

Обработка сигналов, информации и изображений

DOI 10.24412/2221-2574-2025-4-44-54

УДК 621.391:535.231.16

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБНАРУЖЕНИЯ И КООРДИНАТОМЕТРИИ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ С БОЛОМЕТРИЧЕСКИМ МАТРИЧНЫМ ПРИЁМНИКОМ

Костров Виктор Васильевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», ведущий инженер-программист АО «НИИ «Субмикрон»².

E-mail: kostrov.46@mail.ru

Ракитин Алексей Валерьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», начальник отдела АО «НИИ «Субмикрон»².

Богатов Александр Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», ведущий инженер-конструктор АО «МЗ РИП»³.

¹Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

²Адрес: 124460, Российская Федерация, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., д. 5, с. 2.

³Адрес: 602267, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, Карачаровское шоссе, д. 2.

Аннотация: В работе рассматривается задача обнаружения точечных целей и оценивания их координат в пассивной оптико-электронной системе (ОЭС) дальнего инфракрасного (ИК) диапазона, в которой первичное изображение формируется с помощью микроболометрического матричного приёмника излучения (МПИ). С учётом дифракционного эффекта и технологических промежутков между чувствительными элементами получены распределения мощности по пикселям. Приводятся характеристики обнаружения, на основании которых показано, что потери в пороговой мощности сигнала с учётом этих эффектов могут достигать 4...15 дБ. Предложена структура многоканального корреляционного приёмника, позволяющего снизить потери сигнала. В качестве базового метода субпиксельного измерения координат точечной цели использован метод центра тяжести. Показано, что при смещении точечной цели от центра пикселя среднеквадратические ошибки оценивания координат увеличиваются в 2...8 раз (в зависимости от направления смещения). Предложен адаптивный вариант устройства оценивания координат объекта в плоскости матрицы.

Ключевые слова: оптико-электронная система (ОЭС), матричный приёмник излучения, болометр, многоканальный корреляционный приёмник, характеристики обнаружения, метод центра тяжести, ошибки измерения координат.

Введение

Задача обнаружения объектов и определения их угловых координат является фундаментальной проблемой пассивных оптико-электронных систем (ОЭС). Её решение кри-

тически важно для различных приложений, например, при наблюдении малогабаритных беспилотных воздушных средств на атмосферном фоне [1]. В рамках такой задачи требуется обеспечить максимальную дальность

обнаружения (минимальные пороговые сигналы), высокую разрешающую способность по угловым координатам и малое время реакции на меняющуюся обстановку, поэтому вопросам повышения эффективности обработки сигналов в ОЭС уделяется пристальное внимание. В современных пассивных ОЭС дальнего инфракрасного (ИК) диапазона часто используются матричные приёмники излучения (МПИ) на основе микроболометров, что позволяет создавать системы наблюдения «смотрящего типа» без механического сканирования [2]. Болометрические МПИ не требуют криогенного охлаждения, имеют малое время готовности после включения, низкую стоимость. Вместе с тем матричные приёмники, в том числе и болометрические, имеют ряд особенностей, существенно влияющих на тактико-технические характеристики ОЭС. Пространственная передаточная характеристика матрицы входит в общую передаточную функцию системы, от которой во многом зависит качество ИК изображения. Кроме того, в ОЭС (в отличие от радиолокационных систем) при формировании изображений проявляются дифракционные эффекты, превращающие точечную цель в плоскости матрицы в пятно.

Наличие пространственной дискретизации в матрице и дифракции в объективе приводит к зависимости уровня сигнала в отдельных пикселях от положения проекции цели на чувствительные элементы (ЧЭ) матрицы [3–7]. Мощность излучения точечной цели распределяется по пикселям матрицы, что приводит к деградации качества обнаружения, разрешающей способности по угловым координатам и точности их измерения, а также усложняет все процедуры обработки сигнала при стремлении достичь потенциальные характеристики или приблизиться к ним.

К конструктивным особенностям болометрических МПИ можно отнести технологические зазоры между пикселями, необходимые для размещения балок, которые держат чувствительный элемент и служат про-

водниками сигналов [2]. В [7] технологические зазоры между пикселями в горизонтальной и вертикальной плоскостях приняты одинаковыми, однако при расчётах они не учитываются. Наличие таких зазоров приводит к дополнительным потерям полезного сигнала и снижению точности оценивания координат [3], что ещё раз подчёркивает необходимость оптимизации обработки сигналов ОЭС.

Проблема обнаружения и определения координат точечных объектов в зависимости от положения проекции цели внутри пикселя рассматривалась в [6], где в качестве основного инструмента повышения энергетики сигнала использовался выделяющий фильтр. В работе [5] эта проблема решалась с помощью анализа и последующего учёта соседних пикселей по всем направлениям, а в [4] — с использованием совместного оценивания амплитуды, координат центра и дисперсии ошибок оценивания.

Наиболее распространённым методом измерения угловых координат является метод определения центра тяжести, который обладает рядом положительных свойств [8, 9]. Оптимизация радиуса кружка рассеивания для повышения точности измерения угловых координат этим методом рассматривалась в [8]. В [3] повышение точности измерения координат достигается за счёт применения пеленгационной характеристики, учитывающей смещение проекции цели по отношению к центру пикселя и технологические зазоры.

Целью данной работы является рассмотрение качества обнаружения и пеленгации точечных объектов на изображении при использовании микроболометрического матричного приёмника излучения с учётом дифракционных эффектов.

