

УДК 621.396.76

А.В. ИГНАТЬЕВ

Харьковский университет Воздушных Сил, Украина

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Показана перспективность применения акустооптических фильтров, использующих высшие порядки брэгговской дифракции в системах мониторинга природной среды, обладающих повышенной спектральной разрешающей способностью. Акустооптические фильтры изображения на вторых порядках брэгговской дифракции имеют спектральную селективность выше, чем фильтры, использующие первый брэгговский резонанс, и одинаковую пространственную разрешающую способность.

акустооптический фильтр, разрешающая способность, фильтрация изображения, брэгговская дифракция, видеоспектрометр

Введение

В настоящее время ведутся активные работы по разработке видеоспектрометров с использованием в качестве селективирующих устройств акустооптических фильтров (АОФ), которые обеспечивают пространственное разделение по длинам волн падающего на них светового излучения [1]. Основными преимуществами АОФ перед другими диспергирующими устройствами подобного класса являются, во-первых, возможность формирования произвольной требуемой спектральной характеристики в реальном масштабе времени путем возбуждения в звукопроводе ультразвуковых волн с различными частотами и амплитудами, во-вторых, возможность изменения коэффициента пропускания АОФ регулировкой мощности высокочастотного сигнала, поступающего на пьезопреобразователь звукопровода [2]. Принцип действия неколлинеарных АОФ основан на селективных свойствах брэгговской дифракции. Обычно спектральное разрешение фильтров подобного класса не превышает 20 – 50 нм.

1. Постановка задачи

Для космических исследований поверхности суши в отражательном спектральном диапазоне 0,4 – 2,4 мкм от видеоспектрометра требуется сочетание

высокого пространственного разрешения 1 – 5 м, высокого спектрального разрешения 5 – 10 нм в десятках и даже сотнях спектральных каналов.

Таким образом, повышение спектральной разрешающей способности является актуальной задачей. Установлено [3], что помимо брэгговской дифракции первого порядка, которая реализуется под углом Брэгга, существуют условия брэгговского синхронизма высших порядков при углах падения световой волны равных двойному, тройному и т.д. углам Брэгга. Эти условия названы «брэгговскими резонансами высших порядков» и, как установлено, связаны с двукратным, трехкратным и т.д. рассеянием света на неоднородных фазовых структурах и, следовательно, обладают большей угловой и спектральной селективностью по сравнению с «обычной» брэгговской дифракцией первого порядка [4]. Существенно, что при взаимодействии света под углами, кратными углу Брэгга, максимальными оказываются дифракционные составляющие второго порядка, которые обладают в два раза большей угловой дисперсией [5].

Изучению спектральной разрешающей способности акустооптического фильтра при взаимодействии световой и ультразвуковой волн под двойным углом Брэгга посвящена работа [6]. Показано, что при равенстве геометрических, волновых и энерге-

тических параметров акустооптического взаимодействия спектральная разрешающая способность для второго брэгговского резонанса в четыре раза выше по сравнению с первым резонансом [7].

Однако исследования зависимости пространственной разрешающей способности от условий акустооптического взаимодействия при использовании составляющих вторых порядков брэгговской дифракции не проводились и являются предметом изучения в настоящей работе.

Целью настоящей статьи является исследование зависимости разрешающей способности акустооптического фильтра изображения от параметров акустооптического взаимодействия при использовании составляющих брэгговской дифракции второго порядка и сравнительный анализ этих характеристик с аналогичными характеристиками фильтра на составляющих первого порядка.

2. Решение проблемы

При взаимодействии света с ультразвуковой волной происходит перенос пространственных и временных спектров взаимодействующих полей в спектр рассеянного излучения. Несмотря на общность информационного процесса, состоящего в переносе спектра рассеянных полей в зависимости от решаемых акустооптических задач, условия взаимодействия должны быть разные. Акустооптические фильтры изображения должны обладать высокой пространственной разрешающей способностью, и, следовательно, их характеристики должны наименьшим образом быть связаны с передачей акустооптического спектра в рассеянное оптическое излучение.

