

**С. М. Борзов<sup>1</sup>, Б. Н. Дrajнников<sup>2</sup>, В. И. Козик<sup>1</sup>  
О. И. Потатуркин<sup>1,3</sup>, В. В. Синельщиков<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Институт автоматизации и электрометрии СО РАН  
пр. Академика Коптюга, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

<sup>2</sup> *АО «НПО «Орион»  
ул. Косинская, 9, Москва, 111538, Россия*

<sup>3</sup> *Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

<sup>4</sup> *ОАО «Корпорация «Комета»  
ул. Велозаводская, 5, Москва, 115280, Россия*

## **ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЛИНЕЙНОЙ КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ КРУПНОФОРМАТНЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ \***

Работа посвящена исследованию основных параметров крупноформатных многомодульных сканирующих ИК фотоприемных устройств (ФПУ) субматричной структуры, а также методов коррекции искажений, обусловленных пространственной неоднородностью чувствительных элементов и нелинейностью их светосигнальных зависимостей. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение, позволяющее путем обработки последовательностей изображений тестовых полей, полученных в результате стендовых измерений, определять поэлементные светосигнальные зависимости, импульсную и пеленгационную характеристику, чувствительность и пороговую чувствительность по точному объекту и т.п. Представлены результаты оценивания указанных характеристик для модулей исследуемого ФПУ. Определены достоверность линейной аппроксимации светосигнальных зависимостей и среднееквадратическое отклонение сигналов до и после линейных и нелинейных методов коррекции неоднородности элементов.

*Ключевые слова:* стендовые измерения, оценка характеристик, нелинейная коррекция, крупноформатные ИК фотоприемники.

### **Введение**

При разработке перспективных крупноформатных фотоприемных устройств (ФПУ) инфракрасного (ИК) диапазона спектра [1] целесообразно оперативно исследовать их основные характеристики и функциональные возможности, а также оценивать эффективность линейных и нелинейных процедур коррекции регистрируемых изображений, направленных на устранение имеющихся аппаратных искажений.

---

\* Авторы благодарят сотрудников ОАО «НИИ ОЭП» В. Н. Васильева и И. Ю. Дмитриева и сотрудников ИАиЭ СО РАН В. П. Косых и Г. И. Громилина за содействие в проведении исследований, полезные замечания и рекомендации.

*Борзов С. М., Дrajнников Б. Н., Козик В. И., Потатуркин О. И., Синельщиков В. В.* Оценка характеристик и исследование эффективности нелинейной коррекции данных крупноформатных тепловизионных фотоприемников // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2016. Т. 14, № 4. С. 14–21.

Исследуемое в данной работе устройство является многомодульным сканирующим ИК фотоприемником субматричной структуры с функцией временной задержки и накопления (ВЗН) сигнала, формирующим изображение более  $10^7$  пикселей с фильтрацией верхних частот [2]. Каждый модуль содержит 4 субматрицы, размерностью  $10 \times 256$  пикселей. Они ориентированы широкой стороной поперек направления сканирования и располагаются одна за другой. Накопление сигнала, исходящего от каждой точки сцены, осуществляется в процессе сканирования совместно десятью пикселями субматрицы, а относительное смещение субматриц модуля на долю размера пикселя позволяет осуществлять измерения с перекрытием чувствительных элементов. Все это обеспечивает определенные преимущества подобных систем относительно матричных ФПУ «смотрящего» типа.

Такие устройства предназначены, как правило, для использования в системах мониторинга поверхности Земли и околоземного пространства для наблюдения малоразмерных низкоконтрастных объектов на интенсивном фоне. Поэтому помимо стандартных фотоэлектрических параметров, таких как светосигнальная характеристика, чувствительность, уровень шума [3], необходимо определять параметры, связанные с отображением точечных источников: импульсная и пеленгационная характеристики, чувствительность и пороговая чувствительность по точечному объекту и т. п. [4]. Именно эти ключевые параметры в первую очередь определяют эффективность функционирования измерительных систем, созданных на базе крупноформатных ФПУ.