Учёт дифракционных эффектов

Уровень сигнала на выходе МПИ определяется распределением освещённости в плоскости ЧЭ, которое получается из освещённости исходной сцены после прохождения объектива. Для болометрических МПИ изменение уровня

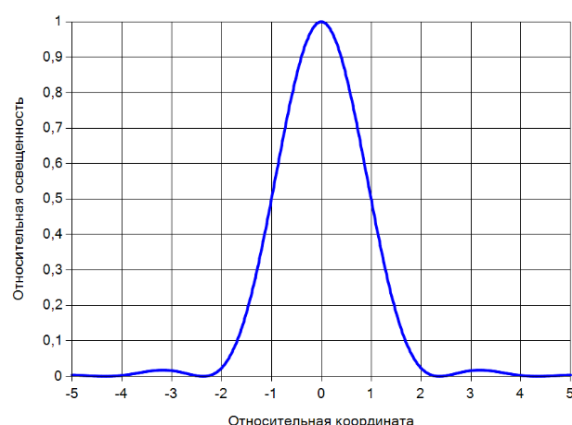


Рис. 1. Относительная интенсивность точечного объекта в дифракционном пятне (интенсивность колец увеличена)

сигнала на выходе схемы считывания (ROIC) может быть рассчитано по соотношению $\Delta U = \alpha U_B \Delta T$, где α — температурный коэффициент электрического сопротивления, для плёнок из оксида ванадия VO_x обычно составляет $-(0,02 \dots 0,03) \text{K}^{-1}$; U_B — смещение напряжения болометра, $U_B \cong 1 \text{ В}$; ΔT — изменение температуры, К. В стационарном состоянии $\Delta T = \Delta P / G$, где ΔP — изменение мощности теплового излучения в плоскости детектора [Вт]; G — теплопроводность консолей, $G = 10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ Вт/К}$. Отсюда следует важный вывод о том, что выходной сигнал пропорционален мощности теплового излучения. Будем полагать, что в рассматриваемом диапазоне наблюдения слабых сигналов приведённые линейные зависимости сохраняются.

Предполагаем также, что объективы, применяемые для наблюдения слабых сигналов в ИК диапазоне, представляют собой линейные осесимметричные устройства, одной из характеристик которых является относительное фокусное расстояние F/D (относительное отверстие D/F), где F — фокусное расстояние; D — диаметр зрачка объектива.

Оптическая система ОЭС при преобразовании освещённости наблюдаемой сцены в освещённость поверхности МПИ ограничивает световой поток в силу конечного диаметра

зрачка. Это приводит к тому, что при наблюдении идеального точечного источника ИК излучения на поверхности ЧЭ вместо точки появляется дифракционное пятно (диск Эйри) [10]. Относительная интенсивность дифракционной картины определяется зависимостью

$$I_{fr}(r) = \left| \frac{2J_1(k \cdot R \cdot \sin \theta)}{k \cdot R \cdot \sin \theta} \right|^2,$$

где $J_1(x)$ — функция Бесселя первого порядка; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — рабочая длина волны; θ — угол между оптической осью и направлением на точку плоскости ЧЭ, расположенную на радиусе r ; R — радиус отверстия объектива.

Данная зависимость определяет функцию рассеивания точки (ФРТ) объектива и представлена на рис. 1. К числу основных параметров графика относятся радиус пятна $r_{0,5}$ на уровне 0,5 от максимального значения (по нему произведена нормировка оси абсцисс) и радиус r_{dif} первого тёмного кольца. Для малых углов θ можно воспользоваться приближенным соотношением $\sin \theta \approx \theta$, тогда эти параметры связаны между собой соотношением $r_{0,5} \approx 0,422 \cdot r_{dif}$ и определяются рабочей длиной волны, диаметром зрачка объектива и расстоянием L от ЧЭ до зрачка

Таблица 1. Основные параметры

№	Параметр	Значение
1	Спектральный диапазон	Дальний ИК
2	Основная длина волны	11 мкм
3	Размер шага пикселей	17 мкм
4	Размер ЧЭ (Г×В)	11×14 мкм
5	Фокусное расстояние	100 мм
6	Диаметр входного зрачка	100 мм
7	Относительное отверстие	1:1

$$r_{dif} = 1,22 \frac{\lambda}{D} L, \quad r_{0,5} = 0,515 \frac{\lambda}{D} L.$$

В случае фокусировки объектива на ЧЭ под L понимается фокусное расстояние F .

Объектив переводит пространство предметов в плоскость матрицы. Распределение интенсивности (энергии) изображения I_{im} в плоскости чувствительного элемента (ЧЭ) определяется свёрткой ФРТ и изображения объекта на входе объектива I_{imin} . В полярных координатах можно записать

$$I_{im}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{imin}\left(\frac{u}{m}\right) I_{frit}(u-r) du,$$

где m — коэффициент деформации координат.

Для идеальной точечной цели I_{imin} представляет собой δ -функцию, поэтому распределение интенсивности $I_{im}(r)$ с точностью до постоянной совпадает с ФРТ. Анализ показывает, что объект с линейными размерами порядка 20 см на расстояниях более 3...5 км можно рассматривать как точечную цель. Для конкретных расчётов используем объектив и МПИ, параметры которых приведены в таблице 1.

Распределение мощности по пикселям

Для анализа взята матрица из чувствительных элементов размерностью 5×5, которая освещается точечной целью с интенсивностью, определяемой после объектива диском Эйри. Начало декартовой системы координат находится в центре среднего пикселя, а для определённости принято: x , y — горизонтальная и вертикальная координаты не-

которой точки в плоскости изображения (матрицы).

