

УДК 535.231.6+621.382
EDN: JPTWDZ

PACS: 07.57.Kp

Дискретизация функции рассеяния точки инфракрасного фотоприемного устройства с матричным микроболометрическим детектором

Р. З. Хафизов, В. В. Серов, Л. В. Скрипачева

Рассмотрены особенности дискретизации функции рассеяния точки (ФРТ) при тепловой пеленгации целей с малыми угловыми размерами. Цель работы состояла в определении характеристик пеленгации удаленных тепловых объектов при использовании оптико-электронного канала с микроболометрическим ФПУ. В качестве примера проведено рассмотрение характеристик дискретизации при использовании ФПУ с микроболометрическим матричным детектором формата 640×480 с шагом элементов 17 мкм при учёте топологии чувствительных областей, преобразующих тепловое излучение. Анализ трансформации функции рассеяния точки при изменении положения кружка рассеяния объектива относительно пикселей детектора проведен для зеркально-линзового объектива с фокусным расстоянием 100 мм (F/1,0), оптимизированного на спектральный диапазон 8÷14 мкм.

Ключевые слова: микроболометрический матричный детектор, инфракрасная оптико-электронная система, тепловая пеленгация.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-2-115-123

Введение

Возможность использования микроболометрических матричных детекторов в инфракрасных оптико-электронных системах (ИК-ОЭС) стала реальностью всего 10–15 лет назад, когда их чувствительность, выраженная в эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ), достигла значений 30÷50 мК. Сегод-

ня в ряде тепловизионных систем эти детекторы вполне конкурируют с квантовыми матричными фотоприёмниками.

Исторически болометрические сенсоры развивались как приборы, обеспечивающие решение задач тепловидения. Поэтому основные усилия разработчиков и сегодня направлены на достижение больших форматов и высокого разрешения при чувствительности, дающей возможность получать изображения тепловой сцены с низким контрастом.

Одной из важнейших активно развивающихся областей применения ИК-фотоприёмников является тепловая пеленгация. В отличие от задач, решаемых тепловидением, тепlopеленгация имеет дело с объектами, характеризующимися малыми угловыми размерами и существенно большими (вплоть до 400÷500 °С) температурами, смещая спектр их излучения в коротковолновую область.

До настоящего времени разработки оптических пеленгационных ОЭС были ориентированы на использование фотоприемных устройств (ФПУ) на основе охлаждаемых

Хафизов Ренат Закирович, нач. исследовательского центра, к.ф.-м.н.

E-mail: imagelab@mail.ru

Серов Виталий Витальевич, гл. конструктор.

E-mail: svv@astrohn.ru

Скрипачева Лилия Викторовна, гл. метролог.

E-mail: slv@astrohn.ru

АО «ОКБ «АСТРОН».

Россия, 140080, Московская обл., г. Лыткарино, ул. Парковая, 1.

Статья поступила в редакцию 31.01.2025

После доработки 7.03.2025

Принята к публикации 7.04.2025

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Хафизов Р. З., Серов В. В., Скрипачева Л. В., 2025

квантовых детекторов, поскольку они в виде малоформатных (одноэлементных и строчных) вариантов давно и достаточно эффективно используются как в наземной, так и в авиационной пеленгационной аппаратуре.

Развитие МЭМС технологии открыло уникальные возможности для создания микроболометрических сенсоров, которые в последнее время стали активно применяться в составе тепловизионных оптико-электронных систем благодаря таким их достоинствам, как небольшая стоимость, малый вес, низкая потребляемая мощность и длительный срок службы. Для систем тепловой пеленгации они обладают такими дополнительными преимуществами по сравнению с квантовыми аналогами, как отсутствие фотоэлектрической связи между элементами благодаря пространственной изоляции чувствительных элементов друг от друга, возможностью реализации широкого ($2 \div 16$ мкм) диапазона спектральной чувствительности, малым (менее 10 с) временем выхода на рабочий режим и отсутствием систем охлаждения [1].

Параметром микроболометрических сенсоров, вызывающим оправданную критику потребителей инфракрасных пеленгационных ОЭС, является их невысокое быстродействие, определяемое тепловым характером преобразования инфракрасного излучения. Вместе с тем, с одной стороны, при пеленгации цели, удаленной на значительное расстояние, угловые скорости перемещения её изображения в фокальной плоскости сравнимы и даже ниже скорости смены кадров, с другой – аппаратура сопровождения цели, обеспечивая быстрое совмещение оптической оси ФПУ с линией визирования, практически фиксирует изображение цели в центре раstra детектора. Поэтому при использовании матричных микроболометрических детекторов в составе пеленгационных ОЭС этот недостаток не становится сильно критичным. При этом современные разработки матричных микроболометрических детекторов ориентируются на увеличение кадровой частоты по крайней мере до $100 \div 150$ Гц с сохранением высокой чувствительности [2, 3].

