

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи
УДК 681.77+681.2.08

СТАРОСОТНИКОВ
Николай Олегович

**СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ
ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук
по специальности 05.11.07 –
оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент
Фёдорцев Р.В.

Минск, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень сокращений и обозначений.....	4
Введение	5
Общая характеристика работы	6
Глава 1 Анализ проблем калибровки геометрических параметров оптико- электронных аппаратов	11
1.1 Калибровка на примере космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.....	11
1.2 Способы формирования эталонной связки векторов.....	15
1.3 Способы реализации тест-объекта с широким диапазоном характеристик	19
1.4 Формирование рисунка тест-объекта посредством цифрового микрзеркального устройства.....	24
Выводы по главе 1.....	32
Глава 2 Коллиматор с цифровым микрзеркальным устройством в качестве тест-объекта	34
2.1 Выбор и обоснование оптических компонентов, конструкции	34
2.2 Методика калибровки коллиматором с цифровым микрзеркальным устройством	38
Выводы по главе 2.....	41
Глава 3 Факторы, влияющие на погрешность калибровки, и методы уменьшения их воздействия.....	43
3.1 Пространственно-энергетические параметры изображения рисунка тест- объекта.....	43
3.2 Алгоритм и математическая модель поиска центров элементов изображения рисунка тест-объекта.....	55
3.3 Аберрации и качество сборки оптических компонентов	65
Выводы по главе 3.....	68
Глава 4 Методика калибровки геометрических параметров оптико- электронных аппаратов	71
4.1 Влияние температурного смещения микрзеркальной структуры и элементов фотоприёмника	71
4.2 Методика калибровки температурного смещения.....	72
4.3 Анализ результатов калибровки температурного смещения	77
4.4 Методика калибровки геометрических параметров многоматричных оптико-электронных аппаратов.....	86
4.5 Алгоритм обработки и анализ результатов калибровки.....	90
Выводы по главе 4.....	97
Глава 5 Апробация способов формирования эталонной связки векторов	99

5.1 Описание сравниваемых способов.....	99
5.2 Особенности методик калибровки и обработки измеренных данных	102
5.3 Сравнение погрешности способов формирования эталонной связки векторов.....	105
Выводы по главе 5.....	107
Заключение	109
Список использованных источников	112
Библиографический список	112
Список публикаций соискателя учёной степени	118
Приложение А Материалы, подтверждающие право соискателя на результаты интеллектуальной деятельности.....	121
Приложение Б Материалы о практическом использовании (внедрении) результатов диссертации	123

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВЗН	– временная задержка накопления
ДЗЗ	– дистанционное зондирование Земли
ЖК	– жидкие кристаллы / жидкокристаллический
КА	– космический аппарат
КМОП	– комплементарный металло-оксидный полупроводник
ОЭА	– оптико-электронный аппарат
ОЭА-2ФП	– ОЭА с двумя ФП
ОЭА-3ФП	– ОЭА с тремя ФП
ПЗС	– прибор с зарядовой связью
ПК	– персональный компьютер
ТКЛР	– температурный коэффициент линейного расширения
ФП	– фотоприёмник
ФРТ	– функция рассеяния точки
ЭВО	– элементы внутреннего ориентирования
DLP	– Digital Light Processing (цифровое управление светом)
DMD	– Digital Micromirror Device (цифровое микрозеркальное устройство)
GLV	– Grating Light Valve (решётчатый световой затвор)
LCD	– Liquid Crystal Display (жидкокристаллический дисплей)
LCoS	– Liquid Crystal on Silicon (жидкие кристаллы на кремнии)
σ	– среднеквадратическое отклонение

ВВЕДЕНИЕ

Важным применением снимков земной поверхности с высоким пространственным разрешением является их использование для создания топографических планов и карт. Формирование таких снимков осуществляется съёмочной ОЭА ДЗЗ. Необходимо калибровать геометрические параметры ОЭА. Традиционная калибровка предусматривает длительный процесс в течение нескольких месяцев съёмок и обработки подходящих объектов после запуска КА. Для сокращения времени калибровки в полёте предлагается предварительно проводить калибровку в лабораторных условиях. С учётом стоимости снимков на рынке в зависимости от пространственного разрешения, погрешности географической привязки и др., составляющей (5–100) \$/км², для КА с дневной производительностью порядка 0,1 млн км² положительный экономический эффект в этом случае может составить до порядка 10 млн \$/день.

Существует необходимость калибровки геометрических параметров ОЭА, имеющей различное фокусное расстояние, размер пикселя, количество и формат фотоприёмников, их взаимное положение друг относительно друга в фокальной плоскости ОЭА. Известные методы калибровки геометрических параметров ОЭА с различными характеристиками предусматривают изготовление тест-объекта коллиматора в виде стеклянной пластины с нанесённым на её поверхность способом литографии индивидуальным рисунком. Предлагается в качестве тест-объекта использовать DMD, с точной равномерной пространственной структурой. DMD позволит формировать практически любой требуемый рисунок тест-объекта.

Для обеспечения высокой точности калибровки исследованы влияющие факторы, предложены различные методы уменьшения их влияния, определены соотношения параметров устройств калибровки и калибруемого ОЭА. Для повышения точности, калибровка осуществляется по большому количеству снимков (десятки-сотни). Предложенные алгоритмы математической обработки обеспечивают высокую точность и автоматизацию.

Распространённой особенностью ОЭА ДЗЗ является использование нескольких фотоприёмников, обеспечивающих увеличение снимаемой площади земной поверхности и количества спектральных каналов по сравнению с вариантом использования одного фотоприёмника. Для калибровки геометрических параметров такой ОЭА предложена методика.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы утверждённым Указом Президента Республики Беларусь 07.05.2020 № 156: «1. Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства», в том числе «аэрокосмические и геоинформационные технологии» и «4. Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы», в том числе «лазерные, плазменные, оптические технологии и оборудование».

Исследования, составившие основу диссертационной работы, выполнялись в рамках ОКР ОАО «Пеленг» НКУ «Космос»: по проектированию «Коллиматора проекционного», входящего в состав «Установки для измерения ЭВО ОЭА», «Установки для измерения углов между аппаратами», «Установки для измерения дисторсии оптико-электронных аппаратов» ДЗЗ согласно планам-графикам ОАО «Пеленг».

Диссертационная работа также соответствует научному направлению кафедры «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета и выполнялась в рамках научно-исследовательского проекта «Разработка новых лазерных материалов и твёрдотельных лазеров на их основе, светосильных объективов и зеркальных систем, технологии финишной обработки линз малой жёсткости, аксиконов и оптических деталей лазерных гироскопов» ГБ 16-246 от 22.12.2020.

Цель и задачи, объект и предмет исследования

Целью работы является уменьшение погрешности и времени калибровки геометрических параметров ОЭА с широким диапазоном характеристик.

Для достижения поставленной цели в процессе исследований потребовалось решить следующие задачи:

1. Разработать способ реализации тест-объекта с широким диапазоном пространственно-энергетических и временных характеристик формируемого рисунка;
2. Проанализировать факторы, влияющие на погрешность определения координат центров элементов изображения рисунка тест-объекта, разработать методики математической и экспериментальной оценки их влияния, методы уменьшения влияния на погрешность;
3. Разработать модель калибровки и метод поиска центров элементов изображения рисунка тест-объекта;

4. Разработать методику калибровки геометрических параметров многоматричных ОЭА, в том числе температурного смещения пространственной структуры микрозеркал цифрового микрозеркального устройства и элементов фотоприёмника оптико-электронного аппарата. Апробировать и валидировать методику калибровки стандартными методами: коллиматором с тест-объектом в виде стеклянной пластины и теодолитом или тахеометром.

Объектом исследования является калибровка геометрических параметров ОЭА, предметом – средства реализации; факторы, влияющие на погрешность калибровки; методики калибровки.

Научная новизна

Полученные в рамках диссертационных исследований результаты обладают новизной:

1. Предложено устройство для калибровки геометрических параметров ОЭА с широким диапазоном технических характеристик за счёт использования в качестве тест-объекта цифрового микрозеркального устройства, которое может быть использовано для ОЭА различных типов, с погрешностью не хуже, чем при использовании стандартных способов реализации тест-объекта, разрабатываемых индивидуально под каждый конкретный ОЭА.

2. По результатам исследований на разработанной математической модели и макетах определены требования пороговым значениям, предложены методы уменьшения влияния факторов, влияющих на погрешность определения координат центров элементов изображения рисунка тест-объекта:

– размер элемента изображения рисунка тест-объекта должен быть более 3 пикселей, чтобы погрешность составляла не более $\pm 0,01$ пикселя;

– фильтрация двумерного сигнала изображения фильтром Винера, а также применение порога, значения ниже которого принимаются равными нулю, позволяют уменьшить погрешность, вызванную влиянием шумов исследуемых промышленных цифровых камер от 3 до 5 раз до не более $\pm 0,01$ пикселя;

– полезный двумерный сигнал изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике ОЭА должен быть более 30 % максимального значения квантования; при присвоении значению сигнала квадратичных весовых коэффициентов уровень сигнала достаточен более 12 % максимального значения квантования; сигнал по полю фотоприёмника ОЭА должен быть равномерным, отличие – не более 5–10 %;

– отношение сигнал/шум должно быть более 10–20;

– установлено, что более точный алгоритм поиска центров элементов изображения рисунка тест-объекта по энергетическому центру тяжести по сравнению с контурными алгоритмами и вычислением кросскорреляции между рисунком тест-объекта и его изображением;

– определены aberrации, которые при расчёте оптической системы необходимо свести к минимуму: астигматизм, дисторсия, хроматизм увеличения, а также хроматизм положения и термооптические aberrации, но на порядок меньшей степени;

– установлены временные параметры калибровок для уменьшения температурного смещения элементов DMD и фотоприёмника исследуемой цифровой камеры до величины менее 1 мкм: время прогрева DMD – 60 мин, при совместном использовании DMD с исследуемой цифровой камерой – 120 мин.

3. Предложена методика калибровки геометрических параметров многоматричных ОЭА, основанная на разделении элементов внешнего ориентирования путём обработки измеренных данных по всем фотоприёмникам и элементов внутреннего ориентирования по каждому фотоприёмнику в противоположных положениях коллиматора, обеспечивающая погрешность от $\pm 0,2''$ до $\pm 1,0''$ (3σ).

Положения, выносимые на защиту

1. Способ реализации тест-объекта для калибровки геометрических параметров оптико-электронных аппаратов, отличающийся применением цифрового микрозеркального устройства, установленного в фокальной плоскости коллиматора, что обеспечивает уменьшение от 4 до 5 раз времени и погрешности калибровки по сравнению с тахеометром и сопоставимо со специальным тест-объектом в виде стеклянной пластины.

2. Метод определения координат центра элемента изображения рисунка тест-объекта по энергетическому центру тяжести, отличающийся последовательной фильтрацией изображения фильтром Винера, применением порога, значения двумерного сигнала изображения ниже которого принимаются равными нулю, присвоении значениям сигнала квадратичных весовых коэффициентов, а также вписыванию в площадку фотоприёмника элемента изображения рисунка тест-объекта, что позволяет уменьшить погрешность определения координат центров элементов изображения рисунка тест-объекта от 3 до 5 раз.

