

Л. Ф. Купченко, А. С. Рыб'як, О. А. Гурін*Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба
77/79, ул. Сумская, Харьков, 61023, Украина
E-mail: anattolij@meta.ua***ДИНАМИЧЕСКАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ
В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ**

В работе обобщаются и развиваются принципы динамической спектральной фильтрации, которая является дальнейшим развитием изображающей спектроскопии. В отличие от видеоспектрометров, в оптико-электронных системах с динамической спектральной фильтрацией реализуется управляемая спектральная фильтрация, обеспечивающая максимальное подавление спектральных составляющих излучения фона при минимальном ослаблении оптического сигнала объекта в преддетекторной области. Целью статьи является обобщение и развитие принципов динамической спектральной фильтрации в интересах создания оптико-электронных систем обнаружения объектов по спектральным признакам. Задачу оптимального выделения оптических сигналов из фоновых помех удалось свести к решению задачи обнаружения сигналов с априорно известными параметрами, используемой в теории радиолокации. В статье изложены принципы динамической спектральной фильтрации оптического излучения, описаны алгоритм оптимального обнаружения объектов по спектральным признакам и синтез оптимального обнаружителя оптических сигналов. В работе определены количественные характеристики обнаружителя, позволяющие при заданном уровне ложной тревоги определить условную вероятность правильного обнаружения объекта наблюдения в зависимости от отношения сигнал/помеха. Количественные характеристики обнаружителя получены в предположении, что сигналы объекта и фона подчиняются нормальному закону распределения, а их корреляционные характеристики (корреляционные матрицы фона и объекта) одинаковы. Экспериментально установлена возможность создания управляемого акустооптического селекционирующего устройства, обеспечивающего спектральную селекцию двух оптических сигналов, отличающихся по спектральному составу, путем изменения амплитуды частотных компонент ультразвуковой волны. При этом в качестве источников излучения использовались три лазера, работающие в красном, зеленом и синем участках спектра. В ходе эксперимента спектральная селекция осуществлялась путем дифракции полихроматического лазерного излучения на многочастотном ультразвуке. Эффективность процесса фильтрации определялась по величине контраста до и после фильтрации. Экспериментально установлено, что при наличии трех спектральных каналов селекции удается повысить контраст на выходе в несколько раз. Ил. 5. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: оптико-электронная система, динамическая спектральная фильтрация, акустооптический светофильтр.

Спектральная фильтрация оптического излучения лежит в основе одного из научных направлений в оптоэлектронике – изображающей спектроскопии [1]. Под спектральной фильтрацией оптического излучения понимают регистрацию изображений объектов в узких диапазонах длин волн, что позволяет наблюдать на изображениях фрагменты, отличающиеся спектральной яркостью.

Динамическая спектральная фильтрация [2] оптического излучения является дальнейшим развитием принципов изображающей спектроскопии и представляет собой управляемую согласованную оптимальную обработку сигналов в преддетекторной области оптико-электронной системы (ОЭС). Диспергирующее устройство в этом случае выполняет две функции: во-первых, обеспечивает разложение принятого излучения на спектральные компоненты, а во-вторых, изменяет коэффициент пропускания каждой спектральной компоненты таким образом, чтобы обеспечить максимальное подавление спектральных составляющих излучения фона при минимальном ослаблении оптического сигнала объекта.

При обсуждении преимуществ преддетекторной обработки оптической обработки сигналов и изображений, по-видимому, следует опираться на фундаментальные преимущества оптической обработки. Если обработка осуществляется в оптическом диапазоне без преобразования сигна-

лов в электрические, то это позволяет исключить ошибки, возникающие при преобразовании.

Анализ литературных источников показал, что наиболее близкой по тематике к настоящей статье является работа [3], где изложены результаты экспериментальных исследований ОЭС, в которой в качестве управляемого селекционирующего устройства используется спектрометр на основе акустооптического фильтра. Система сначала анализирует форму спектра фона и спектра объекта наблюдения, а затем вычисляет необходимый коэффициент пропускания фильтра, обеспечивающий на его выходе уменьшение оптического сигнала фоновой засветки.

В работе [2] изложены принципы динамической спектральной фильтрации, включающие формирование аппаратной функции устройства, обеспечивающие повышение требуемых параметров обнаружения.

В работе [4] проблему оптимального выделения оптических сигналов из фоновых помех удалось свести к решению задачи обнаружения сигналов с априорно известными параметрами, используемой при разработке радиолокационных устройств. С использованием основных положений теории обнаружения сигналов разработаны алгоритм оптимального обнаружения объектов по спектральным признакам и его структурная схема. Определены количественные характеристики

обнаружителя, позволяющие при заданном уровне ложной тревоги определить условную вероятность правильного обнаружения объекта наблюдения в зависимости от величины разности спектральных характеристик объекта и фона.

В настоящей статье исследуется оптимальный обнаружитель оптического излучения, в состав которого входят динамический спектральный фильтр, обеспечивающий оценку степени корреляции (согласованности) между опорными сигналами, принадлежащими объекту и фону, и характеристиками входного сигнала, а также пороговое устройство, принимающее решение о наличии сигнала, принадлежащего объекту, либо его отсутствии. Аппаратная функция устройства спектральной фильтрации, обеспечивающая согласованную фильтрацию оптического излучения, формируется на основании априорных спектральных характеристик объекта и фона.

В качестве управляемого селективного устройства в оптико-электронной системе с динамической спектральной фильтрацией используется акустооптический фильтр, работающий по определенному алгоритму. Поэтому в таких системах акустооптический светофильтр с управляемым коэффициентом пропускания можно рассматривать как оптический процессор, в котором обработка оптического излучения реализуется как математическая операция вычисления скалярного произведения вектора на вектор. При этом физической реализацией этой операции является дифракция полихроматического оптического излучения на многочастотной, управляемой по амплитуде, ультразвуковой волне [5].

Целью статьи является обобщение и развитие принципов динамической спектральной фильтрации в интересах создания оптико-электронных систем обнаружения объектов по спектральным признакам.

