

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-12-73-84

УДК 551.501.816; 551.510.411

Трёхканальная фурье-обработка оптических изображений с использованием одного акустооптического фильтра

Владимир Михайлович Котов¹✉, Станислав Владимирович Аверин²,
Анастасия Алексеевна Зенкина³, Анастасия Сергеевна Белоусова⁴

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук, Фрязино, Россия

¹vmk6054@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1369-5123>

²sva278@ire216.msk.su

<https://orcid.org/0000-0002-7524-3563>

³anastasiya-zenkina@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-7246-3350>

⁴nastya9bel@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0004-2188-9643>

Аннотация

Предмет исследования. Исследование возможности двумерной фурье-обработки изображений по трём каналам с использованием одного фильтра пространственных частот. **Цель работы.** Разработка трёхканального фильтра пространственных частот на основе акустооптической ячейки из парателлурита (TeO_2), как наиболее перспективного и широко используемого на практике материала на сегодняшний день. **Метод.** В основе метода лежит использование срезов кристалла парателлурита, обеспечивающих режим высокоэффективной акустооптической дифракции в два симметричных брэгговских порядка. Расчёты показывают, что наиболее эффективная дифракция в два симметричных порядка в парателлурите реализуется в случае, когда оптическое излучение распространяется вблизи оптической оси $[001]$ кристалла, а акустическая волна — вдоль направления $[110]$. При этом дифракция должна сопровождаться изменением поляризаций дифрагировавших лучей относительно поляризации падающего излучения, что происходит только при условии, когда акустическая волна является поперечной с направлением сдвига вдоль $[110]$. При использовании акустооптической дифракции в два симметричных брэгговских порядка выходными каналами служат плюс первый, нулевой и минус первый порядки. Получены и проанализированы передаточные функции дифракционных порядков. Выявлена особенность формирования передаточных функций с использованием одной акустооптической ячейки, заключающаяся в том, что каждый элемент передаточной функции отстоит от соответствующего элемента «соседней» передаточной функции строго на угол, равный двойному углу Брэгга K/k , где K и k — величины волновых векторов звука и света. Это приводит к необходимости поиска подходящих участков одновременно во всех распределениях передаточных функций, связанных угловым соотношением K/k . **Основные результаты.** Впервые теоретически и экспериментально продемонстрирована фурье-обработка изображения по трём каналам с использованием одного акустооптического фильтра пространственных частот. Экспериментально получена операция дифференцирования по двум каналам и интегрирования по третьему каналу двумерного изображения, переносимого излучением на длине волны света 0,63 мкм. В качестве фильтра пространственных частот использована акустооптическая ячейка из парателлурита, работающая на частоте звука 43,5 МГц в режиме акустооптической дифракции в два симметричных брэгговских порядка. **Практическая значимость.** С увеличением числа каналов появляется возможность

решать более широкий круг задач, например, в процессе обработки сконцентрироваться на одних участках изображения по одним каналам, на других — по другим, «сгладить» шероховатость изображения и т.д.

Ключевые слова: акустооптическая дифракция, фильтр пространственных частот, обработка двумерного оптического изображения

Благодарность: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-21-00059).

Ссылка для цитирования: Котов В.М., Аверин С.В., Зенкина А.А., Белоусова А.С. Трёхканальная фурье-обработка оптических изображений с использованием одного акустооптического фильтра // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 12. С. 73–84. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-73-84>

Коды OCIS: 070.1060, 070.2615, 070.6110.

Three-channel Fourier processing of optical images using a single acousto-optic filter

VLADIMIR KOTOV¹✉, STANISLAV AVERIN², ANASTASIA ZENKINA³, ANASTASIA BELOUSOVA⁴

Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia

¹vmk6054@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1369-5123>

²sva278@ire216.msk.su

<https://orcid.org/0000-0002-7524-3563>

³anastasiya-zenkina@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-7246-3350>

⁴nastya9bel@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0004-2188-9643>

Abstract

Subject of study. Investigation of the possibility of two-dimensional Fourier processing of images in three channels using one spatial frequency filter. **Aim of study.** Development of a three-channel spatial frequency filter based on an acousto-optic cell made of paratellurite (TeO_2) as the most promising and widely used material at the moment. **Method.** The method is based on the use of the slices of a paratellurite crystal, which provide a regime of highly efficient acousto-optic diffraction in two symmetric Bragg orders. Calculations show that the most efficient diffraction in two symmetric orders in paratellurite occurs when optical radiation propagates near the optical $[001]$ axis of the crystal, while the acoustic wave propagates along the $[110]$ direction. In this case, the diffraction should be accompanied by the change in the polarizations of the diffracted beams relative to the polarization of the incident radiation, which occurs only if the acoustic wave is transverse with a shift direction along $[1\bar{1}0]$. When using acousto-optic diffraction in two symmetric Bragg orders, the plus first, zero, and minus first orders serve as output channels. Transfer functions of diffraction orders are obtained and analyzed. A feature of the formation of transfer functions using one acousto-optic cell is revealed, which consists in the fact that each element of the transfer function is separated from the corresponding element of the "neighboring" transfer function strictly by an angle equal to the double Bragg angle K/k , where K and k are the values of the sound and light wave vectors. This leads to the need of search for suitable sections simultaneously in all distributions of transfer functions related by the condition of fulfillment of strong Bragg synchronism. **Main results.** Fourier processing of an image in three channels using the single acousto-optic spatial frequency filter has been demonstrated for the first time. The operation of differentiation over two channels and integration over the third channel of two-dimensional image carried by radiation at a light wavelength of $0.63\ \mu\text{m}$ has been experimentally obtained. The paratellurite acousto-optic cell operating at a sound frequency of $43.5\ \text{MHz}$ in the acousto-optic diffraction mode in two symmetric Bragg orders was used as the spatial frequency filter. **Practical significance.** With an increase in the number of channels, it becomes possible to solve a wider range of tasks, for example, in the process of processing, focus on some areas of the image using one channel, on others — using others, "smooth out" the roughness of the image, etc.

Keywords: acousto-optic diffraction, spatial frequency filter, two-dimensional optical image processing

Acknowledgment: the work was supported by the Russian Science Foundation (Project № 22-21-00059).

