Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

XXIV Международная научная конференция

ВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Сборник статей

Часть 1

31 мая – 4 июня 2021 г.

Санкт-Петербург

Санкт-Петербург, Россия

2021

УДК 621.38
ББК 32.85
В67

В67 Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXIV Междунар. науч. конф. (СПб., 31 мая – 4 июня 2021 г.): сб. статей: в 3 ч. Ч. 1. СПб.: ГУАП, 2021. 316 с.
ISBN 978-5-8088-1581-0
ISBN 978-5-8088-1582-7 (Ч. 1)
DOI: 10.31799/978-5-8088-1582-7-2021-1

Материалы XXIV Международной научной конференции отражают современное состояние волновой электроники и ее применение в информационных и телекоммуникационных системах.

Представляют интерес для широкого круга исследователей, преподавателей, аспирантов и специалистов в области акустооптики, акустоэлектроники.

ISBN 978-5-8088-1581-0
ISBN 978-5-8088-1582-7 (Ч. 1)
DOI: 10.31799/978-5-8088-1582-7-2021-1

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021

АКУСТООПТИКА

УДК 534.8; 535.4

В. И. Балакший*
доктор физико-математических наук, профессор
М. И. Купрейчик*
аспирант
С. Н. Манцевич*
кандидат физико-математических наук, доцент
*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Теоретически исследованы особенности анизотропной дифракции света в периодически неоднородном акустическом поле, создаваемом секционированным пьезопреобразователем с противофазным возбуждением соседних секций. Численные расчеты показали, что этот тип акустооптического взаимодействия имеет ряд интересных особенностей, которые могут быть использованы при разработке акустооптических приборов. В частности, рассмотрена возможность создания устройств для управления неполяризованным оптическим излучением.
Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, анизотропная дифракция света, брэгговский фазовый синхронизм, фазированный пьезопреобразователь, акустооптические модуляторы и дефлекторы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 19-12-00072.

V. I. Balakshy*
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
M. I. Kupreychik*
PhD Student
S. N. Mantsevich*
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
*M. V. Lomonosov Moscow State University

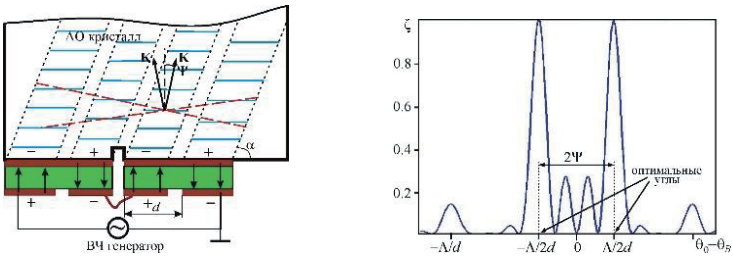
ACOUSTO-OPTIC DEVICES WITH SECTIONED TRANSDUCERS. FEATURES OF OPERATION AND POSSIBLE APPLICATIONS

Peculiarities of anisotropic light diffraction in a periodically inhomogeneous acoustic field created by a phased array transducer with antiphase excitation of adjacent sections are studied theoretically. Numerical calculations have shown that this type of acousto-optic interaction possesses a number of interesting regularities which can be useful at designing acousto-optic instruments. In particular, the possibility of creating devices for controlling non-polarized optical radiation is considered.
Keywords: acousto-optic interaction, anisotropic diffraction of light, Bragg phase matching, Phased array transducer, acousto-optic modulators and deflectors.

Возможности современной акустики позволяют изготавливать весьма разнообразные по структуре возбудители ультразвука – пьезоэлектрические преобразователи, обеспечивающие необходимые параметры акустических по-

лей. Это относится также и к акустооптическим (АО) приборам, характеристики которых в значительной степени определяются особенностями структуры акустических пучков. Помимо простых пластинчатых пьезопреобразователей, в акустооптике сейчас применяются секционированные преобразователи, на секции которых могут подаваться различные электрические сигналы [1], [2].

Первые устройства такого типа появились еще в 60-е годы прошлого столетия. Так, в [3] рассмотрена работа АО ячейки с плоской фазированной решеткой преобразователя в режиме возбуждения секций от общего генератора, но с произвольным сдвигом фаз. А в [4] описана экспериментальная система проекционного телевидения, в которой отклонение лазерного пучка осуществлялось АО дефлектором, выполненным в виде ступенчатой структуры со сдвигом фазы на π. Планарная структура с противофазным возбуждением соседних секций была использована также в работах [5]–[9]. При использовании таких структур характеристики АО взаимодействия меняются кардинально. Это открывает возможности для разработки АО приборов принципиально нового типа.



(а) *(б)*

Рис. 1. Вариант ступенчатой структуры на основе кристалла парателлурита:
а – АО ячейка с фазированным пьезопреобразователем;
б – угловая характеристика 4-секционного преобразователя

На рис. 1а схематически показан один из возможных вариантов такой структуры на основе кристалла парателлурита (TeO_2). Пьезопреобразователь состоит из четырех секций одинаковой толщины, соединенных электрически последовательно, но таким образом, что электрическое поле в соседних секциях (показанное стрелками) направлено в противоположную сторону. Благодаря этому соседние акустические пучки возбуждаются в противофазе, в результате образуется система эквивалентных волновых фронтов (изображенных красными штриховыми линиями), повернутых на угол Ψ относительно плоскости преобразователя. Угол Ψ определяется приближенным соотношением $\Psi = \pm\Lambda/2d = \pm V/2df$, где V – скорость звука; Λ и f – длина волны и частота ультразвука; d – период решетки преобразователя. По сравнению с несекционированным преобразователем здесь угловая характеристика АО ячейки содержит два основных максимума, располагающихся по разную сторону относи-

тельно угла Брэгга θ_B, как показано на рис. 1б. Из рисунка следует, что АО дифракция отсутствует при падении света под углом Брэгга, но наблюдается при углах $\theta_{opt} = \theta_B \pm \Lambda/2d$. Наши расчеты показали, что при оптимальных углах падении света θ_{opt} эффективность дифракции может достигать 100 %, несмотря на заметную фазовую расстройку. Однако это требует несколько большей акустической мощности [10], [11].

Рис. 2 показывает области АО взаимодействия в кристалле парателлурита для случая, когда сдвиговая акустическая волна распространяется в плоскости $(1\bar{1}0)$ под углом $\chi = 4°$ к плоскости (001).

Для этой моды $V = 0.632 \cdot 10^5$ см/с, а угол сноса пучка составляет $\alpha = 35°$. Расчет выполнен для 4-секционного преобразователя в предположении, что на АО ячейку под углом θ_0 падает необыкновенно поляризованная световая волна, а дифрагированный пучок имеет обыкновенную поляризацию (режим анизотропной дифракции света [1], [2]). Учтена также оптическая активность кристалла парателлурита. Эффективность дифракции ζ представлена в цветовой кодировке: от $\zeta = 1$ (темно-красным цветом) до $\zeta = 0$ (темно-синим цветом). Важно подчеркнуть, что в случае несекционированного преобразователя подобные области АО взаимодействия не реализуются, что можно рассматривать как достоинство таких АО ячеек.

Особый интерес представляет вариант, показанный на рис. 2б, который характеризуется низкой угловой и частотной селективностью одновременно. Для оценки этого результата надо учесть, что селективность брэгговской дифракции во многих устройствах является мешающим фактором, ограничивающим быстродействие и разрешение АО приборов [1]. Рис. 2б показывает, что при помощи одной АО ячейки определенного среза можно обрабатывать в широком частотном диапазоне как коллимированные световые пучки, так и пучки, несущие изображение.

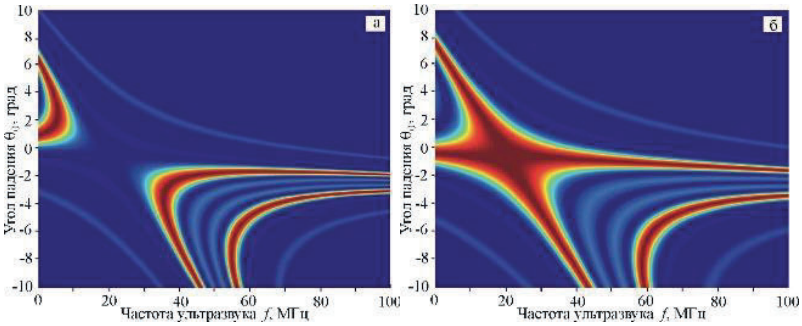
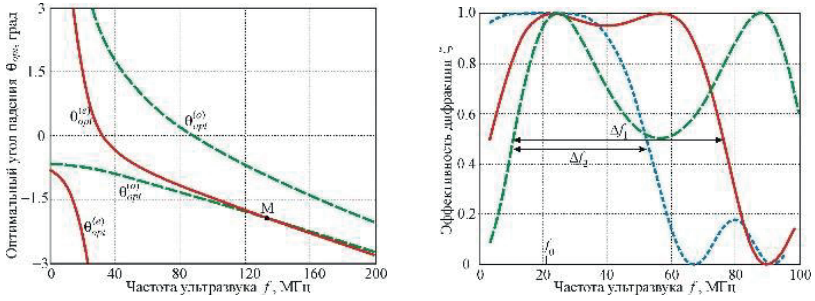


Рис. 2. Области АО взаимодействия при различном периоде структуры преобразователя: d=0,51 мм (а) и d=0,34 мм (б)



(а) *(б)*

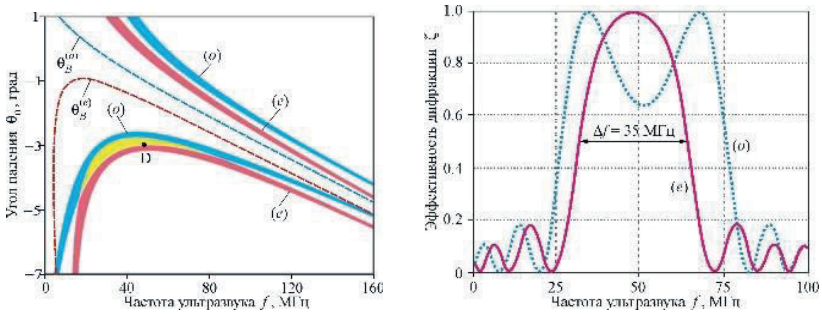
Рис. 3: а – частотные характеристики в слабоселективной области АО взаимодействия; б – частотные характеристики оптимальных углов для о- и е-поляризаций падающего света при d=0,2 мм

Указанную необычную особенность АО взаимодействия в акустическом поле фазированного преобразователя иллюстрирует рис. 3а, на котором представлены частотные характеристики АО взаимодействия при разных углах падения светового пучка: $\theta_0 = -0.5°$ (синяя кривая), $\theta_0 = -1°$ (красная кривая) и $\theta_0 = -1.4°$ (зеленая кривая). Из графиков следует, что частотному диапазону $\Delta f_1 = 65$ МГц соответствует угловой диапазон $\Delta\theta_0 = 0.4°$ (между зеленой и красной кривыми), а диапазону $\Delta f_2 = 42$ МГц – угловой диапазон $\Delta\theta_0 = 0.9°$ (между зеленой и синей кривыми). А на частоте $f_0 = 21$ МГц, показывающей центр слабоселективной области, угловой диапазон взаимодействия составляет $\Delta\theta_0 = 4.2°$, что в 3,1 раза превышает угловой диапазон несекционированного преобразователя.

Сравнение областей АО взаимодействия для вариантов обыкновенной (о) и необыкновенной (е) поляризации падающего света позволяет установить еще одну интересную и практически важную особенность, характерную только для ячеек с фазированным преобразователем. На рис. 3б представлены частотные зависимости оптимальных углов $\theta_{opt}^{(o)}(f)$ и $\theta_{opt}^{(e)}(f)$ для рассеяния света в +1 порядок дифракции. Кривые пересекаются в точке М на частоте $f = 134$ МГц. Это означает, что такая геометрия взаимодействия может быть использована для создания модулятора неполяризованного света. Положение рабочей точки М определяется периодом структуры преобразователя *d*. Поэтому, подбирая *d*, можно менять рабочую точку в широком диапазоне частот.

Эта же идея может быть реализована при создании АО дефлекторов, предназначенных для управления неполяризованными световыми пучками. На рис. 4а штриховыми кривыми $\theta_B^{(o)}$ и $\theta_B^{(e)}$ показана частотная зависимость углов Брэгга для оптических мод с о- и е-поляризацией в случае несекционированного преобразователя, а области АО взаимодействия для парателлуритной ячейки

с фазированным преобразователем изображены синим и красным цветом соответственно для о- и е-поляризаций. Желтым цветом показана область перекрытия. Буквой D отмечено положение рабочей точки дефлектора при $f = 49$ МГц и $\theta_0 = -3°$. Частотные характеристики дефлектора представлены на рис. 4б. Видно, что общая полоса частот для обеих поляризаций составляет $\Delta f = 35$ МГц. Это означает, что такой дефлектор может обеспечить сканирование светового пучка с числом разрешимых положений $N = (w/V)\Delta f = 570$ при оптической апертуре АО ячейки w=1 см.



(а) *(б)*

Рис. 4. АО дефлектор неполяризованного света: а – совмещенные области АО взаимодействия для о- и е-поляризаций падающего света. Желтым цветом показана область перекрытия; б – частотные характеристики АО дефлектора для о- и е-поляризаций

Проведенные исследования показывают, что использование секционированных пьезопреобразователей с противофазным возбуждением соседних секций существенно меняет закономерности АО взаимодействия. Особенно ярко это проявляется в режиме анизотропной дифракции, когда реализуются геометрии взаимодействия, принципиально невозможные в случае несекционированного преобразователя. Это открывает возможности как для улучшения характеристик существующих приборов акустооптики, так и для создания устройств нового типа.

Библиографический список

1. *Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.

2. *Xu J., Stroud R.* Acousto-optic devices. N. Y.: Wiley, 1992.

3. *Gordon E.* A review of acoustooptical deflection and modulation devices // Proc. IEEE. 1966. Vol. 54. N 10. P. 1391–1401.

4. *Korpel A., Adler R., Desmares P.* A television display using acoustic deflection and modulation of coherent light // Proc. IEEE. 1966. Vol. 54. N 10. P. 1429–1437.

5. *Coquin G., Griffin J., Anderson L.* Wide-band acousto-optic deflectors using acoustic beam steering // IEEE Trans. Son. Ultrason. 1970. Vol. SU–17. N 1. P. 34–40.

6. *Pinnow D.* Acousto-optic light deflection: Design considerations for first order beam steering transducers // IEEE Trans. Son. Ultrason. 1971. Vol. SU–18. N 4. P. 209–214.

7. *Kim S., Gao L., Wagner K.* Acousto-optic tunable filter using phased-array transducer with linearized RF to optical frequency mapping // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5953. Art. 59530.

8. *Антонов С. Н., Вайнер А. В., Проклов В. В.* Расширение углового диапазона сканирования акустооптического дефлектора с двухэлементным фазированным пьезопреобразователем // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 9. С. 108–113.

9. *Balakshy V., Kupreychik K., Mantsevich S.* Acousto-optic cells with phased-array transducers and their application in systems of optical information processing // Materials. 2021. Vol. 14. N 2. Art. 451.

10. *Balakshy V., Linde B., Vostrikova A.* Acousto-optic interaction in a non-homogeneous acoustic field excited by a wedge-shaped transducer // Ultrasonics. 2008. Vol. 48. N 5. P. 351–356.

11. *Балакший В. И., Манцевич С. Н.* Акустооптическое взаимодействие в неоднородном акустическом поле // Опт. и спектр. 2015. Т. 118. № 4. С. 646–652.

УДК 534.535

В. Н. Белый*
доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент
П. А. Хило**
доктор физико-математических наук, профессор
Н. С. Казак*
доктор физико-математических наук, академик
Н. А. Хило*
кандидат физико-математических наук, доцент
*Институт физики НАН Беларуси
**Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПУЧКА ГАУССОВА ТИПА В БЕССЕЛЕВ СВЕТОВОЙ ПУЧОК ПРИ ВСТРЕЧНОМ АКУСТООПТИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Исследован процесс акустооптического (АО) взаимодействия пучка гауссова типа и встречного бесселева акустического пучка в акустически поперечно изотропных кристаллах. Рассмотрена АО дифракция на вертикально поляризованной (SV-) акустической волне, что позволяет задействовать в АО-процессе диагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости. Установлено, что за счет указанных диагональных компонент может быть реализована изотропная дифракция светового пучка гауссова типа в бесселев световой пучок с высокой эффективностью взаимодействия.
Предложенная схема АО дифракции представляет интерес для получения бесселевых световых пучков из гауссовых с возможностями динамической перестройки их параметров.
Ключевые слова: бесселевы световые пучки, бесселевы акустические пучки, акустооптическая дифракция, пучок гауссова типа.

V. N. Belyi*
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor, Correspondent Member
P. A. Khilo**
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
N. S. Kazak*
Dr. Sc. Phys.-Math., Academician
N. A. Khilo*
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
*Institute of Physics of the NAS of Belarus
**Sukhoi State Technical University of Gomel

TRANSFORMATION OF GAUSSIAN-LIKE BEAM INTO BESSEL LIGHT BEAM AT ACOUSTO-OPTIC INTERACTION

The process of acousto-optic (AO) interaction of Gaussian-like beam and backward Bessel acoustic beam in acoustically transversely isotropic crystals was investigated.
AO diffraction on vertically-polarized (SV-) acoustic wave was studied that allowed involving diagonal components of permittivity tensor into AO-process. It was established that due to the men-

tioned diagonal components there can be realized isotropic diffraction of Gaussian-like light beam into Bessel light beam with high interaction efficiency.
The proposed scheme of AO diffraction is of interest for obtaining Bessel light beams from Gaussian ones with the possibility of dynamic tuning of their parameters.
Keywords: Bessel light beams, Bessel acoustic beams, acousto-optical diffraction, Gaussian-like beam.

Геометрия акустооптического взаимодействия гауссова и акустического бесселева пучков

На рис. 1 показано взаимное положение волновых векторов световых и акустического полей в рассматриваемой задаче. Эллиптическая кривая относится к необыкновенной плоской волне (индекс е), или же ТН-моде; круговая расположена внутри эллиптической ($n_o < n_e$) и относится к обыкновенной плоской волне (индекс о), или к ТЕ-моде.

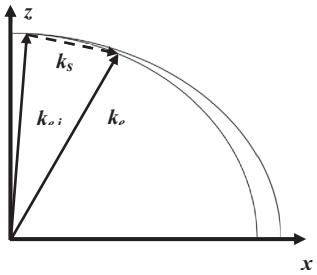


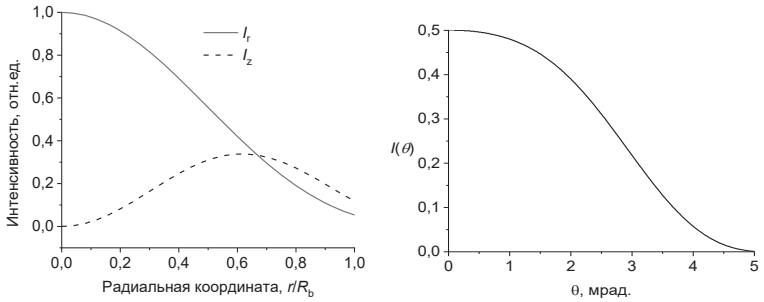
Рис. 1. Сечение поверхности волновых векторов одноосного оптически положительного кристалла главной плоскостью XZ и векторная диаграммы АО дифракции пучка гауссова типа на акустическом бесселевом пучке. Здесь $k_{e,\,in}$ – волновой вектор падающего пучка гауссова типа; $k_{e,\,d}$ – волновой вектор дифрагированного бесселева светового пучка (БСП); k_s – волновой вектор БАП

Далее будет рассматриваться е → е тип дифракции. В этом случае падающий пучок является ТН-поляризованным (или е-пучком). Для его описания использована модель бесселева пучка, близкого к гауссову, которая реализуется при стремлении угла конуса БСП к нулю. Эта модель упрощает описание АО процесса, так как позволяет проводить его в рамках теории векторных бесселевых пучков.

Парциальный волновой вектор $k_{e,in}$ падающего пучка, лежащий в плоскости (x, z) вблизи оптической оси, показан на рис. 1. Волновой вектор $k_{e,d}$ относится к дифрагированному БСП, а вектор k_s – к акустическому бесселеву пучку (БАП). Световые падающий и дифрагированный БП распространяются в положительном направлении оси z, а акустический БП распространяется во встречном направлении.

Угол конуса падающего БСП выбран таким, чтобы в области АО дифракции укладывался примерно один максимум бесселевой функции нулевого порядка (см. рис. 2). В этом случае для длины волны $\lambda = 0.63$ мкм угол конуса БСП равен γ=1.21 мрад. Диаметр такого пучка $2R_b$ равен примерно 250 мкм, а его пространственный спектр вследствие уменьшения диаметра трансформируется из кольцевого в близкий к гауссову (рис. 2б).

Как видим из рис. 2б, полуширина углового спектра пучка с указанными выше параметрами равна примерно 4 мрад.



а *б*

Рис. 2. Распределение интенсивности поперечной I_r и продольной I_z компонент падающего БСП в зависимости от радиальной координаты r в пределах цилиндрической области ($r=R_b$) АО дифракции (а). Угловой спектр I(θ) падающего БСП (б)

Уравнения векторного синхронизма для БП аналогичны известным уравнениям для плоских волн и имеют вид:

$$\vec{k}_e + \vec{k}_s = \vec{k}_{d,e} \tag{1}$$

Из уравнения (1) в зависимости от решаемой задачи можно определить параметры одного из полей по заданным параметрам двух остальных.

Тензор АО дифракции бесселевых светового и акустического пучков

Для SV-поляризованного БАП порядка n в поперечно изотропном кристалле компоненты вектора смещения $\vec{U}$ имеют вид (см. [1]–[4]):

$$\vec{U} = u_0\left[J_n^-(q_s\rho)\vec{e}_\rho + iJ_n^+(q_s\rho)\vec{e}_\varphi + 2ic_z J_n(q_s\rho)\vec{e}_z\right]\exp i\left(k_{sz}z + in\varphi - \Omega t\right), \tag{2}$$

где

$$J_n^{\pm}(q_s\rho) = J_{n-1}(q_s\rho) \pm J_{n+1}(q_s\rho),\ q_s = k_s\sin(\gamma_s),\ c_z = \frac{-(c_{13}+c_{44})\ q_s^{\ 2}}{c_{44}q_s^{\ 2} + c_{33}k_{sz}^{\ 2} - \rho\Omega^2}\cdot\frac{k_{sz}}{q_s}.$$

Здесь q_s и $k_{sz} = \sqrt{k_s^2 - q_s^2}$ – радиальная и продольная компоненты волнового вектора БАП; γ_s – угол конуса; $u_0 = \sqrt{\frac{P}{\rho v^3}}\frac{1}{k_{sz}\sqrt{W_s}}$; P– мощность; c_{ik} – компоненты тензора упругой жесткости; ρ – плотность кристалла; $v = 2\pi f/k_s$ –

фазовая скорость; $\Omega = 2\pi f$; f – акустическая частота, $W_s = 2\pi \int_0^{R_b} \left(J_n^{-2}(q_s\rho) + J_n^{+2}(q_s\rho) + 2c_z^2 J_n^2(q_s\rho) \right) \rho d\rho$; R_b – радиус БП.

Для кристалла ZnO, который будет использоваться в качестве примера [5], c_{44}=4.25·10^{10} Па, c_{11}=20.97·10^{10} Па, c_{33}=21.09·10^{10} Па, c_{13} =10.51·10^{10} Па, ρ=5.67·10^{3}кг/м^3.

Изменение тензора диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon$, индуцированное акустическим полем, для кристаллов гексагональных классов имеет ненулевые компоненты:

$$\begin{aligned} &\Delta\varepsilon_{\phi,z} = \frac{1}{4}\varepsilon_o\varepsilon_e p_{44} u_0 J_n^+(q_s\rho);\ \Delta\varepsilon_{\rho,z} = -\frac{i}{4}\varepsilon_o\varepsilon_e p_{44} u_0 J_n^-(q_s\rho) \\ &\Delta\varepsilon_{\rho,\rho} = \frac{c_z}{2}\varepsilon_o\varepsilon_e p_{13} u_0 J^n(q_s\rho);\ \Delta\varepsilon_{z,z} = \frac{c_z}{2}\varepsilon_o\varepsilon_e p_{33} u_0 J^n(q_s\rho) \end{aligned}, \qquad (3)$$

где $\Delta\varepsilon^0 = \varepsilon_o\varepsilon_e u_0 / 4$.

Из (2) следует, что если падающий БСП имеет порядок m, то он будет рассеиваться в БСП порядка m+n или m-n в зависимости от знака дислокаций. Далее будут рассматриваться дислокации одного знака.

Важная особенность тензора АО дифракции (3) – наличие в нем диагональных и оптимального согласования или т. н. пространственного синхронизма [1], [2] падающего и дифрагированного БСП.

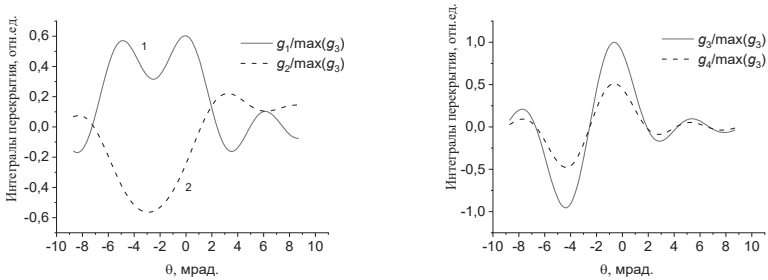
Эффективность дифракции пучка гауссова типа в бесселев световой пучок

Укороченные уравнения для АО дифракции с участием БП имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{dA_{m+n}^e}{dz} &= i\chi_{m+n,m}^{ee} A_m^e \exp\left(-i\Delta k_z z\right) \\ \frac{dA_m^e}{dz} &= i\chi_{m,m+n}^{ee} A_{m+n}^e \exp\left(i\Delta k_z z\right) \end{aligned} \qquad (4)$$

Здесь A_m^e и A_{m+n}^e – амплитуды проходящего и дифрагированного БСП; Δk_z – волновая расстройка. Параметры акустооптической связи $\chi_{m,n}^{ee}$, в отличие от случая плоских волн, достаточно сложные, поскольку содержат интегралы перекрытия различных по пространственной структуре компонент бесселевых светового и акустического пучков. Эти интегралы представлены на рис. 3 как функции угла отклонения конуса волновых векторов дифрагированного пучка от направления пространственного синхронизма. Указанное направление выбрано под углом 1 град. к оптической оси (рис. 1). Для достижения пространственного синхронизма в данном направлении требуется частота звука равная 140 МГц.

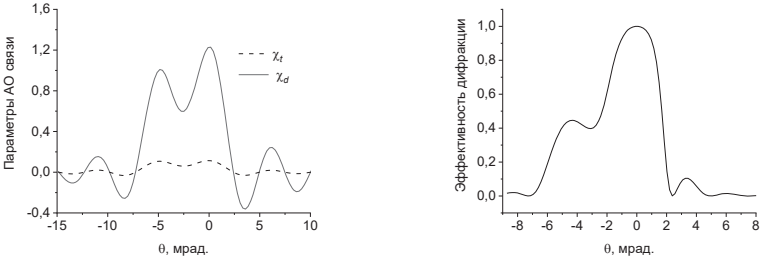
Интеграл $g_1(\theta)$ на рис. 3 описывает перекрытие радиальных компонент БСП и z-компоненты БАП; интеграл $g_2(\theta)$ – перекрытие азимутальных компонент БСП и z-компоненты БАП; интеграл $g_3(\theta)$ – перекрытие z-компоненты падающего БСП с радиальными и азимутальными компонентам дифрагированного БСП и БАП; интеграл $g_4(\theta)$ – перекрытие z-компонент световых пучков и z-компоненты БАП.



а *б*

Рис. 3. Угловая зависимость интегралов перекрытия g_1, g_2 (а) и g_3, g_4 (б), обусловленных взаимодействием различных компонент бесселевых светового и акустического пучков

Из графиков рис. 3 видно, что в рассматриваемой геометрии дифракции преобладающим является интеграл перекрытия g_3.



а *б*

Рис. 4. Угловая зависимость параметров АО связи χ_d и χ_t, описывающих прямую (индекс d) и обратную (индекс t) перекачку энергии при АО взаимодействии. Резонансная кривая для эффективности АО дифракции (б)

На рис. 4 показана угловая зависимость параметров АО связи $\chi_d = \chi^{ee}_{m+n,m}$ и $\chi_t = \chi^{ee}_{m,m+n}$. Видно, что они достигают максимума в условиях поперечного синхронизма. Отметим также наличие второго максимума на рис. 4а и 4б, расположенного левее основного. Его появление связано с отрицательным по знаку экстремумом интегралов перекрытия на рис. 3а и 3б.

Далее была рассчитана резонансная кривая, описывающая зависимость эффективности дифракции от угла отклонения от направления полного синхронизма. Полный синхронизм здесь означает, что в направлении максимума интеграла перекрытия реализуется также и согласование фазовых скоростей, то есть волновая расстройка Δk_z равна нулю.

Для расчета резонансной кривой использовалась формула для эффективности дифракции в одну поперечную моду, следующая из укороченных уравнений (4)

$$\eta(\theta) = \frac{W_d(\theta)/W_{in}(\theta)\chi_d(\theta)^2}{[\Delta k_z(\theta)/2]^2 + \chi_d(\theta)\chi_t(\theta)} \sin^2\left(L\sqrt{[\Delta k_z(\theta)/2]^2 + \chi_d(\theta)\chi_t(\theta)}\right). \quad (5)$$

Здесь длина взаимодействия L рассчитывалась из уравнения $\sin\left(L\sqrt{\chi_d(0)\chi_t(0)}\right) = 1$, то есть из условия максимума интенсивности дифрагированного поля в направлении полного синхронизма. При акустической мощности 1Вт длина L оказалась равной 4 мм. В итоге резонансная кривая эффективности имеет вид, показанный на рис. 4б. Видно, что кривая несимметрична относительно направления синхронизма и имеет два характерных максимума. Ее угловая полуширина в направлении положительных углов θ равна примерно 2 мрад., а в направлении отрицательных – 6 мрад. Учитывая, что резонансный угол равен 1 град., то есть 17,4 мрад. получаем, что отношение полуширины углового спектра дифрагированного многомодового бесселева поля к центральному углу конуса равно 0,46.

Резонансная кривая 4б имеет несколько иную интерпретацию в случае, когда АО процесс происходит в достаточно узкой цилиндрической области, ограничивающий пучки. В этом случае дифракция происходит в несколько дискретных мод в пределах угловой ширины резонансной кривой. Для расчета количества мод N можно использовать формулу $\Delta\theta \approx \lambda / R_b$, описывающую угловое расстояние бесселевых мод в цилиндрической области радиусом R_b. При R_b=125 мкм получим N ~3. При этом ближайшая к центральной мода имеет относительную эффективность генерации ~0,45. Это означает, что в принципе возможно преобразование исходного пучка гауссова типа в близкий к одномодовому БСП. Для подтверждения такой возможности необходим провести аналогичный расчет для многомодового волокна из изотропного материала. Отметим в связи с этим, что оптическая схема на основе волокна позволяет нетривиально решать вопрос о методе возбуждения акустической волны. Это связано с тем, что в предлагаемой схеме угол конуса БАП очень большой (89,47 град. в приведенном расчете) и поэтому оптимальной является геометрия возбуждения БАП через боковую поверхность световода с помощью цилиндрического пьезопреобразователя.

Таким образом, в работе предложен и описан режим АО дифракции светового пучка гауссова типа на SV-поляризованной акустической волне с генерацией бесселева светового пучка. Такой тип АО дифракции реализует новый

метод получения бесселевых пучков, отличающийся возможностями динамического управления параметрами генерируемого БСП.

Представляет интерес распространение метода на случай АО дифракции в изотропных световодах. Световодный режим дифракции представляет практический интерес в связи с возможностями динамического управления модовым составом поля, а также переноса винтовых дислокаций из акустического бесселева пучка на световой.

Библиографический список

1. Features of the acousto-optic interaction of Bessel light beams and Bessel acoustic beams in transversely isotropic crystal / V. Belyi, P. Khilo, N. Kazak, N. Khilo // Journal of Optical Technology. 2017. Vol. 84. P. 130–136.

2. Low-frequency backward acousto-opnical scattering of Bessel light beams / V. Belyi, P. Khilo, N. Kazak, N. Khilo // Opt. comm. 2018. Vol. 415. P. 6–12.

3. *Salo J., Salomaa M.* Nondiffracting waves in anisotropic media // Phys. Rev. E. 1999. Vol. 67. P. 056609.

4. *Hanorvar F., Sinclair N.* Acoustic wave scattering from transversely isotropic cylinders // J. Acoust. Soc. Amer. 2003. Vol. 100. P. 57–63.

5. *Auld B.* Acoustic Fields and Waves in Solids. Vol. 1. John Wiley & Sons, Inc., 1973. 430 p.

УДК 535.8

А. Р. Бестугин*
доктор технических наук, профессор
Е. В. Тепликов*
аспирант
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РЕГИСТРАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Разработан метод обнаружения локальных изменений температуры воздуха в системах пожарной безопасности с помощью регистрации изменения состояния поляризации лазерного излучения. Представлен принцип простроения системы контроля с использованием координатной схемы расположения чувствительных элементов, приведены расчеты минимальной чувствительности фотоприемного устройства чувствительного элемента.
Ключевые слова: пожарная безопасность, лазер, поляризация, оптическое излучение, пожаный извещатель, чувствительный элемент пожарного извещателя.

A. R. Bestugin*
Dr. Sc. Tech., Professor
E. V. Teplikov*
PhD Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

REGISTRATION OF LOCAL CHANGES IN AIR TEMPERATURE USING LASER RADIATION IN FIRE SAFETY SYSTEMS

A method has been developed for detecting local changes in air temperature in fire safety systems by registering changes in the state of polarization of laser radiation. The principle of construction of the control system using the coordinate diagram of the location of the sensitive elements is presented, the calculations of the minimum sensitivity of the photodetector of the sensitive element are presented.
Keywords: firesafe, laser, polarisation, fire detector, fire alarm.

Введение

Обычно пожар сопровождается опасными факторами возгорания: пламя и искры; тепловой поток; повышенные температура окружающей среды, концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения; пониженная концентрация кислорода; снижение видимости в дыму [1].

Для регистрации каждого фактора существует отдельный вид пожарных извещателей. *Извещатель* – устройство, формирующее определенный сигнал об изменении контролируемого параметра окружающей среды. Извещатели можно условно разделить на датчики и детекторы. *Датчики* – это извещатели, преобразующие физические величины и характеристики (например, тепло, свет, звук

и т. д.) в электрический сигнал. *Детекторы* – это извещатели, включающие в свой состав датчики, схему обработки сигнала и схему принятия решения [2].
При любом возгорании локальное повышение температуры воздуха провоцирует появление конвективного восходящего теплового потока, поднимающегося над очагом пожара, турбулентности воздушных масс. В большинстве случаев сопровождается непрозрачными продуктами горения – дымом. На принципе обнаружения таких продуктов горения работают дымовые пожарные извещатели (линейные, точечные, аспирационные и т. п.). Однако в случаях бездымных возгораний (воспламенение газа, эфирных жидкостей) необходимо использовать другие методы детектирования.

Методы и модели

Методика регистрации локальных изменений температуры воздуха заключается в использовании массива чувствительных элементов для обнаружения неоднородности воздушных масс в контролируемом пространстве с помощью определения изменения состояния поляризации, ослабления и рассеяния оптического излучения.
Принцип действия чувствительного элемента для обнаружения бездымных возгораний с помощью лазерного излучения, прошедшего через конвективный поток, основывается на регистрации изменении поляризации света при акустооптическом взаимодействии и впервые был описан в работе [3]. Общая схема чувствительного элемента приведена на рис. 1.

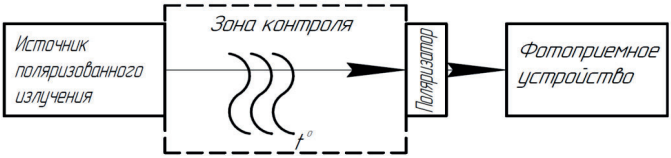


Рис. 1. Общая схема чувствительного элемента

Формирователь зондирующего сигнала формирует оптический импульс определенной мощности и длительности, а также определенного состояния поляризации (в нашем случае – вертикальной поляризации) оптического излучения, который затем пропускается через чувствительный элемент и, соответственно, через зону контроля.

Когда в зоне контроля происходит возгорание, воздушные массы локально нагреваются и образуются тепловые конвективные потоки и границы раздела сред горячего и относительно холодного воздуха, о которых говорилось ранее. Оптическое зондирующее излучение вертикальной поляризации проходит по воздуху над наблюдаемым пространством, через многократные границы раздела сред (из-за хаотичности границ конвективных потоков). По мере прохождения через области соприкосновения воздушных масс с разными показате-

лями преломления состояние поляризации оптического излучения изменяется в случайном направлении.

При отсутствии возгорания на фотоприемнике мы получаем постоянную мощность принятого сигнала. В противном же случае уровень принимаемого сигнала будет отклоняться от контрольного уровня (за счет отклонения вектора поляризации излучения).

Для расчета ослабления оптического сигнала при его распространении в свободном пространстве можно руководствоваться выражениями для линий атмосферных оптических линий связи (АОЛС/FSO) [4]. Ключевым параметром при разработке линий FSO является расчет бюджета линии. Запас на линии M_{link} (дБ), который представляет собой доступную мощность, превышающую чувствительность приемника, можно рассчитать из уравнения: $Mlink = Pe - Sr - Ageo - A\text{scintillation} - Asystem$, где P_e (дБм) – общая мощность излучателя; S_r (дБм) – чувствительность приемника, которая также зависит от ширины полосы (скорости передачи данных); A_{geo} (дБ) – геометрическое ослабление линии из-за рассеивания передаваемого луча с увеличением расстояния; A_{atmo} (дБ) – ослабление в атмосфере из-за поглощения и рассеяния; $A_{scintillation}$ (дБ) – ослабление из-за турбулентности атмосферы; A_{system} (дБ) – представляет все остальные потери в системе, включая ошибки в установке направления луча, оптические потери приемника, потери из-за отклонения луча, уменьшение чувствительности из-за окружающей освещенности (солнечного излучения) и т. п.

Ослабление из-за рассеивания передаваемого луча с увеличением расстояния (геометрическое ослабление) вычисляется по следующей формуле:

$$Ageo(\text{дБ}) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{Sd}{Scapture}\right),$$

где $S_{capture}$ – поверхность захвата приемника (м^2); S_d – площадь поверхности луча передачи на расстоянии d, которая аппроксимируется формулой:

$$Sd = \frac{\pi}{4} \cdot (d \cdot \theta)^2,$$

где θ – угол расхождения луча (мрад); d – расстояние между излучателем и приемником (км).

На коротких линиях площадь захвата может быть больше площади луча. В этих случаях значение должно быть равным нулю, поскольку в приемнике собирается вся энергия луча.

Специфическое ослабление в атмосфере γ_{atmo} (дБ/км) можно записать в виде суммы двух слагаемых:

$$\gamma atmo = \gamma clean_air + \gamma excess,$$

где γ_{clean_air} – специфическое ослабление в условиях чистого воздуха (из-за наличия молекул газов); γ_{excess} – специфическое ослабление из-за возможного наличия дыма, тумана, водяных брызг, дымки, измороси, дождя, снега, града и т. п.

Ослабление в условиях чистого воздуха представляет собой, главным образом, поглощение в молекулах газов. Поскольку размер молекул газов намного меньше длины волны, то ослабление из-за рассеяния на молекулах газов незначительно.

Длину волны лазера необходимо подобрать так, чтобы она попадала в атмосферные окна передачи, таким образом, величина γ_{clean_air} будет незначительной. Но в то же время, в отличие от систем АОЛС, чем короче длина волны излучения в чувствительном элементе, тем более явно влияние факторов пожара на оптический зондирующий сигнал.

Предполагается, что чувствительные элементы размещаются в закрытых пространствах, где в состоянии покоя (при отсутствии возгорания) воздушные массы обладают одинаковой температурой и нулевой разницей в давлении. Возможное мерцание оптического сигнала в системе, находящейся в покое, в этом случае можно исключить.

По причине передачи зондирующего оптического сигнала в однородной спокойной среде (а не импульсного потока информационных сигналов) также можно пренебречь значением запаса мощности сигнала над чувствительностью передатчика.

Учитывая все вышесказанное, необходимую минимальную чувствительность фотоприемника в условиях штатной ситуации можно условно считать по формуле:

$$Sr = Pe - Ageo - Asystem,$$

где P_e (дБм) – общая мощность излучателя; S_r (дБм) – чувствительность приемника.

В качестве передатчика предлагается к использованию серия одномодовых малогабаритных лазерных излучателей *S*-12 с длиной волны 532 нм, мощностью излучения до 5 мВт, расходимостью пучка 0,5 мрад., выходным диаметром пучка излучения 5 мм;

Конструктивно предлагается использовать фотоприемники серии BP 104 SR, где площадь чувствительного элемента фотоприемника равна 4,84 мм^2.
Таким образом, получаем необходимую для регистрации оптического сигнала, прошедшего через зону контроля, чувствительность фотоприемника:

$$Sr = 5 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot \lg_{10}\left(\frac{\frac{\pi}{4} \cdot (0.005 \cdot 0.5)^2}{0.022^2}\right) = -56 \cdot 10^{-3} \text{ дБм.}$$

Для регистрации локальных изменений температуры с использованием описанных чувствительных элементов необходимо разработать систему определения зоны нагрева. Идея матричной схемы расположения чувствительных элементов была предложена в [5]. Дальнейшая разработка показала, что согласно данной схеме расположения фотодетектор должен включать в себя фоточувствительный элемент и устройство квантования по уровню амплитуды электрического

сигнала – компаратор или аналого-цифровой преобразователь. Последний имеет бóльшую стоимость, однако предпочтительнее для установки в систему – преобразование мощности оптического сигнала в цифровой электрический код предоставит возможность программной настройки системы: пороги срабатывания, более точное отслеживание изменений интенсивности и, следовательно, бóльшая чувствительность. Функциональная схема системы контроля локальных изменений температур в помещении приведена на рис. 2.

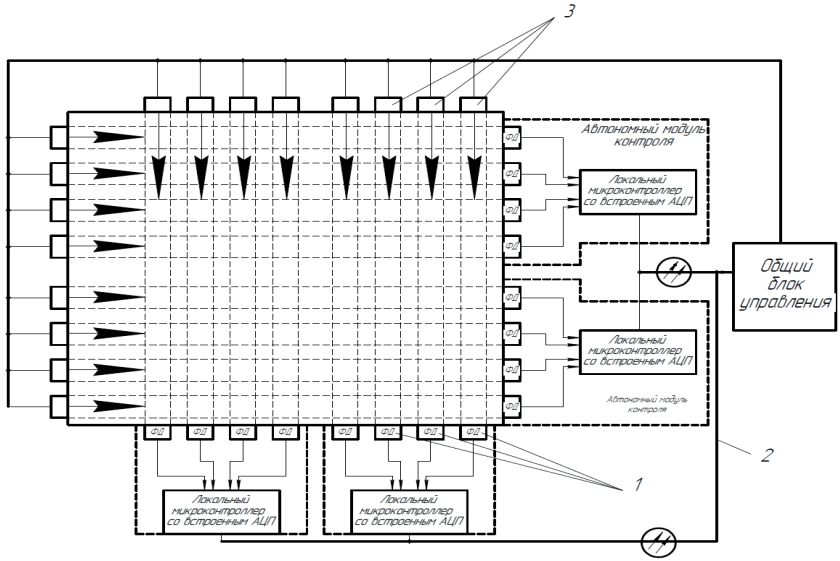


Рис. 2. Функциональная схема системы контроля локальных изменений температур в помещении

Предлагается использовать малогабаритные микроконтроллеры со встроенными АЦП для небольших подгрупп датчиков. В таком случае оптические сигналы от излучателей (3) попадают на группу фотодетекторов (1), подключенную к одному локальному микроконтроллеру с АЦП, образующие автономное устройство, подключенное по оптическому каналу связи (2) к общему блоку управления. На всю зону контроля может быть несколько таких автономных модулей.

При нормальной работе в отсутствии возгорания (а также препятствия в зоне контроля или неисправности) локальные контроллеры сообщают блоку управления статус системы с определенной частотой. При возникновении на линии контроля сигнала с характеристиками отличными от нормальных контроллер сообщает блоку управления о нештатной ситуации, после чего система выявляет характер аномалии (неисправность, препятствие, падение интенсивности оптического сигнала), выполняет более детальный поиск похожих несо-

ответствий на других смежных линиях контроля и формирует соответствующий сигнал извещения.

Представленный подход к определению характера события обеспечит минимальную вероятность ложного срабатывания системы, предоставит возможность определения типа возгорания (быстрое или вялотекущее) и повысит точность определения локальных изменений температуры воздуха.

Заключение

Впервые устройства с данными чувствительными элементами опубликованы в [3], [5], затем был разработан лабораторный макет. В настоящее время активно проводится исследование и разработка методики регистрации локальных изменений температуры воздуха в системах пожарной безопасности с помощью изменения состояния поляризации оптического излучения, проходящего через зону контроля, с целью использования в уже существующих устройствах обнаружения и оповещения, а также как самостоятельных устройств.

Библиографический список

1. ФЗ от 22.07.2008 № 123-ФЗ. Глава 3. Показатели и классификация пожаровзрывоопасности и пожарной опасности веществ и материалов. Ст. 3.

2. *Нилов В. А., Членов А. П.* Технические средства охранно-пожарных систем. М.: Тахир. 1998.

3. *Semenov A., Teplikov E.* Firesafe polarizing sensitive element of fire detector // XVII International Conference For Young Researchers “Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems”, 2014. P. 23.

4. Рекомендация МСЭ-R P.1814. Методы прогнозирования, требуемые для разработки наземных оптических линий для связи в свободном пространстве, 2007. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1814-0-200708-I!!MSW-R.doc (дата обращения: 20.03.2021).

5. *Teplikov E., Bestugin A.* Development of methods for register local changes in air temperature in fire safety systems. XIX международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы», 2018.

УДК 534.8

С. В. Боритко*
доктор физико-математических наук, профессор
*ФГБУН Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

ВОЗМОЖНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ В СЛОЖНЫХ ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

На примере разработанного в НТЦ уникального приборостроения РАН акустооптического спектрометра комбинационного рассеяния показана возможность достоверной неразрушающей диагностики драгоценных камней в сложных ювелирных изделиях, а также исследования спектральных особенностей натуральных и синтетических кристаллов.
Ключевые слова: драгоценные камни, сложные ювелирные изделия, спектроскопия комбинационного рассеяния, акустооптический спектрометр.

S. V. Boritko*
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
*Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS

THE ABILITY TO DIAGNOSE PRECIOUS STONES IN COMPLEX JEWELRY

The possibilities of reliable non-destructive gemstone diagnostics in complex jewelry and studying the spectral features of natural and synthetic crystals are shown using the acousto-optical Raman scattering spectrometer developed at the Scientific and Technical Center for Unique Instrumentation of the Russian Academy of Science.
Keywords: gemstones, complex jewelry, Raman spectroscopy, acousto-optical spectrometer.

Постановка задачи

Человек всегда интересовался драгоценными камнями. Вначале его привлекали только красота камня, блеск и окраска. Позже стали использовать физические свойства, такие как твердость и способность раскалываться на тонкие острые пластинки. В более поздние времена камни стали ценить за редкость и долговечность. В результате были сформулированы три основные положения, позволяющие считать природные минералы драгоценными: красота, износостойкость и уникальность. Следует отметить, что в ювелирной практике издавна использовали всевозможные имитации. В конце XIX века был открыт синтез драгоценных камней группы корунда. С 1902 года французский химик М. А. Вернель начал поставлять на рынок синтетические рубины, а чуть позже – сапфиры и шпинель. Таким образом, задача достоверной диагностики драгоценного камня (особенно в сложном ювелирном изделии) стоит довольно остро и ее значимость будет только возрастать.

Используемая методика

Многие физические методы, используемые для исследования твердых тел, базируются на измерении расстояния между энергетическими уровнями

того или иного рода [1]–[3]. Так как любое твердое тело состоит из атомов, жестко связанных между собой, то для такой системы характерны коллективные колебания с определенными частотами. Следовательно, если облучать объект с помощью источника света, имеющим одну спектральную линию, то в спектре рассеянного света помимо релевской линии будут существовать линии, имеющие смещенные частоты – линии комбинационного рассеяния [4]. Причем их число, спектральное положение, ширина и интенсивность связаны с составом и структурой рассеивающего объекта. Впервые на возможность использования комбинационного рассеяния для диагностики минералов указал К. Нассау [5].

Аппаратурное оформление

Для использования в задачах диагностики спектрометр должен иметь высокие чувствительность, спектральное разрешение и спектральный контраст. Этим требованиям удовлетворяет спектрометр на основе акустооптических фильтров [6]. Такой спектрометр (рис. 1) состоит из излучающей части – в нашем случае лазера (λ=532 нм) и приемной части, включающей оптический блок, совмещенный с блоком управления (фото на рис. 1), а также волоконно-оптического зонда, необходимого для освещения исследуемого объекта и приема рассеянного излучения. Спектрометр управляется компьютером, на котором установлена специальная программа.

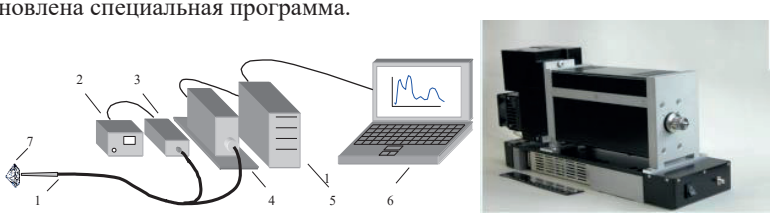


Рис. 1. Составные части установки: 1 – волоконно-оптический зонд; 2 – блок питания лазера; 3 – лазерная головка; 4 – оптический блок; 5 – блок управления; 6 – управляющий компьютер; 7 – диагностируемый образец

Экспериментальные исследования

Когда речь заходит о драгоценных ювелирных камнях, в первую очередь говорят о бриллиантах, то есть ограненных алмазах. Кристаллы алмаза имеют кубическую решетку, в которой атомы углерода связаны между собой сильными ковалентными связями. Такие кристаллы обладают максимальной твердостью (10 по шкале Мосса) и для них характерно одно групповое колебание. Следовательно, в спектре комбинационного рассеяния существует только один ярко выраженный пик, уширенный в меру теплового колебания решетки, что и демонстрирует рис. 2.

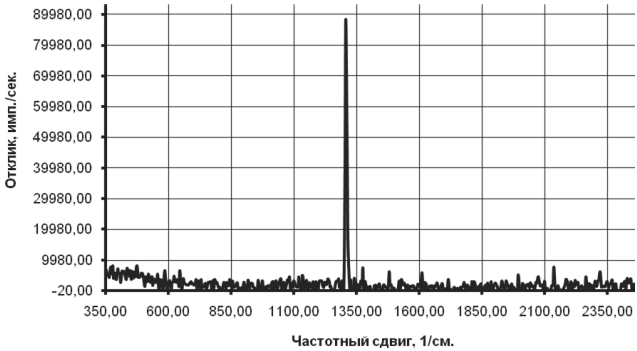
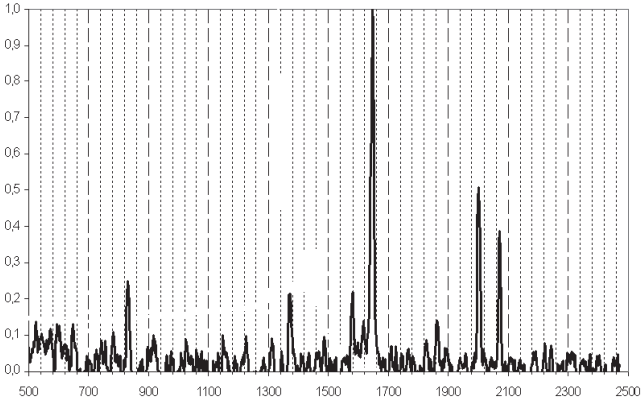


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния натурального алмаза ювелирного качества (виден характерный пик на частоте 1332 см$^{-1}$)

Наиболее близким имитатором алмаза является фианит, который был синтезирован в Физическом институте Академии наук СССР. По химическому составу фианит представляет собой окись циркония и гафния в сочетании с добавками редкоземельных элементов – эрбия, кобальта, ванадия, хрома и железа, что приводит к образованию нескольких частот групповых колебаний. Следовательно, спектр комбинационного рассеяния фианита значительно богаче, чем у алмаза (рис. 3).



Частотный сдвиг, 1/см

Рис. 3. Нормированный спектр комбинационного рассеяния фианита

Другим используемым с давних пор имитатором алмаза является горный хрусталь. По факту это чистый кварц (SiO_2), бесцветный и прозрачный кристалл, встречающийся в речных отложениях в виде отполированной гальки. На

рис. 4 показан спектр комбинационного рассеяния кристалла кварца. Виден четко выраженный одиночный характеристический пик (что характерно для алмаза), но его частота составляет 466 см$^{-1}$ и, следовательно, диагностика камня в ювелирном изделии и в этом случае однозначна.

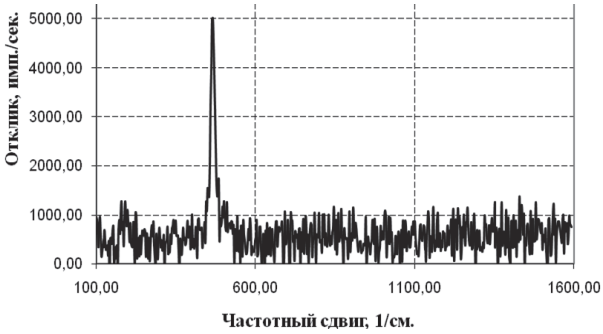


Рис. 4. Спектр комбинационного рассеяния кристалла горного хрусталя

Самым молодым драгоценным минералом является александрит. Этот загадочный камень был найден на реке Токовой около Екатеринбурга и 17 апреля 1834 года подарен Александру II, в честь которого и получил название. Камень сразу стал царским, ввиду дороговизны и редкости. Александрит – это наиболее дорогая разновидность хризоберилла ($A_{l2}BeO_4$), основная примесь, отвечающая за окраску кристалла, – хром. Уникальное свойство александрита – способность при небольшом изменении температуры вблизи комнатной изменять цвет от сине-зеленого до красно-фиолетового, что обусловлено особым положением ионов хрома в составе кристаллической решетки (на рис. 5 виден двойной пик комбинационного рассеяния).

Заключение

Следует отметить, что в ходе выполнения работ был исследован целый ряд как натуральных (корунд, шпинель, турмалин, топаз, берилл, горный хрусталь), так и искусственных (ИАГ, фабулит, ниобат лития и т. д.) имитаторов бриллиантов, любезно предоставленных хранилищем государственного Геологического музея им. В. И. Вернадского (Москва). Анализ приведенных выше результатов однозначно подтверждает жизнеспособность рассмотренной методики неразрушающей диагностики драгоценных камней-минералов в сложных ювелирных изделиях и надежность работы ее конкретного приборного оформления на основе акустооптического спектрометра комбинационного рассеяния. Автор выражает благодарность сотрудникам Коллегии экспертов и оценщиков ювелирных изделий и антиквариата и Подкомитета Торгово-промышленной палаты РФ по оценке произведений искусства и ювелирных изделий за постоянный интерес и помощь в работе.

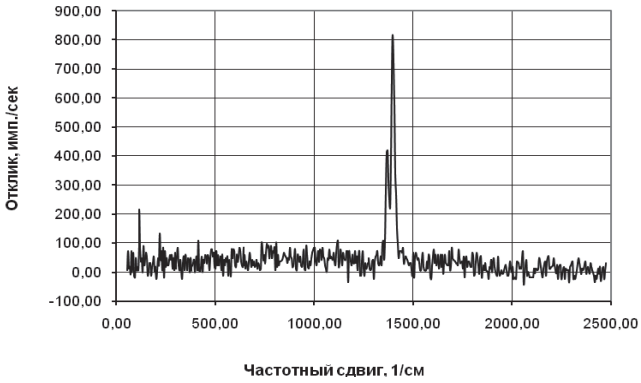


Рис. 5. Спектр комбинационного рассеяния александрита

Библиографический список

1. *Хинкли Е. Д., Нилл К. В., Блум Ф. А.* Инфракрасная спектроскопия с использованием перестраиваемых лазеров // Лазерная спектроскопия атомов и молекул / Под ред. Г. Вальтера. М.: Мир, 1979. С. 155–235.

2. *Курицин Ю. А.* Инфракрасная спектроскопия с инжекционными лазерами // Лазерная аналитическая спектроскопия / Под ред. В. С. Летохова. М.: Наука, 1986. С. 120–173.

3. *Купцов А. Х., Жижин Г. Н.* Фурье-спектры комбинационного рассеяния и инфракрасного поглощения полимеров // Справочник. М.: Физматлит, 2001. С. 6–16.

4. *Raman C., Khrishnan K.* The production of new radiations by light scattering // Proc. Roy. Soc. (London). 1929. Vol. 122. P. 23–35.

5. *Nassau K.* Raman spectroscopy as gemstone test // J. Gemmol. 1982. Vol. XVII. N 5. P. 306–320.

6. *Мазур М. М., Шорин В. Н.* Акустооптический рамановский спектрометр. М.: Акустооптические, акустические и рентгено-спектральные методы и средства измерений в науке и технике. 2005. № 48 (140). С. 15–26.

УДК 629.735.33

Е. И. Костылева*
магистрант
С. Н. Манцевич*
кандидат физико-математических наук, доцент
*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ УПРУГИХ МОДУЛЕЙ ПАРАТЕЛЛУРИТА АКУСТООПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Условие фазового синхронизма акустооптической дифракции определяется параметрами взаимодействующих волновых пучков и среды взаимодействия. При этом свойства среды взаимодействия, в первую очередь скорость акустической волны, зависят от ее температуры. Изменение скорости ультразвуковой волны определяется температурными зависимостями величин упругих модулей среды, однако даже для такого широко используемого акустооптического (АО) материала, как парателлурит, величины температурных коэффициентов упругих модулей, приведенные в различных литературных источниках, существенно различаются, а наблюдаемые величины сдвига условия АО синхронизма не совпадают с рассчитанными по литературным данным. С целью устранения наблюдаемого расхождения в работе проведен анализ температурных зависимостей упругих модулей c_{11}, c_{12} и c_{44} кристалла парателлурита АО методом.
Ключевые слова: акустооптический эффект, температура, парателлурит, упругие модули.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-12-00072.
Костылева Е. И. является стипендиатом фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

E. I. Kostyleva*
Postgraduate Student
S. N. Mantsevich*
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
*M. V. Lomonosov Moscow State University

DETERMINATION OF THE PARATELLURITE ELASTIC CONSTANTS TEMPERATURE DEPENDENCES BY THE ACOUSTO-OPTIC

Acousto-optic (AO) phase matching condition is determined by the characteristics of interacting optical beams and the parameters of the interaction medium. Wherein properties of the interaction medium, mainly the acoustic wave propagation velocity, are temperature dependent. The change of ultrasonic wave velocity relies on the temperature dependence of the elastic constants of the medium. However, even for the most popular AO material – tellurium dioxide – values of the temperature coefficients of the elastic constants mentioned in various articles are significantly different. The experimentally observed values of the AO phase matching frequency variation with temperature do not correspond with those calculated from literature data. In order to eliminate the observed discrepancy, we analyzed the temperature dependences of the paratellurite's elastic constants using the AO method.
Keywords: acousto-optic effect, temperature, paratellurite single crystal, elastic constants.

Введение

Акустооптические (АО) устройства, созданные на основе кристалла парателлурита, широко используются в современной оптической электронике. Одним из важных применений АО устройств является спектральная фильтрация света [1], [2]. При этом температурный диапазон функционирования АО фильтров достаточно широк, а потребляемая мощность сильно зависит от длины волны оптического излучения. Парателлурит известен экстремально большой анизотропией акустических и акустооптических (АО) свойств [3]–[5]. Акустическая анизотропия наиболее ярко проявляется в зависимости скорости распространения медленной акустической моды от направления в кристаллографических плоскостях XY и $\left(1\bar{1}0\right)$.

Скорости акустических волн для произвольного направления в кристалле можно вычислить, используя уравнение Кристоффеля:

$$|\Gamma_{jk} - \rho V^2 \delta_{jk}| = 0, \tag{1}$$

где $\Gamma_{jk} = c_{ijkl} n_i n_l$ – тензор второго ранга; c_{ij} – упругие модули; ρ – плотность; V – фазовая скорость акустической волны; δ_{jk} – символ Кронекера.

Для расчета требуется знать величины упругих модулей, которые измерялись различными авторами в разные годы [6]–[10]. Отметим, что уже в первых работах, посвященных исследованию свойств парателлурита [6], [7], было отмечено, что величины упругих модулей зависят от температуры кристалла. Следовательно, и скорости ультразвуковых волн являются функциями температуры $V(T)$, а величина их изменения зависит от выбранного направления в кристалле.

Взаимосвязь частоты ультразвуковой волны и длины волны дифрагирующего на ней светового излучения определяется условием брэгговского синхронизма:

$$f = \frac{V(T)}{\lambda}\left\{\sqrt{n_d^2 - n_i^2 \cos^2\Theta_B} + n_i \sin\Theta_B\right\}, \tag{2}$$

где f – частота ультразвуковой волны; $V(T)$ – скорость ее распространения; λ – длина световой волны; n_i и n_d – показатели преломления падающей и дифрагированной световых волн; Θ_B – угол Брэгга. Среди величин, определяющих значение частоты фазового синхронизма f, зависящими от температуры являются не только скорость ультразвука, но и величины показателей преломления, однако их зависимость от температуры мала, поэтому ей можно пренебречь.

Наиболее важной для практической реализации АО устройств на основе кристалла парателлурита является плоскость $\left(1\bar{1}0\right)$, в которой наблюдаются большие значения АО качества, и существует возможность реализации широкоугольной геометрии АО взаимодействия, используемой для спектральной фильтрации изображений [1], [2].

Практические применения АО фильтров, связанные задачами спектроскопии, требуют проведения температурных калибровок этих устройств, в ходе которых для нескольких длин волн светового излучения измеряется зависимость частоты АО синхронизма от температуры. При этом для различных углов среза кристалла (угол между направлением [110] и волновым вектором акустической волны), сопоставление результатов измерений и расчетов, выполненных с помощью литературных данных, дает систематическое расхождение, связанное с неточностью определения температурных коэффициентов упругих модулей.

В данной работе температурные коэффициенты упругих модулей определены по результатам измерения сдвига частоты АО синхронизма для нескольких геометрий АО взаимодействия.

Методика определения температурных коэффициентов упругих модулей

Рассмотрим разработанную методику определения температурных коэффициентов упругих модулей.

АО взаимодействие в плоскости $\left(1\bar{1}0\right)$ кристалла парателлурита реализуется с использованием медленной сдвиговой акустической волны, зависимость скорости которой от угла среза определяется выражением:

$$V_s\left(\varphi\right)=\sqrt{\frac{\frac{c_{11}-c_{12}}{2}\cos^2\varphi+c_{44}\sin^2\varphi}{\rho}}, \qquad (3)$$

которое можно получить из уравнения Кристоффеля (1). Здесь V_s – скорость сдвиговой акустической волны; c_{11}, c_{12}, c_{44} – модули упругости; φ – угол среза. Таким образом, для АО применений парателлурита наиболее важны температурные зависимости разности $c_{11}-c_{12}$ и модуля c_{44}.

Поскольку широкоугольная геометрия АО взаимодействия в парателлурите наблюдается в диапазоне углов среза от 0° до ~19,5° (в зависимости от длины волны светового излучения), то большее значение имеет температурная зависимость разности $c_{11}-c_{12}$.

Определим связь dV_s/dT и температурных коэффициентов упругих модулей. Для этого возведем выражение (3) в квадрат и, предположив, что $V_s\cdot dV_s/dT >> \left(dV_s/dT\right)^2$, получим:

$$\frac{dV_s\left(\varphi\right)}{dT}=\frac{1}{4\rho V_s\left(\varphi\right)}\left\{\frac{d\left(c_{11}-c_{12}\right)}{dT}\cos^2\varphi+2\frac{dc_{44}}{dT}\sin^2\varphi\right\}. \qquad (4)$$

С другой стороны, из соотношения (2) можно получить:

$$\frac{dV_s\left(\varphi\right)}{dT}=\frac{df}{dT}\frac{\lambda}{\sqrt{n_d^2-n_i^2\cos^2\Theta_B}+n_i\sin\Theta_B}.. \qquad (5)$$

Таким образом, проведя измерения смещения частоты АО синхронизма с температурой для не менее чем двух углов среза кристалла парателлурита, мы можем получить величины $d(c_{11}-c_{12})/dT$ и dc_{44}/dT. Значение $V_s(\varphi)$, стоящее в знаменателе правой части выражения (4), рассчитаем теоретически, используя данные из работы [8].

Результаты измерений и их анализ

Измерения df/dT были выполнены для пяти значений углов среза в диапазоне от 1,8° до 19° для нескольких длин волн светового излучения в каждом случае. В результате проведенных исследований получены следующие значения температурных коэффициентов: $d(c_{11}-c_{12})/dT = 1.357 \pm 0.035$ кПа/К и $dc_{44}/dT = 3.541 \pm 0.242$ кПа/К.

Также были проведены расчеты с целью сопоставления полученных результатов с известными из литературы. Сравнение приведено на рис. 1, на котором изображены зависимости $dV_s(\varphi)/dT$ для диапазона углов среза от 0 до 20°. На рисунке кружками отмечены величины температурных коэффициентов изменения скорости, полученные из эксперимента, сплошной линией – расчет, проведенный с использованием установленных значений $d(c_{11}-c_{12})/dT$ и dc_{44}/dT, остальные зависимости – с использованием данных из работ [6]–[10].

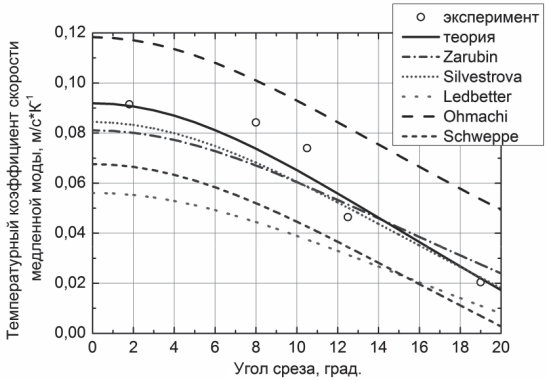


Рис. 1. Сопоставление результатов измерений и расчетов с литературными данными

Заключение

В работе предложен способ определения температурных коэффициентов упругих модулей при помощи измерений температурного сдвига частоты АО синхронизма для АО ячеек с различными углами среза в плоскости $(1\bar{1}0)$, определены значения температурных коэффициенты для упругого модуля c_{44} и

разности $c_{11} - c_{12}$, имеющих наибольшее значение для практических применений кристалла диоксида теллура.

Библиографический список

1. *Xu J., Stroud R.* Acousto-Optic Devices. New York: Wiley, 1992. 680 p.
2. *Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и Связь, 1985. 279 с.
3. *Arlt G., Schweppe H.* Paratellurite, a new piezoelectric material // Solid State Commun. 1968. N 6. P. 783–784.
4. *Ohmachi Y., Uchida N.* Elastic and photoelastic properties of TeO2 single crystal // J. Appl. Phys. 1969. N 40. P. 4692.
5. *Yano T., Watanabe A.* Acousto-optic figure of merit of TeO2 for circularly polarized light // J. Appl. Phys. 1974. N 45. P. 1243–1245.
6. *Schweppe H.* Elastic and piezoelectric properties of paratellurite (TeO_2) // Ultrasonics. 1970. N 8. P. 84–87.
7. *Ohmachi Y., Uchida N.* Temperature dependence of elastic, dielectric, and piezoelectric constants in TeO2 single crystals // J. Appl. Phys.1970. N 41. P. 2307–2311.
8. *Silvestrova I.* Temperature dependence of elastic properties of paratellurite // Phys. Stat. Sol. 1987. N 101. P. 437–444.
9. *Ledbetter H.* Low-temperature elastic and piezoelectric constants of paratellurite // J. Appl. Phys. 2004. N 96. P. 6201–6206.
10. *Zarubin V.* Lasre-ultrasonic temperature mapping of an acousto-optic dispersive delay line // NDT and E International. 2018. N 98. P. 171–176.

УДК 534.535

Г. В. Кулак*
доктор физико-математических наук, профессор
А. П. Ропот**
младший научный сотрудник
О. В. Шакин****
доктор технических наук, профессор
*Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина
**Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси
***Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

КОЛЛИНЕАРНОЕ АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В УСЛОВИЯХ ВНУТРЕННЕЙ КОНИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ

Рассмотрено коллинеарное акустооптическое преобразование бесселевых световых пучков в два кольцевых пучка внутренней конической рефракции. С использованием метода преобразования Фурье найдены выражения для потоков мощности дифрагированных на ультразвуке кольцевых пучков внутренней конической рефракции в замкнутой форме. Установлено, что при малых интенсивностях ультразвуковой волны имеет место существенное изменение эффективности дифракции при увеличении длины акустооптического взаимодействия; при больших интенсивностях ультразвука интенсивности дифрагированных пучков выравниваются. Показано, что для малых длин акустооптического взаимодействия достигается узкополосное преобразование световых бесселевых пучков нулевого порядка с шириной полосы ~0,1 нм.
Ключевые слова: коллинеарное акустооптическое взаимодействие, бесселевы световые пучки, внутренняя коническая рефракция, двуосный кристалл, эффективность дифракции.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № Ф20Р-286) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): проект №20-57-00004.

G. V. Kulak*
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
A. P. Ropot**
Junior Researcher
O. V. Shakin****
Dr. Sc. Tech., Professor
*I. P. Shamiakin in Mozur State Pedagogical University
**Insitute of Physics of NAS Belarus
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

COLLINEAR ACOUSTO-OPTICAL TRANSFORMATION OF BESSEL LIGHT BEAMS UNDER CONDITIONS OF INTERNAL CONICAL REFRACTION

The collinear acousto-optical transformation of Bessel light beams into two ring beams of internal conical refraction is considered. Using the Fourier transform method, expressions are found for the

power flows of ring beams of internal conical refraction diffracted by ultrasound in a closed form. It is established that at low ultrasonic wave intensities, there is a significant change in the diffraction efficiency with an increase in the acousto-optic interaction length; at high ultrasound intensities, the diffracted beam intensities are equalized. It is shown that for small acousto-optical interaction lengths, a narrow-band transformation of zero-order Bessel light beams with a bandwidth of ~0,1 nm is achieved.
Keywords: collinear acousto-optic interaction, Bessel light beams, internal conical refraction, biaxial crystal, diffraction efficiency.

Эффективное коллинеарное акустооптическое (АО) преобразование бесселевых световых пучков (БСП) вблизи оптической оси одноосного кристалла исследовано в [1]. Известно, что сечения поверхностей волновых векторов двуосного негиротропного кристалла плоскостью X_1X_3 представляют собой окружность с радиусом $k_0\sqrt{\varepsilon_{22}}$ для световой волны, поляризованной перпендикулярно плоскости (010), и эллипс с полуосями $k_0\sqrt{\varepsilon_{33}}$ и $k_0\sqrt{\varepsilon_{11}}$ для света, поляризованного в главной плоскости кристалла (здесь $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 – длина световой волны в вакууме, $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$ – главные диэлектрические проницаемости кристалла) [2]. При распространении ограниченных световых пучков вдоль бинормали в двуосных кристаллах наблюдается внутренняя коническая рефракция [3]–[7]. Пространственное распределение световых пучков в кольцевой зоне конической рефракции определяется отношением радиуса основания конуса конической рефракции ρ_0 к радиусу падающего светового пучка w. В [5] приведены выражения, описывающие распределение световых полей в кольце внутренней конической рефракции и показано, что при определенных условиях для прошедшего светового пучка отчетливо наблюдаются два светлых кольца. Особенности распространения световых пучков и импульсов в окрестности оптических осей одноосных и двуосных кристаллов (включая гиротропные), связанные со сложной формой волновых поверхностей кристаллов вблизи бинормалей, исследованы в [6], [7]. В [8] показано, что учет гиротропии при объяснении явления внутренней конической рефракции можно произвести, вводя в рассмотрение вместо собственных векторов линейной поляризации собственные векторы эллиптической поляризации. При этом эллиптичность собственных волн вблизи бинормали определяется гиротропией кристалла, линейной анизотропией и углом отклонения от бинормали плосковолновых компонент кольцевого пучка.

В настоящей работе рассмотрен режим коллинеарного АО взаимодействия БСП нулевого порядка в условиях внутренней конической рефракции. Такой режим дифракции перспективен для создания перестраиваемых коллинеарных АО фильтров на основе БСП. Произведен учет сложного пространственного распределения поляризации света в кольцевых пучках при таком взаимодействии. При этом рассмотрены особенности коллинеарного АО взаимодействия БСП в двуосных негиротропных кристаллах в условиях внутренней конической рефракции при их преобразовании из нулевого дифракционного порядка в первый.

Предполагается, что БСП, распространяющийся вдоль бинормали N двуосного кристалла, формирует световые пучки с конической структурой пространственного спектра, дифрагирующие на ультразвуковой (продольной или сдвиговой) волне. В случае негиротропного кристалла азимутально однородное распределение интенсивности кольцевых пучков достигается для циркулярно поляризованных БСП [8]. Амплитудное распределение и поляризация БСП рассматриваются в цилиндрической системе координат ρ, ϕ, z с осью симметрии, направленной вдоль бинормали ($N \| \mathrm{OZ}$), причем азимутальный угол ϕ отсчитывается от оси OX (рис. 1).

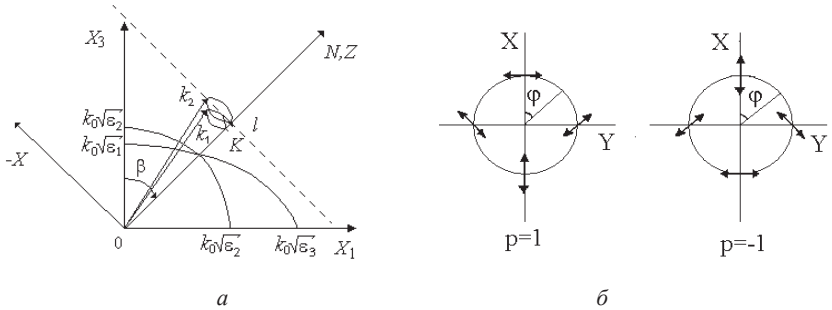


Рис. 1. Геометрия АО взаимодействия в окрестности оптической оси двуосного кристалла (а); поляризация ортогонально-поляризованных кольцевых пучков (б) (N – бинормаль; k_1, k_2 и K – волновые векторы преломленной, дифрагированной волны и ультразвука соответственно; $k_0 = 2\pi / \lambda_0$; X_1X_3 – плоскость главного сечения кристалла)

Ультразвуковой (УЗ) пучок с круговой частотой Ω и волновым вектором K также распространяется вдоль бинормали N и индуцирует периодическую в пространстве и времени решетку диэлектрической проницаемости: $\hat{\varepsilon}(r,t) = \hat{\varepsilon}^0 + \Delta\hat{\varepsilon}\cos(\vec{K}\vec{r} - \omega t)$, где $\hat{\varepsilon}^0$ – тензор диэлектрической проницаемости невозмущенного кристалла; $\Delta\,\hat{\varepsilon}_{ik} = -\hat{\varepsilon}^0_{il}\hat{\varepsilon}^0_{jk}\hat{p}_{ljmn}\hat{U}_{mn}$; $\hat{p}_{ljmn}$ – компоненты тензора фотоупругих постоянных; $\hat{U}_{mn}$ – компоненты тензора деформаций.

В области, занятой ультразвуком, напряженность $\vec{E}$ и индукция $\vec{D}$ светового поля удовлетворяют волновому уравнению, следующему из уравнений Максвелла:

$$\nabla^2\vec{E} - \nabla(\nabla\vec{E}) - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{D}}{\partial t^2} = 0, \qquad (1)$$

где c – скорость света в вакууме; $\vec{E} = \hat{\varepsilon}^{-1}\vec{D}$.

Положим, что падающий световой пучок на границе z=0 области АО взаимодействия имеет бесселево распределение амплитуды для компоненты поля с правой циркулярной поляризацией

$$\vec{D}(\rho, z=0) = \vec{e}_+ D_i J_0(k\gamma_0\rho),$$

где D_i – амплитуда падающего БСП; $J_0(k\gamma\rho)$ – функция Бесселя нулевого порядка; $k = 2\pi n / \lambda_0$, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$; γ_0 – угол конусности БСП; $\vec{e}_+$ – единичный вектор правой циркулярной поляризации.

В квадратичном приближении с учетом малого угла отклонения от бинормали плосковолновых компонент кольцевых пучков, волновые векторы $\vec{k}_{1,2}$ и векторы поляризации $\vec{e}^{\pm}$ двух собственных мод можно представить в следующем виде [6], [9]:

$$\vec{k}_{1,2} = k_x\vec{e}_1 + k_y\vec{e}_2 + (k - \gamma k_x + p\gamma k_\perp - k_\perp^2 / 2k)\vec{e}_3,$$

$$\vec{e}^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{e}_+ \mp e^{i\phi}\vec{e}_-), \qquad (2)$$

где $\cos\phi = k_x / k_\perp, \sin\phi = k_y / k_\perp;$, $\vec{e}_1$, $\vec{e}_2$, $\vec{e}_3$ – единичные векторы, направленные вдоль осей X, Y, Z соответственно; $\gamma = arctg[\sqrt{(\varepsilon_3^{-1} - \varepsilon_2^{-1})(\varepsilon_2^{-1} - \varepsilon_1^{-1})} / 2n^2]$, $k_\perp = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$; k_x, k_y – проекции волнового вектора на оси $\vec{e}_1 \parallel X, \vec{e}_2 \parallel Y$; λ_0 – длина световой волны в вакууме; n – показатель преломления кристалла в направлении бинормали; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные диэлектрические проницаемости; $p = \mp 1$. Сечение поверхностей волновых векторов плоскостью X_1X_3 двуосного негиротропного кристалла показано на рис. 1. В окрестности бинормали оно представляет собой два соосных конуса. «Быстрый» и «медленный» кольцевые пучки внутренней конической рефракции эффективно взаимодействуют в области УЗ поля при выполнении условий пространственного и временного синхронизма: $\vec{k}_2 = \vec{k}_1 + \vec{K}, \omega_d = \omega + \Omega$ (ω и ω_d – циклическая частота падающей и дифрагированной волн соответственно). Частота ультразвука $f = \Omega / 2\pi$, при которой происходит эффективное АО преобразование кольцевых пучков, определяется параметром γ распространяющегося в кристалле БСП, причем $f = 2\gamma^2 n\upsilon / \lambda_0$ (υ – фазовая скорость УЗ волны).

В соответствии с методом медленно изменяющихся амплитуд и с учетом геометрии АО взаимодействия решение волнового уравнения [9] для определения фурье-компонент дифрагированных пучков следует искать в виде:

$$\vec{D} = \int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int \vec{e}^{+}U_t^{+}(k_x,k_y,z)\exp[i(\vec{k}_2\vec{r}-\omega t)]dk_x dk_y +$$
$$+\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int \vec{e}^{-}U_t^{-}(k_x,k_y,z)\exp[i(\vec{k}_1\vec{r}-\omega t)]dk_x dk_y +$$
$$+\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int \vec{e}^{+}U_d^{+}(k_x,k_y,z)\exp[i(\vec{k}_2\vec{r}-\omega_d t)]dk_x dk_y + \qquad (3)$$
$$+\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int \vec{e}^{-}U_d^{-}(k_x,k_y,z)\exp[i(\vec{k}_1\vec{r}-\omega_d t)]dk_x dk_y,$$

где $U_{t,d}^{\pm}$ – фурье-спектры прошедшего (t) и дифрагированного (d) световых пучков.

Предположим, что распределение амплитуды в поперечном сечении УЗ пучка имеет гауссов профиль. При этом вектор смещений УЗ волны определяется в соответствии с соотношением: $\vec{U} = \vec{U}_0 \exp[(-\rho^2/2w_a^2)+i(Kr-\Omega t)]$, где U_0 – амплитуда смещений; w_a – радиус поперечного сечения УЗ пучка. При малой расходимости УЗ пучка (когда $\theta_a \le \gamma$) испытывают эффективную дифракцию лишь те компоненты светового пучка, для которых выполняются условия фазового синхронизма. При этом происходит преобразование светового пучка с правой циркулярной поляризацией в световой пучок с левой циркулярной поляризацией, и наоборот. Положим, что на кристалл падает световой пучок с правой циркулярной поляризацией, тогда для упрощения записи опустим в амплитудах индексы $\pm$, то есть положим: $U_t^{+} \equiv U_t, U_d^{-} \equiv U_d$. При расходимости УЗ волны $\theta_a > \gamma$ могут наблюдаться значительные искажения кольцевой структуры световых пучков вследствие других АО процессов, не связанных с АО преобразованием кольцевых пучков. При этом в выражениях (3) и системе уравнении связанных волн следует рассматривать все четыре комплексные амплитуды ($U_{t,d}^{\pm}$) с соответствующей расстройкой фазового синхронизма [9].

Подставим выражение (3) в волновое уравнение (1), используем приближения [10]

$$(\varepsilon_{ij}-\bar{\varepsilon}), \Delta\varepsilon_{ij}, |g| << \bar{\varepsilon}, \quad \left|\frac{dD_m}{dz}\right|(\varepsilon_{ij}-\bar{\varepsilon}) \approx 0, \ (k^2\gamma^2 l/(k_{\pm z}) << 1, \ \theta_d \le \gamma,$$

(здесь $\bar{\varepsilon} = Sp\hat{\varepsilon}/3, m = x, y, z$; l – длина области АО взаимодействия), получим систему уравнений для фурье-спектров U_t, U_d дифрагированных пучков [11]:

$$\frac{dU_t}{dz}=\left(\frac{k_x^2+k_y^2}{2ik_1}\right)U_t-i\chi_-\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int\limits_{-\infty}^{+\infty}U_d(k_x-K_x,k_y-K_y)U_a(K_x,K_y)dK_xdK_y,$$
$$\frac{dU_d}{dz}=\left(\frac{k_x^2+k_y^2}{2ik_2}\right)U_d+i\chi_+\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int\limits_{-\infty}^{+\infty}U_d(k_x+K_x,k_y+K_y)U_a(K_x,K_y)dK_xdK_y, \quad (4)$$

где

$$\chi_{\mp}=\frac{\pi n^3 p_{эф}\sin\phi\sqrt{2I_a/\sigma\upsilon^3}}{2\lambda_0(1-\gamma k_\perp\cos\phi/k+p\gamma k_\perp/k-k_\perp^2/2k)},$$

причем σ – плотность кристалла; $I_a.(\upsilon)$ – интенсивность (фазовая скорость) УЗ волны; $U_a(K_x,K_y)$ – фурье-спектр УЗ пучка.

Решение системы уравнений связанных волн (4) находим с привлечением граничных условий:

$$U_t\,(z=0)=D_i\left(\frac{k^2\gamma^2}{4\pi}\right)F\left(k_\perp,\phi\right),$$
$$U_d(z=0)=0, \quad (5)$$

где

$$F\left(k_\perp,\phi\right)=\frac{k_\perp(\cos\phi\sqrt{k_\perp^2\cos^2\phi-k^2\gamma_0^2}+\sin\phi\sqrt{k_\perp^2\sin^2\phi-k^2\gamma_0^2})}{(k^2\gamma_0^2-k_\perp^2)\sqrt{(k_\perp^2\cos^2\phi-k^2\gamma_0^2)(k_\perp^2\sin^2\phi-k^2\gamma_0^2)}}.$$

При записи выражения (5) учитывался фурье-спектр падающего бесселевого светового пучка [12].

Потоки мощностей дифрагированных волн P_t и P_d находим в виде:

$$P_t=P_0D_i^2\int\limits_0^{2\pi}\int\limits_0^{\infty}\cos^2(z\sqrt{\chi_+\chi_-})F^2(k_\perp,\phi)k_\perp d\phi dk_\perp,$$
$$P_d=P_0D_i^2\int\limits_0^{2\pi}\int\limits_0^{\infty}\sin^2(z\sqrt{\chi_+\chi_-})F^2(k_\perp,\phi)k_\perp d\phi dk_\perp, \quad (5)$$

где I_a – интенсивность УЗ волны; σ – плотность кристалла; $p_{эф}$ – эффективная фотоупругая постоянная кристалла; $P_0=c/8(\overline{\varepsilon})^{3/2}$. При этом эффективность АО взаимодействия находится из соотношения: $\eta=P_d(z=l)/P_t(z=0)$.

Численные расчеты были проведены для кристалла бифталата калия ($KHC_8H_4O_4$). На рис. 2 представлены зависимости эффективности дифракции η от интенсивности продольной УЗ волны I_a, рассчитанные при разных значениях длины l области АО взаимодействия.

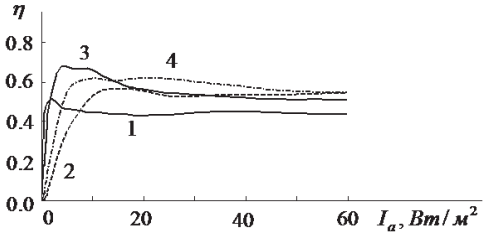


Рис. 2. Зависимость эффективности дифракции η *от интенсивности УЗ волны* I_a *при различных длинах АО взаимодействия l: 1 – 2, 2 – 4, 3 – 6, 4 – 8 мм (*$\gamma = 0{,}01$рад, $\gamma_0 = 0{,}03$рад*, f=1,71 МГц,* λ_0*=0,6328 мкм, n=1,603,* $p_{эф}$*=0,226, кристалл* $KHC_8H_4O_4$*)*

Из рис. 2 следует, что при увеличении интенсивности УЗ волны дифракционная эффективность достигает максимального значения, близкого к 67 % при малых интенсивностях ультразвука ~0,001 Вт/см^2. Увеличение длины АО взаимодействия приводит значительному изменению эффективности дифракции лишь при малых интенсивностях ультразвука. При этом кольцевые пучки внутренней конической рефракции имеют существенно отличающуюся интенсивность света. При больших интенсивностях ультразвука ~0,1 Вт/см^2 эффективность дифракции достигает ~50 % и практически не изменяется при увеличении УЗ интенсивности и длины АО взаимодействия. Данная особенность АО дифракции объясняется эффективным преобразованием БСП в два кольцевых пучка внутренней конической рефракции, достигающих примерно одинаковую интенсивность света.

При коллинеарной АО фильтрации БСП в условиях внутренней конической рефракции, при геометрии взаимодействия, представленной на рис. 1, ширина полосы пропускания устройства определяется дисперсией двулучепреломления двуосного кристалла и находится из соотношения: $\Delta\lambda = 0{,}8\lambda / (\partial\Delta n / \partial\lambda)$. Для кристалла БФК ширина полосы пропускания АО фильтра на длине волны λ_0=0,6328 мкм составляет ~0,1 нм. Аналогичные особенности АО дифракции имеют место для гоуссовых световых пучков, дифрагирующих в условиях внутренней конической рефракции [9].