3. Алгоритм математической обработки изображения с произвольным количеством элементов рисунка тест-объекта по их энергетическим центрам тяжести, заключающийся в предварительном поиске требуемой области обнаружения путём применения контурных алгоритмов, а также вычисления кросскорреляции между рисунком тест-объекта и его изображением, что

обеспечивает возможность автоматизации процесса поиска, исключение регистрации ложных объектов и уменьшает время обработки от 20 до 100 раз.

4. Методика калибровки геометрических параметров оптико-электронных аппаратов с многоматричными фотоприёмниками, включающих: температурное смещение элементов фотоприёмников оптико-электронного аппарата, элементы внешнего ориентирования (пространственную ориентацию оптико-электронного аппарата относительно коллиматора) путём обработки измеренных данных по всем фотоприёмникам, элементы внутреннего ориентирования (фотограмметрическое фокусное расстояние, расположение фотоприёмников в фокальной плоскости, коэффициенты аппроксимации дисторсии) по каждому фотоприёмнику в противоположных положениях коллиматора, которая позволяет обеспечить погрешность совокупных параметров от $\pm 0,2''$ до $\pm 1,0''$, что от 3 до 10 раз меньше по сравнению с существующими методиками.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты, вошедшие в диссертационную работу, получены автором самостоятельно. Цель и задачи исследования сформулированы совместно с научным руководителем кандидатом технических наук, доцентом Р. В. Фёдорцевым, а также соавтором совместной публикации заместителем начальника управления по науке и технике ОАО «Пеленг» И. В. Подскребкиным, которые принимали участие в обсуждении полученных результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационной работы представлялись автором на 10 научно-технических конференциях.

Результаты диссертационных исследований используются в устройствах калибровки геометрических параметров ОЭА, разработанных ОАО «Пеленг»: «Коллиматоре проекционном», входящем в состав «Установки для измерения элементов внутреннего ориентирования оптико-электронных аппаратов», «Установке для измерения дисторсии оптико-электронных аппаратов» и «Установке для измерения углов между аппаратами» ДЗЗ, использовались для калибровки в полёте 6 образцов ОЭА ДЗЗ, что подтверждается 4 актами о практическом использовании результатов исследований в производстве.

Результаты диссертационных исследований: методы и способы калибровки геометрических параметров ОЭА ДЗЗ, используются в учебном процессе на кафедре «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета, при изучении дисциплины «Специальные оптические приборы» (акт № 214 от 11.05.2021 г.).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 печатных работах (7 а. л.), в том числе 5 статьях (5 а. л.), соответствующих пункту 18 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь (из них без соавторов – 1 статья), 10 работах в сборниках материалов научно-технических конференций (1,5 а. л.). Получено 2 патента на изобретения Республики Беларусь и Российской Федерации (0,5 а. л.).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 130 страницах, содержит 52 рисунка, 15 таблиц, 2 приложения на 10 страницах, списка использованных источников из 102 наименований.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ КАЛИБРОВКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ

1.1 Калибровка на примере космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Важным применением снимков земной поверхности, полученных современной съёмочной ОЭА оптическими методами ДЗЗ с проекцией пикселя ОЭА на Землю порядка (0,25–0,5) м [1, 2], является их использование для создания топографических планов и карт. Для топографических планов и карт масштабом 1:2000, 1:5000, 1:10000 необходимо, чтобы географические координаты объектов на снимках были определены с погрешностью порядка (0,5–2,5) м [3] (σ). Погрешность (0,5–2,5) м включает погрешность определения географических координат опорных объектов на местности (достигает (0,2–0,5) м [4, с. 180–186]) и погрешность самой калибровки. Для достижения такого уровня точности геометрические параметры ОЭА должны быть калиброваны с погрешностью не более (0,2–1,0)'' для средней высоты орбиты КА 500 км. Опорные объекты при калибровке в полёте являются эталоном и представляют собой фигуры простых форм с высокой контрастностью к общему фону, хорошо различимые на снимках с известными географическими координатами участков земной поверхности. Таким образом, требуемая погрешность калибровки геометрических параметров ОЭА ДЗЗ сравнима с эталоном и находится на пределе современных технических возможностей.

Калибровка геометрических параметров ОЭА включает:

- элементы внешнего ориентирования;
- элементы внутреннего ориентирования.

Элементы внешнего и внутреннего ориентирования впоследствии используются при обработке снимков [5, с. 48–65], полученных при помощи калибруемого ОЭА.

Определение элементов внешнего ориентирования заключается в измерении пространственного положения ОЭА относительно некоего базового элемента и, если имеется несколько ОЭА, их положения друг относительно друга, например, в стереоаппаратах или съёмочных системах с несколькими спектральными каналами, реализованными в виде отдельных ОЭА. Так в целевой аппаратуре для КА ДЗЗ в качестве базового элемента может выступать куб с зеркальными гранями. Ориентация ОЭА относительно зеркального куба впоследствии учитывается при привязке к зеркальному кубу других составных частей КА, в первую очередь составных частей,

определяющих линейное положение и угловую ориентацию ОЭА при съёмке КА земной поверхности.

Определение ЭВО заключается в определении:

- фотограмметрического (эффективного) фокусного расстояния;
- положения задней главной точки;
- расположения фотоприёмника или фотоприёмников, если их несколько, в фокальной плоскости ОЭА относительно задней главной точки:
 - линейного – координаты нулевого пикселя фотоприёмника;
 - углового – угол поворота фотоприёмника;
- коэффициентов аппроксимации дисторсии объектива ОЭА при необходимости.

Полученные элементы внешнего и внутреннего ориентирования впоследствии используются для установления связи между каждым пикселем изображения и соответствующей точкой предмета земной поверхности для калибруемого ОЭА [6, с. 13–41; 7]; а также для первого приближения «сшивки» нескольких изображений, сформированных разными фотоприёмниками ОЭА и комплексирования (паншарпенинга) [8, с. 76–89, с. 301–310]. Модель связи между пикселями изображения и соответствующей точки земной поверхности производится через угловое представление, так как согласно [9] фотокамера с измерительной точки зрения является угломерным прибором. Достоверность углового представления зависит от погрешности определения элементов внешнего и внутреннего ориентирования и соответственно является погрешностью калибровки. Калибровка измерительных приборов заключается в установлении зависимости между показаниями средства измерительной техники (прибора) и размером измеряемой (входной) величины. Так как фотокамера является угломерным инструментом, то и в качестве эталона должны выступать углы. В пределе, это совокупность всех угловых измерений, т. е. «связка лучей» [9].

Для ОЭА ДЗЗ последовательность калибровки может быть следующая:

- На первом этапе, в лабораторных условиях:
 - 1 Измеряются координаты фотоприёмников друг относительно друга;
 - 2 Измеряется дисторсия, фотограмметрическое фокусное расстояния, уточняются координаты фотоприёмников относительно задней главной точки;
 - 3 Измеряются установочные углы ОЭА относительно систем навигации и ориентации КА.

– На втором этапе, в полёте с использованием специальных полигонов на Земле или звёзд:

- 1 Уточняется фотограмметрическое фокусное расстояние, также при необходимости могут быть уточнены координаты фотоприёмников и дисторсия;

2 Уточняются установочные углы ОЭА относительно систем навигации и ориентации КА [10, 11].

Результаты калибровки в лабораторных условиях являются первым приближением к калибровке КА в полёте, а также позволяют разделить полученный массив данных по функциональному назначению и достоверно определить измеренные параметры. Например, КА WorldView-3 и Pleiades калибруется только в полёте [12, 13], либо в лабораторных условиях калибруются элементы внешнего ориентирования [14]. Это приводит к тому, что увеличивается время калибровки в полёте, то есть период времени, до которого КА начнёт формировать данные с высокой точностью географической привязки. Калибровка в таком случае может составлять (3–6) месяцев [12, 13], а это в среднем (5–10) % от общего активного ресурса работы КА. В то время как при наличии исходных данных, полученных на этапе лабораторной калибровки, калибровка может не понадобиться либо продолжительность калибровки в полёте может составить (1–2) месяца. С учётом стоимости снимков на рынке в зависимости от пространственного разрешения, погрешности географической привязки и др., составляющей (5–100) \$/км² [15, 16, 17, 18, 19], для КА с дневной производительностью порядка 0,1 млн. км² положительный экономический эффект может составить до порядка 10 млн. \$/день. Помимо этого, сразу после запуска в космос происходит активное усыхание конструкции углепластикового корпуса КА. Это приводит к изменению геометрических размеров элементов конструкции КА, и как следствие влияет на калибровку. Изменение геометрических размеров корпуса КА приводит к изменению элементов внешнего ориентирования. Наличие большого числа неопределённых параметров может привести к недостоверным результатам геометрической калибровки.

В связи с совершенствованием технологии создания фотоприёмников в ОЭА ДЗЗ, а также в цифровых автоколлиматорах, системах астроориентации, пеленгаторах, датчиках Шака-Гартмана, проекционных измерительных системах фотоприёмник выступает не только в качестве приёмного устройства, но и отсчётного, поскольку элементы фотоприёмника – пиксели – имеют высокую точность пространственной периодичности. Задачи, стоящие перед такими ОЭА, становятся более сложными, требуются большие поля зрения, которые обеспечиваются в том числе за счёт размера фотоприёмников с минимальным размером пикселя. Однако, на практике существуют технологические ограничения при создании таких фотоприёмников. Одним из путей решения данной проблемы становится использование нескольких фотоприёмников, установленных на одной электронной плате, однако фотоприёмники могут быть установлены с некоторой погрешностью их

взаимного расположения. Поэтому после окончательной сборки необходимо проводить калибровку геометрических параметров таких ОЭА.

Общей схемой калибровки является определение углового положения во внешней эталонной связке векторов с предварительно известной пространственной ориентацией, спроецированной на фотоприёмник ОЭА определением линейных размеров [А-15]. По энергетическим центрам тяжести, определяемым периодической топологией пикселей фотоприёмника, вычисляется их пространственное положение в системе координат фотоприёмника. Таким образом, в данной схеме периодическая топология пикселей фотоприёмника ОЭА будет являться измерительной шкалой. Далее осуществляется переход из системы координат фотоприёмников в систему координат ОЭА. Затем определяются невязки эталонной связки векторов и их проекций в системе координат ОЭА. Невязки входят в систему линейных алгебраических уравнений, решение которых методом наименьших квадратов будет определять ЭВО ОЭА [А-4].

Основным различием методов калибровки можно назвать способ формирования связки векторов [А-10, А-15]. В зависимости от того, какой в ОЭА фотоприёмник: линейный или матричный определяется то, как должны быть разнесены вектора связки векторов: по двум или по одной координатам. Величина поля зрения ОЭА влияет на то, какой диапазон должна охватывать связка векторов. Требования к погрешности калибровки определяют требования к определению пространственной ориентации связки векторов.

Для калибровки чаще всего используются коллимационные схемы [20, с. 103–106; 21]. В данном случае в качестве рисунка тест-объекта может выступать либо матрица некоторых геометрических элементов рисунка тест-объекта, например, кругов, либо рисунок тест-объекта с одним элементом.

Коллиматор с матрицей элементов рисунка тест-объекта [А-5] подходит для калибровки ОЭА с небольшим полем зрения, ограниченными технологическими возможностями производства тест-объекта. Предварительно такой коллиматор также калибруется, например, теодолитом.