For citation: Kotov V.M., Averin S.V., Zenkina A.A., Belousova A.S. Three-channel fourier processing of optical images using a single acousto-optic filter [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 12. P. 73–84. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-73-84>

OCIS codes: 070.1060, 070.2615, 070.6110.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных методов увеличения надёжности измерения параметров оптического изображения является использование нескольких каналов обработки. Например, двухканальные методы регистрации изображений позволяют исправлять аберрации оптической системы, влияющие на качество изображения [1, 2], проводить сравнение изображений путём использования структур дескрипторов [3], выявлять людей в лесах и горах, распознавать лица людей с применением двухдиапазонных устройств сканирования [4, 5] и т.д. Трёхканальные системы позволяют получать цифровые изображения удалённых объектов с высоким пространственным разрешением, приближающимся к дифракционному пределу [6], многоканальное гиперспектральное разрешение с применением набора акустооптических (АО) фильтров обеспечивает распознавание малых объектов [7] и т.д. Перечисленные методы реализуются на основе широкого применения вычислительных средств. Известно [8, 9], что оптическая фурье-обработка изображений существенно разгружает вычислительные мощности, не используя их, поскольку выполняет операцию над изображениями с привлечением пассивных оптических элементов (линз). При этом быстродействие двумерной обработки определяется временем прохождения света через фурье-систему порядка 10^{-9} с. Пожалуй, основным элементом фурье-обработки становится фильтр пространственных частот, который, по сути, и определяет результат обработки. В качестве фильтров пространственных частот во многих устройствах используются АО ячейки благодаря их простоте и высокой скорости перестройки параметров акустической волны (её частоты и мощности) [10]. АО ячейки, как правило, питаются одним генератором, работающим на одной фиксированной частоте с возможностью её перестройки. С помощью ячеек можно обрабатывать как одномерные, так

и двумерные изображения [11–16]. До недавнего времени использовались только одноканальные системы фурье-обработки с использованием АО фильтров [11–16]. Однако ситуация достаточно сильно поменялась после обнаружения возможности обработки двумерных изображений на основе АО фильтров, использующих многофононную брэгговскую дифракцию. Это открыло путь к обработке изображений сразу по нескольким каналам с применением одного АО фильтра. В работах [17–19] описаны двухканальные варианты двумерной обработки изображений, описана методика поиска распределений передаточных функций для двумерной обработки по двум каналам.

Целью настоящей работы является разработка трёхканального фильтра пространственных частот, основанный на использовании АО ячейки из парателлуриата (TeO_2), как наиболее перспективного и широко применяемого на практике материала на сегодняшний день. Метод формирования трёх каналов заключается в применении режима многофононной брэгговской дифракции, а именно — дифракции в два симметричных брэгговских порядка. В работе впервые демонстрируется двумерная обработка изображения сразу по трём каналам, при этом по двум каналам выполняется операция дифференцирования изображения, по третьему — интегрирования. Это ещё более расширяет возможности обработки изображений с использованием одного АО фильтра пространственных частот. Появляется возможность решать более широкий круг задач, например, в процессе обработки сконцентрироваться на одних участках изображения по одним каналам, на других — по другим, «сгладить» шероховатость изображения и т.д.

ТЕОРИЯ

Анализ показывает [18, 20], что наиболее эффективная многофононная дифракция в парателлуриате реализуется в случае, когда

оптическое излучение распространяется вблизи оптической оси [001] кристалла, а акустическая волна направлена вдоль оси [110]. Наиболее эффективная дифракция происходит на поперечной акустической волне, направление сдвига которой ориентировано вдоль $[1\bar{1}0]$. Для трёхканальной обработки выбран режим дифракции в два симметричных брэгговских порядка, при этом выходными каналами служат плюс первый, нулевой и минус первый порядки. В рамках используемого нами подхода полагается, что оптическое поле представляет собой набор плоских волн, причём каждая плоская волна дифрагирует на звуке независимо от присутствия других волн. Акустическая волна является плоской, поэтому дифрагировавшие излучения также представляют собой наборы плоских волн. Кроме того, полагаем, что передаточные функции нулевого, плюс первого и минус первого дифракционных порядков H_0 , H_1 и H_{-1} являются коэффициентами пропорциональности между амплитудами дифрагировавших лучей и амплитудой падающего излучения. Тогда передаточные функции связаны между собой следующей системой дифференциальных уравнений [20]:

$$\begin{aligned} \frac{dH_0}{dz} &= -\frac{\nu}{2}(H_1 \exp(-i\eta_1 z) + H_{-1} \exp(-i\eta_2 z)); \\ \frac{dH_1}{dz} &= \frac{\nu}{2}H_0 \exp(i\eta_1 z); \\ \frac{dH_{-1}}{dz} &= \frac{\nu}{2}H_0 \exp(i\eta_2 z). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ν — коэффициент, зависящий от мощности звука $\nu = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 P_{ac}}{LH}}$, где λ — длина волны света, M_2 — величина АО качества материала $M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho V^3}$, где n — показатель преломления света; p — эффективная константа фотоупругости, ρ — плотность кристалла, V — скорость звука в кристалле, L и H — длина АО взаимодействия и высота акустического столба, P_{ac} — акустическая мощность, z — координата, вдоль которой развивается АО взаимодействие, η_1 , η_2 — величины рас-

строек фазового синхронизма плюс первого и минус первого порядков, соответственно: $\eta_1 = k_z - k_{z(+1)}$, $\eta_1 = k_z - k_{z(-1)}$, здесь k_z , $k_{z(+1)}$, $k_{z(-1)}$ — проекции волновых векторов нулевого \mathbf{k}_0 , плюс первого \mathbf{k}_{+1} и минус первого \mathbf{k}_{-1} дифракционных порядков на направление Z .

Для граничных условий $H_0 = 1$; $H_1 = H_{-1} = 0$ при $z = 0$ решение системы (1) имеет вид

$$\begin{aligned} H_0 &= a_1 \exp(i\beta_1 z) + a_2 \exp(i\beta_2 z) + a_3 \exp(i\beta_3 z); \\ H_1 &= \frac{\nu}{2i} \left\{ \frac{a_1}{\beta_1 + \eta_1} \exp[i(\beta_1 + \eta_1)z] + \frac{a_2}{\beta_2 + \eta_1} \exp[i(\beta_2 + \eta_1)z] + \frac{a_3}{\beta_3 + \eta_1} \exp[i(\beta_3 + \eta_1)z] \right\}; \\ H_{-1} &= \frac{\nu}{2i} \left\{ \frac{a_1}{\beta_1 + \eta_2} \exp[i(\beta_1 + \eta_2)z] + \frac{a_2}{\beta_2 + \eta_2} \exp[i(\beta_2 + \eta_2)z] + \frac{a_3}{\beta_3 + \eta_2} \exp[i(\beta_3 + \eta_2)z] \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } a_1 &= \frac{T_1}{T_1 + T_2 + T_3}; \quad a_2 = \frac{T_2}{T_1 + T_2 + T_3}; \\ a_3 &= \frac{T_3}{T_1 + T_2 + T_3}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{где } T_1 &= (\beta_3 - \beta_2)(\beta_1 + \eta_1)(\beta_1 + \eta_2); \\ T_2 &= (\beta_1 - \beta_3)(\beta_2 + \eta_1)(\beta_2 + \eta_2); \\ T_3 &= (\beta_2 - \beta_1)(\beta_3 + \eta_1)(\beta_3 + \eta_2), \end{aligned} \quad (4)$$