Заключение

Таким образом, в двуосных негиротропных кристаллах возможно эффективное низкочастотное коллинеарное АО преобразование бесселевых световых пучков нулевого порядка в условиях внутренней конической рефракции. При этом для малых длин АО взаимодействия достигается узкополосное преобразование световых бесселевых пучков. На основе таких преобразований возможно создание коллинеарных перестраиваемых АО фильтров с узкой шириной полосы пропускания, достигающей 0,1 нм.

Библиографический список

1. Generation of TH- and TE – polarized Bessel light beams at acoustooptic interaction in anisotropic crystals / V. Belyi, P. Khilo, N. Kazak, N. Khilo // Optics commun. 2014. Vol. 325. P. 84–91.

2. *Ярив А.* Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 616 с.

3. *Бельский А. М., Хапалюк А. П.* Внутренняя коническая рефракция на границе светового пучка в двуосных кристаллах // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 44. № 4. С. 746–751.

4. *Fève J., Boulanger B., Marnier G.* Experimental study of internal and external conical refractions in KTP // Optics commun. 1994. Vol. 105. N 34. P. 243–252.

5. *Ulhmann G.* Light intensity distribution in conical refraction // Commun. Pure and Appl. Math. 1982. Vol. 35. N 1. P. 69–80.

6. *Хаткевич А. Г.* Внутренняя коническая рефракция световых пучков // Оптика и спектроскопия. 1979. Т. 46. № 3. С. 505–510.

7. *Хаткевич А. Г.* Коническая рефракция и преобразование излучения вблизи оптической оси // Прикладная спектроскопия. 1996. Т. 63. № 6.С. 1017–025.

8. *Schell A., Blombergen N.* Laser studies of internal conical diffraction. II. Intensity patterns in an optically active crystal, α – iodic acid // J. Opt. Soc. Am. 1978 Vol. 68. N 8. P. 1093–1098.

9. *Кулак Г. В.* Акустооптическое взаимодействие световых пучков в условиях внутренней конической рефракции // Оптика и спектроскопия. 2001. Т. 90. № 3. С. 464–467.

10. *Vachss F., Hesselink I.* Holographic beam coupling in anisotropic photorefractive media // J. Opt. Soc. Am. 1987. Vol. 4. N 2. P. 325–339.

11. *Парыгин В. Н. Вершубский А. В. Резвов Ю. Г.* Коллинеарная дифракция гауссового пучка на акустическом цуге // Оптика и спектроскопия. 1998. Т. 84. № 6. С. 1005–1011.

12. *Прудников А. П., Брычков Ю. А., Маричев О. И.* Интегралы и ряды // Специальные функции. М.: Наука, 1983. 750 с.

УДК 535.421

М. И. Купрейчик*
физик
В. И. Балакший*
доктор технических наук, профессор
С. Н. Манцевич*
кандидат физико-математических наук, доцент
*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

ДИФРАКЦИЯ НЕПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АКУСТООПТИЧЕСКИХ ЯЧЕЙКАХ НА ОСНОВЕ ДВУОСНЫХ КРИСТАЛЛОВ С ФАЗИРОВАННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

На примере ромбического кристалла Tl_3AsS_4 проведено исследование характеристик анизотропной дифракции в двуосных кристаллах в акустическом поле, создаваемом фазированным пьезоэлектрическим преобразователем с противофазным возбуждением соседних секций. Особое внимание уделено особенностям частотных зависимостей оптимальных углов падения в различных срезах кристалла. Доказана целесообразность применения фазированного пьезоэлектрического преобразователя для повышения характеристик устройств управления неполяризованным излучением. В частности, предложен дефлектор неполяризованного излучения, значительно превосходящий по своим характеристикам существующие серийные аналоги. Изучена возможность создания дефлекторов неполяризованного излучения с большим числом разрешимых положений на основе акустооптических ячеек с электронным управлением фазами секций преобразователя.
Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, условие фазового синхронизма, акустооптические устройства управления неполяризованным излучением.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) № 19-12-00072.

M. I. Kupreychik*
Physicist
V. I. Balakshy*
Dr. Sc. Tech., Professor
S. N. Mantsevich*
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
*M. V. Lomonosov Moscow State University

DIFFRACTION OF UNPOLARIZED RADIATION IN ACOUSTO-OPTIC CELLS BASED ON BIAXIAL CRYSTALS WITH PHASED-ARRAY TRANSDUCERS

Using as an example rhombic crystal Tl_3AsS_4, we investigated the characteristics of anisotropic diffraction in biaxial crystals in an acoustic field created by a phased-array transducer with antiphase excitation of adjacent sections. The main attention is paid to the peculiarities of frequency dependences of optimal angles for different cuts of the crystal. The feasibility of using phased-array piezoelectric transducers to improve the performance of non-polarized radiation control devices is

shown. In particular, a non-polarized radiation deflector, which significantly exceeds the existing serial analogues in its characteristics is proposed. The possibility of implementing non-polarized radiation deflectors with large number of spatially resolved points based on the acousto-optic cells with electronic control of phases of transducer sections is studied.
Keywords: acousto-optic interaction, Bragg phase matching, non-polarized radiation control acousto-optic devices.

Введение

Проблема создания устройств управления неполяризованным излучением является актуальной, до сих пор до конца не решенной задачей современной акустооптики. Наиболее очевидный способ ее решения состоит в поиске срезов кристаллов с близкими коэффициентами АО качества для различных поляризаций падающего излучения в режиме изотропной дифракции. Среди известных одноосных АО кристаллов наиболее подходящим для этой цели материалом является молибдат свинца $PbMoO_4$ [1], однако этот кристалл обладает плохими термофизическими свойствами. В списке перспективных материалов особое место занимают двуосные кристаллы, матрицы фотоупругих модулей которых имеют большее число различных коэффициентов, что значительно расширяет возможности выбора оптимальной конфигурации среза кристалла.

Другим возможным вариантом является применение АО ячейки на основе одноосного кристалла с секционированным преобразователем, секции которого включены противофазно [2]. Такой подход позволяет в режиме анизотропной дифракции обеспечить эффективное рассеяние обеих собственных мод в один порядок дифракции в геометрии АО модулятора. К сожалению, подобный метод не подходит для получения высоких частот модуляции, поскольку для этого, как правило, требуются очень малые периоды секций. Аналогичный подход может быть использован и для создания дефлектора неполяризованного излучения [2], однако характеристики такого устройства оказываются относительно невысокими, что в основном обусловлено низкой центральной частотой.

Применение фазированного преобразователя в комбинации с анизотропной дифракцией в двуосных кристаллах приводит к существенно более сложной форме частотных зависимостей оптимальных углов падения, что позволяет рассчитывать на создание АО приборов нового типа. В [3] показано, что особая структура оптической анизотропии двуосных кристаллов позволяет создавать на их основе устройства управления неполяризованным излучением даже в однородном акустическом поле. Поэтому для реализации подобных устройств с использованием фазированного преобразователя не потребуются столь малые периоды секций, которые типичны для аналогичных приборов на основе одноосных кристаллах. Наиболее ярко упомянутая особенность проявляется при дифракции в двуосных кристаллах с умеренным двулучепреломлением. Одним из таких двуосных кристаллов является кристалл Tl_3AsS_4, для которого и проводились дальнейшие расчеты в настоящей работе.

Кристалл Tl_3AsS_4 – синтетический монокристалл ромбической сингонии, принадлежащий к точечной группе (mmm). Кристалл прозрачен в диапазоне длин волн от 0,6 до 12 мкм и является одним из наиболее перспективных мате-

риалов для создания АО устройств среднего ИК диапазона [4]. К достоинствам кристалла следует отнести низкие средние значения скоростей акустических мод, что вкупе с высокими значениями фотоупругих коэффициентов определяет чрезвычайно высокую АО эффективность, а также малые акустические потери в срезах с высоким значением АО качества [4]. Для длины волны излучения λ=1,06 мкм, для которой и проводились расчеты характеристик дифракции, главные показатели преломления равны: n_X=2,646, n_Y=2,598, n_Z=2,642 [4].

При рассмотрении особенностей АО дифракции в периодически неоднородном акустическом поле в кристалле Tl_3AsS_4 ограничимся срезами главной плоскости XY, содержащей оптические оси. При анализе АО эффекта в плоскости XY, содержащей оптические оси, негиротропного двуосного кристалла правомерно ввести оптические квази-моды: квази-обыкновенную волну (qo-моду) и для квази-необыкновенную волну (qe-моду), лучевые вектора и вектора поляризации которых не испытывают скачкообразного изменения при переходе через направления оптических осей [3]. Введем также угол среза кристалла χ, определяющий направление распространения медленной сдвиговой акустической моды в рассматриваемой плоскости, отсчитывая его от оси Y в сторону, противоположную оси X.

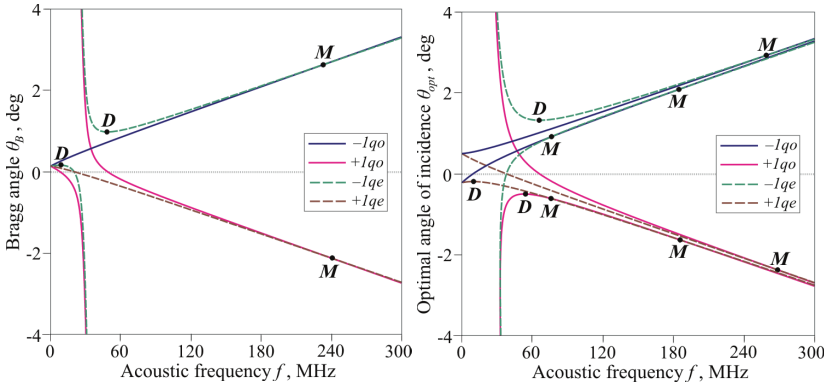
Результаты расчетов

Частотные зависимости углов Брэгга $\theta_B(f)$в срезе 73.3º плоскости XY кристалла Tl_3AsS_4 представлены на рис. 1а. Сплошные кривые на графиках соответствуют ситуации, когда падающий свет является qo-волной, а дифрагированный – qe-волной, в то время как пунктирные кривые отвечают обратной ситуации. Например, ветвь +1qo отображает процесс рассеяния qo-волны в +1 порядок. Кривые касаются оси ординат в точках, соответствующих распространению взаимодействующих световых пучков вдоль одной из оптических осей. Точками D отмечены области с низкой частотной селективностью дифракции, оптимальные для создания АО дефлекторов [1]. Точками M обозначены области, оптимальные для создания АО модуляторов интенсивности неполяризованного излучения. Как следует из графика, ветви +1qe и +1qo пересекаются в точке M на частоте 239 МГц, а ветви -1qe и -1qo – на частоте 232,6 МГц. Центральные частоты подобных АО модуляторов зависят от угла среза кристалла. Так, при изменении угла среза от 73,2 ° до 74 ° рабочая частота модулятора в -1 порядке дифракции возрастает с 138,1 МГц до 532.7 МГц. Получаемые для большинства срезов высокие значения частот ультразвука позволяют рассчитывать на создание на основе кристалла Tl_3AsS_4 эффективных АО модуляторов в среднем ИК диапазоне [3].

При использовании в качестве источника ультразвука фазированного пьезо-преобразователя с противофазным возбуждением соседних секций максимальная эффективность дифракции достигается при оптимальных углах падения, отличных от угла Брэгга [2]. Оптимальные углы падения могут быть истолкованы как углы Брэгга для системы эквивалентных волновых фронтов, при этом, не смотря на нарушение условия АО синхронизма, эффективность ди-

фракции может достигать 100 %, однако для этого требуется несколько большая акустическая мощность [5].

На рис. 1б представлены частотныt зависимости оптимальных углов падения $\theta_{opt}(f)$ в срезе 73,3 º для АО ячейки с фазированным преобразователем из 2 секций. Расчеты проведены для периода структуры преобразователя d=2,4 мм. Здесь и далее относительная величина зазора между секциями ξ=a/l, где l – размер отдельной секции, выбиралась равной 0,2. Нетрудно видеть, что при выбранных параметрах структуры преобразователя в каждом из дифракционных порядках реализуется по два низкочастотных (НЧ) и по одному высокочастотному (ВЧ) АО модуляторов неполяризованного излучения. Следует подчеркнуть, что все указанные варианты модуляторов реализуются при рассеянии на одном, развернутом в сторону больших углов среза, лепестке диаграммы направленности преобразователя. При уменьшении периода секций рабочие точки крайних, ВЧ и НЧ модуляторов сдвигаются в более высокочастотную область, тогда как центральная частота оставшегося НЧ модулятора, напротив, смещается в область более низких частот. Необходимо особо отметить, что рассмотренные здесь варианты АО модуляторов оказываются существенно менее чувствительными, в сравнении с аналогичными устройствами на основе одноосных кристаллов, использующими оба лепестка диаграммы направленности [2], к изменению сдвига фазы между соседними секциями преобразователя, возникающему ввиду влияния паразитных электрических параметров элементов соединения секций преобразователя и особенно заметному на высоких частотах ультразвука, что позволяет рассчитывать на их широкое практическое применение.



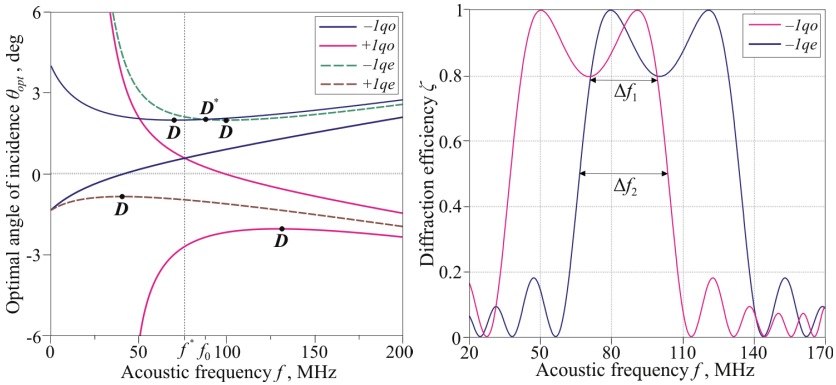
(а) (б)

Рис. 1. Частотные зависимости углов Брэгга (а) и оптимальных углов падения (б)

Увеличением периода секций относительно значения 0,24 мм можно добиться совпадения углов падения для АО дефлекторов, рабочие точки которых расположены на пересекающихся ветвях оптимальных углов +1qo и +1qe на

рис. 1б. В последнем случае частотная селективность дифракции вблизи точки пересечения вышеупомянутых ветвей оказывается низкой для обеих оптических мод, что может быть использовано для создания АО дефлектора неполяризованного излучения. Центральная частота и, как следствие, допустимый диапазон углов отклонения дифрагированного светового пучка в воздухе $\Delta\theta_d$ подобного дефлектора монотонно растет по мере отхода от среза 73,15 º. При этом вследствие роста коэффициента АО качества при уменьшении угла среза [3] для практической реализации рассматриваемого здесь дефлектора неполяризованного излучения целесообразно использовать срезы кристалла, меньшие 73,15 º.

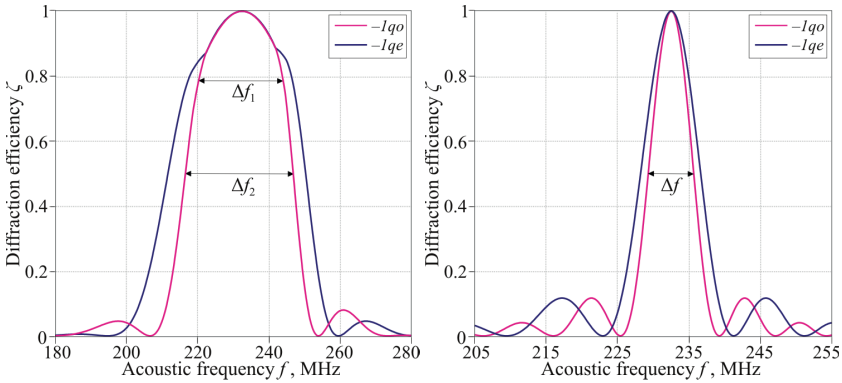
На рис. 2а представлены зависимости $\theta_{opt}(f)$ в срезе 72,3 º для АО ячейки с фазированным преобразователем из 8 секций с периодом 0,43 мм. Положение рабочей точки дефлектора неполяризованного излучения, имеющего центральную частоту f_0=87,6 МГц, показана точкой D^*. Сильная перекачка энергии qe-моды в -2 порядок дифракции, наблюдающаяся вблизи частоты ультразвука, показанной на рисунке символом f^*, возникающая в результате эффективного рассеяния дифрагированной qo-волны на втором лепестке диаграммы направленности преобразователя, а также аналогичная область перекачки энергии qo-моды ограничивают предельно допустимый частотный диапазон дефлектора величиной 29 МГц, что приближенно соответствует значению $\Delta\theta_d$=1,6 º. Частотные характеристики дифракции для рассматриваемого варианта АО дефлектора, построенные для угла падения 2 º, показаны на рис. 2б. Из графика следует, что частотный диапазон АО ячейки по уровню эффективности дифракции 80 % составляет 28 МГц, тогда как по уровню -3 дБ последний оказывается равным 38 МГц, что в 2,5 раза превышает частотный диапазон изотропной дифракции при тех же параметрах АО ячейки.



(а) (б)

Рис. 2. Частотные зависимости оптимальных углов падения (а) и частотные характеристики АО дифракции (б)

На основании вида зависимостей $\theta_B(f)$ в двуосных кристаллах можно предложить другой подход к созданию АО дефлектора неполяризованного излучения с большим числом пространственно разрешимых положений, свободного от негативного влияния эффекта перекачки энергии в старший порядок дифракции. Идея метода состоит в использовании рабочей точки М на рис. 1а и расширения частотного диапазона ячейки за счет электронной подстройки эквивалентного волнового фронта, осуществляемой путем изменения сдвига фаз между соседними секциями преобразователя, что требует включения в цепь преобразователя фазовращателей [6]. Последнее приводит к повышению сложности изготовления АО ячейки, что в свою очередь накладывает жесткие ограничения на число секций в структуре преобразователя. Частотные характеристики подобного АО дефлектора в срезе 73,3 º кристалла Tl_3AsS_4 с преобразователем из 3 секций периодом 1,2 мм представлены на рис. 3а. Частотный диапазон ячейки по уровню эффективности дифракции 80 % составляет 24 МГц, тогда как по уровню -3 дБ последний равен 31 МГц. Для сравнения частотный диапазон аналогичной АО ячейки с однородным преобразователем составляет всего 6,5 МГц (рис. 3б), то есть оказывается почти в 5 раз уже.



(а) (б)

Рис. 3. Частотные характеристики АО дифракции

Таким образом, на основании проведенных расчетов можно утверждать, что применение фазированных преобразователей в комбинации с анизотропной дифракцией в двуосных кристаллах действительно позволяет создавать АО устройства управления неполяризованным излучением с улучшенными характеристиками.

Библиографический список

1. *Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.

2. Acousto-optic cells with phased-array transducers and their application in systems of optical information processing / V. Balakshy, M. Kupreychik, S. Mantsevich, V. Molchanov // Materials. 2021. Vol. 14. No 2. P. 451.

3. *Balakshy V., Kupreychik M., Mantsevich S.* Extraordinary variants of anisotropic acousto-optic interaction in optically biaxial crystals // Proc. of WECONF 2020. IEEE. 2020. P. 1–7.

4. *Goutzoulis A., Gottlieb M., Davies K.* Thallium arsenic sulfide acoustooptic Bragg cells // Applied Optics. 1985. Vol. 24. P. 4183–4188.

5. *Balakshy V., Kupreychik M., Mantsevich S.* Anisotropic light diffraction in spatially periodical acoustic field // Proc. SPIE. 2019. Vol. 11210. P. 00L:1–00L:10.

6. *Antonov S., Vainer A., Proklov V.* Extension of the angular scanning range of the acousto-optic deflector with a two-element phased-array piezoelectric transducer // Techn. Phys. 2013. Vol. 58. P. 1346–1351.

УДК 534.29

С. Н. Курилкина*
доктор физико-математических наук, профессор
В. Н. Белый*
доктор физико-математических наук, член-корреспондент НАН Беларуси
С. В. Кулаков**
доктор физико-математических наук, профессор
*Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси
**Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ЭЛЕКТРОИНДУЦИРОВАННОЕ БЕЗДИФРАКЦИОННОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ В КУБИЧЕСКИХ ЦЕНТРОСИММЕТРИЧНЫХ КРИСТАЛЛАХ С ВЫСОКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

Показано, что приложение внешнего электрического поля к кубическому центросимметричному кристаллу обусловливает деформацию поверхности волновых векторов и появление на ней параболических точек, соответствующих направлениям, вдоль которых возможно бездифракционное распространение пучков квазипоперечных ультразвуковых волн. Кроме того, изменяя внешнее электрическое воздействие, можно управлять формой пучка продольных волн: фокусировать или расфокусировать его, а также реализовать случай, когда данный пучок распространяется как в изотропной среде.
Ключевые слова: акустический пучок, анизотропный кристалл, поверхность волновых векторов, бездифракционное распространение.

S. N. Kurilkina*
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
V. N. Belyi*
Dr. Sc. Phys.-Math., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Belarust
S. V. Kulakov**
Dr. Sc. Phys.-Math., Professor
*B. I. Stepanov Institute of Physics of NAS Belarus
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ELECTROINDUCED DIFFRATION-FREE PROPAGATION OF ACOUSTIC BEAMS IN CUBIC CENTROSYMMETRICAL CRYSTALS WITH HIGH DIELECTRIC PERMEABILITY

It is shown that the application of an external electric field to a cubic centrosymmetric crystal causes the deformation of the wave vectors surface and the appearance of parabolic points on it corresponding to directions along which diffraction-free propagation of quasi-transverse ultrasonic beams is possible. Moreover, changing the external electrical field one can shape the longitudinal waves beam: focusing or defocusing it, and also to realize the case when this beam propagates as in an isotropic medium
Keywords: acoustic beam, anisotropic crystal, wave vectors surface, diffraction-free propagation.

Введение

Проблема формирования сфокусированных и каналированных звуковых пучков имеет фундаментальное значение для таких областей прикладной акустики, как томография, акустическая микроскопия, гидролокационная связь. Для ее решения было предложено несколько подходов, например, использование акустических линз [1] или имеющих особую конструкцию преобразователей гауссовых пучков [2]. В последние годы теоретически и экспериментально показана возможность получения пучков с подавленной дифракционной расходимостью в акустических метаматериалах [3]–[5]. Следует отметить, что указанные подходы достаточно сложны в технологическом исполнении.

В настоящем сообщении рассматривается возможность формирования самоканалированных акустических пучков в кубических центросимметричных кристаллах с высокой диэлектрической проницаемостью. Такие кристаллы ($BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $KTiO_3$ и др.) обладают аномально большими эффектами линейной и нелинейной электрострикции, что приводит к значительным относительным изменениям скоростей упругих волн $\Delta V / V \sim 10^{-3} \div 10^{-2}$ в поле напряженности $E \sim 10$ кВ/см. В рамках ковариантного подхода, основы которого заложены в [6], анализируется возможность перестройки посредством электрического поля структуры акустической поверхности данных сред и появления участков с близкой к нулю кривизной, следствием чего является формирование бездифракционных ультразвуковых (УЗ) пучков.

Общие соотношения для распространения акустических пучков в кубических центросимметричных кристаллах с высокой диэлектрической проницаемостью во внешнем поле

Вектор смещения $\mathbf{A}(\mathbf{r},t)$ пучка ультразвукового излучения в кристалле представим в виде волны:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r},t) = \\ = \left\{ (2\pi)^{-2} \int d\mathbf{q} A(\mathbf{q}) \mathbf{a}(\mathbf{q}) \exp i \left[(\mathbf{r} - \mathbf{U}t)\mathbf{q} - \frac{t}{2}\mathbf{q}\mathbf{w}\mathbf{q} - \frac{t}{6}\mathbf{q}\mathbf{W}\mathbf{q}\mathbf{q} \right] \right\} \exp i[\mathbf{k}_0\mathbf{r} - \omega_0 t], \quad (1)$$

пространственно-временная зависимость амплитуды которой определяется групповой скоростью $\mathbf{U} = \partial\omega / \partial\mathbf{k}$ и ее производными $\mathbf{w} = \partial\mathbf{U} / \partial\mathbf{k}$, $\mathbf{W} = \partial^2\mathbf{U} / \partial\mathbf{k}\partial\mathbf{k}$. В выражении (1) ω_0 и $\mathbf{k_0} = (\omega_0 / V_0)\mathbf{n_0}$ – частота и соответствующий волновой вектор центральной волны пучка; $\mathbf{n_0}$ – единичный вектор волновой нормали центральной волны; V_0 – фазовая скорость волны в направлении оси пучка; $\mathbf{q} = \mathbf{k} - \mathbf{k_0}$, $\mathbf{a}(\mathbf{q})$ – вектор поляризации. Используемое в (1) приближение применимо для слабо расходящихся пучков, для которых спектр пространственных частот локализован вблизи $\mathbf{n_0}$. Групповая скорость U и ее производные w, W определяются непосредственно из характеристического

(дисперсионного) уравнения, которое для механически свободного кристалла во внешнем электрическом поле имеет вид [7]:

$$\begin{gathered}\det \mathbf{L}=0,\ \mathrm{L}_{il}=\Lambda_{il}-V^2\delta_{il},\quad \Lambda_{il}=\Lambda_{il}^0+\Lambda'_{il},\ \Lambda_{il}^0=c_{iklm}n_k n_m/\rho,\\ \Lambda'_{il}\cong R_i R_l/(4\pi\rho\mathbf{n}\varepsilon\mathbf{n})-\beta_{il}/(8\pi\rho),\ R_i=g_{rsik}E_r n_k n_s,\ \beta_{il}=d^*_{rsiklm}E_r E_s n_m n_k,\\ d^*_{rsiklm}=\widehat{d}_{rsiklm}-c_{iklmnq}s_{nqzt}g_{rszt}-c_{lmqk}s_{iqzt}g_{rszt}-c_{ikqm}s_{lqzt}g_{rszt}-\\ -c_{qnmk}\delta_{li}s_{nqzt}g_{rszt},\ \widehat{d}_{rsiklm}=2d_{rsiklm}-g_{rsim}\delta_{kl}.\end{gathered}\tag{2}$$

Здесь c_{iklm}, c_{iklmnq} – соответственно линейные и нелинейные упругие модули среды при постоянном электрическом поле; ρ – плотность среды; ε – ее диэлектрическая проницаемость; g_{rslk}, d_{rsiklm} – коэффициенты линейной и нелинейной электрострикции; s_{nqzt} – коэффициенты податливости; E_r – компоненты внешнего электрического поля; V – фазовая скорость акустической волны.

Электроиндуцированное формирование бездифракционных акустических пучков для квазипоперечных волн в кубических центросимметричных кристаллах

Рассмотрим, как влияет внешнее электрическое воздействие на распространение УЗ пучков в окрестности осей симметрии четвертого порядка кубических центросимметричных кристаллов с высоким значением диэлектрической проницаемости. Для этого определим, как изменяются поверхности волновых векторов. При этом для определенности полагаем, что вектор напряженности электрического поля **E** коллинеарен оси [100].

Можно показать, что градиент групповой скорости по волновому вектору оказывается умноженным на величину групповой скорости тензором кривизны поверхности волновых векторов. Поэтому для характеризации кривизны поверхности необходимо определить вектор U и его производную w. Считая электрическое возмущение малым, получим для фазовых скоростей $V_{1,2}$ квазипоперечных волн следующее выражение:

$$\begin{gathered}V_{1,2}^2=(c'_{44}+\mu_1E^2/2)+c\eta\theta^2/2\pm\frac{1}{2}\left[b^2c^2\theta^4+2bc\theta_2\delta_1\frac{1-N^2}{1+N^2}+\delta_1^2\right]^{1/2},\\ b=\sqrt{\eta-\sin^2 2\varphi(2\eta-1)},\ \ \eta=\frac{c'_{11}+c'_{12}}{c'_{11}-c'_{44}},\\ c=c'_{11}-c'_{12}-2c'_{44},\mu_1=\left(\rho\varepsilon^{-1}g'^2_{44}-d_5-d_6\right)/4\pi,\\ \delta_1=\mu E^2,\ \mu=\left(\rho\varepsilon^{-1}g'^2_{44}+d_5-d_6\right)/4\pi,\ N=\frac{\eta\cos 2\varphi-\sqrt{\eta^2-\sin^2 2\varphi(2\eta-1)}}{(1-\eta)\sin 2\varphi}.\end{gathered}\tag{3}$$

Здесь и ниже c'_{ij}, g'_{ij} – модули, отнесенные к плотности кристалла; $d_5 = d_{144}/\rho$, $d_6 = d_{155}/\rho$, θ – малый угол отклонения волновой нормали n от оси [001]; φ – азимутальный угол.

Дифференцируя (3) по компонентам волновой нормали и учитывая малость электроиндуцированной анизотропии в сравнении с естественной, можно получить следующие выражения для компонент групповой скорости $\mathbf{U}(U_1, U_2, U_3)$ квазипоперечных волн:

$$U_1 = \theta\cos\varphi\frac{a_1 \pm (a_2 - a_3\sin^2\varphi)/b \pm (\tilde{r}+r_1)\delta_1}{2V},$$
$$U_2 = \theta\sin\varphi\frac{a_1 \pm (a_2 - a_3\cos^2\varphi)/b \pm (\tilde{r}+r_2)\delta_1}{2V}, \quad U_3 = \tilde{c}_{44}/V. \tag{4}$$

Здесь

$$r_1 = \tilde{A}(2b_1\cos^2\varphi - b - \eta)\sin^2\varphi, \quad r_2 = \tilde{A}(2b_2\sin^2\varphi - b + \eta)\cos^2\varphi$$
$$b_1 = \frac{\eta^2 - 2(2\eta-1)\sin^2\varphi}{b}, \; b_2 = \frac{\eta^2 - 2(2\eta-1)\cos^2\varphi}{b},$$
$$\tilde{r} = \frac{t_2^2 - t_1^2}{t_2^2 + t_1^2}, \quad \tilde{A} = \frac{8t_1(1-\eta)^2}{t_2^2 + t_1^2}, \quad t_1 = \eta\cos 2\varphi - b, \; t_2 = (1-\eta)\sin 2\varphi, \tag{5}$$
$$a_1 = 2\tilde{c}_{44} + c\eta, \quad \tilde{c}_{44} = c'_{44} - d_5E^2/4\pi, \quad a_2 = c\eta^2, \; a_3 = 2c(2\eta - 1).$$

Наибольший интерес представляет случай параболических точек поверхности волновых векторов, для которых производная групповой скорости по волновому вектору равна нулю. В окрестности таких точек имеет место «выполаживание» указанной поверхности волновых векторов, что приводит к отсутствию дифракционной расходимости пучка, возбуждаемого в данном направлении плоским пьезопреобразователем. Воспользовавшись выражениями (4), (5), определим возможность существования подобных точек в рассматриваемом случае. Из соображений симметрии следует, что для направлений волновой нормали в плоскости (010) главные радиусы кривизны поверхности волновых векторов лежат в ортогональных плоскостях: один в этой же плоскости (010), а второй – в ортогональной к ней. При этом главные кривизны поверхности волновых векторов квазипоперечных волн (быстрой «+» и медленной «-») пропорциональны соответственно производным $\partial\theta_U/\partial\theta\big|_{\varphi=0}$ и $\partial\varphi_U/\partial\varphi\big|_{\varphi=0}$, где θ_U, φ_U – полярные координаты вектора групповой скорости. С использованием соотношения

$$\mathrm{tg}\theta_U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}/U_3 \tag{6}$$

получаем следующие выражения для главной кривизны поверхности в плоскости (010) соответственно быстрой и медленной квазипоперечных волн:

$$\partial\theta_U^+ / \partial\theta\Big|_{\varphi=0} = \sqrt{(1+c\eta / c'_{44})^2 + \mu E^2 / c'_{44}}, \quad \partial\theta_U^- / \partial\theta\Big|_{\varphi=0} = \sqrt{1-\mu E^2 / c'_{44}}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что для быстрой волны кривизна возрастает при $\mu > 0$ и уменьшается при $\mu < 0$. При условии

$$\left[c'_{11}(c'_{11}-c'_{44})-(c'_{12}+c'_{44})^2\right]^2 + \mu E^2 c'_{44}(c'_{11}-c'_{44})^2 = 0 \quad (8)$$

вблизи направления [001] в плоскости (010) существует параболическая точка, для которой $\partial\theta_U^+ / \partial\theta\Big|_{\varphi=0} = 0$. Таким образом, соотношение (8) определяет, при каком значении внешнего воздействия возможно бездифракционное распространения УЗ пучков в плоскости (010) вблизи направления [001]. Отметим, что данное явление возможно лишь для кристаллов, для которых $\mu < 0$.

Для медленных квазипоперечных волн бездифракционное распространение УЗ пучков может иметь место только при условии $\mu > 0$, причем при выполнении условия

$$\mu E^2 = c'_{44}. \quad (9)$$

Учитывая (4) и соотношение

$$tg\varphi_U = U_2 / U_1, \quad (10)$$

получаем главные кривизны в ортогональной к (010) плоскости:

$$\frac{\partial\varphi_U^{\pm}}{\partial\varphi}\Bigg|_{\varphi=0} = \frac{a_1 \pm \eta^{-1}(a_2-a_3) \pm 2\delta_1}{a_1 \mp \eta^{-1}a_2 \pm \delta_1}. \quad (11)$$

Из равенства нулю выражения (11) следует условие существования параболической точки соответственно для быстрой

$$\eta(\tilde{c}_{44}+c\eta) - c(2\eta-1) + \eta\mu E^2 = 0 \quad (12)$$

и медленной волн

$$\tilde{c}_{44}\eta + c(2\eta-1) - \eta\mu E^2 = 0. \quad (13)$$

Аналогично тому, как это было выполнено для плоскости (010), можно определить кривизны поверхности волновых векторов в диагональной плоскости параэлектрика вблизи оси симметрии [001]. При этом

$$\partial\theta_U^+ / \partial\theta\Big|_{\varphi=\pi/4} = [2\tilde{c}_{44}+c] / c'_{44}, \; \partial\theta_U^- / \partial\theta\Big|_{\varphi=\pi/4} = [2(c'_{44}+c\eta)-c] / 2c'_{44},$$
$$\partial\varphi_U^{\pm} / \partial\varphi\Big|_{\varphi=\pi/4} = 1 \pm \frac{2c(2\eta-1)}{(\eta-1)\left[2\tilde{c}_{44}+c\eta \pm c(\eta-1)\right]}. \quad (14)$$

Из равенства нулю выражений (14) следуют условия существования параболических точек на поверхности волновых векторов для быстрой

$$2\tilde{c}_{44} + c = 0,\ (\eta - 1)\left[2\tilde{c}_{44} + c(2\eta - 1)\right] + 2c(2\eta - 1) = 0 \qquad (15)$$

и медленной волн

$$2(\tilde{c}_{44} + c\eta) - c = 0,\ (\eta - 1)\left[2\tilde{c}_{44} + c(2\eta - 1)\right] - 2c(2\eta - 1) = 0\,. \quad (16)$$

Электроиндуцированная фокусировка квазипродольных волн

Рассмотрим теперь влияние внешнего электрического поля на кривизну поверхности волновых векторов для квазипродольной волны. Из-за деформации поверхности изменяется расходимость акустического пучка. Для характеризации такого изменения воспользуемся коэффициентом концентрации $A_l^{-1} = \left|\partial\Omega_{\mathrm{U}} / \partial\Omega_n\right|$ равного отношению потока энергии фононов, распространяющихся в кристалле, к потоку, который распространялся бы в изотропной среде. Для скорости квазипродольной волны в окрестности оси [001] получаем приближенное соотношение:

$$V_l(\theta) = V_l^o(1 - d_3 E^2 / (8\pi c'_{11})) - c\eta V_l^o \theta^2 / 2c'_{11}. \qquad (17)$$

Здесь $d_3 = d_{122} / \rho$, V_l^o – фазовая скорость продольной волны в направлении оси пучка, коллинеарной [001]. Из определения коэффициента концентрирования следует:

$$A_l^{-1} = [1 - d_3 E^2 / (8\pi c'_{11}) - c\eta / c'_{11}]^2. \qquad (18)$$

Тогда, как видно из соотношения (18), для кубических параэлектриков с положительной анизотропией ($c > 0$) воздействие поля увеличивает концентрацию продольных фононов вдоль оси [001]. Если же анизотропия отрицательна ($c<0$), то внешнее электрическое поле вызывает расфокусировку пучка фононов. При

$$E^2 = -8\pi c\eta / d_3 \qquad (19)$$

коэффициент концентрации равен единице, и акустический пучок распространяется, как и в изотропной среде.

Заключение

Таким образом, воздействие внешнего электрического поля на кубические центросимметричные кристаллы обусловливает деформацию поверхности волновых векторов и, как следствие, появление на ней параболических точек, соответствующих направлениям, вдоль которых оказывается возможным бездифракционное распространение пучков квазипоперечных УЗ волн. Кроме того, изменяя внешнее электрическое воздействие, можно управлять формой пучка продольных волн: фокусировать или расфокусировать его, а также реализовать случай, когда данный пучок распространяется как в изотропной среде.

Полученные соотношения могут быть использованы при моделировании пучков УЗ излучения, в том числе при получении самоканалирующихся пучков, в кубических кристаллах.

Библиографический список

1. *Shield T., Harris J.* An acoustic lens design using the geometrical theory of diffraction // J. Acoust. Soc. Am. 1984. Vol. 75. P.1634–1635.

2. *Huang D., Breazale M.* An ultrasonic gaussian transducer and its diffraction field // IEEE Transactions on Ultraconics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2006. Vol. 53. P. 1018–1027.

3. *Cebrecos A., Romero-Garcia V., Pico R.* Formation of collimated sound beams by three-dimensional sonic crystals. URL: arXiv:1111.6382 [cond-mat.mtrl-sci] (дата обращения: 12.03.2021).

4. *Noori M., Soroosh M., Baghban H.* Self-collimation in photonic crystals: applications and opportunities // Annalen der Physik. 2018. URL: https://doi.org/10.1002/andp.201700049 (дата обращения: 12.03.2021).

5. *Golovanov V., Shipilov K.* Collimation of acoustic radiation via zero-refraction-index 2D periodic structures // Acoustical Physics. 2020. Vol. 66. P. 257–261.

6. *Федоров Ф. И.* Теория упругих волн в кристаллах. М.: Наука, 1965. 386 с.

7. *Белый В. Н., Курилкина С. Н.* Электроиндуцированная коническая рефракция ультразвуковых волн в кубических параэлектриках // ФТТ. 1993. Т. 35. С. 2794–2801.

УДК 621.38.544.6

В. П. Ларин*
доктор технических наук, профессор
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛОСКИХ СВЕТОВОДОВ

Изложены материалы с решением задач, связанных с технологическим проектированием планарных полимерных световодов. Рассмотрены технологические операции, необходимые для получения световодов, встроенных в поверхность диэлектрической подложки. Выполнен анализ обеспечения минимальных светопотерь и помех при передаче световой волны по полимерному световоду. Изложена последовательность выполнения технологических операций по предлагаемому варианту наноимпритинга как способа получения встроенных полимерных световодов.
Ключевые слова: планарный световод, встроенный полимерный световод, технология изготовления, наноимпринтинг, уменьшение светопотерь.

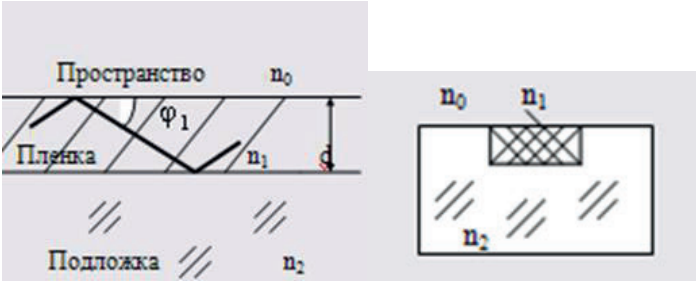
V. P. Larin*
Dr. Sc. Tech., Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

TECHNOLOGY FOR MAKING FLAT LIGHTS

Materials with solutions to the problems associated with the technological design of planar polymer light guides are presented. The technological operations necessary to obtain light-aid embedded in the surface of the dielectric substrate are considered. The analysis of providing minimal light loss and interference in the transmission of light waves through the polymer light. The sequence of technological operations on the proposed nanoinpriting variant is set out as a way to obtain embedded polymer lights.
Keywords: planar light guide, built-in polymer light guide, manufacturing technology, nanoimprinting, reducing light loss.

Введение

В интегральной оптике конструктивной основой многих устройств является планарный (двумерный) оптический световод. Планарный световод представляет собой плоский диэлектрический элемент, расположенный на диэлектрической подложке. Планарные пленочные световоды в настоящее время находят все большее применение на практике для передачи оптических сигналов. Основу пленочного световода (рис. 1) составляет диэлектрическая пленка с параметрами $\varepsilon_{пп}$ μ_0, выращенная на диэлектрической подложке или сформированная методами интегральной технологии. Пленку можно рассматривать как плоский диэлектрический световод, ограниченный подложкой и верхним покрытием. Для распространения волн по такому световоду необходимо, чтобы показатели преломления пленки, подложки и покрытия находились в следующих отношениях $n_1>n_2>n_0$.



а) *б)*

Рис. 1. Вид волны при полном внутреннем отражении в планарном световоде (а) и структура световода полоскового канального типа (б)

Если увеличить угол φ так, чтобы выполнялось условие полного внутреннего отражения от подложки, то наблюдается полное внутреннее отражение как от границы раздела «канал-подложка», так и от границы раздела «канал-покрытие». Световая волна, попавшая в канал, будет распространяться в нем по зигзагообразному пути (рис. 1а). Подобные световоды используются для передачи света в пределах оптической или оптоэлектронной подложки и в локальных линиях связи.

С позиции наиболее эффективной защиты канала от внешних факторов данный вариант рассматривается и развивается как перспективное направление проектирования световодов, внедряемых в поверхность подложки. В таких световодах при последовательном отражении волн света от поверхностей n_0 и n_2 возникают проблемы светопотери, имеют место помехи, различного рода деградации и др.

Цель

Целью публикации является изложение технологических решений по обеспечению неискаженного прохождения световой волны по световоду, а главной задачей – рассмотрение таких влияющих факторов, как свойства и параметры поверхности подложки и покрытия, возможные загрязнения, образующиеся при выполнении технологических операций.

Методы исследования

К методам, позволяющим сформировать световодные пленки непосредственно в подложке и рассмотренным в [1], относятся те, что основаны на диффузии, имплантации ионов, электрооптическом эффекте и др. Эти методы широко используются при создании планарных и канальных световодов интегрально-оптических (фотонных) устройств. В данной статье ограничимся рассмотрением только полимерных световодов, формируемых на подложках из керамики (включая LTCC-керамику), плавленого кварца, полиимида и на тонких

слоях карбида кремния (SiC), поликристаллического CVD-алмаза или графитовых пленках PGS.

LTCC-керамика выбрана в качестве основного материала подложек для формирования системы световодов в поверхности пластины. Объясняется это тем, что материал обладает стабильностью электрических и механических характеристик, гораздо более высокой теплопроводностью, по сравнению с альтернативными материалами, возможностью создания 3D-структур, а также низким коэффициентом температурного расширения, близким к коэффициентам основных полупроводниковых материалов электроники (Si, GaAs, InP). Это позволяет монтировать кристаллы непосредственно на подложку со световодами. Широкий диапазон технологий создания канальных углублений, сквозных и глухих проемов, отверстий для встраивания оптических и электронных активных и пассивных компонентов, делает подложки из LTCC базовым функциональным элементом.

Технологически важной является высокотемпературная стойкость керамики, что позволяет образовывать на поверхности оптические элементы как по тонко- , так и по толстопленочной технологии.

На выбор технологических операций влияют свойства выбираемых полимерных материалов [3]. Так, большинство полиимидов и поликарбонатов не фоточувствительны, что вызывает необходимость применения определенных технологий с использованием шаблона из фоторезиста и ионное травление. А фоточувствительные полимеры не требуют дорогостоящего оборудования и вспомогательных материалов и могут быть использованы в качестве фоторезиста, что позволяет значительно сократить время получения полимерных планарных структур по всем технологическим операциям.

Результаты исследования

В отличие от широко распространенных оптических сред, таких как оптическое стекло, монокристаллы, полимерные материалы являются привлекательными для создания систем с широкой полосой пропускания частот, с малым светорассеянием, устойчивых к динамическим нагрузкам. Полимерные световоды относительно дешевы и просты в изготовлении. Эти преимущества делают их незаменимыми для использования в локальных линиях связи, в качестве датчиков и индикаторов в рекламных и декоративных целях. Но реализация этих достоинств ограничена из-за высокого уровня светопотерь, потребовавших проведения исследований комплекса оптических и физико- механических характеристик полимерных световодов и технологий их изготовления. Проведен анализ по всей технологической цепочке изготовления полимерных световодных систем: материалы полимерного световода и подложки; технологии подготовки поверхности к нанесению полимерного слоя [2]; способы формирования канальной топологии световодной системы на подложке; технологии наполнения канальных образований полимерным материалом.

Потребовалось также рассмотрение специализированных комплексных технологий, примером которых может служить наноимпритная технология.

Обычно эти методы используются для изготовления субмикронных элементов или элементов, имеющих микронные размеры с высокими требованиями к точности. Например, планарные световоды имеют характерные размеры на уровне 5–10 мкм, но точность должна быть порядка 50 нм. Наноимпритная технология рассматривалась как вариант формирования полимерных световодных структур на кремниевых подложках в каналах, полученных с помощью CO_2 лазера. Типовая технология наноимпринтинга состоит из двух самостоятельных процессов: изготовления «инструмента» и непосредственного формирования полимерного рисунка на подложке. Изготовление «инструмента» – штампа с необходимой топологией применяется для получения гребенчатых («ребристых») и поверхностных наложенных световодов. Для рассматриваемого варианта канальных планарных световодов, показанных на рис. 1, форма наноимпритного штампа должна быть совершенно плоской, покрытой антиадгезионным составом для работы с полимером. Процесс образования полимерных каналов световодов начинается с нанесения на подложку тонкого слоя полимера. Полимер нагревается обычно до 90–100 ^{0}С, то есть до температуры, при которой полимер приобретает пластичность. Плоским штампом на полимерный слой оказывается давление с выдержкой в несколько минут, чтобы полимер мог заполнить каналы подложки (рис. 2). Для полиметилметакрилата рассмотрен режим стеклования около 105 °С, температура печати порядка 155 °С и давление – до 10 МПа.

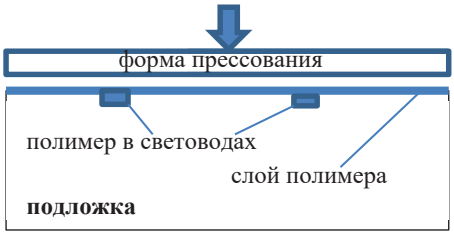


Рис. 2. Схема процесса формирования световодов

Так как после прессования на поверхности имеются остатки полимера, то для его удаления используется ионное травление поверхности, которое обеспечивает равномерное удаление полимера. В результате остатки тонкого слоя полимера будут удалены, а верхние границы заполненных полимером каналов сравняются с поверхностью подложки. Для придания требуемых свойств поверхностям световодов и подложки выполняются операции полировки и плазмохимической очистки. Вся полученная система световодов покрывается полиимидной пленкой или локально отдельные световоды.

Рассмотренные варианты технологических решений при проектировании подложек с планарными внедренными полимерными световодами показаны на рис. 3.

Использование электрохимической полировки и плазмохимической очистки позволяет устранить практически любые макроскопические дефекты и микродефекты, пыль или другие инородные включения, сравнимые или меньше длины волны.

Плазмохимические операции травления и осаждения на подложке могут быть использованы для формирования канальных световодов. Они связывают дискретные функциональные элементы оптической схемы в систему в соответствии со схемой.

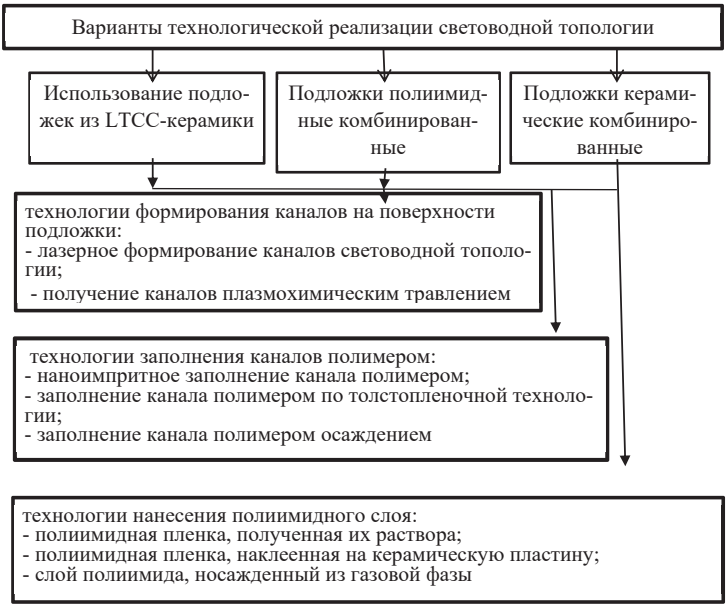


Рис. 3. Схема вариантов технологических операций для построения маршрута технологического процесса изготовления системы внедренных полимерных световодов на подложке

Например, интенсивная ионная бомбардировка поверхности подложки при плазмохимическом осаждении позволяет выполнить полное, без образования полостей, заполнение диэлектриком узких зазоров между гребенчатыми или накладными световодами, сформированными на поверхности, и получить световоды, внедренные в поверхность, как еще один вариант технологического решения для образования световодов, внедренных в поверхность подложки.

Заключение

Рассмотренный процесс технологического проектирования и решения ключевых задач формирования систем полимерных световодов, внедренных в

поверхность подложки, может быть использован при создании различных оптико-электронных устройств, а также при проектировании технологических систем, предназначенных для выполнения рассмотренных операций и построения маршрутной технологии.

Библиографический список

1. *Ларин В. П., Шелест Д. К.* Технологическое проектирование гибридных оптоэлектронных устройств // Датчики и системы. 2019. № 11. С. 25–32.

2. *Ларин В. П.* Технологии подготовки поверхности подложек оптико-электронных узлов // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Двадцать третья междунар. науч. конф. (СПб., 1–5 июня 2020 г.): сб. статей: в 2 ч. Ч. 2. СПб.: ГУАП, 2020. С. 92–102.

3. *Зубков А. И.* Структура и свойства полимерных световодов: автореф. дис. … доктора физ.-мат. наук / Инженер. центр полимер. оптических волокон. Тверь, 2000. 40 с.

УДК 629.735.33

С. Н. Манцевич*
кандидат физико-математических наук, доцент
К. Б. Юшков**
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
С. А. Третьяков****
кандидат физико-математических наук, доцент
*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
**Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС»
***Тверской государственный университет

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОПУСКАНИЯ КВАЗИКОЛЛИНЕАРНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

В работе проведен теоретический и экспериментальный анализ влияния температурных градиентов, появляющихся при функционировании квазиколлинеарных акустооптических (АО) фильтров, на их спектральное пропускание при реализации АО дифракции на одночастотной и линейно частотно-модулированной акустической волнах. Температурные градиенты и функции пропускания при дифракции на одночастотной ультразвуковой волне были измерены для различных мощностей ультразвука. Разработана теоретическая модель, основанная на уравнениях Рамана-Ната, учитывающая затухание ультразвука и неоднородность температуры в области АО взаимодействия.
Ключевые слова: акустооптическая дифракция, акустооптические фильтры, квазиколлинеарная геометрия, функция пропускания, АО дисперсионная линия задержки.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-12-00072.

S. N. Mantsevich*
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
K. B. Yushkov**
PhD Sc. Phys.-Math., Laading Reseacher
S. A. Tretiakov****
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
*M. V. Lomonosov Moscow State University
**National University of Science and Technology MISiS
***Tver State University

PECULIARITIES OF THE QUASICOLLINEAR ACOUSTO-OPTIC FILTERS SPECTRAL TRANSMISSION

A theoretical and experimental analysis of the temperature gradients effect on the quasicollinear acousto-optic (AO) filters spectral transmission is presented in this paper. The gradients appear during the AO filters operation. Two cases were considered: AO diffraction by single-frequency and linearly frequency-modulated acoustic waves. Temperature gradients and AO filter transmission functions for single frequency acoustic wave were measured for various ultrasound powers. A theo-

retical model was developed based on the Raman-Nath equations, taking into account the attenuation of ultrasound and inhomogeneous temperature distribution in the AO interaction area.
Keywords: acousto-optic diffraction, acousto-optic filters, quasicollinear geometry, transmission function, AO dispersion delay line.

Введение

Квазиколлинеарная акустооптическая (АО) дифракция в кристалле парателлурита (TeO_2) одновременно удовлетворяет требованиям высоких эффективности и спектрального разрешения. Максимальное спектральное разрешение может достигать почти 1 см$^{-1}$, а типичная мощность одночастотного ВЧ сигнала составляет около 10 мВт в видимом и ближнем ИК диапазонах. Это дает возможность реализовать эффективное функционирование АОПФ в многочастотном режиме.

Многочастотная дифракция в квазиколлинеарных АОПФ позволяет управлять спектром ультракоротких лазерных импульсов, а также имеет другие практические применения. Для получения высокого разрешения требуется большая длина взаимодействия, на практике она ограничена доступными размерами кристаллов TeO_2 (до 90 мм), затуханием и расходимостью ультразвуковых пучков.

Форма лазерного импульса изменяется посредством создания акустического поля с таким пространственным распределением частоты и амплитуды, что спектральные компоненты дифрагированного светового импульса задерживаются и масштабируются друг относительно друга. Спектр акустического сигнала должен быть согласован с шириной спектра лазерного импульса, а пиковая мощность одиночного ультразвукового импульса может достигать десятков ватт, для достижения высокой эффективности АО взаимодействия. Средняя же акустическая мощность в АО ячейке составляет несколько ватт. Такой величины акустической мощности достаточно для формирования неоднородного распределения температуры внутри АО ячейки.

В данной работе исследовано влияние градиентов температуры внутри кристалла TeO_2 на спектральное пропускание АОПФ. Градиенты возникают из-за тепловыделения в кристалле, сопровождающего возбуждение и распространение ультразвука. Анализ проведен для случаев одночастотной и частотно-модулированной акустических волн.

Квазиколлинеарная геометрия АО взаимодействия

Отличительной особенностью квазиколлинеарной геометрии АО взаимодействия является то, что волновой вектор падающего светового пучка коллинеарен вектору Пойнтинга акустической волны, что позволяет увеличить длину области АО взаимодействия.

Типичная схема квазиколлинеарного АОПФ приведена на рис. 1. Угол между направлением [110] в кристалле парателлурита и волновым вектором отраженной акустической волны **K** обозначен как α. Данный угол определяет свойства ультразвукового пучка (скорость V, угол сноса ψ, величину акустиче-

ской анизотропии среды), величину АО качества и спектральное разрешение, которое также зависит и от длины взаимодействия L.

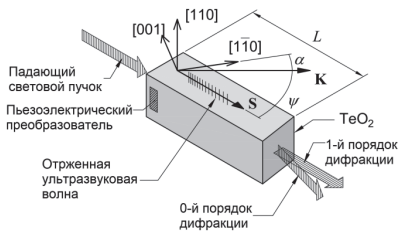


Рис. 1. Схема исследованного квазиколлинеарного АОПФ

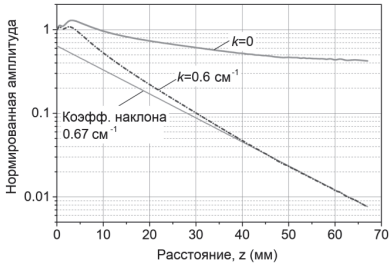


Рис. 2. Распределение амплитуды вдоль оси акустического пучка

В работе был изучен случай, когда α=1,8 °, при этом ψ=18,1 ° (падающее световое излучение направлено пол углом ≈20 ° к оси [110]), V=621 м/с при T=25 °С. Размеры АО ячейки: длина L=67 мм, ширина и высота 12,5 мм.

Условие брэгговского синхронизма связывает акустическую частоту f_c с длиной дифрагированной световой волны λ, при этом в выражение входит скорость акустической волны, зависящая от температуры среды взаимодействия (в нашем случае кристалла TeO_2). Таким образом, V и f_c являются функциями координат, определяемыми распределением $T=T(x, y, z)$. Температурный коэффициент скорости медленной акустической моды вдоль выбранного направления составляет dV/dT=0.098 (м/с)/К. Наибольшая температура в кристалле наблюдается около преобразователя, поскольку источниками тепла здесь являются сам преобразователь и объемное поглощение ультразвука в кристалле.

Влияние неоднородной температуры кристалла АО фильтра имеет две основные особенности. Первая – смещение дисперсионной кривой АО устройства. Вторая – искажение формы функции пропускания АО фильтра. Произвольные функции пропускания АОПФ получают с помощью ВЧ сигналов с амплитудной и фазовой модуляцией по длине АО кристалла. Таким образом, длина волны λ, соответствующая условию АО синхронизма, становится функцией координаты z. Простейший вариант модуляции ультразвука – линейная частотная модуляция (ЛЧМ).

Для определения формы функции пропускания АОПФ требуется решить систему уравнений Рамана-Ната с учетом неоднородного распределения температуры и амплитуды акустического поля. Расчеты структуры ультразвукового пучка проводились по оригинальной методике с учетом отражения акустического пучка от входной оптической грани АО ячейки. Полученное распределение амплитуды ультразвука вдоль оси пучка без поглощения и с его учетом представлено на рис. 2. Коэффициент затухания, включающий поглощение и дифракционные потери, составляет 0.67 см$^{-1}$ при больших значениях z.

Измерение распределения температуры в квазиколлинеарных АОПФ

Влияние температуры на характеристики квазиколлинеарной АО дифракции измерялось следующим образом, моделирующим тепловую нагрузку на АОПФ, и позволяющим в реальном времени измерять функции пропускания, при неоднородном нагреве АО кристалла. Источником света был одномодовый лазер с λ=1053 нм. Интенсивность дифрагированного света измерялась фотодиодом, подключенным к осциллографу.

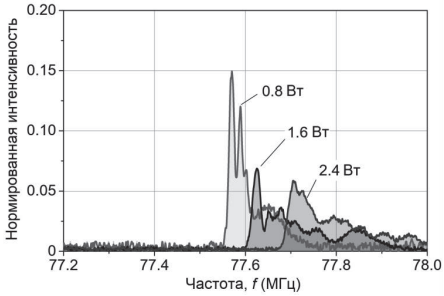


Рис. 3. Измеренные функции пропускания АОПФ, для λ=1053 нм и различных мощностей ультразвука

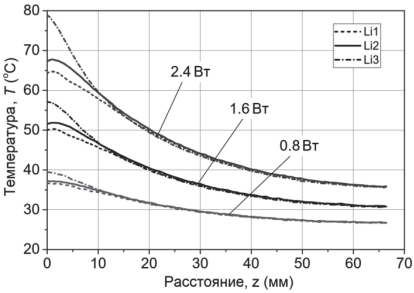


Рис. 4. Измеренные температурные профили для различных мощностей ультразвука, вдоль Li1-Li3

Выходной сигнал ВЧ генератора состоял из двух сигналов. Первый – ультразвуковая накачка с частотой 70 МГц (не участвует в АО взаимодействии) и мощностью, изменяемой от 0,8 до 2,4 Вт. Второй, с частотой, перестраиваемой от 77 до 78 МГц и мощностью 20 мВт, использовался для измерения функций пропускания.

Осциллограф, синхронизированный с генератором, обеспечивал прямое измерение функций пропускания. Температура кристалла контролировалась тепловизионной камерой.

Измерения функций пропускания проводились для трех значений мощности ультразвуковой накачки (0,8; 1.6 и 2,4 Вт), после установления стационарного неоднородного распределения температуры АОПФ. Результаты измерений приведены на рис. 3. С увеличением акустической мощности наблюдается все большее искажение функций пропускания, сопровождаемое их смещением по частоте и уменьшением максимальной эффективности АО взаимодействия.

Распределения температуры были измерены вдоль кристалла (рис. 4). Линии Li1 и Li3 отстоят на расстояние 5 мм от оси z, при этом Li2 совпадает с осью акустического пучка.

Моделирование функций пропускания квазиколлинеарных АОПФ

Экспериментальные данные измерений температуры были использованы при численном моделировании. Поскольку ВЧ импульс располагается в середине кристалла (т. е. около $z=L/2$), можно использовать одномерную модель и

профиль температуры вдоль Li2. Диаметр оптического пучка составлял 2 мм. Результаты численного моделирования функции пропускания АОПФ при акустических мощностях 0,8; 1.6 и 2,4 Вт, показаны на рис. 5.

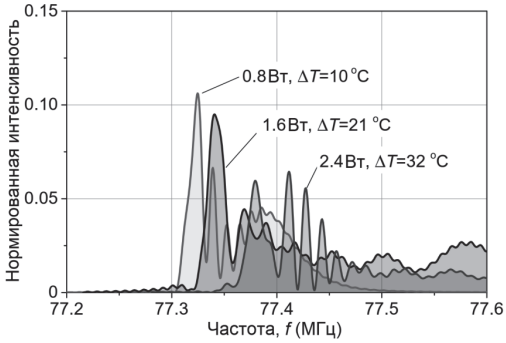


Рис. 5. Результаты расчета функций пропускания для различных значений акустической мощности

Искажения и эффективная ширина функции пропускания увеличиваются с мощностью ультразвука и величиной температурного градиента. Сравнивая зависимости на рис. 5 с экспериментальными результатами (рис. 3), можно отметить, они хорошо согласуются, несмотря сложный вид зависимостей. Таким образом, разработанный метод пригоден для расчета спектрального пропускания АОПФ даже в случае больших градиентов температуры и неоднородностей акустического поля.

ЧМ режим работы АОПФ обеспечивает широкую полосу одновременного выполнения условия фазового синхронизма, требуемую для обработки ультракоротких лазерных импульсов. Пусть что ЛЧМ ультразвуковой сигнал занимает половину длины АОПФ, а спектр лазерного импульса имеет ширину 20 нм (от 1043 до 1063 нм с центральной длиной волны 1053 нм). Эта полоса, для α=1,8 °, соответствует частотам ультразвука между 78.139 и 76.547 МГц при температуре кристалла T=25 °C. Следовательно, можно пренебречь влиянием частоты ультразвука на структуру акустического поля в АО кристалле и использовать результаты расчета для $f=f_c$ (рис. 2).

Влияние неоднородности акустического поля и температурных градиентов было изучено раздельно для ультразвуковых ЛЧМ импульсов с положительным и отрицательным чирпом. Для расчета пропускания АОПФ уравнения Рамана-Ната решались для длин волн оптического излучения в диапазоне от 1035 до 1080 нм. Центральная частота ультразвука соответствует частоте f_c для λ=1053 нм.

Результаты моделирования пропускания АОПФ (рис. 6а, б) демонстрируют влияние затухания ультразвука в кристалле. В обоих случаях температура кристалла АО однородна и составляет 25 °C. Моделирование в случае одно-

родного акустического поля проводилось при параметре Рамана-Ната qL=10 π, при учете акустической анизотропии и затухания qL=50 π. Максимальная эффективность АО взаимодействия достигается только для компонент оптического спектра, дифрагирующих в хвосте акустического импульса, где амплитуда максимальна. Таким образом, при работе АОПФ в ЛЧМ режиме простое увеличение мощности акустического сигнала не может компенсировать влияние сложного распределения амплитуды ультразвукового пучка. Коррекция амплитуды должна быть обратной к ее распределению, изображенному на рис. 2.

Влияние температурного градиента на пропускания АОПФ при ЛЧМ модуляции показано на рис. 6в, г. Моделирование проводилось для различных уровней акустической мощности в предположении, что распределение амплитуды ультразвука в импульсе однородно и соответствует qL=10π.

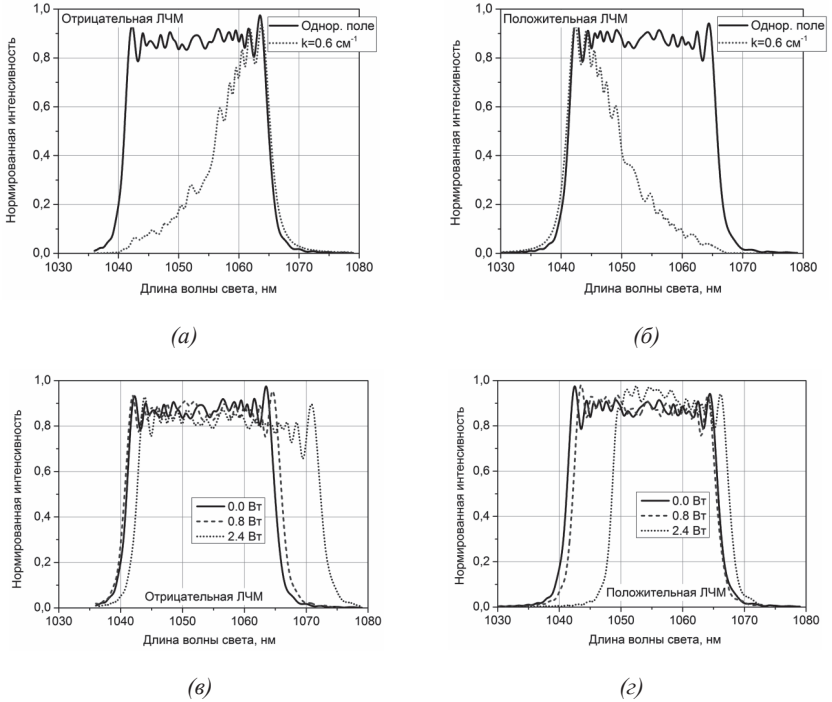


Рис. 6. Моделирование пропускания АОПФ для полосы шириной 20 нм с центральной длиной волны 1053 нм: (а, б) неоднородная амплитуда и постоянная температура; (в, г) однородная амплитуда и неоднородная температура

Наличие температурных градиентов изменяет полосу пропускания. Высокие и низкие температуры в кристалле соответствуют противоположным частотам для ЛЧМ импульсов с положительным и отрицательным чирпом. Наибольший сдвиг для ЛЧМ с отрицательным чирпом (рис. 6в) наблюдается

для самых низких частот ультразвука, что соответствует длинноволновой части полосы пропускания. В результате ширина полосы пропускания увеличивается (максимально на 25 %). Противоположная ситуация имеет место для ЛЧМ с положительным чирпом (рис. 6г) здесь смещается коротковолновая граница, а полоса пропускания сужается (на 21 %).

Влияние температурных градиентов на ширину полосы пропускания АОПФ можно компенсировать при пересчете зависимости $\lambda(f_c)$. Компенсация будет различной для ЛЧМ импульсов с положительным и отрицательным чирпом. Более высокие частоты приобретают больший сдвиг частоты для импульса с положительной ЛЧМ и меньший сдвиг для импульса с отрицательной ЛЧМ. Также существует небольшая разница в значениях частотной коррекции между ЛЧМ импульсами с положительным и отрицательным чирпом, и эта разница увеличивается с градиентом температуры.

УДК 534-16

М. В. Марунин*
студент
Н. В. Поликарпова*
кандидат физико-математических наук, доцент
*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУМЕРНЫХ ФОНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ПЛАВЛЕНОГО КВАРЦА

В работе проведено исследование акустических свойств двумерных фононных кристаллов на основе плавленого кварца. Цель работы – оценка возможности использования фононных кристаллов при создании акустооптических устройств. С помощью метода конечных элементов рассчитаны дисперсионные зависимости акустических волн в фононном кристалле. Получены сечения поверхностей обратных фазовых скоростей акустических волн. Представлены распределения углов сноса акустической энергии. Рассмотрено влияние геометрических параметров фононного кристалла на распределение его акустических характеристик.
Ключевые слова: фононный кристалл, дисперсионное соотношение, фазовая скорость, угол акустического сноса энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 19-12-00072.

M. V. Marunin*
Student
N. V. Polikarpova*
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
*M. V. Lomonosov Moscow State University

ACOUSTIC PROPERTIES OF TWO-DIMENSIONAL PHONONIC CRYSTALS BASED ON FUSED SILICA

We examine acoustic properties of two-dimensional squire-lattice phononic crystals based on fused silica. The analysis is carried out in order to assess a possibility of using phononic crystals in acousto-optic devices. Dispersion relations of acoustic waves were computed with the finite element method. It was found that at relatively low frequencies, there are always three acoustic modes propagating inside a phononic crystal. Cross sections of acoustic slowness surfaces were calculated by considering dispersion relations. Angular distributions of acoustic energy walk-off angle are shown. The influence of the unit cell parameters on the acoustic characteristics of a phononic crystal is considered.
Keywords: phononic crystal, dispersion relation, phase velocity, acoustic energy walk-off angle.

Актуальной задачей акустооптики на сегодняшний день является поиск новых эффективных материалов. Среди распространенных и перспективных сред можно выделить монокристаллы парателлурита (TeO_2), теллура (Te), ниобата лития ($LiNbO_3$), а также различные соединения ртути [1]–[3]. Данные материалы известны сильной анизотропией акустических свойств, которая приводит к рекордно большим значениям углов акустического сноса энергии. В

кристалле парателлурита, в частности, величина угла сноса энергии может достигать 74 [4]. Обращают на себя внимание и чрезвычайно низкие значения фазовой скорости акустических волн, распространяющихся вдоль особых направлений в данных материалах. Так, минимальное значение фазовой скорости акустических волн, распространяющихся в кристалле йодида ртути (HgI_2), составляет V=247 м $с^{-1}$. Указанные акустические свойства материалов являются уникальными и могут быть использованы при создании новых акустооптических устройств.

Параметры акустической волны, распространяющейся в кристалле, определяют эффективность акустооптического взаимодействия. Известно, что интенсивность дифрагированного излучения обратно пропорциональна кубу фазовой скорости акустических волн [5]. Поэтому в акустооптике преимущественно используются низкоскоростные материалы. В то же время важное значение имеет и анизотропия физических свойств среды. Для создания и реализации новых конфигураций акустооптических устройств необходимы материалы с сильной акустической анизотропией. Круг известных материалов, интересных для потенциальных применений, невелик. В настоящее время ведется активная работа по поиску новых материалов.

Физические свойства монокристаллических материалов фиксированы и не могут быть изменены, а значит, в таких материалах невозможно изменить величину акустооптического эффекта. Поэтому следующим этапом развития акустооптики является создание и использование новых анизотропных искусственных структур, свойства которых можно было бы менять в зависимости от конкретных поставленных целей. В качестве таких новых структур могут выступать акустические метаматериалы, например фононные кристаллы.

Фононный кристалл представляет собой периодическую структуру, состоящую из материалов с различными акустическими свойствами [6]. Распространение акустических волн в подобном кристалле описывается дисперсионным соотношением, также известным как зонная структура. Важной особенностью зонной структуры является наличие запрещенных зон, представляющих собой области частот, в которых распространение акустических волн запрещено. Данная особенность фононных кристаллов на сегодняшний день является ключевой в исследовании этих материалов. Однако периодическая природа фононных кристаллов приводит к появлению ряда других особенностей, таких как сильная акустическая анизотропия материала, низкие значения фазовых скоростей акустических волн, а также большие углы акустического сноса. При этом наличие периодичности и варьирование параметров фононного кристалла позволяют искусственно навязывать различные акустические свойства даже материалам, которые являются изотропными. Таким образом, данная работа является теоретическим исследованием двумерных фононных кристаллов на основе плавленого кварца. Работа проведена с целью оценки возможности использования фононных кристаллов в акустооптических устройствах.

В работе рассмотрен двумерный фононный кристалл, трехмерная структура которого изображена на рис. 1а. Данный материал представляет собой образец плавленого кварца, в котором периодически расположены сквозные цилиндрические отверстия, заполненные воздухом. На рис. 1б представлена элементарная ячейка рассматриваемого фононного кристалла. Величина a определяет длину ячейки, в то время как d определяет диаметр отверстия. В работе фононный кристалл считался бесконечной идеально периодической средой. Мы также предположили, что распространение акустических волн в фононном кристалле происходит только в плавленом кварце. Возбуждением и распространением акустических волн в цилиндрических отверстиях можно пренебречь, ввиду относительно малого акустического импеданса воздуха. При этом материал плавленого кварца считался идеальной средой, и потери на распространение акустических волн не учитывались.

Акустические характеристики фононного кристалла были получены путем рассмотрения его зонной структуры. Расчет дисперсионных зависимостей был проведен согласно [7]. С использованием теоремы Блоха, динамические уравнения распространения упругих волн в среде могут быть сведены к вариационной форме вида:

$$\int_{\Omega} S_I^*(v) c_{IJ} S_J(\tilde{u}) dr = \omega^2 \int_{\Omega} \rho \left(v^* \cdot \tilde{\mathbf{u}} \right) dr, \qquad (1)$$

где $\tilde{\mathbf{u}}(\mathrm{r})$ – вектор смещения, определяющий амплитуду и поляризацию акустической моды, распространяющейся в фононном кристалле; $v(r)$ – произвольная тестовая функция, необходимая для решения задачи методом конечных элементов; S_{I} – компоненты вектора деформации; c_{IJ} и ρ – модули упругости и плотность плавленого кварца; $\omega=2\pi f$ – круговая частота акустической волны. Индексы I, J принимают значения от 1 до 6 и подчиняются соглашению Эйнштейна. Интегрирование ведется по области Ω элементарной ячейки, занимаемой плавленым кварцем.

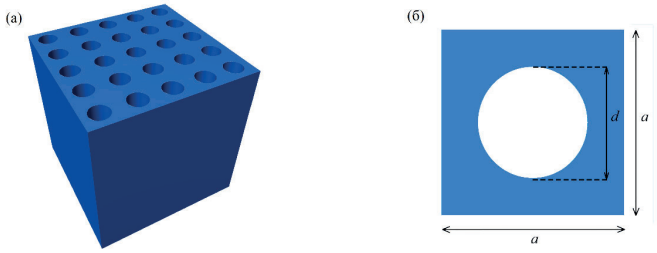


Рис. 1. Двумерный фононный кристалл на основе плавленого кварца: а – трехмерная физическая модель; б – элементарная ячейка

Интегральное уравнение (1) является обобщенной задачей на поиск собственных функций и собственных значений. Собственными значениями в данном случае является величина $\lambda=\omega^2$. Собственные вектора $\tilde{u}_\lambda$ задают вектор

поляризации акустических мод частоты ω. Компоненты вектора деформации S_I явно зависят от волнового вектора k [7]. Таким образом, изменяя значение волнового вектора в пределах первой зоны Бриллюэна и решая интегральное уравнение (1) для каждого отдельного значения волнового вектора, можно получить дисперсионную зависимость ω(k).

В данной работе при расчете акустических свойств фононного кристалла, модули упругости и плотность плавленого кварца считались равными c_{11}=7,85·10^{10} Па, c_{12}=1,61·10^{10} Па и ρ=2203 кг·м$^{-3}$. Постоянная решетки фононного кристалла была выбрана *a*=10 мкм. Распределение акустических характеристик фононного кристалла, как будет показано далее, существенно зависит от геометрического коэффициента подобия d/a элементарной ячейки. Несмотря на то, что теоретически отношение d/a может быть сколь угодно близким к единице, максимальное значение этой величины, рассмотренное в работе, составляет 0,8.

На рис. 2 представлена зонная структура фононного кристалла в случае, когда *d/a*=0,8. Дисперсионные зависимости ω(*k*), полученные методом конечных элементов, представлены на рис. 2а. Показаны только первые три дисперсионные поверхности,

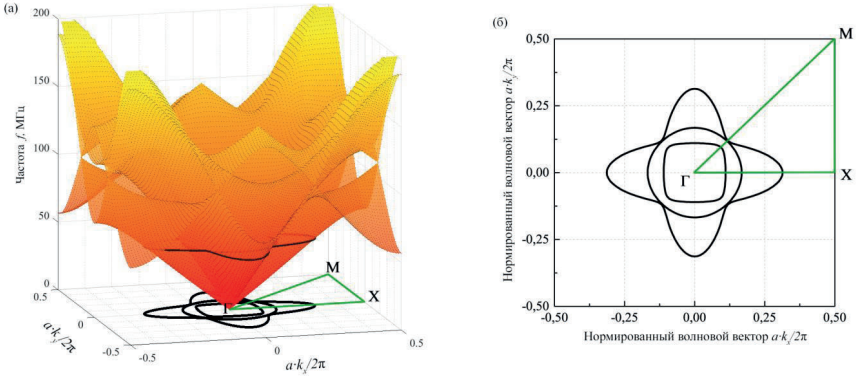


Рис. 2. Зонная структура двумерного фононного кристалла с нормированным диаметром отверстия d/a=0,8: а – три первые дисперсионные поверхности, рассчитанные методом конечных элементов; б – линия контура дисперсионных поверхностей при изочастоте f0=50 МГц

трем различным акустическим модам, лежащим в области частот до 200 МГц. Поверхности более высоких порядков лежат выше этой частоты 200 МГц. Запрещенные зоны при такой геометрии кристалла, как видно из рис. 2, отсутствуют. Первые три поверхности исходят из центра первой зоны Бриллюэна. В области частот до 50 МГц эти поверхности взаимно-однозначны, монотонны и не пересекаются друг с другом. При частотах выше 50 МГц поверхности становятся немонотонными, а при частотах более 100 МГц вторая

и третья поверхности начинают пересекаться друг с другом. Такая сложная структура объясняется относительно высоким значением отношения d/a. Из рис. 2а также видно, что дисперсионные поверхности симметричны относительно первой неприводимой зоны Бриллюэна Г-Х-М, что объясняется симметрией фононного кристалла.

Изочастотная линия контура частоты f_0 дисперсионной зависимости задает сечения поверхностей обратных фазовых скоростей акустических волн [8]. В акустооптическом устройстве такой изочастотой f_0 является частота ультразвука, задаваемая пьезопреобразователем. На рис. 2б представлена изочастотная линия контура дисперсионных поверхностей для случая f_0=50 МГц. Как и дисперсионные поверхности, изочастотные линии симметричны относительно первой неприводимой зоны Бриллюэна Г-Х-М. Для изочастот f_0 меньше 50 МГц, линии контура каждой отдельной акустической моды являются замкнутыми кривыми. При изочастотах f_0 больше 50 МГц, когда дисперсионные поверхности становятся немонотонными, линии контура становятся кусочно разрывными линиями. Расчет акустических характеристик при столь больших изочастотах требует отдельного дополнительного анализа. В работе рассмотрен случай, когда изочастота f_0=50 МГц.

На рис. 3 представлено сравнение сечений поверхности акустической медленности сплошного изотропного материала плавленого кварца и фононного кристалла при различных значениях d/a. Известно, что в случае сплошного изотропного плавленого кварца, сечения поверхностей медленности представляют собой пару окружностей, как представлено на рис. 3а. Соответствующие фазовые скорости акустических волн равны $V_{\perp}$=3763 м с$^{-1}$ и $V_{\parallel}$=5969 м с$^{-1}$. При этом в среде распространяются две поперечные акустические моды с фазовой скоростью $V_{\perp}$ и одна продольная акустическая мода с фазовой скоростью $V_{\parallel}$. Поляризации этих трех мод взаимно-перпендикулярны. На рис. 3б–д представлены сечения акустических медленностей фононного кристалла для различных значений геометрического фактора элементарной ячейки *d/a*.

Представленные результаты позволяют проследить за динамикой изменения распределения обратных фазовых скоростей при изменении нормированного диаметра отверстий d/a. Видно, что при уменьшении этого отношения, кривые медленностей в фононном кристалле стремятся к распределению обратных скоростей сплошного изотропного плавленого кварца. Было получено, что изменение изочастоты f_0 в широком диапазоне частот до 50 МГц практически не отражается на виде и численных значениях распределений обратных фазовых скоростей. Это согласуется с тем фактом, что на низких частотах дисперсионная зависимость имеет линейный характер.

Особый интерес представляет сечение поверхностей акустической медленности, которому соответствует нормированный диаметр отверстий равный *d/a*=0.8. Указанное сечение выделяется сильной анизотропией фазовых скоростей акустических волн. Максимальная и минимальная фазовые скорости медленной акустической моды составляют V_{min}=1594 м с$^{-1}$ и V_{max}=2976 м с$^{-1}$.

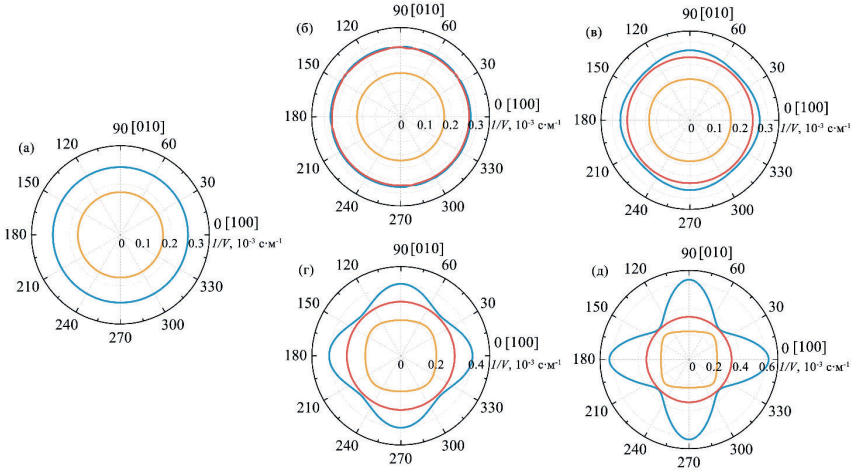


Рис. 3: а – кривые обратных фазовых скоростей в изотропном материале плавленого кварца; Кривые обратных фазовых скоростей в фононном кристалле; б – d/a=0,2; в – d/a=0,4; г – d/a=0,6; д – d/a=0,8

Коэффициент анизотропии этой медленной акустической моды, определяемый как квадрат отношения максимальной и минимальной фазовой скорости, составляет χ=3,5. Таким образом, искусственное введение периодичности позволяет не только уменьшать фазовую скорость медленной акустической волны сплошного изотропного плавленого кварца $V_{\perp}$=3763 m/s в несколько раз, но также приводит к сильной анизотропии фазовой скорости акустической волны.

Вторая поперечно-поляризованная мода сплошного изотропного плавленого кварца остается изотропной. Фазовая скорость этой моды, однако, уменьшается до значения V_{iso}=2985 м с$^{-1}$. Расчеты показывают, что данная мода поляризована вдоль оси цилиндрических отверстий. При увеличении нормированного диаметра отверстий, продольно-поляризованная мода сплошного изотропного плавленого кварца начинает принимать форму квадрата. Фазовая скорость этой моды также уменьшается с ростом величины d/a, а минимальное значение составляет V_{min}=3759 м с$^{-1}$. Коэффициент анизотропии этой быстрой акустической моды составляет χ=1,46. Поляризация этой моды имеет сложный характер, однако она всегда перпендикулярна поляризации медленной акустической моды фононного кристалла.

Явный вид кривых акустической медленности позволяет найти угол акустического сноса энергии ψ. Угол акустического сноса между вектором Пойнтинга и вектором фазовой скорости акустической волны может быть найден [5] как:

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{1}{s}\frac{ds}{d\varphi}\right), \qquad (2)$$

где величина $s=1/V$ – акустическая медленность.

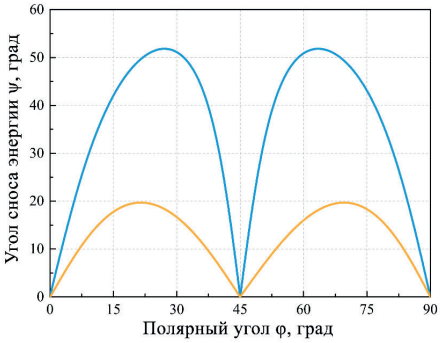


Рис. 4. Угловое распределение угла акустического сноса энергии в фононном кристалле с нормированным диаметром отверстий d/a=0,8

На рис. 4 показано угловое распределение угла сноса, соответствующее кривым акустической медленности, представленным на рис. 3е. Показаны быстрая (синим) и медленная (оранжевым) акустические моды фононного кристалла. Угол сноса изотропной моды фононного кристалла равен нулю для всех направлений распространения акустической волны. Максимальное значение угла сноса быстрой моды фононного кристалла составляет $\psi=19{,}5$ для полярного угла $\varphi=22$. Максимальное значение угла сноса медленной акустической моды $\psi=51{,}5$ достигается при $\varphi=27$. Данное значение достаточно высокое, и лишь ограниченное число монокристаллических материалов обладают столь высокими значениями угла акустического сноса.

Таким образом, в работе показано, что даже в простейшем случае, когда управляющим средой является изотропный материал, фононные кристаллы проявляют необычные акустические свойства, которые могут быть использованы в акустооптических устройствах. Рассмотрение более сложных вариантов фононных кристаллов, когда в качестве управляющего материала выступают анизотропные среды, является целью дальнейших исследований. Актуальным также остается исследование свойств фононных кристаллов на высоких частотах акустических волн, при которых дисперсионные поверхности имеют не однозначный и немонотонный характер.

Библиографический список

1. *Voloshinov V., Nikitin P., Trushin A.* AcoustoOptic Cell Based on Paratellurite Crystal with Surface Excitation of Acoustic Waves // Tech. Phys. Letters. 2011. 37. N 8. P. 754–756.

2. *Voloshinov V., Khorkin V., Kulakova L.* Optic, acoustic and acousto-optic properties of tellurium in close-to-axis regime of diffraction // J. Phys. Commun. 2017. 1. N 2. P. 1–10.

3. *Sarabalis C.* Acousto-optic modulation in lithium niobate on sapphire // APL Photonics. 2020. 5. P. 086104-1–086104-8.

4. *Voloshinov V., Polikarpova N.* Acousto-optic investigation of propagation and reflection of acoustic waves in paratellurite crystal // ApP. Opt. 2009. 48. N 7. P. C55–C66.

5. *Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.

6. *Liu J., Guo H., Wang T.* A Review of Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals // Crystals. 2020. 10. N 4. P. 1–26.

7. *Laude V.* Phononic Crystals. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2015.

8. *Wang Y., Maznev A., Laude V.* Formation of Bragg Band Gaps in Anisotropic Phononic Crystals Analyzed With the Empty Lattice Model // Crystals. 2016. 6. N 5. P. 1–12.

УДК 629.735.33

М. Г. Мильков*
физик 1-й категории
*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

ПОДБОР СОСТАВА АКУСТИЧЕСКОЙ СКЛЕЙКИ ДЛЯ ПРОПУСКАНИЯ СДВИГОВЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

В работе исследованы характеристики пропускания сдвиговой ультразвуковой волны через акустическую склейку на основе сахара и глицерина. Измерения коэффициента пропускания проведены акустооптическим способом для трех различных пропорций компонент исследуемого состава.
Ключевые слова: акустика, акустический контакт, акустическая склейка, сдвиговая ультразвуковая волна, метод Диксона, акустооптика.

Работа выполнена по гранту РНФ 19-12-00072.

M. G. Milkov*
Physicist of the 1t kat
*M. V. Lomonosov Moscow State University

SELECTION OF THE COMPOSITION OF ACOUSTIC BONDING FOR TRANSMISSION OF SHEAR ULTRASONIC WAVES

The paper investigates the transmission characteristics of a shear ultrasonic wave through an acoustic gluing based on sugar and glycerin. The transmittance was measured using the acousto-optic method for three different proportions of the components of the composition under study.
Keywords: acoustics, acoustic contact, acoustic bonding, shear ultrasound wave, Dixon's method, acousto-optics.