При использовании коллиматора с одним элементом рисунка тест-объекта, его проецируют под разными углами в ОЭА. Могут быть три варианта:

- коллиматор неподвижен, поворачивается калибруемый ОЭА;
- коллиматор поворачивается, калибруемый ОЭА неподвижен;
- калибруемый ОЭА поворачивается по одной оси, а коллиматор – по другой, для упрощения конструктивной реализации схемы калибровки, когда необходимо калибровать ОЭА с большими полями зрения по двум осям. Во всех случаях необходимо измерять величину поворота либо ОЭА, либо коллиматора, например, при помощи углового датчика или теодолита.

Для калибровки ОЭА с сильно (порядка 10 м) вынесенным входным зрачком необходимо не только осуществлять его поворот вокруг оси, но и выполнять поперечное линейное перемещение. В этом случае предотвращается срезание зрачков. Кроме того, необходимо обеспечить минимальное расстояние между коллиматором и калибруемым ОЭА поскольку движение воздушных масс, либо градиент температуры также могут оказывать существенное влияние на погрешность калибровки.

Существует необходимость калибровки ОЭА, имеющих различное количество фотоприёмников, формат фотоприёмников, размер пикселя, фокусное расстояние, положение фотоприёмников друг относительно друга в фокальной плоскости ОЭА.

Классические методы калибровки с различными техническими характеристиками ОЭА предусматривают изготовление для коллиматора тест-объекта в виде стеклянной пластины с нанесённым на её поверхность индивидуальным рисунком литографическим способом. Рассматриваемый технологический процесс является неэффективным по временным затратам.

Для обеспечения высокой точности калибровки ОЭА за счёт эффективных устройств и методик необходимо исследовать факторы оказывающие наибольшее влияние и определить методы уменьшения их воздействия, а также найти сбалансированные соотношения параметров устройств калибровки и калибруемого ОЭА.

1.2 Способы формирования эталонной связки векторов

Для калибровки может использоваться угломерное устройство, например, теодолит [21], который устанавливается перед калибруемым ОЭА, а зрительная труба теодолита последовательно проецирует перекрестие сетки зрительной трубы, подсвеченное осветителем, установленным вместо окуляра, на различные участки фотоприемника ОЭА.

Может быть реализована схема в которой калибруемый ОЭА поворачивается на некоторый угол [22, с. 26–27], значение которого измеряется угломерным устройством. Угломерное устройство в таком случае определяет эталонную связку векторов, а погрешность калибровки будет в первую очередь зависеть от погрешности угломерного устройства. Предъявляются требования к взаимной перпендикулярности осей поворота, которое может быть обеспечена за счёт калибровки в противоположных положениях калибруемого ОЭА [22, с. 26–27].

Существует метод калибровки при котором определение угловых координат производится путём измерения линейных расстояний при повороте калибруемого ОЭА. Система отсчёта углов состоит из двух осветительных

устройств, расположенных на калибруемом ОЭА, и регистраторов системы отсчета углов, расположенных на некотором известном расстоянии от калибруемого ОЭА: два линейных фотоприёмника (ЛФПУ) для отсчётов горизонтальных и вертикальных углов (рисунок 1.1) [23]. Фокусное расстояние измеряется методом увеличения при известном фокусном расстоянии коллиматора и аттестованном расстоянии между щелями тест-объекта, установленного в фокальной плоскости коллиматора. Предполагаемая погрешность метода должна составить $0,5''$ (σ) [23]. Метод хорошо подходит для калибровки крупногабаритных ОЭА.

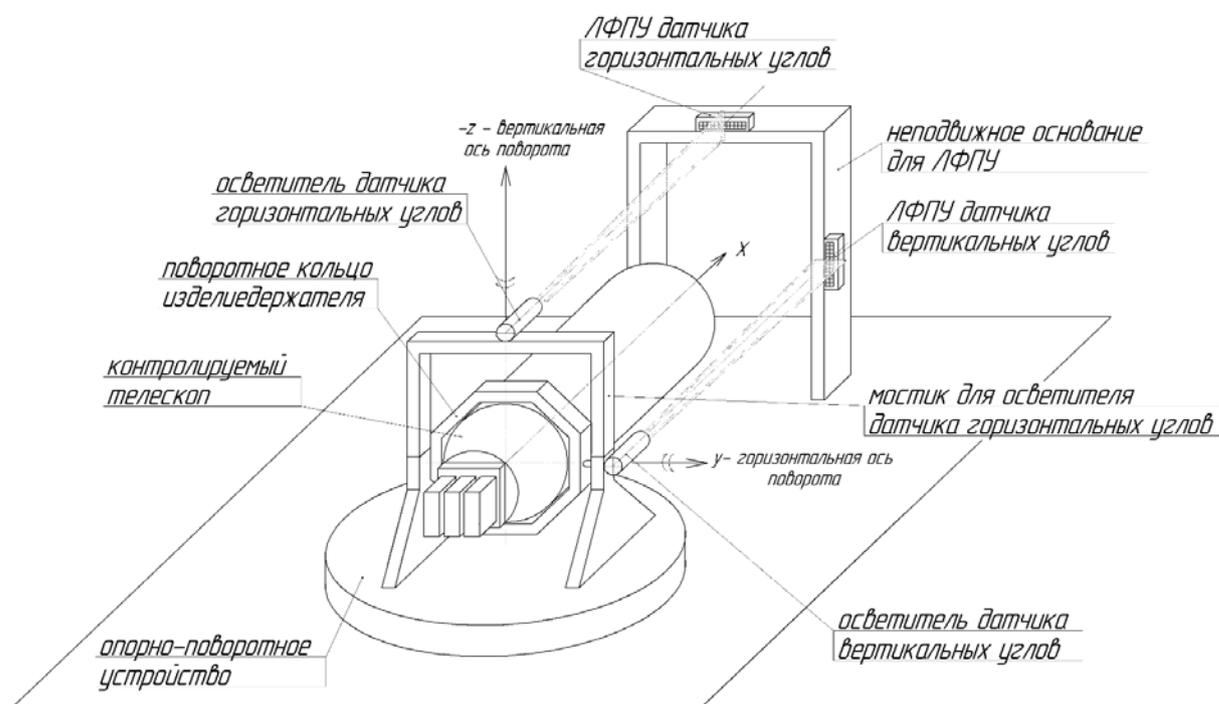


Рисунок 1.1 – Определение угловых координат путём измерения линейных расстояний при повороте калибруемого ОЭА

Для калибровки часто используются коллимационные схемы [21], в которых в качестве рисунка тест-объекта выступает массив кругов, одновременно проецируемых на всю фокальную плоскость. Погрешность калибровки в первую очередь зависит от погрешности определения расстояния между кругами изображения рисунка тест-объекта и может достигать $(0,4-0,6)''$ (σ) (рисунок 1.2) [21]. В данном случае координаты массива кругов, пересчитанные в угловую меру с учётом фокусного расстояния коллиматора, задают эталонную связку векторов. Поле зрения коллиматора и размер элементов рисунка тест-объекта будут ограничивать величину поля зрения ОЭА, которую можно откалибровать. В таком случае можно спроецировать изображение рисунка тест-объекта с перекрытием на фокальную плоскость ОЭА под разными углами, поворачивая или коллиматор, или калибруемый ОЭА как в [24], что незначительно увеличивает

время калибровки и усложняет процесс обработки результатов. Погрешность калибровки таким методом в работе [24] составила $0,5''$ (σ).

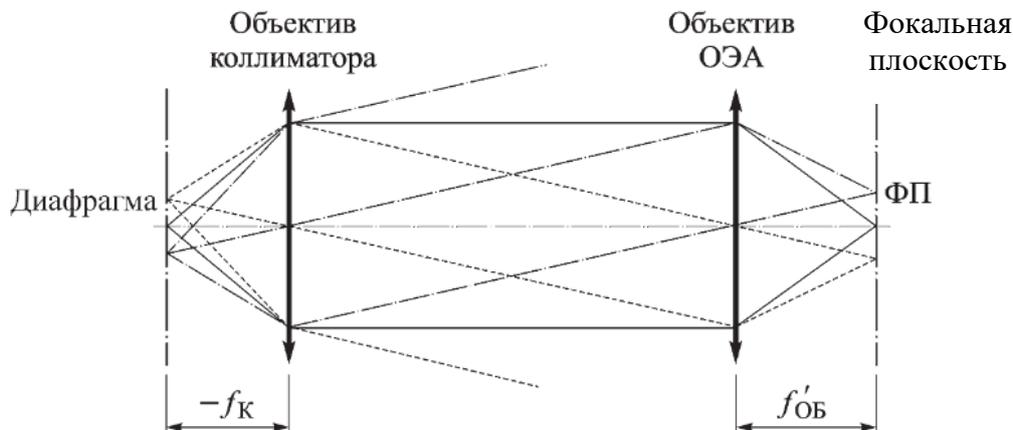


Рисунок 1.2 – Коллимационная схема

Известен метод калибровки, который заключается в установке дифракционного элемента в параллельном ходе лучей от коллиматора (рисунок 1.3) [25]. Дифракционный элемент, изготовленный с использованием литографии, представляет собой массив кругов. Метод имеет технологические ограничения по размерам изготовления дифракционного элемента и определяет максимальное линейное поле зрения для калибруемого ОЭА, кроме того, диаметр зрачка коллиматора должен быть в 3 раза больше чем размер дифракционного элемента. Погрешность метода в работе [25] составила порядка $4''$ (σ).

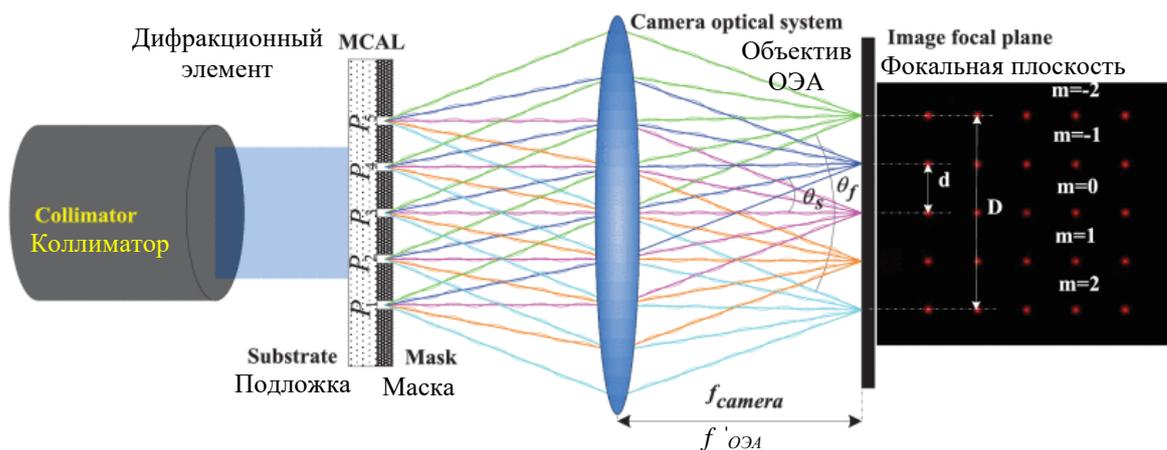


Рисунок 1.3 – Дифракционный элемент в параллельном ходе лучей коллиматора

Пример использования проектора с DMD – элементом, формирующим изображение, для калибровки представлен в [26, 27]. Такая схема заключается в проецировании DMD на объект некоторой формы или плоский экран

массива линий, кругов или шахматной доски и съёмке этого объекта или экрана цифровой камерой (рисунок 1.4) [27]. Однако, такая схема калибровки не подходит для ОЭА ДЗЗ, имеющих большие фокусные расстояния (порядка 10 м) и сфокусированных на бесконечность. Для получения резкого изображения на экране, его пришлось бы расположить на расстоянии в десятки метров, в лабораторных условиях такая реализация становится практически невозможной.

