

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
"ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ "ЛЭТИ")**

Направление 11.04.01 – Радиотехника

Профиль

Факультет РТ

Кафедра ТВ

К защите допустить

Зав. кафедрой

Лысенко Н. В.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА**

**Тема: МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРУЖКА РАССЕЯНИЯ
ОБЪЕКТИВА**

Студент

подпись

Ермолаев Р. С.

Руководитель

подпись

Манцветов А. А.

Консультант

подпись

Санкт-Петербург

2016

РЕФЕРАТ

73 с., 34 рис., 5 табл., библи. 20 ист., 4 прил.

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, КРУЖОК РАССЕЯНИЯ, МЕТОД ЦЕНТРА
ТЯЖЕСТИ, ТОЧЕЧНЫЙ ИСТОЧНИК, ГАУССОВСКОЕ
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

В данной работе рассмотрены основные параметры и характеристики оптических систем, проведен обзор существующих методов определения кружка рассеяния, разработан автоматизированный метод определения кружка рассеяния, проведено его компьютерное моделирование в среде MATLAB, а также разработаны стенды для экспериментального исследования метода.

ANNOTATION

In this graduate work were examined the basic parameters and characteristics of optical systems, reviewed existing methods of determining the circle of confusion, developed an automated method of determining the circle of confusion, performed its computer simulation in MATLAB, and developed test benches for experimental study of the method.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	7
1.1. Фокусное расстояние	7
1.2. Поле зрения	8
1.3. Разрешающая способность	8
1.4. Глубина резко изображаемого пространства	9
1.5. Относительное отверстие	9
1.6. Светосила	10
1.7. Аберрации оптических систем.....	11
1.7.1. Сферическая аберрация	12
1.7.2. Кома	13
1.7.3. Астигматизм.....	13
1.7.4. Дисторсия	14
1.7.5. Хроматическая аберрация	15
1.8. Функция рассеяния точки.....	16
1.9. Частотно-контрастная характеристика	16
1.10. Дифракция Фраунгофера. Описание функции рассеяния точки.....	18
1.11. Дифракционный предел. Критерий Рэлея	20
2. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	23
2.1. Методы определения параметров кружка рассеяния объектива.....	23
2.1.1. Метод секторного раstra.....	23
2.1.2. Измерение распределения энергии в кружке рассеяния	26
2.1.3. Метод сканирования точечной диафрагмой.....	27
2.2. Цель и задачи исследования.....	29
3. РАЗРАБОТКА СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРУЖКА РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТИВА	30
3.1. Метод определения центра тяжести изображений малоразмерных объектов.....	30
3.2. Статистический метод определения кружка рассеяния	31
4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА	36
4.1. Среда программирования MATLAB	36
4.2. Имитация сигнала точечного источника	37
4.3. Моделирование метода	38

4.4 Встроенные функции MATLAB	42
4.5. Результаты моделирования	42
5. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА.....	44
5.1. Экспериментальный стенд №1	44
5.2. Экспериментальный стенд №2	46
6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ	48
6.1. Результаты исследований на экспериментальном стенде №1	48
6.2. Результаты исследований на экспериментальном стенде №2.....	50
7. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ	51
7.1. Требования к организации рабочего места.....	51
7.2. Требование к микроклимату	52
7.3. Освещенность рабочего места	53
7.4. Уровень шума	54
7.5. Электромагнитное и ионизирующее излучения	55
7.6. Электробезопасность	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	58
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	62
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	63
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	66
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	68

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение малоразмерных объектов является важной задачей различных направлений астрономии и космонавтики – от исследования звезд до дистанционного зондирования Земли.

Среди всех параметров оптических систем самым критичным для упомянутой задачи является кружок рассеяния. Это искаженное изображение точки, формируемое оптической системой. Иными словами, кружок рассеяния определяет, насколько исказится изображение точечного объекта при съемке.

Существует ряд методов определения кружка рассеяния, но все они трудоемки, а сами измерения требуют много времени. Поэтому разработка универсального автоматизированного программного метода определения кружка рассеяния является весьма актуальной задачей. В связи с этим в данной выпускной квалификационной работе были решены следующие задачи:

- рассмотрены основные параметры оптических систем;
- перечислены и проанализированы основные методы определения кружка рассеяния;
- разработан автоматизированный метод определения кружка рассеяния, проведено его теоретическое исследование, а также компьютерное моделирование в среде MATLAB;
- разработаны и собраны два контрольно-проверочных стенда и проведены экспериментальные исследования метода;
- на основе полученных результатов сделаны выводы.

1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Оптической системой (ОС) называется совокупность оптических элементов (преломляющих, отражающих, дифракционных и пр.), созданная для преобразования световых пучков, радиоволн или заряженных частиц [1].

Рассмотрим основные характеристики и параметры ОС, применяемых в телевидении.

1.1. Фокусное расстояние

Фокусное расстояние – физическая характеристика ОС, описывающая способность собирать лучи в одну точку при условии, что эти лучи идут параллельным пучком параллельно оптической оси (рисунок 1).

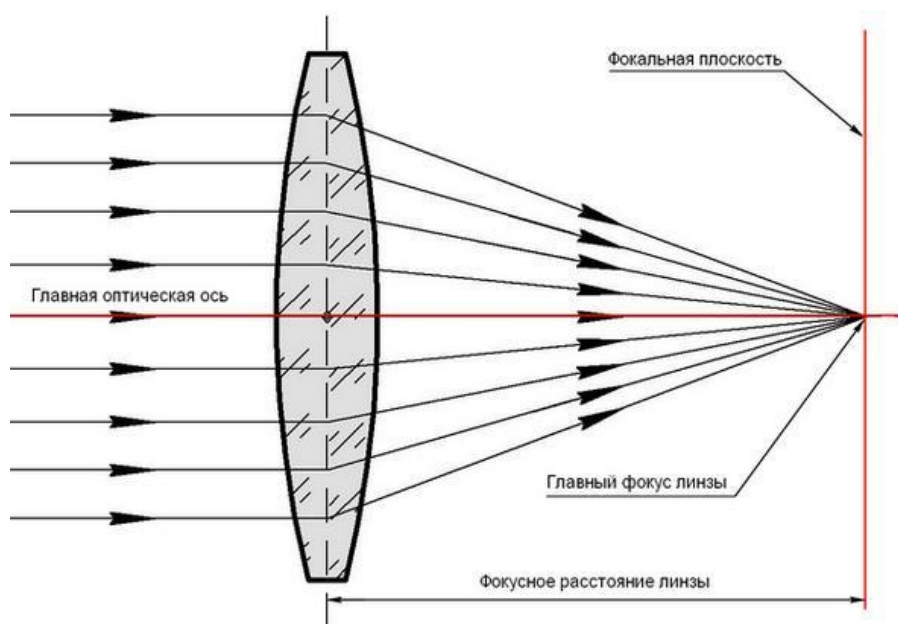


Рисунок 1 – Фокусное расстояние собирающей линзы

Определяется данная величина как расстояние от передней главной точки до переднего фокуса (для переднего фокусного расстояния), и как расстояние от задней главной точки до заднего фокуса (для заднего фокусного расстояния) [1]. При этом под главными точками понимаются точки пересечения главных плоскостей с оптической осью.

Для ОС, как и для простой линзы конечной толщины, фокусное расстояние зависит от радиусов кривизны поверхностей, показателей преломления стекол и толщин элементов системы.

1.2. Поле зрения

Поле зрения называется наибольший угол с вершиной в оптическом центре ОС, при котором все предметы, находящиеся в его пределах, будут изображены системой в плоскости ее кадрового окна (рисунок 2). За пределами этого угла лежит изображение со значительно сниженными разрешающей способностью и яркостью [2].

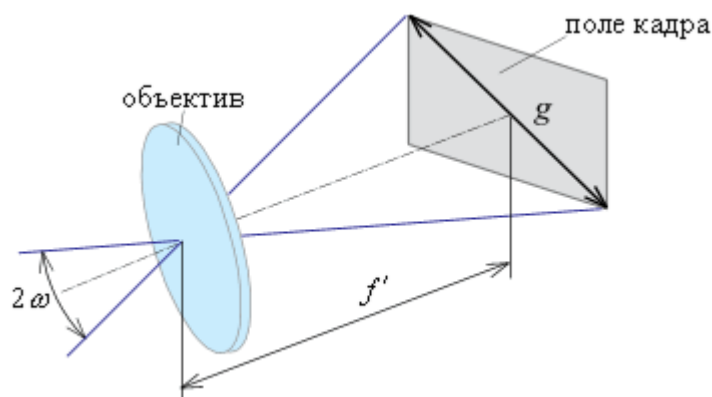


Рисунок 2 – Поле зрения объектива

Поле зрения ОС принято характеризовать в угловых единицах, если наблюдаются значительно удаленные предметы, и в линейных единицах, если наблюдаются близко расположенные предметы.

1.3. Разрешающая способность

Разрешающей способностью, или разрешающей силой, называется способность ОС изображать отдельно две точки [3].

Разрешающую способность ОС определяют с помощью тест-объектов абсолютного контраста в виде мир. Различаются миры штриховые и радиальные (рисунок 3).

Штриховая мира представляет собой группу семейств разноразмещенных штрихов. В каждом семействе штрихи параллельны и одинаковы по ширине. От группы к группе ширина штрихов растет в геометрической прогрессии.

Радиальная мира преимущественно применяется при испытаниях фотообъективов.

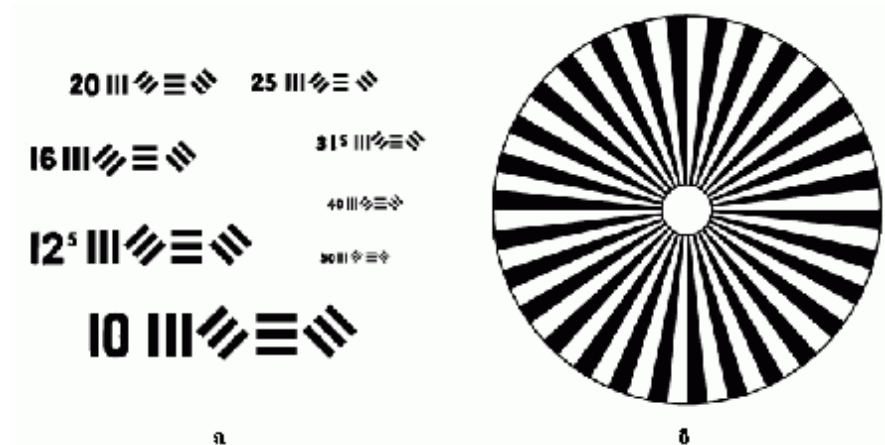


Рисунок 3 – Штриховая (а) и радиальная (б) миры

1.4. Глубина резко изображаемого пространства

Глубиной резко изображаемого пространства или глубиной резкости называется расстояние вдоль оптической оси, измеренное между точками пространства изображений, определяющими границы резкого изображения ОС плоскости, заданной в пространстве предметов [3].

Переднюю и заднюю границы резко изображаемого пространства можно точно определить по формулам:

$$R_{\text{п}} = \frac{R_{\text{н}} f^2}{f^2 + k(R_{\text{н}} - f)z_{\text{сс}}},$$

$$R_{\text{з}} = \frac{R_{\text{н}} f^2}{f^2 - k(R_{\text{н}} - f)z_{\text{сс}}},$$

где $R_{\text{п}}$ и $R_{\text{з}}$ – передняя и задняя границы резко изображаемого пространства соответственно; $R_{\text{н}}$ – расстояние, на которое производится наводка на резкость; f – фокусное расстояние ОС; k – диафрагменное число; $z_{\text{сс}}$ – диаметр кружка рассеяния.

1.5. Относительное отверстие

Отношение диаметра входного отверстия (зрачка) объектива к его фокусному расстоянию называется относительным отверстием. Это отношение выражается в виде дроби с числителем, равным единице, и знаменате-

лем k , равным отношению фокусного расстояния f к диаметру D действующего отверстия объектива [4]. Оно показывает, во сколько раз фокусное расстояние объектива больше диаметра входного отверстия (зрачка)

$$\frac{D}{f} = \frac{1}{k}. \quad (1)$$

Относительное отверстие объектива уменьшают ирисовой диафрагмой, позволяющей бесступенчато менять ее величину. На оправу объектива может быть нанесена шкала из знаменателей относительных отверстий (числа ирисовой диафрагмы), соответствующих различному диафрагмированию. Перевод ирисовой диафрагмы на одно деление изменяет относительное отверстие в $\sqrt{2}$ раз, что дает увеличение или уменьшение площади входного зрачка в два раза и, как следствие, освещенности оптического изображения в два раза.

1.6. Светосила

Светосилой ОС называется отношение освещенности изображения, создаваемого данной системой, к яркости изображаемого предмета.

Рассмотрим частный случай, в котором яркость предмета является постоянной величиной. Тогда освещенность предмета E' и будет параметром, определяющим светосилу ОС.

В ОС от малого элемента площади предмета δ падает световой пучок в пределах телесного угла, опирающегося на входной зрачок. Световой поток dF от малого элемента δ равномерно светящейся поверхности с яркостью B , входящий во входной зрачок ОС, определяется как

$$dF = \delta \pi B \sin^2 u,$$

где u – апертурный угол в пространстве предметов. Аналогично

$$dF' = \delta' \pi B' \sin^2 u',$$

где u' – апертурный угол в пространстве изображений [3].

Если предмет с яркостью B расположен в оптической среде с показателем преломления n , а изображение с яркостью пучка B' в среде с показателем преломления n' то яркость пучка зависит от отношения показателей преломления и от коэффициента пропускания света τ и определяется выражением

$$B' = \tau \left(\frac{n'}{n} \right)^2 B.$$

Освещенность изображения определяется отношением светового потока dF' , прошедшего через систему, к площади изображения δ'

$$E' = \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \pi B \tau \sin^2 u'.$$

Если предмет расположен в бесконечности, а ОС в однородной среде, например в воздухе, то $n = n'$, а угол u' может быть заменен отношением половины диаметра зрачка входа к фокусному расстоянию

$$E' = \frac{\pi B \tau}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2. \quad (2)$$

Подставив (1) в (2), получим

$$E' = \frac{\pi B \tau}{4k^2}. \quad (3)$$

Полученные выражения преобразуем для случая объектов, работающих на отражение, используя известное соотношение

$$E = \frac{B \pi}{\rho},$$

тогда выражения (2) и (3) будут иметь вид

$$E' = \frac{E \rho \tau}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2,$$

$$E' = \frac{E \rho \tau}{4k^2}.$$

1.7. Аберрации оптических систем

Широкие пучки лучей, вышедшие из одной точки предмета, преломляясь ОС, не образуют одну точку схода. Ошибка, или погрешность изображения в ОС, вызываемая отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной ОС, называется аберрацией.

Изучая изображение точки, образованное различными лучами, можно заметить характерные аберрации, присущие только этим лучам. Поэтому отдельно рассматривают прохождение различных лучей через ОС и каждой аберрации присваивают свое наименование [3].

При рассмотрении аберраций различают:

- сферическую аберрацию;
- кому;
- астигматизм;

- дисторсию;
- хроматическую aberrацию.

1.7.1 Сферическая aberrация

Сферическая aberrация – aberrация ОС из-за несовпадения фокусов для лучей света, проходящих на разных расстояниях от оптической оси (рисунок 4) [1].

