

## Двумерная обработка изображений с использованием двух каналов, формируемых одним акустооптическим фильтром

В.М. Котов<sup>1</sup>, С.В. Аверин<sup>1</sup>, А.А. Зенкина<sup>1</sup>, А.С. Белоусова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Россия, 141190, Московской обл., Фрязино, пл. Введенского, д. 1

### Аннотация

Исследованы свойства двухканального акустооптического фильтра пространственных частот, отклоняющего оптические лучи в два симметричных порядка. Выявлено, что неоднородное распределение поля в каждом порядке дает возможность выполнять обработку изображений по двум каналам с использованием различных передаточных функций. Формирование двумерного контура в двух дифракционных порядках подтверждено экспериментально на длине волны 0,63 мкм. В качестве двухканального фильтра пространственных частот использована АО-ячейка из TeO<sub>2</sub>, работающая на частоте звука 26 МГц.

**Ключевые слова:** обработка изображений, двумерный контур, акустооптическая дифракция, фильтр пространственных частот.

**Цитирование:** Котов, В.М. Двумерная обработка изображений с использованием двух каналов, формируемых одним акустооптическим фильтром / В.М. Котов, С.В. Аверин, А.А. Зенкина, А.С. Белоусова // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 6. – С. 905-913. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1119.

**Citation:** Kotov VM, Averin SV, Zenkina AA, Belousova AS. Two-dimensional image processing using two channels formed by one acousto-optical filter. Computer Optics 2022; 46(6): 905-913. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1119.

### Введение

Одной из широко используемых операций с изображениями является выделение его контура с последующим контурным анализом [1]. К разновидностям контурного метода относится обнаружение контуров на основе весовых моделей изображения [2], нелинейной фильтрации контуров [3], фильтрации на основе преобразований Гильберта [4], вихревых пространственных фильтров [5–7], контурные методы для исследования поверхностей вулканов [8], исследования коленных суставов по их контурам [9] и т.д. Контур изображения позволяет существенно снизить объемы обрабатываемой информации, при этом сохранить такие важные характеристики объекта, как его форму, размеры, особенности строения объекта, характер движения объекта в целом или его частей и т.д. Наиболее быстродействующим и в то же время простым методом обработки изображений (в частности, операции выделения контура) является его оптическая Фурье-обработка, осуществляемая с использованием двух линз [10]. Ключевым элементом системы оптической Фурье-обработки является фильтр пространственных частот, который определяет в конечном итоге характеристики обработанного изображения.

Одним из широко используемых на практике перестраиваемых фильтров пространственных частот являются акустооптические (АО) фильтры, в которых характеристики поля легко меняются путем изменения частоты и мощности звука. АО-элементы отличаются высокой скоростью перестройки, малые управляющие напряжения, надежность и простота конструкции [11]. Впервые фильтрующие свойства АО-ячейки были ис-

следованы в [12]. Было показано, что АО-ячейка действует на проходящую через нее оптическую волну как линейный фильтр пространственных частот.

Существенным недостатком АО-фильтров считалась их одномерность, что, как казалось, предопределяло невозможность их применения для двумерной обработки изображений [13–15]. Открытие анизотропной брэгговской дифракции в одноосных и двуосных кристаллах, сопровождающееся «перебросом» волнового вектора света с одной поверхности волновых векторов на другую, позволило найти режимы, с помощью которых стало возможным обрабатывать двумерные изображения [11, 16–21]. В работах [19, 20] выполнены полные исследования всех вариантов брэгговской АО-дифракции и сделан вывод о том, что только два режима анизотропной дифракции – тангенциальный и коллинеарный – передаточные функции которых являются осесимметричными, могут быть использованы для обработки двумерных изображений. В процессе исследования двухфононных режимов дифракции, направленных на улучшение качества одномерных контуров, нами было экспериментально обнаружено, что при некоторых ориентациях АО-ячейки, когда излучение дифрагирует в два порядка, возможно формирование не только одномерных, но и двумерных контуров изображения [22]. Этот эффект казался странным, поскольку передаточные функции двухфононного режима дифракции не являются осесимметричными. Однако теоретические исследования этого явления подтвердили, что в некоторых случаях передаточные функции, не являющиеся осесимметричными, могут быть пригодными для выделения двумерного контура [23, 24]. Это существенно расширило возможности акустооптики для задач обра-

ботки изображений. В частности, удалось существенно увеличить полосу пропускания пространственных частот  $\Delta f_p$  и предельное разрешение  $d_{\min}$  АО-элемента. Эти параметры определяются как  $\Delta f_p = \Delta \Theta_p / \lambda$  и  $d_{\min} = 1 / \Delta f_p$  [12]. По уровню 3 дБ и при малой эффективности дифракции величины  $\Delta \Theta_p$  и  $d_{\min}$  равны:  $\Delta \Theta_p = 0,89V/Lf$ ;  $d_{\min} = 1,12\lambda Lf/V$ . Здесь  $\lambda$  – длина волны света;  $L$  – длина АО-взаимодействия;  $f$  и  $V$  – частота и скорость звука. Отсюда следует, что для увеличения  $\Delta \Theta_p$  (и, соответственно, уменьшения  $d_{\min}$ ) необходимо понижать частоту  $f$ .

Отметим, что частота звука, используемая в тангенциальной геометрии АО-дифракции в  $\text{TeO}_2$ , равна  $\sim 68$  МГц для длины волны оптического излучения  $\lambda = 0,63 \times 10^{-4}$  см [11]. С использованием двукратных и трехкратных режимов дифракции удалось понизить частоту звука до  $\sim 25$  МГц [22–24].

В настоящей работе демонстрируется еще одно достоинство фильтров, основанных на интерференции нескольких оптических волн, – возможность обрабатывать изображение по двум каналам, формируемым одним АО-фильтром. При этом передаточные функции каналов различные.

Двухканальная система позволяет увеличить надежность измерений, уменьшить шумы, а также открывает возможность решать более широкие задачи, например, сконцентрироваться на одних участках изображения по одному каналу, на других – по другому.

