

## Методика измерения пятна рассеяния объектива с использованием матричного фотоприемного устройства

А. И. Андосов, А. В. Полесский, Т. Н. Романова, А. Д. Юдовская, М. А. Тришенков

*В статье приведены результаты экспериментального подтверждения методики измерения функции рассеяния точки и пятен рассеяния объективов с помощью матричного фотоприемного устройства. В ходе работы был поставлен эксперимент и проведено его математическое моделирование. Требуемый динамический диапазон системы достигнут путем обработки массива кадров с различным временем накопления. Для проведения эксперимента было разработано специализированное программное обеспечение (ПО). Сравнение результатов, полученных с помощью математической модели и экспериментальных данных, подтверждает разработанные ранее требования к методике измерения пятен рассеяния с помощью матричного фотоприемного устройства.*

*Ключевые слова:* пятно рассеяния, методика измерения, эксперимент, программное обеспечение, погрешность измерения.

**Ссылка:** Андосов А. И., Полесский А. В., Романова Т. Н., Юдовская А. Д., Тришенков М. А. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 5. С. 508.

**Reference:** A. I. Andosov, A. V. Polesskiy, T. N. Romanova, A. D. Yudovskaya, and M. A. Trishenkov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (5), 508 (2019).

### Введение

Одним из наиболее информативных и оперативных методов контроля качества объективов (видимого и инфракрасного диапазонов – ИК) является контроль их пятен рассеяния с помощью матричного фотоприемного устройства. В отличие от интерференционного

контроля, данный метод позволяет проводить контроль не только функции рассеяния точки (ФРТ), но и пятна рассеяния, а также обнаруживать блики, переотражения, двоение изображения и проводить контроль полихроматических аберраций.

Стенд измерения пятен рассеяния объективов состоит из источника излучения, конденсора, тест-объекта в виде круглой диафрагмы требуемого диаметра, коллиматора, проекционного объектива (в случае контроля качества ИК оптических трактов) и матричного фотоприёмника. Несмотря на кажущуюся простоту структурной схемы измерительного стенда, для получения объективных и повторяемых результатов измерения пятен рассеяния необходимо обеспечить выполнение ряда условий, что отмечается рядом исследователей [1–3].

В более ранних работах на основе результатов математического моделирования были сформулированы требования к условиям измерений, обеспечивающие получение объек-

Андосов Артем Игоревич<sup>1</sup>, инженер-программист.  
Полесский Алексей Викторович<sup>1</sup>, главный метролог,  
к.т.н.

Романова Татьяна Николаевна<sup>2</sup>, доцент кафедры ИУ-7.  
Юдовская Александра Дмитриевна<sup>1</sup>, вед. инженер.

Тришенков Михаил Алексеевич<sup>1</sup>, гл. специалист, д.т.н.  
<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru, av22236@bk.ru

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский  
университет).

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2019 г.

© Андосов А. И., Полесский А. В., Романова Т. Н.,  
Юдовская А. Д., Тришенков М. А., 2019

тивного повторяемого результата измерений, проводимых на данном оборудовании [4]. К этим условиям относятся:

- рекомендуемое соотношение размера исследуемого пятна рассеяния и изображения тест-объекта в плоскости фотоприемника 6:1;
- полезная разрядность АЦП 12-14 бит;
- обеспечение достаточного разрешения контролируемого пятна рассеяния на матричном фотоприемнике: центральная часть пятна рассеяния должна занимать не менее 8 пикселей;
- рекомендуемый алгоритм обработки – бикубическая интерполяция.

Целью данной работы была верификация разработанной ранее математической модели измерения пятен рассеяния экспериментальным путем.

### Описание экспериментальной установки

При проведенном ранее математическом моделировании в качестве объекта измерения рассматривалась ФРТ дифракционно-ограниченной оптической системы как наиболее сложный объект наблюдения. При проведении эксперимента необходимо было его воссоздать, а также обеспечить выполнение ряда условий: соотношение размеров изображения ФРТ и пикселя матричного фотоприемника, соотношение размеров ФРТ и изображения диафрагмы, требуемый динамический диапазон. Дополнительным условием обеспечения дифракционно-ограниченной ФРТ при проведении эксперимента в видимой области было исключение системы увеличения, из-за возможного внесения ею абберационных искажений в распределение энергии ФРТ.

Для создания ФРТ дифракционно-ограниченной оптической системы был использован фотографический объектив «Юпитер-8» на котором было установлено относительное отверстие 1:18. Использование в качестве источника излучения светодиода с длиной волны 660 нм, а в качестве матричного фотоприемника – камеры ToprCam 5.1 с шагом 2,2 мкм обеспечило получение требуемого соотношения размера изображения ФРТ и пикселя: изображение пятна Эйри занимало 13 пикселей. Расчетные остаточные абберации объектива для точки на оси (СКО волнового фрон-

та), полученные в Zemax, составляют менее  $\lambda/200$ .

Тест-объект (круглая диафрагма) устанавливался на конечном расстоянии, превышающем 25 фокусных расстояний объектива. Диаметр диафрагмы был рассчитан исходя из требований к рекомендуемому соотношению ФРТ исследуемого объектива и изображения диафрагмы 6:1, и составил 120 мкм. При проведении эксперимента были использованы диафрагмы диаметрами 120 мкм и 30 мкм (так как допустимо уменьшение диаметра диафрагмы при условии сохранения требуемого уровня энергетики системы).

Для проведения эксперимента было разработано специализированное программное обеспечение (ПО).