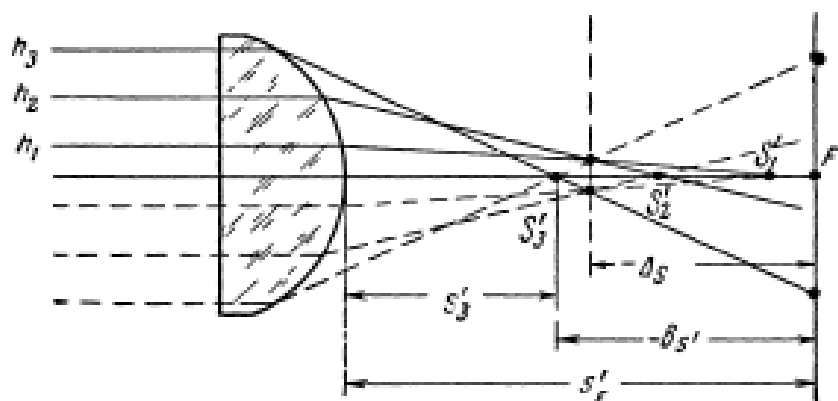


Рисунок 4 – Сферическая aberrация

Сферическая aberrация рассматривается для пучка лучей, выходящего из точки предмета, расположенной на оптической оси. Данное явление имеет место и для других пучков лучей, выходящих из точек предмета, удаленных от оптической оси, но в таких случаях оно рассматривается как составная часть aberrаций всего наклонного пучка лучей.

Первую плоскую поверхность линзы лучи проходят без преломления. Вторую поверхность они встречают под весьма значительными углами падения. Вследствие этого наиболее удаленные от оптической оси лучи преломляются всего сильнее и образуют точку схода, наиболее удаленную от фокальной плоскости.

В результате этого явления цилиндрический пучок лучей в пространстве предметов, после преломления линзой, в пространстве изображений получает вид не конуса, а некоторой воронкообразной фигуры, наружная поверхность которой вблизи узкого места называется каустической поверхностью. Световая энергия распределяется на значительную по величине каустическую поверхность, и тем самым нарушается образование точечного изображения.

1.7.2. Кома

В наклонном пучке лучей, кроме сферической аберрации, обнаруживается и нарушение симметрии всего строения, которое называют комой.

Основной причиной комы является, как и в случае сферической аберрации, кривизна поверхности. Но в осевом пучке, вверх и вниз от оптической оси, существует полная симметрия в условиях преломления, а для наклонного пучка лучей этой симметрии нет. Поэтому верхние и нижние части пучка после преломления получают различные погрешности (рисунок 5) [3].

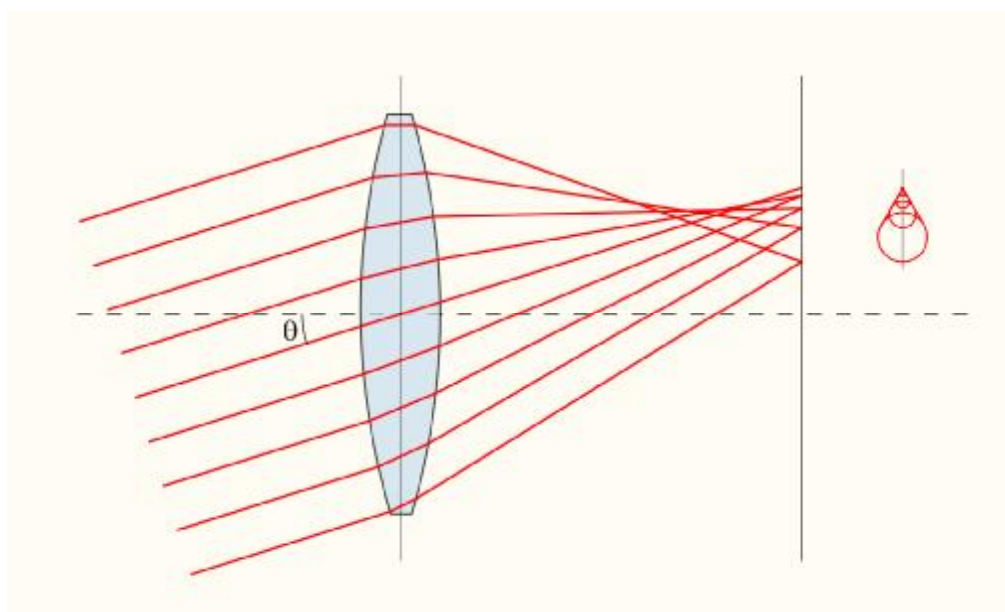


Рисунок 5 – Кома

1.7.3. Астигматизм

Астигматизмом называется аберрация ОС, которая проявляется в том, что лучи одного и того же пучка, идущие относительно друг друга в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, после преломления в ОС не собираются в одну точку, а образуют две точки схода (рисунок 6). Расстояние между точками схода называется астигматической разностью [3].

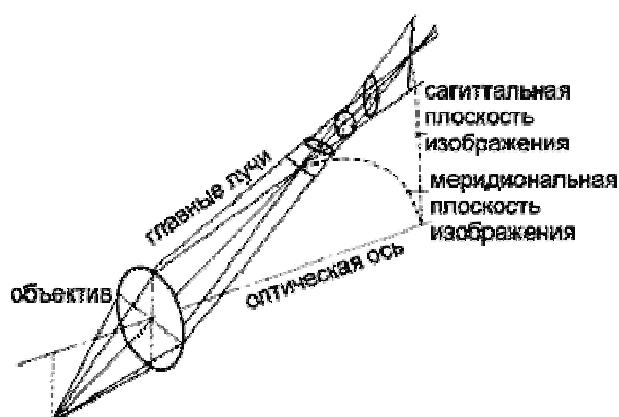


Рисунок 6 – Астигматизм

Для пучка лучей, идущего из точки на оси ОС, астигматизм отсутствует, так как в обоих направлениях кривизны поверхностей одинаковы. Наличие же астигматизма в центре поля указывает на нарушение центрированности ОС. С этим явлением приходится встречаться в практике сборки оптических деталей приборов.

1.7.4. Дисторсия

Дисторсия – аберрация ОС, при которой коэффициент линейного увеличения изменяется по полю зрения объектива. При этом нарушается геометрическое подобие между объектом и его изображением [1]. Дисторсия не влияет на резкость изображения.

Дисторсия проявляется в том, что правильный квадрат изображается в виде подушки или бочки или еще более сложной фигуры (рисунок 7).

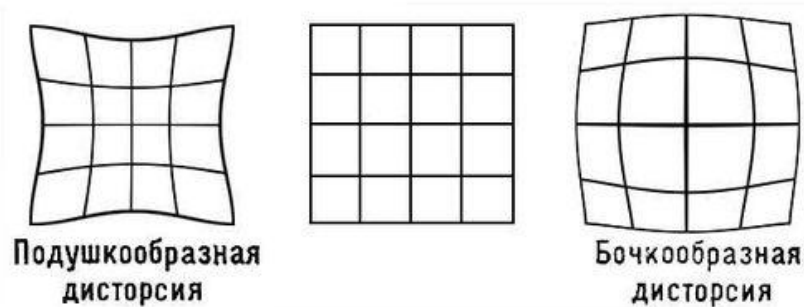


Рисунок 7 – Проявление дисторсии

В первом случае дисторсия называется подушкообразной, или положительной, так как величина действительного изображения больше теоретического. Во втором случае – бочкообразной, или отрицательной. Обычно одна часть изображения является бочкообразной, а другая – подушкообразной [3].

1.7.5. Хроматическая aberrация

Хроматическая aberrация – разновидность aberrации ОС, обусловленная зависимостью показателя преломления среды от длины волны проходящего через нее излучения (то есть, дисперсией света) [1]. Иными словами, ОС, преломляя лучи света и разлагая белый свет на составные части, смещает изображения в различных лучах спектра относительно друг друга (рисунок 8).

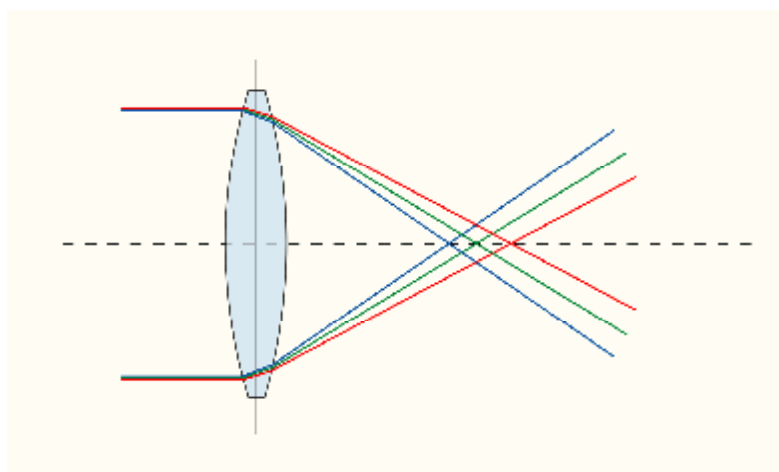


Рисунок 8 – Хроматическая aberrация

Хроматическая aberrация проявляется в окрашивании изображения (рисунок 9).



Рисунок 9 – Проявление хроматической aberrации

1.8. Функция рассеяния точки

Как отмечалось выше, в реальной ОС точка изображается в виде кружка рассеяния.

Основной характеристикой, описывающей передачу структуры предмета ОС, является функция рассеяния точки.

Функция рассеяния точки (ФРТ) – это функция, описывающая зависимость распределения освещенности от координат в плоскости изображения, если предмет – это светящаяся точка в центре изопланатической зоны [5].

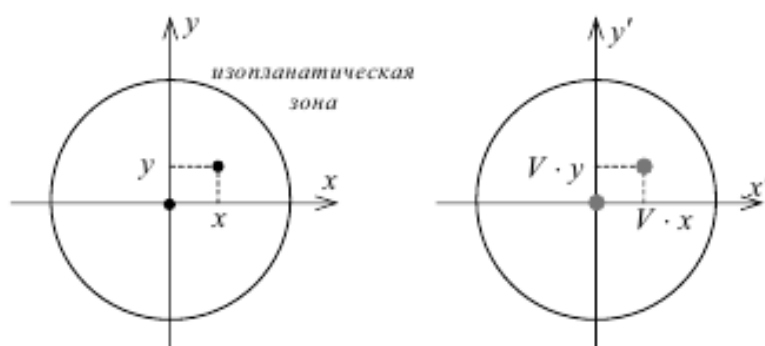


Рисунок 10 – Точка и ее изображение в пределах изопланатической зоны

С помощью ФРТ можно найти изображение любого предмета, если разложить его на точки и найти ФРТ от каждой. Так, каждая точка предмета $I(x, y)$ изображается в виде функции $h(x' - Vx, y' - Vy)$. Другими словами, ФРТ смещается в точку с координатами (Vx, Vy) (см. рисунок 10). Изображение предмета представляет собой сумму

$$I'(x', y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) h(x' - Vx, y' - Vy) dx dy.$$

1.9. Частотно-контрастная характеристика

О качестве ОС можно судить по изображению любого предмета, но для количественной оценки удобнее применять тест-объекты простейшей геометрической формы. Особое положение среди таких тестобъектов занимает косинусоидальная решетка, у которой светность распределена по закону

$$R(x) = R_{\phi} + R_a \cos 2\pi Nx, \quad (4)$$

где R_{Φ} – светность равномерного фона; R_a – амплитуда колебания светности в плоскости предмета вдоль оси x ; N – частота решетки, т.е. число периодов решетки в единице длины. Предельные значения светности решетки будут равны $R_{\max} = R_{\Phi} + R_a$ и $R_{\min} = R_{\Phi} - R_a$, отсюда величина контраста в плоскости предмета:

$$k_{\text{мод}} = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}} = \frac{R_a}{R_{\Phi}}.$$

Отношение $k_{\text{мод}}$ амплитудного значения светности R_a к ее среднему значению (фону) R_{Φ} называют коэффициентом модуляции.

Распределение освещенности в плоскости изображения:

$$E(x) = R_{\Phi} + R_a |T(N)| \cos[2\pi Nx - \varphi(N)]. \quad (5)$$

Из сопоставления выражений (4) и (5) следует, что косинусоидальная решетка изображается объективом также в виде косинусоидальной решетки. Изображение отличается от оригинала в двух отношениях:

- 1) амплитуда колебаний освещенности в изображении в $|T(N)|$ раз меньше, чем в самой решетке;
- 2) вне оптической оси изображение решетки может не совпасть с его положением, рассчитанным по законам оптики идеальной системы, на что указывает присутствие смещения фазы $\varphi(N)$.

Смещение, не зависящее от частоты N , может быть вызвано дисторсией, а смещение фазы, вследствие возникновения асимметрии в фигуре рассеяния и зависящее от частоты, – аберрациями комы и астигматизмом.

Из (4) следует, что контраст изображения решетки равен:

$$k' = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} = \frac{R_a}{R_{\Phi}} |T(N)| = k_{\text{мод}} |T(N)|$$

или

$$|T(N)| = \frac{k'}{k_{\text{мод}}},$$

т. е. функция $|T(N)|$ характеризует отношение контраста изображения решетки к контрасту самой решетки; эту функцию, зависящую от пространственной частоты N решетки, называют частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) объектива. Также ее называют функцией передачи модуляции (ФПМ) [6].

1.10. Дифракция Фраунгофера. Описание функции рассеяния точки

Рассмотрим дифракцию монохроматического света на бесконечном непрозрачном экране с отверстием Σ конечных размеров. Рассматривается плоский экран, с которым жестко связана прямоугольная система координат (x_1, y_1) . Кроме того, предполагается, что область наблюдения представляет собой плоскость, параллельную плоскости экрана и расположенную на расстоянии z по нормали от него. С плоскостью наблюдения связана система координат (x_0, y_0) , оси которой параллельны осям плоскости (x_1, y_1) .

Используя математическое выражение принципа Гюйгенса-Френеля, можно найти амплитуду поля в точке (x_0, y_0)

$$U(x_0, y_0) = \iint_{\Sigma} h(x_0, y_0; x_1, y_1) U(x_1, y_1) dx_1 dy_1.$$

Здесь

$$h(x_0, y_0; x_1, y_1) = \frac{1}{j\lambda} \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos(\bar{n}, \bar{r}_{01}), \quad (6)$$

где r_{01} – расстояние до точки наблюдения.

Предположив, что расстояние z между отверстием и плоскостью наблюдения значительно превышает максимальный размер отверстия Σ , а также, что в плоскости наблюдения рассматривается только конечная область вблизи оси z и что расстояние z много больше максимально размера этой области, можно считать

$$\cos(\bar{n}, \bar{r}_{01}) \approx 1.$$

При этом величина \bar{r}_{01} в знаменателе выражения (6) будет лишь незначительно отличаться от z . В этом случае для функции h справедливо выражение:

$$h(x_0, y_0; x_1, y_1) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkr_{01}).$$

Величину \bar{r}_{01} в экспоненте нельзя просто заменить на z , так как возникающая при этом погрешность умножается на очень большое число k и фазовые погрешности становятся много больше 2π рад.

