

## 23 Формирование контрастных изображений заданных объектов акустооптическим гиперспектрометром путем выборочной спектральной регистрации

© В.В. Шипко<sup>1,2</sup>, Е.А. Самойлин<sup>1</sup>, В.Э. Пожар<sup>2</sup>, А.С. Мачихин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил „Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина“, 394064 Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 117342 Москва, Россия

e-mail: shipko.v@bk.ru

Поступила в редакцию 28.06.2022 г.

В окончательной редакции 21.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Представлена методика выбора положения наиболее информативных спектральных каналов при использовании акустооптического гиперспектрометра в режиме выборочной спектральной регистрации. Разработанная методика позволяет выбрать спектральные каналы, в которых наблюдается максимальный контраст объектов на некотором фоне при условии, что спектральные свойства их известны. Результаты экспериментальных исследований методики подтверждают повышение контраста по сравнению с панхроматическим и с гиперспектральным режимами съемки во всем оптическом диапазоне. Выбор спектральных каналов по представленной методике может быть использован как для формирования функций пропускания в многооконном акустооптическом гиперспектрометре, так и для быстрого формирования высококонтрастных цветосинтезированных изображений.

**Ключевые слова:** гиперспектральные изображения, спектральный контраст, цифровая обработка изображений, акустооптический фильтр, спектральная плотность энергетической яркости.

DOI: 10.21883/OS.2022.10.53633.3873-22

### Введение

В последнее время наблюдается интенсивное развитие средств дистанционного зондирования в направлении создания гиперспектральных (ГС) систем. Современные образцы гиперспектральной аппаратуры охватывают видимый и инфракрасный спектральный диапазоны с формированием сотен спектральнональных изображений со спектральным разрешением в единицы нанометров [1,2]. Обработка ГС изображений позволяет проводить дешифрирование и распознавать объекты на основе анализа их спектров. Однако в ряде задач информации о спектрах может быть недостаточно. В таком случае осуществляют визуализацию ГС изображений, позволяющую использовать пространственные признаки при дешифрировании. Рассматривать последовательно все спектральные изображения — задача трудоемкая и неэффективная. В основном эта задача решается на этапе постобработки уже сформированного ГС изображения путем синтеза нового изображения, например, на основе метода выделения главных компонент [3] или визуализации по некоторым мерам сходства с эталоном [4]. Также получил распространение метод [5], в котором совокупность спектральнональных полутоновых изображений преобразуется в одно изображение в псевдоцвете. Для этого из всей совокупности спектральных каналов выбирают

три канала и, представляя данные, соответственно, в виде красной, зеленой и синей составляющих, получают RGB-изображение (цветное изображение в естественных цветах). Поскольку в этом методе не предусмотрено использование какой-либо дополнительной информации, повлиять на результат визуализации можно, выбирая тот или иной вариант раскраски. Вариантов такой раскраски может быть множество. Большинство рассмотренных методов используют полный объем сформированного ГС изображения и требуют значительных вычислительных и временных ресурсов, что ограничивает их применение в задачах оперативного мониторинга.

Экспериментальные исследования информационного содержания различных ГС изображений показывают, что наиболее ценная для различных тематических задач информация сосредоточена, как правило, в нескольких спектральных каналах [6,7]. Данное обстоятельство дает основу для сокращения массива информации, используемой для различения объектов известного спектрального состава. При обработке ГС изображений для экономии времени и вычислительных операций желательно заранее отобрать наиболее информативные спектральные каналы. Более того, это необходимо делать в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, что имеет место на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах.

Особенно эффективен этот подход в случае, когда регистрация ГС данных ведется посредством программно перестраиваемых оптических фильтров — акустооптических (АО) [2]. Эти фильтры используют динамические дифракционные решетки, возбуждаемые акустической ультразвуковой волной, и способны осуществлять спектральную фильтрацию световых пучков без существенных искажений переносимых ими изображений. В этом случае можно сократить не только объем обрабатываемой информации, но и объем регистрируемых данных. Это позволяет радикально сократить время регистрации, необходимое для выполнения задачи различения (распознавания) данных. Сокращение составляет отношение общего числа регистрируемых спектральных каналов прибора к числу информативных каналов ( $N_{\text{gen}}/N_{\text{inf}}$ ) и может достигать для типичных АО фильтров 2-х порядков [8]. Особенно эффективен этот подход при анализе линейчатых спектров с высокой степенью разреженности (sparse spectra), что характерно, например, для задач газоанализа [9,10]. В задачах наблюдения подстилающей поверхности спектры, однако, непрерывны, что с одной стороны не позволяет отобрать информативные точки автоматически, а с другой, создает условия, при которых устранение однородной или плавной составляющей спектра („фона“) заметно повышает контраст изображения.

Целью выбора наиболее информативных спектральных каналов в задачах обработки и анализа ГС изображений объектов с известными спектральными характеристиками является существенное ускорение и упрощение процедуры получения ГС данных, в результате чего можно получать некоторый набор изображений, обеспечивающий решение поставленной тематической задачи (обнаружение и распознавание объектов разных классов) с достаточно высоким показателем качества.

