

УДК 681.7:621.383

Исследование влияния динамического диапазона фотоприемных устройств на точность измерения функций рассеяния точки оптических систем

В. И. Демидов, А. А. Колесова, М. Е. Кононов, А. В. Лобачев,
А. В. Полесский, Н. А. Семенченко, К. А. Хамидуллин

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по влиянию динамического диапазона на точность измерения функции рассеяния точки (ФРТ) оптических систем. Показано, что для корректного измерения ФРТ и расчета на ее основе пятна рассеяния по заданному уровню концентрации энергии необходимо использование фотоприемных устройств ФПУ, обеспечивающих реальный динамический диапазон при оцифровке не менее 14 бит.

PACS: 42.30.Va

Ключевые слова: функция рассеяния точки, аналого-цифровой преобразователь, динамический диапазон, фотоприемное устройство.

Введение

Любая оптическая система (ОС) формирует изображение с определенными искажениями, вызванными аберрациями и дифракционными явлениями. На этапе оптического расчета, когда ОС представляет собой идеализированную модель, определяется наилучшее качество изображения, которым она может обладать. При производстве ОС из-за наличия дефектов изготовления механических и оптических деталей, а также принципиально неустранимых погрешностей сборочных операций качество изображения, получаемого с помощью ОС, всегда ниже расчетного.

Для контроля качества изображения, получаемого с помощью ОС, используются как прямые, так и косвенные методы, использующие различные критерии, основанные на построении пограничной кривой, измерении функции рассеяния точки/линии (ФРТ/ФРЛ), определении разрешения или частотно-контрастной характеристики

(ЧКХ) и измерении ошибок проходящего волнового фронта интерференционными методами.

Существенным недостатком косвенных методов является сложность обработки полученных данных. Кроме того, в отличие от прямых, косвенные методы не позволяют определить влияние ряда факторов, ухудшающих качество изображения, таких как [1]:

- мелкоструктурные дефекты оптических поверхностей (например, возникающие при ретуши крупногабаритной оптической поверхности малым полировальником), а также их остаточная шероховатость;

- мелкоструктурные дефекты оптических сред (свилы, неоднородности, включения, мутность);

- дефекты оптических покрытий;

- дефекты склеек;

- рассеянный свет;

- блики;

- свет, отраженный от элементов оправы ОС и элементов внутренней конструкции оптического прибора.

Для проведения точного контроля качества изображения в ответственных случаях (астрономической и микроскопической оптике, для объективов, входящих в состав контрольно-измерительного оборудования [2—4] и т. д.) необходимо учитывать вышеперечисленные факторы.

Наиболее универсальным прямым методом, дающим более полную информацию о структуре изображения, является построение ФРТ, т. е. распределения освещенности в изображении бесконечно удаленной светящейся точки в плоскости наилучшего изображения [5]. Именно на основе построения и последующего анализа ФРТ определяется такой параметр ОС, как размер пятна

Демидов Владимир Ильич, начальник лаборатории¹.

Колесова Анастасия Александровна, студент².

Кононов Михаил Евгеньевич, инженер¹.

Лобачев Антон Васильевич, студент².

Полесский Алексей Викторович, главный метролог¹.

Семенченко Наталья Александровна, инженер¹.

Хамидуллин Камиль Алиевич, начальник отдела¹.

¹ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

E-mail: orion@orion-ir.ru

²МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2014 г.

© Демидов В. И., Колесова А. А., Кононов М. Е., Лобачев А. В., Полесский А. В., Семенченко Н. А., Хамидуллин К. А., 2015

рассеяния по заданному уровню концентрации энергии.

В настоящее время для объективных и воспроизводимых результатов при построении ФРТ и измерении пятна рассеяния используются фотоэлектрические методы, реализуемые в измерительных системах с использованием приемников излучения как одноэлементных, так и матричных.

По своей структуре ФРТ имеет очень большой перепад яркостей, и поэтому для его регистрации необходимо использовать фотоприемные тракты с высоким динамическим диапазоном.

