

## АКУСТООПТИЧЕСКИЙ МЕТОД СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2009 г. В. С. Анчуткин<sup>\*</sup>, канд. физ.-мат. наук; А. Б. Бельский<sup>\*</sup>, канд. техн. наук;  
В. Б. Волошинов<sup>\*\*</sup>, канд. физ.-мат. наук; К. Б. Юшков<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, г. Красногорск, Московская обл.

<sup>\*\*</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва

В работе рассмотрена система спектрального и поляризационного анализа изображений на основе перестраиваемого акустооптического фильтра. Использована особая геометрия дифракции Брэгга в парателлурите, при которой ортогонально поляризованные компоненты светового поля рассеиваются в противоположные дифракционные порядки. Для сравнения интенсивностей пучков с различной поляризацией применяется одновременная регистрация +1- и -1-го порядков дифракции.

Коды OCIS: 110.4234, 230.1040, 230.5440

*Поступила в редакцию 26.03.2009*

### 1. Введение

Известно, что акустооптические (АО) методы обработки оптических сигналов находят применение в оптике и спектроскопии [1, 2]. В частности, перестраиваемые АО фильтры позволяют обеспечить спектральную и пространственную фильтрацию световых пучков. Управление параметрами проходящего через фильтр излучения обеспечивается в режиме реального времени путем изменения характеристик управляющего высокочастотного (ВЧ) сигнала. В основе работы таких устройств лежит явление дифракции света на фазовых решетках, индуцированных ультразвуком в кристаллах. Если на фильтр падает световой пучок с широким спектром длин волн света  $\lambda$ , то в первом брэгговском дифракционном порядке оказывается сосредоточено узкополосное излучение в диапазоне  $\Delta\lambda$ . Частота радиосигнала, подаваемого на АО ячейку, определяет цвет пропускаемого излучения, а амплитуда управляющего сигнала определяет интенсивность проходящего света. Для обеспечения возможности обработки неколлимированных световых пучков и оптических изображений используется особенная геометрия дифракции Брэгга в кристаллах, называемая тангенциальной. Такая геометрия взаимодействия является широкоапертурной, поскольку дифракция света

может наблюдаться с высокой эффективностью (более 50%) в диапазоне углов падения света, достигающем нескольких десятков градусов [3]. Таким образом, становится возможным обеспечить спектральную фильтрацию двумерных оптических изображений.

Важным свойством дифракции в оптически анизотропных средах является зависимость условий фазового синхронизма от поляризации падающего электромагнитного излучения [1, 2]. Это означает, что при заданной частоте ультразвука углы Брэгга для обыкновенно и необыкновенно поляризованных волн в общем случае отличаются. Для устранения этого недостатка был предложен ряд оптических схем [4–7]. С другой стороны, на основе этого явления может быть осуществлен поляризационный анализ изображений [8]. Было обнаружено, что исследование поляризации отраженного света наряду с его спектральным составом оказывается полезным в задачах определения искусственных объектов на естественном фоне [9]. В работе исследована спектральная АО система обработки изображений в реальном времени, способная также регистрировать поляризацию падающего излучения. В системе применен перестраиваемый АО фильтр и две ПЗС-камеры, позволяющие одновременно регистрировать ортогонально поляризованные пучки на выходе АО ячейки.

## 2. Акустооптическая дифракция с пространственным разделением различных поляризаций света

### 2.1. Поляризационно-независимая геометрия брэгговской дифракции

Известно, что АО взаимодействие может происходить с высокой эффективностью при выполнении брэгговского условия фазового синхронизма [1, 2]. Для монохроматического света это условие связывает между собой угол Брэгга  $\theta$ , длину волны света  $\lambda$  и частоту ультразвука  $f$  и описывается уравнением, которое может быть получено с помощью векторных диаграмм взаимодействия, обуславливающих связь волновых векторов падающего и дифрагированного света ( $\mathbf{k}_i$  и  $\mathbf{k}_d$ ) с волновым вектором ультразвука  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{k}_i \pm \mathbf{K} = \mathbf{k}_d. \quad (1)$$

