

МОДУЛЯЦИЯ СВЕТА

Дифференцирование и интегрирование изображения в разных каналах с использованием одного акустооптического фильтра

В.М.Котов, С.В.Аверин, А.А.Зенкина, А.С.Белоусова, М.В.Карачевцева, А.Н.Булук

Теоретически и экспериментально исследована двумерная фурье-обработка изображения с использованием двух каналов, когда по одному каналу выполняется операция дифференцирования изображения, а по другому – операция интегрирования. Обе операции осуществляются одним акустооптическим (АО) фильтром пространственных частот, работающим в режиме АО дифракции в два симметричных брэгговских порядка. Проанализированы передаточные функции каналов, продемонстрированы операции дифференцирования и интегрирования. Результаты подтверждены экспериментально посредством оптической фурье-обработки изображения, сформированного излучением на длине волны света 0.63 мкм. В качестве фильтра пространственных частот использована АО ячейка из TeO_2 , работающая на частоте звука 44 МГц.

Ключевые слова: брэгговская дифракция в два симметричных порядка, одноосный гиротропный кристалл, дифференцирование и интегрирование изображения.

1. Введение

Для обработки оптических изображений широко используется фурье-метод [1,2], основанный на фурье-преобразовании изображения, пропускании полученного фурье-образа через пространственный фильтр и обратного фурье-преобразования для получения выходного изображения. Привлекательность метода заключается в простоте его реализации на практике: фурье-преобразование осуществляется посредством «обычных» линз. Метод позволяет, в частности, выполнять такие операции над изображениями, как дифференцирование и интегрирование. В первом случае выделяется контур изображения, во втором – осуществляется его «сглаживание», что позволяет избавиться от ярких пятен, шумов, зернистости, различных неоднородностей изображения и т. п., в ряде случаев мешающих его идентификации [2, 3]. В качестве фильтров пространственных частот, являющихся одним из основных элементов фурье-обработки, находят применение акустооптические (АО) ячейки [4]. Ячейки позволяют выполнять как одномерную [5–7], так и двумерную [7–16] обработку изображений. Двумерная обработка предпочтительнее, однако она может быть реализована не во всех случаях АО взаимодействия. В частности, «обычный» брэгговский режим, при котором происходит дифракция только в один порядок, допускает обработку двумерного изображения лишь в двух геометриях АО взаимодействия – тангенциальной и коллинеарной [7–11]. В работе [7] исследованы операции двумерного дифференцирования и интегрирования изображения с помощью АО фильтра, основанного на тангенциальной геометрии. В результате

исследований был сделан вывод о том, что для двумерной обработки изображений передаточные функции фильтра должны быть осесимметричными. Для дифференцирования изображения вид функции должен иметь колоколообразное распределение, для интегрирования – распределение в виде тора. Дифракция с использованием нескольких дифракционных порядков принципиально отличается от дифракции в один порядок: здесь распределение передаточных функций не является осесимметричным. Оно, как правило, имеет вид изогнутых линий, линий с обрывами и т. п., причем областей, пригодных для двумерной обработки, может быть несколько (см., напр., [12–16]). Это открывает существенно больше возможностей для задач двумерной обработки в сравнении с «обычной» брэгговской дифракцией.

Если в предыдущих работах основной целью был поиск распределений передаточных функций, обеспечивающих дифференцирование изображения, то в настоящей работе упор сделан на поиске условий его интегрирования. Более того, описывается вариант двухканальной обработки изображения, когда по одному каналу выполняется операция дифференцирования, а по другому – интегрирования.