Для анализа информационных свойств акустооптической фильтрации на вторых порядках брэгговской дифракции воспользуемся результатами работы [8], в которой определяются информационные и изображающие свойства акустооптического взаимодействия, а также разрешающая способность ди-

фракционного процесса при визуализации акустических полей.

Условие полной передачи спектра акустического поля в рассеянное излучение сводится к следующему: апертура освещающего светового пучка в направлении звука меньше апертуры акустического поля в направлении света в число раз, равное отношению длин волн акустического и оптического взаимодействующих полей.

Из анализа условий передачи акустического спектра в дифракционные порядки определим информационные свойства акустооптического взаимодействия.

Условие полной передачи акустического спектра в дифракционные порядки:

$$h = \frac{l}{M}; k_{z_{\max}} = M \cdot K_{x_{\max}}, \quad (1)$$

где $M = \lambda_0/\lambda$ – масштабный коэффициент, равный отношению длин волн взаимодействующих полей. В этом случае для передачи акустического спектра шириной $K_{x_{\max}}$ необходимо использовать освещение световой волной ультразвукового поля в M раз более широким спектром.

Условие избыточной передачи акустического спектра в дифракционные порядки может быть представлено в виде:

$$h < \frac{l}{M}; k_{z_{\max}} > M \cdot K_{x_{\max}}. \quad (2)$$

Для рассмотренного случая наибольший интерес представляет условие неполной передачи акустического спектра в дифракционные порядки:

$$h > \frac{l}{M}; k_{z_{\max}} < M \cdot K_{x_{\max}}. \quad (3)$$

Частным случаем неполной передачи акустического спектра является передача в дифракционные порядки одного отсчета этого спектра.

Таким образом, для создания устройств акустооптической фильтрации изображения требуется выполнение условия не полной передачи акустического спектра в дифракционные порядки, из которого

видно, что для фильтрации оптического изображения требуется, чтобы апертура светового излучения была больше апертуры ультразвукового столба. Это свойство дифракции, характеризующее ее избирательность, имеет существенное значение в акустооптической обработке информации. Благодаря этому свойству удается получать оптические изображения и осуществлять необходимую фильтрацию и селекцию спектральных составляющих этих полей.

Для анализа разрешающей способности будем использовать методику, которая изложена в работе [9]. Согласно этой методике, расчетные значения максимального числа элементов разрешения в исследуемых изображениях определяется из соотношения (3):

$$N \leq \frac{\Delta\theta a}{\lambda}, \quad (4)$$

где $\Delta\theta$ – расходимость ультразвукового пучка; a – апертура акустооптического фильтра; λ – длина световой волны.

В эксперименте исследовалась разрешающая способность акустооптического фильтра, который фильтрует изображение в пространственной составляющей первого и второго порядков, и произведена сравнительная оценка их пространственной разрешающей способности.

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника излучения 1 использовалась лампа накаливания. Пространственный оптический сигнал формировался с использованием транспаранта 3, а затем его размер уменьшался с использованием телескопической системы 5 до размеров апертуры акустооптического фильтра.

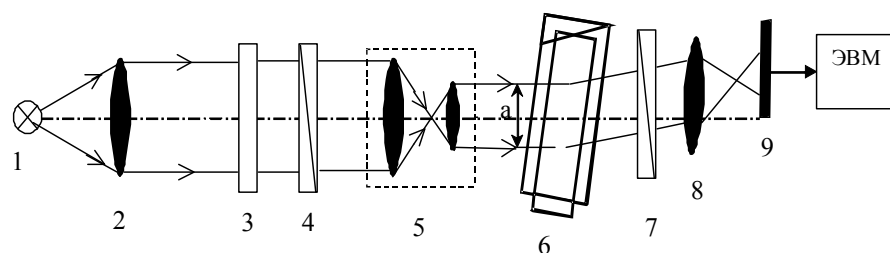


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки

Акустооптический фильтр устанавливался на поворотном устройстве, что позволяло устанавливать требуемый угол взаимодействия света с ультразвуковой волной.

Для выделения продифрагированного светового пучка использовался поляризатор 4, обеспечивающий создание поляризационного светового пучка и поляриод 7. Объектив 8 формировал изображение транспаранта 3 в фокальной плоскости, где устанавливался фотоприемник 9.