Введение

При проведении многих экспериментальных исследований, (например, при измерении скорости распространения ультразвука (УЗ) в той или иной твердой среде или измерении коэффициента акустооптического (АО) качества материала) проблема пропускания ультразвуковой волны из одной среды в другую с последующим демонтажем акустического соединения появляется довольно часто. В данной работе речь пойдет о такой ситуации, когда требуется не только осуществить эффективный переход сдвиговой акустической волны из одного твердого тела в другое, но и важна возможность разъединить эти два тела без существенных трудностей и повреждений. Для осуществления такого пропускания используются различные варианты материала, который часто называют акустической склейкой [1]. В случае пропускания продольной ультразвуковой волны в качестве эффективной и легко демонтируемой акустической склейки могут быть использованы такие составы, как глицерин, масло, эпоксидная смола без отвердителя и другие.

Проблема акустического контакта для продольной волны не является значительной, так как физические особенности продольных волн не приводят к

заметному снижению их интенсивности в тонком слое склейки даже при высоких частотах волны. Что же касается сдвиговых акустических волн, то эффективность прохождения волны из одного твердого тела в другое зависит от множества факторов, главным из которых является твердость материала склейки. Акустический контакт на основе индиевой сварки, применяемый, например, в большинстве АО устройств, с высокой эффективностью проводит сдвиговую УЗ волну, однако он сложен в изготовлении и не дает возможности разъединить поверхности. Использование склейки на основе двухкомпонентного высокотемпературного эпоксидного компаунда тоже показывает свою высокую эффективность [2], но процесс соединения поверхностей этим составом также весьма непрост, а разъединение поверхностей требует для растворения склейки значительных затрат времени и применения определенных растворителей.

Также могут быть использованы склейки на основе органических кристаллов, таких как салол, анестезин, стильбен и др. [3]. Использование данных типов склеек требует их нагрева до температуры плавления и нанесения на склеиваемые поверхности. Температуры плавления салола, анестезина и стильбена равны, приблизительно 30, 100 и 140 С. К недостаткам данных видов склеек можно отнести то, что они имеют заметно отличающиеся коэффициенты температурного расширения по сравнению со многими кристаллами, что может приводить к разрушениям поверхности.

Амплитуда и фаза ультразвуковой волны, проходящей через плоскую границу между твердыми телами, полностью задается граничными условиями. Два главных параметра плоской границы, на которые возможно непосредственно оказывать влияние, – это сила прижима и характер трения. Именно они определяют, какая часть энергии отразится или перейдет в волну с другой поляризацией, потратится на генерацию гармоник, уйдет в тепловые потери. Изменяя силу прижима поверхностей при помощи приложения внешней силы либо меняя характер их трения при помощи добавления смазки, можно добиться сильного изменения амплитуды прошедшей волны [4]–[5].

Акустическая склейка на основе сахара и глицерина и акустооптический метод измерения ее эффективности

В [6] были проведены измерения эффективности прохождения сдвиговой ультразвуковой волны с частотой от 30 до 110 МГц через акустическую склейку из одного образца плавленого кварца в другой. Исследования проводились для двух материалов склеек – склейки Shear Gel фирмы Sonotech и склейки из смеси на основе сахара и глицерина, приготовленной определенным способом. Коэффициенты прохождения, отражения и поглощения сдвиговой ультразвуковой волны измерялись акустооптическим способом. Известно, что в акустооптическом эффекте при выполнении условия фазового синхронизма Брэгга интенсивность дифрагированного света при слабой эффективности дифракции пропорциональна интенсивности ультразвуковой волны и коэффициенту акустооптического качества материала M_2 [7].

В качестве референсного материала в [6] использовались две акустооптические ячейки (буфера) на основе плавленого кварца. Пьезоэлектрические преобразователи АО ячеек генерировали сдвиговую ультразвуковую волну в диапазонах 30–60 МГц на в одной ячейке и 60–110 МГц в другой. Через исследуемую склейку к референсной среде присоединялся другой образец из плавленого кварца, грани которого были обработаны таким образом, чтобы через него также можно было пропустить луч от лазера. Присоединение второго образца осуществлялось после нанесения на грань буфера небольшого количества исследуемой склейки и небольшого притирания образца, который прижимался к буферу винтом. Обе среды были выбраны из одного и того же материала для того, чтобы фактор разных коэффициентов акустооптического качества M_2 исключался.

Схема установки является классической для многих акустооптических измерений. Ультразвуковая волна заданной частоты f в данной системе генерировалась в импульсном режиме. Далее акустический импульс попадал по нормали на склейку, разделялся на прошедший и отраженный импульсы, а также частично поглощался. Система регистрации (на основе ФЭУ) дифрагированных на этих акустических импульсах световых пучков была синхронизирована с импульсами ультразвука. Измерение интенсивности дифрагированного света проводилось при выполнении условия синхронизма Брэгга и давало данные про интенсивность падающего, прошедшего и отраженного пучков ультразвука в относительных единицах.

Измерение коэффициента пропускания склейки Shear Gel фирмы Sonotech в [6] показало, что через нее сразу после присоединения образца проходит около 30 % интенсивности от падающей сдвиговой ультразвуковой волны во всем исследуемом диапазоне частот, и этот показатель становится немного ниже через несколько часов. Что же касается интенсивности отраженной волны, то она составляла около 50–60 % от падающей волны и через несколько часов ее доля немного увеличивалась.

Наибольший в упомянутой выше работе интерес представляют результаты исследования склейки на основе сахара и глицерина, который был взят у коллег, использующих его в акустических экспериментах. Измерения характеристик взятого состава показали, что коэффициент пропускания ультразвука данной склейкой растет с течением времени и за несколько часов может увеличиться более чем вдвое. Непосредственно после склеивания через такой акустический контакт проходит около 30–35 %, отражается и поглощается около трети интенсивности падающей ультразвуковой волны во всем диапазоне частот от 30 до 110 МГц. Однако с течением времени в склейке происходят такие изменения, что спустя 10–20 часов через нее проходит уже около 80 % от интенсивности падающей волны, а отраженная доля становится очень малой вне зависимости от частоты сдвиговой волны.

Подбор состава склейки на основе жженого сахара и глицерина и измерение его параметров

К сожалению, состав и рецепт приготовления склейки на основе сахара и глицерина, о котором шла речь выше, не был детально известен. Поэтому в

рамках данной работы автором были самостоятельно приготовлены три состава подобной склейки с различной пропорцией содержания сахара и глицерина и измерены характеристики пропускания сдвиговой акустической волны через них. Состав № 1 содержал 3 объема сахара, 1 объем воды и 1 объем глицерина, что делало его очень густым. Состав № 2 содержал 2 объема сахара, 1 объем воды и 1 объем глицерина, а состав № 3 содержал 1 объема сахара, 1 объем воды и 1 объем глицерина и был наименее вязким.

Приготовление составов производилось следующим образом. Сначала смесь сахара и воды плавно прогревалась в течение 2–4 минут до того состояния, когда сахар темнел (становился «жженым»), после чего в нее добавлялся глицерин и производилось перемешивание.

Измерение характеристик пропускания сдвиговой волны данными составами было проведено также акустооптическим способом, о котором рассказано выше. Измерения проводились на одной частоте, а именно 50 МГц через разные промежутки времени. Ниже будут приведены данные о возможностях этих составов пропускать сдвиговую ультразвуковую волну.

Состав № 1 сразу после соединения поверхностей пропускал 22 % волны по интенсивности, после двухх часов – 40 %, через сутки – 70 %, а спустя шесть суток – 85 %. Данный состав, как показал опыт, кристаллизуется наиболее медленно.

Состав № 2 после приклеивания с притиранием пропускает около 15–20 %, через сорок минут около 25–30 %, через полтора часа около 55 %, после двух суток – 80 %, после четырех суток и после семи суток – более 90 %.

Во втором измерении пропускания волны составом № 2 его количество в склейке было больше, а также не производился процесс «притирания». Через шесть часов в данном опыте прошло около 50 %, через сутки 60 %, через дво суток 60–65 %, а через пять суток – около 60 %. Данные показатели меньше, чем в предыдущем измерении с этим же составом, что может быть связано с более медленным процессом кристаллизации состава. Указанное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что целесообразно использовать минимальное количество состава склейки и производить процесс поэтапного притирания, которое чередуется с поджатием. Это было сделано в третьем измерении с данным составом, которое показало, что сразу проходит 25 %, через полтора часа 60 %, через три часа – 70 %, через сутки – 85 %, а через семь суток – более 90 %.

При проведении опыта с составом № 3 было взято наименьшее количество состава и производилось поэтапное притирание после недолгого свободного нахождения образца на буфере. Измерения показали, что сразу после соединения поверхностей проходит 40 % интенсивности сдвиговой волны, через час уже 80 %, а спустя восемь суток – немного больше, чем 80 %. Если же в склейку положить немного больше состава, то тогда сразу будет проходить – 20 %, спустя двадцать пять минут – 40 %, через час – 50 %, через два часа 67 %.

В процессе проведения измерений была подтверждена целесообразность нанесения минимально возможного количества материала склейки на поверхность контакта и чередования легкого притирания поверхностей с постепенным увеличением усилия их прижатия друг к другу.

Измерения также показали, что наилучшим составом склейки для применений в эксперименте является состав номер № 3, который является наиболее жидким. Как показали измерения, данный состав способен пропускать до 85 % сдвиговой волны по интенсивности уже через несколько часов после склеивания.

Что же касается условий хранения готового состава, есть основание полагать, что для сохранения его свойств емкость, где он хранится, должна быть герметичной для минимизации взаимодействия поверхности состава с воздухом.

Автор выражает благодарность своим коллегам по физическому факультету МГУ Н. В. Ширгиной и А. И. Кокшайскому, а также сотрудникам НТЦ «Акустооптика» МИСиС К. Б. Юшкову и В. Я. Молчанову.

Библиографический список

1. *J. Couvreur J., Thimus J.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics. 1996, 33 (4). P. 417–424.

2. *Антонов С. Н.* Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 4. С. 364–370.

3. Материал для акустического контакта: Авторское Свидетельство 1045311 А СССР, МКИ Н 01 L 41/16, Н 03 Н 9/00 / Антонов С. Н. и др. (СССР).

4. *Коробов А. И., Ширгина Н. В., Кокшайский А. И.* Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 2. С. 182–190.

5. *Meziane A., Norris A., Shuvalov A.* Acoust. Soc. Am. 2011. 130. N 4. P. 1820.

6. *Мильков М. Г., Кокшайский А. И., Скачков И. В.* Труды 17-й Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» им. А. П. Сухорукова («Волны-2020»). 2020. С. 14–16.

7. *Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 279 с.

УДК 535.8

Д. В. Обыденнов*,**
аспирант
К. Б. Юшков*
кандидат физико-математических наук
В. Я. Молчанов*
кандидат физико-математических наук
*Национальный исследовательский технологический университет МИСиС
**Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

КОЛЬЦЕВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ФИЛЬТРА

В работе продемонстрирована работа оптической ловушки с кольцевым потенциалом управляемого радиуса. Кольцевое распределение поля создается с помощью фокусировки лазерного пучка в неколлинеарный акустооптический фильтр, обладающий двумерной передаточной функцией. Многочастотное адаптивное управление акустооптическим фильтром позволяет управлять пространственным распределением поля оптической ловушки. В качестве экспериментального подтверждения работоспособности установки продемонстрировано управление радиальным положением полистирольных микрочастиц в составе водяной суспензии.
Ключевые слова: фотоника, акустооптика, оптические ловушки, оптическое управление.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 20-12-00348).

D. V. Obydennov*,**
PhD Student
K. B. Yushkov*
PhD Sc. Phys.-Math.
V. Y. Molchanov*
PhD Sc. Phys.-Math.
*National University of Science and Technology MISiS
**M. V. Lomonosov Moscow State University

ACOUSTO-OPTIC TUNABLE FILTER-BASED ANNULAR OPTICAL TRAP

Here we demonstrate an optical trapping device with annular potential of a controlled radius. The annular field distribution is created by focusing a laser beam into noncollinear acousto-optic filter with a two-dimensional transfer function. Multifrequency adaptive controlling of the acousto-optic filter allows us to control the spatial distribution of the optical trap field. To confirm the operability of the setup, we have shown optical manipulation of the radial position of dielectric microparticles.
Keywords: photonics, acousto-optics, optical trapping, optical manipulation.

Явление оптического захвата известно уже на протяжении четырех десятилетий. Круг применения оптические ловушек охватывает множество дисциплин, связанных с изучением микромира, – от исследования биологических объектов до манипуляций одиночными молекулами [1]. Техника оптических ловушек непрерывно совершенствуется, и в последнее время возникла потреб-

ность в генерации различных типов оптических ловушек, для чего требуются передовые способы управления свойствами оптических пучков.

Одним из таких способов являются акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) на основе парателлурита. АОПФ обладает двумерной передаточной функцией, которая для неколлинеарного фильтра имеет кольцевую форму, определяемую анизотропией кристалла [2], [3]. Угловой диаметр кольца передаточной функции определяется частотой ультразвука. Использование нескольких частот делает возможным синтез различных радиальных распределений поля и быструю их перестройку, что особенно важно для динамических оптических ловушек.

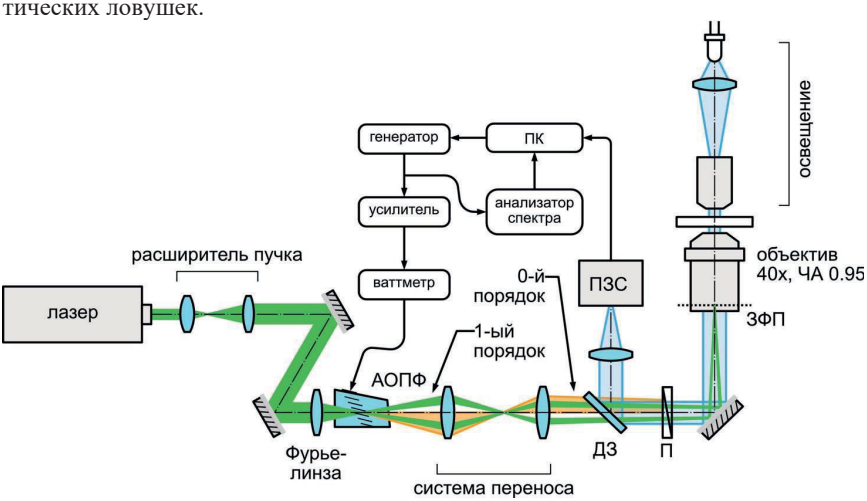


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: ДЗ – дихроичное зеркало; П – поляризатор; ЗФП – задняя фокальная плоскость; ПЗС – видеокамера с матрицей на основе прибора с зарядовой связью

Схема установки кольцевой оптической ловушки представлена на рис. 1. Для формирования кольцевого распределения поля использовалось лазерное излучение с длиной волны 532 нм. Проходя через расширитель, лазерный пучок с помощью объектива (Фурье-линзы) фокусировался в объем неколлинеарного АОПФ на основе парателлурита, специально изготовленного и оптимизированного для данной задачи. Рабочая частота фильтра в широкоапертурной геометрии дифракции составляет 132,35 МГц, полоса 0,24 МГц. Поле, соответствующее 1-му порядку дифракции, имело кольцевой угловой спектр в соответствии с передаточной функцией фильтра. Излучение, соответствующее 0-му порядку дифракции, отсекалось с помощью поляризатора. Далее излучение проходило через систему линз, которая переносила фокальную плоскость Фурье-линзы в заднюю фокальную плоскость (ЗФП) микрообъектива с числовой апертурой 0,95. Расположение линз было выбрано таким образом, чтобы угловая апертура пучка была согласована с апертурой объектива. Микрообъектив преобразовал

угловое распределение пучка в пространственное. Проходя через микрообъектив, излучение, имеющее кольцевое пространственное распределение, попадало на образец.

Образец представлял собой суспензию полистирольных сфер со средним диаметром 10 мкм. Жидкой фазой суспензии служила деионизованная вода с добавлением жидкого антисептика и поверхностно-активного вещества для предотвращения адгезии. Суспензия была помещена в специальную гидроизолированную ячейку с верхней и нижней стенками из покровного стекла.

Для визуализации образца использовалась система освещения в геометрии на просвет с помощью источника синего света. Проходя через образец, излучение собиралось объективом и с помощью дихроичного зеркала направлялось на тубусную линзу, которая строила изображение образца на ПЗС-матрицу видеокамеры.

Управление радиусом кольцевого поля ловушки осуществлялось с помощью изменения частоты ультразвука, возбуждаемого с помощью генератора радиочастоты и пьезоэлектрического преобразователя, в диапазоне частот от 132,7 до 133,9 МГц.

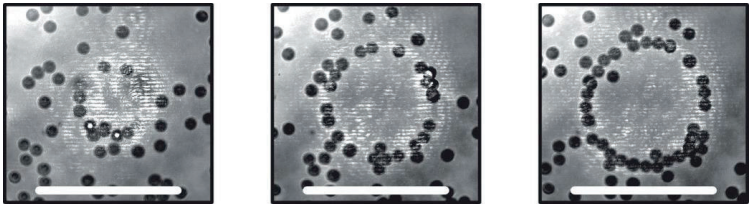


Рис. 2. Демонстрация оптического захвата полистирольных частиц в объеме жидкости. Белая полоса – масштабный отрезок длиной 100 мкм. Частота ультразвука и диаметр кольцевого поля увеличиваются слева направо

Эксперименты показали, что представленная схема позволяет управлять радиальным положением взвешенных в объеме жидкости частиц (рис. 2).

Библиографический список

1. *Neuman K., Block S.* Optical trapping //Review of Scientific Instruments. 2004. Vol. 75. N 9. P. 2787–2809.

2. *Balakshy V.* Acousto-optic visualization of optical wavefronts //Applied optics. 2018. Vol. 57. N 10. P. 56–63.

3. *Yushkov K., Chizhikov A., Makarov O.* Optimization of noncollinear AOTF design for laser beam shaping // Applied Optics. 2020. Vol. 59. N 28. P. 8575–8581.

УДК 29.37.25; 520.35

В. Э. Пожар*
доктор физико-математических наук
А. С. Мачихин*
доктор физико-математических наук, доцент
*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

АКУСТООПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Рассмотрены проблемы получения массивов пространственно-спектральной информации посредством акустооптических перестраиваемых фильтров. Описаны этапы последовательного решения проблемы. Перечислены развиваемые направления, основанные на этой технологии.
Ключевые слова: акустооптический перестраиваемый фильтр, спектральное отображение, гиперспектрометрия, стереоспектрометрия, спектральная фазовая микроскопия, оптическая когерентная томография, спектральная цифровая голография.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант РНФ 19-19-00606).

V. E. Pozhar*
Dr. Sc. Phys.-Math.
A. S. Machikhin*
Dr. Sc. Phys.-Math., Associate Professor
*Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Russian Academy of Sciences

ACOUSTO-OPTICAL IMAGING SPECTROSCOPY

The problems accompanying the detection of spatial-spectral 3D array of information by means of acousto-optical tunable filters are described. The sequential stages of the problem resolution are described. The technical directions being developed on this technology are presented.
Keywords: acousto-optic tunable filter; spectral imaging; hyperspectrometry, stereospectrosmetry; spectral phase microscopy, optical coherence tomography, spectral digital holography.

Введение

Спектроскопия с пространственным разрешением является эффективным методом анализа объектов. Получаемый массив данных I(x, y, ω), часто называемый «гиперкуб» (рис. 1а), дает информацию как о распределению свойств по пространственным координатам x и y, так и о внутреннем строении вещества через его частотный (ω) спектр, отражающий энергетическую структуру молекул и атомов.

Для получения трехмерного массива данных с помощью двумерной матрицы фотодетекторов необходимо реализовать либо сканирование по времени *t*, либо разделение по пространству (например, с помощью приемника с многоцветным растром). Многоканальная регистрация, хотя и обеспечивает параллельный (быстрый) прием информации, представляет собой экстенсивный

подход, сопровождающийся увеличением габаритов системы, ее сложности и стоимости, либо разделением ограниченных ресурсов на много каналов (рис. 1б–д).

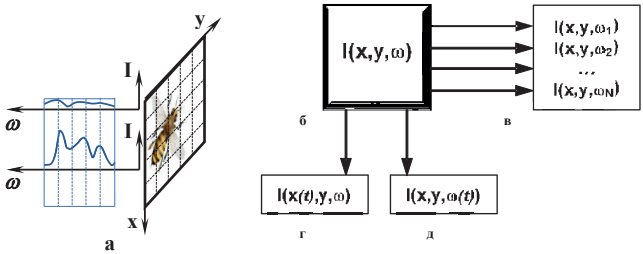


Рис. 1. Регистрация спектрально-пространственной информации I(x, y, ω). Гиперкуб данных (а) и методы его регистрации (б): многоканальный (в) и сканирующие по пространству (г) или по спектру (д)

Метод разделения по времени (сканирования) дает возможность перестраиваться либо по одной из координат (гиперспектрометры на дифракционных решетках), либо по спектру (на перестраиваемых фильтрах). Последний способ эффективно реализуется на акустооптических (АО) фильтрах, в которых для перестройки используется эффект селективной дифракции на объемных (брэгговских) решетках, создаваемых в среде генерируемой ультразвуковой волной.

В докладе рассмотрен этот наиболее эффективный подход к получению пространственно-спектральной информации. Выделены проблемы получения массивов пространственно-спектральной информации посредством акустооптических перестраиваемых фильтров. Описаны этапы их последовательного решения. Перечислены развиваемые направления, основанные на этой технологии.

При использовании перестраиваемых АО фильтров, фактически, осуществляется последовательная регистрация изображений на разных длинах волн ($\lambda=2\pi c/\omega$), что позволяет собрать гиперкуб как совокупность спектральных сечений $\{I(x,y,\lambda_i(t_i))\}$. При этом для каждого пикселя (x_m,y_n) изображения генерируется своя спектральная зависимость $I_{mn}(\omega) \equiv I(x_m,y_n,\omega)$, что открывает возможность поточечно определять состав объекта или его состояние.

Оказалось, однако, что практическая реализация этого подхода сталкивается с некоторыми проблемами. Основной проблемой на этом пути является хроматическая трансформация изображения объекта: каждый «снимок» искажен по-своему, а потому спектральные отсчеты в одном пикселе относятся к разным элементам изображения (рис. 2). Для исправления этого эффекта необходимо привести все изображения к неискаженному виду с единым масштабом, для чего следует устранить множество типов искажений: хроматический сдвиг, хроматизм увеличения и нелинейные искажения.

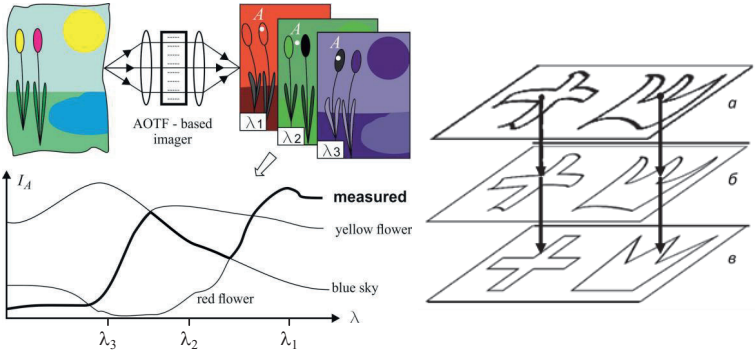


Рис. 2. Искажение спектральных изображений и перепутывание спектральных свойств (слева) [1]; Математическое восстановление спектральных изображений (справа) [4]

Решение этой проблемы стало возможным после построения теории трансформации изображений при АО дифракции с изменением направления поляризации [2]. В ее рамках были определены аналитические выражения, точные, описывающие дифракцию необыкновенно-поляризованного излучения (e→o), и приближенные для обратной дифракции (o→e).

Один из подходов позволяющих устранить аберрации, заключается в использовании двух последовательно расположенных АО фильтров, развернутых таким образом, чтобы во втором поляризация возвращалась в исходное состояние (например, e→o→e). Однако этот способ требует двух АО фильтров, причем идентичных [3], а также необходимость прецизионной юстировки системы. А для одиночных АО фильтров необходимы средства расчета оптических систем, обеспечивающих устранение трансформаций.

Еще одним шагом в понимании принципов искажения спектральных изображений явился анализ разных оптических схем, характеризующихся разным ходом оптических пучков – конфигурации с параллельный ходом, слабо сходящимися пучками и фокусировкой пучков в пределах брэгговской решетки. Это позволило классифицировать качественно типы аберраций для каждой конфигурации и оценить их количественно [1].

Проблемы расчета систем

Полученные теоретические выражения для трансформации изображения в АО фильтре не позволяют рассчитать характеристики системы, содержащей такие элементы как линзы, диафрагмы, клинья, призмы поляризаторов. Для расчета таких многоэлементных систем используются пакеты специализированных программ, основанных на трассировке лучей (волновых трубок) через все элементы системы. Однако этот подход не способен рассчитывать такие эффекты как дифракцию на толстой (брэгговской) решетке, поскольку, каждый «луч» дифрагирует на разных участках решетки и порождает таким образом множе-

ство (бесконечное) дифрагированных «лучей». Эта принципиальная несовместимость лучевого подхода при описании классических оптических элементов и волнового подхода при описании АО фильтров составляет вторую принципиальную проблему.

Частично решить эту проблему удалось путем построения специального модуля [1] для классической программы расчета оптических систем «Zemax». Для этого использован настраиваемый элемент программы «black box», описываемый своей функцией передачи. Последняя в этой модели задается пространственно-спектральной функцией АО фильтра, рассчитываемой из теоретических формул, а ход лучей определяется из допущения, что дифракция «луча» осуществляется в середине дифракционной решетки.

Разработанный модуль позволяет реализовать методы автоматического проектирования при расчете смешанных систем, содержащих и АО, и классические элементы. Проведенные эксперименты показали адекватность развитого приближенного подхода, что дает возможность проектировать приборы разного назначения: для микроскопии, эндоскопии, стереоскопии, ручной съемки и т. д., описанные в следующем разделе. Другой подход заключается в коррекции искажений (рис. 2, а–в) на основе теоретических соотношений.

Гиперспектральные системы

Следующий уровень проблем возникает при практической реализации оптических устройств и систем. При этом для каждого типа устройств содержание проблемы различно и связано с решаемыми задачами: для эндоскопа сложность заключается в оптическом сопряжении и механическом сочленении с эндоскопом, для микроскопии – в способе размещения спектрального модуля в собранной и отъюстированной схеме микроскопа, для ручной съемки – в способах фокусировки и быстрой эффективной настройке на анализируемый объект.

Во всех этих областях применения целью является получение трехмерного массива данных $I(x, y, \lambda)$: сплошного (гиперспектрального) или на отдельных длинах волн (мультиспектрального, многоволнового). Именно в последнем случае, когда для анализа образцов, достаточно получить информацию на небольшом множестве длин волн, АО видеоспектрометр реализует свое уникальное преимущества – возможность скачкообразно (за микросекунды) перестраиваться на любую другую длину волны, что позволяет эффективно использовать время измерений, не теряя его, как у сканирующих приборов, на перестройку между спектральными точками. Примеры созданных спектрометров для эндоскопии, микроскопии и удаленной бесконтактной съемки приведены на рис. 3.

Спектроэндоскоп отличается наличием специальной согласующей системы, что позволило существенно повысить размер и качество изображений при присоединении АО фильтра к жестким и гибким эндоскопам.

Спектральное АО устройство для микроскопии выполнено в виде модуля, вставляемого при необходимости в стандартный микроскоп между входным объективом и бинокулярной насадкой. В таком подходе микроскоп сохраняет

все свои функции и приобретает дополнительную возможность спектрального анализа всех элементов изображения.

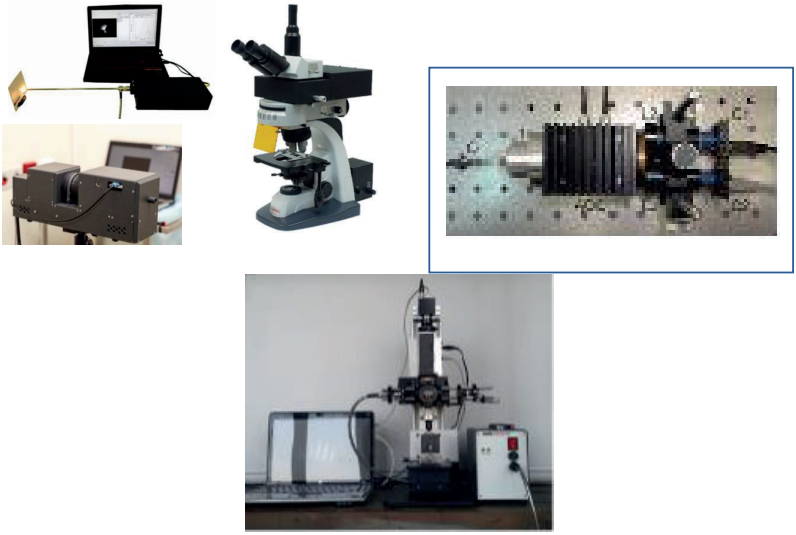


Рис. 3. Акустооптические спектральные приборы:
(слева – направо) спектроэндоскоп, гиперспектрометр, спектральный микроскопический модуль, стереоспектрометр, мультифункциональная установка для спектральных и фазовых измерений

Гиперспектральная камера содержит длиннофокусный объектив, а АО фильтр сопряжен с ее оптической схемой с помощью согласующих элементов. Камера используется для получения детализированных изображений участков тела пациентов в медицинских целях без непосредственного контакта с расстояния около 1 м.

Системы пространственно-спектрального анализа

Во многих задачах необходимо определить и иные характеристики объекта, например его объемные свойства. Для этого могут использоваться стереоскопические приборы и устройства, чувствительные к фазовым характеристикам света.

В случае непрозрачных объектов интерес представляет форма объекта или отдельные негладкие элементы ее поверхности. Наблюдение участков поверхности с двух разных ракурсов позволяет определить дальность до нее и локальную форму. Стереоспектрометр, реализующий этот метод (рис. 3), имеет два канала, образованных входной призмой. Спектральная селекция на каждой

длине волны может при этом осуществляться парой АО фильтров [5] или же одним АО фильтром сложной конструкции [6].

Получаемый массив данных $I_\alpha(x, y, \lambda)$ (α=Left, Right) позволяет восстановить пространственное расположение поверхности объекта в виде трехмерной модели на мониторе компьютера.

В случае прозрачных объектов световой сигнал приходит от всех внутренних точек объекта, а поскольку свет не поглощается, то единственной информативной величиной является фаза волн. Набег фаз при прохождении через объект $\Delta\varphi=kl=2\pi nl/\lambda$ дает информацию как о толщине l, так и о показателе преломления $n(\lambda)$, определяемом составом объекта. В измерениях регистрируется разность фаз при прохождении двух пучков света по разным каналам, объектному и опорному, а значит, фазовые методы требуют двухканальной схемы. Таким образом, использование АО фильтров в таких схемах сталкивается с той же проблемой – необходимостью фильтровать 2 канала.

При этом АО фильтр не должен вносить фазовые различия в 2 световых канала. Это автоматически происходит, если АО фильтр расположен в общей части светового тракта, например, на входе. Однако было показано [7], что фазовые искажения, вносимые АО фильтром, при расположении его на выходе достаточно малы. Это дает возможность использовать такую схему, которая позволяет реализовать 3 режима регистрации: спектральный фазовый, спектральный, монохромный, которые дополняют друг друга (рис. 3, справа). Они реализуют режим микроскопический, режим спектрального контрастирования и режим оптической когерентной томографии. В последнем режиме необходимо осуществить преобразование Фурье по спектру для определения распределения коэффициента отражения по глубине $R(x, y; z)=F_\omega[S(x, y; \omega/c)]$.

Еще один метод определения фазовой структуры объектов, мультиспектральная цифровая голография, также предусматривает двухканальную схему регистрации и позволяет вычислить оптическую толщину ($L(\lambda) \equiv nl$) объекта во всех его точках на разных длинах волн $\Delta\varphi(x, y, \lambda) \Rightarrow L(x, y, \lambda)$. Это дает возможность определить спектральную зависимость показателя преломления всех частей объекта $n(x, y, \lambda)$ и выделить его основные элементы. Это необходимо для исследования структуры, состава, состояния объектов и для их идентификации.

Заключение

Все рассмотренные методы исследований могут быть реализованы и в варианте с временной разверткой $I(x, y, \lambda, t)$, что открывает возможности изучать динамику процессов, происходящих в объекте, осуществлять контроль его состояния, в частности фиксировать моменты наступления событий.

Другое важное направление развития, представляющее большой практический и научный интерес, связано с регистрацией поляризационных характеристик света $I_p(x, y, \lambda)$ (p=o, e). Это позволяет выявить особенности строения, в частности выявить элементы, обладающие выделенной ориентацией.

А для более точных расчетов рассмотренных систем имеет смысл дальнейшее развитие метода аппроксимации АО ячейки оптическим элементом с сосредоточенными параметрами. Этот метод должен более полно учитывать нелокальность процесса брэгговской дифракции, эффект уширения светового пучка, а также неоднородность акустического поля [8].

Библиографический список

1. *Machikhin A., Batshev V., Pozhar V.* Optical Society America. 2017, A 34. N 7. P. 1109–1113.
2. *Machikhin A., Pozhar V.* Applied Optics, 40(6), 2012. P. 871–877.
3. Proc. SPIE / V. I. Pustovoit, V. E. Pozhar, M. M. Mazur et al. 2005. Vol. 5953. P. 200–203.
4. *Мачихин А. С., Пожар В. Э.* Приборы и техника эксперимента. 2009. № 6. С. 92–98.
5. Компьютерная оптика / А. С. Мачихин, В. И. Батшев, В. Э. Пожар, М. М. Мазур. 2016. Т. 40. С. 871–77.
6. Optics Express / A. Machihin, V. Batshev, V. Pozhar, A. Naumov. 2020. Vol. 28. N 2. P. 1150–57.
7. *Висковатых А. В., Мачихин А. С.* Приборы и техника эксперимента. 2015. № 1. С. 117–121.
8. *Балакший В. И., Манцевич С. Н.* Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 5. С. 600–609.

УДК 534.8

Н. В. Поликарпова*
кандидат физико-математических наук, доцент
М. В. Марунин*
студент
И. К. Чиж*
студент
*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

ИНФРАКРАСНЫЕ АКУСТООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ

В работе исследованы особенности отражения объемных акустических волн в кристаллах галогенидов ртути в случае произвольного падения упругой волны на свободную границу раздела между кристаллом и вакуумом. Рассмотрен ряд необычных эффектов и явлений, ранее мало изученных акустикой и принципиально не наблюдаемых в изотропных материалах. На основе результатов работы могут быть построены новые варианты акустооптических приборов, работающие в инфракрасном диапазоне.
Ключевые слова: анизотропия упругих свойств, преломление, парателлурит.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19–12-00072.

N. V. Polikarpova*
PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor
M. V. Marunin*
Student
I. K. Chizh*
Student
*M. V. Lomonosov Moscow State University

IR ACOUSTO-OPTIC DEVICES USING ACOUSTIC REFLECTION

The paper presents the peculiarities of bulk acoustic waves reflection in mercury halides crystals in the case of an arbitrary incidence of elastic wave on the free interface between the crystal and vacuum. A number of unusual effects and phenomena not observed in isotropic materials, are considered. Based on the results of the work, new varieties of acousto-optic devices operating in the infrared range can be constructed.
Keywords: anisotropy of elastic properties, refraction, paratellurite.

Важную роль в акустооптическом взаимодействии играют свойства акустического пучка, поскольку структура пучка определяет характер дифракции [1]–[3]. Отличительной особенностью галогенидов ртути, к которым можно отнести кристаллы каломели, бромида ртути и йодида ртути, является сильная анизотропия упругих свойств, как и в кристалле парателлурита. Вследствие этого в указанных кристаллах могут происходить необычные физические процессы и явления, не наблюдающиеся в изотропных и слабо анизотропных средах [3]. Более того, перечисленные соединения ртути прозрачны в дальнем ин-

фракрасном диапазоне, что привлекает к ним дополнительный интерес с точки зрения построения устройств, работающих в этом спектральном интервале. Акустическая анизотропия материала проявляется в сильной зависимости фазовой скорости волн от направления распространения в кристалле, а также приводит к отклонению направления распространения упругой энергии от направления распространения акустического волнового фронта. Известно, что направление групповой скорости волн в анизотропных средах в общем случае не совпадает с соответствующим направлением фазовой скорости. Однако в плоскости XOY кристалла парателлурита (TeO_2) угол сноса между акустической групповой и фазовой скоростью достигает рекордной величины $\psi = 74^0$.

Как исследуемые кристаллы, так и значительное количество материалов, применяющихся в акустооптике, принадлежат к тетрагональной сингонии [1]. Поэтому в акустооптических кристаллах хлорида ртути, бромида ртути и йодида ртути, наблюдается схожая картина распределения скоростей. В литературе представлен полный набор констант для указанных материалов, что позволяет рассчитать фазовую скорость в любом заданном направлении. Зависимости обратных скоростей от направления распространения волны для изучаемых сред в плоскости (001) представлены на рис. 1.

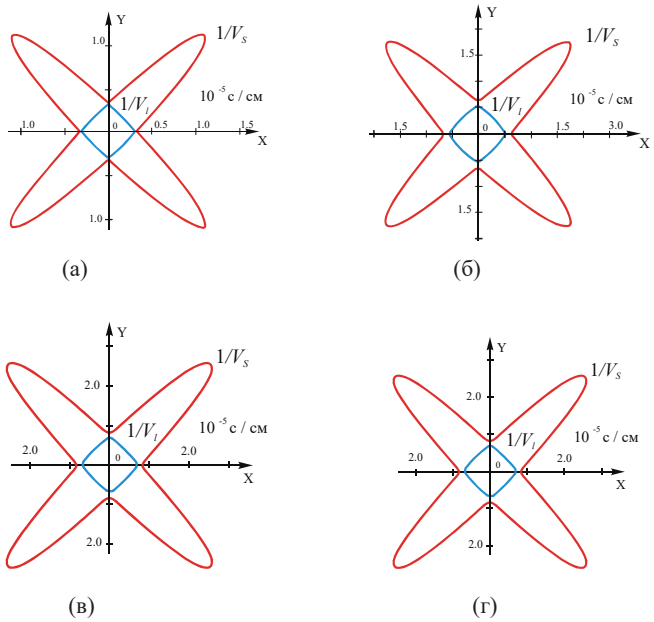


Рис. 1. Кривые медленностей в плоскости (001) кристаллов:
а – парателлурита; б – каломели; в – бромида ртути; г – йодида ртути

Помимо соединений ртути, для сравнения построены хорошо известные кривые медленностей в кристалле парателлурита. В парателлурите скорость в направлении [100] медленной волны приблизительно в пять раз больше скорости для нее в направлении [110], что является причиной значительного угла акустического сноса 74^0 в плоскости XOY. Необходимо также отметить, что и для кристаллов Hg_2Cl_2, Hg_2Br_2 и Hg_2I_2 скорости отличаются не менее чем в четыре раза, что отражает качественный вид кривых.

Представляет интерес обсуждение возможности применения в акустооптике эффектов отражения акустических волн. К настоящему времени известно несколько модификаций акустооптических приборов, в которых использовано отражение акустических волн от свободных граней. Так, используя акустические отражения, в акустооптике удается решить проблему ввода оптического излучения в кристалл. При этом пьезоэлектрический преобразователь для генерации акустических волн размещен на грани кристалла, не совпадающей ни с входной, ни с выходной оптическими гранями акустооптической ячейки.

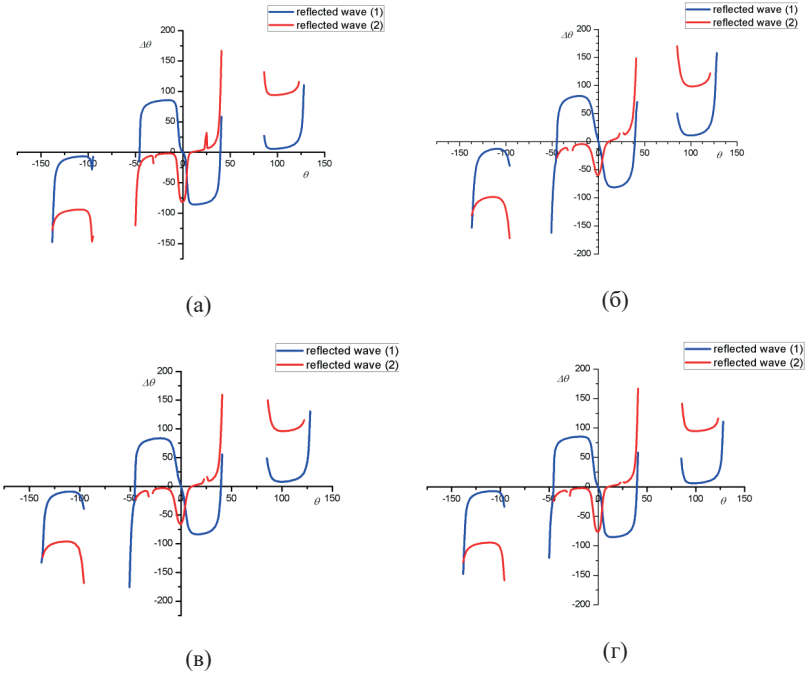


Рис. 2. Зависимости угла пространственного разделения пучков для двух отраженных волн в кристаллах: а) TeO_2; б) Hg_2Cl_2; в) Hg_2Br_2; г) Hg_2I_2

В работе исследованы особенности отражения объемных акустических волн в кристаллах галогенидов ртути в случае произвольного падения упругой

волны на свободную границу раздела между кристаллом и вакуумом. В этих средах распространение волн сопровождается рядом необычных эффектов и явлений, ранее мало изученных акустикой и принципиально не наблюдаемых в изотропных материалах. Оказалось, что можно наблюдать отличные от ожидаемых случаев отражения упругих волн от свободной и плоской границы раздела между кристаллом и вакуумом. Рассматриваются случаи произвольного наклонного падения на границу медленной сдвиговой акустической волны в плоскости XY. Рассмотрение показало, что энергетические потоки волн, отраженных от поверхности кристалла, могут распространяться неочевидным, ранее не предсказанным образом.

Для того чтобы проанализировать основные особенности поведения волн при отражении, построены зависимости углов пространственного разделения $\Delta\theta$ от угла падения θ для четырех различных материалов (рис. 2). Также на рис. 3 для полноты анализа также представлен расчет коэффициентов отражения в зависимости от угла падения.

Полученные графики демонстрируют много новых необычных случаев. Непредсказуемое направление распространения акустических волн на рис. 2 также сопровождается необычным распределением энергии между отраженными от границы акустическими волнами, показанное на рис. 3. Определены направления отражения акустических волн и их потоков энергии. Кривые на рис. 2 демонстрируют существование углов, при которых энергетические потоки отраженных волн совпадают, в то время как их волновые векторы направлены в разные стороны по отношению к волновому вектору падающей волны.

Дополнительной закономерностью акустического отражения в галогенидах ртути является существование областей, в которых распространяется только одна отраженная волна. Это означает, что в некотором интервале углов падения энергия исходной волны преобразуется в энергию только одной отраженной волны.

Рис. 2 демонстрирует существование углов падения, при которых акустическая волна отражается строго назад, и при этом угол падения для волны не равен нулю. Кроме того, оказалось, что указанная тенденция, при которой отражение является почти обратным, наблюдается в широком интервале углов падения. Это говорит о том, что обратное отражение для данных углов падения может без больших трудностей наблюдаться в эксперименте.

Также можно предсказать, что имеются области, в которых угол падения превышает 90°, однако падение волны на границу раздела тем не менее существует.

Проведенное рассмотрение доказало, что направления потоков энергии, а также величина энергии в них может желаемым образом варьироваться. При этом количественные характеристики отражения зависят от того, как вырезан кристалл и от степени его анизотропии.

На основе проведенного анализа можно утверждать, что обнаруженные закономерности распространения акустических волн в соединениях ртути мож-

но обобщить и на другие монокристаллические среды с большой анизотропией физических свойств.

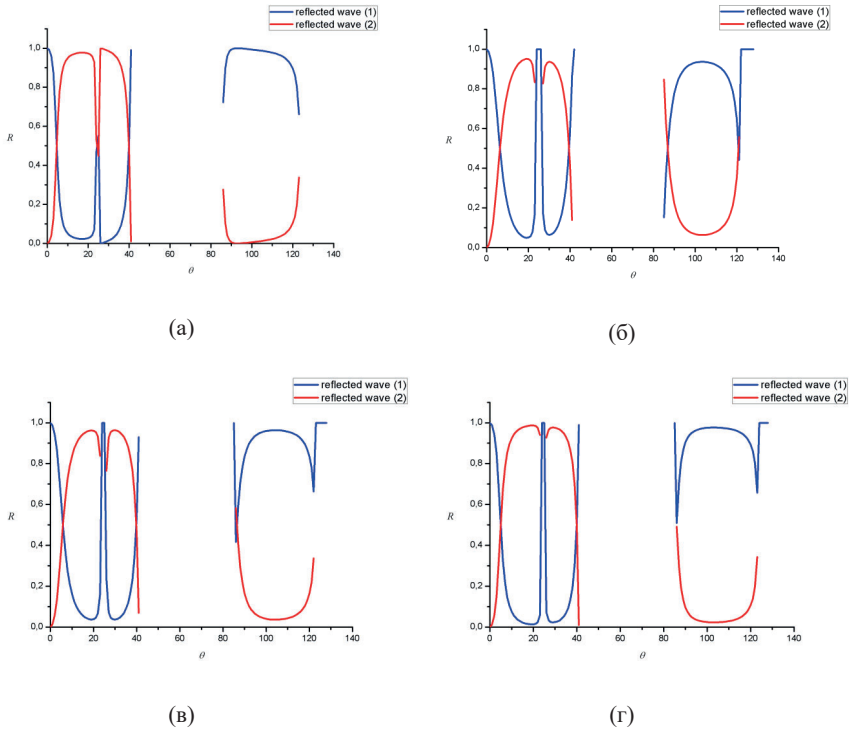


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения для двух отраженных волн от угла падения в кристаллах: а) TeO_2; б) Hg_2Cl_2; в) Hg_2Br_2; г) Hg_2I_2

Основываясь на результатах расчета, могут быть созданы варианты акустооптических фильтров, в которых используется отражение как с сохранением акустической моды, так и с преобразованием акустических мод из продольных в сдвиговые.

Вышесказанное говорит о перспективности использования кристаллов хлорида ртути, бромида ртути и йодида ртути в приборах среднего и дальнего инфракрасного диапазонов электромагнитного излучения. Рассмотрены интересные для практики варианты акустического отражения с несколькими отраженными пучками, распространяющимися под различными углами по отношению друг к другу. Это позволяет предложить новые конфигурации акустооптических устройств не только с поперечным, но и с коллинеарным режимом дифракции света на ультразвуке.

Библиографический список

1. *Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.

2. *Auld B*. Acoustic Fields and Waves in Solids. N.Y.: Robert Krieger Publ., 1990.

3. Applied Optics / V. Voloshinov, N. Polikarpova, P. Ivanova and V. Khorkin. Vol. 57. N 10. P. 19–25.

УДК 535.421

Н. А. Рожкова*
стажер-исследователь
А. С. Мачихин*
ведущий научный сотрудник
*Научно-технологический центр уникального приборостроения
Российской академии наук

ОПТИЧЕСКИЙ ПИНЦЕТ С ДВУХКООРДИНАТНЫМ АКУСТООПТИЧЕСКИМ ДЕФЛЕКТОРОМ ДЛЯ МАНИПУЛИРОВАНИЯ ЧАСТИЦАМИ

Оптический захват стал важным методом контроля и исследования частиц на масштабах от нанометров до миллиметров. В данной статье описана схема работы оптической системы с акустооптическим дефлектором для автоматического захвата частиц, показано, что этот дефлектор за счет быстрой перестройки по частоте позволяет реализовать перемещение частицы по произвольной траектории, множественный захват.
Ключевые слова: оптический пинцет, акустооптика, акустооптический дефлектор, дифракция.

N. A. Rozhkova*
Research Trainee
A. S. Machikhin*
Leading Researcher
*Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS

OPTICAL TWEEZERS WITH BI-AXIS ACOUSTO-OPTICAL DEFLECTOR FOR PARTICLE MANIPULATION

Optical capture is an important method for monitoring and examining particles on scales from nanometers to millimeters. The operation principle of an optical system with the acousto-optical deflector for automatic particle capture is described. We demonstrate that the developed optical system, due to fast frequency tuning of the acousto-optical deflector, provides particle transportation along an arbitrary trajectory and multiple capture.
Keywords: optical tweezers, acousto-optics, acousto-optic deflector, diffraction.

Введение

Оптический пинцет – инструмент, представляющий собой сильно сфокусированный луч света, который создает силы связи для микроскопических объектов, позволяющие возможность перемещения последних. Принцип работы оптического пинцета для микрочастиц размером больше длины волны лазерного излучения заключается в том, что неоднородное распределение электромагнитного поля в перетяжке сфокусированного лазерного пучка формирует эффективную потенциальную яму для частиц, находящихся вблизи перетяжки (рис. 1).

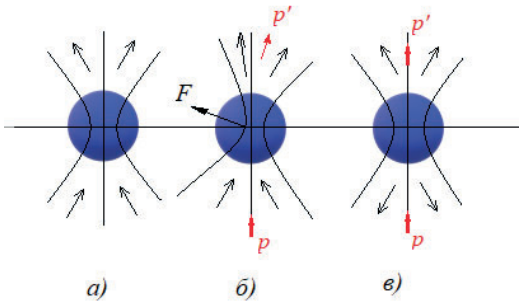


Рис. 1. Принцип работы оптического пинцета: F – возвращающая сила при смещении частицы перпендикулярно оси падающего оптического пучка; p, p' – суммарные импульсы светового потока до и после рассеяния на микрочастице (преломления)

Те частицы, у которых показатель преломления больше показателя преломления окружающей среды, при попадании в область перетяжки лазерного пучка одновременно преломляют падающее на нее излучение, что можно рассматривать как рассеяние. Это приводит (по второму закону Ньютона) к возникновению сил воздействия на частицу, возвращающие ее в исходное положение. А если микрочастица находится в фокусе лазерного луча (в перетяжке), то эти силы уравновешиваются.

В ином случае, когда показатель преломления частица меньше окружающей средой, частица выталкивается из оптической ловушки под действием лазерного пучка. Также выталкиваются из перетяжки частицы недостаточной прозрачности, так что оптический захват не наблюдается.

Описание установки

Основные элементы оптического пинцета:

- система формирования оптической ловушки;
- система сканирования для управления пространственным положением;
- система наблюдения.

Базовая оптическая ловушка: для реализации фокусировки захватывающего луча в качестве источника излучения используется лазер с высокой пространственной когерентностью. В разработанной установке это твердотельный красный лазер с длиной волны 671 нм. Для создания фокусного пятна используется микрообъектив с большим увеличением и большой числовой апертурой.

Система сканирования

Среди существующих различных методов сканирования, то есть управления пространственным положением частицы в разработанной установке использован двухкоординатный акустооптический дефлектор (АОД).

АОД содержит два перпендикулярно расположенных кристалла TeO_2, к торцу каждого из которых прикреплен пьезоэлемент-излучатель. При подаче высокочастотного сигнала на пьезоэлемент по кристаллу распространяется акустическая волна, вызывающая периодическое изменение показателя преломления и, соответственно, создает фазовую решетку вдоль кристалла. Периодичность решетки можно контролировать, изменяя частоту сигнала. Угол падения должен удовлетворять условию Брэгга для первого порядка дифракции:

$$\sin\theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda},$$

где λ – длина волны падающего света; $\Lambda = \frac{v_S}{f}$ – длина волны звука; v_s – скорость акустической волны; f – частота акустической волны. Соответственно, изменение частоты ультразвука на величину Δf вызывает отклонение луча на величину $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{\upsilon_S}\Delta f .$$

В разработанной установке диапазон акустических частот составляет $\Delta f = 32\text{МГц}$. С учетом того, что в установке используется микрообъектив Олимпус 100$^{\times}$/1,25 (масло), 180 с фокусным расстоянием 1,8 мм, следует, что поле оптического пинцета составляет $\Delta x \times \Delta y = 120 \times 120\,\text{мкм}$.

Эксперимент

Для подтверждения эффективности метода была собрана установка (рис. 2).

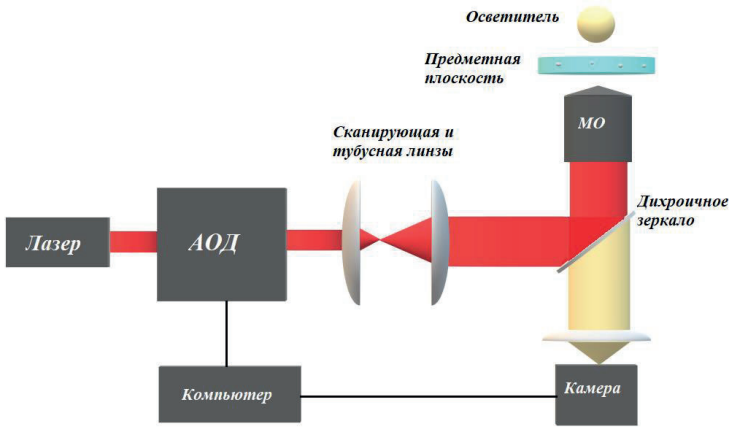


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Излучение лазера, обладающего высокой стабильностью, направляется на АОД и систему, состоящую из сканирующей и тубусной линз и с помощью высокоапертурного микрообъектива формируется оптическая ловушка. Одновременно изображение с камеры передаются на компьютер. Автоматическая настройка дефлектора для согласования положение пятна лазера на экране монитора и углов(частот) отклонения АОД происходит с помощью программы предварительной калибровки. Основные функции, которые может выполнять рабочая программа: перемещение лазерного пятна (в том числе с захваченной частицей) осуществляется по двум координатам с помощью компьютерной мыши, причем по произвольным траекториям (рис. 3). Возможно также формирование и нескольких ловушек одновременно.

Рис. 3. Перемещение по произвольной траектории частицы пекарских дрожжей

Заключение

Экспериментально подтверждено, что использование акустооптического дефлектора в качестве системы сканирования для управления пространственным положением достаточно эффективно. По сравнению с другими методами сканирования АОД имеет ряд преимуществ: управление несколькими частицами одновременно за счет быстрого переключения, перемещение по сложным произвольным траекториям, простое управление.

Библиографический список

1. *Ashkin A.* Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure, Phys. Rev. Lett. Vol. 24, 156 (1970).

2. *Ashkin A., Dziedzic J., Bjorkholm J.* Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles, Optics Letters. 11(5), 288–290 (1986).

3. *Chisholm C. S.* A three-dimensional steerable optical tweezer system for ultracold atoms // Review of Scientific Instruments. 2018. Vol. 89. N 10. P. 103–105.

4. *Neuman K., Abbondanzieri E., Landick R.* Ubiquitous transcriptional pausing is independent of rna polymerase backtracking. 2003. Cell. 115(4):437–47.

5. *Molloy J., Padgett M.* Lights, action: Optical tweezers. Contemporary Physics. 2002. 43, 241–258.

6. *Negrean A., Mansvelder H.* Optimal lens design and use in laser-scanning microscopy.

7. *Neuman K., Block S.* Optical trapping // Review of Scientific Instruments. 2004. Vol. 75. P. 2787–2809.

8. *Ortas J., Badosa E., Usategui M.* Dynamic Optical Tweezers using Acousto-Optic Modulators.

9. *Shaevitz J.* A Practical Guid to Optical Trapping. 2006.

10. *Yablokova A., Martynov G., Kozlov A.* Multi-mode manipulation of microscopic objects using acoustooptical deflector Proc. 2019. SPIE 11458.

УДК 535.243

А. С. Хомутов*
аспирант
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПРИБОР НА БАЗЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ФИЛЬТРА С РАСЧЕТОМ ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В СРЕДЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Акустооптический модулятор рассмотрен как элемент системы обработки сигналов радио и оптического диапазона с решеткоподобной структурой. Отмечена значимость спектральных измерений оптического диапазона в науке и технике [1]. Предложен способ измерения спектра оптического сигнала спектральным прибором на базе акустооптического перестраиваемого фильтра при линейно-частотной модуляции сигнала с учетом затухания акустической волны в среде акустооптического взаимодействия. Представлен пример затухания акустической волны в среде акустооптического взаимодействия. Предложен коэффициент амплитудной модуляции управляющего сигнала для учета затухания акустического сигнала. Оптический спектральный прибор данного типа можно эффективно использовать для контроля процессов горения, протекающих в условиях повышенной опасности для человека.
Ключевые слова: акустооптический модулятор, акустооптическое взаимодействие, дифракция, акустооптический перестраиваемый фильтр, аппаратная функция, контроль процессов горения, затухание акустической волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ): проект № 19-79-10110.

A. S. Khomutov*
Phd Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

OPTICAL SPECTRAL DEVICE BASED ON AN ACOUSTOOPTIC TUNABLE FILTER WITH THE CALCULATION OF THE ATTENUATION OF AN ACOUSTIC WAVE IN AN ACOUSTO-OPTIC INTERACTION MEDIUM

An acousto-optic modulator is considered as an element of a system for processing signals in the radio and optical range with a lattice-like structure. The importance of spectral measurements of the optical range in science and technology is noted. A method is proposed for measuring the spectrum of an optical signal with a spectral device based on an acousto-optic tunable filter with linear-frequency modulation of the signal, taking into account the attenuation of an acoustic wave in an acousto-optic interaction medium. An example of attenuation of an acoustic wave in an acousto-optic interaction medium is presented. The amplitude modulation coefficient of the control signal is proposed to take into account the attenuation of the acoustic signal. An optical spectral device of this type can be effectively used to control combustion processes occurring in conditions of increased danger to humans.
Keywords: acoustooptic modulator, acoustooptic interaction, diffraction, acoustooptic tunable filter, point-spread function, control of combustion processes, attenuation of an acoustic wave.

Введение

Рассматривается действие одного из видов дифракционных оптических спектральных приборов, каковым является оптический спектральный прибор на базе акустооптического перестраиваемого фильтра. В таком спектральном приборе в качестве диспергирующей системы применяется акустооптический модулятор, который представляет собой решеткоподобную структуру. Эта решеткоподобная структура формируется бегущей акустической волной, распространяющейся в среде акустооптического взаимодействия. Бегущая акустическая волна возбуждается соответствующим управляющим сигналом [2].

Один из известных режимов работы акустооптического модулятора заключается в использовании управляющего сигнала с линейно-частотной модуляцией. В таком режиме работы акустооптический модулятор рассматривается как динамическая дифракционная решетка. Период решетки меняется в зависимости от изменения частоты управляющего сигнала [3]. Для максимальной эффективности работы диспергирующего элемента предложено учитывать затухание акустической волны в среде акустооптического взаимодействия. Следовательно, требуется использовать не только частотную модуляцию, но и амплитудную.

Представлен пример акустооптического взаимодействия. Представлена функциональная схема оптического спектрального прибора в синхронном режиме работы. Представлен пример затухания акустической волны в среде акустооптического взаимодействия.

Функциональная схема оптического спектрального прибора и принцип его работы

Отличительной особенностью оптического спектрального прибора на базе акустооптического перестраиваемого фильтра от оптического спектрального прибора с дифракционной решеткой заключается в динамическом изменении периода дифрагирующего элемента путем подачи на него управляющего электрического колебания [4].

Решеткоподобная структура дифрагирующего элемента формируется путем возбуждения акустической волны в акустооптическом модуляторе. Форма акустической волны зависит от управляющего электрического колебания, поступающего на пьезопреобразователь в акустооптическом модуляторе.

Функциональная схема оптического спектрального прибора на базе акустооптического перестраиваемого фильтра представлена на рис. 1.

На функциональной схеме оптического спектрального прибора на базе акустооптического перестраиваемого фильтра для формирования управляющего электрического сигнала используется микросхема фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с генератором, управляемым напряжением, которая обеспечивает частотную и амплитудную модуляцию. Для считывания оптической информации используется фотодетектор (ФД). Высокочастотные ключи в схеме обеспечивают синхронный режим работы управляющего сигнала и фотодетектора.

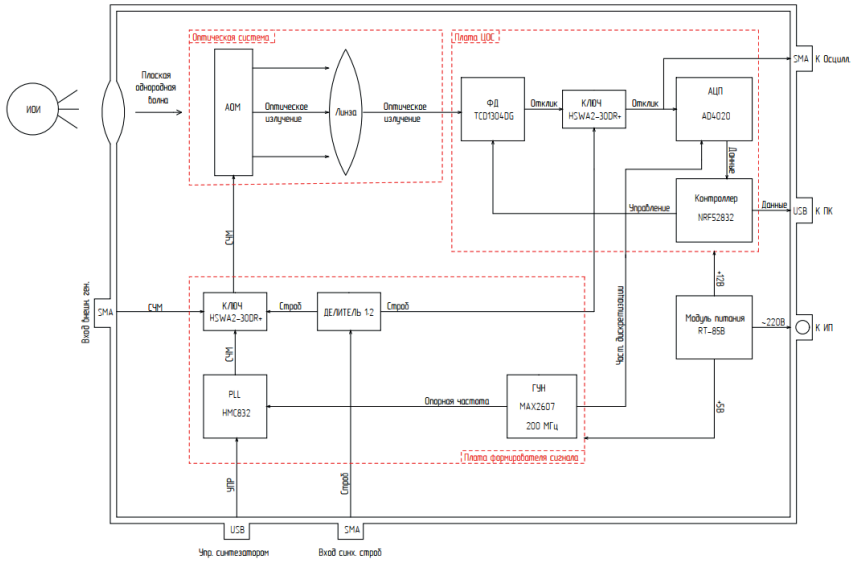


Рис. 1. Функциональная схема оптического спектрального прибора на базе акустооптического перестраиваемого фильтра

Акустооптическое взаимодействие

Принцип работы оптического спектрального прибора на базе АОПФ заключается в том, что оптического излучение дифрагирует на АОПФ, который используется в качестве динамической дифракционной решетки. Период дифракционной решетки зависит от формы управляющего электрического колебания. Электрическое колебание подается на пьезопреобразователь, расположенный в АОПФ. Пьезопреобразователь формируется акустическую волну в среде акустооптического взаимодействия (рис. 2).

В оптической схеме акустооптический модулятор 1 при подаче на него управляющего колебания $s(t)$ рассматривается как динамическая дифракционная решетка, а оптический когерентный Фурье-процессор содержит два слоя свободного пространства 2,4 и положительную линзу 3 с фокусным расстоянием F [5].

Решеткоподобная структура акустооптического модулятора может быть сформирована подачей на него управляющего сигнала в виде последовательности радиоимпульсов с мгновенной линейно-частотной модуляцией [6]:

$$s_1(t) = S_0 \exp(i(\Omega_0 t + V_F t^2 / 2)),\ \ t \in (kT_s, kT_s + \tau_s), \qquad (1)$$

где V_F – скорость изменения мгновенной частоты; T_s – период последовательности импульсов; $k = 0,1,2,...$; τ_s – длительность импульса. Скорость роста линейно-частотной модуляции представлен на рис. 2.

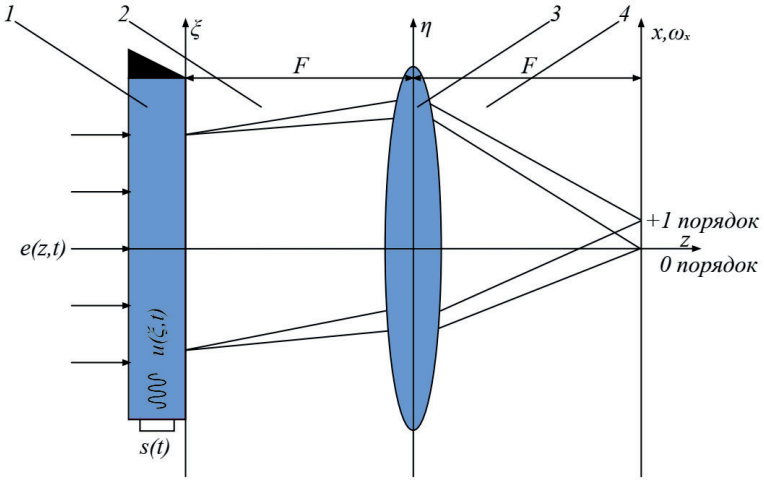


Рис. 2. Пример акустооптического взаимодействия

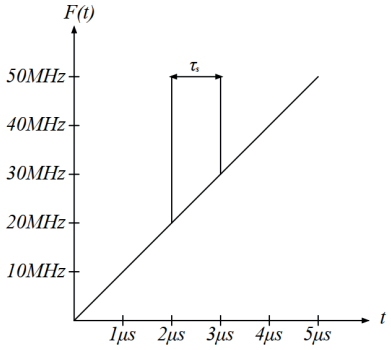


Рис. 2. Скорость роста линейно-частотной модуляции

Затухание акустической волны в среде акустооптического взаимодействия

Одним из свойств акустической среды, отрицательно влияющих на эффективность акустооптического взаимодействия является затухание акустиче-

ской волны в акустооптическом модуляторе. Затухание акустической волны в среде акустооптического взаимодействия:

$$F(\xi) = e^{\frac{-\alpha K \xi}{\omega}} \cdot \cos(-K\xi), \tag{2}$$

где $K = \frac{\omega}{V}$ – волновое число; V – скорость акустической волны; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot F$ – круговая частота, α – потери в материале акустооптического модулятора. На рис. 3 представлены расчеты затухания акустической волны в среде акустооптического взаимодействия. Материал акустооптического модулятора – парателлурит (диоксид теллура) TeO^2:

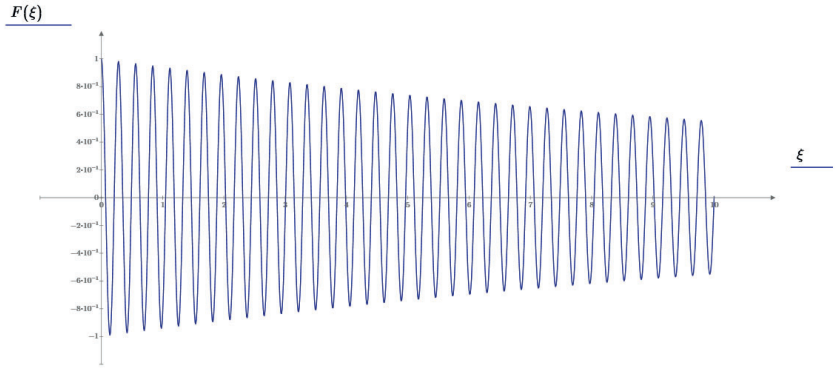


Рис. 3. Затухание акустической волны частотой 40МГц в акустооптическом модуляторе

Чтобы учесть отрицательное влияние затухания акустического сигнала в среде акустооптического взаимодействия, к управляющему сигналу с линейно-частотной модуляцией добавим амплитудную модуляцию обратно пропорциональную коэффициенту затухания:

$$F(t,\xi) = \frac{1}{e^{\frac{-\alpha K \xi}{\omega}}} \cdot \cos(2 \cdot \pi t(\frac{F_0}{2} + \frac{F_{\max} - F_{\min}}{Tc} \cdot t)), \tag{3}$$

где $F_{\min}$ – минимальное значение частоты; $F_{\max}$ – максимальное значение частоты; F_0 – частота несущей; T_c – длительность импульса. На рис. 4 представлен управляющий сигнал с линейно-частотной и амплитудной модуляцией.

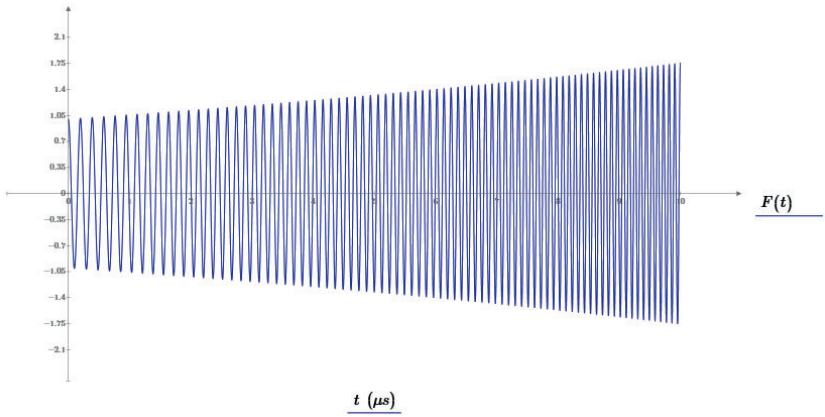


Рис. 4. Управляющий сигнал с линейно-частотной и амплитудной модуляцией

Таким образом, результаты моделирования показывают, что для математического описания акустооптического взаимодействия требуется учитывать затухание акустической волны в среде акустооптического взаимодействия.

Заключение

Предложен способ измерения спектра оптического сигнала спектральным прибором на базе акустооптического перестраиваемого фильтра при линейно-частотной модуляции сигнала с учетом затухания акустической волны в среде акустооптического взаимодействия. Представлен пример затухания акустической волны в среде акустооптического взаимодействия. Предложен коэффициент амплитудной модуляции управляющего сигнала для учета затухания акустического сигнала.

Представлена функциональная схема оптического спектрального прибора на базе акустооптического перестраиваемого фильтра в синхронном режиме работы формирователя управляющего сигнала и фотодетектора.

Библиографический список

1. *Пожар В. Э.* Методы акустооптической спектрометрии: автореф. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. М., 2005.

2. Пат. 86734 РФ, МПК8 G 01 J 3/26. Параллельный анализатор спектра сигналов оптического диапазона / И. Н. Архипов, М. А. Ваганов, С. В. Кулаков и др. (РФ). № 2009116195/22 // Изобретения и полезные модели. 2009. № 25. 2 с.

3. *Kalinin V., Moskaletz O.* Spectral measurement of optical radiation by acoustooptic methods // Proceedings of SPIE. 2003. Vol. 5381. P. 243–252.

4. *Калинин В. А.* Спектральные измерения в оптическом диапазоне с передачей анализируемых сигналов по оптическому волокну: дис. … канд. тех. наук. СПб., 2006. 133 с.

5. *Kazakov V., Korol G., Moskaletz O.* Investigations of spread function of the optical spectral device based on acousto-optic tunable filter. Proc. SPIE. Vol. 9889. Optical Modelling and Design IV. 98891O. 2016.

6. Measurement of optical spectrum by a spectral device based on an acousto-optic tunable filter with a stepwise tuning frequency / O. Moskaletz, M. Vaganov, V. Kazakov, A. Khomutov. Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11354. P. 113542.

УДК 535-15, 535.42

В. С. Хоркин*
кандидат физико-математических наук, физик 1 категории
М. Г. Мильков*
физик 1 категории
*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

АКУСТИЧЕСКИЕ И АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИНФРАКРАСНЫХ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ ГЕРМАНИЯ, СЕЛЕНА, КРЕМНИЯ И ТЕЛЛУРА

Исследованы акустические и акустооптические параметры стекол на основе германия, селена, кремния и теллура. Представлены результаты измерений для стекол, в химический состав которых входит германий, селен, теллур (GeSeTe), а также кремний и теллур (SiTe). Приведены основные свойства исследуемых стекол, такие как скорости продольных и сдвиговых акустических волн, а также величины акустооптического качества.
Ключевые слова: акустооптика, инфракрасные стекла, акустооптическое качество, германий, селен, кремний, теллур.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) №19-12-00072.

V. S. Khorkin*
PhD Sc. Phys.-Math., Physicist of the 1t kat
M. G. Mil'kov*
Physicist of the 1t kat
*M. V. Lomonosov Moscow State University

ACOUSTIC AND ACOUSTO-OPTIC PARAMETERS OF INFRARED GLASSES BASED ON GERMANIUM, SELENIUM, SILICON AND TELLURIUM

We investigated acoustic and acousto-optic parameters of glasses based on germanium, selenium, silicon and tellurium. The results of measurement are presented for two group of glasses including germanium, selenium and tellurium (GeSeTe) and silicon and tellurium (SiTe). We also present main parameters of these glasses, for example velocity of longitudinal and shear acoustic waves and the value of acousto-optic figure of merit.
Keywords: acousto-optic interaction, infrared glasses, acousto-optic figure of merit, germanium, selenium, silicon, tellurium.

На сегодняшний день акустооптические (АО) приборы широко используются для управления параметрами электромагнитного излучения в оптике, лазерной технике, спектроскопии, а также телекоммуникационных системах и устройствах оптической обработки информации. Зачастую, современные АО приборы управляют излучением видимого и ближнего инфракрасного диапазона [1]. В среднем (λ=2,5–7 мкм) и длинноволновом (λ=7–15 мкм) инфракрасных диапазонах АО устройства изготавливаются на основе кубического кристалла

германия, однако отсутствие оптической анизотропии ограничивает его применение в акустооптике [1], [2]. На сегодняшний день в качестве альтернативы кристалла германию рассматривается множество материалов – стекла на основе германия, селена, кремния и теллура [3], [4], халькогенидные стекла на основе мышьяка [5], а также кубические кристаллы галогенидов таллия (семейство кристаллов KRS) [6], [7]. К оптически анизотропным средам, применение которых также анализируется в акустооптике инфракрасного диапазона, относятся кристаллический теллур (Te), соединения таллия, мышьяка и селена (TAS), а также соли некоторых тяжелых металлов – каломель (Hg_2Cl_2), бромид (Hg_2Br_2) и йодид (Hg_2I_2) ртути [8, 9].

Данная работа является продолжением цикла исследований свойств стекол на основе германия, селена, кремния и теллура [3], [4]. Представлены результаты эксперимента, в ходе которого определены фазовые скорости продольных и сдвиговых акустических волн, а также коэффициенты АО качества M_2 рассматриваемых стекол. Полученные результаты показывают перспективность использования теллуровых стекол в среднем и длинноволновом диапазоне длин волн электромагнитного спектра.

При определении основных параметров сплавов на основе теллура были использованы стандартные методики. Фазовые скорости продольных и сдвиговых акустических волн определялась методами эхо-импульсов, а также акустооптическим методом. В случае акустооптического метода использовалось электромагнитное излучение с длиной волны λ=3,39 мкм, которое дифрагировало на акустической волне и по углу отклонения оптического излучения определялась скорость выбранной акустической волны. Для определения коэффициента акустооптического качества сплавов был использован метод Диксона. Данный метод позволяет определять коэффициент акустооптического качества M_2 неизвестного материала, в данном случае стекол GeSeTe и SiTe, относительно материала с известным коэффициентом АО качества.

Величины АО качества измерялись методом Диксона при помощи двух буферов на основе тяжелого флинта (ТФ-7) и плавленого кварца (SiO_2). Буфер на основе тяжелого флинта (ТФ-7) использовался для возбуждения в исследуемых стеклах продольной акустической волны, а буфер на основе плавленого кварца – для возбуждения сдвиговой волны. В качестве материала для склейки продольного буфера с теллуровыми стеклами использовался глицерин, а в случае сдвигового буфера – использовалась смесь глицерина с жженым сахаром [10].

Для возбуждения продольной акустической волны к стеклу ТФ-7 был прикреплен при помощи эпоксидной смолы с отвердителем преобразователь из пьезоэлектрической керамики ЦТС-19, который возбуждал в тяжелом флинте продольную акустическую волну. Частота основной гармоники пьезоэлектрического преобразователя оказалась равной f=2,8 МГц, но в работе использовались высшие нечетные гармоники указанного преобразователя вплоть до 17-й гармоники, что соответствует частоте f=51 МГц. Наиболее эффективно акустическая волна возбуждалась на следующих частотах (в скобках указаны номера

гармоник): f=21 МГц (7), f=27 МГц (9), f=33 МГц (11), f=39 МГц (13) и f=45 МГц (15), что обеспечивалось при помощи созданной цепи согласования буфера. Наилучшее электрическое согласование достигалось на частоте f=33 МГц, для которой величина коэффициента S_{11} матрицы рассеяния оказалась равной $S_{11} \approx$-6 dB. Это означает, что более 75 % электрической энергии преобразуется в энергию продольной акустической волны.

Сдвиговый буфер был изготовлен на основе плавленого кварца, к которому был приварен преобразователь из ниобата лития ($LiNbO_3$) с частотой основной гармоники f ≈60 МГц. Для данного буфера была создана цепь согласования, которая позволяла возбуждать сдвиговые волны в полосе частот f=45–75 МГц. Наилучшее согласование достигалось на частоте f ≈55 МГц и оказалось равным $S_{11} \approx$-5 dB. Это означает, что до 70 % электрической энергии преобразуется в энергию сдвиговой акустической волны.

Описанные выше буферы использовались для определения величин фазовых скоростей продольных и сдвиговых акустических волн в теллуровых стеклах. Результаты этих измерений приведены в табл. 1. Необходимо отметить, что представленные величины скоростей были получены и методом эхо-импульсов, и АО методом и совпали между собой для продольной акустической волны. Для сдвиговой акустической волны в табл. 1 представлены результаты, полученные при помощи метода эхо-импульсов.

Таблица 1

Скорость акустических волн в сплавах систем SiSeTe и GeSeTe

Химический состав	Скорость продольных акустических волн v_L, м/с	Литературные данные v_L, м/с [3], [4]	Скорость сдвиговых акустических волн v_S, м/с
$Si_{25}Te_{75}$	1920 ± 50	–	1160 ± 20
$Si_{20}Te_{80}$	–	2030 ± 40	–
$Ge_{33}Se_{33}Te_{33}$	2230 ± 20	–	1260 ± 20
$Ge_{30}Se_{30}Te_{40}$	2200 ± 20	2400 ± 50	1260 ± 30
$Ge_{30}Se_{25}Te_{45}$	2200 ± 30	2300 ± 40	1230 ± 20
$Ge_{30}Se_{25}Te_{60}$	2050 ± 10	2120 ± 40	1210 ± 20

Как следует из представленных в табл. 1 результатов, исследованные стекла обладают достаточно низкими скоростями ультразвука. Так величины скоростей продольных акустических волн немногим превышали 2000 м/с, наибольшее значение было получено для стекла с химическим составом $Ge_{33}Se_{33}Te_{33}$ и оказалось равно v_L=(2230 ± 20) м/с. Полученные результаты совпадают с имеющимися литературными данными [3], [4].

Также была измерена скорость сдвиговых акустических волн в теллуровых стеклах, например, для стекла с химическим составом $Ge_{33}Se_{33}Te_{33}$ она оказалась равна v_S=(1240 ± 20) м/с. Как видно из данных, представленных в табл. 1, стекла на основе теллура обладают низкими по абсолютной величине фазовыми скоростями сдвиговых волн.

Далее были проведены измерения величин АО качества при дифракции на продольной и сдвиговой акустических волнах. Следует отметить, что коэффициент качества при дифракции на продольной акустической волне измерялся для двух состояний поляризации оптического излучения – вектор поляризации параллелен ($M_{2||}$) и ортогонален ($M_{2\perp}$) волновому вектору ультразвука. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициент АО качества для стекол систем SiSeTe и GeSeTe

Химический состав	Продольная акустическая волна		Сдвиговая акустическая волна
	$M_{2\|\|}, 10^{-15} c^3/кг$	$M_{2\perp}, 10^{-15} c^3/кг$	$M_{2S}, 10^{-15} c^3/кг$
$Si_{25}Te_{75}$	1200 ± 200	800 ± 100	65 ± 10
$Si_{20}Te_{80}$	–	–	–
$Ge_{33}Se_{33}Te_{33}$	380 ± 80	300 ± 40	–
$Ge_{30}Se_{30}Te_{40}$	420 ± 80	240 ± 40	23 ± 2
$Ge_{30}Se_{25}Te_{45}$	440 ± 80	240 ± 40	–
$Ge_{25}Se_{15}Te_{60}$	1300 ± 250	700 ± 100	90 ± 10

Из полученных результатов видно, что наибольшая величина АО качества достигается при дифракции на продольной акустической волне и равна $M_{2||} = (1300 \pm 250) \cdot 10^{-15} c^3/кг$ для стекла с химическим составом $Ge_{25}Se_{15}Te_{60}$. Полученная величина превышает максимальное значение АО качества для кристалла германия ($M_2 = 190 \cdot 10^{-15} c^3/кг$ при дифракции на продольной волне, распространяющейся вдоль направления [111] кристалла [4]) примерно в 6 раз, что показывает перспективность использования теллуровых стекол в акустооптике среднего и длинноволнового инфракрасного диапазона.

Также из табл. 2 видно, что для этого же образца (химический состав $Ge_{25}Se_{15}Te_{60}$) наблюдается наибольшая разница между величиной АО качества M_2 при дифракции на продольной акустической волне с различными поляризациями электромагнитного излучения ($M_{2||} = (1300 \pm 250) \cdot 10^{-15} c^3/кг$ и $M_{2\perp} = (700 \pm 100) \cdot 10^{-15} c^3/кг$ соответственно). Это напрямую влияет на величину АО качества при дифракции на сдвиговой акустической волне – $M_{2S} = (90 \pm 10) \cdot 10^{-15} c^3/кг$. Как видно из табл. 2, величина АО качества при дифракции на сдвиговой акустической волне M_{2S} является наибольшей в стекле $Ge_{25}Se_{15}Te_{60}$ относительно других рассмотренных стекол. Также необходимо

отметить, что в двух стеклах с химическим составом $Ge_{33}Se_{33}Te_{33}$ и $Ge_{30}Se_{25}Te_{45}$ дифракция на сдвиговой акустической волне экспериментально не наблюдалась. Предполагается, что это связано с низким значением АО качества, величина которого по теоретическим оценкам не превышает $M_{2S} \leq 5 \cdot 10^{-15} c^3 / кг$.

Кроме того, из полученных экспериментальных результатов следует, что наибольшие величины АО качества при дифракции на продольной акустической волне наблюдаются в стеклах с большей концентрацией теллура. Эти результаты совпадают с имеющимися литературными данными [3], [4]. Однако из табл. 2 также следует, что при увеличении концентрации теллура в стеклах возрастает и разница между коэффициентами качества для разных поляризаций оптического излучения ($M_{2\parallel}$ и $M_{2\perp}$), что эквивалентно возрастанию коэффициента АО качества на сдвиговых акустических волнах. Этот факт был подтвержден экспериментально и продемонстрирован в настоящей работе.

Таким образом, в работе представлены результаты исследований параметров стекол систем GeSeTe и SiSeTe. Экспериментально определены величины скоростей продольных и сдвиговых акустических волн, а также определены значения коэффициента АО качества M_2 при дифракции на этих волнах. Получено, что при увеличении концентрации теллура в стеклах коэффициент АО качества при дифракции и на продольных, и на сдвиговых акустических волнах возрастает. Это показывает перспективность применения сплавов на основе германия, селена, кремния и теллура с большой концентрацией теллура в качестве основы для акустооптических устройств среднего и длинноволнового инфракрасных диапазонов.

Библиографический список

1. *Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е.* Физические основы акустооптики. М: Радио и связь, 1985. 280 с.

2. *Fox A.* Acoustooptic figure of merit for single crystal germanium at 10.6-μm wavelength // Appl. Opt. 1985. Vol. 24. N 4. P. 2040–2041.

3. Investigation of acousto-optic properties of tellurium-based glasses for infrared applications / V. Voloshinov, N. Gupta, L. Kulakova et al. J. Opt. 2016. Vol. 18. P. 025402–025411.

4. Акустооптические свойства сплавов на основе германия, селена, кремния и теллура / В. С. Хоркин, В. Б. Волошинов, А. И. Ефимова, Л. А. Кулакова // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 2. С. 250–255.

5. *Ohmachi Y., Uchida N.* Vitreous As_2Se_3 Investigation of AO properties and application to infrared modulator // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. P. 1709–1712.

6. Anisotropic acousto-otic interaction in KRS-5 cubic crystal possessing induced optical anisotropy / Voloshinov V., Khorkin V., Kuznetsov M., Subbotin K. // Proc. SPIE 11210, 14th School of Acousto-Optics and Applications. 2019. P. 112100E.

7. *Voloshinov V., Porokhovnichenko D., Dyakonov E.* Design of far-infrared acousto-optic tunable filter based on backward collinear interaction // Ultrasonics. 2018. Vol. 88. P. 207–212.

8. Optic, acoustic and acousto-optic properties of tellurium in close-to axis regime of diffraction / V. Voloshinov, V. Khorkin, L. Kulakova, N. Gupta // Journal of Physics Communications. 2017. Vol. 1. N 2. P. 025006.

9. Implementation of the wide-angle acousto-optical interaction geometry in a mercury bromide single crystal / E. Dyakonov, D. Porokhovnichenko, J. Ryu, V. Balakshy // Appl. Opt. 2021. Vol. 60. P. 2348–2353.

10. Экспериментальное исследование акустической склейки акустооптическим способом / М. Г. Мильков, А. И. Кокшайский, И. В. Скачков, Н. В. Ширгина // Труды XVII всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» им. А. П. Сухорукова, секция Акустоэлектроника и акустооптика. 2020. С. 14–16.

УДК 534.29

О. В. Шакин*
доктор технических наук, профессор
В. И. Казаков*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕДИ

Рассчитан и изготовлен акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ) на основе кристалла парателлурита TeO_2 для перестройки длины волны излучения лазера на парах меди. Геометрия акустооптического взаимодействия в АОПФ для выполнения широкоугольной спектрально-селективной дифракции основана на параллельности касательных к волновым поверхностям падающего и дифрагированного света. Решена система уравнений для заданных выше условий и определена максимальная числовая апертура фильтра в плоскости рассеяния. Установлено, что необходимый угол отклонения акустического волнового вектора от направления [110] приводит, в силу большой упругой анизотропии парателлурита, к значительному отклонению вектора групповой скорости, или потока энергии. Этот угол между векторами фазовой и групповой скоростями может составлять десятки градусов, что приводит к необходимости изготавливать акустооптическую ячейку особой формы. Кроме того, при отклонении от направления [110] это приводит также и к изменению скорости упругих волн, в данном случае к ее увеличению и, в результате, к снижению эффективности акустооптического взаимодействия. Рассчитано, что максимальная числовая апертура в плоскости дифракции получается при угле отклонения вектора упругих волн от направления [110] примерно на 18 градусов. В этом случае числовая апертура в плоскости дифракции почти вдвое превышает числовую апертуру в ортогональной плоскости. Поэтому для случая одинаковой числовой апертуры достаточно выбрать угол около 10 градусов. В работе представлено математическое описание и результаты расчета основных характеристик акустооптического перестраиваемого фильтра. На основе выполненных исследований изготовлен и экспериментально исследован акустооптический перестраиваемый фильтр для управления параметрами лазера на парах меди на двух длинах волн излучения 510,6 нм и 578,2 нм.
Ключевые слова: АОПФ, лазер на парах меди, парателлурит, акустооптическая ячейка, дифракция, апертура.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № Ф20Р-286) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): проект №20-57-00004.