В области дифракции Френеля напряженность поля $U(x_0, y_0)$ можно найти путем фурье-преобразования произведения распределения $U(x_1, y_1)$

в отверстии на квадратичную фазовую функцию $\exp\left[j(k/2z)(x_1^2 + y_1^2)\right]$. Но если принять более строгое предположение Фраунгофера

$$z \gg \frac{k(x_1^2 + y_1^2)_{\text{макс}}}{2},$$

то квадратичный фазовый множитель становится приблизительно равным равным единице по всему отверстию, а наблюдаемое распределение поля можно найти непосредственно, вычисляя фурье-образ распределения в самом отверстии. Таким образом, в области дифракции Фраунгофера

$$U(x_0, y_0) = \frac{\exp(jkz) \exp\left[j \frac{k}{2z}(x_0^2 + y_0^2)\right]}{j\lambda z} \iint_{\infty} U(x_1, y_1) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z}(x_0 x_1 + y_0 y_1)\right] dx.$$

Для дальнейших преобразований положим, что отверстие имеет круглую форму, а диаметр отверстия равен l . Амплитудный коэффициент пропускания такого отверстия имеет вид

$$t(r_1) = \text{circ}\left(\frac{r_1}{l/2}\right),$$

где r_1 – величина радиуса-вектора в плоскости отверстия.

Осевая симметрия этой задачи позволяет применить преобразование Фурье-Бесселя. Таким образом, дифракционную картину Фраунгофера можно описать выражением

$$U(r_0) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left(j \frac{kr_0^2}{2z}\right) B\{U(r_1)\},$$

в котором r_0 – величина радиуса-вектора в плоскости наблюдения.

В том случае если отверстие освещается нормально падающей волной единичной амплитуды, распределение поля в отверстии описывается коэффициентом пропускания $U(r_1) = t(r_1)$. Кроме того,

$$B\left\{\text{circ}\left(\frac{r_1}{l/2}\right)\right\} = \left(\frac{l}{2}\right)^2 \frac{J_1(\pi l \rho)}{l \rho / 2}.$$

Таким образом, видно, что распределение амплитуды в дифракционной картине Фраунгофера имеет вид

$$\begin{aligned} U(r_0) &= \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left(j \frac{kr_0^2}{2z}\right) \left[\left(\frac{l}{2}\right)^2 \frac{J_1(\pi l r_0 / \lambda z)}{l r_0 / 2 \lambda z}\right] = \\ &= \exp(jkz) \exp\left(j \frac{kr_0^2}{2z}\right) \frac{kl^2}{j8z} \left[2 \frac{J_1(kl r_0 / 2z)}{kl r_0 / 2z}\right], \end{aligned}$$

тогда как распределение интенсивности описывается выражением

$$I(r_0) = \left(\frac{kl^2}{8z} \right)^2 \left[2 \frac{J_1(klr_0/2z)}{klr_0/2z} \right]^2.$$

Полученное распределение называют картиной Эйри. Первому минимуму картины Эйри соответствует координата 1,22.

1.11. Дифракционный предел. Критерий Рэля

В фокальной плоскости линзы наблюдается дифракционная картина Фраунгофера или дифракция в параллельных лучах. Согласно законам геометрической оптики, в фокусе линзы должно располагаться точечное изображение малоразмерного объекта. На самом деле изображение малоразмерного объекта оказывается размытым из-за дифракции. Таким образом проявляется волновая природа света. В случае дифракции Фраунгофера на круглом отверстии диаметра D дифракционная картина состоит из центрального светлого пятна (диск Эйри), на которое приходится около 85 % энергии света, и концентрических колец окружающих его (рисунок 11). Эта дифракционная картина и принимается за изображение точечного источника [7].

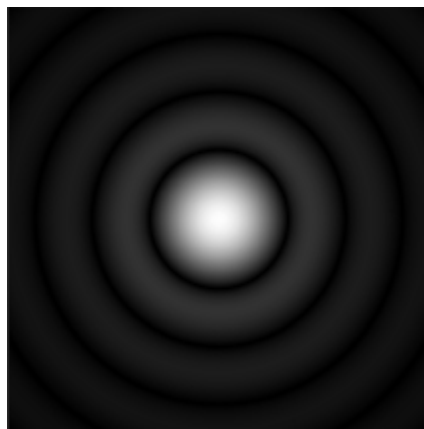


Рисунок 11 – Дифракционное изображение точечного источника

Радиус центрального пятна в фокальной плоскости линзы равен

$$r = 1,22 \frac{\lambda}{D} f.$$

Во многих ОС дифракционное размытие изображений незаметно за значительно более сильными искажениями из-за несовершенства оптики.

Но в высокоточных астрономических приборах реализуется дифракционный предел качества изображений.

Вследствие дифракционного размытия изображения двух близких точек объекта могут оказаться неотличимы от изображения одной точки. Рассмотрим в качестве примера объектив телескопа, нацеленного на две близкие звезды, удаленные на угловое расстояние ψ друг от друга. Будем считать, что все дефекты и aberrации устранены, и в фокальной плоскости объектива наблюдаются дифракционные изображения звезд (рисунок 12).

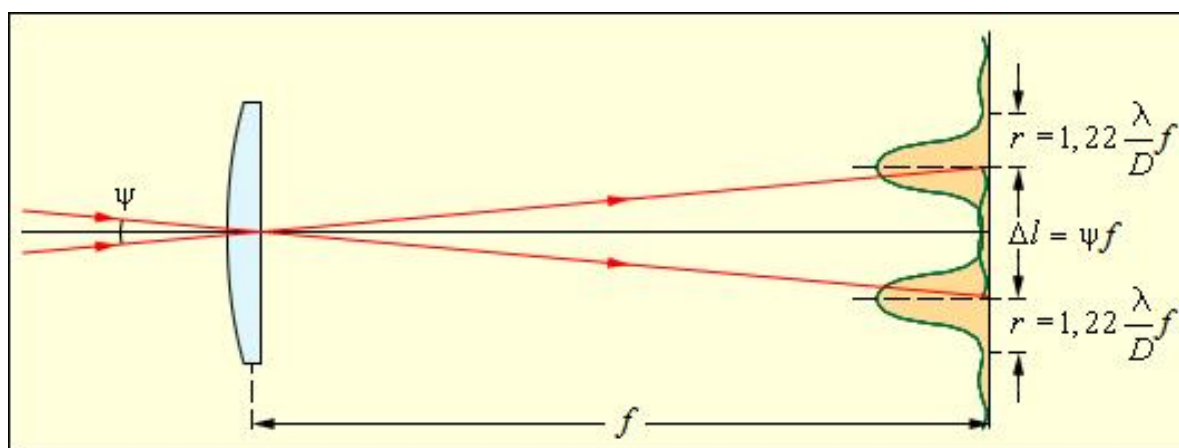


Рисунок 12 – Дифракционные изображения двух близких звезд в фокальной плоскости объектива телескопа

На рисунке 12 расстояние Δl между центрами дифракционных изображений звезд превышает радиус r центрального светлого пятна – в данном случае изображения звезд воспринимаются наблюдателем отдельно и объектив телескопа позволяет разрешить две близкие звезды. При уменьшении углового расстояния ψ между ними дифракционные изображения начнут перекрываться и перестанут отличаться от изображения одиночной звезды. В этом случае объектив телескопа будет не способен различить близкие звезды.

В конце XIX в. Английский физик Джон Рэлей предложил условно считать разрешение полным, если расстояния Δl между центрами изображений равно или превышает радиус r диска Эйри. Условие $\Delta l = r$ называют критерием разрешения Рэля (рисунок 13) [7].

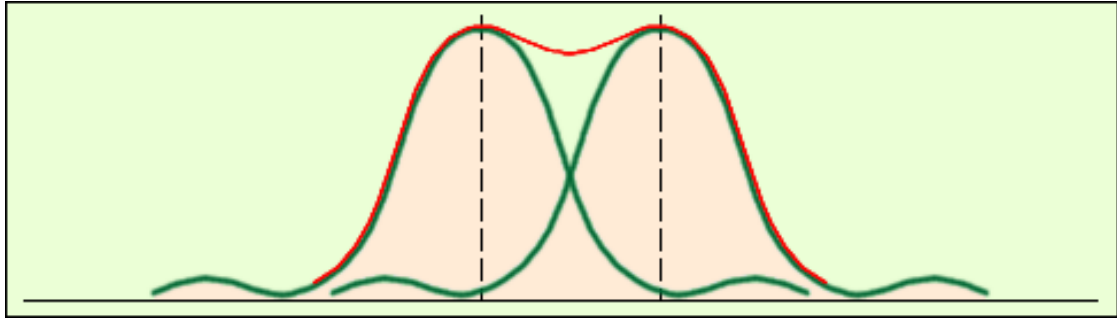


Рисунок 13 – Предел разрешения по Релею

Из этого критерия следует

$$\Delta l_{\min} = \psi_{\min} \cdot f = 1,22 \frac{\lambda}{D} f \quad \text{или} \quad \psi_{\min} = 1,22 \frac{\lambda}{D}.$$

2. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Методы определения параметров кружка рассеяния объектива

Методы определения параметров кружка рассеяния можно разделить на визуальные и фотоэлектрические. Визуальные методы применяют для исследования ОС в видимой области спектра. Измерения производятся на оптической скамье при помощи микроскопа с окуляром-микрометром или на специальной установке, состоящей из тех же элементов (рисунок 14).

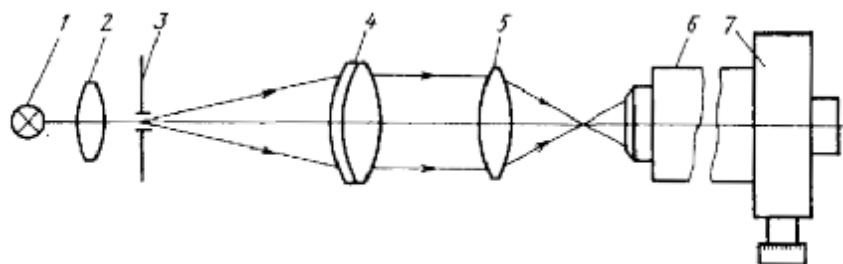


Рисунок 14 – Установка для исследования кружка рассеяния

В фокальной плоскости объектива коллиматора 4 размещается точечная диафрагма 3, освещаемая источником света 1 через конденсор 2. Исследуемый объектив 5 располагается на минимальном расстоянии от объектива коллиматора. Он создает изображение точечной диафрагмы в виде кружка рассеяния. Измерения же проводятся в плоскости наилучшего изображения, определяемой с помощью микроскопа 6 по наилучшей резкости изображения. Окуляром-микрометром 7 измеряют диаметр центрального светлого пятна [8].

Для получения дифракционного изображения диаметр точечной диафрагмы выбирают исходя из заданной погрешности.

2.1.1. Метод секторного раstra

Существует целая группа методов измерения кружка рассеяния. Одним из самых известных является метод секторного раstra. С помощью данного метода можно измерить размер кружка рассеяния как в видимой, так и в невидимой области спектра. Метод измерения основывается на изменении глубины модуляции потока излучения в зависимости от переме-

щения кружка рассеяния от центра к краю сектора раstra, и в зависимости от радиуса раstra, на который проецируется кружок рассеяния [8].

При перемещении кружка рассеяния вдоль сектора раstra (рисунок 15) амплитуда модулированного потока излучения будет увеличиваться до тех пор, пока кружок не впишется в угол сектора. В этом случае будет обеспечена 100 %-ная модуляция потока излучения и амплитуда сигнала достигнет максимального значения A_{\max} .

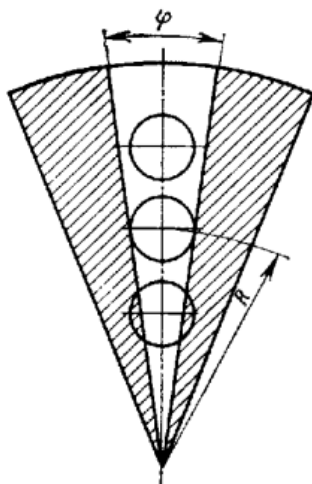


Рисунок 15 – Перемещение кружка рассеяния вдоль сектора раstra

Дальнейшее перемещение кружка не изменит амплитуды сигнала, а только повлияет на его форму (рисунок 16).

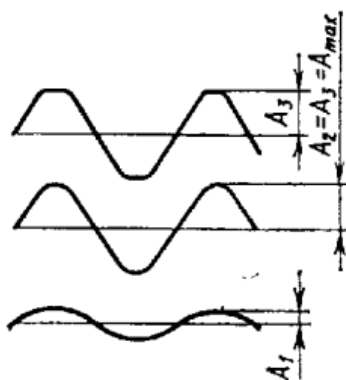


Рисунок 16 – Изменение амплитуды модулированного потока излучения

По радиусу R раstra, на котором амплитуда сигнала имеет максимальное значение и при дальнейшем перемещении кружка вдоль сектора заметно не увеличивается, определяют размер кружка в направлении сканирования

$$l = 2R \sin(\varphi/2), \quad (7)$$

для практического использования можно принять

$$l = \pi R / m, \quad (8)$$

где R – радиус секторного растра при максимальном значении амплитуды сигнала; φ – угол сектора растра; m – число пар секторов растра.

Измерения выполняют в различных направлениях, чтобы определить форму кружка рассеяния в меридиональном и сагиттальном сечениях. Устройство для измерения кружка рассеяния исследуемого объектива методом секторного растра (рисунок 17) включает в себя коллиматор с точечной диафрагмой 3, которая освещается источником излучения 1 через конденсор 2. Диафрагма 3 расположена в фокальной плоскости объектива коллиматора 5. Исследуемый объектив 6 проецирует точечную диафрагму 3 в виде кружка рассеяния. В плоскости наилучшего изображения диафрагмы расположен модулирующий растр 7. Число секторов растра выбирают в зависимости от размеров предполагаемого диаметра кружка рассеяния объектива. Растр вращается электродвигателем 10 с постоянной скоростью. Фотоприемное устройство (ФПУ) 8 преобразует световые сигналы в электрические, которые поступают на усилитель 9, а затем – на электроизмерительный прибор (гальванометр или осциллограф). Плоское зеркало 4 служит для сокращения габаритных размеров прибора.

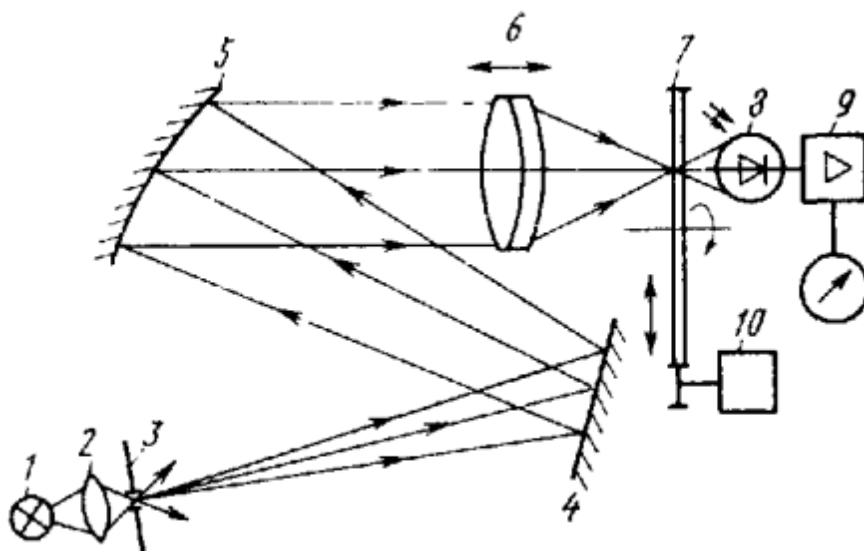


Рисунок 17 – Схема устройства для измерения кружка рассеяния методом секторного растра

Исследуемый объектив 6 проецирует точечную диафрагму 3 в виде кружка рассеяния. В плоскости наилучшего изображения диафрагмы расположен модулирующий растр 7. Число секторов растра выбирают в зависимости от размеров предполагаемого диаметра кружка рассеяния объектива. Растр вращается электродвигателем 10 с постоянной скоростью. Фотоприемное устройство (ФПУ) 8 преобразует световые сигналы в электрические, которые поступают на усилитель 9, а затем – на электроизмерительный прибор (гальванометр или осциллограф). Плоское зеркало 4 служит для сокращения габаритных размеров прибора.