где β_1 , β_2 , β_3 — корни кубического уравнения

$$\begin{aligned} \beta^3 + \beta^2(\eta_1 + \eta_2) + \beta(\eta_1\eta_2 - 0,5\nu^2) - \\ - 0,25\nu^2(\eta_1 + \eta_2) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Двухмерность передаточных функций в рамках нашей модели учитывалась трёхмер-

ным видом показателей преломления кристалла, которые задавались как [18]

$$n_{1,2}^2 = (1 + \operatorname{tg}^2 j) / \left(\frac{1}{n_0^2} + \frac{\operatorname{tg}^2 j}{2} \left(\frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_e^2} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\operatorname{tg}^4 j \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_e^2} \right)^2 + 4G_{33}^2} \right), \quad (6)$$

где n_0 , n_e — главные показатели преломления кристалла, j — угол между оптической осью кристалла и волновым вектором световой волны, G_{33} — компонента псевдотензора гирации. Знак (\pm) в знаменателе указывает на два возможных значения показателя преломления. В нашем случае полагалось, что происходит анизотропная дифракция света на звуке, при этом показатель преломления падающего излучения соответствует знаку плюс в выражении (6), дифрагировавших лучей — знаку минус. Трёхмерные поверхности волновых векторов описываются выражениями $2\pi n_1/\lambda$ и $2\pi n_2/\lambda$. Из вида поверхностей определялись значения расстройек η_1 , η_2 , а затем — величины H_0 , H_1 , H_{-1} согласно выражениям (1)–(5).

Отметим, что распределения передаточных функций определяются угловым распределением плоских волн падающего излучения [10–13].

На рис. 1 приведена векторная диаграмма анизотропной АО дифракции в два симметричных брэгговских порядка. Дифракция происходит в одноосном гиротропном кристалле. Оптическая ось кристалла — Z . Внешняя и внутренняя поверхности волновых векторов кристалла обозначены 1 и 2, соответственно. Падающее излучение принадлежит внутренней волновой поверхности, дифрагировавшие лучи — внешней. Падающее оптическое излучение представлено в виде конуса, содержащего набор плоских волн, несущих информацию об изображении. Ось симметрии конуса совпадает с направлением «центрального» волнового вектора, обозначенного \mathbf{k}_0 . Дифрагировавшие в плюс первый и минус первый порядки лучи также представлены в виде конусов с «центральными» волновыми векторами \mathbf{k}_{+1} и \mathbf{k}_{-1} . Дифракция происходит на звуковой волне с волновым вектором \mathbf{K} ,

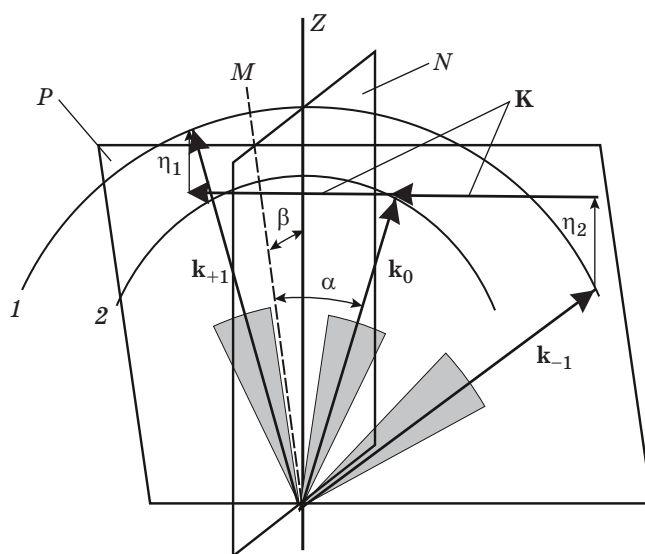


Рис. 1. Векторная диаграмма АО дифракции в два симметричных брэгговских порядка. Z — оптическая ось кристалла; 1, 2 — поверхности волновых векторов; P — плоскость дифракции; N — плоскость симметрии АО взаимодействия; \mathbf{k}_0 , \mathbf{k}_{+1} , \mathbf{k}_{-1} — волновые векторы падающего и дифрагировавших в плюс первый и минус первый порядки волн; \mathbf{K} — волновой вектор звука; η_1 , η_2 — векторы расстройек брэгговского синхронизма; α , β — углы ориентации вектора \mathbf{k}_0

Fig. 1. Vector diagram of AO diffraction in two symmetric Bragg orders: Z is the optical axis of the crystal; 1, 2 are the surfaces of wave vectors; P is the diffraction plane; N is the plane of symmetry of AO interaction; \mathbf{k}_0 , \mathbf{k}_{+1} , \mathbf{k}_{-1} are the wave vectors of the incident and diffracted waves in plus and minus first orders; \mathbf{K} is the wave vector of sound; η_1 , η_2 are the vectors of the Bragg synchronism mismatch; α , β are the orientation angles of the vector \mathbf{k}_0

направленным ортогонально оси Z . Волновые векторы \mathbf{k}_0 , \mathbf{k}_{+1} , \mathbf{k}_{-1} и \mathbf{K} лежат в плоскости дифракции, обозначенной P . Плоскость дифракции наклонена на угол β относительно оптической оси кристалла Z . На рисунке буквой N обозначена плоскость симметрии АО дифракции. Она проходит через оптическую ось Z и ориентирована ортогонально акустической волне \mathbf{K} . Вектор \mathbf{k}_0 наклонён на угол α к плоскости симметрии N . Линия пересечения плоскостей N и P обозначена M . Векторы расстройки брэгговского синхронизма АО дифракции в плюс первый и минус первый порядки обозначены η_1 и η_2 , соответственно. Анализ показывает, что, если центральный вектор \mathbf{k}_0 лежит в плоскости симметрии N ,

то есть, когда $\alpha = 0$, распределения передаточных функций плюс первого и минус первого дифракционных порядков зеркально симметричны. Здесь для центральных лучей \mathbf{k}_{+1} и \mathbf{k}_{-1} имеем $\eta_1 = \eta_2$. Если $\alpha \neq 0$, то распределения теряют зеркальную симметрию. Здесь уже $\eta_1 \neq \eta_2$.