O. V. Shakin*
Dr. Sc. Tech., Professor
V. I. Kazakov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ACOUSTO-OPTIC TUNABLE FILTER FOR TUNING A COPPER VAPOR LASER

An acousto-optic tunable filter (AOTF) based on a paratellurite crystal for tuning the radiation wavelength of a copper vapor laser has been calculated and manufactured. The geometry of acousto-optic

interaction in AOTF for performing wide-angle spectral-selective diffraction is based on the parallelism of the incident and diffracted light tangents to the wave surfaces. The system of equations for the above conditions is solved and the maximum numerical aperture of the filter in the scattering plane is determined. It has been found that the required angle of deviation of the acoustic wave vector from the [110] direction leads, due to the large elastic anisotropy of paratellurite, to a significant deviation of the group velocity vector, or energy flux. This angle between the vectors of the phase and group velocities can be tens of degrees, which makes it necessary to manufacture an acousto-optic cell of a special shape. In addition, when deviating from the [110] direction, this also leads to a change in the velocity of elastic waves, in this case to its increase and, as a result, to a decrease in the efficiency of acousto-optic interaction. It is calculated that the maximum numerical aperture in the diffraction plane is obtained at an angle of deviation of the elastic wave vector from the [110] direction by approximately 18 degrees. In this case, the numerical aperture in the diffraction plane is almost twice the numerical aperture in the orthogonal plane. Therefore, for the case of the same numerical aperture, it is sufficient to choose an angle of about 10 degrees. The paper presents a mathematical description and calculation results for the main characteristics of an acousto-optic tunable filter. Based on the performed studies, an acousto-optic tunable filter for controlling the parameters of a copper vapor laser at two radiation wavelengths 510.6 nm and 578.2 nm was fabricated and experimentally investigated.
Keywords: AOTF, copper vapor laser, paratellurite crystal, acousto-optic cell, diffraction, aperture.

Введение

Принцип работы акустооптического перестраиваемого фильтра основан на особенностях анизотропной дифракции света [1], [2]. В АОПФ из TeO_2 используется анизотропная дифракция света на звуке, а нормальными типами световых волн являются волны с линейной поляризацией. Поверхность волновых векторов в случае оптически одноосных кристаллов будет представлять собой две поверхности второго порядка: сферу и эллипсоид вращения, соприкасающиеся между собой в направлении оптической оси при отсутствии оптической активности. Эти особенности распространения оптических и упругих волн в кристаллических анизотропных средах и используются при создании перестраиваемых фильтров.

Действие акустооптического перестраиваемого фильтра можно понять на примере прохождения света через дифракционную решетку. Дифракционной решеткой здесь служит акустическая волна. Период дифракционной решетки определяется длиной акустической волны и легко изменяется при перестройке частоты упругих волн. Спектральное разрешение на длине волны света λ определяется соотношением

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \tag{1}$$

где Δλ – ширина спектральной линии.

Спектральное разрешение акустооптической ячейки будет определяться числом укладывающихся в оптической апертуре D длин волн

$$R = \frac{D}{\Lambda}\cos\theta = \frac{fD}{V}\cos\theta = \frac{L}{\Lambda}\sin\theta, \tag{2}$$

где f и V – частота и скорость акустических волн; L – длина взаимодействия оптических и акустических волн.

Так как $\frac{D}{\Lambda}\cos\theta = \tau$ – это время прохождения акустической волны через оптическую апертуру, то

$$R = f\tau. \qquad (3)$$

Следовательно, для получения большого разрешения необходимо использовать высокие частоты упругих волн и материалы с малой скоростью распространения акустических волн. Максимальное разрешение ограничено увеличением затухания акустических волн при повышении частоты и габаритами выращиваемых кристаллов, когда выполняются условия дифракции для одной частоты упругих волн и конуса углов оптического излучения.

В результате исследования анизотропной дифракции в одноосном кристалле ниобата лития оказалось, что можно выбрать такие условия акустооптического взаимодействия, что конусу падающих оптических лучей может соответствовать одна частота упругих волн, обеспечивая перестройкой частоты выбор длины волны дифрагированного излучения [3].

Геометрия акустооптического взаимодействия в АОПФ для выполнения широкоугольной спектрально-селективной дифракции основана на параллельности касательных к волновым поверхностям падающего и дифрагированного света. Условия акустооптического взаимодействия определяются из уравнений касательных к эллипсу и окружности. По ним определяют углы падения падающего и дифрагированного света. Решая систему уравнений для заданных выше условий, можно определить максимальную числовую апертуру фильтра в плоскости рассеяния.

Необходимый угол отклонения акустического волнового вектора от направления [110] приводит в силу большой упругой анизотропии парателлурита к значительному отклонению вектора групповой скорости, или потока энергии. Этот угол между векторами фазовой и групповой скоростями может составлять десятки градусов, что приводит к необходимости изготавливать акустооптическую ячейку особой формы. Кроме того, при отклонении от направления [110] это приводит также и к изменению скорости упругих волн, в данном случае к ее увеличению и в результате – к снижению эффективности акустооптического взаимодействия, так как M_2 обратно пропорционально кубу скорости упругих волн.

Максимальная числовая апертура в плоскости дифракции получается при угле отклонения вектора упругих волн от направления [110] примерно на 18°. В этом случае числовая апертура в плоскости дифракции почти вдвое превышает числовую апертуру в ортогональной плоскости. Поэтому для случая одинаковой числовой апертуры достаточно выбрать угол около 10°, как это и было сделано в [3]. Основные характеристики фильтра данной конструкции можно определить следующим образом.

Пусть векторы падающего k_1 и дифрагированного k_2 света направлены под углами θ_1 и θ_2 к оптической оси. Волновой вектор упругой волны составляет некоторый угол β с направлением [110] в плоскости рассеяния (рис. 1).

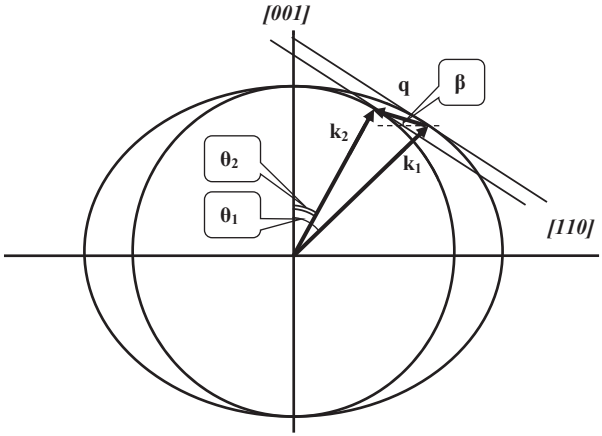


Рис.1. Геометрия акустооптического взаимодействия в неколлинеарном широкоапертурном фильтре на парателлурите [3]

Сечение поверхности волновых векторов изображено для одноосного оптически положительного кристалла без учета оптической активности.

Угол β будет определяться из условия параллельности касательных к окружности и эллипсу в точках начала и конца волнового вектора упругой волны. Это условие является необходимым для обеспечения большой угловой апертуры селектируемого излучения.

Параметры взаимодействия в этом случае связаны следующими соотношениями:

$$\left(\frac{|q|\lambda_0}{2\pi}\right)^2 = A^2 + B^2,\ \mathrm{tg}\beta = \frac{A}{B}, \qquad (4)$$

где

$$A = \frac{n_0}{Y} - \frac{n_e^2}{X},\ B = \frac{n_0 t}{Y} - \frac{n_0^2 t}{X},\ X = \sqrt{1+t^2},\ Y = \sqrt{t^2 n_e^2 + n_0^2},\ t = -\frac{n_0^2}{n_e^2} tg\theta_1. \quad (5)$$

Здесь n_0 и n_e – обыкновенный и необыкновенный показатели преломления кристалла, $|q|=2\pi\nu/V$ – величина волнового вектора упругой волны с частотой ν и скоростью V. Необходимо также учитывать, что скорость упругой волны зависит от направления распространения, то есть является функцией угла β. Эта зависимость аналитически определяется следующим выражением, полученным на основании работ [4], [5]:

$$3\rho V = \left(2\Gamma_{11} + \Gamma_{33} - 2\left(3\left(\Gamma_{12}^2 + 2\Gamma_{13}^2\right) + \left(\Gamma_{33} - \Gamma_{11}\right)^2 \right)^{0,5} \times \cos\left(\frac{\left(\Gamma_{33} - \Gamma_{11}\right)\left(9\left(\Gamma_{13}^2 - \Gamma_{12}^2\right) + \left(\Gamma_{33} - \Gamma_{11}\right)^2\right) + \left(27\Gamma_{13}^2\Gamma_{33}\right)}{3\left(3\left(\Gamma_{12}^2 + 2\Gamma_{13}^2\right) + \left(\Gamma_{33} - \Gamma_{11}\right)^2\right)^{1,5}} - 60 \right) \right)^{0,5}, \quad (6)$$

где

$$\Gamma_{11} = \frac{1}{2}\left(c_{11} + c_{66}\right)\cos^2\beta + c_{44}\sin^2\beta,\ \Gamma_{12} = \frac{1}{2}\left(c_{12} + c_{66}\right)\cos^2\beta,$$
$$\Gamma_{13} = \frac{\sqrt{2}}{4}\left(c_{13} + c_{44}\right)\sin 2\beta,\ \Gamma_{33} = c_{33}\sin^2\beta + c_{44}\cos^2\beta. \quad (7)$$

На рис. 2. представлено сечение поверхности фазовой скорости медленной квазипоперечной упругой волны для кристалла парателлурита, рассчитанные по вышеприведенным формулам (6).

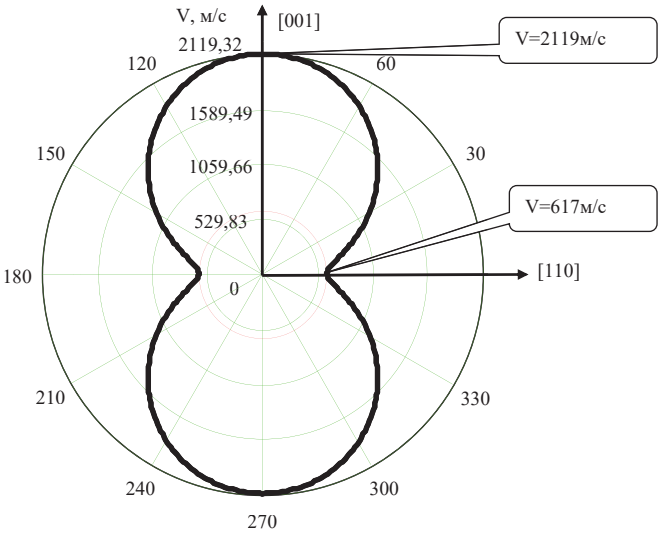


Рис. 2. Скорость медленной квазипоперечной волны в парателлурите в плоскости $(1\bar{1}0)$

При распространении медленной квазипоперечной упругой волны в кристалле парателлурита в плоскости $\left(1\bar{1}0\right)$, наблюдается сильное отклонение потока акустической энергии.

Угол между направлением групповой скорости медленной сдвиговой волны и кристаллографическим направлением оптической оси [100] в плоскости определяется по формуле:

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{c_{11} - c_{12}}{2c_{44}}\mathrm{ctg}\beta, \qquad (7)$$

где α – угол между звуковой гранью и вектором потока энергии, а по оси X отложен угол β между кристаллографическим направлением [110] и направлением волнового вектора звука q.

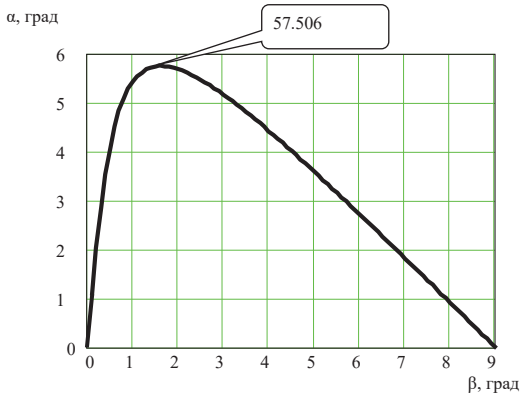


Рис. 3. Отклонение вектора потока энергии при отклонении волнового вектора от направления [110] в кристалле парателлурита

Выбрав угол отклонения вектора упругих волн β, определяем диапазон частоты перестройки упругих волн и определяем спектральное разрешение фильтра (рис. 4, 5).

Подавая на пъезопреобразователь АОПФ радиоимпульсы с несущими частотами Ω_1 или Ω_2 раздельно или одновременно, которые заполняют звукопровод АОПФ перед началом генерации лазерного импульса, получаем на выходе световые импульсы с заданной длиной волны. Частоты Ω_1 и Ω_2, соответствующие λ_1 и λ_2, в нашем случае равнялись 157 МГц и 133 МГц. Блок управления позволял управлять временем появления каждого светового импульса, а амплитуда световых импульсов могла изменяться путем изменения амплитуды радиоимпульсов на входе АОПФ.

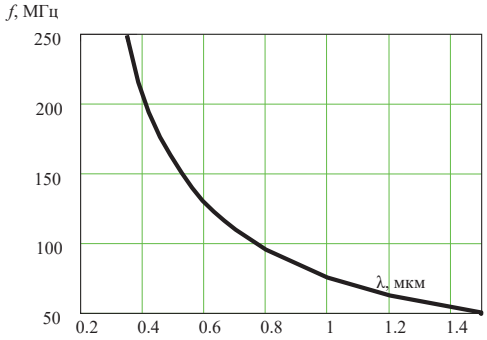


Рис. 4. Соотношение частоты упругих волн и селектируемой длины волны в неколлинеарном акустооптическом перестраиваемом фильтре, выполненном на кристалле парателлурита

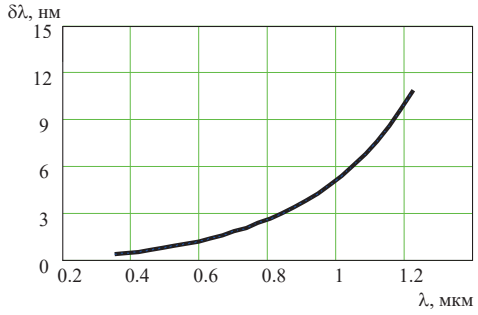


Рис. 5. Зависимость полосы пропускания δλ акустооптического перестраиваемого фильтра от длины волны λ селектируемого излучения

Таким образом, использование системы внутрирезонаторного управления выходным излучением лазера на парах меди на основе АОПФ позволяет управлять длиной волны и амплитудой каждого светового импульса лазера на парах меди без изменения режима разогрева активного элемента и направления распространения света. Кроме того, АОПФ из TeO_2 выполняет роль эффективного поляризатора лазерного излучения. Сравнение выходных мощностей лазера с АОПФ из TeO_2 и установленной на то же место призмы Глана показало, что для одной и той же мощности накачки средняя выходная мощность лазера на парах меди остается практически одинаковой при эффективности дифракции в АОПФ ≈80 %.

Рис. 6. Изменение длины волны лазера на парах меди

На основе выполненных исследований был изготовлен и экспериментально исследован акустооптический перестраиваемый фильтр для управления параметрами лазера на парах меди на двух длинах волн излучения λ_1= 510,6 нм и λ_2= 578,2 нм [6].

Заключение

Использование системы внутрирезонаторного управления выходным излучением лазера на парах меди на основе АОПФ позволило управлять длиной волны и амплитудой каждого светового импульса лазера на парах меди без изменения режима разогрева активного элемента и направления распространения света.

Кроме того, АОПФ из TeO_2 выполняет роль эффективного поляризатора лазерного излучения. Сравнение выходных мощностей лазера с АОПФ из TeO_2 и установленной на то же место призмы Глана показало, что для одной и той же мощности накачки средняя выходная мощность лазера на парах меди остается практически одинаковой.

Библиографический список

1. *Korpel A.* Acousto-Optics. Marcel Dekker. New York, 1988.

2. *Леманов В. В., Шакин О. В.* Рассеяние света на упругих волнах в одноосных кристаллах // Физика твердого тела. 1972. Т. 14. №. 1. С. 229.

3. *Chang I.* Non-collinear acousto-optic filter with large angular aperture // Appl. Phys. Lett. 1974. 25. № 7. P. 370–372.

4. *Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П.* Основы кристаллофизики: учеб. пособие. М.: Наука, 1979. 639 с.

5. *Every A.* General closed-form expressions for acoustic wave in elastically anisotropic solids // Phys. Rev. B. 1980. Vol. 22. P. 1746–1760.

6. *Гуляев Ю. В., Казарян М. А., Мокрушин Ю. М.* Акустооптические лазерные системы формирования телевизионных изображений. М.: Физматлит, 2016 240 с.

УДК 534.26:535.52

К. Б. Юшков*
кандидат физико-математических наук
Н. Ф. Науменко*
кандидат физико-математических наук
*Национальный исследовательский технологический университет МИСиС

ТЕНЗОРНЫЕ СВОЙСТВА КРИВИЗНЫ ВОЛНОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В КРИСТАЛЛАХ: ПРИМЕНЕНИЯ В ОПТИКЕ И АКУСТИКЕ

Рассмотрен строгий тензорный подход к анализу кривизны оптических и акустических волновых поверхностей кристаллов. Показано, что расходимость волновых пучков в анизотропной среде определяется главными значениями тензора кривизны, а направления автоколлимации существуют тогда и только тогда, когда одно из собственных значений является нулевым. Проблема рассмотрена в приложении к распространению акустических волн в кристаллах с сильной анизотропией и анализу фазового синхронизма в акустооптике и нелинейной оптике.
Ключевые слова: волновая поверхность, тензор кривизны, анизотропия, дифракция, фазовый синхронизм.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 21-12-00247).

K. B. Yushkov*
PhD Sc. Phys.-Math.
N. F. Naumenko*
PhD Sc. Phys.-Math.
*National University of Science and Technology MISiS

TENSOR PROPERTIES OF WAVE NORMAL SURFACES IN CRYSTALS: APPLICATIONS IN OPTICS AND ACOUSTICS

Rigorous tensor method of optical and acoustic wave normal surface curvature analysis is proposed. It is shown that the divergence of the finite-size beams depends only on the eigenvalues of the curvature tensor and the beam autocollimation takes place if and only if only one of the eigenvalues is zero. The problem is considered in the application to propagation of acoustic beams in strongle anisotropic crystals and to analysis of phase matching in acousto-optics and nonlinear optics.
Keywords: wave normal surface, curvature tensor, anisotropy, diffraction, phase matching.

Введение

Распространение волновых пучков ограниченной апертуры в анизотропных средах широко используется в различных прикладных задачах оптики и акустики и волновой электроники. Дифракция пучков может оказывать существенное влияние на характеристики устройств, поэтому анализ физических свойств кристаллов, отвечающих за анизотропию дифракционной расходимости акустических и электромагнитных пучков, является актуальной теоретической задачей. Для ее решения используется тензор кривизны волновой поверхности.

Определение и свойства тензора кривизны

Нормированный тензор кривизны волновой поверхности W выражается через компоненты вектора волновой нормали s и вектора нормированной поперечной компоненты групповой скорости g [1]– [3]:

$$W_{mn} = \delta_{mn} - s_m s_n + g_m g_n + \partial g_m / \partial s_n , \qquad (1)$$

где δ_{mn} – символ Кронекера, а вектор g определяется через фазовую скорость v и групповую скорость $\mathbf{v}_g$:

$$\mathbf{g} = \mathbf{v}_g / v - \mathbf{s} . \qquad (2)$$

Для нахождения вектора **g** удобно использовать свойство параллельности вектора $\mathbf{v}_g$ вектору Умова-Пойнтинга.

Тензор W_{mn} является планарным тензором, то есть $W_{mn} s_m s_n = 0$, и имеет два собственных значения w_1 и w_2, соответствующие собственным векторам d_1 и d_2. Третьим собственным вектором тензора является вектор s с тождественно нулевым собственным значением. В общем случае собственные значения тензора кривизны w_j (j=1,2) могут быть как положительными, так и отрицательными, а также могут принимать нулевые значения. Величины w_j обратно пропорциональны главным радиусам кривизны волновой поверхности в направлении вектора s.

Задача нахождения величин w_j решается следующим образом. Для выбранного направления волновой нормали s и выбранной моды находится величина фазовой скорости v и вектор групповой скорости $\mathbf{v}_g$, что позволяет найти вектор **g**. Как в случае оптики, так и в случае акустики, вектор $\mathbf{v}_g$ может быть найден аналитически. Далее выбираются два произвольных направления, ортогональных вектору **s**, и осуществляется численное дифференцирование $g(s)$ по этим направлениям. Это позволяет найти компоненты тензора W_{mn} и далее решить задачу на собственные значения, в результате чего находятся величины w_j и собственные векторы d_j.

Физический смысл коэффициентов w_j заключается в том, что они определяют масштабирование функции Грина однородной анизотропной среды в направлении векторов d_1 и d_2. Рассмотрим поле плоского источника $A_0(r)$, расположенного в плоскости $z = 0$. В случае когда оба коэффициента ненулевые, то есть $w_1 w_2 \neq 0$, функция Грина принимает вид:

$$G(\mathbf{r}) = ik / (2\pi z)(w_1 w_2)^{1/2} \exp(ikz) \exp\{ik[(x - g_1 z)^2 / w_1 + (y - g_2 z)^2 / w_2] / (2z)\} \qquad (3)$$

где $g_j = (\mathbf{g}\mathbf{d}_j)$. В случае изотропной среды выполняются тождества $g_j = 0$ и $w_j = 1$, и данное выражение совпадает с функцией Грина свободного пространства в приближении дифракции Френеля [4]. Выражение для скалярного поля A(r) определяется интегралом:

$$A(\mathbf{r}) = \int A_0(\mathbf{r}') G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \qquad (4)$$

Иными словами, A(r) является решением параболического уравнения с мнимыми коэффициентами диффузии $D_j = i\,|\,w_j\,|\,/(2k)$.

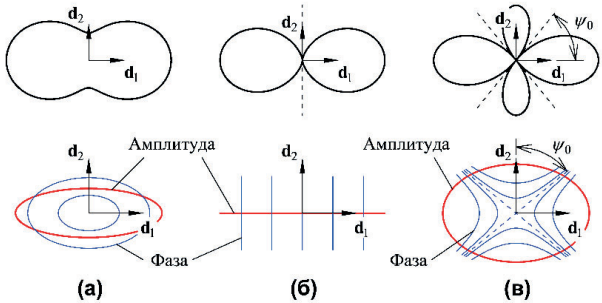


Рис. 1. Кривые значений тензора кривизны в плоскости (d_1, d_2) и соответствующая геометрия распределения амплитуды и фазы пучка в дальней зоне дифракции: (а) $w_1 w_2 > 0$*; (б)* $w_1 w_2 = 0$*, направление автоколлимации; (в)* $w_1 w_2 < 0$

Отметим, что распределение амплитуды поля определяется только модулем величин w_j, в то время как геометрия волновых фронтов зависит от знаков w_j. В случае если w_1 и w_2 отрицательны, волновые фронты вогнуты и имеют форму эллиптического параболоида; в случае если знаки w_1 и w_2 различны, волновые фронты имеют форму гиперболического параболоида; в случае если w_1 и w_2 положительны, волновые фронты выпуклы и имеют форму эллиптического параболоида. Особым случаем являются направления автоколлимации, когда один из коэффициентов w_j равен нулю. Возможные формы кривых значений тензора кривизны и соответствующие им распределения амплитуды и фазы в дальней зоне дифракции приведены на рис. 1.

Применения тензора кривизны

Одной из задач акустики кристаллов является поиск акустических осей, то есть направлений вырождения двух мод. Особый интерес представляют оси конического типа, в которых наблюдается сингулярность поля поляризаций и внутренняя коническая рефракция. Вблизи конических осей характеристики распространения волн в среде испытывают сильные изменения, что позволяет, в частности, реализовывать различные типы акустоэлектронных устройств. Коническая ось представляет собой направление, в котором поверхность медленности не дифференцируема, следовательно, отсутствует однозначно определенный вектор групповой скорости v_g и один из коэффициентов w_j бесконечен. Это свойство может быть использовано для нахождения акустических осей в кристаллах [3].

Из теории известно, что максимальное число акустических осей в кристалле произвольной симметрии составляет 16, причем в кристаллах тригональной системы и в системах низших симметрий акустические оси могут

существовать в произвольных направлениях вне плоскостей симметрии. В качестве примера на рис. 2 приведен расчет коэффициентов тензора кривизны в моноклинных кристаллах калий-гадолиниевого вольфрамата (КГВ) и калий-иттриевого вольфрамата (КИВ). На диаграммах изображен меньший из двух коэффициентов (w_2) для медленной квазисдвиговой моды. Точки, в которых $w_2 \to -\infty$ соответствуют коническим акустическим осям. Несмотря на близость значений упругих модулей этих кристаллов, топология поверхностей медленности и количество акустических осей различно. Коэффициенты кривизны волновых поверхностей позволяет оценивать дифракционное снижение интенсивности акустических пучков в кристаллах, что необходимо для оптимизации многих акустооптических устройств.

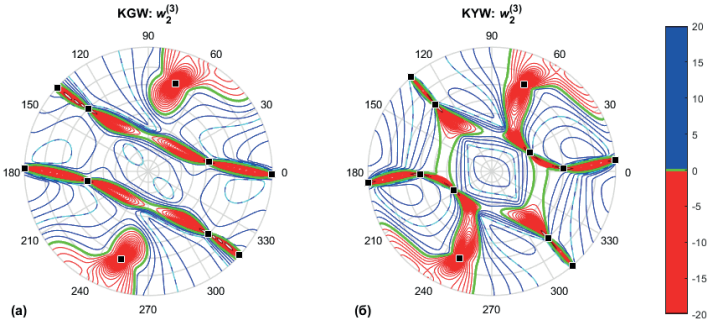


Рис. 2. Пространственное распределение коэффициента дифракции w_2 для медленной квазисдвиговой акустической моды и положение акустических осей в кристаллах калий-редкоземельных вольфраматов: (а) КГВ; (б) КИВ

Помимо решения задачи дифракции в параксиальном приближении, тензор дифракции позволяет анализировать топологию двумерных передаточных функций широкоапертурного акустооптического взаимодействия. Общим свойством всех широкоапертурных геометрий взаимодействия является параллельность касательных к волновым поверхностям взаимодействующих волн. Это условие означает, что величина фазовой расстройки в любом поперечном сечении зависит от углового отклонения квадратично или как полином более высокой степени. Проанализируем случай одноосного кристалла. Для обыкновенной волны волновая поверхность изотропна и коэффициенты дифракции единичны, $w_1 = w_2 = 1$. Для необыкновенной волны коэффициенты дифракции зависят от полярного угла и различаются для направлений в главной плоскости и перпендикулярно ей. Коэффициент дифракции в главной плоскости w_p монотонно меняется от величины $\varepsilon_{11}/\varepsilon_{33}$ в направлении оптической оси до величины $\varepsilon_{33}/\varepsilon_{11}$ ортогонально ей. Единственная точка, в которой w_p=1, является точкой сверхширокоапертурной дифракции. Коэффициент дифракции

ортогонально главной плоскости $w_s = n_e^2 / \varepsilon_{33}$ также меняется монотонно но никогда не принимает значения 1: для положительных кристаллов ($\varepsilon_{11} < \varepsilon_{33}$) $w_s > 1$, а для отрицательных кристаллов ($\varepsilon_{11} > \varepsilon_{33}$) $w_s < 1$. Таким образом, в направлениях вблизи оптической оси и реализуется двумерная передаточная функция О-типа, причем угловые апертуры фазового синхронизма в плоскости дифракции и ортогонально ей практически равны $w_p \approx w_s$. В направлениях ортогонально оптической оси и близких к нему всегда выполняется неравенство $(w_p - 1)(w_s - 1) < 0$, то есть кривизна волновой поверхности необыкновенной волны в одном направлении больше 1, а ортогональном направлении меньше 1. Благодаря этому существуют два симметричных направления в поперечном сечении пучка, в которых кривизна волновой поверхности необыкновенной волны равна 1, а двумерная передаточная функция имеет Х-тип.

Заключение

Анализ кривизны волновых поверхностей акустических и оптических волн в кристаллах методами дифференциальной геометрии позволяет решать важные практические задачи разработки и оптимизации акустооптических и акустоэлектронных приборов, а также исследовать некритичные по углу конфигурации нелинейно-оптического взаимодействия, не прибегая к явному решению задачи распространения волновых пучков в анизотропной среде. Данный формализм является аналитическим обобщением коэффициентов анизотропии, определяемых через ширину лучевых спектров пучков [5], в пределе малой расходимости. При этом вычисляемые коэффициенты кривизны определяются только материальными константами среды и не зависят от параметров расчета структуры акустического пучка (длины волны, формы источника), а также применимы для произвольных направлений и физических свойств среды, включая пьезоэлектрические акустические кристаллы и гиротропные оптические кристаллы.

Библиографический список

1. *Хаткевич А. Г.* Дифракция и распространение пучков ультразвукового излучения в монокристаллах // Акустический журнал. 1978. Т. 24. № 1. С. 108.

2. *Naumenko N., Yushkov K., Molchanov V.* Extreme acoustic anisotropy in crystals visualized by diffraction tensor // The European Physical Journal – Plus. 2021. Vol. 136. N 1. P. 95.

3. *Yushkov K., Naumenko N.* Optical beam diffraction tensor in birefringent crystals // Physical Review A. 2021 (submitted).

4. *Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П.* Теория волн. М.: Наука, 1979. 384 с.

5. *Балакший В. И., Манцевич С. Н.* Распространение акустических пучков в кристалле парателлурита // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 5. С. 600.

АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 541.183+548.571

В. И. Анисимкин*
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник
Н. В. Воронова**
кандидат физико-математических наук, ведущий инженер-технолог
*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
**Научно-исследовательский институт «Элпа» с опытным производством

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ИХ ТРАНСФОРМАЦИИ В ЛЕД С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ЛЭМБА НОВОЙ МОДИФИКАЦИИ

На примере пластин пьезоэлектрического кварца численно предсказано и экспериментально подтверждено существование новой модификации волн Лэмба с эллиптической поляризацией в плоскости пластины, которая сохраняется на всех глубинах от поверхности при всех толщинах пластины. Благодаря малому вертикальному смещению радиационное излучение волн в прилегающую жидкость слабо. В то же время из-за значительных колебаний в сдвигово-горизонтальном и продольном направлениях поглощение волн резко увеличивается с ростом вязкости жидкости (на 27 дБ для глицерина) и при трансформации жидкости в лед (на 50 дБ при замерзании воды). Поэтому использование этих волн может оказаться полезным в ряде приложений, таких как детектирование льдообразования на крыльях самолетов, корпусах кораблей, автомобильных дорогах и пр.
Ключевые слова: акустическая волна, пьезопластина, жидкость, вязкость, лед, поглощение.

Исследование профинансировано Российским научным фондом, грант 20-19-00708.

V. I. Anisimkin*
Dr. Sc. Phys.-Math., Principal Researcher
N. V. Voronova**
PhD Sc. Phys.-Math., Senior Engineer
*Kotel'nikov Institute of Radioenginering and Electronics Russian Academy of RAS
**Acoustoelectronic and Piezokeramic ELPA Corporation

SENSING THE LIQUID PROPERTIES AND LIQUID-TO-ICE TRANSFORMATION USING NEW MODIFICATON OF THE ULTRASONIC LAMB WAVES

Using plates of piezoelectric quartz as an example, new modification of the acoustic Lamb waves is numerically predicted and experimentally verified. The waves have elliptic polarization parallel to the plate faces maintained at all depths from free faces and for all plate thickness considered. Because of small vertical displacement the radiation of the waves from the plate to adjacent liquid is weak. At the same time, due to vibration in shear-horizontal and longitudinal directions the wave attenuation is rapidly increased with liquid viscosity (27 dB for glycerin) and with water-to-ice transformation (50 dB for water). Thank to these properties the new waves may turn to be useful for some applications such as sensing the ice formation on aircraft wings, ship bodies, car roads, etc.
Keywords: acoustic wave, piezoelectric plate, liquid, viscosity, ice, attenuation.

Введение

Детектирование всевозможных жидкостей и сортов льда важно при эксплуатации самолетов, кораблей, автомобильных дороги и пр. Оно производится различными методами, основанными на акустических вибрациях [1], [2], электрооптике [3], волоконной оптике [4], радиоволнах [5], микромеханике [6], индукционных устройствах [7] и ультразвуке [8]–[10]. Хотя ультразвуковой подход считается одним из наиболее привлекательных [10], пока он ограничивался использованием волн только сдвигово-горизонтальной поляризации [11]–[14], тогда как, учитывая современное состояние твердотельной акустики [15]–[29], можно было ожидать его значительного улучшения при использовании иных типов акустических колебаний.

В частности, спектр акустических волн в кристаллических пластинах толщиной *h* порядка длина волны λ очень разнообразен [15]–[29]. Он состоит из трех семейств акустических волн разной поляризации (рис. 1) – SH [15], [28], L [18], [20], [21], [29] и Лэмба четырех модификаций: i) эллиптической в плоскости X_3-k, ii) эллиптической под углом к этой плоскости, iii) эллиптической, повернутой вокруг нормали пластины X_3 и iv) эллиптической и наклоненной, и повернутой (как показано на рис. 1).

Цель данной работы – показать, что i) волны Лэмба могут иметь еще одну модификацию с эллипсом смещения, параллельным плоскостям пластины ($u_3 << u_1$, $u_2 \neq 0$, рис. 2), и ii) такие волны пригодны для детектирования жидкостей и их превращения в лед.

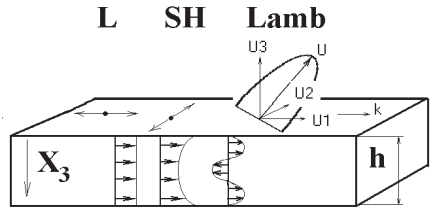


Рис. 1. Известные типы акустических пластинчатых волн: L – продольные или Анисимкина мл.; SH – сдвигово-горизонтальные; двух- и трехпарциальные Лэмба (эллиптические); k – волновой вектор (ось x_1); u_1, u_2, u_3, компоненты смещения; h – толщина пластины; x_3 – нормаль пластины

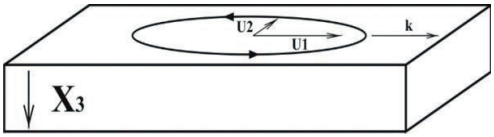


Рис. 2. Новая модификация волн Лэмба с эллиптической поляризацией в плоскости пластины ($u_3 << u_1$, $u_2 \neq 0$)

Методики

В качестве примера численные расчеты и экспериментальные измерения выполнялись для кварцевых пластин ST, X-среза (углы Эйлера 0°, 132.75°, 0°). Нормализованная толщина пластин h/λ (h – толщина; λ – длина волны) варьировалась от 0 до 1.7. Дисперсионные кривые скорости $v_n(h/\lambda)$, поверхностные смещения u_1^0, u_2^0, u_3^0 и профили смещений по глубине $u_1(x_3/\lambda)$, $u_2(x_3/\lambda)$, $u_3(x_3/\lambda)$ мод разных порядков n рассчитывались с помощью программы [30] и материальных констант [31].

Эксперимента выполнялись с пластиной толщиной h/λ=1.0. Верхняя (шлифованная) поверхность пластины использовалась для нанесения жидкости, нижняя (полированная) – для размещения входного и выходного встречно-штыревых преобразователей с 20-ю парами электродов (1000-нм, Cr/Al) и полосой 5 %.

Процесс измерений детально описан в работах [32]–[33]. Для каждой моды n измерялись вносимые потери S_{12} и скорость $v_n=f_n/\lambda$. Откликом моды на вязкость жидкости η служила величина $\Delta S_{12}=S_{12}^{\text{Glycerin}} - S_{12}^{\text{H2O}}$. Откликом моды на трансформацию воды в лед – величина $\Delta S_{12}=S_{12}^{\text{ice}} - S_{12}^{\text{H2O}}$.

Результаты и их обсуждение

Дисперсионные кривые модифицированных волн Лэмба имеют обычный вид монотонно спадающих функций, не имеющих пересечений и плоских участков (рис. 3).

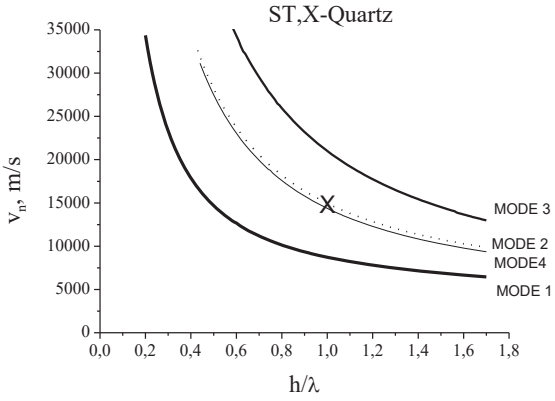


Рис. 3. Дисперсионные кривые модифицированных волн Лэмба в кварцевой пластине ST, X-среза. x – пример, выбранный для детального анализа

Поверхностные смещения модифицированных мод удовлетворяют соотношению $u_3^0 << u_1^0$, u_2^0 для всех толщин пластины h/λ (рис. 4а) – то есть эллиптическая поляризация мод всегда параллельна поверхностям.

То же соотношение $u_3(x_3/\lambda) << u_1(x_3/\lambda)$, $u_2(x_3/\lambda)$ имеет место на разных глубинах пластины (рис. 4б–г). Значит, эллиптическая поляризация, параллельная поверхностям, сохраняется и на всех глубина пластины.

Типичный спектр акустических мод, измеренных в кварцевой пластине со свободными поверхностями, водной нагрузкой и льдом, показан на рис. 5. Частоты мод f_n определялись скоростями мод v_n и длиной волны λ (периодом преобразователей): $f_n=v_n/\lambda$; амплитуды мод зависели от коэффициента электромеханической связи K_n^2 и поглощения: чем больше K_n^2 и меньше поглощение, тем больше амплитуда моды. Как видно из рис. 5, различные моды испытывают разное изменение амплитуды (вносимых потерь) под действием воды и льда. Наибольший отклик на образование льда имеет мода частотой f_n=49.74 МГц (МОДА 2). Она характеризуется малыми радиационными потерями $S_{12}^{H2O} - S_{12}^{air}$ (которые пропорциональны вертикальному смещению u_3^0) и большим вязкоупругим поглощением $S_{12}^{Glycerin} - S_{12}^{H2O}$ (пропорциональным смещениям u_1^0, u_2^0, лежащим в плоскости). А потому в соответствии с расчетами поляризация этой моды представляет собой эллипс, ориентированный параллельно поверхностям пластины.

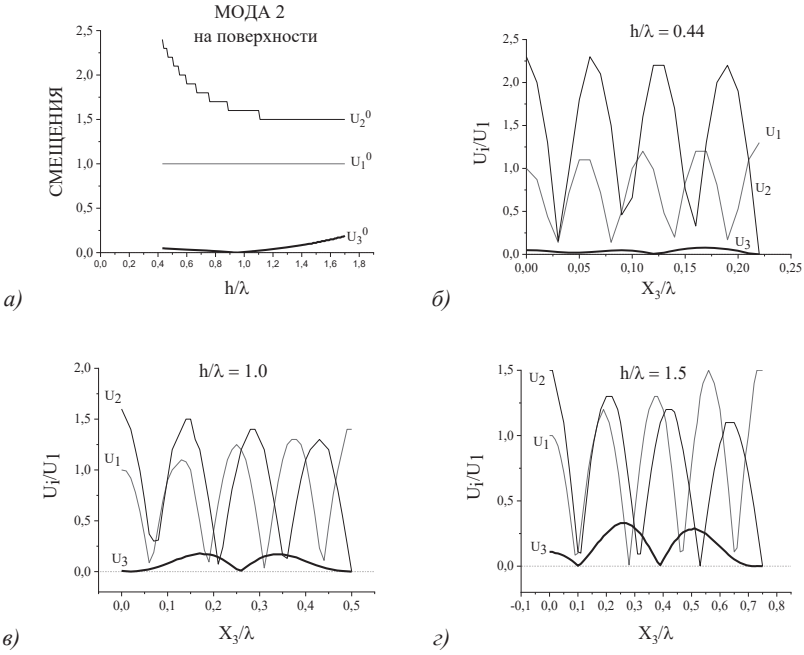


Рис. 4. Поверхностные смещения (a) и глубинные профили (b–d) для модифицированной МОДЫ 2

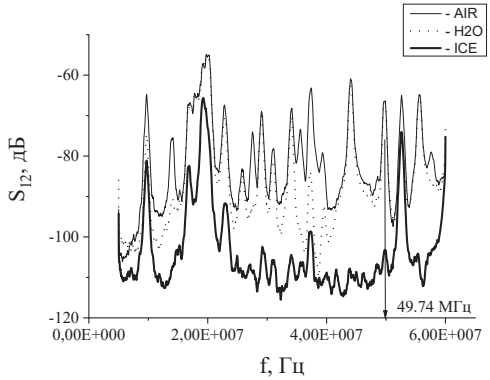


Рис. 5. Вносимые потери S_{21} линии задержки на пластине ST, X-кварца толщиной h/λ=1.0, измеренные при 20 °C на воздухе (тонкая сплошная), при 20 °C с водной нагрузкой (пунктир) и при -15 °C с нагрузкой из льда (толстая сплошная)

Отклики МОДЫ 2 на вязкость жидкости (глицерин) и льдообразование (вода) велики и составляют: $S_{12}^{Glycerin} - S_{12}^{H2O}$=27 дБ (рис. 6) и $S_{12}^{ice} - S_{12}^{H2O}$=50 дБ (рис. 7). Физической причиной таких особенностей является, по нашему мнению, увеличение поглощения моды из-за ее распространения не только в пластине совершенного монокристалла (кварца), но и в таких несовершенных средах как вода и лед [33].

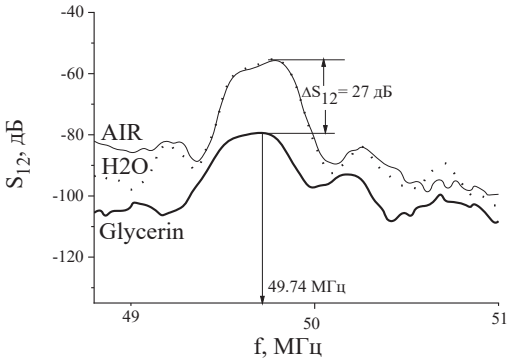


Рис. 6. Вносимые потери модифицированной МОДЫ 2 (49.74 МГц) в пластине ST, X-кварца (h/λ = 1.0), измеренные на воздухе (AIR, тонкая сплошная), с водой (H_2O, пунктир) и глицерином (Glycerin, толстая сплошная). v_n=14 920 м/с, k_n^2=0.0094 %, u_1^0=1; u_2^0=1.6 u_1^0; u_3^0=0.007 u_1^0

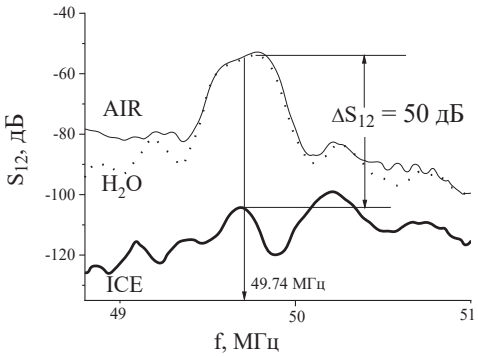


Рис. 7. Вносимые потери модифицированной МОДЫ 2 (49.74 МГц) в пластине ST, X-кварца (h/λ = 1.0), измеренные на воздухе (AIR, тонкая сплошная), с водой (H_2O, пунктир) и льдом (ICE, толстая сплошная)

Выводы

Волны Лэмба в кристаллических пластинах могут иметь эллиптическую поляризацию, ориентированную на всех глубинах и при разных толщинах пластины параллельно ее поверхностям. При нанесении жидкости на одну из поверхностей амплитуды таких волн резко уменьшаются с ростом вязкости жидкости и при ее трансформации в лед.

Библиографический список

1. *Daniels J.* Ice detecting system // US Patent 4775118. 1988. Oct.4.

2. *Barre C., Lapeyronnie D., Salann G.* Ice detection assembly installed on aircraft // US Patent 7000871. 2006. Feb. 21.

3. *Anderson M.* Electro-optic ice detection device // US Patent 6425286. 2002. Jun. 30.

4. *Kim J.* Fiber optic ice detector // US Patent 5748091. 1998. May 5.

5. *Abaunza J.* Aircraft icing sensors // US Patent 5772153. 1998. Jun. 30.

6. *DeAnna R.* Ice detection sensor // US Patent 5886256. 1999. Mar. 23.

7. *Lee H., Seegmiller B.* Ice detector and deicing fluid effectiveness monitoring system // US Patent 5523959. 1996. Jul. 4.

8. *Hansman R., Kirby M.* Measurement of ice growth during simulated and natural icing conditions using ultrasonic pulse-echo techniques // Aircraft. 1986. Vol. 23. N 6. P. 493–498.

9. *Jose J., Pilarski A., Hammer J.* Contaminant detection system // US Patent 5629485. 1997. May 13.

10. *Gao H., Rose J.* Ice detection and classification on an aircraft wing with ultrasonic shear horizontal guided waves // IEEE Transactions. 2009. Vol. UFFC-56. N 2. P. 334–343.

11. *Chammuel J.* Ultrasonic aircraft ice detector using flexural waves // US Patent 4461178. 1984. Jul. 24.

12. *Hughes R., Martin S., Frye G.* Liquid-solid phase transition detection with acoustic plate mode sensors: application to icing of surfaces // Sensors and Actuators. 1990. Vol. A21-A23. P. 693–699.

13. *Vellekoop M., Jakoby B., Bastemeijer J.* A Love-wave ice detector, Proc. IEEE Ultrasonic Symp. 1999. P. 453–456.

14. *Jose K., Gangadharan S., Varadan V.* Wireless surface acoustic waves ice sensor // JASA. 2000. Vol. 108. N 5. P. 2599–2604.

15. *Auld B.* Acoustic Fields and Waves. New York-London-Sydney-Toronto: Wiley Interscience Publication, 1973. Vol. 2. 287 p.

16. *Zaitsev B., Kuznetsova I., Joshi S.* Acoustic waves in piezoelectric plates bordered with viscous and conductive liquids // Ultrasonics. 2001. Vol. 39. N 1. P. 45–50.

17. *Lomonosov A., Pupyrev P., Hess P.* Leaky Wedge Waves in Single Crystal Silicon // Proc IEEE Ultrasonic Symp. 2003. Prague, 21–25 July 2003. P. 1362–1365.

18. *Anisimkin I.* New type of an acoustic plate modes: quasi-longitudinal normal wave // Ultrasonics. 2004. Vol. 42. N 10. P. 1095–1099.

19. *Yantchev V., Katardjiev I.* Micromachined thin film plate acoustic resonators utilizing the lowest order symmetric Lamb wave mode // IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr. 2007. Vol. 54. N 1. P. 87–95.

20. *Gulyaev Y.* Peculiarities of the Anisimkin Jr.' plate modes in $LiNbO_3$ and Te single crystals // IEEE Trans. Ultrason, Ferroelect., Freq. Contr. 2009. Vol. 56. P. 1042–1045.

21. *Onoe M., Kaga S.* Analytical study of Anisimkin's (Quazilongitudinal) modes in piezoelectric plates // Proc. 2010 IEEE International Frequency Control Symposium. New Port Beach, California. June 2–4, 2010. P. ID 6041.

22. *Soluch W., Lysakowska M.* Properties of shear horizontal acoustic plate modes in BT-cut quartz // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2011. Vol. 58. N 10. P. 2239–2243.

23. *Zou J., Lin C., Senesky D.* Thermally stable SiO2/AlN/SiO2 Lamb wave resonators utilizing the lowest-order symmetric mode at high temperatures // Proc IEEE Ultrason. Symp. 2013. P. 1077.

24. *Caliendo C., Lo Castro F.* Quasi-linear polarized modes in Y-rotated piezoelectric GaPO4 plates // Crystals. 2014. Vol. 4. N 3. P. 228–240.

25. *Chen Z., Fan L., Zhang S.* Theoretical research on ultrasonic sensors based on high-order Lamb waves // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115. N 20. P. 14–20.

26. *Zou J., Pisano A.* Temperature compensation of the AlN Lamb wave resonator utilizing the S1 mode // Proc IEEE Ultrason. Symp., 2015. P. 07329432.

27. *Wang Y., Wang T., Liu J.* Guiding and splitting Lamb waves in coupled-resonator elastic waveguides // Composite Structures. 2018. Vol. 206. P. 588–593.

28. *Zaytsev B., Kuznetsova I.* Acoustic waves in thin piezoelectric plates. Moscow: Radiotechnics, 2018. 240 p.

29. *Nikolaevtsev V., Suchkov S., Selifonov A.* Wave as a long-wave branch of low-order Lamb mode // Physical Department of Moscow State University. 2020. N 1. P. 201 1601.

30. *Adler E., Slaboszewics J., Farnell G.* PC software for SAW propagation in anisotropic multi-layers // IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. 1990. Vol. 37. N 3. P. 215–220.

31. *Slobodnik A., Conway E., Delmonico R.* Microwave Acoustic Handbook. AFCRL198 TR-73-0597. 1973. 434 p.

32. *Anisimkin I., Anisimkin V.* Attenuation of acoustic normal modes in piezoelectric plates loaded by viscouse liquids // IEEE Trans.Ultrason., Ferroelect., Freq.Contr. 2006. Vol. 53. N 8. P. 1487–1492.

33. *Anisimkin V., Kolesov V., Kuznetsova A.* An analysis of the water-to-ice phase transition using acoustic plate waves // Sensors. 2021. Vol. 21.

УДК 621.372.63

А. С. Багдасарян*
доктор технических наук, профессор, академик НАН Республики Армении
Ю. В. Гуляев**
академик, профессор, член Президиума РАН
С. А. Доберштейн**
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Т. В. Синицына***
доктор технических наук, главный конструктор
*ФГУП Научно-исследовательский институт радио
**Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
***АО «ОНИИП»
****ООО «БУТИС»

СОЗДАНИЕ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ С МАЛЫМИ ПОТЕРЯМИ – ОДНО ИЗ ГЛАВНЫХ КОНКУРЕНТНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ ТЕХНИКИ ПАВ

Представлены последние достижения по созданию фильтров на ПАВ с малыми потерями на кольцевых структурах с ОМПО и однонаправленных ВШП с МПО, на повторяющихся, резонаторных двухмодовых и лестничных структурах.
Ключевые слова: техника ПАВ, ПАВ-фильтры, малые вносимые потери.

A. S. Bagdasaryan*
Dr. Sc. Tech., Professor, Academician of NAS of Armenia Republic
Y. V. Gulyaev**
Academician, Professor, member of Presidium of the Russian Academy of Science
S. A. Dobershtein**
PhD Sc. Tech., Leading Scientific Worker
T. V. Sinitsina***
Dr. Sc. Tech., Chief Designer
*FSUE «NIIR»
**Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics
***JSC «ONIIP»
****LLC «BUTIS»

CREATING THE LOW-LOSS SAW FILTERS – ONE OF MAJOR COMPETITIVE ADVANTAGES OF SAW TECHNOLOGY

This paper presents the last achievements in creating the low-loss SAW filters on the ring structures with the RMSC and unidirectional IDTs with MSC, on the repetition, resonator double mode and ladder structures.
Keywords: SAW technology, SAW filters, low insertion loss.

Введение

Современная техника ПАВ – это разнообразные устройства, выполняющие как одну из главных функций обработки сигналов: фильтрацию, задержку во времени, частотное формирование, изменение амплитуды и фазы, так и множество других функций с новыми возможностями [1], [2]. Одной из главных мировых тенденций развития устройств на ПАВ является уменьшение вносимых потерь (ВП) [1]. Снижение ВП в устройствах на ПАВ уменьшает собственные шумы РЭА, увеличивает ее динамический диапазон, расширяет сферы применения устройств на ПАВ и определяет их конкурентноспособность с другими известными технологиями.

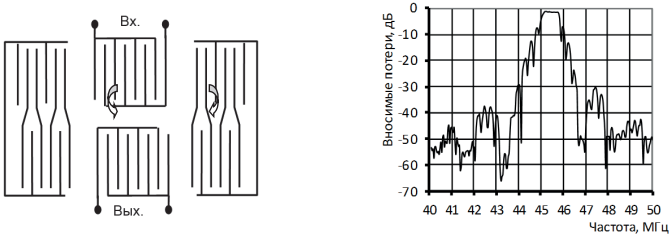


Рис. 1. Топология и АЧХ кольцевого фильтра с ОМПО

Основные подходы к реализации фильтров на ПАВ со сверхмалыми вносимыми потерями около 1 дБ

ВП в фильтрах на ПАВ обусловлены следующими причинами [1], [3]: потери на двунаправленность излучения ПАВ; потери на рассогласование с нагрузками по входу и выходу; потери на проводимость металлической пленки электродов преобразователей ПАВ; потери на распространение ПАВ в пьезоэлектрике; потери в элементах согласования; потери взвешивания преобразователей ПАВ. Для решения проблемы малых потерь необходимо минимизировать каждую составляющую из указанных причин,

Наилучшие результаты (ВП=1–2 дБ) в середине 70-х годов прошлого столетия были получены на однонаправленных многофазных ВШП и ВШП группового типа со сложными цепями согласования по входу и выходу [4], [5]. В настоящее время ВП около 1 дБ уверенно достигаются в кольцевых структурах с отражательными многополосковыми ответвителями (ОМПО) и на однонаправленных ВШП с МПО на сравнительно низких частотах до 200 МГц [6], [7]. В подобных структурах используется самосогласование, тем самым устранятся потери в элементах согласования.

На рис. 1 показаны топология и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) самосогласованного кольцевого фильтра с ОМПО на центральную частоту f_0=45 МГц с относительной полосой пропускания $\Delta f/f_0$=1,87 % на срезе УХ/128° $LiNbO_3$. Фильтр обеспечил ВП=0,8 дБ, затухание в полосе задерживания около 30 дБ в тракте 75 Ом [6].

Топология и АЧХ самосогласованного фильтра на однонаправленных ВШП с U-образными МПО на f_0=70 МГц при $\Delta f/f_0$=3,5 % на срезе УХ/128 ° $LiNbO_3$ представлены на рис. 2. Фильтр показал ВП=1 дБ, затухание в полосе задерживания около 10 дБ в тракте 50 Ом [7].

В гигагерцовом диапазоне используют повторяющиеся структуры [8], [9], резонаторные двухмодовые структуры [10–12] и резонаторные лестничные структуры [13]–[15].

Достоинство повторяющихся структур (группа входных ВШП вложена в группу выходных ВШП) – простота изготовления и потенциальная возможность получения малых ВП.

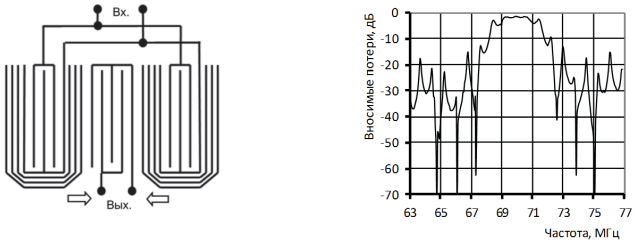


Рис. 2. Топология и АЧХ фильтра на однонаправленных ВШП с U-образными МПО

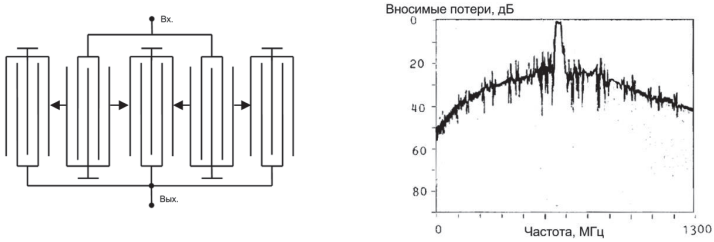


Рис. 3. Топология и АЧХ фильтра на повторяющейся структуре

На рис. 3 приведены топология и АЧХ самосогласованного фильтра на повторяющейся структуре (9 повторений ВШП) на f_0=600 МГц при $\Delta f/f_0$=4,4 % на срезе УХ/36 ° $LiTaO_3$. В фильтре получены ВП=1–2 дБ, затухание в полосе задерживания около 20 дБ в тракте 50 Ом [9].

В резонаторных двухмодовых структурах акустическая энергия локализуется в пространстве (резонансной полости) между двумя отражательными решетками (ОР). Наибольшее распространение нашли трехпреобразовательные структуры [10]–[12]. Принцип действия описывается взаимодействием 2-х продольных мод – симметричной и антисимметричной, отсюда название этих фильтров – резонаторные двухмодовые фильтры (double mode SAW filters – DMS-фильтры). Топология и АЧХ самосогласованного DMS-фильтра на f_0=835 МГц при $\Delta f/f_0$=4 % на срезе УХ/64 ° $LiNbO_3$ представлена на рис. 4. Фильтр

обеспечил ВП=1 дБ, затухание в полосе задержания около 20 дБ в тракте 50 Ом [10].

Резонаторные лестничные структуры выполняются на импедансных элементах (ИЭ), в которых используются импедансные характеристики одновходовых ПАВ-резонаторов с ОР или резонаторов на протяженных ВШП [13]–[15]. Главное достоинство лестничных структур на ИЭ заключается в том, что в подобных фильтрах не используются напрямую акустические тракты распространения ПАВ. Коэффициент передачи в полосе пропускания определяется очень малыми активными сопротивлениями эквивалентных LCR-резонаторов в последовательных ветвях и очень большими сопротивлениями этих резонаторов в параллельных ветвях. В результате чего в лестничных фильтрах достигаются ВП < 1 дБ. На рис. 5 показаны топология однозвенного и АЧХ двухзвенного лестничного фильтра на ИЭ в виде протяженных ВШП на f_0=845 МГц при $\Delta f/f_0$=4 % на срезе УХ/64 ° $LiNbO_3$. Фильтр имеет ВП около 1 дБ, затухание в полосе задерживания 30 дБ в тракте 50 Ом [14].

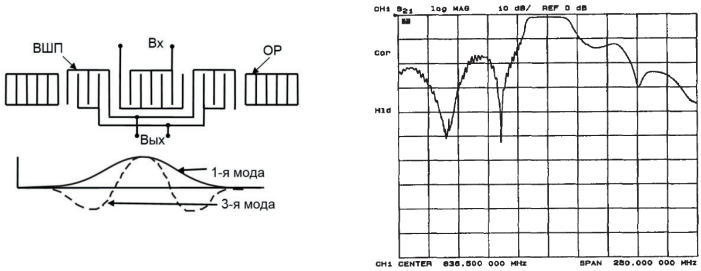


Рис. 4. Топология и АЧХ DMS-фильтра

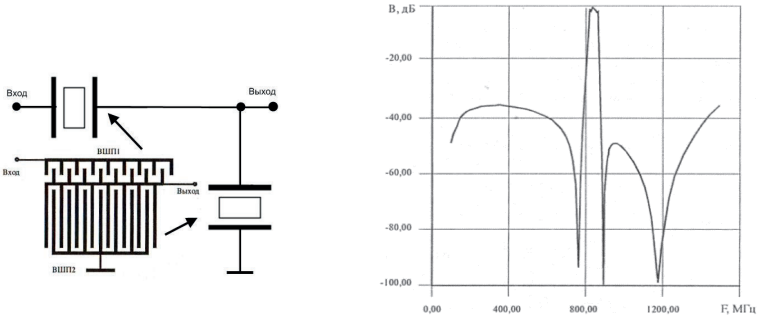


Рис. 5. Условная топология и АЧХ лестничного фильтра на ИЭ из протяженных ВШП

Примеры практической реализации фильтров на ПАВ с малыми потерями и высокой избирательностью

На рис. 6 показаны топология и АЧХ кольцевого фильтра с ОМПО на f_0=172,5 МГц с полосой пропускания 2,6 МГц по уровню -2 дБ на срезе УХ/128° $LiNbO_3$ в SMD-корпусе размерами 9,1 × 7,1 × 1,8 мм. В топологии фильтра применено фазовое взвешивание (ФВ) с малыми потерями входного и выходного ВШП. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП=1,5 дБ, затухание в полосе задерживания более 55 дБ при отстройке ± 8,6 МГц от f_0 [6].

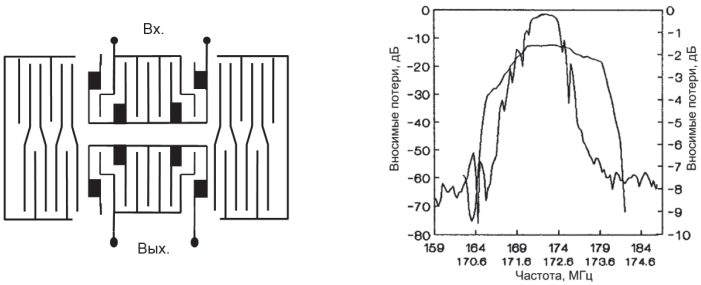


Рис. 6. Топология и АЧХ кольцевого фильтра с ОМПО с ФВ

На рис. 7 представлена топология и АЧХ фильтра на однонаправленных ВШП с U-образными МПО на f_0=44,4 МГц с полосой пропускания 3,4 МГц по уровню -2 дБ на срезе УХ/41 ° $LiNbO_3$ в SMD-корпусе размерами 29,0 х 18,9 х 4,4 мм. Для увеличения избирательности использована двухканальная топология с ФВ центральных ВШП. Фильтр обеспечил ВП=3,2 дБ, затухание в полосе задерживания 60 дБ при отстройках ±9 МГц от f_0 в тракте 50 Ом [16].

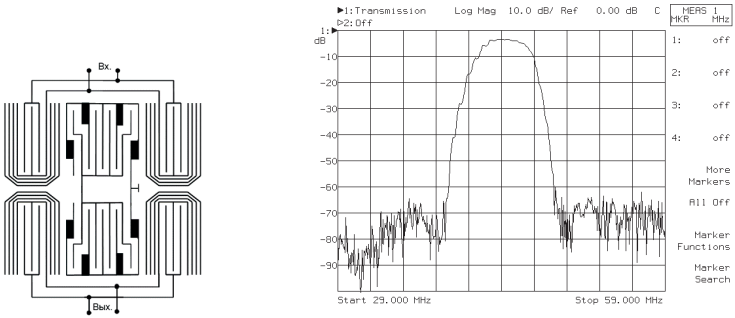


Рис. 7. Топология и АЧХ двухканального фильтра на однонаправленных ВШП с U-образными МПО с ФВ

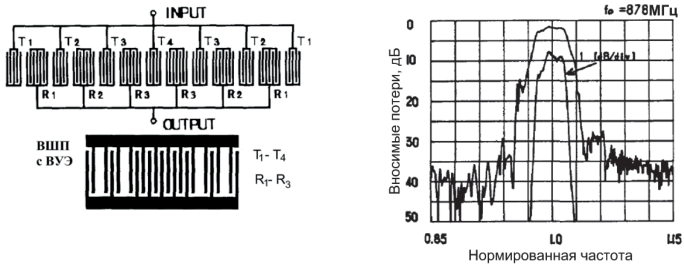


Рис. 8. Топология и АЧХ фильтра на повторяющейся структуре с ВУЭ

Топология и АЧХ фильтра на повторяющейся структуре на f_0=878 МГц с полосой пропускания 20 МГц на срезе УХ/36° $LiTaO_3$ в SMD-корпусе размерами 5 × 5 × 1,8 мм приведены на рис. 8. В топологии фильтра использовано 13 повторений ВШП (7 входных ВШП вложены в 6 выходных ВШП). Для увеличения избирательности во входных и выходных ВШП применено взвешивание удалением электродов (ВУЭ) с малыми потерями. В тракте 50 Ом фильтр показал вносимые потери 1,6 дБ, затухание в полосе задерживания 25–35 дБ при отстройках ± 79 МГц от f_0 [17].

На рис. 9 показаны топология и АЧХ DMS-фильтра на f_0=896 МГц с полосой пропускания 21,8 МГц по уровню –3 дБ на срезе УХ/42° $LiTaO_3$ в SMD-корпусе размерами 3 × 3 × 1,5 мм. Для увеличения избирательности использована оптимизированная двухканальная топология с неодинаковым числом электродов в центральном и боковых ВШП входного и выходного каналов [18]. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП около 3 дБ, затухание в полосе задерживания более 45 дБ при отстройках ± 45 МГц от f_0 [19].

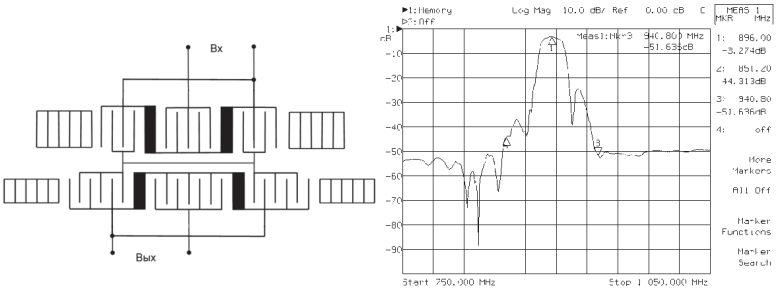


Рис. 9. Оптимизированная двухканальная топология и АЧХ DMS-фильтра

На рис. 10 представлены топология и АЧХ DMS-фильтра на f_0=903 МГц с полосой пропускания 14,8 МГц по уровню -3 дБ на срезе УХ/36 ° $LiTaO_3$ в SMD-корпусе размерами 3 × 3 × 1,2 мм. Для увеличения избирательности и улучшения прямоугольности АЧХ фильтра использована двухканальная топо-

логия с ФВ центральных ВШП и определенным соотношением между периодом электродов входных, центральных ВШП и ОР. Фильтр обеспечил ВП=2,4 дБ, затухание в полосе задерживания 65 дБ при отстройках ± 35 МГц от f_0 в тракте 50 Ом [12].

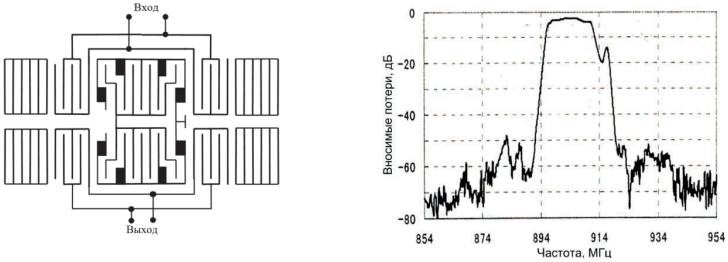


Рис. 10. Двухканальная топология и АЧХ DMS-фильтра с ФВ

Условная топология и АЧХ лестничного фильтра на ИЭ на f_0=900 МГц с полосой пропускания 18 МГц по уровню -3 дБ на срезе УХ/42° $LiTaO_3$ в SMD-корпусе размерами 3,8 × 3,8 × 1,2 мм даны на рис. 11. Для увеличения избирательности используется одно Г-образное звено, но с разными ИЭ (ПАВ-резонаторами) в последовательных и параллельных ветвях. Фильтр обеспечил ВП около 1 дБ, затухание в полосе задерживания >50 дБ при отстройке ± 50 МГц от f_0 в тракте 50 Ом [15].

Фильтры на ПАВ с малыми потерями на частоты > 1 ГГц

В гигагерцовом диапазоне факторами ограничивающими применение техники ПАВ являются потери на распространение и разрешающая способность технологического оборудования. Как известно, потери на распространение ПАВ α пропорциональны f_0^2: $\alpha \sim f_0^2$. В то же время размеры ПАВ-фильтра s обратно пропорциональны f_0: $s \sim 1/f_0$. Тогда увеличение потерь в гигагерцовом диапазоне для ПАВ-устройств не так существенно. Разрешающая способность современного высокотехнологичного оборудования составляет 0,5 мкм, следовательно, ширина электродов ПАВ-фильтров должна быть >0,5 мкм.

Ниже приведены характеристики последних разработок фильтров на ПАВ с малыми потерями ведущих мировых производителей техники ПАВ из России, Тайваня, США, Германии. На рис. 12 приведена условная структурная схема и АЧХ импедансного фильтра на f_0=2170 МГц с полосой пропускания 82 МГц по уровню -3 дБ на срезе УХ/46 ° $LiTaO_3$ в корпусе размерами 3 × 3 × 1,2 мм. На рис. 12 R1, R2, R3 – резонаторы на ПАВ в виде ВШП с большим числом электродов и малым числом электродов в ОР с многослойным напылением Ti-Al-Ti-Al, облегчающим выдерживание большой мощности входного сигнала. Фильтр имеет ВП=1,8 дБ, затухание в полосе задерживания 40 дБ при отстройках ± 230 МГц от f_0 в тракте 50 Ом [20]. Фильтр позволяет обрабатывать сигналы с уровнем входной мощности до 2,3 Вт и используется в системах связи.

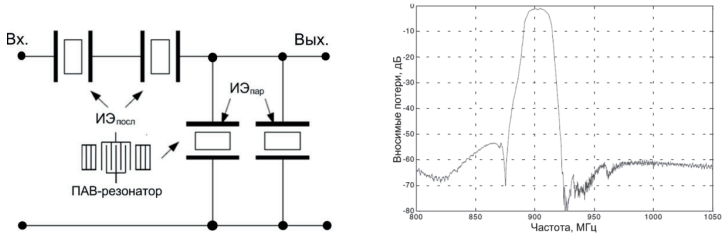


Рис. 11. Условная топология и АЧХ лестничного фильтра на ИЭ

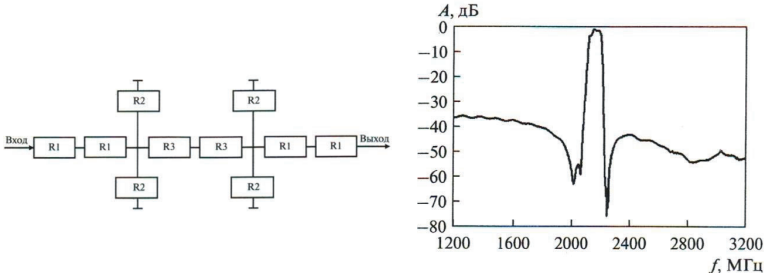


Рис. 12. Структурная схема и АЧХ импедансного фильтра на f_0=2170 МГц

Большая скорость распространения вытекающей ПАВ V=4700 м/с и высокий k^2=11 % (k – коэффициент электромеханической связи) на срезе УХ/64 ° $LiNbO_3$ позволили на f_0=1590 МГц использовать ширину электродов 0,7 мкм и обеспечить $\Delta f/f_0$=4 %. АЧХ DMS фильтра на f_0=1590 МГц с полосой пропускания 59 МГц по уровню -1,2 дБ на срезе УХ/64 ° $LiNbO_3$ в SMD-корпусе размерами 3×3×1,2 мм приведена на рис. 13. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП=2,3 дБ, затухание в полосе задерживания 50 дБ при отстройках ± 150 МГц от f_0 [21].

Расширить полосу пропускания, увеличив $\Delta f/f_0$ до 6,7 %, возможно за счет использования среза УХ/49 ° $LiNbO_3$ с большой V=4700 м/с и высоким k^2=16 % для вытекающей ПАВ. При этом ширина электродов на f_0=1225 МГц составила 1 мкм. На рис. 14 показана АЧХ DMS фильтра на f_0=1225 МГц с полосой пропускания 82 МГц по уровню -3 дБ на срезе УХ/49 ° $LiNbO_3$ в SMD корпусе размерами 3 × 3 × 1,2 мм. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП=3 дБ, затухание в полосе задерживания 50 дБ при отстройках ±200 МГц от f_0 [22].

Лидерами по ВП при избирательности до 40 дБ в гигагерцовом диапазоне остаются лестничные фильтры на ИЭ с небольшим, до четырех, числом звеньев. На частоты 1200–1600 МГц при использовании вытекающей ПАВ на срезе УХ/42 ° $LiTaO_3$ с V=4200 м/с и k^2=6 % ширина электродов составляет 0,65–0,87 мкм, а $\Delta f/f_0$=2,2–3 %. На рис. 15 представлена АЧХ лестничного фильтра на ИЭ на f_0=1227 МГц с полосой пропускания 37,6 МГц по уровню –3 дБ на срезе УХ/42 ° $LiTaO_3$ в SMD корпусе размерами 3 × 3 × 1,2 мм. Фильтр обеспечил

ВП=1,0 дБ, затухание в полосе задерживания около 40 дБ при отстройках ±110 МГц от f_0 в тракте 50 Ом [23].

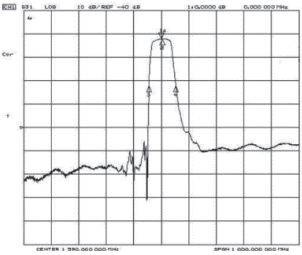


Рис. 13. АЧХ DMS фильтра на f_0=1590 МГц

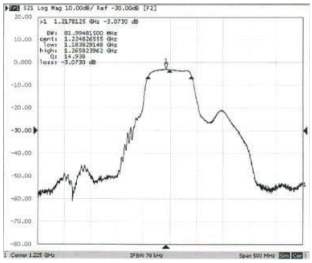


Рис. 14. АЧХ DMS фильтра на f_0= 1225 МГц

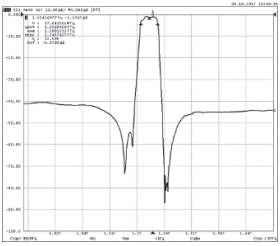


Рис. 15. АЧХ лестничного фильтра на ИЭ на f_0=1227 МГц

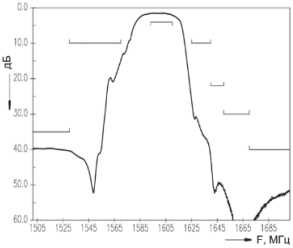


Рис. 16. АЧХ лестничного фильтра на ИЭ на f_0= 1601,5 МГц

АЧХ лестничного фильтра на ИЭ на f_0=1601,5 МГц с полосой пропускания 36,5 МГц по уровню -3 дБ на срезе УХ/42 ° $LiTaO_3$ в SMD корпусе размерами 3 × 3 × 1,1 мм изображена на рис. 16. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП=1,5 дБ, затухание в полосе задерживания 40–50 дБ при отстройках ±200 МГц от f_0 [24].

Подобные ПАВ-фильтры являются компонентами многостандартных модулей смартфонов. ПАВ-фильтры, корпусированные по технологии WLP (Wafer Level Package) с размерами кристалла 1,4 × 1,1 × 0,35 мм, входят в состав таких сверхтонких модулей (толщина менее 1 мм), изготовленных по технологии LTCC. Интеграция ПАВ- , WLP- и LTCC-технологий является, по сути, уникальной платформой для дуплексоров. мультиплексоров и входных модулей с усилителями и переключателями смартфонов ближайших поколений – самой массовой позиции использования техники ПАВ [1], [2]. Такая платформа по степени миниатюризации и функциональности превосходит аналоги на LC, коаксиальных и керамических резонаторах.

Библиографический список

1. Техника ПАВ: ближайшие перспективы / А. С. Багдасарян, Ю. В. Гуляев, С. А. Доберштейн, Т. В. Синицына // Техника радиосвязи. 2017. Вып. 3 (34). С 72–84.

2. Интеллектуальные устройства на ПАВ: новые возможности / А. С. Багдасарян, Ю. В. Гуляев, С. А. Доберштейн и др. // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 2 (37). С 64–73.

3. *Hartmann C. S.* Future High Volume Applications of SAW Devices // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1985. P. 64–73.

4. *Hartmann C., Rosenfeld R., Brown R.* Unidirectional Acoustic Surface Wave Filters with 2 dB Insertion Loss // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1974. P. 425–428.

5. *Yamanouchi K., Nyffeler F.* Low Insertion Loss Acoustic Surface Wave Filter using Group-Type Unidirectional Interdigital Transducer // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1975. P. 317–321.

6. *Doberstein S., Malyukhov V.* SAW Ring Filters with Insertion Loss of 1 dB // IEEE Transaction on UFFC. 1997. Vol. 44. N 3. P. 590–596.

7. *Doberstein S., Malyukhov V., Razgonyaev V.* Wideband Three-Transducer SAW Filters Using Unidirectional IDTs on U-shaped MSCs with Insertion Loss of 1 dB // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1999. P. 43–46.

8. *Lewis M.* SAW Filters Employing Interdigitated Interdigital Transducers, IIDT // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1982. P. 12–17.

9. Low Loss SAW Filter for Antenna Duplexer / Y. Kinoshita, A. Nakagoshi, H. Kojima, M. Hikita // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1983. P. 77–83.

10. Wideband Low Loss Double Mode SAW Filters / T. Morita, Y. Watanabe, M. Tanaka Y. Nakazawa // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1992. P. 95–104.

11. *Синицына Т. В., Багдасарян А. С., Егоров Р. В.* ПАВ-фильтры на основе продольно-связанных структур // Электронная промышленность. 2004. С. 14–19.

12. *Fujita Y.* Low Loss and High Rejection RF SAW Filter using Improved Design Techniques // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1998. P. 399–402.

13. *Ikata O.* Development of Low-Loss Band-Pass Filters using SAW Resonators for Portable Telephones // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1992. P. 111–115.

14. *Багдасарян А. С., Карапетян Г. Я.* Импедансные фильтры на поверхностных акустических волнах. М: Международная программа образования, 1998. 79 с.

15. *Kondratiev S., Thorvaldsson T.* High Rejection Impedance Element SAW Filters Realized on Quartz and 42 ° – $LiTaO_3$ Substrates // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2000. P. 109–112.

16. *Доберштейн С. А.* Разработка низкочастотных ПАВ-фильтров и высокочастотных ПАВ-микросборок в отечественных корпусах под поверхностный монтаж // Техника радиосвязи. 2015. Вып. 1 (24). С. 92–103.

17. *Yatsuda H.* IIDT type Low-Loss SAW Filters with Improved Stopband Rejection in the Range of 1 to 2 GHz // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1992. P. 67–70.

18. *Доберштейн С. А.* Резонаторный фильтр на ПАВ: пат. 161759 РФ № 2015154375/08; заявл. 17.12.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 1.

19. *Доберштейн С. А.* Балансные резонаторные СВЧ ПАВ-фильтры на продольных модах с малыми потерями // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 4 (39). С. 72–78.

20. *Багдасарян А. С., Синицына Т. В.* Фильтры на ПАВ, выдерживающие входную мощность радиосигнала 1–2 Вт, для телекоммуникационной аппаратуры // Техника радиосвязи. 2016. Вып. 3 (30). С. 80–89.

УДК 621.396

О. Л. Балышева*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ФИЛЬТРЫ НА ПАВ И СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G

Появление нового стандарта мобильной связи неизбежно связано с новыми требованиями к фильтрам, вызванными как освоением новых частотных диапазонов и расширением используемых полос, так и возрастающей сложностью мобильных устройств. В статье анализируются причины, по которым технология поверхностных акустических волн продолжает оставаться одной из доминирующих технологий частотной фильтрации и с введением нового стандарта мобильной связи 5G.
Ключевые слова: поверхностные акустические волны, фильтры, системы мобильной связи, стандарт 5G.

O. L. Balysheva*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SAW FILTERS AND MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS 5G

The introduction of a new mobile communication standard is inseparably associated with new requirements for filters, caused both by the development of new frequency ranges and the expansion of the bands used, and the increasing complexity of mobile devices. The article analyzes the reasons why the surface acoustic wave technology continues to be one of the dominant frequency filtering technologies even after the introduction of the new 5G mobile communication standard.
Keywords: surface acoustic waves, filters, mobile communication systems, standard 5G.

Введение

Начиная с 70-х годов прошлого века, каждый новый стандарт мобильной связи появляется примерно через каждые 10 лет. По прогнозу, смартфоны 5G в 2024 будут составлять 37 % от общего количества смартфонов [1].

Количество используемых для мобильной связи частотных полос постоянно растет. В стандарте 3G их было 13, в 4G 45, а в 5G более 100 [1]. Архитектура построения радиочастотного модуля (РЧМ) современных мобильных телефонов основана на использовании отдельных фильтров для каждого из задействованных диапазонов частот. Смартфоны премиум класса стандарта 5G могут содержать до 80–100 фильтров. Поскольку для стандарта 5G в целом, характерны более высокие частоты, чем для 4G, ожидается, что используемые решения для частотной фильтрации будут разнообразнее, чем в современных мобильных телефонах [2].

Подавляющее большинство радиочастотных фильтров современных мобильных телефонов – акустические фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и объемных акустических волнах (ОАВ). ПАВ и ОАВ фильтры предпочтительнее благодаря оптимальному сочетанию отличных характери-

стик (высокого Q-фактора, низких вносимых потерь, высокого внеполосного подавления, и т. д.) с миниатюрностью и низкой стоимостью.

На протяжении нескольких десятков лет ПАВ фильтры используются в мобильных телефонах на частотах до 2 ГГц, а ОАВ фильтры на более высоких. В последние несколько лет верхняя граница рабочих частот ПАВ фильтров сместилась к 2,5–3 ГГц. В настоящее время технологии ПАВ и ОАВ продолжают развиваться параллельно, причем ни одна из них не может полностью вытеснить другую, несмотря на попытки. Статья призвана ответить на вопрос: есть ли место и потенциал роста для фильтров на ПАВ с введением нового стандарта.

Сосуществование стандартов. Частотный спектр для 5G

Несмотря на усилия по стандартизации, переход к новому стандарту связи не означает отказа от поддержания работы в предыдущем стандарте, что автоматически означает наличие соответствующих фильтров. Специалисты сходятся во мнении, что существующий стандарт LTE-Advanced будет играть важную роль даже после прихода нового стандарта 5G, что означает сохранение массовой потребности в ПАВ фильтрах.

Важной особенностью, определяемой 3GPP (3rd Generation Partnership Project) в Release 15, является способность сосуществовать стандартам LTE и новому стандарту 5GNR (5G New Radio) и совместно использовать одни и те же низкочастотные полосы без необходимости полного освобождения полос, задействованных стандартом LTE.

Приход стандарта 5G сопровождается следующими отличительными чертами: частотный рефарминг уже задействованных частотных полос (то есть «переиспользование» частотного спектра) и освоение новых более высокочастотных диапазонов. На первой стадии введения стандарта 5G, выделено два новых частотных диапазона FR1: 450–6000 МГц и FR2: 24 500–52 600 МГц. Внутри первого диапазона выделено три полосы n77 (3,7 ГГц), n78 (3,5 ГГц) и n79 (4,7 ГГц). Для этих частот ПАВ и ОАВ остаются основными технологиями частотной фильтрации. Диапазон частот до 6 ГГц представляет наибольший интерес в качестве средней полосы частот для будущих этапов развития и имеет важнейшее значение для устойчивого развития сетей 5G в ближайшие 10 лет.

Требования к фильтрам, диктуемые стандартом 5G

Переход к новому стандарту связан с ужесточением требований к используемым фильтрам. Более высокие рабочие частоты связаны с физическим уменьшением резонаторных структур фильтров и повышением требований к технологии изготовления. Фильтры для стандарта 5G должны иметь большую полосу пропускания (например, для полосы n77–24 %, полосы n78–14 %), выдерживать больший уровень мощности (соответствовать классу 2, а не классу 3, как в предыдущем стандарте). Следствием увеличения сложности РЧМ мобильного телефона и сокращения доступного места на плате являются дополнительные требования по миниатюризации и интеграции фильтров. Развитие

техники агрегации, несущей и увеличение числа агрегируемых полос сводится к ужесточению спецификаций фильтров и смещению проектирования от полосовых фильтров и дуплексоров, к мультиплексорам.

Новые материалы и технологии для ПАВ фильтров

В настоящее время выпускаются ПАВ фильтры с использованием трех технологий: стандартные ПАВ, TC (Temperature compensation) ПАВ, TF (Thin Films) ПАВ (в том числе технологии I.H.P. (Incredible High-Performance)).

В последние годы в изготовлении ПАВ фильтров наблюдается неизбежный уход от традиционных монокристаллических подложек к гибридным многослойным структурам. Прежде всего, такой уход был вызван требованиями температурной стабильности и внедрением технологии температурной компенсации (ТК). Традиционные ПАВ фильтры продолжают оставаться компактными, надежными фильтрами с отличными характеристиками и наименьшей стоимостью, наиболее подходящими для применения на частотах до 1,5–2ГГц. Стоимость фильтров с ТК увеличена по сравнению с традиционными ПАВ, но все же остается ниже стоимости ОАВ фильтров. Вместе с традиционными ПАВ фильтры с ТК используются в диапазоне частот до 2,5 ГГц.

Увеличить рабочие частоты ПАВ фильтров до 3,5 ГГц и получить отличные характеристики позволяет технология I.H.P. Например, она позволила изготовить резонатор с добротностью выше 6000 на частоте 0,9 ГГц и 1900 на частоте 3,5 ГГц, что примерно в 3 раза выше значений для традиционных резонаторов на подложках из танталата лития [6].

Прорывной технологией для ПАВ фильтров стала инновационная технология изготовления подложек Piezo-on-Insulation (POI) [7], [8], разработанная компанией Soitec специально для ПАВ фильтров стандарта 4G/5G, обладающих увеличенной полосой пропускания, низкими вносимыми потерями и «встроенной» температурной компенсацией. В 2020 г. компании Soitec и Qualcomm заключили соглашение, в соответствии с которым технология POI стала стандартной для фильтров 5G.

Для достижения фильтрами современных требований необходимы высококачественные резонаторы с высоким Q-фактором, определяющим вносимые потери, высоким коэффициентом электромеханической связи (КЭМС), определяющим полосу пропускания, малым температурным коэффициентом частоты (ТКЧ), обеспечивающим стабильность частоты. Решить эти задачи позволяют новые материалы подложек, например, тонкие пленки нитрида алюминия (AlN), показывающие многообещающие результаты для фильтрации на частотах 3–10 ГГц [10]. В последнее время особый интерес разработчиков вызывают подложки на основе нитрида алюминия скандия. AlN имееет скорость ПАВ около 5500 м/с и относительно низкий ТКЧ равный -19ppm/ °C, что составляет менее одной четверть от ТКЧ ниобата лития, но относительно низкий КЭМС [10], [11]. Легирование скандием увеличивает КЭМС более, чем в 4 раза, по сравнению с AlN, а такие структуры, как $Sc_xAl_{1-x}N$/сапфир, успешно объединяют сильные пьезоэлектрические свойства, высокие скорости ПАВ и хорошую

температурную стабильность. Полученные экспериментальные результаты показали работоспособность ПАВ резонаторов на частотах выше 3 ГГц на подложках с нитридом алюминия скандия [11], [14].

Подложки, основанные на структурах $Sc_xAl_{1-x}N$, хорошо подходят и для развития перспективного направления гибридных ПАВ/ОАВ технологий [17], [18]. В гибридных ОАВ/ПАВ резонаторах осуществляется трансформация ОАВ в ПАВ за счет периодической структуры столбиков из AlScN, каждый из которых представляет собой ОАВ резонатор.

Заключение

Имея больший по сравнению с ОАВ фильтрами опыт массового промышленного производства и выигрывая соревнование в стоимости, ПАВ фильтры, в целом, имеют больший потенциал развития. Перспективным остается поиск новых материалов и совершенствование технологий производства ПАВ фильтров. Развитие технологий ТК ПАВ, I.H.P. и TF ПАВ, вместе с технологией производства подложек POI, решающей задачи интеграции, имеет потенциал «оживления» ПАВ для современных потребностей мобильной связи. Комбинация в стандарте 5G низкочастотных диапазонов (700, 800, 900 МГц) с полосой 3300–3800 обеспечивает перспективы дальнейшего повышения качества и снижения стоимости фильтров для этих частот.

Несмотря постоянную конкурентную борьбу с технологией ОАВ, у ПАВ технологии есть множество причин остаться в приоритете и с приходом стандарта 5G. Способность мобильных телефонов поддерживать работу в предыдущих стандартах вместе с частотным рефармингом – все это факторы, определяющие дальнейшую массовую потребность в ПАВ фильтрах. Цена, отличные характеристики, появление инновационных технологий производства, скорость выхода новых компонентов на массовый рынок наряду с активным продвижением в более высокочастотный диапазон и отсутствием других прорывных технологий – все это возможности сохранения лидирующих позиций ПАВ фильтров в мобильной связи, по крайней мере, в ближайшее десятилетие.