### Описание программного обеспечения

Для обработки изображения с камеры ToprCam 5.1 и расчета распределения энергии в пятнах рассеяния было разработано специализированное ПО с использованием объектно-ориентированного языка программирования C#. Верификация работы ПО также была выполнена в данном исследовании.

Первоочередными задачами, которые решает разработанное ПО, являются:

- получение изображения тест-объекта с требуемым динамическим диапазоном (12–18 бит);
- интерполяция полученных данных и расчет радиуса кружка с заданным содержанием энергии;
- расчёт частотно-контрастной характеристики (MTF – англ. Modulation Transfer Function) оптической системы на основании полученного пятна рассеяния.

Также программное обеспечение позволяет:

- задавать условия проведения эксперимента (начальное и конечное время накопления, интервал изменения времени накопления, граничные условия обработки кадров, вычитание «темновых» кадров);
- выводить диаграммы распределения энергии по осям «x» и «y» в зависимости от координаты курсора (вывод данных производится в режиме реального времени, при перемещении курсора в пределах HDR кадра);

– выводить зависимость изменения полной энергии исследуемого пятна рассеяния от номера кадра (для оценки достижения требуемого динамического диапазона).

Обеспечение динамического диапазона, соответствующего разрядности 12–18 бит, при использовании камеры TourCam 5.1, имеющей разрядность выходных данных 8 бит, была достигнута за счет разработки специального суммирования кадров с кратными временами накопления. Принцип работы алгоритма суммирования кадров идеологически близок к работе алгоритма HDR (англ. High Dynamic Range), используемого в фотографии [5]. Кратность измерения времени накопления может изменяться в широких пределах, но, как показала практика, наиболее рационально использование величины в пределах 1,4–2 раз. При этом шаге изменения времени накопления хорошо устраняется нелинейность энергетической характеристики чувствительности матричного фотоприёмника камеры TourCam 5.1 при сравнительно коротком цикле измерения. Условие достижения требуемого динамического диапазона оценивается по приросту энергии пятна рассеяния при получении последнего кадра – она должна составлять менее 1 % от предыдущего кадра.

Одним из наиболее важных условий правильной работы алгоритма расширения динамического диапазона является обеспечение «черного» фона, т. е. сигнал неосвещённого пикселя при большом времени накопления должен быть близок к нулю. В алгоритме расширения динамического диапазона реализовано вычитание «темновых» кадров для каждого времени накопления. Это актуально для времен накопления более 1 с, из-за наличия светлых точек в изображении с камеры, вызванных темновыми токами фоточувствительных элементов матрицы.

Второй задачей, решаемой ПО, является интерполяция полученного HDR-кадра, т. е. перевод его из массива данных в непрерывную трехмерную функцию с последующим

расчетом размера пятна рассеяния по заданному уровню концентрации энергии. При моделировании работы ПО при решении тестовых задач были рассмотрены различные методы интерполяции данных:

- линейная интерполяция;
- метод обратных взвешенных расстояний;
- интерполяции на основе радиальных базисных функций;
- метод наименьших квадратов;
- ординарный кригинг;
- интерполяция на основе «обычной» нейросети;
- интерполяция на основе пятислойной адаптивной нейро-нечеткой системы (ANFIS).

Моделирование работы перечисленных методов интерполяции на тестовых данных показал, что наиболее эффективными методами для решения поставленной задачи являются метод на основе пятислойной адаптивной нейро-нечеткой системы и ординарный кригинг. В наихудшем случае (для первого темного кольца) погрешность определения функции концентрации энергии в пятне заданного радиуса для обоих методов не превышает 2,8 %, при этом время вычисления интерполированной функции пятислойной адаптивной нейро-нечеткой системой 4 раза меньше, чем при использовании ординарного кригинга.

Внешний вид разработанного ПО приведен на рис. 1.

Как показала практика, на погрешность измерения пятна рассеяния влияет шаг экспозиции при формировании HDR-кадра и предобработка сигнала в камере, реализованная на основе алгоритма CLAHE (англ. Contrast-limited adaptive histogram equalization) [6, 7]. Для уменьшения погрешности вычислений ПО может исключать из расчетов углы кадра, однако при вычитании «темновых» кадров данная функция не потребовалась.

Для обеспечения возможности обработки полученного HDR-кадра в других программах и верификации результатов работы, ПО позволяет сохранять данные в формате \*.xlsx.

