

УДК 621.396.77

Л.Ф. Купченко, А.С. Рыбьяк, А.В. Игнатъев

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба*

## **АКУСТООПТИЧЕСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ПРИЗНАКАМ**

*Проведен обзор алгоритмов обнаружения целей по спектральным признакам. Показано, что увеличение числа спектральных каналов изображающего спектрометра повышает вероятность обнаружения целей. Обсуждаются вопросы реализации алгоритмов обнаружения в видеоспектрометрах, оснащенных акустооптическими фильтрами на основе, как первых, так и вторых брегговских резонансов.*

*акустооптическая фильтрация, оптоэлектронная система*

### **Введение**

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** В настоящее время накоплен значительный опыт по разработке и построению систем обнаружения целей по их спектральным признакам. В работах [1, 2]

представлен обзор теоретических и практических результатов по разработке алгоритмов обнаружения, обеспечивающих работу видеоспектрометров. Однако в этих работах не обсуждаются вопросы, связанные с выбором технических средств и их характеристик для реализации разработанных алгоритмов.

Выбор технических средств и их характеристик должен определяться, во-первых, свойствами электромагнитного спектра сигнала и фона, а, во-вторых, пространственной и спектральной разрешающей способностями видеоспектрометрической системы обнаружения.

В работе [1] произведен сравнительный анализ оптоэлектронных систем обнаружения, которые используют спектральные либо пространственные признаки объектов. Показано, что при пространственном обнаружении объектов по геометрическим признакам необходимо обеспечить высокое пространственное разрешение системы, что предполагает большую апертуру приемной части системы и, как правило, приводит к снижению отношения сигнал-шум. Кроме того, с увеличением пространственной разрешающей способности объем регистрируемой информации растет квадратично.

При обнаружении объектов по спектральным признакам отсутствует необходимость в высокой разрешающей способности, так как при этом для обнаружения достаточно использовать только один элемент разрешения. Необходимо отметить, что объем регистрируемой информации, растет линейно с увеличением спектральных интервалов. Поэтому использование спектральных, а не пространственных признаков объектов в оптоэлектронных системах обнаружения, как правило, оказывается предпочтительнее.

Спектры, регистрируемые при наблюдении отраженного излучения от одного и того же материала при различных измерениях, не идентичны даже при регистрации в лабораторных условиях, что связано с вариациями поверхности материала и носит название спектральная изменчивость.

Если пространственная разрешающая способность оптоэлектронной системы низкая, то в пределах каждого элемента разрешения местности может присутствовать несколько материалов, обладающих различными спектральными характеристиками. Поэтому различают "чистые" точки, включающие в свой состав одну поверхность материала, следовательно, спектральный состав излучения будет характеризовать лишь этот материал, и "смешанные" точки (подпиксельные цели), которые содержат несколько материалов.

Спектральная изменчивость и помехи, вызванные наличием смешанных точек, являются главными препятствиями при создании систем обнаружения целей по спектральным признакам. Эти препятствия должны решаться с использованием алгоритмов, которые основываются на статистической теории.

Для полных точек цели спектр, регистрируемый датчиком, является или спектром цели или спектром фона, и отсутствует взаимное влияние спектров друг на друга, а так же влияние освещения и затенения. Под термином фон обычно понимают

все точки, не относящиеся к цели. Спектры цели и фона искажены аддитивными шумами датчика, однако они могут быть учтены в распределениях цели и фона. Обычно полагают, что точки класса фона и цели в этом случае не содержат смешанные спектры и каждый класс может быть описан с помощью многомерного распределения с простым набором параметров.

По определению подпиксельные цели занимают только часть регистрируемой области. В этом случае спектр, регистрируемый приемником обнаружителя, включает линейную и нелинейную смесь спектров цели и фона. Спектр фона добавляет шумовую компоненту и делает процесс обнаружения более сложным.

В состав видеоспектрометра входят две системы: оптическая система и изображающий спектрометр. Оптическая система делит регистрируемую область пространства на набор смежных точек. Размеры этих точек определяется разрешением оптической системы и ее мгновенным полем зрения, которая, в свою очередь, зависит от размеров приемника излучения и высоты полета. Изображающий спектрометр является регистрирующей системой пространственных сигналов, которая делит с использованием диспергирующих устройств электромагнитное излучение на набор ограниченных спектральных полос и затем производит измерение энергии в каждой полосе.