Серьезную проблему для получения качественных изображений с тепловизионных систем наблюдения создает существенная неоднородность элементов ФПУ. Для восстановления формы входного изображения традиционно применяются специальные процедуры коррекции [5, 6], основанные на выборе постоянного смещения и коэффициента усиления сигнала отдельно для каждого пикселя фотоприемника. Эти процедуры используют выходной сигнал от опорных источников для вычисления необходимых коэффициентов [6]. Элементарный подход заключается в использовании двух опорных источников с линейной интерполяцией выходного сигнала. Он называется алгоритмом двухточечной коррекции [5]. В сложных случаях используются три и более опорных источников с различной температурой с аппроксимацией выходного сигнала полиномом второй или третьей степени. Однако поскольку данная процедура является более трудоемкой, необходимость ее применения для каждого конкретного ФПУ должна быть обоснована результатами экспериментальных исследований.

Целью данной работы является оценивание основных характеристик крупноформатного ФПУ на базе стыкуемых многорядных матричных модулей путем обработки последовательностей изображений тестовых полей, полученных в результате стендовых измерений, а также исследование на этой основе эффективности нелинейной коррекции амплитудных искажений сигнала.

### **Оценка основных характеристик**

Для исследования характеристик ФПУ разработано специализированное программно-алгоритмическое обеспечение, ориентированное на обработку стендовых экспериментальных данных, полученных с таких приборов [7]. Функционально оно состоит из блоков приема данных, обработки изображений, оценки характеристик ФПУ, документирования и отображения.

Блок приема данных обеспечивает формирование 14 разрядных данных в виде изображений размерностью  $1024 \times 6000$  пикселей. Блок предварительной обработки реализует процедуры коррекции амплитудных искажений [8] (с использованием полиномов до 3 степени включительно) и дефектных фоточувствительных элементов.

Блок первичной обработки осуществляет внутрикадровую обработку (свертка с фильтром, согласованным с формой сигнала), подавление нестационарного пространственно неоднородного фона за счет межкадровой обработки, оценивание текущих статистических характеристик сигнала, а также выделение точечных динамических объектов.

Блок оценки характеристик обеспечивает отображение исходных и результирующих изображений (с возможностью масштабирования и выбора зоны отображения), определение их статистических параметров, оперативный расчет корректирующих коэффициентов ампли-

тудных искажений, а также оценивание поканальных светосигнальных характеристик, импульсной характеристики, пеленгационной характеристики, поканальная чувствительность, уровень шума каналов, поканальная пороговая чувствительность и т. п.

Оценка указанных характеристик ФПУ выполняется по изображениям тестовых полей, зарегистрированным на специализированном стенде. Стенд содержит осветитель, проекционную систему, узел крепления и подвижки диафрагм и обеспечивает установку нейтральных светофильтров в оптический тракт.

Поканальные светосигнальные характеристики описывают зависимость сигнала в каждом канале модуля ФПУ от уровня освещенности. Они оценивались в данных исследованиях по изображениям щелевой диафрагмы, полученным при различной комбинации нейтральных светофильтров. Диафрагма располагалась поперек направления сканирования, таким образом, чтобы обеспечить одновременное облучение всех каналов модуля ФПУ. Далее для каждого уровня освещенности рассчитывалась разность фонового и максимального сигнала для каждого канала и формировалась ее зависимость от освещенности. При этом измерения сигналов проводились сериями из десяти наблюдений и определялись средние значения результатов измерений. Полученная усредненная по каналам светосигнальная характеристика приведена на рис. 1. Достоверность линейной, квадратичной (сплошная линия) и кубической (штриховая) аппроксимации результатов измерений составила  $R_1^2 = 0.9024$ ,  $R_2^2 = 0.9991$  и  $R_3^2 = 0.9998$ , соответственно.

Здесь и далее коэффициент достоверности аппроксимации, характеризующий степень соответствия аппроксимирующего полинома исходным данным, определяется как:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2},$$

где  $y_i$  – фактические значения,  $\hat{y}_i$  – значения аппроксимирующей функции, а  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i$ .

