

Методы расчёта формы спектрального окна пропускания акустооптического фильтра

*Е.А. ДЬЯКОНОВ¹, В.Э. ПОЖАР²

¹Физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

²Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

*E-mail: ead1989@gmail.com

Аннотация

Рассмотрена проблема расчёта характеристик акустооптических фильтров с управлением числом объёмных дифракционных решёток и их структурой. Описаны методы расчёта в частных случаях, в том числе в коллинеарной геометрии. Показано, что в широкоапертурной геометрии дифракции, используемой в фильтрах для задач спектрального анализа изображения объектов, существует подход, позволяющий реализовать детальный расчёт спектральных характеристик. Он позволяет разбить весь световой поток на отдельные пучки, в каждом из которых парциальная функция передачи описывается простым интегралом по траектории. Этот метод даёт возможность определить влияние модуляции акустической волны на спектральную функцию пропускания фильтра.

Ключевые слова: акустооптический фильтр, методы расчёта коллинеарной геометрии, спектральный анализ, спектральная функция пропускания фильтра

Введение

Селективность акустооптических (АО) устройств (фильтров, дефлекторов) основана на однородности дифракционной решётки: ультразвуковая (УЗ) волна создаёт решётку с идеальным гармоническим профилем. Это позволяет из падающего на акустооптическую ячейку белого света выделить только одну спектральную компоненту, длина волны которой связана с периодом решётки $\lambda(d)$, который определяется частотой f ультразвука

$$d \equiv \Lambda = V / f, \quad (1)$$

где Λ – это длина волны и V – это скорость ультразвука. В результате получается оптический фильтр (рис. 1 (а)), отличающийся отсутствием подвижных частей и быстрой (мкс) перестройкой окна пропускания (рис. 1 (б)) по спектру, что обусловило его достаточно широкую применимость [1, 2].

Естественным развитием классических схем стали АО фильтры, в которых одновременно возбуждается несколько акустических волн в одной АО ячейке. Они имеют несколько окон пропускания (рис. 1 (а) и рис. 1 (в)) одновременно [3] с коэффициентом дифракции, способным приближаться к 100 % в каждом, что позволяет их применять в корреляционной спектроскопии [4, 5]. Ещё одно направление развития – это создание АО фильтров на модулированных (неоднородных) волнах и шумоподобных сигналах [3, 6, 7]. В этом случае полоса пропускания может быть расширена (рис. 1 (з)), что полезно для повышения светосилы. Однако простой и надёжной теории расчёта характеристик для этих случаев нет.

Проблема

Фильтр характеризуется спектральной функцией пропускания, которая представляет собой коэффициент дифракции по амплитуде $T(\lambda, f) \equiv E_{dif} / E_{in}$ на каждой длине волны. Вычисление этой функции для произвольного профиля решётки, который определяется структурой акустического поля, созданного в АО ячейке, представляет принципиальную сложность. В общем случае необходимо учесть амплитудную и фазовую неоднородность, нелокальность рассеяния света, нелинейные эффекты, что представляет собой нетривиальную оптическую задачу. Однако есть несколько практически важных случаев, где вычисление возможно провести относительно простыми методами.

Современные методы анализа

В общем случае направление рассеяния (дифракции) света определяется условием Брэгга

$$k_{dif} = k_{in} + K, \quad (2)$$

где $k_{dif} = k_{in} = 2\pi n / \lambda$ – это волновые векторы дифрагированной и падающей световых волн, n – показатель преломления для этих волн, $K = 2\pi / \Lambda$ – это волновой вектор ультразвуковой волны [1]. В изотропной среде (стекло, жидкость), как видно из рис. 2, это сводится к зеркальному отражению от фронтов акустических волн. Эта же диаграмма демонстрирует, что для заданной частоты f условие Брэгга выполнено только для одной спектральной составляющей $\lambda(f)$, что и обеспечивает селективность процесса дифракции и делает возможной узкополосную фильтрацию.

