

Обоснование требований к элементам установки измерения пятна рассеяния объектива на основе матричного фотоприемного устройства

А. В. Полесский, А. Д. Юдовская

Рассмотрены основные методы измерения распределения энергии в пятне рассеяния для объективов среднего и дальнего ИК-диапазонов. Предложена структурная схема установки на основе матричного фотоприемного устройства для измерения пятен рассеяния ИК-объективов. В соответствии с результатами математического моделирования работы установки даны рекомендации по выбору параметров её основных узлов. Показано, что для восстановления исходного пятна рассеяния с высокой точностью необходимо использовать 14-битный АЦП или методы расширения динамического диапазона оптоэлектронного тракта. При этом оптимальным алгоритмом восстановления сигнала является кубическая интерполяция. Проведено исследование влияния относительного размера тест-объекта на точность восстановления исходного пятна рассеяния. Рекомендуемое соотношение диаметров тест-объекта и пятна рассеяния исследуемого объектива 1:6. Проведено исследование влияния увеличения проекционной системы на точность измерения пятна рассеяния ИК-объектива, даны рекомендации по выбору увеличений проекционных систем. Предложены оптические схемы проекционных объективов для контроля качества ИК оптических трактов в диапазонах 3,5...5 мкм и 8...12 мкм. Представлены результаты экспериментов, подтверждающих теоретические расчеты в части определения зависимости полной энергии пятна рассеяния от глубины оцифровки сигнала.

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

Введение

Стремительное развитие ИК-техники задает повышенные требования к созданию методов и средств оценки качества ее составных частей. Одним из основных узлов современных тепловизионных приборов (ТВП) и теплопеленгационных систем является ИК-объектив. Технологический и аттестационный контроль качества изображения ИК-объектива, как правило, основывается на применении метода измерения размеров его наименьшего кружка рассеяния и измерения распределения интенсивности в кружке рассеяния, называемом функцией рассеяния точки (ФРТ) [1].

Функция рассеяния точки является наиболее информативной характеристикой оптической сис-

темы [1]. Через Фурье-преобразование ФРТ связана с модуляционной передаточной функцией (МДФ) системы [2, 3]. При этом форма распределение энергии в ФРТ позволяет определить остаточные aberrации оптической системы и судить об ошибках, допущенных при её изготовлении [4].

Целью данной работы было аналитическое рассмотрение основных методов измерения распределения энергии в пятне рассеяния для объективов среднего и дальнего ИК-диапазонов и выработка рациональных предложений по структурной схеме установки на основе матричного фотоприемного устройства для эффективного измерения пятен рассеяния ИК-объективов

Методы измерения ФРТ ИК-объектива

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 час-

Полесский Алексей Викторович, главный метролог, к.т.н.

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 30 мая 2017 г.

ти математической обработки данных и не позволяет измерять полихроматические аберрации.

Прямые измерения позволяют проводить оперативный анализ при сравнительно малом объеме дополнительных вычислений. Ранее при реализации такого метода, в связи с применением одноэлементных фотоприемных устройств (ФПУ) и ФПУ в виде линеек, требовалось наличие сложной системы сканирования с возможностью построения пространственного распределения интенсивности в кружке рассеяния контролируемого объектива. Но появление высокочувствительных

широкоформатных матричных фотоприемных устройств (ФПУ) позволило упростить задачу сбора информации и вовсе отказаться от систем сканирования.

Структурная схема установки измерения ФРТ ИК-объектива

Наилучшие результаты по оперативности показывают установки, в которых в качестве приемника излучения используется *матричные* фотоприемные устройства (МФПУ). Структурная схема такой установки приведена на рис. 1.