2. Теория

Будем рассматривать дифракцию в два брэгговских порядка, а именно в плюс первый и минус первый [17, 18]. На рис.1 приведена оптическая схема такой дифракции. Поле падающего излучения $E_{inc}(\alpha)$, представляющее собой набор плоских волн, каждая из которых распространяется под «своим» углом α , направляется в АО ячейку АОЯ. На преобразователь Π , приваренный к АО ячейке, подается электрический сигнал частотой f . На выходе ячейки формируются три дифрагировавших пучка – нулевой, плюс первый и минус первый, поля которых обозначены E_0 , E_{+1} и E_{-1} соответственно. Понятно, что для реализации такого режима дифракции необходимо выбирать специальные срезы кристаллов и специальную геометрию АО взаимодействия. В настоящей работе подраз-

В.М.Котов, С.В.Аверин, А.А.Зенкина, А.С.Белоусова, М.В.Карачевцева, А.Н.Булук. Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1; e-mail: vmk277@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 17 января 2023 г., после доработки – 14 июня 2023 г.

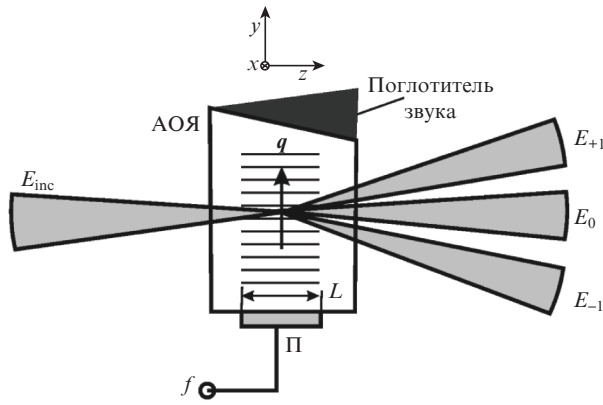


Рис.1. Оптическая схема дифракции в два брэгговских порядка.

умеается, что дифракция происходит в одноосном гиротропном кристалле TeO_2 , широко используемом на практике. Дифракция в два симметричных порядка в TeO_2 происходит в случае, когда оптическое излучение распространяется вблизи оптической оси кристалла и дифрагирует на «медленной» звуковой волне, распространяющейся ортогонально оптической оси [17, 18]. На рис.1 оптическая ось кристалла ориентирована вдоль направления z , акустическая волна с волновым вектором q распространяется вдоль направления y . Длина АО взаимодействия равна L . На противоположной от преобразователя П грани АО ячейки расположен поглотитель звука, обеспечивающий распространение бегущей акустической волны. Отметим, что в некоторых работах режим в два симметричных брэгговских порядка уже использовался для обработки изображений (см., напр., [15, 16]), однако в этих работах рассматривалась только операция дифференцирования.

Будем рассматривать задачу в приближении трехволнового АО взаимодействия в однородном акустическом поле, создаваемом бегущей акустической волной. Передаточные функции дифракционных порядков определим исходя из следующей связи между волнами, участвующими в дифракции [7, 16]:

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

Здесь E_0, E_{+1} и E_{-1} – амплитуды полей нулевого, плюс первого и минус первого дифракционных порядков; E_{inc} – амплитуда поля падающего излучения; H_0, H_{+1} и H_{-1} – передаточные функции нулевого, плюс первого и минус первого дифракционных порядков; K и k – величины волновых векторов звуковой и световых волн соответственно. Отношение K/k равно двойному углу Брэгга [7]. Наличие этого угла отражает факт отклонения дифрагировавших плоских волн от падающей волны в результате брэгговской дифракции.

Амплитуды волн E_0, E_{+1} и E_{-1} связаны между собой следующей системой дифференциальных уравнений, получаемых с учетом гиротропии и анизотропии среды [17, 19]:

$$\frac{dE_0}{dz} = -\frac{A_1}{2}E_{+1}\exp(-i\eta_1 z) - \frac{A_1}{2}E_{-1}\exp(-i\eta_2 z),$$

$$\frac{dE_{+1}}{dz} = \frac{A_1}{2}E_0\exp(i\eta_1 z), \quad (2)$$

$$\frac{dE_{-1}}{dz} = \frac{A_2}{2}E_0\exp(i\eta_2 z).$$

Здесь $A_1 = \varepsilon p_{0,(+1)}$; $A_2 = \varepsilon p_{0,(-1)}$;