Установив исследуемый объектив 6 на штатив, перемещают его вдоль оптической оси, определяя плоскость изображения по максимальному сигналу на измерительном приборе. В этой плоскости и проводятся измерения. Максимальные показания измерительного прибора наблюдаются при полном перекрытии кружка рассеяния секторами раstra. По радиусу, зафиксированному в этом положении, вычисляют размер кружка рассеяния в направлении сканирования. Шкалу поперечного перемещения раstra градуируют в размерах кружка рассеяния согласно формулам (7) и (8).

Чувствительность схемы определяется по изменению падающего на ФПУ потока излучения, выраженного в делениях шкалы электроизмерительного прибора, при перемещении кружка вдоль сектора раstra. Зависит чувствительность главным образом от характеристик оптических элементов и от параметров электрической измерительной части схемы [8].

Относительная погрешность измерений размера кружка рассеяния рассмотренным методом не превышает 0,1 % при $m=100$.

2.1.2. Измерение распределения энергии в кружке рассеяния

Данный метод измерения основывается на фотометрировании изображения точечного источника путем пропускания света сквозь постепенно увеличивающиеся в диаметре круглые отверстия.

Схема измерения (рисунок 18) содержит исследуемый объектив 5, который проецирует изображение точечной диафрагмы 3, освещенной источником света 1 через конденсор 2, с помощью объектива коллиматора 4 в плоскость наилучшего изображения. Микрообъектив 6 переносит это изображение в плоскость диска 7, на котором расположены круглые отверстия различного диаметра. Плоское зеркало с 90 %-ным отражением делит световой поток на две части: одна часть (10 %) используется для юстировки с помощью окуляра 10, который предназначен для визуального наблюдения, а другая часть (90 %) ограничивается круглыми диафрагмами и с помощью ФПУ 8 преобразуется в электрические сигналы. Фототок на выходе ФПУ регистрируется электроизмерительный прибором.

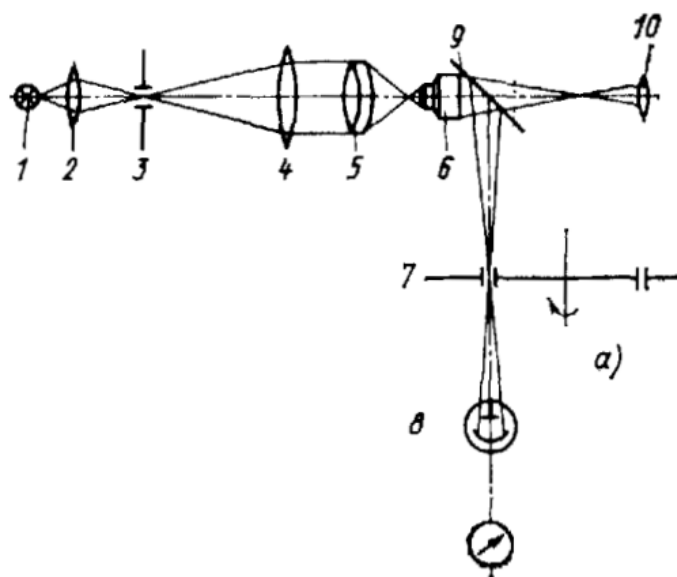


Рисунок 18 – Схема устройства для измерения распределения энергии в кружке рассеяния

Вначале визуально находится плоскость изображения по наилучшей резкости изображения произвольного отверстия. Затем она уточняется по максимальному значению сигнала при установке на диске наименьшего отверстия. Максимальное значение сигнала достигается путем перемещения исследуемого объектива вдоль оптической оси. Показания электроизмерительного прибора при наименьшем отверстии записывается и дальнейшие измерения производят в этой плоскости, постепенно увеличивая размер отверстий до тех пор, пока показания электроизмерительного прибора не перестанут увеличиваться [8]. Процент энергии E находится по формуле

$$E = \frac{I_i}{I_{\max}} 100\% ,$$

где I_i – значение фототока, измеренное гальванометром при данном отверстии; I_{\max} – значение фототока при максимальном диаметре отверстия.

По полученным результатам строится график зависимости энергии от диаметра диафрагмы.

2.1.3. Метод сканирования точечной диафрагмой

Метод сканирования изображения точечной диафрагмой основан на сканировании кружка рассеяния отверстием малого диаметра в продоль-

ном (вдоль оптической оси) и поперечном (перпендикулярно к оптической оси) направлениях.

Увеличенный кружок рассеяния сканируется точечной диафрагмой, диаметр которой в десятки раз меньше исследуемого поля. Это позволяет передать микроструктуру изображения с высокой точностью.

Так как сканирующая диафрагма очень мала по сравнению с полем анализа, ее пропускание можно приближенно аппроксимировать δ -функцией.

При одномерном сканировании поток излучения, прошедший через сканирующую диафрагму,

$$\Phi(x_0) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \delta(x - x_0) dx = A(x_0),$$

где $A(x)$ – функция рассеяния исследуемого объектива в направлении сканирования; x_0 – координата сканирующей диафрагмы; x – текущая координата поля анализа.

Таким образом, поток излучения, прошедший через сканирующую диафрагму, пропорционален значению функции рассеяния в точке с координатой x_0 .

Сканируя кружок рассеяния по всей плоскости и измеряя поток излучения с помощью ФПУ, получают двумерную функцию рассеяния исследуемой ОС.

Для определения размеров кружка рассеяния с заданным содержанием энергии находят поперечные сечения объемной фигуры функции рассеяния на установленном уровне освещенности плоскостью, перпендикулярной оптической оси (рисунок 19).

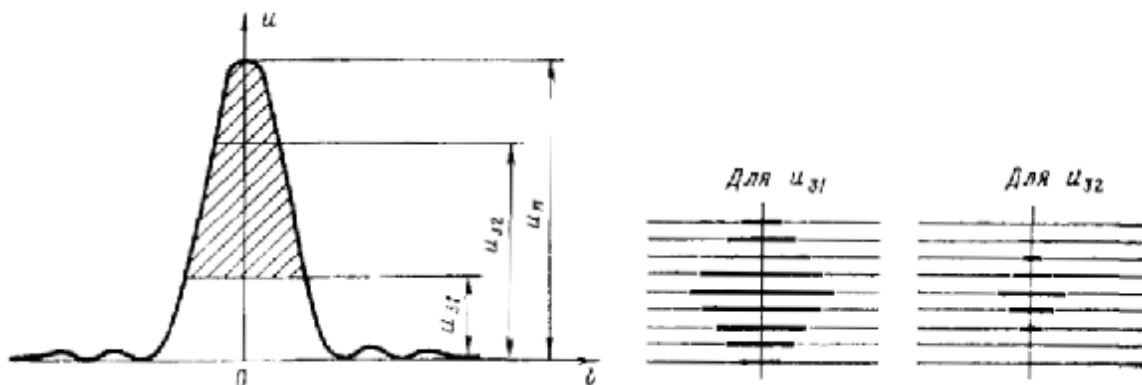


Рисунок 19 – Поперечные сечения функции рассеяния

2.2. Цель и задачи исследования

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что существующие методы требуют использования сложного и дорогостоящего дополнительного оборудования, прецизионной юстировки, значительного периода времени для снятия даже одного кружка рассеяния. Все это приводит к тому, что кружок рассеяния объектива редко оценивается и, как правило, не входит в число паспортных параметров, хотя является очень критичным при работе по изображениям малоразмерных (точечных) объектов, таких как звезды.

Таким образом, целью данной работы является разработка метода определения радиуса кружка рассеяния, не требующего точной юстировки, обеспечивающего возможность быстрого автоматизированного проведения измерений, реализующего высокую точность определения радиуса, позволяющего проводить измерения в различных спектральных диапазонах и в различных частях поля зрения объектива.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать статистический метод определения радиуса кружка рассеяния, основанный на методе вычисления центра масс;
- провести компьютерное моделирование метода;
- разработать экспериментальный стенд;
- получить экспериментальные данные и провести их анализ;
- разработать рекомендации по применению разработанного метода;
- разработать мероприятия по специальным вопросам обеспечения безопасности.

3. РАЗРАБОТКА СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРУЖКА РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТИВА

3.1. Метод определения центра тяжести изображений малоразмерных объектов

Точность, сложность и априорная неопределенность формы сигнала – это главные параметры, определяющие вид вычислителя координат точечных источников. На практике баланс между точностью и сложностью достигается выбором алгоритма, устойчивого к изменению формы сигнала, – определение координаты центра тяжести полезного сигнала [9]

$$\bar{x} = \sum_i i \Delta U_i / \sum_i U_i, \quad (9)$$

Метод центра тяжести основывается на трактовке отклика ОС на излучение точечного источника как плотности вероятности его координат. При этом предполагается, что определение координат по центру тяжести не зависит от вида и величины реакции ОС на излучение точечного источника [10].

При вычислении координат решающую роль играет шум не в отсчете с максимумом сигнала точечного источника, а в соседних с ним. Это связано с тем, что алгоритм (9) может быть преобразован к виду, содержащему номер отсчета с максимальным значением сигнала точечного источника i_m и дробную часть, вычисляемую через значения сигнала в соседних отсчетах – i_{m-1} и i_{m+1}

$$\bar{x} = \Delta \left(i_m + \frac{\sum_{j=1}^{\infty} j (U_{i_m-j} - U_{i_m+j})}{\sum_{j=-\infty}^{\infty} U_{i_m+j}} \right).$$

При дискретизации сигнала точечного источника по каждой оси на три элемента разложения оценка координат определяется сигналами в двух соседних с максимальным отсчетах с номерами i_{m-1} и i_{m+1}

$$\bar{x} = \Delta \left(i_m + \frac{U_{i_{m-1}} + U_{i_{m+1}}}{U_{i_{m-1}} + U_{i_m} + U_{i_{m+1}}} \right).$$

Ошибка определения координат при использовании алгоритма центра тяжести имеет несколько компонент, обусловленных шумом. Поскольку

шум вызывает два явления: одно – обычное уменьшение точности, другое – неоднозначность [11], оценка может быть отброшена от своего истинного положения настолько, что будет казаться соответствующей совершенно ложному значению координаты. Таким образом, полная ошибка измерения координат ε будет содержать две компоненты: нормальную ошибку ε_n , определяемую уменьшением точности, и аномальную ошибку ε_a , определяемую неоднозначностью внутри самого сигнала:

$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_a.$$

Нормальная ошибка аналогична пропуску полезного сигнала при обнаружении сигнала. Аномальная ошибка, аналогичная ложной тревоге, определяется вероятностью неправильного определения отсчета с максимальным значением сигнала. Нормальная ошибка в случае разложения сигнала точечного источника на большое число элементов вычисляется по формуле

$$\varepsilon_n = 2\Delta^2 \left(\sum_{j=1}^{\infty} j \sigma_{i_m-j}^2 \right) / \left(\sum_{j=-\infty}^{\infty} U_{i_m-j} \right)^2. \quad (10)$$

Из выражения (10) видно, что нормальная ошибка при увеличении размера элемента монотонно возрастает.

Аномальная ошибка определяется вероятностями $p(U_{i_m+j} > U_{i_m})$ превышения смесью сигнала и шума в соседних элементах над содержащим истинный максимум сигнала точечного источника:

$$\varepsilon_a = \sum_{j=-\infty}^{\infty} (j\Delta)^2 p(U_{i_m+j} > U_{i_m}) = 2 \sum_{j=1}^{\infty} (j\Delta)^2 p(U_{i_m+j} > U_{i_m}). \quad (11)$$

Из анализа формулы (11) можно сделать вывод, что аномальная ошибка при увеличении размера элемента, в отличие от нормальной, монотонно убывает. Эти противоположные тенденции и определяют наличие оптимального для измерения координат размера элемента разложения [9].

3.2. Статистический метод определения кружка рассеяния

Рассмотренный выше метод центра тяжести лежит в основе статистического метода определения кружка рассеяния.

Суть разработанного метода заключается в следующем. С помощью исследуемого объектива получают изображение большого числа точечных источников (рисунок 20, а). На цифровом изображении распределение ин-

тенсивности светового потока от точечного источника представляет собой дискретизированные в пространстве и квантованные по уровням значения сигнала. С большой точностью можно утверждать, что значения сигналов подчинятся гауссовскому распределению с СКО σ .

Далее, методом центра тяжести определяется фотоцентры изображений каждого источника (рисунок 20, б). После этого все изображения проецируются на область пикселей в окрестностях точки, которая выбирается исходя из удобства обработки. В этой точке сигналы точечных источников складываются (рисунок 20, в), и измеряется ширина полученного сигнала по уровню $1/e^2$ (рисунок 20, г).

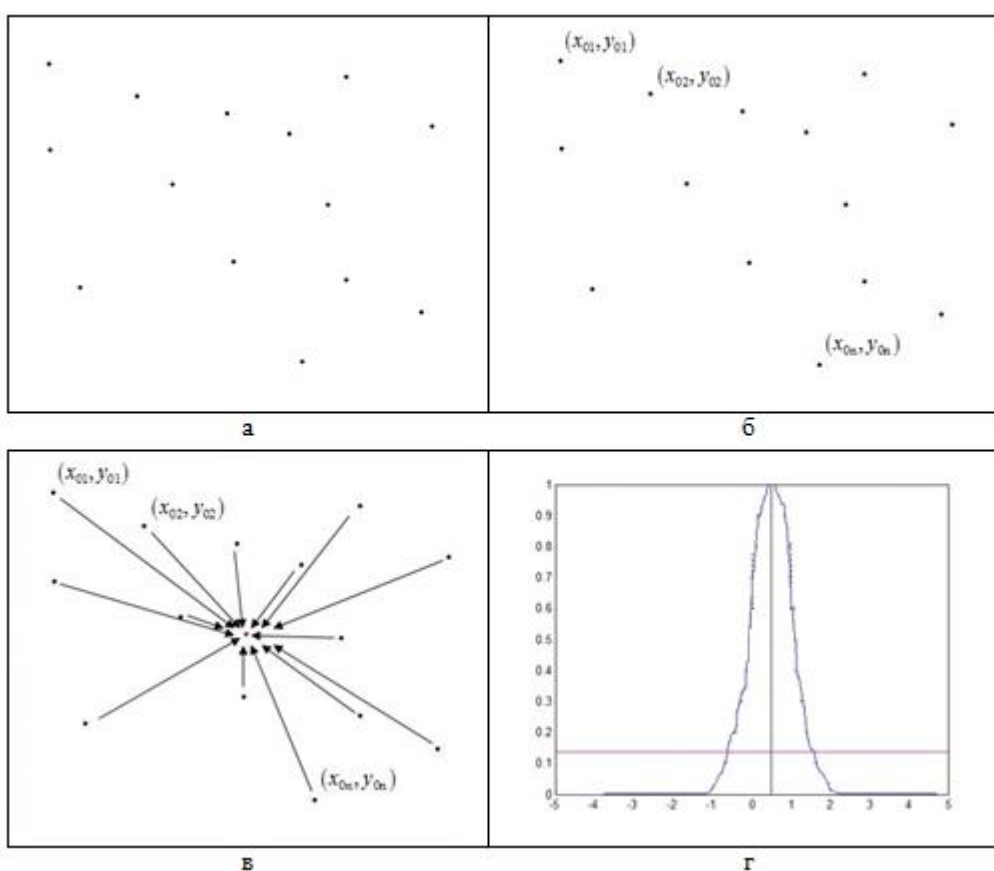


Рисунок 20 – Этапы статистического метода определения кружка рассеяния

При этом форма суммарного сигнала совпадает с формой свертки сигнала от одного источника с пикселом (прямоугольным импульсом).

