

### **Перспективы использования микроболометрических ФПУ в оптико-электронной аппаратуре тепловой пеленгации**

Р.З. Хафизов<sup>1</sup>, А.В. Ракитин<sup>2</sup>, К.В. Соколов<sup>1</sup>, А.Ф. Иванченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Оптико-механическое конструкторское бюро «Астрон», 140080, Московская обл., г. Лыткарино, ул. Парковая, д. 1, оф. 9.

E-mail: info@astrohn.ru

<sup>2</sup>Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Субмикрон», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, проспект Георгиевский, д. 5, стр. 2.

E-mail: submicron@se.zgrad.ru.

*Рассмотрены особенности преобразования ИК-изображения в виде кружка рассеяния объектива, формируемого в фокальной плоскости микроболометрического детектора, при тепловой пеленгации объектов с малыми угловыми размерами. Цель работы состояла в определении характеристик пеленгации удаленных тепловых объектов при использовании оптико-электронного канала с неохлаждаемым матричным микроболометрическим детектором.*

*Ключевые слова: ИК излучение, микроболометрический детектор, фотоприёмное устройство, пеленгация, оптико-электронная система (ОЭС).*

### **Prospects of using microbolometric photodetector devices in optical-electronic equipment of thermal direction finding**

Khafizov R.Z.<sup>1</sup>, Rakitin A.V.<sup>2</sup>, Sokolov K.V.<sup>1</sup>, Ivanchenko A.F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Experimental Design Bureau «ASTROHN»

<sup>2</sup>Joint-Stock Company «Research Institute «Submicron»

*The features of the transformation of an IR image in the form of a lens scattering circle formed in the focal plane of a microbolometric detector during thermal direction finding of objects with small angular dimensions are considered. The aim of the work was to determine direction-finding characteristics of remote thermal objects when using an optoelectronic channel with an uncooled matrix microbolometric detector.*

*Keywords: IR radiation, microbolometric detector, thermal imaging sensor, direction finding, optical-electronic system (OES)*

### **Введение**

В современных тепловизионных оптико-электронных системах (ОЭС) активно применяются неохлаждаемые фотоприёмные устройства (ФПУ) на основе матричных микроболометрических детекторов благодаря таким их достоинствам, как небольшая стоимость, малый вес, низкая потребляемая мощность и длительный срок службы.

Одной из важнейших активно развивающихся областей применения инфракрасной аппаратуры является тепловая пеленгация. В отличие от задач, решаемых тепловидением, тепlopеленгация имеет дело с объектами, характеризующимися малыми угловыми размерами и более высокими (вплоть до 400÷600°C) температурами.

В этой связи представляется актуальным рассмотрение возможностей использования в тепlopеленгационной аппаратуре ФПУ на основе микроболометрических детекторов с учетом таких их преимуществ по сравнению с квантовыми аналогами, как отсутствие фотоэлектрической связи между элементами, малым (менее 10 с) временем выхода на рабочий режим, отсутствием систем охлаждения

и возможностью реализации широкого ( $2\div 16$  мкм) диапазона спектральной чувствительности [1 – 3].

В настоящей работе рассмотрены особенности преобразования матричными микроболометрическими детекторами ИК изображений малоразмерных объектов при их тепловой пеленгации, и представлены результаты разработки макета тепlopеленгационной ОЭС.

## 1 Эффективность преобразования матричными детекторами энергии ИК излучения

Поскольку при пеленгации в фокальной плоскости детектора формируется изображение в виде кружка рассеяния объектива (КРО), то, с одной стороны, эффективность преобразования излучения в сигнал зависит от фокусирующих характеристик оптики, а с другой, – определяется такими параметрами детекторов как чувствительность, уровень собственных шумов, быстродействие, формат и разрешение. При этом одним из важнейших проявлений матричной структуры детекторов, оказывающих существенное влияние на характеристики дальности обнаружения и возможности эффективного сопровождения малоразмерных тепловых объектов, становится дискретизация КРО, нарушающая пространственную инвариантность его преобразования.

