

УДК 621.384.3, 681, 681.332, 681.3.01

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЁМНЫХ УСТРОЙСТВ
ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА
ДЛЯ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ
МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**А. Н. Галянтч¹, И. С. Гибин², В. В. Золотцев¹,
М. В. Киселев¹, Г. В. Колесников³**

¹ *Филиал ОАО «ПО Уральский оптико-механический завод им. Э. С. Яламова»
«Урал-СибНИИОС»,*

630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 179/2

² *Учреждение Российской академии наук*

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

E-mail: gibin@iae.nsk.su

³ *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»,*

630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

Приведены результаты экспериментальных исследований «смотрящих» матричных фотоприёмных устройств (МФПУ) инфракрасного диапазона, ориентированных на применение в системах обнаружения объектов. Разработан специализированный стенд для определения пороговой чувствительности МФПУ к точечной облучённости, т. е. минимального превышения мощности сигнала над фоном с учётом измерительного тракта и его эксплуатационных характеристик. Проведены оценки величины среднеквадратического шума элемента МФПУ, определяющего порог обнаружения превышения мощности излучения объекта над фоном в плоскости входного зрачка.

Ключевые слова: абсолютно чёрное тело, матричное фотоприёмное устройство, экспериментальный стенд, тест-объект, контраст, система обнаружения.

Введение. Современные технологии производства матричных фотоприёмных устройств (МФПУ) «смотрящего» типа инфракрасного диапазона позволяют создавать несканирующие системы различного назначения [1–6].

Паспортные параметры и характеристики выпускаемых МФПУ на основе соединений кадмий—ртуть—теллур (КРТ) соответствуют требованиям, предъявляемым к компонентам систем обнаружения. Для таких систем основной характеристикой, определяющей возможность применения МФПУ, является пороговая облучённость от объекта, детектируемая измерительным трактом, состоящим из МФПУ и устройств электронной обработки сигнала.

Эффективность обнаружения зависит от совокупности факторов: методик предварительной и постобработки сигнала, отношения сигнал/шум, неоднородности чувствительности, размеров изображения и элемента, шага элементов, взаимного влияния элементов, времени экспозиции и т. д. [1]. Самый сложный случай для обнаружения — это отклик системы на изображение объекта субпиксельного размера. Очевидно, что создание устройств для выполнения таких задач предъявляет дополнительные требования не только к МФПУ, но и к постобработке сигнала: алгоритмам, методикам, технической реализации [7–9].

Постановка задачи. Основными задачами предлагаемой работы являются анализ комплекса параметров МФПУ для систем обнаружения, синтез и экспериментальные исследования устройств, обеспечивающих оценку таких параметров МФПУ, как минимальное превышение сигнала от объекта над фоном (на основе методик постобработки сигнала), отношение сигнал/шум с учётом неоднородности чувствительности.

Эксперимент. Для определения минимального превышения сигнала объекта над фоном был разработан стенд, вид и структурная схема которого представлены на рис. 1, *a*, *b* соответственно. Модель АЧТ 1 с температурой $T_{\text{АЧТ}}$ освещает тест-объект (ТО) в виде точечной диафрагмы 2. Оптические элементы 3, 4 переносят изображение точечной диафрагмы в светочувствительную плоскость МФПУ 5 (MARS MW ("Sofradir", Франция)). Холодная диафрагма приёмника 5.2 является апертурной в системе и предназначена для снижения фоновых засветок от конструктивных элементов стенда.

Применение точечной диафрагмы, изображение которой переносится в плоскость МФПУ, обусловлено назначением разрабатываемого комплекса: для оценки пороговых характеристик точечных объектов и их превышения над фоновой составляющей.

