

## АКУСТООПТИЧЕСКИЙ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЙ СПЕКТРОМЕТР ПОЛНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТОВ В ПРОИЗВОЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛАХ

А.С. Мачихин<sup>1,2</sup>, В.И. Батшев<sup>1,3</sup>, В.Э. Пожар<sup>1,4</sup>, М.М. Мазур<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup> Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия,

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия,

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия,

<sup>4</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия,

<sup>5</sup> ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская область, Россия

### Аннотация

Рассмотрена задача получения объемных изображений объектов в произвольных узких спектральных интервалах видимого диапазона. Для ее решения предложена схема двухканального акустооптического спектрометра, позволяющего регистрировать стереоскопические изображения, сформированные ортогонально поляризованными излучениями. Изготовлен макет спектрометра. Приведены примеры полученных стереоскопических изображений реального объекта и восстановленная по ним его объемная структура.

**Ключевые слова:** акустооптическая спектральная фильтрация, видеоспектрометрия, трехмерная визуализация.

**Цитирование:** Мачихин, А.С. Акустооптический стереоскопический спектрометр полного поля для восстановления объемной структуры объектов в произвольных спектральных интервалах / А.С. Мачихин, В.И. Батшев, В.Э. Пожар, М.М. Мазур // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 871-877. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-871-877.

### Введение

Приборы для визуализации и анализа двумерной структуры объектов в отдельных спектральных интервалах в настоящее время находят широкое применение при проведении научных исследований [1, 2]. Спектральная фильтрация позволяет системе работать с изображениями именно в тех интервалах длин волн, где отсутствуют фоновые помехи и наиболее интенсивно проявляются физические, химические и другие свойства анализируемых объектов. Для этого выделяют свет в полосе поглощения, излучения или флуоресценции визуализируемого вещества. При этом существует множество промышленных, медицинских, биологических и других задач, в которых необходимо исследовать пространственное распределение свойств объектов, имеющих не плоскую, а рельефную (трехмерную) поверхность, то есть получить более полную информацию о расположении и форме элементов исследуемого объекта [3, 4].

Добавление к классической системе регистрации двумерных изображений  $I(x, y)$  информации по одной дополнительной координате – пространственной ( $z$ ) или спектральной ( $\lambda$ ) – дает качественно новое отображение объектов: стереовидение  $I(x, y, z)$  либо спектральную визуализацию  $I(x, y, \lambda)$  [5]. Добавление сразу двух этих координат позволит получить еще больший аналитический эффект – регистрировать 4-мерное распределение  $I(x, y, z, \lambda)$ . Например, многие микроскопы, предназначенные для стереоскопической регистрации, дополнены несколькими спектральными фильтрами для контрастирования объектов. Это, однако, позволяет получать объемные изображения лишь в нескольких фиксированных полосах спектра. Устройств, формирующих стереоизображения на произвольных длинах волн  $\lambda$ , пока нет, а потому задача создания такого устройства представляется актуальной.

В настоящей работе представлен стереоскопический акустооптический (АО) видеоспектрометр, работающий на принципе одновременной спектральной фильтрации двух световых пучков, переносящих изображения объекта, наблюдаемого через один входной объектив с двух разных ракурсов, как в схеме стереомикроскопа Аббе [6]. Особенностью разработанного прибора является то, что два изображения, образующие стереопару, имеют различную поляризацию. Это дает дополнительную информацию, что важно для многих биомедицинских задач.

### 1. Принцип работы

Для получения спектрального изображения излучение необходимо дополнительно пропустить через оптический фильтр. Для этого можно использовать набор сменных светофильтров либо перестраиваемый оптический фильтр. Наиболее подходят для этого АО фильтры, которые не имеют подвижных частей, обеспечивают быструю произвольную спектральную адресацию, высокий коэффициент пропускания, достаточно высокое пространственное и спектральное разрешение [7, 8].

При передаче изображений требуется большая угловая апертура, достигаемая в широкоугольных АО фильтрах [9]. Формальным условием реализации широкоугольной геометрии дифракции в плоскости  $ZX$  одноосного кристалла, включающей оптическую ось кристалла  $Z$ , является параллельность касательных в пространстве волновых векторов к волновым поверхностям для падающей и дифрагированной волн (рис. 1а). Для выполнения этого необходимо, чтобы в полярной плоскости углы распространения падающего  $\theta$  и дифрагированного  $\psi$  света для случаев дифракции  $o \rightarrow e$  и  $e \rightarrow o$  были связаны соотношениями [9]

$$\begin{aligned} \psi_e &= \text{arcctg} \left( \left( \frac{1}{\xi_0^2} \right) \text{ctg} \theta_o \right), \\ \psi_o &= \text{arcctg} \left( \xi_0^2 \text{ctg} \theta_e \right), \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\xi_0 = n_e / n_o$  – параметр двулучепреломления. Угол распространения акустической волны  $\gamma$  в этих случаях составляет [9, 10]