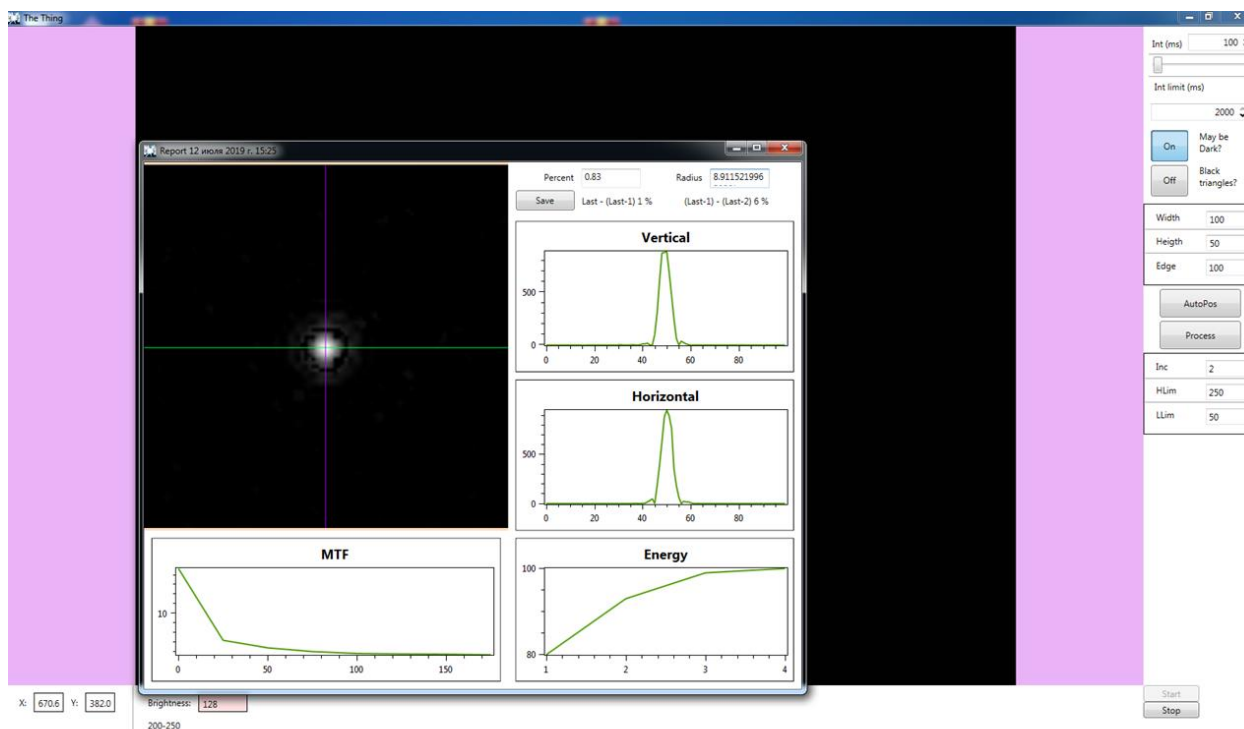


Рис. 1. Внешний вид ПО для измерения пятен рассеяния.

### Эксперимент и обработка полученных данных

В ходе верификации методики проводилось сравнение размеров пятен рассеяния по различным уровням концентрации энергии, полученных в каждом из четырех перечисленных методов:

- «идеальное» пятно рассеяния, описываемое аналитически с помощью функции Бесселя;
- математическая имитация результатов эксперимента (имитационная часть) по разработанной ранее математической модели [4];
- результаты, полученные с помощью разработанного ПО;
- результаты обработки HDR кадра (полученного с помощью ПО) в MathCad (верификационная часть).

Отличием верификационной части от ПО является используемый алгоритм интерполяции: в ПО используется интерполяция на основе пятислойной адаптивной нейро-нечеткой системы, а в верификационной части – бикубическая интерполяция.

Имитационная часть математической модели производит дискретизацию входного сигнала (заданной аналитической функции) по координате и уровню энергии в соответствии

со структурой матричного приемника и требуемой разрядностью АЦП, а также производит бикубическую интерполяцию полученных массивов данных, что позволяет вычислять радиусы кружков с заданным содержанием энергии. В процессе обработки данных можно усложнять математическую модель, искусственно вводя «несовершенства» фотоприемника, такие, как неравномерность чувствительности по площадке, фотоэлектрическую связь, нелинейность динамического диапазона фотоприемника. Более подробно имитационная часть математической модели описана в статье [4].

При проведении экспериментов уделялось особое внимание формированию равномерной засветки тест-объекта, поскольку данная неравномерность вносит существенные погрешности в измерения. Так как в качестве источника излучения использовался светодиод, излучение которого фокусировалось в плоскость диафрагмы с помощью микрообъектива, для обеспечения равномерности засветки диафрагмы, непосредственно перед ней, было установлено матовое стекло.

На рис. 2 приведен пример HDR-кадра пятна рассеяния, полученного с помощью разработанного специализированного ПО в ходе одного из экспериментов: на изображении яв-

но просматривается центральная часть пятна, первое и частичное второе дифракционное кольцо.

Из рис. 2 видно, что структура изображения дифракционной точки претерпевает искажения, по сравнению с теоретической формой. Появление темных «артефактов» может быть объяснено субпиксельной структурой используемого фотоприемника. Известно, что каждый пиксель цветной матрицы состоит из четырех субпикселей, поглощающих излучение разных длин волн (красный, синий и два зеленых субпикселя). При засветке такой матрицы светодиодом определенной длины волны (в нашем случае 660 нм) и переводе матрицы в черно-белый режим, в формировании изображения будет участвовать только каждый четвертый субпиксель матрицы. В этом случае эквивалентный коэффициент заполнения матрицы снижается в 2 раза, зазоры между активными пикселями становятся соизмеримы с размером пикселя. Такая структура приводит к появлению вышеописанных «артефактов» в изображении дифракционного кружка, а неравномерность чувствительности внутри активных пикселей может усугубить картину.

Поскольку распределение чувствительности внутри пикселя фотоприемника, используемого при проведении эксперимента (камера TopCam 5.1), неизвестно, то в процессе моделирования работы данного ФПУ искусственно вводилась неравномерность чувствительности по площадке. Наибольшее соответствие результатов моделирования и эксперимента (производилась визуальная оценка распределения яркости в пятне рассеяния, а также сравнение размеров кружков с заданным содержанием энергии) дало использование двумерной гауссоиды с шириной 1,1 мкм по уровню 0,5 в качестве модели чувствительности пикселя. На рис. 3 приведен внешний вид массива гауссоид, использованных для описания распределения чувствительности по фотоприемнику.