### 1. Простейшие симметричные и несимметричные передаточные функции

Многие исследователи, занимающиеся обработкой изображений с помощью АО-фильтров, уверены в том, что передаточные функции фильтров, предназначенных для обработки двумерных изображений, должны быть осесимметричными (см. напр. [11, 16–21]). На простом примере мы покажем, что для подобных операций осесимметричность фильтров необязательна. Более того, информация, заложенная в симметричных функциях, избыточна. Можно удалить значительную часть фильтра, и он будет выполнять свои функции. В дальнейшем будет подразумеваться, что изображение обрабатывается с помощью Фурье-метода, заключающегося в преобразовании Фурье-изображения, заданного пространственной функцией  $f(x, y)$ , в изображение, представленное в частотной области в виде функции  $F(u, v)$ , перемножении этой функции с передаточной функцией фильтра  $H(u, v)$ , и обратного преобразования Фурье [1, 10]. В результате на выходе формируется изображение, описываемое пространственной функцией  $g(x, y)$ . Здесь  $(x, y)$  – координаты элементов изображения на входе и выходе системы;  $(u, v)$  – пространственные частоты. Контур изображения, заданного функцией  $f(x, y)$ , можно получить посредством его дифференцирования. Наиболее простой передаточной функцией, выполняющей операцию дифференцирования, является функция вида [1]

$$H(u) = au, \tag{1}$$

где  $a$  – константа,  $u$  – пространственная частота. Для одномерного случая, когда исходное изображение представляется функцией  $f(x)$ , после преобразования Фурье формируется распределение вида

$$F(u) = \Phi[f(x)], \tag{2}$$

где через  $\Phi$  обозначено Фурье-преобразование. После прохождения излучения через фильтр (1) формируется спектр

$$G(u) = F(u)H(u) = auF(u). \tag{3}$$

После повторного Фурье-преобразования получим выходное изображение

$$g(x) = \Phi[G(u)] = a \int uF(u) \exp(2\pi iux) du = \frac{a}{2\pi i} \frac{d}{dx} \left[ \int F(u) \exp(2\pi iux) du \right] = \frac{a}{2\pi i} \frac{df(-x)}{dx}. \tag{4}$$

Видно, что Фурье-обработка с фильтром (1) действительно приводит к дифференцированию входного изображения.

В двумерном случае операцию выделения контура можно выполнить с использованием осесимметричной передаточной функции

$$H = a\sqrt{u^2 + v^2}, \tag{5}$$

где  $u$  и  $v$  – пространственные частоты.

На рис. 1а в качестве примера приведен трехмерный вид фильтра (5) для  $a=0,1$ ; на рис. 1б дается «вид сверху» на этот фильтр. На рис. 2 приведен пример входного изображения в виде круга (а) и вид изображения после его Фурье-обработки (б) с использованием фильтра (5). Видно, что изображение 2б содержит хорошо выраженный контур исходного изображения 2а.

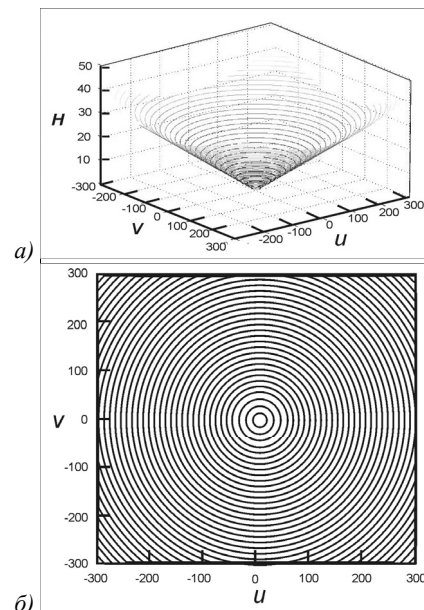


Рис. 1. Трехмерный (а) и двумерный (б) виды передаточной функции (5)

Теперь удалим некоторые области фильтра (5). На рис. 3 приведены два таких варианта. В варианте 3а оставлена рабочая часть в виде смещенного квадрата, площадь рабочей части составляет ~28% от общей площади фильтра, на рис. 3б оставшаяся рабочая часть имеет вид угла, его площадь ~32%. Полученные фильтры – неосесимметричны, однако они позволяют выполнять операцию двумерного дифференцирования. Результаты Фурье-обработки изображения рис. 2а с помощью фильтров 3а, б приведены на рис. 4. Видно, что фильтры с «урезанными» рабочими поверхностями позволяют достаточно хорошо выделять двумерный контур.

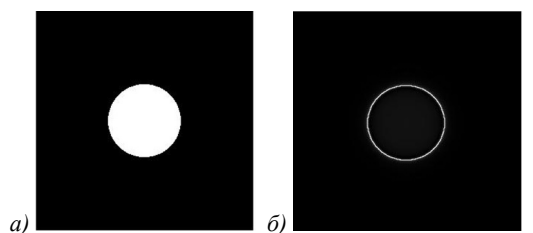


Рис. 2. Исходное изображение в виде круга (а) и его изображение после Фурье-обработки (б)

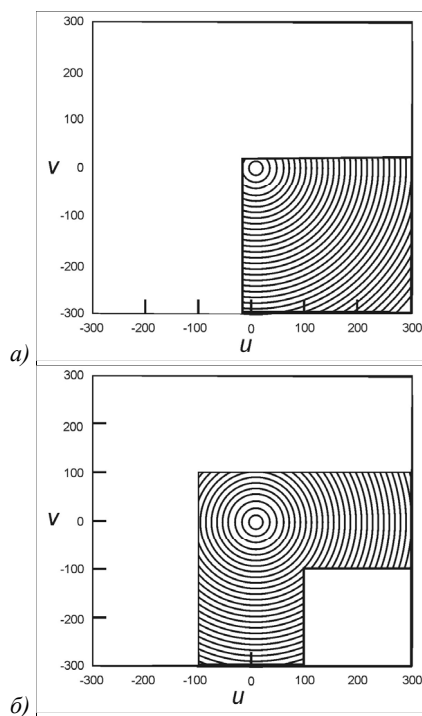


Рис. 3. Передаточные функции фильтра (5) с «рабочими» участками в виде смещенного квадрата (а) и угла (б)

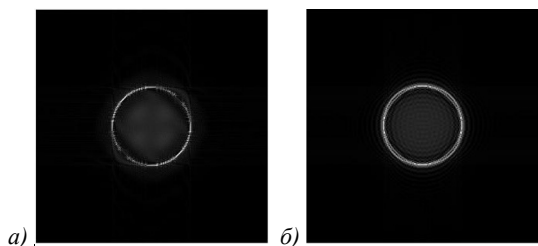


Рис. 4. Изображение круга (рис. 2а) после его Фурье-обработки с использованием фильтров в виде смещенного квадрата (а) и угла (б)

Этот простой пример показывает, что передаточные функции с явно несимметричными рабочими областями могут обладать некоторой «внутренней» двумерной симметрией, позволяющей обрабатывать двумерные изображения. Это, в свою очередь, объясняет возможность выделения двумерных контуров с использованием передаточных функций, формируемых в процессе многофононной брэгговской дифракции и имеющих явно несимметричные распределения пропускания.