$$\begin{aligned} \gamma_{oe} &= \text{arctg} \left( \frac{\text{ctg} \theta_o}{\sqrt{(\text{ctg}^2 \theta_o + 1)(\text{ctg}^2 \theta_o + \xi_0^2) + \text{ctg}^2 \theta_o}} \right), \\ \gamma_{eo} &= \text{arctg} \left( \frac{\xi \text{ctg} \theta_e}{\xi^3 \text{ctg}^2 \theta_e + \sqrt{(\xi^4 \text{ctg}^2 \theta_e + 1)(\xi^2 \text{ctg}^2 \theta_e + 1)}} \right). \end{aligned} \tag{2}$$

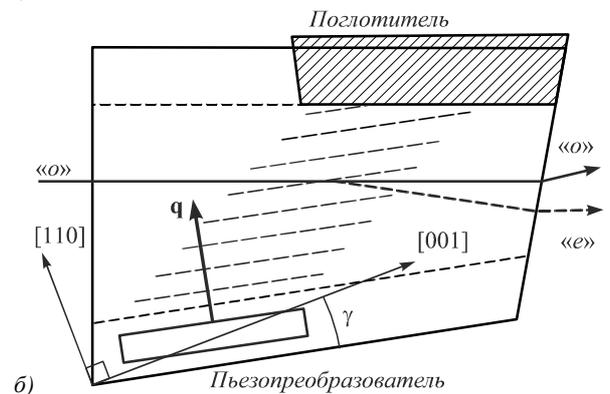
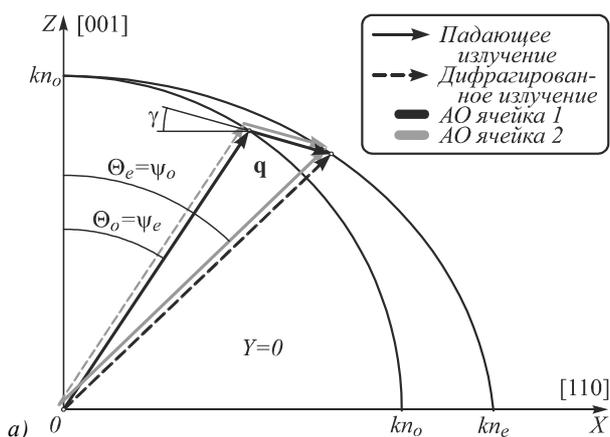


Рис. 1. Волновая диаграмма (а) и конструкция (б) используемых АО ячеек

Зависимости углов ориентации света  $\theta$  и звука  $\gamma$  при широкоугольной дифракции, описываемые выражениями (2), имеют вид немонотонных кривых, а потому для двух разных поляризаций направление распространения звука  $\gamma$  может быть одинаковым. Это позволяет использовать две идентичные АО ячейки, в которые свет должен направляться под углами  $\theta_o$  и  $\theta_e$ . На рис. 1б представлена схема такой ячейки на примере дифракции «о»-поляризованного света. Вторая ячейка полностью идентична и развернута в плоскости XZ на  $180^\circ$  так, что в нее попадает «е»-поляризованный свет, а выходит – «о»-поляризованный; таким образом, можно анализировать еще и состояние поляризации излучения, идущего от объекта.

Для установки были изготовлены две АО ячейки из оптически анизотропного кристалла  $\text{TeO}_2$ . Они имеют идентичную широкоугольную геометрию с углом распространения звука  $\gamma = 6^\circ$ , волновая диаграмма которой приведена на рис. 1а. Символом  $q$  на рисунке обозначен вектор звука, который направлен под углом  $6^\circ$  к оси  $OX$ . При этом в первую АО ячейку вводится «о»-поляризованное излучение под углом  $\theta_o = 12,2^\circ$ , а выходит необыкновенно («е») поляризованное излучение под углом  $\theta_e = 13,8^\circ$ , а во второй АО ячейке – наоборот. В АО ячейке возбуждается продольная акустическая волна, которая после отражения от грани кристалла преобразуется в поперечную, на которой впоследствии происходит дифракция света [11, 12].

Двухканальный монохроматор на основе таких АО ячеек имеет следующие характеристики: диапазон перестройки 440–760 нм, спектральное разрешение  $\delta\lambda = 2,5$  нм (на длине волны  $\lambda = 633$  нм), диапазон управляющих частот ультразвука 65–127 МГц, длина пьезопреобразователя – 9 мм, угловое поле зрения  $3^\circ \times 3^\circ$ , входные зрчки в виде вертикально вытянутых прямоугольников размерами  $6 \times 8$  мм<sup>2</sup>.

