

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ С МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЕМНИКА

А.И. Андосов

das00@inbox.ru

SPIN-код: 6737-5635

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»

Аннотация

Рассмотрена проблема восстановления изображения при измерении характеристик оптических систем инфракрасного диапазона спектра. Решение проблемы с помощью применения фотоприемной матрицы в качестве основы измерительного канала позволит резко сократить стоимость установки и повышения конкурентоспособности на рынке в результате отказа от большого количества высокоточной механики и повышения оперативности контроля. Исследована возможность применения математических методов для восстановления изображения, полученного с матричного фотоприемника размером 20×20 пикселей при решении задачи контроля пятен рассеяния. Проведенное в рамках данной работы аналитическое исследование и методические расчеты позволили выбрать подходящий метод интерполяции. Решение задачи восстановления изображения после применения предложенного подхода показало минимальную погрешность при сравнении с экспериментальными данными. На основе выбранного метода создан программный модуль в среде MatLab, позволяющий рассчитывать диаметры световых колец. Адекватность построенной компьютерной модели проверена сравнением с решением, полученным с помощью MathCAD.

Ключевые слова

Матричный фотоприемник, инфракрасный спектр, интерполяция, метод обратных взвешенных расстояний, оптические системы, пятно рассеяния, функция рассеяния точки, аберрации оптической системы

Поступила в редакцию 12.11.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. В современном мире фотоприемники используются во множестве сфер человеческой деятельности, начиная от промышленности и заканчивая научными исследованиями. Активное развитие наблюдается в инфракрасном диапазоне спектра 0,75...14 мкм. Инфракрасные фотоприемники данного диапазона применяются в приборах ночного видения, системах самонаведения и управления огнем, системах поиска и обнаружения самолетов и беспилотных летательных аппаратов, системах передачи данных на большие расстояния по оптическим каналам.

Анализ существующих подходов. Основными элементами современных оптико-электронных приборов, работающих в инфракрасном диапазоне, являются оптическая система (объектив) и матричное фотоприемное устройство. При любом производстве необходимо отслеживать конечное качество полученной продукции. Матричный фотоприемник состоит из полупроводникового кристалла с матрицей фоточувствительных элементов (пикселей), состыкованного металлическими столбиками с кремниевой схемой предварительной обработки сигнала [1, 2]. Кристаллы получают специальными методами, наиболее распространенный среди них — эпитаксия [3, 4]. Качество матрицы можно отследить на различных этапах изготовления [4] хорошо отработанными методами, а измерение характеристик фотоприемного устройства в целом хорошо отработано. Вместе с тем процесс измерения качества изготовления оптической системы работающей в инфракрасном диапазоне спектра в настоящее время является сложной задачей, поскольку хорошо отработанные методы трудоемки или не являются полностью объективными.

Функция рассеяния точки (ФРТ) является наиболее информативной характеристикой оптической системы. Через преобразование Фурье она связана с модуляционной передаточной функцией (МПФ) системы. Также форма распределения энергии в ФРТ позволяет определить остаточные аберрации оптической системы и сделать вывод об ошибках ее изготовления [5].

Луч света, падая на поверхность фотоприемника (МФПУ), образует рисунок в виде чередующихся светлых и темных колец. Диаметры и количество энергии данных колец являются основными параметрами для вычисления ФРТ. Структурная схема установки и картина световых колец представлены на рис. 1.

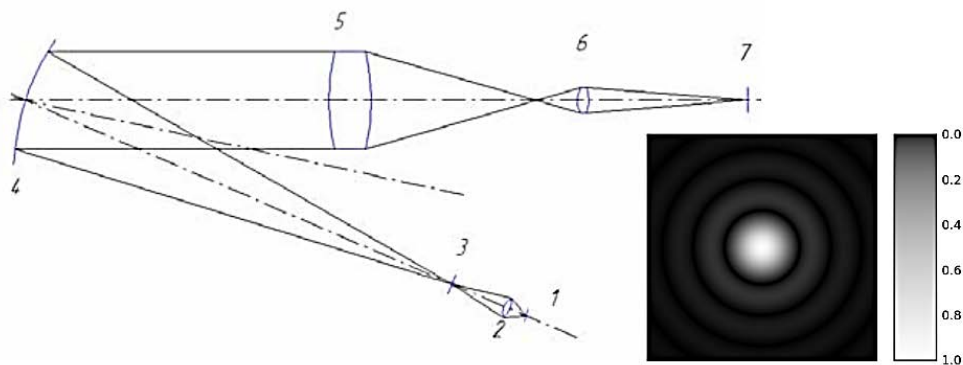


Рис. 1. Структурная схема установки:

