

УДК 621.383
EDN: AMAJAV

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp



Методика оценки формы и размеров фоточувствительного элемента сканирующего инфракрасного фотоприёмного устройства (ИК-ФПУ)

В. В. Абилов, В. А. Стрельцов, В. В. Савцов, С. А. Смотряков

Рассматриваются особенности измерения порогового потока сканирующих ИК ФПУ при проецировании в плоскость матрицы фоточувствительных элементов изображения малоразмерного объекта, показано, что существующая методика измерения порогового потока ИК ФПУ не позволяет получить корректный результат без учёта формы и размеров фоточувствительного элемента (ФЧЭ). Описана новая методика оценки формы и размеров ФЧЭ, основанная на применении итерационного метода деконволюции Ричардсона-Люси. Представлены результаты применения предложенной методики на реальных фотоприёмных модулях (ФМ). Обнаружены существенные отличия в размерах ФЧЭ разных субматриц ФМ. Предложено использовать изображение горизонтальной щели для коррекции неравномерности вольтовой чувствительности.

Ключевые слова: инфракрасный ФПУ сканирующего типа, методика измерения, размер ФЧЭ, декорреляция, метод Ричардсона-Люси, прямое произведение, пороговый поток.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-44-48

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в инфракрасном диапазоне широко применя-

ется для решения гражданских и специальных задач. ИК крупноформатные фотоприёмные устройства (ФПУ) сканирующего типа занимают значительное место в современных системах ДЗЗ, несмотря на стремительное развитие «смотрящих» матричных фотоприёмных устройств (МФПУ).

Регистрация малоразмерных объектов (МО) является одной из ключевых задач в ряде применений ДЗЗ, таких как регистрация очагов возгорания лесных пожаров, утечек газопроводов, аэронавигация и т. д. Малоразмерными будем называть объекты, размеры изображения которых в плоскости матрицы фоточувствительных элементов (ФЧЭ) не превышают удвоенного размера ФЧЭ [1].

Традиционно установки для измерений параметров сканирующих ИК ФПУ используют в качестве оптического воздействия модулированное равномерно распределённое излучение от АЧТ, в связи с чем не учитывается неполное поглощение мощности, содержа-

Абилов Владислав Владимирович¹, инженер 2 кат., аспирант.

Стрельцов Вадим Александрович^{1,2}, инженер 1 кат., аспирант.

Савцов Владимир Валериевич¹, инженер 2 кат., аспирант.

Смотряков Сергей Александрович¹, вед. инженер.
E-mail: s_kpss@mail.ru

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 21.12.2022

После доработки 29.12.2022

Принята к публикации 10.01.2023

© Абилов В. В., Стрельцов В. А., Савцов В. В., Смотряков С. А., 2023

щейся в изображениях малоразмерных объектов, что не позволяет моделировать и анализировать процессы формирования сигнала с необходимой точностью [2–4]. Результаты измерения порогового потока – главного фотоэлектрического параметра, характеризующего качество работы всего ИК ФПУ, в режиме имитации малоразмерного объекта были представлены в работе [5]. В ней было продемонстрировано значительное (в 3 раза) различие между значениями порогового потока, измеренными в режиме без оптико-механического сканирования, и в режиме сканирования с формированием в плоскости фоточувствительного слоя изображения малоразмерного объекта. В данной работе был сделан вывод о том, что различия результатов измерения устраняются учётом распределения чувствительности по площади ФЧЭ.

В связи с этим возникает естественная необходимость измерения формы распределения чувствительности ФЧЭ. Как описано в работе [6], существует два основных подхода к измерению размеров ФЧЭ, первый из которых («измерение малым пятном») практически неосуществим для приёмников ближнего ИК-диапазона. Поэтому в разработанной методике предлагается использовать вариант метода «измерения большим пятном», предполагающий измерение пеленгационной характеристики ФЧЭ при помощи зондирующего оптического пятна.

