DOI 10.37882/2223-2966.2025.07.26

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ФОКУСИРУЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

INFORMATION SYSTEM FOR QUALITY ANALYSIS OF FOCUSING OPTICAL SYSTEMS

S. Pavlov

Summary. This paper presents the development of an information system for the quality analysis of focusing optical assemblies. The work addresses the current need to automate quality control of optical systems in both mass-production and laboratory environments. Key production and laboratory use cases for the information system have been systematically identified. A review and justification of quality-control methods were carried out, leading to the selection of optimal techniques that ensure both versatility and minimal hardware requirements. The hardware and software components of the system were defined, and the overall system architecture was designed. A software module was implemented in MATLAB, and the system was experimentally tested and validated on real optical samples. Finally, recommendations for further refinement and prospects for industrial deployment are outlined.

Keywords: point spread function (PSF), energy concentration function, information system, automated system, image processing, optical system, MATLAB.

Павлов Сергей Николаевич
Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград
sergp4v10v@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается разработка информационной системы для анализа качества фокусирующих оптических систем. Работа направлена на решение актуальной задачи автоматизации контроля качества оптических систем в условиях серийного и лабораторного производства. Проведен обзор и обоснование методов контроля качества, выбраны оптимальные методы, обеспечивающие универсальность и минимизацию аппаратных затрат. Определен состав аппаратных и программных модулей системы, разработана архитектура информационной системы. Реализован программный модуль на базе MATLAB, проведены экспериментальные проверки и валидация системы на реальных оптических образцах. В заключении сформулированы рекомендации по её доработке и перспективам внедрения.

Ключевые слова: функция рассеяния точки, функция концентрации энергии, информационная система, автоматизированная система, обработка изображения, оптическая система, MATLAB.

Введение

Современные оптические системы играют важную роль в спутниковой съемке, дистанционном зондировании Земли. В условиях серийного и лабораторного производства контроль качества таких систем требует оперативности, минимизации затрат и универсальности методов анализа.

Цель заключается в разработке информационной системы для оперативного контроля качества оптических систем. Данная система предназначена для автоматизации процесса контроля качества оптических элементов, таких как линзы, объективы и асферические зеркала, в условиях серийного производства. Основная цель создания системы — обеспечить оперативный и автоматизированный анализ качества оптических систем с минимальными аппаратными затратами. Система автоматизирует процесс анализа изображения «пятна рассеяния» оптической системы, что позволяет минимизировать вмешательство оператора. Важной особенностью системы является универсальность, поддержка любых фокусирующих оптических компонентов при вводе соответствующих параметров.

Анализ

Анализ литературы подтвердил практическую востребованность методов ФРТ и ФКЭ. В работе [1] описана установка «КИЗО-ФРТ», которая использует минимальное оборудование и программный модуль для автоматической обработки изображений, предоставляя оператору готовые графики и численные метрики. В работе [2] описан пакет OPAL-PC, который также использует минимальную оптическую часть и единую графическую оболочку для анализа различных параметров оптических систем. В работе [3] описана информационная система, которая практически совпадает по архитектуре с техническим заданием, используя минимальный набор оборудования и программный модуль для автоматического построения ФРТ и выдачи ключевых числовых метрик. Таким образом, анализ литературы подтвердил обоснованность выбора прямых количественных методов ФРТ и ФКЭ.

Проектирование архитектуры информационной системы

Система включает в себя источник когерентного излучения (лазер) и коллиматор для формирования пло-

ского волнового фронта, исследуемый оптический объект, а также блок обработки изображения, состоящий из монохромной фотокамеры (с матрицей KAI-02150 [4]) и вычислительной станции с установленным специализированным программным обеспечением. Программные компоненты разделены на две подсистемы: первая отвечает за управление камерой и сбор изображений, а вторая, реализованная в виде MATLAB-скрипта, занимается обработкой изображений, расчетом метрических характеристик и визуализацией результатов.

