

УДК 681.78

А.С. Рыбьяк

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## К ВОПРОСУ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ПРИЗНАКАМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ

Решена задача обнаружения малоразмерных объектов по спектральным признакам с помощью оптико-электронных систем, включающих динамический спектральный фильтр. Показано, что в рассматриваемом случае задача сводится к обнаружению сигналов со случайными параметрами. Синтезирован алгоритм оптимального обнаружения малоразмерных объектов по спектральным признакам и разработана структурная схема обнаружителя.

**Ключевые слова:** оптико-электронные системы, динамическая спектральная фильтрация.

### Введение

Обнаружение объектов (т.е. установление факта наличия в поле зрения объекта поиска и определение его местоположения) является одной из наиболее сложных задач, решаемых с использованием оптико-электронных систем (ОЭС).

В настоящей статье рассматриваются вопросы обнаружения малоразмерных объектов по спектральным признакам с помощью ОЭС с динамической спектральной фильтрацией. Под малоразмерными будем понимать такие объекты, геометрические размеры которых всего в несколько раз превышают размеры элементов разрешения оптоэлектронной системы на местности. Обнаружение в этом случае осуществляется на "пределе" разрешения ОЭС, а информация о форме объектов сильно искажена.

Под динамической спектральной фильтрацией мы будем понимать такую преддетекторную обработку оптического излучения в ОЭС, которая на основе априорной информации о спектральных характеристиках излучения объекта и фона обеспечивает селекцию полезного оптического сигнала при наличии излучения помехи [1].

Настоящая статья является продолжением работ [2, 3], в которых с использованием принципов динамической спектральной фильтрации и основных положений теории оптимального обнаружения сигналов разработаны алгоритмы оптимального обнаружения объектов по спектральным признакам для двух случаев. В первом случае (рис. 1, а) [2] предполагалось, что объект разрешается оптоэлектронной системой, т.е. некий минимальный критический размер объекта  $\ell_{\min}$  превышает размеры элемента разрешения оптоэлектронной системы на местности  $\Delta$  ( $\ell_{\min} \geq \Delta$ ). При решении задачи обнаружения в работе [2] считалось, что на вход ОЭС мо-

жет поступать либо излучение объекта, либо фона. При этом параметр  $\gamma$ , соответствующий величине площади элемента разрешения, перекрываемой изображением объекта наблюдения, равняется 1.

Во втором случае (рис. 1, в) [3], рассматривается задача обнаружения субпиксельного объекта, т.е. случай, когда геометрические размеры объекта наблюдения меньше размеров элемента разрешения оптоэлектронной системы на местности ( $\ell_{\min} < \Delta$ ). При этом параметр  $\gamma$  является постоянной величиной и может принимать значения на интервале  $(0, 1)$ .

В то же время значительный практический интерес представляет решение задачи обнаружения малоразмерных объектов по спектральным признакам с помощью оптико-электронных систем (рис. 1, б), когда изображение объекта состоит из полных и смешанных точек, т.е. параметр  $\gamma$  является случайной величиной, принимающей значения  $\gamma \in (0, 1]$ .

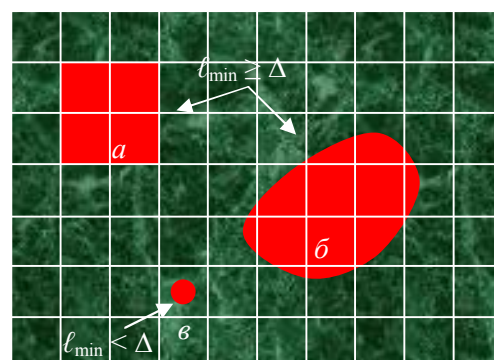


Рис. 1. К задаче обнаружения малоразмерных объектов по спектральным признакам

Таким образом, **целью статьи** является разработка алгоритма обнаружения малоразмерных объектов по спектральным признакам с использованием ОЭС с динамической спектральной фильтрацией.

## Постановка задачі

Рассмотрим решение задачи обнаружения с помощью ОЭС с динамической спектральной фильтрацией малоразмерного объекта на неоднородном фоне. В этом случае распределение яркости природных образований, окружающих объект наблюдения, носит случайный характер и создает неоднородный фон, препятствующий обнаружению.

Рассматриваемая задача, по сути, является частным случаем задачи статистической проверки гипотез при двухальтернативном обнаружении. В этом случае рассматриваются две гипотезы:  $H_0$  и  $H_1$ . Гипотезе  $H_0$  соответствует значение коэффициента  $\alpha = 0$  (присутствует только сигнал фона), а гипотезе  $H_1 - \alpha = 1$  (присутствует смесь сигналов объекта наблюдения и фона).

