

# Спектрально-поляризационные системы трёхмерного технического зрения на основе акустооптической фильтрации

В.Э. ПОЖАР, А.С. МАЧИХИН

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва  
E-mail: vitold@ntcup.ru

## Аннотация

Рассмотрено развитие двухканальных акустооптических спектральных устройств с расширенными функциональными возможностями. Обсуждаются подходы к созданию многофункциональных акустооптических устройств, способных регистрировать разные виды оптической информации (пространственное распределение, спектры, поляризационные характеристики). Проанализированы возможности регистрации «многомерных» взаимодополняющих данных на основе брэгговской дифракции света на ультразвуковых волнах в одноосном кристалле. Показана возможность развития такого подхода, основанная на реализации одновременной дифракции двух световых пучков в плоскостях, разведённых на небольшой угол. Такое расширение концепции работы акустооптических фильтров позволяет выйти за пределы классических ограничений, накладываемых на их характеристики.

**Ключевые слова:** перестраиваемый акустооптический фильтр, спектральная стереоскопия, спектроскопия с пространственным разрешением, поляризационная чувствительность, двухканальные акустооптические фильтры, многофункциональные устройства

## Введение

Системы технического зрения широко используются в задачах мониторинга, дистанционного зондирования, обеспечения безопасности, контроля промышленных процессов, в научных исследованиях, а также при проведении работ и исследований в труднодоступных условиях [1, 2]. Особенные требования предъявляются к таким системам в составе современных мобильных аппаратов и автономных комплексов, предназначенных для вы-

полнения трудоёмких работ, которые требуют высокой производительности или сопряжены с повышенным риском, таких как автоматизация технологических процессов на производстве, ремонт трубопроводов, мониторинг в агрессивных средах и др. Как правило, такие работы ведутся в условиях неполной информации и динамически меняющегося окружения. Поэтому расширение числа регистрируемых аппаратом физических характеристик и их комплексный анализ, обеспечивающий получение разнобразной взаимодополняющей информации, – это актуальная задача, от которой зависит не только степень и качество выполнения поставленной задачи, но иногда и сама возможность функционирования всего рабочего комплекса.

Оптические методы регистрации и анализа информации позволяют проводить эффективный бесконтактный анализ объектов. Информация, переносимая световыми волнами, выражается следующим уравнением

$$\vec{E} = \vec{e} \cdot A(x, y) \cdot \sin(\omega t - kz), \quad (1)$$

где  $A(x, y)$  – это пространственное распределение амплитуды волны,  $\vec{e}$  – это её поляризации и  $\omega$  – это спектр частот. Зрение живых существ позволяет извлекать эту информацию, давая представление одновременно о форме, цвете и удалённости объекта, а в общем случае и о поляризации рассеянного им света. Перспективной представляется задача создания комплексной системы технического зрения, способной регистрировать все

эти характеристики [3]. Аналогично зрительному аппарату она должна давать стереоскопические изображения со спектральным разрешением и, желательнее, поляризационной чувствительностью и быть достаточно компактной. Оснащение системы сразу несколькими измерительными устройствами расширяет её функциональные возможности, увеличивает надёжность распознавания объектов, но одновременно увеличивает габариты, вес, энергопотребление, объём обрабатываемой информации, что нежелательно, а для мобильных автономных аппаратов – неприемлемо. Поэтому решение этой проблемы представляет большой научный и практический интерес.

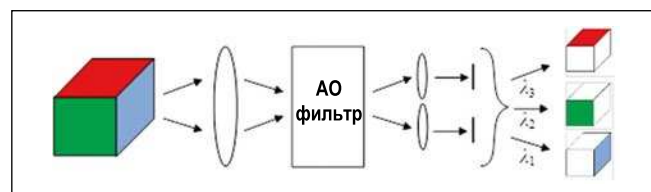
Такая система может быть основана на акустооптических (АО) перестраиваемых фильтрах, которые обладают всеми этими свойствами [4]. При этом для стереочувствительности необходимо формирование изображений с двух ракурсов, то есть такая система должна иметь пару каналов (рис. 1). При этом методы стереоскопии предоставляют возможность определить форму объекта и расстояние до его поверхности, а спектральные методы способны дать информацию о его структуре, состоянии и даже составе. В настоящей работе рассмотрены различные подходы к построению таких АО систем, проанализированы их недостатки и предложен путь к их преодолению.