В качестве приемника излучения использовалась WEB-камера, пространственные сигналы с которой после преобразования регистрировались персональной ЭВМ.

3. Результаты и обсуждения

В качестве рабочей среды использовался кристалл парателлуриата, на который падала световая волна $\lambda = 0,633$ мкм; коэффициенты преломления для обыкновенной и необыкновенной световых волн составляли $n_0 = 2,41$ и $n_e = 2,46$, причем падающий световой пучок был поляризован как необыкновенный. В кристалле возбуждалась поперечная «медленная» ультразвуковая волна, скорость которой равна $\vartheta = 0,617 \cdot 10^5$ см/с. Частота ультразвука равна $f = 60$ МГц, длина взаимодействия равна $l = 0,5$ см. В эксперименте интенсивность ультразвуковых

волн при получении изображений на первом и втором порядках выбиралась таким образом, чтобы дифракционные эффективности в каждом из порядков были одинаковы.

Вычислим максимальное число разрешаемых элементов изображения и произведем сравнительную оценку разрешающей способности акустооптического фильтра при использовании первого и второго дифракционных порядков. Для этого воспользуемся выражением 3. При расчете будем полагать, что расходимость ультразвукового пучка определяется только его дифракционной расходимостью. В кристалле парателлурита при выбранной частоте ультразвука 60 МГц и размерах излучателя 5×5 мм она составляет $2 \cdot 10^{-3}$ рад. Если апертура фильтра равна 5 мм, а длина световой волны $\lambda \approx 0,6$ мкм, то расчетное максимальное число элементов разрешения равно $N = 8$.

На рис. 2 показано изображение штриховой миры, полученное в некогерентном свете при использовании составляющих первого и второго порядков.

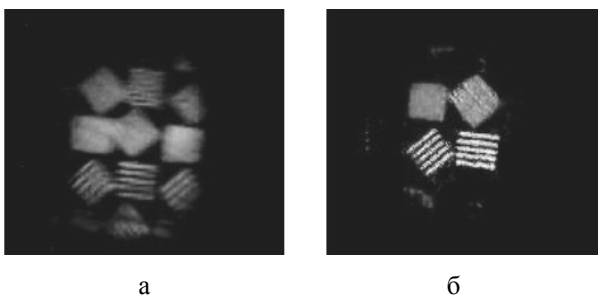


Рис. 2. Изображения штриховой миры, полученные в первом (а) и втором (б) порядках брэгговской дифракции

По глубине модуляции частотно-контрастных характеристик изображения, полученных экспериментально (рис. 2), используя известную методику визуального определения разрешающей способности оптических систем [10], произведена сравнительная оценка разрешающей способности изображений в каждом из порядков. Установлено, что раз-

решающая способность фильтра в обоих случаях одинакова. При этом максимальное число элементов разрешения равно $N_1 \approx N_2 \approx 7$.

Помимо определения разрешающей способности визуальными методами данная характеристика была определена амплитудно-пространственным методом. Его суть состоит в компьютерной обработке отдельного элемента изображения штриховой миры с целью получения его амплитудно-пространственных характеристик для каждого из порядков дифракции. В процессе реализации амплитудно-пространственного метода для обработки результатов эксперимента были получены характеристики, представленные на рис. 3.

