

Анализ влияния динамического диапазона регистрирующей камеры на точность измерения пятен рассеяния оптических систем

А.Д. Деомидов¹, А.В. Лобачев^{1,2}, Тресак В.К.^{1,2}, П.В. Храбров³

¹ Научно-производственное объединение «Орион»

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

³ АО «Швабе-Фотоприбор»

Любая оптическая система (ОС) формирует изображение с определенными искажениями, вызванными аберрациями и дифракционными явлениями. Для контроля качества изображения, формируемого оптическими системами, в ответственных случаях (например, для объективов, входящих в состав контрольно-измерительного оборудования [1–3] и т.д.) учитывают такие факторы, как [4] мелкоструктурные дефекты поверхностей и сред, дефекты покрытий и склеек, блики и т.п. Универсальным методом, дающим наиболее полную информацию о структуре изображения, является построение функции рассеяния точки (ФРТ) – 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 рассеяния по заданному уровню концентрации энергии.

Измерение ФРТ ОС, работающих в видимом диапазоне, может быть осуществлено с помощью камер на основе ПЗС-матриц. Расчетное ФРТ дифракционно-ограниченной ОС имеет большие перепады яркости. Поэтому для получения подробной структуры ФРТ необходимо регистрировать одновременно как слабо, так и сильно освещенные области, что требует большого динамического диапазона.

На практике наиболее существенным фактором, ограничивающим динамический диапазон современных камер, является разрядность встроенного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), составляющая 8-10 бит [6].

В ходе работы были проведены 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 aberrациями.

Данные о величине фиксируемой энергии для пяти рассматриваемых случаев с различной разрядностью АЦП приведены в таблице 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

Для подтверждения теоретических исследований проведены эксперименты на специально созданной установке измерений пятна рассеяния (с классической для данных задач схемой [5, 7]), в которой реализована оригинальная методика обработки результатов измерения, позволяющая проводить оцифровку с большой разрядностью при использовании в качестве приемника изображения 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 описанной в [4]. 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 [8]. 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 (рисунок 1). Результаты измерений приведены в таблице 2.

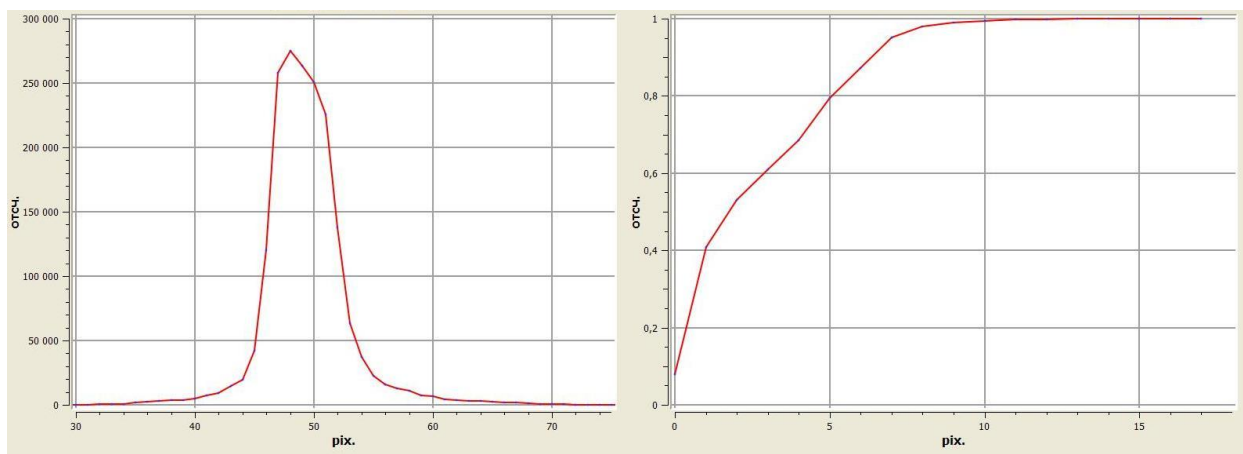


Рисунок 1 – Распределение освещенности в пятне и зависимость концентрации энергии при различной глубине оцифровки

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 таблицах 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 таблице 1 и 2, может быть достигнуто, если пятно рассеяния будет не менее чем 100x100 пикселей. В серии экспериментов пятно рассеяния занимало площадь 30x30 пикселей

Установлено, что при измерении пятна рассеяния необходимо применять камеры с приемниками излучения, имеющими глубину оцифровки не менее 12-16 бит, тогда ошибка измерения концентрации энергии не превышает 2-7 %. При измерении пятна

рассеяния камерой с 8-битной оцифровкой наблюдаемая энергия будет составлять 80-85 % от реальной.

Результаты верны для измерения ФРТ в УФ, видимом и коротковолновом ИК диапазонах, т.к. в них можно практически полностью устранить фон. Для измерения ФРТ и размеров пятен рассеяния в коротковолновом диапазоне ИК требуется создание специализированных приемников излучения с увеличенным динамическим диапазоном или применение специальных методик, вроде той, которая описана в данной работе.

Следует учитывать, что к камерам, применяемым для измерения ФРТ, предъявляются повышенные требования по линейности зависимости выходного сигнала от мощности падающего излучения, и что при работе с малоразрядными фотоприемниками при склеивании кадров возникают нелинейности при обработке информации как в нижней части диапазона (обусловлено слишком грубой оцифровкой пикселей с малой яркостью), так и в верхней.

Литература

1. Демидов В.И., Колесова А.А., Полесский А.В., Смирнова Е.А., Хамидуллин К.А. // Разработка оптического зонда для стенда измерения фотоэлектрической связи. Прикладная физика, 2013, том 1, № 5, стр. 625-630.
2. Болтарь К.О., Яковлева Н.И. // Исследование фотоэлектрических размеров элементов в матричных ИК-фотоприемниках. Прикладная физика, 1999, № 2, стр. 20-24.
3. Демидов В.И., Залетаев Н.Б., Полесский А.В., Смирнова Е.А., Семенченко Н.А., Хамидуллин К.А. // Оптический зонд для измерения фотоэлектрической связи в средневолновом ИК-диапазоне. Прикладная физика, 2013, № 6, стр. 11-16.
4. Кирилловский В.К., Ле Зуи Туан // Оптические измерения. Часть 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. СПб ГУ ИТМО, 2008. – 131 с.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. «Оптические измерения» – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.: ил.
6. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. «Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы» – М.: Физматкнига, 2007. – 384 с.
7. Афанасьев В.А. «Оптические измерения» – М.: Недра, 1968. – 255 с.
8. Колесова А.А., Полесский А.В., Хамидуллин К.А., Юдовская А.Д. // Разработка и исследование объектива ультрафиолетового диапазона спектра. Прикладная физика, 2013, № 5, стр. 63-66.