1. Принципы динамической спектральной фильтрации оптического излучения. При решении задач оптимального приема обычно используют методы математической статистики и формулируют задачу следующим образом [6]. Априорно известны статистические характеристики полезного сигнала и помех, а также канала их обработки. Необходимо получить решающее устройство, которое наилучшим образом примет решение об обнаружении объекта с наименьшими ошибками.

Рассмотрим ОЭС, в состав которой входит устройство спектральной селекции, обеспечивающее как разложение оптического излучения на m спектральных составляющих, так и изменение коэффициентов пропускания в каждом спектральном канале. Суммарный поток излучения, прошедшего спектральные каналы селективного устройства, затем регистрируется неселек-

тивным приемником излучения. Сигнал на выходе приемника излучения определяется соотношением:

$$Y(i, j) \sim q \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} F(\lambda) X(\lambda, i, j) d\lambda, \quad (1)$$

где q – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных параметров системы; $X(\lambda, i, j)$ – спектральный поток излучения, поступающий на вход ОЭС от пространственного элемента с координатами (i, j) ; $F(\lambda)$ – спектральная характеристика пропускания (аппаратная функция) селективного устройства:

$$F(\lambda) = \sum_{k=1}^m \tau_k(\lambda) = \sum_{k=1}^m A_k \varphi_k(\lambda), \quad (2)$$

где $\tau_k(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания k -го канала; A_k , $\varphi_k(\lambda)$ – максимальный коэффициент пропускания и относительная спектральная характеристика пропускания k -го канала.

Пусть совокупность $\varphi_k(\lambda)$ составляет ортогональную систему базисных функций. Тогда, разложив $X(\lambda, i, j) \in \mathfrak{R}^n$ и $F(\lambda) \in \mathfrak{R}^n$ в ряд по ортогональной системе базисных функций евклидова функционального пространства, получим [2]

$$Y(i, j) \cong \sum_{k=1}^m A_k x_k(i, j) = \vec{F}^T \vec{X}(i, j), \quad (3)$$

где \vec{F} – вектор фильтра, координаты которого соответствуют коэффициентам пропускания A_k селективного устройства в спектральных каналах; $\vec{X}(i, j)$ – вектор входного оптического сигнала, координаты которого соответствуют сигналам, регистрируемым в спектральных каналах;

$$x_k(t) = q \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi_k(\lambda) X(\lambda, i, j) d\lambda. \quad (4)$$

Таким образом, сигнал на выходе ОЭС с динамической спектральной фильтрацией (3) будет определяться скалярным произведением вектора $\vec{X}(i, j)$, соответствующего потоку излучения, который поступает на вход ОЭС от пространственного элемента (i, j) , и вектора фильтра \vec{F} , соответствующего аппаратной функции селективного устройства.

2. Синтез оптимального обнаружителя оптических сигналов. Обнаружение объектов с использованием ОЭС обычно состоит в обработке оптических полей в интересах выделения полезного сигнала из помех, создаваемых фоном.

Рассмотрим решение задачи обнаружения неоднородного по пространству объекта на неодно-

родном (пестром) фоне с использованием ОЭС с динамической спектральной фильтрацией оптического излучения. В этом случае распределение спектральных яркостей природных образований в поле зрения ОЭС имеет случайный характер и создает флюктуирующий фоновый сигнал, препятствующий обнаружению оптического сигнала объекта наблюдения.

Рассматриваемая задача является частным случаем общей задачи статистической проверки двух взаимоисключающих гипотез H_0 и H_1 . Гипотеза H_0 соответствует значению коэффициента $\alpha = 0$ (присутствует сигнал фона), а гипотеза H_1 – коэффициенту $\alpha = 1$ (присутствует сигнал объекта). Предположим, что для гипотезы H_0 условная плотность вероятности является нормальной и имеет вид $p(\bar{X}/H_0) \sim N(\bar{\mu}_\phi, \Gamma_\phi)$, а для гипотезы H_1 – $p(\bar{X}/H_1) \sim N(\bar{\mu}_o, \Gamma_o)$. Здесь $\bar{\mu}_\phi$ и $\bar{\mu}_o$, а также Γ_ϕ и Γ_o – математические ожидания и корреляционные матрицы реализаций фона и объекта соответственно.

Далее будем рассматривать только случай, приводящий к математически решаемой задаче – равенство корреляционных матриц $\Gamma_\phi = \Gamma_o = \Gamma$ [4]. Если условные плотности вероятности $p(\bar{X}/H_0)$ и $p(\bar{X}/H_1)$ имеют одинаковые корреляционные матрицы, то задача обнаружения неоднородного объекта при наличии флюктуирующих фоновых помех сводится к решению задачи обнаружения детерминированного сигнала на фоне аддитивного шума.

Задача обнаружения сигнала с полностью известными параметрами является одной из основных в теории обнаружения радиолокационных сигналов [7]. При ее решении абстрагируются от реальных случайных параметров сигналов, что позволяет получить результаты в наглядной форме и выявить существенные особенности их обработки. В ходе решения задачи полагают, что сигнал характеризуется неслучайным вектором-столбцом $\bar{\xi} = \|\xi_k\|$, размерность которого определяется характеристиками системы обнаружения. В принятом излучении сигнал может отсутствовать или присутствовать, аддитивно накладываясь в последнем случае на помеху. Обычно применяется следующая выборка [7]:

$$\bar{X} = \alpha \bar{\xi} + \bar{n}, \quad (5)$$

где неизвестное значение коэффициента α равно 0 или 1, а помеха определяется случайным вектором-столбцом $\bar{n} = \|n_k\|$.

Покажем, что задача обнаружения оптического сигнала объекта при наличии фоновых помех

сводится к решению задачи обнаружения сигналов с полностью известными параметрами, рассмотренной выше. Для этого выборку, принимаемую ОЭС с динамической спектральной фильтрацией при равенстве корреляционных матриц $\Gamma_\phi = \Gamma_o = \Gamma$, представим в следующем виде:

$$\bar{X} = \alpha \bar{T} + (1 - \alpha) \bar{B} + \bar{n}, \quad (6)$$

где α – случайный параметр, принимающий значение 1 либо 0; $\bar{T} = \bar{\mu}_o$ – детерминированный сигнал объекта; $\bar{B} = \bar{\mu}_\phi$ – детерминированный сигнал фона; \bar{n} – случайный вектор-столбец выборочных значений, характеризующий аддитивную помеху. Требуется дать зависящее от входного оптического сигнала \bar{X} решение $\hat{\alpha} = 0$ или $\hat{\alpha} = 1$.