Одним из важнейших проявлений матричных фотодетекторов при формировании изображений малоразмерных объектов в виде

кружка рассеяния объектива (КРО), сравнимого с шагом элементов детектора, становится пространственная дискретизация. Для микроболометрических детекторов в связи с их инерционностью существенным фактором при определённых условиях становится и временная (частотная) дискретизация.

В настоящей работе рассмотрены особенности дискретизации функции рассеяния точки (ФРТ) при тепловой пеленгации целей с малыми угловыми размерами. Цель работы состояла в определении характеристик пеленгации удаленных тепловых объектов при использовании оптико-электронного канала с микроболометрическим ФПУ. В качестве примера проведено рассмотрение характеристик дискретизации при использовании ФПУ с микроболометрическим матричным детектором формата 640×480 с шагом элементов 17 мкм при учёте топологии чувствительных областей, преобразующих тепловое излучение. Анализ трансформации функции рассеяния точки при изменении положения кружка рассеяния объектива относительно массива чувствительных областей детектора проведен для зеркально-линзового объектива с фокусным расстоянием 100 мм (F/1,0), оптимизированного на спектральный диапазон $8 \div 14$ мкм.

Влияние дискретизации изображения малоразмерных объектов на пеленгационную характеристику ИК ФПУ

Пространственная дискретизация

При тепловой пеленгации цели, удаленной на значительное расстояние, её изображение в фокальной плоскости матричного детектора представляет собой кружок рассеяния, размеры которого зависят от оптических параметров объектива. Относительное пространственное изменение мощности излучения в плоскости детектора описывается функцией рассеяния точки (ФРТ), за первое приближение которой, как правило, принимают двумерное гауссово распределение [4]:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x+x_0)^2 + (y+y_0)^2}{2\sigma^2}\right],$$

где σ – среднеквадратическое отклонение; x, y – текущие координаты в плоскости; x_0, y_0 –

смещение центра кружка рассеяния в пределах пиксела. При этом считается, что начало координат x и y совпадает с центром пикселя (рис. 1).

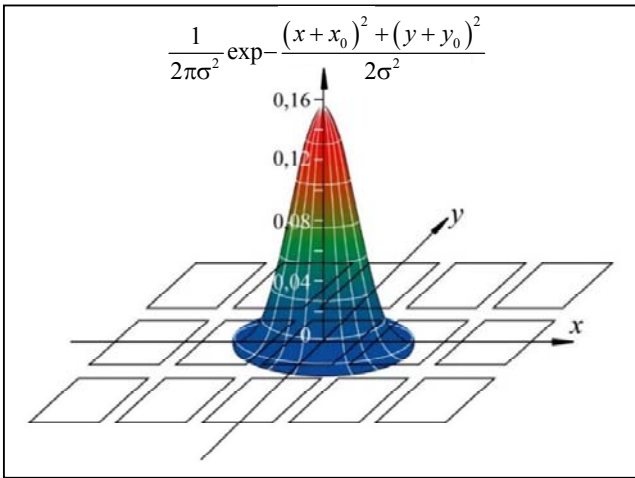


Рис. 1. Функция рассеяния точки, аппроксимированная двумерным гауссовым распределением

Дискретизация изображения матричным детектором, нарушая пространственную инвариантность преобразования функции рассеяния точки, оказывает влияние на характеристики воспроизведения кружка рассеяния при изменении его положения относительно массива чувствительных областей детектора. При этом существенное влияние на эти характеристики оказывает топология чувствительных элементов детектора.

Рассмотрим дискретизацию ФРТ при движении кружка рассеяния относительно фокальной плоскости распространенного сегодня варианта матричного микроболометрического детектора формата 640×480 с шагом пикселей 17 мкм . С учетом топологии этого детектора можно считать, что поглощающая тепловое излучение часть площади пиксела ограничена размерами $11 \times 14 \text{ мкм}$. Рассмотрение проведем в предположении гауссова распределения ФРТ, принимая за среднеквадратическое отклонение значение $\sigma \approx 5 \text{ мкм}$, что соответствует кружку рассеяния объектива ОЗЛ-100 (F/1,0), определенному по результатам расчёта в программе Zemax при спектре излучения в диапазоне $8 \div 14 \text{ мкм}$.