В расчётах набор плоских волн падающего излучения задавался в пространстве углов (α , β), которые определяли ориентацию всех волновых векторов падающего излучения. Отсюда определялись величины проекций волновых векторов k_z , $k_{z(+1)}$, $k_{z(-1)}$, а, значит, и величины расстройек η_1 и η_2 .

Для численного расчёта использовались следующие значения констант [21, 22]: $\lambda = 0,63 \times 10^{-4}$ см, $n_o = 2,26$, $n_e = 2,41$, $G_{33} = 2,62 \times 10^{-5}$, $M_2 = 1200 \times 10^{-18}$ с³/г, $V = 0,617 \times 10^5$ см/с. Кроме того, полагалось, что $P_{ac} = 0,081$ Вт, $L = H = 0,2$ см. Частота звука взята равной 43,5 МГц (условие эксперимента).

Анализ показывает, что распределения функций представляют собой набор интерференционных линий с достаточно сильными неоднородными участками: изгибами, обрывами, линиями с переменной толщиной полос интерференции и т.д. В общем случае неоднородных участков в распределениях достаточно много (не менее десятка), каждый из которых может быть использован для двумерной обработки изображений. Большое количество таких участков открывает возможность вы-

полнять обработку изображений сразу по нескольким каналам. При этом надо иметь в виду, что выбор участков не произволен. Исходя из того, что каналы формируются одной АО ячейкой, каждый элемент выбранной передаточной функции отстоит от соответствующего элемента «соседней» передаточной функции строго на угол, равный двойному углу Брэгга K/k , где K и k — величины волновых векторов звука и света. Поэтому для одновременной обработки изображения по трём каналам необходимо искать подходящие участки одновременно во всех трёх распределениях передаточных функций, при этом, как упоминалось выше, участки разных функций должны быть связаны условием брэгговского синхронизма. В общем случае распределения передаточных функций разные, поэтому характер обработки изображений также разный. Мы остановились на варианте, когда по двум каналам выполняется операция, близкая к дифференцированию изображения, а по третьему — к интегрированию.

На рис. 2 приведены результаты расчёта найденного нами варианта. Здесь отображены модули передаточных функций минус первого (а), нулевого (б) и плюс первого (в) дифракционных порядков. В найденном варианте центральный вектор \mathbf{k}_0 наклонён на углы α и β , равные $1,27^\circ$ и $9,6^\circ$, соответственно. Угловой размер представленных распределений — около $5^\circ \times 5^\circ$. В расчётах использовались только центральные области распределений, размеры

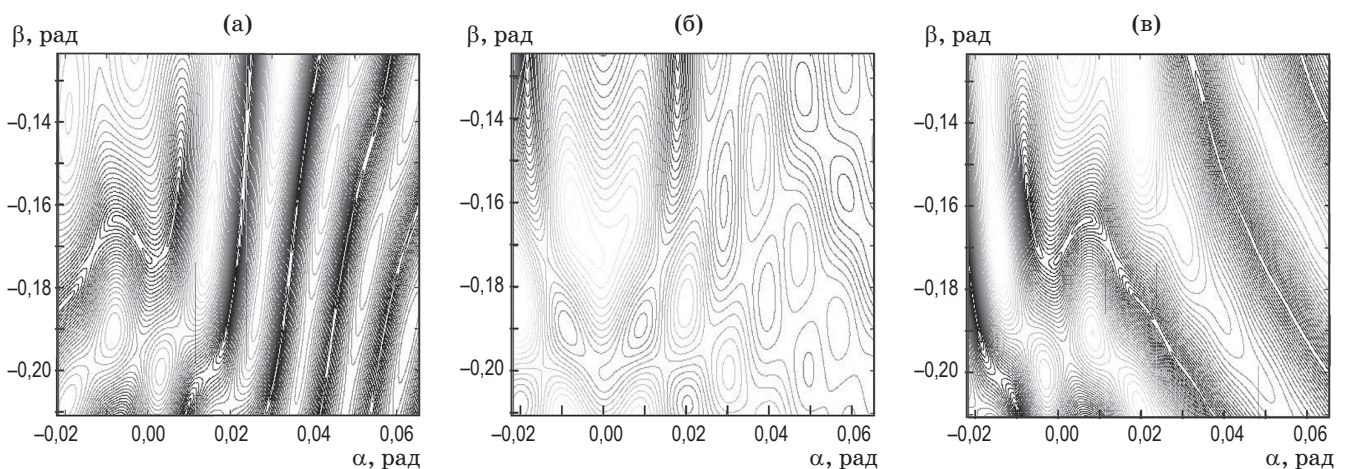


Рис. 2. Модули передаточных функций минус первого (а), нулевого (б) и плюс первого (в) дифракционных порядков

Fig. 2. Modules of transfer functions of minus first (a), zero (b) and plus first (v) diffraction orders

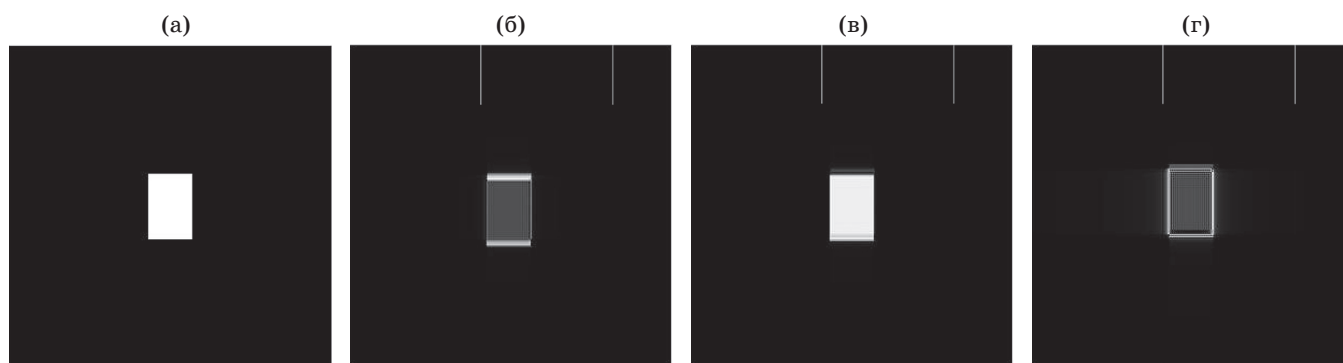


Рис. 3. Исходное изображение (а) и изображения после фурье-обработки в минус первом (б), нулевом (в) и плюс первом (г) дифракционных порядках