Один из наиболее общих методов расчёта – это приближение однократного рассеяния (рис. 2 (б)), в котором каждый элемент объёма АО ячейки, лежащий в области пересечения падающего светового пучка E_{in} и акустического столба A , – это источник рассеянного излучения,

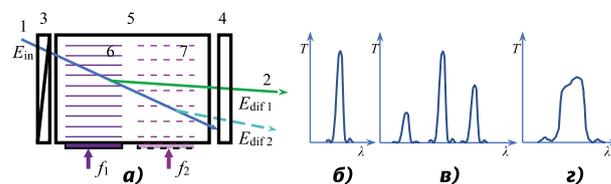


Рис. 1. Акустооптический фильтр: оптическая схема (а), классическая (б), многооконная (в) и уширенная (з) функции пропускания, где 1, 2 – падающий и отфильтрованный (дифрагированный) световые пучки, 3 и 4 – пара скрещённых поляризаторов, 5 – рабочий АО кристалл, 6 и 7 – УЗ пучок основной и дополнительный (в многооконных АО фильтрах)

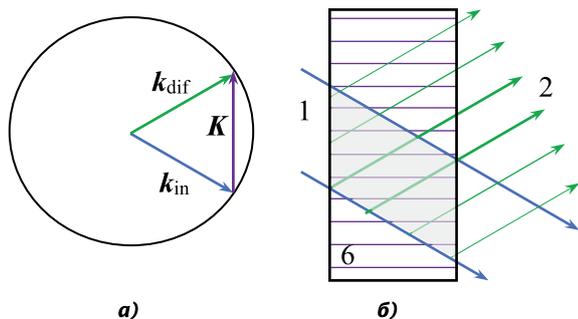


Рис. 2. Акустооптический фильтр общего вида: волновая диаграмма (а) и схема дифракции света на решётке (б), где 1, 2 – падающий и отфильтрованный (дифрагированный) световые пучки, 6 – основной УЗ пучок

так что дифрагированная волна – это суперпозиция всех рассеянных волн

$$E_{dif}(\mathbf{R}; \lambda) \sim R^{-1} \int E_{in}(\mathbf{r}; \lambda) A(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{k}(\mathbf{R} - \mathbf{r})) d\mathbf{r}. \quad (3)$$

Это выражение, линейное по амплитуде как света, так и ультразвука, позволяет вычислить характеристики дифрагированной волны. В частности, в случае однородной ограниченной по пространству решётки, решение представляет собой отклонённый узконаправленный пучок. Это приближение (3), однако, справедливо лишь при малом коэффициенте дифракции ($T \ll 1$). Второй пример, где общее решение существует, – это коллинеарная дифракция в двулучепреломляющем одноосном кристалле, а именно геометрия, в которой падающая и дифрагированная волны распространяются вдоль одной прямой (рис. 3). В этом случае задача становится одномерной, а решение описывается интегралом по траектории движения света

$$E_{dif}(\lambda) \sim E_{in}(\lambda) \int A(z) \exp(i(\Delta k)z) dz, \quad (4)$$

где $\Delta k = k_{dif} - k_{in} - K$ – это волновая расстройка условия Брэгга. В этой формуле учитывается и многократное рассеяние на решётке, которое ведёт к истощению падающего пучка, так что вся его энергия переходит в дифрагированный, а коэффициент дифракции $T \rightarrow 1$.

По сути, в этой геометрии коэффициент дифракции на данной длине волны λ при заданной частоте ультразвука f представляются Фурье-образом пространственного распределения акустического поля $T = \mathbf{F}[A(z)]$. Эта связь может быть использована для определения требуемого профиля решётки для синтеза функции пропускания требуемого вида. К сожалению, в коллинеарной геометрии решётка смещается вместе с бегущей ультразвуковой волной $A(z - Vt)$, а потому найденное распределение смещается, что вызывает изменение указанной функции. Поэтому этот способ синтеза применим либо к обработке коротких импульсов света, либо следует вычислять среднюю по периоду повторения функцию пропускания $\langle T \rangle$ [8].