Массив чувствительных элементов с размерами $11 \times 14 \text{ мкм}$ в масштабе единиц σ рассматриваемого детектора выглядит, как представлено на рисунке 2. На рисунке видно, что

размеры чувствительных фрагментов пиксела относительно кружка рассеяния для объектива составляют $2,2\sigma \times 2,8\sigma$, а радиус кружка рассеяния равен $r = 2\sigma = 10 \text{ мкм}$. Нормировка размеров пиксела в единицах σ позволяет в дальнейших расчетах использовать выражение для гауссова распределения, в котором $\sigma = 1$:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{(x+x_0)^2 + (y+y_0)^2}{2}\right] \quad (1)$$

При этом относительные изменения величины сигнала при смещении кружка рассеяния на величины x_0, y_0 в окрестности центра пиксела определяют пеленгационную характеристику матрицы в виде:

$$\gamma(x_0, y_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-1,1}^{+1,1} \int_{-1,4}^{+1,4} \exp\left[-\frac{(x+x_0)^2 + (y+y_0)^2}{2}\right] dx dy. \quad (2)$$

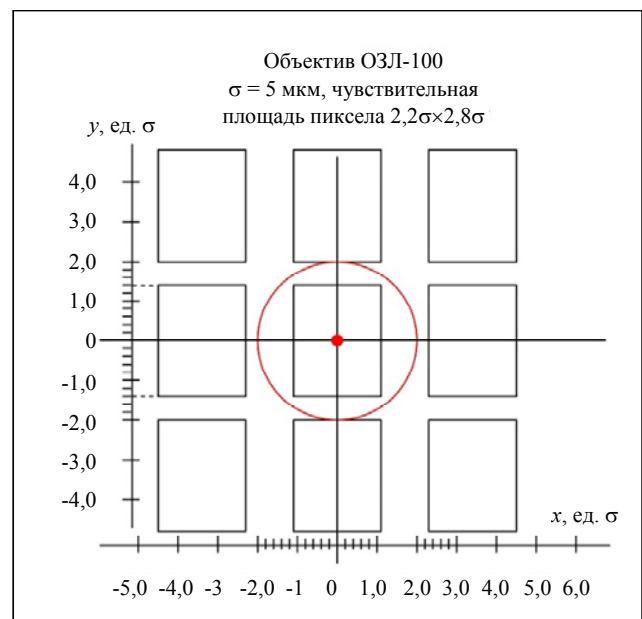


Рис. 2. Нормировка размеров пиксела и кружка рассеяния на величину σ для объектива ОЗЛ-100

Выражение (2) симметрично относительно сдвигов по осям на величину шага элементов, поэтому достаточно проанализировать изменение сигнала в окрестности центра пиксела при сдвигах по x в пределах $x_0 = -1,1 \div 1,1$ и по y в пределах $y_0 = -1,4 \div 1,4$.

Так, например, для положения пятна в центре пиксела ($x_0 = 0, y_0 = 0$) получим:

$$\gamma_{\max} = \frac{1}{2\pi} \int_{-1,1}^{+1,1} \int_{-1,4}^{+1,4} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2}\right] dx dy = 0,61. \quad (3)$$

Для $x_0 = -1,7\sigma$, $y_0 = 0$, что соответствует смещению пятна на половину шага пикселя по оси x , КРО распределяется на два элемента с $\gamma_{\max} = 22,8\%$, а при $x_0 = -1,7\sigma$, $y_0 = -1,7\sigma$, что соответствует смещению пятна в перекрестье пикселей, КРО распределяется на четыре элемента с $\gamma_{\max} = 10,3\%$ (см. рис. 3).

Принимая σ в качестве единицы измерения координат и интегрируя выражение (2) по координатам x , y для различных значений x_0 , y_0 получим относительные изменения значе-

ния мощности излучения на пикселе в зависимости от произвольного положения кружка рассеяния объектива в плоскости матрицы. С точностью до второго знака в коэффициентах численное интегрирование выражения (2) дает следующий результат:

$$\begin{aligned} \gamma(x_0, y_0) = &= 0,25 [erf(0,71x_0 + 0,78) - erf(0,71x_0 - 0,78)] \times (4) \\ &\times [erf(0,71y_0 + 1) - erf(0,71y_0 - 1)]. \end{aligned}$$