1 — источник инфракрасного излучения; 2 — конденсор; 3 — точечная диафрагма;
4 — зеркальный коллиматор; 5 — контролируемый объектив; 6 — микрообъектив; 7 — МФПУ

Измерить диаметр напрямую, к сожалению, нельзя, поскольку инфракрасный диапазон не является видимым для человеческого глаза. Существуют два основных метода измерения энергетического распределения в пятне рассеяния

для объективов инфракрасного диапазона: прямой и косвенный. Косвенный метод предполагает измерение ошибки волнового фронта интерференционным методом с последующим пересчетом ее в ФРТ. Этот метод довольно трудоемкий в части математической обработки данных, к тому же в открытой печати в России нет данных о погрешностях этого метода. Прямые измерения позволяют проводить оперативный анализ производимых измерений. Наилучшие результаты по оперативности показывают установки, в которых в качестве приемника излучения используются МФПУ [6]. Луч света, попадая на МФПУ, проходит процедуру оцифровки, после которой получают дискретные значения — цифровую матрицу.

По полученной цифровой матрице можно восстановить изображение и определить диаметры световых колец. Получив матрицу значений после оцифровки, необходимо по ней рассчитать непрерывную *функцию рассеяния точки* (ФРТ, *point spread function, PSF*), которая описывает зависимость распределения освещенности от координат в плоскости изображения. Эта функция позволяет описать картину, получаемую системой формирования изображения при наблюдении точечного объекта.

Проблема измерения характеристик оптической системы в инфракрасном диапазоне спектра существует уже давно. В США и других странах успешно разработаны установки для определения ФРТ. Но погрешность производимых измерений является коммерческой тайной. Поэтому в России в настоящее время ведется разработка установки и методики измерения, которая позволит метрологически правильно решить данную задачу. Для этого требуется восстанавливать значения аналогового входного сигнала по имеющимся в матрице данным.

Проблема восстановления изображения возникла в момент перехода к цифровым технологиям. Решается она с помощью методов интерполяции. За много лет развития были созданы множество алгоритмов. Некоторые уникальные алгоритмы являются секретными и не появляются в открытом доступе.

На основе тестовых данных [5] были проведены методические расчеты с использованием одномерной интерполяции. В результате проведенных вычислений обнаружилось, что общая точность относительно результатов одномерного метода интерполяции возросла, однако ближе к границам матрицы появляются отрицательные значения энергии. Для преодоления этих недостатков был проведен аналитический обзор существующих методов и выбрана двумерная бикубическая интерполяция.

Рассматриваемая проблема встречается в геологической статистике [7]. Существует две основные группы применяемых методов интерполяции: детерминированные и геостатистические. Методы детерминированной интерполяции позволяют создавать поверхности из измеренных точек, основываясь или на степени схожести (обратные взвешенные расстояния), или уровне сглаживания (радиальные базисные функции). В геостатистических методах интерполяции используются статистические свойства измеренных точек. Рассмотрим детерминированные методы более подробно.

Детерминированные методы интерполяции можно подразделить на две группы: глобальные и локальные. Глобальные методы позволяют интерполировать значения на основании всего набора данных, а локальные — на основании измеренных точек в пределах окрестностей, которые являются меньшими пространственными областями внутри большей изучаемой территории. Детерминированная интерполяция может принуждать результирующую поверхность к прохождению сквозь значения данных или не принуждать вовсе.

В зависимости от того, проходит или не проходит построенная с помощью детерминистских методов поверхность через опорные точки, выделяют:

– *жесткий интерполятор*, который дает в опорной точке значение, равное измеренному значению;

– *нежесткий интерполятор*, который дает в опорной точке значение, отличное от измеренного значения, т. е. аппроксимирует значение в опорной точке.