Импульсная характеристика определяет форму отклика элемента ФПУ на воздействие кратковременной засветки. Для ее оценки использовалось изображение точечной диафрагмы. При сканировании такого изображения исследуемым приемником излучения для одного из каналов воздействие эквивалентно импульсной засветке. Измерения проводились для десяти положений диафрагмы, соответствующих не дефектным каналам модуля, с усреднением полученных данных. Результаты оценивания импульсной характеристики представлены на рис. 2, откуда видно, что по переднему фронту импульса засветки происходит резкий подъем сигнала, по заднему – резкий спад в область

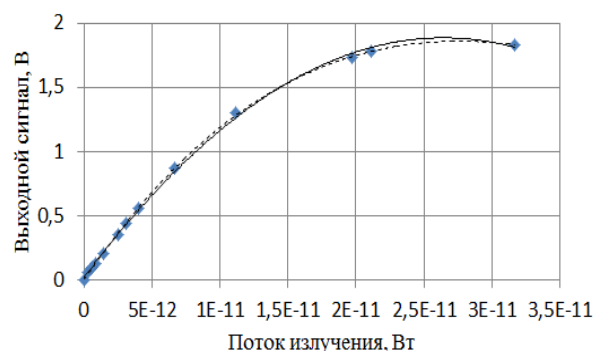


Рис. 1. Средняя по каналам светосигнальная характеристика

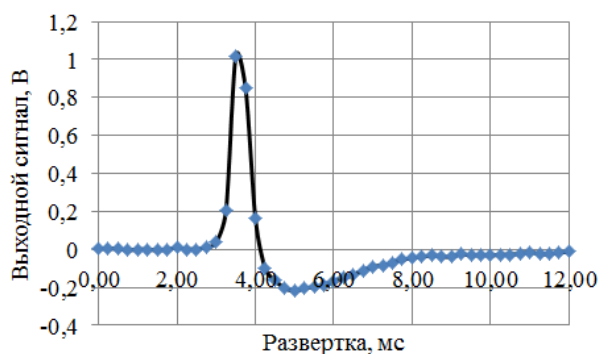


Рис. 2. Импульсная характеристика

отрицательных значений, а затем относительно медленная релаксация. Время нарастания сигнала составило 0.31 мс, спада – 0.43 мс, релаксации – 2.72 мс.

Пеленгационная характеристика определяется в первую очередь скважностью элементов ФПУ и описывает зависимость уровня сигнала от местоположения точечного объекта. В данных исследованиях она оценивалась по изображениям, полученным при линейном перемещении светового пятна (объекта) в плоскости ФПУ, двумя способами: либо по сигналу

тестируемого канала, либо по максимуму сигнала каналов в некоторой окрестности [9]. Полученные зависимости представлены на рис. 3.

Видно, что форма сигналов различных каналов подобна, значения максимумов близки. Во втором случае глубина модуляции может быть оценена согласно

$$Km = (G_{\max} - G_{\min}) / G_{\max}.$$

Для данной последовательности  $G_{\max}=0.431\text{В}$ ,  $G_{\min}=0,347\text{В}$ ,  $Km=0.194$ .

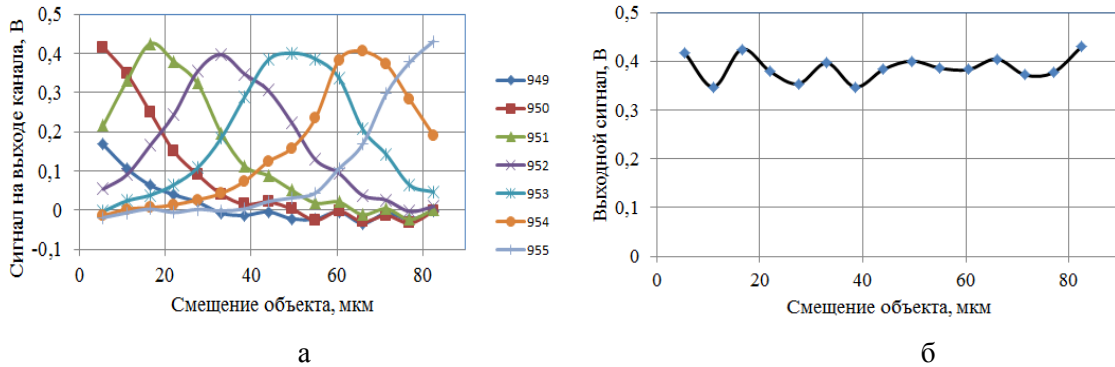


Рис. 3. Зависимость сигналов от положения точечного объекта:

