

МАКСИМАЛЬНО ПРАВДОПОДОБНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В ДВУХКАНАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Артемьев В.М., Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, e-mail: artemiev@iapf.bas-net.by

Наумов А.О., Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, e-mail: naumov@iapf.bas-net.by

Кохан Л.Л., РУП «КБ Радар», г. Минск, e-mail: koxanll@yandex.ru

Ключевые слова: обнаружение, алгоритм, объект, анализ, изображение, методика, оценка вероятности, система, оптико-электронная, детектор.

Формулировка задачи

Одним из направлений повышения качественных показателей обзорных оптико-электронных систем является использование многоканальных способов получения и обработки информации. При измерениях с одной точки пространства многоканальность может быть реализована путем использования различных спектральных диапазонов. Их количество может меняться от двух до гиперспектральных случаев, имеющих десятки и сотни каналов. Ширина используемого спектра может простираться от видимого диапазона до дальнего инфракрасного [1-4]. Возможны два варианта структуры рассматриваемых в настоящей статье двухканальных систем: с отдельными и совмещенными фотоприемниками. Наиболее просто реализуется первая структура, состоящая из двух отдельных каналов, «настроенных» на свой спектральный диапазон. В совмещенных структурах используется общий канал, сложность создания которого состоит в обеспечении его пропускной способности во всем рабочем спектральном диапазоне. При этом детектирование сигналов может осуществляться как отдельными детекторами, так и объединенными путем использования многослойных матриц [5-6]. В отдельных системах требуется предварительная синхронизация изображений, как по масштабу, так и по геометрическому положению. В устройствах с многослойными детекторами эта проблема отсутствует, однако их чувствительность ниже и, кроме того, имеется взаимное влияние между слоями.

В настоящей работе рассматривается задача обнаружения изображений объектов в двухканальных обзорных оптико-электронных системах (ОЭС) в случае неопределенности задания априорных характеристик полезного сигнала, известных статистических характеристиках шумов фотоприемника и при совмещенных изображениях в каналах.

Априорные характеристики изображений

Исходным постулатом статистической теории обнаружения является задание априорных характеристик изображений, как объектов, так и помех. Сложность их получения привела к необходимости разработки специальных разделов теории, в той или иной мере учитывающих апри-

Разработана методика оценки вероятности обнаружения малоразмерных объектов в двухканальных оптико-электронных системах при наличии шумов. В случае неизвестных априорных данных о статистических характеристиках изображений объекта в каналах использован метод максимального правдоподобия. Введено понятие о максимально правдоподобных характеристиках обнаружения. Это позволило дать оценку диапазона изменения максимально правдоподобной вероятности правильного обнаружения при заданных текущих значениях отношений сигнал/шум в каналах наблюдения и вероятности ложных тревог.

орную неопределенность. Можно сослаться на монографию [7], где вопросы обнаружения решаются на основе использования метода максимального правдоподобия.

При использовании двухканальных оптико-электронных систем (ОЭС) помимо известного недостатка в априорном знании статистических характеристик сигналов в каждом из каналов, появляется дополнительная неопределенность в знании связей между изображениями. По этой причине в настоящей работе делаются следующие предположения об априорных данных.

Первое касается задания инвариантных характеристик изображений объектов в обоих каналах. Таковыми считаются контуры обоих изображений. Например, это предположение можно принять в случае использования спектральных полос, одновременно лежащих либо в видимом, либо в инфракрасном диапазонах, а также при комплексировании видимого диапазона с инфракрасным для объектов без высокотемпературных следов. Пример подтверждения этого предположения дается на рис. 1, где показаны изображения вертолета в видимом и инфракрасном диапазонах, полученные одновременно с одного ракурса. Здесь же даны изображения их контуров, полученные по единой методике [8].

Второе предположение связано с заданием характеристик полей яркости внутри контуров, которые полагаем неизвестными. Третье касается характера связей между изображениями в каналах. Поскольку в имеющейся литературе отсутствуют экспериментальные данные по этому вопросу, вновь приходится использовать предположение о наличии дополнительной априорной неопределенности в их задании.

При сделанных предположениях решение задачи обнаружения приводит к необходимости расширения методов, изложенных в [7], на случай двухканального поступления информации об одном и том же объекте в условиях неопределенности.

