

УДК 621.3.089.5

## Анализ требований к фотоприемному тракту для установок измерения пятен рассеяния на основе матричных фотоприемных устройств

А. В. Полесский, А. Д. Юдовская

*Данная работа посвящена анализу требований, предъявляемых к системе регистрации распределения энергии в пятне рассеяния ИК-объективов в установках измерения пятен рассеяния оптических трактов на основе матричных фотоприемных устройств (МФПУ). Произведено математическое моделирование работы системы регистрации, состоящей из объектива, фотоприемного устройства, АЦП и блока электронной обработки, даны рекомендации по выбору оптимальных значений разрядности АЦП и размера пятна рассеяния ИК-объектива. Теоретические расчеты подтверждены экспериментальными данными.*

PACS: 52.70.Kz

*Ключевые слова:* функция рассеяния точки, ФРТ, АЦП, инфракрасный диапазон, фотоприемное устройство.

### Введение

Функция рассеяния точки (ФРТ) является наиболее информативной характеристикой оптической системы [1]. Через Фурье-преобразование ФРТ связана с модуляционной передаточной функцией (МПФ) системы [2, 3]. Одновременно форма распределения энергии в ФРТ позволяет определить остаточные aberrации оптической системы и сделать вывод об ошибках её изготовления [4].

Существуют два основных метода измерения энергетического распределения в пятне рассеяния для объективов ИК-диапазона: прямой и косвенный. Косвенный метод предполагает измерение ошибки волнового фронта интерференционным методом [5] с последующим пересчетом её в ФРТ [6]. Этот метод довольно трудоемкий в части математической обработки данных. К тому же в России нет данных о погрешностях этого метода.

Прямые измерения позволяют проводить оперативный анализ при сравнительно малом объеме дополнительных вычислений. Наилучшие результаты по оперативности показывают установки, в

которых в качестве приемника излучения используются матричные фотоприемные устройства (МФПУ). Структурная схема такой установки приведена на рис. 1.

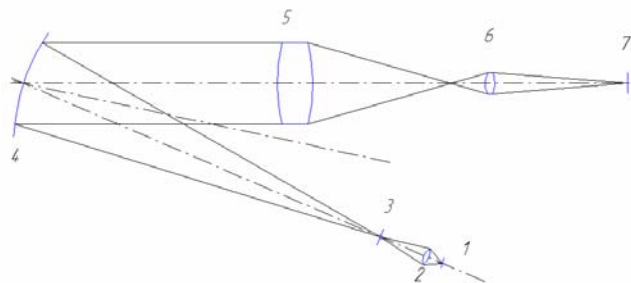


Рис. 1. Структурная схема установки: 1 — источник инфракрасного излучения (АЧТ или глобар), 2 — конденсор, 3 — точечная диафрагма, 4 — зеркальный коллиматор, 5 — контролируемый объектив, 6 — микрообъектив, 7 — МФПУ.

Поскольку в ИК-области спектра размер пятна рассеяния объективов соизмерим с размером чувствительного элемента МФПУ, то поэтому в состав измерительной установки входит микрообъектив с некоторым увеличением. Увеличение должно быть достаточным для того, чтобы можно было «рассмотреть» структуру ФРТ, но при этом оно не должно приводить к сильному падению энергии, приходящейся на один пиксель.

Данная работа посвящена анализу требований, предъявляемых к системе регистрации распределения энергии в пятне рассеяния ИК-объек-

---

Полесский Алексей Викторович, главный метролог.  
Юдовская Александра Дмитриевна, инженер 1 кат.  
АО «НПО «Орион».  
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.  
E-mail: orion@orion-ir.ru, av22236@mail.ru

Статья поступила в редакцию 3 октября 2016 г.

© Полесский А. В., Юдовская А. Д., 2016

тивов в установках измерения пятен рассеяния оптических трактов на основе МФПУ.

### Алгоритм работы модели

Процесс определения требований, предъявляемых к микрообъективу и МФПУ, требует некоторых пояснений. Казалось бы, вопрос о выборе минимального количества элементов разложения, необходимого для восстановления ФРТ, может быть решен с помощью теоремы Котельникова. Спектр ФРТ оптической системы, имеющей дифракционное качество изображения ограничен, однако одним из важных условий использования теоремы Котельникова является применение дельта-функции при проведении дискретизации, в то время как МФПУ производит усреднение падающего оптического сигнала по поверхности элемента, производя «усредняющую» выборку. Такая выборка приводит к искажению спектра дискретизируемой функции в области высоких частот. В связи с этим необходимо проведение «прямого» математического моделирования процесса приема, оцифровки и восстановления ФРТ.