Математическое ожидание каждого из элементов выборки помехи полагается равным нулю $M[n_k] = 0$, а плотность вероятности совместного распределения элементов выборки помехи имеет вид:

$$p(\bar{n}) = (2\pi)^{-m/2} |\Gamma|^{-1/2} \exp\left[-\frac{1}{2} \bar{n}^T \Gamma^{-1} \bar{n}\right], \quad (7)$$

где $\Gamma = M[(\bar{n} - M(\bar{n}))(\bar{n} - M(\bar{n}))^T]$ – корреляционная матрица помеховой выборки размером $m \times m$; $|\Gamma|$ – детерминант матрицы.

Сведем рассматриваемую задачу к задаче обнаружения сигнала с полностью известными параметрами, используемой в радиотехнике. Для этого, вычитая сигнал фона \bar{B} из правой и левой частей выражения (6), получим

$$\bar{Z} = \alpha \bar{\xi} + \bar{n}, \quad (8)$$

где $\bar{Z} = \bar{X} - \bar{B}$ – приведенная выборка на входе схемы обработки; $\bar{\xi} = \bar{T} - \bar{B}$ – разность детерминированных оптических сигналов объекта и фона.

Таким образом, задача обнаружения неоднородного объекта на неоднородном фоне сводится к решению задачи обнаружения детерминированного сигнала на фоне аддитивного нормального шума. Полезным сигналом в выражении (8) выступает разность оптических сигналов объекта и фона $\bar{\xi} = \bar{T} - \bar{B}$.

По-видимому, справедливость подобных преобразований подтверждается тем фактом, что разность векторов сигналов объекта и фона $\bar{\xi}$ используется в качестве информативного параметра при последетекторной обработке сигналов по спектральным признакам в оптико-электронных системах [1].

В качестве критерия оптимальности при решении задачи обнаружения оптических сигналов выберем критерий Неймана–Пирсона, так как

априорные вероятности $P(H_1)$ и $P(H_0)$ неизвестны.

Алгоритм оптимального обнаружения оптических сигналов и структурная схема обнаружителя определяются моделями полезного сигнала и помехи. Плотность вероятности реализаций на входе при наличии только помехи будет описываться нормальным распределением с нулевым математическим ожиданием $p_n(\vec{Z}) = N(0, \Gamma)$, а плотность вероятности реализаций при наличии сигнала и помехи – $p_{cn}(\vec{Z}) = N(\vec{\xi}, \Gamma)$. Модели оптических сигналов и помех с учетом выполненных преобразований (7) являются нормальными распределениями $p_{cn}(\vec{Z}) = p_n(\vec{Z} - \vec{\xi})$, сдвинутыми относительно друг друга на величину разности спектральных характеристик объекта и фона.

Алгоритм оптимального обнаружения должен включать наиболее целесообразные правила принятия решения. Обычно для принятия оптимального решения после приема многомерной реализации (8) вычисляется отношение правдоподобия $\ell(\vec{Z}) = p_{cn}(\vec{Z}) / p_n(\vec{Z})$, т. е. отношение плотностей вероятности одной и той же реализации принимаемого сигнала в двух случаях: при наличии сигнала и помехи $p_{cn}(\vec{Z})$ и при наличии только помехи $p_n(\vec{Z})$. Затем отношение правдоподобия сравнивается с пороговым значением ℓ_0 :

$$\hat{\alpha}_{\text{опт}}(\vec{Z}) = \begin{cases} 1 & \ell(\vec{Z}) \geq \ell_0, \\ 0 & \ell(\vec{Z}) < \ell_0. \end{cases}$$

Однако в силу экспоненциального характера нормального распределения, обычно используемого в моделях помех, вместо сравнения $\ell(\vec{Z})$ с величиной ℓ_0 сравнивают логарифм от отношения правдоподобия $\ln(\ell(\vec{Z}))$ с некоторым обоснованным порогом.

Логарифм от отношения правдоподобия определим, учитывая, что $p_{cn}(\vec{Z})$ и $p_n(\vec{Z})$ являются нормальными плотностями вероятности:

$$\ln \ell(\vec{Z}) = Y^{\text{np}} - q^2/2, \quad (9)$$

где $Y^{\text{np}} = \vec{\xi}^T \Gamma^{-1} \vec{Z} = \vec{F}^T \vec{Z}$ – приведенный сигнал на выходе ОЭС с динамической спектральной фильтрацией; $q^2 = \vec{\xi}^T \Gamma^{-1} \vec{\xi}$ – отношение сигнал/помеха по мощности; $\vec{F} = \Gamma^{-1} \vec{\xi}$ – аппаратная функция ОЭС.

Поскольку величины $\ln \ell(\vec{Z})$ и $Y^{\text{np}} = \ln \ell(\vec{Z}) + q^2/2$ связаны монотонно нарастающими зависимостями с отношением правдоподобия $\ell(\vec{Z})$, то каждая из них может быть использо-

вана для сравнения с соответствующим порогом. Оказалось целесообразным для сравнения с порогом Y_0 использовать величину Y^{np} , которая в рассматриваемом случае является выходным сигналом ОЭС.