Анализ известных диспергирующих устройств показал, что акустооптические фильтры обладают высокими динамическими свойствами и способны изменять свою аппаратную функцию в достаточно широких пределах как по спектру, так и по величине коэффициента преломления. Это обычно обеспечивается путем изменения условий акустооптического взаимодействия, в частности, угла взаимодействия и амплитуды ультразвуковой волны.

**Целью настоящей статьи** является обсуждение алгоритмов обнаружения подпиксельных целей по спектральным признакам и обоснование принципов построения систем обнаружения, оснащенных акустооптическими фильтрами, в которых, в интересах повышения вероятности обнаружения целей, осуществляется увеличение числа селективирующих спектральных каналов, путем изменения условий акустооптического взаимодействия.

### **Основы построения алгоритмов обнаружения целей по спектральным признакам**

В основе построения алгоритмов обнаружения целей по спектральным признакам лежит предположение о том, что каждой из обнаруживаемых целей соответствует собственный детерминированный спектр. Поэтому процесс обнаружения заключается в сравнении сходства эталонного и наблюдаемого спектров.

Количественная оценка сходства эталонного и наблюдаемого спектров осуществляется путем геометрического представления о сходстве спектров. Исследуемый спектр представляется в виде спектральных компонент в  $K$ -мерном евклидовом пространстве, причем каждой спектральной компоненте соответствует одна ось пространства при взаимной ортогональности всех осей.

Спектр каждой исследуемой точки пространства рассматривается как вектор  $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_K]^T$  в  $K$ -мерном Евклидовом пространстве, чьи декартовы координаты  $x_i$  являются значениями яркости или отражения в каждой спектральной полосе, а символ  $T$  означает операцию транспонирования. При этом изменение уровня освещения приводит к изменению длины спектрального вектора, а его направление, которое определяется формой спектра, остается постоянным.

Если каждому материалу соответствует свой детерминированный спектр, то сходство между двумя спектрами наблюдаемым  $\vec{x}$  и эталонным  $\vec{y}$  можно установить, измеряя величину Евклидова расстояния между двумя векторами [2]

$$|\vec{x} - \vec{y}| = \sqrt{\sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}, \quad (1)$$

или измеряя угол между соответствующими векторами

$$\angle(\vec{x}, \vec{y}) = \arccos \frac{\vec{x}^T \vec{y}}{|\vec{x}| |\vec{y}|}, \quad (2)$$

где  $\vec{x}^T \vec{y}$  – скалярное произведение векторов  $\vec{x}$  и  $\vec{y}$ .

Обычно угол между двумя векторами, каждый из которых отображает наблюдаемый и эталонные спектры, называют спектральное угловое отображение.

Такой подход широко используется при построении алгоритмов обнаружения целей по спектральным признакам.

Рассмотрим алгоритм обнаружения для подпиксельных целей. В основе алгоритма обнаружения объектов по спектральным признакам положена статистическая теория обнаружения, согласно которой задача обнаружения цели состоит в выборе между двумя конкурирующими гипотезами:

$$\begin{aligned} H_0 : \vec{x} &= B\vec{a}_{b,0} + \vec{w} && \text{цель отсутствует;} \\ H_1 : \vec{x} &= S\vec{a} + B\vec{a}_{b,1} + \vec{w} && \text{цель присутствует,} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $S$  – матрица размерности  $K \times P$ , отображающая изменчивость цели, причем  $K$  – количество спектральных полос, а  $P$  – размерность подпространства изменчивости цели;  $B$  – матрица размерностью  $K \times Q$  отображающая изменчивость фона, причем  $Q$  – размерность подпространства изменчивости фона. Вектор  $\vec{w}$  является вектором шумов, имеющих нормальные распределения с нулевыми мате-