## Двухканальные АО системы

Двухканальные системы часто используются в АО системах, например, для сравнения объекта с эталоном [5], для нормировки (измерительный и опорный каналы) [6], для получения спектральных изображений двух поляризаций [7], фильтрации интерферирующих пучков [8] и других задач.

Разработка устройств двухканальной стереоскопической спектроскопии с использованием АО дифракции требует, чтобы оба канала были

Рис. 1. Иллюстрация принципа АО стереоспектрометрии



функционально идентичными с точки зрения качества формируемых стереоизображений, диапазона перестройки и пр. В этих устройствах наиболее сложный, к тому же активный элемент – это АО ячейка, в которой происходит выделение спектральной компоненты света  $\lambda$  путём дифракции его на ультразвуковой (УЗ) волне соответствующей частоты  $f$ . Поэтому задача разработки АО фильтра с двумя оптическими каналами актуальна.

Наиболее очевидное решение этой задачи – это применение двух синхронизированных АО фильтров, каждый из которых обеспечивает фильтрацию одного светового пучка, переносящего изображение [9]. При этом габариты, масса и энергопотребление фактически удваиваются в сравнении с одноканальной схемой. Поэтому весьма перспективной представляется разработка одного двухканального АО фильтра, что позволило бы упростить оптическую схему, калибровку и электронное управление стереоскопических спектрометров и расширить возможности их встраивания в другие системы. Сложность реализации этого подхода заключается в необходимости, кроме спектральной фильтрации, обеспечить и разделение стереопары изображений.

### Особенности АО фильтров изображений

Классический подход к построению систем АО фильтрации световых пучков, переносящих изображения, предусматривает использование «широкоапертурной» геометрии дифракции в оптически одноосных кристаллах [10], самый эффективный из которых парателлури́т ( $TeO_2$ ). В этой геометрии дифракция проходит в кристаллографической плоскости (110), содержащей оптическую ось кристалла  $Z$ . В результате дифракции одна из спектральных компонент исходно поляризованного светового пучка, удовлетворяющая определённому условию (рис. 2 (а)), отклоняется и меняет поляризацию, что позволяет её выделить (рис. 2 (в)). Длина волны отфильтрованного света определяется частотой ультразвука, а также направлением распространения света и ультразвука  $\lambda(f; \theta, \gamma)$ . Геометрия «широкоапертурной» дифракции, обеспечивающая наибольшее угловое поле зрения ( $\Delta\theta$ ) и, соответственно, наибольшее число

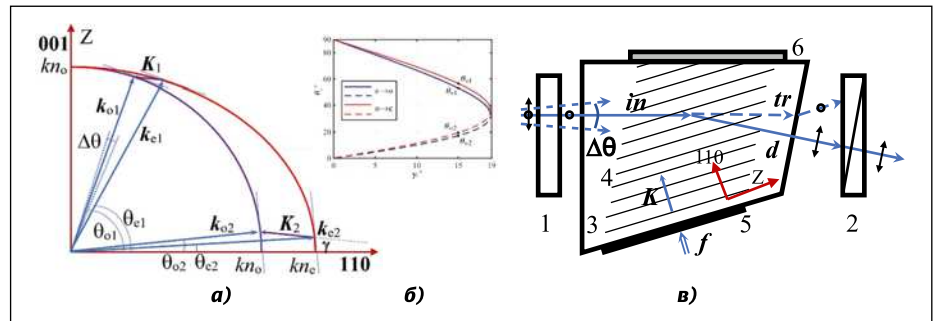


Рис. 2. Широкоапертурная анизотропная АО фильтрация, диаграмма волновых векторов света (а), связь угла распространения света и звука  $\theta(\gamma)$  (б) и распространение в АО фильтре световых пучков (в), где  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{K}$  – это векторы света и ультразвука, отображающая условие дифракции Брэгга и связывающая волны обыкновенной (о) и необыкновенной (е) поляризации,  $\Delta\theta$  – это допустимая угловая расходимость падающего светового пучка (поле зрения),  $in$  – это падающее излучение,  $tr$  – это прошедшее излучение,  $d$  – это отклонённое в результате дифракции излучение, 1, 2 – скрещённые поляризаторы, 3 – рабочий кристалл, 4 – акустический столб, 5 – пьезоизлучатель, 6 – УЗ поглотитель