В других случаях явной формулы не существует. Более того, задача ещё более усложняется для АО фильтров, используемых в задачах спектральной фильтрации изображений объектов. В этом случае функция может зависеть

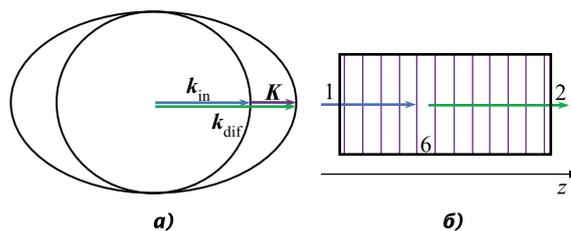


Рис. 3. Коллинеарный АО фильтр: волновая диаграмма (а) и схема дифракции света на решётке (б), где 1, 2 – падающий и отфильтрованный (дифрагированный) световые пучки, 6 – основной УЗ пучок

и от угла падения пучка $T(\lambda, \theta; f)$. А потому при дифракции расходящегося пучка, несущего изображение, разные угловые компоненты светового потока имеют разный коэффициент передачи, так что вычисление характеристик отфильтрованного света представляет сложную задачу. С учётом того, что наибольшее применение АО фильтры нашли в задачах, связанных с фильтрацией изображения объекта, таких как микроскопия, эндоскопия, гиперспектрометрия, проблема отсутствия методов расчёта дифракции на неоднородной брэгговской решётке актуальна. В настоящей статье показано, что в некоторых случаях расчёт можно до некоторой степени упростить.

Задачи спектральной фильтрации изображений

При использовании АО фильтров для спектральной фильтрации изображений, что стало доминирующей областью их применения, проблема расчёта функций пропускания существенно усложняется. Во-первых, эта функция становится многомерной $T(\lambda, \theta_x, \theta_y; f)$, так как зависит от направления распространения конкретного пучка, отображающего данный элемент изображения. Во-вторых, требования к этой функции дополняются необходимостью избежать искажений или минимизировать аберрации.

Тем не менее, есть практически важная геометрия, где эта задача может быть решена. Это так называемая «широкоапертурная» геометрия, используемая повсеместно в задачах фильтрации изображений, поскольку она обеспечивает выполнение условия Брэгга в наибольшем интервале углов (рис. 4). В этой геометрии падающий и дифрагированный пучки имеют разную поляризацию и распространяются под таким углом, что касательные к поверхности эллипсоидов Френеля параллельны. А потому параллельны и нормали к этим поверхностям, определяющие направление распространения энергии пучков. В таком случае дифрагированный пучок распространяется по одному направлению с падающим, и задача в этой геометрии оказывается одномерной. Следовательно, дифрагированный пучок, несущий информацию об объекте, может быть разбит на множество отдельных лучевых трубок, в каждой из которых процесс дифракции протекает независимо.

Амплитуда дифрагированной волны каждого парциального пучка может быть определена по формуле (4) в соответствии с профилем решётки на его пути, т.е. локальный коэффициент дифракции в этой геометрии представляется Фурье-образом пространственного распределения акустического поля $T(x, y) = \mathbf{F}_z[A(x, y, z)]$. Таким образом,

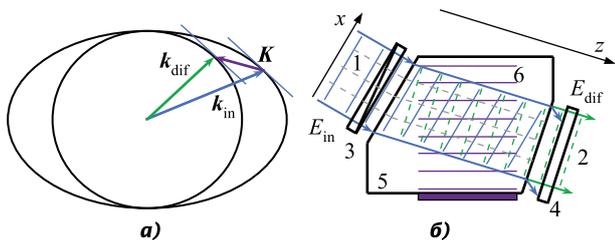


Рис. 4. Акустооптический фильтр «широкоапертурной» геометрии: волновая диаграмма (а) и схема дифракции света на решётке (б), где 1, 2 – падающий и отфильтрованный (дифрагированный) световые пучки, 3 и 4 – пара скрещённых поляризаторов, 5 – рабочий АО кристалл, 6 – основной УЗ пучок

расчёт спектрального изображения на фотодетекторе или экране $E_{det}(X, Y)$ по исходному изображению $E_{obj}(X, Y)$ может быть условно описан следующим образом

$$E_{obj}(X, Y) \rightarrow E_{in}(x, y) \rightarrow E_{dif}(x, y; \lambda) \rightarrow E_{det}(X, Y; \lambda). \quad (5)$$

А именно, в соответствии с видом оптической системы изображение объекта пересчитывается на распределение на входе АО фильтра E_{in} , по нему вышеуказанным образом вычисляется распределение на выходе АО фильтра на любой длине волны λ при заданной частоте ультразвука f , откуда вычисляется спектральное изображение, регистрируемое фотодетектором.

В этом случае также возникает возможность поиска профиля решётки, позволяющего изменить форму окна пропускания АО фильтра. Однако задача усложняется тем, что требуемый профиль смещается вдоль одной из поперечных координат $A(x - Vt, y, z)$, а создание нужного распределения вдоль направления распространения светового пучка (z) требует многосекционного излучателя.