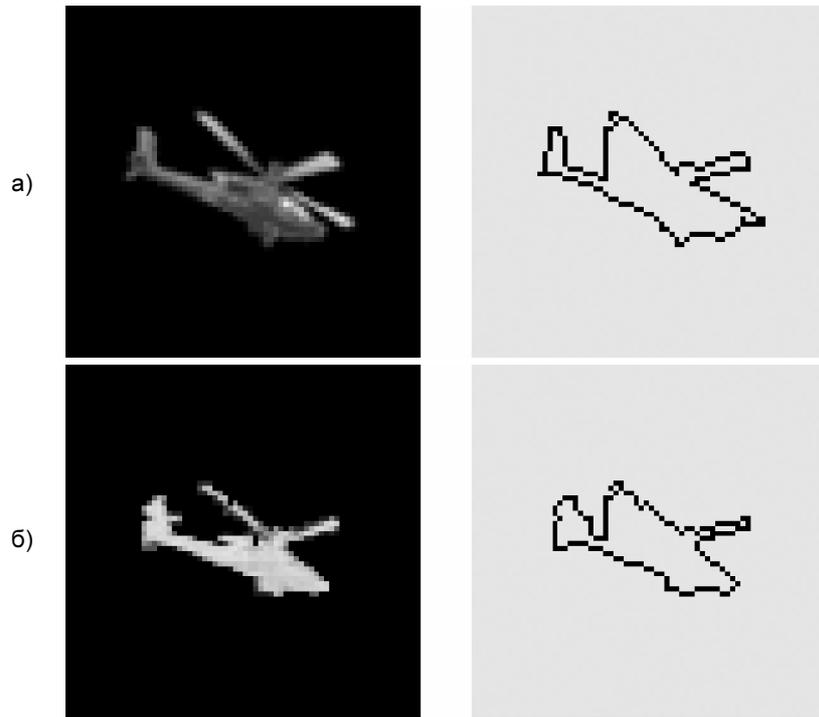


Рис. 1. Изображения вертолета и его контура в различных спектральных диапазонах: а – видимом; б – инфракрасном (8–12 мкм)

Алгоритм обнаружения

Пусть имеются два изображения одного и того же объекта в различных каналах. Полагаем параметры детекторов идентичными с одинаковыми размерами их элементов и одинаковым их числом $S = S_1 \times S_2$, где S_1 — число столбцов, S_2 — число строк. Преобразуем двумерные изображения на выходе детекторов в векторную форму путем сканирования строк слева направо, а столбцов — сверху вниз. Значения яркости элементов векторов обозначим через $\mathbf{x}_1 = [x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1S}]^T$ и $\mathbf{x}_2 = [x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2S}]^T$. В их составе находятся векторы сигналов объекта $\mathbf{u}_1 = [u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1S}]^T$, $\mathbf{u}_2 = [u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2S}]^T$ с элементами, равными нулю вне диапазонов контуров. Поскольку контуры полагаются одинаковыми, то и расположение элементов изображений объекта в составе векторов будут одинаковыми. Сформулируем следующую задачу:

1. Наблюдаются две аддитивные смеси \mathbf{x}_1 и \mathbf{x}_2 изображений объекта \mathbf{u}_1 и \mathbf{u}_2 на фоне помех \mathbf{w}_1 и \mathbf{w}_2 :

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{u}_1 + \mathbf{w}_1, \quad \mathbf{x}_2 = \mathbf{u}_2 + \mathbf{w}_2, \tag{1}$$

где $\mathbf{w}_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iS}]^T$ ($i = 1, 2$). При отсутствии объекта модель наблюдения получается из при $\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_2 = 0$. Вероятности наличия и отсутствия цели априорно неизвестны.