Однако реализовать оптимальный обнаружитель с использованием полученного алгоритма довольно трудно. Сложность состоит в том, что сформировать выборку $\vec{Z} = \vec{X} - \vec{B}$ возможно лишь путем вычитания оптических сигналов. Чтобы исключить операцию вычитания оптических сигналов, целесообразно преобразовать выражение для сигнала на выходе ОЭС следующим образом:

$$Y^{\text{np}} = \vec{\xi}^T \Gamma^{-1} \vec{Z} = \vec{F}^T \vec{X} - \vec{F}^T \vec{B}. \quad (10)$$

Для сравнения с порогом необходимо использовать сигнал Y :

$$\hat{\alpha}_{\text{опт}}(\vec{Z}) = \begin{cases} 1 & Y \geq h_0, \\ 0 & Y < h_0, \end{cases}$$

где $Y = \vec{F}^T \vec{X}$ – сигнал на выходе оптико-электронной системы с динамической спектральной фильтрацией; $h_0 = Y_0 + \vec{F}^T \vec{B}$ – пороговый уровень.

Для практической реализации преддетекторной обработки оптического излучения с использованием принципов динамической спектральной фильтрации необходимо максимизировать оптический сигнал, поступающий на приемник излучения. Поэтому предлагается нормировать аппаратную функцию ОЭС следующим образом:

$$\vec{F}_n = r \Gamma^{-1} \vec{\xi},$$

где $r = 1 / \left| \vec{s}_{\text{max}} \vec{\xi} \right|$ – нормирующий множитель, приводящий максимальное значение пропускания фильтра в одном из спектральных каналов к 100 %; \vec{s}_{max} – вектор-строка корреляционной матрицы, для которого модуль скалярного произведения максимальный $\left| \vec{s} \vec{\xi} \right| \Rightarrow \text{max}$.

Для сравнения с порогом h_n в этом случае необходимо использовать нормированный сигнал Y_n на выходе ОЭС с динамической спектральной фильтрацией

$$\hat{\alpha}_{\text{опт}}(\vec{Z}) = \begin{cases} 1 & Y_n \geq h_n, \\ 0 & Y_n < h_n, \end{cases}$$

где $Y_n = \vec{F}_n^T \vec{X}$ – нормированный сигнал на выходе оптико-электронной системы с динамической спектральной фильтрацией; $h_n = Y_{0n} + \vec{F}_n^T \vec{B}$ – нормированный пороговый уровень.

На основании полученного алгоритма разработана структурная схема (рис. 1) оптимального обнаружителя, в которой исключена операция вычитания оптических сигналов. Для этого при формировании величины порога учитываются априорные сведения о сигнале фона на выходе динамического спектрального фильтра $h_n = Y_{0n} + \bar{F}_n^T \bar{B}$.

Синтезированный оптимальный обнаружитель состоит из динамического спектрального фильтра (ДСФ), обеспечивающего скалярное произведение входного оптического излучения \bar{X} с аппаратной функцией \bar{F}_n , и порогового устройства (ПУ). Пороговое устройство формирует сигнал $\hat{\alpha} = 0$ (верна гипотеза H_0) или $\hat{\alpha} = 1$ (верна гипотеза H_1) в зависимости от уровня выходного сигнала ДСФ Y_n и вычисленного порогового значения $Y_{0n} + \bar{F}_n^T \bar{B}$. На схеме (рис. 1) скалярные величины показаны обычными стрелками, а векторные величины – широкими.

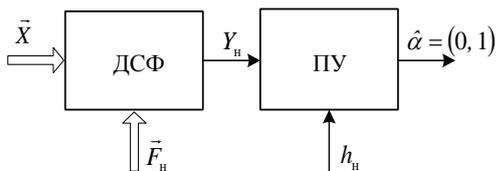


Рис. 1. Структурная схема усовершенствованного оптимального обнаружителя неоднородного объекта наблюдения на неоднородном фоне

Для оценки возможностей разработанного алгоритма оптимального обнаружения оптических сигналов и основных ограничений, возникающих при его реализации, определим количественные характеристики оптимального обнаружителя для случая выделения неоднородного объекта на неоднородном фоне, полагая, что модели сигналов объекта и фона описываются нормальным законом распределения.

При наличии на входе сигнала объекта \bar{T} получим, что $M_{\text{сп}}[Y_n] = \bar{F}_n^T \bar{T}$, $D_{\text{сп}}[Y_n] = q^2 r^2$, а при наличии сигнала фона \bar{B} получим, что $M_{\text{п}}[Y_n] = \bar{F}_n^T \bar{B}$, $D_{\text{п}}[Y_n] = q^2 r^2$.

Согласно критерию Неймана–Пирсона, величина порога выбирается по заданной вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}}$, с использованием следующего выражения:

$$h_n = qr\Phi^{-1}(1 - P_{\text{лт}}) + \bar{F}_n^T \bar{B}, \quad (11)$$

где $\Phi^{-1}(\bullet)$ – квантильная функция, обратная к интегралу вероятности.

При этом условная вероятность правильного обнаружения $P_{\text{по}}$ будет равна:

$$P_{\text{по}} = \int_{h_n}^{\infty} P_{\text{сп}}(Y_n) dY_n = 1 - \Phi(\Phi^{-1}(1 - P_{\text{лт}}) - q). \quad (12)$$

Из выражения (12) следует, что условная вероятность правильного обнаружения $P_{\text{по}}$ зависит от отношения мощности разностного сигнала к мощности помехи q^2 , а также от вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}}$. При этом значение порога зависит от вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}}$, математического ожидания сигнала помехи $M_{\text{п}}[Y_n] = \bar{F}_n^T \bar{B}$ и среднеквадратичного отклонения сигнала помехи на выходе устройства обработки $\sqrt{D_{\text{п}}[Y_n]} = qr$.

С помощью полученных выражений (11), (12) построены зависимости условных вероятностей правильного обнаружения от отношения сигнал/помеха q (рис. 2). Кривые условных вероятностей правильного обнаружения построены при различных уровнях условной вероятности ложной тревоги.