Как показывает практика, наиболее существенным фактором, ограничивающим динамический диапазон современных камер, является разрядность встроенного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), составляющая 8—10 бит [6]. При аналого-цифровом преобразовании непрерывный сигнал на входе представляется в виде дискретного, при этом существует пороговое значение, ниже которого сигнал не будет обнаруживаться. Так, при обработке 8-битным АЦП используется 256 разрядов, а это означает, что если сигнал будет составлять менее 1/256 от максимально фиксированного значения, то он будет теряться при обработке.

Несмотря на то, что величина потерянного сигнала невелика, данный сигнал присутствует на большой площади и может вносить существенный вклад в общую энергию, из-за чего при определении размера пятна рассеяния по заданному уровню концентрации энергии измеренная величина будет значительно отличаться от действительной.

Для корректного построения ФРТ с целью последующего построения ЧКХ требуется фиксация сигнала с яркостным перепадом не менее чем в 10^3 — 10^5 раз [1]. К сожалению, не было найдено данных о требованиях к динамическому диапазону при измерении ФРТ с целью последующего определения пятна рассеяния по заданному уровню концентрации энергии.

В данной работе были проведены расчетные и практические исследования, направленные на определение требований к динамическому диапазону фотоприемных трактов, применяемых при измерении ФРТ и размера пятна рассеяния. С этой целью было проведено моделирование влияния разрядности АЦП на ошибку измерения величины пятна рассеяния по заданному уровню концентрации энергии.

Теоретические исследования влияния глубины оцифровки на точность измерения ФРТ

При моделировании были использованы стандартные функции рассеяния, описывающие распределение энергии в пятне в следующих случаях:

1. ФРТ дифракционно-ограниченной ОС с круглым зрачком;
2. ФРТ дифракционно-ограниченной ОС с центральным экранированием;
3. функция рассеяния, соответствующая изображению точечной диафрагмы, построенной дифракционно-ограниченной ОС с круглым зрачком;
4. функция рассеяния, соответствующая изображению точечной диафрагмы, построенной дифракционно-ограниченной ОС с центральным экранированием;
5. ФРТ ОС с сильными аберрациями.

Математические выражения, описывающие ФРТ для этих случаев [7, 8], приведены ниже:

1. ФРТ дифракционно-ограниченной ОС с круглым зрачком:

$$H(r) = \left(\frac{2 \cdot J_1 \left(2 \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r \right)}{2 \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r} \right)^2, \quad (1)$$

где J_1 — функция Бесселя первого рода первого порядка; α — апертура ОС в пространстве предметов; λ — длина волны, мкм.

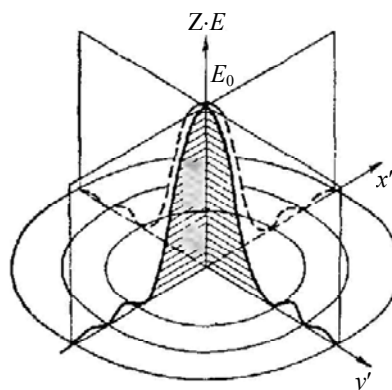


Рис. 1. ФРТ дифракционно-ограниченной ОС с круглым зрачком

2. ФРТ дифракционно-ограниченной ОС с центральным экранированием:

$$H(r) = \frac{1}{(1 - \eta^2)^2} \times \left(\frac{2 \cdot J_1 \left(2 \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r \right)}{2 \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r} - \eta^2 \cdot \frac{2 \cdot J_1 \left(2 \cdot \eta \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r \right)}{2 \cdot \eta \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r} \right)^2, \quad (2)$$

где η — коэффициент центрального экранирования.

3. Функция рассеяния, соответствующая изображению точечной диафрагмы, построенной дифракционно-ограниченной ОС с круглым зрачком

Функция распределения энергии в пятне будет являться свёрткой ФРТ с функцией, описывающей точечную диафрагму:

$$Sv(r) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(r-t) \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{d \cdot \beta}\right) \cdot dt}{\int_{-\infty}^{\infty} H(t) \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{d \cdot \beta}\right) \cdot dt}, \quad (3)$$

где d — диаметр отверстия точечной диафрагмы; β — увеличение оптической системы; $H(r)$ вычисляется по формуле (1).