матическими ожиданиями и корреляционной матрицей  $-\sigma_w^2 I$ , где  $I$  – единичная матрица, а  $\sigma_w^2$  – дисперсия шума. Вектора  $\vec{a}$ ,  $\vec{a}_{b,0}$ ,  $\vec{a}_{b,1}$  представляют собой наборы весовых коэффициентов для цели и фона при двух гипотезах, которые пропорциональны величине площади пикселя, занятой соответствующим компонентом либо цели, либо фона. Величина этих коэффициентов должна удовлетворять следующим условиям:

$$\sum_{k=1}^M a_k = 1; a_k \geq 0. \quad (4)$$

Это означает, во-первых, что сумма весовых коэффициентов в уравнении не должна быть больше единицы и, во-вторых, весовые коэффициенты должны быть больше нуля.

Поскольку весовые коэффициенты  $\vec{a}$ ,  $\vec{a}_{b,0}$ ,  $\vec{a}_{b,1}$  и дисперсия шума  $\sigma_w^2$  являются неизвестными параметрами, то вместо этих величин необходимо использовать их оценки. Тогда отношение правдоподобия будет иметь вид [1]

$$\ell(\vec{x}) = \frac{\vec{x}^T P_B^\perp \vec{x}}{\vec{x}^T P_{SB}^\perp \vec{x}} = \frac{|P_B^\perp \vec{x}|^2}{|P_{SB}^\perp \vec{x}|^2}, \quad (5)$$

где  $P_B^\perp = I - P_B$  – ортогональная проекционная матрица ошибок [1];  $P_B = B(B^T B)^{-1} B^T$  – матрица ортогонального проектирования;  $P_{SB}^\perp$  – матрица, получаемая аналогично  $P_B^\perp$  из матрицы  $[SB]$ , что является линейной оболочкой для подпространств цели и фона.

Возвращаясь к геометрическому представлению алгоритмов обнаружения по спектральным признакам представленных формулами (1), (2), изобразим, например, одномерные подпространства цели и фона в трехмерном Евклидовом пространстве (рис. 1). Линейная оболочка подпространств цели и фона изображена на рисунке градиентной серой заливкой. Точка  $T$  является любой точкой изображения, по которой принимается решение при обнаружении.

Поскольку величины  $|P_B^\perp \vec{x}|$  и  $|P_{SB}^\perp \vec{x}|$  являются евклидовыми расстояниями исследуемой точки  $T$  от подпространства фона –  $TB$  и объединенного подпространства фона и цели –  $ТС$ , то из треугольника  $ТСВ$  возможно определить спектральное угловое отображение  $\cos \phi = TC/TB$ , соответственно  $1/\ell(\vec{x}) = \cos^2 \phi$ . Подставив в это уравнение выражение для отношения правдоподобия (5), получим

$$\frac{\vec{x}^T P_B^\perp \vec{x}}{\vec{x}^T P_{SB}^\perp \vec{x}} = 1 + \text{tg}^2 \phi, \quad (6)$$

Так как функция  $\text{tg}^2 \phi$  является монотонно возрастающей, то ее можно использовать для реали-

зации обнаружения. Тогда выражение для отношения правдоподобия примет вид

$$\ell(\bar{x}) = \frac{\bar{x}^T P_B^\perp \bar{x} - \bar{x}^T P_{SB}^\perp \bar{x}}{\bar{x}^T P_{SB}^\perp \bar{x}} = \text{tg}^2 \phi > \underset{H_0}{\overset{H_1}{\eta_{SB}}} \quad (7)$$

В этом случае решение о принятии гипотезы  $H_1$  или  $H_0$  будет приниматься при сравнении значения функции тангенс со значением порога. При превышении порога принимается гипотеза о  $H_1$  наличии цели, а при значении меньше порогового – гипотеза  $H_0$  об отсутствии цели.