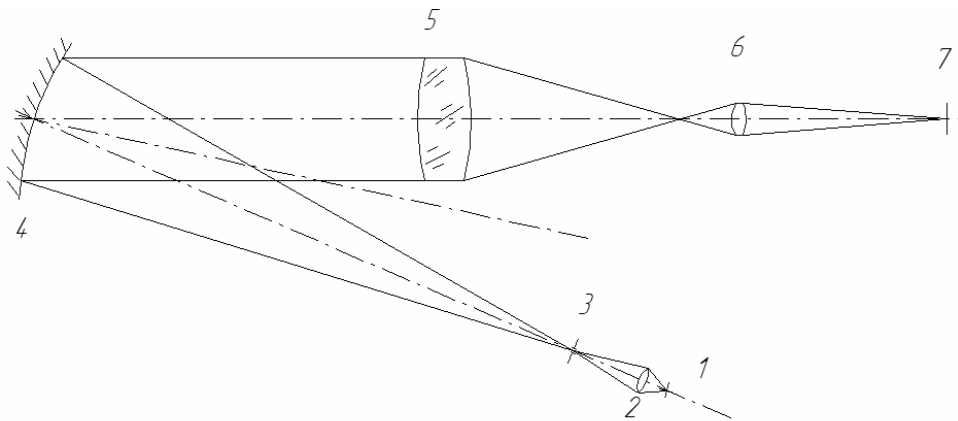


Рис. 1. Структурная схема установки: 1 – источник инфракрасного излучения (АЧТ или глобар); 2 – конденсор; 3 – точечная диафрагма; 4 – зеркальный коллиматор; 5 – контролируемый объектив; 6 – микрообъектив; 7 – МФПУ.

Поскольку в ИК-области спектра размер пятна рассеяния объективов соизмерим с размером чувствительного элемента МФПУ, 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.

Математическое моделирование работы установки

Одной из задач данного исследования было определение требований, предъявляемых к микрообъективу, тест-объекту и МФПУ. 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 применения 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.

Целью 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.

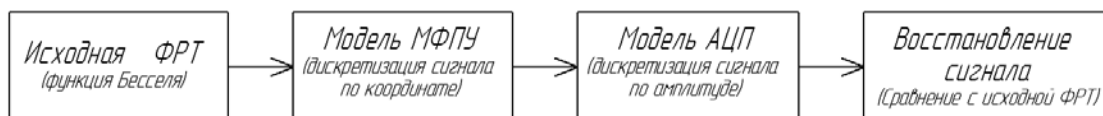


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы модели.

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.

Для упрощения математических расчетов было рассмотрено сечение матрицы вдоль строки ФЧЭ. В качестве критериев оценки достоверности

измерений были использованы: размер пятна рассеяния по уровню 80 % полной энергии пятна рассеяния и погрешность измерения полной энергии пятна рассеяния.

На рис. 3 приведен пример результатов восстановления сигнала после 12-битного АЦП для пятна рассеяния, центральная часть которого занимает 8 пикселей МФПУ (коэффициент заполнения 0,8).

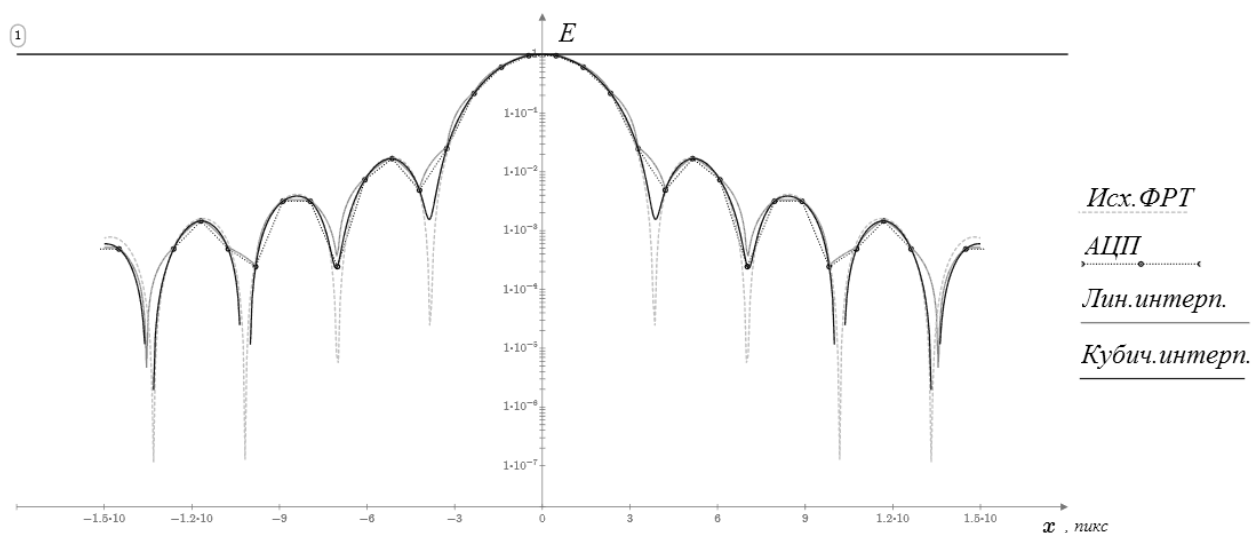


Рис. 3. Работа алгоритма восстановления сигнала после АЦП.