Реализация программного модуля обработки изображения

Ниже на рисунке 1 приведена блок схема работы алгоритма:

Алгоритм состоит из следующих этапов:

Выбор кадра, чтение из файла; приведение интенсивности к диапазону 0–100 % для исключения влияния абсолютных уровней яркости [5] [6]; подавление фона двухрежимным подходом — либо по тёмному кадру, либо пороговым значением [7] [8] [9]; вычисление центра пятна либо как максимума интенсивности, либо по центру масс (моментам) ; усреднение интенсивности по радиальным зонам для получения эффективного профиля ФРТ [1]; накопление энергии внутри концентрических колец вокруг центра [1]; вывод графиков зависимостей и численных метрик.

Входные данные: черно-белое изображение пятна рассеяния (матрица интенсивностей) и параметры эксперимента: длина волны λ, фокусное расстояние *f*, диаметр апертуры *D*, размер пикселя *p*.

Итогом работы алгоритма является сформированный набор выходных данных: визуализации, графики, зависимости и численные метрики.

Экспериментальная проверка

Эксперимент 1: объектив камеры спутниковой фотосъемки

На рисунке 2 показано полученное фото светящейся точки в фокусе исследуемой оптической системы.

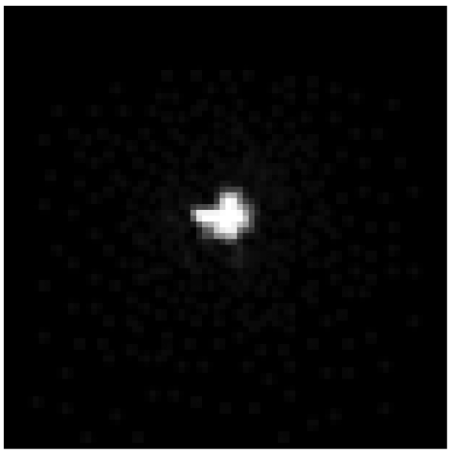

Рис. 2. Полученное фото светящейся точки в фокусе исследуемой оптической системы

Для каждого эксперимента задаются базовые оптические характеристики системы. В первом эксперименте эти параметры имеют следующие значения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры оптической системы для эксперимента

Параметр	Обозначение	Значение
Длина волны	λ	632 нм
Фокусное расстояние	*f*	1100 мм
Диаметр апертуры	*D*	130 мм
Размер пикселя	*p*	5,5 мкм

Функция рассеяния точки (ФРТ) и её метрики:

Экспериментальная ФРТ (радиальный профиль интенсивности пятна) строится усреднением яркости пикселей в концентрических кольцах вокруг центра. Сравнение полученной кривой с идеальным профилем Эйри (теоретической ФРТ) представлено на рисунке 3.

Численные оценки приведены в таблице 2.

Преувеличение ШПП в эксперименте (≈1 %) указывает на минимальное расфокусирование или слабые аберрации. Превышение экспериментального СРП по сравнению с идеальным свидетельствует о расширении

