

Разрешающая способность оптического выделения контуров изображений на основе эффекта Брюстера

М.Д. Колесникова¹, А.В. Любарская¹, Д.В. Нестеренко^{1,2}, В.А. Сойфер¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. Аналоговые оптические преобразования позволяют осуществлять мгновенную обработку целых изображений. Задача аналогового оптического выделения контуров изображений может быть осуществлена на основе эффекта Брюстера, наблюдаемого в спектрах отражения р поляризованного излучения от границы раздела двух диэлектриков. В таких системах, в пространственных спектрах отражения наблюдается резонансный минимум при определенном угле падения плоской поляризованной волны, называемым углом Брюстера. Преобразование изображения объектов на основе эффекта Брюстера описывается передаточной функцией дифференциатора первого порядка. Влияние передаточной функцией на разрешающую способность оптической системы в задаче выделения контуров является предметом исследования данной работы. В данной работе теоретически и экспериментально исследуется разрешающая способность оптической системы, выполняющей преобразование изображений оптических объектов на основе эффекта Брюстера. Экспериментальная оценка фактически достигнутой разрешающей способности проводится с использованием щелевой апертуры, позволяющей точно устанавливать ширину зазора.

1. Введение

Аналоговые оптические преобразования позволяют осуществлять мгновенную обработку целых изображений. Исследования в этой области оптики направлены на поиск эффективных подходов и методов реализации операций оптического выделения контуров с помощью недорогих в изготовлении оптических элементов, допускающих их исполнение в планарной геометрии. В процессе поиска оптимального решения задачи было проведено множество теоретических исследований дифракционных резонансных структур. Была показана эффективность резонансных структур в реализации широкого класса математических операций над световыми сигналами, в дифференцировании и интегрировании оптического сигнала по пространственным переменным, вычисление оператора Лапласа и оптическом решении дифференциальных уравнений [1-6]. Но сложность изготовления таких двумерных и трехмерных структур является препятствием для экспериментальной демонстрации обнаруженных эффектов. Для экспериментального решения задачи оптического выделения контуров были также предложены и исследованы структуры на основе мод поверхностных плазмон-поляритонов [7]. Использование резонансных плазмонных структур позволило решить задачу выделения контуров изображений для поляризованного монохроматического излучения.

Возможность использования эффекта Брюстера для пространственного дифференцирования поляризованных оптических сигналов была теоретически исследована в работе [8]. Экспериментальная демонстрация возможности использования эффекта Брюстера для оптического дифференцирования была представлена на примере оптического выделения контуров изображений как фазовых, так и амплитудных объектов [9]. Вследствие малой дисперсии диэлектриков, предполагается использование этого эффекта для немонахроматического поляризованного источника излучения.

Важной характеристикой эффективности оптических систем является их разрешающая способность. Под разрешением понимается минимальное расстояние между точечными источниками, при котором их изображения будут четко различимы. Различают линейное и угловое разрешения, которые определяется пространственным и угловым расстояниями между точечными источниками, соответственно. Влияние передаточной функции, описывающей преобразование изображения на основе рассматриваемого эффекта, на результаты преобразования, т.е. разрешающей способности системы, представляет особый интерес и изучается в данной работе.

2. Описание эксперимента

Известно, что при падении плоской p поляризованной волны под определённым углом θ_{Br} на границу раздела двух диэлектриков с показателями преломления n_1 и n_2 коэффициент отражения стремится к нулю, а пропускание достигает максимального значения. Угол θ_{Br} называется углом Брюстера, где $\tan(\theta_{Br}) = n_2/n_1$, а этот эффект называется эффектом Брюстера.

Для анализа преобразования изображений оптической системой используется понятие передаточной функции. Передаточная функция показывает, как меняется комплексная амплитуда излучения в зависимости от частоты. Преобразование профиля падающего поля в отраженное описывается передаточной функцией дифференциатора первого порядка [9].

Схема оптической системы, используемой для проведения экспериментального исследования, приведена на рис. 1, где ND – фильтр нейтральной оптической плотности, P – поляризатор, L_1 и L_2 – линзы коллиматора, A – апертура, O – оптическая структура, Pr – призма, L_3 – линза, PD – фоточувствительная матрица. Детальное описание работы данной оптической схемы приведено в работе [9].

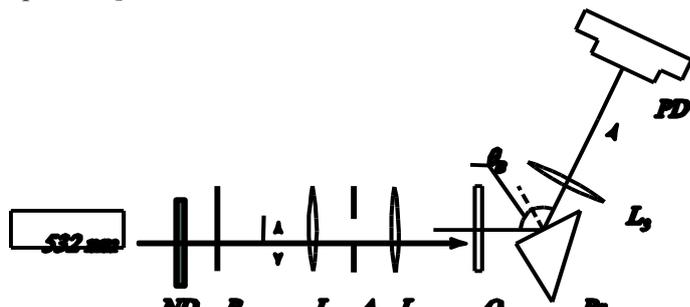


Рисунок 1. Оптическая схема.