2. Векторы помех \mathbf{w}_1 и \mathbf{w}_2 считаются статистически независимыми, однородными, гауссовыми белыми шумами с известными дисперсиями σ_1^2 и σ_2^2 . Их совместная функция плотности распределения вероятности (ПРВ) имеет вид:

$$P_1(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) = \frac{1}{(2\pi\sigma_1^2)^{S/2} (2\pi\sigma_2^2)^{S/2}} \exp\left(-\frac{\mathbf{w}_1^T \mathbf{w}_1}{2\sigma_1^2}\right) \exp\left(-\frac{\mathbf{w}_2^T \mathbf{w}_2}{2\sigma_2^2}\right). \tag{2}$$

3. При наличии объекта условная функция ПРВ наблюдений \mathbf{x}_1 и \mathbf{x}_2 получается в форме:

$$p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 | \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2) = \frac{1}{(2\pi\sigma_1^2)^{S/2} (2\pi\sigma_2^2)^{S/2}} \times \exp\left[-\frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{u}_1)^T (\mathbf{x}_1 - \mathbf{u}_1)}{2\sigma_1^2}\right] \exp\left[-\frac{(\mathbf{x}_2 - \mathbf{u}_2)^T (\mathbf{x}_2 - \mathbf{u}_2)}{2\sigma_2^2}\right]. \tag{3}$$

При отсутствии объекта эта функция равна:

$$p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \frac{1}{(2\pi\sigma_1^2)^{S/2} (2\pi\sigma_2^2)^{S/2}} \times \exp\left(-\frac{\mathbf{x}_1^T \mathbf{x}_1}{2\sigma_1^2}\right) \exp\left(-\frac{\mathbf{x}_2^T \mathbf{x}_2}{2\sigma_2^2}\right). \tag{4}$$

Используя критерий максимального правдоподобия, находим оптимальные оценки $\hat{\mathbf{u}}_1$, $\hat{\mathbf{u}}_2$ значений векторов \mathbf{u}_1 и \mathbf{u}_2 , максимизируя функцию (3). Очевидно, что это достигается при значениях оценок

$$\hat{\mathbf{u}}_1 = \mathbf{x}_1, \quad \hat{\mathbf{u}}_2 = \mathbf{x}_2. \tag{5}$$

Поскольку в методе максимального правдоподобия неизвестные значения векторов объекта заменяются их оценками (5), то условную функцию ПРВ этих оценок при наблюдениях \mathbf{x}_1 и \mathbf{x}_2 можно записать в виде произведения:

$$p(\hat{\mathbf{u}}_1, \hat{\mathbf{u}}_2 | \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \delta(\mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{u}}_1) \delta(\mathbf{x}_2 - \hat{\mathbf{u}}_2). \tag{6}$$

Для решения задачи оптимального обнаружения находится отношение правдоподобия:

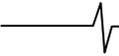
$$\Lambda(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 | \hat{\mathbf{u}}_1, \hat{\mathbf{u}}_2) = p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 | \hat{\mathbf{u}}_1, \hat{\mathbf{u}}_2) / p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2).$$

Подставляя в это выражение формулы (3) и (4), а также учитывая выражение (5) для оптимальных оценок, получаем отношение правдоподобия в виде:

$$\Lambda(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 | \hat{\mathbf{u}}_1, \hat{\mathbf{u}}_2) = \exp\left[\frac{\mathbf{x}_1^T \mathbf{x}_1}{2\sigma_1^2} + \frac{\mathbf{x}_2^T \mathbf{x}_2}{2\sigma_2^2}\right]. \tag{7}$$

Алгоритм обнаружения находится путем сравнения с порогом μ логарифма этой функции, т.е.:

$$z = z_1 + z_2 = \frac{\mathbf{x}_1^T \mathbf{x}_1}{2\sigma_1^2} + \frac{\mathbf{x}_2^T \mathbf{x}_2}{2\sigma_2^2} > \mu. \tag{8}$$



Структурная схема обнаружителя изображена на рис. 2.

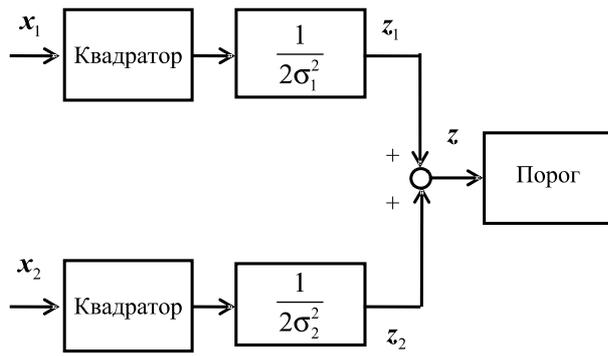


Рис. 2. Структурная схема двухканального обнаружителя в условиях неопределенности