Аналитически двумерная свертка упомянутых функций определяется выражением

$$C(x) = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x - x_0}{\sigma\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta - x_0}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y - y_0}{\sigma\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y - \Delta - y_0}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right], \quad (12)$$

где $(x_0; y_0)$ – координаты центра тяжести сигнала точечного источника; Δ – длительность прямоугольного импульса (размер пиксела); σ – средне-квадратическое отклонение.

На рисунке 21 представлен полученный в соответствии с выражением (12) график зависимости расширения кружка рассеяния по отношению к одиночному сигналу точечного источника от σ . По нему видно, что при увеличении σ радиус кружка рассеяния стремится к радиусу исходного распределения.

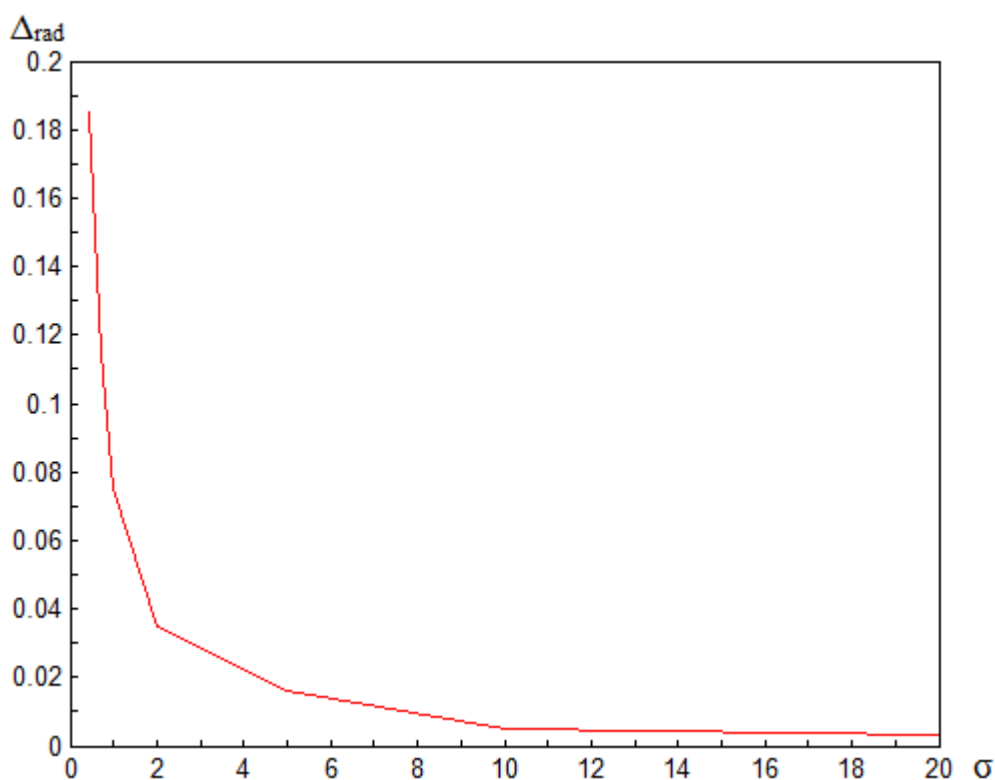


Рисунок 21 – График зависимости расширения кружка рассеяния по отношению к одиночному сигналу точечного источника от σ

Представленная зависимость позволяет определить кружок рассеяния исследуемого объектива при известном σ и измеренной ширине суммарного сигнала.

Таким образом, алгоритм статистического метода определения кружка рассеяния можно проиллюстрировать схемой, представленной на рисунке 22.

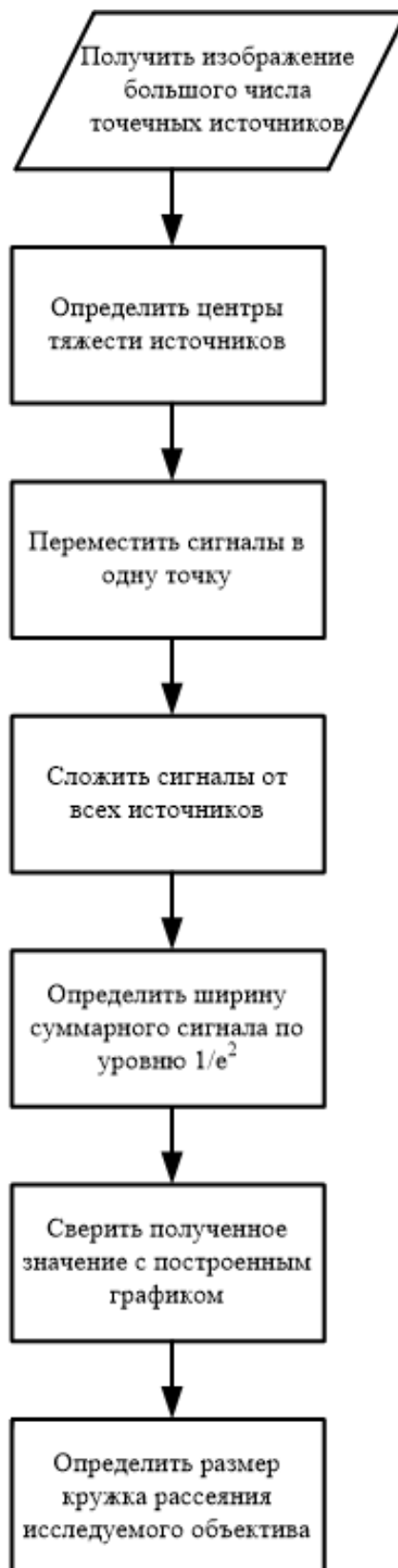


Рисунок 22 – Блок-схема разработанного метода

Разработанный метод обладает рядом особенностей, среди которых:

- определение радиуса с субпиксельной точностью;

- возможность проводить измерения в различных спектральных диапазонах;
- возможность проводить измерения в различных областях поля зрения объектива;
- измерения полностью автоматизированы.

Метод требует использования только имитатора точечных объектов, желательно с переменным спектральным составом. В качестве такого может выступать, например, экран ЖК-монитора.

4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА

4.1. Среда программирования MATLAB

Моделирование исследуемого метода проводилось в пакете MATLAB. С помощью MATLAB можно анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения. Выбор пакета обусловлен следующими его особенностями:

- платформонезависимый высокоуровневый язык программирования ориентированный на матричные вычисления и разработку алгоритмов;
- интерактивная среда для разработки кода, управления файлами и данными;
- функции линейной алгебры, статистики, анализ Фурье, решение дифференциальных уравнений и пр.;
- богатые средства визуализации, 2-D и 3-D графика;
- встроенные средства разработки пользовательского интерфейса для создания законченных приложений на MATLAB;
- средства интеграции с C/C++, наследование кода, ActiveX технологии.

MATLAB – это высокоэффективный язык инженерных и научных вычислений. Он поддерживает математические вычисления, визуализацию научной графики и программирование с использованием легко осваиваемого операционного окружения, когда задачи и их решения могут быть представлены в нотации, близкой к математической. Также MATLAB предоставляет объектно-ориентированные возможности и интерфейсы к программам, написанным на других языках программирования [12].

Программы, написанные на MATLAB, бывают двух типов – функции и скрипты. Функции имеют входные и выходные аргументы, а также собственное рабочее пространство для хранения промежуточных результатов вычислений и переменных. Скрипты же используют общее рабочее пространство. Как скрипты, так и функции сохраняются в виде текстовых файлов и компилируются в машинный код динамически. Существует также возможность сохранять так называемые pre-parsed программы – функции и скрипты, обработанные в вид, удобный для машинного исполнения. В общем случае такие программы выполняются быстрее обычных, особенно если функция содержит команды построения графиков [13].

4.2. Имитация сигнала точечного источника

Задачи определения световых величин особенно просто решаются в том случае, когда источник излучает свет равномерно во всех направлениях. Это означает, что действие источника на какой-либо приемник света будет зависеть только от расстояния между ними и не будет зависеть от положения нормали, проведенной от источника к приемнику.

Источник, который рассматривается как точечный, не всегда должен быть малым. Определяющим параметром для такого источника является соотношение между его размерами и расстоянием, на которых исследуется его действие, а не его абсолютные размеры.

Таким образом, точечным называется источник, излучающий свет по всем направлениям равномерно и размерами которого по сравнению с расстоянием, на котором оценивается его действие, можно пренебречь [14].

Так, для всех практических задач наилучшим образцом точечных источников являются звезды. Хотя они имеют колоссальные размеры, расстояние от них до Земли во много раз превосходит эти размеры.

За распределение интенсивности светового потока $I(x, y)$ от точечного источника на поверхности ФПУ было принято двумерное гауссовское распределение

$$I(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2\Delta^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}},$$

где x, y – координаты осей ФПУ; (x_0, y_0) – фотоцентр изображения точечного источника; Δ – размер пиксела ФПУ.

На цифровом изображении функция $I(x, y)$ представлена дискретизированными в пространстве и квантованными по уровням величинами сигнала.

Распределение интенсивности светового потока от точечного источника с $\sigma = 0,45$ на поверхности ФПУ с размером пиксела $\Delta = 1$ представлено на рисунке 23, а соответствующие ему значения сигнала для области 5×5 пикселей представлены в таблице 1.

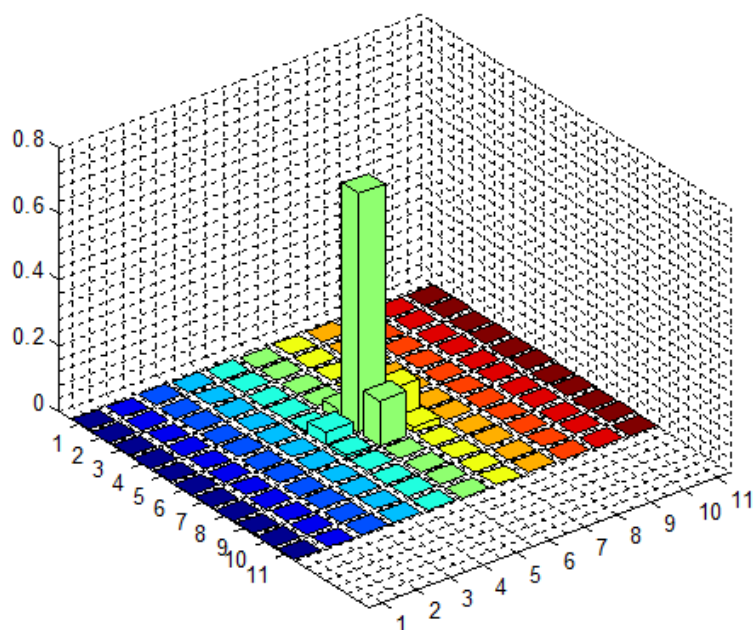


Рисунок 23 – Распределение интенсивности светового потока от точечного источника на поверхности ФПУ

Значения сигнала для области 5×5 пикселей

Таблица 1

Отсчеты по оси Y	Отсчеты по оси X				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0,00157	0,028022	0,003585	0
3	0	0,040656	0,725761	0,092854	0
4	0	0,007547	0,134718	0,017236	0
5	0	0	0	0	0

4.3. Моделирование метода

Компьютерное моделирование проводилось в несколько этапов:

- 1) Генерация большого числа сигналов от точечных источников.
- 2) Проецирование сигналов от источников на один отдельно взятый массив пикселей.

Для этого методом центра тяжести определяются координаты фотоцентра $(x_0; y_0)$ для каждого распределения:

```
maxind = 2*k/step+1;
sum_F = zeros(1,number);
```

```

sum_x = zeros(1,number);
sum_y = zeros(1,number);

for m = 1:1:number
    for i = 1:1:maxind
        for j = 1:1:maxind
            sum_F(m) = sum_F(m)+F_m{m}(i,j);
            sum_x(m) = sum_x(m)+F_m{m}(i,j)*x(i,j);
            sum_y(m) = sum_y(m)+F_m{m}(i,j)*y(i,j);
        end
    end
end

for m = 1:1:number
    weight_x(m) = sum_x(m)/sum_F(m);
    weight_y(m) = sum_y(m)/sum_F(m);
end

```

Затем распределения перемещаются в массив пикселей с центром в точке (0,5;0,5). Для каждого сигнала определяется смещение фотоцентра относительно выбранной точки по осям X и Y:

```

for m = 1:1:number
    err_x(m) = weight_x(m)-0.5;
    err_y(m) = weight_y(m)-0.5;
end

```

Поскольку функция $I'(i, j)$ дискретизированна в пространстве, вычисленное смещение переводится в количество отсчетов

$$m = \text{round}(err_x),$$

$$n = \text{round}(err_y).$$

Полученные значения суммируются с номерами отсчетов функции $I'(i, j)$:

```

for m = 1:1:number
    for i = 1:1:maxind
        for j = 1:1:maxind
            s(i) = i+round(err_y(m)*100);
            r(j) = j+round(err_x(m)*100);
            I'_m{m}(i,j) = I'{m}(s(i),r(j));
        end
    end
end

```

3) Сложение сигналов в окрестностях точки (0,5;0,5) и определение радиуса кружка рассеяния.

Сложение сигналов осуществляется с помощью следующего фрагмента кода:

```
I'_com = zeros(maxind,maxind);

for m = 1:1:number
    I'_com = I'_com+ I'_m{m};
end
```

Результат сложения 100 сигналов точечных источников представлен на рисунке 24.

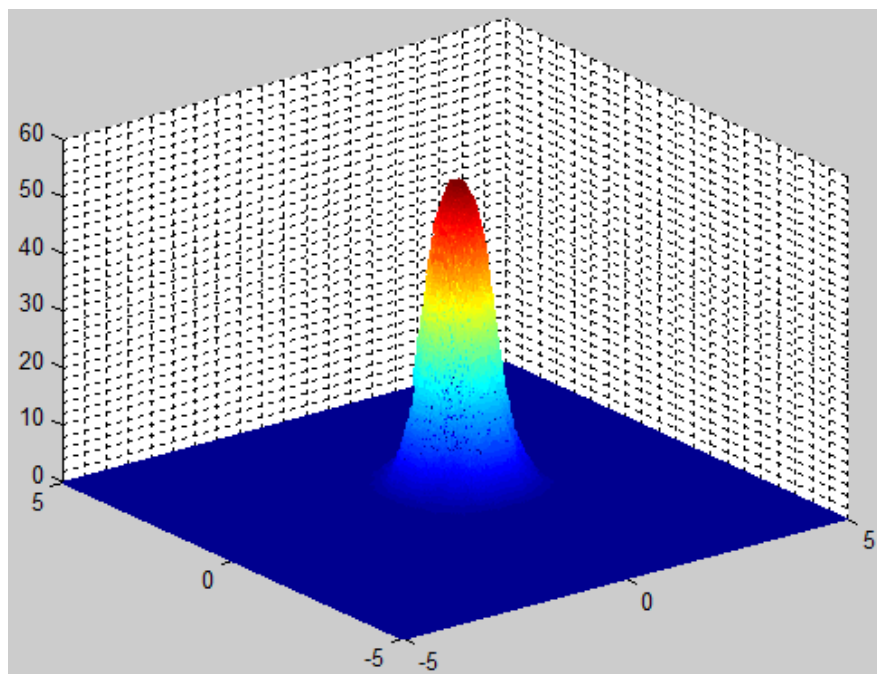


Рисунок 24 – Суммарное распределение интенсивности светового потока 100 точечных источников

Радиус кружка рассеяния определяется по уровню $\max(\max(I'(i,j)))/e^2$ путем сравнения значения отсчетов сигнала с порогом:

```
for i=1:1:maxind
    for j = 1:1:maxind
        if I'_com(i,j) >= max(max(I'_com))/(exp(1)^2)
            mark1 = i;
            mark2 = j;
        end
    end
end
```



```

sum_I'_com = 0;
sum_y_com = 0;

for i = 1:1:maxind
    for j = 1:1:maxind
        sum_I'_com = sum_I'_com+I'_com(i,j);
        sum_y_com = sum_y_com+I'_com(i,j)*y(i,j);
    end
end

com_weight_y = sum_y_com/sum_I'_com;
rad = abs(y(mark1,mark2)-com_weight_y);

```

На рисунке 25 представлен результат вычисления радиуса кружка рассеяния.