Принцип получения спектральных стереоизображений заключается в следующем. Изучаемый объект помещают в переднюю фокальную плоскость оптической системы, направляющей коллимированные пучки в два канала АО монохроматора, и два монохроматизированных ортогонально поляризованных световых пучка фокусируются на отдельных приемниках излучения. Два зарегистрированных изображения, образующих стереоскопическую пару, обрабатываются затем методами машинного зрения.

### 2. Экспериментальная установка

Ход оптических лучей в АО стереоспектрометре и схема управления приведены рис. 2а. Объектив 2 формирует пару световых пучков, переносящих изображение объекта 1 в двух разных ракурсах, и направляет их на вход двухканального АО монохроматора, который содержит две идентичных АО ячейки 4, 7, развернутые на  $180^\circ$ , и две пары скрещенных поляризаторов 3, 5 и 6, 8. Спектральная компонента света, удовлетворяющая условию Брэгга (рис. 1а), дифрагирует на акустических пучках в обеих АО ячейках с изменением плоскости линейной поляризации на ортогональную ( $o \rightarrow e$  и  $e \rightarrow o$ ) и небольшим отклонением. Недифрагированное излучение задерживается выходными поляризаторами 5, 8. После АО монохроматора два ортогонально поляризованных пучка, несущих стереоскопическое изображение объекта, отклоняются двумя разными гранями зеркальной призмы 9 и фокусируются объективами 10, 12 на матричных фотоприемниках 11, 13. Обработка пары зарегистрированных изображений осуществляется с помощью компьютера 18. Компьютер также обеспечивает общее управление системой, задавая режим работы и параметры АО монохроматора и приемников 11, 13. Длина волны излучения  $\lambda$ , выделяемая АО фильтрами в обоих каналах, определяется частотой  $f$  высокочастотного сигнала.

стотного (ВЧ) сигнала, вырабатываемого генератором 15 и усиленного парой ВЧ-усилителей 16, 17. Общий вид стереоспектрометра (без блока управления и компьютера) представлен на рис. 2б.

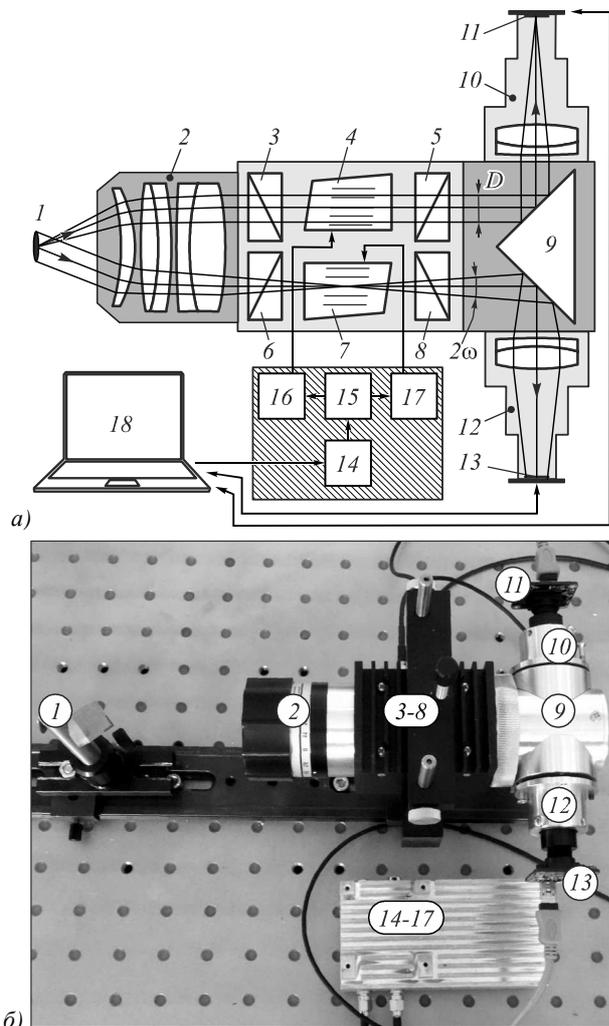


Рис. 2. Схема спектрометра (а) и внешний вид макета (б): 1 – исследуемый объект, 2 – входной объектив, 3, 5, 6, 8 – поляризаторы, 4, 7 – АО-ячейки, 9 – зеркальная призма, 10, 12 – объективы, 11, 13 – матричные приемники излучения, 14 – контроллер, 15 – ВЧ-генератор, 16, 17 – ВЧ-усилители, 18 – компьютер. Излучение распространяется через оба канала одинаково. Для наглядности в верхнем канале показан лишь осевой пучок лучей, а в нижнем канале показаны лишь главные лучи пучков, идущих из разных точек предмета. Также не показано отклонение пучков при дифракции в АО-ячейках

Для определения оптических характеристик системы был проведен описанный ниже расчет. Следует отметить, что, поскольку все оптические характеристики элементов в обоих каналах АО-стереоспектрометра одинаковы, расчет для одного канала справедлив в целом и для другого.