Относительное пространственное изменение мощности излучения в плоскости детектора описывается функцией рассеяния точки (ФРТ), за первое приближение которой, как правило, принимают двумерное гауссово распределение [4]:

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

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение ФРТ, определяемое фокусирующими параметрами объектива;  $x, y$  – текущие координаты в плоскости матрицы;  $x_0, y_0$  – смещение центра кружка рассеяния в пределах пикселя.

На рис. 1 представлены гаусс-аппроксимации ФРТ объективов, обеспечивающих  $\sigma$  от 3 до 5 мкм.

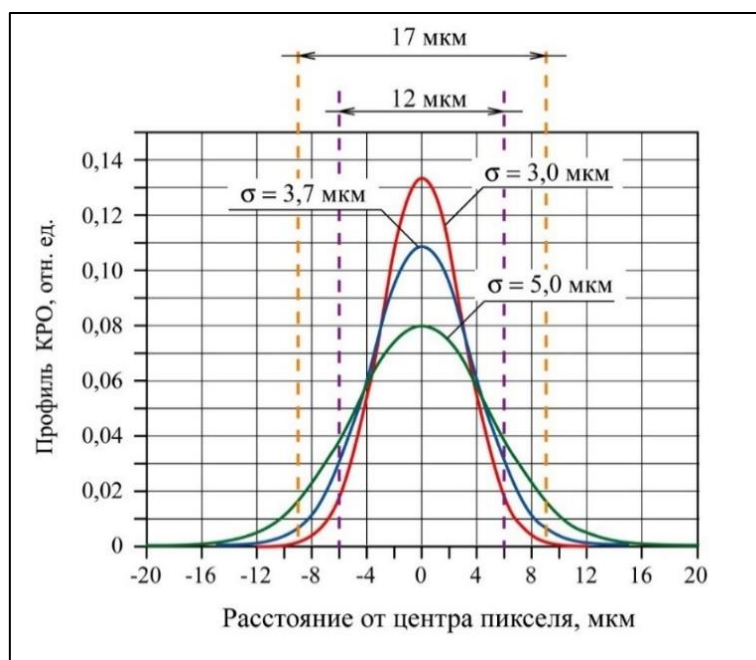


Рис. 1. Гаусс-аппроксимации ФРТ объективов

В качестве показателя эффективности преобразования энергии КРО может служить коэффициент преобразования, определяемый как:

$$\gamma(0,0) = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \exp\left\{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right\} dx dy, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – размеры чувствительных областей пикселя.

Коэффициент показывает, какое количество энергии, содержащееся в КРО, поглощается пикселем при расположении КРО в центре пикселя.

Эффективность преобразования энергии КРО детектором зависит как от  $\sigma$ , то есть от характеристик объектива, так и от шага пикселей, который ограничивает размеры чувствительных областей. Сегодня доступны микроболометрические детекторы формата 640×480(512) и 1280×960(1024) с шагом  $\delta$  пикселей 17 и 12 мкм. Уровень чувствительности таких детекторов в терминах ЭШРТ составляет 30÷50 мК или в терминах пороговой облученности –  $(1 \div 2) \cdot 10^{-6} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ .

В таблице 1 представлены значения коэффициента преобразования энергии КРО для практически реализуемых конструкций пикселей для различных значений  $\sigma$ .

**Таблица 1. Коэффициенты преобразования энергии КРО для практически реализуемых конструкций пикселей детекторов**

Размеры чувствительного элемента пикселя		$\delta = 17$ мкм		
		$\sigma = 3$ мкм	$\sigma = 4$ мкм	$\sigma = 5$ мкм
		$\gamma(0,0)$ , отн. ед.		
$a = b = 17$ мкм	$S_{\text{чз}} = 289$ мкм <sup>2</sup>	0,99	0,93	0,83
$a = 11$ мкм, $b = 14$ мкм	$S_{\text{чз}} = 154$ мкм <sup>2</sup>	0,91	0,76	0,61
$a = 9,5$ мкм, $b = 15,0$ мкм	$S_{\text{чз}} = 142,5$ мкм <sup>2</sup>	0,88	0,72	0,57
		$\delta = 12$ мкм		
		$\sigma = 3$ мкм	$\sigma = 4$ мкм	$\sigma = 5$ мкм
		$\gamma(0,0)$ , отн. ед.		
$a = b = 12$ мкм	$S_{\text{чз}} = 144,0$ мкм <sup>2</sup>	0,91	0,75	0,59
$a = 8,3$ мкм, $b = 11,5$ мкм	$S_{\text{чз}} = 95,5$ мкм <sup>2</sup>	0,79	0,60	0,45