Известно множество различных алгоритмов и методик выбора наиболее информативных спектральных каналов из совокупности всех спектральных каналов ГС изображения [6,7,11], при этом многие из них производят оценку информативности для объектов определенных классов без учета фона, который может быть достаточно близок по спектральному составу к объекту. В этом случае объект и его фон могут быть классифицированы как единая сигнатура. При этом важной задачей оперативного мониторинга является визуализация искомого объекта с высоким контрастом с целью их эффективно обнаружения и распознавания.

Реализация выборочной спектральной регистрации [12] при ГС съемке осуществима с помощью перестраиваемых АО фильтров. В некоторых современных АО фильтрах реализуются новые функции, такие как управление шириной спектрального окна или многооконный режим спектральной фильтрации [13], которые также могли бы быть использованы для повышения контраста, но эти возможности в настоящей работе не рассматриваются. Идея выборочной спектральной регистрации, называемая также

фрагментарной спектральной регистрацией (Fragmentary Spectrum Registration [10]), описана в общем виде [14] и анализировалась либо в особых предположениях [12], либо без регистрации пространственных распределений в работах [8,10]. Таким образом, определение подхода к оптимальному выбору ограниченного количества зон (линий) регистрации спектров различных объектов для задач контрастной „визуализации“ объектов на различном фоне представляет интерес. При этом будем считать, что определены и известны классы искомого объекта и фонов и их спектральные характеристики.

## Основа метода

Здесь описаны принцип работы АО гиперспектрометра и алгоритм выбора спектральных каналов. В основе прибора лежит спектральная узкополосная фильтрация оптического излучения в АО фильтре (рис. 1, *a*). Объектив 1 формирует световой пучок, переносящий изображение объекта на вход АО фильтра. Выделенная входным поляризатором 2 линейно поляризованная спектральная компонента падающего света  $\mathbf{k}_i$ , удовлетворяющая условию дифракции Брэгга  $\mathbf{k}_d = \mathbf{k}_i + \mathbf{q}$  [15], дифрагирует на бегущей акустической волне  $\mathbf{q}$  в АО ячейке 3 с изменением плоскости линейной поляризации света на ортогональную ( $o \rightarrow e$  или  $e \rightarrow o$ ) и небольшим отклонением направления распространения ( $\mathbf{k}_i \rightarrow \mathbf{k}_d$ ). Недифрагированное излучение задерживается выходным поляризатором 4, скрещенным с входным, а дифрагированное излучение фокусируется объективом 5 на матричное фотоприемное устройство 6. Длина волны  $\lambda$  последнего определяется частотой  $f$  высокочастотного сигнала, который подается на пьезопреобразователь АО фильтра и создает в нем динамическую объемную дифракционную решетку.

В настоящей работе использовался широкоапертурный АО фильтр на основе ячейки из кристалла  $\text{TeO}_2$  со срезом в плоскости  $(1\bar{1}0)$ . Угол среза составляет  $7^\circ$ . Зависимость выделяемой им длины волн  $\lambda$  от частоты ультразвука  $f$  представлена на рис. 1, *b*.

Для выбора наиболее информативных спектральных каналов для гиперспектрометров на основе АО фильтров необходима априорная информация о спектре искомого объекта. Например, в этом качестве могут быть использованы спектры излучения объектов и фона, выражаемые в единицах спектральной плотности энергетической яркости. При этом значения яркости представляются в  $k$ -разрядном цифровом виде  $L_n^\alpha \in [0, \dots, 2^k - 1]$  на множестве длин волн  $\lambda$ ,  $n = 1, \dots, N$  — номер спектрального канала,  $\alpha$  — символ, характеризующий номер объекта (o) или фона (b). Эта информация в виде списка сформированных эталонных спектральных сигнатур должна быть получена на предварительном этапе и при необходимости скорректирована в процессе съемки. Так как необходимо получить максимально контрастное изображение искомого объекта на определенном

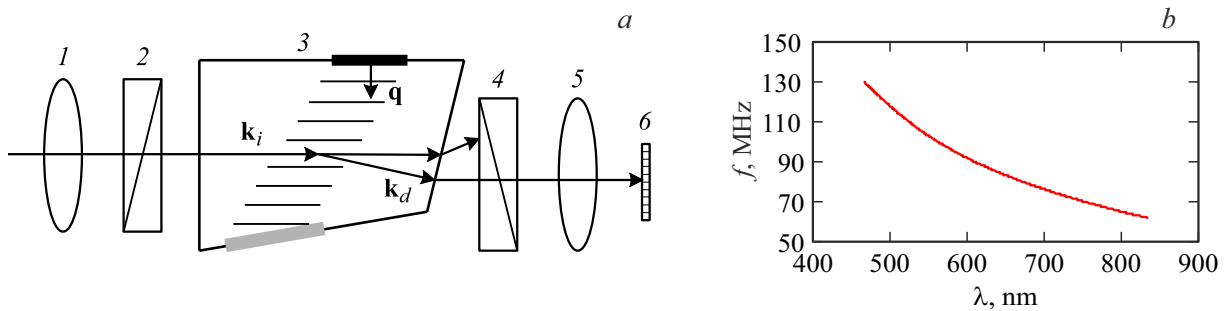


Рис. 1. Схема АОФ (а) и его перестроенная кривая (b).