Ниже описываются особенности АО-фильтров, основанных на дифракции в плюс первый и минус первый порядки, приводится расчет амплитуд дифрагировавших лучей, на основе чего определяются передаточные функции дифракционных порядков. Демонстрируется методика выделения двумерного контура изображения одновременно в плюс первом и минус первом дифракционных порядках.

### 2. АО-несимметричные передаточные функции

При рассмотрении АО-ячеек в качестве фильтров пространственных частот предполагается, что Фурье-обработка выполняется оптическими методами, т.е. с использованием линз. Схема обработки – 4f [1, 10], где f – фокусное расстояние линз. Положим, что информация о входном двумерном изображении содержится в некотором прозрачном материале в виде функции прозрачности  $t(x, y)$ , равномерно освещенном нормально падающей на него монохроматической волной с амплитудой A. Полагаем, что Фурье-преобразование выполняется с помощью линзы, а прозрачный материал, содержащий информацию об изображении, находится в передней фокальной плоскости линзы. Тогда в задней фокальной плоскости линзы формируется Фурье-образ изображения, описываемый функцией  $\Psi_{00}(f_x, f_y)$ , который связан с  $t(x, y)$  соотношением [10]

$$\Psi_{00}(f_x, f_y) = \frac{A}{\lambda f} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} t(x, y) \exp \left[ -\frac{2\pi i}{\lambda f} (xf_x + yf_y) \right] dx dy, \quad (6)$$

где x, y – координаты элементов изображения,  $f_x, f_y$  – пространственные частоты,  $\lambda$  – длина волны света, f – фокус линзы; A – амплитуда волны, падающей на прозрачный материал. В области, где формируется Фурье-образ  $\Psi_{00}(f_x, f_y)$ , расположена АО-ячейка, выполняющая функцию фильтра пространственных частот. В работах [13–15, 25] развита теория АО-взаимодействия, связывающая «напрямую» Фурье-образы падающего и дифрагировавших лучей, получены уравнения, описывающие этот процесс, изучены особенности дифракции. В работах [16–18, 22–24] используется другой подход, основанный на спектральном методе. При этом результаты практически идентичны результатам с использованием изображений в виде Фурье-образов. В спектральном методе

оптическое поле, включая поле, с помощью которого переносится Фурье-образ изображения, представляется в виде набора плоских волн, при этом все акты дифракции плоских волн происходят независимо друг от друга. Волны взаимодействуют с плоской монохроматической акустической волной, поэтому дифрагировавшие волны также представляют собой набор плоских волн [12]. Спектральный метод позволяет использовать хорошо отработанную методику расчета параметров АО-дифракции для вычисления передаточных функций АО-взаимодействия. Полагается, что Фурье-образ формируется не только строго в задней фокальной плоскости линзы, но и сохраняется в некоторой области до и после неё. Длина области существования Фурье-образа равна длине АО-взаимодействия. Это предположение справедливо при выполнении условия  $L \ll f$ , где  $L$  – длина АО-взаимодействия.

В настоящей работе используется спектральный метод. Рассматривается АО-дифракция в два симметричных порядка – плюс первый и минус первый [26]. Этот вариант примечателен тем, что передаточные функции симметричных порядков одни и те же, но зеркальны относительно друг друга. Это, с одной стороны, позволяет формировать независимые каналы, а с другой – существенно упрощает их настройку, поскольку в процессе изменения частоты или мощности звука характеристики распределений меняются симметричным образом.

На рис. 5 приведена трехмерная векторная диаграмма АО-дифракции излучения в два порядка в одноосном гиротропном кристалле. Диаграмма представлена в системе координат волновых векторов  $K_x, K_y, K_z$ , где направление  $K_z$  совпадает с оптической осью кристалла  $OZ$ . Вдоль направления  $K_x$  распространяется акустическая волна с волновым вектором  $\mathbf{K}$ . Падающая оптическая волна с волновым вектором  $\mathbf{k}_0$  в результате АО-взаимодействия с акустической волной  $\mathbf{K}$  дифрагирует в направления волн плюс первого и минус первого порядков, представленных волновыми векторами  $\mathbf{k}_{+1}$  и  $\mathbf{k}_{-1}$ . Происходит анизотропная дифракция света на звуке [26], т.е. падающая волна принадлежит поверхности волновых векторов  $S_1$ , дифрагировавшие волны –  $S_2$ .

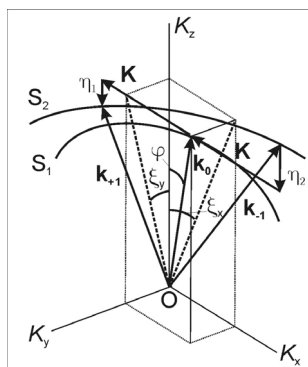


Рис. 5. Трехмерная векторная диаграмма АО-дифракции в два дифракционных порядка

Угол отклонения волн  $\mathbf{k}_{+1}$  и  $\mathbf{k}_{-1}$  от волны  $\mathbf{k}_0$  равен  $\approx K/k_0$ , где  $K$  и  $k_0$  – величины волновых векторов  $\mathbf{K}$  и  $\mathbf{k}_0$ . Отметим, что на воздухе этот угол равен  $K/k$ , где  $k$  – величина волнового вектора света на воздухе. Акты дифракции происходят с расстройкой брэгговского синхронизма. Векторы расстройки обозначены как  $\boldsymbol{\eta}_1$  и  $\boldsymbol{\eta}_2$ . Углы между проекциями вектора  $\mathbf{k}_0$  на плоскости  $(K_x, K_z)$ ,  $(K_y, K_z)$  и оптической осью  $OZ$  равны  $\xi_x, \xi_y$ . Эти углы связаны с углом  $\varphi$  между  $\mathbf{k}_0$  и  $OZ$  соотношением  $\text{tg}\varphi = (\text{tg}^2 \xi_x + \text{tg}^2 \xi_y)^{0.5}$ . Поверхности волновых векторов  $S_1$  и  $S_2$  кристалла описываются функциями  $2\pi n_1/\lambda$  и  $2\pi n_2/\lambda$  соответственно, где  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления кристалла. Для одноосного гиротропного кристалла они равны [27]

$$n_{1,2}^2 = \frac{1 + \text{tg}^2 \varphi}{\frac{1}{n_0^2} + \frac{\text{tg}^2 \varphi}{2} \left( \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_e^2} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\text{tg}^4 \varphi \left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_e^2} \right)^2 + 4G_{33}^2}}, \quad (7)$$

где  $n_0, n_e$  – главные показатели преломления кристалла;  $\varphi$  – угол между оптической осью кристалла и волновым вектором световой волны;  $G_{33}$  – компонента псевдотензора гирации.