4. Функция рассеяния, соответствующая изображению точечной диафрагмы, построенной дифракционно-ограниченной ОС с центральным экранированием

Функция распределения энергии в пятне будет являться свёрткой ФРТ с функцией, описывающей точечную диафрагму:

$$Sv(r) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(r-t) \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{d \cdot \beta}\right) \cdot dt}{\int_{-\infty}^{\infty} H(t) \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{d \cdot \beta}\right) \cdot dt}, \quad (4)$$

где d — диаметр отверстия точечной диафрагмы; β — увеличение оптической системы; $H(r)$ вычисляется по формуле (2).

5. ФРТ ОС с сильными aberrациями

$$H(x, y) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

где $\sigma = \frac{\rho}{\sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{1-P}\right)}}$ — среднеквадратичное отклонение (ρ — радиус кружка, в котором заключено количество энергии P).

Преобразование сигнала АЦП описывалось следующей функцией:

$$F(r, \xi) = \begin{cases} f(r) - \xi, & f(r) - \xi > 0 \\ 0, & f(r) - \xi \leq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где $f(r)$ — ФРТ ОС;

ξ — значение сигнала, соответствующее одному разряду АЦП.

Функция, описывающая потерю энергии при оцифровке, может быть представлена следующим образом:

$$\chi(\xi) = 1 - \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(r, \xi) \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr}{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(r, 0) \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr}. \quad (7)$$

Вид функции $\chi(\xi)$ для случая ФРТ дифракционно-ограниченной ОС с круглым зрачком представлен на рис. 2. Стоит обратить внимание, что ξ — минимально фиксируемый сигнал и, например, для 8-битного АЦП $\xi = 1/2^8 = 4 \cdot 10^{-3}$. Для остальных случаев ФРТ вид графика аналогичен.

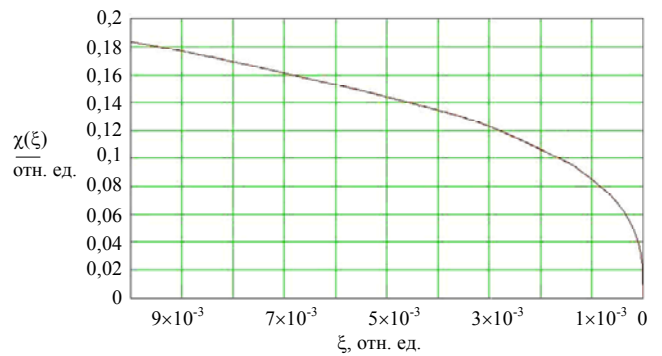


Рис. 2. График функции, описывающий потерю энергии при оцифровке, для случая дифракционно-ограниченной ОС с круглым зрачком

Данные о величине фиксируемой энергии для пяти рассматриваемых случаев с различной разрядностью АЦП приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты теоретического расчета величины фиксируемой энергии

Кол-во бит	Фиксируемая энергия, %				
	1	2	3	4	5
8 бит	87,00	83,10	96,20	93,70	97,40
10 бит	91,80	88,20	97,90	96,30	99,21
12 бит	94,90	93,10	98,80	97,90	99,78
14 бит	96,70	95,80	99,29	98,80	99,94
16 бит	97,90	97,50	99,59	99,36	99,98

Практическая апробация результатов

С целью подтверждения полученных данных была поставлена серия экспериментов, в ходе которых было проведено измерение пятна рассеяния. Для измерения пятна рассеяния была создана специальная экспериментальная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 3.



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

Схема установки является классической для решения задач измерения пятна рассеяния [5, 9]. В установке реализована оригинальная методика обработки результатов измерения, позволяющая проводить оцифровку с большой разрядностью при использовании в качестве приемника изобра-

жения видеокамеру с 8-битным АЦП. 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 [1, 10]. Подобная обработка позволяет за счет съемки каждого последующего кадра увеличивать разрядность оцифровки на единицу.