Предположим, что в первом случае условная плотность вероятности имеет вид

$$p(\bar{X}/H_0) \sim N(\bar{B}, \Gamma),$$

а, во втором –

$$p(\bar{X}/H_1) \sim N(\bar{D}, \Gamma).$$

Здесь  $\bar{B}, \bar{D}$  –  $m$ -мерные векторы математического ожидания сигнала фона и смеси сигналов фона и объекта соответственно;  $m$  – количество спектральных каналов устройства спектральной селекции оптоэлектронной системы;  $\Gamma$  – корреляционная матрица.

Вектор математического ожидания  $\bar{D}$  представим в виде линейной смеси математических ожиданий сигналов объекта  $\bar{T}$  и фона  $\bar{B}$  соответственно:

$$\bar{D} = \gamma \bar{T} + (1 - \gamma) \bar{B},$$

где  $\gamma = S_T/S$  – коэффициент, соответствующий площади элемента разрешения, перекрываемой изображением объекта наблюдения;  $S$  – площадь элемента разрешения;  $S_T$  – площадь изображения объекта наблюдения. В рассматриваемом случае  $\gamma$  является случайной величиной, принимающей значения  $\gamma \in (0, 1]$ . Это объясняется тем, что при обнаружении малоразмерных объектов состав элемента разрешения ОЭС на местности зависит как от взаимного расположения объекта и самого элемента, так и от формы объекта наблюдения.

Таким образом, постановка задачи обнаружения малоразмерного объекта на неоднородном фоне будет состоять в следующем. На вход оптико-электронной системы поступает либо смесь сигналов объекта и фона со случайным параметром  $\gamma$ , либо сигнал фона, на которые накладывается аддитивная помеха. В результате принимается следующая выборка:

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

где  $\alpha$  – случайный параметр, принимающий значение 1 либо 0;  $\bar{n}$  – 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 полагаем равным нулю:

$$M[\mathbf{n}_k] = 0,$$

а плотность вероятности распределения элементов выборки помехи имеет вид

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

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

Вычитая из правой и левой части сигнала фона  $\bar{B}$ , сведем выражения (1) к следующему виду:

$$\bar{Z} = \alpha \bar{\xi}(\gamma) + \bar{n}, \quad (3)$$

где  $\bar{Z} = \bar{X} - \bar{B}$  – приведенная выборка на входе устройства обработки,  $\bar{\xi}(\gamma) = \gamma(\bar{T} - \bar{B})$  – полезный сигнал со случайным параметром  $\gamma$ , представляющий собой разность спектральных характеристик объекта и фона.

Анализ выражения (3) показывает, что задача обнаружения малоразмерного объекта на неоднородном фоне сводится к решению задачи обнаружения сигналов со случайными параметрами.

Алгоритм оптимального обнаружителя и его структурная схема определяется моделями сигнала и помехи. При этом в качестве критерия оптимальности выберем критерий Неймана-Пирсона, так как априорные вероятности  $P(H_1)$  и  $P(H_0)$  неизвестны.

## Алгоритм оптимального обнаружения малоразмерных объектов

Алгоритм оптимального обнаружения должен включать наиболее целесообразные правила принятия решения. Обычно при решении задачи обнаружения сигналов со случайными параметрами для принятия оптимального решения после приема многомерной реализации (3) должно вычисляться отношение правдоподобия путем усреднения по случайному параметру  $\gamma$  частных отношений правдоподобия для данного сигнала  $\bar{Z}$ , рассматриваемого как детерминированный [4]:

$$\ell(\bar{Z}) = \frac{p_{\text{сп}}(\bar{Z})}{p_{\text{п}}(\bar{Z})} = \int_{\gamma} \ell(\bar{Z}/\gamma) p(\gamma) d\gamma, \quad (4)$$

где  $p_{\text{сп}}(\bar{Z})$  – плотность вероятности реализации  $\bar{Z}$  в случае наличия полезного сигнала с помехой;  $p_{\text{п}}(\bar{Z})$  – плотность вероятности реализации  $\bar{Z}$  в случае наличия только помехи;

$$\ell(\bar{Z}/\gamma) = p_{\text{сп}}(\bar{Z}/\gamma) / p_{\text{п}}(\bar{Z}) = \ell(\gamma) -$$

частное отношение правдоподобия, рассчитанное для фиксированной реализации  $\gamma$ ;  $p(\gamma)$  – плотность вероятности реализаций  $\gamma$ .