## 2 Пеленгационные характеристики микроболометрических ФПУ

Другим важным фактором, ограничивающим эффективность преобразования энергии излучения в электрический сигнал, является дискретизация изображения матричным детектором. Дискретизация, нарушая пространственную инвариантность преобразования функции рассеяния точки, оказывает существенное влияние на характеристики воспроизведения изображения КРО при изменении его положения относительно массива чувствительных областей детектора. При этом существенное влияние на эти характеристики оказывает коэффициент заполнения площади пикселя чувствительным элементом.

Относительные изменения величины сигнала при смещении кружка рассеяния на величины  $x_0$ ,  $y_0$  в окрестности центра пикселя определяют пеленгационную характеристику детектора. Для детектора с размерами чувствительных областей  $a$  и  $b$  пеленгационная характеристика определяется выражением:

$$\gamma(x_0, y_0) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \exp\left\{-\frac{(x+x_0)^2+(y+y_0)^2}{2\sigma^2}\right\} dx dy. \quad (3)$$

В рамках проводимых исследований разработана программа, обеспечивающая возможность моделирования пеленгационных характеристик матричного детектора в широких пределах значений  $\sigma$ , шага пикселей  $\delta$  и размеров его чувствительных областей

$a$  и  $b$  при движении КРО в любом выбранном направлении. На рис. 2 показан интерфейс программы с изображением двух КРО с  $\sigma = 5$  мкм в плоскости детектора с шагом пикселей 17 мкм и размерами чувствительных областей  $a = b = 16$  мкм. Пример пеленгационной характеристики (изменения уровня сигнала) при движении левого КРО (зеленая кривая) навстречу соседнему (красная кривая) представлен на рис. 3.

Необходимо отметить, что расчет пеленгационных характеристик производится программой при условии, что скорость движения изображения цели  $v < \frac{\delta}{\tau_f}$ , причем выполняется также условие  $\tau_f > 3\tau_r$ , где  $\tau_f$  – время кадра, а  $\tau_r$  – постоянная времени тепловой релаксации пикселя. При этих условиях скорость изменения температуры чувствительного элемента пикселя соответствует скорости изменения мощности излучения, интегрируемой пикселем по мере движения пятна.

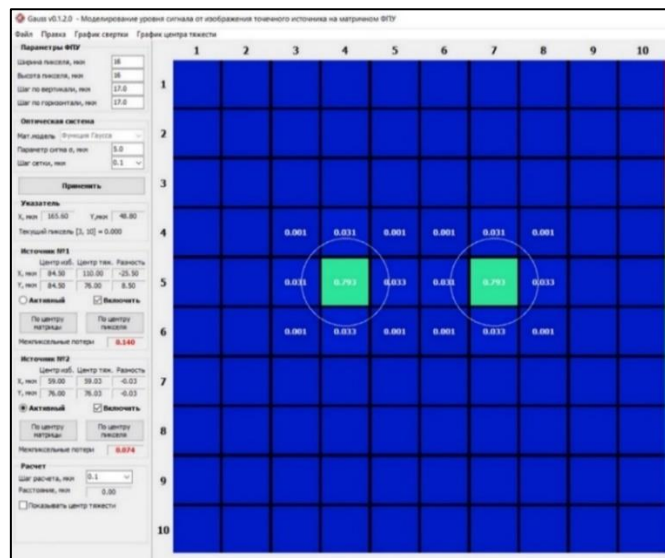


Рис. 2. Интерфейс программы с изображением двух КРО с  $\sigma = 5$  мкм в плоскости детектора с шагом пикселей  $\delta = 17$  мкм и размерами чувствительных областей  $a = b = 16$  мкм