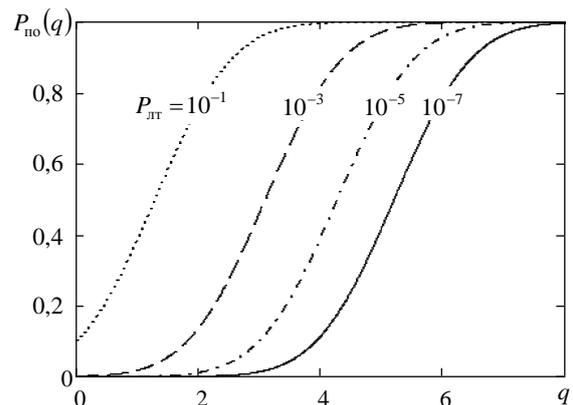


Рис. 2. Графики зависимости условных вероятностей правильного обнаружения от отношения сигнал/помеха при разных значениях вероятности ложной тревоги

Таким образом, с использованием основных положений теории обнаружения сигналов разработан алгоритм оптимального обнаружения оптических сигналов и усовершенствована структурная схема обнаружителя. Определены количественные характеристики обнаружителя, позволяющие при заданном уровне ложной тревоги определить условную вероятность правильного обнаружения объекта наблюдения в зависимости от отношения сигнал/помеха.

3. Экспериментальные исследования динамической спектральной фильтрации. При разработке методики проведения экспериментов учитывались следующие положения. Число спектральных каналов селекции в акустооптическом процессоре ограничено. Это связано с интермодуляционными искажениями, возникающими

между отдельными спектральными составляющими в многочастотной ультразвуковой волне, что ограничивает число управляемых ультразвуковых частотных составляющих.

Целью эксперимента является исследование динамической спектральной фильтрации в интересах повышения контраста изображения объекта на выходе акустооптического процессора при ограниченном числе управляемых акустических каналов и использовании в качестве источников излучения трех лазеров, работающих в красном, зеленом и синем участках спектра.

В акустооптическом процессоре обработка оптических сигналов реализуется как математическая операция вычисления скалярного произведения вектора на вектор [10]. При этом физической реализацией этой операции является дифракция полихроматического оптического излучения на многочастотной, управляемой по амплитуде, ультразвуковой волне.

Таким образом, акустооптический процессор должен выполнить две математические операции – умножение и сложение. В оптике операция умножения реализуется с использованием оптических элементов с управляемой прозрачностью. В акустооптике понятие «управляемая прозрачность» связано с дифракционной эффективностью акустооптического взаимодействия, которая представляет собой отношение квадратов амплитуды дифракционной составляющей E_1 к амплитуде падающего излучения A [8].

В режиме брэгговской дифракции, когда свет падает на фронт ультразвуковой волны под углом Брэгга $\sin\theta_B = k_0/k$ и обеспечивается объемное взаимодействие света с ультразвуком, т. е. когда параметр Клейна–Кука $Q = k_0^2 l/k \geq 4\pi$, где k и k_0 – волновые числа света и звука, l – длина акустооптического взаимодействия, дифракционная эффективность представляется в следующем виде [8]:

$$\eta = \left| \frac{E_1}{A} \right|^2 = \frac{1}{1 + \gamma_1^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta n}{n} \frac{kl}{2} \sqrt{1 + \gamma_1^2} \right), \quad (13)$$

где $\gamma = \varepsilon/q^*$ – отношение параметра расстройки $\varepsilon = 1 + 2k \sin\theta/k_0$ к параметру Рытова $q^* = (\Delta n/n)(k/k_0)^2$; $\Delta n/n$ – относительное изменение показателя преломления среды, вызванное ультразвуком.

Управление величиной дифракционной эффективности, а следовательно, и реализация операции умножения достигаются путем изменения амплитуды звуковой волны, связанной с величиной относительного изменения коэффициента преломления соотношением [9]

$$\frac{\Delta n}{n} = \sqrt{\frac{M_2 P_{\text{ак}}}{lb}}, \quad (14)$$

где $P_{\text{ак}}$ – акустическая мощность; l и b – размеры возбудителя ультразвука; M_2 – коэффициент акустического качества среды.

В оптических процессорах математическая операция сложения осуществляется путем пространственного суммирования нескольких световых лучей.

В акустооптическом процессоре полихроматическое световое излучение взаимодействует с многочастотным ультразвуковым полем. Следовательно, дифрагировать на ультразвуковой сложной пространственной решетке будут те спектральные компоненты, для которых выполняется условие брэгговского синхронизма: $\lambda f_0 = 2v_0 \sin\theta_B = \text{const}$, где f_0 и v_0 – частота и скорость ультразвука, λ – длина световой волны в среде.

При акустооптическом взаимодействии угловое положение дифракционных компонент связано с проекциями волнового вектора света \vec{k} на оси координат $k_1 = \kappa \cos\theta$, $k_2 = \kappa \sin\theta$ и волновым числом звука k_0 соотношением

$$\text{tg}\varphi = \frac{k_2 + k_0}{k_1} \approx \frac{\lambda f_0}{v_0}. \quad (15)$$

Из выражения следует, что световые компоненты с различными длинами волн при выполнении условий брэгговского синхронизма $\lambda f_0 = \text{const}$ на границе звукового поля складываются в единый световой пучок, обеспечивая тем самым операцию сложения.

Таким образом, акустооптический светофильтр с управляемым коэффициентом пропускания выполняет роль процессора, в котором обработка оптического излучения реализуется как математическая операция вычисления скалярного произведения вектора на вектор.

При проведении экспериментального исследования решалась задача повышения контраста изображения объекта на выходе ОЭС путем динамической спектральной фильтрации полихроматического излучения. Контраст объекта определялся с использованием следующего выражения

$$K = \frac{T - B}{T + B}, \quad (16)$$

где T , B – сигналы объекта и фона на выходе ОЭС.

Для определения аппаратной функции акустооптического фильтра, которая обеспечивает повышение контраста объекта на выходе ОЭС, используем векторное представление оптических сигналов. Спектральная плотность излучения объекта в рассматриваемом случае будет харак-

теризоваться вектором \vec{T} , а излучения фона – вектором \vec{B} (рис. 3).