На рис. 4 приведен внешний вид пятна рассеяния после обработки аналитически заданного пятна рассеяния объектива «Юпитер-8»: размер тест-объекта 30 мкм, фокусное расстояние объектива 50 мм, относительное отверстие 1:18, длина волны излучения 660 нм, шаг дискретизации матрицы фотоприемника 2,2 мкм, эквивалентная разрядность АЦП 12 бит.

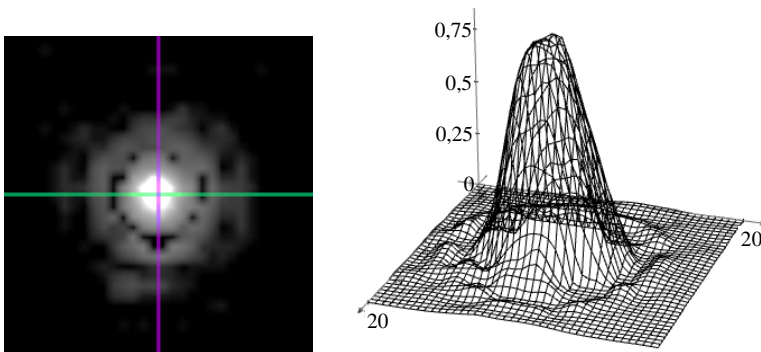


Рис. 2. Внешний вид HDR-кадра, полученного с помощью разработанного ПО (слева) и трехмерная интерпретация числовых данных HDR-кадра (справа).

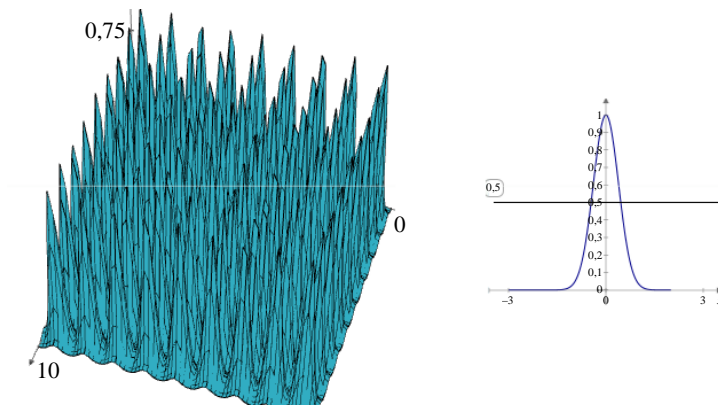
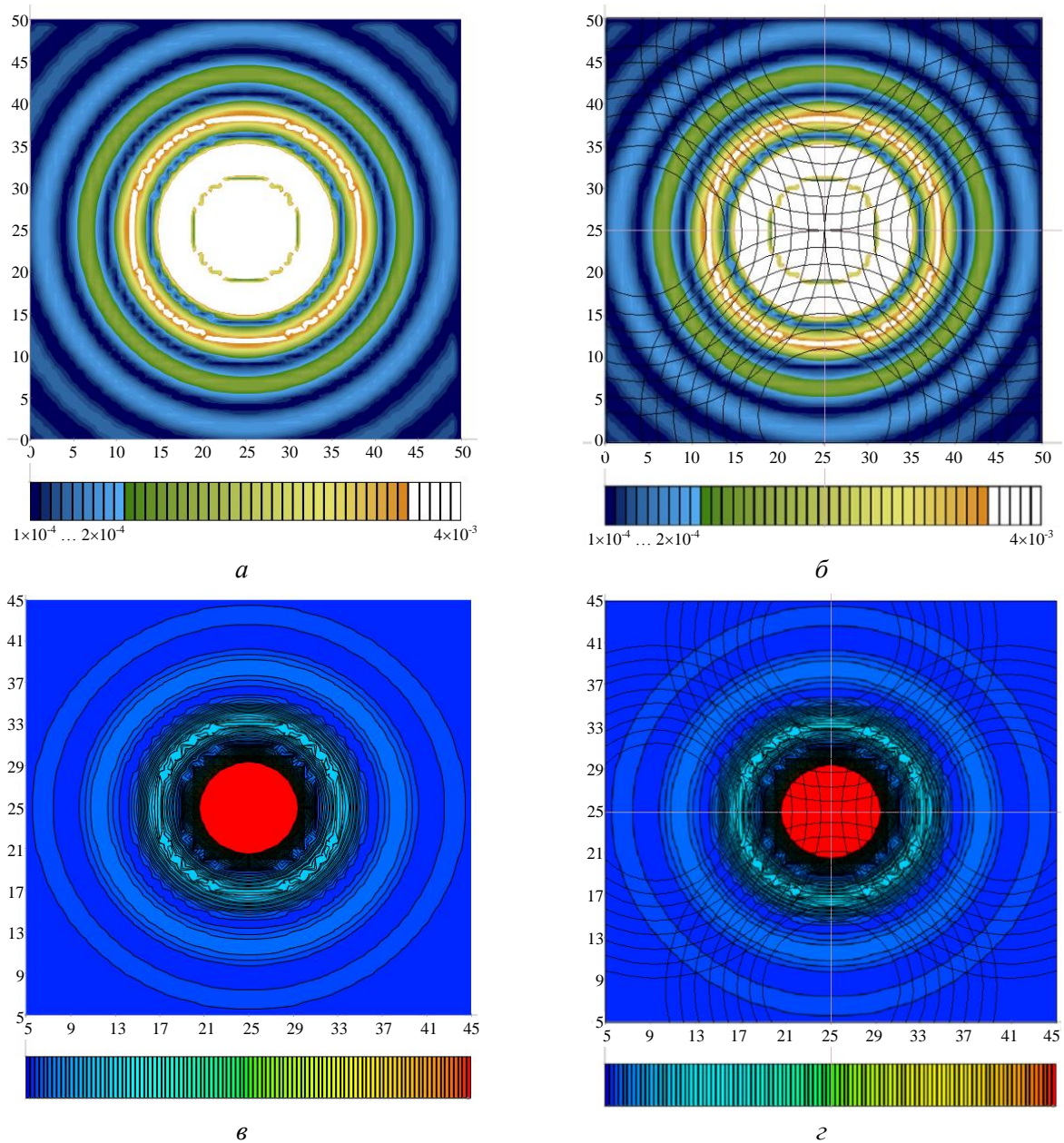