На рис. 6 показано распространение оптического излучения, содержащего информацию о Фурье-образе изображения, через АО-пространственный фильтр. Здесь падающее на ячейку излучение  $E_{\text{inc}}$  представляется в виде набора плоских волн. Волновой вектор одной из плоских волн падающего излучения обозначен  $\mathbf{k}$ . Акустическая волна распространяется вдоль направления  $x$ , оптические волны – вблизи направления  $z$ . На АО-ячейку подается сигнал  $f$ .

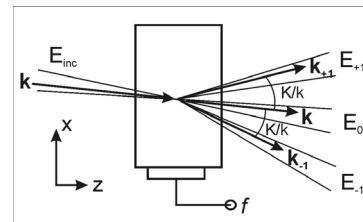


Рис. 6. Ход лучей в АО-ячейке

Каждая плоская волна падающего излучения дифрагирует в результате АО-взаимодействия в два порядка, формируя плоские волны плюс первого и минус первого порядков, отклоняющиеся от падающей волны на углы  $+K/k$  и  $-K/k$ , где  $K = 2\pi f/V$ ;  $k = 2\pi/\lambda$ . Здесь  $f$  и  $V$  – частота и скорость звуковой волны,  $\lambda$  – длина волны света. На рисунке плоская волна с волновым вектором  $\mathbf{k}$  дифрагирует в направления волновых векторов  $\mathbf{k}_{+1}$  и  $\mathbf{k}_{-1}$ . Прошедшее излучение  $E_0$ , а также дифрагировавшие излучения  $E_{+1}, E_{-1}$  тоже представляют собой наборы плоских волн. Отметим, что АО-ячейка отличается от «обычных» фильтров пространственных частот. Если нулевой порядок дифракции ведет себя как «обычный» фильтр, то в дифракционных плюс первом и минус первом порядках АО-ячейка смещает спектры сигналов в целом по оси

временных частот на величины  $+2\pi f$  и  $-2\pi f$  (за счет эффекта Доплера), а по оси пространственных частот (в направлении  $x$ ) – на величины  $+K/2\pi$  и  $-K/2\pi$  [11].

Связь между волнами, участвующими в АО-дифракции, можно записать в виде

$$\begin{aligned} E_0(\theta_m) &= E_{inc}(\theta_m) H_0(\theta_m), \\ E_{+1}(\theta_m + K/k) &= E_{inc}(\theta_m) H_{+1}(\theta_m), \\ E_{-1}(\theta_m - K/k) &= E_{inc}(\theta_m) H_{-1}(\theta_m). \end{aligned} \tag{8}$$

Здесь  $E_0$ ,  $E_{+1}$  и  $E_{-1}$  – амплитуды полей нулевого, плюс первого и минус первого дифракционных порядков;  $E_{inc}$  – амплитуда поля падающего излучения;  $\theta_m$  – угол ориентации  $m$ -той плоской волны;  $H_0$ ,  $H_{+1}$  и  $H_{-1}$  – передаточные функции нулевого, плюс первого и минус первого дифракционных порядков. Наличие дополнительного углового сдвига в амплитудах  $E_{+1}$  и  $E_{-1}$  на величину  $K/k$  отражает факт отклонения продифрагировавших плоских волн от падающих волн в результате брэгговской дифракции. Амплитуды волн  $E_0$ ,  $E_{+1}$  и  $E_{-1}$  связаны между собой следующей системой укороченных дифференциальных уравнений, получаемых из волнового уравнения в приближении медленно меняющихся амплитуд с учетом гиротропии и анизотропии среды [24, 26]:

$$\begin{aligned} \frac{dE_0}{dz} &= -\frac{\varepsilon}{2} (E_{+1} \exp(-i\eta_1 z) + E_{-1} \exp(-i\eta_2 z)), \\ \frac{dE_{+1}}{dz} &= \frac{\varepsilon}{2} E_0 \exp(i\eta_1 z); \quad \frac{dE_{-1}}{dz} = \frac{\varepsilon}{2} E_0 \exp(i\eta_2 z). \end{aligned} \tag{9}$$

Кроме того, из закона сохранения энергии имеем:  $E_{inc} E_{inc}^* = E_0 E_0^* + E_{+1} E_{+1}^* + E_{-1} E_{-1}^*$ , где (\*) означает комплексное сопряжение. В уравнениях (9):  $\varepsilon$  – параметр, связанный с мощностью акустической волны:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 P_{ac}}{LR}},$$

где  $\lambda$  – длина волны света;  $M_2$  – АО-качество материала;  $L$  – длина АО-взаимодействия;  $R$  – высота акустического столба;  $P_{ac}$  – акустическая мощность;  $z$  – координата, вдоль которой развивается АО-взаимодействие;  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  – расстройки фазового синхронизма плюс первого и минус первого порядков соответственно:  $\eta_1 = k_z - k_{z(+1)}$ ,  $\eta_2 = k_z - k_{z(-1)}$ , здесь  $k_z$ ,  $k_{z(+1)}$ ,  $k_{z(-1)}$  – проекции волновых векторов нулевого  $\mathbf{k}$ , плюс первого  $\mathbf{k}_{+1}$  и минус первого  $\mathbf{k}_{-1}$  порядков на направление  $K_z$ .