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

– параметр, определяющий влияние акустической мощности на процесс брэгговского рассеяния; λ – длина волны света; M_2 – АО качество материала; R – высота акустического столба; P_{ac} – акустическая мощность; z – координата, вдоль которой развивается АО взаимодействие; $\eta_1 = k_z - k_{z(+1)}$, $\eta_2 = k_z - k_{z(-1)}$ – расстройки фазового синхронизма плюс первого и минус первого порядков соответственно; $k_z, k_{z(+1)}, k_{z(-1)}$ – проекции волновых векторов нулевого k_0 , плюс первого k_{+1} и минус первого k_{-1} порядков на направление оптической оси. Входящие в выражения для A_1 и A_2 коэффициенты

$$\begin{aligned} p_{0,(+1)} &= p_{(+1),0} = \frac{1 + \rho_0 \rho_{(+1)}}{\sqrt{1 + \rho_0^2} \sqrt{1 + \rho_{(+1)}^2}}, \\ p_{0,(-1)} &= p_{(-1),0} = \frac{1 + \rho_0 \rho_{(-1)}}{\sqrt{1 + \rho_0^2} \sqrt{1 + \rho_{(-1)}^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

учитывают эллиптичность оптических волн. Учет эллиптичности особенно важен при использовании TeO_2 в качестве АО материала, поскольку этот кристалл является гиротропным. Эллиптичности волн $\rho_{0,(+1)}, \rho_{0,(-1)}$ определялись согласно выражению [20]:

$$\begin{aligned} \rho &= (2G_{33})^{-1} (\sqrt{R_{\text{ell}}^2 + 4G_{33}^2} - R_{\text{ell}}), \\ R_{\text{ell}} &= \sin^2 \varphi (n_o^{-2} - n_e^{-2}). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь φ – угол между волновым вектором света и оптической осью; G_{33} – компонента псевдотензора гирации; n_o и n_e – главные показатели преломления кристалла. Понятно, что для разных волн угол φ разный.

Решение системы (2) приведено в работе [15]. Там же получены зависимости E_0, E_{+1} и E_{-1} от мощности звука и расстроек фазового синхронизма η_1 и η_2 . Величины η_1 и η_2 зависят от модели поверхности волновых векторов. Нами за основу была взята модель [15, 19], где распространение оптических волн описывается в ортогональной системе координат (x, y, z) , в которой направление z совпадает с оптической осью одноосного кристалла, а акустическая волна распространяется вдоль направления y . В рамках модели волновой вектор k_i оптической волны представлен в виде проекций K_x, K_y, K_z на направления x, y, z . Проекции связаны следующим соотношением:

$$K_z^4 \left(\frac{1}{n_o^4} - G_{33}^2 \right) + T^2 N \left[\frac{K_z^2}{n_o^2} - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \right] + \frac{T^4}{n_o^2 n_e^2} - \frac{2}{n_o^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 K_z^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 = 0, \quad (5)$$

где $T^2 = K_x^2 + K_y^2 + K_z^2$; $N = n_o^{-2} + n_e^{-2}$.

Поскольку эксперименты выполнялись с излучением He-Ne-лазера, генерирующего на длине волны света $\lambda = 0.63$ мкм, а в качестве материала АО ячейки использовался парателлуриит (TeO_2), параметры, входящие в выражения (2)–(5), брались следующими [21, 22]: $n_o = 2.26$; $n_e = 2.41$; $G_{33} = 2.62 \times 10^{-5}$; $M_2 = 1200 \times 10^{-18}$ с³/Г. Длина АО взаимодействия L равна 0.2 см. Акустическая мощность P_{ac} бралась равной 0.2 Вт. Частота звука была выбрана 44 МГц. Скорость звука составляла $V = 0.617 \times 10^5$ см/с. Передаточные функции H_0 , H_{+1} и H_{-1} , совпадающие, по сути, с распределениями E_0 , E_{+1} и E_{-1} при $E_{inc}(\alpha) = 1$, что следует из соотношений (1), строились в зависимости от углов β и γ , где угол β отсчитывался в плоскости (y, z) от оптической оси z , угол γ – в плоскости (x, z) также от