Моделирование показало, что при соотношении ширины центральной части ФРТ к ширине одного пикселя как 8:1 и более, погрешность восстановления исходной ФРТ практически не зависит от положения максимума относительно центра пикселя.

При восстановлении исходной формы ФРТ наилучшие результаты дает кубическая интерполяция. На рис. 4 приведен график зависимости погрешности восстановления ФРТ (в %) от разрядности АЦП для разных размеров пятен рассеяния при кубической интерполяции сигнала.

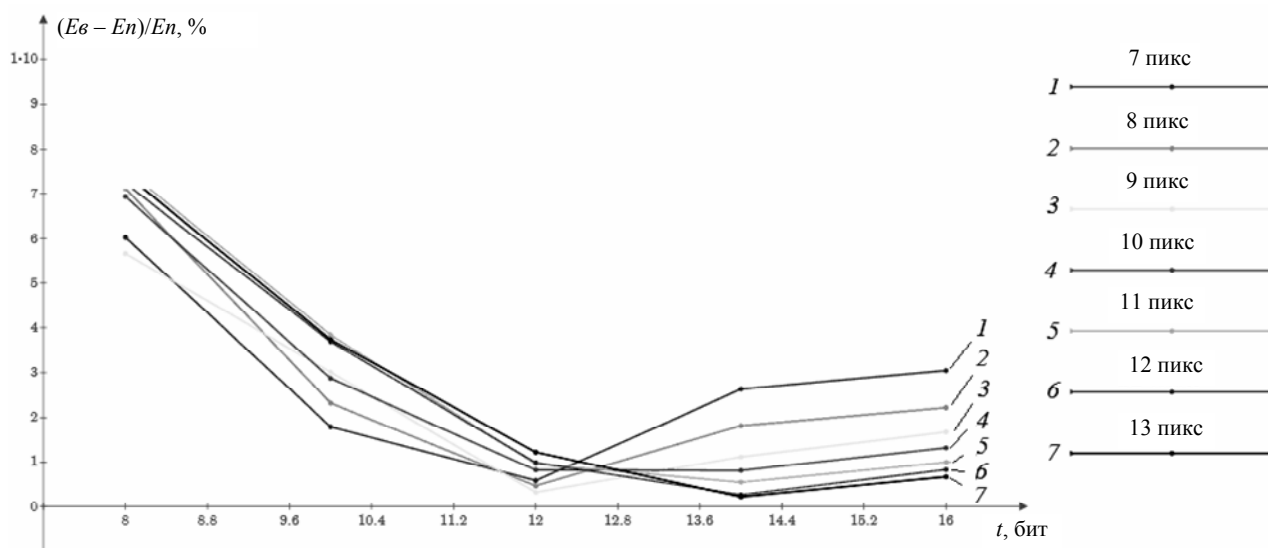


Рис. 4. Зависимость погрешности восстановления ФРТ (%) от разрядности АЦП для разных размеров пятен рассеяния при кубической интерполяции сигнала.

Из графика видно, что для наилучшего восстановления сигнала необходим АЦП, 11-13 бит которого будут производить оцифровку полезного сигнала. Дальнейшее увеличение разрядности АЦП приводит к увеличению погрешности восстановления сигнала из-за ошибок, вносимых процедурой интерполяции.

При этом увеличение проекционного объектива должно быть подобрано таким образом, чтобы на центральную часть и первый кружок ФРТ приходилось от 8 до 10 пикселей МФПУ, так как дальнейшее увеличение приводит к падению энергетики системы.

Рекомендации по выбору диаметра диафрагмы

В общем случае пятно рассеяния исследуемого объектива представляет собой свертку двух функций: оптической передаточной функции (ОПФ) объектива [9] и ОПФ диафрагмы конечных размеров. При увеличении размера диафрагмы пятно рассеяния уширяется и искажается, энергия в максимуме падает. При уменьшении размера диафрагмы падает энергетика системы в целом.