Fig. 3. Original image (a) and images after Fourier processing in minus first (б), zero (в), and plus first (г) diffraction orders

которых $2^\circ \times 2^\circ$. Эти области на рисунках не приведены, чтобы не «смазывать» картину распределений. Отложенные по осям углы приведены в радианах. Направление горизонтальной оси на всех рисунках совпадает с направлением распространения звука. Видно, что все распределения неоднородные. В них отсутствуют в явном виде элементы какой-либо осевой симметрии. Тем не менее, они позволяют выполнять обработку двумерных изображений. Результаты быстрой фурье-обработки изображения с помощью передаточных функций рис. 2 приведены на рис. 3. Здесь показано исходное изображение (а), представляющее собой прямоугольник, и его изображения после фурье-обработки в минус первом (б), нулевом (в) и плюс первом (г) дифракционных порядках. Видно, что изображение на рис. 3б является контуром изображения на рис. 3а, в котором вертикальные границы существенно тоньше, чем горизонтальные. Изображение на рис. 3г представляет собой чётко выраженный контур изображения на рис. 3а, изображение на рис. 3в является изображением на рис. 3а с «заваленными» краями. По сути, все три изображения, получаемые после фурье-обработки, являются результатом разных операций. Вид изображения на рис. 3г является результатом двумерного дифференцирования, изображение на рис. 3б — также двумерное дифференцирование, но здесь операция дифференцирования неодинакова в ортогональных направлениях. Вид изображения на рис. 3в является достаточно близким к изображениям, получаемым в результате интегриро-

вания [3]. Операция интегрирования полезна для устранения мелкозернистой структуры изображения. В нашем случае «зернистость» структуры отсутствует, поэтому операция интегрирования не столь заметна. Здесь интегрирование проявляется на краях изображения в виде «завалов». Изображения дополняют друг друга. В частности, на изображении на рис. 3б хорошо выражены вертикальные участки контура, которые, по нашему мнению, более точно соответствуют «крутизне» краёв исходного изображения на рис. 3а. Другими словами, если рис. 3г указывает на «одинаковость» всех краёв изображения, то рис. 3б позволяет более точно оценить толщину контура.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки полученного результата был выполнен эксперимент. На рис. 4 приведена оптическая схема экспериментальной установки. За основу была взята 4F-схема фурье-обработки с использованием двух линз L_1 и L_2 , выполняющих фурье-преобразование. Фокусное расстояние линз равно F , расстояние между линзами равнялось $2F$. В экспериментах $F = 18$ см.

Входным изображением служило квадратное отверстие в экране P_{in} из непрозрачного материала, отстоящего от входной линзы L_1 на расстоянии F . Изображение формировалось при освещении экрана P_{in} излучением He-Ne лазера с длиной волны $0,63$ мкм. Для фильтрации пространственных частот была

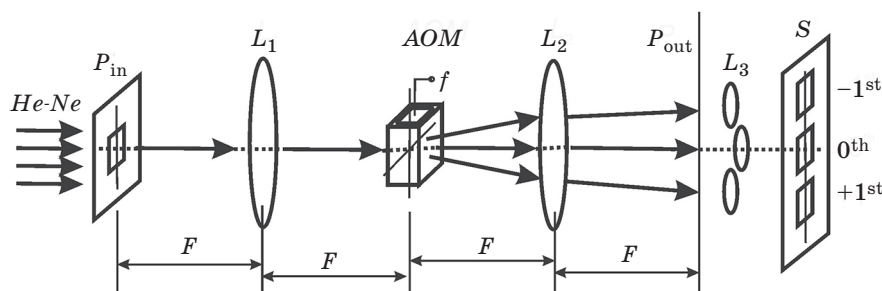


Рис. 4. Оптическая схема трёхканальной фурье-обработки изображения. He-Ne — падающее оптическое излучение гелий-неонового лазера; P_{in} — экран, формирующий входное изображение; L_1 и L_2 — линзы, выполняющие фурье-обработку изображения; AOM — АО фильтр; f — электрический сигнал, подаваемый на фильтр; P_{out} — плоскость формирования выходного изображения; L_3 — увеличивающие линзы; S — экран, на котором наблюдается результат фурье-обработки; -1^{st} , 0^{th} , $+1^{st}$ — изображения минус первого, нулевого и плюс первого дифракционных порядков

Fig. 4. Optical scheme of three-channel Fourier image processing: He-Ne is the incident optical radiation of a helium-neon laser; P_{in} is the screen that forms the input image; L_1 and L_2 are the lenses performing the Fourier processing of the image; AOM is AO filter; f is the electrical signal applied to the filter; P_{out} is the output image formation plane; L_3 are the magnifying lenses; S is the screen, on which the result of the Fourier processing is observed; -1^{st} , 0^{th} , $+1^{st}$ are the images of the minus first, zero and plus first diffraction orders

изготовлена ячейка акусто-оптического модулятора (АОМ), которая располагалась в задней фокальной плоскости линзы L_1 . Размеры ячейки, изготовленной из TeO_2 , были равны $1,0 \times 1,0 \times 1,0 \text{ см}^3$ вдоль направлений $[110]$, $[\bar{1}\bar{1}0]$ и $[001]$, соответственно. В ячейке возбуждалась «медленная» звуковая волна посредством подвода электрического сигнала частотой f к пьезопреобразователю, приваренному к ячейке. Звук распространялся вдоль направления $[110]$ кристалла, оптическое излучение — вблизи оптической оси $[001]$. Такая геометрия АО взаимодействия, как показано в [20, 23], соответствует наибольшему значению коэффициента M_2 , обеспечивая тем самым высокую эффективность дифракции. Частота звука была выбрана 43,5 МГц. В задней фокальной плоскости линзы L_2 формировались изображения в трёх дифракционных порядках. Посредством короткофокусных линз L_3 с фокусным расстоянием 5 см изображения увеличивались. Увеличенные изображения в минус первом, нулевом и плюс первом дифракционных порядках наблюдались на экране S . Задачей эксперимента было получение контура изображения в минус первом и плюс первом порядках, а в нулевом порядке — получение «сглаженного» изображения. Экспериментально задача выполнялась путём плавного вращения АО ячейки вокруг осей $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$ кристалла, а также напряжения,