*а* – сигналы на выходе отдельных рядом расположенных каналов; *б* – максимальный по каналам сигнал

Пороговая чувствительность при работе по точечному объекту определяет минимальный уровень облученности элемента ФПУ от точечного источника, который может быть зарегистрирован. При ее вычислении используются изображения фона  $G_b(i, j)$ , точечного источника  $G_o(l, i, j)$  и щелевой диафрагмы  $G_s(l, i, j)$ . Здесь  $l \in [1, L]$  – номер кадра,  $L$  – количество кадров в последовательности,  $i \in [1, I]$  – номер ВЗН канала (столбца в изображении),  $I$  – полное количество ВЗН каналов фотомодуля,  $j \in [1, J]$  – номер отсчета сигнала в канале (строки в изображении),  $J$  – количество строк.

По изображению фона вычисляются среднее значение сигнала в канале  $i$

$$\bar{G}_b(i) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J G_b(i, j)$$

и среднеквадратичное значение шума в канале  $i$

$$\tilde{G}_b(i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J (G_b(i, j) - \bar{G}_b(i, j))^2}{J - 1}}.$$

По изображениям точечного источника вычисляются глобальные максимумы сигнала

$$G_{o\max}(l, i_0, j_0) = \max_{i, j} G_o(l, i, j),$$

по изображениям щелевой диафрагмы – поканальные глобальные максимумы сигнала во всех засвеченных каналах

$$G_{s\max}(l, i_0, j_s) = \max_j G_s(l, i, j)$$

и определяется коэффициент пересчета чувствительности при работе по изображениям щелевой диафрагмы к чувствительности при работе по изображениям точечного источника

$$\bar{R} = \frac{\bar{G}_{o\max}(i_0)}{\bar{G}_{s\max}(i_0)}.$$

Далее определяется среднее значение полезного сигнала по изображениям точечного источника

$$\bar{G}_{o\max}(i_0, j_0) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L G_{o\max}(l, i_0, j) - \bar{G}_b(j_0),$$

и поканальные средние значения полезного сигнала по изображениям щелевой диафрагмы

$$\bar{G}_{s\max}(i) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L G_{s\max}(i, j_s) - \bar{G}_b(j_s).$$

На этой основе рассчитывается чувствительность канала  $i$  при работе по точечному объекту

$$S(i) = \frac{\bar{G}_{s\max}(i)}{E} \bar{R}$$

и пороговая чувствительность канала  $i$  при работе по точечному объекту

$$E_{eff}(i) = \frac{\tilde{G}_b(i)}{S(i)}.$$

Здесь  $E$  – энергетическая облученность светочувствительного элемента, обусловленная точечным источником.

Экспериментально установлено, что для тестируемого ФПУ:

- средняя чувствительность каналов –  $1.37 \cdot 10^{11}$  В/Вт;
- усредненное значение шума каналов – 3.7 мВ;
- средняя пороговая чувствительность –  $2.7 \cdot 10^{-14}$  Вт.

#### Исследование эффективности нелинейных методов коррекции амплитудных искажений данных ФПУ

При исследовании эффективности методов коррекции амплитудных искажений первоначально по усредненной по каналам светосигнальной характеристике (рис.1) определялся диапазон, внутри которого сигнал ФПУ увеличивался с ростом освещенности. Затем в данном диапазоне выполнялась МНК-аппроксимация поканальных обратных светосигнальных характеристик с использованием линейных, квадратичных и кубических полиномов. Далее с применением полученных коэффициентов осуществлялась коррекция изображений щелевой диафрагмы и по откорректированным данным вновь оценивалась светосигнальная характеристика и остаточная неоднородность ФПУ.