Рис. 3. Описание чувствительности матрицы с помощью гауссоид с шагом 2,2 мкм.



**Рис. 4.** Структура пятна рассеяния, полученная на матричном фотоприемнике с шагом дискретизации 2,2 мкм при математическом моделировании (по цветовой шкале отложена относительная энергия в пределах от  $1 \times 10^{-4}$  до  $4 \times 10^{-3}$  в относительных единицах).

На рис. 4, а и в можно наблюдать деформации в изображении колец пятен рассеяния, возникающие из-за периодичности структуры матричного фотоприемника и сравнительного малого коэффициента заполнения (отношения размера фоточувствительной площадки к шагу дискретизации). На рис. 4, б и г линии деформаций обозначены черным цветом. Такие же деформации (артефакты) возникают и в изображениях пятен рассеяния, полученных с помощью специализированного ПО (см. рис. 2), что несколько затрудняет наблюдение дифракционной картины.

Несмотря на данный недостаток, ПО с большой точностью определяет радиусы кружков с заданным содержанием энергии. В таблице приведены радиусы кружков по заданным уровням энергии, полученные с помощью разработанного ПО (при различных начальных временах накопления  $t_{\text{нач}}$ ), расчетные значения, полученные при математическом моделировании (верификационная и имитационная модели) и теоретические значения.

Таблица 1

## Возможности программного обеспечения

Содержание энергии в пятне, %	Радиус пятна с заданным содержанием энергии, мкм					
	«Идеальное» пятно рассеяния	Имитационная модель	Верификационная модель	ПО*		
				$t_{\text{нач}} = 100$	$t_{\text{нач}} = 40$	$t_{\text{нач}} = 20$
50	4,64	4,58	4,80	4,76	4,60	4,65
60	5,29	5,21	5,51	5,46	5,26	5,34
70	6,21	6,10	6,59	6,33	6,05	6,15
75	6,78	6,63	7,01	6,91	6,55	6,66
80	7,54	7,34	7,51	7,76	7,26	7,41
83	8,14	7,86	7,9	8,65	8,16	8,55
85	8,80	8,37	9,1	9,78	10,33	10,65
87	12,46	9,44	9,85	11,33	11,46	11,69
90	14,64	14,09	11,80	13,08	12,91	13,09
93	16,55	15,99	13,98	16,24	16,51	16,01

\* Среднее значение по нескольким экспериментам.

График 1 иллюстрирует экспериментальные, расчетные и теоретические значения кружков с заданным содержанием энергии. Хорошая сходимость экспериментальных и теоретических данных наблюдается до первого темного кольца. Дальнейшее расхождение результатов может быть вызвано несимметричностью ирисовой диафрагмы, остаточными aberrациями или недостаточно точной фокусировкой контролируемого объектива. Недоисправленная сферическая aberrация и неточная фокусировка приводят к перераспределению энергии между центральным максимумом и первыми двумя дифракционными кольцами в изображении светящейся точки [8].

Для проверки этой гипотезы было проведено измерение остаточных aberrаций на интерферометре OptoTL. Результаты измерений показали, что на длине волны 633 нм СКО волнового фронта для точки на оси при относительном отверстии объектива 1:16 составляет менее  $\lambda/20$ . Это исключает влияние остаточной сферической aberrации на перераспределение энергии в изображении дифракционной точки.

Анализ требований на точность фокусировки контролируемого объектива показал, что при изменении положения плоскости фокусировки на 0,05 мм изменение СКО волнового фронта составляет менее  $\lambda/50$ . В проведенном эксперименте были проведены измерения в различных плоскостях вблизи плоско-

сти наилучшего изображения контролируемого объектива. Расстояние между плоскостями, в которых проводились измерения, было менее 50 мкм.

Скорее всего, расхождение объясняется несимметричностью ирисовой диафрагмы в закрытом состоянии. Ирисовая диафрагма контролируемого объектива имеет 9 лепестков, и в «закрытом» состоянии её форма отличается от правильного многоугольника, что напрямую влияет на характер изображения точки. В результате энергия реального пятна рассеяния с ростом радиуса кружка накапливается медленнее, чем энергия теоретического пятна. Но по достижении 87–90 % энергии наблюдается обратная картина, поскольку у реального пятна за пределами 3 кольца практически не остается энергии.

Кривая, характеризующая верификационную модель, хуже совпадает с теоретической, чем имитационная. Это объясняется ошибками используемой бикубической интерполяции и подтверждает актуальность исследований в области выбора оптимальной интерполяции, проведенных при разработке ПО.

Проведенные эксперименты также выявили необходимость средств контроля увеличения системы, поскольку геометрическое несовпадение темных колец в изображении дифракционной точки с теоретическими приводит к существенному увеличению погрешности измерений.