Решение системы (9) приведено в работе [24]. Однако в этой работе исследуется только передаточная функция 0-го дифракционного порядка. Были выполнены эксперименты по формированию двумерного контура только в нулевом брэгговском порядке. Задача обработки изображений одновременно в плюс первом и минус первом дифракционных порядках в этой работе не рассматривалась. Обработка изображений по двум каналам имеет свои особенности, которые

исследуются в настоящей работе. Амплитуды волн плюс первого и минус первого порядков равны:

$$\begin{aligned} E_{+1} &= \frac{\varepsilon}{2i} \sum_{m=1}^3 \frac{a_m}{\beta_m + \eta_1} \exp[i(\beta_m + \eta_1)z], \\ E_{-1} &= \frac{\varepsilon}{2i} \sum_{m=1}^3 \frac{a_m}{\beta_m + \eta_2} \exp[i(\beta_m + \eta_2)z]. \end{aligned} \tag{10}$$

Здесь

$$a_m = \frac{T_m}{T_1 + T_2 + T_3}, \tag{11}$$

где

$$\begin{aligned} T_1 &= (\beta_3 - \beta_2)(\beta_1 + \eta_1)(\beta_1 + \eta_2); \\ T_2 &= (\beta_1 - \beta_3)(\beta_2 + \eta_1)(\beta_2 + \eta_2); \\ T_3 &= (\beta_2 - \beta_1)(\beta_3 + \eta_1)(\beta_3 + \eta_2). \end{aligned}$$

$\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  – корни кубического уравнения.

$$\begin{aligned} \beta^3 + \beta^2(\eta_1 + \eta_2) + \beta(\eta_1\eta_2 - 0,5\varepsilon^2) - \\ - 0,25\varepsilon^2(\eta_1 + \eta_2) = 0. \end{aligned} \tag{12}$$

Из амплитуд полей  $E_0$ ,  $E_{+1}$  и  $E_{-1}$  определяются передаточные функции согласно соотношениям (8).

Дальнейшие расчеты делаются применительно к излучению с длиной волны  $\lambda = 0,63 \times 10^{-4}$  см, поскольку с таким излучением проводились эксперименты. В качестве АО-материала использовался кристалл  $\text{TeO}_2$ , для которого брались следующие параметры [28, 29]:  $n_0 = 2,26$ ;  $n_e = 2,41$ ;  $G_{33} = 2,62 \times 10^{-5}$ ,  $M_2 = 1200 \times 10^{-18}$   $\text{c}^3/\text{г}$ ,  $V = 0,617 \times 10^5$   $\text{cm}^3/\text{с}$ . Величины  $L$  и  $R$  соответствовали размерам преобразователя ячейки и были равны  $L = R = 0,2$  см. Акустическая мощность была равной  $P_{ac} = 0,15$  Вт. Частота звука – 26 МГц.

Неоднородность передаточных функций особенно сильно проявляется на периферийных участках распределения, там, где волновые фронты интерферирующих волн начинают пересекаться под значительными углами (больше 5–6 град). При вычислении передаточных функций будем полагать, что АО-взаимодействие происходит в одноосном гиротропном кристалле  $\text{TeO}_2$ , оптическая ось кристалла – [001]. Вдоль направления [110] кристалла, ортогонального оптической оси [001], распространяется поперечная звуковая волна с волновым вектором  $K$ . На АО-ячейку падает расходящееся излучение, сосредоточенное в некотором телесном угле, ось симметрии которого  $OO'$  проходит вблизи оптической оси кристалла [001]. Если ось  $OO'$  ориентирована ортогонально звуковому вектору  $K$ , то передаточные функции плюс первого и минус первого порядков будут симметричными. Для того, чтобы «задействовать» периферийные участки распределения функций, направление  $OO'$  необходимо наклонить относительно оптической оси [001] на некоторый угол  $\gamma$ , сохра-

няя при этом ортогональность  $OO'$  вектору  $\mathbf{K}$ . В качестве примера на рис. 7 приведены двумерные передаточные функции  $|H_{+1}|$  и  $|H_{-1}|$  в зависимости от углов  $\xi_x, \xi_y$ , пересчитанных для воздуха, ориентации волнового вектора падающего излучения (рисунки (а) и (б) соответственно), вычисленные на основании соотношений (7–12) с использованием вышеприведенных параметров. Угол  $\gamma$  взят равным 5 град. Угловой размер распределений  $\sim 7 \times 7$  град. Отметим, что диапазон углов  $\xi_{x,y}$  связан с диапазоном пространственных частот  $f_{x,y}$  соотношением  $f_{x,y} = \xi_{x,y} / \lambda$  [12]. Прежде всего, видно, что распределения зеркально симметричны друг относительно друга. В них, наряду с линейными участками интерференции, встречаются участки с достаточно сильными неоднородностями – резко изогнутыми линиями, обрывами и т.п. Ряд таких участков выделен квадратами. Размер квадратов  $\sim 1,5 \times 1,5$  град. Именно такие участки, как показано в [23], позволяют выделять двумерный контур изображений. Вообще говоря, окончательный вывод о пригодности того или иного выделенного участка можно сделать только после его проверки на основе компьютерной Фурье-обработки изображений.

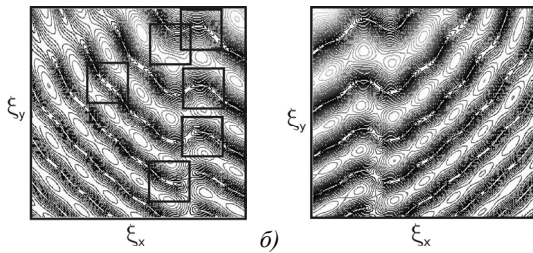


Рис. 7. Передаточные функции плюс первого (а) и минус первого (б) дифракционных порядков. Размер функций  $\sim 7 \times 7$  град. Размеры выделенных участков  $\sim 1,5 \times 1,5$  град

На рис. 8 приведена отобранная пара от распределений  $|H_{+1}|$  и  $|H_{-1}|$  (8а и 8б соответственно) для одновременной обработки изображений по двум каналам. Отметим, что пары нельзя отбирать произвольным образом. Элементы одного распределения разнесены в угловом пространстве от соответствующих элементов другого распределения на угол  $2K/k$ , что следует из соотношений (8). На рис. 9 приведены результаты компьютерной обработки изображений в виде круга (рис. 2а) с помощью передаточной функции рис. 8а (рис. 9а) и рис. 8б (рис. 9б). Видно, что рис. 9 представляют собой достаточно хорошо выраженные контуры круга. Качество контуров немного различно. Мы умышленно выбрали для примера две передаточные функции с разными характеристиками, чтобы продемонстрировать, с одной стороны, неочевидность выделения двумерного контура при помощи фильтров с «любой» изломанной линией интерференции, а с другой – полезность двухканальной обработки изображений для устранения дефектов одного (или обоих) пространственных фильтров.