различимых элементов изображения, устанавливает связь между ориентацией УЗ волны ( $\gamma$ ) и светового пучка ( $\theta$ ) внутри кристалла. При конструктивно заданном угле  $\gamma$  возможно только две геометрии дифракции обыкновенно поляризованного света с изменением поляризации ( $\theta_{o1} \rightarrow \theta_{e1}$ ) и ( $\theta_{o2} \rightarrow \theta_{e2}$ ), соответствующих «приосевой» и «внеосевой» (рис. 2 (б)) [11] ветвям зависимости  $\theta(\gamma)$ . Таким образом, при разработке классического широкоапертурного АО фильтра единственный оптимизируемый параметр – это угол распространения света  $\theta$ .

### Схемы двухканальных АО фильтров

В двухканальном АО фильтре углы падения света в каждом канале должны различаться, например,  $\theta_I = \theta_{o1}$  и  $\theta_{II} = \theta_{o2}$ . Однако в этом случае эти каналы радикально отличаются по своим характеристикам: эффективности дифракции, спектральному разрешению, рабочей частоте ультразвука и другим параметрам [12, 13], а потому их совместное применение для передачи двух изображений весьма проблематично [14, 15].

Альтернативный подход заключается в том, чтобы в разных каналах использовать разные поляризации, например,  $\theta_I = \theta_{o1}$  и  $\theta_{II} = \theta_{e2}$ , так что дифракция проходила бы по схеме ( $\theta_{o1} \rightarrow \theta_{e1}$ ) и ( $\theta_{e1} \rightarrow \theta_{o1}$ ). Использование этой пары углов предпочтительнее, чем использование углов  $\theta_{o2}$  и  $\theta_{e2}$ , ввиду более низкой, технически достижимой частоты ультразвука 100 МГц [16–18].

Использование метода с двумя разными поляризациями в каналах в общем случае может вызвать сложности с интерпретацией результатов. Но во многих ситуациях имеется значительная априорная информация об объекте, что позволяет устранить неопределённость. Например, если в решаемой задаче поляризация не несёт полезной информации (например, в случае естественно поляризованного света), то оба канала могут быть эффективно использованы для восстановления стереоизображения. В другом случае, когда форма объекта известна (например, плоская поверхность), каналы несут информацию о степени поляризации всех элементов изображения. Более того, поляризационное различие интенсивности в двух каналах не всегда препятствует восстановлению формы объекта, поскольку может быть скорректировано при обработке данных.

В целом, однако, ввиду угловой близости в этой геометрии двух входящих пучков  $\theta_{o1} - \theta_{e1} \approx 4^\circ$  и необходимости разведения их после фильтрации использование данного подхода для передачи стереоизображений затруднено, так как требует либо придания кристаллу сложной формы, либо значительных габаритов сопрягающей оптической системы и/или кристалла [19].

Описанная эволюция двухканальных АО стереоспектрометров отражена на рис. 3: от пары независимых АО фильтров [9] через АО фильтр с двумя параллельными каналами [16, 19] к АО фильтру с двумя перекрывающимися каналами [15]. Основной недостаток исходного варианта на рис. 3