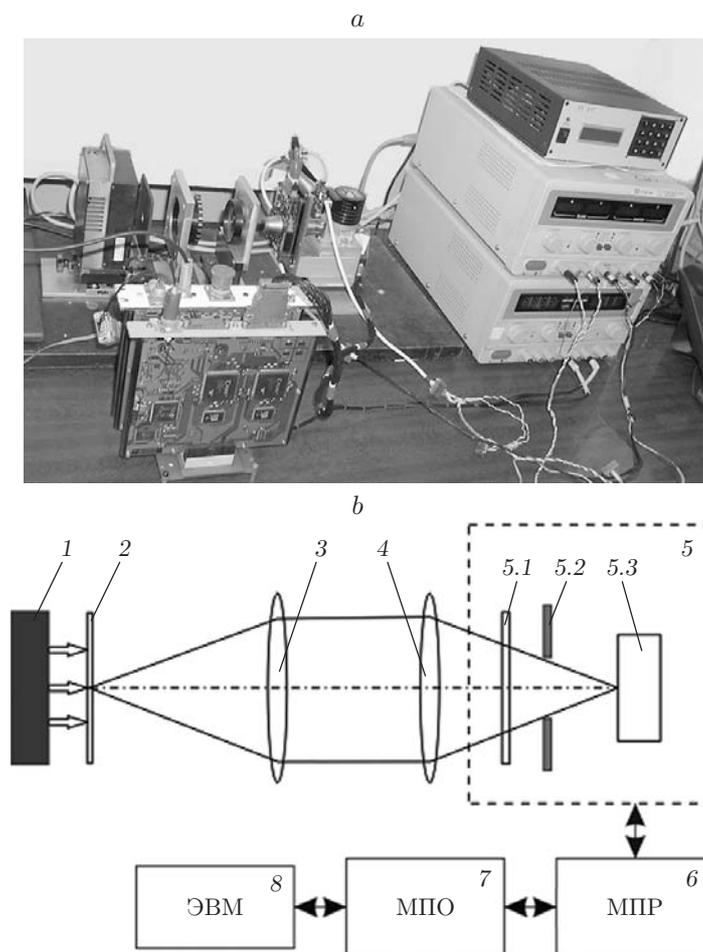


Рис. 1. Стенд исследования МФПУ: *a* — общий вид стенда; *b* — схема измерительного стенда (1 — абсолютно чёрное тело (АЧТ), 2 — точечный ТО, 3, 4 — тестовые объективы, 5 — МФПУ (5.1 — входное окно МФПУ, 5.2 — холодная диафрагма, 5.3 — плоскость светочувствительных элементов), 6 — модуль преобразования (МПР), 7 — модуль предварительной обработки (МПО), 8 — ЭВМ)

Специфика работы охлаждаемых инфракрасных МФПУ на основе КРТ состоит в дополнительной обработке сигналов МФПУ по выравниванию чувствительности, замене дефектных элементов и т. д. Она реализована в модулях МПО и МПР. В МПР происходит снятие сигнала с МФПУ, усиление, аналогово-цифровое преобразование и передача в МПО. В МПО производится управление МФПУ, накопление «горячего» и «холодного» полей для реализации двухточечной коррекции геометрического шума, буферизация сигнала, корректировка яркости и контраста [8] и формирование выходных данных.

Характеристики компонентов стенда приведены в табл. 1.

Оценим расчётное отношение сигнал/фон. АЧТ излучает мощность в полусферу, которая с учётом углового поля зрения оптической системы (ОС) стенда, а также ламбертовского распределения мощности излучения будет определяться как

$$S(T_{\text{АЧТ}}) = \varepsilon_{\text{АЧТ}} \kappa_{\text{ОС}} \frac{\Delta\Omega}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{\text{ТО}}} W(T_{\text{АЧТ}}) \rho \cos\left(\arctg\left(\frac{\rho}{a_{\text{kol}}}\right)\right) \rho d\rho d\varphi, \quad (1)$$

где $W(T)$ — поток излучения от АЧТ ($\text{Вт}/\text{см}^2$); $S(T)$ — общая мощность от диафрагмы ТО (Вт); $\varepsilon_{\text{АЧТ}}$ — коэффициент серости АЧТ, равный 0,95; $\kappa_{\text{ОС}}$ — интегральный коэффициент пропускания ОС, учитывающий прохождение линз, защитного стекла МФПУ и холодной диафрагмы, $\kappa_{\text{ОС}} = 0,66$; $\Delta\Omega$ — угловой размер входного зрачка со стороны ТО (срад); a_{kol} — расстояние тест-объект—объектив (см); ρ, φ — полярные координаты в плоскости ТО (см, рад).