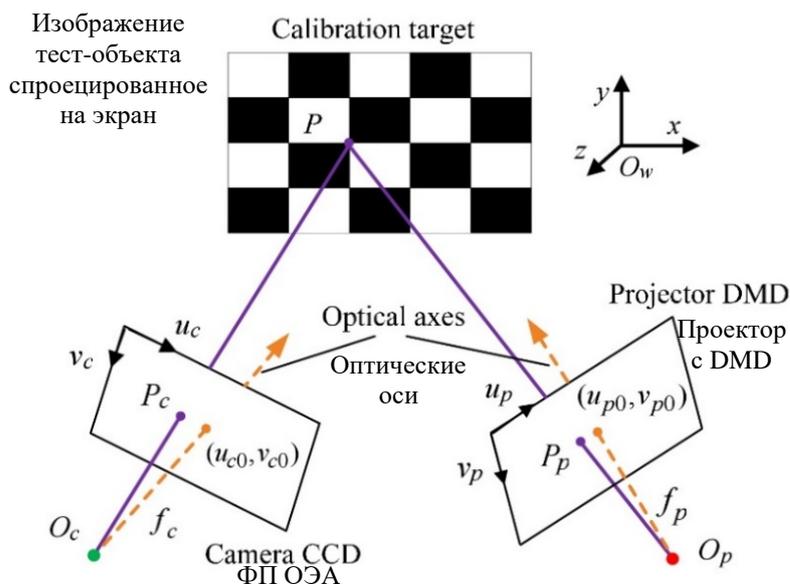


Рисунок 1.4 – Схема калибровки по изображению тест-объекта спроецированного на экран

При расположении ОЭА на большом расстоянии от экрана на погрешность калибровки большое влияние будет оказывать движение воздушных масс и рефракция воздуха из-за температурного градиента. Таким образом, такой способ подходит лишь для короткофокусных объективов, а также является неточным (погрешность порядка $1'-1^\circ$ [26, 27]).

Существует метод калибровки по звёздам. Взаимное расположение звёзд по каталогам известно с погрешностью порядка $(0,01-0,1)''$ (σ) [28], что позволяет провести калибровку с погрешностью порядка $0,1''$ (σ). Недостатком такого метода является, то что не все ОЭА могут различить звёзды, т. е. чтобы изображения звёзд были размером более трёх пикселей, а на погрешность будут влиять хроматические аберации ОЭА, поскольку излучение различных звёзд отличается по спектру. Для широкопольных ОЭА на погрешность калибровки может влиять турбулентность атмосферы по полю.

1.3 Способы реализации тест-объекта с широким диапазоном характеристик

Тест-объект для калибровки широкого круга современных съёмочных ОЭА должен обладать следующими характеристиками:

- точная пространственная геометрическая структура, погрешность не более $(0,01-1)$ мкм – основной параметр;

- нестабильность геометрической структуры не более $(0,01-1)$ мкм в процессе калибровки и в течение всего срока эксплуатации, при последующих использованиях, при необходимости возможность простой однократной калибровки;

- высокий коэффициент заполнения элементов, формирующих рисунок (не менее 90 %);

- минимальный размер элемента для формирования рисунков порядка $(1-10)$ мкм;

- большой формат для ОЭА с соответствующими линейными полями зрения $(0,01-1)$ м;

- при возможности высокие динамические характеристики для формирования быстроизменяющихся объектов не менее $(4-30)$ кГц, например формирования движения подстилающей поверхности в ОЭА ДЗЗ, работающих в режиме ВЗН для отработки алгоритмов обработки изображений;

- высокая контрастность $(1/256-1/65536)$;

- возможность работы в широкой области спектра (УФ, видимой, ближней ИК).

Тест-объект для калибровки может быть реализован посредством пространственного модулятора света, которые широко используются в проекционных системах для формирования структурированного света [29; 30, с. 225–265]. Структурированный свет – это управление оптическими характеристиками излучения в пространстве и во времени. Управление в пространстве в свою очередь осуществляется по амплитуде (интенсивности), фазе (волновому фронту) и поляризации [31]. Большинство представленных на рынке моделей проекторов можно разделить на основные категории по типу устройства, формирующего изображение:

- Liquid Crystal Display (LCD) – жидкокристаллический дисплей;

- Liquid Crystal on Silicon (LCoS) – жидкие кристаллы на кремнии;

- Grated Light Valve (GLV) – решетчатый световой затвор;

- Digital Micromirror Device (DMD) – цифровое микрозеркальное устройство.

1.3.1 Устройства на основе **жидкокристаллического дисплея**

LCD технология строится на основе ЖК матрицы. В основе функционирования таких устройств лежит свойство молекул ЖК вещества менять пространственную ориентацию под воздействием электрического поля [30, с. 137–224; 32]. Проходящий через ячейку свет может менять направление плоскости поляризации в зависимости от величины приложенного напряжения. Поляризационные фильтры, плоскости поляризации которых взаимно перпендикулярны, до и после ячейки позволяют управлять прозрачностью любого элемента изображения.

Основными достоинствами технологии формирования изображения на основе ЖК матриц можно назвать высокую яркость картинки, небольшой вес конструкции, лёгкую настройку и эксплуатацию, а также возможность проецирования изображений очень больших форматов.

Недостатком является большое расстояние между пикселями, из-за необходимости размещать между ячейками проводники и управляющие транзисторы, так коэффициент заполнения составляет порядка 70 % [33]. Другой недостаток – низкая контрастность изображения. В ранних моделях проекторов в качестве источников подсветки ЖК матрицы применялись мощные газоразрядные лампы, которые нуждаются в сложной системе охлаждения. В современных моделях проекторов преимущественно в качестве источников света используются сверхмощные светодиоды и лазеры, формирующие более высокий контраст. Отличительными особенностями ЖК матриц является меньшее быстродействие, неравномерность засветки по полю, с течением времени зависимость величины пропускания от температуры и т.д. Молекулам жидких кристаллов присущи временные флуктуации ориентации молекул вызывающие эффекты деполяризации. Они могут составлять 30 % для уровня сигнала 50 % и иметь период 8 мс, для уровня сигнала более 80 % иметь период 2,5 мс [34].

1.3.2 Устройства на основе **жидких кристаллов на кремнии**

LCoS – технология получения изображения, работающая на отражение, основана на использовании ЖК. В данной технологии световой поток модулируется ЖК матрицей, работающей не на просвет, а на отражение [32]. На подложке располагается управляющий полупроводниковый слой, чаще в виде КМОП матрицы, покрытого отражающей поверхностью, а над ним находятся матрица из ячеек с ЖК и поляризатор. Свет от источника попадает на поляризатор, поляризуется и проходит через ЖК ячейку. На полупроводниковый слой подаётся сигнал, который позволяет управлять плоскостью поляризации входящего света путём изменения пространственной ориентации ЖК. Таким образом, ячейка становится в той или иной степени

прозрачной, позволяя регулировать количество света, которое проходит к отражающему слою и обратно.

Достоинствами этой технологии является хорошее качество изображения, высокая яркость и контрастность картинки, а также возможность проецирования изображений очень больших форматов. Разработаны образцы, работающие в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах [31]. Также стоит отметить, что особенности производства отражающих матриц позволяют располагать управляющие проводники за отражающим слоем, таким образом площадь пикселей, которая участвует в формировании изображения больше, чем у LCD и сравнима с DLP. Пиксельные электроды обычно имеют межпиксельные промежутки от (0,2-0,5) мкм, тогда как размеры пикселей обычно составляют (2-10) мкм [35]. Иными словами, изображение выглядит гораздо более однородным, чем в случае с обычными ЖК матрицами. Технология производства, позволяет создавать матрицы с очень высоким разрешением более 8К [35]. Доступны новые ЖК материалы с временем отклика субмиллисекунды для модуляции интенсивности и временем отклика ~2 мс для фазовой модуляции [35].

Из-за небольшого межпиксельного расстояния на краю пикселя появляется сильное горизонтальное электрическое поле, что приводит к фазовым искажениям и наиболее выражено на границе светлых и тёмных пикселей. Это явление не выражено в ЖК матрицах, работающих на просвет, поскольку у них межпиксельное расстояние более 5 мкм. Разрабатываются способы уменьшения влияния краевых эффектов, однако результатов на данный момент не удалось достичь. Так у LCoS образцов при размере пикселя 6,4 мкм и межпиксельном расстоянии 0,2 мкм, зона, подверженная влиянию краевых эффектов, может составлять до 1 мкм [35].

1.3.3 Устройства на основе **решетчатого светового затвора**

GLV – технология, используемая для формирования изображения с помощью динамически регулируемой дифракционной решётки. В основе технологии лежит использование микроэлектромеханической системы, которая представляет собой набор чередующихся динамических и статических отражающих лент для каждого пикселя. Между лентами и подложкой имеется воздушный зазор. Каждая динамическая лента и подложка являются электропроводными, поэтому отклонением ленты можно управлять. Когда напряжение активных лент установлено равным потенциалу подложки, ленты не отклоняются, устройство работает как зеркало, падающий свет отражается в сторону, т.е. излучение не используется. Когда между лентой и подложкой прикладывается напряжение, создаётся электрическое поле, которое отклоняет активную ленту вниз к подложке. За счёт этого отклонения

падающий свет дифрагирует и используется для формирования изображения. Длина волны для дифракции определяется пространственной частотой лент.

Переключение лент происходит за 0,3 мкс [36], что в 10 раз быстрее, чем LCoS и DMD. Устройство обеспечивает большое разрешение – одномерный модуль с 1088 пикселями формирует развёртку в 8192 пикселя [37].

Недостатком является одномерная структура, требующая дополнительных устройств для развёртки по второй оси. Размер пикселя составляет 25,5 мкм [37], что больше, чем у LCoS и DMD.

1.3.4 Устройства на основе **цифрового микрозеркального устройства**

DLP технология также, как и LCoS основана на отражающем принципе и является наиболее распространённой для формирования структурированного света [38, 39]. В основе этой технологии лежит микроэлектромеханическая система, которая представляет собой микрозеркало, за положение которого отвечает микромеханика, управляемая при помощи электрических сигналов [32]. Микрозеркало может находиться в двух положениях. В одном положении оно отражает свет, который после прохождения всего тракта формирует элемент изображения на экране. Во втором положении свет попадает на специальное светопоглощающее устройство. Благодаря маленькому размеру микрозеркала, оно может переключаться между двумя состояниями очень быстро. Поскольку принцип работы и управления схож с бинарным (света нет – логический ноль, свет есть – логическая единица), то устройства такого типа считаются цифровыми. Для того чтобы формировать изображение, используется целый массив таких микрозеркал вместе с управляющей механикой. Такая микросхема, выполненная по микроэлектронной технологии, называется DMD.