Рис. 1. Блок схема работы алгоритма

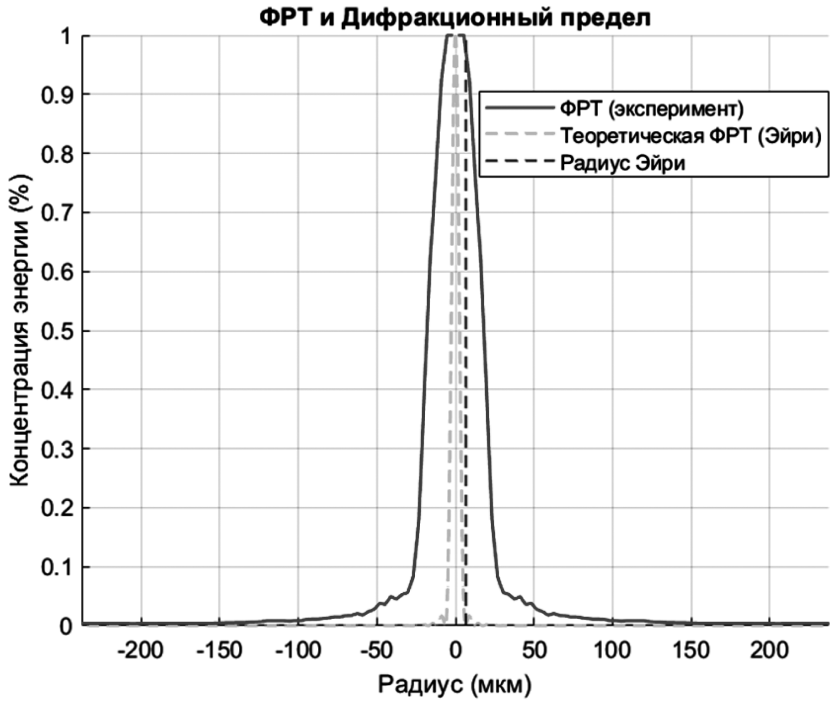

Рис. 3. Зависимости экспериментальная и теоретическая ФРТ

Таблица 2.

Численные оценки

Параметр	Ширина на Полувысоте Пика (ШПП)	Среднеквадратичный Радиус Пятна (СРП)	Коэффициент пик-к-боковому лепестку (КПЛ)
Эксперимент	36,14 мкм	22,11 мкм	1,31
Теория	35,75 мкм	13,21 мкм	4,20

пятна из-за аберраций или микроскопических дефектов поверхности элементов, что снижает контраст и ухудшает детализацию. КПЛ показывает, насколько центральный пик доминирует над первым боковым лепестком. Низкое значение КПЛ в эксперименте указывает на выраженные боковые лепестки (более сильные, чем в идеале), что свидетельствует о нерезкости краёв главного пятна и потенциальном снижении контрастности.

Функция концентрации энергии (ФКЭ) и её метрики:

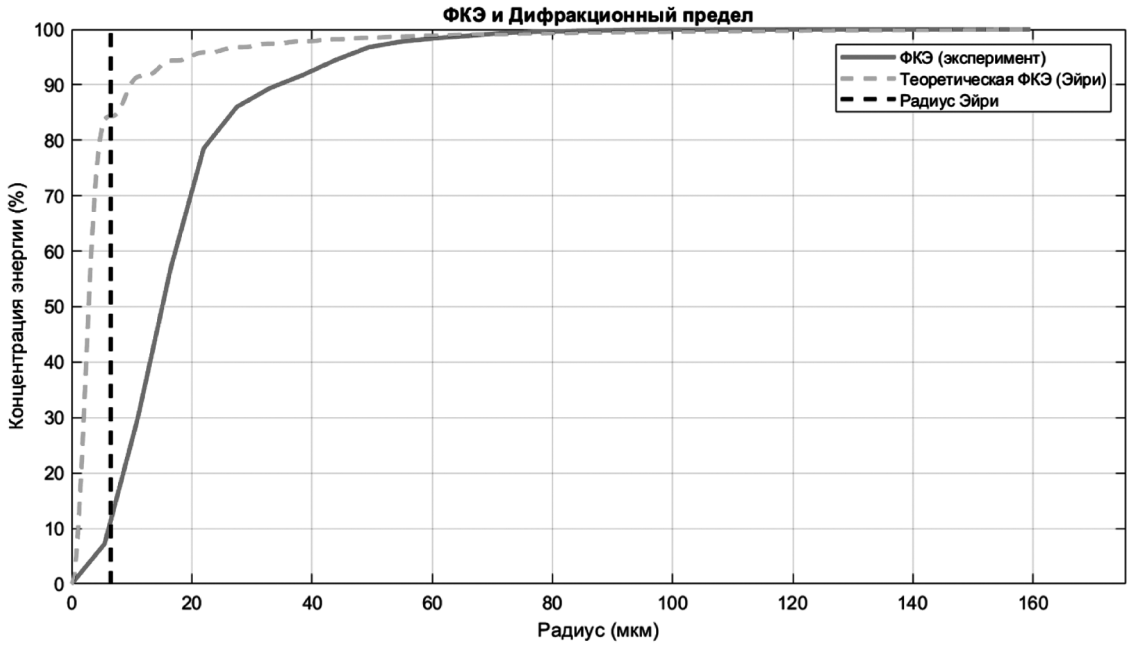

Рис. 4. Экспериментальная и теоретическая ФКЭ

Далее на рисунке 4 представлена функция концентрации энергии (ФКЭ), на котором показаны экспериментальная и теоретическая кривые накопленной энергии EE(r) в зависимости от радиуса.