Поверхностный поток мощности в плоскости МФПУ, соответствующий (1), будет задаваться параметрами оптической системы (см. табл. 1). Поскольку пятно рассеяния ОС меньше тестовой диафрагмы, а оптическое увеличение близко к единице, изображение диафрагмы может быть рассчитано в приближении геометрической оптики.

Таблица 1

| Позиция | Элемент | Характеристика | Значение |
|---------|----------|--------------------------------|-----------------------|
| 1 | АЧТ | коэффициент серости | 0,95 |
| | | диапазон температур | 20–90 °С |
| | | точность установки температуры | 0,1 °С |
| | | размер излучающей площадки | 50 × 50 мм |
| 2 | ТО | площадь | 3300 мкм ² |
| | | материал (фольга оксидная) | — |
| | | форма (круг) | — |
| | | коэффициент серости фона | 0,95 |
| 3, 4 | Объектив | световой диаметр | 50 мм |
| | | фокусное расстояние | 78 мм |
| | | диаметр пятна рассеяния | 42 мкм |
| | | материал (германий) | — |
| | | пропускание (3,7–4,8 мкм) | 0,86 |
| 5 | МФПУ | формат | 320 × 256 элементов |
| | | размер элемента | 30 × 30 мкм |
| | | материал (КРТ) | — |
| | | тип (охлаждаемый) | — |

Поток мощности от диафрагмы в плоскости входного зрачка системы имеет вид

$$S_{bySM}(T_{AЧТ}) = \frac{S(T_{AЧТ})}{\beta^2 \pi (R_{ТО})^2}, \quad (2)$$

где β — увеличение ОС.

Холодная диафрагма фотоприёмника «отсекает» излучение тёплых оправ линз и других элементов стенда, поэтому сигнал фона определяется излучением непрозрачной части ТО вокруг отверстия диафрагмы. Площадь излучающей поверхности находится с помощью поля зрения системы.

Суммарную мощность, генерируемую фоном, можно записать аналогично (1):

$$B(T) = \varepsilon_{ТО} \kappa_{ОС} \frac{\Delta\Omega}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{ТО}} W(T) \rho \cos\left(\arctg\left(\frac{\rho}{a_{kol}}\right)\right) d\rho d\varphi. \quad (3)$$

Поверхностный поток мощности фона, соответствующий (3), определяется выражением

$$B_{bySM}(T_{ТО}) = \frac{B(T_{ТО})}{\beta^2 S_{ТО}}, \quad (4)$$

где $S_{ТО}$ — площадь линейного поля зрения системы (см^2).

Подставляя численные значения параметров (см. табл. 1) в (4) и (2), получаем отношение сигнал/фон:

$$K_i = \frac{S_{bySM}(T_{AЧТ(i)})}{B_{bySM}(T_{ТО})}. \quad (5)$$

Теоретическая зависимость (5) и результаты экспериментальных исследований при значениях $T_{ТО} = 303,18$ К и $T_{AЧТ} = 300,18$ – $307,18$ К представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что экспериментальные значения контраста ниже теоретических, однако сходимость результатов достаточно высокая. Изменение наклона в правой части графика вызвано отклонением температуры ТО под влиянием АЧТ, что приводит к дополнительному снижению контраста.

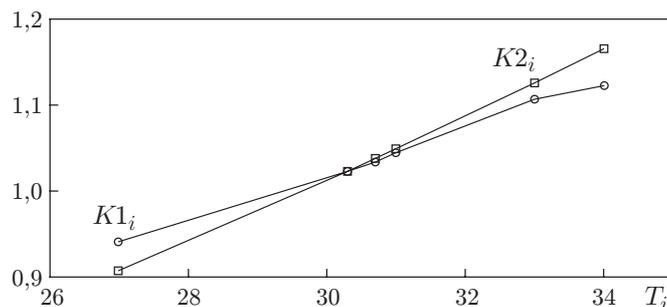


Рис. 2. Зависимости отношения сигнал/фон от температуры объекта (квадратный маркер — теоретическое отношение, круглый — экспериментально измеренное)

Оценим пороговую облучённость на стенде. Мощность точечного источника как функция температуры АЧТ в плоскости входного зрачка системы описывается уравнением

$$S_P(T_{\text{АЧТ}}) = \frac{S(T_{\text{АЧТ}})}{\pi R_{\text{об}}^2}, \quad (6)$$

где $R_{\text{об}}$ — радиус входного зрачка системы (см).