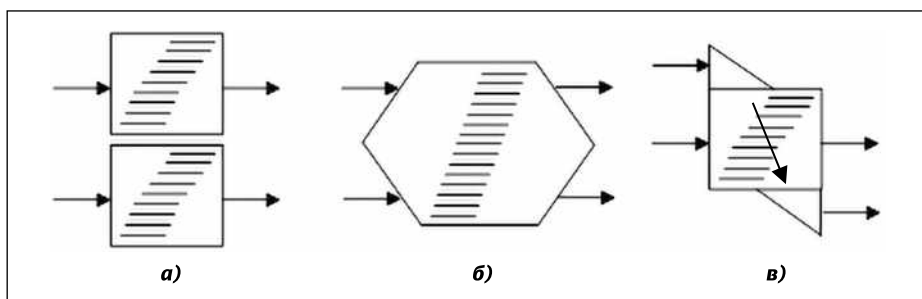


Рис. 3. Различные варианты реализации АО стереоспектрометрии

снимков объекта в широком поле зрения, каждый из которых содержит информацию о разных спектральных составляющих, можно расчётным образом извлечь информацию об угловом распределении яркости объекта на конкретной длине волны, то есть построить монохроматическое изображение в широком поле зрения. Это, во-первых, позволит увеличить поле зрения АО фильтра в несколько раз, а, во-вторых, открывает возможность создания изображающих систем на основе АО фильтров не только «широкоапертурной» геометрии и тем самым заметно расширяет возможности оптимизации характеристик АО фильтров. Предполагается применить этот подход для реализации в одном кристалле одинаково эффективной спектральной фильтрации одновременно двух световых пучков, переносящих изображения, и создать на этой основе компактную и достаточно простую конструктивно систему технического зрения для определения спектральных, объёмных геометрических и поляризационных свойств объектов.

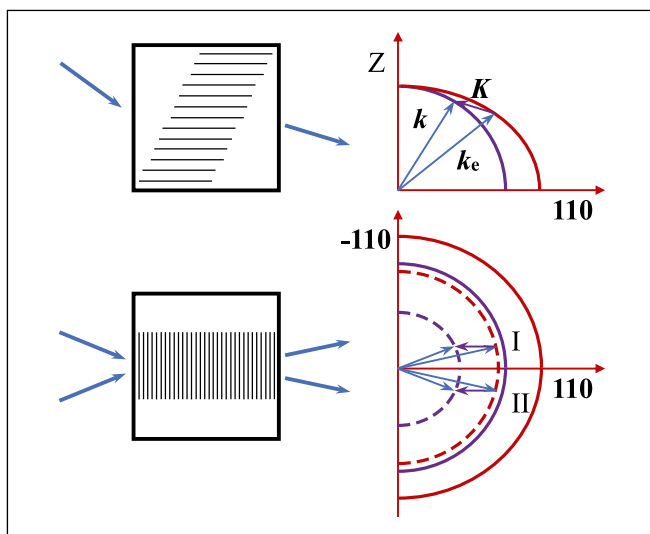


Рис. 4. Перспективный АО фильтр для стереоспектрометрии: симметричная схема (а) и волновая диаграмма (б) пучков в двух проекциях

(а) с двумя АО фильтрами – это их независимость, что из-за их технологических различий может вызывать неконтролируемое расхождение настройки двух каналов. К тому же такая система имеет удвоенные габариты, массу, энергопотребление. Вторая схема на рис. 3 (б) использует единую решётку, созданную ультразвуком, но разные её части, а потому, во-первых, требует достаточно крупного кристалла сложной формы, а во-вторых, не обеспечивает эквивалентность двух каналов из-за затухания звука [13]. Особенности третьей схемы на рис. 3 (в), использующей две вспомогательные призмы, – это минимальные габариты и то, что дифракция обоих пучков проходит в одном месте решётки. Однако, как было установлено, неоднородность каналов, тем больше, чем сильнее разведение пучков в АО ячейке, что снижает привлекательность такого подхода и его практическую применимость, поскольку характеристики всей стереосистемы определяются в этом случае характеристиками менее эффективного канала. Таким образом, все эти подходы сохраняют недостатки, не позволяющие сделать однозначный выбор в их пользу.

### Широкоугольное АО устройство регистрации пространственно-спектральных данных

Принципиальным решением проблемы неэквивалентности каналов мог бы стать выбор симметричной геометрии дифракции двух световых пучков. В случае одноосного АО кристалла это предполагает отклонение обоих пучков в разные стороны от рабочей плоскости ( $110^\circ$ ), используемой в АО фильтре на основе парателлуриата (рис. 4). Данный вариант двухпучковой дифракции ранее не рассматривался для спектральной фильтрации изображений, поскольку он не отвечает условию «широкоапертурности». А если угловое поле светового пучка превосходит допустимую угловую апертуру, то снимок оказывается неоднородно окрашенным, т.е. для разных элементов изображения будут выделены неодинаковые спектральные компоненты.