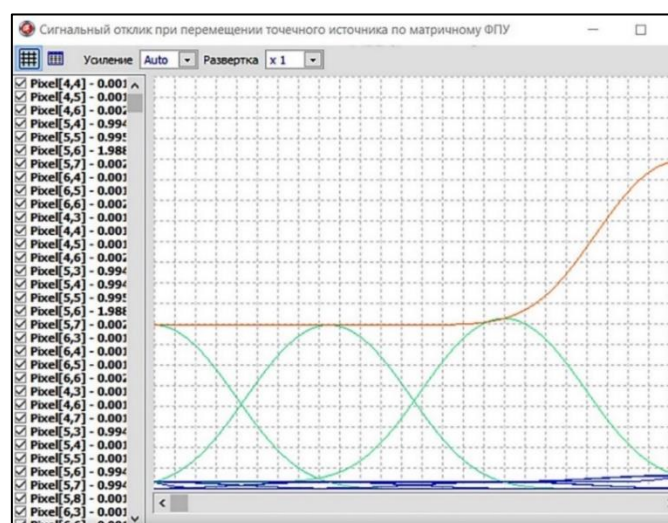


Рис. 3. Пример пеленгационной характеристики матричного детектора с шагом пикселей  $\delta = 17$  мкм и размерами чувствительных областей  $a = b = 16$  мкм при движении КРО с  $\sigma = 5$  мкм

### 3 Фактор пространственной дискретизации КРО

Как следует из предыдущих разделов, уровень выходного сигнала матричного детектора и, соответственно, вероятность обнаружения и точность определения координат теплового объекта существенным образом зависит как от топологических параметров пикселей, так и от положения КРО относительно фокальной плоскости детектора. Поскольку координаты попадания центра КРО в пределы площади пикселя являются случайными величинами, то для расчета вероятности обнаружения по уровню выходного сигнала необходимо пользоваться его средней величиной.

За среднее значение формируемого пикселем сигнала при изменении местоположения центра КРО в пределах площади пикселя можно принять интеграл ФРТ, нормированный на количество произвольных отсчетов сигнала:

$$\bar{\gamma} = \frac{\sum_{n=1}^N \gamma_n}{N} = \frac{1}{2N\pi\sigma^2} \sum_{n=1}^N \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \exp\left\{-\frac{(x+x_{n0})^2 + (y+y_{n0})^2}{2\sigma^2}\right\} dx dy, \quad (4)$$

где  $N$  – число отсчетов (не менее 100).

Тогда фактор пространственной дискретизации КРО, который в дальнейшем должен учитываться при расчетах дальности обнаружения цели, можно определить как:

$$k_d = \frac{\bar{\gamma}}{\gamma(0,0)}. \quad (5)$$

Для определения положения точечных целей пеленгационные системы используют подход, основанный на расчете координат центра тяжести:

$$\hat{x} = \frac{\sum_i \sum_j (i \cdot \gamma_{i,j})}{\sum_i \sum_j \gamma_{i,j}}, \quad \hat{y} = \frac{\sum_i \sum_j (j \cdot \gamma_{i,j})}{\sum_i \sum_j \gamma_{i,j}}. \quad (6)$$

Ясно, что как фактор дискретизации, так и ошибка определения центра тяжести будут зависеть от  $\sigma$ , шага  $\delta$  и размеров  $a$  и  $b$  чувствительных элементов пикселя. Для обобщенного анализа, очевидно, предпочтительно рассматривать зависимости этих параметров от отношения  $(6\sigma/\delta)$  для разных  $a$  и  $b$ , где  $6\sigma$  выбрано, в качестве диаметра КРО, в котором сосредоточено практически 100% его энергии. Разработанная программа позволяет варьировать эти параметры в широких пределах. В качестве примера на рис. 4 представлены результаты численных расчетов для детектора с шагом пикселей 12 мкм и с размерами чувствительных областей  $a = b = 11$  мкм.