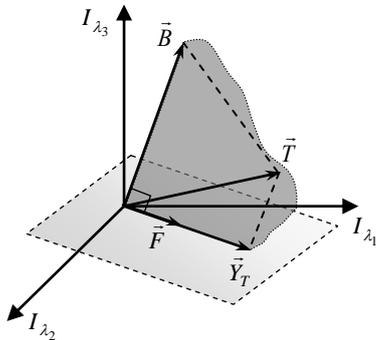


Рис. 3. Иллюстрация к динамической спектральной фильтрации

Аналитическое выражение для нормированного вектора фильтра \vec{F} , обеспечивающего повышение контраста объекта, получим с использованием соотношения для перпендикуляра, опущенного из вектора \vec{T} на одномерное подпространство \vec{B} [2]

$$\vec{F} = \frac{1}{r}(\vec{T} - N \cdot \vec{B}), \quad (17)$$

где $N = (\vec{T}^T \vec{B}) / (\vec{B}^T \vec{B})$ – длина проекции вектора объекта \vec{T} на вектор фона \vec{B} ; r – коэффициент нормировки, обеспечивающий максимизацию оптического сигнала, регистрируемого приемником излучения.

Структурная схема экспериментальной установки (рис. 4) включает следующие элементы и устройства: 1 – источник оптического излучения, в качестве которого использовались три полупроводниковых лазера, работающих в диапазонах красного, зеленого и синего участков спектра; 2 – блок поляризационных светофильтров, обеспечивающих изменение мощности лазерных пучков с целью создания полихроматического излучения с требуемой спектральной плотностью; 3 – сумматор оптического излучения лазеров, обеспечивающий объединение в пространстве излучения лазеров в полихроматический световой пучок; 4 – формирователь оптических сигналов, подлежащих селекции, в качестве которого использовалась пара сменных абсорбционных светофильтров с известными спектральными коэффициентами пропускания (один выступал в качестве «объекта», а другой – «фона»); 5 – акустооптический модулятор МЛ-201 на основе стекла ТФ-7, в котором возбуждалась продольная акустическая волна; 6 – приемник излучения (фотоэлектронный умножитель ФЭУ-51), на выходе которого регистрировалась сила тока с помощью микроамперметра 7; 8 – сумматор высокочастотных сигналов; 9 – блок высокочастотных вольтметров для контроля параметров управляющего сигнала; 10 – регулируемые усилители напряжения, обеспечивающие требуемую величину высокочастотного напряжения на возбудителе ультразвука акустооптического модулятора; 11 – блок высокочастотных генераторов.

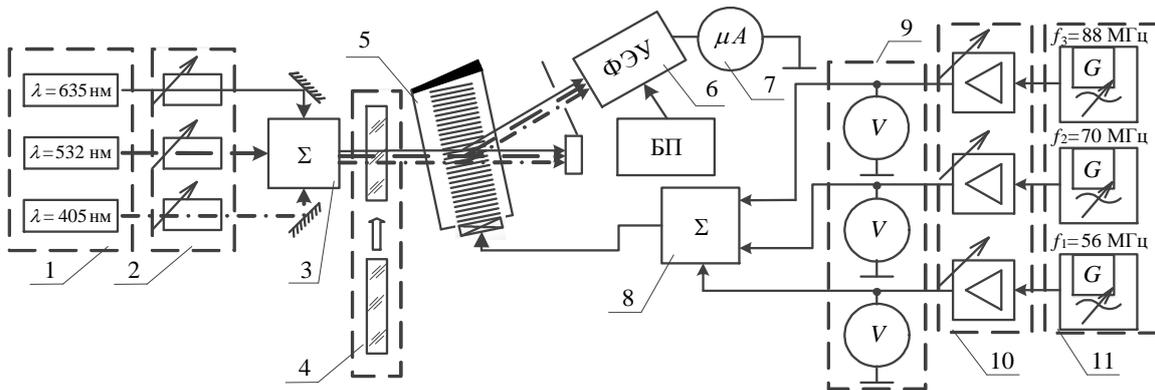


Рис. 4. Структурная схема экспериментальной установки

Методика проведения эксперимента состояла в следующем.

1. В акустооптическом спектрометре обеспечивался брэгговский режим взаимодействия световых и звуковых волн. Для этого при постоянном угле взаимодействия частота каждого из трех высокочастотных генераторов выбиралась таким образом, чтобы произведение длины волны каж-

дого из трех лазеров на частоту звука оставалось постоянным $f_0 \lambda = \text{const}$.

2. Использовались две пары светофильтров. Одна пара светофильтров имела существенно различные спектральные свойства: («объект» – синий светофильтр СС-6, «фон» – оранжевый светофильтр ОС-11), а другая – близкие характеристики СС-6 и ОС-11 соответственно (рис. 5).

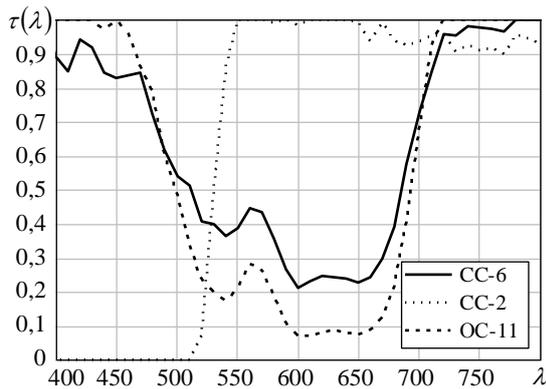


Рис. 5. Коэффициенты пропускания для трех абсорбционных светофильтров

3. Определялись спектральные характеристики пропускания светофильтров в каждом из спектральных диапазонов, и вычислялась аппаратная функция (вектор фильтра) акустооптического процессора с использованием выражения (17).

4. Значение дифракционной эффективности в каждом из спектральных каналов определялось в соответствии с величиной проекций вектора фильтра на оси в трехмерном спектральном пространстве. Затем изменялись амплитуды высокочастотных сигналов каждого из трех генераторов таким образом, чтобы обеспечивать подавление спектральных составляющих излучения одного их абсорбционных светофильтров «фона» с минимальным ослаблением оптического сигнала светофильтра «объекта».

5. Последовательно измерялись суммарные значения токов на выходе приемника излучения, возникающие при воздействии излучения, прошедшего вначале светофильтр «объекта», а затем «фона», и вычислялось значение контраста с использованием выражения (16).