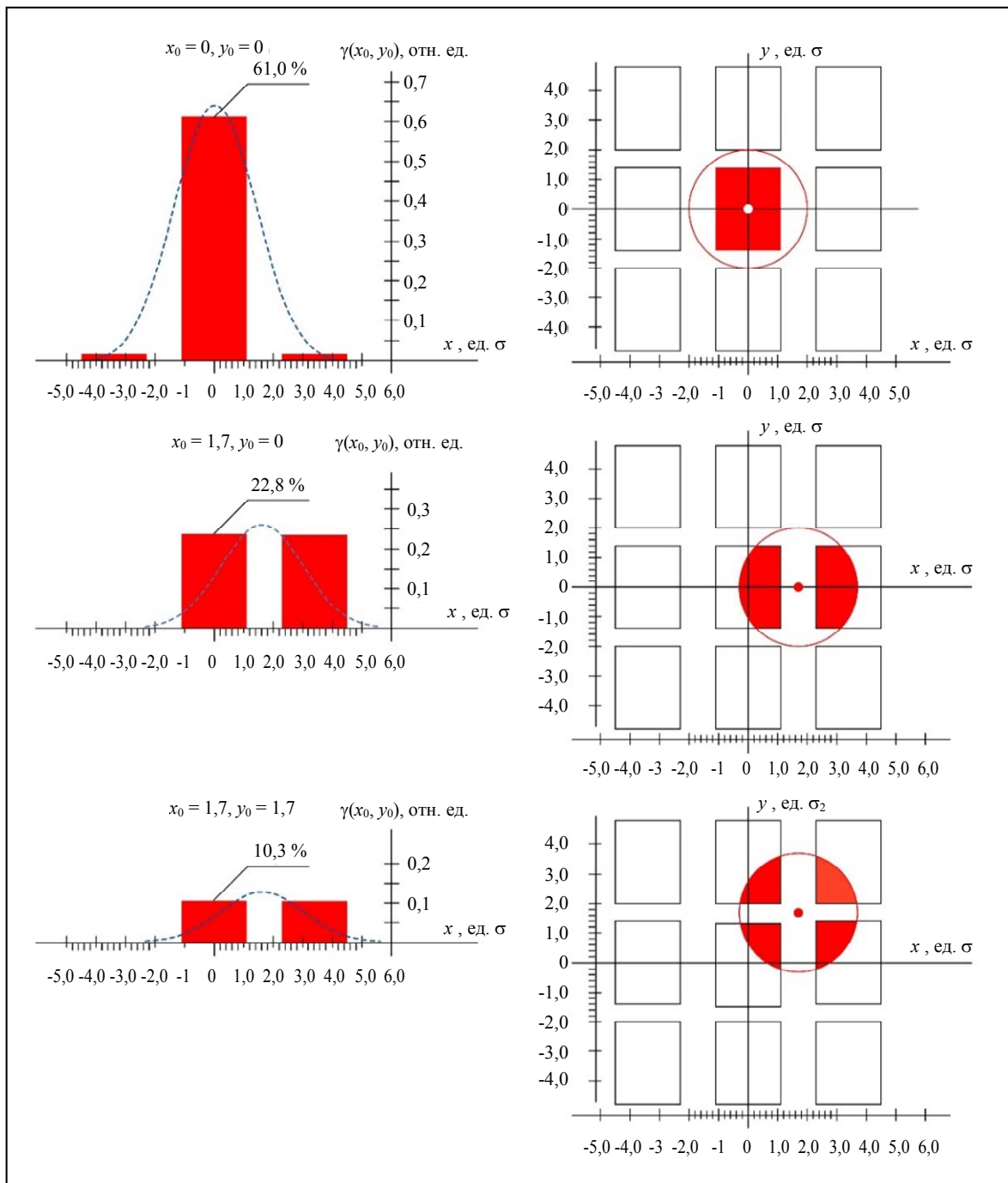


Рис. 3. Распределение кружка рассеяния при его смещении относительно центра пикселя

3D-график выражения (4) представлен на рисунке 4, на котором сечения А, В, и С дают пеленгационные характеристики матрицы при движении кружка рассеяния от центра пиксела, соответственно, вдоль осей x , y и по диагонали пиксела преобразуя выражение (4):

при $y_0 = 0$ к виду (сечение А):

$$\gamma(x_0, y_0 = 0) = 0,42 \left[\operatorname{erf}(0,71x_0 + 0,78) - \operatorname{erf}(0,71x_0 - 0,78) \right], \quad (5)$$