Библиографический список

1. 5G – Next-Generation Wireless. 5G Technology Primer. 2019. Oct. 2. URL: http://pdf.zacks.com/pdf/FA/H5521258.PDF (дата обращения: 21.02.21).

2. *Mahon S.* The 5G Effect on RF Filter Technologies // IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing. Vol. 30. Issue 4. Nov. 2017. P. 494–499.

3. I.H.P. SAW Technology and its Application to Microacoustic Components (Invited) / T. Takai, H. Iwamoto, Y. Takamine et al. // Proc. 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 6–9 Sept. 2017. Washington, DC, USA.

4. Poi engineered substrates for rf front end module filters. Addressing 5G filtering challenges. URL: https://www.soitec.com/en/products/poi?__geom= %E2 %9C %AA. (дата обращения: 21.02.21).

5. Soitec's engineered substrates for 5G. March 2020. URL: https://www.soitec.com/media/files/soitec_5g_march_2020.pdf (дата обращения: 25.02.21).

6. *Ansari A.* Single Crystalline Scandium Aluminum Nitride: An Emerging Material for 5G Acoustic Filters// Proc. 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). 2019.

7. Single Crystalline ScAlN Surface Acoustic Wave Resonators with Large Figure of Merit ($Q \times k_t^2$) / Z. Hao, M. Park, D. Kim et al. // Proc. 2019 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. P. 786–789.

8. Single-Crystal Multilayer Nitride, Metal, and Oxide Structures on Engineered Silicon for New-Generation Radio Frequency Filter Applications / R. Dargis, A. Clark, A. Ansari et al. // Phys. Status Solidi A 2020, 1900813.

9. High performance surface acoustic resonators in 1–3 GHz range using ScAlN/6H-SiC structure / K. Hashimoto, S. Sato, A. Teshigahara et al. // IEEE Trans. on UFFC. Vol. 60. N 3. P. 637–642, Mar. 2013.

10. High Q surface acoustic wave resonators in 2–3 GHz range using ScAlN/single crystalline diamond structure / K. Hashimoto, T. Fujii, S. Sato et al. // Proc. of the 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium, Dresden, Germany. 7–10 Oct. 2012. P. 1–4.

11. Dual-Mode Hybrid Quasi-SAW/BAW Resonators With High Effective Coupling Coefficient / Y. Zhang, J. Zhou, Y. Xie et al. // IEEE Trans. on UFFC. Vol. 67, Issue: 9. 2020. P. 1916–1921.

12. Hybrid BAW/SAW AlN and AlScN Thin Film Resonato / V. Pashchenko, R. Matloub, F. Parsapourkolour et al. // Proc. 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2016. 18–21 Sept.

УДК 621.372.6

С. В. Богословский*
доктор технических наук, профессор
А. Р. Жежерин**
кандидат технических наук, доцент
*АО Научно-производственное предприятие «Радар ммс»
**Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЬЕЗОПОДЛОЖКЕ

Рассмотрен способ измерения скорости ПАВ в материале пьезоподложки с использованием оригинальной топологии устройства на ПАВ и векторного анализатора. Описаны используемые при измерениях характеристики устройства, методика измерения скорости и оценена точность измерения.
Ключевые слова: пьезоподложка, скорость поверхностной акустической волны, встречно-штырьевой преобразователь, отражающая структура, частотные характеристики устройства, методика измерения.

S. V. Bogoslovsky*
Dr. Sc. Tech., Professor
A. R. Zhezherin**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*Joint stock company “Radar mms”
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

METHOD OF MEASUREMENT VELOCITY OF SURFACE ACOUSTIC WAVE IN SUBSTRATE

The method of measuring the surface acoustic wave (SAW) velocity in piezo substrate with use original topology of SAW device and vector analyzer is considered. The characteristics of the device used in the measurements, the method of speed measurement and the measurement accuracy are described.
Keywords: piezo substrate, SAW velocity, interdigital transducer (IDT), reflective structure, frequency responses of the device, measurements technique.

При разработке и изготовлении некоторых устройств на ПАВ важное значение имеет точное знание скорости ПАВ в материале подложки. Отклонение реальной скорости от ее значения, приводимое в справочниках, руководящих материалах и используемое при расчете устройства, может приводить к недопустимым искажениям частотных и временных характеристик проектируемых устройств или даже нарушению его работоспособности.

На практике используются оптические и радиотехнические методы измерений. В частности, известен способ с использованием интерферометрической методики измерения скорости ПАВ [1]. Предлагаемая методика основана на оптическом зондировании ПАВ одновременно в двух точках поверхно-

сти пьезоподложки и использовании при измерениях двухлучевого оптического интерферометра. Два пространственно-разнесенных оптических пучка диффрагируют на поверхностных волнах, затем смешиваются и создают интерференционную картину поля, которое осциллирует при переключении частоты ПАВ. По измерению периода осцилляций этой картины вследствие изменения частоты ПАВ находится фазовая и групповая скорости волны. Для проведения расчета требуется программное обеспечение эксперимента. Точность определения групповой скорости зависит от условий эксперимента и составляет 3 м/с. Недостатком этого метода измерений является необходимость иметь достаточно сложное и дорогое оборудование и соответствующие вычислительные средства (аппаратуру и алгоритмы) для проведения вычислений.

Радиотехнические способы являются более доступными. Например, в [4] рассмотрен способ определения скорости, заключающийся в том, что в контролируемой пьезоподложке возбуждают ПАВ и принимают их двумя приемными ВШП, расположенными по разные стороны от излучающего ВШП. Принятые сигналы суммируют. Приемные ВШП расположены на разном расстоянии от входного ВШП. Задают и измеряют эту разность расстояний ΔL (ΔL= L2 – L1). В эксперименте изменяют частоту генератора, возбуждающего входной ВШП в диапазоне частот $f_o(1-\frac{1}{N}) \le \Delta f < f_o(1+\frac{1}{N})$, где f_o – рабочая частота устройства на ПАВ; N – число пар электродов в ВШП. В интервале частот Δf может содержаться m частот, при которых выходной сигнал достигает минимума. Тогда разность задержек между двумя каналами $t_з = \frac{m-1}{f_m - f_1}$, где f_1 – начальная частота в диапазоне Δf; f_m – текущая частота очередного минимума сигнала на сумматоре; m – количество измеренных минимумов в диапазоне Δf. Скорость может быть определена по соотношению $V = \frac{\Delta L}{t_з}$. Такому методу присущи недостатки:

1) точность измерения скорости зависит от точности измерения ΔL;

2) поскольку измерение производится на гармоническом сигнале, то существующий сигнал 3-го прохода оказывает влияние на неравномерность АЧХ устройства на ПАВ, уменьшая точность измерений;

3) в методе не учтены погрешности используемой измерительной аппаратуры. Поэтому такой метод не обладает достаточной точностью измерения скорости. Другие разновидности рассмотренного радиотехнического способа, например [2] и [3], будут обладать такими же недостатками.

В настоящей работе рассмотрен способ измерения скорости ПАВ, основанный на применении устройства на ПАВ (названного чувствительным элементом ЧЭ) и векторного анализатора, предложенный в [5]. Топология устройства показана на рис. 1.

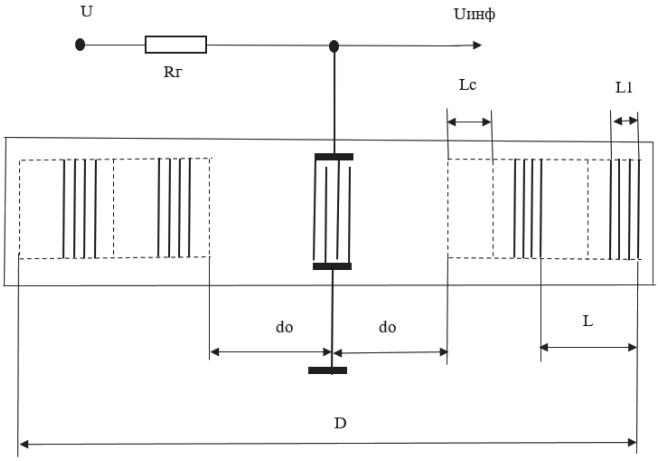


Рис. 1. Топология чувствительного элемента

В ЧЭ применена дифференциальная отражающая структура (ОС), состоящая из двух эквидистантных поочередно прореженных систем канавок, расположенных на пьезоэлектрической подложке слева и справа от преобразователя ПАВ, с синфазным суммированием отраженных волн. ОС состоит из секций. L – длина секции, измеренная в количестве канавок. Прореживание ОС условно означает наличие в ней секций с канавками нулевой глубины, что эквивалентно свободному пространству подложки без канавок. Секции с канавками и без канавок поочередно чередуются. Секция может быть заполнена канавками не полностью. L1 – число канавок в секции. Если L1<L, то в импульсной характеристике (ИХ) ЧЭ (представляющей собой последовательность р/импульсов-символов, образующихся в результате отражения короткого опросного импульса от канавок секций) образуются дырки. Длительность ИХ определяется общей длительностью ОС, а значит, числом канавок в ОС. При постоянной длине ОС и постоянном L, меняя L1, можно менять коэффициент отражения ОС. Интервалы do между краями правой и левой ОС и центром ВШП обеспечивают требуемую начальную задержку t_o и синфазное суммирование отраженных волн. ЧЭ содержит симметричный ПАВ преобразователь встречно-штыревого типа без аподизации. Количество электродов в преобразователе, коэффициент металлизации, апертура выбраны таким образом, чтобы обеспечить активную составляющую входного сопротивления ($R_{вх}$) на рабочей частоте ЧЭ равное 50 Ом с нулевой реактивной составляющей ($X_{вх}$) на этой частоте. Поэтому реализуется автосогласование (без специальных согласующих цепей) ЧЭ с 50-омным источником входного сигнала. При измерениях, проводимых с ЧЭ, использовался векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz ZNB4.

Для исследования возможности применения устройства на ПАВ для измерения скорости акустической волны в подложке была разработана программа для ЭВМ по расчету $R_{вх}(f)$ и $X_{вх}(f)$ ЧЭ. Для разработки программы использовался метод эквивалентных схем [6]. В качестве подложки был выбран материал YX 128 $LiNbO_3$. ВШП содержал 51 электрод, апертура W равнялась 0,489 мм. В качестве отражателей в ОС применялись канавки, *h*а – глубина канавок. При расчете скорость ПАВ в материале подложки (материал из справочника) равнялась *V*1=3997,9 м/с, рабочая частота *f*р1 =433 МГц. На рис. 2 и 3 представлены расчетные графики $R_{вх}$ (*f*) и *X*вх (*f*) при *h*а =300А, *L*с=50, *L*1=20, *d*о=800λо, где λо – длина ПАВ в материале подложки.

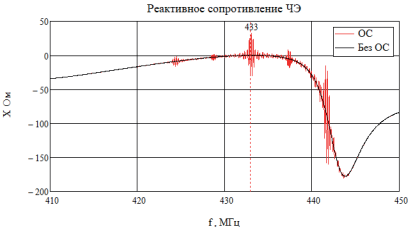


Рис. 2. Расчетный график $R_{вх}$ (f)

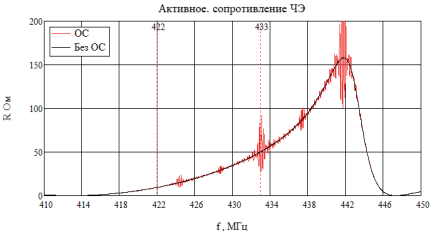


Рис. 3. Расчетный график $X_{вх}$ (f)

Плавные медленно меняющиеся кривые характеризуют ВШП – $R_{вх}(f)_{ВШП}$ и $X_{вх}(f)_{ВШП}$. Как видно на графиках, выбранные параметры ВШП обеспечили $R_{вх}$(*f*р1)=50 Ом и $X_{вх}$(*f*р1) =0. Наложенная на эти кривые быстро осциллирующая функция определяется ОС. Для удобства анализа свойств ЧЭ будем рассматривать характеристику $R_{вх}(f)$. Зависимость $R_{вх}(f)$ ЧЭ обладает тем свойством, что минимум осцилляций находится на частоте *f*р1 (при использовании при расчете скорости ПАВ – *V*1). В этом случае ширина канавки ОС $p1 = \frac{\lambda oc1}{4}$, где $\lambda oc1 = \frac{V1oc}{fp1}$; *V*1ос – скорость ПАВ в ОС. Если считать *V*1ос=*V*1 и λ_{OC1}=λо, то на частоте *f*р1 в ОС будет выполняться условие акустического синхронизма и коэффициент отражения отражающей структуры |*K*ос(*f*)| будет достигать максимума. Как видно из рис. 4, при *d*о=1600 λо минимальное значение осцилляций наблюдается на частоте *f*р1=433 МГц (при расчетной скорости *V*1). Если скорость ПАВ изменится, например, уменьшится и станет равной *V*2, то в этом случае λо –увеличиться. Считая по-прежнему λ_{OC}=λо, можно видеть, что для выполнения условия синхронизма λос2 должно быть > λос1. Это условие должно выполняться при соотношении $p2 = \frac{\lambda oc2}{4}$, где $\lambda oc2 = \frac{V2}{fp2}$. Так как р=р1 было рассчитано при *V*=*V*1, то условие синхронизма в ОС при новой скорости *V*2 станет возможным, если λос2=λос1. При этом *f*р изменится и станет равным *f*р2.

На рис. 5 показано положение осцилляции Rвх(f) при $V2$=3975,74 м/с (параметры ВШП даны для $V1$).

Видно, что минимум осцилляции $R_{вх}(f)$ сместился на fp2=430,6МГц. Изменение рабочей частоты приведет к тому, что $R_{вх}(f\text{p}2) \neq 50$ Ом. При этом произойдет рассогласование Rг с $R_{вх}(f\text{p}2)$, уменьшение сигнала на входе ВШП и уменьшение величины размаха осцилляций. Так как отражение теперь будет происходить при λос2 > λос1, то |Kос(fp2)| уменьшится, что так же уменьшит размах осцилляций. Однако полоса отражения |Kс(f)|, где |Kс(f)| – модуль коэффициента отражения секции, – Δfс > Δfос, где Δfос – полоса отражения ОС. Поэтому произойдет небольшое уменьшение размаха осцилляций $R_{вх}(f)$.

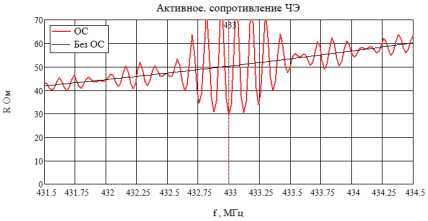


Рис. 4. Положение минимума Rвх(f): при Vp1=3997,9 м/с, do =1600λo

Рис. 5. Положение минимума Rвх(f): при Vp2=3975,74 м/с, do =1600λo

Таким образом, как видно из расчета, изменение величины скорости в реально изготовленном образце по отношению к величине, используемой при расчете устройства, должно приводить к смещению по частотной оси минимума осцилляций $R_{вх}(f)$ (см. рис. 4, 5). Для наблюдения $R_{вх}(f)$ изготовленного образца, истинность величины скорости в подложке которого вызывает сомнение (по отношению к справочной величине), используется векторный анализатор. После калибровки прибора (на $R_{вх}$=50 Ом), исследуемый образец ЧЭ подключается к анализатору и настраивается так, чтобы на экране наблюдать ту часть характеристики $R_{вх}(f)$, где наблюдается максимальный размах осцилляций и можно фиксировать минимальную величину осцилляции. Справедливо следующее рассуждение. Если при известной скорости $V1$ и расчетной частоте fp1, условие акустического синхронизма в ОС одновременно выполняется и на измеренной частоте fp2 (место расположения минимума осцилляций при измерении) при неизвестной скорости $V2$, то можно составить соотношение

$$V2 = \frac{fp2 * V1}{fp1}. \qquad (1)$$

Значения $V1$ и fp1 задаются при расчете топологии устройства, fp2 – измеряется в эксперименте с изготовленным образцом. Точность определения $V2$ зависит от точности определения частоты минимума осцилляции $R_{вх}(f)$. Она зависит от расстояния межу экстремумами осцилляций, которые определяют крутизну кривой осцилляции вблизи точки перегиба. Расстояние между экстрему-

мами определяется расстоянием do на топологии устройства. Это иллюстрируется на рис. 6 и 7, где показаны $R_{вх}(f)$ для do=800λo и 1600λo.

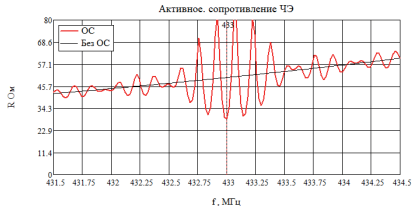


Рис. 6. Rвх (f) при do=800λo

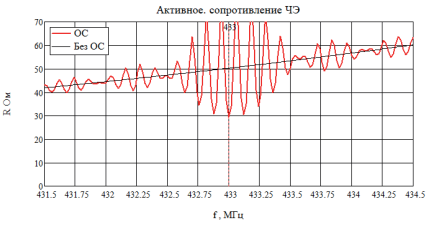


Рис. 7. Rвх (f) при do=1600 λo

Проделанные расчеты были проверены экспериментально на изготовленном образце с применением векторного анализатора. Параметры образца были указаны выше. Расчетная частота fp1 =433 МГц, расчетная скорость ПАВ V1= 3997,9 м/с. Вид осциллограммы $R_{вх}(f)$ показан на рис. 8. Как видно, минимум осцилляции находится на частоте fp2=430,63МГц (точка М3 на осциллограмме, скорость развертки – 300 КГц/дел), что довольно хорошо согласуется с результатами расчета. Таким образом, зная исходные данные fp1 и V1, применяемые при расчете характеристик ЧЭ, и измерив в эксперименте с опытным образцом (изготовленным с использованием указанных данных) fp2, по соотношению (1) можно рассчитать V2.

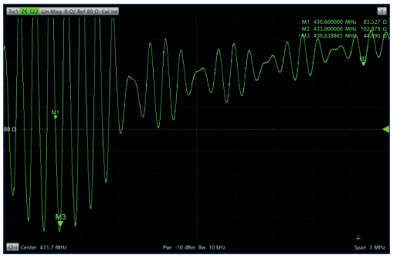


Рис. 8. Осциллограмма Rвх (f) опытного образца скорость развертки 200 КГц/дел

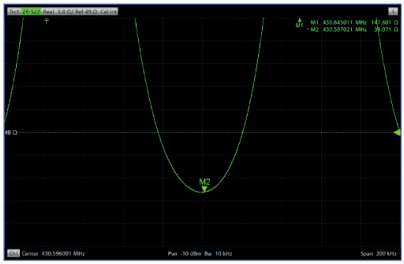


Рис. 9. Осциллограмма Rвх (f) – скорость скорость развертки 20 КГц/дел

Точность определения fp2 будет определять точность расчета V2. На рис. 9 показано положение минимума осцилляции при скорости развертки на экране анализатора 20КГц/дел. Можно использовать для определения разности по частоте 2 минимумов осцилляции критерий разрешения Релея. Если считать, что оператор сможет различить по этому критерию расстояние между двумя экстремумами – Δf в 10 КГц (анализатор позволяет иметь такое разрешение), то при fp1=433МГц относительная погрешность определения скорости V2 – ε будет равна

$$\varepsilon = \frac{\Delta f}{fp1} * V1 = 0.092 \approx 0.1\text{м/с}. \qquad (2)$$

Такое разрешение по скорости больше, чем на порядок превышает разрешение при оптическом методе измерений, не требуя сложного оборудования и специального программного обеспечения. Используемый векторный анализатор имеет разрешающую способность по частоте на порядок выше, чем использовалась при эксперименте. Поэтому при определенной квалификации человека, производящего измерения, точность определения скорости может быть еще повышена.

Фирма-производитель обычно гарантирует направление главной оси вырезаемой пьезоподложки. Уточнив скорость распространения ПАВ в одном образце, можно распространить результат на всю используемую партию пьезоподложек.

Применение в производстве данного способа высокоточного определения фактической скорости распространения ПАВ в пьезоподложке позволит точнее рассчитать топологию ЧЭ для каждого конкретного кристалла подложки и повысить эффективность создания устройств на ПАВ при снижении производственных затрат.

Библиографический список

1. *Колосовский Е. А., Царев А. В., Яковкин И. Б.* Улучшенная методика измерения скорости ПАВ в анизотропных структурах // Акустический журнал. 1998. Т. 44. № 6. С. 793–800.

2. *Симаков И. Г., Гулгенов Ч. Ж.* Регистрация изменения амплитуды и скорости релеевских волн на поверхности пьезоэлектрика // Вестник Бурятского государственного университета. 2011. № 3. С. 216–220.

3. Авторское свидетельство СССР № 1490501. Способ измерения скорости поверхностных акустических волн; опубл. 30.06.1989, МПК G01H 5/00.

4. Авторское свидетельство СССР № 1298549. Способ измерения скорости поверхностных акустических волн; опубл. 23.03.1987, МПК G01H 5/00.

5. Патент RU № 2738454 C1. Способ измерения скорости поверхностных акустических волн в пьезоподложке; опубл.14.12.2020, МПК G01H 5/00.

6. *Inagava K., Koshiba M.* Equivalent networks for SAW interdigital transducers // IEEE Transactions on UFFC. 1994. Vol. 41. N 3.

УДК 621.372.63

И. В. Веремеев*
старший научный сотрудник
С. А. Доберштейн*
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
*АО «ОНИИП»

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА РЕЗОНАТОРОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛНАХ С ВЫСОКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ И УМЕНЬШЕННЫМИ РАЗМЕРАМИ

Представлены конструкции и технологии для производства резонаторов на поверхностных поперечных волнах в диапазоне частот 240–1800 МГц на YX/36 °+90 ° срезе кварца с добротностью 5000–11780 в корпусах под поверхностный монтаж размерами 9,1 × 7,1 × 1,8 мм, 5 × 5 × 1,8 мм и 3 × 3 × 1,5. Резонаторы могут использоваться в миниатюрных малошумящих генераторах.
Ключевые слова: поверхностные поперечные волны, резонатор, добротность.

I. V. Veremeev*
Senior Researcher
S. A. Dobershtein*
PhD Sc. Tech., Leading Scientific Researcher
*JSC «ONIIP»

CONSTRUCTIONAL AND TECHNOLOGICAL PLATFORM FOR THE DEVELOPMENT AND MASS PRODUCTION OF THE STW RESONATORS WITH HIGH QUALITY FACTOR AND REDUCED SIZES

This paper presents the designs and manufacture technologies of the 240–1800 MHz STW resonators with quality factor of 5000–11780 on 36 °YX90 ° cut quartz in the 9.1 × 7.1 × 1.8 mm, 5 × 5 × 1.8 mm and 3 × 3 × 1.5 mm SMD packages. Resonators can be used in the miniature low noise oscillators.
Keywords: surface transverse wave, resonator, quality factor.

Введение

В УКВ аппаратуре связи широко используются малошумящие генераторы на резонаторах поверхностных акустических волн (ПАВ). Возросшие требования к таким генераторам на диапазон частот 240–1800 МГц диктуют следующие технические характеристики резонаторов: добротность > 5000; эквивалентное динамическое сопротивление ≤ 20 Ом; емкостное соотношение > 1000, малые габариты SMD-корпуса; широкий интервал рабочих температур (от –60 до +85 °С).

Реализация этих требований предлагается на резонаторах на поверхностных поперечных волнах (surface transverse waves – STW) на кварце, которые имеют высокую скорость распространения акустической волны V_0=5000 м/с,

низкий температурный коэффициент частоты $-0{,}05\cdot10^{-6}$ 1/ °C^2, выдерживают большую мощность подводимого сигнала до нескольких Вт. Все это позволяет успешно использовать STW для создания высокочастотных резонаторов и генераторов на их основе [1–3]. Однако для обеспечения высокой добротности Q требуется большое число электродов 400 в отражательных решетках (ОР). Это приводит к увеличению размеров резонаторов. В этой работе представлены STW-резонаторы с высокой добротностью и уменьшенными размерами на YX/36 °+90 ° срезе кварца. Резонаторы выполнялись по одновходовой схеме, когда встречно-штыревой преобразователь (ВШП) располагался между двумя ОР с закороченными электродами (рис. 1). Добротность таких резонаторов определяется отражательной способностью ОР, потерями на распространение и на проводимость электродов ВШП, совпадением по частоте центра полосы задерживания и максимума коэффициента отражения ОР с максимумом проводимости ВШП. Отражательная способность ОР зависит от количества электродов ОР, толщины металлизации и коэффициента металлизации электродов. Отражательная способность ОР для STW несколько выше, чем для Рэлеевской ПАВ при одинаковой толщине и коэффициенте металлизации электродов [4]. Следовательно, можно использовать уменьшенное число электродов в ОР для сокращения размеров резонаторов. Потери на распространение STW связаны с потерями в пьезоматериале, определяются длиной резонансной полости и зависят от количества электродов в ВШП и ОР. Потери на проводимость электродов ВШП зависят от толщины металлизации, коэффициента металлизации и величины апертуры ВШП W (рис. 1). Совпадение по частоте центра полосы задерживания и максимума коэффициента отражения ОР с максимумом проводимости ВШП зависит от соотношения между периодами электродов ОР (d_{OP}) и ВШП (d) (рис. 1). В этом случае STW-резонатор становится асинхронным [3].

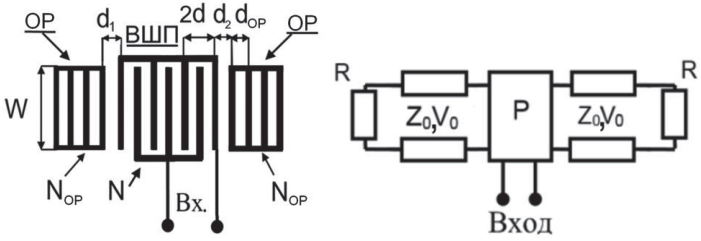


Рис. 1. Топология одновходового STW-резонатора и его эквивалентная схема

Расчетные и экспериментальные результаты

Конструктивно-топологическая оптимизация STW-резонаторов проводилась с помощью компьютерного моделирования с использованием модели эквивалентных схем [5]. Эквивалентная схема STW-резонатора подобна эквивалентной схеме обычного ПАВ-резонатора и показана на рис. 1. Здесь P – матрица смешанных параметров ВШП; Z_0 – характеристический импеданс среды

между ВШП и ОР; V_0 – скорость STW; $R=Z_0(1+\Gamma)/(1-\Gamma)$ – эквивалентный импеданс ОР; Г – коэффициент отражения ОР. Оптимизация вышеупомянутых параметров топологии резонатора (рис. 1) позволяет получить высокую добротность STW-резонаторов. В этом случае ВШП и ОР становятся менее длинными и размеры резонаторов уменьшаются по сравнению с известными подходами [1]–[3]. Оптимальные параметры топологии резонаторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оптимальные параметры топологии резонаторов

Наименование параметра	Значение					
Центральная частота f_0, МГц	241,9	491,6	500	765	1000	1532
Число электродов в ОР, N_{OP}	230	230	230	285	350	380
Число пар электродов в ВШП, N	80	80	80	100	100	100
Соотношение между периодами электродов в ВШП и ОР, d/d_{OP}	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
Расстояние между ВШП и ОР, $d_1=d_2$	d_{OP}	d_{OP}	d_{OP}	d_{OP}	d_{OP}	d_{OP}
Апертура, W*	80λ	80λ	80λ	80λ	80λ	80λ

*Здесь λ – длина STW на частоте f_0 максимума активной части проводимости резонатора.

Представленные расчетные и измеренные частотные характеристики действительной и мнимой части проводимости (рис. 2) соответственно STW-резонатора на кварце YX/36 °+90 ° на f_0=500 МГц демонстрируют хорошее совпадение. Основные требования к параметрам технологии изготовления описанных резонаторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Требования к параметрам технологии изготовления STW-резонаторов

№	Наименование параметра	Значение
1	Удельное сопротивление алюминиевых пленок, мкОм·см	3,2-3,3
2	Толщина алюминиевой пленки h, мкм	0,1-0,51
3	Ширина электродов, мкм	0,5-5,17
4	Ширина зазоров, мкм	0,8-5,19
5	Коэффициент металлизации электродов	0,35-0,5
6	Толщина подложки кварца, мм	0,3-0,5

Особенность разработанной технологии изготовления STW-резонаторов состоит в том, что в диапазоне частот 240–1800 МГц и при выполнении пунктов 1–5 табл. 2 при магнетронном напылении металлических пленок и фотолитографии с жидкостным травлением в резонаторах с оптимизированными топологиями измеренная добротность составляет не менее 8000 в диапазоне частот до 1000 МГц и не менее 5000 в диапазоне до 1800 МГц, а эквивалентное дина-

мическое сопротивление не превышает 20 Ом. Толщина подложки кварца выполняется по пункту 6 табл. 2 для обеспечения монтажа кристалла STW-резонаторов на клей в SMD-корпуса с ограниченной высотой.

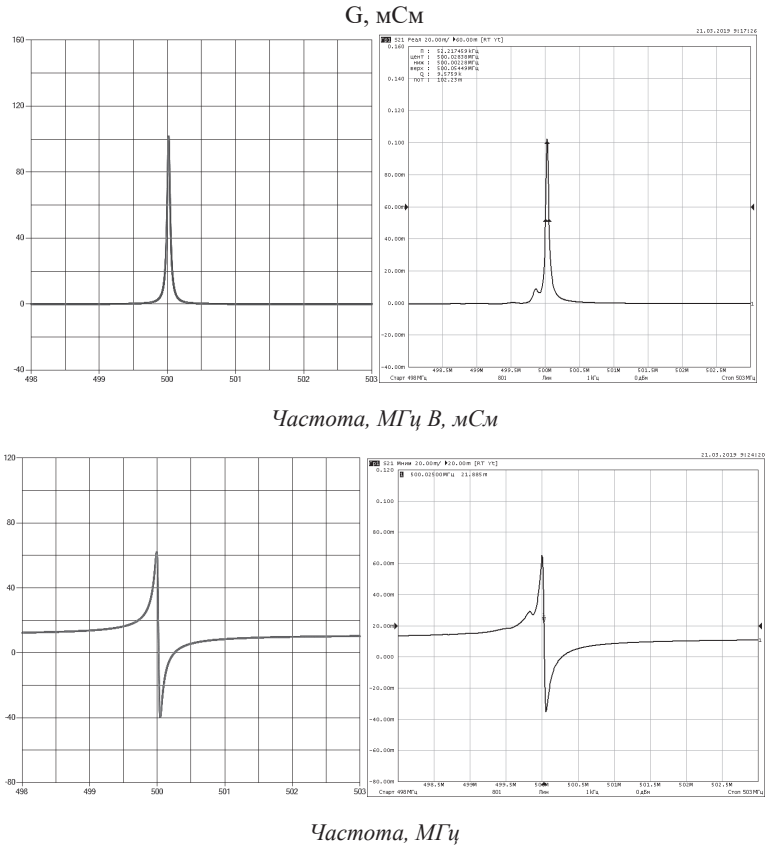


Рис. 2. Расчетные и измеренные частотные характеристики проводимости STW-резонатора на f_0=500 МГц

Конструкции и схемы включения STW-резонаторов для измерения параметров показаны на рис. 3. STW-резонаторы помещались в SMD-корпуса габаритами 9,1 × 7,1 × 1,8 мм (f_0=241,9 МГц), 5 × 5 × 1,8 мм (f_0=491,6–1000 МГц) и 3 × 3 × 1,5 мм (f_0=1000–1800 МГц).

Для анализа STW-резонаторов использовалась эквивалентная схема с сосредоточенными элементами R, L, C. Эквивалентная схема одновходового STW-резонатора (рис. 4) подобна эквивалентной схеме обычного ПАВ-резонатора и представляет собой двухполюсник с динамической индуктивно-

стью L_D, динамической емкостью C_D, статической емкостью C_0, и динамическим сопротивлением R_D, характеризующим внутренние потери в резонаторе.

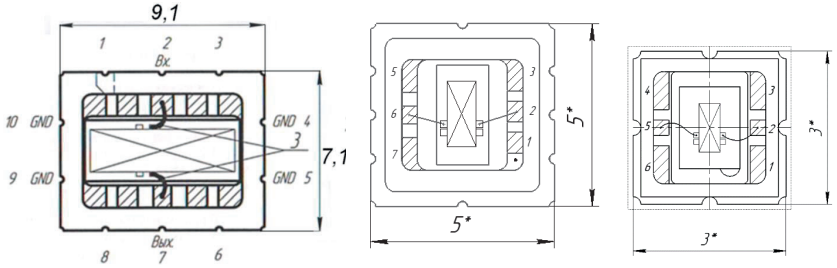


Рис. 3. Конструкция STW-резонаторов в SMD-корпусах 9,1 × 7,1 × 1,8 мм; 5 × 5 × 1,8 мм, 3 × 3 x 1,5 мм

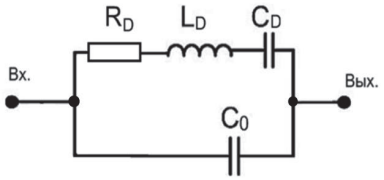


Рис. 4. Эквивалентная схема одновходового STW-резонатора с сосредоточенными элементами R, L, C

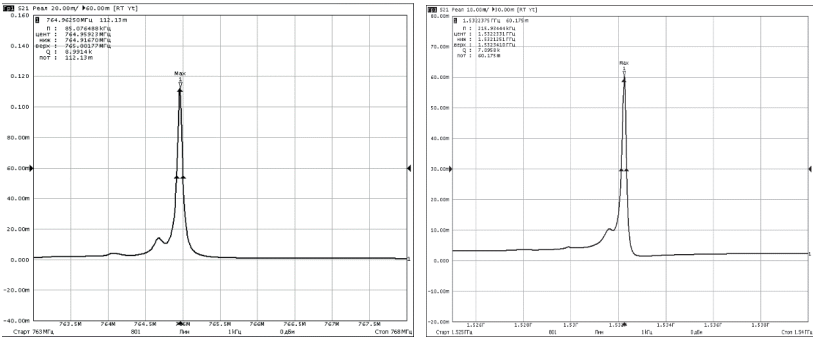


Рис. 5. Измеренные частотные характеристики реальной части проводимости STW-резонаторов на f_0=765 МГц и 1532 МГц

Для оценки эквивалентных параметров STW-резонатора в SMD-корпусе используются формулы из метода эквивалентных схем для одновходовых ПАВ-резонаторов [6]:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f},\ R_D = \frac{1}{G_M},\ L_D = \frac{QR_D}{2\pi f_0},\ C_D = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_D}, \qquad (2)$$

где Q – добротность резонатора; G_M – максимальное значение действительной части проводимости на частоте f_0; Δf – полоса частот по уровню $G_M/2$. Статическая емкость C_0 измеряется на низкой частоте с учетом емкости SMD-корпуса.

Таблица 3

Параметры эквивалентной схемы STW-резонаторов

Наименование параметра	Значение					
Центральная частота, МГц	241,9	491,6	500	765	1000	1532
Добротность Q	10300	11780	9500	9000	8600	7096
R_D, Ом	12,6	7,6	9,7	8,9	11,0	16,62
L_D, мкГн	85,16	29	29,6	16,7	15,2	12,25
C_D, пФ	0,005	0,0036	0,0034	0,00259	0,00166	0,00088
C_0, пФ	6,6	3,6	3,6	3,8	1,86	0,93
Емкостное отношение C_0/C_D	1320	1000	1058	1467	1120	1060

Параметры эквивалентной схемы одновходовых STW-резонаторов, рассчитанные по измеренным характеристикам (рис. 2, 5) по формулам (2), представлены в табл. 3. Эти параметры использовались для моделирования и разработки малошумящих генераторов.

Заключение

Представлена конструктивно-технологическая платформа для разработки и серийного производства STW-резонаторов в диапазоне частот 240–1800 МГц с высокой добротностью и уменьшенными размерами для миниатюрных малошумящих генераторов. Указанная конструктивно-технологическая платформа позволит расширить номенклатуру электронной компонентной базы в свете решения проблемы импортозамещения и создать базовое решение для генерации частот.

Библиографический список

1. *Friedt J.* Design of Asynchronous STW Resonators for Filters and High Stability Source Applications // Proc. IEEE Ultrason. Symp. 2005. P. 1315–1318.

2. *Wang W.* Optimization of STW Resonator by Using FEM/BEM // Proc. IEEE Ultrason. Symp. 2006. P. 1863–1865.

3. *Kim C.* High Q-factor STW-Resonators on AT-Cut of Quartz // Proc. IEEE Ultrason. Symp. 2007. P. 2582–2585.

4. *Thorwaldsson T.* GHz Range STW Resonators and Narrow Band Filters // Proc. IEEE Ultrason. Symp. 1994. P. 99–102.

5. *Веремеев И. В., Доберштейн С. А., Разгоняев В. К.* Моделирование ПАВ-резонаторов и лестничных ПАВ-фильтров методом Р-матриц // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 3. С. 61–71.

6. *Soluch W.* Scattering Matrix Approach to One Port SAW Resonators // Proc. IEEE IFCS-EFTF. 1999. P. 859–862.

УДК 621.37

А. С. Койгеров*
кандидат технических наук, доцент
О. Л. Балышева**
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ЧИСЛЕННЫЙ ПОДХОД К ИЗВЛЕЧЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ИЗ АНАЛИЗА ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Предложен численный подход к извлечению COM параметров поверхностных акустических волн из анализа периодических структур. Скорость, коэффициент отражения, эффективный коэффициент электромеханической связи, затухание определяются на основе моделирования набора тестовых структур с помощью пакета COMSOL Multiphysics. Представлены два типа анализа периодической структуры: анализ собственных частот и анализ частотной характеристики проводимости. Сравнение с использованием двух типов анализа показало хорошее совпадение.
Ключевые слова: поверхностные акустические волны, COM параметры, COMSOL.

A. S. Koigerov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg Electrotechnical University LETI
O. L. Balysheva**
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

NUMERICAL APPROACH FOR EXTRACTION SURFACE ACOUSTIC WAVE PARAMETERS FROM PERIODIC STRUCTURES ANALYSIS

A numerical approach for extraction COM surface acoustic wave parameters from periodic structures analysis is proposed. Velocity, reflection coefficient, effective electromechanical coupling coefficient, attenuation are extracted from simulations of a set of test structures employing COMSOL Multiphysics. Two types of a periodic structure analysis: eigenfrequency analysis and frequency response analysis of harmonic admittance are presented. A comparison using two methods showed good agreement.
Keywords: surface acoustic waves, COM parameters, COMSOL.

Введение

Фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) – массово используемые устройства обработки сигналов современных информационных и телекоммуникационных систем [1], [2]. Сокращение времени проектирования с одновременным снижением затрат на разработку обеспечивается развитием средств моделирования на основе новых подходов и применения современных

вычислительных пакетов. Одним из эффективных методов исследования и моделирования волновых процессов является метод конечных элементов (МКЭ), на котором основана работа получившего в последнее время популярность пакета COMSOL Multiphysics [3], [4].

Наибольшее распространение в практике разработки ПАВ устройств получил метод моделирования на основе связанных волн, в англоязычной литературе известный как COM-метод [5], [6]. Удобный способ формализации вычислений обеспечивает матричное представление в виде P-матрицы. Каскадирование P-матриц для отдельных топологических элементов приводит к суммарной P-матрице устройства в целом, от которой можно перейти к полной матрице Y-проводимостей, и, наконец, к полному набору S-параметров. Такой подход подробно описан, например, в работах [1], [5], [7].

COM метод с матричной формализацией вычислений обеспечивают довольно быстрый расчет, но требуют подстановки так называемых COM параметров, точно описывающих волновые процессы в заданном материале при известных топологических и технологических параметрах ПАВ структур. Данные COM параметры необходимо извлекать «извне», что заставляет разработчика либо воспользоваться экспериментальными результатами [8], [9], [10] различных тестовых устройств, либо применить численный анализ [11], [12], [13]. В статье описана методика извлечения COM параметров с помощью расчетов, выполненных в пакете COMSOL.

Способ извлечения COM параметров на основе численного моделирования

Алгоритм извлечения COM-параметров с помощью пакета COMSOL включает в себя два типа анализа, основанных на МКЭ для периодических структур. Первый тип – анализ собственных значений акустических мод (Eigenfrequency) [13], в результате которого получается набор собственных значений частот для всех акустических мод, возбуждаемых в данной периодической структуре. Второй – частотный анализ, в процессе которого вычисляется полная проводимость (Harmonic admittance) [12] тестовой периодической структуры в заданном частотном диапазоне. При анализе учитываются такие эффекты второго порядка, как рассевание волны в глубину подложки, возбуждение различных акустических мод и др.

Поскольку в устройствах на ПАВ используются электродные структуры, имеющие некоторую периодичность и, как правило, одинаковую форму электродов, то целесообразно исследовать и извлекать параметры именно для одного периода такой структуры (или одной длины волны ячейки) и распространять решения на оставшиеся периодические элементы. Анализируемые в пакете структуры – периодические электродные структуры с периодом $p=\lambda/2$. Размер ячейки составляет одну длины волны (принято $\lambda=2$ мкм).

Такой подход анализа одного периода тестовой структуры или ячейки в одну длину волны позволяет, во-первых, задавая периодические граничные условия, уменьшить сложность численной модели, достичь компромисса между

точностью расчета и сложностью решаемой задачи. Во-вторых, знание параметров отдельного элемента периодической структуры и подразумевает собой подход P-матриц, предусматривающий описание отдельного электрода или элементарной ячейки.

В пакете COMSOL Multiphysics расчет собственных мод осуществляется с помощью решателя Study – Eigen-frequency, в результате чего получается набор собственных значений частот всех акустических мод, возбуждаемых в данной тестовой структуре. Визуализация картины полного механического смещения, либо каждой из трех компонент механического смещения в отдельности для полученной моды позволяет оценить тип волны. Причем данный расчет можно приводить как для волн Рэлея, так и «псевдо» ПАВ.

В табл. 1 представлены результаты численного анализа тестовой структуры для подложки 49 ° Y-X $LiNbO_3$ с шагом электродов, p=λ/2, толщиной металлизации H_m/λ=3,5 % и коэффициентом металлизации K_m=0,5. Полученные на рис. 2 картины механических смещений для различных акустических мод, ярко демонстрируют их отличия и особенности. Волна Рэлея – чисто поверхностная волна, распространяющаяся в слое глубиной до двух λ. Для вытекающей ПАВ (ВПАВ) характерна утечка в объем подложки, а для объемной акустической волны (ОАВ) четко прослеживается наличие максимальных механических смещений в глубине подложки.

Таблица 1

Результаты анализа собственных мод и полученные COM-параметры

Параметры тестовой структуры	Собственные частоты и результаты анализа				
	f_r, ГГц	f_i, ГГц	V, м/с	Тип волны	Рис.
49 ° Y-X $LiNbO_3$ p=λ/2 H_m/λ=3,5 % K_m=0,5	1,8023	0	3618,5	Рэлея	Рис. 2а
	1,8162	0			-
	2,1614	0,0022	4465,0	ВПАВ	Рис. 2б
	2,3036	0,0009			-
	2,3815	0,0025	4763,0	ОАВ	Рис. 2в
	2,3818	0,0027			-

Частотный анализ является инструментом выявления эффективности возбуждения и распространения различных акустических волн в тестовой периодической структуре. Анализ выполняется в заданном частотном диапазоне, определяемом на основе полученных значений частот на предыдущем этапе. Получаемая частотная характеристика полной проводимости тестовой структуры отражает резонансы и анти-резонансы всех возбуждаемых мод. По виду частотной характеристики можно определить присутствие нескольких акустических мод (волна Рэлея, вытекающая ПАВ и моды ОАВ). Причем данные, полученные с помощью частотного анализа, полностью коррелируют с данными табл. 1 по анализу собственных значений частот. В рассматриваемом подходе в данной статье основной интерес представляет частота «отсечки», после которой начинается существенное возбуждение мод ОАВ.

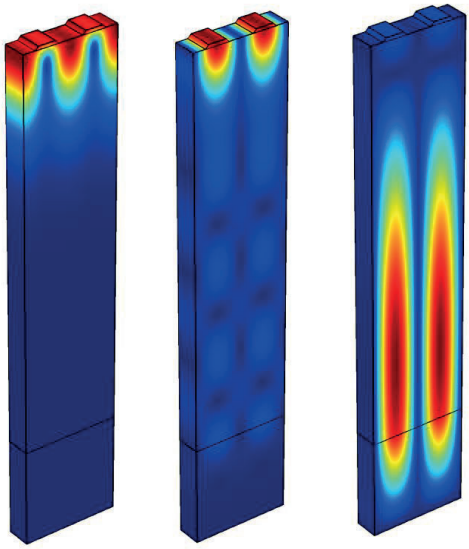


Рис. 2. Картины механических смещений для трех типов волн на подложке 49 ° Y-X LiNbO3: а – волна Рэлея; б – ВПАВ, в – одна из мод ОАВ

Заключение

Представлен способ извлечения COM параметров, необходимых для моделирования и расчета характеристик ПАВ устройств, на основе численного анализа тестовых периодических структур в пакете COMSOL. Показано, что все необходимые ключевые COM параметры могут быть получены на основе единого подхода, с помощью анализа собственных частот. Анализ частотной зависимости проводимости полезен для определения частоты «отсечки», после которой начинается значительное возбуждение ОАВ-мод. Полученные частотные характеристики полной проводимости позволяют оценить возбуждение всех типов акустических мод.

Библиографический список

1. *Аристархов Г. М.* Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства. М.: Радиотехника. 2020. 504 с.

2. *Morgan D.* Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing, Academic Press, London, 2010. 448 p.

3. *Yantchev V., Turner P., Plessky V.* COMSOL modeling of SAW resonators // 2016 IEEE Intern. Ultrason. Symp., Tours, France, 2016. P. 1–4.

4. *Sveshnikov B., Koigerov A., Yankin S.* Unveiling the polarization of the multimode acoustic fields // Ultrasonics. 2018. Vol. 82. P. 209–216.

5. *Plessky V., Koskela J.* Coupling-of-modes analysis of SAW devices // Int. J. High Speed Electronics and Systems. 2000. Vol. 10. P. 867–947.

6. *Hashimto K.* Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications, Modelling and Simulation. Berlin: Springer, 2000. 321 P.

7. *Dmitriev V.* Synthesis of ladder-type filters based on SAW resonators // Tech. Phys. 2002. P. 1024–1031.

8. *Hartmann C., Plessky V.* Experimental measurements of propagation, attenuation, reflection and scattering of leaky waves in Al electrode gratings on 41 °, 52 ° and 64 °-$LiNbO_3$ // 1993 Proceedings IEEE Ultrason. Symp. Baltimore, MD, USA, 1993. Vol. 2. P. 1247–1250

9. *Honkanen K., Koskela J., Plessky V.* Parasitic BAW excitation in LSAW transducers // 1998 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings (Cat. No. 98CH36102), Sendai, Japan, 1998. Vol. 1. P. 949–952/

10. *Malocha S., Gamble K., Dong H.* Automated COM parameter extraction for SiO_2/$LiNbO_3$ and SiO_2/$LiTaO_3$ substrates // 2016 IEEE Intern. Ultrason. Symp. (IUS), Tours, France, 2016.

11. *Cherednick V., Dvoesherstov M.* COM Parameters of Langasite Crystal // 2007 IEEE Ultrason. Symp. Proc., New York, USA, 2007. P. 2351–2354.

12. *Koskela J., Plessky V., Salomaa M.* SAW/LSAW COM parameter extraction from computer experiments with harmonic admittance of a periodic array of electrodes // IEEE Trans. on UFFC. 1999. Vol. 46. N 4. P. 806–816.

13. *Tikka A., Said A., Abbott D.* Acoustic Wave Parameter Extraction with Application to Delay Line Modelling Using Finite Element Analysis // Sensors & Transducers Journal. 2008. Vol. 95. P. 26–39.

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.735.33

Н. В. Богатов*
магистр, инженер
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГРУЗА НА СКЛАДЕ

Рассматривается необходимость решения операционных складских задач на основе внедрения в технологические процессы решений на основе беспилотных авиационных систем. Обосновывается необходимость формирования системы меток, системы маркеров, и выбора наилучшего маршрута для полетных заданий, которые обеспечивает как точную идентификацию материальных объектов, так и решение задачи складского учета и мониторинга. Приводится математическая модель перемещения квадрокоптера между яруса склада, приводятся варианты маршрутизации квадрокоптеров. Рассматриваются результаты идентификации грузов, инвентаризации на основе использования квадрокоптеров, полученные на основе экспериментов в исследовательском летном поле ГУАП.
Ключевые слова: транспортный процесс, складской процесс, мониторинг товародвижения, дрон, Aruco-маркеры, полетные задания.

N. V. Bogatov *
Postgraduate Student, Engineer
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM TO IDENTIFY CARGO IN WAREHOUSE

The necessity of solving operational warehouse tasks based on the introduction of solutions based on unmanned aircraft systems into technological processes is considered. The necessity of forming a system of marks, a system of markers, and the choice of the best route for flight missions, which provides both an accurate identification of material objects and a solution to the problem of warehouse accounting and monitoring, is justified. A mathematical model of the movement of a quadrocopter between warehouse tiers is presented, options for routing quadrocopters are given. Considered are the results of cargo identification, inventory based on the use of quadcopters, obtained on the basis of experiments in the research airfield of SUAI.
Keywords: transport process, warehouse process, monitoring of goods movement, drone, Aruco-markers, flight missions.

Введение

Сегодня наблюдается потребность в разработке новых технологий для операционной деятельности в складских системах, деятельности по мониторингу и анализу динамических систем, мониторингу грузопотоков, в задачах по построению цифровых моделей участков и узлов систем.

Громадные сортировочные центры крупных логистических компаний поражают своим масштабом. Огромное количество различных посылок в коробках, пакетах заставляет задуматься о том, как возможно упорядочить и структурировать весь этот хаос. Ведь согласно статистике один только Amazon за но-

вогодние праздники отправляет в среднем 1 млрд посылок [1], а подведомственное Минкомсвязи предприятие «Почта России» обрабатывает каждый месяц десятки миллионов международных почтовых отправлений с товарным вложением. В данном случае отслеживание огромного количества направлений доставки – это очень сложная задача для любой логистической компании. Любые компании логистического сектора всегда в поиске решений, которые смогли помочь избежать потери груза. Речь идет в первую очередь об инвентаризации складского комплекса грузовых компаний, в дальнейшем рассмотрим основной метод идентификации.

Радиочастотная идентификация

Сейчас наблюдается тенденция на использование нескольких видов идентификации груза. В этот перечень входит сканирование так называемого Bar-Code – штрих-кода, размещаемого на таре с грузом. Однако самым современным и эффективным способом является радиочастотная идентификация (RFID). Данная технология позволяет считывать информацию о грузе дистанционно при помощи радиочастотного канала связи. Информация считывается со специальной RFID метки, которая помещается в тару с грузом и представляет собой миниатюрный носитель информации, считать которую можно с помощью специального RFID-считывателя дистанционно. Принимаемая RFID меткой электромагнитная волна активирует ее и позволяет считать заранее записанную информацию. В устройство RFID метки входит: приемник, передатчик, антенна и блок памяти. Все это, кроме антенны, помещается в специальном чипе.

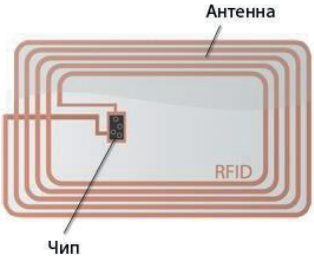


Рис. 1. RFID-метка

Существуют активные и пассивные RFID-метки, главным отличием которых является дальность действия и необходимая мощность сигнала считывателя. Так, пассивная метка, не обладающая собственным источником питания, нуждается в сигнале сильной мощности меньше по весу и дешевле в производстве. Активная же метка, будучи дороже в производстве, не нуждается в сильном сигнале считывателя за счет включения в устройство метки собственного источника питания. Дальность работы такой метки в среднем в 2–3 раза больше, чем у пассивной. К тому же скорость перемещения считывателя относительно активной метки может быть значительно выше, что важно для дальнейшего исследования.

Одной из немногих проблем использования RFID-технологий при осуществлении инвентаризации является скорость работы оператора считывателя. В большинстве случаев инвентаризация проводится человеком вручную, что значительно тормозит работу склада и не позволяет провести процесс запараллеливания складских процессов. Это формирует задачу поиска решения автоматизации процесса инвентаризации с помощью современных технологий.

Теоретическое исследование использования квадрокоптера в складских условиях

Для решения данного круга задач сегодня в данном исследовании предлагается применять решения на основе беспилотных авиационных систем и специализированных новых аппаратных комплексов. Именно беспилотные летательные аппараты, в нашем случае квадрокоптеры, являются одним из наиболее динамично развивающихся видов авиационной техники и активно используются при решении широкого спектра задач, в том числе и для складских [2], [3], [4]. Сегодня наблюдается поиск решений, проведения большого количества конкурсов, выделения определенных грантов, для нахождения универсального решения по применению квадрокоптеров на складах для процесса инвентаризации и мониторинга. Необходимо отметить что сложности возникают с двух сторон. С одной стороны, каждый склад имеет свои уникальные особенности, определенные конструктивные требования, которые необходимо учитывать при интеграции квадрокоптера. С другой стороны, квадрокоптер, как техническая система, требует создания системы навигации внутри склада, требует выполнения мер безопасности, должен решать задачу, как в автономном режиме, так и в режиме ручного пилотирования. Необходимо оценивать направления воздушных потоков, высоту потолков, количество ярусов у стеллажей и других активных элементов и преград. Необходимо соблюдение правил обеспечения безопасности при выполнении полетов. Помимо этого, на складе необходимо наличие персонала, которые могут работать, пилотировать, решать задачи автономного управления и поддерживать в работоспособности беспилотную авиационную систему. При этом производители квадрокоптеров часто представляют законченное решение, которое невозможно перенастроить для операционных задач и крайне трудно адаптировать дрон к системе навигации, которая необходима именно на выбранном складе. Отсюда возникает сложность разработки некоторого универсального решения. Рассмотрим основные технологические операции работы склада (рис. 2).

На рис. 1 представлена схема технологического процесса по приему товара. Видно, что операции инвентаризации, операционного учета и в последствии мониторинга размещения внутри склада очень важны. Помимо этого, необходимо решение задачи оптимизации маршрутизации как при размещении продукции на стеллажах, так и при обратном процессе комплектации заказов.

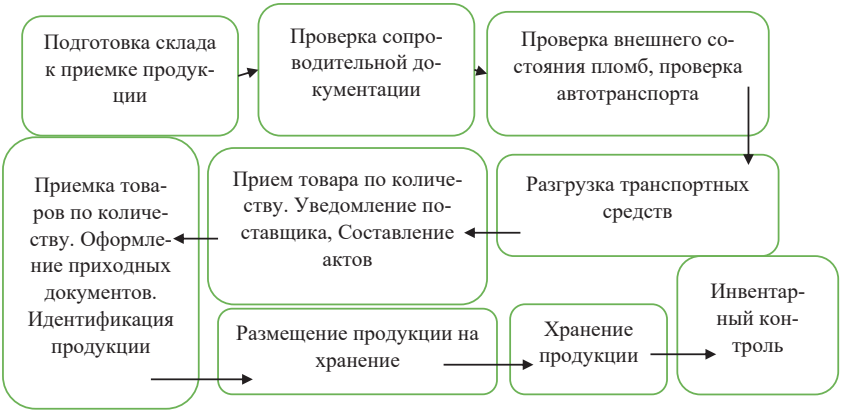


Рис. 2. Основные технологические процессы работы склада

При выполнении инвентаризации выполняются следующие правила:

– происходит назначение инвентаризационной комиссии;

– производится приостановка отгрузки и приемки товаров;

– выполняется подготовка инвентаризационных ведомостей с данным о товарах (наименование, артикул, количество, адрес хранения);

– производится сверка действительного наличия товара и наличия по ведомости;

– при выявлении несоответствия или брака – выставление паллеты для пересчета товара;

– частичную инвентаризацию можно проводить при выявлении несоответствия учетных данных, без остановки складских процессов.

Практическое исследование задание инвентаризации

Для исследования задачи идентификации груза на складе с использованием квадрокоптера было решено построить техническое устройство, способное в автономном полете реализовывать идентификацию тары по QR-коду. Данный вид идентификации был выбран для исследовательских целей ввиду его надежности и простоты эксплуатации, с возможностью дальнейшего перехода на радиочастотную идентификацию.

Участок склада был построен в исследовательском летном поле лаборатории беспилотных авиационных систем инженерной школы ГУАП. Данная лаборатория была открыта в ГУАП в сентябре 2020 года. Квадрокоптерами, на которых проводилось исследование, являются квадрокоптеры «Клевер» компании ООО «Коптер экспресс» модификации COEX Клевер 4 Code. Особенностью квадрокоптеров Клевер (рис. 3) является то, что он представляет собой учебный конструктор программируемого квадрокоптера, который можно при-

менять для решения различных задач: перенос груза, FPV-пилотирование, автономное пилотирование.

Рис. 3. Квадрокоптер Клевер 4

Идентификация перемещения квадрокоптера выполнена на основе идентификации в полетном поле по Aruco-маркерам [8], [9], [10]. Сегодня Aruco-маркеры – популярная технология для позиционирования роботехнических систем с использованием компьютерного зрения. Эта технология представляет собой квадратный маркер, состоящий из широкой черной границы и внутренней двоичной матрицы, в которой зашифрован идентификатор (id) [11], [12], [13]. Черная граница маркера ускоряет обнаружение при помощи машинного зрения, а двоичная кодификация позволяет идентифицировать маркер. Размер маркера определяется размером внутренней матрицы. Также основное преимущество этих маркеров состоит в том, что один маркер обеспечивает достаточное количество информации (четыре угла распознаваемой матрицы, угол наклона и поворота матрицы) для получения позиции камеры квадрокоптера в пространстве. Aruco-маркеры имеют различные варианты размещения в помещении. Благодаря универсальности их можно располагать на полу, стенах, потолке, тем самым обеспечивать целевые установки и мобильность выполнения задач.

В исследовательском летном поле были размещены три стеллажа и 16 коробок, расположенных в случайном порядке. Практическая реализация представлена на рис. 4.

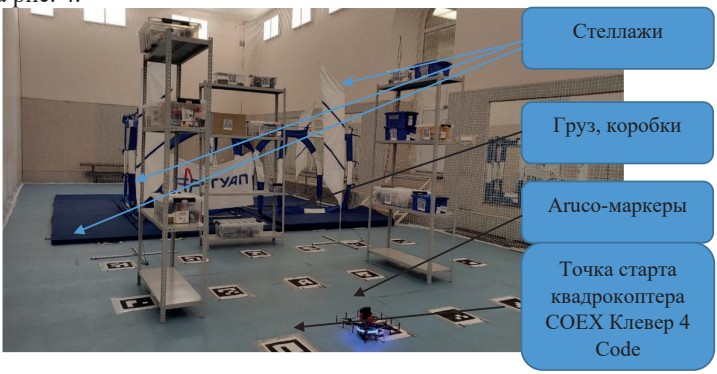


Рис. 4. Построение участка склада в исследовательском летном поле, размещение Aruco-маркеров, стеллажей и грузов

В исследовательском летном поле были реализованы полетные задания. Для решения задачи был написан программированный код для автономного полета коптера и идентификации грузов при помощи машинного зрения и дополнительной камеры, установленной на квадрокоптере. В ходе экспериментов производилась смена расположения грузов на полках стеллажей и выполнялись различные варианты полетов. Полет квадрокоптера COEX Клевер 4 Code представлен на рис. 5.

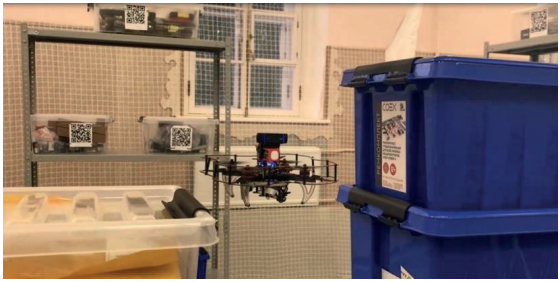


Рис. 5. Выполнение автономного полетного задания по инвентаризации на складе в исследовательском летном поле

Результаты идентификации и процесса обнаружения объектов представлен на рис. 6.

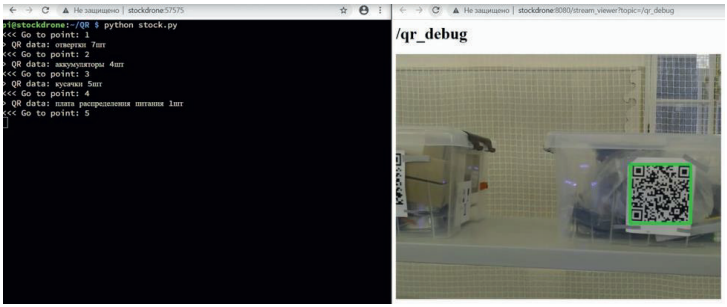


Рис. 6. Результаты идентификации и учета складских запасав с помощью квадрокоптера

Заключение

Задача инвентаризации, учета нахождения оборудования крайне актуальная для складской сферы. Ввиду изменений в цепях поставок и увеличения интернет продаж, в том числе и по причине Covid-19, руководители складов стремятся внедрять новые технологии, которые позволяли бы более оперативно и качественно решать данные задачи. В статье представлены основные технологические процессы на складе и обосновано внедрение решений на основе ис-

пользования беспилотных авиационных систем. Доказана эффективность и большая гибкость беспилотных авиационных систем по сравнению с классическим складским оборудованием. Представлено решение задачи о поиске кратчайшего маршрута между двумя полетными точками, между двумя уровнями стеллажа на складе. На основании проведенного исследования были предложены вариант организации маршрутов полетных заданий для задач инвентаризации и представлено формирование условий выполнения полетов на основе теории графов. Эксперименты проводились в исследовательском летном поле лаборатории беспилотных авиационных систем ГУАП с помощью квадрокоптера COEX Клевер 4 Code. Для решения задачи были составлены программные коды автономного полета и проводилась серия экспериментов при различном расположении как стеллажей, так грузов на них. Результаты эксперимента показали высокую практическую эффективность и доказали правильность представленных моделей и методов.

Библиографический список

1. *Костин А. С., Богатов Н. В.* Вопросы современного развития рынка беспилотных летательных аппаратов // Системный анализ и логистика. 2019. № 4 (22). С. 65–72.

2. *Костин А. С., Майоров Н. Н.* Анализ пассажиропотока остановок городского транспорта на основе использования беспилотных авиационных систем // Организация и безопасность дорожного движения: материалы XIII Национальной научно-практической конференции с международным участием (Тюмень, 19 марта 2020 г.). Тюмень: ТИУ, 2020. С. 367–371.

3. *Лукинский В. С., Лукинский В. В., Плетнева Н. Г.* Логистика и управление цепями поставок: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2016. 359 с.

4. Логистика промышленного предприятия: учебное пособие / П. П. Крылатков, Е. Ю. Кузнецова, Г. Г. Кожушко, Т. А. Минеева. Екатеринбург, 2016. 176 с.

5. *Прокушев Л. А.* Дискретная математика. СПб.: ГУАП, 2000. 80 с.

6. *Фетисов В. А., Майоров Н. Н.* Системный анализ. СПб.: ГУАП, 2016. 137 с.

7. *Фетисов В. А., Майоров Н. Н.* Практические задачи моделирования транспортных систем // СПб.: ГУАП, 2012. 185 с.

8. ООО «Коптер экспресс». COEX. URL: https://ru.coex.tech/ (дата обращения: 01.11.2020).

9. Генератор Aruco-маркеров // ArUco markers generator. URL: https://chev.me/arucogen/ (дата обращения: 01.09.2020).

10. *Kim J., Kang M., Park S.* Accurate Modeling and Robust Hovering Control for a Quad-rotor VTOL Aircraft // Intell. Robotics Syst. 2010. Vol. 57. N 1–4. P. 9–26.

11. *Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Мальцев А. С.* Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории // Автометрия. 2012. № 5. С. 32–41.

12. *Engel J., Sturm J., Cremers D*. Accurate Figure Flying with a Quadrocopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing // Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012. P. 43–48.

13. *Hoffmann G., Haomiao H., Wasland S.* Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment // Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Hilton Head, South Carolina, 2007.

УДК 658.511

Е. А. Вознесенский*
магистр, лаборант
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА

Рассмотрена одна из основных областей развития рынка Аэронет, раскрыта одна из существующих проблем в применении беспилотных летательных аппаратов. В рамках решения проблемы автономности БПЛА, были предложены методы подзарядки, рассмотрены их отличительные особенности и сделаны выводы о возможности их применения, отобран метод беспроводного заряда квадрокоптера, исследована теоретическая часть вопроса и разработана стратегия реализации концепта для дальнейшего практического применения.
Ключевые слова: квадрокоптер, беспроводная зарядка, базовая станция.

E. A. Voznesenskii*
Master, Laboratory Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

AUTOMATED BATTERY CHARGING SYSTEM FOR MULTI-ROTOR AERIAL VEHICLES

One of the main areas of development of the Aeronet market is considered, one of the existing problems in the use of unmanned aerial vehicles is revealed. Within the framework of solving the problem of UAV autonomy, charging methods were proposed, their distinctive features were considered and conclusions were drawn about the possibility of their application, the method of wireless charging of the quadcopter was selected, the theoretical part of the issue was investigated and a strategy for implementing the concept for further practical application was developed.
Keywords: quadcopter, wireless charging, base station.

Введение

В течение последних нескольких лет беспилотные летательные аппараты (БПЛА), в частности винтокрылые мультироторные дроны, использовались во многих различных областях применения в промышленности и вооруженных силах, для наблюдения, технического обслуживания, транспортировки, доставки и поисково-спасательных задач [1].

Аэронет (рынок беспилотных авиационно-космических систем, комплексных решений и услуг на их основе) – многообещающий, в настоящее время все еще развивающийся глобальный сетевой рынок информационных, логистических и других услуг, предоставляемых парком постоянно находящихся в воздухе и на низких орбитах БПЛА координируемых с помощью информационных технологий [2].

В рамках развития области беспилотных авиационных систем существуют различные направления развития беспилотных авиационных систем, в частности применение новых материалов (материалы легче воздуха, более совершенные

композиты и т. п.) и источников тока (новые типы аккумуляторов, электрохимических источников тока и т. п.). Облегчение конструкции и увеличение мощности беспилотных летательных аппаратов значительно расширит спектр задач для их применения за счет увеличения дальности полета и удельной грузоподъемности. На текущий момент времени, истощение бортового источника питания является наиболее существенным ограничением в длительном непрерывном выполнении задач любого летательного аппарата. Высокое потребление тока двигателями, для которых требуются аккумуляторы большой емкости, которые часто бывают тяжелыми, препятствует длительной работе, что приводит к сокращению времени полета БПЛА. Полет квадрокоптера ограничен всего несколькими минутами даже при полностью заряженной батарее. Любая другая полезная нагрузка, нужная для выполнения различных практических задач, еще больше сократит время полета. Следовательно, существует очевидная необходимость часто заряжать батарею квадрокоптера для длительной работы.

Методы исследования

В рамках разработки базовой зарядной станции необходимо рассмотреть существующие методы зарядки аккумуляторных батарей и выделить их основные черты. После рассмотрения методов зарядки аккумуляторов будет выбран основной метод и будет исследована теоретическая часть концепта, установлена стратегия разработки устройства для зарядки с целью практической реализации и в дальнейшем применения в реальных условиях.

Анализ

Обычно процесс перезарядки включает прямое вмешательство человека, что мотивирует разработку автономной системы заряда аккумулятора, которая приведет к бесперебойному выполнению поставленной полетной задачи. Решить данную задачу может базовая станция. Ниже рассмотрим основные концепции базовых станций.

Проводная зарядная станция

Сама станция представляет собой большую контактную площадку, на которую приземляется дрон. Специальная система с контактными ножками на конце устанавливается снаружи квадрокоптера или монтируется непосредственно в корпус. Когда коптер находится на платформе, два контакта физически касаются поверхности зарядной платформы, устанавливая электрическое соединение от зарядной станции к батарее БПЛА.

На рынке представлены несколько компаний с данным решением, но наиболее интересным вариантом является берлинская компания Skysense [3]. Автономная зарядная станция была разработана как готовое решение, работающее «из коробки».

Платформа защищена от атмосферных воздействий, дополнительная полезная нагрузка на дрон имеет массу всего 45 грамм. Флагманское решение компании имеет мощность 500 Вт с коэффициентом КПД 92 %.

Таблица 1

Достоинства и недостатки проводной зарядной станции

Достоинства	Недостатки
- Простота конструкции - Большой КПД и быстрота зарядки - Относительная дешевизна производства - Универсальность	- Контакты могут окислиться или замкнуть под воздействием внешней среды - Устойчивость к погодным условиям добивается установкой защитного контейнера, но это усложнит конструкцию и увеличит цену производства - В большинстве проектов необходима очень точная посадка на платформу для соприкосновения контактов

Станция с механизированной заменой аккумуляторов

Центральным элементом системы является авиабаза, которая служит в качестве взлетно-посадочной площадки и заправочной станции. Завершив выполнение задачи беспилотник снижается, и роботизированная рука заменяет отработавший батарейный модуль на свежий. В случае изменения заданий между рейсами, механизм способен также заменять и полезную нагрузку квадрокоптера [4].

Таблица 2

Достоинства и недостатки станции с механизированной заменой аккумуляторов

Достоинства	Недостатки
- Минимальная пауза в выполнении задачи, буквально через минуту после посадки коптер готов продолжать полетную миссию - Станция может защищать БПЛА от внешних воздействий	- Инженерная сложность конструкции - Дороговизна - Отсутствие универсальности, подходит только для специально разработанного дрона - Сомнительная надежность

Наземная станция беспроводной зарядки дрона

Беспроводная передача энергии – это передача электрической энергии без проводов по воздуху. Такая система в основном состоит из двух катушек, передающих энергию через колеблющееся магнитное поле. На стороне передатчика от блока питания постоянный ток преобразуется в высокочастотный переменный. Переменный ток питает медную проволочную катушку, которая генерирует магнитное поле. Как только приемная катушка помещается в непосредственной близости от магнитного поля в приемной катушке возникает переменный ток. Затем он преобразуется обратно в постоянный для дальнейшего использование дроном.

Таблица 3

Достоинства и недостатки наземной станции беспроводной зарядки

Достоинства	Недостатки
- Беспроводная технология - Нет необходимости в сверхточной системе позиционирования - Устойчивость к погодным условиям - Универсальность - Надежность - Простота изготовления - Относительная дешевизна - Возможность заряжать несколько дронов на одной платформе - Приемлемый КПД (~80 %)	- Нужно достаточно близкое расположение передатчика с приемником энергии

Существуют и другие концепции решения данной задачи, такие как: «Лазерная зарядка БПЛА в полете» [5], «“Летающие” батареи для квадрокоптеров» [6] и другие. Но в данной статья были взяты для наглядного анализа самые эффективные и перспективные идеи на мой взгляд. Также необходимо отметить, что для каждого из рассмотренных типов необходимо реализовать алгоритм точной автономной посадки, поэтому этот пункт не был добавлен к индивидуальным недостаткам концепций.

В рамках выполненного анализа можно сделать вывод о том, что беспроводной метод зарядка аккумулятора является наиболее перспективным, хотя и имеет ряд недостатков. Ниже рассмотрена принципиальная схема работы беспроводной зарядки для дрона.

Теоретическая часть

Беспроводная передача энергии (с англ. wireless power transfer, WPT) – это технология передачи электрической энергии без проводов через воздушный зазор. Резонансная индуктивная передача энергии – это форма индуктивной связи, в которой мощность передается магнитными полями между двумя резонансными контурами, передатчиком и приемником. Беспроводная система передачи энергии в основном состоит из двух катушек, передающих энергию через колеблющееся магнитное поле. Для достижения этой цели источник питания постоянного тока (DC) преобразуется в высокочастотный переменный ток (AC) с помощью специально разработанной электроники, встроенной на стороне передатчика. Переменный ток питает медную проволочную катушку, которая генерирует магнитное поле. Как только приемная катушка помещается в непосредственной близости от магнитного поля передающей катушки, это поле индуцирует переменный ток в приемной катушке. Затем полученный переменный ток преобразуется обратно в постоянный ток для дальнейшего применения потребителем. Рис. 1 описывает концепцию WPT.

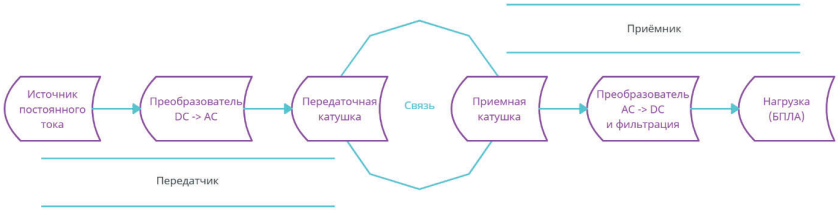


Рис. 1. Типовая структурная схема для беспроводной передачи энергии

Нерезонансные связанные катушки индуктивности, такие как типичные трансформаторы, нуждаются в магнитном сердечнике и требуют, чтобы магнитное поле было покрыто вторичным проводом в достаточно коротком радиусе. Большие расстояния и резистивные потери делают нерезонансную индукционную систему крайне неэффективной, что может быть улучшено за счет использования резонансной индукции катушек. Для резонансной связи используется LC-контур, состоящий из индуктора (катушки) и конденсатора на передающей и приемной сторонах, резонирующих на одной частоте, что обеспечивает значительную передачу мощности между катушками в диапазоне, в несколько раз превышающем диаметры катушек при разумном КПД. Основной резонансный контур, используемый для резонансной связи и передачи энергии с использованием источника переменного тока показан на рис. 2.

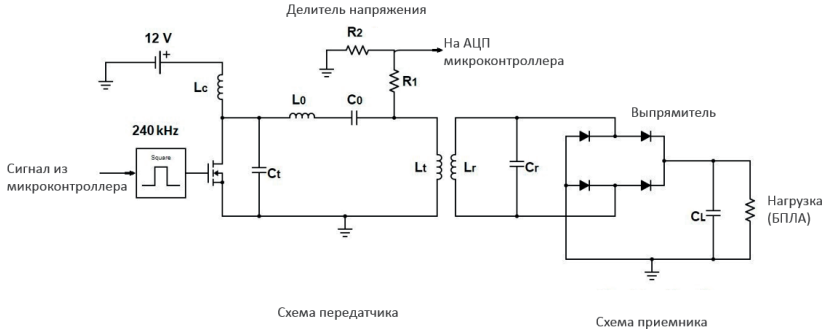


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема для беспроводной передачи энергии

Для тестирования зарядки беспилотного летательного аппарата в платформе беспроводной зарядки можно использовать модули на базе микросхемы XKT-510 от ElecFreaks [7]. XKT-510 имеет широкий диапазон напряжения 3–15 В постоянного тока на передающей стороне. Максимальный номинальный ток при пиковой эффективности 1 модуля составляет 0,8А. Максимальная выходная мощность беспроводной передачи составляет 10 Вт. Внешний и внутренний диаметр катушек передатчика/приемника составляет

22 мм и 10 мм соответственно, а индуктивность 20 мкГн. Диапазон рабочих температур находится в диапазоне от -55 до +125 °С, что подходит для внешней окружающей среды. На рис. 3 и 4 представлена принципиальная схема приемника и передатчика [7].

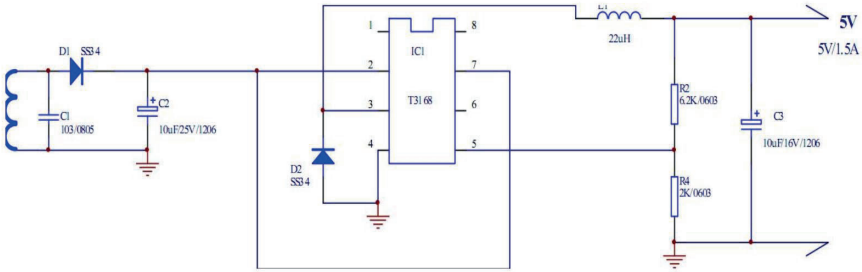


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема приемника беспроводной зарядки

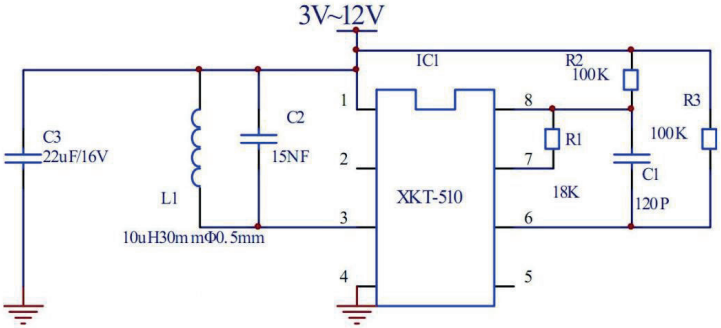


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема передатчика беспроводной зарядки

Практическая часть

Станция беспроводной зарядки состоит из защитной посадочной платформы с электроникой беспроводной зарядки внутри. К станции подведен источник постоянного тока или подключен аккумулятор большой емкости. Для увеличения мощности передаваемой энергии, а также площади распространения магнитного поля от передающей части с приемлемым КПД, можно использовать несколько рядом расположенных передающих модулей на базе микросхемы XKT-510. Катушки передатчика крепятся к посадочной платформе, на которой также располагается ArUco-маркер, или любой другой цветной маркер для возможности реализации алгоритма точного позиционирования и посадки мультиротора на платформу.

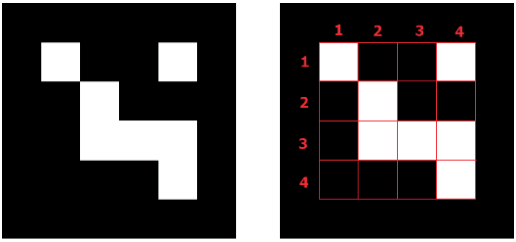


Рис. 5. ArUco-маркер для позиционирования квадрокоптера

Квадрокоптер также модифицируется и снабжается быстросъемным принимающим WPT модулем. В нижней части корпуса устанавливаются последовательно или параллельно включенные катушки приемника беспроводной зарядки. Весь приемный модуль со встроенными выпрямительными подсхемами и платой балансной зарядки защищается и изолируется, устанавливается снизу корпуса дрона. Плата балансного заряда (BMS) преобразует выходной ток приемных цепей так, чтобы он соответствовал протоколу зарядки CCCV (Constant Current – Constant Voltage) (в зависимости от количества ячеек заряжаемого аккумулятора 3S или 4S) с помощью DC/DC преобразователя напряжения. Далее балансирующая плата непосредственно подключается к балансному разъему аккумулятора дрона. Когда дрон приземляется на станцию беспроводной зарядки, балансировочное зарядное устройство получает питание от бортовой системы беспроводной зарядки и начинает заряжать аккумулятор. В то же время полетный контроллер отслеживает напряжение батареи, доступ к которому можно получить с удаленного компьютера. Также автоматизированная зарядная станция может быть оборудована необходимыми датчиками и центральным компьютером, который может иметь связь с управляющим сервером. Центральный компьютер может принимать команды от сервера, обрабатывать все данные с датчиков (например, термометры, вольтметры и т. д.) и управлять процессом заряда, отправлять телеметрию станции и беспилотника на сервер оператору.

Также для реализации системы зарядки дрона, которая не требует вмешательства человека, необходимо автоматически направлять дрон прямо к зарядной станции и управлять им таким образом, чтобы приземляться точно на зарядную платформу в правильном положении и ориентации. Для достижения этой цели нужно объединить систему GPS позиционирования и алгоритмы, основанные на компьютерном зрении. Поскольку GPS-модуль имеет значимую в данной задаче погрешность, изначальная навигация по направлению к зарядной платформе недостаточно точна, чтобы точно посадить беспилотник на зарядную платформу. Для этого можно использовать цветной, инфракрасный или ArUco маркер на посадочной платформе зарядной станции. Как только беспилотник обнаруживает местоположение маркера, алгоритм управления точной посадкой начинает позиционировать беспилотник в центр над маркером, повторяя настройку местоположения беспилотника. Регулировка положения про-

должается до тех пор, пока беспилотник не достигнет центра прямо над маркером или не произойдет ошибка по времени выполнения выравнивания.

Выводы

В данной статье предложена автоматизированная беспроводная система зарядки малых мультироторных БПЛА для реализации продолжительных полетных миссий. Создание инфраструктуры беспроводной зарядки в сфере выполнения задач мультикоптерами может обеспечить возможность непрерывного выполнения полетных миссий без какого-либо вмешательства человека. Беспроводная зарядка позволяет беспилотникам заряжаться автономно во время полета к месту назначения, тем самым продолжая полет после подзарядки без какого-либо внешнего прерывания.

Интеграция беспроводной зарядной системы в беспилотные летательные аппараты на открытом воздухе открывает различные направления для исследования. Например, может быть установлена солнечная панель вместе с зарядной станцией, если ее нужно разместить в отдаленном районе. Кроме того, может быть исследован и включен в беспроводную зарядную станцию метод быстрой зарядки Li-po аккумуляторов, что позволит сократить время заряда аккумулятора, тем самым приведя к сокращению общего времени выполнения полетной миссии.

Библиографический список

1. *Махони Р., Кумар В.* Aerial robotics and the quadrotor. IEEE Robot. Autom. Mag. 2012.

2. Тренды развития рынка в России и мире. URL: http://nti-aeronet.ru/rynki/ (дата обращения: 01.04.2021).

3. Контактная зарядная станция. URL: https://www.skysense.co/ (дата обращения: 01.04.2021).

4. Станция с механизированной заменой аккумуляторов. URL: https://www.airoboticsdrones.com/ (дата обращения: 01.04.2021).

5. Лазерная зарядка БПЛА в полете. URL: https://old.sk.ru/news/b/press/archive/2018/12/10/v-rossii-razrabotali-metod-nepreryvnoy-zaryadki-dronov-s-pomoschyu-lazera.aspx (дата обращения: 01.04.2021).

6. “Летающие” батареи для квадрокоптеров. URL: https://arxiv.org/abs/1909.10091 (дата обращения: 01.04.2021).

7. Даташит XKT-510. URL: https://datasheetspdf.com/datasheet/XKT-510.html (дата обращения: 01.04.2021).

УДК 656.183

А. А. Добровольская*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ ОТ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАЗВИТИЯ МИКРОМОБИЛЬНОСТИ И МОДЕРНИЗАЦИИ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В статье рассматривается опыт использования и проектирования велодорожек на основе опыта Финляндии, а также типы расположения велосипедных дорожек и инфраструктурные особенности для мегаполисов. Приводится модель создания велодорожки путем частичного сужения проезжей части, графические функции и аналитическая информация. Приводятся практические примеры применения БПЛА при проектировании велосипедных дорожек.
Ключевые слова: велосипедная дорожка, интенсивность движения, проектирование, проезжая часть, ширина полосы.

A. A. Dobrovolskaya*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

RESEARCH THE APPLICATION OF DATA FROM UNMANNED SYSTEMS FOR THE DEVELOPMENT OF MICROMOBILITY AND MODERNIZATION OF URBAN INFRASTRUCTURE

The article discusses the experience of using and designing bike paths based on the experience of Finland,as well as the types of bike paths and infrastructure features for megacities. A model for creating a bike path by partially narrowing the roadway, graphical functions, and analytical information are provided. Practical examples of the use of UAVs in the design of Bicycle paths are given.
Keywords: bike path, traffic volume, design the roadway, lane width.

Города развиваются с огромной скоростью из-за демографических сдвигов и общего роста населения. Ожидается, что 2030 году число «мегаполисов» увеличится примерно до 43. В связи с этим, создание новых комплексных решений микромобильности является необходимостью. Новый тренд – переход от плоских данных к объемным решениям. Методы получения данных становятся все более совершенными и дешевыми в сравнении с традиционными методами создания векторной информации. Современные технологии позволяют на основе данных аэрофотосъемки, строить реалистичные измеряемые 3D-модели отдельных объектов и целых городских пространств. Эти модели при наличии некоторых инструментов затем можно использовать для решения иных задач. Необходимо разработать цифровые модели на основе БПЛА и приборных комплексов, которые позволяли бы получить динамику городского передвижения.

Микромобильность является одной из главных повесток дня в странах балтийского региона. Согласно исследованию [1] около 60 % автомобильных

поездок по всему миру происходят на дистанции менее 8 км и могли бы извлечь выгоду из решений по микромобильности. Термин «микромобильность» использует переход к миниатюризации транспортных средств для коротких поездок, к таким устройствам можно отнести велосипеды, самокаты, электросамокаты, скейтборды и т. д. Главная задача создания микромобильных решений – это создание комплексных решений, которые позволят транспортной системе городов работать слаженно. Именно поэтому активно развивается велосипедная инфраструктура городов: в повседневную жизнь входят понятия велопрокат и кикшеринг, а количество велосипедных дорог непрерывно растет.

В городах Европы велосипед давно является альтернативой перемещения наравне с общественным транспортом (рис. 1), а инфраструктура значительно более развита.

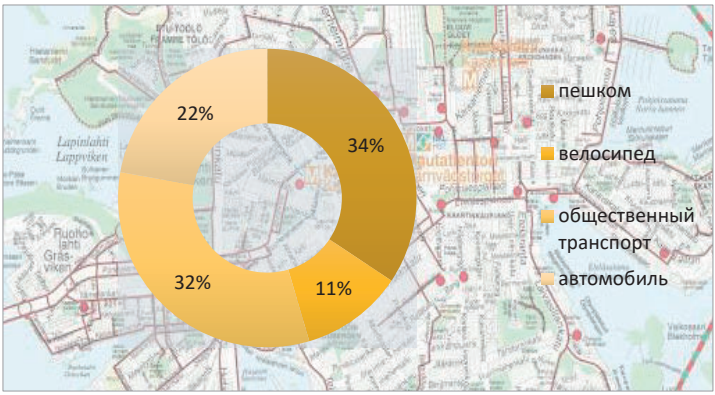


Рис. 1. Распределение перемещений в Хельсинки по различным видам транспорта

В Хельсинки проложено более 1500 км велодорожек. Важным фактором является то, что велодорожки были заложены в городскую среду на этапе проектирования, поэтому, сами они отделены от пешеходной и проезжей зоны для безопасности и удобства передвижения. Однако Хельсинки активно развивается: число резидентов растет с каждым годом, а современные системы кикшеринга набирают все большую популярность. Отсюда так же возникает потребность расширения и модернизации существующей сети велодорожек, для удовлетворения потребностей всех горожан.

В 2017 году в Санкт-Петербурге была определена трасса пяти маршрутов общей протяженностью 39,4 км [2]. В 2018 году протяженность велодорожек составляла уже 106,4 км. Сейчас суммарная протяженность велосипедных дорожек составляет 126,5 км [3], однако на данный момент не является полноценной частью городской транспортной системы (рис. 2). На интерактивной карте [4] можно увидеть, что велосипедные маршруты обрываются или захватывают лишь некоторые участки.