Здесь и далее индекс “ $i$ ” обозначает величины, относящиеся к световой падающей волне, а индекс “ $d$ ” – к дифрагированной. Знак “+” соответствует +1-му порядку дифракции, в то время как знак “-” берется для рассеяния света в -1-й порядок. В литературе [10] было показано, что в особых случаях условие (1) может выполняться одновременно как для обыкновенно, так и для необыкновенно поляризованного излучения. Тогда справедливы и уравнения

$$\mathbf{k}_{io} - \mathbf{K} = \mathbf{k}_{de}, \quad (2a)$$

$$\mathbf{k}_{ie} + \mathbf{K} = \mathbf{k}_{do}, \quad (2b)$$

где нижние индексы “ $o$ ” и “ $e$ ” соответствуют обыкновенно и необыкновенно поляризованным волнам. На рис. 1 представлены соответствующие диаграммы для положительного одноосного кристалла. Основные показатели преломления обозначены как  $n_o$  и  $n_e$ , а угол  $\alpha$  представляет собой угол среза плоскости пьезопреобразователя АО ячейки. Известно, что в приближении малого двулучепреломления ( $\Delta n \equiv n_e - n_o \ll n_o$ ) показатель преломления для необыкновенной волны может быть вычислен по формуле

$$n_i \approx n_o + \Delta n \sin^2(\theta + \alpha).$$

В этом случае условие Брэгга может быть записано как

$$f \approx \frac{V}{\lambda} \Delta n \frac{\sin^2(\theta + \alpha)}{\sin \theta}, \quad (3)$$

где  $V$  – фазовая скорость ультразвука, определяемая углом среза кристалла  $\alpha$ . Кроме этого,

в кристаллах упругие волны могут обладать значительным сносом энергии, характеризующимся углом  $\psi$  между фазовой и групповой скоростями.

### 2.2. Полоса пропускания АО фильтра

Из векторной диаграммы (1) можно найти полосу частот ультразвука  $\Delta f$ , соответствующую уровню коэффициента пропускания АО фильтра не менее -3 дБ [1], –

$$\Delta f = \frac{0,8V}{l_{PT}} (\text{tg}\psi + \text{ctg}\theta), \quad (4)$$

где  $l_{PT}$  – длина пьезоэлектрического преобразователя. Посредством условия Брэгга (3) величина  $\Delta f$  взаимосвязана с полосой пропускания фильтра [11]

$$\Delta \lambda = \frac{0,8\lambda^2 \cos \theta}{\Delta n l_{PT} \sin^2(\theta + \alpha)} (1 + \text{tg}\psi \text{tg}\theta). \quad (5)$$

Например, АО фильтр на основе парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ) с углом среза  $\alpha = 10^\circ$  и длиной пьезопре-