фоне, в качестве критерия их различимости естественно использовать модуль разности спектральной плотности энергетической яркости объекта и фона на каждой  $n$ -й длине волны  $G_n = |L_n^o - L_n^b|$ . Тогда методика выбора наиболее информативных спектральных каналов будет состоять из следующих шагов.

**Шаг 1.** Выбор пары спектров: объекта  $L_n^o$  и фона  $L_n^b$ . Вычисление по всем длинам волн абсолютной величины разности значений спектральной яркости спектров  $G_n$  объекта и фона и определение массивов локальных максимумов  $\lambda_m$  ( $m = 1, \dots, M$ ) функции  $G_n$ .

**Шаг 2.** Определение полной совокупности всех локальных максимумов  $\{\lambda_m\}$  путем перебора всех попарных сочетаний  $L_n^o$  и  $L_n^b$ .

**Шаг 3.** Отбор из этой совокупности наиболее информативных длин волн  $\lambda_p$  ( $p = 1, \dots, P$ ) по критерию  $G_p \geq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — заданное пороговое значение, выбираемое из условия, чтобы каждая пара спектров объекта и фона была представлена хотя бы одной длиной волны.

Альтернативный вариант предусматривает отбор в каждой паре спектров объекта и фона некоторого небольшого числа информативных линий и формирование из них окончательного множества, то есть перестановку шагов 2 и 3. В зависимости от этого линии будут общие для всего класса или индивидуальные для каждой пары объект/фон.

**Шаг 4.** Сформированное для объектов и фонов множество информативных спектральных точек  $\lambda_p$  используют в зависимости от задачи для формирования (последовательно или одновременно)  $P$  частотных сигналов высокочастотного генератора  $f_p$  для настройки АО фильтра на выбранные длины волн  $\lambda_p$ .

Этот метод позволяет получить несколько изображений (или одно „полихроматическое“ в многооконном режиме [13]), соответствующих наибольшим значениям контраста объекта на фоне из выбранных классов. Физическими эффектами, которые могут осложнить реализацию метода, являются возможные погрешности спектральной адресации АО фильтра, вызываемые его тепловым нагревом и соответствующим сдвигом перестроенной характеристики, и вариации формы спектров объектов и фонов, связанные с условиями наблюдения.

Влияние этих факторов будет рассмотрено в отдельной работе.

## Экспериментальная реализация

Для исследований предложенной методики формирования контрастных полутоновых и цветных изображений по наиболее информативным спектральным каналам была собрана экспериментальная установка (рис. 2).

В состав основного оборудования входит галогеновая лампа мощностью 150 W, акустооптический гиперспектрометр, разработанный в Научно-технологическом центре уникального приборостроения РАН, предназначенный для регистрации спектральных изображений в диапазоне 450–850 nm, дифракционный спектрометр, использовавшийся для получения эталонных спектров с высоким разрешением по длине волны (в диапазоне 450–850 nm), компьютер со специализированным программным обеспечением.

Тестирование проводилось в рамках задачи обнаружения маскировочной ткани на естественном фоне: луговой траве и песчаной почве. Коэффициенты спектральной яркости  $r_n$  объектов и фонов, полученные дифракционным спектрометром высокого разрешения приведены на рис. 3, которые вычислялись как отношение спектральной яркости снимаемого объекта/фона  $L_n^a$  к спектральной яркости, равномерно освещенной белой матовой поверхности.

В соответствии с описанной выше методикой первым шагом было формирование для каждой пары объект/фон массива спектральных точек  $\{\lambda_m\}$ , полученных по измерениям дифракционного спектрометра. Число точек в массиве зависит от задаваемого масштаба поиска локальных максимумов, и для исследуемых тестовых образцов достаточно приемлемым оказался масштаб размером в 60 спектральных точек (рис. 4). Из полученных оценок локальных максимумов для каждой пары объект/фон были выбраны три спектральных канала  $\lambda_p$  ( $p = 1, 2, 3$ ), соответствующие наибольшим значениям  $G_n$ . Именно на этих длинах волн проводились измерения АО гиперспектрометром и были получены спектральные изображения  $L_{i,j,p}$ , где  $i, j$  — индексы строк и столбцов изображения. Кроме этого, были