при $x_0 = 0$ к виду (сечение В):

$$\gamma(x_0 = 0, y_0) = 0,365 \left[\operatorname{erf}(0,71y_0 + 1) - \operatorname{erf}(0,71y_0 - 1) \right], \quad (6)$$

при движении пятна по диагонали $l = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ пиксела к виду (сечение С):

$$\gamma(l) = 0,42 \left[\operatorname{erf}(0,81l + 0,78) - \operatorname{erf}(0,81l - 0,78) \right]. \quad (7)$$

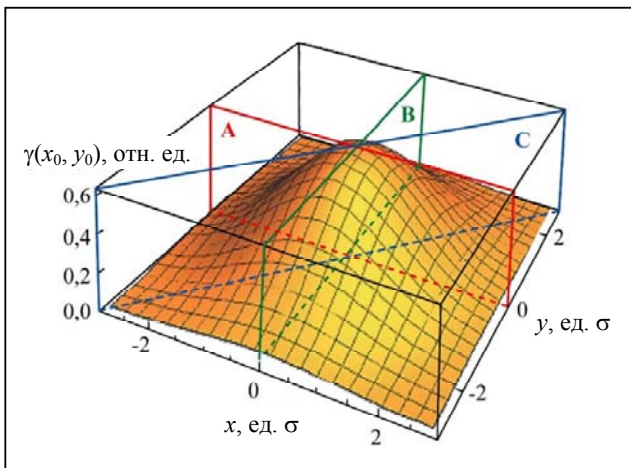


Рис. 4. 3D-представление отклика матрицы на движение кружка рассеяния относительно центра пиксела

Отклики матрицы на движение кружка рассеяния относительно центра пиксела по сечениям А и В с учетом $\sigma = 5$ мкм представлены на графике рисунка 5.

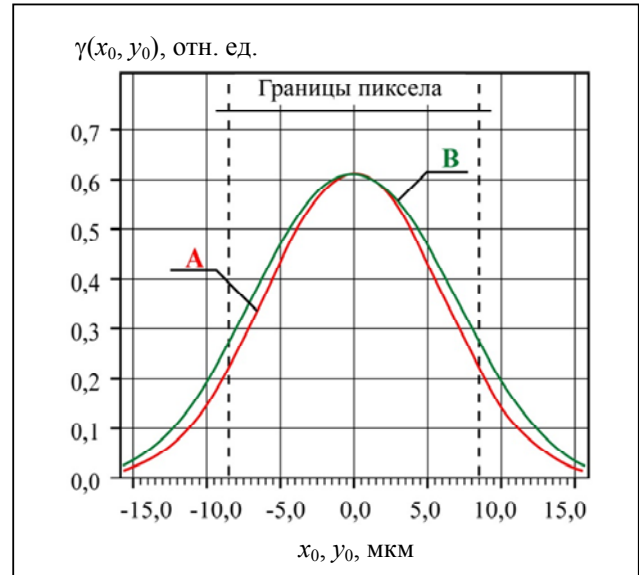


Рис. 5. Отклики матрицы на движение кружка рассеяния относительно центра пиксела по сечениям А и В рисунка 4

График функции (4) при последовательном движении пятна вдоль оси x по соседним пикселам представлен на рисунке 6. Необходимо отметить, что такой вид пеленгационной характеристики реализуется при скоростях движения изображения цели $v < \frac{\delta}{\tau_f}$, причем должно выполняться также условие $\tau_f > 3\tau_r$, где τ_r – постоянная времени тепловой релаксации пиксела. При этих условиях скорость изменения температуры чувствительного элемента пиксела (мембраны с поглощающим излучение слоем) будет соответствовать скорости изменения мощности излучения, интегрируемой пикселем по мере движения пятна.