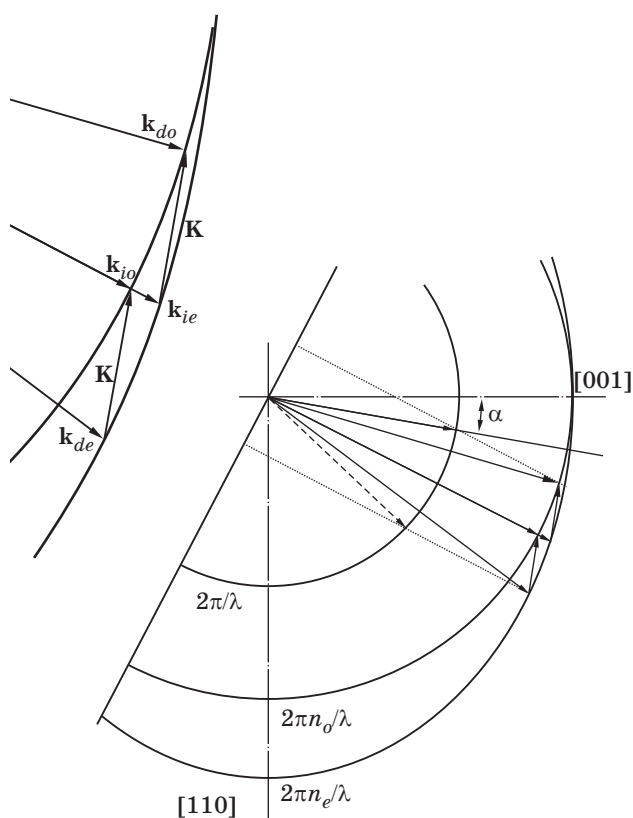
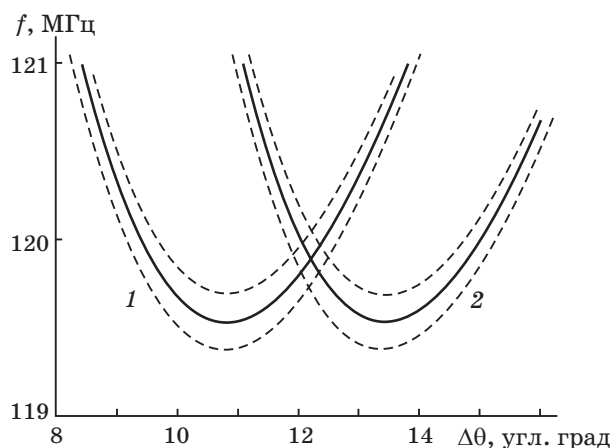


Рис. 1. Векторная диаграмма анизотропной брэгговской дифракции произвольно поляризованного света.

образователя  $l_{PT} = 1,2$  см обладает полосой пропускания  $\Delta\lambda = 15 \text{ \AA}$  на длине волны света  $\lambda = 0,63$  мкм, что соответствует полосе частот ультразвука  $\Delta f \approx 310$  кГц.

### 2.3. Пространственное разрешение

На рис. 2 представлены зависимости частоты ультразвука  $f$  от угла Брэгга  $\theta$  в кристалле парателлурита с углом среза  $\alpha = 10^\circ$ . Пунктирные линии обозначают границы области  $f \pm \Delta f/2$  в соответствии с уравнением (4), в которой эффективность дифракции превышает 50% для АО ячейки, имеющей длину пьезопреобразователя  $l_{PT} = 1,2$  см. Очевидно, что наибольшая угловая апертура дифракции наблюдается в точке локального минимума частоты ультразвука  $f_0 = f(\theta_0)$ . Также видно, что в точке пересечения ветвей этой характеристики, соответствующих различным поляризациям падающего света, реализуется геометрия рассеяния, представленная на рис. 2. В этой рабочей точке обычно поляризованный свет рассеивается в  $-1$ -й порядок в соответствии с уравнением (2а), а необыкновенно поляризованная волна испытывает дифракцию в  $+1$ -й порядок согласно (2б). Одновременная разнонаправленная дифракция наблюдается на частоте ультразвука  $f = 119,8$  МГц при угле Брэгга  $\theta = 12,4^\circ$ . Также видно, что угловая апертура дифракции в этой точке составляет  $\Delta\theta = 0,6^\circ$ , что значительно меньше, чем в широкоапертурной



**Рис. 2.** Частотно-угловая характеристика дифракции в парателлурите с углом среза  $10^\circ$  на длине волны света  $\lambda = 0,63$  мкм. Пунктирные кривые соответствуют границам полосы пропускания по уровню  $-3$  дБ. 1 – обыкновенная поляризация, 2 – необыкновенная поляризация.

