

## К вопросу о выделении контура изображения посредством дифракции в первый порядок

*В. М. Котов, Г. Н. Шкердин*

*Теоретически и экспериментально рассмотрена эволюция формирования контура изображения в процессе акустооптической (АО) брэгговской дифракции с ростом мощности звука. Показано, что с энергетической точки зрения вариант формирования контура в первом дифракционном порядке более выгоден по сравнению с формированием контура в нулевом порядке несмотря на то, что первый вариант происходит с расстройкой брэгговского синхронизма.*

PACS: 02.90.+p

*Ключевые слова:* контур изображения, акустооптика, брэгговская дифракция, синхронизм.

### Введение

Акустооптическая дифракция оказалась эффективным методом обработки изображений. Она, в частности, позволяет удалять участки изображения, которые, следуя логике поставленной задачи, несут "избыточную" информацию. Например, для задачи получения контура изображения избыточным участком изображения является его центр. Удаление центральной части посредством АО-дифракции проявляется как результат рассеяния неоднородного оптического пучка на расходящем-

ся звуке. При этом периферийные, контурные части изображения сохраняются [1—3].

Хотя качество получаемого контура и уступает качеству контура формируемого, например посредством операции дифференцирования изображения [4], неоспоримыми достоинствами АО-метода, привлекающей исследователей и разработчиков, являются его простота, а также быстрдействие формирования контура.

До настоящего времени самым эффективным вариантом выделения контура посредством АО-взаимодействия считалась дифракция в нулевой брэгговский порядок [1—3], когда центральные участки изображения дифрагируют с большей эффективностью — они находятся в строгом синхронизме с акустической волной, периферийные — с меньшей эффективностью, там синхронизм более слабый. Режимы с расстройкой синхронизма не рассматривались ввиду, как полагалось, их бесперспективности: эти режимы, как правило, реализуются с потреблением большой акустической

---

**Котов Владимир Михайлович**, ведущий научный сотрудник;  
**Шкердин Геннадий Николаевич**, профессор, ведущий научный сотрудник.

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,

Россия, 141190, г. Фрязино, Московская обл., пл. Академика Введенского, 1.

Тел. 785-56-39-1455; E-mail: vmk277@ire216.msk.su

*Статья поступила в редакцию 24 октября 2008 г.*

мощности. Однако в настоящей работе показывается, что режим с расстройкой брэгговского синхронизма более выгоден с энергетической точки зрения для выделения контура ввиду особенностей АО-взаимодействия. При этом процесс оконтуривания происходит в первом порядке. Исследованию формирования контура в первом порядке дифракции и посвящена настоящая работа.

**Теоретический анализ**

Рассмотрим брэгговскую дифракцию в некоторой системе координат XYZ. Пусть оптическое излучение распространяется вблизи направления Z, акустическая волна — вдоль направления X. Тогда аппаратные функции  $H_0$  и  $H_1$ , описывающие процесс дифракции в нулевом и первом порядках, соответственно, нетрудно получить из [5]:

$$H_0 = \exp\left(i \frac{k_x^2}{2k_0} L\right) \left[ \cos(\varphi L) - ik_x \sin \Theta_B \frac{\sin(\varphi L)}{\varphi} \right];$$

$$H_1 = -i \frac{\nu}{2L} \exp\left(i \frac{k_x^2}{2k_0} L\right) \frac{\sin(\varphi L)}{\varphi}.$$

Здесь  $k_0 = 2\pi n_0/\lambda_0$ , где  $\lambda_0$  и  $n_0$  — длина волны света и показатель преломления среды;  
 $k_x$  — проекция волнового вектора света на направление X, отсчитываемая от направления строгого брэгговского синхронизма;  
 $L$  — длина АО-взаимодействия;

$$\varphi = \sqrt{k_x^2 \sin^2 \Theta_B + (\nu/2L)^2},$$

здесь  $\sin \Theta_B = q/2k_0$ , где  $q$  — величина волнового вектора звука;  
 $\nu$  — параметр Рамана—Ната, зависящий от мощности акустической волны.