Если мощность излучения, выходящую после объектива принять за 100%, то мощность излучения, приходящаяся на ЧЭ матрицы, составит 73%, т.е. в данной конфигурации МПИ около 27% мощности диска Эйри не используется из-за наличия технологических промежутков между чувствительными элементами. Распределение мощности по чувствительным элементам зависит от направления на точечную цель. На рис. 2 приведены четыре характерных (предельных) случая расположения проекции цели на плоскости матрицы 3×3, где окружность с малым радиусом (красный цвет) соответствует проекции на плоскость матрицы сечения ФРТ на уровне 0,5, а большая окружность (синий цвет) — проекция линии первого нуля.

Первый случай (рис. 2, а) соответствует варианту, когда направление на цель попадает в центр пикселя; второй случай (рис. 2, б) — проекция цели смещена по горизонтали на 0,5 шага матрицы; третий случай (рис. 2, в) —

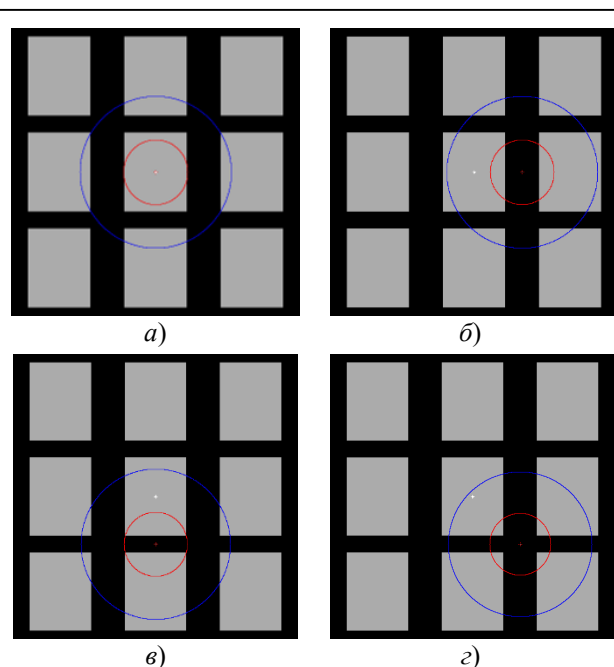


Рис. 2. Проекция цели: а) в центре пикселя; б) смещена по горизонтали на 0,5 шага матрицы; в) смещена по вертикали; г) смещена по горизонтали и вертикали

смещение по вертикали на 0,5 шага матрицы; четвёртый — одновременное смещение по вертикали и горизонтали (рис. 2, *г*). Соответствующие распределения интенсивности принимаемого излучения по пикселям для матрицы 5×5 представлены в таблицах 2–5, в которых центральный пиксель имеет координаты (2; 2).

Для случая 2 можно выделить два пикселя, между которым мощность распределяется по 20%. Суммарная мощность этих двух пикселей составляет 40%, что на 36% меньше, чем мощность одного пикселя в первом случае. Суммарные потери в пикселях составляют 5,22 дБ.

В третьем случае, так же, как в предыдущем случае, значимыми являются два пикселя, суммарная мощность которых составляет 52%, что на 12% меньше, чем мощность одного пикселя в первом случае. Суммарные потери мощности двух пикселей составляют 2,95 дБ.

В случае 4 (рис. 2, *г*) выделяются четыре пикселя с суммарной мощностью 33%, поэтому данный случай можно рассматривать как наихудший случай направления на цель. Суммарные потери четырёх пикселей составляют 6,89 дБ.

Как видим, наибольшая мощность сигналов концентрируется в четырёх смежных пикселях, которые в соответствии с таблицами 2–5 имеют координаты (2;2), (2;3), (3;2), (3;3). Зависимости мощности излучения P_{ji} , перехватываемой этими пикселями, от смещения положения центра пятна внутри пикселя в долях пикселя для трёх рассмотренных выше направлений представлены на рис. 3: *а*) смещение по горизонтали; *б*) смещение по вертикали; *в*) смещение по диагонали.

В целом представленные зависимости являются нелинейными функциями, на поведение которых оказывает существенное влияние отношение радиуса ФРТ к шагу матрицы, а также размеры технологических промежутков. Различие в размерах технологических зазоров между пикселями привело к тому, что перемещение центра ФРТ по горизонтали и вертикали даёт разные зависимости (ср. рис. 3, *а* и 3, *б*). Кроме того, следует отметить доминирующую

Таблица 2. Распределение мощности по пикселям — случай 1 (рис. 2, *а*)

j, i	0	1	2	3	4
0	0,0005	0,0011	0,0019	0,0011	0,0005
1	0,001	0,0048	0,0109	0,0048	0,001
2	0,0017	0,0098	0,6309	0,0098	0,0017
3	0,001	0,0048	0,0109	0,0048	0,001
4	0,0005	0,0011	0,0019	0,0011	0,0005

Таблица 3. Случай 2 (рис. 2, *б*)

j, i	0	1	2	3	4
0	0,0004	0,0008	0,0017	0,0017	0,0008
1	0,0006	0,0022	0,0087	0,0087	0,0022
2	0,0008	0,0033	0,2	0,2	0,0033
3	0,0006	0,0022	0,0087	0,0087	0,0022
4	0,0004	0,0008	0,0017	0,0017	0,0008

Таблица 4. Случай 3 (рис. 2, *в*)

j, i	0	1	2	3	4
0	0,0004	0,0007	0,0007	0,0007	0,0004
1	0,0008	0,0021	0,0045	0,0021	0,0008
2	0,0014	0,0093	0,26	0,0093	0,0014
3	0,0014	0,0093	0,26	0,0093	0,0014
4	0,0008	0,0021	0,0046	0,0021	0,0008