Наибольший интерес представляет задача обнаружения объектов на максимальных дальностях, когда их изображения состоят из одного элемента. Это приводит к процедуре поэлементного «просмотра» всего изображения с решением задачи обнаружения сигналов объекта в каждом из них. Алгоритм одноэлементного обнаружения получается из (8) в виде:

$$z_i = \frac{x_{1i}^2}{2\sigma_1^2} + \frac{x_{2i}^2}{2\sigma_2^2} > \mu, \quad i = 1, 2, \dots, S. \quad (9)$$

При этом обнаружение многоэлементных изображений объектов будет состоять из последовательности операций над каждым из элементов в отдельности. Такая процедура не является строго оптимальной, однако удобна на практике для обнаружения объектов различных размеров.

Анализ характеристик обнаружения

Существующая методика оценки качества обнаружения в условиях неопределенности включает следующую последовательность операций: первоначально находится алгоритм обнаружения; затем, исходя из физического смысла задачи, задаются конкретными априорными данными и, наконец, известными методами [7] находят характеристики правильного обнаружения и ложных тревог для заданной совокупности статистических параметров сигнала и помех. В условиях неопределенности такой подход вызывает неудовлетворение по следующей причине. Исходным предположением решения сформулированной задачи является априорная неопределенность характеристик полезного сигнала, преодоление которой осуществляется путем использования метода максимального правдоподобия. При этом естественной будет попытка получения характеристик обнаружения, так же обладающих свойствами максимального правдоподобия и зависящих не от статистических параметров, а от измеряемых величин сигналов. В рамках такого подхода априорные функции заменяются на функции ПРВ максимального правдоподобия путем подстановки вместо амплитуд полезных сигналов их правдоподобных оценок.

Рассмотрим эту методику применительно к одноэлементному обнаружению. Исходя из заданных свойств помех, максимально правдоподобные функции ПРВ

значений x_1 и x_2 при условии оценок \hat{u}_1 и \hat{u}_2 равны:

$$p(x_i | \hat{u}_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{(x_i - \hat{u}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad i = 1, 2. \quad (10)$$

Для сигналов $z_i = x_i^2/2\sigma_i^2$ они будут иметь распределения типа χ^2 :

$$p(z_i | \hat{u}_i) = \frac{1}{\sqrt{\pi z_i}} \exp\left(-\left(z_i + \frac{\hat{u}_i^2}{2\sigma_i^2}\right)\right) \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{2\hat{u}_i^2 z_i}{\sigma_i^2}}\right), \quad z_i \geq 0. \quad (11)$$

Затем в соответствии с формулой (9) значения z_i суммируются, образуя сигнал $z = z_1 + z_2$, поступающий на пороговое устройство с уровнем срабатывания μ .

Вероятность ложной тревоги $P_{ЛТ}$ находится при отсутствии полезных сигналов ($\hat{u}_i = 0$), поэтому функции ПРВ (11) преобразуются к виду:

$$p(z_i) = \frac{1}{\sqrt{\pi z_i}} \exp(-z_i).$$

Поскольку помехи в каналах статистически независимы, то совместная функция ПРВ значений z_1 и z_2 будет равна произведению:

$$p(z_1, z_2) = \frac{1}{\pi\sqrt{z_1 z_2}} \exp(-z_1 - z_2).$$

Для суммарного значения z функция ПРВ получается в виде свертки:

$$p(z) = \int_0^z p(z_1, z - z_1) dz_1 = \frac{\exp(-z)}{\pi} \int_0^z \frac{1}{\sqrt{z_1(z - z_1)}} dz_1 = \exp(-z) \quad (12)$$

Отсюда вероятность ложной тревоги находится из выражения:

$$P_{ЛТ}(\mu) = \int_{\mu}^{\infty} p(z) dz = \int_{\mu}^{\infty} \exp(-z) dz = \exp(-\mu). \quad (13)$$

Таким образом, в случае известных априорных характеристик помех в каналах, вероятность ложной тревоги зависит только от величины порога, поскольку сигналы в каналах нормируются (рис. 2).