Стенд для формирования в плоскости ФЧЭ зондирующего пятна

Измерительный стенд для оценки формы и размеров ФЧЭ выполнен в виде двухканальной проекционной оптической системы ИК диапазона и обеспечивает формирование изображений тестовых объектов канала МО и канала фона в плоскости изображения, совмещаемой с плоскостью ФЧЭ испытуемого изделия, однокоординатное сканирование изображений тестовых объектов каналов МО и фона с заданной линейной скоростью, а также передвижение изображений тестовых объектов. Блок-схема стенда представлена на рис. 1.

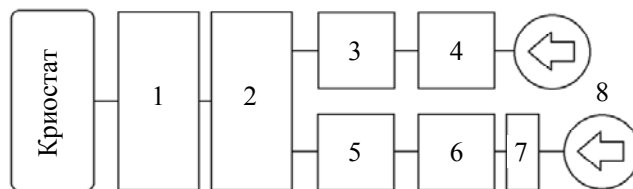


Рис. 1. Блок-схема двухканального проекционного стенда для измерения фотоэлектрических параметров ФМ: 1 – прецизионное сканирующее устройство; 2 – коллиматорный двухканальный объектив; 3 – узел тестовых объектов фона; 4 – осветитель тестовых объектов фона; 5 – узел тестовых МО; 6 – осветитель тестовых МО; 7 – оптический модулятор (съёмный); 8 – модели абсолютно черных тел

Посредством перемещения зондирующего пятна вдоль ФЧЭ в двух перпендикулярных направлениях путём использования шаговых двигателей в составе узла тестовых объектов МО получают исходные экспериментальные данные – одномерные пеленгационные характеристики. После вычитания постоянной составляющей сигналов и нормировки характеристик на единицу, при помощи декартова произведения полученных функций, конструируется двумерное распределение сигнала в зависимости от относительной координаты зондирующего пятна.

Обработка полученных экспериментальных данных

В случае «большого пятна» полученное двумерное распределение ($PSF_{исх}$) является сверткой распределения чувствительности ФЧЭ, функции рассеяния точки (ФРТ) оптической системы стенда, и ФРТ тестового объекта:

$$PSF_{исх}(x, y) = [f_{тест. объект}(x, y) \otimes \otimes PSF_{опт}(x, y)](x, y) \otimes PSF_{ФЧЭ}(x, y)](x, y). \quad (1)$$

Если предположить отсутствие дифракции в оптической системе, то изображением диафрагмы с номинальным диаметром 30 мкм в фокальной плоскости используемого стенда ($f_{тест. объект}(x, y)$) является круг радиусом $r_{тест. объект} = 3,628$ мкм.

В качестве ФРТ оптической системы стенда используем гауссоиду:

$$PSF_{\text{опт}}(x, y) = \frac{1}{2\pi R_{\text{опт}}^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2R_{\text{опт}}^2}\right) \quad (2)$$

где $R_{\text{опт}}$ подбирается исходя из известного значения коэффициента концентрации энергии сенда (ККЭ = 0,83). Методом бинарного поиска получаем $R_{\text{опт}} = 7,757$ мкм.

Распределение чувствительности ФЧЭ (ФРТ фоточувствительного элемента) является неизвестным двумерным распределением, оценка которого и составляет цель данного исследования. Формирование измеренной пеленгационной характеристики ($PSF_{\text{исх}}$) продемонстрировано на рис. 2.