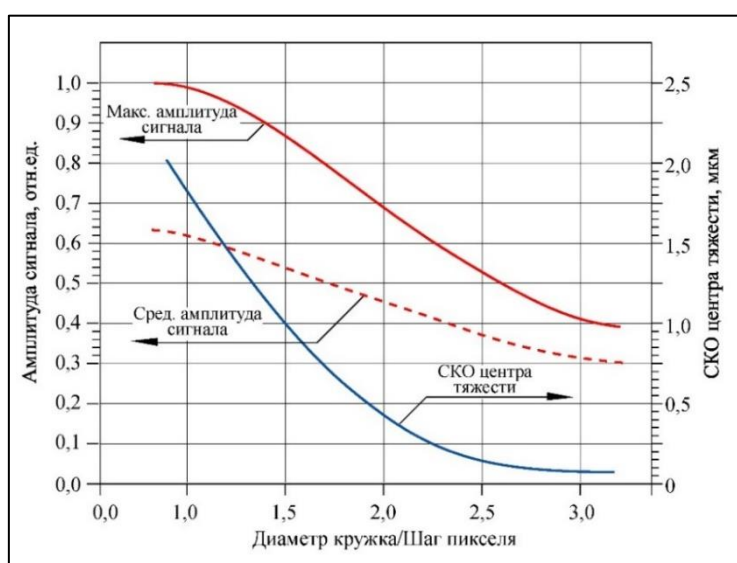
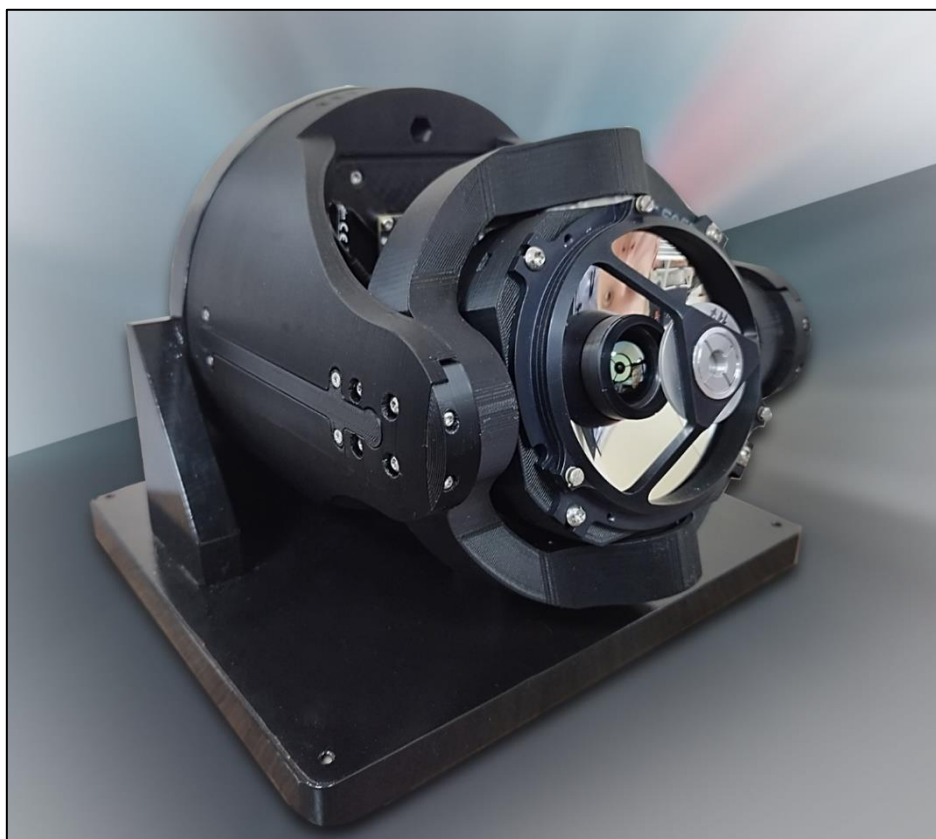


Рис. 4. Зависимости максимальной и средней по площади пикселя амплитуды сигнала и ошибки (СКО) определения координат цели по центру тяжести от отношения  $(6\sigma/\delta)$  для детектора с  $\delta = 12$  мкм и  $a = b = 11$  мкм

Зависимости получены с использованием разработанной программы, для максимальной и средней по выборкам по площади пикселя амплитуды сигнала и ошибки (СКО) определения координат цели по центру тяжести от отношения  $\left(6\sigma/\delta\right)$ . Видно, что, с одной стороны, амплитуда сигнала максимальна при диаметре КРО, сравнимом с шагом пикселей, убывая с возрастанием отношения  $\left(6\sigma/\delta\right)$ . При этом точность определения координат цели по центру тяжести изменяется от 1,76 мкм до 0,04 мкм. Следует также отметить, что фактор дискретизации для приведенного примера с увеличением  $\left(6\sigma/\delta\right)$  от 1,0 до 3,0 изменяется незначительно (от 0,62 до 0,76).