Таблица 5. Случай 4 (рис. 2, *г*)

j, i	0	1	2	3	4
0	0,0003	0,0005	0,0007	0,0007	0,0005
1	0,0005	0,0013	0,0032	0,0032	0,0013
2	0,0008	0,0028	0,0832	0,0832	0,0028
3	0,0008	0,0028	0,0832	0,0832	0,0028
4	0,0005	0,0013	0,0032	0,0032	0,0013

роль зависимости мощности P_{22} для центрального пикселя, сигнал в котором максимален. Это обстоятельство позволяет в качестве простейшего алгоритма оценивания угловых координат использовать пространственно-инвариантный метод максимума.

Обнаружение точечного объекта

Результаты расчётов позволяют оценить потери в пороговой мощности сигналов при обработке сигналов. В таблице 6 приведены данные по потерям в пороговой мощности сигнала для рассмотренных ситуаций (случаи 1–4) положения центра диска Эйри на поверхности матрицы. Из таблицы 6 видно, что потери могут быть значительными (8...15 дБ). Кроме того, следует отметить, что разница в ширине технологических зазоров по горизонтали и вертикали

Таблица 6. Потери пороговой мощности сигнала

Случай	1	2	3	4
Потери, дБ	4,0	10,97	8,69	15,6

(3 мкм) приводит к потерям 2,28 дБ, т.е. «стоимость» 1 мкм зазора между пикселями составляет $\sim 0,75$ дБ потерь пороговой мощности при обнаружении.

Для проверки данных расчётов было проведено статистическое моделирование обнаружителей сигналов. На рис. 4 представлены характеристики оптимального обнаружения сигналов, соответствующих таблицам 2–5, полученные для вероятности ложной тревоги $F_a = 10^{-4}$. Кривые 1–4 соответствуют рассмотренным выше случаям положения центра цели (диска Эйри), кривая под цифрой 0 — случаю отсутствия потерь в МПИ. Сравнение характеристик обнаружения в целом подтвердило правильность расчётов и их результатов (таблица 6).

При моделировании в качестве опорных сигналов (ОС) корреляторов использовались копии сигналов — матрицы 5×5 . Для упрощения аппаратуры обработки также предложено использовать более простые ОС единичной амплитуды: матрицы 1×1 (случай 1); 1×2 (случай 2); 2×1 (случай 3); 2×2 (случай 4), составленные только из пикселей с максимальной амплитудой. По качеству работы обнаружители с такими ОС практически не отличаются от оптимальных — различие в пороговых сигналах 0,1...0,15 дБ находится в пределах погрешностей моделирования.

Полученные характеристики обнаружения дают представление о потерях в пороговой мощности сигнала, возникающих за счёт дифракции (случай 1) и смещения на половину шага матрицы проекции точечной цели относительно центра пикселя (случаи 2–4). При произвольных смещениях характеристики обнаружения будут располагаться на рис. 4 между кривыми 1 и 4. Однако смещение при наблюдении целей является неизвестным, поскольку угловое направление на цель является произвольным, и вследствие этого возникают дополнительные потери, причиной возникно-

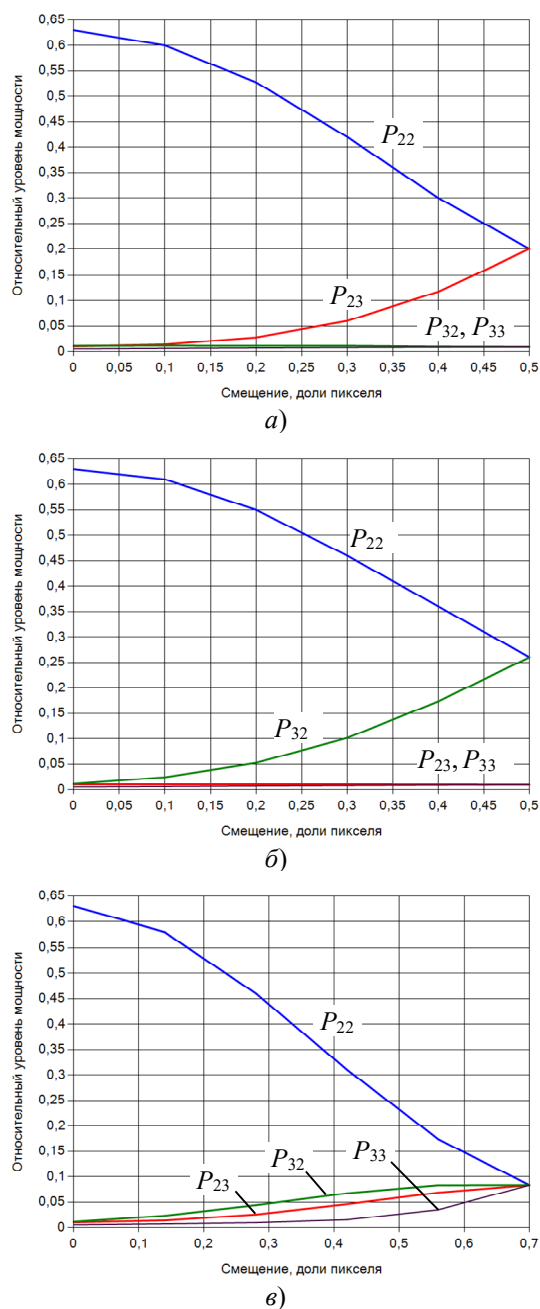


Рис. 3. Зависимость уровня сигнала от смещения ФРТ

вения которых служит рассогласование реального сигнала и ОС. Результаты расчёта ожидаемых потерь для различных комбинаций принимаемого сигнала и ОС в четырёх случаях приведены в таблице 7.