На рис. 1 приведены зависимости модулей  $|H_0|$  и  $|H_1|$  от параметра  $k_x$ . Значения величин, используемых в расчетах, соответствовали экспериментальным параметрам. Полагалось, что дифракция происходит в монокристалле  $\text{TeO}_2$ , в котором оптическое излучение с длиной волны  $\lambda_0 = 0,63 \cdot 10^{-4}$  см распространяется вблизи оптической оси кристалла и взаимодействует с поперечной акустической волной частотой  $f = 44$  МГц, распространяющейся в кристалле со скоростью  $V = 0,617 \cdot 10^5$  см/с. Показатель преломления  $n_0 = 2,26$ ; длина АО-взаимодействия  $L = 0,6$  см. Угол Брэгга  $\Theta_B = q/2k_0 = f\lambda_0/2n_0V = 0,57^\circ$ . На рис. 1 кривые (0-а), (0-б), (0-в) описывают зависимости  $|H_0|$ ; (1-а), (1-б), (1-в) — зависимости  $|H_1|$ . Кривые

попарно соответствуют разным значениям параметра Рамана—Ната: (0-а), (1-а) — значению  $\nu = 0,3 \pi$ ; (0-б), (1-б) —  $\nu = 0,6 \pi$ ; (0-в), (1-в) —  $\nu = \pi$ . Из рис. 1 видно, что минимум в нулевом порядке дифракции, прослеживаемый вдоль пунктирной прямой А, при минимальном значении  $\nu$  слабо выражен, он начинает формироваться с ростом  $\nu$ , т. е. с ростом мощности звука. В первом же порядке дифракции минимумы существуют всегда (они формируются вблизи пунктирной прямой Б) при любом значении  $\nu$ . Другими словами, в первом порядке контур изображения будет существовать при любой мощности звука, при этом с ростом акустической мощности периферийные участки будут становиться ярче. Этот результат проверялся нами экспериментально.

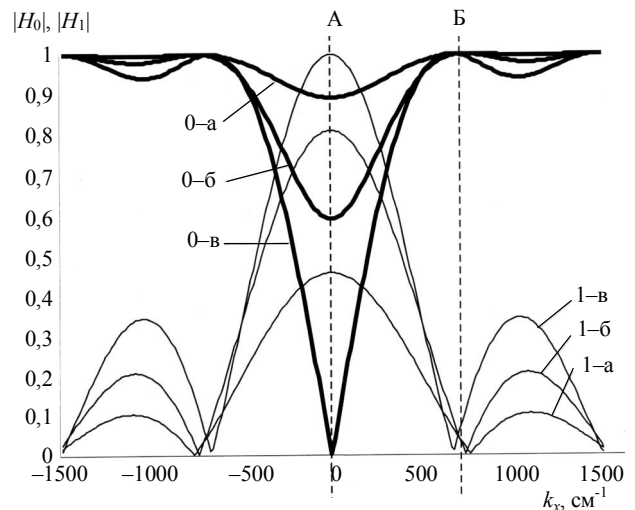


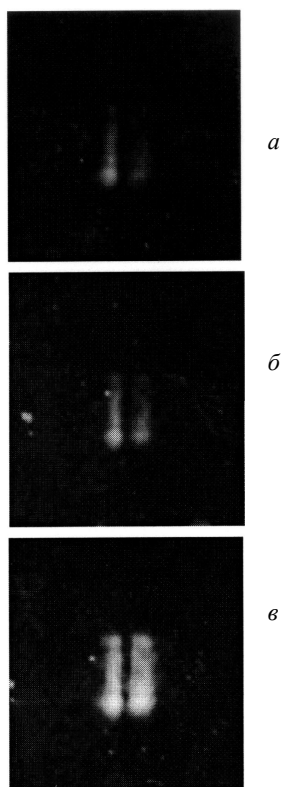
Рис. 1. Зависимости модулей аппаратных функций нулевого  $|H_0|$  и первого  $|H_1|$  дифракционных порядков от параметра  $k_x$

**Эксперимент и обсуждение экспериментальных результатов**

Эксперимент выполнялся следующим образом: оптическое излучение, генерируемое He—Ne-лазером, формировалось системой линз в широкий параллельный пучок диаметром  $\sim 10$  мм, который направлялся на прямоугольное отверстие размерами  $2 \times 3$  мм. Это отверстие и служило изображением в наших экспериментах. За отверстием на расстоянии 16 см располагалась линза, фокус линзы  $F = 16$  см. За линзой на расстоянии  $2F$  располагалась такая же линза. Экран, на котором наблюдалось результирующее изображение, располагался на расстоянии  $F$  за второй линзой. Первая и вторая линзы выполняют, соответственно, прямое и обратное преобразования Фурье. Посередине между линзами располагалась АО-ячейка, выполненная из  $\text{TeO}_2$  размерами  $10 \times 10 \times 8$  мм вдоль направлений  $[110]$ ,  $[1\bar{1}0]$  и  $[001]$ , соответственно. По сути