Нежесткий интерполятор можно использовать для сглаживания возникающих острых вершин или углублений на выходной поверхности. Обратные взвешенные расстояния и радиальные базисные функции являются точными интерполяторами, тогда как глобальный полином, локальный полином, интерполяция ядра с барьерами и интерполяция диффузии с барьерами — это нежесткие интерполяторы.

Метод обратных взвешенных состояний. В методе обратных взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighting — IDW) однозначно предполагается, что объекты, которые находятся поблизости, более подобны друг другу, чем объекты, удаленные друг от друга [8]. Чтобы вычислить значение для неизмеренного положения, IDW использует измеренные значения вокруг интерполируемого местоположения. При IDW предполагается, что каждая измеренная точка оказывает локальное влияние, которое уменьшается с увеличением расстояния. Это придает больший вес точкам, расположенным ближе всего к интерполируемому местоположению. Вес точки уменьшается как функция от расстояния. Формула вычисления энергии в точке (x, y) имеет следующий вид [9]:

$$F(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(F_i(x, y)) \cdot F_i(x, y)}{\sum_{i=1}^N w_i(F_i(x, y))}, \quad (1)$$

где $F(x, y)$ — значение энергии в точке матрицы с координатами (x, y) ;

$w_i(x) = \left(\frac{1}{d(x, x_i)} \right)^p$ — весовая функция точки; $d(x, x_i)$ — функция расстояния между двумя точками пространства; N — число ближайших рассматриваемых точек; p — коэффициент сглаживания.

Выбор метода. Функция обратных взвешенных расстояний никогда не интерполирует значения выше максимального или ниже минимального измеренного значения. Это является важным пунктом в решаемой задаче, поскольку на границе матрицы значения энергии порядка 10^{-5} . На основе данного вывода был проведен вычислительный эксперимент, который показал отсутствие отрицательных значений в матрице в результате интерполяции. Результаты показаны на рис. 2. По вертикальной оси отмечены безразмерные нормированные значения энергии (E), падающей на МФПУ, по горизонтальной оси четные значения определяют вычисленные промежуточные значения энергии, нечетные — значения энергии, полученные с матрицы.

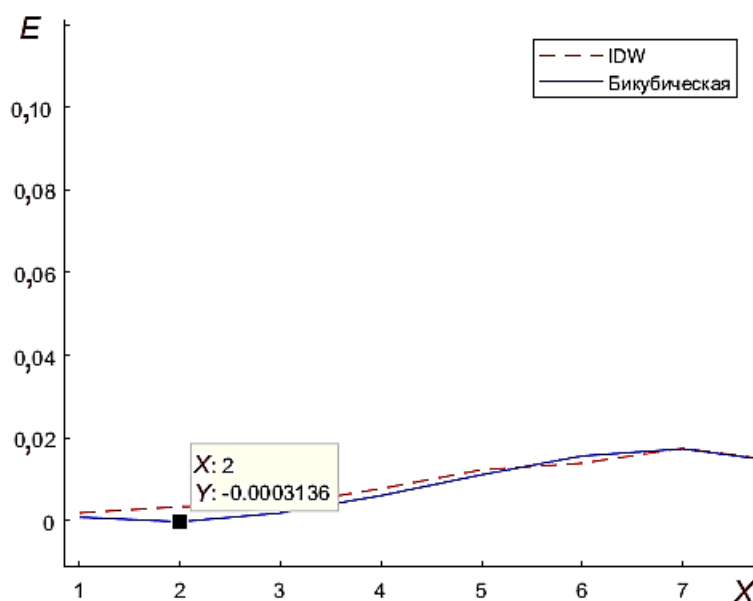


Рис. 2. Профиль поверхности после применения интерполяций при $Y = 10$

Идеальная функция концентрации энергии была рассчитана в MathCAD по формуле [10]:

$$F(x, y) = \int_{-x}^x \int_{-y}^y \left(\frac{2 \cdot J_1(a(x^2 + y^2))}{(x^2 + y^2)} \right)^2 dx dy, \quad (2)$$

где $F(x, y)$ — функция концентрации энергии в прямоугольной области; a — масштабный коэффициент учитывающий оптические свойства; J_1 — функция Бесселя первого рода первого порядка.