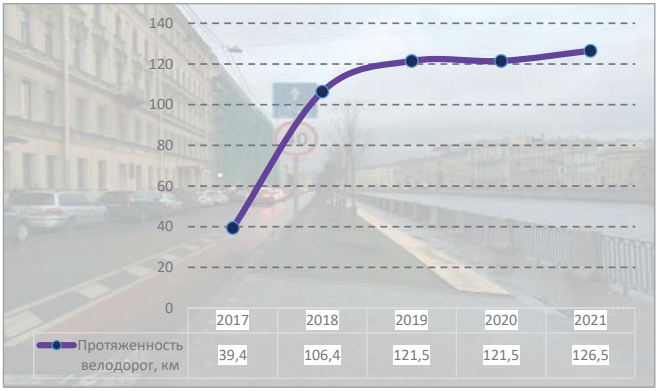


Рис. 2. Протяженность велодорожек в Санкт-Петербурге

Велосипедные дорожки создают разграничение потоков автомобилей, велосипедов и пешеходов, что позволяет предугадывать поведение участников дорожного движения и обеспечивать их безопасность. Главным требованием к устройству велосипедных дорожек при проектировании – обеспечение безопасности движения велосипедистов, а при обустройстве автомобильной дороги велосипедной полосой, не должны ухудшаться условия безопасности дорожного движения и условия использования автомобильной дороги. Для этого дорожки должны оборудоваться соответствующей инфраструктурой: дорожными знаками, разметкой, ограждениями и светофорами, также могут отличаться типом и цветом покрытия.

Этапы проектирования велодорожек

– Сбор исходных данных: организация дорожного движения на существующем участке; интенсивность передвижения пешеходов и автомобилей; геометрические параметры дорог на выбранном участке.

– Разработка предварительного маршрута велосипедной дорожки: выбор пункта отправления и пункта прибытия; выбор предварительного маршрута.

– Разработка окончательного маршрута велодорожки: выбор соответствующего типа расположения велосипедной дорожки при заданных исходных данных; составление окончательного веломаршрута.

– Определение места и параметров размещения элементов инфраструктуры.

В качестве проекта велосипедной дорожки был выбран участок от существующей дорожки на Тихорецком проспекте, поскольку возникающий разрыв велосипедной дороги делает перемещение до парка неудобным и небезопасным. В первую очередь необходимо проанализировать интересующий участок (рис. 3).

Рис. 3. Анализ проектируемого участка: 1, 2 – участки велосипедных дорог; П1 – перекресток 1 (пересечение Тихорецкого пр. и ул. Академика Байкова); П2 – перекресток 2 (пересечение пр. Культуры и Северного пр.); В1, В2, В3 – выезды торгового центра

На данной схеме можно увидеть, что на участке *1* расположена пешеходная и зеленая зона (около 27 м), поэтому данный участок позволяет проектировать наиболее безопасный тип расположения дорожки – отделенный от пешеходной и проезжей части. На участке *2* существует возможность создания дорожки только по проезжей части.

Ширина полосы движения составляет около 3,5 м, ширина велодорожки должна составлять 2 м, а ширина буфера велодорожки 0,5 м [5].

Исходя из зависимости ширины проезжей части от скорости движения [6], при частичном сужении проезжей части, скорость движения автомобилей снижается на 29 %, но находится в пределах безопасной скорости движения в городских условиях.

$$H = 0{,}015V + b + 0{,}3, \qquad (1)$$

где b – ширина автомобиля, м; V – скорость движения автомобиля, км/ч; 0,3 – дополнительный зазор, м.

Таким образом, при заданных исходных данных был выбран окончательный маршрут велодорожки А-Б (рис. 3). Следующим этапом является определение параметров размещения дополнительной инфраструктуры [7]:

Рис. 4. Дорожная разметка

– разметка места пересечения проезжей части (1) на пресечениях ул. Академика Байкова и Тихорецкого пр., Тихорецкого и Северного пр., а также выездах из торгового центра В1, В2 и В3 (рис. 4);

– обозначение велосипедной дорожки на всех участках движения (2);

– обозначение буферной зоны на участке автомобильной дороги (3);

– установка дорожных знаков типов 4.4.1 на пересечении улицы Академика Байкова и знаков типов 5.11.2 и 5.12.2 на участке автомобильной дороги.

Рассмотрим возможность применения беспилотных летательных аппаратов на каждом этапе проектирования.

В России появляются положительные примеры использования 3D-моделей, прежде всего, в сфере градостроительства. Ортофотопланы используются в качестве базовых слоев информационной системы обеспечения градостроительной деятельности, что позволяет выполнять мониторинг строительства. Геодезическая точность и высокое разрешение результатов съемки позволяют определять объемы насыпей и выемок, величины площадей без необходимости выполнения большого объема дорогостоящих геодезических работ. БПЛА может близко подлететь к интересующему строителей участку объекта строительства или выполнять ежедневную съемку в автоматическом режиме. Полученный набор снимков легко преобразовать в 3D-модель, позволяющую наглядно фиксировать все происходящие изменения [8].

Технология аэрофотосъемки на основе БПЛА состоит из следующих этапов [9]:

– подготовительные работы: сбор и систематизация имеющихся материалов; формирование требований к материалам, которые необходимо получить по результатам съемки;

– аэрофотосъемка: формирование полетного задания для БПЛА (выполняется программой – планировщиком полета, входящей в состав комплекса. Оператор должен выбрать используемый комплекс БПЛА, задать на карте контур участка съемки и примерное положение стартовой площадки, установить требуемое разрешение и перекрытие, после чего программа рассчитывает план полета и проверяет его выполнимость); аэрофотосъемка (включает в себя уточнение положения стартовой площадки запуска БПЛА для аэрофотосъемки; уточнение плана полета; запуск и выполнение съемки в автоматическом режиме);

– обработка полученных данных: снятие данных (фотоснимки и журнал полета) с фотокамеры; визуальная оценка качества фотографий и сортировка снимков; фотограмметрическая обработка полученных снимков (получение цифровой модели рельефа, ортофотоплана); составление цифровой модели местности.

Таким образом, в работе установлено, что сужение полос движения автомобилей на проектируемом участке позволяет проектировать дополнительную велосипедную полосу без помех для транспорта, однако необходим более глубокий анализ интересующего участка, для получения действительной информации об интенсивности движения на заданном участке дороги, геометриче-

ских параметров и состоянии дороги. Преимущество создания цифровой модели – высокая точность информации о геометрических параметрах интересующего участка и текущем состоянии дороги. Поскольку спутниковые данные не обладают высоким разрешением, для анализа необходимо проводить натурные обследования, применение аэрофотосъемки намного упрощает этап сбора исходных данных. Помимо этого, на модели можно отработать различные варианты маршрутов перемещения велосипедистов и выбрать наиболее оптимальный конечный маршрут. Наличие точных исходных данных на цифровой модели позволяет определить расположение велодорожки и параметров размещения элементов дополнительной инфраструктуры, учитывая состояние участка проектирования.

Библиографический список

1. 5 вещей, которые вы должны знать о микромобильности. URL: https://seat-avto.ru/5–veshhej-kotorye-vy-dolzhny-znat-o- mikromobilnosti.html (дата обращения: 31.03.21).

2. Строительство велосипедных дорожек. URL: https://krti.gov.spb.ru/velo/stroitelstvo-velosipednyh-dorozhek/ (дата обращения: 31.03.21).

3. СПб ГКУ «Городской центр управления парковками Санкт-Петербурга». URL: http://gcup.spb.ru/velodorozhki/marshruty-velodorozhek/ (дата обращения: 31.03.21).

4. Интерактивная карта велосипедных дорожек. URL: https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg/?ll=30.433072 %2C59.912538&mode=usermaps&source=constructorLink&um=constructor %3Ah92gLBwOylwuQhhC7bb9pT9QO0B6VhNG&z=10 (дата обращения: 31.03.21).

5. ГОСТ 33150-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование пешеходных и велосипедных дорожек. Общие требования. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200123908 (дата обращения: 31.03.21).

6. *Майоров Н. Н., Фетисов В. А.* Моделирование транспортных процессов. СПб.: ГУАП, 2011. 165 с.

7. ГОСТ Р 51256-2011. Технические средства организации дорожного движения. Разметка дорожная. Классификация. Технические требования. URL: http://docs.cntd.ru/document/gost-r-51256–2011 (дата обращения: 31.03.21).

8. Применение БПЛА. URL: http://skvot.2035.university/primenenie-bpla-dlya-upravleniya-gorodskoj-sredoj (дата обращения: 31.03.21).

9. Создание топокарт и планов по данным БПЛА. URL: https://gisinfo.ru/techno/photoscan.htm (дата обращения: 31.03.21).

УДК 614.8 (575.2-7); 004.056.55

К. В. Епифанцев*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СЕЙСМОДАТЧИКОВ В ПРОЦЕССЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ИХ КАЛИБРОВКИ

В данной статье рассмотрены начальные, текущие и результирующие факторы, сопровождающие любой оползневый процесс, а также приборы для мониторинга и предотвращения подобных событий. На основе исследований в области разработки сейсмодатчиков исследован вопрос возможных векторов развития отечественных сейсмографов и возникающих в результате этого проблем калибровки. В статье подчеркивается важность изоляции сейсмодатчиков от внутренних шумов, которые для приборов данного вида имеют наиболее критическое значение.
Ключевые слова: сейсмодатчики, проблемы калибровки, мониторинг оползней, погрешности при проведении процедуры калибровки.

K. V. Epifantsev*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

REVIEW OF THE USE OF DOMESTIC SEISMIC SENSORS IN THE PROCESS AND STUDY OF THE PROBLEMS OF THEIR CALIBRATION

This article discusses the initial, current and resulting factors that accompany any landslide process, as well as devices for monitoring and preventing such events. On the basis of research in the field of development of seismic sensors, the question of possible vectors of development of domestic seismographs and the resulting calibration problems is investigated. The article emphasizes the importance of isolating seismic sensors from internal noise, which is of the most critical importance for such devices.
Keywords: seismic sensors, calibration problems, landslide monitoring, errors during the calibration procedure.

Исследование систем движения горных пород актуально по причине неустойчивости стратиграфической колонки пластов ввиду обширной деятельности на территории РФ по добыче полезных ископаемых открытым и закрытым способом и интенсификацией применения буровзрывных способов для добычи полезных ископаемых. Кроме того, глобальное потепление, которое в последнее время представляет реальную угрозу устойчивости зданий и сооружений, построенных в горных районах нашего государства. Для анализа формирования предпосылок землетрясения или оползня используются специальные сейсмодатчки, в комплексе объединяемые в сейсмографы, позволяющие проводить контроль текущей ситуации. Важно подчеркнуть, что исследуемый в статье вид оборудования может быть также применен в области строительного мониторинга мостов и сооружений в сейсмоустойчивых районах местности. Однако

мосты и высотные здания в современном мире имеют крайне высокую актуальность в связи с освоением новых территорий, густозаселенностью местности, в том числе в районах где горных работ никогда не велось и колебаний никогда не наблюдалось. В процессе анализа систем сейсмодатчиков были выявлены проблемы, приводыящие к помехам в системе работы датчиков из-за наличия видрации и шумов, возникающих внутри оборудования.

Механизм формирования оползня запускается чаще всего в глубине пластов горных пород и их переходов, одного в другой (описанная в классификации Е. П. Емельяновой или Г. И. Тер-Степаняном) [1], [2] под воздействием гравитационных объемных сил, сейсмических сил, фильтрационного давления, техногенной нагрузки. Г. И. Тер-Степанян подчеркивает, что важнейшими элементами механизма являются напряжения, деформации и время. Однако при наличии угрозы последнего необходимо устранить деформирующее – выдавливающую силу (например: создающие давление грунтовые воды). Для снижения оползневой опасности и более равномерного распределения нагрузок в пластах хорошим вариантом будет использование сооружений на винтовых или трубчатых сваях с установленным внутри сейсмографом и тензометрическими датчиками, однако в связи с долгим процессом эксплуатации здания доступ к подобным датчикам будет ограничен.

Трубчатые сваи могут прокладываться на большую глубину, чем винтовые. Также на подобные сваи легче монтировать сейсмографы и тензометрические линии [1]. В качестве мониторинга оползней также важно упомянуть использование воздушного лазерного сканирования для мониторинга возможно в качестве топографо-геодезической технологии [3].

Однако установка сейсмографа внутри сваи – дорогостоящая процедура, которая в основном может применяться только при строительстве уникальных зданий и сооружений. Для подобных регистраторов применяется дорогостоящее оборудование. Рассмотрим отечественное оборудование, применяемое для оценки сейсмоустойчивости зданий и сооружений.

Важно отметить, что в процессе разработки датчиков для анализа виброустойчивости зданий и сооружений советские ученые добились отличных результатов.

Особенно хотим отметить, что в начале 1970-х годов в Ереване были проведены серии натурных экспериментальных исследований по определению периодов и форм колебаний ряда зданий повышенной этажности с различными конструктивными схемами под руководством Э. Е. Хачияна, с участием В. А. Закаряна. В результате этих экспериментов были определены периоды 41 каркасного жилого здания, 20 каркасных общественных зданий и 17 комплексных и блочнокаркасных жилых зданий с различными конструктивными схемами [4]. Авторами исследования [4] были проведены исследования в Армении, при использовании сейсмодатчиков СМ-3, созданной Национальной академией наук Армении (рис. 1). Испытания проводились спустя 50 лет после исследования аналогичных зданий под руководством Э. Е. Хачияна. Данные были следующими: фактические значения периодов соб-

ственных колебаний здания по сравнению со старыми значениям Хачияна возросли в поперечном направлении (X) на 6–7 %; в продольном направлении (Y) – на 10,5–11 %. Поскольку значение периодов превышает более чем на 10 % значение старого измерения, нужно подчеркнуть важность увеличения точности измерений и созданий мер превентивной борьбы с погрешностями.

Рис. 1. Сейсмодатчик, созданный в НАН Армении

В настоящее время производители сейсмостанций предлагают большое количество вариантов приборов для анализа сейсмологической обстановки, каждый раз внедряя все более точные системы учета изменений колебаний.

Одна из разработчиков системы датчиков – компания ZETLAB постоянно наращивает потенциал производства тензодатчиков (табл. 1).

Важным процессом наряду с созданием современных датчиков сейсморазведки является также развитие систем поверки и калибровки данных датчиков – это особенно важно, так как данные приборы находятся под постоянным воздействием вибрации, а значит, имеют наибольший риск со временем наложения погрешности на результаты измерения.

Для сейсмоприемников основными параметрами, определяемыми при поверке, являются действительное значение коэффициента преобразования на базовой частоте, неравномерность АЧХ и нелинейность АХ. При определении неравномерности АЧХ проводят измерение коэффициента преобразования датчика в нескольких точках частотного диапазона, при определении нелинейности АХ – в нескольких точках амплитудного диапазона. Таким образом, основным действием при поверке является определение коэффициента преобразования, который рассчитывается как отношение напряжения на выходе сейсмоприемника к воздействующему на него ускорению (1):

$$K = \frac{U}{A}, \qquad (1.1)$$

где K – коэффициент преобразования сейсмоприемника [мВ/ (м·с$^{-2}$)]; U – напряжение на выходе сейсмоприемника [мВ]; A – ускорение, воздействующее на сейсмоприемник [м/с^2].

Таблица 1

Тензодатчики компании ZETLAB

Вид сейсмографа	Сейсмограф ZET 7152–N VER.3	Сейсмограф ZET 7156 VER.2	Сейсмостанция ZET 048–I
Фото			
Характеристики	Основные преимущества: широкий динамический диапазон – 176 дБ, за счет использования двух датчиков, работающих в разных частотных и амплитудных диапазонах для возможности точного одновременного измерения как слабых (например, определение дальних землетрясений), так и сильных сигналов (расчет бальности по шкале MSK-64)	Используется для: -изучение массивов пород вблизи горных выработок; -мониторинг собственной частоты колебаний строительных объектов повышенной взрывоопасности; -пассивная сейсморазведка; -компактное взрывозащищенное исполнение	Регистратор сейсмический цифровой ZET 048–I в индустриальном исполнении предназначен для измерений и регистрации сигналов с сейсмоприемников. Регистраторы могут применяться автономно или в составе систем для проведения сейсмических и сейсмологических исследований, работ на суше и со льда методами преломленных, отраженных волн и глубоководного сеймозондирования

Важным элементом поверки датчиков является контроль ускорения *A*.

При определении параметров виброизмерительных преобразователей, как правило, применяется относительный метод измерений, при котором в качестве эталона применен акселерометр, устанавливаемый с датчиком на одной оси. Таким образом, на датчики воздействует идентичное ускорение, и показания акселерометра применяются для определения коэффициента преобразования поверяемого датчика по формуле (1).

Рекомендуемый уровень виброускорения при проведении виброиспытаний относительным методом согласно ГОСТ Р 8.669-2009 [7] должен составлять не менее 10 м/с^2 [2]. В частности, по проблемам развития системы сейсмодатчиков, необходимо указать исследование [6], в котором подчеркивается что датчики оценки сейсмической активности должны оцениваться по нескольким параметрам, в частности – по общей работоспособности, полосе рабочих частот, уровню шумов во всей частотной полосе, неидентичности каналов, чувствительности к метеорологическим помехам. Погрешности в подобных датчиках возникают по причине работы значительного количества дополнительных элементов, усложняющих метрологическое обеспечение приборов и влияющее на другие их важные характеристики, такие как стабильность, чувствитель-

ность к помехам разного происхождения. Существующие методы калибровки сейсмодатчиков дают невысокую точность. Невысокая точность датчиков обусловлена, прежде всего, высокой чувствительностью оборудования, которое естественно не можжет не чувствовать и свои помехи. Говоря банальным примером, если дегустатор пробует дорогое долголетнее вино, ему может помешать вкус собственной слюны, о котором он и не подозревает. Именно эта проблема сверхвысокой чувствительности является актуальной на данной момент.

Как следует из представленного исследования, собственные шумы аппаратуры играют важное значение при точности определения сигнала. Данные шумы – инструментальная погрешность, которую нужно учитывать и исключать в виде определенной поправки, которая создаст прозрачность измерений для сейсмодатчиков.

В заключение хотелось бы отметить возможность расширения стандартов по калибровке и поверке сейсмоаппаратуры, в особенности – создания определенных систем исключения или уменьшения погрешности. Данные шумы имеют, конечно, влияние на любую аппаратуру, используемую при проведении измерений, однако только для сейсмографов они представляют наибольшую опасность, так как в определенный момент времени не смогут предоставить точной оценки ситуации и выявить сейсмически опасные объекты.

Библиографический список

1. *Тер-Степанян Г. И.* Геодезические методы изучения динамики оползней Оползни // Геодезические наблюдения. 2-е изд., перераб. М.: Недра, 1979. 157 с.

2. *Ерыш И. Ф., Саломатин В. Н.* История отечественного оползневедения. Симферополь, 1999. 254 с.

3. *Баборыкин М. Ю., Жидиляева Е. В.* Мониториг оползней с использованием лазерного сканирования и геодезических наблюдений. URL: Geoinfo.ru (дата обращения: 14.03.2021).

4. *Карапетян Д. К., Айрапетян О. Ю., Мхитарян Д. А.* Анализ динамических характеристик здания комплексной конструкции с помощью мобильной сейсмостанции нового поколения // Геология и геофизика Юга России. 2019. Т. 9. № 1. С. 110–121.

5. Особенности поверки сейсмоприемников. URL: https://zetlab.com/podderzhka/seysmika/osobennosti-poverki-seysmopriemnikov/ (дата обращения: 31.03.2021).

6. *Марченков А.Ю., Рыков А. В., Уломов И. В.* Создание методических основ для метрологического обеспечения сейсмических и виброизмерительных приборов с использованием в качестве источника естественного сейсмического фона земли // Отчет о НИР № 95-05-14931 (Российский фонд фундаментальных исследований). Информационный бюллетень РФФИ, 3 (1995).

7. ГОСТ Р 8.669-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями.

***УДК*: 004.056.55**

К. В. Епифанцев*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ДЕКОДЕРОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

В современных условиях увеличивающегося потока информации важным элементом являются системы защиты информации от внешних угроз. Стандарт ГОСТ Р 54089-2018 [1] при описании «Электронного дело изделия» рекомендует применять авторизацию записей на всех этапах формирования объектов документооборота. Одним из наиболее распространенных элементов защиты информации являются шифраторы и дешифраторы (декодеры). В приемопередающих устройствах декодер имеет широкое применение. Декодер в общем случае – некоторое звено, которое преобразует информацию из одного внешнего вида в другой вид, применяемый в каком-либо устройстве. В программном обеспечении декодер: модуль программы или самостоятельное приложение, которое преобразует файл или информационный поток из внешнего вида в вид, который поддерживает другое программное обеспечение.
Ключевые слова: кодирование, модули программ, информационный сигнал.

K. V. Epifantsev*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF DECODERS IN THE CONTEXT OF DIGITALIZATION

In modern conditions of increasing information flow, information protection systems against external threats are an important element. The standard GOST R 54089–2018 when describing the «Electronic product case» recommends the use of record authorization at all stages of the formation of document flow objects. One of the most common elements of information security are encoders and decoders (decoders). In the receiving and transmitting devices, the decoder has a wide application. In general, a decoder is a link that converts information from one appearance to another, which is used in a device. In software, a decoder: a program module or standalone application that converts a file or information stream from an appearance to a view that is supported by other software.
Keywords: coding, program modules, information signal.

При использовании незащищенного канала актуальными являются задачи обеспечения конфиденциальности передаваемых данных и аутентификации источника сообщений [1], [7]. В настоящее время для решения этих задач используются итегрированные симметричные алгоритмы блочного шифрования, такие как ГОСТ 28147-89, на смену которому пришел в 2018 году ГОСТ 34.13-2018 [1]. Криптографическая защита информации в мире берет свое начало со времени созданий электронной цифровой подписи в конце 1979 году в США. Именно этот момент принято считать началом отсчета по шифрованию текстовой информации, разрешенной не только на военном уровне, но и на гражданском. Важно также отметить, что параллельно с развитием электронно-

цифровой подписи, ее популяризации меняются и системы дешифраторов, выполняющих распознавание сигналов. Развитие системы шифраторов связано также и наращиванием системы интернета вещей, использующим возможность повсеместного применения qr-кодов и подобных элементов, позволяющих идентифицировать объекты. С одной стороны, возможно говорить о необходимости подобной безбумажной технологии для ускорения доступа к информации и идентификации объектов, но с другой стороны, такое распространение и свободный доступ информации делают ее общедоступной и усиливают риск несанкционированного доступа. Именно поэтому еще в одном стандарте – ГОСТ Р54089-2018 «Электронное дело изделия» неоднократно упоминается вопрос идентификации объектов, неоднократного кодирования на самом элементарном уровне – к примеру, в режиме доступа к общей папке на предприятии необходимо создавать пароль.

В российской промышленности производят дешифраторы по виду интегральных микросхем. Микросхема К500ИД162М – позволяет трансформировать 2-й код в 8-й. Другие типы дешифраторов могут преобразовывать двоичное исчисление в десятичное (для этих целей применяются микросхемы К176ИД1 и К155ИД1). В РФ производятся также дешифраторы со счетчиками, которые позволяют управлять 7-сегментными цифровыми индикаторами. На микросхемах их принято маркировать обозначением «ДИ».

На рис. 1 представлен механизм шифрования информации, который включает в себя разностный регистр «d», информационный регистр «u» и синдромный регистр «s». На представленном рисунке кодер обозначен штриховой линией, работающий прежде всего с информационным регистром, производящий манипуляции с последовательностью цифр «0», «1», «4», «12» и переносящий их в синдромный регистр. В результате перехода из одного состояния в другое происходит сдвиг регистра, и информация, таким образом, шифруется.

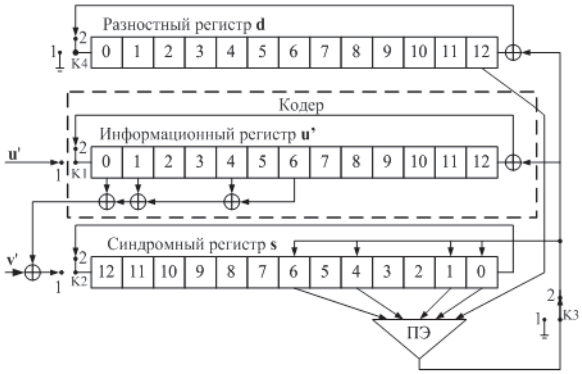


Рис. 1. Принцип шифрования информации

В настоящее время актуальной проблемой совершенствования декодеров, как и много лет назад, является борьба с Гауссовским шумом, увеличивающим

помехи и отражение волны, что играет по принципу «зеркала», в котором мы видим не настоящее изображение, а его отражение. В случае с отражением волны мы также лишены возможности проанализировать истинный физический сигнал, а видим лишь его отраженную копию, что, безусловно, вводит в заблуждение и дает большое количество погрешностей при анализе параметров волны – к примеру фазового сдвига, так как в случае отраженного сигнала мы получим результат со знаком «-». Подобные явления прослеживаются также и при наложении сигналов от внешних источников – антенн, катушек индуктивности, электродвигателей, трансформаторных подстанций.

Многопороговый декодер [6] является развитием простейшего порогового декодера Месси и позволяет расшифровывать очень длинные коды. При этом данный декодер многопорогового вида сохраняет простоту и скорость обычного порогового декодера, что делает его очень актуальным для применения в высокоскоростных системах связи. Шифраторы получили широкое распространение в системах Правительственной связи и поэтому данный вопрос является крайне актуальным.

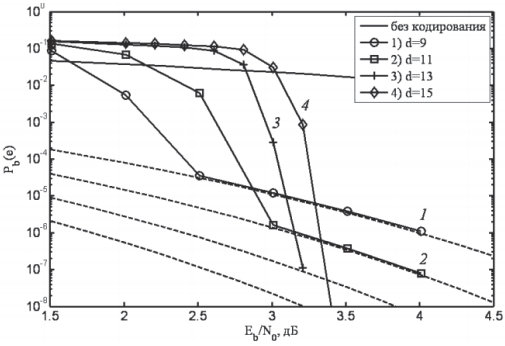


Рис. 2. Характеристики декодера для самоортогональных кодов (СОК) с R=1/2

Зависимость вероятности битовой ошибки P_b (e) от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для многопорогового декодера представлена на рис. 2. Пунктиром на рисунке показана вероятность возникновения ошибки декодирования тех же кодов с помощью оптимального декодера. Из представленных графиков видно, что многопороговый декодер имеет более качественные показатели при высоком уровне шума. Качество шифрования информации – условный показатель, который не может быть измерен конкретными приборами и эталонами [6]. В данных условиях мы говорим о проблеме создания эталона подобного преобразователя. В настоящее время известны 7 базовых эталонов, 4 из которых (метр, килограмм, ампер, кельвина) находятся во ВНИИМ, и 3 (секунда, моль, канделла) во ВНИИФТРИ. В процессе изучения эталонов ВНИИФТРИ были выявлены эталоны, которые могли бы быть использованы в качестве эталона

шифрования информации: в качестве рекомендации возможно рассмотреть действующие эталоны:

- ГЭТ 207-2013. Эталон единицы угла фазового сдвига;
- ГЭТ 200-2012. Эталон единиц измерения объемов передаваемой цифровой информации по каналам интернет и телефонии.

Рассматриваемые эталоны являются инновационными разработками, которые в настоящий момент контролируют область крайне мало стандартизованную – Интернет. В настоящее время провайдеры не могут обеспечить достаточной скорости передачи данных, а в свою очередь шифровальные устройства также зависят от качества поступаемого сигнала, и в результате – отрицательной влияние оказывается на все отрасли. В нашем государстве отсутствует эталон 1 Мб/с и в результате этого производители роутеров, к примеру, не могут привязаться к эталонному значению. Однако указанные эталоны ГЭТ 207-2013 и ГЭТ 200-2012 могут частично решить эту проблему при значительно большом распространении среди ЦСМ и издания соответствующего Федерального закона о поверке средств передачи данных, которые в свою очередь обяжут поставщиков интернета выполнять работы более качественно и использовать эталон 1 Мб/с для проверки используемых роутеров.

Проблема кодирования и декодирования сигнала остается актуальной и в настоящее время по причине постоянно растущих потоков кодированной информации. Перспективы совершенствования декодеров описаны в книге д. т. н. Золотарева В. В., д. т. н. Зубарева Ю. Б. и д. т. н. Овечкина Г. В., которые описывают ряд эффективных методов при большом шуме [7]:

1) применение каскадных методов различного типа. Каскадирование действительно помогает решить задачи более эффективного и простого исправления ошибок;

2) использование кодов с выделенными ветвями и с неравной защитой символов, которые позволяют менять размерности некоторых периодических сверок сигналов;

3) разработки по тематике декодеров свидетельствуют о возможности эффективного использования пороговых решающих функций. Важно увеличить объем расчетов для некоторых контролируемых символов, усовершенствовав при этом пороговый элемент, что подняло бы достоверность его решений о принятых информационных символах;

4) совместное применение алгоритмов МПД с другими методами коррекции ошибок.

В процессе исследования декодеров в СПбГУАП в настоящее время применяется установка Elvis II, которая позволяет рассмотреть алгоритм работы, записать последовательность сигнала (рис. 3). Благодаря возможности широкого использования установки лабораторного модуля на макетную плату возможно накладывать различные возмущающие воздействия. Возможности современных модулей, основанных на установках National Instrumens, позволяют рассмотреть параметры изменения и трансформации сигналов в условиях лабо-

ратории, что позволяет работать как с шифраторами, так и с дешифраторами с возможностью наложения частотных возмущений.

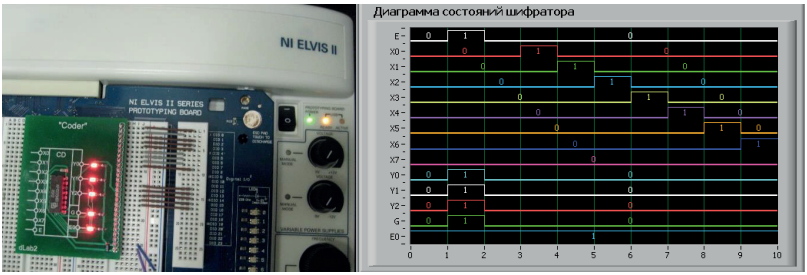


Рис. 3. Установленный лабораторный модуль и диаграмма состояний шифратора

В настоящее время для управления различными объектами часто используются команды, передаваемые объекту управления по радиоканалу. При этом в большинстве случаев правильность передачи команд по каналу, в котором на передаваемый сигнал действуют разного рода помехи, оказывается критичным.

Одним из наиболее эффективных подходов, позволяющих решить задачу обеспечения требуемой достоверности передачи радиокоманд, является применение помехоустойчивого кодирования. За счет этого можно улучшить многие параметры системы управления, такие как дальность связи, скорость и надежность передачи и другие [5]. Процесс разработки шифраторов (кодеров) и дешифраторов (декодеров) необходим для принципиальной задачи повышения обороноспособности страны, защиты интеллектуальной собственности и разработки принципиально новых систем бесперебойной передачи информации и качественной связи.

Библиографический список

1. *Жданов О. Н.* Методика выбора ключевой информации для алгоритма блочного шифрования. М., 2015. 88 с.

2. *Авдошин С.* Дискретная математика. Модулярная алгебра, криптография, кодирование. М.: Синтег, 2016. 260 с.

3. *Ассанж Д.* Шифропанки. Свобода и будущее Интернета. М.: Азбука-Аттикус, 2014. 574 с.

4. *Бабаш А. В., Шанкин Г. П.* История криптографии. Ч. I. М.: Гелиос АРВ, 2002. 240 с.

5. *Белицкий А. М., Овечкин Г. В., Шевляков Д. А.* Повышение достоверности приема-передачи команд управления с использованием многопороговых декодеров самоортогональных кодов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6.

6. *Зубарев Ю. Б., Золотарев В. В., Овечкин Г. В.* Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых // Цифровая обработка сигналов. 2008. № 1. С. 1–12.

7. *Золотарев В. В., Зубарев Ю. Б., Овечкин Г. В.* Многопороговые декодеры и оптимизационная теория кодирования. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 239 с.

8. ГОСТ Р 54089-2018. Национальный стандарт РФ. Интегрированная логистическая поддержка. Электронное дело изделия. Основные положения и общие требования.

УДК 656.073.2

О. А. Изотов*
кандидат технических наук
А. Л. Кузнецов**
доктор технических наук, профессор
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
**ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРИЗОНТА ПЛАНИРОВАНИЯ ДОСТАВКИ СБОРНЫХ ПАРТИЙ ГРУЗОВ

Представлена модель определения горизонтов планирования доставки сборных партий в мультимодальных перевозках. В условиях применения различных средств укрупнения грузовых мест, призванных обеспечить сохранность перевозки, выполнение доставки грузов с заданной скоростью и по опубликованным на видах транспорта тарифам, способы укрупнения сборных партий грузов оказывают существенное влияние и на применяемые в ходе перевозки к таким грузам технологии перегрузочных и перевозочных операций. На этапе растарки морского контейнера в силу необходимости его своевременного возвращения владельцу на контейнерный терминал, грузовладелец как клиент контейнерной линии теряет преимущества контейнерных технологий и, как правило, вынужден смириться с дополнительными перегрузочными операциями и сменой вида транспорта доставки, что неизменно приводит к повышению стоимости перевозки в целом. Включение в цепочку продвижения грузов внутриконтейнерных модулей призвано расширить возможности доставки сборных партий грузов с применением контейнерных технологий, а сроки их использования в границах хинтреленда морского терминала могут обеспечить удлинение маршрута такой перевозки.
Ключевые слова: измерительные модели, горизонты планирования, сборные грузы, контейнерные технологии, мультимодальные перевозки, средства укрупнения грузовых мест.

O. A. Izotov*
PhD Sc. Tech.
A. L. Kuznetsov**
Dr. Sc. Tech., Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

MEASUREMENT MODELS FOR DETERMINING THE PLANNING HORIZON FOR THE DELIVERY OF BULK SHIPMENTS

A model for determining the planning horizons for the delivery of combined shipments in multimodal transport is presented. In the context of the use of various means of consolidation of cargo spaces, designed to ensure the safety of transportation, delivery of goods at a given speed and at the rates published on the modes of transport, the methods of consolidation of combined shipments have a significant impact on the technologies of transshipment and transportation operations applied to such goods during transportation. At the stage of Stripping the ocean container because of the need for its timely return the holder to the container terminal, the cargo owner as a client container lines loses the advantages of container technology and, as a rule, compelled to accept the additional handling operations and the change of transport modes of delivery which invariably leads to increased transportation cost as a whole. The inclusion of intra-container modules in the chain of cargo promotion is in-

tended to expand the possibilities of delivery of combined shipments using container technologies, and the terms of their use within the borders of the hinterland sea terminal can provide an extension of the route of such transportation.
Keywords: measurement models, planning horizons, combined cargo, container technologies, multimodal transportation, means of consolidation of cargo spaces.

Введение

За последние десятилетия контейнерные технологии настолько проникли в основу технологических процессов транспортировки грузов всеми видами транспорта, что интермодальность, по сути, стала синонимом перевозки в контейнерах. Причина не только в том, что применение контейнеров в цепях транспортировки грузов обеспечивает эффективное привлечение различных видов транспорта к таким перевозкам, но и в использовании сложившихся шаблонов маршрутных сетей. Все это обеспечивает сокращение времени и снижение стоимости перевозки [1], предоставляя грузовладельцу широкий выбор альтернативных вариантов доставки. Дополнительным логистическим преимуществом служит то, что пункты перевалки контейнерных (контейнеризированных) грузов в сетях пакетных маршрутов как правило уже оснащены стандартными видами перегрузочного оборудования, позволяющего обеспечить эффективную передачу переход таких грузов с одного вида между видами транспорта. Тем самым одновременно предоставляется возможность переключения с одного (магистрального) маршрута на альтернативный (территориальный) маршрут. Организаторам перевозочного процесса остается учесть загруженность различных звеньев цепи продвижения товаров и отследить тарифные ставки за транспортные услуги, предлагаемые участниками транспортировки.

Появление устойчивого грузопотока способствует проявлению эффекта масштабной экономии в форме запуска ускоренных контейнерных поездов, укрупнению морского контейнерного тоннажа на морских линиях, опоры на крупные распределительные центры. В то же время на начальном и конечном плече доставки груза в большинстве случаев приходится использовать традиционный, относительно более дорогой, автомобильный транспорт [2].

Во многом с осознанием преимуществ контейнерных технологий, ростом числа специализированных перегрузочных терминалов связан и общий рост грузооборота на внутренних транспортных путях страны. Тем не менее имеется существенный потенциал для роста: в России сегодня в контейнерах перевозится примерно 10 % грузов, в то время как в развитых странах – от 15 до 40 %.

Методы и материалы

Для роста объемов контейнерных перевозок необходимо соблюдение трех условий:

- развитие логистических услуг на транспортной сети страны;
- развитием транспортной инфраструктуры, в частности складских и терминальных комплектов;

- усложнение логистических цепочек товаропродвижения, позволяющее реализовать эффективность контейнерных перевозок по сравнению с другими видами сообщений.

В инфраструктурных сетях контейнерных перевозок к настоящему времени уже сложились первичные маршруты с максимальной загруженностью, формирующие контуры будущих опорных сетей (backbones). По этим транспортным коридорам сегодня перевозится значительный объем грузов в контейнерах. Уровень контейнеризации грузовых перевозок в России составляет 34,4 %, в Китае этот показатель достиг 73,0 %, в США 68,8 %. Как правило, взаимодействие участвующих в них видов транспорта обеспечивает ускоренное продвижение за счет гармонизации правил перевозок грузов по таким коридорам [3].

В целом, понятие транспортного коридора отражает естественные экономические механизмы концентрации грузопотоков на отдельных направлениях и удобство организации перевозок по ним.

Дальнейшее продвижение сборных партий грузов, после растарки/затарки контейнеров морских линий, производится по внутренним транспортным путям страны смежными видами транспорта. Соответствующая передача партий возможна только в узловых центрах коридоров, обеспечивающих перегрузочные, складские и сопутствующие услуги видов транспорта. Консолидация и концентрация грузопотоков приводит к тому, что упомянутые центры становятся все более удаленными от конечных потребителей, грузоотправителей и грузополучателей. Именно на этих этапах возникает проблема доставки сборных партий грузов смежным транспортом.

В то же время на маршрутах от узловых центров для части конечных потребителей объем контейнерной партии может быть избыточен. Кроме того, даже при полной контейнерной партии, ограничение времени возврата морского контейнера может потребовать перетарки груза для освобождения требуемого владельцем контейнера.

Как следствие, организация перевозки и перевалки сборных партий грузов, не обеспечивающих полную загрузку контейнеров, делает перспективным использования специализированных грузовых (внутриконтейнерных) модулей [4]. Такое средство укрупнения, как и стандартный контейнер, призвано обеспечить сохранность перевозки грузов при перегрузке и транспортировке различными видами транспорта, свободную и быструю загрузку (выгрузку) контейнеров модулями с грузом, а также ограничить несанкционированный доступ к грузу вплоть до возможности закрытия на замок и опломбирования модуля.

Иными словами, предлагаемый модуль отражает идеологию развития и обеспечивает все преимущества стандартного морского контейнера в меньшем масштабе, отражая требования совершенствования перевозки «последней мили».

Различные объемно-весовые, временные, стоимостные и пространственные параметры маршрутов транспортировки, упомянутые выше, ставят задачу определения рациональных границ обращения технологических средств укрупнения: контейнеров, внутриконтейнерных модулей, паллет.

Разработке математических моделей, являющихся инструментом решения этой комплексной и масштабной задачи, посвящена данная работа.

Таким образом, модель горизонтов планирования доставки сборных партий грузов представляет собой условные временные отрезки, которые в полной мере описывают логистическую связь между этапами транспортировки грузов видами транспорта и конечной целью перевозки. Фактически, предложенный подход объясняет, где проходят границы между краткосрочными этапами доставки и конечной перспективой [5].

Например, при использовании морского контейнера в границах хинтерленда, срок его оборота не должен превышать 8 сут. (4 сут. в одном направлении), а с внедрением в оборот внутриконтейнерного модуля, срок его оборота может составлять до 16–24 сут. (8–12 сут. в одном направлении). С превышением срока применения, тарно-штучных груз после растарки модулей может следовать в крытых вагонах или автомобильных фурах уже без применения преимуществ контейнерных технологий.

Результаты

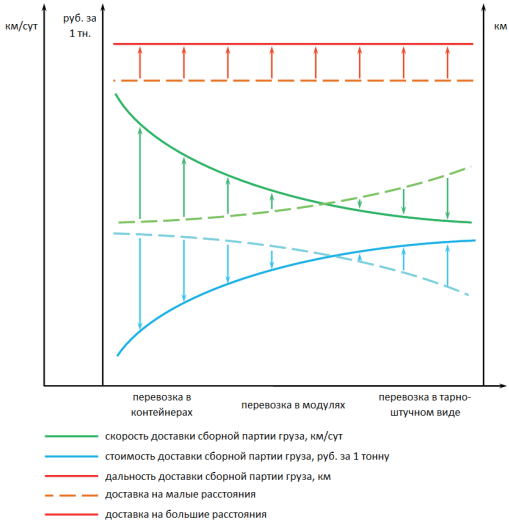


Рис. 1. Поведение модели перевозки сборных партий грузов на малые и дальние расстояния

Кроме того, горизонты планирования доставки сборных партий грузов, имеют свои связанные с условиями организации перевозок видами транспорта, ограничения. Так, согласно выводам логистических исследований на малых расстояниях (до 1500 км) стоимость перевозок автомобильным транспортом ниже, чем железнодорожным, что связано с отсутствием необходимости доставки грузов на железнодорожную станцию отгрузки и вывозом грузов со

станции назначения (рис. 1). С увеличением дальности завоза груза измениться и скорость доставки [10].

Заключение

Таким образом, применение внутриконтейнерных модулей призвано, как к снижению общих издержек доставки сборных партий грузов, так и уровня неопределенности связанных с такими перевозками рисков. Тем более, что сами внутренние противоречия в оценке эффективности работы транспортной системы стимулируют развитие новых форм транспортного обслуживания. Одним из основных направлений такого развития остается расширение транспортной системы на смежные виды деятельности.

Библиографический список

1. *Горев А. Э.* Основы теории транспортных систем. СПб.: СПбГАСУ, 2010. 214 с.

2. *Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Щербакова-Слюсаренко В. Н.* Эволюция показателей, характеризующих эксплуатационную работу портов и терминалов // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 909–924.

3. *Irannezhad E., Prato C., Hickman M.* A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2017. Vol. 121. P. 119–133.

4. *Изотов О. А., Кириченко А. В., Кузнецов А. Л.* Технологические решения для организации отправок сборных грузов посредством контейнерных транспортно-технологических систем // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2019. Т. 11. № 4. С. 609–620.

5. Модели управления портфелем проектов в условиях неопределенности / В. М. Аньшин, И. В. Демкин, И. М. Никонов, И. Н. Царьков. М.: МАТИ, 2008. 117 с.

6. *Изотов О. А.* Преимущества внедрения новых средств укрупнения сборных грузов в контейнерные перевозки // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2019. Т. 11. № 6. С. 1037–1043.

7. Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port / X. Schepler, S. Balev, S. Michel, É. Sanlaville // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2017. Vol. 100. P. 38–62.

8. *Ципес Г. Л., Товб А. С.* Проекты и управление проектами в современной компании. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2009. 304 с.

9. *Изотов О. А., Кузнецов А. Л., Гультяев А. В.* Перспективы экспедирования морских контейнерных перевозок // Транспортное дело России. 2019. № 4. С. 130–133.

10. *Кузнецов А. Л., Галин А. В.* Моделирование развития портов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. № 3 (41). С. 176–182.

УДК 621 873; 621.43.629

И. Ю. Класс*
магистрант
В. С. Павлов*
доктор технических наук, профессор
Е. Л. Турнецкая*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМОБИЛЯ

Проведено моделирование диагностики тормозной системы транспортного средства на основе математических моделей ее компонентов. Разработано встроенное в микроЭВМ автомобиля программное средство, позволяющее оценить состояние элементов тормозной системы без диагностики на специализированных стендах. Анализ данных, полученных при моделировании, может проинформировать пользователя о текущем состоянии элементов тормозной системы, поведении водителя при управлении транспортным средством и указать на внешние факторы, влияющие на процесс торможения.
Ключевые слова: тормозная система, двигатель внутреннего сгорания, математическое моделирование, диагностика технического состояния.

I. Y. Klass*
Postgraduate Student
V. S. Pavlov*
Dr. Sc. Tech., Professor
E. L. Turnetskaya*
PhD Sc.Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SIMULATION OF OPERATIONAL DIAGNOSTICS OF THE VEHICLE BRAKE SYSTEM

The modeling of diagnostics of the vehicle braking system is carried out on the basis of mathematical models of its components. A software tool built into the microcomputer of a car has been developed, which makes it possible to assess the state of the elements of the brake system without car service. Analysis of the data obtained during the simulation can inform the user about the current state of the elements of the braking system, the driver's behavior when driving a vehicle, and indicate external factors affecting the braking process.
Keywords: brake system, internal combustion engine, mathematical modeling, technical condition diagnostics.

Своевременная диагностика технического состояния тормозной системы автомобиля необходима для обеспечения безопасности во время движения. Диагностические операции проводят в сервисных центрах методами визуального контроля, ходовых испытаний или на специализированных стендах, которые сопряжены с программно-аппаратным комплексом по измерению и интерпре-

тации состояния элементов тормозной системы. Плановую проверку автотранспортного средства проводят ежегодно или каждые 15 000 км пробега автомобиля [1]. Однако при планировании передвижений необходимо самостоятельно оценивать уровень технического состояния элементов тормозной системы. Поэтому требуется разработать программный инструмент для оперативной диагностики таких компонентов.

Цель исследования – разработка программного средства оперативной диагностики тормозной системы. Предмет исследования – техническое состояние тормозной системы автомобиля. Задачи исследования: описание математического аппарата для расчета параметров диагностических операций, выбор программной среды реализации, разработка математической и компьютерной модели тормозной системы, тестирование реализованной модели.

Реализация математической модели тормозной системы

Рассмотрим основные математические зависимости и формулы для моделирования процессов работы дисковой тормозной системы автомобиля [2]–[4]. При составлении математической модели требуется определить формулы для описания более 40 параметров, наиболее важные из которых сгруппированы и приведены ниже.

1. Параметры силы сжатия.

$$Fsz_fwd = P_gtc\,Sef_fwd\ , \tag{1}$$

где Fsz_fwd – сила сжатия (кг); P_gtc – давление, создаваемое главным тормозным цилиндром (кг/см^2); Sef_fws – эффективная площадка передних тормозов. Аналогичным образом рассчитаем для задней оси показатели силы сжатия.

$$M_fwd = mu\,\mathrm{Re}_fwd\,Fsz_fwd\,, \tag{2}$$

где M_fwd – производимая сила торможения (кг); mu – коэффициент трения колодки и диска; Re_fwd – эффективный радиус тормозного диска (от центра ступицы до центра колодки); Fsz_fwd – сила сжатия (кг). Аналогичным образом рассчитаем силу торможения для задней оси.

2. Расчет значений параметров педального узла.

$$F_gtc = p\,k1\,k2\,, \tag{3}$$

где F_gtc – сила, приложенная к поршню главного тормозного цилиндра; p – давление на педали; $k1$ – коэффициент (соотношение) педали; $k2$ – коэффициент усилителя тормозов (если его нет, использовать 1).

3. Определение параметров давления в гидравлической системе автомобиля.

$$P_gtc = F_gtc\,/\,S_gts\,, \tag{4}$$

где P_gtc – давление в системе; F_gtc – сила, приложенная к поршню главного тормозного цилиндра; S_gt – площадь поршня главного тормозного цилиндра (ГТЦ).

4. Основные технические характеристики автомобиля.

$$G = m1g, \tag{5}$$

где G – вес автомобиля при снаряженной массе; $m1$ – снаряженная масса авто; g – ускорение свободного падения [6]. Аналогичным образом рассчитаем вес автомобиля при полной массе.

$$S = 0.78BH, \tag{6}$$

где S – площадь автомобиля; B – ширина автомобиля; H – высота автомобиля.

$$W = k_bS, \tag{7}$$

где W – обтекаемость автомобиля; k_b – коэффициент лобового сопротивления; S – лобовая площадь автомобиля.

$$G_1 = Gb / L, \tag{8}$$

где G_1 – вес, приходящийся на передние колеса; G – вес авто при снаряженной массе; b – расстояние до задней оси от центра тяжести автомобиля (ЦТ); L – колесная база.

$$G_2 = G1b / L, \tag{9}$$

где G_2 – вес, приходящийся на передние колеса в статическом положении; $G1$ – вес авто при полной массе; b – расстояние до задней оси от ЦТ; L – колесная база.

$$G_3 = Ga / L, \tag{10}$$

где G_3 – вес, приходящийся на задние колеса в статическом положении; G – вес авто при снаряженной массе; a – расстояние до передней оси от ЦТ; L – колесная база.

$$G_4 = G1a / L, \tag{11}$$

где G_4 – вес, приходящийся на задние колеса в статическом положении; $G1$ – вес авто при снаряженной массе; a – расстояние до передней оси от ЦТ; L – колесная база.

5. Параметры тормозной системы автомобиля.

$$S_gtc = D_gtc^2 2\pi / 4, \tag{12}$$

где S_gtc – площадь поршня ГТЦ; D_gtc – диаметр ГТЦ.

$$Sp_fwd = Dp_fwd^2 2\pi / 4, \tag{13}$$

где Sp_fwd – площадь передних тормозных поршней; Dp_fwd – диаметр передних поршней. Аналогичным образом рассчитаем площадь для задних тормозных поршней для задней оси.

$$Sef_fwd = n_fwd\, Sp_fwd, \tag{14}$$

где Sef_fwd – эффективна площадка передних поршней; n_fwd – количество передних поршней; Sp_fwd – площадь переднего поршня.

6. Технические характеристики автомобильных покрышек.

$$d_sh = d_sh_d\, 25.4, \tag{15}$$

где d_sh_d – посадочный диаметр шины в дюймах.

$$H_sh = (delta_sh / 100,)\, B_sh \tag{16}$$

где H_sh – высота профиля шины; $delta_sh$ – отношение высоты профиля к ширине покрышки; B_sh – ширина шины.

$$D_sh = d_sh + 2H_sh, \tag{17}$$

где D_sh – диаметр колеса; d_sh – посадочный диаметр шины; H_sh – высота профиля шины.

$$Rs = 0.5d_sh + H_sh, \tag{18}$$

где Rs – свободный радиус; d_sh – посадочный диаметр шины; H_sh – высота профиля шины.

$$Rst = 0.5d_sh + lamda_z H_sh, \tag{19}$$

где Rst – статический радиус; d_sh – посадочный диаметр шины; H_sh – высота профиля шины, $lamda_z$ – коэффициент смятия шины.

$$Rk = D_sh / 2, \tag{20}$$

где Rk – качение шины за один оборот; D_sh – диаметр колеса.

7. Параметры тормозных колодок и дисков автомобиля.

$$\mathrm{Re}_fwd = (Dd_fwd / 2) - (hk_fwd / 2,) \tag{21}$$

где R_fwd – эффективный радиус переднего/заднего тормозного диска; Dd_fwd – диаметр переднего/заднего тормозного диска; hk_fwd – высота передней/задней колодки.

Разработка программного средства оперативной диагностики

Реализация программного средства проведена на основе инструментальных средств языка программирования Python. Текст программы записывают в постоянное запоминающее устройство микроЭВМ автомобиля, сопряженное с электронным блоком управления (ЭБУ) машины (рис. 1). ЭБУ

служит для сбора значений датчиков, их преобразованием, обработкой, формированием управляющих сигналов, часть из которых будет передана в качестве исходных данных для первичной настройки разработанного программного средства. Например, получение необходимой информации для определения износа фрикционного слоя тормозной колодки происходит при помощи датчиков тормозного момента, датчика угловой скорости колеса (ABS), датчика износа тормозных колодок, датчика распределения тормозных усилий (EBD) [5]. Эти значения будут отображены на графическом интерфейсе водителя.

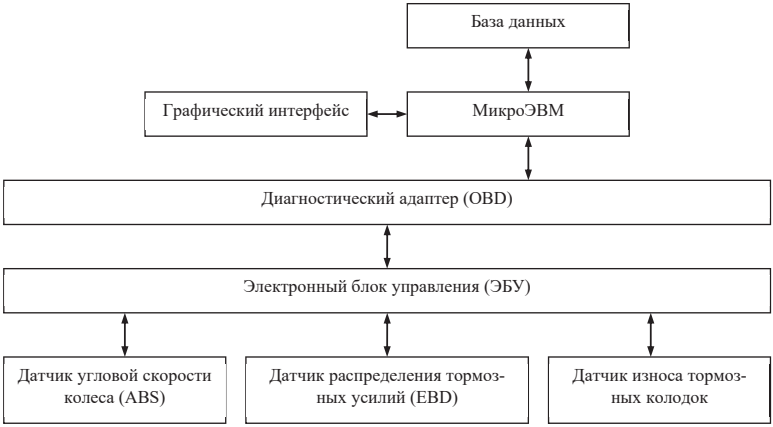


Рис. 1. Структурная схема вычислительной системы автомобиля

Для соединения микроЭВМ и ЭБУ автотранспортного средства используется диагностический сканер (OBD), предназначенный для предварительной фильтрации входных информационных сигналов и преобразование их в стандартную для микроЭВМ форму. Инициализацию и тонкую настройку программного средства выполняют согласно техническим характеристикам автомобиля через сервисный интерфейс. Условия и режимы интерактивной диагностики выбирает пользователь системы (рис. 2).

Программное средство в режиме реального времени получает данные о действиях водителя по разгону и торможению с целью определения текущих временных и скоростных характеристик автомобиля, которые служат первичной информацией для вычисления диагностируемых параметров [6]. На основе этой информации и данных технической документации о конструктивных особенностях конкретного автомобиля проводят моделирование износа элементов тормозной системы, в частности тормозных колодок. Вывод расчетных показателей осуществляют в числовом и графическом форматах, на основании которых водитель принимает решение о проведении соответствующего сервисного обслуживания или ремонта. Исходная информация и

расчетные данные сохраняют в базе данных, реализованной в программной среде MySQL.

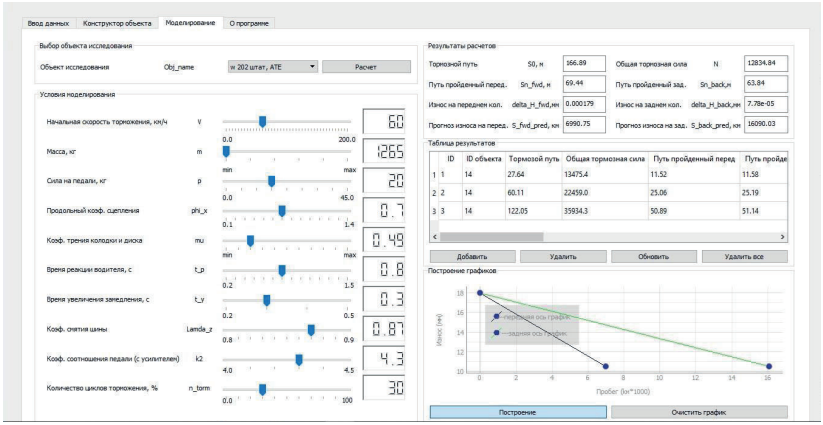


Рис. 2. Интерфейс программного средства

Интуитивно-понятный интерфейс пользователя разработанного программного модуля состоит из двух частей. В правой части вводят параметры для расчетов. Значения параметров передают датчики конструктивных элементов или вводят в ручном режиме на основе технической документации конкретного автомобиля. В левой части показаны результаты моделирования в числовом и графическом форматах. Расчетные данные можно использовать для диагностики состояния тормозной системы, прогнозирования корректной работы элементов системы, выбора соответствующих компонентов при ее модификации, оценки правильности выполнения действий водителя по управлению транспортным средством и т. д.

Тестирование разработанного программного средства

Проведем сравнение двух тормозных колодок разных фирм «Ate» и «Delphi» для автомобиля «Mercedes-Benz w202». Данный тест поможет выявить технические различия между тормозными колодками и показать тормозной путь, а также износ фрикционного материала каждой оси автомобиля. На рис. 2 показана параметрическая настройка процесса моделирования. Для проведения моделирования выбраны следующие значения: коэффициент сцепление с дорогой составляет 0,9, сила нажатия на педаль тормоза составляет 40 кг, время реакции водителя 3 сек. Остальные параметры оператор определяет вручную, плавно изменяя положения каретки. К таким параметрам относят начальную скорость торможения, силу нажатия на педаль и количество циклов торможения. Визуализация результатов моделирования, на основании которых можно

провести анализ технического состояния колодок тормозной системы автомобилей, представлена на рис. 3.

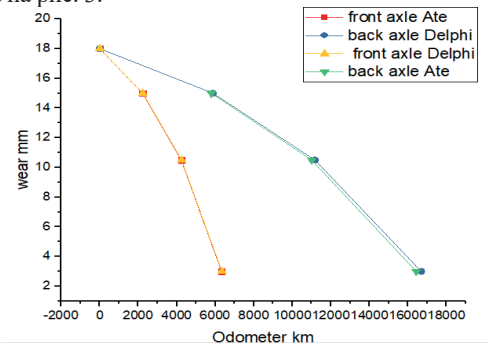


Рис. 3. Анализ сравнения износа фрикционного материала колодок фирм «Ate» и «Delphi» на автомобиле «Mercedes-Benz w202»

Полученные результаты сопоставимы с результатами, полученными на специализированном стенде, что подтверждает адекватность разработанных математической и компьютерной моделей [7].

Заключение

В ходе исследования разработаны математическая и компьютерная модели интерактивной диагностики тормозной системы автотранспортного средства. В соответствии с моделью реализовано программное средство, которое встроено в бортовую мини ЭВМ и соединено с ЭБУ, что позволяет использовать данные от датчиков без создания дополнительных интерфейсов для взаимодействия между элементами тормозной системы. На основании результатов расчетов пользователь получает оперативные сведения о техническом состоянии элементов тормозной системы, прогнозирует работоспособность элементов, выбирает соответствующие компоненты при модификации и модернизации элементов, а также выполняет оценку правильности действий водителя по управлению транспортным средством, косвенно оценивает внешние факторы, например, погодные факторы, влияющие на поведение автомобиля при торможении.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 51709-2001. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки (с Изменением № 1). URL: http://docs.cntd.ru/document/gost-r-51709–2001 (дата обращения: 31.03.2021).

2. *Ревин А. А.* Автомобильные автоматизированные тормозные системы: Техническое решение. Теория. Свойства: монография. Волгоград: Изд-во ин-та качеств, 1995. 160 с.

3. *Ревин А. А., Тюрин С. В., Полуэктов М. В.* Экспресс-оценка долговечности тормозных накладок по результатам подконтрольной эксплуатации автотранспортных средств: монография М.: Инновационное машиностроение, 2015. 148 с.

4. *Ревин А. А., Тюрин С. В., Федотов В. Н*. Прогнозирование ресурса новых тормозных накладок транспортного средства // Вестник транспорта. 2006. № 9. С. 32–34.

5. Электронный блок управления двигателем: назначение и устройство. URL: http://krutimotor.ru/bloki-upravleniya-dvigatelem-vidy-ustrojstvo-remont (дата обращения: 31.03.2021).

6. *Балакина Е. В., Зотов Н. М., Зотов В. М.* Проблемы моделирования динамических процессов в реальном времени (на примере тормозной динамики автомобиля): монография. М.: Машиностроение, 2013. 299 с.

7. HfmScan – программа для диагностики двигателя мерседеса. URL: http://www.hfmscan.com/ru/index.html (дата обращения: 31.03.2021).

УДК 681.5

А. С. Костин*
аспирант
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В статье рассмотрен метод реализации полетной миссии при помощи квадрокоптера в автономном формате. Рассмотрены основные технические требования для реализации полета, а также разработан программный код с полетной миссией в качестве апробации рассмотренного метода позиционирования дрона в пространстве при помощи aruco-маркеров.
Ключевые слова: дрон, квадрокоптер, автономный полет, aruco-маркеры,пространственное перемещение.

A. S. Kostin*
PhD Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INFORMATION-MEASURING SYSTEMS FOR MONITORING THE AIRCRAFT TRAJECTORY

The article discusses a method for implementing a flight mission using a quadcopter in an autonomous format. The main technical requirements for the implementation of the flight are considered, and a program code with a flight mission is developed as an approbation of the considered method of positioning a drone in space using aruco-markers.
Keywords: drone, quadcopter, autonomous flight, setting the trajectory of motion, aruco markers, spatial movement.

Введение

На сегодняшний день сфера применения дронов достаточно масштабна: от исследования сельскохозяйственных угодий для получения большего количества урожая до поиска правонарушителей или съемки массовых мероприятий (концерты, свадьбы и т. д.) [1], [2]. Даже с учетом достаточно широких возможностей применения дронов появляются новые вызовы от индустрии, в частности применение дронов в полностью автономном режиме, например, для доставки различных грузов в городской среде, для построения цифровых моделей местности и т. д. [3], [4]. В рамках данной статьи будет рассмотрена база для выполнения автономного полета в лабораторных условиях, а также описан программный код автономного полета.

Исследование автономного полета проводилось на базе квадрокоптера «Клевер 4 CODE» [5]. Для проверки полета по выбранной траектории использовалось специальное летное поле с Aruco-маркерами.

Квадрокоптер «Клевер 4 CODE» включает в себя полетный контроллер Pixracer с полетным стеком PX4, Raspberry Pi 4 в качестве управляющего бортового компьютера, модуль камеры для реализации полетов с использованием

компьютерного зрения и набор различных датчиков и другой периферии. Платформа Клевера также включает в себя преднастроенный образ для Raspberry Pi с полным набором необходимого ПО для работы со всей периферией и программирования автономных полетов. При этом на данном квадрокоптере имеется возможность выполнять сложные полетные задания, выполнять отработку группового управления дрона, выполнять поиск новых решений для складской логистики, решения по доставке грузов.

При перемещении квадрокоптера в сложной среде осуществляется непрерывное планирование и построение траектории движения [6]. Необходимо понимание следующих особенностей:

– определение базовой системы координат, точек старта, границ полетного поля;

– понимание движения квадрокоптера в пространстве, построение идеальной модели;

– включение в модели ошибок, связанных с позиционирование коптера в пространстве и возможные отклонения при движении, вызванное как аэродинамическими свойствами, так и возможными вибрациями корпуса квадрокоптера.

В данном случае идентификация перемещения квадрокоптера выполнена на основе идентификации в летном поле по Aruco-маркерам [7], [8].

Постановка задачи и алгоритм управления

Положение квадрокоптера в пространстве характеризуется координатами x, y, z центра масс аппарата в неподвижной декартовой системе координат и тремя углами поворота вокруг осей связанной системы координат [9], [10], [11]. На начальных этапах разработки можно также считать ненесущую часть аппарата твердым телом, а ветер учитывать только как внешнее возмущение. Так как полеты происходят в закрытом летном поле, то влияние внешней среды будет приниматься крайне малой величиной, не оказывающей сильного возмущения при выполнении полета. При выполнении полетного задания необходимо учитывать зависание квадрокоптера в определенной точке (определенном Aruco-маркере). На рис. 1 показаны взаимное положение связанной (x_k, y_k, z_k) и нормальной, соответствующей маркеру, (x_m, y_m, z_m) систем координат в режиме зависания и действующие на квадрокоптер силы и моменты.

На рис. 1 F_1, F_2, F_3, F_4 – силы тяги винтов; M_1, M_2, M_3, M_4 – моменты от сопротивления винтов. Матрицы преобразования двух систем координат R является:

$$\begin{cases} F_b = [F_{xb}, F_{yb}, F_{zb}]^T = [0,0,L]^T \\ L = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = b(w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_4^2), \\ b = \dfrac{1}{2}\rho \cdot C_D \cdot A_i \cdot R_i^2 \end{cases} \quad (1)$$

где L – суммарная тяга; b – коэффициент силы тяги; ρ –плотность воздуха; C_D – коэффициент подъемной силы; A_i – площадь ометаемой лопастями винта поверхности; R_i – радиус винта; w_i – угловая скорость вращения i-го винта.

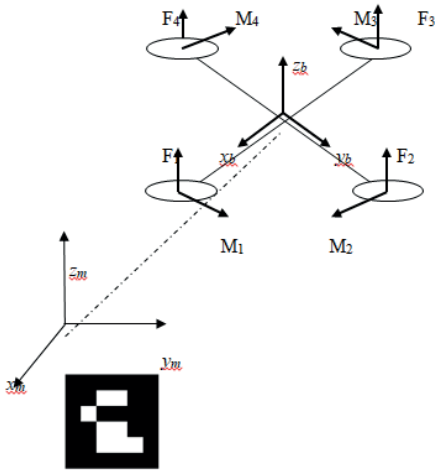


Рис. 1. Системы координат квадрокоптера в режиме зависания

Сила тяги в системе координат маркера:

$$F_m = [F_{xm}, F_{ym}, F_{zm}] = R \cdot F_b = L[s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta, c_\varphi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\theta, c_\varphi c_\theta]^T, \quad (2)$$

где

$$R = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\varphi s_\theta - c_\varphi s_\psi & s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta \\ c_\theta s_\psi & c_\varphi c_\theta + s_\varphi s_\psi s_\theta & c_\varphi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\varphi c_\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$C_x = \cos x, S_x = \sin x, \varphi, \psi, \theta -$ углы рыскания, тангажа, крена; R – матрица перехода.

Для построения полной системы уравнений необходимо включить силу тяжусти и силу сопротивления воздуха (4).

$$\begin{bmatrix} f_m = [f_x, f_y, f_z]^T \\ G = [0, 0, -mg]^T \end{bmatrix}. \quad (4)$$

С учетом симметрии квадрокоптера и считая, что центр масс расположен в начале координат связанной системы, уравнения динамики углового движения в связанной системе координат можно записать в виде:

$$\begin{cases} \dot{p} = \dfrac{(I_{yy} - I_{zz})}{I_{xx}} qr + \dfrac{L_2}{I_{xx}} \\ \dot{q} = \dfrac{(I_{zz} - I_{xx})}{I_{yy}} pr + \dfrac{L_3}{I_{yy}} \\ \dot{r} = \dfrac{(I_{xx} - I_{yy})}{I_{zz}} pq + \dfrac{L_1}{I_{zz}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} L_2 = M_{xq} + M_{xm} + M_{xp} \\ L_3 = M_{yq} + M_{ym} + M_{yp}, \\ L_4 = M_{zq} \end{cases} \quad (6)$$

где $p = w_x, q = w_y, r = w_z$ – проекции вектора угловой скорости аппарата; I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – осевые моменты инерции аппарата; M_{xq}, M_{yq}, M_{zq} – моменты, создаваемые винтами, $M_{xm}, M_{ym}, M_{xp}, M_{yp}$ – гироскопические моменты двигателей и винтов.

На основании представленных уравнений определяется уравнение динамики квадрокоптера.

Практическая реализация полетного задания

Для реализации автономного полета, квадрокоптер должен выполнить следующие задачи [12]:

- выполнить автономный запуск двигателей и произвести взлет на заданную высоту;
- показать определенную цветовую индикацию на адресной светодиодной ленте;
- проследовать по заданному маршруту;
- выполнить автономную посадку и остановку двигателей.

Для реализации как одиночных ручных полетов при помощи оператора БПЛА, так и для автономных полетов необходимо установить следующие компоненты:

- полетный контроллер COEX Pix;
- приемник дистанционного управления Flysky FS-A8S;
- одноплатный компьютер Raspberry Pi 4;
- специализированная широкоформатная камера для Raspberry Pi 4;
- Адресуемая RGB-светодиодная лента.

Рассмотрим перечисленные выше узлы подробнее.

Полетный контроллер – устройство, обеспечивающее полет квадрокоптера, за счет управления газом, углами крена, тангажа и рысканья (throttle, pitch, roll, yaw). Это бортовой компьютер БАС. Обычно он содержит набор датчиков (гироскопы, акселерометр, магнитометр, GPS датчик) и микрокопроцес-

сор, который производит расчеты. Именно полетный контроллер отвечает за то, чтобы при среднем положении всех стиков пульта радиоуправления, квадрокоптер стабилизировался, висел в воздухе, не отклоняясь ни в одну из сторон.

Полетный контроллер выполняет следующие задачи:

– собирает информацию с датчиков (встроенных или внешних: гироскопы, акселерометры, GPS, магнитометр);

– расчет положения в пространстве на основе показаний датчика;

– собирает информацию о внешних воздействиях, таких как отклонения стиков пульта радиоуправления пилота;

– производит корректировку с использованием коэффициентов ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциального);

– отправляет сигналы управления на регуляторы скорости (ESC).

Для реализации автономного полета необходимо использовать одноплатный компьютер Raspberry Pi 4 для запуска программного кода и камеру для поиска и распознавания Aruco-маркеров с целью точного определения текущей позиции квадрокоптера в пространстве.

Raspberry Pi – это одноплатный компьютер, созданный на базе мобильного микропроцессора ARM. Он обладает низким энергопотреблением и может работать даже от солнечных батарей. Raspberry Pi входит в комплекты программируемого квадрокоптера Клевер. Raspberry Pi 4 обладает максимальным потреблением в 15W, операционной системой Linux и поддержкой подключения к полетному контроллеру через интерфейсы UART и USB.

Адресуемая RGB-светодиодная лента позволяет выставлять произвольные 24-битные цвета на каждый из отдельных светодиодов. Это позволяет сделать полет дрона более ярким, а также визуально получать информацию о полетных режимах, этапе выполнения пользовательской программы и других событиях.

Квадрокоптер при помощи нижней камеры распознает маркер и сопоставляет ID маркера с файлом карты всех меток, находящихся в полетной зоне. В файле-карте указаны координаты всех меток, с учетом их id-номера, а также размера самого маркера. За счет идентификации маркера при помощи машинного зрения, а также сопоставления id-номера распознанной метки и ее координат в файле-карте, дрон может достаточно точно определить текущие координаты, а также осуществить дальнейшую навигацию.

В представленном ниже фрагменте кода (рис. 2) производится автономный взлет, зависание над aruco-маркером на высоте 1 м, а затем полет к маркеру. Все поле меток заранее занесено в память квадрокоптера.

Платформа Клевера 4 позволяет использовать Raspberry Pi для того, чтобы запрограммировать автономный полет дрона. Чаще всего программа для автономного полета пишется на языке Python. Программа может получать телеметрию (заряд батареи, ориентацию, расположение и т. д.) и отправлять команды: полететь в точку, установить ориентацию, угловую скорость и другие функции.

Для того чтобы указать координаты точки, в которую должен переместиться дрон, используется сервис navigate (прилететь в обозначенную точку по прямой).

Параметры:

– x, y, z – координаты (м);

– yaw – угол по рысканью (радианы);

– yaw_rate – угловая скорость по рысканью (применяется при установке yaw в NaN) (рад/с);

– speed – скорость полета (скорость движения setpoint) (м/с);

– auto_arm – перевести коптер в OFFBOARD и заармить автоматически (коптер взлетит);

– frame_id – система координат, в которой заданы x, y, z и yaw.

–

```
import rospy
from clover import srv
from std_srvs.srv import Trigger
from mavros_msgs.srv import CommandBool
import math
import pigpio

rospy.init_node('flight')

get_telemetry = rospy.ServiceProxy('get_telemetry', srv.GetTelemetry)
navigate = rospy.ServiceProxy('navigate', srv.Navigate)
land = rospy.ServiceProxy('land', Trigger)
arming = rospy.ServiceProxy('mavros/cmd/arming', CommandBool)

def navigate_wait(x=0, y=0, z=0, yaw=float('nan'), speed=0.5, frame_id='', auto_arm=False, tolerance=0.20):
    navigate(x=x, y=y, z=z, yaw=yaw, speed=speed, frame_id=frame_id, auto_arm=auto_arm)

    while not rospy.is_shutdown():
        telem = get_telemetry(frame_id='navigate_target')
        #print(telem.z)
        if math.sqrt(telem.x ** 2 + telem.y ** 2 + telem.z ** 2) < tolerance:
            break
        rospy.sleep(0.2)
navigate(z = 1.5, frame_id = 'body', auto_arm = True)
rospy.sleep(5)

frame_id = ''
if dronepoint == '1':
    navigate_wait(x = 0.9, y = 0.9, z = 1.8, yaw = math.radians(90), frame_id = 'aruco_map', tolerance = 0.15)
    frame_id = 'aruco_105'
elif dronepoint == '2':
    navigate_wait(x = 2.7, y = 0.9, z = 1.8, yaw = math.radians(90), frame_id = 'aruco_map', tolerance = 0.15)
    frame_id = 'aruco_104'
else:
    land()
    rospy.sleep(4)
    arming = False

landing(frame_id)
rospy.sleep(3)
```

Рис. 2. Фрагмент исходного кода автономного полета квадрокоптера

Для навигации квадрокоптера во время взлета, посадки и выполнения полетной миссии используется frame_id – система координат для значений x, y, z, v_x, v_y, v_z. Для взлета применяется система координат body – координаты относительно квадрокоптера без учета наклонов по тангажу и крену. Во время использования данной системы координат считываются данные с датчиков, которые находятся в полетном контроллере без использования камеры, так как камера находится слишком близко к маркеру и распознать его не получится. Во время выполнения полетной миссии используется система координат aruco_N – координаты относительно маркера с ID=N.

Заключение

В рамках проверки работы автономной навигации, в лабораторных условиях был выполнен автономный полет по заданным координатам с целью поиска определенных объектов при помощи машинного зрения (рис. 3).

Рис. 3. Пример выполнения полетной миссии с поиском объектов

В результате испытаний удалось успешно выполнить автономный полет и обнаружить объект (на рис. 3 объект выделен в белую рамку и подписан в левом верхнем углу) и сохранить отчет в виде текстового документа и фотографии объекта с камеры квадрокоптера). При движении квадрокоптера вдоль заданной траектории погрешность позиционирования составила около 0,15 м с систематическим сдвигом, пропорциональным значению желаемой скорости. Достигнутая погрешность позиционирования квадрокоптера относительно желаемой траектории при анализе автономного полета составила 0,1−0,2 м.

Библиографический список

1. АЭРОНЕТ. Ассоциация эксплуатантов и разработчиков беспилотных авиационных систем. URL: https://aeronet.aero/ (дата обращения: 01.09.2020).

2. *Костин А. С., Богатов Н. В.* Вопросы современного развития рынка беспилотных летательных аппаратов // Системный анализ и логистика. 2019. № 4 (22). С. 65–72.

3. *Костин А. С., Майоров Н. Н.* Анализ пассажиропотока остановок городского транспорта на основе использования беспилотных авиационных систем // Организация и безопасность дорожного движения: материалы XIII Национальной научно-практической конференции с международным участием (Тюмень, 19 марта 2020 г.). Тюмень: ТИУ, 2020. С. 367–371.

4. *Maiorov N., Fetisov V., Krile S.* Forecasting the operational activities of the sea passenger terminal using intelligent technologies // Transport Problems. 2018. Vol. 13 (Issue 1). P. 27–36.

5. ООО «Коптер экспресс». COEX. URL: https://ru.coex.tech/ (дата обращения: 01.11.2020).

6. *Hoffmann G., Haomiao H., Wasland S.* Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment // Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Hilton Head, South Carolina, 2007.

7. Генератор Aruco-маркеров. URL: https://chev.me/arucogen/ (дата обращения: 01.09.2020).

8. *Munoz-Salinas R.* Aruco: a minimal library for augmented reality applications based on opencv. Universidad de Cordoba. 2012.

9. *Kim J., Kang M., Park S.* Accurate Modeling and Robust Hovering Control for a Quad-rotor VTOL Aircraft // Intell. Robotics Syst. 2010. Vol. 57. N 1–4. P. 9–26.

10. *Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Мальцев А. С.* Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории // Автометрия. 2012. № 5. С. 32–41.

11. *Engel J., Sturm J., Cremers D*. Accurate Figure Flying with a Quadrocopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing // Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012. P. 43–48.

12. *Фетисов В. А., Майоров Н. Н.* Практические задачи моделирования транспортных систем // СПб.: ГУАП, 2012. 185 с.

УДК 621.391.28

В. И. Курносов*
доктор технических наук, профессор
Н. П. Будко**
соискатель ученой степени кандидата технических наук
*Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии»
**Независимый специалист

МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

В статье рассмотрен способ построения системы интеллектуального мониторинга информационно-телекоммуникационной сети на основе модели, реализующей поэтапный принцип идентификации класса технического состояния сетевых элементов с использованием агентно-ориентированного подхода. Многоэтапный принцип принятия решения реализуется на уровнях распределенной телекоммуникационной системы: глобальном, региональном, локальном. Сначала на первом этапе (в обнаружителе) по обобщенному показателю проверяют систему на работоспособность и, в случае выявления аномалии (аварийного или предаварийного состояния системы), на последующих этапах (в распознавателе) осуществляют идентификацию ее действительного состояния. При этом рассылка интеллектуальных агентов осуществляется только при обнаружении аномалии в изменениях значений контролируемых параметров сетевых элементов и каналов связи, имеющих нумерацию по уровням иерархии системы. Предложенная процедура мониторинга сетевого оборудования приводит к существенному сокращению объема измерительной информации и общего времени проверок. Получено условие, минимизирующее ошибку идентификации класса технического состояния, а также позволяющее определить оптимальные значения порогов классификации состояния элементов сетевого оборудования.
Ключевые слова: интеллектуальный мониторинг, классы технического состояния, информационно-телекоммуникационная сеть, идентификация, критерий Байеса.

V. I. Kurnosov*
Dr. Sc. Tech., Professor
N. P. Budko**
Doctoral Student
*Joint-Stock Company «INTELTECH»
**Independent Specialist

METHOD OF DISTRIBUTED INTELLIGENT MONITORING OF THE FUNCTIONAL STATE OF A PUBLIC INFORMATION AND TELECOMMUNICATIONS NETWORK

The article describes a method for constructing an intelligent monitoring system for an information and telecommunications network based on a model that implements the step-by-step principle of identifying the class of technical condition of network elements using an agent-based approach. The multi-stage decision-making principle is implemented at the levels of a distributed telecommunica-

tions system: global, regional, and local. First, at the first stage (in the detector), the system is checked for operability by a generalized indicator and, in the case of an anomaly (an emergency or pre-emergency state of the system), at subsequent stages (in the recognizer), its actual state is identified. At the same time, the distribution of intelligent agents is carried out only when an anomaly is detected in changes in the values of the monitored parameters of network elements and communication channels that are numbered according to the levels of the system hierarchy. The proposed procedure for monitoring network equipment leads to a significant reduction in the volume of measurement information and the total time of inspections. A condition is obtained that minimizes the error of identifying the technical condition class, and also allows determining the optimal values of the thresholds for classifying the state of network equipment elements.
Keywords: intellectual monitoring, technical condition classes, information and telecommunications network, identification, Bayes criterion.

Введение

Активное использование на современном этапе развития общества информационных технологий (ИТ) опирается на широкое проникновение во все сферы производства и общественной жизни информационно-телекоммуникационных сетей (ИТКС) и систем разной сложности и территориальной распределенности. При этом ИТКС справедливо относят к системам непрерывного режима работы с высокой доступностью, когда должна быть обеспечена безотказность работы элементов системы и их сервисов 24 часа в сутки 7 дней в неделю 365 дней в году, поскольку каждая минута простоя влечет за собой существенные издержки для телеком-оператора. Это значит, что любые сбои и отказы на ИТКС ведут к существенным финансовым и репутационным потерям операторов и их клиентов, выводя на первый план для телекоммуникационной отрасли задачи обеспечения надежности функционирования сетевых элементов на каждом из иерархических уровней системы и нивелирования дестабилизирующих воздействий среды распространения информационных сигналов (каналов связи).

С целью оперативного выявления критических аномальных ситуаций и сокращения времени их устранения на ИТКС в последние годы много внимания уделяется вопросам построения автоматизированных систем мониторинга, обеспечивающих постоянное наблюдение и периодический анализ изменения технического состояния сетевых элементов. Повсеместно, в министерствах и ведомствах (корпорациях) создаются ситуационные центры, имеющие одним из основных сегментов – сегмент мониторинга состояния подконтрольного пространства [1]. И это оправданно, поскольку в соответствии с докладом ACFE организации применяющие в повседневной деятельности инструменты мониторинга и прогноза в ИТ системах снижают свои потери на 60 % по сравнению с организациями, их игнорирующими [2].

При разработке систем сетевого мониторинга на ИТКС исследуемые характеристики отклонения эксплуатационных параметров от нормы возможно получить как в результате процедур пассивного мониторинга, применяя встроенную систему контроля сетевого элемента, или дистанционно на сервере мониторинга путем активного опроса периферии с помощью агентного подхода, когда в качестве интеллектуальных агентов используются управляющие пакеты, реализующие управление техническим состоянием сетевых элементов, переводя их на резерв

или приводя в нормальный режим функционирования. Причем встроенная система контроля (мониторинга) функционирует на локальном уровне системы, и в интересах периферийного устройства определяет «аномальное» техническое состояние относительно «нормального» его состояния на основе статистических данных характеристик (параметров) сетевого элемента. А сервер мониторинга, просматривая систему широким оперативным полем (агентный подход) способен решать проблемы функциональной безопасности всей ИТКС, не допуская ее блокировки, снижения уровня надежности и деградации.

Цель статьи – разработка метода распределенного интеллектуального мониторинга функционального состояния ИТКС на основе агентно-ориентированного подхода, реализующего поэтапный принцип выявления аномального состояния ее сетевых элементов.

Мультиагентный подход к моделированию системы мониторинга ИТКС

Представим ИТКС в виде территориально-распределенной системы, имеющей иерархическую структуру и позволяющей осуществлять перераспределение функций мониторинга (сервера мониторинга) в зависимости от текущего на данный момент времени состояния системы (ее сетевых элементов) (рис. 1). Такое видение структуры ИТКС позволяет уйти от строгой централизации управления сетью к децентрализованному управлению. Действительно, управление глобальной системой, такой как ИТКС, не может быть строго централизованным в силу задержек, изменений текущего состояния сети и огромного потока управляющей информации (из опыта эксплуатации сети ARPA в конце 60 годов прошлого века в США – сеть блокировалась только за счет огромного объема управляющей информации без поступления реальной нагрузки). В алгоритмах работы современных сетей связи производительность системы зависит от принимаемых решений, которые принимаются с учетом текущего состояния сети, ее деградации и дестабилизирующих воздействий внешней среды. В связи с этим возникает самостоятельная задача динамического управления системой.

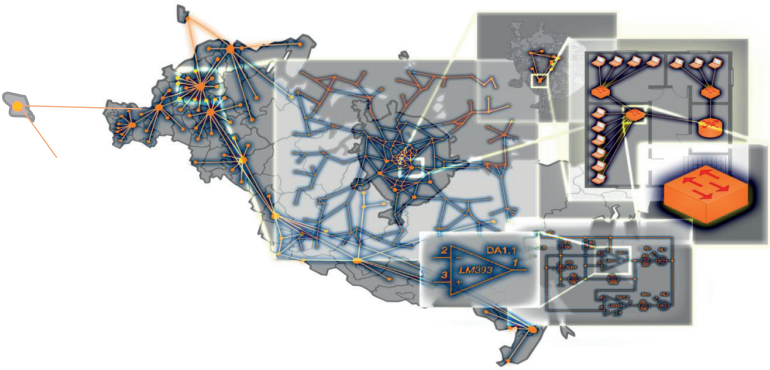


Рис. 1. Уровни разукрупнения информационно-телекоммуникационной системы

Такое представление ИТКС позволяет реализовать поэтапный процесс мониторинга, когда на первом этапе по локальной измерительной информации о состоянии периферии определяется наличие нарушения режима работы, а на втором и последующих этапах уточняется степень и тип нарушения. При этом каждый из этапов связан с соответствующим уровнем иерархии сетевой структуры. При обнаружении аномалии в изменениях значений контролируемых параметров сетевых элементов и каналов связи осуществляется рассылка интеллектуальных агентов, имеющих нумерацию по уровням иерархии ИТКС (рис. 2). Аномалией на сетевой структуре при этом понимается такое состояние сетевого элемента, при котором наблюдается отклонение подконтрольного параметра за пределы допуска (порога).

Важность реализации распределенной обработки информации в ИТКС ставит вопрос разработки новых методов управления информационными ресурсами, на основе мониторинга состояния сетевых элементов, которые позволяют повысить оперативность обмена данными, а также существенно сократить объемы циркулирующей по сети управляющей и измерительной информации, не снижая качество функционирования системы в целом. Организация управления ресурсами ИТКС сегодня включает следующие мероприятия: сбор измерительной информации о состоянии сетевых элементов, анализ качественных характеристик работы коммуникационного оборудования, применение решения о состоянии сети и выработке управляющих воздействий. Реализация же задач системы мониторинга сетевых элементов достигается путем выполнения следующего функционала: сбор оперативных и статистических данных о качестве работы ИТКС; сбор данных о нагрузках сетевого оборудования и каналов связи; динамический контроль сетевых вычислительных и телекоммуникационных процессов, ВВХ доставки информации, а также выработка решений по поддержанию их в заданных пределах; распределение по сегментам сети информации об изменениях структуры и о ее функциональном состоянии.

Данные функции, получившие название сетеметрии, позволяют сформулировать задачу управления сетевыми ресурсами с позиции математической статистики. Она входит в круг задач идентификации состояния сети и представляет собой задачу различения гипотез. Из анализа функций управления текущее состояние системы можно описать вектором $S=S\,(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ в n-мерном пространстве признаков, формируемом из пространства исходного описания. При этом теория статистических решений позволяет найти метод, основанный на результатах анализа, дающих с минимальной вероятностью ошибки ответ на вопрос, к какому из двух множеств N или $\overline{N}$ относится данное конкретное состояние системы и соответствующий ему вектор S, где $N \in \overline{A}$ – нормальное состояние системы; $\overline{N} \in A$ – аномальное ее состояние.

В процессе определения класса технического состояния имеют место ошибки: первого рода α, когда гипотеза $U_1(S=\overline{N})$ отклоняется, хотя она справедлива; и второго рода β, когда принимается гипотеза $U_2(S=N)$, но оказывается справедливой гипотеза $U_1(S=\overline{N})$.

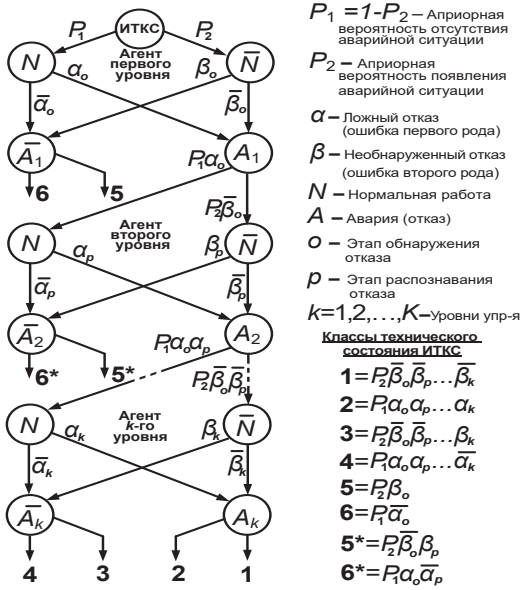


Рис. 2. Вероятностный граф выявления аварийной (аномальной) ситуации на ИТКС

В качестве основного решающего правила системы мониторинга выбран критерий Байеса, обеспечивающий наивысшую точность решения двуальтернативных задач идентификации. При этом необходимо минимизироть средний риск W, или среднюю стоимость принятия решения о наличии ошибок первого и второго рода: $W = \delta_a \cdot \alpha + \delta_b \beta$, где δ_a – вес ошибки первого рода, а δ_b – вес ошибки второго рода. Запишем данное решающее правило:

$$S \in N, \text{ если } \frac{P(x_1,...,x_n / N}{P(x_1,...,x_n / \overline{N})} > \frac{\delta_a P(\overline{N})}{\delta_b P(N)} = \theta;$$

$$S \in \overline{N}, \text{ если } \frac{P(x_1,...,x_n / N}{P(x_1,...,x_n / \overline{N})} << \frac{\delta_a P(\overline{N})}{\delta_b P(N)} = \theta,$$

где $P(x_1,..,x_n / N)$ и $P(x_1,...,x_n / \overline{N})$ – условные плотности вероятности нормального и аварийного состояния ИТКС соответственно, $P(\overline{N}) = 1 - P(N)$ – априорная вероятность возникновения аварии. Это правило минимизирует средний риск и сравнивает отношение вероятностей с порогом θ, который является постоянной величиной для значений весов δ_a и δ_b. Его называют критерием Байеса, а отношение $L(x_1,...,x_n) = \dfrac{P(x_1,...,x_n / N)}{P(x_1,...,x_n / \overline{N})}$ – отношением правдоподобия.