АО-ячейка является фильтром пространственных частот. К грани {110} приклеен пьезо-преобразователь из  $\text{LiNbO}_3$ , генерирующий сдвиговую волну на частоте 44 МГц. Реализовывалась дифракция на "медленной" акустической волне. На экране наблюдался процесс одномерного формирования контура (т. е. формирования контура по одной координате) в нулевом и первом дифракционных порядках с ростом мощности звука. Отметим, что одномерные контуры нашли применение, например, для распознавания цифр и штрих-кодов [6].

На рис. 2 представлены фотографии одномерных контуров прямоугольного изображения, формируемые в первом порядке дифракции. При нагрузке  $R = 50$  Ом напряжения преобразователя (1, 2 и 3 В) соответствуют мощностям  $P = U^2/2R$ , равным 10, 40 и 90 мВт. Из рисунка видно, что контуры изображения появляются сразу: они проявляются уже при наименьшей мощности 10 мВт (см. рис. 2, а), при мощности 90 мВт границы контуров уже достаточно яркие.



**Рис. 2. Фотографии одномерного контура прямоугольного отверстия, полученные посредством дифракции в первый порядок при разных значениях приложенного к преобразователю напряжения:**  
а — 1 В; б — 2 В; в — 3 В

Отметим, что в нулевом порядке дифракции наблюдался ярко выраженный минимум только при мощностях, равных  $\sim 100$  мВт.

Таким образом, вывод о том, что в первом порядке дифракции минимум наблюдается при значительно меньших акустических мощностях, чем в нулевом порядке, подтверждается экспериментально.

### Выводы

1. Проведено сравнение процессов формирования контуров изображения посредством АО-дифракции в нулевой и первый порядки на основе анализа их аппаратных функций.

2. Выявлено, что формирование контура в первом порядке более предпочтительно с энергетической точки зрения несмотря на то, что при этом дифракция происходит с расстройкой брэгговского синхронизма. Это обусловлено особенностями формирования минимумов в зависимости от роста мощности звука: если в нулевом порядке минимум постепенно формируется с ростом акустической мощности, то в первом порядке он появляется сразу.

3. Теоретические результаты подтверждены экспериментально на основе оптической Фурье-обработки прямоугольного изображения и использования АО-ячейки в качестве фильтра пространственных частот, в которой использованы фильтрующие свойства нулевого и первого дифракционных порядков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-01-00045) и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-8195.2006.9

### Литература

1. Athale R. A., Gracht J., Prather W., Mait J. N.// Appl. Opt. 1995. V. 34. No. 2. P. 276.
2. Babkina T. M., Voloshinov V. B.// J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2001. V. 3. P. S54.
3. Балакиев В. И., Волошинов В. Б.// Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 1. С. 85.
4. Соифер В. А., Сергеев В. В., Попов С. Б., Мясников В. В. Теоретические основы цифровой обработки изображений. — Самара: Самарский госуд. аэрокосмич. ун-т им. акад. С. П. Королева, 2000.
5. Banerjee P. P., Tam C.-W.// Acustica. 1991. V. 74. P. 181.
6. Case S. K.// Optics Letters. 1979. V. 4. No. 9. P. 286.

## To the problem of the image edge enhancement by means of the diffraction into first order

*V. M. Kotov, G. N. Shkerdin*

Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 1 Academician Vvedensky sq.,  
141190, Fryazino, Moscow region, Russia

E-mail: vmk277@ire216.msk.su

*Theoretically and experimentally is considered the evolution of the image contour during the acousto-optic (AO) Bragg diffraction with the increasing of the acoustic power. It is shown that from the power point of view the variant of the forming of the contour into the first diffraction order is more preferable respect to the forming into zeros order in spite of the first variant occurs with the Bragg synchronism mismatch.*

PACS: 02.90.+p

*Keywords:* contour of animage, acousto-optics, Bragg diffraction, synchronism.

Bibliography — 6 references.

*Received 24 October 2009*