Необходимо добавить, что в нашей работе [30] уже предпринималась попытка получения передаточ-

ных функций в двух дифракционных порядках, но там поиск «подходящих» областей в двух соседних порядках был, вообще говоря, бессистемным, даже случайным. Никакого систематического подхода там развить не удалось, поскольку не удалось проследить связь в формировании распределений в этих порядках. В настоящей же работе передаточные функции формируются и меняются одинаковым образом, поэтому достаточно просто отследить изменение в одном распределении по изменению в другом.

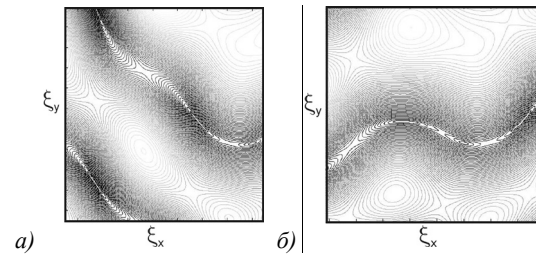


Рис. 8. Выбранные участки для реализации одновременной дифракции в плюс первый (а) и минус первый (б) дифракционных порядках

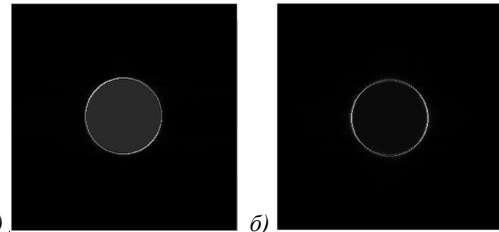


Рис. 9. Результаты обработки изображения рис. 2а с помощью передаточной функции 8а (рис. а) и функции 8б (рис. б)

Как следует из вида передаточных функций рис. 7, существует большое число участков с изгибами и неоднородностями, что предоставляет существенно больше возможностей для обработки изображений в сравнении с другими АО-методами, не использующими интерференцию нескольких лучей. При этом обработка изображений по двум каналам позволяет, с одной стороны, скомпенсировать несовершенство некоторых передаточных функций, а с другой – существенно расширить круг выполняемых задач, например, выделяя одни участки контура (по одному или обоим каналам) и подавляя другие.

Отметим, что обработка изображений по двум каналам достаточно широко применяется и другими исследователями, например, с использованием дескрипторов [31], но в этом случае каналы заведомо разделяются и обрабатываются независимыми фильтрами. В нашем же случае операции по разделению на два канала и обработке по двум каналам выполняются одним АО-пространственным фильтром.

### 3. Эксперимент

Для проверки возможности двумерной обработки изображений по двум каналам с использованием АО-дифракции в два симметричных брэгговских порядка

был выполнен эксперимент. На рис. 10 приведена оптическая схема экспериментальной установки двумерной Фурье-обработки изображения.

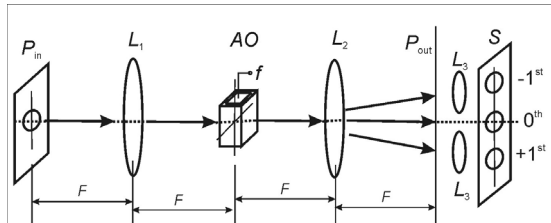


Рис. 10. Оптическая схема экспериментальной установки Фурье-обработки двумерного изображения

Нами использовалась схема Фурье-обработки  $4F$ , т.е. с применением двух идентичных линз, фокусное расстояние которых равнялось 18 см. В качестве входного изображения  $P_{in}$  использовался транспарант с практически круглым отверстием с небольшими дефектами, освещаемый с одной стороны расширенным пучком He-Ne лазера ( $\lambda=0,63$  мкм). Входное изображение располагалось на расстоянии  $F$  от первой линзы  $L_1$ , за этой линзой на расстоянии  $2F$  от нее располагалась вторая линза  $L_2$ . Посередине между линзами помещалась АО-ячейка, выполняющая функцию фильтра пространственных частот. Выходные изображения формировались в плоскости  $P_{out}$ , расположенной на задней фокальной плоскости линзы  $L_2$ . Для увеличения изображений в плюс первом и минус первом дифракционных порядках использовались короткофокусные линзы  $L_3$  с фокусным расстоянием 2 см. Увеличенные изображения наблюдались на экране  $S$ .

Фильтром пространственных частот служила АО-ячейка из  $\text{TeO}_2$ , в которой возбуждалась поперечная звуковая волна. Размеры монокристалла  $\text{TeO}_2$  вдоль направлений  $[110]$ ,  $[\bar{1}\bar{1}0]$  и  $[001]$  были равны  $1,0 \times 0,8 \times 0,8$  см<sup>3</sup> соответственно. Направления  $[110]$ ,  $[\bar{1}\bar{1}0]$  и  $[001]$  соответствуют направлениям  $K_x, K_y, K_z$  рис. 5. Звуковая волна распространялась вдоль  $[110]$ , оптическое излучение – вблизи оптической оси  $[001]$ . Частота звука была выбрана 26 МГц. Прикладываемая электрическая мощность составила  $\sim 0,5$  Вт на нагрузку 50 Ом. Для получения двумерных контуров одновременно в двух дифракционных порядках оптическая грань  $(001)$  АО-ячейки вначале ориентировалась ортогонально падающему излучению, а затем медленно вращалась вокруг оси  $[110]$  кристалла. Этой операцией обеспечивался переход к периферийным участкам передаточных функций. Угол поворота составлял  $\sim 5$  град. Затем менялась ориентация АО-ячейки поворотом вокруг оси  $[\bar{1}\bar{1}0]$  кристалла на малый угол ( $\sim 0,1-0,2$  град), что обеспечивало «неодинаковость» передаточных функций, формируемых в брэгговских порядках. Более тонкой подстройкой вышеупомянутых углов добивались ситуации, когда в обоих дифракционных порядках формировался двумерный контур изображения. На экране  $S$  наблюдался

результат Фурье-обработки. На рис. 11 приведены фотографии контура в плюс первом дифракционном порядке (а), вид изображения в нулевом порядке дифракции (б) и изображение контура, получаемого в минус первом порядке (в). Видно, что на рисунках (а) и (в) сформированы достаточно четкие контуры. Но их характеристики разные: видно, что толщина контуров неодинакова, наблюдаются разрывы в контурах. Оба изображения, по нашему мнению, хорошо дополняют друг друга. Иными словами, в нашем случае получение информации о контуре изображения по двум каналам предоставляет хорошую возможность коррекции контура.