Затем производился поиск диаметра светового кольца, в котором содержится 83 % всей энергии, падающей на МФПУ. В результате этого подхода получили, что диаметр самого энергоемкого кольца 6,4213 пиксела матрицы. В работе создан программный модуль, предназначенный для нахождения мини-

мального радиуса окружности, в которой содержится заданное количество энергии. Для расчетов использована следующая формула. Пределы интегрирования изменены, чтобы по формуле (2) ограничивать окружность:

$$E = \int_{C-R}^{C+R} \int_{D-\sqrt{R^2-(x-C)^2}}^{D+\sqrt{R^2-(x-C)^2}} F(x,y) dx dy \quad (3)$$

где E — энергия в области, ограниченной световым кольцом радиуса R ; $F(x,y)$ — функция энергии, рассчитываемая по формуле (1); R — радиус светового кольца; D — y -координата точки максимума энергии; C — x -координата точки максимума энергии.

Диаметр самого энергоемкого кольца, который был рассчитан с помощью разработанного программного модуля, составил 6,4214 пиксела матрицы МФПУ. Расхождение численного результата, полученного с помощью формулы (3) в программном модуле, с решением, полученным с помощью MathCAD, составило 3 %.

Заключение. В статье рассмотрена проблема восстановления изображения, полученного с матричного фотоприемника размером 20×20 пикселей. Числовые расчеты, проведенные для вычисленных значений энергий, подтвердили адекватность построенной модели. Созданный программный модуль импортирован в существующую вычислительную систему. Применение модуля позволило автоматизировать процесс измерений и повысить достоверность полученных данных. Разработанное программное обеспечение было интегрировано в существующую измерительную систему и позволило решить проблему оперативного контроля качества продукции.

Литература

- [1] Балиев Д.Л., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д. и др. Многорядное ФПУ для дистанционного зондирования Земли в шести спектральных полосах ИК диапазона 3-12,5 мкм. *XXIV Межд. науч.-тех. конф. и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения*. М., НПУ Орион, 2016, с. 39.
- [2] Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. СПб., НИУ ИТМО, 2013.
- [3] Бовина Л.А., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д. и др. Матричные фотоприемники формата 128x128 и 384x288 на основе фотодиодов из Cd_xHg_{1-x}Te. *Прикладная физика*, 1999, № 3, с. 32–41.
- [4] Kawamura T. Fast phase retrieval from reflection high energy electron diffraction intensities during growth. *JSSNT*, 2018, vol. 16, pp. 97–100. DOI: 10.1380/ejssnt.2018.97 URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/ejssnt/16/0/16_97/_article/-char/en
- [5] Полесский А.В., Юдовская А.Д. Анализ требований к фотоприемному тракту для установок измерения пятен рассеяния на основе матричных фотоприемных устройств. *Успехи прикладной физики*, 2016, № 4, с. 517–522.

- [6] Демидов В.И., Колесова А.А., Кононов М.Е. и др. Исследование влияния динамического диапазона фотоприемных устройств на точность измерения функций рассеяния точки оптических систем. *Прикладная физика*, 2015, № 1, с. 66–71.
- [7] Что такое геостатистика? ArcGIS Pro: веб-сайт. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/what-is-geostatistics-.htm> (дата обращения 01.03.2018)
- [8] De Mesnard L. Pollution models and inverse distance weighting: Some critical remarks. *Comput. Geosci.*, 2013, vol. 52, pp. 459–469. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.11.002 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009830041200372X>
- [9] Павлова А.И. Анализ методов интерполирования высот точек для создания цифровых моделей рельефа. *Автометрия*, 2017, т. 53, № 2, с. 86–94.
- [10] Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. СПб., НИУ ИТМО, 2005.

Андосов Артем Игоревич — студент кафедры «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер-программист АО «НПО «Орион», Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Романова Татьяна Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Полесский Алексей Викторович, кандидат технических наук, главный метролог АО «НПО «Орион»», Москва, Российская Федерация.