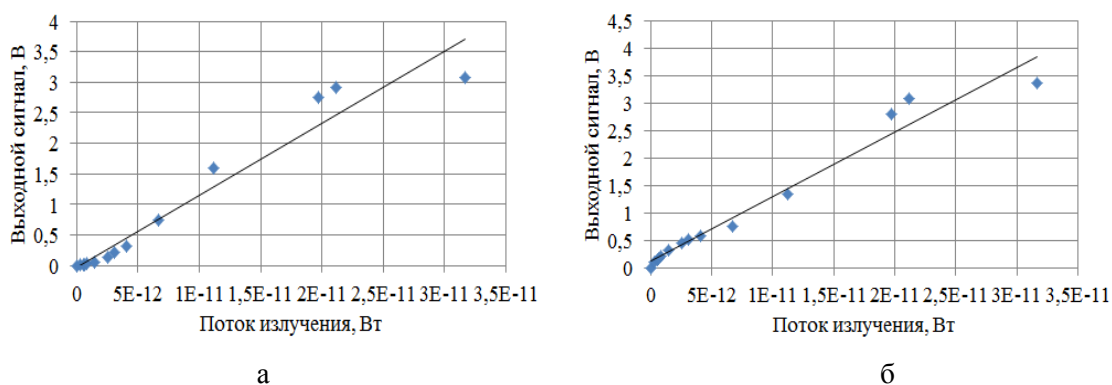


Рис. 4. Светосигнальные характеристики после коррекции: а – квадратичной; б – кубической

Усредненные по каналам светосигнальные характеристики после коррекции амплитудных искажений с использованием квадратичного и кубического преобразований приведены на рис. 4. Достоверность линейной аппроксимации в первом случае составила  $R_1^2 = 0.9612$ , а во втором –  $R_1^2 = 0.9775$ . На рис. 5 приведены светосигнальные характеристики ряда от-

дельных каналов до и после кубической предварительной обработки. Видно, что выполнение коррекции амплитудных искажений позволило повысить степень линейности и уменьшить разброс светосигнальных характеристик.

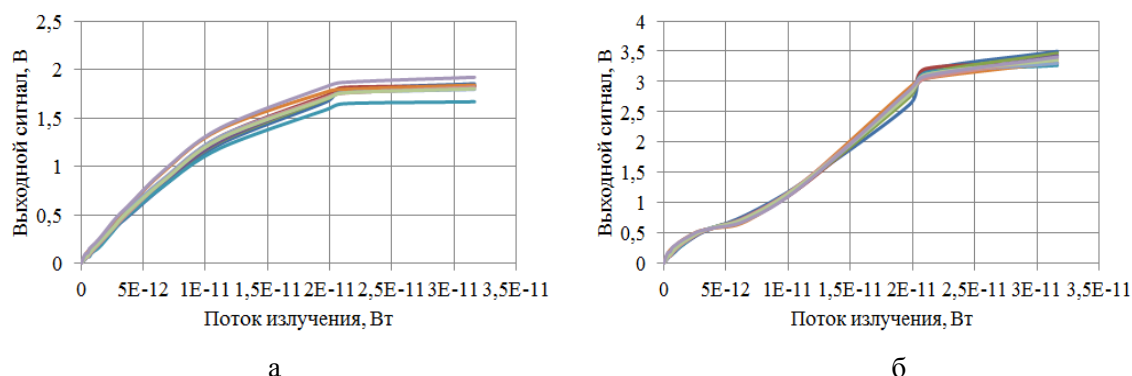


Рис. 5. Примеры светосигнальных характеристик: *а* – до коррекции; *б* – после кубической коррекции

Отметим, что для слабых сигналов возможно применение двухточечной коррекции, поскольку с уменьшением энергетического диапазона достоверность линейной аппроксимации светосигнальной характеристики возрастает. Так, в диапазоне до  $2.1 \cdot 10^{-11}$  Вт она составила  $R_1^2 = 0.9623$ , а до  $1.1 \cdot 10^{-11}$  Вт –  $R_1^2 = 0.9934$ .