подаваемого на преобразователь. Полученный результат приведён на рис. 5. Здесь показаны фотографии изображений при отсутствии сигнала, подаваемого на АО ячейку (рис. 5а), и при наличии сигнала (рис. 5б, 5в, 5г), формируемых в минус первом, нулевом и плюс первом дифракционных порядках, соответственно. Изображения на рис. 5б, 5в, 5г приведены на одном рисунке, чтобы наглядно продемонстрировать результат фурье-обработки одновременно во всех порядках, получаемых с помощью одной АО ячейки. Отметим, что изображение рис. 5а соответствует входному изображению, прошедшему через все оптические элементы устройства. Видно, что изображения 5б и 5г являются достаточно чётко выраженными контурами изображения на рис. 5а, а на рис. 5г — «сглаженное» изображение на рис. 5а. Операция «сглаживания» изображения важна в тех случаях, когда необходимо избавиться от ярких пятен, зернистости, различных неоднородностей изображения и так далее, что в ряде случаев мешает его идентификации. Полученные характеристики схожи с характеристиками, приведёнными в работе [3], где исследовались операции дифференцирования и интегрирования изображений с помощью АО фильтра, работающего в тангенциальной геометрии АО взаимодействия. Отметим, что контуры, полученные на рис. 5б и 5г, не совпадают между собой.

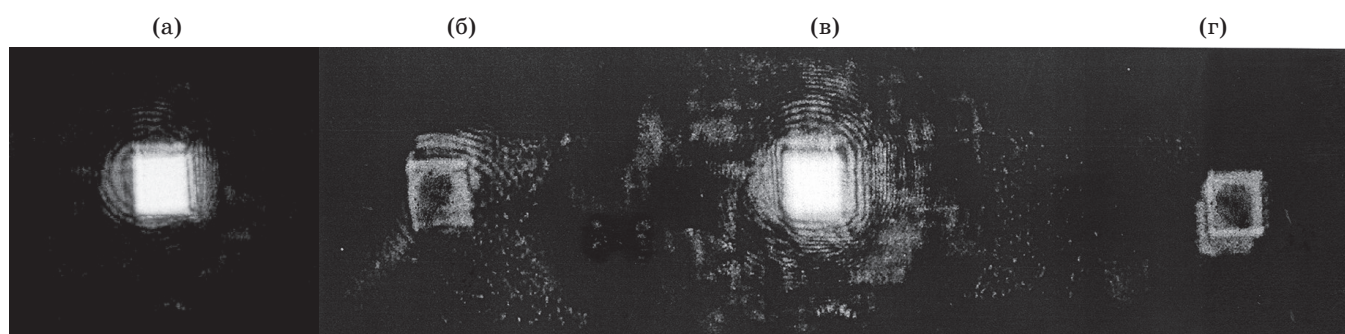


Рис. 5. Изображения, прошедшие оптическую систему фурье-обработки и наблюдаемые на экране. Изображение при отсутствии СВЧ сигнала на АО ячейке (а); изображения, формируемые в минус первом (б), нулевом (в) и плюс первом (г) дифракционных порядках, соответственно, при наличии сигнала на АО ячейке

Fig. 5. Images after Fourier processing observed on the screen: (a) is the image in the absence of an electrical signal on the AO cell; (б), (в), and (г) are the images formed in the minus first, zero, and plus first diffraction orders, respectively, in the presence of a signal on the AO cell

Например, на рис. 5г получен хороший равномерный контур, но толщина контура увеличена. На рис. 5б отдельные участки контура тонкие, что указывает на то, что границы изображения достаточно крутые. По нашему мнению, оба контура хорошо дополняют друг друга.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность выполнения операций дифференцирования и интегрирования одновременно по трём каналам с использованием одного АО пространственного фильтра.

Необходимо отметить, что на фотографии рис. 5в, отображающей формирование изображения в нулевом брэгговском порядке, отчётливо проявляется спекл-структура поля. На фотографии рис. 5а, получаемой в том же нулевом порядке, но в отсутствии звуковой волны, спекл-структуры практически нет. Здесь только проявляются aberrации линз. Наличие спекл-структуры мы связываем с неоднородностью акустического поля. В работе [24] достаточно подробно исследован вопрос возникновения сильной неоднородности звукового поля в парателлурите в направлении распространения звука, наиболее часто используемом на практике. Этот эффект авторы связывают с существованием сильной акустической анизотропии кристалла. Спеклы достаточно просто отличать от основного изображения, поскольку картина спеклов меняется при небольшом изменении параметров звуковой волны (частоты или мощности

звука). Спеклы при этом не исчезают, но их структура меняется. Отметим, что изменение частоты на 0,5–1 МГц существенно влияет на картину спеклов, в то же время это не приводит к изменению формируемого изображения. Эта особенность может быть использована как метод устранения картины спеклов, например, сравнивая два изображения, получаемые при разных частотах звука и оставляя только неизменную часть изображения. Устранение спекл-картины не входило в нашу задачу, однако, мы планируем вернуться к этому вопросу в наших дальнейших исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Для фурье-обработки изображения по трём каналам разработан трёхканальный фильтр пространственных частот на основе АО ячейки из парателлурита, являющегося наиболее перспективным и широко используемым на практике кристаллом в настоящее время. В основе функционирования фильтра лежит АО дифракция в два симметричных брэгговских порядка, которые наряду с нулевым порядком являются тремя выходными каналами фильтра. Для реализации такой дифракции оптические грани кристалла ориентированы ортогонально оптической оси [001], а акустическая грань — ортогонально

направлению $[110]$ кристалла. Дифракция происходит на поперечной звуковой волне с направлением сдвига вдоль $[110]$.

2. Получены и проанализированы передаточные функции АО дифракции нулевого, плюс первого и минус первого порядков. Выявлено, что процедуру выбора подходящих участков распределений передаточных функций необходимо проводить одновременно во всех трёх распределениях, поскольку каждый элемент передаточной функции отстоит от соответствующего элемента «соседней» передаточной функции строго на угол, равный двой-

ному углу Брэгга K/k , где K и k — величины волновых векторов звука и света.