**SOFTWARE MODULE FOR OBTAINING AN IMAGE
FROM A MATRIX PHOTO RECEIVER**

A.I. Andosov

das00@inbox.ru

SPIN-code: 6737-5635

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
RFSRCE "RD&P Center "Orion", Moscow, Russian Federation**

Abstract

The article considers the problem of image reconstruction while measuring the characteristics of optical systems of the infrared range of the spectrum. Solving the problem by using a photodetector matrix as the basis of the measuring channel will dramatically reduce installation costs and increase competitiveness in the market as a result of the rejection of a large number of high-precision mechanics and of the increased control efficiency. It is researched the possibility of using mathematical methods to reconstruct an image obtained from a matrix photodetector with a size of 20–20 pixels in solving the problem of monitoring scatter spots. The analytical study and methodological calculations carried out within the framework of this work have made it possible to choose the appropriate interpolation method. The solution of the problem of image reconstruction after applying the proposed approach has showed a minimum error in comparing with experimental data. A software module was created in MatLab based on the selected method, which allows to calculate the diameters of light rings. The adequacy of the constructed computer model is verified by comparison with the solution obtained using MathCAD.

Keywords

Digital image, noise model, digital image noise, biometric data, recognition, biometric image, fingerprint, synthesis of biometric images

Received 06.11.2018

© Bauman Moscow State Technical
University, 2019

References

- [1] Baliev D.L., Boltar' K.O., Burlakov I.D. et al. [Multiple-row photodetector for remote Earth sensing in six spectral bands 3-1.25 μm]. *XXIV Mezhd. nauch.-tekh. konf. i shkola po fotoelektronike i priboram nochnogo videniya* [XXIV Int. sci.-tech. conf. on photoelectronics and night vision systems]. Moscow, NPU Orion Publ., 2016, p. 39. (in Russ.)
- [2] Gorbachev A.A., Korotaev V.V., Yaryshev S.N. Tverdotel'nye matrichnye fotopreobrazovateli i kamery na ikh osnove [Solid array photo-converters and cameras on their base]. Sankt-Petersburg, NIU ITMO Publ., 2013. (in Russ.)
- [3] Bovina L.A., Boltar' K.O., Burlakov I.D. et al. Staring CdHgTe 128x128 and 384x288 focal plane arrays. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics], 1999, no. 3, pp. 32–41. (in Russ.)
- [4] Kawamura T. Fast phase retrieval from reflection high energy electron diffraction intensities during growth. *JSSNT*, 2018, vol. 16, pp. 97–100. DOI: 10.1380/ejsnt.2018.97 URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/ejsnt/16/0/16_97/_article/-char/en

- [5] Poleskiy A.V., Yudovskaya A.D. Analysis of requirements to a photo receiving path for measuring a spot of confusion by FPA. *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics], 2016, no. 4, pp. 517–522. (in Russ.)
- [6] Demidov V.I., Kolesova A.A., Kononov M.E. et al. Research of influence of the photodetectors' dynamic range on the measurement accuracy of the optical system's point spread function. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics], 2015, no. 1, pp. 66–71. (in Russ.)
- [7] Chto takoe geostatistika? [What is geostatics?] ArcGIS Pro: website.
URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/what-is-geostatistics-.htm> (accessed 01.03.2018) (in Russ.)
- [8] De Mesnard L. Pollution models and inverse distance weighting: Some critical remarks. *Comput. Geosci.*, 2013, vol. 52, pp. 459–469. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.11.002
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009830041200372X>
- [9] Pavlova A.I. Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models. *Avtometriya*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 86–94. (in Russ.) (Eng. version: *Optoelectron. Instrument. Proc.*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 171–177. DOI: 10.3103/S8756699017020108
URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S8756699017020108>
- [10] Kirillovskiy V.K. Opticheskie izmereniya. Ch. 4. Otsenka kachestva opticheskogo izobrazheniya i izmerenie ego kharakteristik [Optical measurements. P. 4. Quality assessment of optical image and measuring its characteristics]. Sankt-Petersburg, NIU ITMO Publ., 2005. (in Russ.)

Andosov A.I. — Student, Department of Computer Software and Information Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation; software engineer, RFSRCE “RD&P Center “Orion”, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — T.N. Romanova, Ph.D., Assist. Professor, Department of Computer Software and Information Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — A.V. Poleskiy, Ph.D., chief metrologist, RFSRCE “RD&P Center “Orion”, Moscow, Russian Federation.