оптической оси z . Расчеты показывают, что при небольших углах γ распределения полей в процессе изменения угла β представляют собой чередование интерференционных полос в виде вертикальных линий. Такое распределение характерно для «обычных» режимов брэгговской дифракции в один порядок [7] и может быть пригодно только для одномерной обработки изображений. По мере увеличения угла γ интерференционные линии начинают искажаться, изгибаться, обрываться и т.п. Это типично только для многократных режимов дифракции. Как было показано в [12–16], для обработки двумерных изображений пригодны только участки с достаточно сильными искажениями. Такие участки начинают встречаться на периферии передаточных функций, т.е. при больших углах γ .

Нами проводился поиск подходящих участков передаточных функций, когда центр отсчета угла γ смещался от 0 до $\sim 18^\circ$ (на воздухе). Найденные участки показаны на рис.2. Здесь приведены модули передаточных функций минус первого и плюс первого дифракционных порядков $|H_{-1}|$ и $|H_{+1}|$ в зависимости от углов β и γ , отчитываемых в градусах. Угловой размер распределений $\sim 7 \times 7^\circ$.

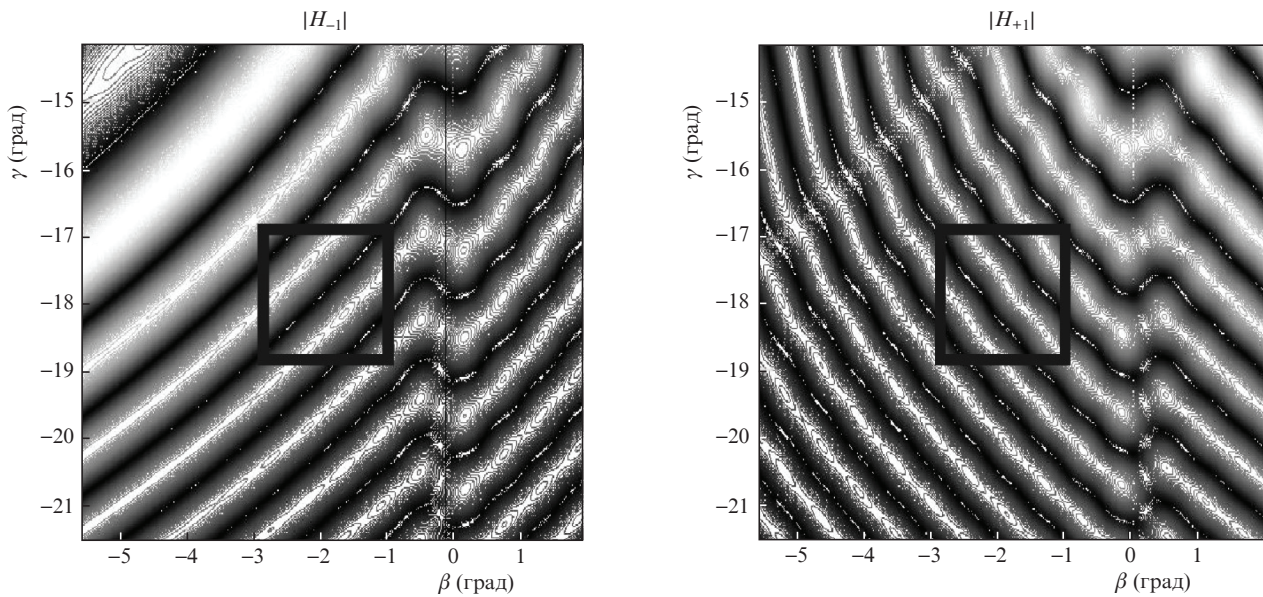


Рис.2. Модули передаточных функций минус первого и плюс первого дифракционных порядков.