геометрии при  $f_0 = 119,6$  МГц, однако достаточно для обработки изображений [4]

Число разрешаемых элементов в изображении может быть найдено как отношение угловой апертуры линейной системы  $\Delta\theta$  к угловому размеру минимального разрешаемого элемента  $\delta\theta$

$$N = \frac{\Delta\theta}{\delta\theta}. \quad (6)$$

Величина  $\delta\theta$  определяется дифракцией света на апертуре АО ячейки  $a$ , а также дополнительными хроматическими aberrациями, возникающими в процессе АО рассеяния света. Тем не менее при правильной конфигурации оптической системы, формирующей изображение, можно достичь дифракционного предела разрешения  $\delta\theta = 1,22\lambda/a$  [12, 13].

Для определения угловой апертуры АО взаимодействия удобно воспользоваться разложением частоты в ряд Тейлора по степеням угла Брэгга в окрестности локального минимума

$$f(\theta) = f_0 + \Phi_2(\theta - \theta_0)^2. \quad (7)$$

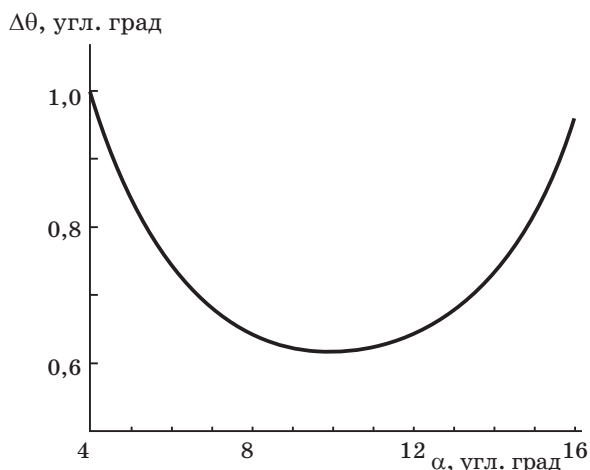
Здесь  $\Phi_2$  – квадратичный коэффициент разложения частоты в степенном ряду. Тогда угловую апертуру можно найти из соотношения

$$\Delta\theta = \frac{\Delta f}{\Phi_2 \mathcal{S}_{\text{dif}}}, \quad (8)$$

где угол дифракции определен из векторной диаграммы (1) в приближении малого двулучепреломления

$$\mathcal{S}_{\text{dif}} \approx \frac{\Delta n}{n_o} \sin^2(\theta + \alpha) \text{ctg} \theta. \quad (9)$$

Известно, что селективность АО дифракции определяется длиной области взаимодействия света и звука, которая в случае ортогональной геометрии взаимодействия пропорциональна длине пьезоэлектрического преобразователя. Из формул (4) и (5) видно, что полоса пропускания также зависит от угла среза кристалла  $\alpha$ . Очевидно, что угловая апертура взаимодействия также определяется этими параметрами АО ячейки. Из уравнений (4) и (8) следует, что величина  $\Delta\theta$  обратно пропорциональна длине пьезопреобразователя  $l_{PT}$ . В то же время зависимость  $\Delta\theta$  от  $\alpha$  оказывается более сложной, поскольку все величины, входящие в (8), зависят от угла среза кристалла. На рис. 3 представлена зависимость угловой апертуры от угла среза кристалла в точке пересечения частотно-угловых характеристик при фиксированной длине преобразователя  $l_{PT} = 1,2$  см. Видно, что при угле среза  $\alpha \approx 10^\circ$



**Рис. 3.** Зависимость угловой апертуры фильтра  $\Delta\theta$  от угла среза  $\alpha$  кристалла парателлуриата при длине пьезоэлектрического преобразователя  $l_{\text{ПЭ}} = 1,2$  см.

угловая апертура оказывается минимальной. Увеличение апертуры при малых углах среза вызвано уширением полосы пропускания фильтра, в то время как при больших углах среза сказывается уменьшение крутизны частотно-угловой характеристики по мере приближения к критическому углу среза  $19,7^\circ$  [14].