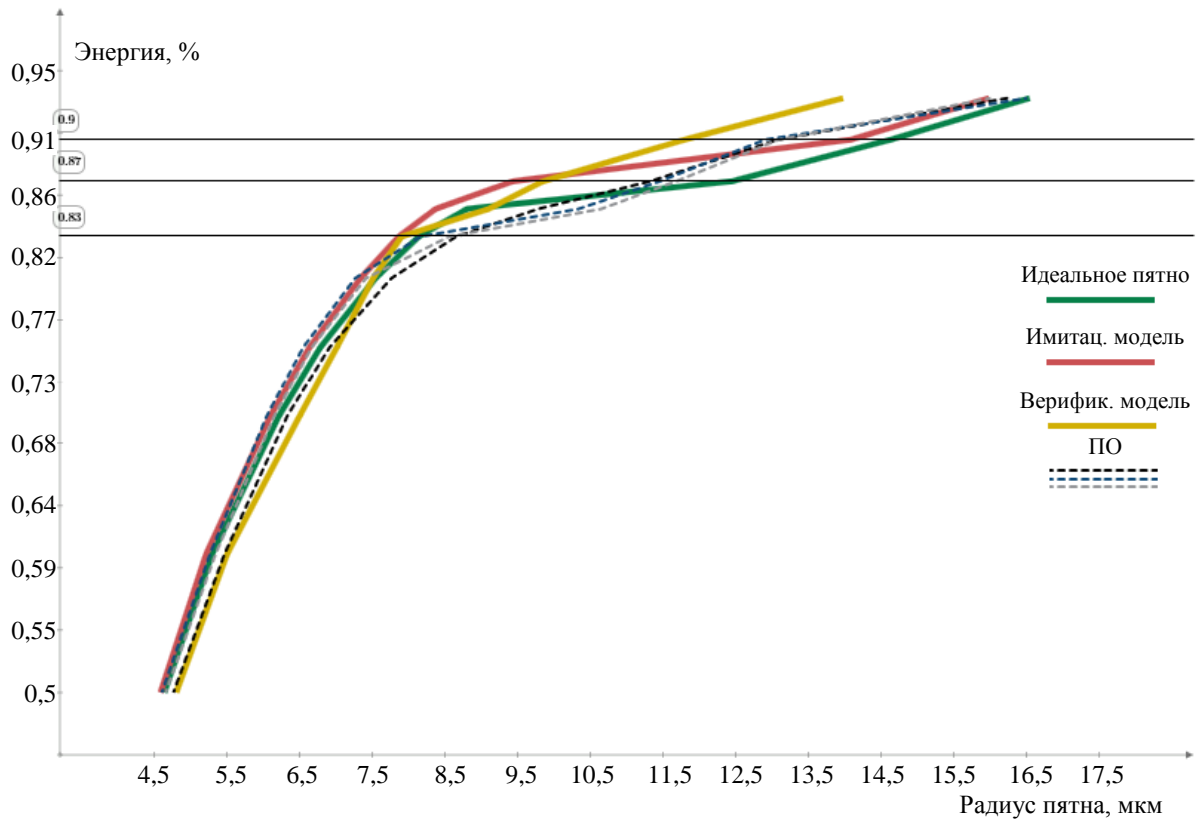


График 1. Данные по кружкам с заданным содержанием энергии (теоретические, результаты математического моделирования и полученные с помощью ПО).

На графике 2 показан результат обработки статистических данных, собранных при проведении 15 экспериментов. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что разработанное ПО имеет невысокую случайную погрешность.

График 3 иллюстрирует зависимость случайной погрешности определения радиуса кружка с заданным содержанием энергии с

помощью разработанного ПО. Среднеквадратичное отклонение таких измерений не превышает 2,2 % для самой проблемной зоны – первого темного кольца. Средняя величина случайной погрешности составляет  $\pm 1,35\%$ .

Проведенные эксперименты показали, что расширение динамического диапазона системы до 12–14 бит путем накопления кадров является достаточным для точного расчета