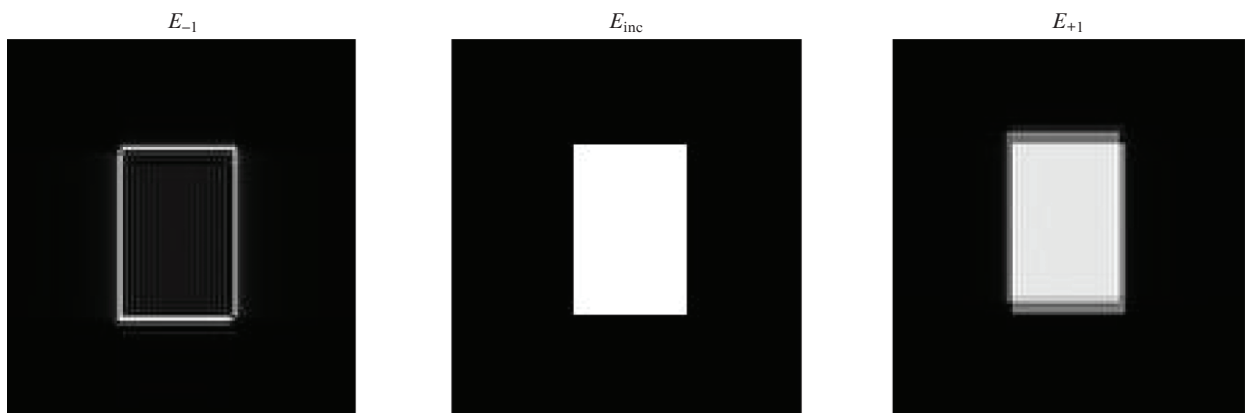


Рис.3. Изображения после фурье-обработки, формируемые в минус первом (E_{-1}) и плюс первом (E_{+1}) дифракционных порядках; E_{inc} – исходное изображение.

Внутри каждого распределения квадратами $\sim 2 \times 2^\circ$ выделены «рабочие» участки, с помощью которых выполняется двумерная фурье-обработка изображений. Видно, что выделенные участки существенно отличаются друг от друга. Оба участка содержат линии с достаточно сильными неоднородностями, но количество неоднородных линий в распределении $|H_{+1}|$, с помощью которого выполняется операция интегрирования, существенно больше (на $\sim 30\%$), чем в распределении $|H_{-1}|$, предназначенном для операции дифференцирования. Это находится в качественном согласии с результатами [7], где передаточная функция, выполняющая операцию дифференцирования, должна содержать по крайней мере один экстремум, а интегрирования – не меньше двух: один экстремум расположен в центре осесимметричного распределения, другой – распределен в виде кольца вокруг оси симметрии. В любом случае, как указывалось в [12–14], окончательный вывод о пригодности передаточной функции для той или иной операции над изображением можно сделать только после «прямой» проверки полученной функции в процессе компьютерной фурье-обработки.

На рис.3 приведены результаты обработки изображения в виде прямоугольника с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БФП) с использованием передаточных функций. Изображение E_{-1} соответствует результату, полученному с помощью передаточной функции минус первого порядка $|H_{-1}|$ рис.2, а изображение E_{+1} – с помощью функции $|H_{+1}|$ того же рис.2 (изображение E_{inc} исходное). Видно, что изображение E_{-1} является хорошо выраженным контуром изображения E_{inc} , а изображение E_{+1} повторяет изображение E_{inc} , но с размытыми границами. Этот результат, по нашему мнению, соответствует операции интегрирования, когда значение каждой точки изображения отвечает значению, усредненному по окружающим ее точкам.

3. Эксперимент

Для проверки полученного результата был выполнен эксперимент. Экспериментальная установка была аналогичной установке, описанной в [12–15]. В установке использовалась стандартная $4F$ схема оптической фурье-обработки (см., напр., [1, 2]), основанная на использовании двух одинаковых линз с фокусным расстоянием F (в наших экспериментах $F = 18$ см), выполняющих преобразование Фурье. Входным изображением служило квадратное отверстие в экране из непрозрачного материала,