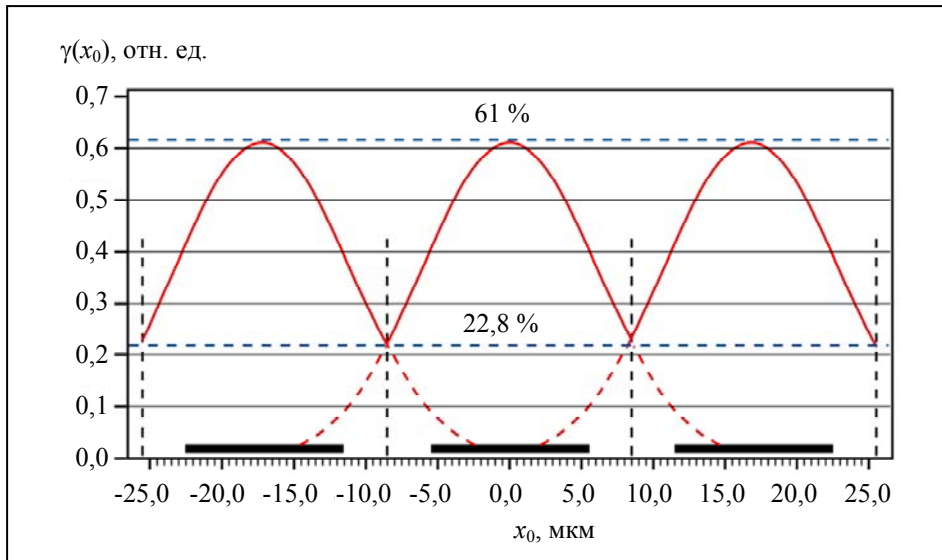


Рис. 6. Пеленгационная характеристика матрицы при движении кружка рассеяния от центра пиксела вдоль оси x

Фактор пространственной дискретизации ФРТ

Вероятность обнаружения фотоприемным устройством точечной цели, обусловленная дискретностью чувствительных элементов матричного детектора, определяется вероятностью попадания центра КРО в пределы фрагмента площадью $S_f = 4x_0 \cdot y_0$ с координатами $(-x_0 \div x_0, -y_0 \div y_0)$ относительно центра пиксела. Принимая во внимание нормировку размеров пиксела в единицах σ , получим:

$$p(S_f) = \frac{S_f}{S_{px}} 100 \% = \frac{x_0 \cdot y_0}{2,89} 100 \% \quad (8)$$

За фактор пространственной дискретизации изображения точечной цели, определяющий среднее значение формируемого пикселем сигнала при равновероятном попадании центра КРО в пределы фрагмента пиксела, можно принять нормированный на площадь фрагмента интеграл ФРТ:

$$\bar{\gamma} = \frac{\gamma_{\max}}{S_f} = \frac{1}{2\pi S_f} \int_{-x_0}^{+x_0} \int_{-y_0}^{+y_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2}\right) dx dy \quad (9)$$

Вероятность $p(S_f) = 100 \%$, означающая попадание центра КРО независимо от его ме-

стоположения в пределы площади пиксела, реализуется при $x_0 = y_0 = 1,7$:

$$\gamma_{\max} = \frac{1}{2\pi} \int_{-1,7}^{+1,7} \int_{-1,7}^{+1,7} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2}\right) dx dy = 0,83, \quad (10)$$

$$\bar{\gamma} = \frac{0,83}{2,89} = 0,29$$

Таким образом, при произвольном местоположении центра КРО среднее значение формируемого пикселем сигнала при рассмотренных оптических параметрах оптики и топологических характеристиках матричного детектора определяется фактором пространственной дискретизации, равным 0,29, что соответствует фактической эффективности преобразования потока излучения, падающего на фокальную плоскость детектора.

Фактор пространственной дискретизации, определяемый выражением (10), необходимо принимать во внимание при расчётах вероятности обнаружения точечной цели.

Частотная дискретизация

Движение изображения цели в фокальной плоскости матрицы со скоростями, превышающими скорость смены кадров, приводит к уменьшению сигнала и появлению эффекта размытия изображения (см. рис. 7) вследствие

инерционности, характерной для теплового механизма преобразования ИК-излучения сенсорами микроболометрических матриц.

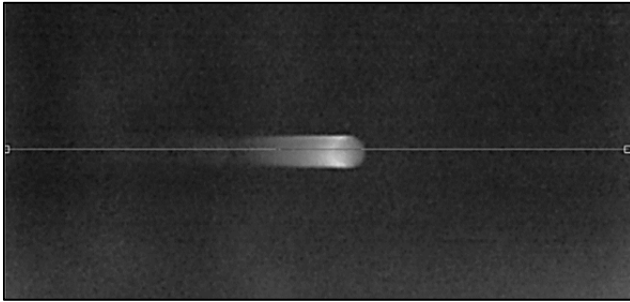


Рис. 7. Размытие изображения малоразмерного объекта при его движении (фрагмент раstra 240×480 пкс)

Рассмотрим для примера эффект деформации пеленгационной характеристики, определяемой формулой (5), при линейном равномерном движении точечного изображения в виде кружка рассеяния с радиусом $r = 2\sigma$ вдоль строки матрицы с относительной скоростью $v = \frac{n\delta}{\tau_f}$, где n – число пикселей, которое пятно проходит за время кадра τ_f .