Исходными параметрами расчета являются полное угловое поле каждого канала  $2\omega$ , составлявшее  $3^\circ$  по обоим направлениям, а также размер входного зрачка и размеры приемника и отдельного пикселя. С учетом того, что входные зрачки АО-монохроматора пред-

ставляют собой прямоугольники  $6 \times 8 \text{ мм}^2$ , в дальнейших расчетах для простоты зрачок считался круглым с диаметром  $D = 8 \text{ мм}$ . В качестве матричных приемников использовались КМОП-сенсоры *Artina MT9V024* с размером пикселя  $6 \times 6 \text{ мкм}^2$  и числом пикселей  $744 \times 480$ , что соответствует размеру матрицы  $4,8 \times 3,6 \text{ мм}^2$  (диагональ  $1/3''$ ). Выходной объектив 10 с фокусным расстоянием  $f_{10} = 50 \text{ мм}$  обеспечивает поле зрения  $5,5^\circ \times 4^\circ$ , что превосходит поле зрения АО-монохроматора и гарантирует сбор всего прошедшего через него излучения.

Входной объектив 2 сделан сменным, чтобы позволять формировать изображение с различным линейным оптическим увеличением, величина которого составляет

$$\beta = f_{10} / f_2, \tag{3}$$

где  $f_2$  – фокусное расстояние входного объектива 2. Хотя для этого может быть использован стандартный фотообъектив, для обеспечения наилучшего качества изображения был использован специализированный высококачественный объектив. Чтобы перекрыть апертуры обоих каналов АО-монохроматора, его диаметр составил 20 мм. Линейное поле зрения спектрометра, равное максимальному размеру изображаемого объекта, при этом равно

$$2y = 2f_2 \operatorname{tg} \omega. \tag{4}$$

Важнейшим параметром оптической стереоскопической системы является глубина резко изображаемого пространства, которая может быть оценена из следующих соображений [6]. Смещение объекта вдоль оптической оси на величину  $z$  приводит к смещению его изображения на величину

$$z' = \alpha \cdot z, \tag{5}$$

где  $\alpha$  – продольное увеличение оптической системы спектрометра, равное  $\alpha = \beta^2$ . Это ведет к размытию изображения точки, составляющему

$$\delta' = z' D / f_{10}, \tag{6}$$

и ограничению предела разрешения в пространстве предметов

$$\delta = \delta' / \beta. \tag{7}$$

Таким образом, глубина резко изображаемого пространства определяется максимально допустимой величиной предела разрешения  $\delta$  и фокусным расстоянием входного объектива  $f_2$

$$z = \delta \cdot f_2 / D. \tag{8}$$

В приведенных соотношениях не учтено влияние хроматических aberrаций АО-фильтра. Однако спектральная полоса его пропускания достаточно узкая (2,5 мкм), что обеспечило хорошее пространственное разрешение прибора [13].

В макете стереоспектрометра использован входной объектив с фокусным расстоянием  $f_2 = 50 \text{ мм}$ , что обеспечивает следующие характеристики: линейное увеличение  $\beta = 0,5$ , поле зрения  $2y = 2,6 \text{ мм}$  и глубину

резко изображаемого пространства  $z = \pm 0,6$  мм (при допустимом пределе разрешения  $\delta = 0,1$  мм).

### 3. Измерение и обработка данных

В качестве объекта для тестирования стереоспектрометра был использован кубик размером 4,5 мм, поверхность которого содержит разноцветные квадратные секции. Из сравнения спектральных изображений на двух разных длинах волн  $\lambda_1 = 600$  нм и  $\lambda_2 = 750$  нм (рис. 3а) видно, что при перестройке по спектру контрастно отображаются границы между секциями. Спектральные характеристики всех точек изображения могут быть построены путем проведения серии измерений с минимальным шагом по спектру  $\delta\lambda$  с последующим точным совмещением спектральных снимков при условии предварительной калибровки спектральной чувствительности системы. Для получения объемных спектральных изображений необходимо провести ряд описанных ниже процедур.

Для реконструкции по паре изображений формы поверхности исследуемого объекта и построения его трехмерной модели в виде множества точек, образующих его поверхность, необходима предварительная пространственная калибровка спектрометра с целью определения характеристик каждого канала и параметров взаимной ориентации каналов [14–16].

Калибровочная матрица  $C$ , используемая при обработке измерений, определяется из серии изображений объемного тест-объекта, на поверхность которого нанесены специальные отметки, локальные координаты которых  $(M \equiv (X, Y, Z)^T)$  в системе координат, связанной с этим объектом, известны с высокой точностью. В качестве такого тест-объекта был использован стальной кубик размером 15 мм. На гранях кубика вблизи обращенной к спектрометру вершины

методом лазерной гравировки нанесена сетка из штрихов шириной 50 мкм с шагом 0,2 мм.