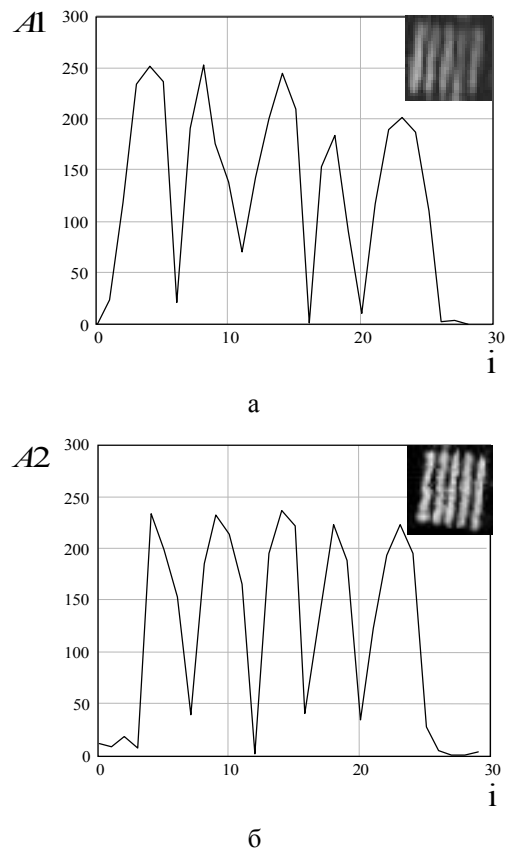


Рис. 3. Контрастно-частотные характеристики элемента изображения штриховой миры зарегистрированные первым (а) и вторым (б) порядках дифракции после компьютерной обработки

Различие контрастных интегральных характеристик исследуемых изображений не превысило 10%, что позволяет сделать вывод о равенстве простран-

ственной разрешающей способности акустооптических фильтров на первом и втором порядках брэгговской дифракции.

Заключение

Разрешающая способность фильтров, построенных на основе первых и вторых порядках примерно одинакова, так как она определяется расходимостью светового и ультразвукового пучков участвующих в акустооптическом процессе.

Поскольку спектральная селективность фильтров на основе второго брэгговского резонанса выше, чем у фильтров на первом резонансе, а их пространственная разрешающая способность одинакова, то разработка акустооптических фильтров изображения на основе вторых порядков брэгговской дифракции представляется целесообразной.

Литература

1. Колобродов В.Г., Бородийчук П.В., Микитенко В.И. Оптические системы видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли // *Космічна наука і технологія*. – 1998. – Т. 4, № 1. – С. 29 – 38.
2. Асташкин А.А. Космические системы, аппараты и приборы для решения задач природопользования и экологического контроля // *Исследование земли из космоса*. – М.: ВИНТИ. – 1991. – № 4. – С. 32 – 38.
3. Зильберман Г.Е., Сидоров И.Н., Купченко Л.Ф. К теории дифракции света на ультразвуке // *Радиотехника и электроника*. – 1982. – Т. 27, № 2. – С. 241 – 247.
4. Гуляев Ю.В., Проклов В.В., Шкердин Г.Н. Дифракция света на звуке в твердых телах // *Успехи физических наук*. – 1978. – Т. 124, № 1. – С.106 – 111.
5. Купченко Л.Ф., Плахов Ю.М., Ефимова О.В. Свойство брэгговских резонансов высших порядков при дифракции света на периодических структурах // *Материалы междунар. научного конгресса "Фундаментальные проблемы естествознания"*. – С.-Пб. – 1998. – С. 114.
6. Купченко Л.Ф., Коробка А.Г., Черкашина Е.Л. Акустооптические фильтры с повышенной разрешающей способностью на основе брэгговских резонансов второго порядка для видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли // *Сб. научн. тр. 1-го Междунар. радиоэлектронного Форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2002)*. Ч.1. – Х.: ФН ПРЭ, ХНУРЭ. – 2002. – С. 322 – 325.
7. Купченко Л.Ф., Коробка А.Г. Акустооптические фильтры с повышенной разрешающей способностью для видеоспектрометров систем воздушной разведки и экологического мониторинга // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – Х.: ГАКУ „ХАІ”. – 2001. – №. 22. – С. 353 – 356.
8. Телишевский В.И. Элементы общей теории и методы акустооптической голографии // *Материалы VI всесоюзной школы по голографии*. – Л. – 1974. – С. 400 – 461.
9. Беликов И.Б., Буймистряк Г.Я., Волошиной В.Б. Акустооптическая фильтрация изображений // *Письма в ЖТФ*. – 1984. – Т. 10, № 20. – С. 1225 – 1228.
10. Жевтюк А.А. Методика определения разрешающей способности оптических систем при визуальном наблюдении // *Системы обробки інформації*. – Х.: ХВУ. – 2002. – Т. 19, №3. – С.31 – 33.

Поступила в редакцию 30.11.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил, Харьков.