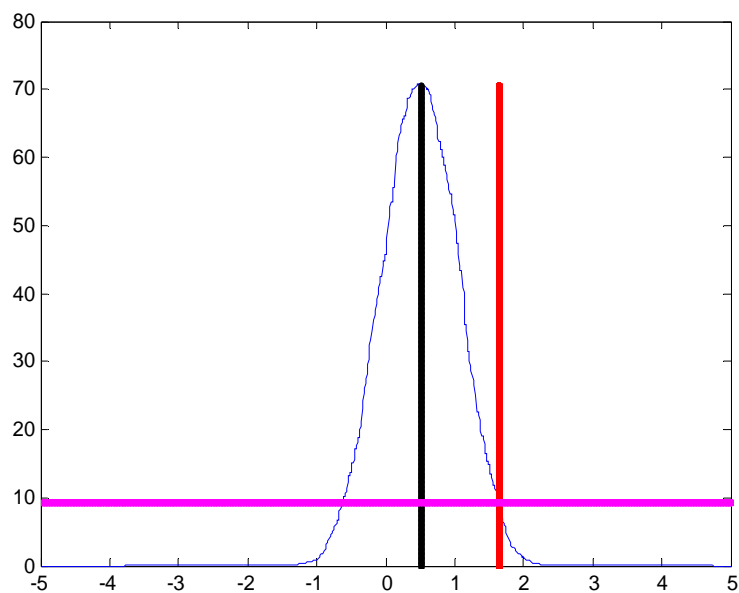


Рисунок 25 – Радиус кружка рассеяния по уровню $\max(\max(I'(i,j)))/e^2$

Полный текст кода, использованного при моделировании, представлен в приложениях 1–3.

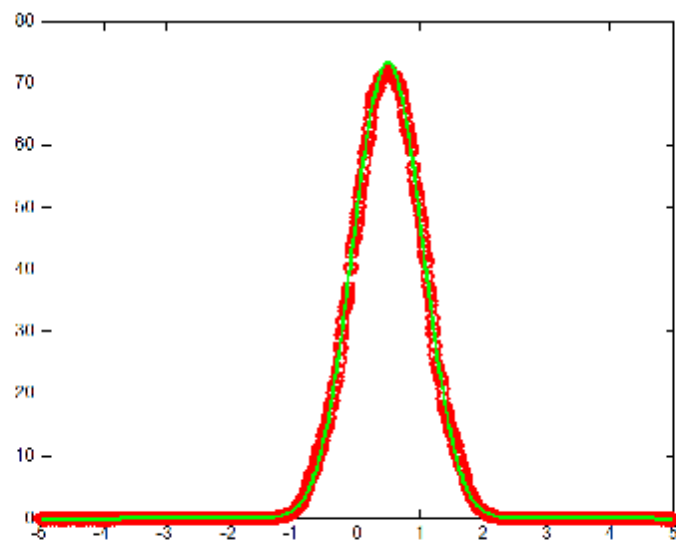
4.4. Встроенные функции MATLAB

В ходе моделирования для эргономичности и минимизации кода использовались ряд встроенных функций MATLAB. Среди них:

- `rand(m, n)` – формирует массив размера $m \times n$, элементами которого являются случайные величины, которые распределены по равномерному закону в интервале от 0 до 1;
- `zeros(m, n)` – формирует массив нулей размера $m \times n$;
- `round(x)` – возвращает значения, округленные до ближайшего целого;
- `abs(X)` – возвращает массив абсолютных значений элементов X (для массива действительных чисел);
- `max(X)` – в случае одномерного массива возвращает наибольший элемент; в случае двумерного массива – это вектор-строка, содержащая максимальные элементы каждого столбца; таким образом, `max(max(X))` – это наибольший элемент массива;
- `meshgrid(x, y)` – формирует массивы X и Y , которые определяют координаты узлов прямоугольника, задаваемого векторами x и y – этот прямоугольник задает область определения функции от двух переменных, которую можно построить в виде 3D-поверхности;
- `imresize(S, m, method)` – создает массив значений, размеры которого в m раз отличаются от размеров исходного массива S ; для изменения размеров используется один из предопределенных методов интерполяции [15], который задается во входном параметре `method` (в данном случае в качестве параметра `method` использовался параметр `'nearest'`, который определяет использование значение ближайшего пиксела) [16].

4.5. Результаты моделирования

В ходе моделирования разработанного метода было установлено, что при сложении сигналов от 100 точечных источников при размере пиксела $\Delta=1$ форма суммарного распределения точно повторяет форму сверки прямоугольного импульса и сигнала от одного источника (рисунок 26).



результат суммирования
 o – свертка прямоугольного импульса (пиксела) с нормальным распределением

Рисунок 26 – Суммарный сигнал совместно с функцией свертки
 (сечение в плоскости X-Z)

5. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

В ходе разработки статистического метода определения кружка рассеяния необходимо провести его экспериментальное исследование. Для этой цели были разработаны два контрольно-проверочных стенда. Структурные схемы разработанных стендов представлены на рисунке 27.

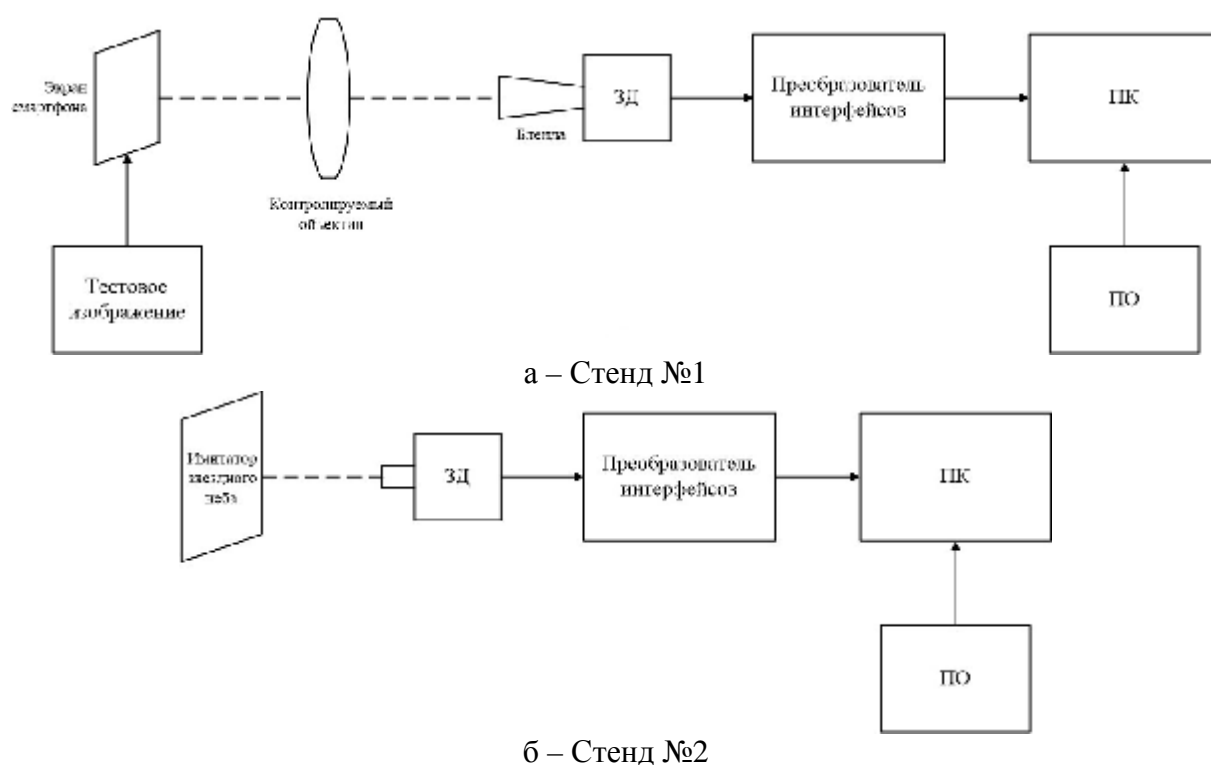


Рисунок 27 – Структурные схемы контрольно-проверочных стендов

5.1. Экспериментальный стенд №1

Задачей экспериментального стенда №1 является определение кружка рассеяния исследуемого объектива. В данном случае это объектив Юпитер-6, производство СССР.

Юпитер-6 – это сменный светосильный объектив с просветленной оптикой (рисунок 28). Снабжен ирисовой диафрагмой и устройством предварительной ее установки. Объектив предназначен для зеркальных фотоаппаратов с резьбовым присоединением оптики М39×1/45,2. В таблице 2 представлены основные характеристики данного объектива.

Характеристики объектива Юпитер-6

Таблица 2

Фокусное расстояние, мм	Макс. диафр.	Мин. диафр.	МДФ, м	Вес, гр	Длина, мм	Диаметр, мм
180	$f/2.8$	$f/22$	2	1470	139	77



а – Общий вид



б – Крупный план

Рисунок 28 – Объектив Юпитер-6 на штативе

В качестве имитатора звездного неба в стенде №1 используется Full HD sAMOLED дисплей с разрешением 1920×1080 и глубиной цвета – 16 млн. цветов. На дисплей выводится тестовое изображение, которое представляет собой черный фон с сеткой 9×10 из красных точек, имитирующих точечные источники (рисунок 29).

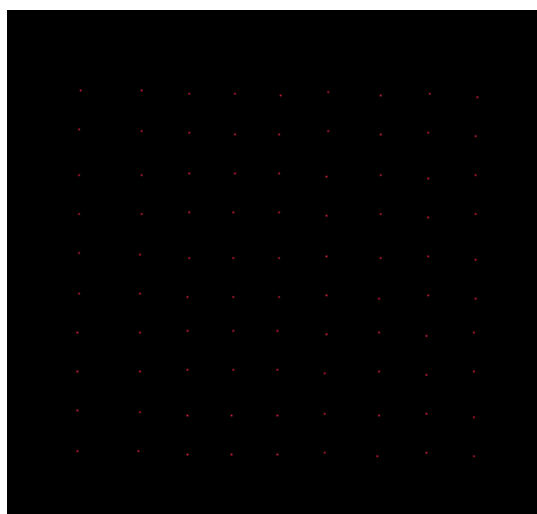
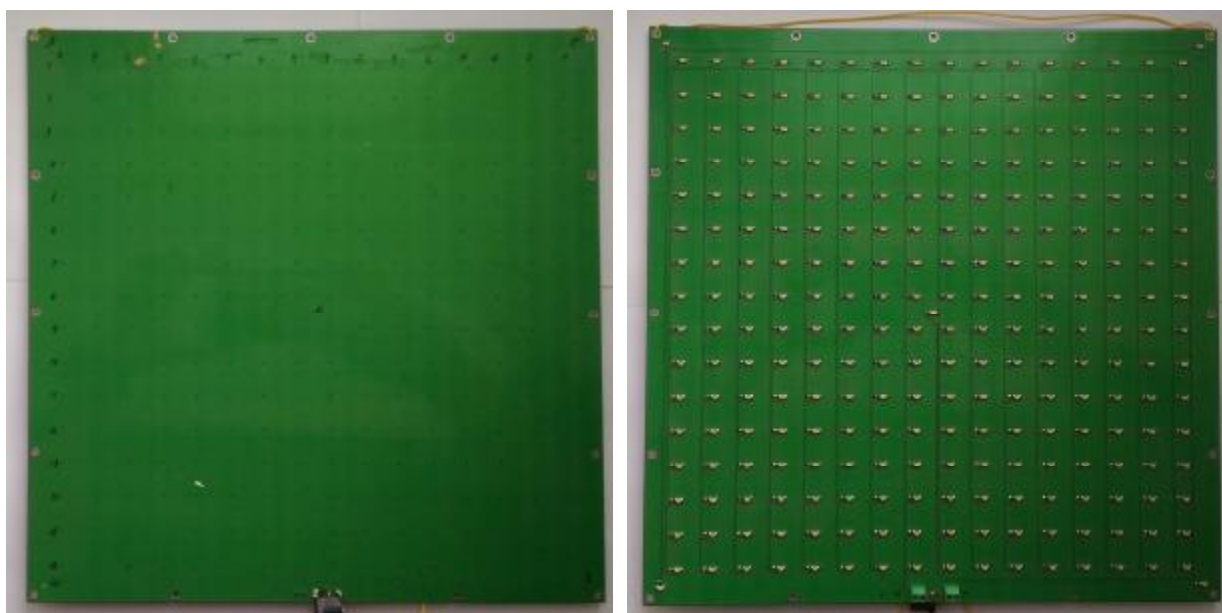


Рисунок 29 – Тестовое изображение

5.2. Экспериментальный стенд №2

Стенд №2 предназначен для контроля кружка рассеяния объектива звездного датчика (ЗД). В его состав входит: имитатор звездного неба, звездный датчик, преобразователь интерфейсов и ПК.

Имитатор звездного неба представляет собой перфорированную плату размером 300×300 мм (рисунок 30). На ней через резисторы 1 кОм установлено 261 светодиод, 4 из которых расположены по углам платы, 1 – в центре, а оставшиеся 256 – в узлах квадратной решетки 16×16. Посадочные места светодиодов расположены строго над отверстиями в плате. Это позволяет минимизировать размер имитируемых точечных источников за счет дифракции на отверстиях.



а – Вид спереди

б – Вид сзади

Рисунок 30 – Внешний вид имитатора звездного неба

В основе использованного ЗД лежит матричный ПЗС KAI-01050-ABA-FD-BA фирмы TrueSense Imaging Inc. Данное ФПУ имеет следующие характеристики:

- 1024×1024 активных пикселей;
- размер пиксела 5,5×5,5 мкм;
- оптический формат 1/2";
- прогрессивная развертка;
- частота считывания до 120 кадров в секунду.

Также в ЗД установлен объектив C2514-M фирмы Pentax с фокусным расстоянием 25 мм и относительным отверстием 1:1,4 (рисунок 31). Он предназначен для работы с ФПУ, имеющими оптический формат 2/3 дюйма [17].



Рисунок 31 – Объектив Pentax C2514-M

Внешний вид использованного ЗД с блендой показан на рисунке 32.