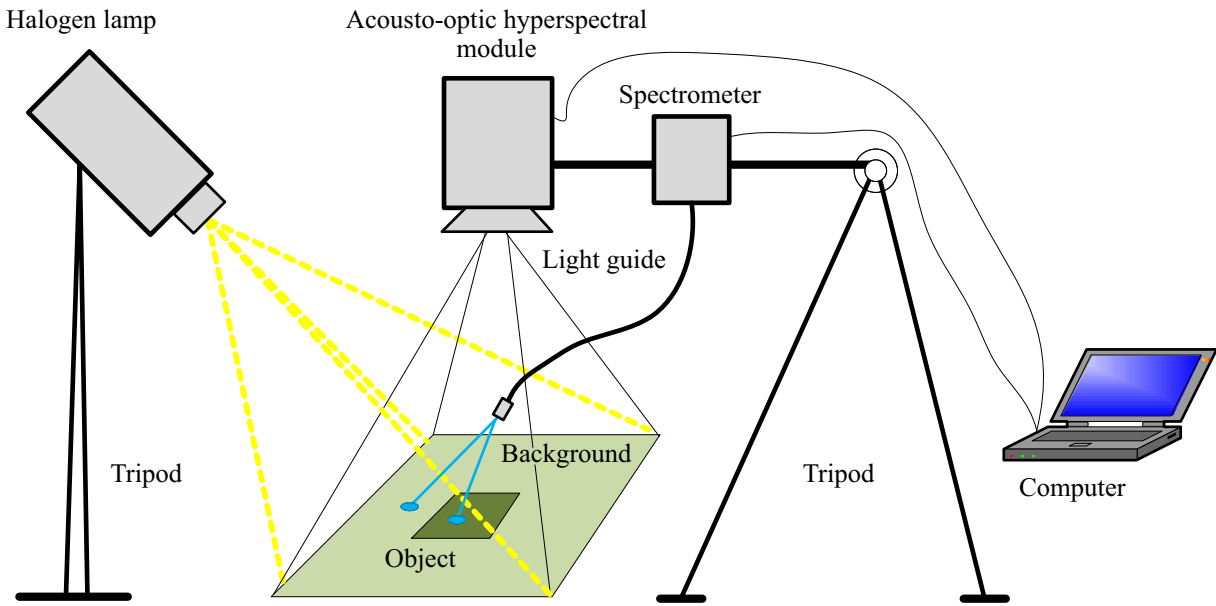


Рис. 2. Схема эксперимента.

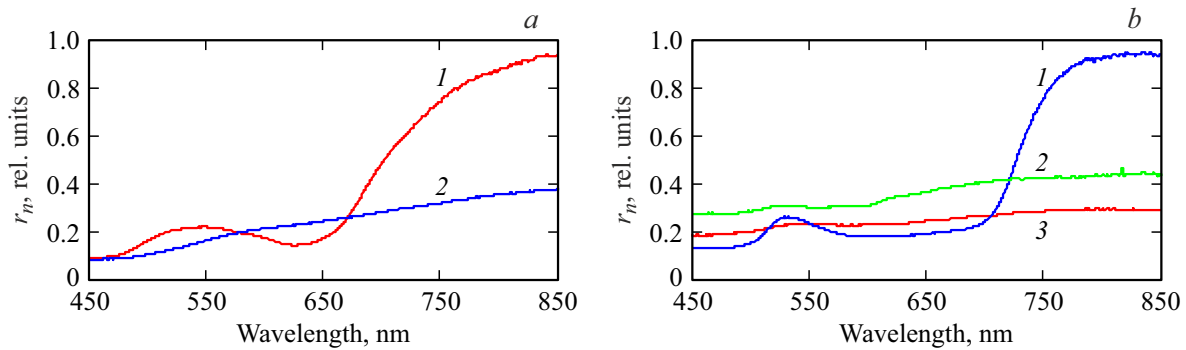


Рис. 3. (а) Спектры фонов (1 — луговая трава, 2 — песок) и (b) объектов, их имитирующих (1–3 — маскировочные комплекты).

синтезированы суммарное монохромное (полутонное)