Условные плотности вероятности P(x/N) и $P(x/\overline{N})$ формируются в процессе обучения системы мониторинга, при этом следует допустить, что они оказываются близкими к истинным, поскольку критерий Байеса обеспечивает наивысшую точность решения двуальтернативных задач распознавания (идентификации) [3].

Выбор порогов классификации технического состояния ИТКС

Поскольку на *k*-м этапе подсистема мониторинга может совершать ошибки первого $\alpha(x_{0k})$ и второго рода $\beta(x_{0k})$, то необходимо решение задачи выбора порогов x_{0k} на К этапах. Тогда с учетом принятых обозначений запишем выражения для определения вероятности ложной тревоги (ЛТ) $\alpha(x_{0k}) = \int\limits_{x_{0k}}^{\infty} f(x_k / N)dx_k$ и пропуска отказа (ПО), $\beta(x_{0k}) = \int\limits_{-\infty}^{x_{0k}} f(x_k / \overline{N})dx_k$.

Исходя из представленного на рис. 2 вероятностного графа получим суммарные ошибки пропуска отказа $P_{\text{пр}} = P_2\left[1 - \prod\limits_{k=1}^{K} \beta(x_{0k})\right]$ и ложной тревоги $P_{\text{лт}} = P_1 \cdot \prod\limits_{k=1}^{K} \alpha(x_{0k})$ для всей системы, где P_1=1 – P_2 – априорная вероятность появления аварии, P_2 – априорная вероятность ее отсутствия. В соответствии с критерием Неймана-Пирсона зафиксируем вероятность $P_{\text{лт}}$ на заданном уровне и минимизируем $P_{\text{пр}}^{\min}$. Минимизация $P_{\text{пр}}$, в которой переменные x_{0k} связаны функциональной зависимостью $P_{\text{лт}}$, является задачей условной оптимизации с функционалом:

$$\Phi = P_2\left[1 - \prod_{k=1}^{K} \beta(x_{0k})\right] + \lambda P \prod_{k=1}^{K} \alpha(x_{0k}),$$

где λ – неопределенный множитель Лагранжа. Найдя частные производные $\partial\Phi/\partial x_{0k}$, получим систему К уравнений, что совместно с уравнениями для $P_{\text{пр}}$ и $P_{\text{лт}}$ позволит найти множитель λ и К переменных x_{0k}. Продифференцировав результат в полученных уравнениях искомыми будут оптимальные пороги классификации на каждом этапе $(x_{01}^*, x_{02}^*, ..., x_{0k}^*, ..., x_{0K}^*)$, минимизирующие вероятность пропуска отказа $P_{\text{пр}}^{\min}$, связанную с наименьшей вероятностью ошибки возникновения аварии. Это решение позволяет однозначно определить вероятность применения правильного решения об отсутствии отказа в работе подсистем ИТКС: $\overline{P}_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{пр}}^{\min}$. На последующих этапах анализу подвергается информация о при-

нятии верного решения $\overline{\beta}_k = 1 - \beta_k$, то есть о нормальном функционировании ИТКС.

Поскольку решение о нормальном функционировании системы на первом этапе может быть принято на основе локальной информации о состоянии сетевого узла, например, загрузка процессора, объем буферной памяти и др.), то нет необходимости обмена информацией с другими узлами сети. На втором и последнем этапах наряду с $\overline{P}_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{пр}}^{\min}$ анализу подвергается та часть информации, которая обусловливает появление вероятностей ложной тревоги: $P_1\alpha_1, P_1\alpha_1\alpha_2 ..., P_1\alpha_1\alpha_2 ..., \alpha_k$ и которая должна подвергаться дальнейшему анализу.

Значение $P_{\text{лт}} = P_1\alpha_1(1 + \alpha_2 + \alpha_2\alpha_3 + ... + \alpha_2\alpha_3 ... \alpha_k)$ определяет ту часть потока информации, принятой за 1, которая подлежит анализу на втором и последующих этапах. Фактически она определяет степень сокращения η_c объема информации, которая должна передаваться между узлами сети для уточнения типа нарушения:

$$\eta_{\text{c}} = 1/P_1\alpha_1(1 + \alpha_2 + \alpha_2\alpha_3 + ... + \alpha_2\alpha_3 ... \alpha_k).$$

Выводы

Поэтапная принцип мониторинга обеспечивает наивысшую точность (не хуже байесовой) выявления аномалии на ИТКС, поскольку использует на каждом из этапов (уровнях) независимые признаки распознавания, при этом степень сокращения объема измерительной информации зависит от величины ошибок первого рода, возникающих на каждом из этапов. На последнем, *k*-м этапе работы интеллектуального агента системы мониторинга рис. 2 выделены финальные вероятности состояния системы, по которым определяются классы ее технического состояния: «1» – ИТКС заблокирована, отказ обнаружен и распознан; «2» – ИТКС работоспособна, ложное обнаружение и распознание; «3» – ИТКС заблокирована, отказ обнаружен, но не распознан; «4» – ИТКС работоспособна, ложное обнаружение не распознано; «5» – ИТКС заблокирована, отказ не обнаружен; «6» – ИТКС работоспособна и признана таковой.

Библиографический список

1. *Зацаринный А. А., Шабанов А. П.* Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров. М.: Торус Пресс, 2015. 232 с.

2. Report to the Nations on Occupational Fraud and Abuse. URL: https://www.acfe.com/rttn/docs/2014–report-to-nations.pdf (дата обращения: 06.12.2017).

3. Инфокоммуникационные сети: энциклопедия. Кн. 4: Гетерогенные сети связи: принципы построения, методы синтеза, эффективность, цена, качество / П. А. Будко, И. А. Кулешов, В. И. Курносов, В. И. Мирошников; под ред. проф. В. И. Мирошникова. М.: Наука, 2020. 683 с.

УДК 004.414.2

В. И. Курносов*
доктор технических наук, профессор
Н. П. Будко**
соискатель ученой степени кандидата технических наук
*Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии»
**Независимый специалист

СТРУКТУРА СЕРВЕРА МОНИТОРИНГА СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Предложена структура построения сегмента мониторинга состояния подконтрольного пространства информационно-телекоммуникационной сети в составе ситуационного центра общего назначения. Ключевым элементов сегмента мониторинга является сервер мониторинга, структурно включающий сборщик сырых данных, базу данных временных рядов и HTTP сервер.
Ключевые слова: информационно-телекоммуникационная сеть, ситуационный центр, обработка больших данных, база данных временных рядов, метрики системы мониторинга.

V. I. Kurnosov*
Dr. Sc. Tech., Professor
N. P. Budko**
Doctoral Student
*Joint-Stock Company «INTELTECH»
**Independent Specialist

STRUCTURE OF THE MONITORING SERVER OF THE SITUATION CENTER OF THE GENERAL PURPOSE INFORMATION AND TELECOMMUNICATIONS SYSTEM

The structure of building a segment for monitoring the state of the controlled space of an information and telecommunications network as part of a general-purpose situation center is proposed. The key element of the monitoring segment is the monitoring server, which structurally includes a raw data collector, a time series database, and an HTTP server.
Keywords: information and telecommunications network, situation center, big data processing, time series database, metrics of the monitoring system.

Введение

Анализ функционирования сложных организационно-технических объектов, увеличение количества элементов и подсистем современных территориально-распределенных производственных комплексов страны предполагает соответствующее развитие межведомственных систем управления и телекоммуникаций, приобретающих, с одной стороны, характер пространственной рассредоточенности, а с другой – полной автоматизации и автономности, и направленных на реализацию задач, сопряженных, как правило, с доведением управляющей информа-

ции в режиме реального времени [1]. При этом необходимо отметить, что современный этап развития сложных организационно-технических систем характеризуется повсеместным использованием информационных технологий (ИТ) на базе внедрения концепции «Индустрия 4,0» («умный» город, промышленный интернет, интернет вещей и пр.), в качестве основы которой используются различного рода системы, сети и телекоммуникации. В связи с чем на современном этапе необходимо развитие ИТ, обеспечивающих обработку больших объемов информации, от разных источников, распределенных территориально и в пространстве.

Сегодня все чаще слышатся утверждения о том, что современная Россия живет в условиях «ручного управления», при этом оперативные решения вырабатываются по уже свершившимся фактам, а долговременные аналитические прогнозы на государственном уровне фактически не работают или полностью отсутствуют [2]. Это говорит о все более возрастающей роли, создаваемой в последние годы практически во всех ведомствах и корпорациях сети ситуационных центров, как службы эффективной аналитической деятельности в сфере государственного управления с учетом информационных, технических, технологических и когнитивных аспектов развития отраслей народного хозяйства и целых регионов страны.

Ситуационный центр как элемент сбора информации об объекте управления

Ситуационный центр (СЦ), в соответствии с [3] – это комплекс, концентрирующий информацию о подконтрольном пространстве от различных источников и обеспечивающий ситуационное управление, принятие управленческих решений с широким использованием информационно-коммуникационных технологий, моделей и методов ситуационного анализа.

В свою очередь ситуационное управление как система становится эффективной, когда необходимо, чтобы «управляющие воздействия субъекта управления основывались на анализе вариантов принятия решения с учетом текущего состояния объекта управления, располагаемых вариантов действий и прогноза последствий принимаемых управленческих воздействий» [4]. Такая необходимость практически постоянно присутствует, если объектами управления являются большие и сложные элементы, по своей природе являющиеся социотехническими системами.

Именно для таких системных объектов существует высокая вероятность возникновения под влиянием внутреннего и внешнего воздействий совокупности обстоятельств, нарушающих заданное функционирование, требующее перевода в новое состояние для исключения нарушения штатного режима, или обеспечения большей эффективности функционирования. Исходя из этого, СЦ сложных распределенных объектов должен включать в себя следующие компоненты:

– комплексы аппаратно-программных средств отображения, хранения и защиты информации, средства для телекоммуникации, автоматизации и жизнеобеспечения, а также средства общего и общесистемного программного обеспечения;

– комплексы специального программного обеспечения, которые реализуют исполнение основных функциональных задач ситуационного центра;

– должностных лиц, подготовленных к эффективному применению ситуационного центра и поддержания его подсистем в заданных режимах функционирования [2].

Организационно СЦ состоит из сегментов: руководства органа государственного управления (ОГУ); мониторинга состояния подконтрольного пространства (распределенной ИТКС); ситуационного анализа и поддержки принятия решений; администрирования и эксплуатации АПС и средств защиты информации (СЗИ) (рис. 1) [2].

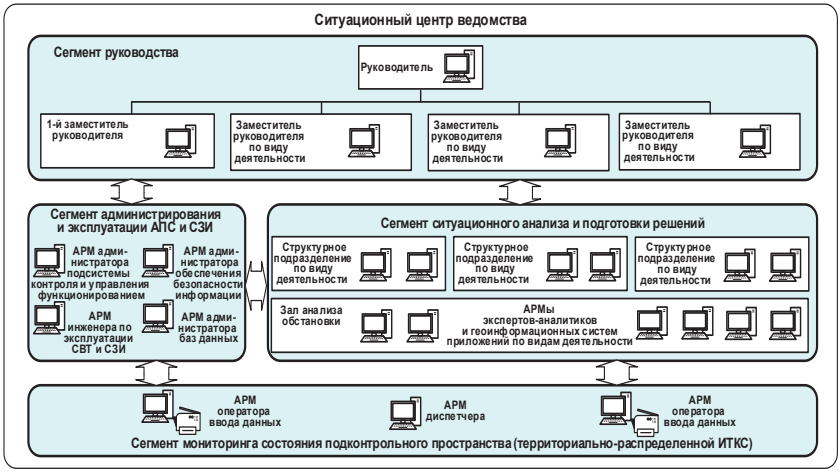


Рис. 1. Организационно-техническая структура ситуационного центра

Анализ технологий поддержания функциональной безопасности ИТКС на СЦ

В настоящее время в телекоммуникационной отрасли активно разрабатываются технологии поддержания функциональной безопасности ИТКС и систем, направленные на обеспечение их эксплуатационной надежности. К одной из таких технологий, все более настойчиво завоевывающей рынок IT-услуг для телекомоператоров, относится технология SRE (Site/System Reliability Engineering), рассматриваемая в виде набора инженерных практик, поддерживающих надежную и безотказную работу приложений в настоящем и будущем. Данная технология ориентирована на способность обнаруживать аномальные ситуации и проблемы в работе ИТКС до того, как о них сообщат абоненты. Здесь слово «site» применено в широком смысле и означает обеспечение функциональной надежности на всех логических уровнях ИТКС. Концепция технологии SRE ориентирована на решение внутренних задач ИТКС с четким измерением времени безотказной работы ее

элементов и сервисов, а также точного определения их доступности с учетом требуемой масштабируемости и внезапных форс-мажоров. Технология предполагает устранение организационных барьеров между функциями специалистов по разработке специального программного обеспечения (СПО) и специалистов по информационно-технологическому обслуживанию ИТКС при взаимной интеграции их рабочих процессов друг в друга как при использовании единых индикаторов оценки (метрик) функциональной безопасности, так и общей ответственности всех участников предоставления информационно-телекоммуникационных услуг на всех этапах жизненного цикла ИТКС.

Одной из задач технологии SRE является вычисление и поддержание заданного уровня доступности к элементам ИТКС. При этом уточняется, какие именно показатели эксплуатационной надежности системы должны быть под постоянным мониторингом, измеряться и оцениваться. Обычно в SLA-договоре между поставщиком телекоммуникационной услуги и ее получателем [5] в разделе описания процесса управления доступности указываются следующие метрики оценки качества IT сервиса [6]: доступность (availability); производительность (performance); надежность (reliability); сопровождаемость (maintainability); обслуживаемость (serviceability); безопасность (security). При этом в SLA-договоре устанавливается регламент взаимоотношений с внешними потребителями, в то время как SRE технология необходима в первую очередь для внутреннего пользования и взаимодействия служб технической поддержки ИТКС. Собственно, поэтому требования, предписанные к качеству сервиса SRE стандартом, как правило, выше, чем те, которые приведены в SLA-договоре.

К примеру, индикаторами доступности SRE являются следующие метрики времени: SLI (Service Level Indicator) – пропускные способности, задержки запросов, количество запросов в секунду, число сбоев на запрос. Данные метрики сначала агрегируются во времени и переводятся в среднее (или в %) по сравнению с порогом; SLO (Service Level Objective) –целевые показатели метрик времени SLI за отчетный временной период: год, квартал, месяц и пр.

При этом необходимо отметить, что всякие простои ИТКС грозят для телеком-оператора убытками, в связи с чем важно представлять текущие значения метрик SRE в режиме on-line [7]:

RPO (Recovery Point Objective) – максимальный период времени, за который могут быть потеряны данные в результате инцидента (целевая временная точка восстановления ИТКС). Для телеком-оператора данный показатель необходимо минимизировать, и в идеале, свести к нулю, RPO → 0. Такие инструменты, например, как автоматическая репликация данных в файловой системе снижает RPO, но для высокой доступности всего сервиса только этого недостаточно. Вычисление значения RPO относится к задачам DevOps и SRE инженеров;

RTO (Recovery Time Objective) – интервал времени, в течение которого ИТКС может быть недоступной в случае отказа или аварии (целевое время восстановления системы). Данное время необходимо для восстановления полного функционирования системы (сервиса) после возникновения аварии. SRE инже-

неры должны организовать систему так, чтобы с использованием различных технологий отказоустойчивости и восстановления данных из резервных копий восстановить работоспособность системы на резервном сервере (оборудовании), площадке. Задачей оптимизации является минимизация значений RPO и RTO.

Также важно отметить, что только режим реального времени для сетевого мониторинга поможет иметь телеком-оператору объективную картину метрик SRE для различных потребителей и их доступа к приложениям ИТКС. При этом, если в SLA-договоре оговариваются лишь отношения с внешним потребителем услуг, то SRE метрики необходимы в большей степени самому оператору для выработки общей ответственности его технического персонала и SRE инженеров за доступ к приложению (сервису) при функционировании ИТКС.

Только постоянный мониторинг качественных параметров ИТКС в совокупности с общей системой управления, сбора и обработки измерительной информации реального масштаба времени могут дать объективную картину поддержания функциональной безопасности ИТКС в плане обеспечения доступа к их приложениям (сервисам). Причем данные приложения условно могут быть разделены на две основные группы [8]: приложения, при неудовлетворительной работе которых может наступить уголовная ответственность пользователя (работа критически важных приложений); приложения, использование которых при низком качестве сетевых услуг несет финансовые и репутационные потери пользователя.

В этих случаях SRE метрики могут быть положены в основу судебных претензий к телеком-оператору, как поставщику услуг при включении в SLA-договор их качества.

Таким образом, сетевой мониторинг в SRE метриках на сегодня является единственным объективным и надежным методом (технологией) оценки параметров эффективного функционирования ИТКС, что требует разработки и совершенствования SRE инструментария.

Структура сервера мониторинга ИТКС общего назначения

Как было указано выше, одним из основных сегментов СЦ является сегмент мониторинга, который представлен комплексом программных средств, предназначенных для сбора, обработки и хранения метрик объектов мониторинга, а также выдачи оповещений о нестандартных ситуациях в ИТКС. Ключевым элементов сегмента мониторинга СЦ является сервер мониторинга, который с позиции области применения и наблюдаемого пространства может формироваться по областям применения различно. Для мониторинга функционального состояния ИТКС общего назначения предложен следующий вариант его построения (рис. 2).

Структурно сервер мониторинга состоит из сборщика сырых данных, базы данных временных рядов и HTTP сервера, функционирующих во взаимодействии с объектами мониторинга, и подсистемой оповещения и подсистемой отображения других сегментов СЦ. Сборщик сырых данных опрашивает объекты мониторинга по протоколу http и помещает собранные метрики в базу дан-

ных временных рядов. В базе данных хранятся метрики мониторинга за одним и тем же объектом на протяжении заданного времени наблюдений. Таким образом, возможно определение изменений значений параметров объекта во времени.

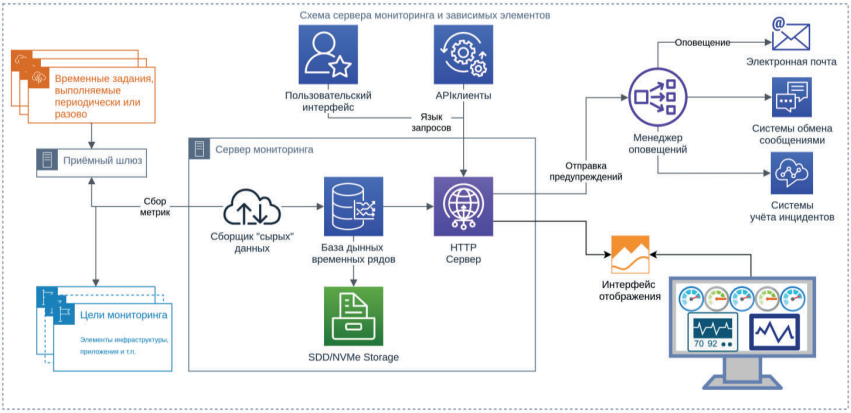


Рис. 2. Структурная схема сервера мониторинга ИТКС и зависимых элементов

К объектам мониторинга относятся объекты (сетевые элементы) контролируемого пространства ИТКС, с которых собираются метрики. Они могут предоставлять информацию в виде, понятном для сервера мониторинга. В противном случае необходима разработка вспомогательного программного обеспечения (ПО), которое преобразует данные, предоставляемые объектом мониторинга в понятный для сервера мониторинга вид. Для многих программных и аппаратных средств такое ПО уже существует, например, для мониторинга операционной системы (Windows, Linux), или оборудования mikrotik, но для многих продуктов таких агентов не существует, поэтому требуется разработка необходимого ПО специалистами сегмента мониторинга СЦ, в зависимости от используемой аппаратно-программной платформы.

Подсистема оповещения предназначена для оповещения диспетчера сегмента мониторинга о нестандартных ситуациях, при выходе метрики (какого-либо параметра) за пределы пороговых значений. Она состоит из менеджера оповещений, который принимает сигналы от сервера мониторинга и клиентов, интегрирующих систему оповещения с каналами оповещения. Оповещения могут приходить к конечному пользователю системы мониторинга по любым каналам: звуковая и световая сигнализация, e-mail, мессенджеры (telegram, whatsapp, jabber и т. д.), sms. Выбор способа оповещения ограничен возможностями системы мониторинга.

Подсистема отображения предназначена для визуального отображения собираемой измерительной информации и ее оценочных значений после обработки. Как правило, она состоит из интерфейса, который собирает данные о значениях

необходимых метрик объектов мониторинга за установленный промежуток времени из базы данных временных рядов и размещают их на экране в виде интерактивных графиков, таблиц, диаграмм, схем, которые отображают параметры текущего функционального состояния объектов мониторинга. При этом у оператора сервера мониторинга всегда имеется возможность выбрать конкретный интерфейс или конкретный вид нагрузки на целевом сетевом элементе и его компонентах (рис. 3).

Рис. 3. Интерфейс подсистемы отображения базовых метрик, собранных с целевого узла ИТКС за последние 24 часа: верхний ряд – текущие характеристики с обновлением каждые 15 секунд; статистика по использованию процессора; статистика по использованию оперативной памяти; суммарная скорость передачи на всех сетевых интерфейсах; использование жестких дисков

Выводы

Таким образом, предложена архитектура сегмента мониторинга функционального состояния информационно-телекоммуникационной сети в составе ситуационного центра общего назначения. Ключевым элементов сегмента мониторинга является сервер мониторинга, структурно включающий сборщик сырых данных, базу данных временных рядов и HTTP сервер. Предложен вариант построения интерфейса отображения базовых метрик сервера мониторинга.

Библиографический список

1. *Виноградeнко А. М.* Методология интеллектуального контроля технического состояния автоматизированной сети связи специального назначения: монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. 180 с.

2. *Зацаринный А. А., Шабанов А. П.* Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров. М.: Торус Пресс, 2015. 232 с.

3. *Зацаринный А. А., Королев В. И.* Информационная безопасность ситуационных центров // Системы и средства информатики. 2016. Т. 26. № 1. С. 121–138.

4. *Зацаринный А. А., Сучков А. П.* Системы ситуационных центров специального назначения. Основные определения, понятия и подходы к созданию // Межотраслевая информационная служба. 2015. № 4. С. 31–41.

5. URL: https://www.osp.ru/itsm/2012/09/13017362.html (дата обращения: 21.03.2021).

6. URL: https://olontsev.ru/2016/04/rpo and rto/ (дата обращения: 21.03.2021).

7. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Соглашение_об_уровне_услуг (дата обращения: 21.03.2021).

8. *Сторожук М.* Использование систем мониторинга сетей для обеспечения работы критически важных приложений // Первая миля. 2021. № 1. С. 40–44.

УДК 65.012.1; 656.072

Н. Н. Майоров*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЗИЦИИ ТРАНСПОРТНОГО ТЕРМИНАЛА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦИФРОВОЙ «CIRCOS» МОДЕЛИ

Современные порты и терминалы (транспортные узлы) являются сложными техническими системами, эффективность которых зависит от параметров внутренних процессов, и их организации работы и влияния внешней среды. Одним из измеряемых, на основе статистических данных по работе за отчетный период, параметров является состояние терминала по обработке входящего потока и его положение относительно других терминалов. Вопрос определения положения терминала относительно других актуален в случае как конкуренции, так и при формировании стратегии развития, изменения и модернизации инфраструктуры. Сегодня необходимо использование моделей и методов, которые позволяют получить полную системную картину положения транспортного узла, его взаимосвязи с другими терминалами для формирования набора переменных для принятия решений по модернизации инфраструктуры. В статье предложена математическая модель, и приведено практическое решение определения состояния транспортного терминала в регионе, относительно других терминалов, на основе использования Circos-модели и ее графической реализации. Предложенное решение связывает как данные выбранного терминала, так и существующие маршрутные сети, что позволяет произвести многокритериальное исследование и оценить взаимное влияние перевозчика и терминала. Предложенное решение применимо как для оперативного исследования эффективности работы, так для решения вопроса прогнозирования развития терминала, моделирования различных сценариев изменения инфраструктуры с целью изменения положения и роли транспортного узла в регионе.
Ключевые слова: транспортная инфраструктура, моделирование, circus модель, интенсивность, состояние терминала.

N. N. Maiorov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

RESEARCH OF THE TRANSPORT TERMINAL POSITION BASED ON THE ANALYSIS OF THE DIGITAL «CIRCOS» MODEL

Modern ports and terminals (transport hubs) are complex technical systems, the efficiency of which depends on the parameters of internal processes, and their organization of work and the influence of the external environment. One of the measurable parameters, based on statistical data on the work during the reporting period, is the state of the terminal for processing the incoming flow and its position in relation to other terminals. The issue of determining the position of the terminal in relation to other terminals is relevant in the case of competition, as well as in the formation of development strategy, changes and modernization of infrastructure. Today, it is necessary to use models and methods that provide a complete system picture of the position of a transportation hub, its relationship with other terminals to form a set of variables for decision-making on infrastructure modernization. This article offers a mathematical model and a practical solution for determining the state of a transport terminal in a region, relative to other terminals, based on the use of the Circos model. The proposed solution connects both the data of the selected terminal and the existing route networks,

which allows for a multi-criteria study in assessing the mutual influence of the carrier and the terminal. The proposed solution can be used both for operational research of operational efficiency and for solving the issue of forecasting the terminal development, modeling various scenarios of infrastructure changes in order to change the position and role of the transport hub in the region.
Keywords: transport infrastructure, modeling, circos model, circos graph, intensity, terminal condition.

Введение

Современные транспортные узлы, порты, терминалы, аэровокзалы являются как центрами ускорения обработки пассажиров, грузов, так и центрами, которые выдвигают новые требования к инфраструктуре и транспортным средствам. Ввиду сложности процессов организации и согласованной работы служб и подразделений, терминалы активно внедряют информационные системы, новые измерительные и аппаратные комплексы для анализа работы и получения данных по наличию слабых мест как в технологических процессах, так и для поддержания требуемого качества работы. Кроме внутренних параметров необходимо анализировать и интенсивность работы соседних терминалов, которые могут выступать конкурентами на рынке, как за пассажиропоток, так и за грузопоток. В этом случае для качественной модернизации инфраструктуры, направленной на увеличение и рост терминала, привлечения новых перевозчиков, необходимо использование моделей и методов и информационных систем, которые позволяют как фиксировать текущее состояние транспортной системы и терминала, так и моделировать различные состояния. Данное направление позволяет на качественно новом уровне решать вопросы прогнозирования развития, формировать стратегические предложения по изменению положения как в регионе, так и на мировом уровне. Ввиду взаимозависимости многих участников процесса необходимо принимать во внимание взаимозависимость систем «внешняя среда – терминал – система компаний перевозчиков». Классические модели развития портов и терминалов [1, 2] при их практическом применении для определения модернизации инфраструктуры необходимо корректировать на основе предлагаемых circos-моделей, которые требует выполнения шагов по преобразованию данных.

Определение состояния транспортной системы

Современные процессы в экономике напрямую влияют на развитие и изменения портов, терминалов и самих транспортных систем. При этом, конечно, имеет место взаимное влияние таких систем. Необходимо отметить, что любой терминал (грузовой, пассажирский) исторически сформировывался и функционирует под воздействием определенного набора уникальных факторов, которые и определяют сегодня его положение и уникальность порта в регионе. Время на принятие решений по модернизации инфраструктуры сокращается. Терминальная инфраструктура должна быть готова обработать входной поток транспортных средств без сбоев и возможных задержек. Поэтому крайне актуально использование именно информационных систем и аппаратных комплексов для анализа интенсивностей работы, которые необходимо объединять в единую транспортную информационно-аналитическую систему. Для использования нахождения поло-

жения терминала в регионе необходимо определить модель взаимодействия «внешняя среда – терминал – система компаний перевозчиков», представлена на рис. 1. Именно на основе данных взаимодействия этих систем определяется эффективность будущего решения по модернизации инфраструктуры.

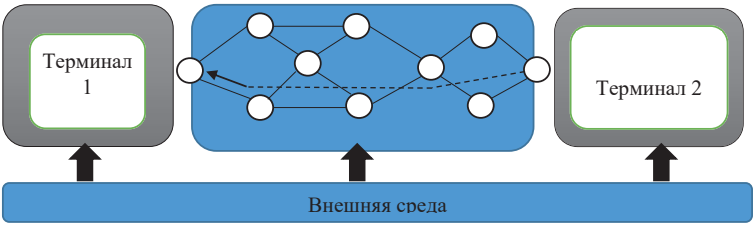


Рис. 1. Пример транспортной сети с учетом взаимодействия «внешняя среда – терминал – система компаний перевозчиков»

При выполнении исследования необходимо исследовать взаимное влияние транспортных узлов друг на друга, анализировать интенсивности транспорта, пассажиропотоков, грузопотоков, учитывать влияние внешней среды, оценивать надежности систем и элементов. Принятие решений по модернизации инфраструктуры можно принять как для микроуровня транспортного планирования, на уровне внедрения отдельных аппаратных решений, так и для макроуровня, путем создания специализированных информационных систем, собирающих данные от микроуровня.

Само понятие модернизации инфраструктуры представляет собой комплекс мероприятий и конкретных шагов, которые должны в первую очередь основываться на качественном прогнозе. Если решения на микроуровне представляют собой изменение только некоторых аппаратных комплексов, изменение направления потоков пассажиров или грузов, то для исследования всей системы необходима оценка с учетом взаимного влияния процессов и оценки конкурентов в регионе. Аналитические модели могут дать лишь некоторые конкретные значения хорошо применимые для микроуровня. В случае изменения входящего потока аппаратные комплексы не всегда смогут быть гибкими. В таком случае основываться лишь на данных по работе терминала и моделях микроуровня для модернизации инфраструктуры является недостаточным. Поэтому необходимо использование новых моделей – цифровых Circos-моделей.

При выполнении анализа интенсивностей работы транспортной системы, терминала или загруженности узлов используются данные, представленные в графическом, табличном виде или, реже в форме двухфакторных (многофакторных) функции. На практике для представления транспортной системы хорошо себя зарекомендовали модели в форме графов [3], [4], [5]. Исследование транспортной системы можно выполнять на основе имитационного моделирования (дискретно-событийного, агентного, системно-динамического [3]). Но данные методы не позволяют проанализировать всю систему комплексно на

макроуровне, и вынуждают делать пересчеты при новых граничных условиях. Необходимо отметить, что результаты моделирования требуют обратной трансляции применительно к реальным транспортным системам.

Для представления взаимодействия элементов транспортной системы и определения положения предлагается использование моделирования на основе круговых диаграмм связей (Circos-моделей). На основе серии экспериментов для терминалов Санкт-Петербурга была подтверждена необходимость использования новых моделей. Для построения Circos-моделей необходимо на основе общей схемы (рис. 1) ввести следующие ограничения:

1) из множества терминалов или транспортных узлов в регионе выбираются только взаимосвязанные терминалы и производится ранжирование терминалов по интенсивности работы (в данном случае необходимо исследовать все возможные сети, в том числе с учетом сезонности);

2) при исследовании статистики работы каждого терминала, выбираются данные взятые в близкий (некоторый граничный) момент времени и данное дискретное состояние выбирается как основное, при некотором T_0;

3) исходные терминалы образуют два массива данных:

первый массив является одномерным и состоит из терминалов n выбранного региона

$$F_{term}(N_i) = \left\{ F_{term_1}; F_{term_2}; F_{term_3}; ...; F_{term_N} \right\}, \qquad (1)$$

где F_i – количество заходов в порт (либо терминал); N – число терминалов в выборке;

второй массив является двумерным массивам, элементы которого отражают интенсивности работы компаний перевозчиков между заданными терминалами в выбранный дискретный момент времени. На практике вводится значения как прямых, так и при наличии обратных маршрутов. Варианты маршрутизации транспортных средств на различных видах транспорта представлены в [3]:

$$F_{routes}(F_i, F_j) = \begin{Bmatrix} N_{00}(F_1; F_1) & N_{01}(F_1, F_2) \\ N_{10}(F_2, F_1) & N_{11}(F_2, F_2) \\ ..... & \end{Bmatrix}, \qquad (2)$$

где F_i – порт отправления; F_j – порт назначения; $N(F_1, F_2)$ – числовое значение интенсивности транспортных средств в заданный дискретный момент времени между терминалами;

4) интенсивности транспортных средств принимаются взятыми в выбранный момент времени T_0. При выполнении исследований формируется система вариантов на основе определенной выборки моментов времени. Также необходимо выполнение условий формирования полной группы событий (3):

$$\sum_{i=1}^{N} PF_{routes}(F_i, F_j) = 1 \qquad (3)$$

На основании формирования условия полной группы событий определяются границы выборки данных для терминалов или портов. Представленная методика преобразования данных необходима для формирования матричной формы для построения специализированной Circos-модели. Именно такая форма позволяет представить как имеющуюся маршрутную сеть и определить положение, так и спрогнозировать изменение позиции терминала в регионе после модернизации.

Построение цифровых Circos-моделей для исследования положения транспортных терминалов

Circos-модель и ее графическая реализация является инструментарием основанными на определении логических взаимосвязей между различными данными транспортной системы. Данная модель применима для любого горизонта планирования и может быть применима как для внутреннего исследования системы, так и определения позиции относительно других. На основе матричной формы данная модель представляет собой специализированную диаграмму, которая требует преобразования данных, как представлено выше (формулы 1–3). При таком подходе модель обеспечивает структурированный подход к анализу комплексных взаимодействий между элементами системы или терминалами в регионе, что является ее сильной стороной. Ввиду использования данных по интенсивностям работы открывается возможность определять как загруженность системы, так и определять влияние внешней среды. На своих элементах модель позволяет размещать дополнительную аналитическую информацию (рис. 2), такую как интенсивности работы, загруженность, возможные сбои и другие качественные показатели для терминала, шкалы и другие процентные данные.

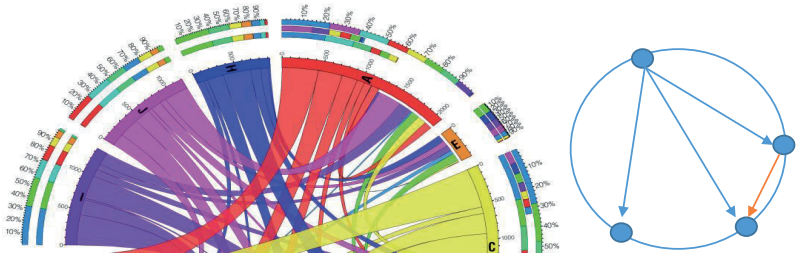


Рис. 2. Представление Circos-модели для транспортной, технической системы

Рассмотрим применение построения Circos-модели для системы паромных перевозок. Данная система обладает сложной организацией и зависит от влияния внешней среды. Математическая модель эффективности работы системы или терминала можно представить в виде следующей системы целевых уравнений

$$\begin{cases} T_{\text{П}} = T_1 + T_2 + \ldots + T_n \to \min; \\ C_n = \sum_{i=1}^{n} QT_m \to \min; \\ F(s) = NT_m - C_{\text{з}i} \to \max; \\ F(\theta_i) = F(\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n) \to \min, \end{cases}$$

где $T_{\text{П}}$ – время, затраченное пассажирами на передвижение (состоящее из всех возможных перемещений пассажиропотока); $C_{\text{п}}$ – стоимость перевозки с учетом возможных пересадок; Q – количество поездок на пароме; T_m – некоторый базовый тариф перевозки, который устанавливается на определенный сезон; $F(s)$ – функция прибыли перевозчика; N – количество пассажиров; $C_{\text{з}i}$ – затраты (эксплуатационные, сезонные, затраты в случае поломки судна); $F(\theta_i)$ – функция влияния внешней среды. При этом работа паромной сети должна удовлетворять условию

$$\sum_{i=1,\, j=1}^{A_{ij}} \sum_{S=1}^{S_i} \sum_{M=1}^{M} CW \to \min,$$

где A_{ij} – совокупное количество портов; S – типы паромных или круизных судов; M – число портов; C – стоимость перевозки пассажиров из пункта i в пункт j на пароме S с использованием нескольких портов M; W – объем пассажиропотока и сопутствующего грузопотока.

Система принятия решений по оценке положения терминала в регионе представлена на рис. 3.

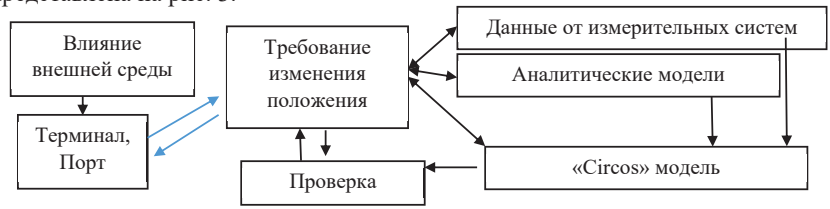


Рис. 3. Включение результатов цифровой Circos-модели в контур принятия решений по анализу позиции терминала

Исходные данные (интенсивности паромных судов с 12 по 18 ноября 2019 г.) представлены в табл.

Таблица

Пассажирские терминалы	Helsinki	Stockholm	St.Petrsburg	Tallinn
Tallinn	15	3	0	0
Helsinki	0	0	2	14
STOCKHOLM	3	0	0	2
St.Petersburg	2	0	0	1

На основе исходных данных и анализа интенсивности работы формируется файл данных, который загружается в инструментальную среду Circos [6]. Результат определения состояния пассажирского терминала представлен на рис. 3.

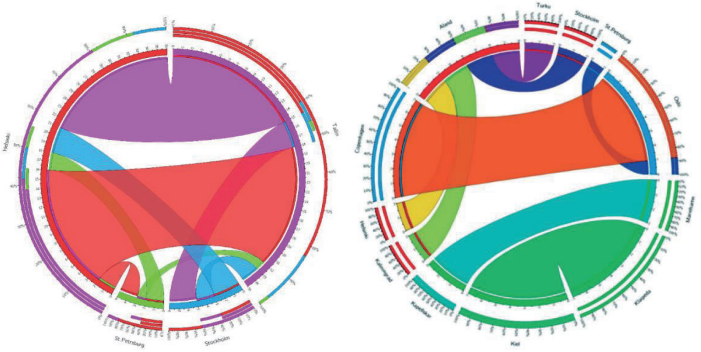


Рис. 4. Практическая реализация Circos-модели для системы морских паромных перевозок в регионе Балтийского моря

Заключение

В результате проведенного исследования предложена последовательность преобразований с данными по работе терминала, обоснована необходимость определения положения и состояния терминала относительно других в регионе, обоснована эффективность применения Circos-моделей и графиков для принятия решений по модернизации для изменения положения терминала в регионе. Предложенный путь исследования можно использовать для любого числа пассажирских терминалов и данную модель можно масштабировать. Предлагаемое решение удобно как для исследования внутреннего взаимодействия процессы системы, так и для анализа некоторой выборки элементов. Данная возможность позволяет обеспечить гибкость при принятии решений, гибкость моделирования различных сценариев. Данные от аппаратных средств на микроуровне, объединяются для последующей передачи информации руководителю или аналитическому отделу. После этого необходимо преобразование данных и последующая загрузка в среду для построения цифровой Circos-модели.

Для обоснованного решения необходимо проведение нескольких исследований, что в свою очередь требует именно использование программного инструментария. Таким образом, открывается возможность обосновывать инфраструктурные изменения.

Библиографический список

1. *Bin. K. L.* Port development. New York. UNCTAD, 1985. 228 p.

2. *Bose. J. W.* Handbook of Terminal Planning; Springer Science Business Media. LLC: Springer-Verlag. New York, 2011. 456 p.

3. *Майоров Н. Н., Фетисов В. А.* Практические задачи моделирования транспортных систем. СПб.: ГУАП, 2012. 186 с.

4. *Майоров Н. Н.* Моделирование изменений в транспортных системах после внедрения интеллектуальных технологий на основе теории множеств // Труды XII международной научно-практической конференции «Организация и безопасность дорожного движения». Тюмень: ТИУ, 2019. С. 335–339.

5. *Прокушев Л. А.* Дискретная математика. Основы теории графов и алгоритмизации задач. СПб.: ГУАП, 2000. 81 с.

6. Circos. URL: https://sourceforge.net/projects/jcircos/ (дата обращения: 12.01.2021).

7. *Krile S., Maiorov N.* Work analysis of maritime passenger terminals for particular region based on circos plot // Nase More. 2019. Vol. 66. N 2. P. 57–61.

УДК 629.056.8

А. Ю. Прохоренко*
студент
Д. О. Федотов*
студент
В. В. Тарасов*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

УВЕЛИЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ СУХОПУТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Системы мониторинга и контроля местоположения транспортных средств на дорогах во многом помогают эффективно отслеживать перемещение автотранспорта в условиях современного мира. В связи с большим количеством ошибок и задержек, а также отражением спутникового сигнала в городских условиях точность определения местоположения транспортных средств существенно снижается.
Ключевые слова: спутниковая навигация, ГЛОНАСС, GPS, IMU, PPP.

A. Y. Prokhorenko*
Student
D. O. Fedotov*
Student
V. V. Tarasov*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INCREASING POSITIONING ACCURACY FOR SATELLITE NAVIGATION OF LAND VEHICLES

Vehicle positioning systems on the roads in many ways help to effectively track the movement of vehicles in the modern world. But due to the large number of errors and delays, also the reflection of the satellite signal in urban environment, the accuracy of the vehicle location determining decreases.
Keywords: Satellite navigation, GLONASS, GPS, IMU, PPP.

Введение

Global Navigation Satellite System (GNSS) – спутниковая навигационная система, предназначенная для определения местоположения (позиционирования) и параметров движения (направление движения, скорость и т. д.) для наземных, водных, воздушных объектов. Для определения местоположения используют три координаты спутниковой навигации. Часто используемыми системами координат являются ECEF (Earth-centered, Earth-fixed, декартова система координат с началом в точке центра масс Земного шара) и WGS84 (World Geodetic System 1984, сферическая система координат с началом в точке центра масс Земного шара). В

случае если высота (третья координата) неизвестна, то позиционирование является двумерным. В случае если один приемник зафиксирован, а второй перемещается, позиционирование является кинематическим. Если координаты приемника не меняются, позиционирование является статическим [1].

В настоящее время существуют следующие системы спутниковой навигации:

• GPS (Global Positioning System). Данная система дает возможность определять скорость и местоположение объектов почти при любой погоде, практически в любой точке Земного шара. Исключением являются некоторые приполярные области. Разработана и введена в эксплуатацию Министерством обороны США. Определение координат в данной системе основано на расчете и вычислении дистанции от объекта до спутников, координаты которых известны заранее. Для однозначного определения положения объекта достаточно информации от трех спутников: координаты объекта рассчитываются как точка пересечения сфер, центрами которых являются спутники, а радиусом – измеренное расстояние [2].

• ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) – Российская спутниковая система навигации. Данная система изначально имела строго военное предназначение и была запущена в СССР вместе с системой предупреждения о ракетном нападении в 1982 году. Основой данной системы являются двадцать четыре спутника, перемещающихся над поверхностью земного шара в трех орбитальных плоскостях на высоте 19 100 км. Принцип измерения расстояния аналогичен с системой GPS.

• DORIS – французская навигационная система. Принцип работы системы связан с применением эффекта Доплера. В отличие от других спутниковых навигационных систем, основывается на системе стационарных наземных передатчиков, расположение приемников на спутниках. Система способна установить точные координаты и высоту маяка после определения точного положения спутника.

• Beidou – китайская система спутниковой навигации. Планируется, что система будет состоять из пяти спутников на геостационарной орбите, из трех спутников на геосинхронной орбите и двадцати семи спутников на средней околоземной орбите. В 2012 году была запущена в коммерческую эксплуатацию как региональная система позиционирования.

• Galileo – система спутниковой навигации Европейского союза. Предназначена для решения геодезических и навигационных задач.

Под открытым небом система спутниковой навигации работает неплохо, но в городских условиях точность сильно падает. Отклонение может происходить до 50 м. Причиной этому являются провода, мосты, высокие здания и тому подобные объекты. Это является основной проблемой спутниковой навигации в городских условиях. Пока сигнал идет от спутника до приемника, он может несколько раз переотразится от зданий, что является помехой для прямой видимости спутников. На рис. 1 представлен пример отражения спутникового сигнала в городских условиях.

Данная тема актуальная также для улучшения качества управления беспилотными ТС. При увеличении точности и качества позиционирования беспилотных транспортных средств снижается риск дорожно-транспортных происшествий на дорогах.

Рис. 1. Отражение спутникового сигнала в городских условиях

Повышение точности позиционирования ТС

Способов повышения точности позиционирования ТС существует немало. В спутниковой навигации поиск местоположения осуществляется нахождением трех координат. Помимо данных величин, можно измерить и другие относительные параметры при помощи инерциального измерительного модуля.

IMU (Inertial Measurement Unit) – Инерциальный измерительный модуль. Позволяет определить текущее положение тела, оснащенного IMU, зная его начальное положение и какие силы воздействовали на данное тело. Состоит из гироскопа, акселерометра, магнетометра. Гироскоп позволяет измерить три координаты угловых скорости. Акселерометр позволяет измерить три координаты ускорения. Магнетометр позволяет измерить три координаты вектора магнитного склонения. Пример IMU представлен на рис. 2 [3].

Рис. 2. Инерциальный измерительный блок

Установив данный модуль на транспортное средство, нельзя измерить высоту, скорость или позицию, но можно извлечь полезную информацию для улучшения позиционирования на паркингах, в тоннелях и в других местах, где слабый сигнал спутниковой навигации.

Преимуществами являются полная независимость от внешних источников данных, высокая защита от помех, передача данных на высокой скорости, а также отсутствие излучений, чем обеспечивает скрытность объекта. Основным недостатком можно назвать то, что модуль способен накапливать ошибки с приборов с течением времени.

Одним из способов повышения позиционирования автотранспорта является исключение наибольшего количества задержек и ошибок, которые возникают при измерении расстояния от спутника до приемника. Под ошибкой будет понимать какой-либо сдвиг координат спутника или часов приемника и спутников. В свою очередь задержкой можно считать ошибку, из-за которой изменилась скорость прохождения сигнала на какой-либо участке от спутника до приемника [4]. Ошибки могут быть следующие:

- ошибка часов спутника;
- релятивистский эффект;
- спутниковые инструментальные задержки;
- ионосферная задержка;
- тропосферная задержка;
- ошибки часов приемника;
- инструментальный эффект приемника.

Для предотвращения задержек и ошибок существует немало методов. Их можно применять как в комбинации, так и по отдельности. Одним из вариантов предотвращения ошибок является использование методов моделирования. Методы моделирование представляют собой расчет ошибки в случае, если это является возможным. Можно подсчитать следующие ошибки:

- коррекция релятивистского эффекта;
- коррекция инструментальных ошибок спутников;
- коррекция тропосферной задержки;
- учет сдвига фазового центра спутника и приемника;
- коррекция влияния гравитации других планет;
- коррекция координат в соответствии с геофизической моделью.

Для исключения ионосферной задержки можно использовать двухчастотный приемник. Он принимает от спутников те же данные, но на разных частотах, что позволяет подсчитать ионосферную задержку напрямую. Сложность заключается в том, что для гражданских целей использовать двухчастотный приемник нельзя, а также отличается высокой стоимостью относительно одночастотного приемника.

Для полного или хотя бы частичного исключения всех вышеперечисленных ошибок был изобретен класс методов, который носит название – разностные методы. Для использования этих методов потребуется хотя бы одна наземная станция, координаты которой известны с достаточной точностью. Исключение ошибок возможно благодаря предположению, проверенному эмпирическим путем, о том, что ошибки, связанные с задержками в атмосфере, коррелируют тем выше, чем ближе находятся приемники. Следовательно, чем выше расстояние от приемника до наземной станции, тем хуже позиционирование ТС. Это связано с ухудшением корреляции [5].

Использование разностных методов в случае одночастотных приемников возможно на расстоянии до 8 км, а для двухчастотных на расстоянии от 20 до 50 км.

Недостатками разностных методов являются обязательное наличие наземной станции и маленькая дистанция в случае с одночастотным приемником.

Следующим методом повышения позиционирования является метод, который используется без использования наземных станций – метод высокой точности (Point Precise Positioning) [6]. Данный метод был разработан для двухчастотного приемника и определение местоположение со временем достигло точности в 1 см. Данный метод применим с одночастотным приемником, но эффективность данного метода становится на порядок ниже. Для использования данного метода требуется:

- наличие карт тропосферы и ионосферы;
- полное исключение ионосферной задержки (исключается при использовании двухчастотного приемника);
- наличие серии решений, которую можно усреднить с помощью фильтра Калмана;
- наличие дополнительных данных с уточненными координатами спутников;
- наличие данных об ошибках часов спутников.

Для повышения позиционирования ТС также можно использовать CAN-шину автомобиля. CAN-шина объединяет информацию со всех электронных блоков автомобиля и осуществляет ее обмен между блоками. Данный способ может быть полезен, так как для позиционирования будет полезна информация о скорости, об оборотах колес, их поворотах и прочих характеристиках.

Недостатком может являться сложность считывания информации, поскольку каждый разработчик авто использует свои протоколы.

Заключение

В данной статье кратко описано, что такое спутниковая навигационная система (GNSS). Приведены примеры существующих систем спутниковой навигации различных стран.

За счет своих датчиков инерциальный измерительный модуль позволяет получить дополнительную информацию о перемещении автомобиля, на котором установлен данный модуль.

В статье перечислены ошибки и задержки, которые могут возникать при определении местоположения приемного устройства. Рассматривается обзор следующих методов, позволяющих уменьшить количество ошибок и задержек в спутниковой навигации:

- использование методов моделирования;
- использование двухчастотного приемника;
- использование разностных методов;
- использование метода высокой точности.

Использование каждого из этих методов в той или иной степени позволяет увеличить точность позиционирования транспортного средства. Приведены некоторые достоинства и недостатки по описываемым методам.

Рассмотрен вариант использования CAN-шины автомобиля для считывания информации, которая может быть полезна для позиционирования транспортного средства.

Библиографический список

1. *Leick A.* GPS Satellite Surveying // John Wiley & Sons, Inc. 2004.

2. *Серапинас Б. Б.* Глобальные системы позиционирования. Изд. 3-е, исправ. и доп. М.: ИФК «Каталог», 2002. 62 с.

3. *King A.* Inertial Navigation – Forty Years of Evolution // Gec review. 1995. Vol. 13. N 3. 10 p.

4. *Щербаков А. С., Першин Д. Ю.* Определение местоположения высокой точности для одночастотных приемников спутниковой навигации с использованием инерциальных датчиков // Новосибирский государственный университет, МНСК-2011. 5 с.

5. *Соловейчик Ю. Г., Рояк М.Э., Персова М. Г.* Метод конечных элементов для скалярных и векторных задач. Новосибирск: НГТУ, 2007. 896 с.

6. *Подкорытов А. Н.* Высокоточное местоопределение в абсолютном режиме в ГНСС с использованием разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений // Труды МАИ. М., 2012. № 59. 12 с.

УДК 519.85:656.614.3

А. Ж. Радочинская*
аспирант
Т. Е. Маликова*
доктор технических наук, доцент
А. Ю. Стрелков*
доцент
*Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПИСАНИЯ АЛГОРИТМА РАЗДЕЛЕНИЯ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ НА ЯЗЫКЕ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ

Рассмотрена возможность автоматизации контроля соблюдения правил разделения опасных грузов при их морской перевозке. Предложено в качестве инструментария решения задачи формализации процесса разделения грузовых единиц на транспортном средстве использовать теорию конечных автоматов. В результате был построен граф переходов конечного автомата для поиска рационального размещения опасного груза на судне, а также обоснована его применимость для схемы совмещения двух произвольно выбранных опасных грузов.
Ключевые слова: безопасность мореплавания, перевозка опасных грузов, грузовой план, математическое моделирование.

A. Z. Radochinskaia*
PhD Student
T. E. Malikova*
Dr. Sc. Tech., Associate Professor
A. Y. Strelkov*
Associate Professor
*Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi

PROVABILITY OF DANGEROUS GOODS SEGREGATION ALGORITHM DESCRIPTION USING FINITE STATE-MACHINE DESCRIPTION LANGUAGE

An option of automating supervision of dangerous goods segregation regulation compliance when carried by sea has been considered. The theory of finite state machines has been proposed as the tooling that the task of segregating unit loads on board formalization requires. As a result a finite state machine transition graph for reasonable dangerous goods disposition on board a vessel has been drawn and its applicability to two randomly chosen dangerous goods' compatibility plan has been substantiated.
Keywords: safety of navigation, carriage of dangerous goods, mathematical simulation.

Введение

Вопросы безопасности транспортировки и предотвращения аварий с опасными грузами, гармонизация национальных и международных правил по этому виду перевозок, а также проблемы перехода на новую систему регулирования таких перевозок, являются актуальными для любого вида транспорта.

В объеме грузов, перевозимых в России, доля опасных грузов составляет около 20 %, или примерно 800 миллионов тонн в год [1]. Из них 65 % приходится на долю автомобильного транспорта, около 30 % – на долю железнодорожного, около 5 % – на долю морского и речного транспорта и около 0,1 % – на долю воздушного транспорта.

Безусловно, наиболее проблемным вопросом в области морских перевозок опасных грузов являются высокая вероятность риска возникновения аварийных ситуаций. Доля опасных грузов, перевозимых морским транспортом, невелика по сравнению с другими видами транспорта, однако, «пожары и взрывы» на судах перевозящие генеральные грузы среди основных причин их гибели [2], [3] традиционно занимают третье место и практически остается на одном и том же уровне (ежегодно около 14–15 % от всех видов аварий) не смотря на усилия, предпринимаемые мировым морским сообществом к снижению аварийности мирового торгового флота [4]. Кроме того, стойкие тенденции увеличения размеров торговых судов, особенно контейнеровозов, за последние десятилетия приводят к необходимости организации перевозки большой номенклатуры грузов, в том числе и опасных, на одном судне, что в свою очередь требует усиления контроля за соблюдением правил разделения несовместимых грузов (СОЛАС 1974). Поэтому особый интерес представляет обоснование возможности цифровизации процесса контроля разделения опасных грузов как при проведении погрузо-разгрузочных работ, так и при их транспортировке.

Немаловажным вопросом в любом научном исследовании является выбор математического аппарата для описания изучаемого процесса на формализованном языке. В качестве инструментария для решения задачи формализации процесса разделения грузовых единиц на транспортном средстве предложено рассмотреть применимость теории конечных автоматов, т. е. обосновать возможности применения конечного автомата для поиска рационального размещения опасного груза на судне.

Методы и Материалы (Methods and Materials)

Абстрагируемся от решения задачи разделения грузовых единиц на транспортном средстве и рассмотрим возможности выбранного математического аппарата. С математической точки зрения правила разделения опасных грузов можно описать набором символов («рассматриваемая грузовая транспортная единица», «грузовая единица для которой разрешено совместное размещение», «грузовая единица для которой не разрешено совместное размещение»), взятых в определенной последовательности. На языке конечных автоматов последовательность символов называется строкой. Таким образом, задача поиска рационального размещения опасного груза на судне сводится к задаче поиска допустимых строк.

Математическая постановка задачи поиска допустимых строк. Найти алгоритм, который будет на каждом новом шаге брать некоторую частично заполненную строку S и искать в ней набор клеток, который можно заполнить однозначно определяемым символом по заданному правилу.

Обоснование выбора метода решения. Данную задачу можно решить полным перебором всех возможных вариантов заполнения строки *S*, т. е. получить множество вариантов s_1, s_2, …, s_m строки, сравнить между собой клетки, стоящие на одном и том же месте, в каждом наборе s_i и определить клетки, которые во всех вариантах строки имеют один и тоже символ, например, крестик или точка. В итоге получим множество клеток с однозначно определенными символами. Сформируем новую строку S_{max}, заполнив найденные клетки соответствующими им символами. Количество вариантов групп клеток, и следовательно, их символов (крестики и точки), может быть и больше, но для простоты пояснения работы алгоритма полного перебора достаточно было ограничится двумя группами.

Рассмотрим в качестве примера один шаг алгоритма поиска новых клеток. Строка S частично заполнена одним крестиком и одной точкой (рис. 1). Для построения вариантов заполнения строки *S* применяем правило (4; 2), которое означает, что строка заполняется чередующимися последовательностями клеток: четыре крестика, затем два крестика и т. д. В образовавшиеся пустоты между крестиками ставятся точки. Получим три варианта заполнения строки s_1, s_2, s_3. Одинаковые символы в трех вариантах имеют клетки на позициях 1, 2, 4, 5, 6 и 9. Заполним эти клетки соответствующими символами и получим строку S_{max},

S =	*4*	*2*			•			×					

s_1 =	*4*	*2*		•	•	×	×	×	×	•	×	×	•
s_2 =	*4*	*2*		•	•	×	×	×	×	•	•	×	×
s_3 =	*4*	*2*		•	•	•	×	×	×	×	•	×	×

S_{max} =	*4*	*2*		•	•		×	×	×			×	

Рис. 1. Пример поиска новых ячеек для заполнения методом полного перебора

Возникает вопрос вычислительной трудоемкости метода решения: «Сколько вариантов заполнения имеет строка S длиной n при условии, что в ней не заполнена ни одна клетка»? Для случая применения правила заполнения из k единичек (1, 1, 1, …), количество вариантов возможных заполнений строки равно C_{n+1-k}^{k}. При фиксированной длине строки n это выражение достигает максимума при k=0,28n. Отсюда, максимальное количество вариантов заполнений строки равно $C_{0,72n+1}^{0,28n}$. Количество вариантов заполнения с увеличением длины строки растет очень быстро. Например, при n=20 количество вариантов заполнения строки равно 3432, при n=30 – вариантов будет 497 420. Поэтому метод полного перебора не приемлем для решения задачи большой размерности.

Решение задачи с помощью конечного автомата. Попробуем не заполнять строку методом полного перебора, а зададим конечный автомат (рис. 2), рабо-

тающий по правилу (4; 2). Следует отметить, что графическое представление конечного автомата называют графом конечного автомата.

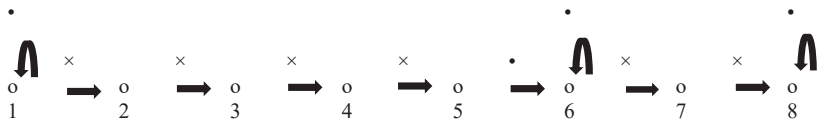


Рис. 2. Графическое представление конечного автомата, соответствующего описанию (4; 2)

Рассмотрим работу автомата, представленного на рис. 2. На первом шаге пройдем из первой вершины в последнюю и выпишем последовательность символов, стоящих только на ребрах автомата, пропуская символы на петлях. В результате получим ××××•××, которая соответствует описанию (4; 2). На втором шаге пройдем из первой вершины в последнюю, при этом два раза обойдем первую петлю и один раз вторую. Выпишем соответствующую последовательность символов ••××××••××•. Эта строка также соответствует описанию (4; 2), а также полностью повторяет набор заполненных ячеек строки S_2 из примера на рис. 1. Таким образом, автомат на рис. 2 может строить строки, соответствующие описанию (4; 2).

Убедимся, что автомат может проверять подходит ли строка под описание (4; 2). Выберем произвольную строку из примера, показанного на рис. 1. Пусть это будет строка S_3 с набором ячеек •••××××•××. Про эту строку заранее известно, что она соответствует описанию (4; 2). Посмотрим, как читает автомат данную строку. Зафиксируем положение автомата в его начальной вершине 1. Прочитаем первый символ строки S_3 – это символ •. В автомате данному символу соответствует петля, пройдя по которой мы остаемся в вершине 1. Читаем следующий символ строки – это снова символ •. Вновь проходим по первой петле и по-прежнему остаемся в вершине 1. Читаем третий символ строки S_3 и вновь остаемся в вершине 1. Четвертый символ строки – ×, заставляет автомат перейти в вершину 2. Далее в строке записаны последовательно три крестика, означающие последовательный переход по ребрам из вершины 2 в вершину 5. Следующий символ строки – это •, который заставляет автомат перейти в вершину 6. Из вершины 6 автомат по петле может остаться в этой же вершине, либо перейти в соседнюю в зависимости анализируемого символа рассматриваемой строки. В нашем случае это символ ×, автомат переходит в вершину 7. Последний символ строки S_3 заставляет автомат перейти в конечную вершину 8. Вывод: автомат распознал строку S_3.

Проверим, отвергает ли автомат строки, несоответствующие описанию (4; 2). Возьмем в качестве примера строку •••×××••××. Автомат прочитает шесть первых символов строки и окажется в вершине 4. Следующий седьмой символ строки является точкой, но из вершины 4 автомат может совершить переход в следующую вершину только после считывания символа крестик. Следовательно, автомат останется в вершине 4 и никогда не перейдет в конечную вершину

8. Построенный автомат принимает только те строки, которые заполнены по описанию (4; 2).

Результаты

Проверим применим ли граф конечного автомата (рис. 2) для описания алгоритма разделения опасных грузов, в частности, подкласса 1.3 – «вещества и изделия, которые характеризуются опасностью возгорания», и подкласса 2.2. «невоспламеняющиеся нетоксичные газы». Согласно кодекса ММОГ (Международный морской кодекс по опасным грузам) данные подклассы разделяются по правилу «отдельно от 2». На рис. 3 представлена одна из возможных схем размещения опасных грузов по правилу «отдельно от 2».

	← *корма*			*Вдоль судна*			*нос* →		
S_1 =	•	×	×	×	•	•	•	•	*Палуба*
S_2 =	•	×	×	×	•	•	•	•	
S_3 =	•	×	*N*	×	•	•	•	•	
S_4 =	•	×	×	×	•	•	•	•	
S_5 =	•	•	×	×	×	×	•	•	*Трюм*
S_6 =	•	•	×	×	×	×	•	•	
S_7 =	•	•	×	×	×	×	•	•	
S_8 =	•	•	×	*N*	×	×	•	•	
S_9 =	•	•	×	×	×	×	•	•	
S_{10} =	•	•	×	×	×	×	•	•	
S_{11} =	•	•	×	×	×	×	•	•	

Рис. 3. Схема. Расположение «открытая напротив открытой»: N – рассматриваемая грузовая транспортная единица (ГТЕ); × – ГТЕ с несовместимым грузом, для которого не разрешается размещение; • – ГТЕ с несовместимым грузом, для которого разрешается размещение

Представим схему размещения опасных грузов в виде множества отдельных строк S_i, пронумеровав их как показано на рис. 3. В качестве опорной строки возьмем строку S_8 с рассматриваемой ГТЕ. Эту строку можно считать уже частично заполненной, так как известны места расположения по крайней мере двух ее ячеек (рис. 4).

S =		•		*N*						

Рис. 4. Частично заполненная опорная строка

Ответим на вопрос: Можно ли заполнить пустые клетки опорной строки так, чтобы ее принял автомат, представленный на рис. 2? Другими словами, чтобы она подошла под описание (4; 2)? Будем вводить последовательно значения клеток опорной строки в автомат. Встанем в первую вершину графа автомата и прочитаем первую клетку строки S (рис. 4). Первая клетка строки неизвестна и может принять значение как •, так и ×. Автомат на первом шаге соответственно либо проходит по петле и остается в вершине 1, либо – по ребру,

совершая переход в вершину 2. Вторая клетка строки S уже заполнена символом •, следовательно, автомат может совершить переход только по петле, то есть по-прежнему остаться в вершине 1. При этом из вершины 2 перейти никуда нельзя, значит, после второго шага однозначно определена последовательность символов ••, автомат – в вершине 1 (рис. 5).

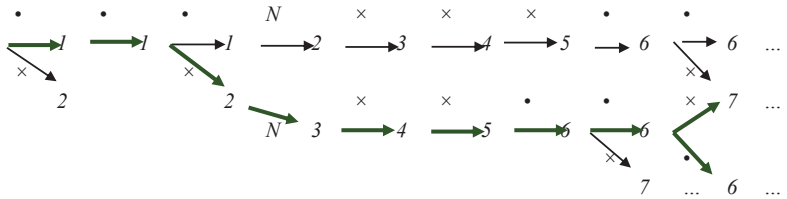


Рис. 5. Процесс заполнения опорной строки S конечным автоматом

Третий символ опорной строки не определен и может значение как •, так и ×. Следовательно, на третьем шаге автомат может пройти по петле и остается в вершине 1, или – по ребру, совершая переход в вершину 2. Получаем соответственно два набора символов ••• и ••×. Четвертый символ опорной строки определен как N, следовательно, получим наборы символов – •••N и ••×N. Следует отметить, что символ N используется лишь для того, чтобы однозначно определить местоположение рассматриваемой ГТЕ в опорной строке. Поэтому будем считать, что для автомата символ N равен символу ×.

Напомним, что на четвертом шаге автомат находиться либо в вершине 1 с набором символов •••, либо в вершине 2 с набором символов ••×. Если автомат находится в вершине 1, то считав символ строки ×, автомат перейдет в вершину 2 с набором •••×. Если же автомат находиться в вершине 2 – переход будет выполнен в вершину 3 с набором символов ••××, и так далее (см. рис. 5). Варианты заполнения конечным автоматом частично заполненной строки S представлены табл. 1.

Таблица 1

Вариант	Последовательность символов										
1	•	•	•	*N*	×	×	×	•	•	×	×
2	•	•	•	*N*	×	×	×	•	×	×	•
3	•	•	×	*N*	×	×	•	×	×	•	
4	•	•	×	*N*	×	×	•	•	×	×	

Сравним все возможные варианты заполнения строки из табл. 1 с опорной строкой S_8 (рис. 3). В результате получим, что выделенная цветом последовательность символов в четвертом варианте заполнения строки полностью совпадает с последовательностью символов строки S_8. Следовательно, существует возможность описания алгоритма разделения опасных грузов на языке конеч-

ных автоматов. Процесс получения последовательности символов строки S_8 на рис. 5 выделен цветом.

Выводы

На основании выше изложенного, уже сейчас можно определить основные элементы формализованного языка разделения опасных грузов с использованием теории конечных автоматов. Для его однозначного задания необходимо определить: конечное множество входных символов, конечное множество состояний автомата, опорные строки в схемах размещения опасных грузов из кодекса ММОГ, правила работы автоматов, а также составить таблицу соответствий между схемами и графами переходов конечных автоматов. В результате получим формализованную модель процесса разделения опасных грузов. В дальнейшей перспективе на основе данной модели будет разрабатываться автоматизированная система контроля разделения опасных грузов как при проведении погрузо-разгрузочных работ, так и при их транспортировке.

Библиографический список

1. *Соколов Ю. И.* Вопросы безопасности транспортировки опасных грузов // Проблемы анализа риска. 2009. Т. 6. № 1. С. 38–74.

2. *Маликова Т. Е., Аносов Н. М., Филиппова А. И.* Причинно-следственный анализ аварийности судов, перевозящих пакетированные грузы // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 4. С. 86–89.

3. *Маликова Т. Е.* Аварийность морского флота и анализ внешних факторов, повлекших за собой аварии со смещением грузов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1, 2. С. 162–165.

4. *Коберник И. Н., Костюк В. М., Петров Я. П.* Анализ аварийности мирового торгового флота на современном этапе // Актуальные вопросы проектирования, постройки и эксплуатации морских судов и сооружений: Труды региональной научно-практической конференции. 2019. С. 158–169.

УДК 658.511

В. В. Рубинов*
магистр, лаборант
В. А. Фетисов*
доктор технических наук, профессор
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ПОДХОДА К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ПРОЦЕССУ РАБОТЫ С ОТХОДАМИ

Рассмотрен технологический процесс работы с отходами в России. Описаны существующие измерительные системы. Сформулированы системные проблемы и направления их решения.
Ключевые слова: технологический процесс работы с отходами, измерительные системы.

V. V. Rubinov*
Master, Laboratory Assistant
V. A. Fetisov*
PhD Sc. Tech., Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PROBLEMS OF A MODERN APPROACH TO THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF WASTE MANAGEMENT

The technological process of working with waste in Russia is considered. The existing measuring systems are described. Systemic problems and directions for their solution are formulated.
Keywords: technological process of working with waste, measuring systems.

Введение

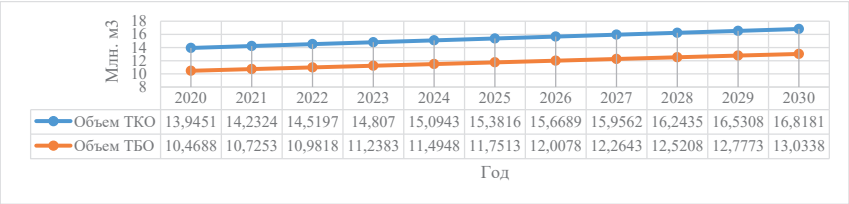
Ежедневно по всему миру производится огромное количество отходов. Вопросам, касающимся утилизации твердых бытовых и коммунальных отходов (далее ТБО и ТКО), уделяется особое внимание. В разных уголках мира ситуация обстоит по-разному, но нельзя сказать, что хотя бы в одной стране система работает идеально. Данная отрасль все чаще сталкивается с трудностями.

В современной России ситуация остается сложной. Метод накопления отходов на полигонах распространенный повсеместно, имеет множество недостатков, однако по-прежнему очень популярен ввиду низкой себестоимости и отсутствия технологической альтернативы [1]. Кроме того, возможность дешевого нелегального вывоза отходов ставит систему вывоза отходов в сложное и невыгодное положение.

Прогноз динамики роста отходов

Проведенный анализ данных о количестве отходов, образующихся в городе Санкт-Петербурге, позволил оценить тенденции и построить прогнозную модель динамики роста (рис. 1). Исследование показывает, что количество отходов нелинейно зависит от количества населения, доля ТБО на человека еже-

годно увеличивается [2]. Так, в 2000 году на одного жителя города приходилось 1,64 м^3 ТКО и 1,11 м^3 ТБО. К 2019 году эта цифра увеличилась до 2,49 м^3 ТКО и 1,84 м^3 ТБО [1]. Рост объема отходов связан с ростом объемов отходов из нежилого фонда. Количество предприятий нежилого фонда так же способствует образованию отходов и напрямую не зависит от населения города [1].



	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Объем ТКО	13,9451	14,2324	14,5197	14,807	15,0943	15,3816	15,6689	15,9562	16,2435	16,5308	16,8181
Объем ТБО	10,4688	10,7253	10,9818	11,2383	11,4948	11,7513	12,0078	12,2643	12,5208	12,7773	13,0338

Рис. 1. Прогнозирование роста объема ТБО и ТКО в Санкт-Петербурге [1]

Важно отметить возрастающую ответственность предприятий, работающих с отходами. В ближайшие годы значимость этого сектора и нагрузка на него может сильно возрасти, а недостаток перерабатывающих мощностей может создать кризисную ситуацию в области утилизации отходов. Во избежание этого помимо государственного реформирования в сфере обращения отходов предприятиям необходимо разрабатывать новые методы работы.

Наиболее перспективным с точки зрения мирового опыта можно считать построение системы раздельного сбора и вторичного использования отходов внутри системы обращения отходов [3].

Структура процесса работы с отходами

Объем отходов образующееся в регионе зависит в первую очередь от уровня развития страны и региона в целом [5], однако на него влияют и другие внешние и внутренние факторы системы обработки отходов.

Систему работы с отходами (S_1) можно представить в виде модели «черного ящика» (рис. 2), где входящий поток $W_1(t)$ – материальный поток сырья (отходов), исходящий поток $W_2(t)$ – исходящий материальный поток вещества некоторой степени вредности, $R_1(t)$ – поток ресурсов, затрачиваемых на работу системы, $Y_1(t)$ – управляющее воздействие на систему.

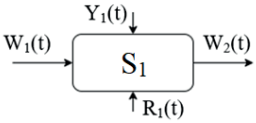


Рис. 2. Модель системы работы с отходами в виде черного ящика

Графическое представление процесса обращения отходов путем декомпозиции элементов позволяет анализировать процессы протекающие в системе

работы с отходами, а также оценить ключевые факторы, оказывающие на нее влияющие.

Система работы с отходами с точки зрения технологического процесса является совокупностью подсистем: образования (возникновение, накопление и сбор отходов), обработки (сортировка, предварительная подготовка, прессование, очищение и т. д.), утилизации отходов (захоронения, вторичного использования или сжигания), а также связывающей эти системы – системы транспортировки.

Структура процесса обращения отходов представлена ниже на рис. 3:

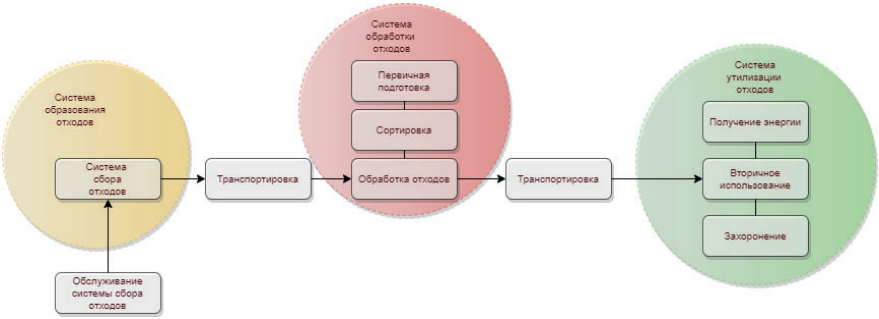


Рис. 3. Структура процесса работы с отходами

Одной из самых больших сложностей в контроле за системой работы с отходами является проблема получения объективной информации о потоках отходов и распределении их по системе утилизации. Методы учета отходов, человеческий фактор при оценке количества отходов, прямая связь между объемами контейнеров и тарифом приводят к высокой погрешности измерений, а также сильному искажению исходных данных даже при попытке их объективного получения.

Оценить реальное количество отходов, образующееся регионе на сегодняшний день довольно трудно. Погрешность данных об исходном количестве отходов может быть критической, а любые прогнозные и аналитические модели, созданные на основе таких данных, – необъективные. Таким образом, становится трудно оценить реальный эффект от проектов раздельного сбора отходов и эффективность сортировочных площадок. Потенциально есть острая необходимость в повышении точности получения исходных данных о потоках отходов в системе.

Вопрос получения объективной информации на микроуровне давно беспокоит пользователей и участников системы. В последнее время появилось много производителей измерительных систем, предлагающих различные решения для работы с отходами, с принципиально разными подходами к получению данных, однако они до сих пор не получили массового распространения. Для того чтобы оценить причины их невостребованности, необходимо проанализировать основные типовые измерительные системы.

Измерительные системы в области работы с отходами

Существующие измерительные системы можно классифицировать по принадлежности к подсистеме работы с отходами. Классификация существующих измерительных систем представлена на рис. 4:

Рис. 4. Классификация измерительных систем в области работы с отходами

Анализ основных существующих систем контроля

Основные методы и направления измерительный систем в сфере работы с отходами позволяют производить контроль на следующих участках технологического процесса:

Контроль накопления отходов

Различных автоматизированных систем контроля накопления твердых бытовых и коммунальных отходов на рынке довольно много. Принцип работы и метод формирования данных у всех похож. Типовой датчик наполненности контейнера представлен на рис. 5.

Рис. 5. Типовые датчики наполняемости контейнера [8]

Автономный датчик, находясь в емкости контейнера, собирает и передает данные о состоянии наполненности полезного пространства. Датчик преобразует измеренную информацию в форму, удобную для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения. Данные о пространственном позиционировании собираются через сети GPS/ ГЛОНАСС. Способ определения уровня наполненности – ультразвуковой или инфракрасный в зависимости от производителя.

За очевидными достоинствами контроля наполненности контейнеров измерительными системами такого типа кроются довольно существенные недостатки: высокая стоимость в пересчете на единицу накопления, низкий уровень точности измерений связанный высокой вероятностью ложного перекрытия инфракрасного или ультразвукового луча, ограниченный срок службы, низкая вандалоустойчивость, серьезные требованию к профилактическому обслуживанию и отсутствие формирования количественных показателей наполняемости.

Вышесказанное делает такого рода технологию низкоэффективной и возможной к реализации только на очень ограниченном участке под постоянным контролем.

Контроль работы мусоровозов

Системы контроля передвижения в XXI веке получили широкое распространение на транспортных предприятиях, в том числе и связанных с работой с отходами. Поскольку перемещение мусоровозов потенциально связано с контролем за нелегальными разгрузками (без оплаты захоронения), в России контроль трека перемещения мусоровоза стал законодательно обязателен [4], [6].

На рынке присутствует огромное множество производителей (Gelios, WIALON Hosting, СКАУТ и др.), предлагающих программное решение (рис. 6) для большей части современной техники, однако использование такого измерительного оборудования сводится, в лучшем случае, к диспетчеризации или контролю сливов топлива нежели приближает к количественным показателям системы работы с отходами.

Рис. 6. Интерфейс систем мониторинга движения транспорта [10]

Комбинированные системы

Поскольку система транспортировки отходов является основной артерией перемещения грузопотоков в области работы с отходами, потенциально размещение оборудования на мусоровозах является правильным решением. С целью получения объективной информации ряд производителей попытались создать системные решения на базе автомобилей, которые затрагивали бы систему накопления отходов.

Контроль и получение данных осуществляется путем установки спецоборудования, которое устанавливается на автомобиль, позволяет осуществлять

считывание и фиксацию обработки мусорных контейнеров путем использования методов радиочастотной идентификации при осуществлении погрузо-разгрузочных работ (Binman), а также осуществляет видеофиксацию движения и погрузо-разгрузочных работ. Оборудование Binman представлено на рис. 7. Другое направление получения объективных исходных данных – контроль за работой дополнительного оборудования мусоровозов (фиксирование работы лебедок и прессов на треке перемещения – Omnicomm).

Рис. 7. Оборудование системы Binman [11]

Программные комплексы такого типа представляют интерес, однако предоставляемые ими показатели чаще являются качественными характеристиками системы.

Существуют телематические измерительные системы, учитывающие нагрузку мусоровоза на ось, что позволяет оценивать также массу перевозимых отходов [9]. Такой подход потенциально более надежный для получения исходных данных, однако на сегодняшний день такие системы используются редко ввиду высокой стоимости оборудования и низкой надежности.

Система контроля на полигонах

Поскольку самым массовым и самым дешевым в России по-прежнему остается метод захоронения отходов, в этой точке технологического процесса находится наиболее важное место контроля потоков отходов.

На сегодняшний день в системе работы с отходами в местах захоронения поток контролируется с помощью систем взвешивания – весовых комплексов (предполагающих контроль веса проходящих через них мусоровозов). На рынке существуют программные решения в виде автоматизированных весовых комплексов. Однако даже сегодня наличие весового контроля является скорее внутренней необходимостью полигонов для выставления счетов за реализацию услуг, нежели средством контроля и анализа потоков. Кроме того, далеко не все сортировочные станции и полигоны оборудованы такими системами. Учет отходов ведется по внутреннему уставу, который у каждого предприятия может быть свой.

Проблемы технологического процесса работы с отходами

Учет потоков отходов в системе накопления ведется повсеместно с использованием «абстрактных» метров кубических, даже при использовании из-

мерительных систем, а учет в системе утилизации (особенно на полигонах захоронения) ведется в тоннах. Такой подход является почвой для появления серых зон в системе, искажений и невозможности контролировать и оптимизировать процесс работы с отходами.

Попытки реформировать систему и заставить ее работать единообразно производятся, однако эти действия не носят системных характер. Так, например, в феврале 2021 года появилась информация о что, что в Башкирии установят датчики определения веса на каждый мусоровоз и полигон [7]. Аналитики утверждают, что в год в Башкирии образуется 1,5 млн тонн отходов, из которых на легальные полигоны попадает порядка 1 млн тонн [7]. Можно допустить что схожие проблемы испытывают и другие субъекты Российской Федерации, что делает существующую систему работы с отходами неэффективной.

В результате анализа существующих измерительных систем становится видна основная проблема системы работы с отходами. Совокупность измерительных систем в технологическом процессе (рис. 8) наглядно демонстрируют системную ошибку в подходе.

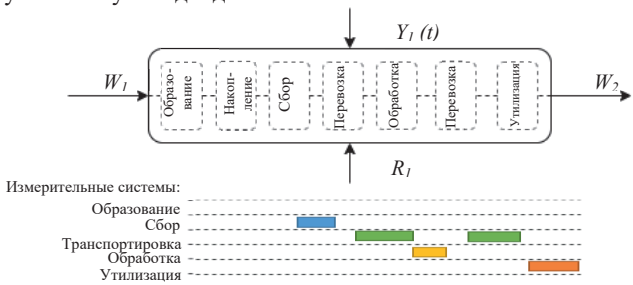


Рис. 8. Совокупность измерительных систем в технологическом процессе работы с отходами

Элементы процесса и измерительные системы работают исключительно отдельно друг от друга в разных блоках технологического процесса, не взаимодействуя друг с другом и не учитывая информацию, полученную на других участках технологического процесса. Это происходит потому что организации, вовлеченные в технологический процесс, связаны исключительно финансовыми обязательствами между собой и не заинтересованы в глобальном изменении системы и широком ее контроле.

Заключение

Для решения описанной проблемы необходимо изменить принципиальный подход к описанию и реализации технологического процесса работы с отходами. Основной задачей можно считать переход от разделенных обособленных элементов процесса к комплексному единому подходу в работе с системой. Разработка связанной, взаимодополняющей системы измерительной аппаратуры позволит контролировать процессы, протекающие в системе и влиять на них

не в рамках одного элемента, а путем разработки дополнительных управляющих воздействий на всю систему Y_2 (t), и при помощи дополнительных ресурсов R_2 (t) получать на выходе системы полезные ресурсы X_1 (t) (безотходное производство) или вещество со значительно сниженными опасными свойствами (рис. 9).

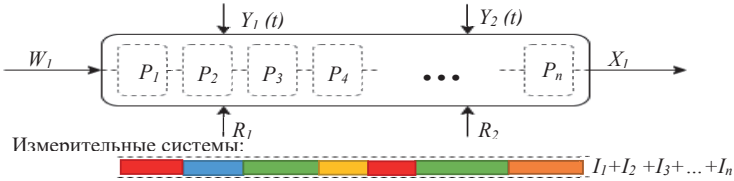


Рис. 9. Модель единого технологического процесса работы с отходами

Применение измерительных систем, поможет предприятиям контролировать процесс вывоза отходов на макроуровне, а также позволит применять современные методы анализа, и оптимизации производственных и бизнес процессов. В рамках реформы ТБО и разработки территориальных схем накопления отходов такие, инструменты становятся необходимыми.

На сегодняшний день существует необходимость в разработке принципиально новых подходов к измерительным системам в ключевых участках технологического процесса, а именно в области сбора и утилизации отходов.

Библиографический список

1. *Рубинов В. В.* Оценка динамики роста отходов в Санкт-Петербурге // Системный анализ и логистика. СПб.: ГУАП. 2020. С. 3–8.

2. *Иванцова Е. А.* Проблемы и перспективы управления твердыми бытовыми отходами // Вестник Волгоградского государственного университета. 2016. № 5. С. 109–113.

3. *Глеба О. В. Чудакова К. А.* Раздельный сбор отходов в России: проблемы и пути решения // Аграрное и земельное право. 2020. № 2. С. 56–59.

4. Постановление Правительства РФ от 25 августа 2008 г. № 641 «Об оснащении транспортных, технических средств и систем аппаратурой спутниковой навигации ГЛОНАСС или ГЛОНАСС/GPS» (с изменениями и дополнениями).

5. Что происходит с отходами в России и в мире. URL: republic.ru/posts/90408 (дата обращения: 30.03.2021).

6. Оборудование для спутникового мониторинга. URL: https://ssm22.ru/s-1–yanvarya-2018–goda-musorovozy-obyazany-ispolzovat-oborudovanie-dlya-sputnikovogo-monitoringa/ (дата обращения: 30.03.2021).

7. В Башкирии установят датчики определения веса. URL: https://tass.ru/obschestvo/10795917 (дата обращения: 30.03.2021).

8. Прибор учета ТКО. URL: http://gor-hoz.ru/gh/article_1183.html (дата обращения: 30.03.2021).

9. Система мониторинга мусоровозов. URL: https://www.jv-technoton.com/ru/resheniya/monitoring-musorovozov/ (дата обращения: 30.03.2021).

10. Спутниковый мониторинг транспорта. URL: https://global-ural.ru/global/functions.html (дата обращения: 30.03.2021).

11. Онлайн контроль мусоровозов. URL: https://binman.ru/ (дата обращения: 30.03.2021).

УДК 629.735.33

Ю. А. Силин*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО БАЛАНСА ВНУТРИ КОНТЕЙНЕРА ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ

В статье кратко рассмотрены возможности применения квадрокоптеров для доставки различных грузов. Для практической реализации доставки грузов был реализован переносной автономный модуль, способный поддерживать заданную температуру в течение определенного времени. Самым оптимальным является использование для охлаждения элемента пельтье, так как он является достаточно компактным.
Ключевые слова: квадрокоптеры, доставка грузов, организация доставки, контейнер для доставки грузов.

Y. A. Silin*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DEVELOPMENT OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM TO MAINTAIN THE TEMPERATURE BALANCE INSIDE THE CONTAINER DURING TRANSPORTATION

The article briefly discusses the possibilities of using quadrocopters for the delivery of various cargoes. For the practical implementation of cargo delivery, a portable, autonomous module was implemented, capable of maintaining a given temperature for a certain time. The most optimal is to use a peltier element for cooling, since it is quite compact.
Keywords: quadrocopters, cargo delivery, organization of delivery, container for cargo delivery.

Введение

Идея использовать дрон для доставки грузов давно обсуждается. Доставка грузов с помощью квадрокоптеров сегодня – это одно из перспективных направлений применения беспилотников в гражданской сфере, а одна из главных особенностей данного вида транспорта в том, что груз можно доставить в труднодоступные районы за короткий срок. В качестве груза могут выступать:

биологические материалы, вакцины, медикаменты или питание в клиники, больницы или непосредственно пострадавшим от стихийных бедствий [1];

доставка почты, товаров и других небольших грузов [1];

доставка товаров из магазинов (включая еду и напитки).

Дроны DHL доставляют кровь, медикаменты и противоядия в удаленные регионы Танзании: немецкие аппараты позволили охватить свыше 8000 пациентов и пересмотреть подход к оказанию медицинских услуг в ряде населенных пунктов [2].

На данный момент сразу несколько крупных корпорацией разрабатывают дроны для доставки грузов, ниже представлено описание разрабатываемых проектов.

Сам же метод доставки при помощи квадрокоптеров заключается в том, что дрон получает информацию о доставке (например, информацию о грузе, информацию о местоположении груза и/или информацию о месте доставки), автономно или полуавтономно получает груз из места хранения и доставляет по воздуху.