Перейдем к нахождению максимально правдоподобной вероятности правильного обнаружения, для чего первоначально запишем условную функцию ПРВ $p(z_1, z_2 | \hat{u}_1, \hat{u}_2)$ с учетом независимости шумов в каналах и формулы (11):

$$p(z_1, z_2 | \hat{u}_1, \hat{u}_2) = p(z_1 | \hat{u}_1) p(z_2 | \hat{u}_2) = \frac{1}{\pi\sqrt{z_1 z_2}} \exp\left(-\left(z_1 + \frac{\hat{u}_1^2}{2\sigma_1^2}\right) - \left(z_2 + \frac{\hat{u}_2^2}{2\sigma_2^2}\right)\right) \operatorname{ch}\left(\sqrt{2\frac{\hat{u}_1^2 z_1}{\sigma_1^2}}\right) \operatorname{ch}\left(\sqrt{2\frac{\hat{u}_2^2 z_2}{\sigma_2^2}}\right). \quad (14)$$

Наиболее правдоподобная функция ПРВ сигналов z_1 и z_2 при наблюдениях x_1 и x_2 получается из выражения:

$$p(z_1, z_2 | x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(z_1, z_2 | \hat{u}_1, \hat{u}_2) p(\hat{u}_1, \hat{u}_2 | x_1, x_2) d\hat{u}_1 d\hat{u}_2.$$

Подставляя формулы (5) и (6), приходим к выражению:

$$p(z_1, z_2 | x_1, x_2) = \frac{1}{\pi\sqrt{z_1 z_2}} \exp\left(-\left(z_1 + \frac{x_1^2}{2\sigma_1^2}\right) - \left(z_2 + \frac{x_2^2}{2\sigma_2^2}\right)\right) \operatorname{ch}\left(\sqrt{2\frac{x_1^2 z_1}{\sigma_1^2}}\right) \operatorname{ch}\left(\sqrt{2\frac{x_2^2 z_2}{\sigma_2^2}}\right). \quad (15)$$

Функция ПРВ суммарного сигнала $z = z_1 + z_2$ определяется интегралом свертки:

$$p(z | x_1, x_2) = \int_0^z p(z_1, z - z_1 | x_1, x_2) dz_1 = \\ = \frac{1}{\pi} \exp\left(-\frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)\right) \exp(-z) \int_0^z \frac{1}{\sqrt{z_1(z-z_1)}} \operatorname{ch}\left(\sqrt{2\rho_1 z_1}\right) \operatorname{ch}\left(\sqrt{2\rho_2(z-z_1)}\right) dz_1,$$

где через $\rho_i = x_i^2 / \sigma_i^2$ обозначены отношения квадрата амплитуд измеренных сигналов к дисперсиям помех, что можно считать текущим отношением сигнал/шум в каналах. Тогда вероятность максимально правдоподобного правильного обнаружения $P_{ПО}(\mu)$ находится из выражения:

$$P_{ПО}(\mu) = \int_{\mu}^{\infty} p(z | x_1, x_2) dz = \frac{1}{\pi} \exp\left(-\frac{\rho_1 + \rho_2}{2}\right) \times \\ \times \int_{\mu}^{\infty} \exp(-z) \int_0^z \frac{1}{\sqrt{z_1(z-z_1)}} \operatorname{ch}\left(\sqrt{2\rho_1 z_1}\right) \operatorname{ch}\left(\sqrt{2\rho_2(z-z_1)}\right) dz_1 dz. \quad (16)$$

Вероятность правильного обнаружения зависит от двух параметров ρ_1 и ρ_2 и может быть рассчитана численными методами.

Приведем следующий пример. Пусть желаемая вероятность ложной тревоги $P_{ЛТ}(\mu) = 10^{-3}$. Из формулы (13) находим значение порога $\mu = 6,9$. Для этого порога по формуле (16) строим зависимости вероятности максимально правдоподобного обнаружения для диапазонов значений ρ_1 и ρ_2 в пределах от 0 до 20. Эти зависимости приведены на рис. 3.