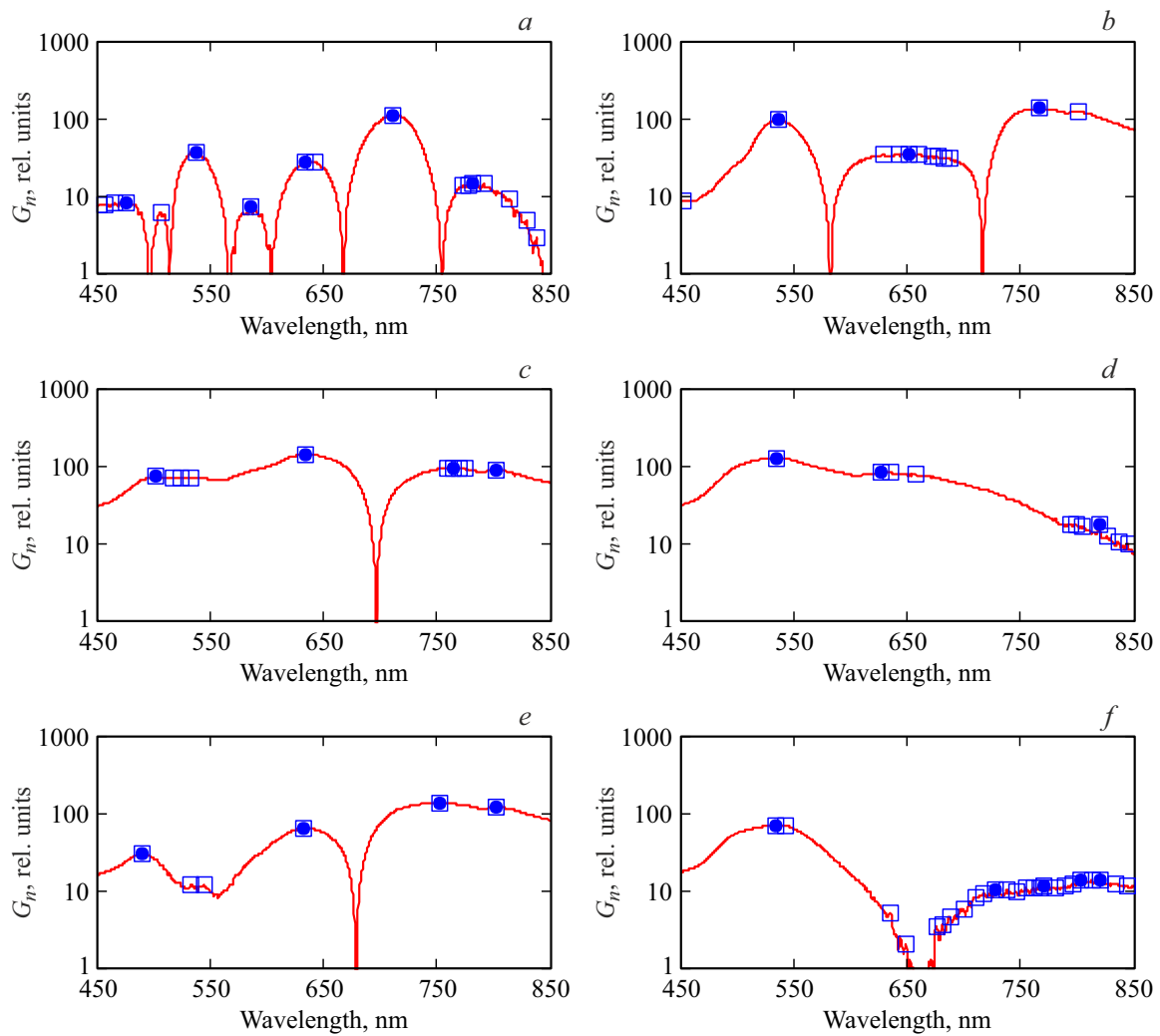
изображение  $L_{i,j,\Sigma p} = \frac{1}{3} \sum_{p=1}^3 L_{i,j,p}$  и трехкомпонентное цветное изображение  $L_{i,j}^{rgb} = [L_{i,j,p=1} L_{i,j,p=2} L_{i,j,p=3}]^T$ .

Оценка информативности получаемых изображений  $L_{i,j,p}$  и  $L_{i,j,\Sigma p}$  проводилась в сравнении с панхроматическим изображением  $L_{i,j,\Sigma n} = N^{-1} \sum_{n=1}^N L_{i,j,n}$ , полученным в диапазоне длин волн  $\lambda_n = 450-850$  nm. При оценке использовались спектры объекта и фона  $L_n^a = \frac{1}{S^a} \sum_{i,j \in S^a} L_{i,j,n}^a$ , усредненные по областям пространства  $S^a$ , занимаемым ими. В качестве критерия для монохромных (полутонных) изображений был использован коэффициент контраста [16], который рассчитывался как для совокупности всех  $N$  спектральных компонент и выбранных  $P$  (наиболее информативных), так и для каждой  $p = 1, 2, 3$  спектральной компоненты в отдельности. Чем больше различие, тем больше коэффициент, который зависит только от совокупности длин волн,

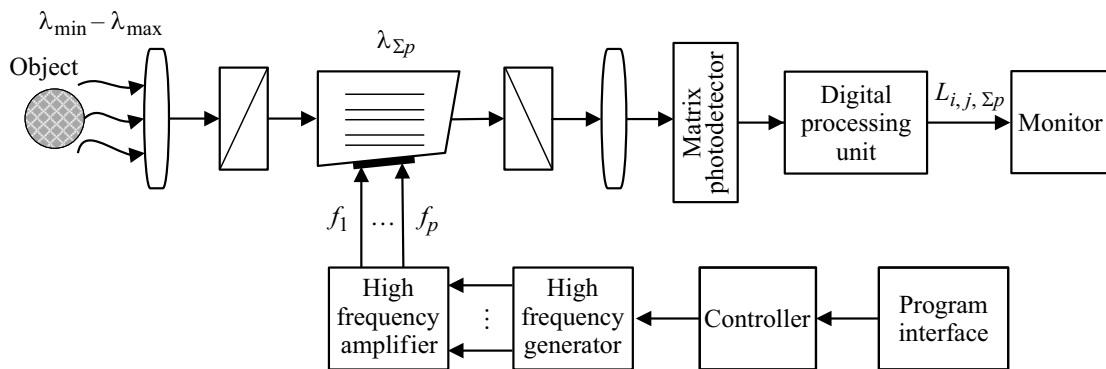
используемых в анализе сцены. Например, для панхроматического изображения этот коэффициент имеет вид

$$K_1 = \frac{\left| \left( N^{-1} \sum_n L_n^o \right) - \left( N^{-1} \sum_n L_n^b \right) \right|}{\max \left( \left( N^{-1} \sum_n L_n^o \right), \left( N^{-1} \sum_n L_n^b \right) \right)} = \frac{|L_{\Sigma n}^o - L_{\Sigma n}^b|}{\max(L_{\Sigma n}^o, L_{\Sigma n}^b)}. \tag{1}$$