Численные оценки приведены в таблице 3:

Таблица 3.

Численные оценки

Параметр	Максимальный градиент dEE/dr	Точки перегиба ($d^2EE/dr^2 = 0$)	Нормированный коэффициент крутизны
Эксперимент	4,519 %/мкм при r = 11,00 мкм	от 11,00 до 126,50 мкм	0,182
Теория	24,760 %/мкм при r = 2,24 мкм	2,24 до 159,02 мкм	

Максимальный градиент профиля ФКЭ показывает скорость нарастания накопленной энергии по мере удаления от центра. Экспериментальный максимум на порядок ниже идеального, что указывает на гораздо более пологое нарастание энергии. Практически это означает, что край пятна «размыт», и большая часть энергии аккумулируется медленнее, чем в чисто дифракционном случае. В эксперименте зона смены режима накопления энергии сдвинута наружу и расширена, что указывает на появление и усиление боковых колец и артефактов, формируемых аберрациями. Расширенная область перегибов свидетельствует о нерезкой границе пятна и неоднородном распределении энергии. Точки перегиба отражают сложную структуру профиля (боковые кольца и вентильные эффекты). Нормированный коэффициент крутизны 0,182 означает, что скорость накопления энергии в реальной системе менее 20 % от теоретической, что подчёркивает влияние оптических дефектов.

Локальная крутизна на уровнях EE50, EE80, EE90:

Полученные значения представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Параметры оптической системы для эксперимента

Уровень EE	Эксперимент, %/мкм	Теория, %/мкм
50 %	4,454	23,411
80 %	2,325	7,453
90 %	0,508	2,021

В каждом «интервале» роста накопленной энергии система отстает от дифракционного предела, подтверждая наличие оптических дефектов или смещения фокуса. Градиенты на уровнях EE50/80/90 показывают локальное изменение крутизны, позволяя выявлять зоны с наибольшими потерями фокусировки.

Эксперимент 2: асферическое зеркало (сегмент эллипсоида)

На рисунке 5 показано изображение светящегося пятна в фокусе асферического зеркала.

Рис. 5. Изображение светящегося пятна в фокусе асферического зеркала

Во втором эксперименте параметры приведены в таблице 5:

Таблица 5.

Параметры оптической системы для эксперимента

Параметр	Обозначение	Значение
Длина волны	λ	632 нм
Фокусное расстояние	*f*	600 мм
Диаметр апертуры	*D*	160 мм
Размер пикселя	*p*	5,5 мкм

Данный сегмент асферического зеркала эллипсоидной формы будет применён для фокусирования света, а не как элемент оптической системы для получения изображений.

Функция рассеяния точки (ФРТ) и её метрики (см. рис. 6).

Численные оценки приведены в таблице 6:

Таблица 6.

Численные оценки

Параметр	Ширина на Полувысоте Пика (ШПП)	Среднеквадратичный Радиус Пятна (СРП)	Коэффициент пик-к-боковому лепестку (КПЛ)
Эксперимент	16,49 мкм	66,85 мкм	2,96
Теория	14,30 мкм	13,28 мкм	4,21

Увеличенное значение ШПП говорит о небольшом расширении главного пика из-за астигматизма или микронеровностей поверхности зеркала. Превосходство СРП экспериментальной величины указывает на «разма-