Чтобы оптимизировать систему обнаружения, рассмотрим задачу различения сигналов и воспользуемся методом максимального правдоподобия. Пусть наблюдения U_{ji} содержат

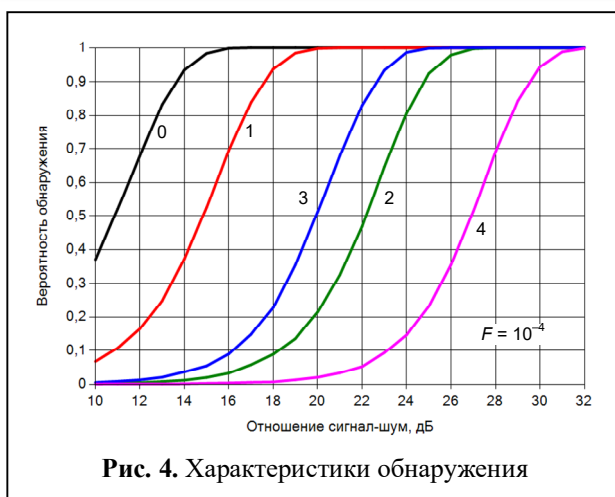


Рис. 4. Характеристики обнаружения

Таблица 7. Потери при несогласованной обработке, дБ

Эталон \ Сигнал	ОС 1	ОС 2	ОС 3	ОС 4
Сигнал 1	0,0	3,1	2,8	4,7
Сигнал 2	2,2	0,0	4,1	1,5
Сигнал 3	3,3	6,1	0,0	2,6
Сигнал 4	5,3	3,2	2,1	0,0

один из четырех полезных сигналов $S_{ji}^{(k)}$

$$U_{ji} = S_{ji}^{(k)} + b_{ji} + \xi_{ji},$$

где $k = 1, \dots, 4$; b_{ji} — фоновый коррелированный процесс; ξ_{ji} — широкополосный шум.

Оптимальное решение задачи классификации сигналов $S_{ji}^{(k)}$ после компенсации фона приводит к многоканальному корреляционно-му приёмнику (КП), каждый канал которого оптимален для сигналов 1–4 (рис. 5). В качестве опорных сигналов (ОС) используются копии соответствующих сигналов или их цифро-

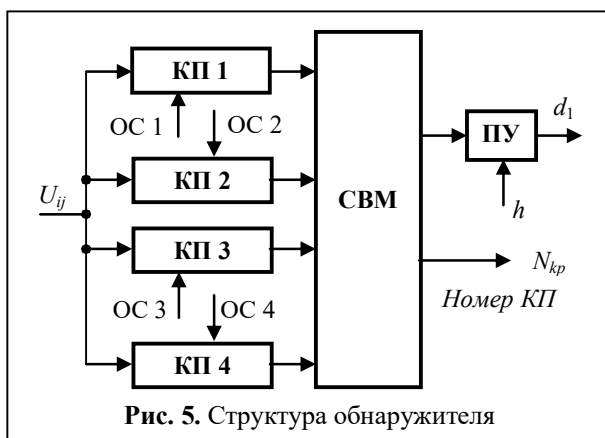


Рис. 5. Структура обнаружителя

вые аналоги, причём в последнем случае КП 1 вырождается — на выход КП передаётся U_{ji} , поскольку ОС 1 представляет собой δ -функцию. Далее в схеме выбора максимума (СВМ) определяется максимальный уровень среди всех результатов корреляционной обработки, по которому в пороговом устройстве (ПУ) принимается решение об обнаружении цели ($d_1 = 1$) или её отсутствии ($d_1 = 0$). На основании принятого решения с учётом номера канала ($N_{kp} = 1, \dots, 4$), в котором произошло обнаружение, составляется карта обнаружений. Для повышения устойчивости работы обнаружителя может быть использован процессор с постоянным уровнем ложных тревог (ПУЛТ процессор) [11].

Измерение координат

Работа измерителя координат начинается после принятия решения о наличии цели, поэтому в алгоритмах участвует карта обнаружений. Положение цели при обработке оценивается в пикселях, которые далее переводятся в угол или в управляющее напряжение (сигнал ошибки) для работы следящей системы. Наиболее простым для реализации является метод максимального правдоподобия, при использовании которого за центр области обнаруженного объекта принимается пиксель с максимальной амплитудой. Координаты этого центра (i_{\max}, j_{\max}) принимаются за оценку координат объекта в плоскости матрицы

$$(\hat{x} = i_{\max}, \hat{y} = j_{\max}) = \arg \max_{i,j} U_{ji},$$

где x, y — горизонтальная и вертикальная координаты в плоскости матрицы; U_{ji} — уровень сигнала пикселя с координатами (j, i) .