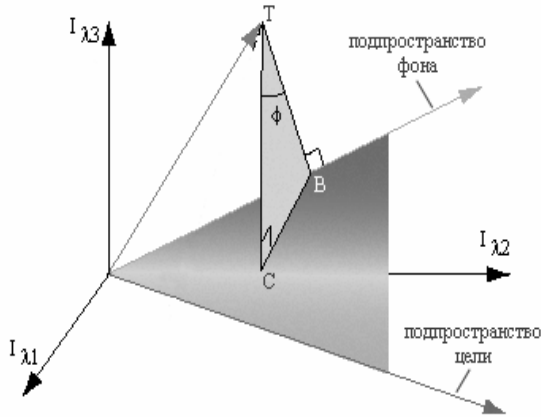


Рис. 1. Геометрическое представление работы обнаружителя для случая подпиксельных целей

Ввиду того, что числитель и знаменатель выражения (7) являются независимыми и имеют нормальное распределение, то, как показано в [3], отношение правдоподобия сводится к F-критерию. Соответственно, выражение (7) принимает вид

$$\ell(\bar{x}) = \frac{F_{P, K-P-Q}(q)}{K-P-Q}, \quad (8)$$

где  $F_{P, K-P-Q}$  является нецентральным F-распределением с  $P$  степенями свободы числителя,  $K - P - Q$  степенями свободы знаменателя и нецентральным параметром отношения сигнал помеха плюс шум  $q$  [1, 3]:

$$q = \frac{(\bar{S}\bar{a})^T P_B^\perp (\bar{S}\bar{a})}{\sigma_w^2}. \quad (9)$$

Значение порога устанавливается требуемой вероятностью ложной тревоги

$$P_{FA} = 1 - F_{P, K-P-Q}(0, \eta_{SB}), \quad (10)$$

так как  $q = 0$  при  $H_0$ . Тогда вероятность обнаружения определяется по формуле

$$P_D = 1 - F_{P, K-P-Q}(q, \eta_{SB}). \quad (11)$$

С использованием выражения (11) построены графики зависимости вероятности обнаружения  $P_D$  от отношения сигнал/помеха плюс шум  $q$  для размерности подпространства изменчивости фона

$Q = 5$  и вероятности ложной тревоги  $P_{FA} = 10^{-6}$ .

На рис. 2 показана зависимость вероятности обнаружения от отношения сигнал помеха плюс шум при различной размерности подпространства изменчивости цели  $P$  и количестве спектральных полос  $K = 144$ , а на рис. 3 – при различном числе спектральных полос  $K$  для случая одномерного подпространства изменчивости цели  $P = 1$ . Штрих пунктирной линией изображена зависимость для согласованного фильтра.

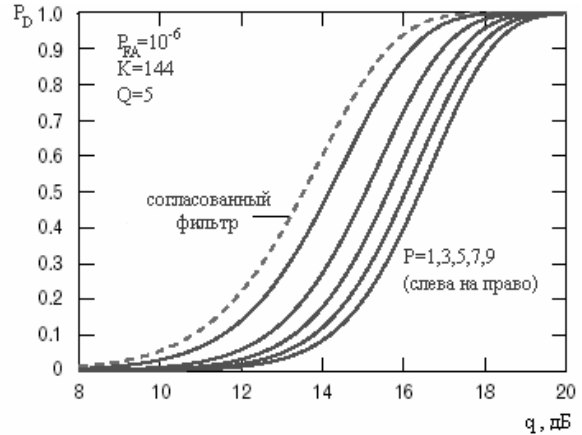


Рис. 2. Зависимость вероятности обнаружения от отношения сигнал помеха плюс шум при различной размерности подпространства изменчивости цели  $P$

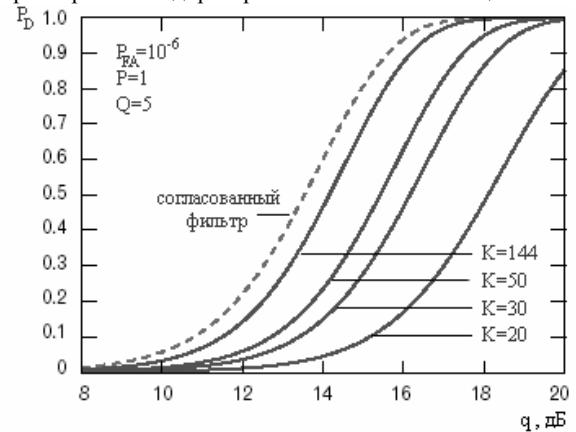


Рис. 3. Зависимость вероятности обнаружения от отношения сигнал помеха плюс шум при различном числе спектральных полос  $K$