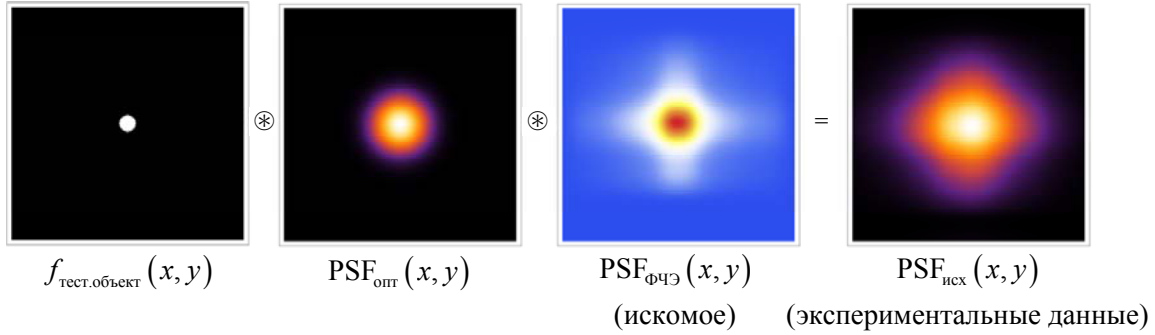


Рис. 2. Математическая модель формирования измеряемых экспериментальных данных

Для получения $PSF_{\text{ФЧЭ}}$ предлагается использовать метод Ричардсона-Люси: итерационный алгоритм деконволюции для восстановления исходного изображения из экспериментальных данных, размытых известной ФРТ.

Результаты применения методики

В результате проведения измерения размеров нескольких ФЧЭ на одном фотомодуле

при помощи разработанной методики были обнаружены значительные различия эффективной площади элементов различных субматриц ФЧЭ. Субматрицы – группы ФЧЭ, разнесённые друг от друга в пространстве в соответствии с топологией фотошаблона (рис. 3) с целью увеличить пространственное разрешение, что является преимуществом сканирующих ФПУ в сравнении со «смотрящими» матрицами.

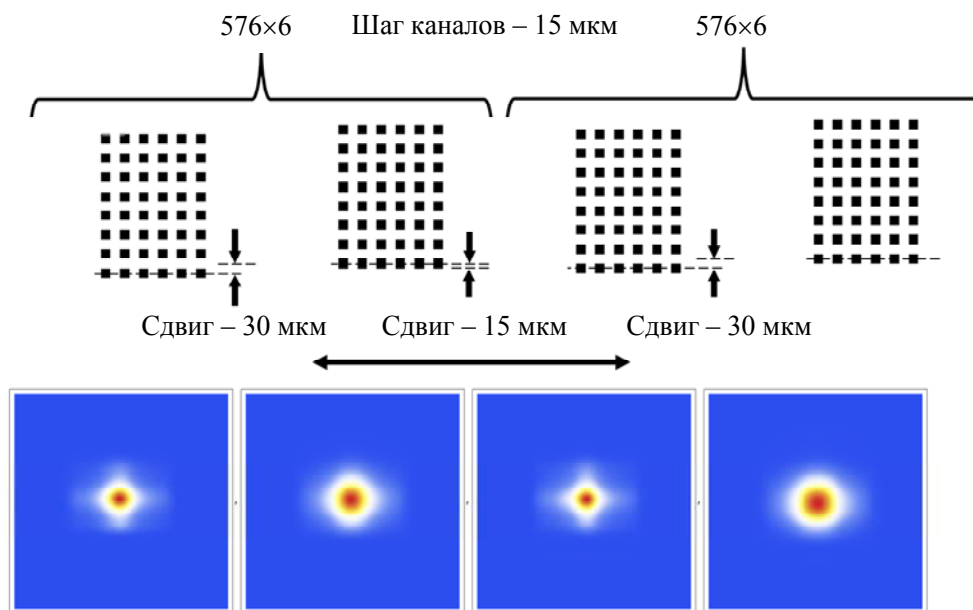


Рис. 3. Топология субматриц ИК ФМ и соответствующие им ФЧЭ

Эти различия оказывают значительный негативный эффект на поканальный разброс вольтовой чувствительности, измеряемой при засветке фотомодуля равномерной облучённостью. Полученный таким образом список значений относительных коэффициентов усиления используется в алгоритме коррекции неравномерности чувствительности. Эта процедура производится из соображения того, что каждый фоточувствительный элемент имеет свою квантовую эффективность, а также существует технологический разброс используемых в большой интегральной схеме считывания ёмкостей. Однако в связи с тем, что некоторые ФЧЭ имеют больший размер, их реакция на изображение малоразмерного объекта, сравнимое с ними самими, может значительно отличаться от используемого в вырав-

нении коэффициента. Это явление делает проводимую коррекцию недостоверной.