Измерение пятна рассеяния проводилось на трех различных объективах. Один из них был подробно описан в статье [11]. 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.

Данные, полученные в ходе эксперимента, позволили построить зависимость концентрации энергии в пятне при различной глубине оцифровки (рис. 4). Результаты измерений приведены в табл. 2.

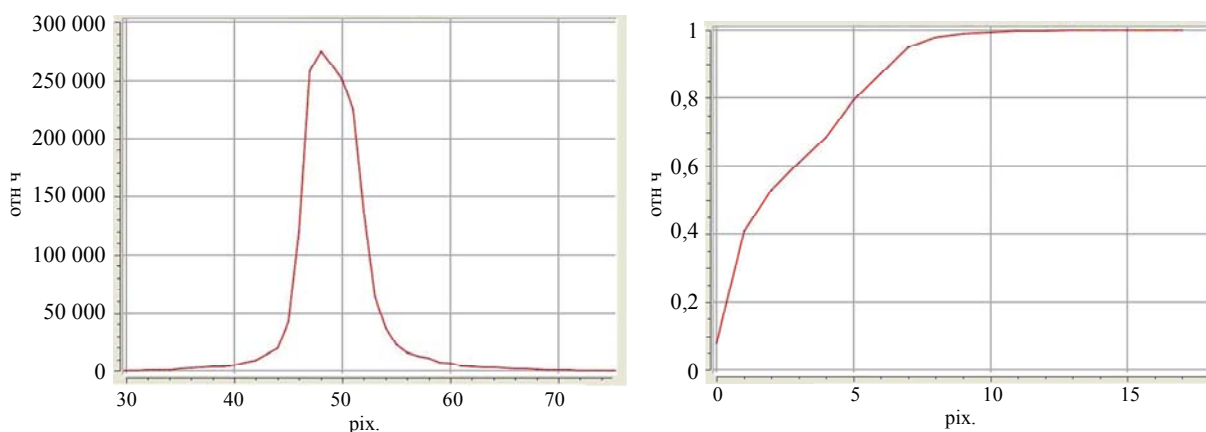


Рис. 4. Распределение освещенности в пятне и зависимость концентрации энергии при различной глубине оцифровки

Таблица 2

Экспериментальные результаты распределения энергии при различной глубине оцифровки

Кол-во бит	Фиксируемая энергия, %		
	Объектив 1	Объектив 2	Объектив 3
8	95,22	97,89	78,89
9	97,90	98,99	85,77
10	98,93	99,45	90,60
11	99,39	99,71	95,27
12	99,74	99,87	97,88
13	99,83	99,95	99,48
14	99,91	99,99	100
15	99,96	100	—
16	99,98	—	—
17	99,99	—	—
18	100	—	—

Данные в табл. 1 и 2 отличаются, хоть и имеют общий характер. Указанное отличие происходит из-за того, что в действительности для приема энергии используется матричный приемник, имеющий определенный размер элемента разложения (пикселя), и при приеме оптического сигнала происходит его усреднение по площади. За счет этого усреднения происходит накопление слабых сигналов по площади, и требования к динамическому диапазону приемного тракта несколько уменьшаются. Хорошее соответствие данных, приведенных в табл. 1 и 2, может быть достигнуто, если пятно рассеяния будет не менее чем 100×100 пикселей. В серии экспериментов пятно рассеяния занимало площадь 30×30 пикселей.

Заключение

Полученные в данной работе результаты работы говорят о необходимости применения при контроле пятна рассеяния приемников излучения с глубиной оцифровки не менее 12—16 бит. В этом случае ошибка измерения концентрации энергии по заданному уровню не будет превышать 2—7 %. Стоит отметить, что при измерении пятна рассеяния камерой с 8-битной оцифровкой наблюдаемая энергия будет составлять 80—85 % от реальной. Полученные результаты верны для измерения ФРТ и размеров пятен рассеяния в УФ, видимом, ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах, поскольку в этих диапазонах можно практически полностью устранить фоновую засветку.