Исследование зависимости искажения пятна рассеяния от размера диафрагмы показало, что для наилучшего восстановления исходной ФРТ рекомендуется использовать диафрагму, диаметр которой в 6 раз меньше диаметра кружка Эйри исследуемого объектива.

Проекционные объективы

Характерный размер пятен рассеяния ИК-объективов обусловлен, как правило, дифракцией. Для тепловизионных приборов в диапазоне 3,5...5 мкм ($D/f' = 1:4$) пятно рассеяния составляет около 40 мкм, а для диапазона 8...12 мкм ($D/f' = 1:2$) – порядка 50 мкм.

В Российской Федерации существует МФПУ с шагом 15 мкм для диапазона 3...5 мкм (ФЭМ18М-03), и с шагом 25 мкм для диапазона 8...10 мкм (ФУК25М). Для проецирования пятна рассеяния в плоскость фоточувствительных элементов таким образом, чтобы оно занимало 8–10 пикселей МФПУ, необходимы проекционные объективы с увеличениями 4^x и 8^x .

Для установки измерения ФРТ были разработаны схемы двух проекционных объективов для диапазона 3,5...5 мкм с увеличениями 4^x и 8^x , двух объективов для диапазона 8...12 мкм с увеличениями 4^x и 8^x и один объектив для диапазона 3,5...12 мкм с увеличением 8^x . Все линзы имеют сферические поверхности и выполнены на основе широко используемых ИК-материалов.

Разработанные объективы имеют высокое качество изображения при больших относительных отверстиях (1:0,7 для однодиапазонных и 1:0,9 для двухдиапазонного), поэтому при работе с малыми полями они не вносят искажений в пятно рассеяния контролируемого объектива.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Для апробации теоретических расчетов была собрана экспериментальная установка со сменными объективами, схема которой показана на рис. 5.

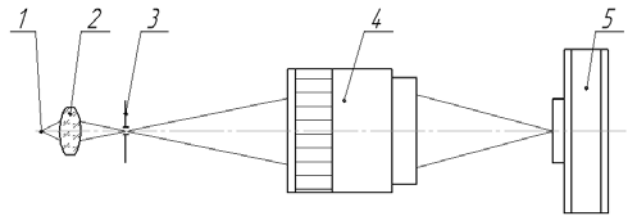


Рис. 5. Схема контроля распределения энергии в пятне рассеяния: 1 – светодиод; 2 – конденсор; 3 – точечная диафрагма; 4 – контролируемый объектив; 5 – камера-окуляр.

Конденсор 2 создает изображение светодиода 1 в плоскости точечной диафрагмы 3. Контролируемый объектив 4 переносит в плоскость приемника излучения 5 увеличенное изображение дифракционной точки.

Схема установки является классической для решения задач измерения пятна рассеяния [9]. В установке реализована методика обработки результатов измерения, позволяющая проводить оцифровку с большой разрядностью при использовании в качестве приемника изображения видеокамеры с 8-битным АЦП [10]. Получение большой глубины оцифровки достигалось путем съемки серии кадров с временем экспозиции, кратным 2, и их последующей обработки по методике, близкой к методике, описанной в [11]. Подобная обработка позволяет за счет съемки каждого последующего кадра увеличивать разрядность оцифровки на единицу.

Измерение пятна рассеяния проводилось для пяти различных объективов. Количество кадров, используемое при обработке, определялось из условия, что на двух последних кадрах приращение энергии не должно составлять более 0,1 %. Стоит отметить, что для большинства случаев эквивалентная глубина оцифровки составляла не менее 14 бит.

Пример картины, полученной при суммировании кадров, показан на рис. 6.

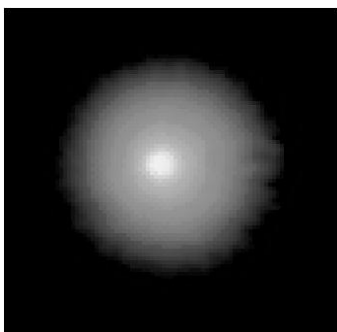


Рис. 6. Результат сложения кадров (масштаб яркости логарифмический).

В результате накопления кадров для каждого объектива был получен эквивалент 17-битной АЦП. В таблице приведены результаты эксперимента и теоретический расчет распределения полной энергии при различной глубине оцифровки.