При статистических измерениях на дискретной сетке точность измерений определяется двумя основными компонентами: составляющей σ_{an} , обусловленной шумами МПИ, и ошибками дискретизации σ_{ad} . Суммарная среднеквадратическая ошибка (СКО) измерения координаты определяется соотношением

$$\sigma_{\alpha} = \sqrt{\sigma_{an}^2 + \sigma_{ad}^2}.$$

Точность измерений σ_{an} зависит от отношения сигнал-шум q_{sn} [12] и углового размера пятна по уровню 0,5 от максимальной интенсивности $\gamma = 2\arctg(r_{0,5}/F)$

$$\sigma_{an} = \sqrt{\frac{1 + q_{sn}}{2\pi q_{sn}^2} \gamma}.$$

Ошибки дискретизации σ_{ad} рассчитываются в предположении о равновероятном положении цели в пределах элементарного поля зрения (один пиксель размером Δ в плоскости матрицы)

$$\sigma_{ad} = \frac{\alpha_{pz}}{2\sqrt{3}} \text{ [радиан]}, \quad \sigma_{ad} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \text{ [пиксель]},$$

где α_{pz} — поле зрения чувствительного элемента, $\alpha_{pz} = 2\arctg(\Delta/2F)$, радиан.

Отсюда имеем $\sigma_{ad} = 4,91 \cdot 10^{-5}$ радиан (0,17 угловых минут) или $\sigma_{ad} = 0,29$ пикселя. С учётом $r_{0,5} = 5,665$ мкм для отношения сигнал-шум 6 (15,5 дБ) получаем $\sigma_{an} = 2,34 \cdot 10^{-5}$ радиан (0,142 угловых минут) или $\sigma_{an} = 0,14$ пикселя. Суммарная погрешность составит $\sigma_{\alpha} = 5,44 \cdot 10^{-5}$ радиан (0,33 пикселя), т.е. погрешность определяется в основном дискретностью матрицы и фокусным расстоянием объектива.

Ошибки дискретизации можно снизить, если в четырёхканальном приёмнике использовать информацию о номере канала, в котором обнаружен сигнал. Тогда

$$\begin{aligned} \hat{x} &= i_{\max}, \hat{y} = j_{\max} \text{ при } N_{kp} = 1; \\ \hat{x} &= i_{\max} + 0,5, \hat{y} = j_{\max} \text{ при } N_{kp} = 2; \\ \hat{x} &= i_{\max}, \hat{y} = j_{\max} + 0,5 \text{ при } N_{kp} = 3; \\ \hat{x} &= i_{\max} + 0,5, \hat{y} = j_{\max} + 0,5 \text{ при } N_{kp} = 4. \end{aligned}$$

Область неопределённости и ошибки измерений при таком подходе снижаются в 2 раза. Более точный, субпиксельный метод измерения углов реализуется с помощью дискри-

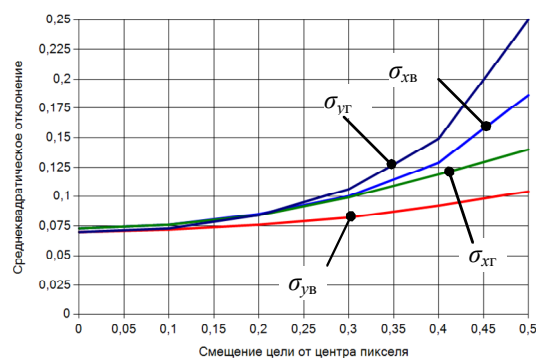
натора, основанного на алгоритме взвешенного определения центра тяжести отметки от цели. Оценки координат, которые получает данный алгоритм, имеют вид

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \frac{\sum_i \sum_j M(j,i) \cdot i \cdot U_{ji}}{\sum_i \sum_j M(j,i) \cdot U_{ji}}, \\ \hat{y} &= \frac{\sum_i \sum_j M(j,i) \cdot j \cdot U_{ji}}{\sum_i \sum_j M(j,i) \cdot U_{ji}}, \end{aligned}$$

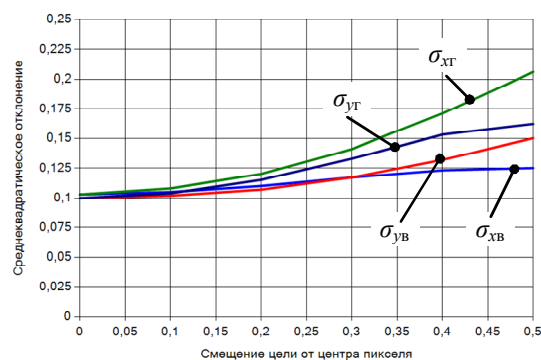
где $M(j,i)$ — маска единичной амплитуды, определяющая область суммирования.

В этом методе оценивание угловых координат осуществляется в долях пикселей и не имеет дискретного характера. Данный метод не зависит от вида или масштаба реакции системы на излучение точечной цели. При этом надо иметь в виду, что при сложной конфигурации цели должно быть определено понятие угловой координаты и её связь с центром тяжести отметки от цели. Анализ различных конфигураций масок показал, что для оценивания координат точечных целей на больших дальностях наилучшие результаты дают маски в виде матриц размерностью 3×3 (М3) и 4×4 (М4), в которых угловые пиксели равны нулю, а также 1×3 (М13) и 3×1 (М31). Для первых двух масок на рис. 6 приведены зависимости СКО σ оценивания координат (x, y) проекции цели на матрице при различных направлениях смещения от центра пикселя и отношении сигнал-шум 30 (29,5 дБ). Рис. 6, а) получен для маски 3×3 , рис. 6, б) — для маски 4×4 при смещениях либо по вертикали, либо по горизонтали. Рис. 6, в) содержит графики для обеих масок при смещении центра цели по диагонали. В индексах приняты обозначения: x — оценивание горизонтальной координаты; y — оценивание вертикальной координаты; $г$ — смещение по горизонтали; $в$ — смещение по вертикали; $д$ — смещение по диагонали. Остальные маски дали аналогичные результаты.