Задачей моделирования являлось определение количества пикселей, приходящихся на центральную часть пятна рассеяния, разрядности АЦП и

алгоритма восстановления сигнала, необходимых для достоверного восстановления ФРТ. Блок-схема алгоритма работы модели представлена на рис. 2.

В качестве исходной функции была выбрана ФРТ безабберационной оптической системы, для которой характерны наибольший перепад яркости при минимальном пятне рассеяния [7]. ФРТ такой системы описывается функцией Бесселя 1-го порядка, что иллюстрируется рис. 3.

Для упрощения математических расчетов было рассмотрено сечение матрицы вдоль строки ФЧЭ. В качестве критериев оценки достоверности измерений были использованы следующие величины: размер пятна рассеяния по уровню 80 % полной энергии пятна рассеяния и погрешность измерения полной энергии пятна рассеяния.

На рис. 4 приведен пример результатов восстановления сигнала после 12-битного АЦП для пятна рассеяния, центральная часть которого занимает 8 пикселей МФПУ (коэффициент заполнения 0,8).

В ходе моделирования было определено, что при попадании первого темного кольца на 8 и более пикселей восстановление слабо зависит от положения максимума относительно центра пикселя, и, следовательно, этот параметр можно не учитывать.

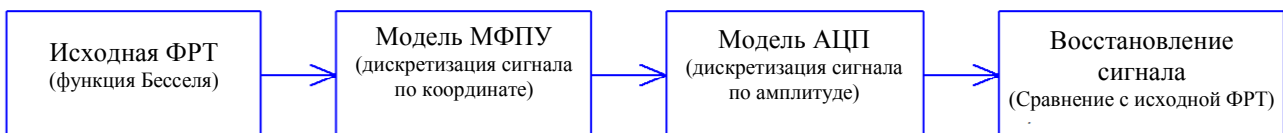


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы модели.

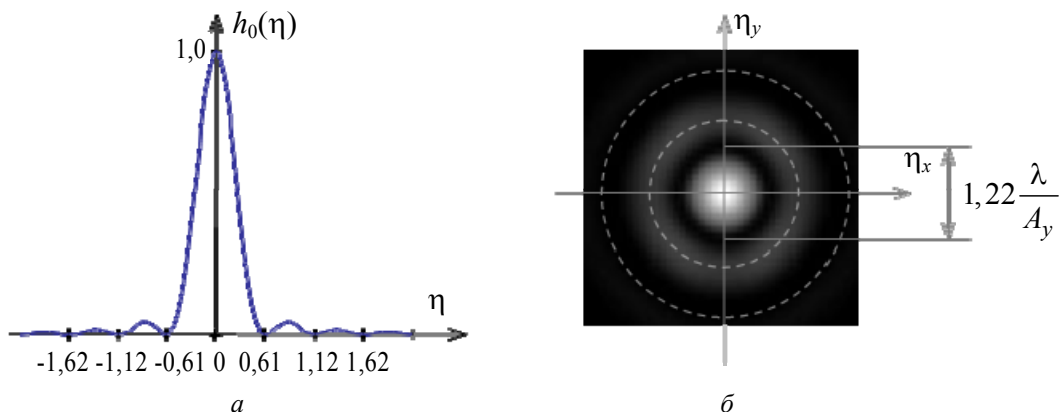


Рис. 3. Распределение интенсивности в ФРТ безабберационной системы: а — сечение; б — общий вид распределения интенсивности (картина Эри).