При определении остаточной неоднородности корректированных изображений, также как и при определении светосигнальных характеристик, использовались изображения щелевой диафрагмы. Неоднородность оценивалась как

$$Q = \bar{G} / \bar{\sigma}.$$

Здесь

$$\bar{G} = \frac{1}{N} \sum_{\Omega} G(i, j),$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{\Omega_i} \sigma(j),$$

где  $G(i, j)$  – изображение щелевой диафрагмы,  $\sigma(j)$  – СКО по строке  $j$  изображения,  $\Omega$  – множество элементов, составляющих засвеченную область на изображении,  $\Omega_i$  – множество засвеченных элементов изображения по столбцу  $i$ ,  $N$  – количество засвеченных элементов на изображении,  $n$  – количество засвеченных элементов в столбце изображения.

При вычислении коэффициентов (и оценке остаточной неоднородности) по участку с квазилинейной светосигнальной характеристикой (до  $\sim 7 \times 10^{-12}$  Вт) результаты линейного, квадратичного и кубического методов оказались довольно близки, среднее значение  $Q$  увеличилось примерно в 1,5 раза. Когда вычисление коэффициентов выполнялось по полной светосигнальной характеристике (до  $\sim 3 \times 10^{-11}$  Вт), при линейной и квадратичной коррекциях произошло снижение средней величины  $Q$  примерно в 1,3 раза в том же диапазоне энергий, что и в предыдущем случае, а при кубической – увеличение в 1,6 раз. Квадратичная коррекция перестает давать ухудшение при работе на участке до  $\sim 2 \times 10^{-11}$  Вт.

## Заключение

Апробированы разработанные методики и программно-алгоритмические средства для определения основных характеристик и нелинейной коррекции данных, полученных с крупноформатного ИК ФПУ. Экспериментально оценены основные параметры стыкуемых мно-

горядных матричных ВЗН модулей, связанные с отображением точечных источников: импульсная и пеленгационная характеристики, чувствительность и пороговая чувствительность при работе по точечному объекту.

Показано, что коррекция амплитудных искажений с использованием линейного преобразования при работе в пределах квазилинейного участка светосигнальной характеристики обеспечивает снижение остаточной неоднородности примерно в 1,5 раза. Однако при обработке данных во всем диапазоне яркости существенное снижение остаточной неоднородности обеспечивает только применение кубической коррекции (в 1,6 раза). Помимо улучшения качества изображений за счет уменьшения неоднородности, применение квадратичной и кубической коррекций позволяет значительно уменьшить степень нелинейности светосигнальных характеристик ФПУ. Так, достоверность линейной аппроксимации исходных светосигнальных характеристик составила  $R_1^2 = 0.902$ , а после квадратичной и кубической коррекций амплитудных искажений  $R_1^2 = 0.961$  и  $R_1^2 = 0.978$  соответственно.

Необходимо отметить, что вычислительная сложность алгоритма кубической коррекции в 2 раза выше относительно квадратичной и в 6 раз – линейной (без учета затрат на выполнение операций сложения по сравнению с умножением).

### Список литературы

1. Бурлаков И. Д., Филачев А. М., Пономаренко В. П. Современные тенденции создания приборов регистрации оптического излучения // Тр. 23-й Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: НПО «Орион», 2014. С. 12–14.
2. Бочков В. Д., Дрожников Б. Н., Кузнецов П. А., Козлов К. В., Соляков В. Н. Особенности ФПУ с режимом ВЗН формата  $1024 \times 10$  на основе КРТ // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 58–61.
3. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик.
4. Козлов К. В., Соляков В. Н., Кузнецов П. А., Полесский А. В., Хамидуллин К. А., Семенченко Н. А., Бедарева Е. А. Исследование частотных характеристик многоуровневого МФПУ с режимом ВЗН // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2, № 5. С. 528–538.
5. Milton A. Influence of nonuniformity to infrared focal plane array performance // Opt. Eng. 1985. No. 24. P. 855–862.
6. Певцов Е., Чернокожин В. Матричные ИК-приемники для малогабаритных тепловых тепловизионных камер // Электронные компоненты. 2001. № 3. С. 32–36.
7. Борзов С. М., Громиллин Г. И., Дрожников Б. Н., Козик В. И., Косых В. П., Потатуркин О. И. Оценка эффективности нелинейных методов коррекции крупноформатных тепловизионных ФПУ // Тр. 24-й Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: НПО «Орион», 2016. С. 205–208.
8. Борзов С. М., Козик В. И., Феоктистов А. С. Исследование эффективности коррекции данных тепловизионных камер // Изв. вузов, приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 47–50.
9. Иванов В. А., Киричук В. С. Модель инерционного фотоприемного устройства для анализа пороговой чувствительности в задаче обнаружения движущегося точечного объекта // Автометрия. 2013. Т. 49, № 1. С. 3–10.