Основными достоинствами DLP технологии являются: высокая геометрическая точность микрозеркальной структуры по сравнению с технологией на ЖК, что важно в тех случаях когда геометрическая точность как и в схемах калибровки является самым важным параметром, например, в оптической профилометрии [33], а также высокая яркость и контрастность изображения [А-8]. За счёт конструкции DMD микросхем, DLP устройства также отличаются малым временем отклика – порядка 10 мс [40]. Поскольку здесь работает принцип отражения, то эффективность использования светового потока в таких проекторах очень высока, а значит, для получения необходимых значений яркости требуются источники света меньшей мощности. DMD микросхемы сохраняют свои первоначальные характеристики с течением времени. По однородности изображения и заметности пикселей на экране DLP технология сравнима с LCoS и

превосходит LCD. Коэффициент заполнения более 90 % [41, с. 18–20]. Микрозеркала обеспечивают работу в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Современное развитие оптических полупроводниковых технологий, появление светодиодов и лазеров синего и зелёного цветов позволило использовать их в качестве источников света. Схемы, обеспечивающие высокую скорость включения/отключения источников света, позволили увеличить и скорость смены кадров. Кроме того, удалось очень сильно уменьшить энергопотребление и габаритные размеры устройства, в том числе и за счёт более простой системы охлаждения. А меньшее тепловыделение также положительно сказывается на работе всей электроники. Применение полупроводниковых светодиодов и лазеров в качестве источника света в проекторах позволило снизить энергопотребление, увеличить срок службы, увеличить яркость и контрастность изображения, а также сделать их постоянными в течение времени эксплуатации.

К недостаткам DMD можно отнести большие линейные размеры микрозеркал (5,4-13,6) мкм [42, с. 7] по сравнению с пикселями ЖК матриц и формат до 2К [42, с. 7], 4К [43, с. 1, 19–22].

В качестве тест-объекта в коллиматоре предлагается использовать DMD, которое позволяет сформировать рисунок тест-объекта практически любой формы и размера, с возможностью индивидуального подбора рисунка, в том числе и экспериментальным методом. DMD обеспечивает возможность проецирования изображения одновременного на несколько фотоприёмников ОЭА с учётом их взаимного расположения. Сложность спроецировать изображение элементов рисунка тест-объекта с достаточным расстоянием до краёв фотоприёмника для вычисления их центров возникают при необходимости калибровки ОЭА с фотоприёмниками в виде «линеек», у которых размеры по столбцам и строкам могут отличаться на порядок. При наличии разного числа фотоприёмников в фокальной плоскости ОЭА и для различных несирийных ОЭА требуется изготовление отдельных специальных тест-объектов. Существование допусков задних фокусных расстояний на изготовление ОЭА не позволяет заранее, до проведения калибровки, изготовить подходящий тест-объект. Использование в качестве тест-объекта DMD, помимо этого, позволяет формировать рисунок тест-объекта с различными значениями контраста, в том числе и по полю, а также позволяет изменять рисунок тест-объекта во времени с высокой частотой. Коллиматор с таким тест-объектом подходит для решения широкого круга задач.

DMD получило широкое распространение в различных областях оптоэлектроники, в проекторах, спектроскопии, литографии, системах машинного зрения и др. Поскольку технология изготовления DMD позволяет

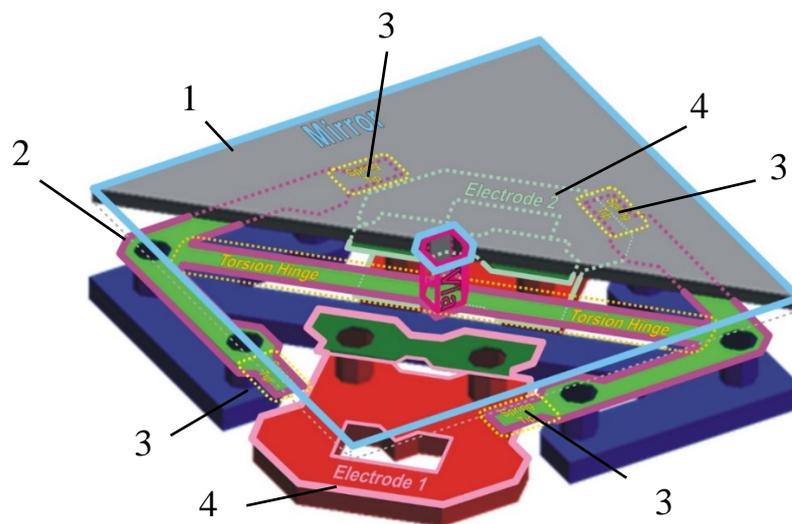
получать микрозеркала размером от 5,5 мкм [42, с. 7], предполагается, что погрешность изготовления пространственной структуры микрозеркал DMD обеспечит требуемую погрешность калибровки макета ОЭА, а также будет не хуже в сравнении с другими реализованными методами: при помощи тест-объекта в виде стеклянной пластины, установленной в фокальной плоскости коллиматора и тахеометра.

1.4 Формирование рисунка тест-объекта посредством цифрового микрозеркального устройства

DMD – бистабильный пространственный модулятор света, включающий массив подвижных микрозеркал, функционально установленных в ячейках памяти на КМОП матрице [44, с. 1–11].

Микрозеркала DMD являются одновременно оптико-механическими и электромеханическими элементами. Бистабильное функционирование означает то, что существуют два устойчивых положения микрозеркала, которые во время работы определяются геометрией и электростатикой микрозеркала. Микрозеркала являются оптико-механическими элементами, поскольку позиции определяют направление, на которое отклоняется падающий световой поток. Микрозеркало состоит из шарнира кручения, упругих наконечников с которыми контактирует нижняя часть микрозеркала, двух электродов, используемых для приведения микрозеркала в одно из рабочих положений (рисунок 1.5) [44, с. 3], на котором микрозеркало показано в отключённом состоянии.

Каждое микрозеркало управляется ячейкой памяти, сформированной из элементов двойной КМОП памяти [44, с. 1–11]. Состояние двух элементов памяти не являются независимыми, но всегда комплементарными. Если один элемент является логической «1», другой элемент является логическим «0», и наоборот. Состояние ячейки памяти определяет механическое положение зеркала. Для того, чтобы ячейка изменила положение микрозеркала, в неё должен поступить специальный импульс. Данные о положении микрозеркал могут загружаться по строкам. Если только одно микрозеркало в строке должно быть изменено, необходимо чтобы была загружена вся строка. Микрозеркала могут управляться не только по строкам, но и по блокам микрозеркал для эффективного управления отдельными участками DMD. Короткое время отображения может быть достигнуто путём загрузки данных в блоки микрозеркал, когда осуществляется поворот микрозеркал другого блока. Это фактически устраняет время влияния поворота микрозеркал в общем времени, которое требуется для отображения одного кадра.



1 – микрозеркало; 2 – шарнир кручения; 3 – упругий наконечник; 4 – электрод

Рисунок 1.5 – Устройства управления положением микрозеркала для угла поворота $\pm 12^\circ$

Существует два основных типа топологии микрозеркал в DMD: прямоугольная и диагональная. Благодаря диагональной топологии массив микрозеркал позволяет формировать более плавные диагональные линии, с неровными вертикальными и горизонтальными (рисунок 1.6) [45, с. 11]. В случае диагональной топологии для получения вертикальных и горизонтальных линий существует два варианта: использовать через одно микрозеркало в каждой последующей строке или столбце, или использовать смежное микрозеркало в каждой последующей строке или столбце. Выбор варианта зависит от необходимой толщины линии. Однако при использовании DMD в качестве тест-объекта для калибровок ОЭА, у которых чаще всего прямоугольная структура пикселей, это не очень удобно.

Управление положением каждого из микрозеркал осуществляется пользователем независимо через ПК. Пользователь, задавая определённым микрозеркалам положение «Вкл», формирует рисунок тест-объекта. Микрозеркала управляют отражённым световым потоком. Микрозеркало, при повороте вокруг своей диагонали, может принимать два рабочих положения: «+ α » «Вкл» (например $\alpha = 12^\circ$) относительно плоского положения А – А и «- α » «Выкл» относительно плоского положения (рисунок 1.7 и рисунок 1.8) [41, с. 22–28]. Световой поток, проецируемый на DMD осветителем и отражённый от микрозеркал в положении «Вкл», попадает в объектив. Для создания изображения, имеющего промежуточную освещённость, световой поток модулируется микрозеркалами путём задания частоты колебания микрозеркал между положением «Вкл» и «Выкл».

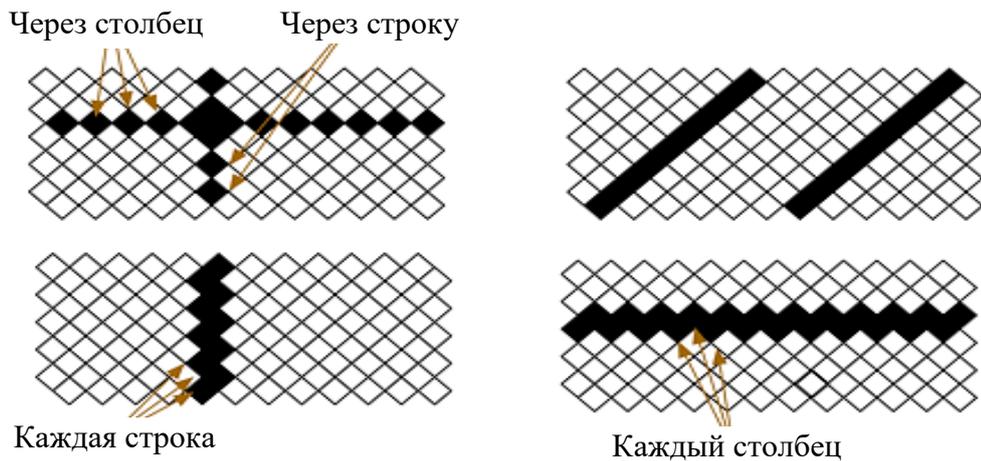


Рисунок 1.6 – Диагональная топология пикселей для формирования вертикальных, горизонтальных и диагональных линий

Когда микрозеркала не под напряжением, они находятся в неактивном положении и располагаются приблизительно в одной плоскости.

Для управления DMD необходимы процессор, флэш память, система питания и контроллер, осуществляющий согласованную работу всех этих устройств, реализованных в виде DLP модуля. Помимо этого в модуле может быть реализована система управления подсветкой, когда в модуле имеется осветительный канал, который может включать светодиоды или лазер, конденсор, оптические компоненты для формирования равномерной подсветки. В модуле может иметься проекционные объектив и тогда модуль по сути является законченным проектором. В зависимости от применения подбирается соответствующий DLP модуль (таблица 1.1) [41, с. 1, 18–20, 22–28; 42, с. 7; 46, с. 1, 17–20; 47, с. 1, 20–22], который при необходимости может быть доработан в оптической части.

Для контрольно-юстировочных операций важным критерием является использование модуля с DMD матрицей, имеющей минимальный размер микрозеркала, что увеличивает разрешающую способность. Такими модулями являются DLP LightCrafter 3000, DLP LightCrafter 4500, DLP LightCrafter 6500 и DLP LightCrafter 9000, DLP 2010. Если в контрольно-юстировочных задачах необходимо сформировать элементы рисунка тест-объекта дискретностью менее (5,4–7,6) мкм, то дополнительно применяются оптические компоненты, уменьшающие исходное изображение микрозеркала.