Анализ графиков (рис. 2, 3) позволяет сделать вывод, что если спектральные характеристики цели изменяются в широком спектральном диапазоне и, следовательно, увеличивается размерность подпространства изменчивости спектра цели  $P$  (априорная информация о цели уменьшается), то характеристики обнаружителей ухудшаются. В то же время, если в обнаружителе использовать изображающий спектрометр с большим числом спектральных полос  $K$ , то характеристики обнаружителя улучшаются. Это связано с тем, что в обнаружителе используется больше информации о спектральных свойствах цели и его характеристики улучшаются, приближаясь к характеристикам согласованного фильтра.

Следовательно, для повышения вероятности обнаружения в состав видеоспектрометра должен входить изображающий спектрометр, обладающий большим числом, спектральных каналов.

### Акустооптическая фильтрация с использованием составляющих вторых порядков брэгговской дифракции в видеоспектрметрах обнаружения целей

Известно, что числом рабочих каналов акустооптических фильтров можно управлять путем изменения условия акустооптическом взаимодействии, обеспечивая при этом режим первого или второго брэгговского резонансов и используя составляющие соответствующих порядков [4, 5].

Под брэгговскими резонансами различных порядков понимают условия взаимодействия света с ультразвуковой волной, когда взаимодействие происходит под углами кратными углу Брэгга, то есть при  $\theta_B, 2\theta_B, 3\theta_B, \dots$  – первый, второй и третий брэгговские резонансы (угол Брэгга, как известно, определяется соотношением  $\sin \theta_B = -k_0/2k$ , где  $k_0$  и  $k$  – волновые числа ультразвука и света соответственно). Существенно, что дифракционные составляющие второго порядка обладают в два раза большей, а третьего – в три раза большей угловой дисперсией по сравнению с составляющими первого порядка, а также и большей угловой и спектральной селективностями [6].

При определенных условиях взаимодействия число рабочих каналов в случае реализации второго брэгговского резонанса в четыре раза больше, чем для первого резонанса. Это связано с тем, что рабочий диапазон длин волн для первого и второго брэгговских резонансов примерно, одинаков, а селективирующие свойства второго резонанса выше в четыре раза, чем первого.

В устройствах селективной фильтрации информация о спектральных свойствах излучения содержится в пространственном спектре светового потока и обычно определяется энергетическими характеристиками пространственных составляющих (дифракционной эффективностью и коэффициентом пропускания устройства).

Под дифракционной эффективностью понимают отношение квадратов амплитуды дифракционной составляющей к амплитуде падающего излучения  $\chi_i = |E_i/A|^2, (i=1,2,\dots)$ . Тогда дифракционные эффективности составляющих первого и второго порядков будут иметь следующий вид [6]:

$$\chi_1 = \frac{1}{\tilde{R}_1^2} \sin^2 \left( \frac{1}{2} \frac{\Delta n}{n_0} k l \tilde{R}_1 \right), \quad (12)$$

где  $\tilde{R}_1 = \sqrt{1 + \gamma_1^2}$ ;  $\tilde{R}_2 = \sqrt{1 + \gamma_2^2}$ ;  $\gamma_1 = \frac{\varepsilon_1}{2q}$ ;  $\gamma_2 = \frac{\varepsilon_2}{q^2}$ ;

$$\varepsilon_1 = 1 + \frac{2k \sin \theta}{k_0}; \quad \varepsilon_2 = 2 \left( 1 + \frac{k \sin \theta}{k_0} \right); \quad q = \alpha k^2 / k_0^2 -$$

параметр Рытова;  $l$  – длина взаимодействия;  $\alpha$  – коэффициент акустооптической связи, равный для изотропной среды  $\Delta n \cdot n_0$ ,  $\Delta n$  – амплитуда изменения коэффициента преломления среды, вызванной ультразвуковой волной.