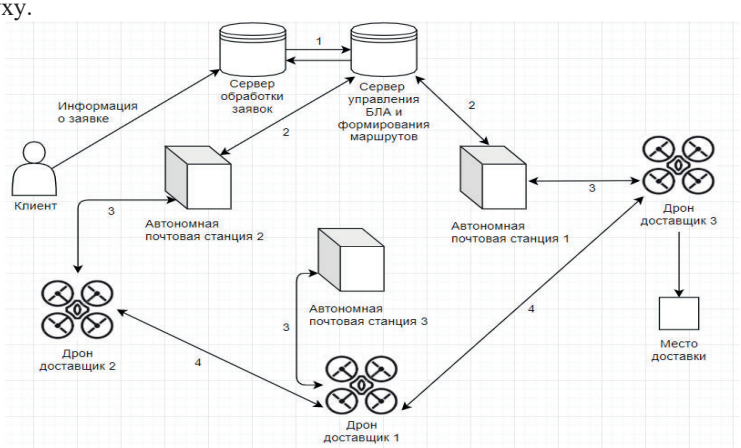


Рис. 1. Схема обработки заявки по доставке груза

Когда дрон достигает места доставки, он исследует поверхность в месте доставки для безопасной посадки, производит посадку, затем отпускает груз, тем самым завершая доставку. В дальнейшем, если дрон ранее успешно приземлился в месте доставки, он может использовать сохраненную информацию о месте доставки (например, безопасную зону посадки, географические координаты зоны посадки) для навигации при посадке в точке доставки. После завершения доставки дрон может вернуться в базовый пункт обработки или в другое место для получения другого груза, зарядки батарей и т. д.

Практическая реализация доставки грузов при помощи дронов в контейнере

Для реализации доставки грузов необходимо разработать контейнер с возможностью поддержания заданной среды. Транспортировать данный модуль планируется на квадрокоптере, так как он имеет несколько очень важных особенностей по сравнению с беспилотными доставщиками самолетного типа, а именно возможность зависнуть в воздухе, высокая маневренность и возможность вертикального взлета и посадки, что освобождает от необходимости приобретения специальных пусковых установок. Возможность зависнуть в воздухе и высокая маневренность необходимы в черте города, так как беспилотному

доставщику может быть поставлена задача, в которой необходимо совершать маневры в узких улицах при доставке медикаментов прямо к месту ЧП (чрезвычайного происшествия). Возможность вертикального взлета и посадки может использоваться для доставки медикаментов прямо на крыши зданий (к примеру здание больницы).

Сборка модуля осуществлена на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 Model B+. Охлаждение модуля происходит при помощи двух элементов пельтье, на каждом из которых установлен алюминиевый радиатор и вентилятор для повышения эффективности охлаждения. Данные о температуре поступают в Raspberry Pi 3 Model B+ от датчика температуры, который установлен в грузовом отсеке. Регулировка температуры в грузовом отсеке будет происходить при помощи лопасти, установленной на сервопривод, который управляется при помощи Raspberry Pi. У лопасти имеется два крайних положения:

1) нагретый воздух от радиаторов будет отводиться наружу (во время охлаждения);

2) нагретый воздух от радиаторов будет поступать в грузовой отсек если температура в нем опустилась слишком низко.

Описание электронных компонентов

Электронные компоненты: одноплатный компьютер Raspberry Pi 3; элементы Пельтье TEC1–12703 – 2 шт.; DC-DC преобразователи – 4 шт.; сервопривод MG90S – 1 шт.; вентиляторы – 2 шт.; датчик температуры DS18B20 – 1 шт.

В табл. 1 представлены технические характеристики электронных компонентов.

Таблица 1

Технические характеристики Raspberry Pi 3 Model B+ [3]

1	Процессор	64-битный четырехъядерный ARM Cortex-A53 с тактовой частотой 1,4 ГГц на однокристальном чипе Broadcom BCM2837
2	оперативная память	1ГБ LPDDR2 SDRAM
3	цифровой видеовыход	HDMI
4	композитный выход	3,5 мм (4 pin)
5	USB порты	4×USB 2.0
6	беспроводная сеть	WiFi 2,4/5 ГГц, 802.11n
7	Ethernet	10/100/1000 Мб RJ45
8	Bluetooth	Bluetooth 4.2, Bluetooth Low Energy
9	разъем дисплея	Display Serial Interface (DSI)
10	разъем видеокамеры	MIPI Camera Serial Interface (CSI-2)
11	карта памяти	MicroSD
12	порты ввода-вывода	40
13	габариты	85×56×17 мм

Таблица 2

Технические характеристики Пельтье TEC1–12703 [4]

1	Рабочее напряжение макс.	15,4В
2	Рабочий ток макс.	3А
3	Внешние размеры	40×40×4,7мм
4	Производительность макс.	38Вт
5	Материал	Al2O3
6	Длина провода	150мм
7	Материал контакта	BiSn
8	Разница температур макс.	68°С
9	Сопротивление	3,2Ом

Таблица 3

Технические характеристики DC-DC преобразователя

1	Вес	12 г
2	Размер	48×26×13 мм (Д × Ш × В)
3	Диапазон входного напряжения	5,0–25 В
4	Диапазон выходного напряжения	0,5–25 В
5	Непрерывный выходной ток	3А (макс.)
6	Непрерывный входной ток	3А (макс.)
7	Входная/Выходная мощность	30 Вт (макс.)

Таблица 4

Технические характеристики датчика температуры DS18B20 [5]

1	Диапазон измеряемых температур	−55…+125 °С
2	Точность	±0,5 °С (в пределах −10…+85 °С)
3	Время получения данных	750 мс при 12-битном разрешении; 94 мс при 9-битном разрешении
4	Напряжение питания	3–5,5 В
5	Потребляемый ток при бездействии	750 нА
6	Потребляемый ток при опросе	1 мА

Описание конструкции контейнера

Конструкция модуля без электронных компонентов состоит из следующих пяти элементов.

Элемент 1 – грузовой отсек (рис. 2): объем отсека 1000 см^3.

Элемент 2 – корпус (рис. 3): имеет 2 гребня по бокам, которые вставляются в пазы грузового отсека при сборке. На корпус устанавливается Raspberry Pi, элементы пельтье, радиаторы и куллеры.

Элемент 3 – крышка: на нее устанавливаются DC-DC преобразователи и сервопривод с лопастью.

Элемент 4 – лопасть: устанавливается на сервопривод. Служит для регулировки направления потока нагретого воздуха.

Элемент 5 – упор: служит для закрепления грузового отсека на корпусе.

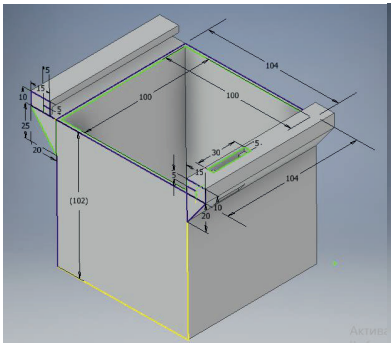


Рис. 2. Грузовой отсек

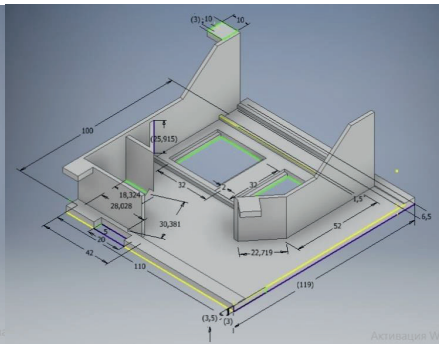


Рис. 3. Корпус

На рис. 4 представлен собранный вариант контейнера для перевозки грузов.

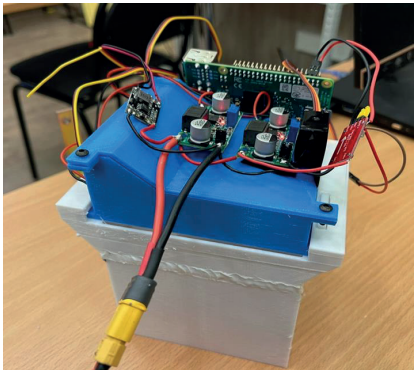


Рис. 4. Опытный образец контейнера для перевозки грузов

Результаты лабораторных испытаний

В рамках лабораторных испытаний были измерены основные показатели работы данного устройства. На рис. 5, 6 показаны результаты работы контейнера.

Графики потребления силы тока I[A] и мощности P[Вт]:

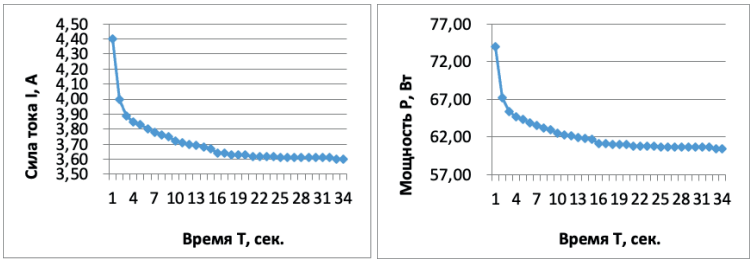


Рис. 5. Графики потребления силы тока I[A] и мощности P[Вт]

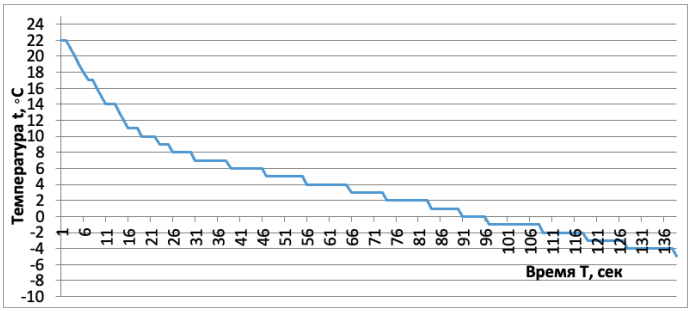


Рис. 6. График изменения температуры t (◦C) охлаждающейся части элемента Пельтье

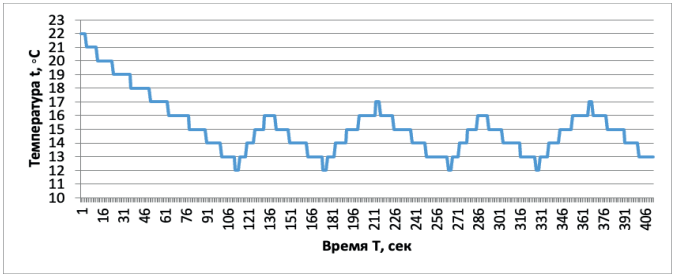


Рис. 7. График изменения температуры в грузовом отсеке при заданной температуре 15◦C

Формула дисперсии $D = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - X)^2}{n-1}$, где n – число измерений, а $\overline{X}$ среднее арифметическое значение n измерений. Значение дисперсии: 4,266°C.

Формула среднеквадратического $S=\sqrt{D}$. Значение среднеквадратического отклонения: 2,065°С.

Выводы

В рамках разработки контейнера с возможностью задавания определенной внутренней среды для квадрокоптера с целью доставки грузов, был реализован проект, который выполняет поставленную задачу, имеет возможность программным образом управляться и поддерживать заданную среду оператором.

Однако данный проект имеет возможность для дальнейших доработок, в частности вместо того, чтобы перераспределять нагретый от радиаторов воздушный поток в отсек с грузом, можно установить программируемое реле, которое позволит включать и выключать элементы Пельтье. Есть возможность оптимизировать расположение электронных компонентов контейнера, с целью повышения эффективности отвода тепла. В дальнейшем нужно заменить разъем XT60 для питания электронных компонентов.

Библиографический список

1. Доставка беспилотниками грузов. URL: http://robotrends.ru/robopedia/dostavka-bespilotnikami-gruzov (дата обращения: 31.03.2021).

2. Life-Saving Drones Fly Medicine to Tanzania's Remotest Spots. URL: https://www.bloomberg.com/news/articles/2019–03–08/life-saving-drones-deliver-medicine-to-tanzania-s-remotest-spots (дата обращения: 31.03.2021).

3. Микрокомпьютер Raspberry Pi 3 Model B+. URL: https://amperka.ru/product/raspberry-pi-3–model-b-plus (дата обращения: 31.03.2021).

4. Герметичный датчик температуры DS18B20. URL: https://amperka.ru/product/sealed-temperature-sensor-ds18b20#docs (дата обращения: 31.03.2021).

5. TEC1–12703. URL: https://www.tme.eu/ru/details/pm-40x40-38/modulipelt-e/stonecold/tec1–12703/ (дата обращения: 31.03.2021).

УДК 539

С. Ф. Скорина*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ РАЗРАБОТКИ, ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СЕНСОРОВ БОРТОВЫХ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ, ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ

Рассмотрены проблемы метрологического сопровождения этапов жизненного цикла наноразмерных инерциальных сенсоров параметров движения основания бортовых систем стабилизации, ориентации и навигации. Предложен комплексный подход для совершенствования метрологического обеспечения жизненного цикла подобных сенсоров на основе широкого внедрения конвергенции нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных технологий.
Ключевые слова: метрологическое сопровождение, наноразмерные сенсоры, конвергенция технологий.

S. F. Skorina*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PROBLEMS JF METROLOGICAL SUPPORT FOR THE DEVELOPMENT, PRODUCTION AND APPLICATION OF NANOSCALE INERTIAL SENSORS OT ON-BOARD STABILIZATION, ORIETATION FND NAVIGATION SYSTEMS

The problems of metrological support of the stages of the life cycle of nanoscale inertial sensors of motion parameters of the base of onboard stabilization, orientation and navigation systems are considered. An integrated approach is proposed for improving the metrological support of the life cycle of such sensors based on the widespread introduction of convergence of nano-, bio-, information, cognitive and socio-humanitarian technologies.
Keywords: metrological support, nanoscale sensors, convergence of technologies.

Особенностью современного этапа развития электронной компонентной базы (ЭКБ) является насущная потребность ее дальнейшей микроминиатюризации. Характерные размены элементов интегральных микросхем, применяемых даже в составесовременных мобильных гаджетах, сегодня уже определяется единицами нанометров. Обеспечение указанных размеров не является пределом и подкреплено наличием соответствующего метрологическогосопровождения процесса производства такой ЭКБ. В соответствии с постулатами метрологической науки точность средств контроля технологических процессов производства подобных изделий должна уже характеризоваться десятыми долями нанометров.

Еще белее актуальна проблема выполнения достоверных прецизионных измерений при проектировании, производстве и последующей эксплуатации такого класса представителей микро- и наносистемной техники. Первоочередным требованием становится обеспечение возможности достаточно достоверной оценки погрешности измерений. Отсутствие сведений о точности или недостоверные оценки в значительной степени обесценивают информацию о качестве и конкурентоспособности продукции, об эффективности используемых технологических процессов и оборудования. Некорректная оценка измерений сверхмалых размеров обусловливает экономические потери предприятия и возможные тяжелые последствия из-за некорректной работы сенсоров в процессе их использования по назначению в составе бортовых систем подвижных объектов. При этом заниженная оценка погрешности измерений определяет рост выпуска некондиционной продукции, неправильные выводы при научных исследованиях, ошибочным решениям при экспериментальной отработке новых образцов техники. Завышенная оценка погрешности измерений также чревата негативными последствиями, которые определяют возможность ошибочных заключений о потребности использования прецизионных средств измерения, что в свою очередь связано с ухудшением показателей экономической эффективности предприятия. К последнему по праву относятся и с каждым годом становятся все более востребованы наноразмерные инерциальные сенсоры подвижных объектов – нано-электромеханические гироскопы и акселерометры [1]. Проблематика обусловлена тем, что в данном случае возникает задача высокоточного определения не только отдельных геометрических размеров элементов сенсора, но и параметров их взаимной ориентации. Последние в процессе функционирования сенсора в составе бортовых систем ориентации, стабилизации и навигации могут изменяться под действием инерционных сил различной природы. По величине возникающих линейных или угловых эволюций инерционной массы относительно корпуса сенсора возможно судить о таких параметрах движения объекта, как углы определяющие угловую ориентацию объекта в заданной системе координат, проекции вектора угловые скорости, проекции вектора линейного ускорения и вектора скорости подвижного объекта. Решение задачи высокоточного определения параметров движения объекта осложняется тем, что потребную высокуюточность измерений необходимо обеспечить на подвижном объекте с учетом комплекса разнообразных внешних и внутренних возмущающих факторов.

В 2005 году в журнале «Физика твердого тела» была опубликована работа отечественных ученых, посвященная исследованию углеродного нанокластера $C_{20}@C_{80}$ [2]. Этот кластер образуют фуллерены C_{20} и C_{80}. Каждый из указанных наночастиц состоит из 20 и 80 атомов углеродасоответственно. При этом диаметр частицы C_{20} несколько меньше диаметра частицы C_{80}. Проведенное исследование энергетических характеристик указанного кластера выявило факт вращения частицы C_{20} внутри фуллерена C_{80}, что позволило говорить о наноразмерном инерциальном сенсоре – наногироскопе со всеми присущими ему свойствами быстровращающихся тел. В первом приближении для создания сенсора

параметров угловой ориентации объекта достаточно только первого свойства быстровращающихся тел, а именно – свойства быстровращающейся частицы C_{20}сохранять неизменным направление оси своего вращения в инерциальном пространстве.

Однако по истечении 15 лет идея создания сверхминиатюрного инерциального сенсора для определения параметров угловой ориентации объекта продолжает оставаться только идеей. Это обусловлено комплексом причин, среди которых необходимость создания прецизионных устройств съема информации, и устройств управления положением главной оси гироскопа относительно корпуса сенсора, устройств арретирования, системы стабилизации скорости вращения и др. При этом перечисленные устройства, используемые в классических и микромеханических инерциальных датчиках, в силу своих габаритов и тактико-технических характеристик, не могут быть использованы в наноразмерных сенсорах. Но приоритетной проблемой все же является отсутствие соответствующего метрологического обеспечения всех этапов жизненного цикла подобных сенсоров. Именно оно должно обеспечить возможность достоверного контроля изготовления всех элементов и самого сенсора, эффективное функционирование сенсора в составе бортовых систем стабилизации, ориентации и навигации подвижных объектов.

Как представляется, решение указанной проблемы должно носить комплексный, системный характер и сопровождаться: всесторонним анализом и оценкой точности, достоверности выполняемых измерений, разработкой эффективных оценок неопределенности измерений, разработкой адекватных математических моделей ошибок измерений, технико-экономическим обоснованием создания и выбора потребных инструментальных средств, аудитом и сертификацией системы менеджмента качества таких инерциальных сенсоров. Отмеченные направления работы сложны и взаимосвязаны, требуют существенны затрат и дорогостоящи. Но результат обеспечит не только существенный прорыв в направлении дальнейшей микроминиатюризации ЭКБ, но и ощутимый вклад в развитие природоподобных технологий. Составной частью последних является NBICS-технология (конвергенция нано- , био- , информационной, когнитивной и социо-гуманитарной технологий), без которой невозможно обеспечить инновационное развитие России в XXI веке [3].

Предлагаемый комплекс мероприятий по созданию наноразмерных инерциальных сенсоров в полной мере отвечает вызовам современного этапа развития и Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. В сентябре 2015 года на пленарном заседании70-й сессии Генеральной ассамблеи Организации объединенных наций Президент Российской Федерации В. В. Путин отмечал: «Нам нужны качественно иные подходы. Речь должна идти о внедрении принципиально новых природоподобных технологий, которые не наносят урон окружающему миру, а существуют с ним в гармонии и позволят восстановить нарушенный человеком баланс между биосферой и техносферой».

Библиографический список

1. Наноэлектромеханический датчик ускорения: пат. 2 391 673 РФ: МПК G01P 15/13, B62B 1/00 / Скорина С. Ф., Гамов Ю. В.: заявитель и патентообладатель СПб. гос. университет аэрокосмич. приборостроения. заявл. 2008.11.12; опубл. 2010.06.10.

2. *Глухова О. Е., Жбанов А. И., Резков А. Г.* Вращение внутренней оболочки наночастицы $C_{20}@C_{80}$. Физика твердого тела. 2005. Т. 47. Вып. 2. С. 376–382.

3. *Белянцев А. Е.* NBIC-технологии как сфера международного взаимодействия. Международные отношения. Политология. Религиоведение // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского. 2013. № 6 (1). С. 350–356.

УДК 658.52

Н. А. Слободчиков*
кандидат военных наук, профессор
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ РЕЖИМНЫХ ГРУЗОВ

Рассмотрены вопросы организации контроля за соблюдением температурного режима при организации перевозок скоропортящихся грузов. Представлен обзор датчиков и вопросов интеграции их цепи поставок и процессы перевозок. Приведено сравнение имеющихся технологий и аппаратных систем.
Ключевые слова: непрерывная холодильная цепь, термоконтейнер, термоиндикатор, датчики, изотермический подвижной состав.

N. A. Slobodchikov*
PhD Sc. Military, Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PROBLEMS OF TEMPERATURE CONTROL DURING TRANSPORTATION OF REGIME CARGOES

The article considers the organization of control over the observance of temperature conditions in the organization of transportation of perishable goods. An overview of sensors and issues of integration of their supply chain and transportation processes is presented. A comparison of available technologies and hardware systems is given.
Keywords: continuous cold chain, thermal container, thermal indicator, sensors, isothermal rolling stock.

Введение

В современном мире с развитием экономики и международного разделения труда растет роль и значение транспорта как для отдельно взятой страны, так и для всего мира. Ярким примером этого тезиса стало перекрытие 23 марта 2021 года контейнеровозом «Ever Given» Суэцкого канала. Убытки мировой экономике от этой аварии ежедневно, по сообщениям «Lloyd's List», одной из старейших в мире служб деловой информации о морской торговле, составляли 9,6 млрд долларов. Для справки, обычно каждый день в западном направлении через канал проходят товары общей стоимостью около $5,1 млрд, а в восточном – примерно на $4,5 млрд. Среди грузов, застрявших в этой «транспортной пробке» достаточно большую долю составляли режимные грузы (скоропортящиеся). Таким образом, в среднем за час через канал перемещаются товары на сумму $400 млн [1]. По заявлению администрации Суэцкого канала, только их потери от этой аварии составили 1 млрд долларов США.

В то же время кроме прямых потерь из-за задержек в поставках, срывов контрактов возникают «отложенные» потери, которые можно выявить только в пункте назначения, да и то только после проведения специальных лаборатор-

ных исследований, особенно если речь идет о скоропортящихся грузах или в более широком понимании этого о режимных грузах.

В первую очередь это связано с особенностями организации транспортировки скоропортящихся грузов в различные регионы нашей страны и за рубеж, так как является одним из самых сложных логистических процессов. Причина этого в первую очередь в том, что эти товары требуют поддержания температурно-влажностного режима. Кроме того, у них имеется максимальный срок пребывания в «непрерывной холодильной цепи» (НХЦ), ограниченные как «сроки транспортабельности», так и максимальным сроки их продажи на рынке, которые в свою очередь ограничены максимальным сроком хранения.

Организация температурного контроля

Как видно из представленного примера, при организации перевозок необходимо учитывать не только расстояние, скорость, род и вид транспортного модуля, но и температурный режим, при котором груз предъявляется к перевозке (храниться на складах), а также температурный режим в период самой перевозке. В этой связи вопросам контроля за соблюдением температурных режимов, влияющих на сохранение свойств, скоропортящихся грузов в пути следования, как основным при организации перевозки и выбора транспортного средства во всем мире уделяется огромное значение.

Принимая во внимание правила перевозки грузов, при выборе условий перевозки и подвижного состава (вида транспорта) или типа контейнера грузоотправитель должен учитывать сроки доставки груза, определенные в соответствии с Правилами исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом, утвержденными приказом Минтранса РФ от 25.07.2012; 245 от 07.08.2015, а также сроки хранения груза при транспортировке без соблюдения температурного режима, а также температуру наружного воздуха в различных климатических регионах, нахождения груза в пути с учетом безопасности и качество загрузки.

При этом в соответствии с п. 63 технического регламента Евразийского экономического союза ТР ЕАЭС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбных продуктов» [3] транспортные средства и контейнеры, предназначенные для перевозки пищевой рыбной продукции, должны быть оснащены средствами, позволяющими соблюдать и регистрировать установленный температурный режим при транспортировке. Эти же требования предъявляются в соответствии с п. 99 тех. регламента Таможенного союза ТР ТС 034/2013 «О безопасности мяса и мясных продуктов» [4] для ТС и контейнеров, оборудованных для транспортировки продуктов убоя и другой мясной продукции.

Датчики, которые могут использоваться для этой цели, включают в себя специальные устройства контроля и мониторинга, которые могут отслеживать уровень температуры и влажности, а также регистрировать критические превышения температуры и влажности в данной среде. Кроме того, они важны не только для записи информации, но и для ее хранения в течение всего времени перевозки, как на самих датчиках, так и при использовании системы ГЛОНАСС и т. п. на

оборудовании отправителя в его офисе. Это важно, потому что согласно разделу 18 в случае составления коммерческого акта о повреждении товаров, перевозимых при помощи железнодорожных транспортных средств или контейнеров, грузоотправитель или оператор поезда и (или) контейнера обязан направить перевозчику информацию о температурном режиме на всем маршруте следования груза.

Технические требования к самописцам

Минтранс РФ предъявляет особые требования к регистратору температуры, которые указаны в Приложении 2 к свидетельству СПС. В частности, регистратор температуры для рефрижераторных перевозок скоропортящихся грузов должен отвечать следующим требованиям.

Регистратор должен быть внесен в реестр состояния средств измерений.

Погрешность измерения не должна превышать ± 1 °С.

Должно быть не менее двух датчиков температуры.

Требуется возможность записи данных в течение года с шагом 60 сек.

Данные устройства должны быть доступны для просмотра с персонального компьютера или мобильного телефона (смартфона).

Транспортировка иммунобиологических препаратов регулируется всеми санитарно-эпидемиологическими правилами СП 3.3.2.3332-16. Согласно этому разрешению возможная допустимая погрешность измерения температуры при транспортировке лекарств в 2 раза меньше, чем у «скоропортящихся», и составляет ±0,5 °С.

Соответствие требованиям ATP и SP

Для начала сравним типовые устройства, относящиеся к категории рекордеров для холодильника.

Регистратор

Визуально устройство выглядит как флешка. Информация об изменении температуры хранится исключительно в его памяти, что не позволяет считывать ее в реальном времени. Данные из логгера передаются на сторонние устройства в виде таблиц и графиков. Дополнительный дисплей на регистраторе является спорным преимуществом из-за его расположения внутри холодильной установки. Соответственно, для просмотра информации о текущих показаниях температуры потребуется открыть дверцы холодильника, то есть нарушить герметичность.

Тепловые индикаторы

Устройства этого типа делятся на 2 основных типа: одноразовые (капиллярные и химические) и многоразовые (электронные). Одноразовые термоиндикаторы не имеют проектной емкости для хранения данных и не соответствуют нормативным требованиям. Электронный тепловой индикатор – первая попытка создать профильное устройство для мониторинга системы холодильной цепи. Это регистратор с обязательным отображением и дополнительной возможностью информировать водителя о нарушениях. Мониторинг температуры в реальном времени, как и у логгера, осуществляется открыванием дверей рефрижератора, а данные записываются с помощью одного устройства – датчика.

Такие датчики делятся на механические регистраторы; тепловизоры; системы GPS-мониторинга/GLONASS с датчиками температуры [7]. В табл. 1 описаны основные примеры подобных устройств.

Таблица 1

Варианты терморегистраторов

№	Название устройства	Описание устройства	Рисунок
1	«DataCOLD 250»	Устройство имеет 2 канала датчиков, 1 канал регистрации событий, память 256 КБ (минимум на 1 год для 2 датчиков и 15-минутный интервал записи), интервал записываемых данных может быть установлен от 1 до 60 мин., 4 клавиши управления устройством и ИК-порт для передачи данных и настройки [8]	
2	ТЕРМО-ХРОН/ Thermochron iButton	Диапазон измерения и регистрации температуры: от –40 до + 1200 °С; влажность: от 0 до 98 %. Абсолютная погрешность температуры ~ ± 0,2 °С; по влажности: ~ ±2,0 %. Диапазон рабочих температур от –40 до + 70 °С (кратковременно от –50 °С). Светодиодный индикатор работает до 40 °С. К тому же это очень точное (0,2 %) и компактное устройство, начало записи задается кнопкой или по календарному времени. Память записывается полностью или циклически	
3	Логгер 100	Это устройство позволяет регистрировать значения как температуры, так и влажности. Датчик может выполнять измерения в достаточно широком диапазоне температур (от –40 до + 70 °С), что дает возможность использовать его для транспортировки, в том числе охлажденных и замороженных продуктов (например, мясных продуктов, рыбы, полуфабрикатов и др.). Также часто при транспортировке продуктов питания необходимо контролировать определенный уровень относительной влажности (фрукты и овощи, кондитерские и хлебобулочные изделия, крупы и т. д.), с чем вполне справляется данное устройство [11]	

Заключение

Таким образом, из выше сказанного можно сделать следующий вывод, в настоящее время вся нагрузка по контролю температурного состояния груза, а также за созданием доказательной базы при несохранных перевозках возлагается на грузоотправителя. При этом он сталкивается в свою очередь еще с рядом противоречий, а именно необходимостью снижения издержек на транспортировку и выбором способа и средств контроля качественных параметров перевозок скоропортящихся грузов.

При этом в настоящее время нет научно обоснованного метода определения эффективности использования того или иного датчика, а также нет исследований, описывающих необходимое количество для установки датчиков в транспортном модуле, а грузоотправители и перевозчики выбирают датчики и их количество в зависимости от собственных представлений о качестве и надежности отдельных устройств.

В настоящее время остро стоит вопрос о разработке математической модели, которая позволит определить эффективность использования того или иного устройства контроля установленных температурных режимов перевозки скоропортящихся грузов в изотермических транспортных модулях. Кроме того, на основе этой модели необходимо разработать методологию выбора отправителя или операторов изотермических модулей в зависимости от транспортных маршрутов, используемых транспортных модулей, точности, необходимой для поддержания температурного режима, а также экономических показателей, таких как, например, целесообразность использования того или иного набора систем контроля за заданной средой.

Библиографический список

1. URL: https://nv.ua/biz/economics/sueckiy-kanal-ogromnyy-konteynerovoz-ostanovil-dvizhenie-tovarov-na-summu-9–6–mlrd-v-den-50150161.html (дата обращения: 03.02.2021).

2. Приказ МТ РФ от 4 марта 2019 г. № 66 «Об утверждении правил перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов». URL: http://www.consultant.ru/(дата обращения: 03.02.2021).

3. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 18.10.2016 № 162 «О техническом регламенте Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции». URL: http://www.eaeunion.org/(дата обращения: 03.02.2021).

4. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 09.12.2013 N 68 «О техническом регламенте Таможенного союза «О безопасности мяса и мясной продукции». URL: http://www.eaeunion.org/(дата обращения: 03.02.2021).

5. Соглашение о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС). URL: https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1684 (дата обращения: 03.02.2021).

6. Приказ от 18 июня 2003 г. № 45 «Об утверждении правил составления актов при перевозках грузов железнодорожным транспортом». URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=205404 (дата обращения: 03.02.2021).

7. КСБ Стелс, «Удаленный контроль температур на транспорте». URL: http://www.sosgps.ru/sensors/temperature-control/ (дата обращения: 03.02.2021).

8. РефТранс, «Регистраторы температуры». URL: http://www.reftrans.spb.ru/registratory-temperatury (дата обращения: 03.02.2021).

9. НТЛ «Электронные инструменты», «Применение регистраторов iButton при контроле транспортировки продукции собственным транспортом». URL: http://www.elin.ru/Application/?topic=own. (дата обращения: 03.02.2021).

УДК 621.436.001.1

А. В. Сумманен*
кандидат технических наук, доцент
Р. Т. Хакимов**
доктор технических наук, доцент
И. В. Белинская****
кандидат экономических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
**Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
***Ленинградский государственный университет им. А. С. Пушкина

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В статье представлены основные преимущества и недостатки сжиженного природного газа в качестве моторного топлива, используемого в двигателях внутреннего сгорания. Приведены основные рабочие показатели системы питания газовых двигателей, приведен разработанный стенд для тестовых испытаний. Представленное решение обладает новизной и новой аппаратной частью. Представлены варианты схем подачи природного газа в топливоподающую систему газового двигателя на основе электронной системы управления. Приведен фрагмент чертежа комплексного датчика. Представлены графические зависимости результаты исследований и экспериментов. Полученные результаты позволяют повысить энергоэффективности и улучшения эксплуатационных свойств.
Ключевые слова: метан, электронная система управления, процесс горения, газовый двигатель внутреннего сгорания, энергоэффективность.

A. V. Summanen*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
R. T. Khakimov**
Dr. Sc. Tech., Associate Professor
I. V. Belinskaya****
PhD Sc. Economics, Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
**St. Petersburg State Agrarian University
***Leningrad State University named after A. S. Pushkin

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF A GAS ENGINE USING AN ELECTRONIC CONTROL SYSTEM

The article presents the main advantages and disadvantages of liquefied natural gas as a motor fuel used in internal combustion engines. Particular attention in the article is paid to the study of critical pressure and temperature indicators in the fuel supply system of a gas engine and cryo tank filled with liquefied methane with thermal insulation. The article also considers the critical parameters during the outflow of methane in special tubes of circular cross-section, this process occurs during the transportation of gas in a two-phase medium. Variants of schemes for supplying natural gas to the fuel supply system of a gas engine based on an electronic control system are presented in order to increase energy efficiency and improve operational properties.

Keywords: Methane, electronic control system, combustion process, gas internal combustion engine, energy efficiency.

Введение

Одним из самых дешевых видов топлива является метан [1]. Данный вид топлива обладает своими плюсами и минусами. К плюсам можно отнести высокую экологичность данного вида топлива, имеет низкую стоимость по сравнению с пропаном, легко растворяется в воздухе, не образуя скопления в одном месте, что сказывается положительно на безопасности. Минусы: низкая плотность газа, высокая летучесть, взрывоопасность.

В данной статье будет рассмотрено влияние электронной системы управления газовым двигателем на процессы подачи и сгорания метановоздушной смеси.

На рис. 1 показаны две схемы подачи метана в двигатель. Одна метан в жатом состоянии (рис. 1а) и метан в жидком состоянии (рис. 1б). В первом случае метан в баке находиться под давлением 19–20 МПа, во втором 0,5–1,6 МПа.

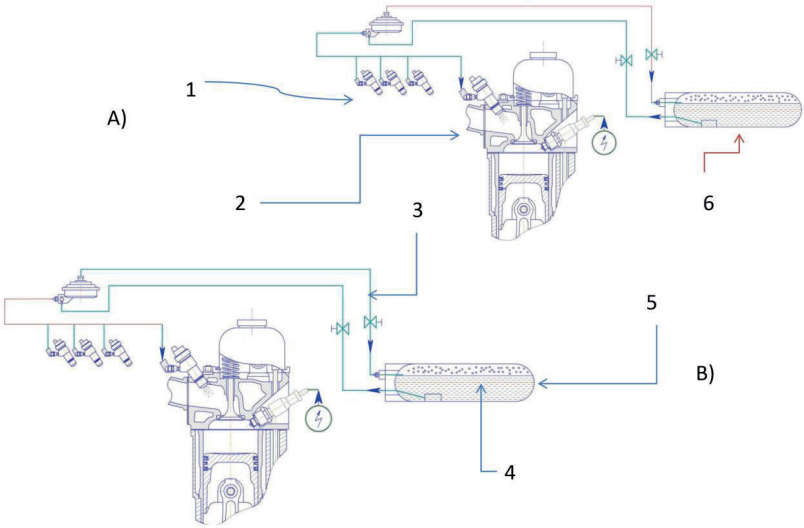


Рис. 1. Основные рабочие показатели системы питания газовых двигателей

Предлагается комплексная схема (рис. 2) электронного управления газовым двигателем при стендовых испытаниях. В данной схеме использован электронный блок управления (ЭБУ) Корвет М10.3х (рис. 2, поз. 1) – это блоки управления предпоследнего поколения. Управление топливоподачей может осуществляться по датчику расхода воздуха (MAF), датчику абсолютного давления (MAP) или датчику дроссельной заслонки (TPS).

В зависимости от модификации КОРВЕТ 10.3х имеют следующие возможности и опции, представленные в статье [1]:

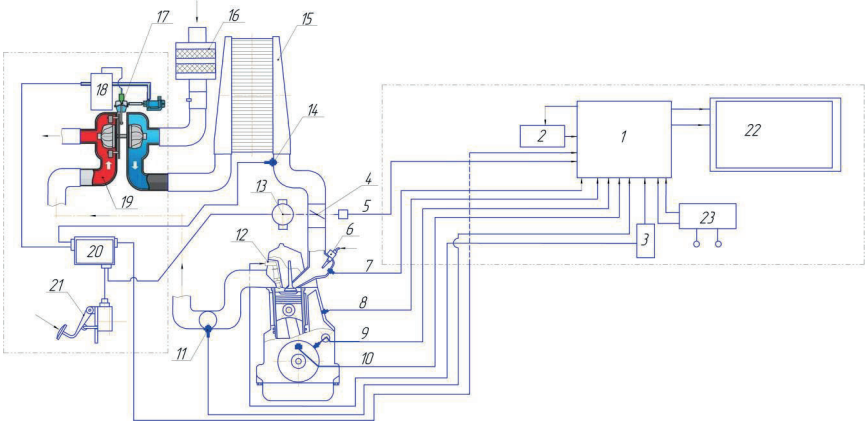


Рис. 2. Рабочая схема управления ГД и стендом при тестовых испытаниях

Также используется блок управления CDI (N3/9) (рис. 2, поз. 20).

Датчик угловой скорости и положения КВ (рис. 2, поз. 9) может быть в двух вариантах. На рис. 3 показано расположение датчиков в двух вариантах.

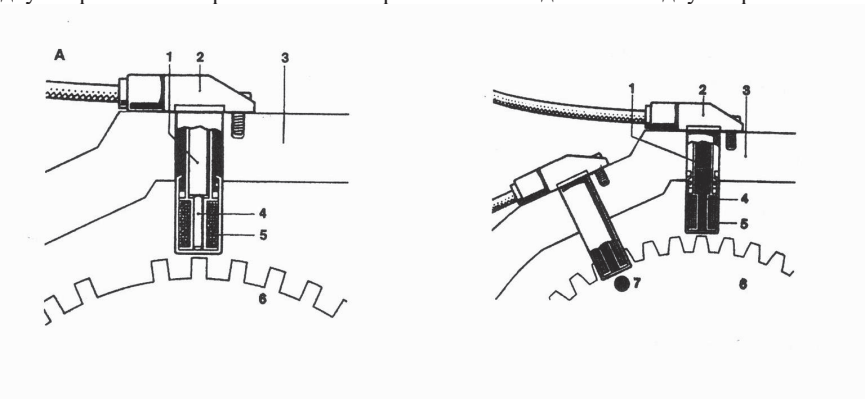


Рис. 3. Датчик скорости и положения коленчатого вала [7]

Из анализа представленных схем [7] предлагается модернизированная схема системы электронного управления ГМД с применением дополнительных датчиков (рис. 4)

Также подключается датчик давления ДДГ-200/600 – высокотемпературный неохлаждаемый датчик давления газа в цилиндре предназначен для индицирования рабочего процесса дизеля.

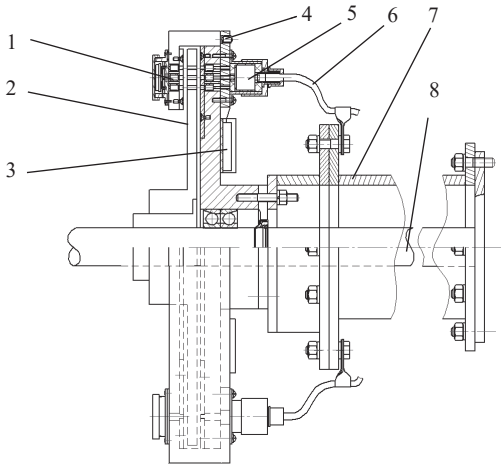


Рис. 4. Комплексный датчик определения угла ПКВ (φ2) при достижении фронта пламени максимальной турбулентной скорости в внутри цилиндра

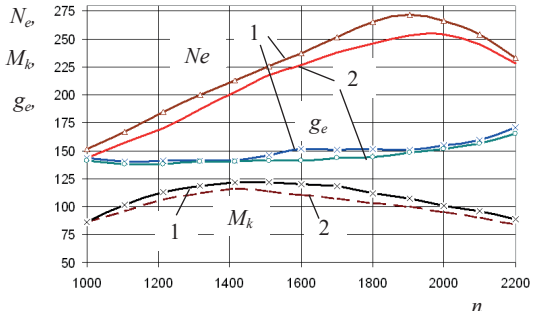


Рис. 5. Внешние скоростные характеристики исследуемого газового двигателя с наддувом на базе КамАЗ: 1 – непосредственный впрыск метана с электронной системой управления; 2 – распределенный впрыск метана

Отличительные особенности датчика:
- возможность длительной непрерывной работы;
- высокая стабильность характеристик.

Основные технические характеристики датчика:
- измеряемое давление – до 25МПа;
- температура измеряемой среды – до 700 град.;
- напряжение питания +24В или +/-12В;
- выходной сигнал 1–5 В или 0–5 В [3].

В процессе вычислений в блоке электронного управления учитываются различные обстоятельства, которые могут иметь место при работе двигателя на холостом ходу и на максимальных нагрузках. Работа датчиков и системы подробно представлена в работе [7], [9], [10].

На основании проведенного исследования получены данные для реализации поставленной цели при правильном подборе материалов для дальнейших опытно конструкторских разработок экспериментальных образцов составных элементов системы.

Библиографический список

1. *Дидманидзе О. Н., Варнаков Д. В., Карев А. М.* Надежность автотранспортных средств. М.: Учебно-методический центр «Триада», 2017. 161 с.

2. Корвет М10.3х. URL: https://abit.spb.ru/ice-control/arhiv/korvet-m10-3h/ (дата обращения: 23.03.2021).

3. Высокотемпературный неохлаждаемый датчик давления газа. URL: https://tehtrans-d.ru/catalog/datchiki/datchik-davleniya-gaza.html (дата обращения: 23.03.2021).

4. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984.

5. *Хакимов Р. Т.* Экспериментальные исследования процесса тепловыделения рабочего цикла газового двигателя с применением пьезоэлектрической форсунки // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования материалы научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава. СПб: СПбГАУ, 2015. С. 605–608.

6. *Хакимов Р. Т.* Анализ экспериментальных исследований рабочих процессов конвертируемых газовых двигателей // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2010. № 21. С. 297–302.

7. *Хакимов Р. Т.* Влияние характеристик выгорания на показатели рабочего цикла газового двигателя при использовании электронной системы управления // Грузовик. 2008. № 4. С. 27–29.

8. *Prakash C., Patankar S.* A control volume-based finite-element method for solving the Navie-Stokes equations using equal-order velocity-pressure interpolation // Numerical Heat Transfer. 1985. Vol. 8. P. 259.

9. *Lee W., Baik D., Rogers T.* Study on Performance and Exhaust Gas Characteristics of Directly Injected CNG Engine. International Journal of Bio-Science and Bio-Technology. Vol. 6. N 2 (2014). P.179–186.

10. *Габитов И. И., Неговора А. В.* Передовые технологии технического обслуживания и ремонта топливной аппаратуры дизелей // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2015. № 3 (35). С. 40–44.

11. *Неговора А. В., Низамутдинов А. И., Хакимов Р. Т.* Специализированное устройство для исследования закона подачи топлива в системах питания дизелей // Технико-технологические проблемы сервиса. 2014. № 3 (29). С. 11–13.

УДК 656.05

В. Е. Таратун*
старший преподаватель
Е. А. Таратун*
ассистент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрена роль цифровых двойников для развития интеллектуальных транспортных систем. Представлена методика построения имитационной модели городского транспортного маршрута для повышения эффективности работы наземной транспортной системы.
Ключевые слова: Цифровые двойники, оценки эффективности, моделирование, имитационное моделирование, городской пассажирский транспорт, интеллектуальные транспортные системы.

V. E. Taratun*
Senior Lecturer
E. A. Taratun*
Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE ROLE OF DIGITAL DOUBLES FOR THE DEVELOPMENT OF INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS

The article describes role of digital doubles for the development of intelligent transport systems is considered. Method of construction of simulation model of urban transport route for improvement of efficiency of operation of ground transport system is presented.
Keywords: Digital doubles, efficiency assessments, modeling, simulation, urban passenger transport, intelligent transport systems.

На сегодняшний день одним из важнейших показателей эффективности функционирования транспортной составляющей страны является степень ее цифровизации. Цифровизация является ключевым моментом в автоматизации транспортных процессов. Также цифровизация напрямую влияет на удобство использования услуг транспорта клиентами.

Рассматривая вопросы повышения эффективности работы наземного городского транспорта – основным аспектом выступает степень проработанности функционирования системы в зависимости от внешних воздействий. К примеру, при возникновении дорожно-транспортных ситуаций происходит задержка движения маршрутного автобуса к цели назначения, что в свою очередь заставляет пассажиров, ожидающих транспорт на остановочных пунктах выбирать другие методы передвижения до цели следования. Возникновение внештатных ситуаций напрямую влияет на эффективность как отдельного участка транспортной системы страны, так и на эффективность работы всей системы в це-

лом. Рассматривая транспортную систему с системной точки зрения необходимо разработка таких сценариев работы транспорта, при которых снижение эффективности транспортной системы при возникновении различного рода непредвиденных дорожных ситуаций будет наблюдаться в минимальной степени.

В общем случае процесс движения определенного маршрута городского пассажирского транспорта можно представить в виде черного ящика (рис. 1). На входе имеется поток пассажиров, которых необходимо обслужить и которые имеют свои цели следования. На выходе вы имеем степень удовлетворенности использования данного маршрута потоком пассажиров в зависимости от целевого места достижения.

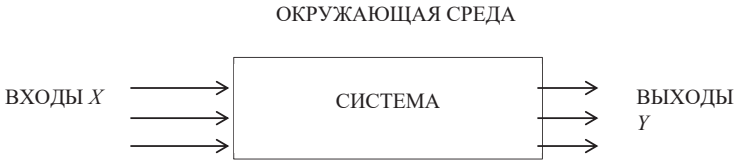


Рис. 1. Модель черного ящика

Рассматривая экономический эффект транспортной системы, представленной в данном виде, требуется соотнести совокупность входных данных по интенсивности применения ресурсов, технологий и т. д. к результатам конечной работы, выражая при этом некую степень эффективности, к примеру – коммерческую.

Одним из существующих методов, который предоставит возможность оценить влияние внештатных ситуаций на маршруте движения является применение имитационного моделирования [1]–[2].

Имитационное моделирование – метод исследования систем путем построения модели изучаемой системы с целью ее детального исследования для выработки сценариев поведения при возникновении конфликтных (внештатных) ситуаций [2].

Имитационное моделирование используется в тех случаях, когда проведение экспериментов над реальным объектом невозможно или же нецелесообразно.

На сегодняшний день существует большое количество программных решений для построения имитационных моделей сложных технических систем. Транспортная система является сложной технической системой, которая в свою очередь требует современных методов и моделей для оценки эффективности и разработки стратегий управления [3]–[4].

Перспективным программным решением является применение пакета имитационного моделирования – Anylogic. Данное программное решение позволяет использовать все существующие на данный момент подходы к построению имитационной модели изучаемой системы. Кроме того, данное программное решение содержит большое количество встроенных библиотек для реализации всевозможных конфликтных ситуаций транспортной системы. Относи-

тельно конкурента Vissim, который позволяет оценить только конфликтные ситуации, Anylogic позволяет строить модели на различных уровнях транспортного планирования: микроуровень – решение задач отдельных перекрестков, или же мезо уровень, макроуровень.

Отдельной особенностью является возможность написания собственного программного кода для реализации определенной логики работы отдельного узла системы.

За основу для исследования эффективности работоспособности наземного городского пассажирского транспорта был взят пассажирский рейсовый 20 маршрут в городе Санкт- Петербург.

При реализации имитационной модели транспортной системы были использованы различные типы структурных элементов, представленные на рис. 2.

Рис. 2. Структура разрабатываемой имитационной модели

Общая структурная реализация с помощью блоков программного решения Anylogic представлена на рис. 3.

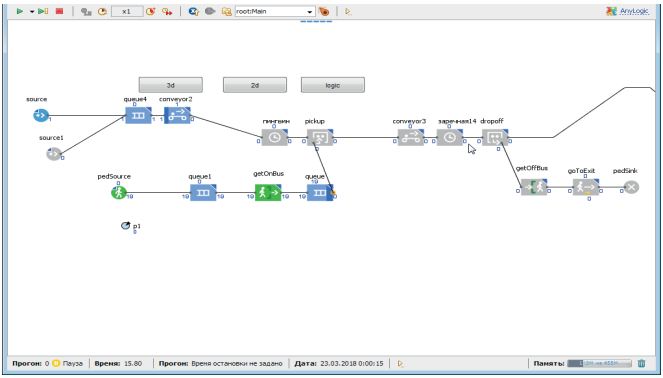


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели

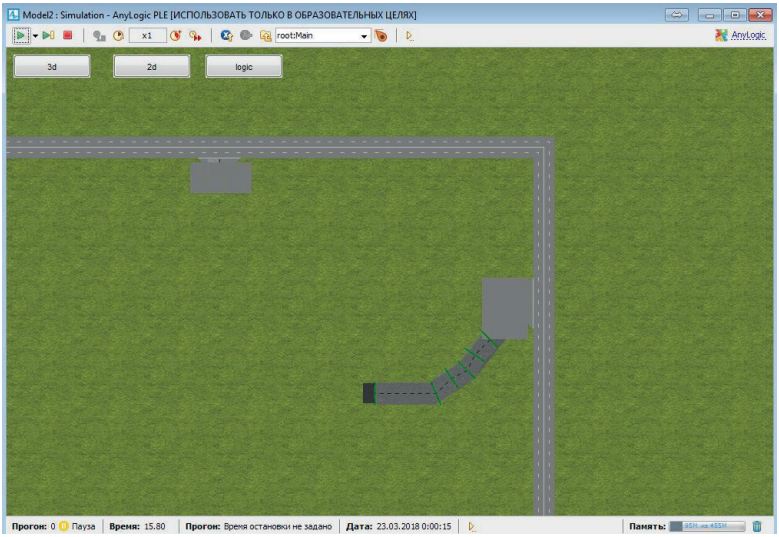


Рис. 3. Визуализация модели в 2D

В данной структурной схеме каждый из объектов несет определенный функционал для реализации логики имитационной модели. К примеру, объект source является источником заявок (автобусов), который может формировать поток как с помощью использования различных законов распределения, так и при непосредственном указании расписания движения для автобусного маршрута. Объекты queue и conveyor являются буфером и объектом транспортировки заявки к цели назначения по заданной траектории.

Для реализации посадки и высадки, а также визуального представления движения пассажиров на остановочном пункте была задействована пешеходная библиотека. Объект pedSource позволяет сформировать пассажиропоток на определенном остановочном пункте, при этом определить для каждого пассажира конечные цели следования. Объект getOnBus позволяет закрепить одну или несколько заявок за другой и реализовать процесс перемещения пассажиропотока в основной заявке – заявке транспортного средства, на основе возможной определенной вместимости.

На рис. 4 и 5 представлен 2d и 3d вид имитационной модели при выполнении прогона на одном из остановочных пунктах при сборе статистики об эффективности работы городского маршрута.

Движение пассажиров через определенное место транспортной сети образует пассажиропоток. Пассажиропоток характеризуется интенсивностью числом пассажиров, следующих за единицу времени через рассматриваемое место транспортной сети (рис. 5).

После прогона модели были получены результаты, представленные на рис. 6.

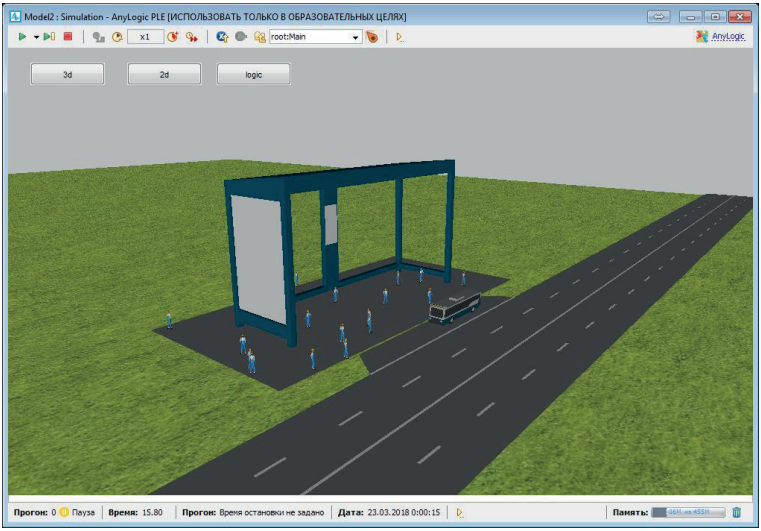


Рис. 4. Визуализация модели в 3D

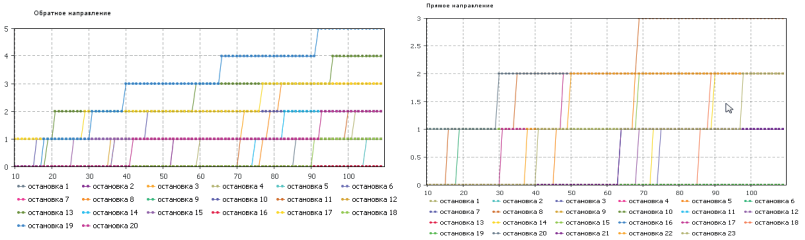


Рис. 5. Интенсивность пассажиропотока на остановочных пунктах в прямом и обратном направлении движения

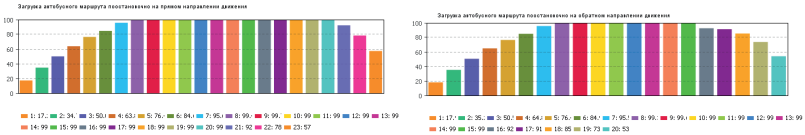


Рис. 6. Загруженность автобусного маршрута на остановочных пунктах в прямом и обратном направлении

Общая же степень загруженности автобусного маршрута составила 83,4%. На основе проведенного исследования и полученных результатов можно сделать вывод что загруженность маршрута является критически высокой. Ввиду несвоевременного прибытия автобуса на остановочный пункт или же не-

возможности движения на нем из-за недостаточной вместимости транспортного средства, о чем свидетельствует рис. 6, происходит перераспределение пассажиропотока на другие маршруты, и как следствие коммерческая эффективность данного маршрута падает.

Таким образом, необходима разработка таких сценариев работы маршрута, при которых будет обеспеченно оптимальное наполнение подвижного состава, соответствующего колебаниям пассажирских потоков. Необходимо корректировать количество, вместимость и распределение подвижного состава по транспортной сети на основе полученного влияния внешней среды.

Применение имитационного моделирования для решения задач оптимизации работы транспортной системы и повышения эффективности является перспективным подходом, за счет возможности непосредственной доработки системы и оценки ее работы в режиме модельного времени.

Применение цифровых двойников для транспортных систем позволит дать значительное как развитие интеллектуальных транспортных систем [5], так и повысить эффективность работы всей транспортной системы в целом.

Библиографический список

1. *Фетисов В. А., Майоров Н. Н.* Моделирование транспортных систем. СПб.: ГУАП, 2011. 165 с.

2. *Фетисов В. А., Майоров Н. Н., Таратун В. Е.* Моделирование транспортных процессов. СПб.: ГУАП, 2013. 31 с.

3. *Таратун В. Е.* Имитационное моделирование как инструмент принятия решений при прогнозировании цепей поставок // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. 2016. С. 220–222.

4. *Фетисов В. А., Таратун В. Е.* Исследование организации городской транспортной системы на основе имитационного моделирования // Организация и безопасность дорожного движения: Материалы XII Национальной науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2019. С. 295–300.

5. *Жанказиев С. В.* Интеллектуальные транспортные системы / Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет. М., 2016. 120 с.

УДК 616-7

О. В. Тихоненкова*
кандидат технических наук, доцент
С. А. Цурков*
кандидат технических наук, доцент
Т. В. Сергеев*
кандидат технических наук, доцент
А. С. Данилова*
аспирант, ассистент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ, ДВИЖЕНИЙ И НАКЛОНОВ ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ОРТОПЕДИИ

В статье рассмотрены теоретические предпосылки к разработке мониторинговой системы для определения положения, движений и наклонов головы человека. Приведено описание разработанной трехточечной модели, учитывающей структурные и двигательные особенности шейного отдела позвоночника. Обоснован выбор опорных точек для установки датчиков. Показаны варианты перемещения этих датчиков при различных положениях головы человека. Описаны статические и динамические показатели необходимые для оценки движений шейного отдела позвоночника. Описана разработанная система – аппаратно-программный комплекс для мониторинга положения, движений и наклонов головы человека, представлены структурная схема и используемые электронные компоненты. Рассмотрены перспективы дальнейшего развития и применения разработанной системы.
Ключевые слова: модель, датчики положения, шейный отдел позвоночника.

O. V. Tikhonenkova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
S. A. Tsurkov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
T. V. Sergeev*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. S. Danilova*
Postgraduate Student, Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE SYSTEM FOR DETERMINING POSITION, MOVEMENT AND INCLINATION OF THE HUMAN HEAD FOR ORTHOPEDICS

The article considers the theoretical prerequisites for the development of a monitoring system for determining the position, movements and inclinations of the human head. The description of the developed three-point model, which takes into account the structural and motor features of the cervical spine, is given. The choice of reference points for the installation of sensors is justified. The options for moving these sensors at different positions of the human head are shown. The static and dynamic parameters necessary for assessing the movements of the cervical spine are described. The developed system – a hardware and software complex for monitoring the position, movements and inclinations

of the human head is described, the block diagram and the electronic components used are presented. The prospects of further development and application of the developed system are considered.
Keywords: model, position sensors, cervical spine.

Введение

Движения в шейном отделе осуществляются вокруг трех осей в трех плоскостях, как и в других отделах, но отличаются большей амплитудой и скоростью. Мышечная система обеспечивает эти движения: разгибание, сгибание, боковой наклон, ротация.

В ряде случаев отмеченные особенности формы и перемещений структур шейного отдела позвоночника, а также изменения, происходящие в них с течением времени, требуют регистрации в режиме мониторинга. В частности, это необходимо для изучения развития патологических состояний в их связи с функционированием шейного отдела позвоночника в различных условиях на протяжении длительного периода времени (24, 48 часов), например, в связи с трудовой деятельностью пациента.

Такая система мониторинга должна обеспечивать анализ движений и наклонов головы человека: наклон вперед/назад, поворот влево/вправо, наклон влево/вправо и вращение. При этом решающим фактором является сохранение пациентом максимальной мобильности как в зоне шейного отдела позвоночника, так и вообще всего организма.

Системы для измерения перемещений шейного отдела позвоночника с использованием датчиков на основе акселерометров и гироскопов обеспечивают необходимую мобильность пациента. Стандартное расположение датчиков не обеспечивает требуемой дифференциации при оценке движений шейного отдела позвоночника, то есть, не позволяет различать особенности движения, связанные с лордозом и кифозом.

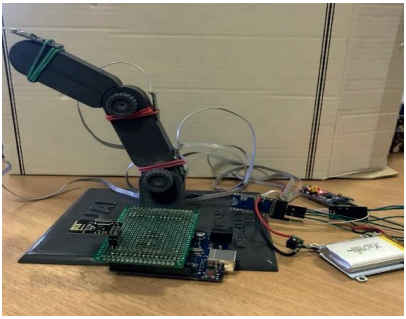
Целью данного исследования являлась разработка системы датчиков положения, движений и наклонов головы человека с учетом структурных и двигательных особенностей шейного отдела позвоночника. При этом разрабатываемая система должна обеспечивать возможность регистрации в течение длительного времени и мобильность пациента. Область применения – ортопедия.

Трехточечная модель

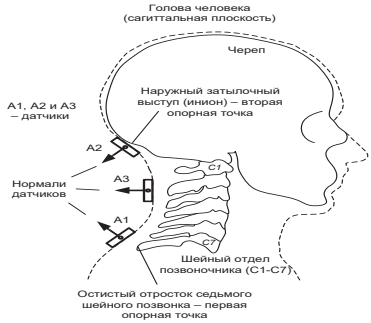
В основе разработанной системы для мониторинга положения, движений и наклонов головы человека лежит трехточечная модель, отражающая изменения в шейном отделе позвоночника, и схема из трех датчиков на основе микроэлектромеханических систем МЭМС, находящихся в этих трех точках.

В представленной части работы приведены результаты исследования, посвященные движению головы в сагиттальной плоскости. Это связано с тем, что в этой плоскости движение шейного отдела позвоночника имеют наибольшие значения статических (расстояния, углы) и динамических (скорости, ускорения) показателей. В дальнейшем будут представлены результаты аналогичных исследований для фронтальной и горизонтальной плоскостей.

На рис. 1 показан макет устройства для системы определения положения, движений и наклонов головы человека (а) и схема (б) расположения датчиков: датчики (А1, А2 и А3) и их векторы. Эти векторы являются нормалями по отношению к корпусам датчиков (ось Z в системе координат датчика). Также показаны опорные точки для установки датчиков, это остистый отросток седьмого шейного позвонка (С7) – первая опорная точка, служащая для установки датчика А1, и наружный затылочный выступ (инион) – вторая опорная точка – для установки датчика А2. Датчик А3 устанавливается на равном расстоянии от датчиков А1 и А2.



(а)



(б)

Рис. 1. Макет устройства для системы определения положения, движений и наклонов головы человека (а) и схема расположения датчиков (б)

Скорость и ускорения перемещения точек А1, А2 и А3 характеризуют динамические свойства шейного отдела.

В итоге для оценки положения, движений и наклонов головы человека с учетом структурных и двигательных особенностей шейного отдела позвоночника необходимо анализировать следующие параметры:

Статические:

- расстояния между датчиками А1, А2 и А3,
- угол α между отрезками L_{12} и L_{13},
- углы между нормалями датчиков А1, А2 и А3 и линией горизонта;

динамические:

- форма траектории перемещения датчиков,
- скорость перемещения,
- ускорения.

Для их регистрации была разработана система – аппаратно-программный комплекс для мониторинга положения, движений и наклонов головы человека. Основные части системы:

- три блока датчиков (А1, А2 и А3),
- блок агрегации данных от блоков датчиков положения,

- два блока для беспроводных приема и передачи данных,
- блок обработки и анализа данных.

В качестве основных элементов датчиков используются акселерометры и гироскопы на основе МЭМС типа LSM6DS33. Их работа и варианты применения описаны достаточно широко [1]. Эта микросхема содержат в себе 3D (3-осевой) акселерометр и 3D гироскоп. Для передачи данных используется последовательный интерфейс SPI/I2C. В микросхеме присутствует встроенный датчик температуры для температурной компенсации. Она имеет достаточно миниатюрные размеры 3 мм × 3 мм × 0,86 мм. Питание: от 1,71 до 3,6 В [2].

Основные технические характеристики акселерометра:

- разрешение: 16 бит,
- диапазон измерения (настраиваемый): ±2, ±4, ±8, ±16 g.,

Основные технические характеристики гироскопа:

- разрешение: 16 бит,
- диапазон измерения (настраиваемый): ±250, ±500, ±1000, ±2000 °/с.

Блок агрегации данных предназначен для сбора информации от трех блоков датчиков и создан на основе микроконтроллера Atmega328. Он является 8-разрядным CMOS микроконтроллером с низким энергопотреблением, основанным на усовершенствованной AVR RISC архитектуре [3].

Блок агрегации данных получает 18 потоков данных по девять от трех 3D акселерометров и трех 3D гироскоп.

Основные технические характеристики Atmega328:

- тактовая частота: 0–20 мгц,
- объем Flash-памяти: 32 кб,
- объем SRAM-памяти: 2 кб,
- объем EEPROM-памяти: 1 кб,
- напряжение питания: 1,8–5,5 В,
- потребляемый ток в режиме работы – 0,2 мА, в режиме сна – 0,75 мкА (1 МГц, 1,8 В),
- количество таймеров/счетчиков: два 8-битных, один 16-битный,
- общее количество портов: 23,
- количество ШИМ (PWM) выходов: 6,
- количество каналов АЦП (аналоговые входы): 6,
- количество аппаратных USART (Serial): 1,
- количество аппаратных SPI: 1 Master/Slave,
- количество аппаратных I^2C/SPI: 1,
- разрешение АЦП: 10 бит.

Два блока беспроводной передачи данных служат для их трансляции от блока агрегации к блоку обработки и анализа.

Блоки беспроводной передачи представляют собой пару радиомодулей типа NRF24L01. Его основные технические характеристики [4]:

- интерфейс обмена данными: SPI,
- частота приема и передачи: 2,4 ГГц,
- количество каналов: 128 с шагом 1МГц,

- тип модуляции: GFSK,
- скорость передачи данных: 250kbps, 1Mbps и 2 Mbps,
- чувствительность приемника: -82 dBm,
- расстояние приема/передачи данных: 100 м – прямая видимость; 30 м – помещение,
- коэффициент усиления антенны: 2 dBm,
- организация сети на одном канале: 7 модулей (1 приемник и 6 передатчиков),
- напряжение питания: 1,9–3,6 В.

Модуль автоматически формирует и отправляет пакеты. Пользователю при этом доступны дополнительные настройки (скорость передачи, отправка и принятие данных, мощность передатчика и др.). Модулям присвоены уникальные адреса, что обеспечивает организацию сети для обмена данными.

Связь с блоком обработки и анализа данных осуществляется на основе преобразователя на микросхеме FT232RL.

Микросхема FT232RL представляет собой универсальный асинхронный приемопередатчик (UART) и является высокоинтегрированным последовательным интерфейсом USB-COM. Микросхема уже содержит тактовый генератор, память EEPROM и способна работать в режиме последовательного обмена данными [5].

Основные технические характеристики FT232RL:

- скорость передачи данных от 300 бод до 3 Мбод (RS422, RS485, RS232) на уровнях TTL;
- 128-байтовый буфер приема и 256-байтный буфер передачи, использующие технологию сглаживания для обеспечения высокой пропускной способности данных;
- поддержка интерфейсом UART режимов передачи 7 или 8 бит данных, 1 или 2 стоповых битов и различных режимов контроля четности;
- возможность работы при напряжении питания от +3,3 В (с использованием внешнего генератора) до +5,25 (внутренний генератор).

В качестве блока обработки и анализа данных может выступать персональный компьютер (если исследование проводится в клинике) или смартфон (если исследование проводится в обычных для пациента условиях).

В дальнейшем будут разработаны алгоритмы обработки и анализа данных о положении, движениях и наклонах головы человека, включающие оценку статические и динамические характеристики перемещений. В основе обработки измерительных сигналов от акселерометров и гироскопов лежит математический аппарат аналитической механики.

Заключение

Конструктивное исполнение датчиков связано с рядом требований:

- необходимость надежного закрепления датчиков на выбранных опорных точках в зоне шейного отдела позвоночника;

• возможность регулировки положения датчиков с учетом индивидуальных особенностей анатомического строения конкретного пациента;

• максимально возможная комфортность при ношении датчиков и всего устройства;

• простота и надежность эксплуатации, поскольку предполагается, что устройство будет использоваться неоднократно.

Выявление механизмов морфологической и функциональной взаимосвязи состояния структур шейного отдела позвоночника человека, ведущих к пониманию причин возникновения различных нарушений и их развития, а также к разработке соответствующих терапевтических и реабилитационных процедур, связано с рядом проблем.

Во-первых, это многофакторность указанной взаимосвязи (взаимодействуют кровеносная, костно-суставная и мышечная системы организма), требующая учитывать разнообразные физиологические данные и показатели (системную гемодинамику и гемодинамику головного мозга, пространственную структуру позвонков шейного отдела, напряжение мышц шеи).

Во-вторых, это разнообразие причин возникновения нарушений (атеросклероз, тромбоз, эмболия, воспаление стенок сосудов), различный характер и длительность их развития.

В-третьих, это необходимость обеспечивать регулярный контроль эффективности терапевтических процедур путем проведения специальных функциональных проб, а также возможность коррекции состояния структур шейного отдела позвоночника человека, и реабилитационных процедур на основе методологии биологической обратной связи.

Разработанная система для определения положения, движений и наклонов головы человека, став частью более общей системы для комплексного исследования состояния шейного отдела позвоночника, будет способствовать решению указанных проблем.

Она кроме описанной части будет включать в себя еще две системы: 1) для изучения гемодинамики головы (на основе четырех канального реоэнцефалографа); 2) для регистрации напряжения мышц в зоне шейного отдела позвоночника (на основе миографа [6]).

Разрабатываемая система станет основой для создания медицинского комплекса, обеспечивающего постановку диагнозов, связанных с нарушением морфологической и функциональной взаимосвязи кровообращения и костно-связочного аппарата, поддержку принятия решений врачом и возможность ее коррекции средствами биоуправления.

Наибольшее значение разрабатываемая система будет иметь для развития методов диагностики и коррекции состояния в ортопедии.

Библиографический список

1. *Алексеев В.* Новые многофункциональные МЭМС-датчики движения производства STMicroelectronics // Датчики. 2015. № 11. С. 7–14.

2. LSM6DS33. iNEMO inertial module: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope. Datasheet. STMicroelectronics, 2015.

3. ATmega328P. 8–bit AVR microcontroller with 32K bytes in-system programmable flash. Datasheet. Atmel Corporation, 2015.

4. nRF24L01+. Single Chip 2.4GHz Transceiver. Preliminary Product Specification v1.0. Nordic Semiconductor, 2008.

5. FT232R USB UART IC Datasheet Version 2.16. Future Technology Devices International Limited, 2020.

6. *Tikhonenkova O. V.* The registration and wireless signal transmission device of the surfase muscle bioelectric activity of the servical spine zone // Proc. Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2020, 9131154.

УДК 656.017.22

С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТАХОГРАФОВ

В статье рассматриваются виды и принципы работы современных тахографов. Произведен анализ решаемых задач и экономическая эффективность использования бортовых регистраторов. Определяются принципы работы блоков, входящих в тахографы: счетчик пробега, спидометр, часы, закрывающее устройство и устройство, записывающее на регистрационном листке вскрытие корпуса. Детально разобраны технические нормы тахографов, и порядок эксплуатации бортовых самописцев. Приведена законодательная база в сфере применения электронных тахографов и требования к их метрологическим характеристикам.
Ключевые слова: тахографы, автомобильные транспортные средства, установка, постоянная тахографа, характеристический коэффициент автомобиля, организация перевозки, счетчик пробега, период времени, измеритель скорости.

S. V. Ugolkov*
PhD Sc. Military, Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

BASIC REQUIREMENTS FOR METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF TACHOGRAPHS

The article discusses the types and principles of modern tachographs. The analysis of the tasks to be solved and the economic efficiency of the use of on-board recorders is made. The principles of operation of the units included in the tachographs are determined: the mileage counter, speedometer, clock, closing device and a device that records the opening of the case on the registration sheet. The technical standards of tachographs and the operating procedure of flight recorders are analyzed in detail. The article describes the legal framework for the use of electronic tachographs and the requirements for their metrological characteristics.
Keywords: tachographs, motor vehicles, installation, tachograph constant, vehicle characteristic coefficient, transportation organization, mileage meter, time period, speed meter.

Введение

В представленной статье рассматриваются тахографы – приборы фиксации режима труда и отдыха шоферов. С первого квартала 1995 года трансграничные автомобильные перевозки в европейских странах в обязательном порядке обеспечиваются контролем бортовыми самописцами соблюдения водительским составом режима эксплуатации транспортных средств и рабочего времени. [1]. В РФ с 1 января 2021 года согласно Постановлению Министерства транспорта № 440 транспортные средства категорий M2, M3, N2 и N3, осуществляющие коммерческие перевозки пассажиров и грузов, подлежат оснащению техническими средствами контроля за соблюдением водителями режимов движения, труда и отдыха. Конструкция указанных транспортных средств

должна обеспечивать возможность оснащения указанными техническими средствами.

Законодательная база применения тахографов

Согласно ГОСТ Р 53831-2010 [2] Тахограф: Автоматическое бортовое техническое устройство для непрерывной индикации и регистрации пройденного пути и скорости движения АТС, времени работы и отдыха водителя, призванное обеспечить выполнение законодательных и нормативных требований, обеспечивающих гармонизацию социальных и коммерческих взаимоотношений в сфере транспорта, а также опасность дорожного движения.

Сформированная на этапах внедрения бортовых регистраторов система руководящих документов о правилах обеспечения транспортных средств электронными тахографами следующая [3].

Европейское соглашение, касающееся работы экипажей транспортных средств, производящих международные автомобильные перевозки (ЕСТР, Женева, 1 июля 1970 г.).

Ряд федеральных законов, регламентирующих порядок установки и эксплуатации тахографов, в том числе: № 196-ФЗ от 10.12.1995; № 2 54-ФЗ от 21.07.2014.

Постановление Правительства РФ от 23.11.2012 № 1213 «О порядке оснащения транспортных средств тахографами».

Приказ Министерства транспорта РФ № 36 от 13 февраля 2013 года «Об утверждении требований к тахографам, устанавливаемым на транспортные средства, категорий и видов транспортных средств, оснащаемых тахографами, правил использования, обслуживания и контроля работы тахографов, установленных на транспортные средства».

Приказ Министерства транспорта РФ от 21.08.2013 № 273 «Об утверждении Порядка оснащения транспортных средств тахографами».

С 1 января 2021 года согласно Постановлению Минтранса № 440 вступили в силу новые правила регламента транспортных средств, оснащаемых тахографами, правила использования, обслуживания и контроля работы тахографов, установленных на транспортные средства [4].

Характеристики и функции тахографов

Самописец фиксирует пройденное автомобилем расстояние, его техническую скорость, продолжительность нахождения на маршруте, периодов труда и отдыха шофера, замены диаграммного диска.

Основными целями использования тахографов являются:

- обеспечение безопасности дорожного движения;
- фиксация соблюдения рабочего регламента вождения;
- повышение технико-эксплуатационных показателей работы автомобиля;
- обеспечивает контроль несанкционированных маршрутов;
- дает возможность осуществления международных перевозок;
- повышает ответственность водительского состава;

- помогает установить реальную картину возникновения ДТП;
- объективный расчет с заказчиком за фактически выполненную работу по перевозке грузов и простоев по различным причинам.

Социальная результативность использования самописцев в Европе за два прошедших десятилетия позволила снизить число ДТП на 22 %, сократить смертность на дорогах на 55 %, более чем в 2 раза увеличить межаварийный пробег.

Принцип работы тахографа

Существуют аналоговые и цифровые тахографы. Принципиальным отличием является способ записи и сохранности данных.

Аналоговый тахограф фиксирует информацию на диаграммном диске водителя. Диск меняется ежесуточно с внесением начального пункта маршрута, текущей даты и данных пробега (рис. 1).

Рис. 1 Устройство аналогового прибора

Рис. 2. Принцип работы цифрового тахографа

Цифровая модификация самописца использует информацию датчика скорости на коробке передач. Тахограф начинает снимать показания после запуска

двигателя автомобиля. Регистрируются данные скорости, пробега и времени нахождения водителя за рулем. Информация записывается в блок памяти прибора и на цифровую карту водителя, считывание которой производится каждые 28 и 90 дней соответственно. Данные хранятся в автотранспортном предприятии в течение года (рис. 2).

Принцип работы российского тахографа

Примеры тахографов, включенных в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений (прошедших испытания с целях утверждения типа): Меркурий ТА-001, Drive 5, DTCO 3283, ТЦА-02НК, ШТРИХ-ТахоRUS, КАСБИ DT-20M, DriveSmart, EFAS V2 RUS, EFAS 4, DigitalTachograph SE5000 (рис. 3).

Меркурий ТА-001 https://www.1tahograf.ru/tahography/tahograf_s_skzi/merkuriy_ta001_skzi/АтолDrive 5 DTCO 3283 VDO

Рис. 3. Тахографы, прошедшие испытания

Тахографы отечественных образцов приемо-передачу информации осуществляют не только с датчика скорости, но и с модуля ГЛОНАСС/GPS или встроенного акселерометра. Фиксация информации возможна только блоком памяти самописца и картой водителя только Российского производства (рис. 4).

Рис. 4. Алгоритм работы российского тахографа

Порядок эксплуатации тахографа

- Перед началом работы каждый водитель заполняет от руки внутреннюю часть своего нового диаграммного диска (рис. 5).

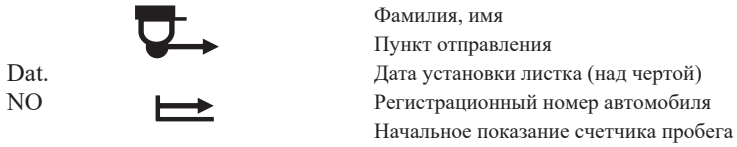


Рис. 5. Обозначения информационных граф диска перед началом работы

- Производит установку диска.
- Выставляет точное время часов тахографа.
- Устанавливает на тахографе граничное значение скорости движения.
- При смене водителя, сидящего за рулем, меняет местами диаграммные диски.
- В течение поездки ручки переключателя групп времени первого и второго водителя устанавливаются в положение «время присутствия на рабочем месте».
- Будучи вне кабины автомобиля, ручки переключения групп времени устанавливаются в положении «прочей работы».
- По окончании работы и перед началом нового рабочего дня, водитель снимает с самописца свой диаграммный диск, дополняет его внутреннее поле от руки и убирает на хранение. Минимальная продолжительность записи на листках одни сутки (рис. 6).

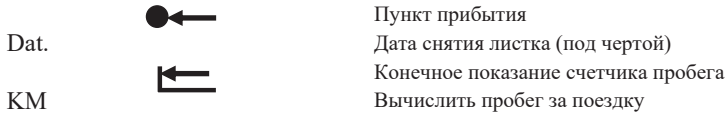


Рис. 6. Информационные граф диска после рейса

В случае неисправности тахографа водитель вносит от руки в регистрационный листок, сведения о его деятельности в рабочее время и в периодах отдыха.

В случае когда члены экипажа находятся вне АТС и не могут использовать тахограф, они должны вносить от руки в регистрационный листок сведения об их деятельности и отдыхе.

Регистрационные листки за текущую неделю и за последний день предыдущей недели управления автомобилем всегда находятся на руках у экипажа с целью их предъявления по требованию проверяющих лиц.

Заключение

В настоящее время автомобильные бортовые самописцы включены в перечень приборов, подлежащих метрологическим испытаниям и периодическим поверкам.

Так, Федеральный закон № 102-ФЗ от 26.06.2008 «Об обеспечении единства измерений» предусматривает прохождение тахографами испытания в целях утверждения типа СИ и поверку [5].

Вполне очевидно расширение сферы применения тахографов как регистраторов технико-эксплуатационных показателей системы «водитель-автомобиль-дорожная среда».

Библиографический список

1. *Романов А. Н.* Автотранспортная психология: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2002. 224 с.

2. ГОСТ Р 53831-2010 – Автомобильные транспортные средства. Тахографы. Технические требования к установке. Дата введения 2010.09.15. М.: Стандартинформ, 2010. 18 с.

3. Законодательная база в сфере применения электронных тахографов. URL: https://metrologu.ru/blogs/entry/121–законодательная-база-в-сфере-применения-электронных-тахографов/ (дата обращения: 30.03.2021).

4. Приказ Минтранса РФ № 440 корректирующий ПМ №36 «Об утверждении требований к тахографам, устанавливаемым на транспортные средства, категорий и видов транспортных средств, оснащаемых тахографами, правил использования, обслуживания и контроля работы тахографов, установленных на транспортные средства». URL: https://www.1tahograf.ru/tahography/prikaz-mintransa-rf-440-korektiruyushchij-pm-36/ (дата обращения: 31.03.2021).

5. Об отнесении тахографовк средствам измерений. URL: https://www.auto.shtrih-m.ru/assets/files/prezentatciy/Rosstandart-edinstvo-sredstv-izmereniy.pdf (дата обращения: 31.03.2021).

СОДЕРЖАНИЕ

АКУСТООПТИКА.....3

Балакший В. И., Купрейчик М. И., Манцевич С. Н. АКУСТООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ..... 4

Белый В. Н., Хило П. А., Казак Н. С., Хило Н. А. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПУЧКА ГАУССОВА ТИПА В БЕССЕЛЕВ СВЕТОВОЙ ПУЧОК ПРИ ВСТРЕЧНОМ АКУСТООПТИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ 10

Бестугин А. Р., Тепликов Е. В. РЕГИСТРАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ..... 17

Боритко С. В. ВОЗМОЖНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ В СЛОЖНЫХ ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЯХ 23

Костылева Е. И., Манцевич С. Н. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ УПРУГИХ МОДУЛЕЙ ПАРАТЕЛЛУРИТА АКУСТООПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ 28

Кулак Г. В., Ропот А. П., Шакин О. В. КОЛЛИНЕАРНОЕ АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В УСЛОВИЯХ ВНУТРЕННЕЙ КОНИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ 33

Купрейчик М. И., Балакший В. И., Манцевич С. Н. ДИФРАКЦИЯ НЕПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АКУСТООПТИЧЕСКИХ ЯЧЕЙКАХ НА ОСНОВЕ ДВУОСНЫХ КРИСТАЛЛОВ С ФАЗИРОВАННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ..... 41

Курилкина С. Н., Белый В. Н., Кулаков С. В. ЭЛЕКТРОИНДУЦИРОВАННОЕ БЕЗДИФРАКЦИОННОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ В КУБИЧЕСКИХ ЦЕНТРОСИММЕТРИЧНЫХ КРИСТАЛЛАХ С ВЫСОКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ 48

Ларин В. П. ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛОСКИХ СВЕТОВОДОВ 55

Манцевич С. Н., Юшков К. Б., Третьяков С. А. ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОПУСКАНИЯ КВАЗИКОЛЛИНЕАРНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ 61

Марунин М. В., Поликарпова Н. В. АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУМЕРНЫХ ФОНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ПЛАВЛЕНОГО КВАРЦА 68

Мильков М. Г. ПОДБОР СОСТАВА АКУСТИЧЕСКОЙ СКЛЕЙКИ ДЛЯ ПРОПУСКАНИЯ СДВИГОВЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН 76

Обыденнов Д. В., Юшков К. Б., Молчанов В. Я. КОЛЬЦЕВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ФИЛЬТРА 81

Пожар В. Э., Мачихин А. С. АКУСТООПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ 84

Поликарпова Н. В., Марунин М. В., Чиж И. К. ИНФРАКРАСНЫЕ АКУСТООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ 91

Рожкова Н. А., Мачихин А. С. ОПТИЧЕСКИЙ ПИНЦЕТ С ДВУХКООРДИНАТНЫМ АКУСТООПТИЧЕСКИМ ДЕФЛЕКТОРОМ ДЛЯ МАНИПУЛИРОВАНИЯ ЧАСТИЦАМИ 97

Хомутов А. С. ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПРИБОР НА БАЗЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ФИЛЬТРА С РАСЧЕТОМ ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В СРЕДЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ 102

Хоркин В. С., Мильков М. Г. АКУСТИЧЕСКИЕ И АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИНФРАКРАСНЫХ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ ГЕРМАНИЯ, СЕЛЕНА, КРЕМНИЯ И ТЕЛЛУРА 109

Шакин О. В., Казаков В. И. АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕДИ 115

Юшков К. Б., Науменко Н. Ф. ТЕНЗОРНЫЕ СВОЙСТВА КРИВИЗНЫ ВОЛНОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В КРИСТАЛЛАХ: ПРИМЕНЕНИЯ В ОПТИКЕ И АКУСТИКЕ 123

АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА 128

Анисимкин В. И., Воронова Н. В. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ИХ ТРАНСФОРМАЦИИ В ЛЕД С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ЛЭМБА НОВОЙ МОДИФИКАЦИИ 129

Багдасарян А. С., Гуляев Ю. В., Доберштейн С. А., Синицына Т. В. СОЗДАНИЕ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ С МАЛЫМИ ПОТЕРЯМИ – ОДНО ИЗ ГЛАВНЫХ КОНКУРЕНТНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ ТЕХНИКИ ПАВ 137

Балышева О. Л. ФИЛЬТРЫ НА ПАВ И СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G 148

Богословский С. В., Жежерин А. Р. СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЬЕЗОПОДЛОЖКЕ 153

Веремеев И. В., Доберштейн С. А. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА РЕЗОНАТОРОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛНАХ С ВЫСОКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ И УМЕНЬШЕННЫМИ РАЗМЕРАМИ 160

Койгеров А. С., Балышева О. Л. ЧИСЛЕННЫЙ ПОДХОД К ИЗВЛЕЧЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ИЗ АНАЛИЗА ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР 167

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ 172

Богатов Н. В. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГРУЗА НА СКЛАДЕ 173

Вознесенский Е. А. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА 181

Добровольская А. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ ОТ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАЗВИТИЯ МИКРОМОБИЛЬНОСТИ И МОДЕРНИЗАЦИИ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ 191

Епифанцев К. В. ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СЕЙСМОДАТЧИКОВ В ПРОЦЕССЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ИХ КАЛИБРОВКИ 195

Епифанцев К. В. АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ДЕКОДЕРОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ 200

Изотов О. А., Кузнецов А. Л. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРИЗОНТА ПЛАНИРОВАНИЯ ДОСТАВКИ СБОРНЫХ ПАРТИЙ ГРУЗОВ 206

Класс И. Ю., Павлов В. С., Турнецкая Е. Л. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМОБИЛЯ 211

Костин А. С. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ 219

Курносов В. И., Будко Н. П. МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ 227

Курносов В. И., Будко Н. П. СТРУКТУРА СЕРВЕРА МОНИТОРИНГА СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ 234

Майоров Н. Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЗИЦИИ ТРАНСПОРТНОГО ТЕРМИНАЛА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦИФРОВОЙ «CIRCOS» МОДЕЛИ 242

Прохоренко А. Ю., Федотов Д. О., Тарасов В. В. УВЕЛИЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ СУХОПУТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ 250

Радочинская А. Ж., Маликова Т. Е., Стрелков А. Ю. ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПИСАНИЯ АЛГОРИТМА РАЗДЕЛЕНИЯ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ НА ЯЗЫКЕ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ 256

Рубинов В. В., Фетисов В. А. ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ПОДХОДА К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ПРОЦЕССУ РАБОТЫ С ОТХОДАМИ 263

Силин Ю. А. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО БАЛАНСА ВНУТРИ КОНТЕЙНЕРА ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ 272

Скорина С. Ф. ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ РАЗРАБОТКИ, ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СЕНСОРОВ БОРТОВЫХ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ, ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ 279

Слободчиков Н. А. ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ РЕЖИМНЫХ ГРУЗОВ 283

Сумманен А. В., Хакимов Р. Т., Белинская И. В. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ 289

Таратун В. Е., Таратун Е. А. РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ 294

Тихоненкова О. В.,Цурков С. А., Сергеев Т. В., Данилова А. С. СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ, ДВИЖЕНИЙ И НАКЛОНОВ ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ОРТОПЕДИИ 300

Уголков С. В. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТАХОГРАФОВ 307

Научное издание

XXIV Международная научная конференция

ВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Сборник статей

Часть 1

9 785808 815827

Ответственный за выпуск
В. И. Казаков

Редакторская подготовка *Е. В. Тороповой*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати 11.05.2021. Формат 60×84 1/16.
Уч.-изд. л. 18,4. Усл.-печ. л. 19,2. Тираж 200 экз. Заказ № 154.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67