С учетом полученного в [3] частного отношения правдоподобия, выражение (4) принимает следующий вид:

$$\ell(\bar{Z}) = \int_{\gamma} e^{Y(\gamma) - \frac{q^2(\gamma)}{2}} p(\gamma) d\gamma = \int_{\gamma} e^{\gamma Y - \frac{\gamma^2 q^2}{2}} p(\gamma) d\gamma, \quad (5)$$

где  $Y(\gamma) = \bar{\xi}(\gamma)^T \Gamma^{-1} \bar{Z} = \gamma \bar{\xi}^T \Gamma^{-1} \bar{Z} = \gamma Y$ ;

$$q^2(\gamma) = \bar{\xi}(\gamma)^T \Gamma^{-1} \bar{\xi}(\gamma) = \gamma^2 \bar{\xi}^T \Gamma^{-1} \bar{\xi} = \gamma^2 q^2.$$

Здесь  $Y$  – сигнал на выходе оптико-электронной системы с динамической спектральной фильтрацией;  $q^2$  – отношение сигнал-помеха;  $\bar{\xi}$  – полезный сигнал.

Величины  $Y$ ,  $q^2$  и  $\bar{\xi}$  вычислены при  $\gamma = 1$ .

Анализ выражения (5) показывает, что синтезировать алгоритм оптимального обнаружения малоразмерного объекта можно и без знания плотности вероятности  $p(\gamma)$ . Это объясняется тем, что произвольная плотность вероятности  $p(\gamma)$  всегда выражается неотрицательной величиной. Функция  $e^{\gamma Y}$  при любом  $\gamma$  является монотонно нарастающей аргумента  $Y$ . Интеграл в выражении (5) – также монотонно нарастающая функция этого аргумента. Следовательно, сравнение  $\ell$  с порогом может быть заменено сравнением  $Y$  со своим порогом [4].

В силу особенностей преддетекторной обработки оптического излучения с использованием принципов динамической спектральной фильтрации для сравнения со своим порогом будем использовать нормированную величину  $Y_{\text{н}}$ , которая имеет вид:

$$Y_{\text{н}} = \gamma(\gamma) \bar{\xi}(\gamma)^T \Gamma^{-1} \bar{Z} = \gamma \bar{\xi}^T \Gamma^{-1} \bar{Z} = \bar{F}_{\text{н}}^T \bar{X} - \bar{F}_{\text{н}}^T \bar{B}, \quad (6)$$

где  $\bar{F}_{\text{н}} = \Gamma^{-1} \bar{\xi}$  – нормированная аппаратная функция ОЭС;  $\gamma(\gamma)$  – нормирующий множитель, который определяется следующим выражением:

$$\gamma(\gamma) = \frac{1}{|\bar{s}_{\text{max}}^T \bar{\xi}(\gamma)|} = \frac{1}{\gamma |\bar{s}_{\text{max}}^T \bar{\xi}|} = \frac{\gamma}{\gamma},$$

где  $\gamma$  – нормирующий множитель, вычисленный при  $\gamma = 1$ ;  $\bar{s}_{\text{max}}$  – вектор-строка обратной корреляционной матрицы, максимизирующий модуль скалярного произведения  $|\bar{s}^T \bar{\xi}| \Rightarrow \max$ .

Как следует из выражения (6) аппаратная функция оптимального обнаружителя, представленная в виде вектора динамического фильтра  $\bar{F}_{\text{н}}$ , не зависит от отношения размера площади изображения объекта к размеру площади элемента разрешения ОЭС.

Существенно, что и пороговое значение оптимального обнаружителя в рассматриваемом случае также не зависит от случайного параметра  $\gamma$ .

Согласно критерию Неймана-Пирсона, величину порога выбирают по заданной вероятности ложной тревоги  $P_{\text{лт}}$ , которая определяется выражением:

$$P_{\text{лт}} = \int_{Y_{0\text{н}}}^{\infty} p_{\text{п}}(Y_{\text{н}}) dY_{\text{н}} = 1 - \Phi(Y_{0\text{н}}/qr), \quad (7)$$

где  $\Phi(\bullet)$  – интеграл вероятности;  $p_{\text{п}}(Y_{\text{н}})$  – плотность вероятности нормированного сигнала на выходе ОЭС при наличии сигнала помехи, которая определяется соотношением:

$$p_{\text{п}}(Y_{\text{н}}) = (1/qr\sqrt{2\pi}) e^{-Y_{\text{н}}^2/2q^2r^2}.$$

После преобразования формулы (7) получим следующее выражение для величины порога:

$$Y_{0\text{н}} = qr\Phi^{-1}(1 - P_{\text{лт}}), \quad (8)$$

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

Анализ выражений (6) и (8) показывает, что аппаратная функция  $\bar{F}_{\text{н}}$  и величина порога  $Y_{0\text{н}}$  оптимального обнаружителя не зависят от  $\gamma$ . Это объясняется тем, что спектральные характеристики фона и объекта наблюдения в данном случае остаются постоянными и не зависят от площади элемента разрешения, перекрываемой изображением объекта и определяемой коэффициентом  $\gamma = S_{\text{T}}/S$ .