Однако, благодаря результатам, полученным в работе [20], появилась возможность выйти за пределы этого ограничивающего условия. Показано, что при наличии серии неоднородно окрашенных спектральных

Таким образом, следующий шаг в развитии АО стереоспектрометрии – это «выход» из классической полярной плоскости ( $110$ ) и разведение двух пучков в азимутальной  $XU$  плоскости (рис. 4). В этой схеме в виду симметрии качество обоих каналов стереоизображения (пространственное и спектральное разрешение, абберации и пр.) одинаково, причём эффективность дифракции и качество изображения не должны заметно измениться при небольшом (несколько градусов) отклонении от классической рабочей плоскости.

### Обсуждение

Проведённый анализ показывает, что на основе АО фильтров широкоапертурной геометрии не удаётся создать компактную и одновременно эффективную стереоскопическую спектральную систему, а сокращение угловой апертуры снижает её характеристики, например, число пространственно разрешимых элементов, светосилу. Развиваемый подход, основанный на измерении серии спектральных снимков и их коррекции численными методами, снимает это противоречие и открывает возможность создания двухканального однокри-

стального АО фильтра с идентичными каналами.

Создание такого АО фильтра требует решения ряда технических, методических и алгоритмических задач. А именно, необходимо

1. сконструировать схему и оптимизировать параметры АО стереоспектрометра в целом и двухканального АО фильтра в частности;

2. провести светоэнергетический и абберационный расчёт характеристик получаемых спектральных изображений;

3. разработать алгоритм коррекции спектральной неоднородности снимков и получения монохроматических изображений во всём поле зрения;

4. адаптировать методы построения трёхмерной структуры объектов по паре изображений с разных ракурсов;

5. разработать процедуру пространственно-спектральной калибровки таких стереоспектрометров.

Решение этих задач может быть выполнено хорошо отработанными методами оптики и акустооптики.

## Заключение

Предложенный подход к созданию стереоскопических перестраиваемых АО фильтров позволяет преодолеть большинство ограничений существующих методов реализации компактных многофункциональных АО систем трёхмерного и гиперспектрального машинного зрения. Его использование может быть востребовано при решении многочисленных задач биомедицины и промышленности, где для эффективного обнаружения и распознавания объектов необходимо одновременное получение информации об их форме, спектральных и поляризационных характеристиках. На основе разрабатываемого технического решения может быть создан целый класс систем технического зрения. В зависимости от решаемой задачи их основные технические характеристики (пространственное разрешение, глубина резкости изображаемого пространства, спектральный диапазон, число спектральных каналов и др.) могут варьироваться. Оптимальные параметры (геометрия АО взаимодействия, форма кристалла и пр.) и ожидаемые технические характеристики такого фильтра будут определены в ходе дальнейших исследований.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00606 продление).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Davies, E.R.* Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities // Elsevier, 2012, 912 p.

2. *Steger, C., Ulrich, M., Wiedemann, C.* Machine Vision Algorithms and Applications // Wiley-VCH, 2018, 370 p.

3. *Yoon, S., Thai, C.* Stereo spectral imaging system for plant health characterization. // Proceedings of 2009 ASABE Annual International Meeting, 2009, #096583.

4. *Мазур М.М., Пожар В.Э.* Спектрометры на акустооптических фильтрах. // Измерительная техника. – 2015. – № 9. – С. 29–33.

5. *М.М. Мазур, В.Н. Шорин, В.И. Пустовойт, В.Э. Пожар, А.В. Фадеев.* Газоаналитический акустооптический спектрометр // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – Т. 54, № 2. – С. 140–146

6. Измерение концентрации этанола в спиртосодержащих жидкостях. В кн.: Акустооптические процессоры спектрального типа. Под ред. В.В. Проклова, В.Н. Ушакова // Радиотехника. – 2012. – С. 170–176.