Мощность излучающего участка фона в плоскости входного зрачка ОС определяется в виде

$$B_P(T_{\text{ТО}}) = \frac{S(T_{\text{ТО}})}{\pi R_{\text{об}}^2}. \quad (7)$$

Превышение мощности точечного источника с температурой $T_{\text{АЧТ}}$ над мощностью источника с температурой $T_{\text{фон}}$ определяется как

$$\Delta P(T_{\text{АЧТ}}, T_{\text{фон}}) = S_P(T_{\text{АЧТ}}) - B_P(T_{\text{фон}}). \quad (8)$$

Подставляя численные значения параметров в (6), (7), получаем расчётную зависимость превышения мощности излучения объекта над фоном.

При проведении экспериментальных исследований условия измерения были заданы близкими к расчётным: $T_{\text{ТО}} = 28,5\text{--}28,7$ °С, $T_{\text{АЧТ}} = 25\text{--}32$ °С. Результаты расчётов и экспериментальных исследований представлены в табл. 2 и на рис. 3, 4.

Измеренное СКО шума приёмника составило величину $\sim 2,6\text{--}2,7$ дискрет АЦП.

Таблица 2

| Температура фона, °С | Температура объекта, °С | Сигнальный контраст объект/фон, дискрет АЦП | Расчётное превышение мощности, Вт/см ² |
|----------------------|-------------------------|---|---|
| 28,5 | 25,0 | −44 | $-8,208 \cdot 10^{-12}$ |
| | 25,5 | −46 | $-7,08799 \cdot 10^{-12}$ |
| | 26,0 | −35 | $-5,95079 \cdot 10^{-12}$ |
| | 26,5 | −30 | $-4,79621 \cdot 10^{-12}$ |
| | 27,0 | −22 | $-3,62404 \cdot 10^{-12}$ |
| | 27,5 | −16 | $-2,43409 \cdot 10^{-12}$ |
| | 28,0 | −9 | $-1,22614 \cdot 10^{-12}$ |
| | 28,5 | −3 | 0 |
| | 29,0 | 4 | $1,24455 \cdot 10^{-12}$ |
| | 29,5 | 12 | $2,50772 \cdot 10^{-12}$ |
| | 30,0 | 18 | $3,78971 \cdot 10^{-12}$ |
| | 30,5 | 27 | $5,09074 \cdot 10^{-12}$ |
| | 31,0 | 32 | $6,41103 \cdot 10^{-12}$ |
| | 31,5 | 37 | $7,75078 \cdot 10^{-12}$ |
| 32,0 | 45 | $9,11021 \cdot 10^{-12}$ | |

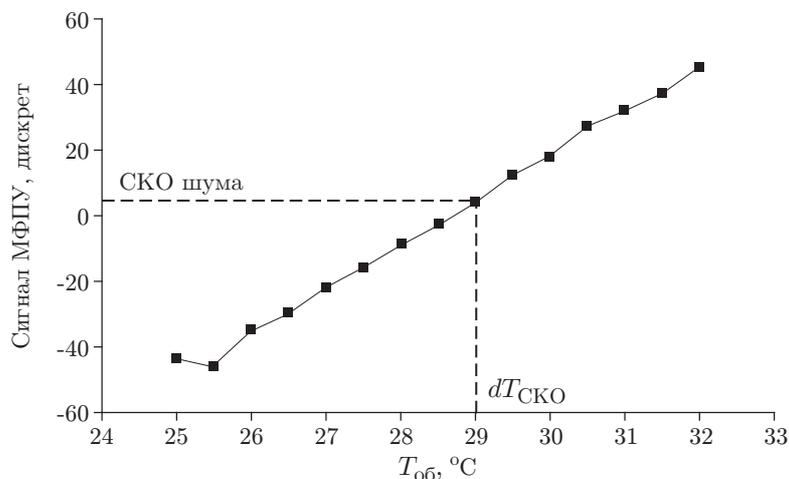


Рис. 3. Зависимость измеренного сигнала МФПУ от температуры объекта ($T_{фон} = 28,6 ^\circ\text{C}$, $dT_{СКО} = 0,25 ^\circ\text{C}$)