## 5 Экспериментальные исследования характеристик тепловой пеленгации

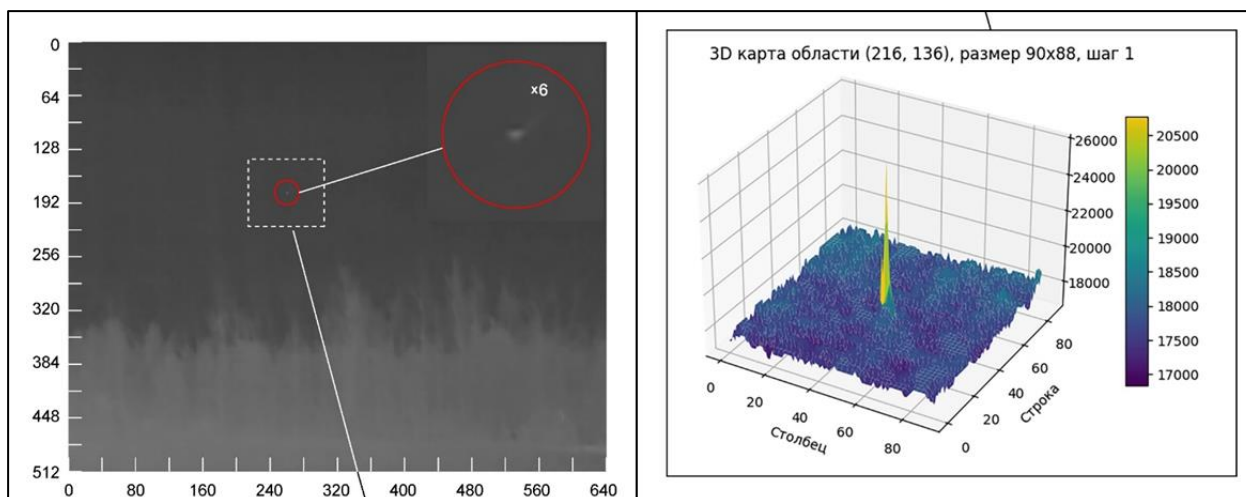
Экспериментальные исследования характеристик тепловой пеленгации проводились с использованием модуля с микроболометрическим матричным детектором формата 640×512 с шагом пикселей 17 мкм, чувствительного в спектральном диапазоне 8÷14 мкм. В комплекте с ИК объективом (F=50 мм, относительное отверстие 1:1), детектор обеспечивал поле зрения 12,4×9,9° (фото на рис. 5). Исследования проводились как лабораторных условиях с использованием тестовых источников ИК излучения, так и в полевой обстановке.



**Рис. 5. Фотография макета оптико-электронного канала тепловой пеленгации с микроболометрическим модулем**

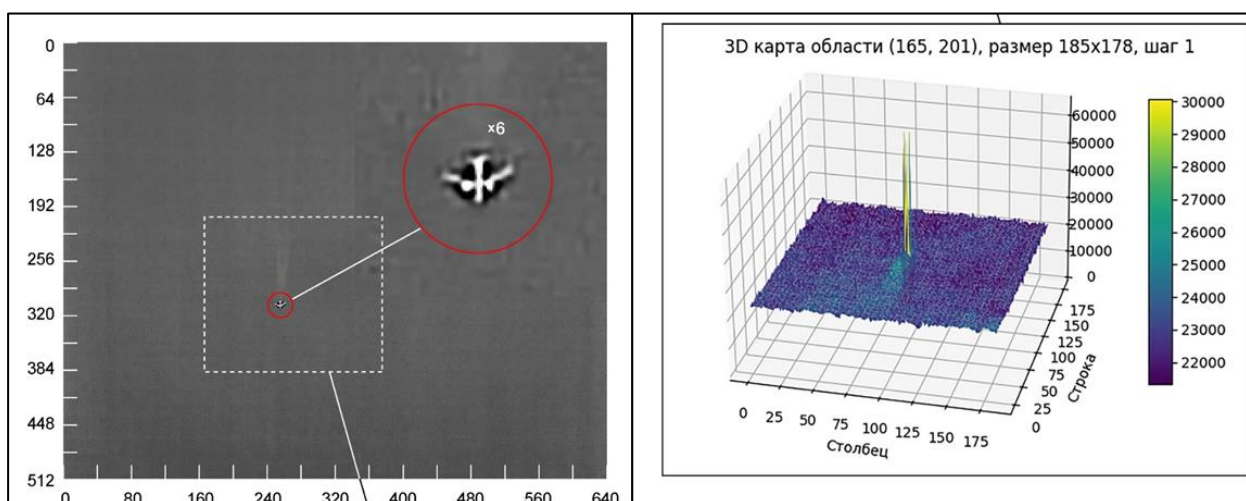
На рис. 6 представлены результаты тепловой пеленгации небольшого БПЛА с электродвигателем 3×5 см<sup>2</sup> ( $T \approx 50^\circ\text{C}$ ). Цель уверенно обнаруживалась на расстоянии 200 м, при этом отношение сигнал/шум составляло более 200.