Как видно из выражений (12), (13), максимальная дифракционная эффективность для каждого из порядков может быть обеспечена при выполнении следующих двух условий. Во-первых, при равенстве нулю относительной расстройки  $\varepsilon_1 = 0$  либо  $\varepsilon_2 = 0$ , а во-вторых, при достижении аргумента синуса в каждом из выражений  $\pi/2$ , т.е. при условиях:

$$\left( \frac{\Delta n}{n_0} \right) k l = \pi; \quad (14)$$

$$\left( \frac{\Delta n}{n_0} \right)^2 \left( \frac{k}{k_0} \right)^2 k l = \pi. \quad (15)$$

При создании фильтров оптического диапазона важную роль играет спектральная селективность  $\Delta\lambda/\lambda$  или  $\Delta k/k$ , в пределах, которых выполняются условия брэгговского синхронизма, рабочий диапазон длин волн оптического излучения  $\delta\lambda$  и число спектральных интервалов  $N = \Delta\lambda/\delta\lambda$  [7, 8].

Определим селективность для составляющих первого и второго порядков как величину приращения расстройки  $\Delta\varepsilon_i$  ( $i=1,2$ ), при которой дифракционная эффективность составляющих принимает нулевое значение. Тогда из выражений (12) и (13), получим  $\Delta\varepsilon_1 = 2\sqrt{3}q$  и  $\Delta\varepsilon_2 = \sqrt{3}q^2$ .

Поскольку  $q \ll 1$ , потенциальные селективные свойства составляющих второго порядка, несомненно, выше первого. Действительно, если  $q = 10^{-2}$ , то  $\Delta\varepsilon_1 = 3,4 \cdot 10^{-2}$ ,  $\Delta\varepsilon_2 = 1,7 \cdot 10^{-4}$ .

Нас будет интересовать спектральная селективность, которую определим как отношение  $\Delta k/k$ , где  $\Delta k$  – приращение волнового вектора света, при котором дифракционная эффективность равна нулю. Тогда получим, что отношение  $\Delta k/k$  связано с относительной расстройкой для первого резонанса  $\Delta\varepsilon_1 = \Delta k/k = 2\sqrt{3}q$  и  $\Delta\varepsilon_2 = 2\Delta k/k = \sqrt{3}q^2$  для второго.

Очевидно, что высокие селективные свойства высших порядков дифракции могут найти практическое использование лишь в том случае, если одновременно будут определены условия взаимодействия, при которых эти свойства проявляются наряду с максимальной дифракционной эффективностью, определяемой выражениями (14), (15). Параллельно решив две системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta k}{k} = 2\sqrt{3}q \\ \frac{k_0^2}{2k}q = \frac{\pi}{2} \end{array} \right\}, \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta k}{k} = \frac{\sqrt{3}}{2}q^2 \\ \frac{k_0^2}{2k}q^2 = \frac{\pi}{2} \end{array} \right. \quad (16)$$

получим выражения для спектральной селективности компонент первого и второго порядков, когда одновременно для каждого из них реализуется максимальная дифракционная эффективность:

$$\left( \frac{\Delta k}{k} \right)_1 = 2\sqrt{3} \frac{k\pi}{k_0^2} = \frac{\pi}{Q} 2\sqrt{3}; \quad (17)$$

$$\left( \frac{\Delta k}{k} \right)_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{k\pi}{k_0^2} = \frac{\pi}{Q} \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (18)$$

где  $Q = k_0^2 l / k$ .

Известно, что при селекции оптического излучения между частотой ультразвука  $f_0$  и длиной световой волны  $\lambda$  исследуемого излучения, выполняются условия синхронизма  $\varepsilon_1 = 0$  для первого брэгговского резонанса и  $\varepsilon_2 = 0$  для второго. Поэтому в определенном диапазоне параметров взаимодействия будет сохраняться следующее равенство  $\lambda f_0 = \text{const}$  [9]. Спектральный интервал, в пределах которого дифракционная эффективность (при выполнении условий  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$ ) составляет  $\chi(\lambda) = 0,5\chi(\lambda)_{\text{макс}}$ , будем называть рабочим диапазоном длин волн  $\delta\lambda$ .