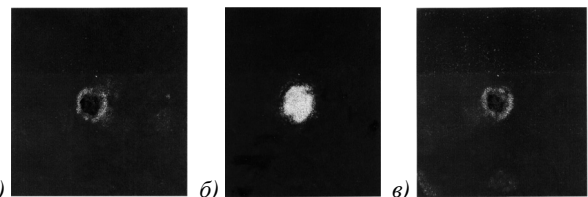


Рис. 11. Формирование двумерного изображения (б) в  $+1$ -м (а) и  $-1$ -м (в) порядках дифракции в процессе АО-дифракции в два симметричных порядка

При выполнении эксперимента не ставилась задача получения предельных параметров изображений. Цель эксперимента – продемонстрировать возможность получения двумерного контура по двум каналам с использованием различных передаточных функций, формируемых одним АО-фильтром.

### Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Впервые для получения двумерного контура оптического изображения по двум независимым каналам предложено использовать акустооптический (АО) фильтр пространственных частот, основанный на брэгговской дифракции в два симметричных дифракционных порядка.

2. Для задачи одновременного выделения двумерного контура изображения в двух каналах проанализированы передаточные функции плюс первого и минус первого порядков и продемонстрирована их зеркальная симметричность. Выявлено, что для двумерной фильтрации лучше всего подходят периферийные участки распределений передаточных функций, при этом число подходящих участков достаточно велико.

3. Описана методика поиска распределений передаточных функций для двумерной обработки изображений по двум каналам. Показано, что соответствующие элементы передаточных функций двух каналов разнесены друг от друга на угол  $2K/k$ .

4. Экспериментально получено выделение двумерного контура изображения в двух независимых оптических каналах посредством оптической Фурье-обработки. Длина волны оптического излучения –  $0,63 \times 10^{-4}$  см, фильтром пространственных частот

служила АО-ячейка из парателлурифта, акустическая волна в которой возбуждалась на частоте звука 26 МГц. Полученные контуры в дифракционных порядках имеют неодинаковые характеристики, однако оба контура хорошо дополняют друг друга. Иными словами, получение информации о контуре изображения по двум каналам предоставляет хорошую возможность коррекции контура.

Результаты, полученные в ходе выполнения работы, могут найти применение для обработки оптических изображений, в которых используются АО-ячейки в качестве фильтров пространственных частот.

### *Благодарности*

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-21-00059).

### *References*

- [1] Ghatak AK, Thyagarajan K. Contemporary Optics. New York: Plenum Press; 1978. ISBN: 0-306-31029-5.
- [2] Gizatullin ZM, Lyasheva SA, Morozov OG, Shleyimovich MP. The method of contour detection based on an image weight model. Computer Optics 2020; 44(3): 393-400. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-615.
- [3] Khafizov RG, Okhotnikov SA. Nonlinear filtering of image contours defined in complex-valued code. Computer Optics 2020; 44(5): 757-762. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-745.
- [4] Davis J, McNamara D, Cottrell D, Campos J. Image processing with the radial Hilbert transform: theory and experiments. Opt Lett 2000; 25: 99-101.
- [5] Ananin MA, Khonina SN. Modelling of optical processing of images with use of the vortical spatial filter. Computer Optics 2009; 33(4): 466-472.
- [6] Wang J, Zhang W, Qi Q, Zheng S, Chen L. Gradual edge enhancement in spiral phase contrast imaging with fractional vortex filters. Sci Rep 2015; 5: 15826.
- [7] Khonina SN, Porfirev AP. Generation of multi-contour plane curves using vortex beams. Optik 2021; 229: 166299. DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.166299.
- [8] Kamaev AN, Urmanov IP, Sorokin AA, Karmanov DA, Korolev SP. Images analysis for automatic volcano visibility estimation. Computer Optics 2018; 42(1): 128-140. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-128-140.
- [9] Mikhaylichenko AA, Demyanenko YM. Detection of the bone contours of the knee joints on medical X-ray images. Computer Optics 2019; 43(3): 455-463. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-455-463.
- [10] Goodman JW. Introduction to Fourier optics. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Companies Inc; 1996. ISBN: 0-07-024254-2.
- [11] Balakshy VI, Voloshinov VB. Acousto-optic image processing in coherent light [In Russian]. Quantum Electron 2005; 35(1): 85-90. DOI 10.1070/QE2005v035n01ABEH002782.
- [12] Balakshy VI. Acousto-optic cell as a filter of spatial frequencies [In Russian]. Radiotekhnika i Elektronika 1984; 29(8): 1610-1616.
- [13] Banerjee PP, Cao D, Poon T-C. Basic image processing operations by use of acousto-optics. Appl Opt 1997; 36(14): 3086-3089. DOI: 10.1364/AO.36.003086.
- [14] Cao D, Banerjee PP, Poon T-C. Image edge enhancement using two cascaded acousto-optic cells with contra-propagating sound. Appl Opt 1998; 37(14): 3007-3014. DOI: 10.1364/AO.37.003007.
- [15] Banerjee PP, Cao D, Poon T-C. Notch spatial filtering with an acousto-optic modulator. Appl Opt 1998; 37(32): 7532-7537. DOI: 10.1364/AO.37.007532.
- [16] Balakshy VI, Voloshinov VB, Babkina TM, Kostyuk DE. Optical image processing by means of acousto-optic spatial filtration. J Mod Opt 2005; 52(1): 1-20. DOI: 10.1080/09500340410001669408.
- [17] Balakshy VI, Kostyuk DE. Acousto-optic image processing. Appl Opt 2009; 48(7): C24-C32. DOI: 10.1364/AO.48.000C24.
- [18] Balakshy VI. Acousto-optic visualization of optical wave fronts [invited]. Appl Opt 2018; 57(10): C56-C63. DOI: 10.1364/AO.57.000C56.
- [19] Yablokova AA, Machikhin AS, Batshev VI, Pozhar VE, Boritko SV. Analysis of transfer function dependence on configuration of acousto-optic interaction in uniaxial crystals. Proc SPIE 2019; 11032: 1103215. DOI: 10.1117/12.2520803.
- [20] Gorevoy AV, Machikhin AS, Martynov GN, Pozhar VE. Spatiospectral transformation of noncollimated light beams diffracted by ultrasound in birefringent crystals. Photonics Res 2021; 9(5): 687-693. DOI: 10.1364/PRJ.417992.
- [21] Yushkov KB, Molchanov VY, Belousov PV, Abrosimov AY. Contrast enhancement in microscopy of human thyroid tumors by means of acousto-optic adaptive spatial filtering. J Biomed Opt 2021; 21(1): 016003. DOI: 10.1117/1.JBO.21.1.016003.
- [22] Kotov VM, Shkerdin GN, Buliuk AN. Two-dimensional image edge enhancement by two-phonon Bragg diffraction. Sov J Quantum Electron 2011; 41(12): 1109-1113. DOI: 10.1070/QE2011v041n12ABEH014673.
- [23] Kotov VM, Averin SV, Kotov EV, Shkerdin GN. Acousto-optic filters based on the superposition of diffraction fields [invited]. Appl Opt 2018; 57(10): C83-C92. DOI: 10.1364/AO.57.000C83.
- [24] Kotov VM, Averin SV. Two-dimensional image edge enhancement using two orders of Bragg diffraction. Sov J Quantum Electron 2020; 50(3): 305-308. DOI: 10.1070/QEL17137.
- [25] Banerjee PP, Tam CW. A Fourier transform approach to acousto-optic interactions in the presence of propagational diffraction. Acustica 1991; 74: 181-191.
- [26] Balakshy VI, Parygin VN, Chirkov LE. Physical principles of acousto-optics [In Russian]. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher; 1985.
- [27] Kotov VM. Acousto-optics. Bragg diffraction of the multi-color radiation [In Russian]. Moscow: "Yanus-K" Publisher; 2016. ISBN: 978-5-8037-0681-6.
- [28] Shaskol'skaya MP. Acoustical crystals. Handbook [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1982.
- [29] Kizel' VA, Burkov VI. Gyrotropy of crystals [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1980.
- [30] Kotov VM, Shkerdin GN, Averin SV. Formation of the two-dimensional image edge in two diffraction orders in the process of triple Bragg diffraction [In Russian]. Journal of Communications Technology and Electronics 2016; 61(11): 1275-1279. DOI: 10.1134/S1064226916110073.
- [31] Zakharov AA, Zhiznyakov AL, Titov VS. A method for feature matching in images using descriptor structures. Computer Optics 2019; 43(5): 810-817. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-810-817.