**S. M. Borzov**<sup>1</sup>, **B. N. Drazhnikov**<sup>2</sup>, **V. I. Kozik**<sup>1</sup>  
**O. I. Potaturkin**<sup>1,3</sup>, **V. V. Sinelshchikov**<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Automation and Electrometry SB RAS  
1 Academician Koptyug, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Corporation «Orion»  
9 Kosinskaya Str., Moscow, 111538, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Novosibirsk State University  
1 Pirogov Str., Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>4</sup>*Corporation «Kometa»  
5 Velozavodskaya Str., Moscow, 1152805, Russian Federation*

## ESTIMATION OF CHARACTERISTICS AND RESEARCH OF EFFICIENCY OF NONLINEAR NONUNIFORMITY CORRECTION OF LARGE-FORMAT INFRARED PHOTODETECTORS

This work is devoted to research of main parameters of large-format multimodular scanning IR focal plane array (FPA) devices of submatrix structure, and also methods of correction of the distortions caused by spatial nonuniformity of sensitive elements and nonlinearity of their light-signal dependences. The program-algorithmic support allowing to determine light-signal dependences, pulse and directional characteristic, sensitivity and threshold sensitivity for point object, etc. by processing of images sequences of test fields, received as a result of test bench measurements is developed. Results of estimation of the mentioned characteristics for modules of researched FPA device are submitted. Reliability of linear approximation of light-signal dependences and root-mean-square error of signals before and after linear and nonlinear nonuniformity corrections are determined.

*Keywords:* test bench measurements, estimation of characteristics, nonlinear nonuniformity correction, large-format focal plane array devices.

### References

1. Burlakov I.D., Filachev A.M., Ponomarenko V.P. Modern trends of creation of devices of registration of optical radiation // Works of 23-th International scientific – technical conference on photoelectronics and devices of night vision. Moscow: "Orion". 2014. p. 12–14.
2. Bochkov V. D., Drazhnikov B. N., Kuznetsov P. A., Kozlov K. V., Soljakov V. N. Peculiarity of photodetectors with time delay with accumulation mode of format 1024×10 on the basis of CdHgTe // Applied physics. 2014. N 1. p. 58–61.
3. State Standard 17772-88. Receivers of radiation, semi-conductor photo-electric and photoreception devices. Methods of measurement of photo-electric parameters and definitions of characteristics.
4. Kozlov K. V., Soljakov V. N., Kuznetsov P. A., Poleskij A. V., Hamidullin K. A., Semenchenko N. A., Bedareva E. A. Investigation of frequency characteristics of multibit matrix photodetectors with time delay with accumulation mode // Successes of applied physics. 2014. V. 2. N 5. p. 528–538.
5. Milton A. Influence of nonuniformity to infrared focal plane array performance // Opt. Eng. 1985. N 24. p. 855–862.
6. Pevtsov E., Chernokojin V. Matrix IR-receivers for small-sized thermal photoreception devices // Electronic components. 2001. N 3. p. 32-36.
7. Borzov S. M., Gromilin G. I., Drazhnikov B. N., Kozik V. I., Kosykh V. P., Potaturkin O. I. Estimation of efficiency of nonlinear correction methods of large-format focal plane array devices // Works of 24-th International scientific – technical conference on photoelectronics and devices of night vision. Moscow: "Orion". 2016. p. 205–208.
8. Borzov S. M., Kozik V. I., Feoktistov A. S. Investigation of efficiency of correction of focal plane array devices // Izvestiya vuzov, priborostroenie. 2013. V. 56. N 12. p. 47–50.
9. Ivanov V. A., Kirichuk V. S. Model of the inertial photoreception device for the analysis of threshold sensitivity in a task of moving dot object detection // Avtometriya. 2013. V. 49. N 1. p. 3–10.