В отличие от УФ и видимого диапазонов, в которых уже существуют матричные фотоприемники на основе кремния с малым шумом и большой глубиной оцифровки, для решения задач измерения ФРТ и размеров пятен рассеяния в коротковолновом ИК-диапазоне требуется или создание специализированных приемников излучения с увеличенным динамическим диапазоном и глубиной оцифровки, или применение методики,

описанной в данной статье. Также стоит отметить, что в любом случае к фотоприемникам, применяемым при измерении ФРТ, предъявляются повышенные требования по линейности зависимости выходного сигнала от мощности падающего излучения. Следует учитывать, что при работе с мало-разрядными фотоприемниками при склеивании кадров возникают нелинейности при обработке информации как верхней части диапазона, так и нижней. Нелинейность в нижней части диапазона обусловлена слишком грубой оцифровкой пикселей с малой яркостью.

При измерении пятен в средне- и длинноволновом ИК-диапазонах требования к динамическому диапазону ФПУ могут отличаться, и данный вопрос должен быть исследован отдельно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения. Часть 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. СПб ГУ ИТМО. 2008.
2. Демидов В. И., Колесова А. А., Полесский А. В. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 625.
3. Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 20.
4. Демидов В. И., Залетаев Н. Б., Полесский А. В. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 11.
5. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. — М.: Машиностроение, 1987.
6. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы — М.: Физматкнига, 2007.
7. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.
8. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н. Теория оптико-электронных систем: Учебник для студентов вузов по оптическим специальностям. — М.: Машиностроение, 1990.
9. Афанасьев В. А. Оптические измерения. — М.: Недра, 1968.
10. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан // Научно-технический вестник СПб ГУ ИТМО. 2009. № 2(60). С. 24.
11. Колесова А. А., Полесский А. В., Хамидуллин К. А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 63.

Research of influence of the photodetectors' dynamic range on the measurement accuracy of the optical system's point spread function

V. I. Demidov, A. A. Kolesova, M. E. Kononov, A. V. Lobachyov,
A. V. Polesskiy, N. A. Semenchenko, and K. A. Khamidullin

Orion R&P Association Inc.
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received December 29, 2014

The results of theoretical and experimental researches of the influence of the dynamic range on the measurement accuracy of the optical system's (OS) point spread function (PSF) are given. The necessity of using photodetectors (PD), which provide real dynamic range at least 14 bits for digitizing, for the correct measurements of the PSF and the calculation of the circle of confusion by a given level of concentration of energy, is shown.

PACS: 42.30.Va

Keywords: point spread function, analog-to-digital converter, dynamic range, photodetectors.

REFERENCES

1. V. K. Kirillovsky and Le Zui Tuan, *Optical Measurements. Part 6.* (SPb GU, ITMO, 2008) [in Russian].
2. V. I. Demidov, A. A. Kolesova, A. V. Polesskiy, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 625 (2013).
3. K. O. Boltar and N. I. Iakovleva, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 20 (1999).
4. V. I. Demidov, N. B. Zaletaev, A. V. Polesskiy, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 11 (2013).
5. G. V. Kreopalova, N. L. Lazareva, and D. T. Purayaev, *Optical Measurements* (Mashinostroenie, Moscow, 1987) [in Russian].
6. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base.* (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].
7. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems* (Plenum Press, New York and London, 1975; Mir, Moscow, 1978).
8. G. M. Mosyakin, V. B. Nemtinov, and E. N. Lebedev, *Theory of Optic-Electron Systems.* (Mashinostroenie, Moscow, 1990) [in Russian].
9. V. A. Afanas'ev, *Optical Measurements.* (Nedra, Moscow, 1968) [in Russian].
10. V. K. Kirillovsky and Le Zui Tuan, *Nauchn. Techn. Vestnik SPb GU.* No. 2(60), 24 (2009).
11. A. A. Kolesova, A. V. Polesskiy, K. A. Khamidullin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 63 (2013).