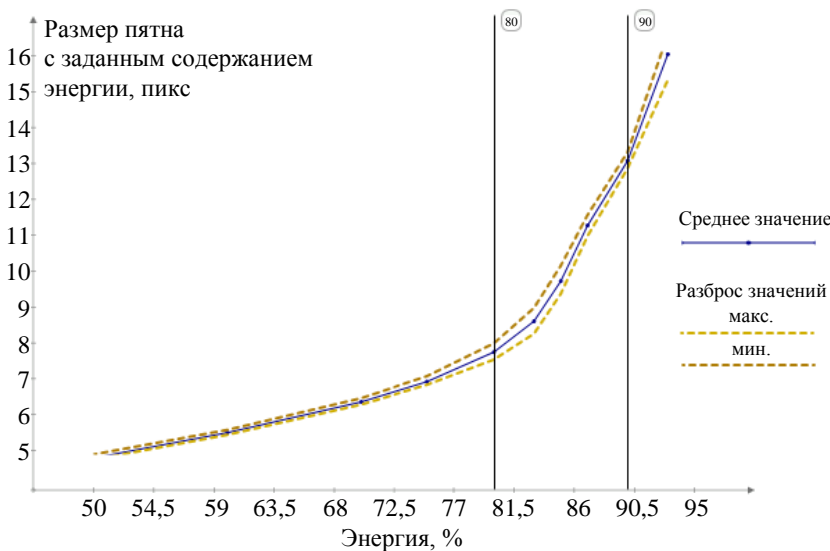
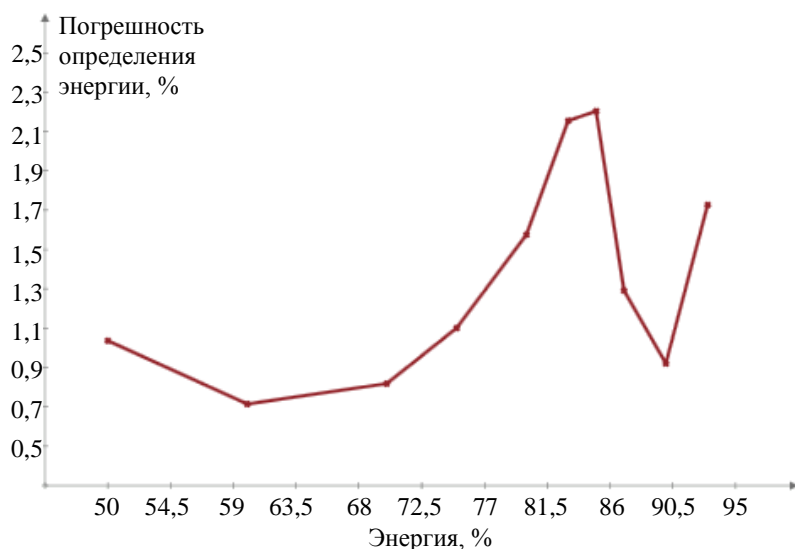


График 2. Статистические данные экспериментов: среднее значение и отклонение размеров кружков с заданным содержанием энергии.





*График 3. Случайная погрешность определения размера кружка с заданным содержанием энергии.*

радиусов кружков с заданным содержанием энергии. Требования достаточности 12-битной АЦП было верифицировано с помощью математической модели: разница в определении радиусов кружков рассеяния, содержащих 83 % от общей энергии пятна рассеяния, между 18-битным и 12-битным АЦП составляет 2 %. Дальнейшее снижение разрядности АЦП ведет к значительному увеличению погрешности, а также потере информации о третьем и последующих кольцах в изображении дифракционной точки.

В завершении экспериментальной части стоит отметить высокое быстродействие разработанного ПО, обусловленное, по большей части, синтаксисом используемого языка программирования, а также высокой степенью отладки программного кода. Расчет радиуса кружка с заданным содержанием энергии при размере кадра  $100 \times 100$  пикселей занимает не более 15 секунд. Расчет MTF и построение её графика по кадру того же формата – не более 2 минут. Время проведения эксперимента обусловлено, прежде всего, временем накопления достаточного количества кадров. Полный цикл одного измерения объектива «Юпитер-8» занимал не более 5 минут, причем с учетом накопления «темновых» кадров, расчета MTF и радиусов кружков с тремя различными концентрациями энергии, а также сохранения результатов эксперимента. При этом полный цикл расчета радиуса кружка с заданным содержанием энергии по верификационной модели занимал не менее 1,5 часов.

### **Рекомендации к опытному образцу системы контроля качества пятен рассеяния объективов**

Несмотря на то, что для решения поставленной задачи используемых в процессе проведения эксперимента ресурсов было достаточно, в процессе экспериментальной работы был выявлен ряд дополнительных требований к установкам измерения пятен рассеяния.

В первую очередь, для избавления от «артефактов» в изображении, вызванных встроенными фильтрами и структурой используемой матрицы, требуется применение камеры с большим коэффициентом заполнения, хорошей равномерностью чувствительности по пикселю и без встроенных фильтров, либо обеспечение большего увеличения за счет использования системы формирования изображения пятна рассеяния.

Во-вторых, для облегчения задачи нахождения наилучшего положения контролируемого объектива относительно матричного анализатора рекомендуется дополнительно ввести систему фокусировки. В случае автоматизации процесса совмещения плоскости наилучшего изображения с фоточувствительной плоскостью фотоприемника, время измерения одного образца объектива удастся сократить примерно втрое.

В-третьих, проведенные эксперименты выявили необходимость измерения коэффициента увеличения системы формирования изображения, что для работы установок данного типа является чрезвычайно важным. С

точки зрения авторов, наилучшим решением данной проблемы будет введение в состав установки калибровочного устройства, например, специализированного тест-объекта, позволяющего определять размер пятна рассеяния с погрешностью, не превышающей 1 % (а лучше 0,3 %). Необходимость обеспечения столь высокой точности измерения коэффициента увеличения объясняется тем, что в этом случае вклад ошибки измерения увеличения будет незначительным по сравнению со случайной погрешностью измерений.

При этом тест-объект может быть выполнен в виде двух отверстий. Расстояние между изображениями отверстий должно быть не менее 300 пикселей (погрешность измерения расстояния на изображении составит примерно  $(1/300) \times 100 \% = 0,33 \%$ ). Таким образом, при изучении пятна размером 10 мкм, расстояние между отверстиями реального тест-объекта составит  $\sim 300$  мкм, а допуск на межцентровое расстояние 1 мкм (еще  $\sim 0,3 \%$  погрешности). Итого, суммарная погрешность определения увеличения по тест-объекту составит не более 0,5 %. Тест-объект может быть изготовлен методом фотолитографии.