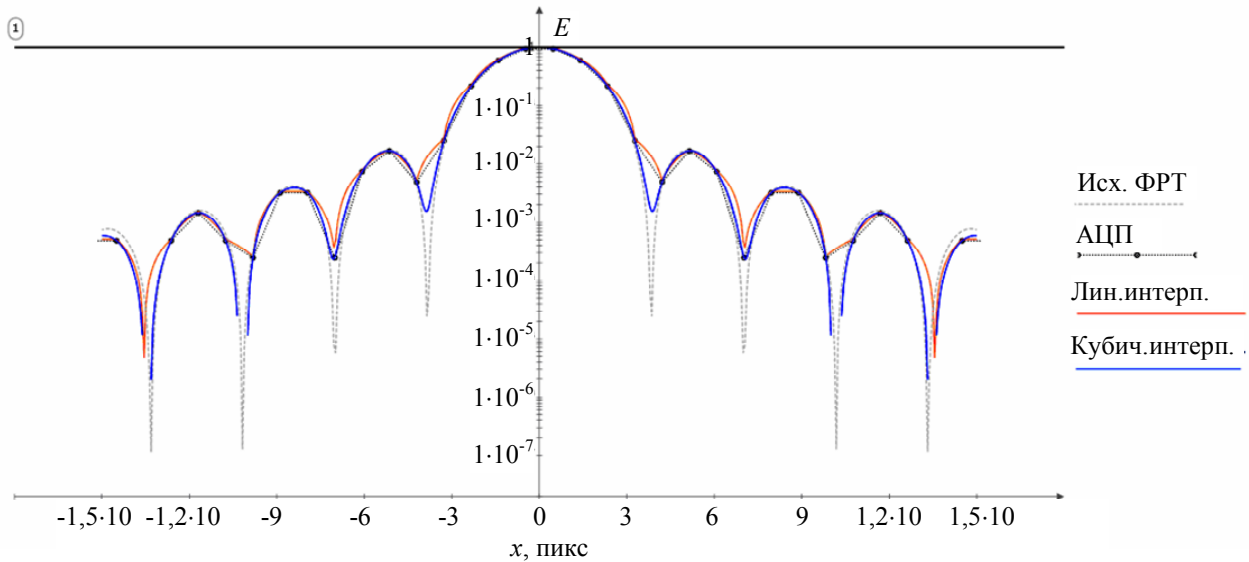


Рис. 4. Работа алгоритма восстановления сигнала после АЦП.

При восстановлении исходной формы ФРТ наилучшие результаты дает кубическая интерполяция. На рис. 5 приведен график зависимости погрешности восстановления ФРТ (в %) от разрядности АЦП для разных размеров пятен рассеяния при кубической интерполяции сигнала. Анализ

графика показывает, что существует оптимальное соотношение размера пятна рассеяния и разрядности АЦП, при котором ошибка восстановления сигнала минимальна. Дальнейшее увеличение разрядности АЦП приводит к увеличению погрешности восстановления сигнала.

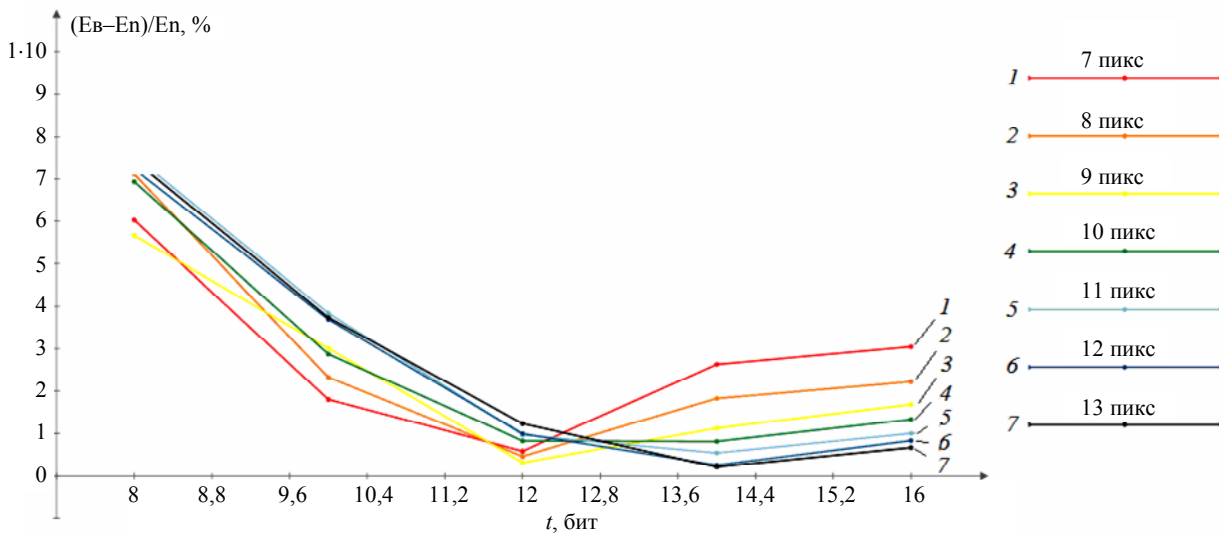


Рис. 5. Зависимость погрешности восстановления ФРТ (%) от разрядности АЦП для разных размеров пятен рассеяния при кубической интерполяции сигнала.