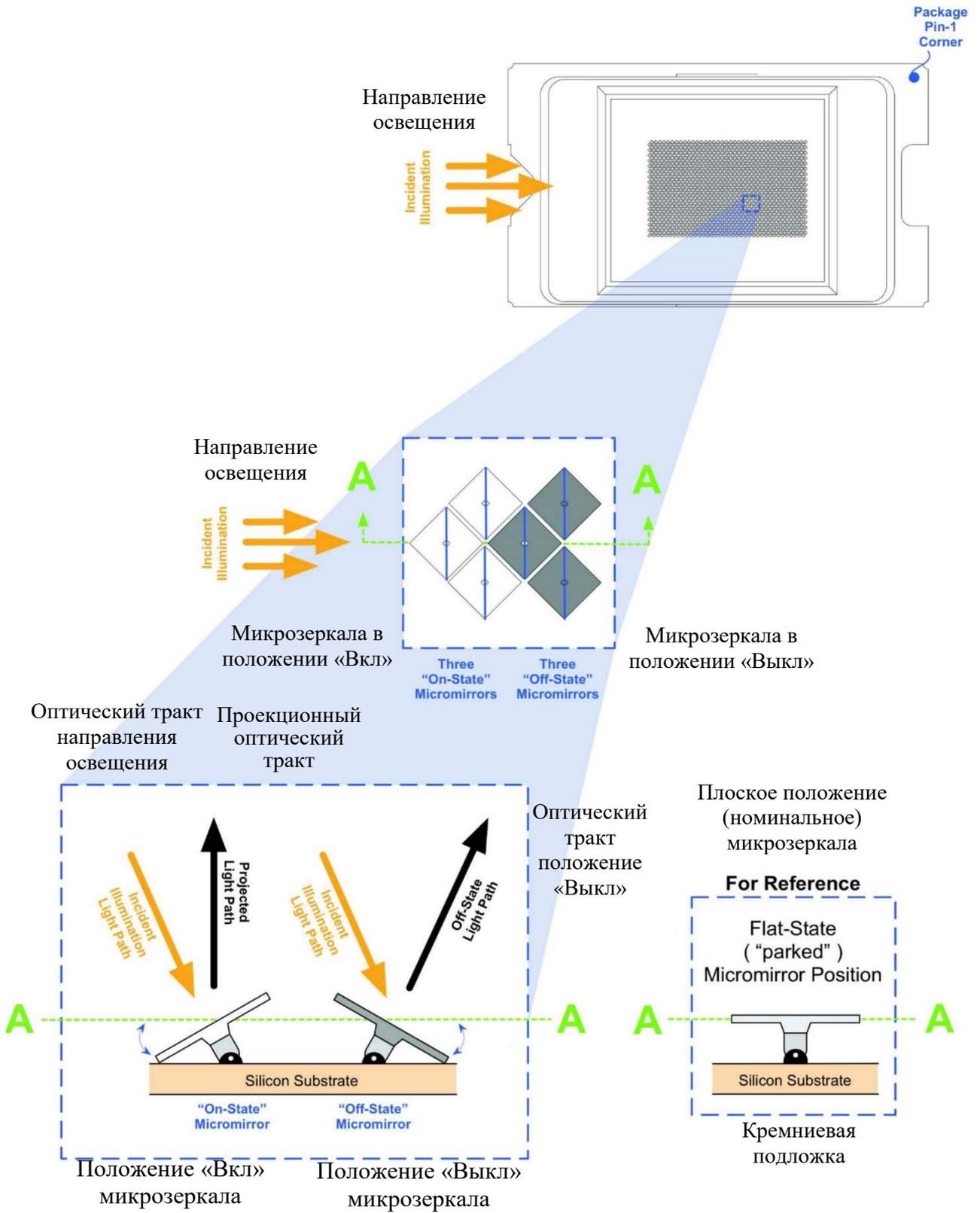


Рисунок 1.7 – Варианты положения микрозеркал

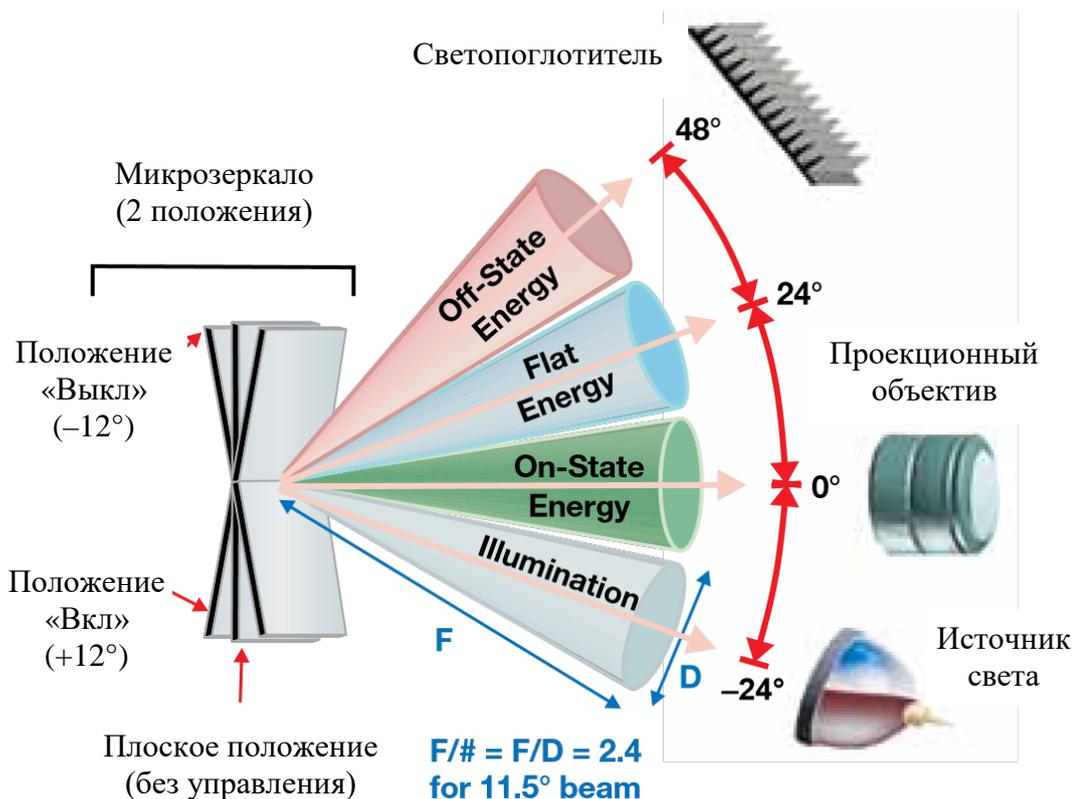


Рисунок 1.8 – Схема организации управления световым потоком DMD

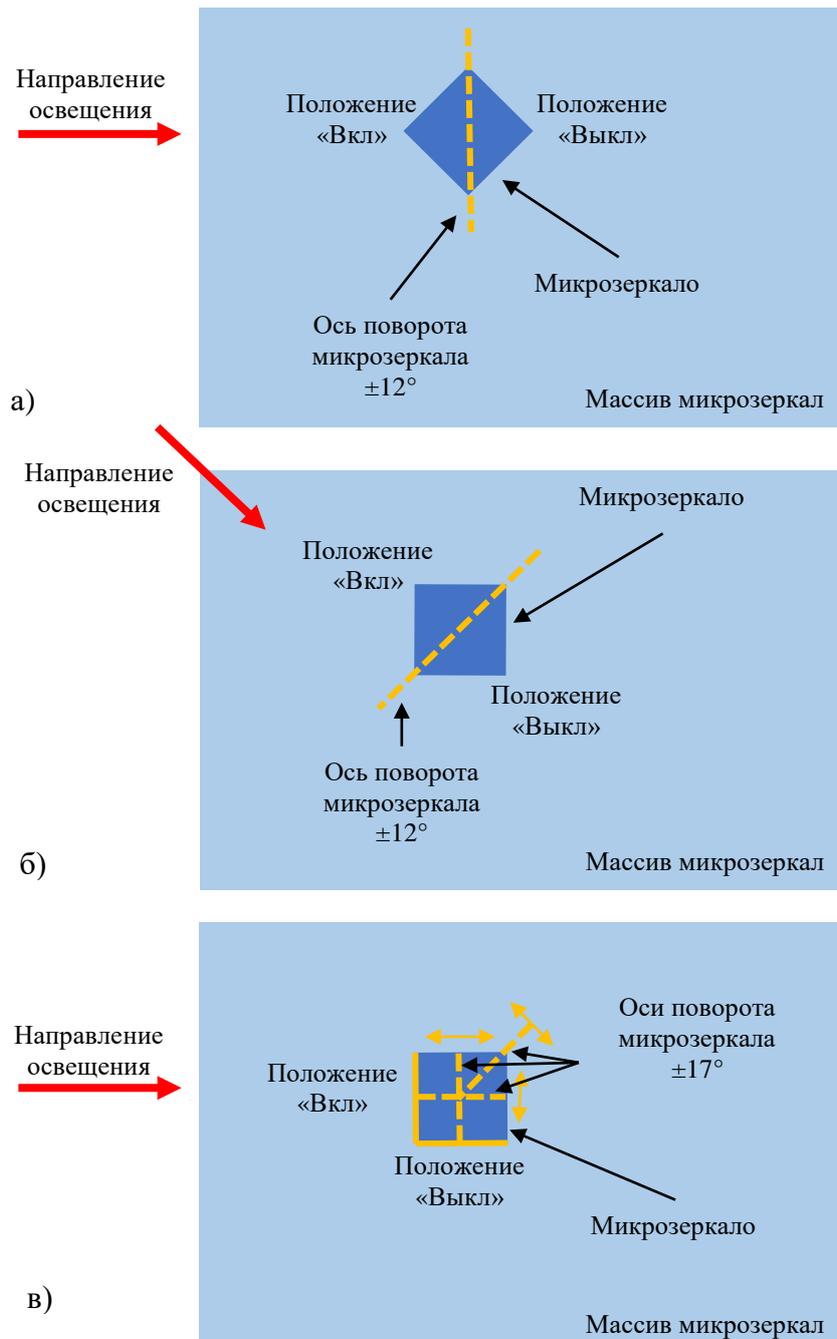
Таблица 1.1 – Основные технические характеристики различных модулей DMD

Модель	Область спектра, нм	Количество микрозеркал	Топология микрозеркал/ направление освещения	Размер микрозеркала, мкм/ угол поворота, °	Диagonal массива микрозеркал, мм	Частота в бинарном режиме / 8-бит, Гц
DLP LightCrafter 4500	420-700	912×1140	диагональная/ со стороны	7,6/±12	11,43	4225 / 120
NIRscan	700-2500					
DLP LightCrafter 3000	420-700	608×684	диагональная/ со стороны	7,6/±12	7,62	4225 / 120
DLP Discovery 4100: – с DLP 9500	400-700	1920×1080	прямоугольная/ с угла	10,8/±12	24,13	23148 / 1700
– с DLP 9500UV	363-420					
DLP Discovery 4100: – с DLP 7000	400-700	1024×768	прямоугольная/ с угла	13,68/±12	17,78	32552 / 1900
– с DLP 7000UV	363-420					
DLP LightCrafter 9000	400-700	2560×1600	прямоугольная/ с угла	7,6/±12	22,86	9523 / 247
DLP LightCrafter 6500	400-700	1920×1080	прямоугольная/ с угла	7,6/±12	16,51	9523 / 247
DLP 2010	420-700	854×480	прямоугольная/ со стороны	5,4/±17 (поворот по двум осям)	5,29	2880 / н.д.
NIRscan Nano	700-2500					

Большой формат изображения, формируемого DLP модулем, необходим для контроля крупноформатных ОЭА. При невозможности применения DLP модуля достаточного формата можно использовать сканирующие системы, например, установить DLP модуль на высокоточный двухкоординатный стол, позволяющие перемещать DLP модуль по полю контролируемого ОЭА.