Для оценки информативности цветосинтезированного изображения  $L_{i,j}^{rgb}$  по трем выбранным наиболее информативным каналам в сравнении с цветным изображением в натуральных цветах  $L_{i,j}^{RGB}$  и с ГС изображением  $L_{i,j,n}$ , содержащим все спектральные каналы, выбран коэффициент цветового контраста  $K_2$  [16,17]. Например,



**Рис. 4.** Формирование массивов спектральных точек для разных пар объект/фон с окном захвата 30 точек (квадраты) и 60 точек (кружки): *a* — объект 1 на фоне 1, *b* — объект 1 на фоне 2, *c* — объект 2 на фоне 1, *d* — объект 2 на фоне 2, *e* — объект 3 на фоне 1, *f* — объект 3 на фоне 2.
























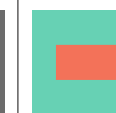

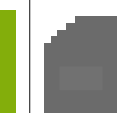



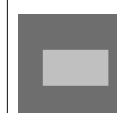






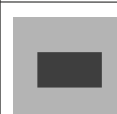
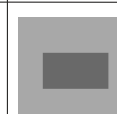
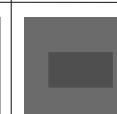










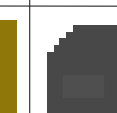
**Рис. 5.** Структурная схема многооконной акустооптической системы контрастной визуализации.

для ГС изображения этот коэффициент имеет вид

$$K_2 = \frac{\sum_n |L_n^o - L_n^b|}{\sum_n \max(L_n^o, L_n^b)}. \quad (2)$$

Таким образом,  $K_2$  позволяет учитывать контраст каждой спектральной составляющей, а не средний, как  $K_1$ , при этом  $K_1$  и  $K_2$  будут совпадать, когда спектральные кривые объекта и фо-

Таблица 1. Синтезированные изображения условного объекта и фона и значения их контраста

Индекс объекта/фона	Наименование изображений							
	$L_{i,j,p=1}$	$L_{i,j,p=2}$	$L_{i,j,p=3}$	$L_{i,j,\Sigma p}$	$L_{i,j,\Sigma n}$	$L_{i,j}^{rgb}$	$L_{i,j}^{RGB}$	$L_{i,j,n}$
1/1	 $K_1 = 0.187$	 $K_1 = 0.215$	 $K_1 = 0.497$	 $K_1 = 0.090$	 $K_1 = 0.032$	 $K_2 = 0.317$	 $K_2 = 0.151$	 $K_2 = 0.131$
1/2	 $K_1 = 0.470$	 $K_1 = 0.201$	 $K_1 = 0.605$	 $K_1 = 0.358$	 $K_1 = 0.299$	 $K_2 = 0.448$	 $K_2 = 0.339$	 $K_2 = 0.388$
2/1	 $K_1 = 0.578$	 $K_1 = 0.457$	 $K_1 = 0.509$	 $K_1 = 0.095$	 $K_1 = 0.069$	 $K_2 = 0.518$	 $K_2 = 0.357$	 $K_2 = 0.417$
2/2	 $K_1 = 0.562$	 $K_1 = 0.343$	 $K_1 = 0.343$	 $K_1 = 0.430$	 $K_1 = 0.369$	 $K_2 = 0.430$	 $K_2 = 0.258$	 $K_2 = 0.369$
3/1	 $K_1 = 0.384$	 $K_1 = 0.602$	 $K_1 = 0.658$	 $K_1 = 0.375$	 $K_1 = 0.249$	 $K_2 = 0.556$	 $K_2 = 0.090$	 $K_2 = 0.413$
3/2	 $K_1 = 0.413$	 $K_1 = 0.149$	 $K_1 = 0.194$	 $K_1 = 0.148$	 $K_1 = 0.089$	 $K_2 = 0.303$	 $K_2 = 0.237$	 $K_2 = 0.183$