На рис. 7 изображен график зависимости полной энергии от глубины оцифровки, соответствующий данным, приведенным в таблице.

Таблица

Зависимость полной энергии от глубины оцифровки сигнала

Разрядность АЦП, бит	Полная энергия, %					
	Теоретич. расчет	Объектив 1	Объектив 2	Объектив 3	Объектив 4	Объектив 5
1	34,7	18,7	33	5,5	13	23
2	62,4	27,1	62	15,6	32	37
3	72,8	34,5	68,5	28,5	47,4	46,2
4	78	39	79	37,3	59,5	53,8
5	80,6	43	85,5	47,2	69	60,6
6	85,8	46,5	89	58	74,5	67,2
7	88,8	53	91,5	68,6	79	74
8	91,6	63	93	77,2	82	84
9	93,3	86	94,3	88	85	89,5
10	95,4	100	96	95	91,4	94,7
11	96,6	100	98,2	97	99	98
12	97,7	100	99,5	100	100	99,2
13	98,5	100	100	100	100	99,8
14	99,2	100	100	100	100	100
15	99,8	100	100	100	100	100
16	99,9	100	100	100	100	100
17	100	100	100	100	100	100

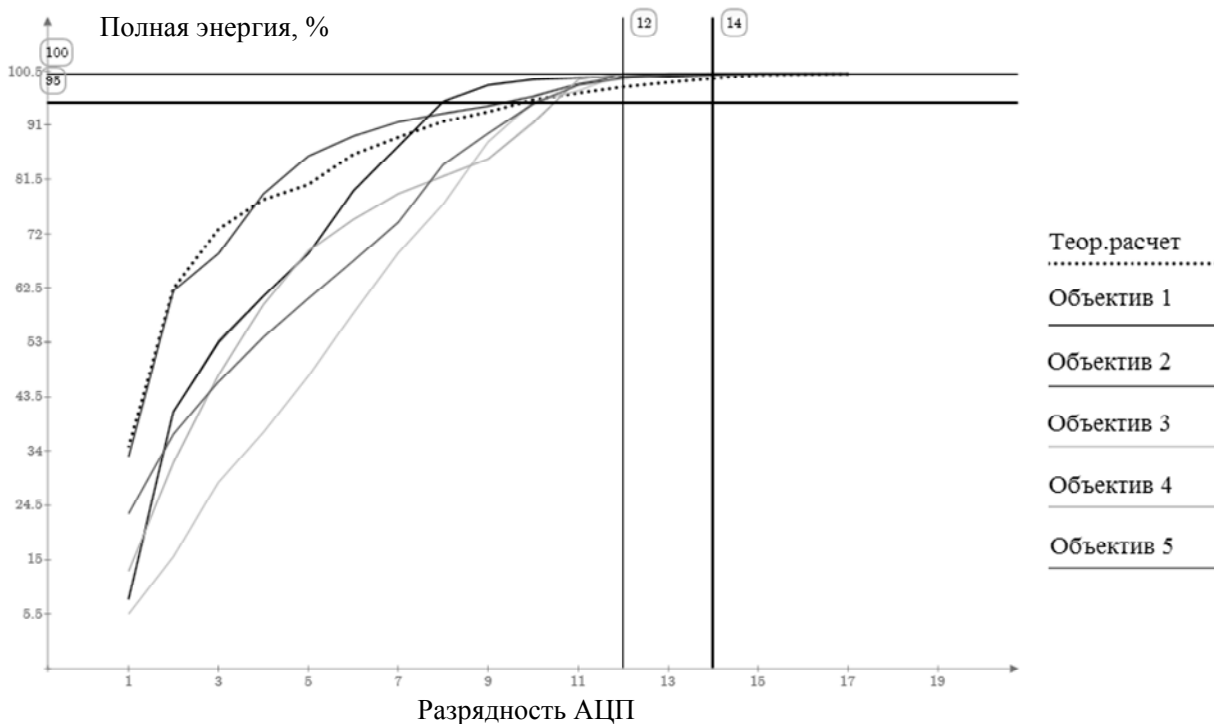


Рис. 7. График зависимости полной энергии пятна рассеяния (%) от глубины оцифровки для объективов 1–5 и теоретического расчета.