Частота смены кадров в формируемом изображении важна для получения динамических рисунков тест-объекта, которые необходимы при контроле ОЭА осуществляющих съёмку движущихся объектов, для ОЭА ДЗЗ работающих в режиме ВЗН, для систем астроориентации. Возможность формирования динамических рисунков тест-объекта позволяет в лабораторных условиях отрабатывать алгоритмы обработки изображений, например имитацию съёмки движущейся подстилающей поверхности для ОЭА ДЗЗ.

Топология микрозеркал в DMD – диагональная или прямоугольная – будет определять угол направления освещения относительно массива микрозеркал (рисунок 1.9). Для диагональной топологии направление освещения конструктивно необходимо реализовать со стороны массива микрозеркал. Для прямоугольной топологии – с угла. Таким образом, для более удобной топологии массива микрозеркал – прямоугольной, требуется более сложная конструктивная реализация освещения – с угла. Для обеспечения освещения со стороны и использования прямоугольной топологии микрозеркал существует более сложное устройство управления микрозеркалом. В данном случае микрозеркало поворачивается не только вокруг диагонали, но и дополнительно вдоль стороны (рисунок 1.10) [42, с. 3]. В результате угол наклона микрозеркала составляет $\pm 17^\circ$, положения микрозеркала «Вкл» и «Выкл» соответствуют сторонам микрозеркала. Такое сложное управление положением микрозеркала DMD требует больше времени и является ограничивающим параметром при использовании в качестве формирования динамического рисунка тест-объекта.



а – диагональная; б – прямоугольная; в – прямоугольная с поворотом вокруг двух осей

Рисунок 1.9 – Направление освещения в зависимости от топологии микрзеркал

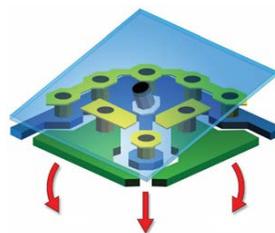


Рисунок 1.10 – Устройство управления положением микрзеркала для угла поворота $\pm 17^\circ$ вокруг двух осей

В качестве примера более подробно представлены технические характеристики DMD для модуля DLP LightCrafter 4500 (таблица 1.2) [41, с. 1, 18–20, 22–28; 45; с. 8–11], размеры и ориентация микрозеркал в массиве друг относительно друга (рисунок 1.11) [41, с. 22–28].

Таблица 1.2 – Технические характеристики DLP LightCrafter 4500

Технические параметр	Значение	Единица измерения
Физические характеристики массива активных микрозеркал		
Число строк активных микрозеркал	1140	шт
Размер активной области микрозеркал по высоте	6,1614	мм
Число столбцов активных микрозеркал	912	шт
Размер активной области микрозеркал по ширине	9,855	мм
Число нерабочих микрозеркал в положении «Выкл»	10	шт/строку
Период микрозеркал (диагональ)	7,637	мкм
Период микрозеркал (по вертикали и горизонтали)	10,8	мкм
Оптические характеристики		
Номинальный наклон микрозеркал	0	°
Рабочий наклон микрозеркал	±12	°
Случайная погрешность угла наклона микрозеркала	±1	°
Случайная погрешность угла наклона оси шарнира	±1	°
Нерабочие микрозеркала (не переходят из номинального в рабочее положение)	несмежные	10 шт
	смежные	0 шт
Время перехода микрозеркал из одного положения в другое положение	5	мкс
Время переключения микрозеркал из одного положения в другое положение	16	мкс
Допустимое превышение освещения	10	%
Материал защитного стекла	Corning Eagle XG	
Показатель преломления для $\lambda = 546,1$ нм	1,5119	
Оптическая эффективность массива микрозеркал		
Общая оптическая эффективность	66	%
– фактор заполнения	92,5	%
– дифракционная эффективность	86	%
– коэффициент отражения	88	%
– коэффициент пропускания	97	%

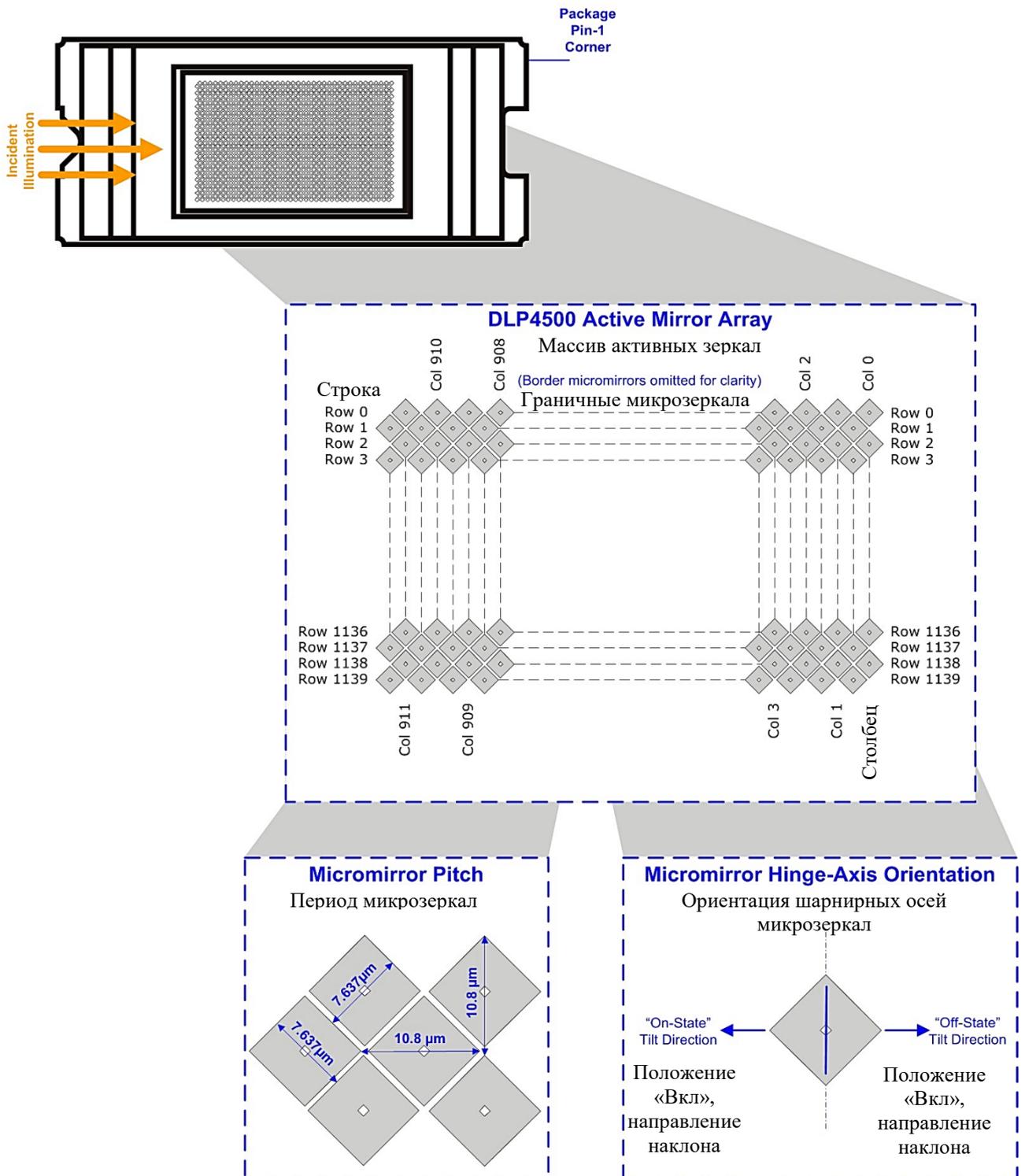


Рисунок 1.11 – Массив микрозеркал, период микрозеркал и ориентация шарнирных осей

Выводы по главе 1

Показана эффективность проведения калибровки ОЭА ДЗЗ в лабораторных условиях по сравнению с калибровкой только в процессе полёта.

Рассмотрены способы формирования эталонной связки векторов для калибровки в зависимости от параметров ОЭА. Преимущественным по точности и конструктивной реализации является установка тест-объекта в фокальную плоскость коллиматора.

В качестве тест-объекта для калибровки могут применяться пространственные модуляторы света – устройства для формирования структурированного света, которые в том числе используются и в проекционных системах. Результаты сравнительного анализа различных способов реализации тест-объекта для калибровки показывают, что микроэлектронная DLP технология по сравнению с другими распространёнными, такими как LCD, LCoS и GLV обеспечивает более точную и стабильную пространственную геометрическую структуру, а также однородность и стабильность энергетических характеристик по полю за счёт DMD [А-5, А-8].

ГЛАВА 2

КОЛЛИМАТОР С ЦИФРОВЫМ МИКРОЗЕРКАЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ В КАЧЕСТВЕ ТЕСТ-ОБЪЕКТА

2.1 Выбор и обоснование оптических компонентов, конструкции

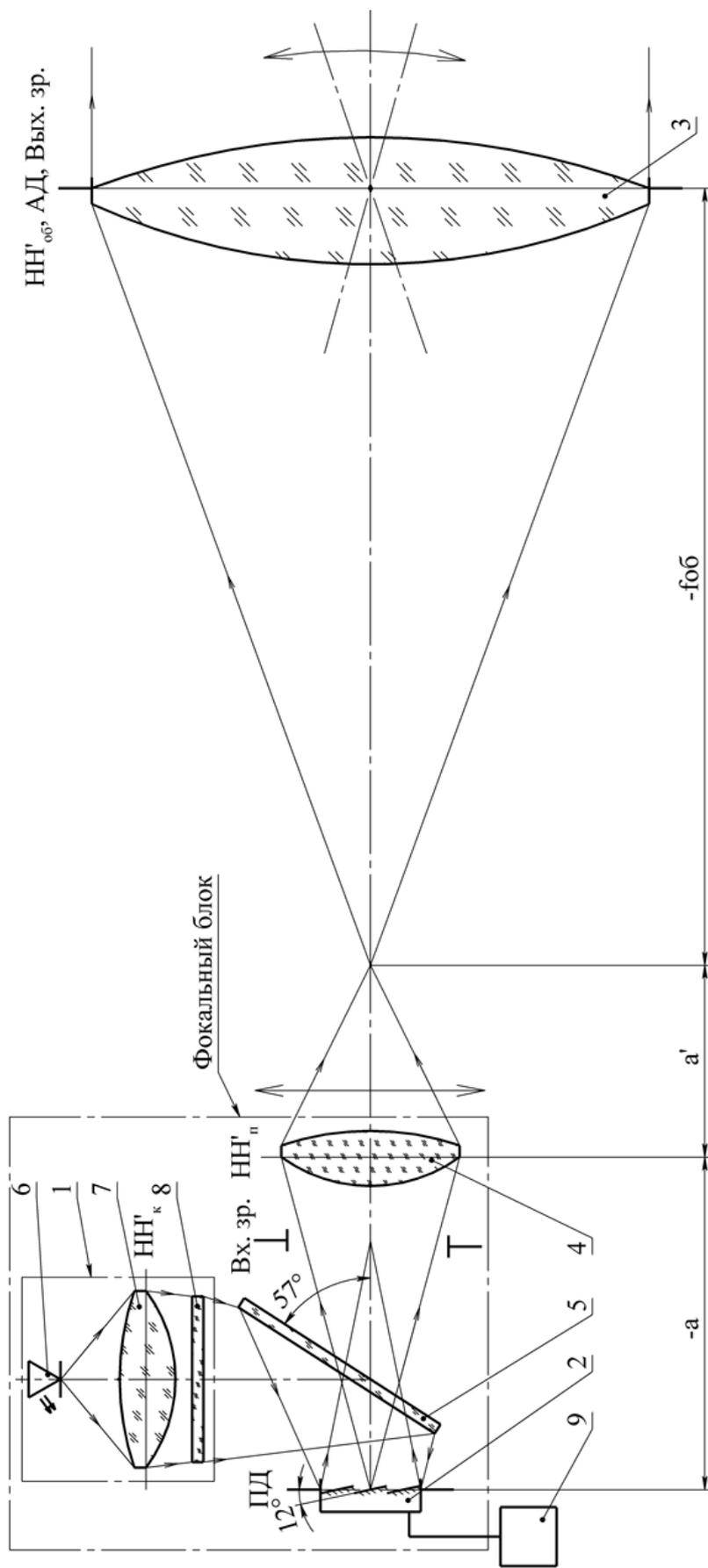
DMD модули в базовом коммерческом исполнении (таблица 1.1) не всегда подходят для решения широкого круга задач и требуют дополнительной конструктивной доработки. Часто модуль DMD используется без штатного объектива коллиматора, а обеспечение требуемого масштаба изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике калибруемого ОЭА может выполняться посредством добавления оптических компонентов. Часто избыточна величина светового потока, поэтому в схему добавляются ослабители светового потока. Модуль DLP Discovery 4100 с DLP 7000, обеспечивающий самую высокую частоту, реализован без осветительной системы.