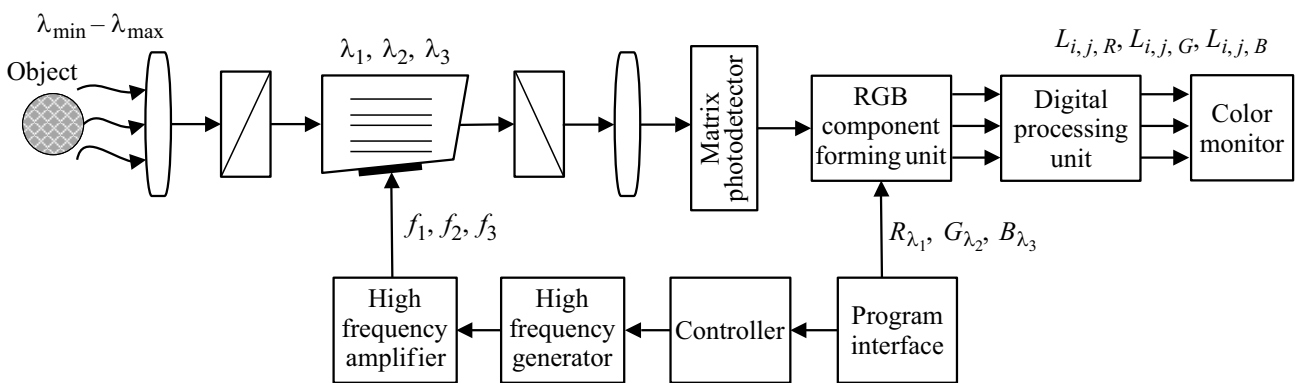


Рис. 6. Структурная схема акустооптической системы цветовой контрастной визуализации.

на не пересекаются и будут иметь разные значения в случае пересечения спектральных кривых.

В табл. 1 представлены синтезированные изображения и соответствующие им значения контраста (1) и (2). Результаты представлены в виде изображения прямоугольника (объекта) на однородном фоне. Степень контраста характеризуется визуальным различием объекта и фона.

В табл. 2 представлены частоты ультразвука и соответствующие им длины волн, выделяемые АО фильтром при формировании наиболее контрастных спектральных изображений  $L_{i,j,p}$ .

Из табл. 1 видно, что во всех случаях значения контраста (1) для изображений  $L_{i,j,\Sigma p}$  по наиболее информативным спектральным каналам превышают значения для панхроматических изображений  $L_{i,j,\Sigma n}$ , при этом спектральные изображения  $L_{i,j,p}$  в отдельности могут давать еще больший контраст. Снижение контраста  $L_{i,j,\Sigma p}$  по отношению к  $L_{i,j,p}$  характеризуется тем, что отдельные составляющие  $L_{i,j,p}$  могут иметь инвертированные яркости объекта и фона в спектральных каналах  $\lambda_p$  (например, в таблице  $L_{p=1}$  и  $L_{p=2}$  для объекта 2 на фоне 1, которые имеют высокий контраст, но инвертированные яркости), и при их усреднении происходит выравнивание контраста. Цветосинтезированные изображения  $L_{i,j}^{rgb}$ , построенные по наиболее информативным спектральным каналам, дают более высокое значение цветового контраста (2), чем RGB-изображения  $L_{i,j}^{RGB}$  и даже чем ГС изображения  $L_{i,j,n}$ . Для RGB-изображений инвертированные яркости в отдельных спектральных каналах существенной роли не играют и влияют лишь на цветовую гамму изображения. Стоит отметить, что основным достоинством RGB-изображения является дополнительная возможность передачи отличий объекта от фона по цветовым оттенкам, что особенно важно при анализе изображений человеком-дешифровщиком.

Выигрыш в контрасте можно определить как отношение контраста сформированного изображения (полутонного или цветосинтезированного) к контрасту исходного (полутонного панхроматического или цветного в натуральных цветах). Для полутонных сформированных изображений приведенного набора классов „объект/фон“ выигрыш в повышении контраста составляет от 15% до 8 раз, для цветных — от 12% до 6 раз.

## Структура АО систем выборочной спектральной регистрации

На рис. 5, 6 представлены обобщенные структурные схемы АО систем, реализующих режимы многооконной (рис. 5) и цветовой контрастной визуализации (рис. 6) по наиболее информативным спектральным каналам. Обработка зарегистрированных изображений осуществляется с помощью блока анализа и обработки изображений через программный интерфейс, который также обеспечивает общее управление системой, задавая режим

**Таблица 2.** Частоты ультразвука  $f$  (MHz) и соответствующие им длины волн  $\lambda$  (nm) при формировании изображений каждой пары объект/фон

Индекс объекта/фона	Частоты ультразвука, MHz			Длины волн, nm		
	$f_{p=1}$	$f_{p=2}$	$f_{p=3}$	$\lambda_{p=1}$	$\lambda_{p=2}$	$\lambda_{p=3}$
1/1	106.47	86.20	75.02	537.03	632.09	710.54
1/2	106.72	83.12	68.58	536.10	651.47	766.84
2/1	86.05	68.78	65.03	633.01	764.10	801.92
2/2	107.24	87.13	63.27	534.26	626.55	820.38
3/1	86.20	70.17	65.03	632.09	752.08	801.92
3/2	107.24	64.85	63.27	534.26	803.76	820.38

работы и параметры АО монохроматора. Матричное фотоприемное устройство в схеме цветовой визуализации является одноканальным, а формирование цветовых компонент осуществляется в соответствующем блоке по командам на присвоение заданной длине волны координаты цвета R, G или B для отображения на цветном мониторе.