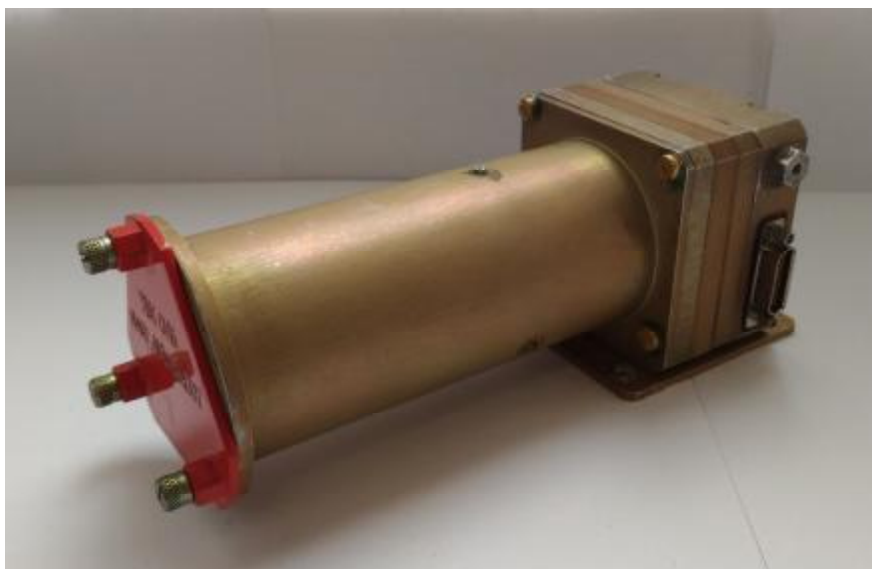


Рисунок 32 – Внешний вид ЗД с блендой

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

6.1. Результаты исследований на экспериментальном стенде №1

Имитатор звездного неба, выполненный по схеме коллиматора, проецирует на ФПУ изображения малоразмерных объектов, сформированных на экране. По интерфейсу SPI 3Д передает информацию об изображении, а также данные телеметрии в преобразователь интерфейса.

Контроллер интерфейса USB2.0, входящий в состав преобразователя интерфейса передает полученные с частотой кадров 0,25 Гц видеоданные в ПК. На ПК установлено специализированное ПО PictureShow, позволяющее организовать отображение и захват изображения, формируемого 3Д. Изображения малоразмерных объектов фокусируется. Освещенность выставляется таким образом, чтобы ни одно из изображений малоразмерных объектов не давало сигнал насыщения.

Изображение захватывается и обрабатывается с использованием статистического метода определения кружка рассеяния. Методом центра тяжести определяются координаты центра группы изображений точечных источников, после чего выделяется область изображения, содержащая данную группу:

```
sum_I' = 0;
sum_x = 0;
sum_y = 0;

for i = 1:1:1024
    for j = 1:1:1024
        sum_I' = sum_I'+I'(i,j);
        sum_x = sum_x+I'(i,j)*j;
        sum_y = sum_y+I'(i,j)*i;
    end
end

weight_x = round(sum_x/sum_I');
weight_y = round(sum_y/sum_I');

left = weight_x-135;
up = weight_y-120;
```



```

for i = 1:1:240
    for j = 1:1:270
        F_min(i,j) = F(i+up-1,j+left-1);
    end
end
end

```

Выделенная область аналогичным образом дробится на 90 подобластей, в каждой из которых присутствует сигнал от точечного источника. Для каждого сигнала определяется центр тяжести и его смещение от центра подобласти. Затем сигналы центрируются и попиксельно складываются.

Путем сравнения значения отсчетов сигнала с порогом $\max(\max(I'(i,j)))/e^2$ определяется кружок рассеяния объектива Юпитер-6.

Результаты эксперимента показали, что данный объектив имеет асимметричный кружок рассеяния (рисунок 33). Размер по оси X составил 15,95 мкм, а по оси Y – 9,86 мкм. Полученный результат можно объяснить весьма плохим состоянием объектива.

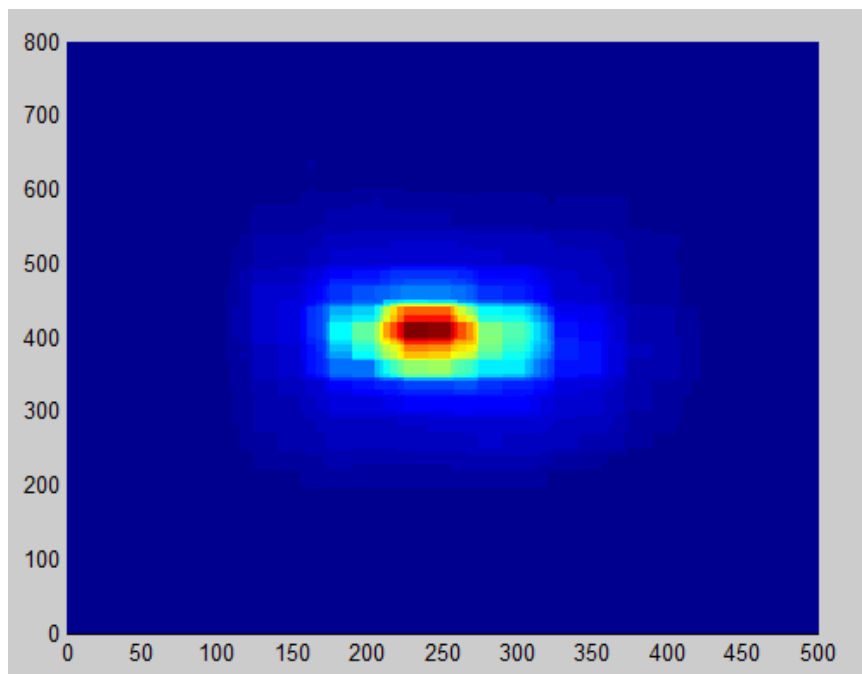


Рисунок 33 – Кружок рассеяния объектива Юпитер-6, найденный с помощью разработанного метода

6.2. Результаты исследований на экспериментальном стенде №2

Объектив 3Д разарретируется, что дает возможность фокусировать его на конечных расстояниях. 3Д устанавливается на расстоянии 2 м от имитатора звездного неба. Изображение фокусируется объективом 3Д. Яркость свечения светодиодов устанавливается таким образом, что изображения малоразмерных объектов не формируют сигналы насыщения. Изображение захватывает с помощью ПО PictureShow и дальнейшая обработка производится по алгоритму, аналогичному 6.1.

В результате, для объектива Pentax C2514-M размеры усредненного изображения по осям X и Y совпали и составили 1,1 размера пиксела – 6,0 мкм.

7. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Для повышения эффективности, а также для обеспечения безопасности работы инженера требуется правильно организованное рабочее место.

Как отмечалось выше, разработанный метод является программным, т.е. для проведения измерений требуется использование ПК. Основными факторами, влияющими на работоспособность человека и на состояние его здоровья, при работе с ПК являются:

- микроклимат на рабочем месте;
- освещение;
- шум;
- излучение от экрана монитора.

Существуют оптимальные условия, при которых внутренние ресурсы организма направлены на процесс труда, а не на преодоление вредных факторов. Именно для установления таких оптимальных условий внешней среды требуется анализ каждого из названных факторов.

7.1. Требования к организации рабочего места

Рабочее место – это неделимое в организационном отношении звено производственного процесса, предназначенное для выполнения одной или нескольких производственных или обслуживающих операций и оснащенное соответствующим оборудованием [18]. Поскольку здесь инженер проводит большую часть рабочего времени, правильно организованное рабочее место способствует высокой производительности труда при наименьшем физическом и психическом напряжении.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 основными требованиями, предъявляемыми к организации рабочих мест пользователей ПК, являются:

- расстояние между рабочими столами с мониторами (в направлении тыла поверхности одного монитора и экрана другого монитора), должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями мониторов – не менее 1,2 м;
- экран монитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600–700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов;

- конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, а также характера выполняемой работы;
- конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе с ПК, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления, при этом тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПК;
- рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию;
- поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

7.2. Требование к микроклимату

Микроклимат в рабочей зоне определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и подвижности воздуха, а также температуры окружающих поверхностей.

При оптимальных параметрах микроклимата обеспечивается сохранение нормального функционального и теплового состояния организма человека без напряжения реакций терморегуляции, что создает ощущение теплового комфорта и служит предпосылкой для высокой работоспособности.

На рабочем месте оператора должны быть оптимальные микроклиматические условия в холодный и теплый периоды года. Температура воздуха на рабочем месте в холодный период года должна быть от 22 до 24 °С, в теплые периоды года – от 23 до 25°С. Разница температуры на уровне пола и уровне головы оператора должна не превышать 3°С.

При пониженной влажности воздуха происходит постепенное пересыхание и обезвоживание многих материалов. Повышенная влажность вызывает падение сопротивления изоляции, приводит к окислению контактов,

усиливает коррозию металлов, а также способствует образованию на поверхности диэлектрических материалов проводящей пленки, что в свою очередь снижает поверхностное сопротивление этих материалов и увеличивает опасность электрического пробоя. Согласно ГОСТ 12.1.005-88, нормальной считается влажность воздуха 40–60 %.

Для поддержания в помещениях заданного температурного и влажностного режимов используется кондиционирование воздуха.

7.3. Освещенность рабочего места

Освещенность рабочего места влияет на зрительную утомляемость, эмоциональное состояние человека и, как следствие, на точность и качество труда.

Качество освещения характеризуется следующими факторами:

- постоянство освещения во времени;
- отсутствие резких контрастов в яркости рабочих поверхностей и окружающего пространства;
- исключение резких и глубоких теней на освещенных поверхностях.

Наиболее рациональным является естественное освещение, оказывающее благоприятное психологическое и биологическое воздействие на человека. Оно нормируется коэффициентом естественного освещения, который в зависимости от вида работ должен составлять 0,1–10%.

Неудовлетворительное освещение приводит к неприятным ощущениям, характеризующиеся чувством неудобства и напряженности – зрительному дискомфорту. Он вызывает отвлечение внимания, уменьшение сосредоточенности и приводит к повышенному утомлению [19]. В соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 освещенность рабочего места должна быть не менее 300 лк, но рекомендуется, чтобы она не превышала 500 лк. При этом освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана, а освещенность поверхности экрана не должна превышать 300 лк. Коэффициент пульсация при использовании люминесцентных ламп не должна превышать 5 %.

7.4. Уровень шума

Шум – беспорядочное сочетание различных по силе и частоте звуков. Он оказывает на организм человека неблагоприятное воздействие и может вызвать различного рода болезненные состояния, в том числе и глухоту [20]. Ограничению его вредного воздействия служит санитарное нормирование шума – установление допустимых параметров шума на рабочем месте.

В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 уровень звукового давления на рабочем месте оператора не должен превышать значений, указанных в таблице 3.

Допускаемые уровни звукового давления									Таблица 3
Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБ <i>A</i>
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	

Печатное оборудование также является источником шума. Его следует устанавливать на звукопоглощающей поверхности автономно от рабочего места оператора. Уровень звукового давления на рабочем месте оператора при работающем печатном оборудовании не должен превышать значений, указанных в таблице 4.

Допускаемые уровни звукового давления в помещениях с шумным оборудованием									Таблица 4
Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБ <i>A</i>
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	

Если же уровень шума на рабочем месте оператора превышает допустимый, то в помещении применяют звукопоглощающие покрытия и экраны, а печатное оборудование размещают вне помещения.

7.5. Электромагнитное и ионизирующее излучения

Монитор является источником рентгеновских, ультрафиолетовых, инфракрасных излучений, а также электрических и магнитных полей, которые могут быть опасными для человека. Опасность рентгеновских и части других излучений принимается пренебрежительно малой, поскольку их уровень достаточно невелик и в основном поглощается покрытием экрана. Наиболее тяжелая ситуация связана с полями излучений очень низких частот, которые способны вызвать биологические эффекты при воздействии на живые организмы.

Допустимые уровни электромагнитных излучений приведены в таблице 5 (в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03).

Допустимые уровни электромагнитных излучений Таблица 5

Наименование параметров	Допустимое значение
Напряженность электрического поля – в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц;	25 В/м
– в диапазоне частот 2 Гц – 400 кГц;	2,5 В/м
Плотность магнитного потока – в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц;	250 нТл
– в диапазоне частот 2 Гц – 400 кГц;	25 нТл
Поверхностный электростатический потенциал экрана монитора	500 В

На оператора воздействует только электромагнитное поле от монитора. Рекомендуемое расстояние от экрана монитора до глаз составляет 1 м.

7.6. Электробезопасность

Согласно ГОСТ 12.1.030-81, в приборах, работающих от напряжения питания 220 В, должно быть предусмотрено заземление. ПК относится к такому классу приборов.

При заземлении ПК следует учитывать ряд особенностей. Если системный блок подключается непосредственно к сети с глухозаземленной нейтралью, которая в большинстве случаев используется для питания, то заземление не даст положительного эффекта, т.е. не позволит снизить

напряжение на корпусе относительно земли до допустимых значений. Корпус блока питания, расположенного внутри системного блока, электрически соединен с РЕ-проводником в шнуре питания, который идет к специальным электрическим контактам вилки, подключаемой к электрической розетке.

При использовании кабельных удлинителей, фильтров защиты от помех и блоков бесперебойного питания необходимо следить за непрерывностью нулевого защитного провода, обрыв которого в случае замыкания фазы на корпус не обеспечит срабатывания автоматического выключателя или предохранителя. Непрерывность этого проводника необходима в случае пропадания питания от сети, когда блок бесперебойного питания некоторое время будет продолжать работать, но уже в режиме однофазной двухпроводной сети с изолированной нейтралью, обеспечивая защитное заземление системой IT (рисунок 34). При замыкании одного полюса на корпус и наличии защитного заземления в данном случае напряжение на нем по отношению к земле будет ничтожно мало из-за большого сопротивления изоляцию другого полюса сети.

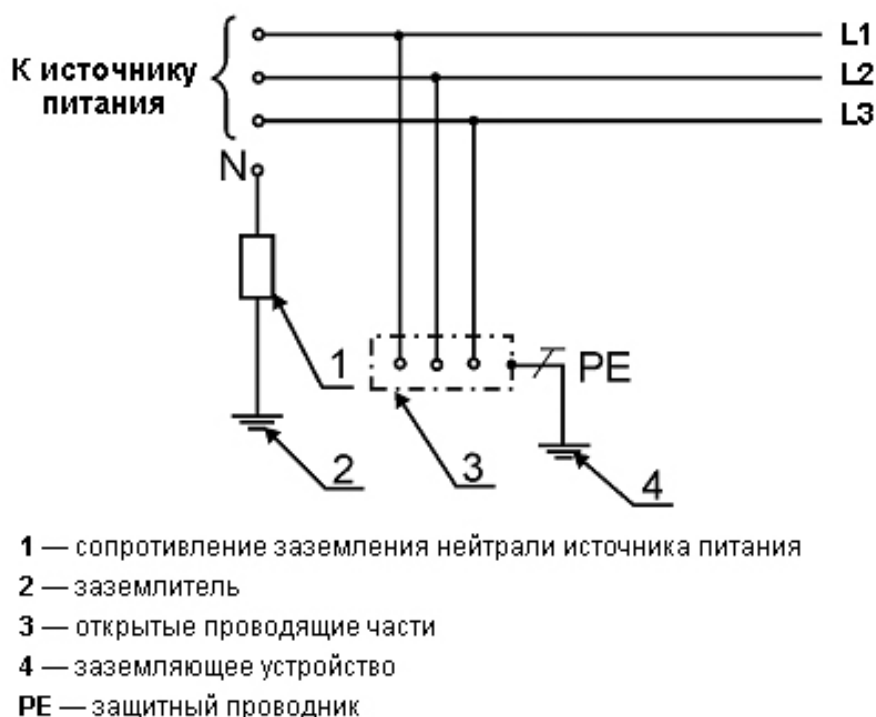


Рисунок 34 – Система заземления IT

Дополнительной мерой защиты от поражения электрическим током может служить УЗО, реагирующее на дифференциальный ток, который может протекать с поврежденного корпуса на землю через тело человека. Эту функцию поддерживает дифференциальный выключатель, реагирующий на сверхтоки и дифференциальный ток [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1) Проведен анализ известных методов определения кружка рассеяния объектива. Известные методы имеют высокую сложность и трудоемкость, требуют специальной аппаратуры и значительного времени на проведение измерений.