6. Эффективность спектральной фильтрации определялась путем сравнения контраста до проведения спектральной фильтрации и по ее окончании. Для определения контраста объекта до проведения фильтрации устанавливались одинаковые величины напряжений высокочастотных сигналов каждого из генераторов, и в каждом спектральном канале регистрировался ток на выходе ФЭУ-51, пропорциональный световым потокам, прошедшим светофильтры (СС-6 – «объект», ОС-11 – «фон-1», СС-2 – «фон-2»).

7. Достоверность результатов эксперимента обеспечивалась путем проведения до пяти независимых опытов, включающих настройку акустооптического процессора, формирование управляющего сигнала и измерения тока приемника излучения с последующим усреднением результатов измерений.

В результате проведения эксперимента установлено, что среднее значение контраста для двух

светофильтров СС-6 и ОС-11 без управляемой фильтрации составило 0,33, а для светофильтров СС-6 и СС-2 – 0,35. После проведения спектральной фильтрации, позволяющей обеспечить минимальную величину спектрального коэффициента пропускания для одного из абсорбционных светофильтров, средний контраст для первого набора светофильтров составил 0,95, а для второго – 0,88.

Таким образом, показано, что в результате спектральной фильтрации можно повысить контраст объекта на изображении примерно в два-три раза. Экспериментально подтверждены известные положения, что контраст объекта зависит от различия спектральных характеристик пропускания двух абсорбционных светофильтров, имитирующих сигналы объекта и фона. Например, при существенном различии спектров значение контраста составило 0,95, а при относительно близких характеристиках светофильтров – 0,88.

Выводы. В отличие от систем спектральной фильтрации, в которых для разложения излучения на спектральные составляющие используется диспергирующее устройство с постоянными коэффициентами пропускания, в настоящей работе устройство спектральной фильтрации обладает регулируемым коэффициентом пропускания.

С использованием принципов динамической спектральной фильтрации и основных положений теории обнаружения сигналов разработан алгоритм оптимального обнаружения оптических сигналов, а также новый алгоритм для вычисления величины порогового уровня оптимального обнаружителя с целью уменьшения числа функциональных элементов в структурной схеме обнаружителя.

Определены количественные характеристики обнаружителя, позволяющие при заданном уровне ложной тревоги определить условную вероятность правильного обнаружения объекта наблюдения в зависимости от отношения сигнал/помеха. Количественные характеристики обнаружителя получены в предположении, что спектральные характеристики объекта и фона подчиняются нормальному закону распределения, а их корреляционные характеристики (корреляционные матрицы фона и объекта) одинаковы $\Gamma_{\phi} = \Gamma_o = \Gamma$.

Экспериментально установлена возможность создания управляемого селективирующего устройства, позволяющего обеспечить различный спектральный коэффициент пропускания для двух оптических сигналов, отличающихся по спектральному составу, при ограниченном числе управляемых спектральных каналов. В ходе эксперимента спектральная селекция обеспечивалась путем изменения амплитуды частотных компонент ультразвуковой волны в соответствии с

управляющим сигналом при дифракции полихроматического лазерного излучения на много-частотном ультразвуке.

Эффективность процесса фильтрации определялась по величине контраста до и после фильтрации. Экспериментально установлено, что при наличии трех спектральных каналов селекции удастся повысить контраст на выходе в несколько раз.

Библиографический список

1. Manolakis D., Marden D., Shaw G. A. Hyperspectral image processing for automatic target detection applications. *Linc. Lab. J.* 2003. Vol. 14, N 1. P. 79–113.
2. Купченко Л. Ф., Рыбьяк А. С. Динамическая спектральная фильтрация оптического излучения в оптоэлектронных системах. *Электромагнитные волны и электронные системы.* 2011. Т. 16, вып. 4. С. 32–43.
3. Shnitsner P., Rheaum L., Mcnamee S. Real-time spectrally efficient target imaging. Small business innovation research. URL: http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/608289/1/ITC_2000_00-23-3.pdf
4. Купченко Л. Ф., Рыбьяк А. С., Проклов В. В., Антонов С. Н. Обнаружение объектов по спектральным признакам в оптико-электронных системах с использованием принципов динамической фильтрации. *Прикладная радиоэлектроника.* 2011. Т. 10, № 1. С. 22–26.
5. Купченко Л. Ф., Рыбьяк А. С., Гурин О. А., Вдовенков В. Ю. Экспериментальные исследования процесса динамической спектральной фильтрации с использованием взаимодействия лазерного излучения с многочастотной акустической волной. *Прикладная радиоэлектроника.* 2016. Т. 16, № 2. С. 100–104.
6. Тихонов В. И. *Оптимальный прием сигналов.* Москва: Радио и связь, 1983. 320 с.
7. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. *Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех.* Москва: Радио и связь, 1981. 416 с.
8. Акустооптические эффекты при сильном взаимодействии: теория и эксперимент. *Метод непрерывных дробей при решении акустооптических задач.* Монография. Под ред. Л. Ф. Купченко. Харьков: ООО «ЭДЕНА», 2009. 264 с.
9. Балакшиев В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. *Физические основы акустооптики.* Москва: Радио и связь, 1985. 285 с.
10. Купченко Л. Ф., Слабунова Н. В., Гурин О. А. Акустооптический процессор в оптоэлектронной системе, обеспечивающий динамическую спектральную фильтрацию. *Прикладная радиоэлектроника.* 2016. Т. 15, № 4. С. 359–361.

REFERENCE

1. Manolakis, D., Marden, D., Shaw, G. A., 2003. Hyperspectral image processing for automatic target detection applications. *Linc. Lab. J.*, **14**(1), pp. 79–113.
2. Kupchenko, L. F., Ryb'yak, A. S., 2011. The Dynamic Spectral Filtration of Optical Radiation in Optoelectronic Systems. *Electromagnetic waves and electronic systems*, **4**(16), pp. 32–43 (in Russian).
3. Shnitsner, P., Rheaum, L., Mcnamee, S., 2000. Real-time spectrally efficient target imaging. Small business innovation research [pdf]. Available at: http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/608289/1/ITC_2000_00-23-3.pdf
4. Kupchenko, L. F., Ryb'yak, A. S., Proklov, V. V., Antonov, S. N., 2011. Detection of objects by spectral characteristics in optoelectronic systems using the principles of dynamic filtering. *Applied radio electronics*, **10**(1), pp. 22–26 (in Russian).