Для рассматриваемой топологии матрицы с шагом пикселей 17 мкм изменение со временем координаты x_0 в интервале $-4,1 \text{ ед. } \sigma \leq x_0 \leq 0$, когда пятно начинает заходить на пиксел и достигает его центра можно представить в виде:

$$x_0 = -4,1 + vt = -4,1 + \frac{n\delta}{\tau_f} t \quad (11)$$

Сдвиг по оси x_0 на $-4,1 \text{ ед. } \sigma$ определяется краем чувствительной площадки пиксела, расположенной от её центра на $-1,1\sigma$ и краем спада гауссова распределения интенсивности излучения, равным 3σ (правило 3-х σ).

Откуда время «наплыва» пятна на чувствительную площадь пиксела и, соответственно, время его нагрева равно:

$$t = \frac{1}{n} \frac{(x_0 + 4,1)}{\delta} \tau_f \quad (12)$$

Скорость нарастания сигнала микроболометрического пиксела ограничивается постоянной времени тепловой релаксации τ_r , по закону:

$$U(t) = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_r}} \right) \quad (13)$$

Уменьшение времени «прохода» пятна через чувствительную площадь пиксела ограничивает возможность нарастания сигнала до максимальной величины.

Изменение фактора $\frac{t}{\tau_r}$ при изменении скорости движения пятна относительно пиксела для рассматриваемых параметров $\tau_f = 20 \text{ мс}$, $\tau_r = 5 \text{ мс}$, $\delta = 3,4 \text{ ед. } \sigma$ равно:

$$\frac{t}{\tau_r} = \frac{1}{n} \frac{(x_0 + 4,1)}{\delta} \frac{\tau_f}{\tau_r} \cong \frac{1,18(x_0 + 4,1)}{n} \quad (14)$$

Тогда деформация пеленгационной характеристики при движении пятна вдоль строки матрицы на отрезке времени, соответствующем нарастанию сигнала, определится сверткой функций (5) и (13):

$$\begin{aligned} \gamma_{mov}(x_0, y_0 = 0) = & 0,42 \left[\text{erf}(0,71x_0 + 0,78) - \text{erf}(0,71x_0 - 0,78) \right] \times \\ & \times \left(1 - e^{-\frac{1,18(x_0 + 4,1)}{n}} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

На графике рисунка 8 представлены деформации пеленгационной характеристики, полученные численным расчетом уравнения (15), при движении пятна вдоль строки при $n = 0, 3, 5, 10, 20, 40$, которые соответствуют угловым скоростям движения цели $\dot{\phi} = 0; 1,45; 2,42; 4,84; 9,69; 19,38 \text{ град/с}$.

В таблице приведены характерные значения угловых скоростей движения пятна вдоль массива пикселей матрицы и соответствующие им уменьшения уровня сигнала.

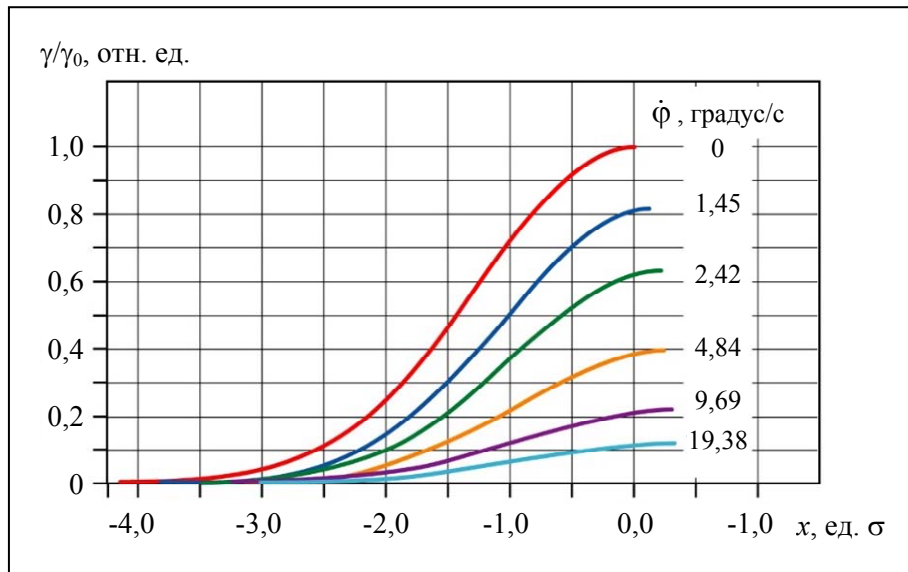


Рис. 8. Относительные уменьшения сигнала от цели, движущейся с угловыми скоростями $\dot{\varphi} = 0 \div 20$ градус/с, для матричного микроболометрического детектора с шагом пикселей 17 мкм