отстоящего от входной линзы на расстоянии F . Изображение формировалось при освещении экрана излучением He–Ne-лазера (длина волны генерации 0.63 мкм). Фильтром пространственных частот служила АО ячейка из TeO_2 , которая располагалась в задней фокальной плоскости входной линзы. На расстоянии F после АО ячейки располагалась выходная линза. Размеры АО ячейки вдоль направлений $[110]$, $[\bar{1}\bar{1}0]$ и $[001]$ были равны $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ см. В ячейке распространялась «медленная» звуковая волна вдоль направления $[110]$ кристалла, оптическое излучение проходило вблизи оптической оси $[001]$. Отметим, что направления $[001]$ и $[110]$ соответствуют направлениям z и y рис.1. При рассматриваемой геометрии, как показано в [17, 23], значение коэффициента M_2 наибольшее, тем самым обеспечивается высокая эффективность дифракции при малой акустической мощности. Частота звука была выбрана 44.0 МГц. На экране, расположенном в задней фокальной плоскости второй, выходной, линзы, наблюдались три дифракционных порядка. Посредством плавного вращения АО ячейки вокруг осей $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$ кристалла, а так же изменением напряжения, подаваемого на преобразователь, добивались того, что в минус первом порядке формировался контур изображения, а в плюс первом – контур с размытыми краями. Этому результату удалось достичь при электрическом напряжении, равном 10.2 В. На рис.4 приведена фотография изображений в дифракционных порядках, полученных на экране. Изображение на рис.4,б, наблюдаемое в нулевом брэгговском порядке, соответствует входному изображению. В изображении на рис.4,а (минус первый порядок) достаточно четко проявляется контур изображения рис.4,б, а изображение на рис.4,в (плюс первый порядок) является изображением рис.4,б с размытыми краями. По нашему мнению, в минус первом порядке осуществляется операция дифференцирования изображения, а в плюс первом – интегрирования. Характеристики изображений на рис.4,а и в схожи с характеристиками изображений, полученных в работе [7] в процессе дифференцирования и интегрирования изображений с помощью АО фильтра, работающего в тангенциальной геометрии АО взаимодействия. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность выполнения операций дифференцирования и интегрирования одновременно по двум каналам с использованием одного АО пространственного фильтра. По нашему мнению, получено хорошее согласие между экспериментальными результатами и выводами теории.

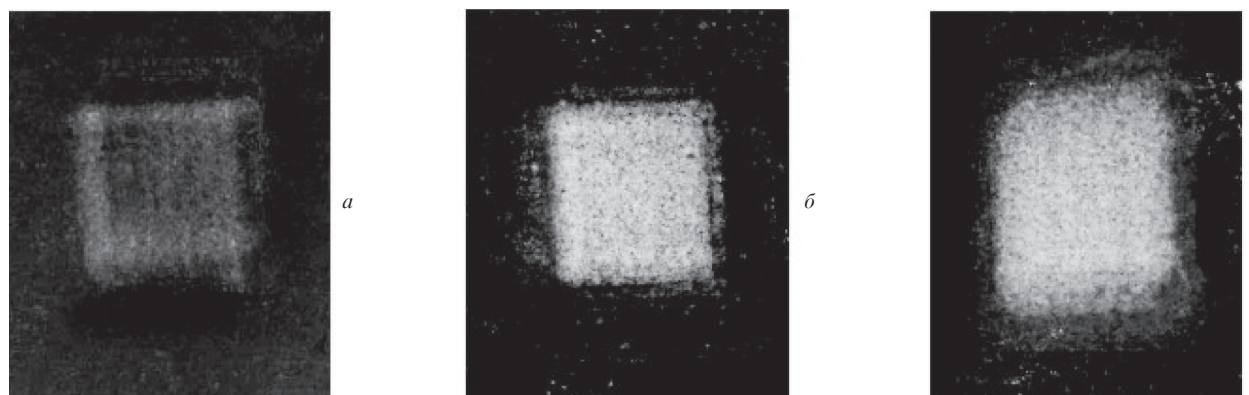


Рис.4. Фотография изображений, получаемых после фурье-обработки в минус первом (а), нулевом (б) и плюс первом (в) дифракционных порядках.