**Сведения об авторах**

**Котов Владимир Михайлович**, 1954 года рождения, руководитель лаборатории быстропротекающих процессов, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Фрязинского филиала Федерального бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов: акустооптическое взаимодействие в твердых телах, управление параметрами оптического излучения (амплитудой, фазой, частотой, поляризацией) посредством дифракции света на звуке, дифракция многоцветного излучения на звуковых волнах, обработка изображений, методы выделения двумерного контура с использованием Фурье-обработки изображений, разработка акустооптических фильтров пространственных частот, волоконная оптика. E-mail: [ymk6054@mail.ru](mailto:ymk6054@mail.ru).

**Аверин Станислав Владимирович**, 1947 года рождения, ведущий научный сотрудник Фрязинского филиала Федерального бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники РАН, доктор физ.-мат. наук. Область научных интересов: физика полупроводников, волоконная оптика, акустооптическое взаимодействие в твердых телах. E-mail: [sva278@ire216.msk.su](mailto:sva278@ire216.msk.su).

**Зенкина Анастасия Алексеевна**, 1989 года рождения, студент 4 курса филиала РТУ МИРЭА г. Фрязино. E-mail: [anastasiya-zenkina@mail.ru](mailto:anastasiya-zenkina@mail.ru).

**Белоусова Анастасия Сергеевна**, 2001 года рождения, студент 3 курса Мытищенского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [nastya9bel@yandex.ru](mailto:nastya9bel@yandex.ru).

---

ГРНТИ: 29.37.25

Поступила в редакцию 10 марта 2022 г. Окончательный вариант – 17 мая 2022 г.

---

---

# Two-dimensional image processing using two channels formed by one acousto-optical filter

V.M. Kotov<sup>1</sup>, S.V. Averin<sup>1</sup>, A.A. Zenkina<sup>1</sup>, A.S. Belousova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fryazino Branch of The Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics (IRE) of RAS, 141120, Russia, Fryazino, Vvedensky Sq. 1

## Abstract

Properties of a two-channel acousto-optic (AO) spatial frequency filter deflecting optical beams in two symmetrical orders are studied. It is found that the non-uniform distribution of the field in each order makes it possible to process images in two channels using different transfer functions. The formation of a two-dimensional contour in two diffraction orders is confirmed experimentally on the basis of image processing for a wavelength of 0.63  $\mu\text{m}$ . A TeO<sub>2</sub> AO cell operating at an acoustic frequency of 26 MHz is used as a two-channel spatial frequency filter.

**Keywords:** image processing, two-dimensional contour, acousto-optic diffraction, spatial frequency filter.

**Citation:** Kotov VM, Averin SV, Zenkina AA, Belousova AS. Two-dimensional image processing using two channels formed by one acousto-optical filter. *Computer Optics* 2022; 46(6): 905-913. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1119.

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

---

## Authors' information

**Vladimir Mihailovich Kotov**, was born in 1954, Head of the Laboratory of Fast Processes, Doctor of Science in Physics and Mathematics, leading scientific worker of Fryazino Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences. Research interests: acousto-optic interaction in solids, control of optical radiation parameters (amplitude, phase, frequency, polarization) by means of light diffraction on sound, diffraction of multicolor radiation on sound waves, image processing, methods for extracting a two-dimensional contour using Fourier image processing, development of acousto-optic filters of spatial frequencies, fiber optics. E-mail: [vmk6054@mail.ru](mailto:vmk6054@mail.ru).

**Stanislav Vladimirovich Averin**, was born in 1947, Doctor of Science in Physics and Mathematics, leading scientific worker of Fryazino Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of sciences. His current research interests include physics of semiconductors, fiber optics, acousto-optical interaction in solids. E-mail: [sva278@ire216.msk.su](mailto:sva278@ire216.msk.su).

**Anastasiya Alexeevna Zenkina**, was born in 1989, 4th year student of the Branch of RTU MIREA, Fryazino. E-mail: [anastasiya-zenkina@mail.ru](mailto:anastasiya-zenkina@mail.ru).

**Anastasiya Sergeevna Belousova**, was born in 2001, 3rd year student of the Mytishchy Branch of Bauman Moscow High Technical University. E-mail: [nastya9bel@yandex.ru](mailto:nastya9bel@yandex.ru).

---

Received March 10, 2022. The final version – May 17, 2022.

---