7. *Voloshinov, V., Molchanov, V., Mosquera, J.C.* Spectral and polarization analysis of optical images by means of acousto-optics // Optics and Laser Technology, 1996, Vol. 28, #2, pp. 119–127.

8. *Висковатых А.В., Мачихин А.С., Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Висковатых Д.А.* Комбинированная оптическая когерентная и спектральная микроскопия на основе перестраиваемых акустооптических фильтров изображений // Письма ЖТФ. – 2014. – Т. 40, № 4. – С. 33–41.

9. *Мачихин А.С., Батиев В.И., Пожар В.Э., Мазур М.М.* Акустооптический стереоскопический спектрометр полного поля для восстановления объёмной структуры объектов в произвольных спектральных интервалах. // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 871–877.

10. *Chang, I.C.* Noncollinear acousto-optic tunable filters with large angular aperture // Applied Physics Letters, 1974, Vol. 25, pp. 370–372.

11. *Gass, P.A., Sambles, J.R.* Accurate design of a noncollinear acousto-optic tunable filter // Optics Letters, 1991, Vol. 16, #6, pp. 429–431.

12. *Voloshinov, V., Yukhnevich, T.* Two regimes of wide-angle acousto-optic interaction in tellurium dioxide single crystals // Applied optics, 2013, Vol. 52, #24, pp. 5912–5919.

13. *Machikhin, A., Gorevoy, A., Pozhar, V., Batshev, V.* Modes of wide-aperture acousto-optic diffraction in a uniaxial birefringent crystal // J. Opt., 2021, Vol. 23, #125607, pp. 1–9.

14. *Епихин В.М., Визен Ф.Л.* Расширение спектрального диапазона неколлинеарного акустооптического фильтра // ЖТФ. – 1990. – Т. 60, № 9. – С. 169–173.

15. *Machikhin, A., Batshev, V., Pozhar, V., Naumov, A.* Single-volume dual-channel acousto-optical tunable filter // Optics Express, 2020, Vol. 28, #2, pp. 1150–1157.

16. *Епихин В.М., Визен Ф.Л., Пальцев Л.Л.* Акустооптическая фильтрация излучения с произвольной поляризацией // ЖТФ. – 1987. – Т. 57, № 10. – С. 1910–1914.

17. *Волошинов В.Б., Молчанов В.Я., Бабкина Т.М.* Акустооптический фильтр неполяризованного электромагнитного излучения // ЖТФ. – 2000. – Т. 70, В. 9. – С. 93–98.

18. *Мачихин А.С., Пожар В.Э.* Получение спектральных стереоизображений с электронной перестройкой по спектру и с поляризационным разделением // Письма ЖТФ. – 2014. – Т. 40, № 18. – С. 58–65.

19. *Machikhin, A., Batshev, V., Pozhar, V., Naumov, A., Gorevoy, A.* Acousto-optic tunable spectral filtration of stereoscopic images // Optics Letters, 2018, Vol. 43, #5, pp. 1087–1090.

20. *Gorevoy, A., Machikhin, A., Martynov, G., Pozhar, V.* Computational technique for field-of-view expansion in AOTF-based imagers // Optics Letters, 2022, Vol. 47, #3, pp. 585–588.



**Пожар Витольд Эдуардович**, доктор физ.-мат. наук. Окончил МФТИ в 1981 г., работает руководителем отдела акустооптических информационных систем ИТЦ УП РАН, профессор МГТУ им.

Н.Э. Баумана и НИЯУ «МИФИ». Область научных интересов: акустооптика, спектрометрия, дифференциальная, модуляционная, адаптивная спектроскопия, гиперспектрометрия, дистанционное зондирование, спектральное приборостроение



**Мачихин Александр Сергеевич**, доктор тех. наук. Окончил МГТУ им.

Н.Э. Баумана в 2007 г. по специальности оплотехника. Работает ведущим научным сотрудником Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН. Область научных интересов: оптическое приборостроение, акустооптика, видеоспектрометрия, интерферометрия, оптическая когерентная томография, цифровая голографическая микроскопия

Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН. Область научных интересов: оптическое приборостроение, акустооптика, видеоспектрометрия, интерферометрия, оптическая когерентная томография, цифровая голографическая микроскопия