**Рис. 6. Пример тепловой пеленгации БПЛА с электродвигателем 3×5 см ( $T \approx 50^\circ\text{C}$ ) на расстоянии 200 м**

На рис. 7 приведен пример тепловой пеленгации самолета «Суперджет», находящегося от места наблюдения по линии визирования на расстоянии  $\sim 8$  км. На изображении объекта виден также тепловой след от двигателей.



**Рис. 7. Пример тепловой пеленгации самолета «Суперджет» на расстоянии  $\sim 8$  км (виден тепловой след от двигателей)**

По результатам экспериментальных измерений профиля сигнала от точечного источника ИК излучения можно оценить параметры оптического канала по формированию кружка рассеяния объектива. Так, при сравнении профиля сигнала, представленного на рис. 8, с гауссовым распределением можно заключить, что он соответствует ФРТ с  $\sigma \approx 11$  мкм, то есть радиус кружка рассеяния используемого объектива равен  $r_{\text{кРО}} \approx 22$  мкм.

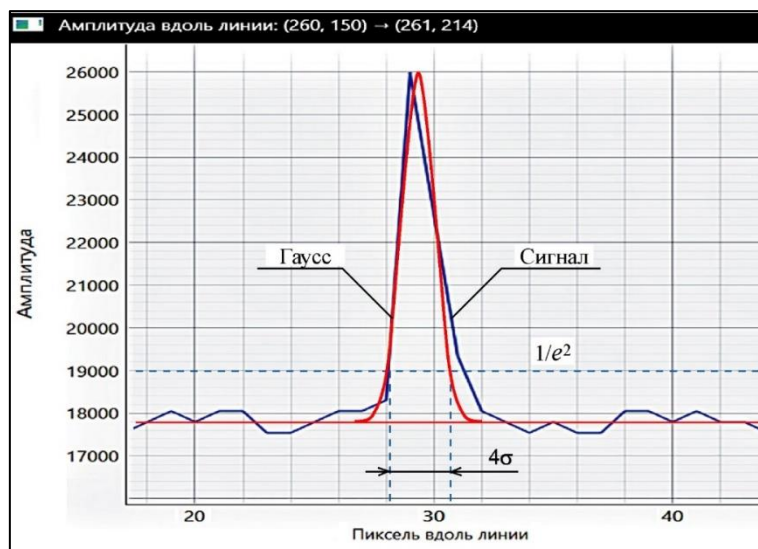


Рис. 8. Профиль выходного сигнала детектора в сравнении с гауссовым распределением

Экспериментально исследована пеленгационная характеристика детектора, обусловленная дискретизацией сигнала при движении КРО относительно фокальной плоскости оптической системы. Эксперимент проводился на стенде, обеспечивающем возможность движения изображения кружка рассеяния объектива относительно поверхности детектора. Скорость движения КРО выбиралась такой, чтобы за время кадра его изображение сдвигалось на расстояние, не более двух шагов пикселей. Поскольку движение КРО не синхронизировалось с частотой считывания сигнала, изменение его амплитуды при прохождении КРО изменялось случайным образом. На экспериментальной характеристике, представленной на рис. 9, можно наблюдать как максимальные выбросы сигнала, соответствующие попаданию КРО в центр пикселей, так и минимальные, которые обусловлены наихудшим расположением КРО относительно их границ. Относительное изменение амплитуды характеризуется невысоким контрастом ( $k=18\%$ ), что обусловлено большим размером КРО по отношению к шагу пикселей ( $6\sigma/\delta = 3,88$ ).