Заключение

Описанный подход позволяет рассчитать функцию пропускания АО фильтра широкоугольной геометрии с неоднородной брэгговской решёткой, что важно для использования в задачах спектральной фильтрации изображений методов управления спектральной характеристикой, например, модуляции ультразвуковой волны.

Этот расчёт не универсальный, так как соответствует лучевому приближению, когда дифракция в отдельных парциальных «лучах» может рассматриваться независимо. Также расчёт искажений изображения и aberrаций с использованием описанного подхода игнорирует распределённый характер брэгговской дифракции, заменяя его однократной неоднородной трансформацией световых параметров светового потока (см. [9]).

Следует также отметить, что рассчитываемая функция пропускания представляет лишь мгновенный отклик и для расчёта функции за длительный промежуток времени, например, за период модуляции, необходимо учитывать смещение решётки со временем по мере распространения бегущей акустической волны или её изменение в случае стоячих волн. В то же время при работе с короткими световыми импульсами [10] решётка может считаться неподвижной и описанный подход позволяет проводить расчёты.

Задача синтеза требуемой спектральной функции АО фильтра тоже может быть в принципе решена с использованием этого подхода, но её техническая реализация классическим методом, использующим ультразвуковые волны, представляет отдельную сложную проблему.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022–0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Goutzoulis, A.P., Rape, D.R. Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices // Boca Raton, USA: CRC Press, 2004, 520 p.
- Акустооптические процессоры спектрального типа. Под ред. В.В. Проклова, В.Н. Ушакова. – М.: Радиотехника. – 2012. – 192 С.
- Machikhin, A.S., Khokhlov, D.D., Pozhar, V.E., Kozlov, A.B., Batshev, V.I., Gorevoy, A.V. Acousto-optical tunable filter for a swept light source with variable transmission function // Proc. SPIE, 2018, Vol. 10815, p. 108150L.
- Герус А.В., Герус Т.Г. Акустооптические методы идентификации объектов в гиперспектральном анализе // Физические основы приборостроения. – 2015. – Т. 4. № 4. – С. 70–83.
- Мазур М.М., Судденко Ю.А., Пожар В.Э. Многооконные акустооптические фильтры для корреляционной спектроскопии // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128. В. 2. – С. 284–289.
- Мазур М.М., Судденко Ю.А., Шорин В.Н. Двойной акустооптический монохроматор изображений с перестраиваемой шириной апертурной функции // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, № 4. – С. 56–62.
- Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Акустооптические спектральные технологии // Изв. РАН. Серия Физическая. – 2015. – Т. 79, № 10. – С. 1375–1380.
- Пустовойт В.И., Пожар В.Э. Управление характеристиками коллинеарного акустооптического фильтра путём модуляции ультразвука // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43. В. 1. – С. 121–127.
- Machikhin, A., Batshev, V., Pozhar, V. Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems // J. Optical Society America, 2017, Vol. A 34, #7, pp. 1109–1113.
- Molchanov, V. Ya., Chizhikov, S.I., Makarov, O. Yu., Solodovnikov, N.P., Ginzburg, V.N., Katin, E.V., Khazanov, E.A., Lozhkarev, V.V., Yakovlev, I.V. Adaptive acousto-optic technique for femtosecond laser pulse shaping // Appl. Opt. Appl. Opt., 2009, Vol. 48, #7, pp. C118–C124.



Дьяконов Евгений Алексеевич, кандидат физ.-мат. наук по специальности «Радиофизика». Окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова с отличием в 2009 г. Научный сотрудник физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Автор и соавтор 45 докладов на всероссийских и международных научных конференциях, а также 18 статей в реферируемых научных журналах. Научные интересы лежат в области акустооптики светового и инфракрасного излучения



Пожар Витольд Эдуардович, доктор физ.-мат. наук, выпускник МФТИ 1981 г., руководитель отдела акустооптических информационных систем НТЦ УП РАН, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана и НИЯУ «МИФИ». Область научных интересов включает акустооптику, спектрометрию, дифференциальную, модуляционную, адаптивную спектроскопию, гиперспектрометрию, дистанционное зондирование и спектральное приборостроение