Определяя координаты  $(u, v)$  узлов этой сетки на зарегистрированном изображении, можно вычислить матрицу  $3 \times 3$  собственных характеристик  $A_1$  1-го канала и параметры  $(R', t')$ , характеризующие его ориентацию относительно глобальной системы координат, связанной с объектом, из следующей системы уравнений [17]

$$Z'v' = A_1 R' M + t' = C_1 \tilde{M}, \tag{9}$$

где  $v' = (u, v, 1)^T$  – вектор координат на изображении в 1-м канале,  $Z'$  – известное расстояние до объекта,  $t'$ ,  $R'$  – вектор смещения и матрица поворота, описывающие переход из глобальной системы координат, связанной с объектом, в систему координат первого канала;  $\tilde{M} = (X, Y, Z, 1)$ .

Компоненты найденной матрицы  $A_1$  определяются размерами пикселя фотоприемника, положением главной точки и фокусным расстоянием оптической системы 1-го канала. Аналогично определяя калибровочную матрицу  $C_2$  второго канала, а также его собственные параметры  $t'', R''$ , можно определить параметры взаимного расположения каналов:  $R = R'' R'^T$ ,  $t = -R'' R'^T t' + t''$ , что полностью завершает калибровку стереосистемы.

В ходе измерений и реконструкции исследуемого объекта находятся (в ручном или автоматическом режиме) сопряженные точки на двух изображениях и определяются их координаты  $v'$  и  $v''$ . После этого расстояния до объекта двух каналов спектрометра  $Z', Z''$  могут быть вычислены по следующим формулам [17]:

$$\begin{bmatrix} Z' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v'^T A_1^{-T} A_1^{-1} v' & -v'^T A_1^{-T} R'^T A_2^{-1} v'' \\ -v'^T A_1^{-T} R'^T A_2^{-1} v'' & v''^T A_2^{-T} A_2^{-1} v'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -v'^T A_1^{-T} R'^T \\ -v''^T A_2^{-T} \end{bmatrix} t. \tag{10}$$

После этого из соотношений

$$\begin{aligned} Z'v' &= A_1 M' \\ Z''v'' &= A_2 M'' \end{aligned} \tag{11}$$

можно определить трехмерные координаты  $M', M''$  рассматриваемой точки в системах координат двух каналов.

На рис. 3а приведены примеры выбора на стереоскопических изображениях 10 пар ( $v'$  и  $v''$ ) сопряженных точек, а на рис. 3б – результат вычисления описанным методом трехмерных координат  $(X, Y, Z)$  соответствующих точек в системе координат, начало отсчета которой совмещено с точкой  $O$ . Видно, что полученные значения близки к истинным, а восстановленные контуры повторяют реальные очертания тест-объекта.

Аналогичным образом может быть определена трехмерная структура поверхности объекта на снимках в любом спектральном интервале в пределах рабочего диапазона перестройки АО-монохроматора.

### 4. Обсуждение

Разработанная система получения спектральных стереоизображений позволяет выделить и зарегистрировать два пучка света, отображающих объект наблюдения в двух разных ракурсах и на произвольно задаваемой длине волны, причем пучки имеют взаимно ортогональную поляризацию. Если объект не имеет поляризационных особенностей, а потому изображение не зависит от поляризации, то по этой паре изображений методами машинного зрения можно восстановить трехмерный образ объекта. Проведенное исследование показало, что получаемая пара изображений имеет для этого достаточно высокое качество и достаточно высокую степень идентичности. Если же изображения в двух поляризациях имеют заметные различия, это может повлиять на качество реконструируемого изображения поверхности объектов. Однако даже и в этом случае совокупность ключевых точек позволяет реконструировать «каркас» поверх-

ности, что достаточно для определения общей формы наблюдаемого участка объекта.