Из графика видно, что для наилучшего восстановления сигнала необходимо АЦП, 12 бит которого будут производить оцифровку полезного сигнала. При этом увеличение объектива должно быть подобрано таким образом, чтобы на центральную часть и первый кружок ФРТ приходилось от 7 до 10 пикселей МФПУ.

### Эксперимент

Для апробации теоретических расчетов была собрана экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 6.

Конденсор 2 создает изображение светодиодного источника 1 в плоскости точечной диафрагмы

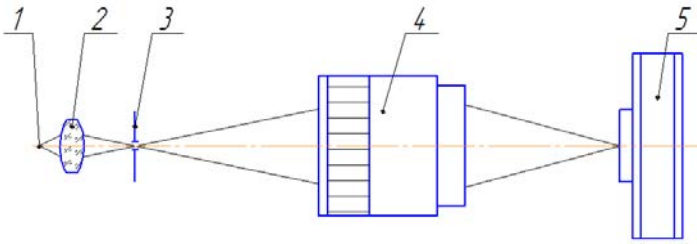


Рис. 6. Схема контроля распределения энергии в пятне рассеяния: 1 — светодиод; 2 — конденсор; 3 — точечная диафрагма; 4 — контролируемый объектив; 5 — камера-окуляр.

мы 3. Контролируемый объектив 4 переносит в плоскость приемника излучения 5 увеличенное изображение дифракционной точки.

В качестве приемника излучения использовалась ПЗС матрица с 8-битным АЦП. Для увеличения разрядности АЦП было произведено сложение кадров с возрастающей экспозицией по формуле из работы [8], а именно:

$$sum_{i,j} = 2sum_{i,j} + \begin{cases} \text{если } (50 < el_{i,j} < 250), \text{ то } \frac{(sum_{i,j} + el_{i,j})}{2}, \\ \text{иначе } 0. \end{cases}$$

где  $el_{ij}$  — элемент текущего обрабатываемого кадра,  $sum_{ij}$  — элемент итогового кадра на момент обработки.

Выбор уровня сигнала ( $50 < el_{ij} < 250$ ) обусловлен линейностью фотоприемника в данном интервале освещенности.

В результате накопления кадров был получен эквивалент 19-битной АЦП. Пример картины, полученной при суммировании кадров, показан на рис. 7.

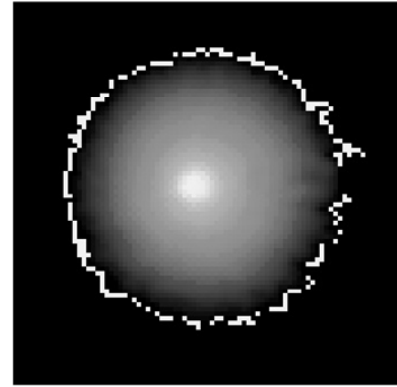


Рис. 7. Результат сложения кадров.

Для оценки сходимости результатов теоретического расчета и эксперимента был проведен анализ зависимости разности диаметров кружков рассеяния по уровню 80 % полной энергии пятна рассеяния от глубины оцифровки сигнала. В случае теоретических расчетов сравнивались диаметры кружков исходной и восстановленной ФРТ (см. рис. 8). При обработке результатов эксперимента сравнивались кружки текущего пятна рассеяния с кружком рассеяния при максимальной разрядности АЦП (см. рис. 9).