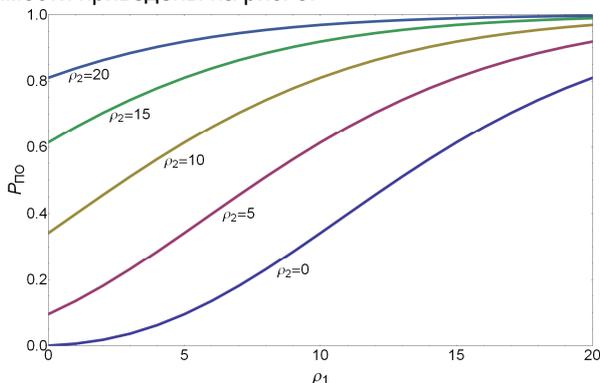


Рис. 3. Зависимости вероятности максимально правдоподобного обнаружения от текущих значений сигнал/шум в каналах.

При заданных диапазонах изменения отношений сигнал/шум ρ_1 и ρ_2 в каналах, по графикам на рис. 3 можно определить диапазон изменения наиболее правдоподобного значения вероятности правильного обнаружения. Например, если ρ_1 и $\rho_2 \leq 15$, то максимальное значение $P_{ПО} = 0,95$. По этим же графикам можно дать оценку выигрыша двухканального обнаружения в сравнении с одноканальным. Нижняя кривая на рис. 3 соответствует значению $\rho_2 = 0$, т.е. отсутствию полезного сигнала во втором канале. С ростом величины ρ_2 увеличивается, и значение вероятности правильного обнаружения и можно оценить степень этого увеличения.

Заключение

Многоканальные обзорные оптико-электронные системы обладают повышенными возможностями, однако они

более сложные и дорогостоящие. Для решения вопроса о целесообразности их использования необходима предварительная оценка степени их эффективности в сравнении с одноканальным вариантом. В работе сделана попытка разработки методики оценки вероятности обнаружения малоразмерных объектов в условиях наличия шумов в каналах. Сложность задачи состояла в отсутствии априорных данных о статистических характеристиках изображений объекта в каналах и связи между ними. Для преодоления этих трудностей использован метод максимального правдоподобия. В отличие от классического подхода к нахождению характеристик обнаружения, в работе вводятся их максимально правдоподобные оценки, связанные не с априорными статистическими, а с текущими значениями отношений сигнал/шум в каналах. Это позволяет при заданных диапазонах изменения текущих значений сигнал/шум дать оценку диапазона изменения максимально правдоподобной вероятности правильного обнаружения при заданном значении вероятности ложных тревог.

Литература

1. Тарасов В.В., Якушников Ю.Г. Многоспектральные оптико-электронные системы // Спец. техника, 2002, № 4, с. 56–62.
2. Goldberg A.C., Fisher T., Derzko Z. Application of dual-band infrared focal plane arrays to tactical and strategic military problems // SPIE Proc., 2003, V. 4820, p. 500–514.
3. Glasser C., Beystum T.R., Himoto R. et al. Architecture of a multichannel multispectral imaging processor // SPIE Proc., 2001, V. 4372, p. 105–113.
4. Wilston J.A., Patten E.A., Chapman G.R. et al. Integrated two-color detection for advanced FPA applications // SPIE Proc., 1994, V. 2274, p. 117–125.
5. Jindall B.K. Result of two-color detector array in bulk mercury cadmium telluride // SPIE Proc., 1994, V. 2275, p. 278–288.
6. Goldberg A.C., Fisher T., Kennerly Z. Dual-band imaging of military targets using a QWIP focal plane array // Army Research Laboratory Report, Adelphi, MD, USA, 20783.
7. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М: Сов. радио, 1977.
8. Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение. М.: изд. БИНОМ, 2006.

MAXIMUM LIKELIHOOD DETECTION OF THE OBJECT IMAGES IN TWO-CHANNEL OPTOELECTRONIC SYSTEMS

Artemiev V.M., Naumov A.O., Kokhan L.L.

The methodology for estimation of detection probability of small-sized objects in two-channel optoelectronic systems corrupted by noises is developed. In the case of unknown priory statistics of the object images in channels the maximum likelihood method is used. The maximum likelihood detection characteristics are introduced. It allows to estimate the true maximum likelihood detection probability with given current signal to noise ratio in observation channels and false alarm probability.