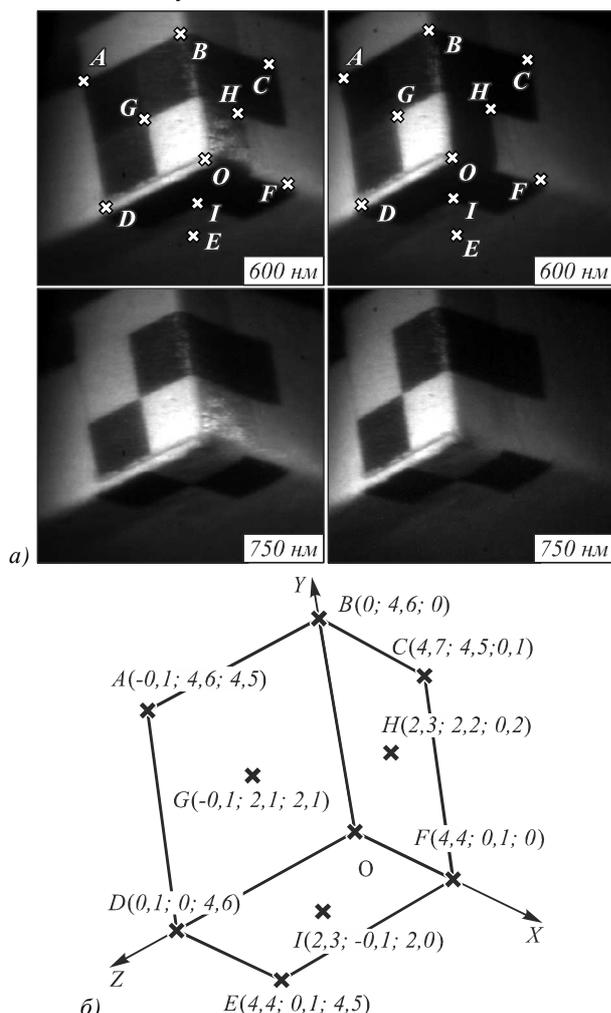


Рис. 3. Зарегистрированные спектральные изображения (а) и восстановленные по ним трехмерные координаты точек поверхности объекта (б)

Таким образом, для сильно поляризующих объектов созданная система фактически выполняет функцию спектрального поляриметра – она позволяет определить поляризационные характеристики разных точек объекта на произвольных длинах волн. При этом может быть реконструирована и форма объекта, если он имеет хорошо выраженные пространственные особенности (углы, ребра и т.п.) или спектрально-яркостные признаки (затененные углубления или сильно рассеивающие выступы, например, царапины). Во многих случаях, когда имеется априорная информация о свойствах объекта (многогранник, пузырь и др.), по ключевым точкам может быть реконструирована точная форма поверхности объекта. В этом случае можно одновременно определить пространственные, спектральные и поляризационные характеристики.

Следует также отметить, что при создании стереоспектрометра было решено несколько технических проблем [18]. Поскольку его схема основана на использовании двух АО-ячеек, каждая из которых является сложным активным устройством, необходимо

обеспечить, во-первых, идентичность их изготовления и сборки, во-вторых, их синхронизацию, в-третьих, проведение предварительной спектральной калибровки. Расхождение длины волны настройки каналов при подаче частоты от единого ВЧ-генератора ввиду различия их перестроенной характеристики не позволило бы получить контрастное изображение в двух каналах одновременно, а соответственно, стереоэффект.

### Заключение

Впервые разработана оптическая система, формирующая стереоскопические изображения микрообъектов в отдельных узкополосных спектральных каналах с высоким спектральным (порядка 2 нм) и пространственным ( $500 \times 500$  элементов) разрешением, позволяющая также анализировать состояние поляризации излучения, прошедшего от объекта. Система обладает малыми габаритами и не имеет подвижных элементов, а потому может использоваться в областях, где эти свойства принципиально важны, например, в экспресс-измерениях *in situ*.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 16-08-01278 и 16-07-00393).

### Литература

1. **Chang, I.C.** Hyperspectral imaging: techniques for spectral detection and classification / I.C. Chang. – Springer, 2003. – 370 p.
2. **Boas, D.** Handbook of biomedical optics / D. Boas, C. Pitris, N. Ramanujam. – CRC Press, 2011. – 831 p.
3. **Yoon, S.** Stereo spectral imaging system for plant health characterization/ S. Yoon, C. Thai // Proceedings of 2009 ASABE Annual International Meeting, Reno, Nevada, June 21 – June 24. - 096583. - DOI: 10.13031/2013.27167.
4. **Pozhar, V.** AOTF-based 3D spectral imaging system / V. Pozhar, A. Machihin // AIP Conference Proceedings. - 2012. – Vol. 1433(1). – P. 65-67. - DOI: 10.1063/1.3703140.
5. **Machikhin, A.S.** Stereoscopic 3-dimensional spectral imaging systems based on a single acousto-optic tunable filter / A.S. Machikhin, V.E. Pozhar // Journal of Physics: Conference Series. - 2015. - Vol. 661. - 012041.
6. **Бегунов Б.Н.** Теория оптических систем / Б.Н. Бегунов, Н.И. Закаэнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. – 3-е изд., перераб. и дополн. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с. - ISBN 5-217-01995-6.
7. **Goutzulis, A.** Design and fabrication of acousto-optic devices / A. Goutzulis, D. Rape. – NY: Marcel Dekker, Inc., 1994. - 520 p.
8. **Пожар, В.Э.** Акустооптические спектральные технологии / В.Э. Пожар, В.И. Пустовойт // Известия РАН. Серия физическая. – 2015. – Т. 79, № 10. – С. 1375-1380.
9. **Chang, I.C.** Analysis of non-collinear acousto-optic filters // Electronics Letters. - 1975. – Vol. 11(25-26). – P. 617-618. - DOI: 10.1049/el:19750470.
10. **Мачихин, А.С.** Передача изображений при широкоугольном акустооптическом взаимодействии / А.С. Мачихин, В.Э. Пожар // Квантовая электроника. - 2010. – Т. 40, № 9. – С. 837-841.
11. **Мазур, М.М.** Физические и технологические основы разработки акустооптических приборов: дис. ... докт. техн. наук: 01.04.01. - М.: НТЦ УП РАН, 2007. – 212 с.
12. **Polikarpova, N.V.** Development of acousto-optic devices based on transformation of acoustic waves / N.V. Polikarpova, V.B. Voloshinov, A.M. Reznikov // Physics of Wave Phenom-