## Выводы

Таким образом, результаты экспериментального исследования предложенного подхода к выбору спектральных каналов подтверждают возможность повышения контраста заданных объектов по сравнению с панхроматическим и ГС режимами съемки. Выбираемые по представленной методике спектральные каналы могут быть использованы как для классического режима мониторинга, в котором выделяется одна (в данном случае наиболее информативная спектральная компонента), так и для режима быстрой (скачкообразной) спектральной перестройки, позволяющий быстро регистрировать несколько спектральных компонент (например, для формирования их цветосинтезированных изображений), а также и для многооконного режима АО контрастной визуализации заданных объектов (в котором изображение формируется автоматически путем взвешенного суммирования отдельных спектральных компонент).

Все это демонстрирует обоснованность и перспективность развиваемого подхода к реализации режима выборочной спектральной регистрации АО гиперспектрометра, основанного на выборе наиболее информативных спектральных каналов при регистрации совокупности объектов с известными спектральными характеристиками на известном множестве фонов.

## Финансирование

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

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] А.Н. Виноградов, В.В. Егоров, А.П. Калинин, А.И. Родионов, И.Д. Родионов. *Оптический журнал*, **88** (4), 54 (2016).
- [2] В.Э. Пожар, А.С. Мачихин, М.И. Гапонов, С.В. Широков, М.М. Мазур, А.Е. Шерышев. *Светотехника*, **4**, 47 (2018). [V.E. Pozhar, A.S. Machikhin, M.I. Gaponov, S.V. Shirokov, M.M. Mazur, A.E. Sheryshev. *Light & Engineering*, **27** (3), 99 (2019). DOI: 10.33383/2018-029].
- [3] А. Дель Агила, Д.С. Ефременко, Т. Траутманн. *Светотехника*, **4**, 60 (2019).
- [4] Т.А. Шереметьева, Г.Н. Филиппов, А.М. Малов. *Оптический журнал*, **82** (1), 32 (2015). [T.A. Sheremetieva, G.N. Filippov, A.M. Malov. *J. Opt. Tech.*, **82** (1), 24 (2015)].
- [5] Н. Know, S.Z. Der, N.M. Nasrabadi. *Opt. Eng.*, **41** (1), 69 (2002).
- [6] С.М. Борзов, О.И. Потатуркин. *Автометрия*, **56** (4) 134 (2020). DOI: 10.15372/AUT20200414 [S.M. Borzov, O.I. Potaturkin. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, **56** (4), 431 (2020). DOI: 10.3103/S8756699020040032].
- [7] И.А. Козинев, Г.Н. Мальцев. *Опт. и спектр.*, **121** (6), 1005 (2016). DOI: 10.7868/S0030403416120151 [I.A. Kozinov, G.N. Maltsev. *Opt. Spectrosc.*, **121** (6), 934 (2016). DOI: 10.1134/S0030400X16120158].
- [8] А.В.Фадеев, В.Э. Пожар. *Оптический журнал*, **80** (7), 50 (2013). [A.V. Fadeev, V.E. Pozhar. *J. Optical Technology*, **80** (7), 444 (2013)].
- [9] М.М. Мазур, В.Н. Шорин, В.И. Пустовойт, В.Э. Пожар, А.В. Фадеев. *Приборы и техника эксперимента*, **54** (2), 140 (2011).
- [10] A.V. Fadeyev, V.E. Pozhar, V.I. Pustovoit. *Proc. SPIE*, **8890**, 88900H (2013).
- [11] М.А.Попов, С.А. Станкевич. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, **3**, 106 (2006).
- [12] В.Э. Пожар, Д.Ю. Великовский. *Опт. и спектр.*, **128** (7), 1035 (2020). DOI: 10.21883/OS.2020.07.49578.107-20 [V.E. Pozhar, D.Y. Velikovskii. *Opt. Spectrosc.*, **128** (7) 1041 (2020). DOI: 10.1134/S0030400X20070176].
- [13] М.М. Мазур, Ю.А. Судденок, В.Э. Пожар. *Опт. и спектр.*, **128** (2), 284 (2020). DOI: 10.21883/OS.2020.02.48980.21119 [M.M. Mazur, Y.A. Suddenok, V.E. Pozhar. *Opt. Spectrosc.*, **128** (2) 274 (2020). DOI: 10.1134/S0030400X20020162].
- [14] В.Э. Пожар, В.И. Пустовойт. *Электромагнитные волны и электронные системы*, **2** (4), 26 (1997).
- [15] В.И. Балакший, В.Н. Парыгин, Л.Е. Чирков. *Физические основы акустооптики* (Радио и связь, Москва, 1985).
- [16] Ю.С. Сагдуллаев, С.Д. Ковин. *Восприятие и анализ разнеспектральных изображений* (Спутник+, Москва, 2016).
- [17] С.М. Огреб, М.В. Тишанинов, П.М. Юхно. *Оптика атмосферы и океана*, **31** (2), 160 (2018). DOI: 10.15372/AOO20180213