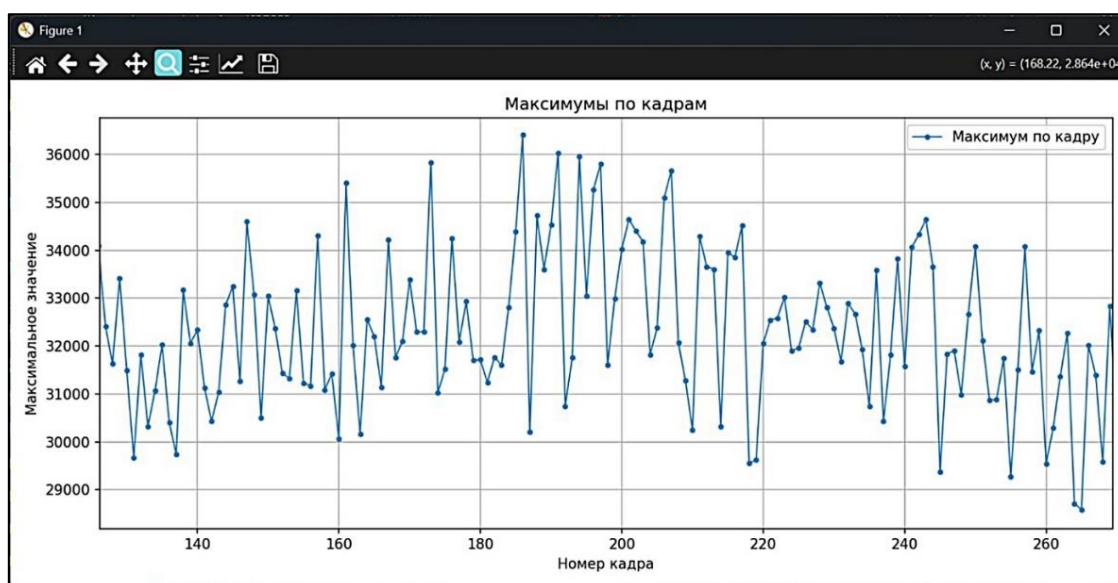


Рис. 9. Пеленгационная характеристика детектора при движении изображения КРО относительно фокальной плоскости под углом  $32^\circ$



## **Выводы**

На основе теоретического анализа, численных расчетов и экспериментальных данных по исследованию характеристик преобразования изображения тепловых объектов матричными микроболометрическими детекторами выявлены возможности их использования в оптико-электронных системах тепловой пеленгации. Рассмотрение проведено с учетом текущего уровня разработок микроболометрических ФПУ. Развитые теоретические модели и программное обеспечение для проведения численных расчетов позволяют получать данные об эффективности преобразования энергии КРО, пеленгационных характеристиках, точности определения координат тепловых объектов, факторе дискретизации изображения КРО, которые необходимы для оценки тактико-технических данных оптико-электронных систем тепловой пеленгации.

Полученные данные указывают на перспективность использования микроболометрических ФПУ в оптико-электронных системах тепловой пеленгации.

## **Литература**

1. Хафизов Р.З., Белоконев В.М., Москвичев В.Ю., Серов В.В., Шилейко Н.А., Шатунов Д.Ю., Сильницкая О.А. Фотоприёмное устройство на основе матричного микроболометрического детектора со спектральным диапазоном чувствительности 2-16 мкм // Российский форум «Микроэлектроника 2023», 9-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. С.653-654.
2. InfiRay Kaiyang T Series Handheld Thermal Imager // Yantai IRay Technology Co., Ltd., 2021.
3. Fraenkel R., Haski J., Mizrahi U., Shkedy L., Shtrichman I., Pinsky E. Cooled and uncooled infrared detectors for missile seekers // SPIE Defense+Security: proceedings of conference. 2014. P. 90700P-90700P-10.
4. Баранов П.С., Манцветов 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.