Таблица

$n, px/frame$	0	3	5	10	20	40
$v, px/c$	0	150	250	500	1000	2000
$\dot{\varphi}, \text{град/с}$	0	1,45	2,42	4,84	9,69	19,38
$\text{Max} [\gamma_{mov}(x_0, y_0 = 0)]$	0,61	0,50	0,39	0,24	0,14	0,07

Таблица иллюстрирует заметные снижения относительной амплитуды сигнала при угловых скоростях изображения цели более 3-х пикселей за кадр (угловая скорость цели 1,45 °/с). Однако, как показывают оценки, при сближении объекта с пеленгационной ОЭС это снижение существенно компенсируется за счет формирования КРО с мощностью, существенно превышающую пороговую мощность детектора.

Заключение

Наряду с активным развитием областей применения матричных микроболометрических детекторов для решения задач тепловидения возможности их использования в оптико-электронных системах тепловой пеленгации, как альтернативы квантовым фотоприемникам, сегодня находятся на стадии обсуждения, находя, как сторонников, так и оппонентов, критически обосновывающих их ограничения.

Принимая во внимание необходимость детального анализа достоинств и возможных ограничений теплового характера преобразования ИК-излучения в микроболометрических сенсорах, в работе рассмотрены характеристики формирования матричными массивами на их основе изображения тепловых объектов с малыми угловыми размерами применительно к решению задач тепlopеленгации.

На основе анализа пространственной и частотной дискретизации функции рассеяния точки получены данные о пеленгационных характеристиках оптико-электронного канала с микроболометрическим матричным детектором формата 640×480 с шагом элементов 17 мкм с учетом топологии чувствительных элементов и инерционности преобразования теплового излучения, которые, по нашему мнению, могут представлять интерес для разработчиков оптико-электронных систем тепловой пеленгации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fraenkel R., Haski J., Mizrahi U., Shkedy L., Shtrichman I., Pinsky E. / SPIE Defense+ Security. 2014. P. 90700P–90700P-10.

2. Tinnes S., Boudou N., Durand A. / OECD Conference Center. – Paris, France, 6–8 Febr., 2018.

3. Хафизов Р. З., Старцев В. В., Москвичев В. Ю. / Автометрия. 2021. Т. 57. № 5. С. 77–87.

4. Баранов П. С., Манцетов А. А. / Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. 2016. Вып. 2. С. 49–53.

PACS: 07.57.Kp

Point spread function discretization of the IR photodetector devices with a microbolometric focal plane array

R. Z. Khafizov, V. V. Serov and L. V. Skripacheva

ODB «ASTROHN» JSC

1, Parkovaya st., Lytkarino, Moscow Region, 140080 Russia

E-mail: imagelab@mail.ru

Received 31.01.2025; revised 7.03.2025; accepted 7.04.2025

The features of the point spread function (PSF) discretization for thermal direction finding of targets with small angular dimensions are considered. The purpose of the work was to determine the direction finding characteristics of far-away thermal objects using an optical-electronic channel with a microbolometric photodetector devices. As an example, the sampling characteristics are considered when using photodetector devices with a 640×480 format microbolometric detector (pixel pitch 17 microns), taking into account the topology of sensitive areas that convert thermal radiation. The transformation of the point spread function when changing the circle of confusion position relative to the detector pixels was analyzed for a specular lens with a focal length of 100 mm (F/1.0), optimized for a spectral range of 8–14 microns.

Keywords: microbolometric detector, infrared optoelectronic system, thermal direction finding.

REFERENCES

1. Frankel R., Haski J., Mizrahi U., Shkedy L., Shtrichman I. and Pinsky E., SPIE Defense+ Security, 90700P–90700P-10 (2014).

2. Tines S., Boudou N. and Durand A., OECD Conference Center. Paris, France, 6–8 February, 2018.

3. Khafizov R. Z., Startsev V. V. and Moskvichev V. Yu., Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing **57**, 511–520 (2021).

4. Baranov P. S. and Mancvetov A. A., Journal of the Russian Universities. Radioelectronics **2**, 49–53 (2016).