- ena. - 2015. - Vol. 23, Issue 1. - P. 52-57. - DOI: 10.3103/S1541308X15010082.
13. **Волошинов, В.Б.** Влияние параметров широкопертурного акустооптического фильтра на качество обработанных изображений / В.Б. Волошинов, Д.В. Богомолов // Квантовая электроника. - 2006. - Т. 36, № 5. - С. 457-463.
  14. **Hartley, R.I.** Multiple View Geometry / R.I. Hartley, A. Zisserman. - Cambridge: Cambridge University Press, 2000. - 670 p.
  15. **Forsyth, D.A.** Computer Vision: a Modern Approach / D.A. Forsyth, J. Ponce. - Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2012. - 720 p. - ISBN: 978-0-13-608592-8.
  16. **Gorevoy, A.V.** Method to improve accuracy of the geometrical parameters measurement in stereoscopic AOTF-based spectral imagers / A.V. Gorevoy, A.S. Machikhin // Journal of Physics: Conference Series. - 2015. - Vol. 584(1). - 012004. - DOI: 10.1088/1742-6596/584/1/012004.
  17. **Грузман, И.С.** Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. - 168 с.
  18. **Мачихин, А.С.** Получение спектральных стереоизображений с электронной перестройкой по спектру и с поляризационным разделением / А.С. Мачихин, В.Э. Пожар // Письма в ЖТФ. - 2014. - Т. 40, № 18. - С. 58-65.

#### Сведения об авторах

**Мачихин Александр Сергеевич**, 1984 года рождения, в 2007 году окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН), ассистент МЭИ; область научных интересов: машинное зрение, видеоспектрометрия, акустооптика. E-mail: [aalexanderr@mail.ru](mailto:aalexanderr@mail.ru).

**Батшев Владислав Игоревич**, 1984 года рождения, в 2007 году окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук, доцент кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, научный сотрудник НТЦ УП РАН; область научных интересов: классическая оптика, видеоспектрометрия. E-mail: [batshev.vlad@gmail.com](mailto:batshev.vlad@gmail.com).

**Пожар Витольд Эдуардович**, 1958 года рождения, в 1981 г. окончил МФТИ, докт. физ.-мат. наук, зав. отделом НТЦ УП РАН, профессор кафедры физико-технических проблем метрологии МИФИ; область научных интересов: акустооптика, спектральные методы, фотоника. E-mail: [v\\_pozhar@rambler.ru](mailto:v_pozhar@rambler.ru).

**Мазур Михаил Михайлович**, 1947 года рождения, в 1970 г. окончил МФТИ, докт. техн. наук, зав. лабораторией ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»; область научных интересов: акустооптика, приборостроение. E-mail: [s-mmazur@mail.ru](mailto:s-mmazur@mail.ru).

ГРПТИ: 47.35.31

Поступила в редакцию 28 октября 2016 г. Окончательный вариант – 24 ноября 2016 г.

### ACOUSTO-OPTICAL FULL-FIELD STEREOSCOPIC SPECTROMETER FOR 3D RECONSTRUCTION IN AN ARBITRARY SPECTRAL INTERVAL

A.S. Machikhin<sup>1,2</sup>, V.I. Batshev<sup>1,3</sup>, V.E. Pozhar<sup>1,4</sup>, M.M. Mazur<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup> Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,

<sup>2</sup> National Research University "MPEI", Moscow, Russia,

<sup>3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,

<sup>4</sup> National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia,

<sup>5</sup> All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radioengineering Measurements (VNIIFTRI), Mendeleev, Moscow Region, Russia

#### Abstract

A problem of spectral narrowband 3D imaging in the visible spectral range is considered. A double-channel acousto-optical spectral system is developed to acquire stereoscopic images in cross-polarized optical beams. A prototype is presented. Some examples of stereoimages detected with the instrument are presented and a 3D image reconstructed on their basis is described.

**Keywords:** spectroscopy, acoustooptic, 3D imaging.

**Citation:** Machikhin AS, Batshev VI, Pozhar VE, Mazur MM Acousto-optical full-field stereoscopic spectrometer for 3d reconstruction in an arbitrary spectral interval. Computer Optics 2016; 40(6): 871-877. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-871-877.

**Acknowledgements:** The work was funded by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), Project No. 16-08-01278 and 16-07-00393.