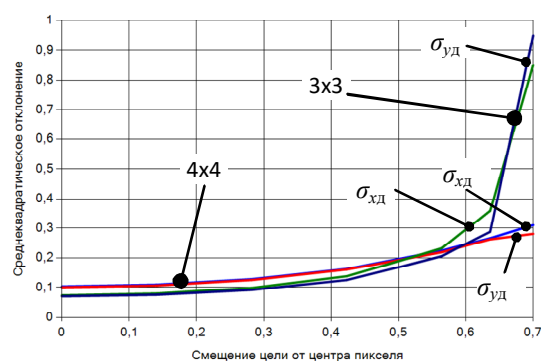
Все графики показывают, что при малых смещениях ($\delta < 0,25$ пикселя) маска М3 обеспечивает на 25% более высокую точность, чем маска М4. При смещении цели от центра пик-



а)



б)



в)

Рис. 6. Зависимости СКО от смещения центра

ся к его краям ($\delta > 0,25$ пикселя) наблюдается деградация качества оценивания. Особенно ярко это проявляется при движении цели по диагонали пикселя и использовании матрицы М3 (рис. 6, в). Это объясняется тем, что к краям пикселя и на стыке углов четырех ЧЭ резко падает отношение сигнал-шум, и ошибки возрастают. Маска М4 более полно учитывает энергию сигнала, чем маска М3, поэтому при смещении центра цели по диагонали более 0,5 пикселя наблюдается повышение точности оценивания. Таким образом, для повышения

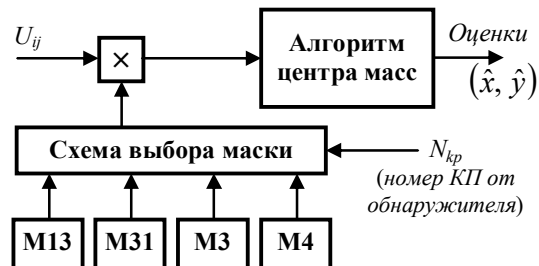


Рис. 7. Структура измерителя координат

точности измерения координат нужно менять вид маски в зависимости от обнаруженного сигнала. Управление этим процессом производится четырёхканальным обнаружителем (рис. 7), что придаёт процессу измерения координат свойства адаптивности.

Заключение

Разработанные алгоритмы обнаружения и оценивания координат для матричных приёмников с болометрическими чувствительными элементами позволяют автоматизировать процессы обработки сигналов и изображений. Проведённый анализ алгоритмического обеспечения наблюдения объектов в виде точечных целей выявил ряд особенностей процедур обработки.

На качество обработки заметное влияние оказывают дифракционные эффекты и технологические зазоры, которые приводят к рассеиванию принимаемой мощности по поверхности матрицы и прямым потерям. В рассмотренном примере на средней длине волны диаметр дифракционного пятна от точечной цели в плоскости матрицы составил 13 мкм, что соизмеримо с размером чувствительного элемента. При этом в лучшем случае около 27% мощности теряется в технологических промежутках, 63% приходится на долю одного пикселя и 10% рассеивается по всем остальным пикселям. В худшем случае, когда проекция цели попадает на стык углов четырех пикселей, мощность, получаемая этими пикселями, падает до 8...10%, а более 40% мощности рассеивается по поверхности матрицы.

Проведённый анализ характеристик обнаружения показал, что по этим причинам в болометрических матричных приёмниках потери в пороговой мощности сигналов могут достигать 4...15 дБ в зависимости от положения цели. Цена уменьшения технологического зазора на 1 мкм составила около 0,75 дБ выигрыша в мощности порогового сигнала.

Предложен многоканальный корреляционный приёмник, в котором реализуется метод максимального правдоподобия и минимизируются дополнительные потери мощности сигнала. Информация о канале, в котором обнаружен сигнал, используется в субпиксельном измерителе координат для выбора маски. Такое построение обнаружителя и измерителя координат делает их адаптивными.

В качестве базового приёмника ИК излучения в рамках данной работы использовался матричный приёмник с шагом 17 мкм и размерами чувствительного элемента 11×14 мкм. Одним из резервов повышения качества обнаружения и измерения координат является уменьшение технологических зазоров. Кроме того, дополнительные исследования показали, что по большинству параметров — энергетическая освещённость, равномерность сигналов по полю матрицы, потери при обнаружении, разрешающая способность, точность измерения координат — матрицы с более мелким шагом имеют более высокие показатели.

Литература

1. Якименко И.В. Методы, модели и средства обнаружения воздушных целей на атмосферном фоне широкоугольными оптико-электронными системами. СПб: Лань, 2022. 168 с.
2. Хафизов Р.З., Старцев В.В., Москвичев В.Ю.

Быстродействующие болометрические матричные детекторы // Фотоника. 2021. Т. 15. №5. С. 396–409.

3. Бехтин Ю.С., Филатов Ю.А. Метод измерения координат точечных объектов по данным многоэлементного ФПУ // Автометрия. 1994. №2. С. 11–17.

4. Киричук В.С., Косых В.П., Курманбек уулу Т. Адаптивная фильтрация с субпиксельным оцениванием координат точечных объектов // Автометрия. 2006. Т. 42. №1. С. 3–12.

5. Yao H., Liu L., Wei Y., Chen D., Tong M. Infra-red Small-Target Detection Using Multidirectional Local Difference Measure Weighted by Entropy // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 1902. DOI 10.3390/su15031902

6. Меденников П.А. Алгоритм обнаружения и определения координат точечного объекта // Оптический журнал. 2019. Т. 86. №8. С. 65–69.