Покажем, что диапазон  $\delta\lambda$  для каждого из резонансов будет примерно одинаков. Действительно для случая селекции оптического излучения ( $\lambda f_0 = \text{const}$ ) множитель  $(k/k_0)$ , входящий в выражения (17), (18), сохраняется постоянным. Следовательно, при фиксированной величине отношения  $\Delta n/n_0$  рабочие диапазоны длин волн для составляющих первого и второго порядков дифракции будут в, основном, определяться произведением  $kl$ . Это означает, что рабочие диапазоны длин световых волн для составляющих первого и второго порядков будут примерно одинаковыми. Так как селективность второго брэгговского резонанса в четыре раза выше по сравнению с первым резонансом, то число разрешаемых спектральных интервалов при использовании в акустооптических фильтрах пространственных составляющих второго порядка увеличивается примерно в четыре раза [10].

### Выводы

Проведенный анализ алгоритмов обнаружения позволяет сделать вывод, что если спектральные характеристики цели изменяются в широком спек-

тральном диапазоне и, следовательно, априорная информация о цели уменьшается, то характеристики обнаружителей ухудшаются. В случае, если в обнаружителе используются изображающий спектрометр с большим числом спектральных каналов, то вероятность обнаружения увеличиваются при равных отношениях сигнал-шум. Показано, что число рабочих каналов акустооптических фильтров можно увеличить в четыре раза, обеспечив условия акустооптического взаимодействия, при котором реализуется режим второго брэгговского резонанса.

### Список литературы

1. Manolakis D., Marden D., Shaw G.A. *Hyperspectral image processing for automatic target detection applications // Lincoln Laboratory Journal*. – 2003. – V. 14, n. 1. – P. 79-113.
2. Keshava N. *A survey of spectral unmixing algorithms // Lincoln Laboratory Journal*. – 2003. – V. 14, n. 1. – P. 55-77.
3. Manolakis D., Siracusa C., Shaw G.A. *Adaptive matched subspace detectors for hyperspectral imaging applications*. – [Электр. ресурсы]. – Режим доступа: [mti.xidian.edu.cn/multimedia/2001/supp/icassp2001/MAIN/papers/pap943.pdf](http://mti.xidian.edu.cn/multimedia/2001/supp/icassp2001/MAIN/papers/pap943.pdf).
4. Зильберман Г.Е., Сидоров И.Н., Купченко Л.Ф. *К теории дифракции света на ультразвуке // Радиотехника и электроника*. – 1982. – Т. 27, № 2. – С. 241-247.
5. Волошинов В.Б., Бломме Э., Леруа О., Скрипник Д.Б., Чертягин А.Ю. *Эффективность акустооптического взаимодействия во втором порядке дифракции // Оптика и спектроскопия*. – 1996. – Т. 81, № 5. – С. 835-841.
6. *Дифракционная эффективность второго порядка брэгговской дифракции при взаимодействии света с ультразвуком под двойным углом Брэгга / Л.Ф. Купченко, Ю.М. Плахов, О.В. Ефимова, В.Б. Лобырев, Е.Л. Черкашина, А.В. Шевченко // Радиофизика и радиоастрономия*. – 1999. – Т. 4, № 4. – С. 342-348.
7. *Ультразвук, маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Голямина*. – М.: Сов. Энциклопедия, 1978. – 400 с.
8. Лебедева В.В. *Экспериментальная оптика*. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. – 3-е изд. – 352 с.
9. Купченко Л.Ф., Коробка А.Г., Черкашина Е.Л. *Акустооптические фильтры с повышенной разрешающей способностью на основе брэгговских резонансов второго порядка для видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли // Сборник научн. тр. 1-го Межд. радиоэлектронного Форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2002)*. – Х.: ФН ПРЭ, ХНУРЭ, 2002. – Ч. 1. – С. 322-325.
10. Купченко Л.Ф., Коробка А.Г., Черкашина Е.Л., Игнатъев А.В. *Акустооптическая фильтрация с использованием дифракции света на ультразвуковой волне под углами Брэгга. Теория и эксперимент // Электромагнитные волны и электронные системы*. – М.: Радиотехника. – 2006. – Т. 11, № 2-3. – С. 109-126.

Поступила в редколлегию 2.10.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук А.В. Лемешко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.