Очевидно, с точки зрения увеличения пространственного разрешения и снижения потребляемой мощности, которая растет с увеличением угла среза [1–2], целесообразно использовать АО фильтры с углом среза менее  $10^\circ$ . Тем не менее анализ выражения (5) показывает, что с уменьшением угла среза кристалла возрастает полоса пропускания фильтра. Таким образом, при выборе геометрии АО ячейки необходимо учитывать требования как к пространственному, так и к спектральному разрешению устройства. Согласно расчету при угле среза  $\alpha = 10^\circ$  угловая апертура составляет  $\Delta\theta \approx 0,6^\circ$ , что позволяет обрабатывать изображения с количеством элементов  $N \approx 10^2$  в красной области спектра. При более коротких длинах волн как пространственное, так и спектральное разрешение фильтра увеличиваются [15].

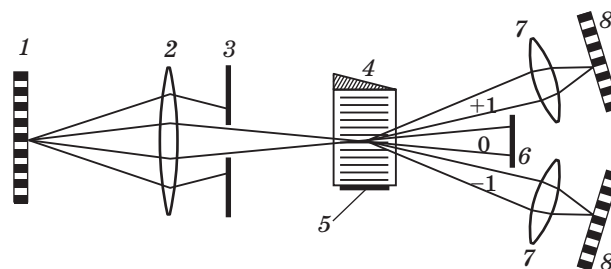
### 3. Оптическая система обработки изображений с анализом поляризации

#### 3.1. Принципиальная схема системы

Важным достоинством АО систем обработки изображений является простота оптической схемы. В общем случае установка состоит из

АО ячейки, ПЗС-камер для регистрации сигнала, а также диафрагм и линз, формирующих изображение. Отсутствие подвижных частей обеспечивает надежность функционирования и быстроту работы устройств. Для обработки неполяризованных изображений можно использовать оптическую схему с совмещением  $+1$ -го и  $-1$ -го порядков дифракции [4]. В настоящей работе мы, напротив, исследовали оптическую систему с разделением поляризаций и их одновременной регистрацией. Таким образом, была обеспечена возможность сравнения компонентов светового поля, имеющих различную поляризацию. Такой анализ позволяет определять искусственные объекты на природном фоне с большей точностью, чем простой анализ спектра отраженного излучения [9].

Общая схема разработанной системы представлена на рис. 4. Произвольно поляризованный свет от объекта 1 проходит через входную линзу 2 и фокусируется на АО ячейке 4, которая является управляемым дисперсионным элементом. Пространственный спектр пучков ограничен ирисовой диафрагмой 3. Отфильтрованные пучки проходят через систему выходных линз 7, проецирующих изображение на регистрирующие ПЗС-матрицы 8. Для снижения паразитных засветок и увеличения контрастности получаемых изображений в выходных каналах системы могут быть использованы поляризационные фильтры. Изображение в  $+1$ -м порядке формируется необыкновенно поляризованным компонентом падающего света, в то время как обыкновенно поляризованная составляющая исходного светового поля наблюдается в  $-1$ -м порядке. Сравнение изображений в  $+1$ -м и  $-1$ -м порядках дает информацию о состоянии поляри-



**Рис. 4.** Принципиальная схема системы спектрально-поляризационного анализа изображений. 1 – объект, 2 – входная линза, 3 – диафрагма, 4 – АО ячейка, 5 – пьезоэлектрический преобразователь, 6 – экран, 7 – выходные линзы, 8 – ПЗС-матрицы.

зации исходного света. Свет в нулевом порядке, не испытавший дифракцию, останавливается непрозрачным экраном  $b$  для исключения паразитных засветок полезного сигнала.

Перестройка длины волны пропускания АО ячейки достигается за счет изменения частоты электрического сигнала, подаваемого на выводы пьезоэлектрического преобразователя. Таким образом, анализ поляризации излучения можно осуществлять при одновременном сканировании излучения по длинам волн.