В качестве альтернативы для получения коэффициентов усиления для алгоритмов выравнивания разброса вольтовой чувствительности предлагается использовать изображение тестового объекта в виде горизонтальной щели, которое в направлении сканирования имеет схожесть с малоразмерным объектом, что должно нивелировать реакцию краёв больших элементов на неинформативное оптическое излучение. При высокой корреляции данных разброс значений по щели получается на 60 % меньше. Изображение щели и коэффициенты усиления, полученные с её помощью в сравнении с коэффициентами равномерного потока, представлены на рис. 4.

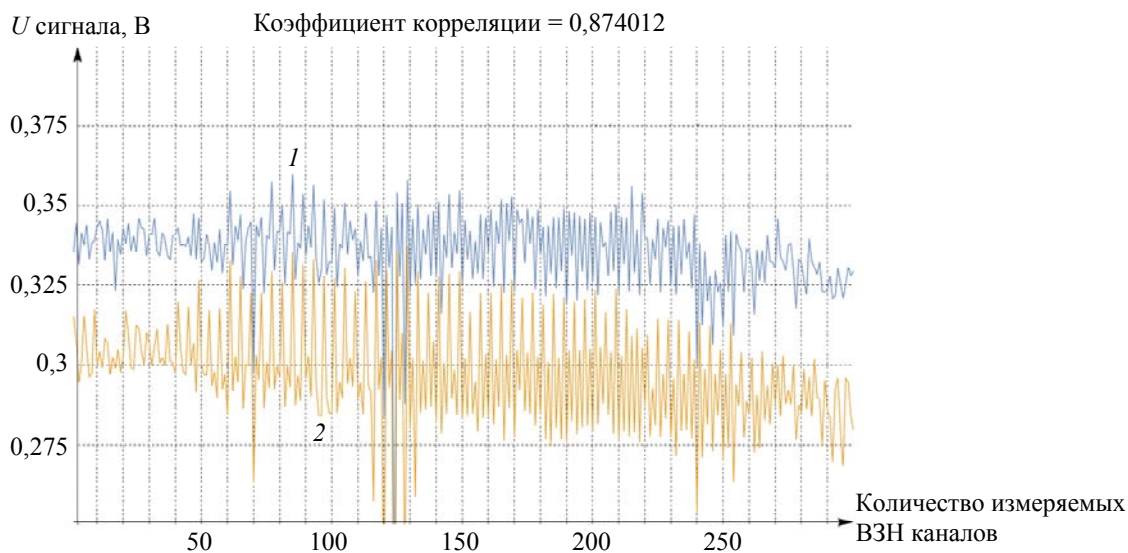


Рис. 4. Исходные данные, полученные с помощью изображения щели для вычисления коэффициентов, в сравнении с данными равномерного потока (кривая 1 – коэффициенты усиления по щели; кривая 2 – коэффициенты усиления по равномерной засветке)

Заключение

В результате исследования была разработана методика оценки формы и размера распределения чувствительности ФЧЭ сканирующего ИК ФПУ, которая предполагает получение исходных данных в виде одномерных взаимоперпендикулярных пеленгационных характеристик, полученных «большим пятном» при помощи специализированного оптико-механического стенда. Восстановление двумерного распределения чувствительности осуществляется декартовым произведением исходных данных и последующей процедурой

деконволюции итерационным методом Ричардсона-Люси.