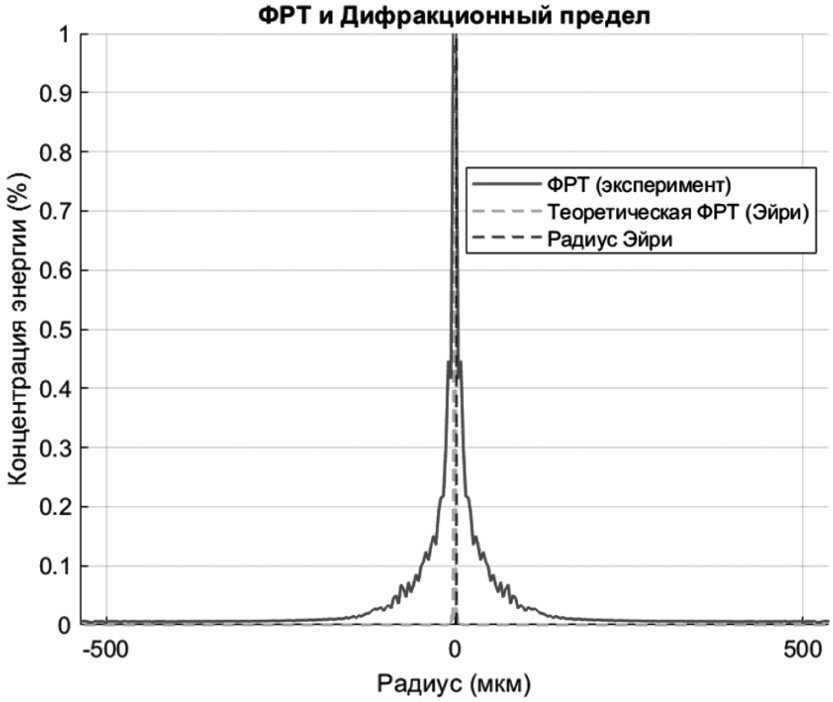

Рис. 6. Зависимости экспериментальная и теоретическая ФРТ

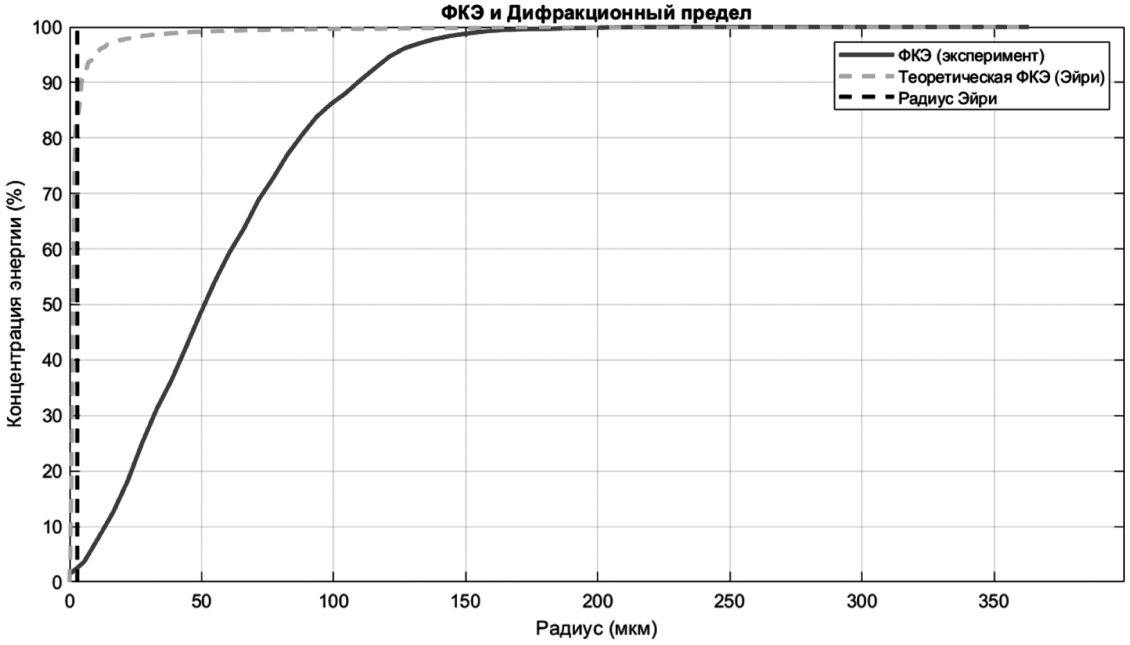

Рис. 7. Экспериментальная и теоретическая ФКЭ

зывание» пятна, обусловленное значительными аберрациями асферической поверхности. Пониженное значение КПЛ свидетельствует о заметных боковых лепестках, что снижает способность зеркала фокусировать свет и указывает на необходимость шлифовки для коррекции формы зеркала.