5. Kupchenko, L. F., Goorin, O. A., Rybiak, A. S., Vdovenkov, V. Yu., 2016. Experimental researches of dynamic spectral filtration using laser radiation interaction with multifrequency acoustic wave. *Applied radio electronics*, **16**(2), pp. 100–104 (in Russian).
6. Tikhonov, V. I., 1983. *Optimum signal reception.* Moscow: Radio i svyaz' Publ. (in Russian).
7. Shirman, Ya. D., Manzhos, V. N., 1981. *Theory and technique of processing radar information against background noise.* Moscow: Radio i svyaz' Publ. (in Russian).
8. Kupchenko, L. F. ed., 2009. Acousto-optical effects with strong interaction: theory and experiment. In: *Continuous fraction method for solving acousto-optical problems.* Kharkiv: EDENA Publ. (in Russian).
9. Balakshii, V. I., Parygin, V. N., Chirkov, L. E., 1985. *Physical principles of acousto-optics.* Moscow: Radio i svyaz' Publ. (in Russian).
10. Kupchenko, L. F., Slabunova, N. V., Goorin, O. A., 2016. Acoustooptical processor in optoelectronic system, providing dynamic spectral filtration. *Applied radio electronics*, **15**(4), pp. 359–361 (in Russian).

Рукопись поступила 12.09.2017.

L. F. Kupchenko, A. S. Rybiak, O. O. Goorin

DYNAMIC SPECTRAL FILTRATION IN ELECTRO-OPTICAL SYSTEM OF TARGET DETECTION

This paper generalizes and develops the principles of dynamic spectral filtration, which is a further development of imaging spectroscopy. Electro-optical systems with dynamic spectral filtration in contrast to imaging spectrometers realize controlled spectral filtration, which ensures maximum suppression of the spectral components of background radiation with a minimum attenuation of the target optical signal in the pre-detector area. The purpose of the article is to generalize and develop the principles of dynamic spectral filtration in the interests of creating electro-optical systems of targets detection by spectral features. The problem of optimal selection of optical signals from background noise has been reduced to solving a problem of signal detection with a priori known parameters used in radiolocation theory. The article states the principles of dynamic spectral filtration of optical radiation. It also describes an algorithm for optimal detection of targets by spectral characteristics and carries out a synthesis of an optimal optical signal detector. The paper defines the quantitative characteristics of the detector, that for a given false alarm level allows to determine the conditional probability of correct detection of the targets of observation depending on the signal-to-interference ratio. The quantitative characteristics of the detector were obtained on the assumption that the signals of the target and the background obey the normal distribution law, and their correlation characteristics (the correlation matrices of the background and the target) are equal. The work experimentally establishes the possibility of creating a controlled acoustooptical selection device providing a spectral selection of two optical signals differing in spectral composition by varying the amplitude of the frequency components of an ultrasonic wave. In this case, three lasers operating in the red, green and blue regions of the spectrum were used as the source of optical radiation. In the course of the experiment, spectral selection was provided by diffraction of polychromatic laser radiation by multifrequency ultrasound. The efficiency of the filtration process was determined by the contrast value before and after filtration. It was experimentally established that, in the presence of three spectral channels of selection, it is possible to increase the contrast at the output in several times.

Key words: electro-optical system, dynamic spectral filtration, acoustooptical filter.

Л. Ф. Купченко, А. С. Риб'як, О. О. Гурін

ДИНАМІЧНА СПЕКТРАЛЬНА
ФІЛЬТРАЦІЯ СИГНАЛІВ
В ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ
ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ

У роботі узагальнюються і розвиваються принципи динамічної спектральної фільтрації, яка є подальшим розвитком зображувальної спектроскопії. На відміну від зображувальних спектрометрів, в оптико-електронних системах з динамічною спектральною фільтрацією реалізується керована спектральна фільтрація, що забезпечує максимальне придушення спектральних складових випромінювання фону при мінімальному ослабленні оптичного сигналу об'єкта в додетекторній області. Метою статті є узагальнення і розвиток принципів динамічної спектральної фільтрації в інтересах створення оптико-електронних систем виявлення об'єктів за спектральними ознаками. Задачу оптимального виділення оптичних сигналів з фонових завад вдалося звести до розв'язання задачі виявлення сигналів з апріорно відомими параметрами, що використовується в теорії радіолокації. У статті викладені принципи динамічної спектральної фільтрації оптичного випромінювання. Описано алгоритм оптимального виявлення об'єктів

за спектральними ознаками і синтез оптимального детектора оптичних сигналів. У роботі визначено кількісні характеристики детектора, що дозволяють при заданому рівні хибної тривоги визначити умовну ймовірність правильного виявлення об'єкта спостереження в залежності від відношення сигнал/завада. Кількісні характеристики детектора отримані в припущенні, що сигнали об'єкта і фону підкоряються нормальному закону розподілу, а їх кореляційні характеристики (кореляційні матриці фону і об'єкта) однакові. Експериментально встановлено можливість створення керованого акустооптичного селектувального пристрою, що забезпечує спектральну селекцію двох оптичних сигналів, що відрізняються за спектральним складом, шляхом зміни амплітуди частотних компонент ультразвукової хвилі. При цьому в якості джерела оптичного випромінювання використовувалися три лазери, що працюють в червоній, зеленій і синій ділянках спектра. В ході експерименту спектральна селекція забезпечувалася шляхом дифракції поліхроматичного лазерного випромінювання на багаточастотному ультразвуці. Ефективність процесу фільтрації визначалася за величиною контрасту до і після фільтрації. Експериментально встановлено, що при наявності трьох спектральних каналів селекції вдається підвищити контраст на виході в кілька разів.

Ключові слова: оптико-електронна система, динамічна спектральна фільтрація, акустооптичний світлофільтр.