В-четвертых, должны быть предъявлены высокие требования к остаточным аберрациям проекционной системы – они должны быть менее  $\lambda/20 \dots \lambda/25$  в апертурном угле контролируемого объектива. Апертурный угол контролируемого объектива в большинстве случаев будет существенно меньше апертурного угла проекционной системы. Это позволит снизить требования на качество изображения проекционной системы в целом, оставив только высокие требования в пределах сравнительно небольшой зоны.

### Заключение

В ходе проведения экспериментальных работ был создан прообраз стенда контроля пятен рассеяния объективов видимого диапазона спектра. Разработанное программное обеспечение позволяет решать задачу оценки качества объективов по их пятнам рассеяния с высокой точностью, что подтверждено путем сравнения экспериментальных, теоретических данных и результатов, полученных при математическом моделировании.

Случайная погрешность измерения размера кружка рассеяния с заданным содержанием энергии при проведении измерений на стенде, реализующем описанную ранее [4] методику с использованием разработанного ПО, не превышает  $\pm 2,2 \%$  для темных колец. Средняя погрешность ПО составляет  $\pm 1,35 \%$ . Максимальная систематическая погрешность измерений (при измерении пятен с концентрацией энергии более 90 %) не превышает 11 % даже с учетом того факта, что исследуемое в эксперименте пятно рассеяния несколько деформировано из-за сложной формы входного зрачка и матричное фотоприемное устройство имеет низкий коэффициент заполнения. Погрешность измерения пятен по уровню 83 % энергии не более 10 %, для уровня 80 % – не более 7 %.

Верификация методики контроля качества объективов видимого и инфракрасного диапазонов показала, что требования к тест-объекту, матричному фотоприемнику, алгоритму обработки полученных изображений и динамическому диапазону приведенные в [4], а именно:

- рекомендуемое соотношение размера исследуемого пятна рассеяния и изображения тест-объекта в плоскости фотоприемника 6:1;
- полезная разрядность АЦП 12–14 бит;
- обеспечение достаточного разрешения контролируемого пятна рассеяния на матричном фотоприемнике: центральная часть пятна рассеяния должна занимать не менее 8 пикселей;
- в случае использования бикубической интерполяции в качестве алгоритма обработки, систематическая погрешность метода составит  $\sim 9 \%$ . При использовании ординарного кригина или специально обученной пятислойной адаптивной нейро-нечеткой системы позволяет уменьшить среднее значение систематической составляющей погрешности измерения до  $\sim 6 \%$ ;
- являются необходимыми и достаточными для обеспечения высокой точности и повторяемости измерений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан Оптические измерения. Часть 6. Инновационные направления в оп-

тических измерениях и исследованиях оптических систем. – СПб ГУ ИТМО, 2008.

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

3. Нужин А. В. Измерение концентрации энергии в малоразмерном изображении / С.-Пб., Интернет-журнал "ТелеФото Техника" (<http://www.telephototech.ru>), 2009.

4. Полесский А. В., Юдовская А. Д. // Прикладная физика. 2017. № 3. С. 115.

5. Richards A., Cromwell B. Superframing: Scene Dynamic Range Extension of Infrared Cameras. – FLIR Systems, Indigo Operations.

6. Zuiderveld Karel Contrast limited adaptive histogram equalization / Graphics gems IV, Academic Press Professional, Inc., 1994, pp. 474–485, URL: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=180940>

7. Ting C. C., Wu B. F., Chung M. L., Chiu C. C., Wu Y. C. // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 16981.

8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.

PACS: 07.05.Kf, 07.05.Rm

## Method of measuring the scattering spot of the lens using a matrix photodetector

A. I. Andosov<sup>1</sup>, A. V. Polesskiy<sup>1</sup>, T. N. Romanova<sup>2</sup>, A. D. Yudovskaya<sup>1</sup>,  
and M. A. Trishenkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orion R&P Association, JSC

9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

E-mail: [orion@orion-ir.ru](mailto:orion@orion-ir.ru), [av22236@bk.ru](mailto:av22236@bk.ru)

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University

5/1 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia

Received September 2, 2019

*The article presents the results of experimental confirmation of the method for measuring the scattering function of the point and scattering spots of lenses using a matrix photodetector. In the course of the work, an experiment and its mathematical modeling were carried out. The required dynamic range of the system is achieved by processing an array of frames with different accumulation times. Specialized software was developed for the experiment. A comparison of the results obtained using the mathematical model and experimental data confirms the previously developed requirements for the method of measuring scattering spots using a matrix photodetector.*

**Keywords:** scattering spot, methodic of measurement, experiment, software, measurement error.

### REFERENCES

1. V. K. Kirillovskiy and Le Zuy Tuan, *Optical measurements, (Part 6), Innovative directions in optical measurements and research of optical systems*, (SPb GU ITMO, 2008) [in Russian].

2. V. K. Kirillovskiy and Le Zuy Tuan, Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2009, No. 2 (60).

3. A. V. Nuzhin, *Measurement of energy concentration in a small image*, (<http://www.telephototech.ru>), (2009) [in Russian].

4. A. V. Polesskiy and A. D. Yudovskaya, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 115 (2017).

5. A. Richards and B. Cromwell, *Superframing: Scene Dynamic Range Extension of Infrared Cameras*. (FLIR Systems, Indigo Operations).

6. K. Zuiderveld, *Contrast limited adaptive histogram equalization*, Graphics gems IV, Academic Press Professional, Inc., 1994, pp. 474–485, URL: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=180940>

7. C. C. Ting, B. F. Wu, M. L. Chung, C. C. Chiu, and Y. C. Wu, *Sensors*. **15**, 16981 (2015).

8. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics (4th.ed.)* (Pergamon Press, 1970).