3. Впервые экспериментально продемонстрирована фурье-обработка изображения по трём каналам с использованием одного акустооптического фильтра пространственных частот, изготовленного из кристалла парателлуриата. Получена операция дифференцирования по двум каналам и интегрирования по третьему каналу двумерного изображения, переносимого излучением на длине волны света 0,63 мкм. Частота возбуждения звуковой волны равнялась 43,5 МГц.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Jing W., Cao G., Huang B., Zhang J., Tian S., Wang C. Fast image restoration method for a simple optical system using phase diversity technique // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 1. Р. 33–46. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-01-33-46>
2. Сиразетдинов В.С., Дмитриев И.Ю., Линский П.М., Никитин Н.В. Повышение точности определения волновых аберраций оптической системы по распределению интенсивности фокусируемого светового пучка // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 4. С. 12–22. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-04-12-22>
3. Zakharov A.A., Zhiznyakov A.L., Titov V.S. A method for feature matching in images using descriptor structures // Computer Optics. 2019. V. 43. № 5. Р. 810–817. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-5-810-817>
4. Маркушин Г.Н., Коротаев В.В., Кошелев А.В., Самохина А., Васильев А.С., Васильева А.В., Ярышев С.Н. Комплексирование изображений в двухдиапазонной сканирующей оптико-электронной системе поиска и обнаружения браконьерского промысла // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 6. С. 57–65. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-06-57-65>
5. Xie Z., Zhang S., Yu X., Lui G. Распознавание лиц по совместным изображениям инфракрасного и видимого диапазонов на основе расширенных разреженных представлений и локальных бинарных паттернов // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 7. С. 19–26. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-07-19-26>
6. Беззубик В.В., Белашенков Н.Р., Васильев В.Н., Вдовин Г.В., Иночкин Ф.М., Соловьев О.А., Рудин Я.В. Многоапертурная цифровая телескопическая система со сверхразрешением // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 12. С. 93–102. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-12-93-102>
7. Герус А.В., Герус Т.Г. Акустооптические методы идентификации объектов в гиперспектральном анализе // Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4. № 4(17). С. 70–83. <https://doi.org/10.25210/jfop-1504-070083>
8. Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. N.-Y.: McGraw-Hill Companies, 1996. 441 p.
9. Черемисин А.И. Фурье-оптика. Ч. 1, 2. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУКИТ, 2012. 340 с.
10. Балакшый В.И., Волошин В.В. Акустооптическая обработка изображений в когерентном свете // Квант. электроника. 2005. Т. 35. № 1. С. 85–90. <https://doi.org/10.1070/QE2005v035n01ABEH002782>

REFERENCES

1. Jing W.B., Cao G.M., Huang B.K., Zhang J.M., Tian S.Y., Wang C.X. Fast image restoration method for a simple optical system using a phase diversity technique // Journal of Optical Technology. 2022. V. 89(1). P. 23–32. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000023>
2. Sirazetdinov V.S., Dmitriev I.Yu., Linsky P.M., Nikitin N.V. Increasing the measurement accuracy for wave aberrations of an optical system using the intensity distribution of a focused light beam // Journal of Optical Technology. 2022. V. 89(4). P. 197–204. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000197>
3. Zakharov A.A., Zhiznyakov A.L., Titov V.S. A method for feature matching in images using descriptor structures // Computer Optics. 2019. V. 43. № 5. P. 810–817. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-5-810-817>
4. Markushin G.N., Korotaev V.V., Koshelev A.V., Samokhina I.A., Vasil'ev A.S., Vasil'eva A.V., Yaryshev S.N. Image fusion in a dual-band scanning optoelectronic system for the search and detection of poaching activity // Journal of Optical Technology. 2020. V. 87(6). P. 365–370. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000365>
5. Xie Z., Zhang S., Yu X., Liu G. Infrared and visible face fusion recognition based on extended sparse representation classification and local binary patterns for the single sample problem // Journal of Optical Technology. 2019. V. 86(7). P. 408–413. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000408>
6. Bezzubik V.V., Belashenkov N.R., Vasil'ev V.N., Vdovin G.V., Inochkin F.M., Solov'ev O.A., Rudin Ya.V. Multi-aperture digital telescopic system with super-resolution // Journal of Optical Technology. 2020. V. 87(12). P. 767–773. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000767>
7. Gerus A.V., Gerus T.G. Acousto-optical methods of identification objects in the hyper spectral analysis // Physical Bases of Instrumentation. 2015. V. 4. № 4(17). P. 70–83. <https://doi.org/10.25210/jfop-1504-070083>
8. Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. N.-Y.: McGraw-Hill Companies, 1996. 441 p.
9. Cheremisin A.I. Fourier-Optics. Part 1, 2. S.Petersburg: S-PGUC&T" Publisher, 2012. 340 p.
10. Balakshy V.I., Voloshinov V.B. Acousto-optic image processing in coherent light // Quantum Electronics. 2005. V. 35. Iss. 1. P. 85–90. <https://doi.org/10.1070/QE2005v035n01ABEH002782>