#### References

[1] Chang IC. Hyperspectral imaging: techniques for spectral detection and classification. Springer; 2003.

[2] Boas D, Pitris C, Ramanujam N. Handbook of biomedical optics. CRC Press; 2011.

[3] Yoon S, Thai C. Stereo spectral imaging system for plant health characterization. Proc ASABE Annual Int Meeting

- 2009 Reno, Nevada, June 21 - June 24: 096583. DOI: 10.13031/2013.27167.
- [4] Pozhar V, Machihin A. AOTF-based 3D spectral imaging system. AIP Conf Proc 2012; 1433(1): 65-67. DOI: 10.1063/1.3703140.
- [5] Machikhin AS, Pozhar VE. Stereoscopic 3-dimensional spectral imaging systems based on a single acousto-optical tunable filter. J Phys: Conf Ser 2015; 661: 012041.
- [6] Begunov BN, Zakaznov NP, Kiryushin SI, Kuzichev VI. Optical instrumentation. Theory and design. Moscow: "MIR" Publishers; 1988.
- [7] Goutzulis A, Rape D. Design and fabrication of acousto-optic devices. New York: Marcel Dekker, Inc.; 1994.
- [8] Pozhar VE, Pustovoi VI. Acousto-optical spectral technologies. Bulletin of Russian Academy of Sciences. Physics 2015; 79(10): 1221-1226. DOI: 10.3103/S1062873815100202.
- [9] Chang IC. Analysis of non-collinear acousto-optic filters. Electron Lett 1975; 11(25). P. 617-618. DOI: 10.1049/el:19750470.
- [10] Machikhin AS, Pozhar VE. Image transformation caused by wide-angle acousto-optic interaction. Quantum Electronics 2010; 40(9): 837-841.
- [11] Mazur MM. Physical and technological basics of acousto-optic devices [in Russian]. Doctoral thesis. Moscow: "NTC UP RAN" Publisher; 2007.
- [12] Polikarpova NV, Voloshinov VB, Reznikov AM. Development of acousto-optic devices based on transformation of acoustic waves. Phys Wave Phen 2015; 23(1): 52-57.
- [13] Voloshinov VB, Bogomolov DV. Effect of the parameters of a wide-aperture acousto-optic filter on the image processing quality. Quantum Electronics 2006; 36(5): 457-463.
- [14] Hartley RI, Zisserman A. Multiple View Geometry. Cambridge: Cambridge University Press; 2000.
- [15] Forsyth DA, Ponce J. Computer Vision: a Modern Approach. Upper Saddle River: Prentice-Hall; 2012. ISBN: 978-0-13-608592-8.
- [16] Gorevoy AV, Machikhin AS. Method to improve accuracy of the geometrical parameters measurement in stereoscopic AOTF-based spectral imagers. Journal of Physics: Conference Series 2015; 584(1): 012004.
- [17] Gruzman IS, Kirichuk VS, Kosykh VP, Peretyagin GI, Spector AA. Digital image processing in information systems [in Russian]. Novosibirsk: "NGTU" Publisher; 2000.
- [18] Machikhin AS, Pozhar VE. Obtaining spectral stereo images with electronic spectral tuning and polarization separation. Tech Phys Lett 2014; 40(9): 803-806. DOI: 10.1134/S1063785014090247.

#### Authors' information

**Alexander Sergeevich Machikhin (b. 1984)** graduated from Bauman Moscow State Technical University (BMSTU) in 2007, PhD, Leading Researcher of Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of Russian Academy of Sciences (STC UI RAS), assistant of National Research University "MPEI". Research interests are machine vision, spectral imaging, acousto-optics. E-mail: [aalexanderr@mail.ru](mailto:aalexanderr@mail.ru).

**Vladislav Igorevich Batshev (b. 1984)** graduated from Bauman Moscow State Technical University (BMSTU) in 2007, PhD(Eng), Researcher of STC UI RAS, associate professor of Laser and Optoelectronic Systems department of BMSTU. Research interests are classical optics and spectral imaging. E-mail: [batshev.vlad@gmail.com](mailto:batshev.vlad@gmail.com).

**Vitold Eduardovich Pozhar (b. 1958)** graduated from Moscow Institute of Physics and Technology in 1981, chief of department of STC UI RAS, professor of Physical and Technical Problems in Metrology department of National Research Nuclear University "MEPhI". Research interests are acousto-optics, spectral analysis, and photonics. E-mail: [v\\_pozhar@rambler.ru](mailto:v_pozhar@rambler.ru).

**Mikhail Mikhailovich Mazur (b. 1947)** graduated from Moscow Institute of Physics and Technology in 1970, chief of department of All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio-Technical Measurements, Senior Researcher of STC UI RAS. Research interests are acousto-optics and instrument engineering. E-mail: [s-mmazur@mail.ru](mailto:s-mmazur@mail.ru).

*Received October 28, 2016. The final version – November 24, 2016.*