Функция концентрации энергии (ФКЭ) и её метрики (см. рис. 7).

Численные оценки приведены в таблице 7.

Таблица 7.

Численные оценки

Параметр	Максимальный градиент dEE/dr	Точки переиба ($d^2EE/dr^2 = 0$)	Нормированный коэффициент крутизны
Эксперимент	1,180 %/мкм при r = 27,50 мкм	от 22,00 мкм до 361,91 мкм	0,022
Теория	52,478 %/мкм при r = 1,09 мкм	от 0,73 мкм до 109,00 мкм	

Практически в 45 раз меньший экспериментальный градиент указывает на пологое накопление энергии в центральной области. Это характерно для систем с выраженными аберрациями или смещённым фокусом — энергия «растекается» дальше от центра, и пик накопления смещается наружу. Экспериментальная зона перегибов существенно расширена и смещена наружу. Это свидетельствует о множественных боковых кольцах и сложной структуре аберраций асферического зеркала, приводящих к неоднородному накоплению энергии. Реальная ФКЭ растёт на 2,2 % от идеальной скорости.

Локальная крутизна на уровнях EE50, EE80, EE90:

Полученные значения представлены в таблице 8.

Таблица 8.

Параметры оптической системы для эксперимента

Уровень EE	Эксперимент, %/мкм	Теория, %/мкм
50 %	1,062	48,341
80 %	0,631	15,374
90 %	0,403	3,198

Во всех трёх точках экспериментальные крутизны существенно ниже идеальных, что указывает на равномерное, но замедленное распределение энергии по радиусу.

Заключение

В результате разработки была создана информационная система, полностью отвечающая исходной цели — обеспечение оперативного и автоматизированного анализа качества фокусирующих оптических систем в условиях серийного производства при минимальных затратах на аппаратное обеспечение. Предложенное решение охватывает весь цикл: от формирования коллимированного луча и съёмки «пятна рассеяния» до вычисления количественных метрик и наглядной визуализации результатов.

Проведённые эксперименты на объективе для спутниковой фотосъёмки и на сегменте асферического зеркала подтвердили, что разработанная система способна выявлять аберрации, влияющие на энергетическую концентрацию и форму пятна рассеяния. Полученные численные данные позволяют не только сравнивать между собой различные образцы, но и отслеживать динамику качества на производственной линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирилловский, В.К., Точилина, Т.В. Оптические измерения. Часть 2–6. — СПб.: Университет ИТМО, 2016–2017.
2. Электронный учебно-методический комплекс по оптическим измерениям. — БНТУ, 2014.
3. Сцепуро, Н.Г., и др. Определение функции рассеяния точки компьютерно-синтезированной линзы. — 2020.
4. Оптические системы [Электронный ресурс] // Астрономер. — URL: http://www.old.astronomer.ru/data/library/books/sikoruk/glava1/1_7.htm
5. How do I normalize the pixel value of an image to 0–1? [Электронный ресурс] // Stack Overflow. — URL: https://stackoverflow.com/questions/70783357/how-do-i-normalize-the-pixel-value-of-an-image-to-01
6. Data normalization [Электронный ресурс] // The Node. — URL: https://thenode.biologists.com/data-normalization/research/
7. Dark Frame Calibration [Электронный ресурс] // Diffraction Limited. — URL: https://cdn.diffractionlimited.com/help/maximdl/Dark_Frame_Calibration.htm
8. Capturing and Using Dark Frames [Электронный ресурс] // SharpCap. — URL: https://docs.sharpcap.co.uk/4.0/29_CapturingandUsingDarkFrames.htm
9. Why is there no image noise in my webcam dark frame photographs? [Электронный ресурс] // Stack Exchange. — URL: https://photo.stackexchange.com/questions/56153/why-is-there-no-image-noise-in-my-webcam-dark-frame

© Павлов Сергей Николаевич (sergp4v10v@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»