3. Результаты и обсуждение

Результаты оптического преобразования изображений рассматриваются на примере использования щелевой апертуры с регулируемой шириной. Пространственные распределения интенсивности пучка, прошедшего щелевую апертуру, и пучка, отраженного от призмы под углом Брюстера, показаны на рисунке 2. На изображении пучка, отраженного от призмы, наблюдаются узкие пики интенсивности, соответствующие рассеянию света на краях апертуры, что напрямую демонстрирует эффект пространственного дифференцирования и выделения контуров изображения.

В качестве экспериментального исследования характеристик пространственного дифференцирования приведены сечения интенсивности перпендикулярно направлению щели для различных значений ширины щели, как показано на рис. 3. Для удобства сравнения

профили интенсивности выровнены по центру. Значения интенсивности нормированы на максимальное значение в каждом сечении. Флуктуации интенсивности, наблюдаемые вблизи пиков на рис. 2 и 3, появляются в результате дифракции света на краях щелевой апертуры. В результате обработки экспериментальных данных получено значение для линейного разрешения, составляющее 12 мкм [9].

Вычисление экспериментального значения разрешения выполнено для используемой оптической схемы. Схема расчета разрешающей способности представлена на рис. 4.

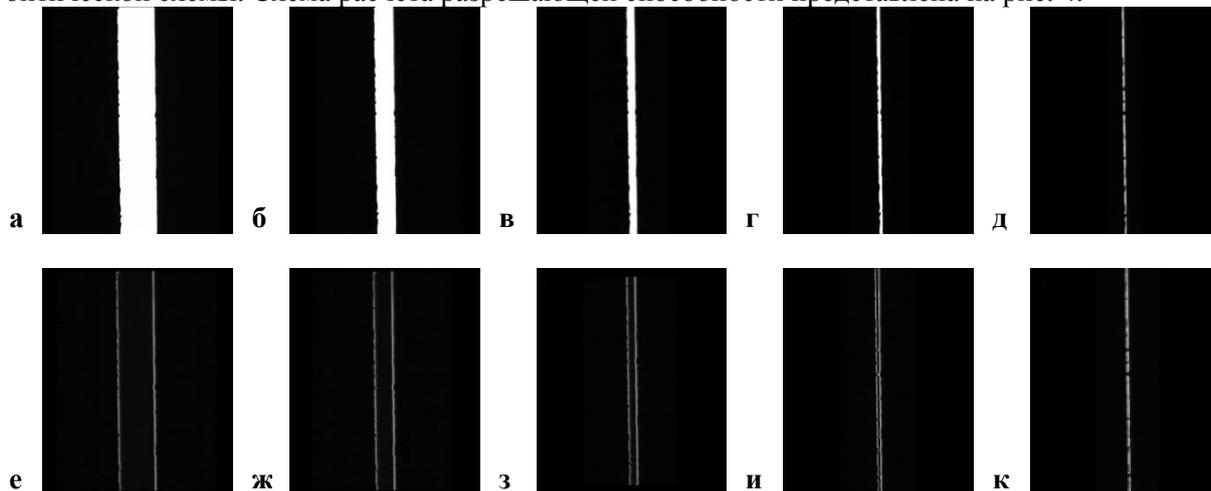


Рисунок 2. Оптическое дифференцирование изображений амплитудных объектов: (а-д) интенсивность пучка, проходящего через щелевую апертуру с шириной 200, 100, 50, 25 и 15 мкм, соответственно; (е-к) распределение интенсивности пучка, отражённого от призмы, для апертур соответственной ширины.

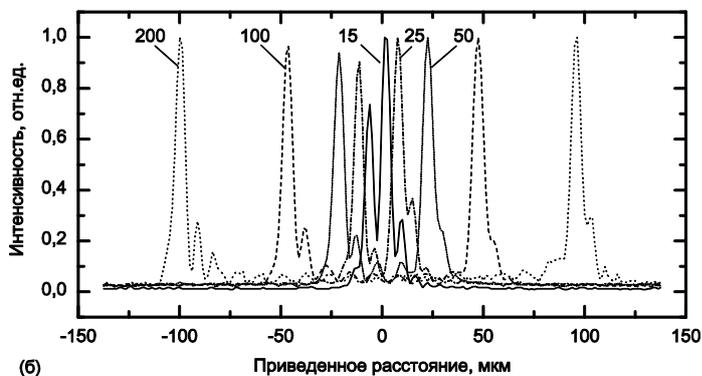
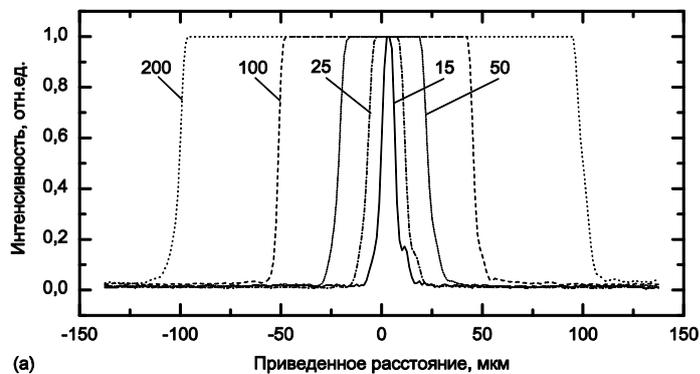


Рисунок 3. Пространственное дифференцирование для пучков, прошедших щелевые апертуры: (а) нормированная интенсивность поля, прошедшего щелевую апертуру для значений ширины 200, 100, 50, 25 и 15 мкм соответственно; (б) нормированная средняя интенсивность преобразованного поля.