Из графика видно, что результаты эксперимента и теоретический расчет сходятся, причем при эквивалентной глубине оцифровки 14 бит ошибка измерения полной энергии не превышает 2 %.

Заключение

Исследование показало, что установка для измерения ФРТ на базе современного МФПУ может существенно упростить процедуру оценки качества ИК оптических трактов. Было показано, что для восстановления исходной ФРТ с высокой точностью необходимо использовать 14 битный АЦП или методы расширения динамического диапазона оптоэлектронного тракта. В качестве оптимального алгоритма восстановления исходной функции предложена кубическая интерполяция. При этом увеличение проекционной системы должно быть подобрано таким образом, чтобы на центральную часть ФРТ приходилось не менее 8 пикселей МФПУ, а тест-объект должен быть в 6 раз меньше пятна рассеяния исследуемого объектива. Разработаны оптические схемы проекционных объективов с увеличениями 4^x и 8^x для контроля качества ИК-объективов в диапазонах 3,5...5 мкм и 8...12 мкм.

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. – 94 с.
5. Скоков И. В. Многолучевые интерферометры. – М.: Машиностроение, 1969.
6. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения. Часть 6. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики – М., 1973.
8. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 2 (60). С. 16
9. Афанасьев В. А. Оптические измерения – М.: Высш. школа. 1981.
10. Ле Зуи Туан, Кирилловский В. К. // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 2 (60). С. 24.
11. Richards A., Cromwell B. Superframing: Scene Dynamic Range Extension of Infrared Cameras. – FLIR Systems, Indigo Operations.

PACS: 52.70.Kz

Justification of the requirements for the elements of the lens spot scattering measurement setup based on a matrix photodetector

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 May 30, 2017

Consideration is given to measuring methods of point spread function (PSF) for lens in mid-wave and long-wave IR range. The block diagram of spot measurement system based on a matrix photodetector realizing a direct method of PSF measuring is proposed. According to the results of mathematic modeling, the recommendations for selecting the main unit parameters of spot measurement system have been obtained. It is shown that it's necessary to use the 14 bit ADC or dynamic range expansion method to restore the original PSF. We consider the cubic interpolation as being the optimal algorithm for a signal reconstruction. A study of the influence of the test object relative size on the accuracy of restoring the original scattering spot has been made. The recommended ratio of the diameters of the test object and PSF of the explored lens is 1:6. The influence of the projection system magnification on the accuracy of the PSF of IR lens measurement was investigated. Recommendations of the choice of magnifications of projection systems have been given. There are proposed the optical schemes of projection lenses for quality control of IR optical paths in the ranges 3.5...5 μm and 8...12 μm . The results of ex-

periments confirming theoretical calculations in terms of determining the dependence of the total energy of the scattering spot on the depth of digitization of the signal are presented.

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

REFERENCES

1. G. V. Kreopalova, N. L. Lazareva, and D. T. Puryaev, *Optical Measurements* (Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987) [in Russian].
2. G. M. Mosyagin, V. B. Nemtinov, and E. N. Lebedev, *The Theory of Electro-Optical Systems* (Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990) [in Russian].
3. V. K. Kirillovsky and Le Zui Tuan, *Optical Measurements. Part 5.* (SPb GU, ITMO, 2005) [in Russian].
4. Yu. G. Yakushenkov, *Theory and Design of Opto-Electronic Devices* (Moscow, Logos, 1999,) [in Russian].
5. I. V. Skokov, *Multiray Interferometers* (Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987) [in Russian].
6. V. K. Kirillovsky and Le Zui Tuan, *Optical Measurements. Part 6.* (SPb GU, ITMO, 2008) [in Russian].
7. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Moscow, 1973) [in Russian].
8. V. K. Kirillovsky and Le Zui Tuan, *Nauchn. Techn. Vestnik SPb GU. No. 2(60), 16 (2009).*
9. V. A. Afanasiev, *Optical Measurements* (Moscow, Vysshaya Shkola, 1981) [in Russian].
10. V. K. Kirillovsky and Le Zui Tuan, *Nauchn. Techn. Vestnik SPb GU. No. 2 (60), 24 (2009),*
11. A. Richards and B. Cromwell, *Superframing: Scene Dynamic Range Extension of Infrared Cameras.* (FLIR Systems, Indigo Operations).