Отметим, что при необходимости регулирования интенсивности дифракционных пучков осуществляется традиционным способом – посредством управления амплитудой электрического сигнала. Следовательно, возможна электронная регулировка коэффициента пропускания АО ячейки  $T = (I_{+1} + I_{-1})/I$ , где  $I_{+1}$ ,  $I_{-1}$  – интенсивности световых пучков в +1-м и –1-м дифракционных порядках,  $I$  – интенсивность падающего пучка. Очевидно, что амплитудная модуляция электрического сигнала приводит к соответствующей модуляции интенсивностей дифрагированных световых пучков, что на практике обеспечивает улучшение отношения сигнал/шум АО фильтра.

Выбранная геометрия хода падающего светового пучка в АО ячейке обеспечивает дифракцию оптических пучков с широкими (вплоть до нескольких десятков угловых градусов) внешними оптическими апертурами. Однако реальная апертура АО ячейки ограничена значением  $\Delta\theta \approx 9^\circ$ . При больших значениях апертур на выходе АО ячейки происходит частичное наложение проходящего (нулевой порядок дифракции) и дифрагированных световых пучков и разделение этих пучков становится затруднительным.

### 3.2. Характеристики АО ячейки

Спектральный рабочий диапазон и основные параметры АО ячейки из различных материалов представлены в таблице.

Разработанный АО фильтр был изготовлен из монокристаллического парателлуриата с углом среза  $\alpha = 10^\circ$  относительно кристаллографической оси [110]. Фазовая скорость ультразвука в выбранном направлении равняется  $V = 710$  м/с, а угол сноса акустической энергии достигает значения  $\psi = 54^\circ$ . Время прохождения ультразвукового импульса через апертуру фильтра  $a = 0,7$  см составляет 10 мкс, что определяет быстродействие устройства. Широкополосное электрическое согласование пьезопреобразователя из ниобата лития было выполнено в диапазоне частот 75–180 МГц (по уровню –3 дБ), что соответствует оптическим длинам волн от 450 до 950 нм. При длине пьезопреобразователя  $l_{\text{PT}} = 1,2$  см полоса пропускания (5) составила  $\Delta\lambda = 16 \text{ \AA}$  на длине волны  $\lambda = 633$  нм, что соответствует спектральному разрешению  $R = \Delta\lambda/\lambda^2 \approx 40 \text{ см}^{-1}$ . При управляющей мощности высокочастотного сигнала 0,2 Вт интенсивность дифрагированного света на длине волны  $\lambda = 0,63$  мкм достигала 96% от интенсивности падающего света.

## 4. Заключение

В оптических многоспектральных и гиперспектральных системах, предназначенных для съемки земной поверхности из космоса, спектральная селекция излучения может осуществляться призмой (клиновой фильтр), дифракционной решеткой, интерферометром,

Спектральный рабочий диапазон и основные параметры АО ячейки из различных материалов

Диапазон перестройки, мкм	$\Delta\lambda$ , нм	T, %	Апертура		P, Вт	Материал
			$\Delta\theta$ , угл. град	$a \times b$ , см		
0,25–0,45	0,6	60	2	0,7×1,0	1,0	KDP
0,48–0,67	0,9	30	9	0,4×0,8	2,0	CaMoO <sub>4</sub>
0,35–0,50	0,9	90	5	0,6×1,0	0,6	TeO <sub>2</sub>
0,42–0,88	4,0	95	4	1,5×2,0	0,9	TeO <sub>2</sub>
0,77–2,10	12	93	4	1,5×2,0	1,5	TeO <sub>2</sub>
1,8–4,4	70	50	4	1,5×2,0	1,4	TeO <sub>2</sub>
1,5–4,6	10	50	8	0,6×1,2	2,0	TeO <sub>2</sub>



интерференционными светофильтрами и перестраиваемым жидкокристаллическим фильтром [16]. Выбор того или иного способа спектральной селекции излучения определяется назначением оптоэлектронного устройства съемки, его конструктивными особенностями и условиями эксплуатации на борту носителя.