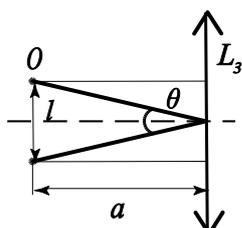


Рисунок 4. Расчет разрешения оптической схемы.

На рис. 4 изображена часть оптической схемы, используемая для расчета разрешающей способности, где θ – угловое расстояние, под которым виден объект, l – линейный размер объекта O , a – расстояние от объекта до линзы L_3 . Тогда значение углового разрешения будет рассчитываться как

$$\theta = 2 \arctan[l / 2a]. \quad (1)$$

При $l = 0,012$ мм, $a = 2f = 150$ мм, экспериментально полученное значение углового разрешения $\theta = 0,004584^\circ$.

Основная формула расчета углового разрешения оптической системы записывается как

$$\sin(\theta) = 1,22\lambda / D, \quad (2)$$

где θ – угловой размер объекта, λ – длина волны излучения, $D = 5$ мм – диаметр апертуры линзы. В результате расчета по формуле (2) получаем теоретическое значение углового разрешения $\theta = 0,007437^\circ$. Таким образом, экспериментально полученное разрешение оптической системы меньше теоретического на 38 %.

4. Заключение

Сравнение экспериментальных и теоретических значений углового разрешения показывают, что выделение контуров на изображениях объектов на основе преобразования Брюстера улучшает разрешение оптической системы в 1,6 раз. Рассмотренный эффект может быть применен для обработки изображений объектов с линейными размерами более длины волны используемого источника излучения в микроскопии биологических и медицинских исследований.

5. Литература

- [1] Doskolovich, L.L. Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating / L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, E.A. Bezus, V.A. Soifer // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39(5). – P. 1278-1281. DOI: 10.1364/OL.39.001278.
- [2] Golovastikov, N.V. Spatial optical integrator based on phase-shifted Bragg gratings / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus // Optics Communications. – 2015. – Vol. 338. – P. 457-460. DOI: 10.1016/j.optcom.2014.11.007.
- [3] Bykov, D.A. Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, V.A. Soifer // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(21). – P. 25084-25092. DOI: 10.1364/OE.22.025084.
- [4] Golovastikov, N.V. Analytical description of 3D optical pulse diffraction by a phase-shifted Bragg grating / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // Optics Express. – 2016. – Vol. 24(17). – P. 18828-18842. DOI: 10.1364/OE.24.018828.
- [5] Kazanskiy, N.L. Coupled-resonator optical waveguides for temporal integration of optical signals / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(11). – P. 14004-14013. DOI: 10.1364/OE.22.014004.
- [6] Головастикова, Н.В. Дифференцирование и интегрирование трёхмерного оптического импульса во времени с использованием брэгговских решёток с дефектным слоем / Н.В. Головастикова, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 1. – С. 13-21. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-13-21.

- [7] Zhu, T. Plasmonic computing of spatial differentiation / T. Zhu, Y. Zhou, Y. Lou, H. Ye, M. Qiu, Z. Ruan, S. Fan // *Nature Communications*. – 2017. – Vol. 8. – P. 1-3. DOI: 10.1038/ncomms15391.
- [8] Youssefi, A. Analog computing by Brewster effect / A. Youssefi, F. Zangeneh-Nejad, S. Abdollahramezani, A. Khavasi // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41(15). – P. 3467.
- [9] Нестеренко, Д.В. Оптическое дифференцирование на основе эффекта Брюстера / Д.В. Нестеренко, М.Д. Колесникова, А.В. Любарская // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 758-763. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-758-763.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007ГЗ/ЧЗ363/26) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-00613).

The resolution of optical image edge detection based on Brewster effect

M.D. Kolesnikova¹, A.V. Lyubarskaya¹, D.V. Nesterenko^{1,2}, V.A. Soifer^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. Optical systems for analog image processing are ultrafast and capable of simultaneous processing of whole images. The analog optical edge detection can be realized using Brewster effect, which is observed as a resonance dip in angular spectra of reflectivity of p-polarized plane waves at interfaces between two dielectrics. The reflectivity takes zero value at a certain angle of incidence of the waves, i.e., the Brewster angle. In the vicinity of the Brewster angle, the image transform based on the Brewster effect is described by the transfer function of the first-order differentiator. In the present work, we study the influence of the transfer function on the resolution of the optical systems based on the Brewster effect in the problem of analog edge detection. The resolution of initial and transformed images is investigated theoretically and experimentally for optical objects. Experimental evaluation of the actually achieved resolution is performed for a slit aperture, which allows accurate tuning of the slit width.