7. Знаменский И.В. Зависимость величины сигнала от смещения функции рассеяния точки относительно центра пиксела фоточувствительной матрицы // Оптический журнал. 2023. Т. 90. №12. С. 96–110.

8. Баранов П.С., Манцетов А.А. Оптимизация отношения радиуса кружка рассеяния объектива к размеру пиксела для повышения точности оценки координат изображений малоразмерных объектов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2016. Вып. 2. С. 49–53.

9. Козирацкий Ю.Л., Донцов А.А., Прохоров Д.В., Плеве В.В. Эффективность сопровождения подвижных объектов на основе измерителей энергетического центра изображения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 6. С. 340–348.

10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.

11. Костров В.В., Ракитин А.В. Автоматическое обнаружение объектов в оптико-электронных системах с болометрическим матричным приёмником // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2025. №2. С. 32–39.

12. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. М.: Радио и связь, 1992. 304 с.

Поступила 25 июля 2025 г.

English

ALGORITHMIC SUPPORT FOR THE DETECTION AND COORDINATION OF POINT OBJECTS IN OPTOELECTRONIC SYSTEMS WITH A BOLOMETRIC MATRIX RECEIVER

Viktor Vasilyevich Kostrov — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Radio Engineering, Murom Institute¹ (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”; Lead Software Engineer, JSC “Research Institute “Submicron”².

E-mail: kostrov.46@mail.ru

Alexey Valerievich Rakitin — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Radio Engineering, Murom Institute¹ (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”; the Head of Department, JSC “Research Institute “Submicron”².

Aleksandr Dmitrievich Bogatov — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Radio Engineering, Murom Institute¹ (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”; Lead Design Engineer, JSC «Murom Plant of Radio measuring Instruments»³.

¹Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya str., 23.

²Address: 124460, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, Georgievsky ave., 5, b. 2.

³Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Karacharovskoe Highway, 2.

Abstract: The paper considers the problem of detecting point targets and estimation of its coordinates in a passive optoelectronic system (OES) of the far infrared (IR) range, in which the primary image is formed using a microbolometric matrix radiation receiver (MRR). Taking into account the diffraction effect and the technological gaps between the sensing elements, pixel power distributions are obtained for four typical cases of target displacement from the pixel center: horizontally, vertically, and diagonally. It is shown that the most difficult case for processing is the location of a point target at the intersection of the technological gaps of four adjacent pixels. Detection characteristics are given, based on which it is shown that losses in the threshold signal power, taking into account these effects, can reach 4...15 dB. The structure of a multichannel correlation receiver is proposed to reduce signal loss. The center of gravity method is used as the basic method for subpixel measurement of point target coordinates. It is shown that displacement of a point target from the center of a pixel leads to an increase of the standard errors of coordinates estimation by 2...8 times (depending on the direction of displacement). An adaptive version of the device for estimating the coordinates of an object in the plane of the matrix is proposed, which uses the results of a four-channel correlation receiver.

Keywords: optoelectronic system (OES), matrix radiation receiver, bolometer, multichannel correlation receiver, detection characteristics, center of gravity method, coordinate measurement errors.

References

1. Yakimenko I.V. Methods, models and means of detecting aerial targets on an atmospheric background by wide-angle optoelectronic systems. St. Petersburg: Lan, 2022. 168 p.
2. Khafizov R.Z., Startsev V.V., Moskvichev V.Yu. Fast Bolometric Focal Plane Arrays. Photonics. Vol. 15. No. 5. 2021. Pp. 396–409.
3. Bekhtin Yu.S., Filatov Yu.A. Method of measuring coordinates of point objects according to multi-element PRU data. Autometry. 1994. No. 2. Pp.11–17.
4. Kirichuk V.S., Kosykh V.P., Kurmanbek uulu T. Adaptive filtering with subpixel estimation of coordinates of point objects. Autometry. 2006. Vol. 42. No. 1. Pp. 3–12.
5. Yao H., Liu L., Wei Y., Chen D., Tong M. Infrared Small-Target Detection Using Multidirectional Local Difference Measure Weighted by Entropy. Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 1902. DOI 10.3390/su15031902
6. Medennikov P.A. Algorithm for detecting and determining the coordinates of a point object. Opticheskii Zhurnal. 2019. Vol. 86. № 8. Pp. 65–69.
7. Znamenskiy I.V. Dependence of the signal magnitude on displacement of the point spread function relative to the center of the photosensitive matrix pixel. Opticheskii Zhurnal. 2023. Vol. 90. No. 12. Pp. 96–110.
8. Baranov P.S., Mancvetov A.A. Optimization of the relationship of Lens Dissipation Disk and Pixel Size to Improve the Precision of the Coordinates of a Small Object Image. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2016. Vol. 2. Pp. 49–53.
9. Koziratsky Yu.L., Dontsov A.A., Prokhorov D.V., Pleva V.V. The effectiveness of tracking moving objects based on energy center image meters. News of TulSU. Technical sciences. 2018. Iss. 6. Pp. 340–348.
10. Born M., Volf E. Principles of Optics. Pergamon Press, 1968. 720 p.
11. Kostrov V.V., Rakitin A.V. Automatic object detection in optoelectronic systems with a bolometric matrix receiver. Radio engineering and telecommunication systems. 2025. Iss. 2. Pp. 32–39.
12. Sosulin Yu.G. Theoretical foundations of radar and radio navigation. Moscow: Radio i Svyaz, 1992. 304 p.