2) Разработан статистический метод измерения кружка рассеяния объектива, основанный на измерении координат центра изображения малоразмерного объекта с субпиксельной точностью.

3) Разработано программное обеспечение на языке MATLAB, обеспечивающее автоматизированную обработку полученных результатов и расчет кружка рассеяния объектива.

4) Разработано два экспериментальных стенда и проведены экспериментальные исследования с двумя типами объективов. Показано, что для объектива «Юпитер-6» кружок рассеяния, измеренный на экспериментальном стенде №1 имеет существенную асимметрию и составляет по уровню $1/e^2$ 15,95 мкм по оси X и 9,86 мкм по оси Y. У объектива типа Pentax C2514-M, кружок рассеяния, измеренный экспериментальном стенде №2 составил 6 мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иофис Е.А. Фотокинетика. М.: Советская энциклопедия, 1981. 447 с.
2. http://aco.ifmo.ru/el_books/introduction_into_specialization/glava-4/glava-4-1.html (дата обращения 10.03.16)
3. Бегунов Б.Н. Геометрическая оптика. М.: Изд-во Московск. Ун-та, 1966. 211 с.
4. Яштолд-Говорко В.А. Фотосъемка и обработка. М.: Искусство, 1967. 442 с.
5. Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. 167 с.
6. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1978. 543 с.
7. http://fizika.aup.ru/6/6_9.html (дата обращения 11.03.16)
8. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
9. Твердотельная революция в телевидении / Под ред. А.А. Умбиталиева, А.К. Цыцулина. М.: Радио и связь, 2006. 312 с.
10. Твердотельные телекамеры: накопление качества информации / А.К. Цыцулин, Д.Ю. Адамов, А.А. Манцветов, И.А. Зубакин. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 234 с.
11. Березин В.В., Цыцулин А.К. Обнаружение и оценивание координат изображений точечных объектов в задачах астронавигации и адаптивной оптики // Вестник ТОГУ. 2008. № 1. С. 11–20.
12. Потемкин В.Г. Введение в MATLAB. М.: Диалог-МИФИ, 2000. 256 с.
13. <http://matlab.ru/products/matlab> (дата обращения 15.04.16)
14. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D1%87%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA (дата обращения 20.04.16)
15. <http://matlab.exponenta.ru/ml/book2/index.php> (дата обращения 30.04.16)
16. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.
17. Телевизионная камера для малогабаритного звездного датчика / В.А. Иванов, Г.В. Левко, А.А. Манцветов и др. // Вопросы радиоэлектроники: Техника телевидения. 2014. № 1. С. 43-51.

18. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%87%D0%B5%D0%B5_%D0%BC%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BE
(дата обращения 11.05.16)

19. Безопасность жизнедеятельности / В.Н. Павлов, В.А. Буканин, А.Е. Зенков и др. М.: Академия, 2008. 336 с.

20. <http://www.medical-enc.ru/24/noise.shtml> (дата обращения 20.04.16)

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

```
%-----  
% Программный модуль для измерения кружка рассеяния одиночного  
% сигнала  
%-----  
% Задание начальных условий  
%-----  
sigma = 0.45;  
  
rng('shuffle');  
x0 = rand(1);  
  
%-----  
% Симуляция точечного источника  
%-----  
k = 100;  
step = 0.01;  
x = -k:step:k;  
  
F = (1/(sigma*sqrt(2*pi)))*exp(-(x-x0).^2)/(2*sigma^2);  
  
%-----  
% Вычисление радиуса  
%-----  
maxind = 2*k/step+1;  
  
for i = 1:1:maxind  
    if F(i) >= max(F)/(exp(1)^2)  
        mark = i;  
    end  
end  
  
rad = abs(x(mark)-x0);
```

```
%-----
% Программный модуль для моделирования метода
%-----
% Задание начальных условий
%-----
number = 100;
sigma = 0.45;

rng('shuffle');
x0 = rand(1,number);
y0 = rand(1,number);

%-----
% Симуляция точечных источников
%-----
k = 5;
step = 1;
[x y] = meshgrid([-k:step:k]);

for m = 1:1:number
    I'{m} = (1/(2*pi*sigma^2))*exp((-1*((x-x0(m)).^2+(y-
y0(m)).^2))/(2*sigma^2));
end

%-----
% Преобразование в сетку 0,01
%-----
step1 = 0.01;
[x1 y1] = meshgrid([-k:step1:k]);

for m = 1:1:num
    I'_m{m} = imresize(I'{m},100,'nearest');
end

%-----
% Метод взвешенных сумм
%-----
maxind = 2*k/step1+1;
sum_I' = zeros(1,number);
sum_x = zeros(1,number);
sum_y = zeros(1,number);

for m = 1:1:number
    for i = 1:1:maxind
        for j = 1:1:maxind
            sum_I'(m) = sum_I'(m)+I'_m{m}(i,j);
            sum_x(m) = sum_x(m)+I'_m{m}(i,j)*x1(i,j);
            sum_y(m) = sum_y(m)+I'_m{m}(i,j)*y1(i,j);
```

```

        end
    end
end

for m = 1:1:number
    weight_x0(m) = sum_x(m)/sum_I'(m);
    weight_y0(m) = sum_y(m)/sum_I'(m);
    err_x(m) = weight_x0(m)-0.5;
    err_y(m) = weight_y0(m)-0.5;
end

%-----
% Перемещение в точку (0,5;0,5)
%-----
for m = 1:1:number
    for i = 1:1:maxind
        for j = 1:1:maxind
            s(i) = i+round(err_y(m)*100);
            r(j) = j+round(err_x(m)*100);
            if s(i) > maxind
                s(i) = maxind;
            end
            if s(i) < 1
                s(i) = 1;
            end
            if r(j) > maxind
                r(j) = maxind;
            end
            if r(j) < 1
                r(j) = 1;
            end
            I'_mm{m}(i,j) = I'_m{m}(s(i),r(j));
        end
    end
end

%-----
% Сложение распределений
%-----
I'_com = zeros(maxind,maxind);

for m = 1:1:number
    I'_com = I'_com+I'_mm{m};
end

%-----
% Вычисление радиуса
%-----
for i=1:1:maxind
    for j = 1:1:maxind
        if I'_com(i,j) >= max(max(I'_com))/(exp(1)^2)

```



```

        mark1 = i;
        mark2 = j;
    end
end
end

sum_I'_com = 0;
sum_y_com = 0;

for i = 1:1:maxind
    for j = 1:1:maxind
        sum_I'_com = sum_I'_com+I'_com(i,j);
        sum_y_com = sum_y_com+I'_com(i,j)*y1(i,j);
    end
end

com_weight_y0 = sum_y_com/sum_I'_com;
rad = abs(y1(mark1,mark2)-com_weight_y0)

```

```

%-----
% Программный модуль для вычисления свертки
%-----
% Задание начальных условий
%-----
sigma = 0.45;

rng('shuffle');
x0 = rand(1);
y0 = rand(1);

k = 5;
step = 0.01;

%-----
% Генерация исследуемых функций
%-----
[x y] = meshgrid([-k:step:k]);

F = (1/(2*pi*sigma^2))*exp(-1*((x-x0).^2+(y-
y0).^2)/(2*sigma^2));
F_max = max(max(F));

maxind = 2*k/step+1;

for i = 1:1:maxind
    for j = 1:1:maxind
        F_n(i,j) = F(i,j)/F_max;
    end
end

G = ones(100,100);

%-----
% Вычисление свертки
%-----
Z = conv2(G,F);

for i = 1:1:maxind
    for j = 1:1:maxind
        Z_m(i,j) = Z(i,j);
    end
end

%-----
% Задание порога
%-----
for i = 1:1:maxind

```

```

    for j = 1:1:maxind
        if Z_m(i,j) >= max(max(Z_m))/(exp(1)^2)
            mark_i = i;
            mark_j = j;
        end
    end
end

%-----
% Вычисления центра масс и радиуса
%-----
sum_Z_m = 0;
sum_y = 0;

for i = 1:1:maxind
    for j = 1:1:maxind
        sum_Z_m = sum_Z_m+Z_m(i,j);
        sum_y = sum_y+Z_m(i,j)*y(i,j);
    end
end

weight_Z_m = sum_y/sum_Z_m;
rad = abs(y(mark_i,mark_j)-weight_Z_m)

```

```

%-----
% Программный модуль для обработки экспериментального
% изображения №2
%-----
% Чтение изображения в массив I'
%-----
I' = imread('Image_1.bmp ');
I' = double(I');
I' = I'-I'(1,1);

%-----
% Определение центра масс изображения
%-----
sum_I' = 0;
sum_x = 0;
sum_y = 0;

for i = 1:1:1024
    for j = 1:1:1024
        sum_I' = sum_I'+I'(i,j);
        sum_x = sum_x+I'(i,j)*j;
        sum_y = sum_y+I'(i,j)*i;
    end
end

weight_x = round(sum_x/sum_I');
weight_y = round(sum_y/sum_I');

%-----
% Определение границ исследуемой области изображения
%-----
left = weight_x-135;
right = weight_x+135;
up = weight_y-120;
down = weight_y+120;

%-----
% Выделение исследуемой области
%-----
for i = 1:1:240
    for j = 1:1:270
        I'_min(i,j) = I'(i+up-1,j+left-1);
    end
end
end

```

```

%-----
% Выделение подобластей
%-----
num = 90;

for m = 1:1:9
    for i = 1:1:24
        for j = 1:1:30
            I'_sin{m}(i,j) = I'_min((m-1)*24+i,(m-1)*30+j);
        end
    end
end
%-----
for m = 10:1:18
    for i = 1:1:24
        for j = 1:1:30
            I'_sin{m}(i,j) = I'_min((m-10)*24+i,(m-10)*30+j);
        end
    end
end
%-----
for m = 19:1:27
    for i = 1:1:24
        for j = 1:1:30
            I'_sin{m}(i,j) = I'_min((m-19)*24+i,(m-19)*30+j);
        end
    end
end
%-----
for m = 28:1:36
    for i = 1:1:24
        for j = 1:1:30
            I'_sin{m}(i,j) = I'_min((m-28)*24+i,(m-28)*30+j);
        end
    end
end
%-----
for m = 37:1:45
    for i = 1:1:24
        for j = 1:1:30
            I'_sin{m}(i,j) = I'_min((m-37)*24+i,(m-37)*30+j);
        end
    end
end
%-----
for m = 46:1:54
    for i = 1:1:24
        for j = 1:1:30
            I'_sin{m}(i,j) = I'_min((m-46)*24+i,(m-46)*30+j);
        end
    end
end

```

```

end
%-----
for m = 55:1:63
    for i = 1:1:24
        for j = 1:1:30
            I'_sin{m}(i,j) = I'_min((m-55)*24+i,(m-55)*30+j);
        end
    end
end
%-----
for m = 64:1:72
    for i = 1:1:24
        for j = 1:1:30
            I'_sin{m}(i,j) = I'_min((m-64)*24+i,(m-64)*30+j);
        end
    end
end
%-----
for m = 73:1:81
    for i = 1:1:24
        for j = 1:1:30
            I'_sin{m}(i,j) = I'_min((m-73)*24+i,(m-73)*30+j);
        end
    end
end
%-----
for m = 82:1:90
    for i = 1:1:24
        for j = 1:1:30
            I'_sin{m}(i,j) = I'_min((m-82)*24+i,(m-82)*30+j);
        end
    end
end
%-----
% Определение центров масс подобластей
%-----
sum_I'_sin = zeros(1,num);
sum_x_sin = zeros(1,num);
sum_y_sin = zeros(1,num);

for m = 1:1:num
    for i = 1:1:24
        for j = 1:1:30
            sum_F_sin(m) = sum_I'_sin(m)+I'_sin{m}(i,j);
            sum_x_sin(m) = sum_x_sin(m)+I'_sin{m}(i,j)*j;
            sum_y_sin(m) = sum_y_sin(m)+I'_sin{m}(i,j)*i;
        end
    end
end
end

```

```

for m = 1:1:num
    sin_weight_x(m) = sum_x_sin(m)/sum_I'_sin(m);
    sin_weight_y(m) = sum_y_sin(m)/sum_I'_sin(m);
end
%-----
% Корректировка размеров подобластей
%-----
for m = 1:1:num
    mini_left(m) = round(sin_weight_x(m))-5;
    mini_right(m) = round(sin_weight_x(m))+5;
    mini_up(m) = round(sin_weight_y(m))-8;
    mini_down(m) = round(sin_weight_y(m))+8;
end

for m = 1:1:num
    for i = 1:1:16
        for j = 1:1:10
            mini_sin_I'{m}(i,j) = I'_sin{m}(i+mini_up(m)-
1,j+mini_left(m)-1);
        end
    end
end

for m = 1:1:num
    I'_mm{m} = imresize(mini_sin_I'{m},50,'nearest');
end

%-----
% Перемещение фотоцентров в одну точку
%-----
sum_I'_mm = zeros(1,num);
sum_x_mm = zeros(1,num);
sum_y_mm = zeros(1,num);

for m = 1:1:num
    for i = 1:1:800
        for j = 1:1:500
            sum_I'_mm(m) = sum_I'_mm(m)+I'_mm{m}(i,j);
            sum_x_mm(m) = sum_x_mm(m)+I'_mm{m}(i,j)*j;
            sum_y_mm(m) = sum_y_mm(m)+I'_mm{m}(i,j)*i;
        end
    end
end

for m = 1:1:num
    weight_x_mm(m) = sum_x_mm(m)/sum_I'_mm(m);
    weight_y_mm(m) = sum_y_mm(m)/sum_I'_mm(m);
    err_x(m) = weight_x_mm(m)-250;
    err_y(m) = weight_y_mm(m)-400;
end

```

```

for m = 1:1:num
    for i = 1:1:800
        for j = 1:1:500
            s(i) = i+round(err_y(m));
            r(j) = j+round(err_x(m));
            if s(i) > 800
                s(i) = 800;
            end
            if s(i) < 1
                s(i) = 1;
            end
            if r(j) > 500
                r(j) = 500;
            end
            if r(j) < 1
                r(j) = 1;
            end
            I'_sin_m{m}(i,j) = I'_mm{m}(s(i),r(j));
        end
    end
end

%-----
% Сложение сигналов
%-----
I'_com = zeros(800,500);

for m = 1:1:num
    I'_com = I'_com+I'_sin_m{m};
end

%-----
% Вычисление радиуса
%-----
for i = 1:1:800
    for j = 1:1:500
        if I'_com(i,j) >= max(max(I'_com))/(exp(1)^2)
            mark1 = i;
            mark2 = j;
        end
    end
end

sum_I'_com = 0;
sum_y_com = 0;

for i = 1:1:800
    for j = 1:1:500
        sum_I'_com = sum_I'_com+I'_com(i,j);
        sum_y_com = sum_y_com+I'_com(i,j)*i;
    end
end

```


end

```
com_weight_y = sum_y_com/sum_I'_com;  
rad_i = abs(mark1-com_weight_y);  
rad_j = abs(mark2-com_weight_y)
```