В процессе проведения измерений при помощи разработанной методики было обнаружено существенное различие эффективной площади ФЧЭ реальных ФМ, что приводит к искажению выходных изображений малоразмерных объектов при проведении коррекции разброса вольтовой чувствительности. Для нейтрализации этого эффекта предложено использовать в качестве тестового воздействия для получения коэффициентов усиления равномерную засветку, а изображение щели. В результате поканальный разброс вольтовой

чувствительности уменьшился на 60 %, что значительно повысит точность измерений фотоэлектрических параметров ИК ФПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов К.В., Патрашин А.И., Бурлаков И.Д., Бычковский Я.С., Дразников Б.Н., Кузнецов П.А. / Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 1. С.63–78.
2. Козлов К.В., Бычковский Я.С., Кондюшин И.С., Матвеев А.В., Соляков В.Н., Пожидаев Д.А., Балиев Д.Л. / Прикладная физика. 2014. № 2. С. 64–68.

3. Бочков В.Д., Дразников Б.Н., Кузнецов П.А., Козлов К.В., Соляков В.Н. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 65–70.

4. Бочков В.Д., Дразников Б.Н., Кузнецов П.А., Козлов К.В., Соляков В.Н. / Прикладная физика. 2014. № 1. С. 53–57.

5. Васильев В.Н., Дмитриев И.Ю., Дразников Б.Н., Козлов К.В., Кузнецов П.А., Соляков В.Н., Пономаренко В.П. / Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 5. С. 486–495.

6. Полесский А.В. / Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 350–359.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp

Method for evaluation of the shape and dimensions of a photo-sensitive element of a scanning infrared photo-receptor (IR-FPA)

V. V. Abilov¹, V. A. Streltsov^{1,2}, V. V. Savtsov¹ and S. A. Smotrakov¹

¹Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: s_kpss@mail.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received 21.12.2022; revised 29.12.2022; accepted 10.01.2023

This article discusses the features of measuring the NEP of scanning IR FPAs in case of projecting the image of a small object into the plane of the matrix of photosensitive elements, it is shown that the existing method of measuring the NEP of IR FPAs does not allow to obtain the correct result without taking into account the shape and dimensions of the photosensitive element (PSE). A new technique for estimating the shape and size of the PSE based on the application of the Richardson-Lucy iterative deconvolution method is described. The results of applying the proposed technique on real photodetector modules (PM) are presented. Significant differences were found in the PSE sizes of different PM submatrices. It is proposed to use the image of a horizontal slit to correct the non-uniformity of the voltage sensitivity.

Keywords: scanning infrared FPA, measurement technique, PSE size, decorrelation, Richardson-Lucy method, Cartesian product, NEP.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-44-48

REFERENCES

1. Kozlov K. V., Patrashin A. I., Burlakov I. D., Bychkovsky Y. S., Drazhnikov B. N. and Kuznetsov P. A., Usp. Prikl. Fiz. **5** (1), 63–78 (2017) [in Russian].
2. Kozlov K. V., Bychkovsky J. S., Kondushin I. S., Matveev A. V., Solyakov V. N., Pozhidaev D. A. and Baliev D. L., Applied Physics, № 2, 64–68 (2014) [in Russian].
3. Bochkov V. D., Drazhnikov B. N., Kuznetsov P. A., Kozlov K. V. and Solyakov V. N., Usp. Prikl. Fiz. **2** (1), 65–70 (2014) [in Russian].
4. Bochkov V. D., Drazhnikov B. N., Kuznetsov P. A., Kozlov K. V. and Solyakov V. N., Applied Physics, № 1, 53–57 (2014) [in Russian].
5. Vasiliev V. N., Dmitriev I. Yu., Drazhnikov B. N., Kozlov K. V., Kuznetsov P. A., Solyakov V. N. and Ponomarenko V. P., Usp. Prikl. Fiz. **3** (5), 486–495 (2015) [in Russian].
6. Polesky A. V., Usp. Prikl. Fiz. **5** (4), 350–359 (2017) [in Russian].