4. Выводы

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Для двумерной фурье-обработки изображений предложена двухканальная схема, в которой по одному каналу выполняется операция дифференцирования изображения, а по другому – интегрирования. Обе операции выполняются с использованием одного АО фильтра пространственных частот, работающего в режиме АО дифракции в два симметричных брэгговских порядков.

2. Проанализированы передаточные функции плюс первого и минус первого дифракционных порядков. Найдены области в распределениях передаточных функций, позволяющие одновременно осуществлять операции дифференцирования и интегрирования при одной и той же частоте и мощности электрического сигнала, подаваемого на АО ячейку.

3. Полученные теоретические результаты подтверждены экспериментально посредством оптической фурье-обработки изображения, сформированного монохроматическим излучением с длиной волны 0.63 мкм. В качестве фильтра пространственных частот использована АО ячейка из парателлурита (TeO_2), работающая на частоте звука 44 МГц.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 22-21-00059).

- Goodman J.W. *Introduction to Fourier Optics* (New York: McGraw-Hill Comp., Inc., 1996).
- Tzay Y., Young, King-Sun Fu. *Handbook of Pattern Recognition and Image Processing* (New York: Academic Press, Inc., 1986).
- Бычков С.И., Румянцев К.Е. *Поиск и обнаружение оптических сигналов* (М: Радио и Связь, Таганрог: Из-во ТРТУ, 2000).
- Балакший В.И. *Радиотехника и электроника*, **29** (8), 1610 (1984).
- Athale R.A., van der Gracht J., Prather D.W., Mait J.N. *Appl. Opt.*, **34** (2), 276 (1995).
- Caо D., Banerjee P.P., Poon T.-Ch. *Appl. Opt.*, **37** (14), 3007 (1998).
- Балакший В.И., Волошинов В.Б. *Квантовая электроника*, **35** (1), 90 (2005) [*Quantum Electron.*, **35** (1), 90 (2005)].
- Balakshy V.I., Voloshinov V.B., Babkina T.M., Kostyuk D.E. *J. Modern Opt.*, **52** (1), 1 (2005).
- Balakshy V.I., Kostyuk D.E. *Appl. Opt.*, **48** (7), C24 (2009).
- Yablokova A.A., Machikhin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E., Boritko S.V. *Proc. SPIE*, **11032**, 1103215 (2019). <https://doi.org/10.1117/12.2520803>.
- Gorevoy A.V., Machikhin A.S., Martynov G.N., Pozhar V.E. *Photonics Research*, **9** (5), 687 (2021).
- Kotov V.M., Aверин S.V., Kotov E.V., Shkerdin G.N. *Appl. Opt.*, **57** (10), C83 (2018).
- Котов В.М., Аверин С.В., Котов Е.В. *Квантовая электроника*, **48** (6), 573 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (6), 573 (2018)].
- Котов В.М., Аверин С.В., Карачевцева М.В., Яременко Н.Г. *Оптический журнал*, **89** (1), 54 (2022).
- Котов В.М., Аверин С.В. *Квантовая электроника*, **50** (3), 305 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (3), 305 (2020)].
- Котов В.М., Аверин С.В., Зенкина А.А., Белоусова А.С. *Квантовая электроника*, **52** (8), 754 (2022) [*Quantum Electron.*, **52** (8), 754 (2022)].
- Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Физические основы акустооптики* (М.: Радио и Связь, 1985).
- Xu J., Stroud R. *Acousto-Optic Devices: Principles, Design, and Applications* (New York: John Wiley & Sons Inc., 1992).
- Котов В.М., Шкердин Г.Н., Григорьевский В.И. *Радиотехника и электроника*, **58** (3), 226 (2013).
- Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. *Основы кристаллофизики* (М.: Наука, 1979).
- Шаскольская М.П. (ред.) *Акустические кристаллы* (М.: Наука, 1982).
- Кизель В.А., Бурков В.И. *Гиротропия кристаллов* (М.: Наука, 1980).
- 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).