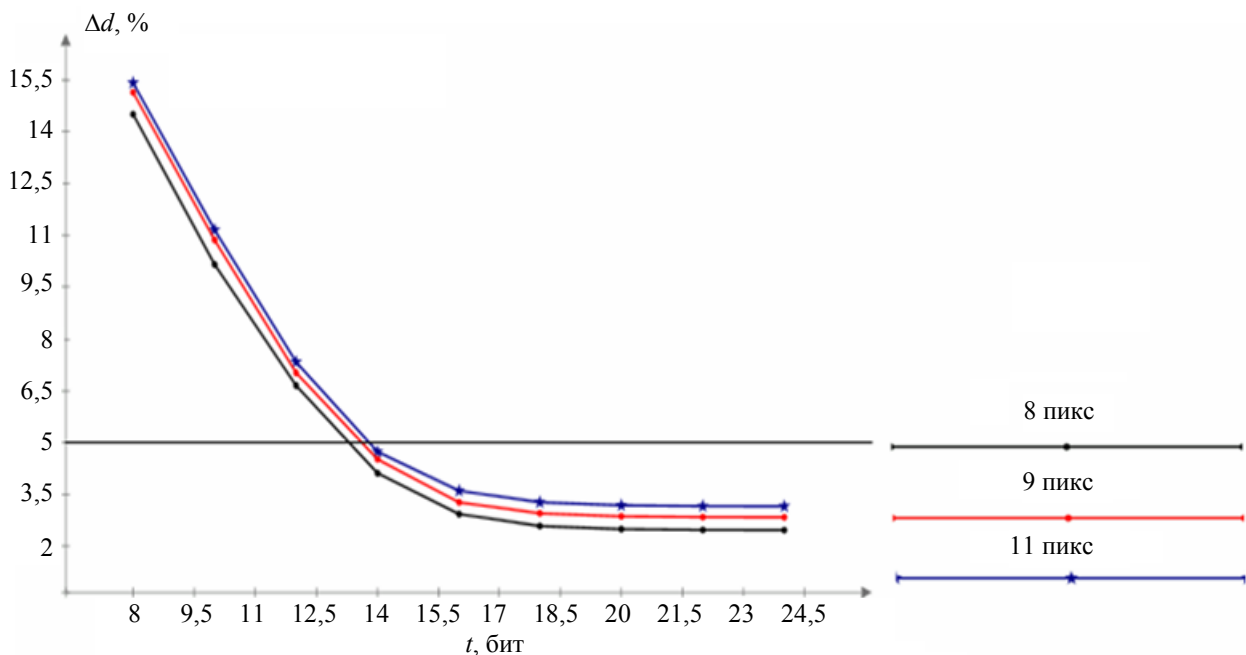


Рис. 8. Зависимость разности диаметров кружков рассеяния (по уровню 80 % полной энергии пятна рассеяния) от разрядности АЦП.

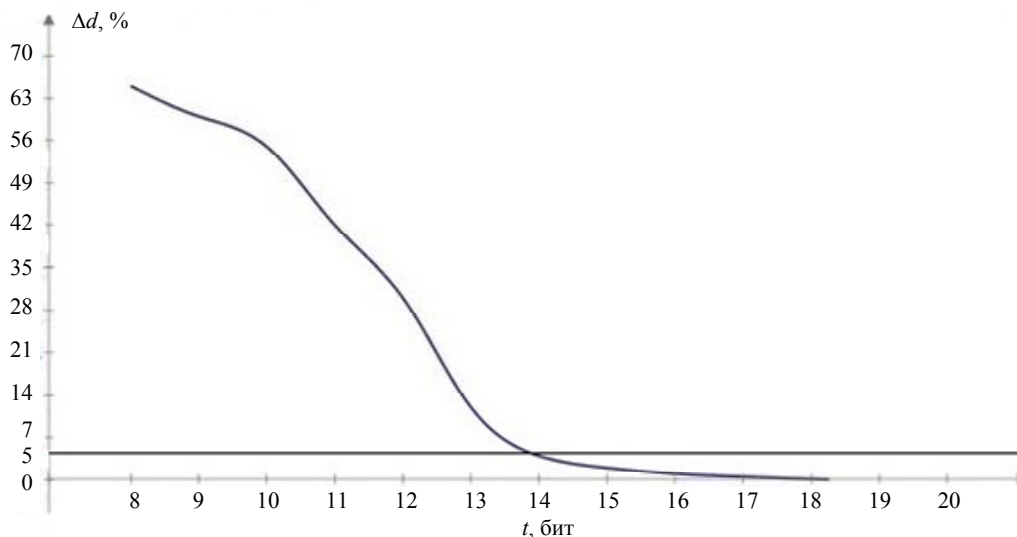


Рис. 9. Ошибка измерения пятна рассеяния при различной разрядности АЦП.

Также было произведено сравнение зависимости полной энергии от глубины оцифровки для

теоретических и экспериментальных данных, что отражено на рис. 10.