Таким образом, синтезированный по критерию Неймана-Пирсона обнаружитель является структурно инвариантным к случайному параметру  $\gamma$  обнаруживаемого сигнала малоразмерного объекта.

Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что в радиотехнике похожая задача решена Тихоновым [5]. В работе [5] показано, что при обнаружении радиосигнала со случайной фазой и амплитудой синтезированный оптимальный обнаружитель

ружитель является инвариантным к случайной амплитуде сигнала.

Выражение (6) позволяет разработать структурную схему оптимального обнаружителя малоразмерных объектов на основе принципов динамической спектральной фильтрации (рис. 2).

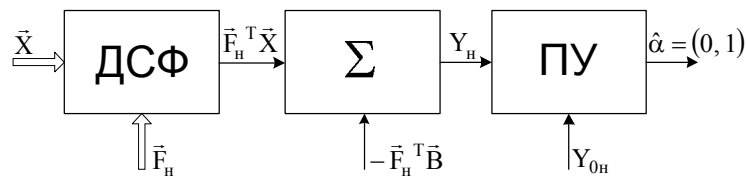


Рис. 2. Схема оптимального обнаружителя малоразмерного объекта на неоднородном фоне

На схеме скалярные величины показаны одинарными стрелками, а векторные величины – двойными. Пороговое устройство формирует сигнал  $\hat{\alpha} = 0$  или  $\hat{\alpha} = 1$  в зависимости от величины выходного сигнала  $Y_H$  и вычисленного порогового значения  $Y_{0H}$ .

## Выводы

С использованием принципов динамической спектральной фильтрации и основных положений теории оптимального обнаружения сигналов синтезирован алгоритм обнаружения малоразмерных объектов по спектральным признакам, а также разработана структурная схема оптимального обнаружителя.

В рассматриваемом случае задача сводится к обнаружению сигнала со случайным параметром, который характеризует площадь элемента разрешения, перекрываемую изображением объекта наблюдения.

Показано, что синтезированный по критерию Неймана-Пирсона обнаружитель является структурно инвариантным к случайному параметру обнаруживаемого сигнала малоразмерного объекта.

## Список литературы

1. Купченко Л. Ф. Динамическая спектральная фильтрация оптического излучения в оптоэлектронных системах / Л. Ф. Купченко, А. С. Рыбьяк // *Электромагнитные волны и электронные системы. – Международный научно-технический журнал.* – М.: Радиотехника, 2011. – Т.16, Вып. 4. – С. 32–43.
2. Купченко Л. Ф. Обнаружение объектов по спектральным признакам в оптико-электронных системах с использованием принципов динамической фильтрации / Л. Ф. Купченко, А. С. Рыбьяк, В. В. Проклов, С. Н. Антонов // *Прикладная радиоэлектроника.* – Х.: ХНУРЕ – 2011. – Том 10, №1 – С. 22–26.
3. Рыбьяк А. С. Обнаружение субпиксельных объектов по спектральным признакам в оптико-электронных системах с использованием принципов динамической фильтрации / А. С. Рыбьяк // *Наука і техніка Повітряних Сил.* – Х.: ХУПС – 2013. – Том 10, №1 – С. 22–26.
4. Ширман Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М: Радио и связь, 1981. – 416 с.
5. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов / В. И. Тихонов. – М: Радио и связь, 1983. – 320 с.

Поступила в редколлегию 11.07.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ДО ПИТАННЯ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА СПЕКТРАЛЬНИМИ ОЗНАКАМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИМИ СИСТЕМАМИ З ДИНАМІЧНОЮ ФІЛЬТРАЦІЄЮ

А.С. Риб'як

*Розв'язана задача виявлення малорозмірних об'єктів за спектральними ознаками за допомогою оптико-електронних систем, які містять динамічний спектральний фільтр. Показано, що у випадку, який розглядається, задача зводиться до виявлення сигналів із випадковими параметрами. Синтезовано алгоритм оптимального виявлення малорозмірних об'єктів за спектральними ознаками та розроблена структурна схема виявлювача.*

**Ключові слова:** оптико-електронні системи, динамічна спектральна фільтрація.

## TO THE QUESTION OF HOW TO DETECT LOW-SIZED OBJECTS ACCORDING TO THEIR SPECTRAL FEATURES BY ELECTRO-OPTICAL SYSTEMS WITH DYNAMICAL FILTRATION

A.S. Rubiak

*The article deals with the problem of low-sized objects detection by spectral features using electro-optical systems that include dynamical spectral filter. It shows that in case under discussion the problem has been reduced to the signals detection with random parameters. There has been synthesized the algorithm of low-sized objects optimal detection by spectral features and has been developed its structure chart.*

**Keywords:** Electro-optical systems, dynamical spectral filtration