11. Balakshy V.I., Voloshinov V.B., Babkina T.M., Kostyuk D.E. Optical image processing by means of acousto-optic spatial filtration // *J. Modern Optics*. 2005. V. 52. № 1. P. 1–20. <https://doi.org/10.1080/09500340410001669408>
12. Balakshy V.I. Acousto-optic visualization of optical wave fronts [Invited] // *Appl. Opt.* 2018. V. 57. № 10. P. C56–C63. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000C56>
13. Balakshy V.I., Kostyuk D.E. Acousto-optic image processing // *Appl. Opt.* 2009. V. 48. № 7. P. C24–C32. <https://doi.org/10.1364/AO.48.000C24>
14. Yablokova A.A., Machikhin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E., Boritko S.V. Analysis of transfer function dependence on configuration of acousto-optic interaction in uniaxial crystals // *Proc. SPIE*. 2019. V. 11032. P. 1103215. <https://doi.org/10.1117/12.2520803>
15. Gorevoy A.V., Machikhin A.S., Martynov G.N., Pozhar V.E. Spatiospectral transformation of noncollimated light beams diffracted by ultrasound in birefringent crystals // *Photonics Research*. 2021. V. 9. № 5. P. 687–693. <https://doi.org/10.1364/PRJ.417992>
16. Yushkov K.B., Molchanov V.Y., Belousov P.V., Abrosimov A.Y. Contrast enhancement in microscopy of human thyroid tumors by means of acousto-optic adaptive spatial filtering // *Journal of Biomedical Optics*. 2021. V. 21. № 1. P. 016003. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.1.016003>
17. Котов В.М., Шкердин Г.Н., Аверин С.В. Формирование двумерного контура изображения в двух дифракционных порядках в процессе трехкратной брэгговской дифракции // *Радиотехника и электроника*. 2016. Т. 61. № 11. С. 1090–1094. <https://doi.org/10.7868/S0033849416110073>
18. Котов В.М., Аверин С.В., Зенкина А.А., Белоусова А.С. Двумерная обработка изображений с использованием двух каналов, формируемых одним акустооптическим фильтром // *Компьютерная оптика*. 2022. Т. 46. № 6. С. 905–913. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1119>
19. Котов В.М., Аверин С.В., Зенкина А.А., Белоусова А.С. Формирование двумерных контуров изображения в нулевом и плюс втором дифракционных порядках в процессе двукратной брэгговской дифракции // *Квантовая электроника*. 2022. Т. 52. № 8. С. 754–758.
20. Балацкий В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
21. Акустические кристаллы / Под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука, 1982. 632 с.
22. Кизель В.А., Бурков В.И. Гиротропия кристаллов. М.: Наука, 1980. 304 с.
23. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П., Шаповаленко К.Г. Теория и практика современной акустооптики. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. 458 с.
24. Balakshy V.I., Mantsevich S.N. Propagation of acoustic beams in a paratellurite crystal // *Acoustical Physics (Russian)*. 2012. V. 54. № 5. P. 549–557. <https://doi.org/10.1134/S1063771012050041>
11. Balakshy V.I., Voloshinov V.B., Babkina T.M., Kostyuk D.E. Optical image processing by means of acousto-optic spatial filtration // *J. Modern Optics*. 2005. V. 52. № 1. P. 1–20. <https://doi.org/10.1080/09500340410001669408>
12. Balakshy V.I. Acousto-optic visualization of optical wave fronts [Invited] // *Appl. Opt.* 2018. V. 57. № 10. P. C56–C63. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000C56>
13. Balakshy V.I., Kostyuk D.E. Acousto-optic image processing // *Appl. Opt.* 2009. V. 48. № 7. P. C24–C32. <https://doi.org/10.1364/AO.48.000C24>
14. Yablokova A.A., Machikhin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E., Boritko S.V. Analysis of transfer function dependence on configuration of acousto-optic interaction in uniaxial crystals // *Proc. SPIE*. 2019. V. 11032. P. 1103215. <https://doi.org/10.1117/12.2520803>
15. Gorevoy A.V., Machikhin A.S., Martynov G.N., Pozhar V.E. Spatiospectral transformation of noncollimated light beams diffracted by ultrasound in birefringent crystals // *Photonics Research*. 2021. V. 9. № 5. P. 687–693. <https://doi.org/10.1364/PRJ.417992>
16. Yushkov K.B., Molchanov V.Y., Belousov P.V., Abrosimov A.Y. Contrast enhancement in microscopy of human thyroid tumors by means of acousto-optic adaptive spatial filtering // *Journal of Biomedical Optics*. 2021. V. 21. № 1. P. 016003. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.1.016003>
17. Kotov V.M., Shkerdin G.N., Averin S.V. Formation of the two-dimensional image in two diffraction orders in the process of triple Bragg diffraction // *Journal of communications technology and electronics*. 2016. V. 61. № 11. P. 1275–1279. <https://doi.org/10.1134/S1064226916110073>
18. Kotov V.M., Averin S.V., Zenkina A.A., Belousova A.S. Two-dimensional image processing using two channels formed by one acousto-optical filter // *Computer Optics*. 2022. T. 46(6). P. 905–913. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1119>
19. Kotov V.M., Averin S.V., Zenkina A.A., Belousova A.S. Formation of 2D image contours in the zeroth and plus second diffraction orders during double Bragg's diffraction // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2022. V. 49. Suppl. 1. P. S99–S105. <https://doi.org/10.3103/S1068335622130036>
20. Balakshy V.I., Parygin V.N., Chirkov L.E. Physical principles of acousto-optics. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher, 1985. 280 p.
21. Shaskol'skaya M.P. Acoustical crystals. Handbook. Moscow: "Nauka" Publisher, 1982. 632 p.
22. Kizel' V.A., Burkov V.I. Gyrotropy of crystals. Moscow: "Nauka" Publisher, 1980. 304 p.
23. Molchanov V.Ya., Kitaev Yu.I., Kolesnikov A.I., Narver V.N., Rozenshtein A.Z., Solodovnikov N.P., Shapovalenko K.G. Theory and practice of modern acoustooptics. Moscow: MISiS Publisher, 2015. 458 p.
24. Balakshy V.I., Mantsevich S.N. Propagation of acoustic beams in a paratellurite crystal // *Acoustical Physics (Russian)*. 2012. V. 54. № 5. P. 549–557. <https://doi.org/10.1134/S1063771012050041>

АВТОРЫ

Котов Владимир Михайлович — доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, г. Фрязино

AUTHORS

Vladimir M. Kotov — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Kotelnikov Institute of Radio-engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 141190,

Моск. обл., Россия; <https://orcid.org/0000-0003-1369-5123>,
vmk277@ire216.msk.su, vmk6054@mail.ru

Аверин Станислав Владимирович — доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, г. Фрязино Моск. обл., Россия; <https://orcid.org/0000-0002-7524-3563>, sva278@ire216.msk.su

Зенкина Анастасия Алексеевна — инженер Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, г. Фрязино Моск. обл., Россия; <https://orcid.org/0009-0008-7246-3350>, anastasiya-zenkina@mail.ru

Белоусова Анастасия Сергеевна — студент, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, г. Фрязино Моск. обл., Россия; <https://orcid.org/0009-0004-2188-9643>, nastya9bel@yandex.ru

Fryazino, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1369-5123>,
vmk277@ire216.msk.su, vmk6054@mail.ru

Stanislav V. Averin — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 141190, Fryazino, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-7524-3563>, sva278@ire216.msk.su

Anastasia A. Zenkina — Engineer, Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 141190, Fryazino, Russia; <https://orcid.org/0009-0008-7246-3350>, anastasiya-zenkina@mail.ru

Anastasia S. Belousova — Student of the Mytishchy branch of Bauman Moscow High Technical University, Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 141190, Fryazino, Russia; <https://orcid.org/0009-0004-2188-9643>, nastya9bel@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 12.04.2023
Одобрена после рецензирования 19.07.2023
Принята к печати 30.10.2023*

*The article was submitted to the editorial office 12.04.2023
Approved after review 19.07.2023
Accepted for publication 30.10.2023*