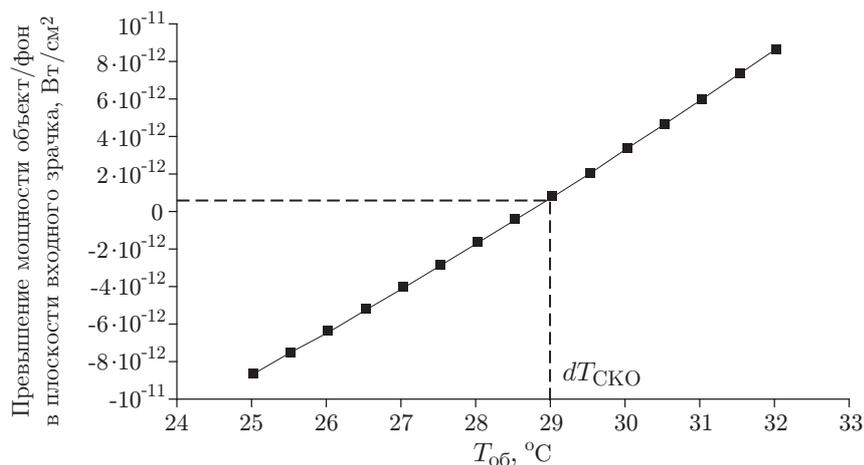


Рис. 4. Расчётное превышение мощности в плоскости входного зрачка, как функции температуры объекта

По графику экспериментально измеренной зависимости превышения сигнала объект/фон на линейной его части (см. рис. 3) находим разность температур объекта и фона, соответствующую СКО шума. Данная разность совпадает с расчётной (с превышением мощности сигнала объекта над сигналом фона), определяемой из (8) или рис. 4.

Заключение. Разработанный стенд позволяет достаточно точно определять эксплуатационные характеристики тракта МФПУ и модуля электронной обработки. Полученные данные экспериментальных исследований матричных фотоприёмных устройств «смотрящего» типа инфракрасного диапазона на основе КРТ подтверждают правильность выбранных методов и средств обработки сигналов для устройств обнаружения. Достоверность результатов подтверждена теоретическими расчётами. Для исследованного образца величина среднеквадратического шума элемента МФПУ, определяющего порог обнаружения, соответствует превышению мощности объекта над фоном $0,5 \cdot 10^{-12}$ Вт/см² в плоскости входного зрачка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Осипов В. В., Пономаренко В. П., Селяков Ю. А.** Предельные характеристики новых ИК-матриц на основе HgCdTe // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 15–35.
2. **Дмитриев Е.** Разработка элементной базы фотоприемных устройств отображения информации // Электроника. 2005. Вып. 2. С. 74–79.
3. **Sensor fusion** // Proc. SPIE. 1988. **931**. P. 180–185.
4. **Волков В. Г., Ковалев А. В., Федчишин В. Г.** Тепловизионные приборы нового поколения // Специальная техника. 2001. № 6. С. 16–21.
5. **Липин М. В., Громов А. В.** Результаты разработки ряда модульных микрокриогенных систем «Сплит-Стирлинг» для криостатированных ФПУ 1 и 2 поколений // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 110–119.
6. **Ли И. И., Базовкин В. М., Валишева Н. А. и др.** Многоэлементные гибридные ИК ФПУ на основе приборов с зарядовой инжекцией. Ч. II. Тепловизионные системы с элементами на InAs // Автометрия. 2007. **43**, № 4. С. 36–49.
7. **Борисова И. В., Горенок В. Н., Ерошкин Р. Э. и др.** Обнаружение малоразмерных целей на основе статистического анализа контраста изображения // Тр. VII Всерос. науч.-техн. конф. «Наука. Промышленность. Оборона». Новосибирск: НГТУ, 2006. С. 96–100.
8. **Галянтич А. Н., Ермошин К. М., Золотцев В. В. и др.** Устройства обработки сигналов с МФПУ ИК-диапазона и формирования тепловизионных изображений // Там же. С. 109–112.
9. **Киричук В. С., Куликов В. А.** Быстрый алгоритм выделения граничных точек на изображениях // Автометрия. 2011. **47**, № 3. С. 19–24.

Поступила в редакцию 21 июня 2011 г.