Технические решения с использованием вышеуказанных элементов характеризуются достаточной сложностью конструкции, высокой стоимостью, большими массами и габаритами, а также и высоким энергопотреблением соответствующего узла спектральной селекции излучения.

В работе предложен новый подход к решению проблемы многоспектральной и гиперспектральной селекции излучения, базирующийся на использовании дифракции света на фазовых решетках, индуцированных ультразвуком в двулучепреломляющих кристаллах. Указанный эффект дает возможность для каждой из выделенных фильтром длин волн разделить неполяризованный и неколлимированный входной световой луч на два луча с ортогональными направлениями поляризации, отклоняющимися в противоположные (+1 и -1) дифракционные порядки.

К преимуществам предлагаемого технического решения можно отнести быструю электронную перестройку по длинам волн, относительную простоту его конструкции, высокую надежность и возможность улучшения чувствительности и обнаружительной способности оптоэлектронного устройства съемки за счет анализа и обработки ортогонально поляризованных пучков на выходе перестраиваемого акустооптического фильтра (ПАОФ) на базе АО ячейки.

Следует отметить, что в отличие от России за рубежом ПАОФ (без разделения излучения по поляризации) находят широкое практическое применение. К числу интересных примеров можно отнести четырехканальный акустооптический спектрометр фирмы "BAE SYSTEMS", разработанный в рамках программы "Космический телескоп Гершеля" (Herschel Space Telescope) по заказу Европейского космического агентства (European Space Agency (ESA)). Конструкция устройства удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системам и приборам космического базирования (space-qualified design) и, в частности, следующим условиям эксплуатации: случайные вибрации по 3 осям – 14,1 g (RMS); термоциклирование, 12 циклов – от +65 °C до -37 °C; статическое ускорение по 3 осям – 11,8 g [17].

Этот пример иллюстрирует реальные возможности использования ПАОФ в качестве фильтрующего элемента при спектральной селекции излучения в оптоэлектронных устройствах космического базирования, входящих в состав гиперспектральной аппаратуры для съемки земной поверхности.

В [18] отмечено, что применение методов поляризационного анализа в видимом и длинноволновом ИК диапазонах спектра позволяет повысить контраст объектов искусственного происхождения (с размерами от долей метра до нескольких десятков метров) на фоне естественной подстилающей поверхности земли. Таким образом, актуальность и необходимость разработки направления, связанного с использованием предлагаемого технического решения при создании гиперспектральной аппаратуры для дистанционной съемки земной поверхности, не вызывает сомнений.

Перспективным направлением использования предлагаемого ПАОФ может оказаться его применение и в аппаратуре для гиперспектрального анализа изображений с целью контроля чистоты и качества продуктов питания [19–22]. Этот метод обладает также большими потенциальными возможностями в задачах обнаружения генетически модифицированных продуктов питания, публикации о работах в этом направлении появились совсем недавно [23–24].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балакий В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 289 с.
2. Xu J., Stroud R. Acousto-Optic Devices. N.Y.: Wiley, 1992. 652 p.
3. Chang I.C. Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25. № 7. P. 370–392.
4. Волошинов В.Б., Молчанов В.Я., Бабкина Т.М. Акустооптический фильтр неполяризованного электромагнитного излучения // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 9. С. 93–98.
5. Антонов С.Н. Акустооптические устройства управления неполяризованным светом и модуляторы поляризации на основе кристалла парателлуриата // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 10. С. 84–89.
6. Pustovoit V. I., Pozhar V. E., Mazur M.M., Shorin V.N., Kutuza I.B., Perchik A.V. Double-AOTF spectral imaging system // Proc. SPIE. 2005. V. 5953. P. 200–203.
7. Магдич Л.Н., Юшков К.Б., Волошинов В.Б. Широкоапертурная дифракция неполяризованного излучения в системе из двух акустооптических