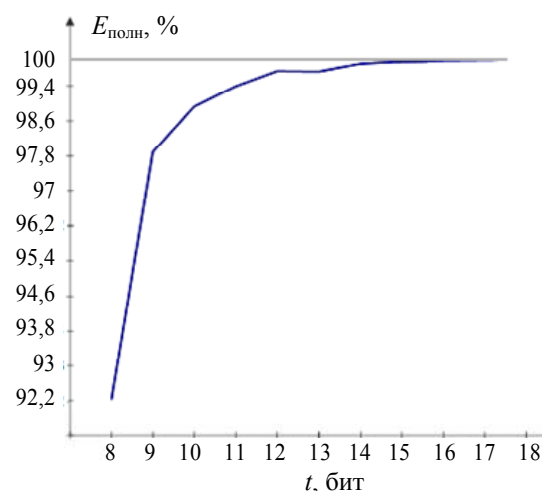
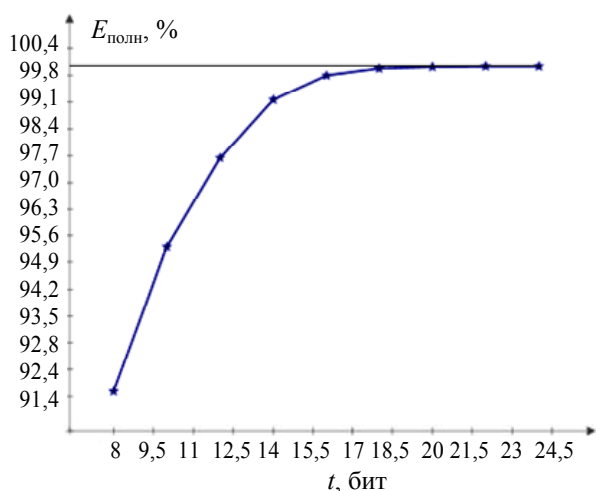


Рис. 10. Графики зависимости полной энергии от глубины оцифровки сигнала для теоретических (слева) и практических (справа) расчетов.

Из графиков видно, что экспериментальные данные подтверждают достоверность теоретических расчетов в части определения зависимости суммарной энергии и размера пятна рассеяния на матрице от глубины оцифровки сигнала.

оцифрованного сигнала дает лучшие результаты, чем линейная. Кроме того, необходимо подобрать увеличение микрообъектива таким образом, чтобы на центральную часть пятна рассеяния приходилось около 8 пикселей МФПУ.

## Заключение

Проведенный цикл исследований показал, что для достоверного восстановления исходной ФРТ необходимо использовать 12-битный АЦП, причем дальнейшее увеличение разрядности АЦП приводит к нарастанию погрешностей восстановления сигнала. При этом кубическая интерполяция

## ЛИТЕРАТУРА

1. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения — М.: Машиностроение, 1987.
2. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н. Теория оптико-электронных систем. — М.: Машиностроение, 1990.
3. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Часть 4. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005.
4. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов — М.: Логос, 1999.

5. Скоков И. В. Многолучевые интерферометры. — М.: «Машиностроение», 1969.  
 6. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения. Часть 6. — СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2008.  
 7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики — Москва, 1973.

8. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан. // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 2. С. 60.

## Analysis of requirements to a photo receiving path for measuring a spot of confusion by FPA

*A. V. Polesskiy and A. D. Yudovskaya*

Orion R&P Association  
 9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
 E-mail: orion@orion-ir.ru, av22236@mail.ru

*Received October 3, 2016*

***The purpose of this study was to determine the requirements for a microscope objectives magnification and FPA in the PSF measuring system. A mathematic modeling of a spot measurement system has been done and analyzed. The study revealed that for establishing an initial PSF it is necessary to use at least of the 12-bit ADC as well, as select a microscope objective magnification so that the center of the Airy disk accounted for at least 8 pixels of FPA.***

PACS: 52.70.Kz

*Keywords:* point spread function, PSF, ADC, infrared region, FPA, IR.

### REFERENCES

1. G. V. Kreopalpa, N. L. Lazareva, and D. T. Puryaev, *Optical Measurements* (Mashinostroenie, Moscow, 1987) [in Russian].
2. G. M. Mosyagin, V. B. Nemtinov, and E. N. Lebedev, *Theory of Optoelectronic Systems* (Mashinostroenie, Moscow, 1990) [in Russian].
3. V. K. Kirillovskii, *Optical Measurements, Part IV* (SPb, ITMO, 2005) [in Russian].
4. Yu. G. Yakushenkov, *Theory and Design of Optoelectronic Devices* (Logos, Moscow, 1999) [in Russian].
5. I. V. Skokov, *Multipath Interferometers* (Mashinostroenie, Moscow, 1969) [in Russian].
6. V. K. Kirillovskii and Le Zui Tuan, *Optical Measurements. Part VI* (SPb, ITMO, 2008) [in Russian].
7. M. Born and E. Wolf, *Foundations of Optics* (Moscow, 1973) [in Russian].
8. V. K. Kirillovskii and Le Zui Tuan, *Nauchn. Vestnik of SPb. Gos Univer. Inf. Tekhn. Mekhan. Optiki*, No. 2, 60 (2009).