- фильтров // Квант. электр. 2009. Т. 39. № 4. С. 347–352.
8. *Voloshinov V.B., Molchanov V.Ya., Mosquera, J.C.* Spectral and polarization analysis of optical images by means of acousto-optics // *Opt. and Laser Tech.* 1996. V. 28. № 2. P. 119–127.
  9. *Gupta N., Denes, L., Gottlieb M., Suhre D.R., Kaminsky B., Metes P.* Object detection with a field-portable spectropolarimetric imager // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. № 36. P. 6626–6632.
  10. *Voloshinov V.B., Molchanov V.Ya.* Acousto-optical modulation of radiation with arbitrary polarization direction // *Opt. and Laser Tech.* 1995. V. 27. № 5. P. 307–313.
  11. *Gupta N., Voloshinov V.B.* Development and characterization of two-transducer imaging acousto-optic tunable filters with extended tuning range // *Appl. Opt.* 2007. V. 46. № 7. P. 1081–1088.
  12. *Suhre D.R., Denes L.J., Gupta N.* Telecentric confocal optics for aberration correction of acousto-optic tunable filters // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. № 6. P. 1255–1260.
  13. *Voloshinov V.B., Linde B., Yushkov K.B.* Improvement in performance of a TeO<sub>2</sub> acousto-optic imaging spectrometer // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2007. V. 9. № 4 P. 341–347.
  14. *Волошинов В.Б., Москера Х.С.* Широкоапертурное акустооптическое взаимодействие в двулучепреломляющих средах // *Опт. и спектр.* 2006. Т. 101. № 4. С. 675–682.
  15. *Suhre D.R., Gottlieb M., Taylor L.H., Melamed N.T.* Spatial resolution of imaging noncollinear acousto-optic tunable filters // *Opt. Eng.* 1992. V. 31. № 10. P. 2118–2121.
  16. Научно-технический справочно-аналитический Ежегодник “Космическая съемка Земли” / Под ред. Ю.А. Подъездкова. М.: Радиотехника, 2008. В. 1–5.
  17. BAE SYSTEMS Advanced Technology Center. Capability Brochure № 448. Four Channel Space Qualified Bragg Cell. Issue № 1 / Date: 16 March 2005.
  18. *Schott J.R.* Fundamentals of Polarimetric Remote Sensing. N.Y.: SPIE Press, 2009. V. TT81. 268 p.
  19. *Kim M.S., Lefcourt A.M., Chao K., Chen Y.R., Kim I., Chan D.E.* Multispectral detection of fecal contamination on apples based on hyperspectral imagery: Part I. Application of visible and near-infrared reflectance imaging // *Trans. ASAE.* 2002. V. 45. № 6. P. 2027–2037.
  20. *Heitschmidt G.W., Lawrence K.C., Windham W.R., Park B., Smith D.P.* Improved imaging system for fecal detection // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5587. P. 101–111.
  21. *Nakariyakul S., Casasent D.P.* Fusion algorithm for poultry skin tumor detection using hyperspectral data // *Appl. Opt.* 2007. V. 46. № 3. P. 357–364.
  22. *Nakariyakul S., Casasent D.P.* Hyperspectral waveband selection for contaminant detection on poultry carcasses // *Opt. Eng.* 2008 V. 47. № 8. P. 087202-1–087202-9.
  23. *Nansen C., Kolomiets M., Gao Xiquan* Considerations Regarding the Use of Hyperspectral Imaging Data in Classifications of Food Products, Exemplified by Analysis of Maize Kernels // *J. Agric. Food Chem.* 2008. V. 56. № 9. P. 2933–2938.
  24. *Savage L.M.* Breaking down corn improves hyperspectral image analysis // *Photonics Spectra.* June 2008. P. 103.