Предложено устройство коллиматора с различными вариантами исполнения. Сущность устройства коллиматора поясняется принципиальной оптической схемой (рисунок 2.1). Коллиматор включает оптически связанные осветитель 1, тест-объект 2 и объектив 3. Между тест-объектом 2 и объективом 3 расположена оптическая система для формирования требуемого масштаба изображения, например, в виде передающего объектива 4 и светоделитель 5 [А-16, А-17].

Осветитель 1 включает источник света, один или несколько светодиодов 6, конденсор 7 и молочное стекло 8. Осветитель 1 оптически связан с тест-объектом 2 посредством светоделителя 5, установленным под углом к оптической оси коллиматора. Осветитель 1 установлен перпендикулярно оптической оси коллиматора и располагается так, что формирует изображение источника света во входном зрачке системы, включающей передающий объектив 5 и объектив 3.

В качестве тест-объекта 2 использован модуль DMD, например:

– DLP Discovery 4100 с DLP 7000, включающий: DMD, плату управления, содержащую контроллер, флеш-память, схему управления питанием и др.;



1 – осветитель; 2 – тест-объект; 3 – объектив; 4 – оптическая система для формирования требуемого разрешения; 5 – светоделитель; 6 – светодиод; 7 – конденсор; 8 – молочное стекло; 9 – ПК

Рисунок 2.1 – Схема оптическая принципиальная коллиматора с ходом главного луча

– DLP LightCrafter 4500, включающий: DMD, систему охлаждения, плату управления, осветительную систему. Используется со снятым штатным объективом. DMD является массив подвижных микрозеркал. Микрозеркала способны поворачиваться на угол $\pm \alpha$ относительно их положения покоя (плоское). Модуль DMD управляется ПК 9. Пользователь может настраивать положение микрозеркал и формировать требуемый рисунок тест-объекта. Массив микрозеркал должен быть повернут вокруг оптической оси коллиматора на угол, определяемый топологией микрозеркал (рисунок 1.9).

Объектив 3 может быть, как линзовым, так и зеркальным. Линзовые объективы обладают большей стабильностью положения входящих в него оптических компонентов, что обеспечивает стабильность качества изображения и стабильность геометрических параметров объектива. Линзовые объективы сравнимы с зеркальными по величине дисторсии. Однако линзовые объективы уступают зеркальным по величине хроматических aberrаций. Использование линзовых объективов не в значительной степени ухудшает погрешность калибровок из-за хроматических aberrаций. Существенным недостатком линзовых объективов является технологическое ограничение по возможности изготовления объективов более $\varnothing_{\text{св}} 150$ мм. Тогда как для зеркальных систем имеется возможность изготавливать главное зеркало диаметром в несколько метров. Однако этот недостаток может быть частично преодолен тем, что можно проводить калибровку в несколько приёмов. В каждом новом приёме измерений коллиматор будет устанавливаться в разных участках зрачка калибруемого ОЭА. Результаты калибровки каждого из приёмов в процессе обработки будут усредняться.

Светоделителем 5 может выступать полупрозрачная пластина, светоделительный куб или призма с полным внутренним отражением. Светоделительная грань расположена под углом, который определяется углом поворота микрозеркал, к оптической оси цифрового коллиматора. Например, для угла поворота микрозеркал DMD $\alpha = 12^\circ$, светоделительная грань будет располагаться под углом $\gamma = 45^\circ + \alpha = 57^\circ$ к оптической оси коллиматора.

При использовании в качестве светоделителя полупрозрачной пластины в узле реализован компенсатор астигматизма в виде другой полупрозрачной пластины, ориентированной под углом в плоскости перпендикулярной первой пластине. Недостатком использования полупрозрачной пластины является её чувствительность к деформациям из-за крепления, что влияет на качество изображения, в первую очередь может появиться астигматизм. При использовании светоделительного куба данный компенсатор можно не использовать, однако возникает дополнительное поглощение светового потока за счёт большего оптического хода в светоделительном кубе, чем в

полупрозрачной пластине. Также могут появиться паразитные блики на входных и выходных гранях светоделительного куба. Использование призмы с полным внутренним отражением, например [48], является предпочтительным вариантом, поскольку потери света в таком случае минимальны, однако с технологической точки зрения такую призму сложнее изготовить.

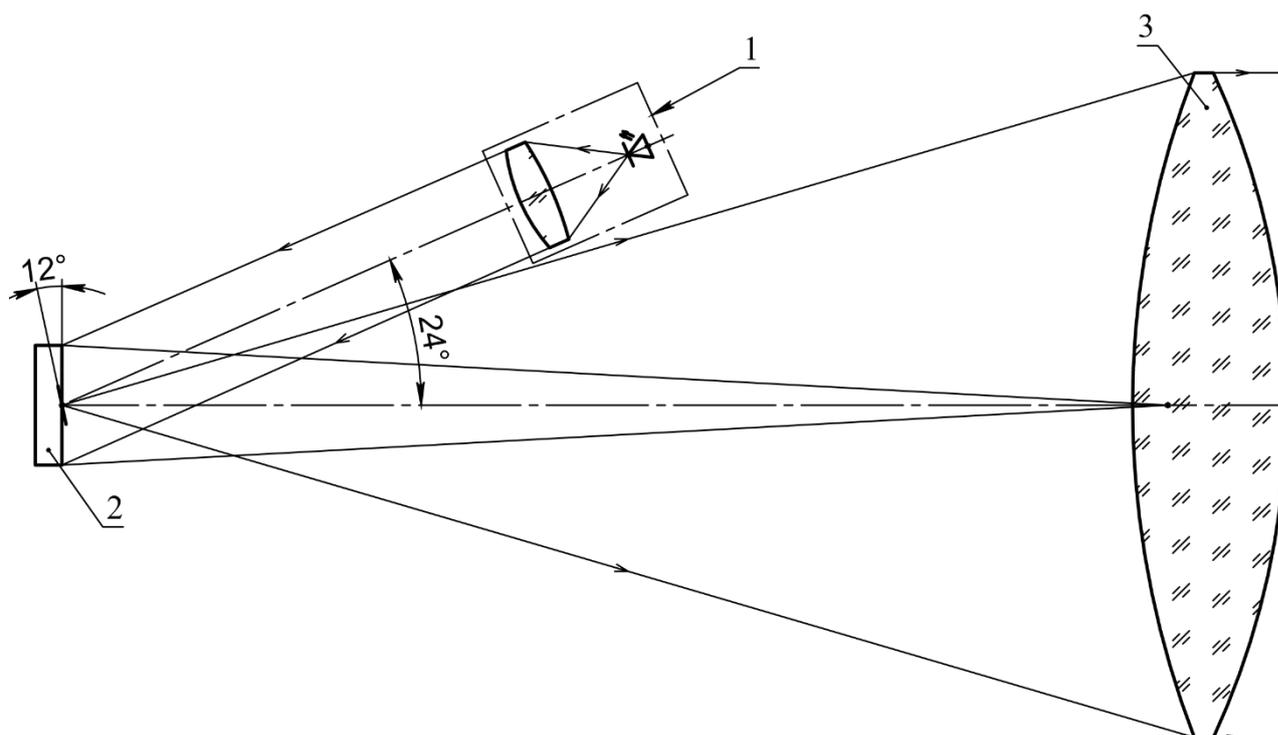
Использование светоделителя позволяет расположить осветительный и проекционный каналы перпендикулярно друг другу. Это упрощает конструктивную реализацию коллиматора, так как без неё необходимо располагать осветительный (до тест-объекта) и проекционный тракты (после тест-объекта) под углом 24° , а также предотвратить их перекрытие. В схеме без светоделителя и передающего объектива (рисунок 2.2), осветитель 1 проецирует изображение источника света во входной зрачок объектива 3.

Чтобы изменить масштаб изображения рисунка тест-объекта, сформировать который не позволяет сам тест-объект из-за минимального размера микроэкрала, используется передающий объектив, изменяющий минимально (максимально) возможное изображение рисунка тест-объекта до требуемой величины. Для формирования элементов изображения рисунка тест-объекта с различным разрешением, передающий объектив должен быть сменным. Передающий объектив 4 (рисунок 2.1) формирует требуемый размер изображения рисунка тест-объекта 2 в задней фокальной плоскости объектива 3, который формирует параллельный пучок лучей. Положение передающего объектива 4 относительно передней фокальной плоскости объектива 3 a' и тест-объекта 2 относительно передающего объектива 4 a определяется линейным увеличением β и задним фокусным расстоянием f' передающего объектива 4

$$a' = (1 - \beta)f'; \quad a = \frac{\beta - 1}{\beta} f. \quad (2.1)$$

Осветитель, передающий объектив и объектив коллиматора рассчитываются таким образом, чтобы они были согласованы по апертуре, либо апертура осветителя рассчитывается с небольшим запасом для облегчения юстировки.

Осветитель, тест-объект, передающий объектив, светоделитель конструктивно можно реализовать в виде единого фокального блока. Фокальный блок можно быстро переустановить в фокальную плоскость других объективов коллиматора с различными фокусными расстояниями, наиболее подходящими под калибруемый ОЭА.



1 – осветитель; 2 – тест-объект; 3 – объектив

Рисунок 2.2 – Вариант коллиматора с ходом главного луча без светоделителя и передающего объектива

Для калибровок ОЭА с большим полем зрения можно перемещать весь коллиматор, либо установить фокальный блок на автоматический высокоточный двухкоординатный стол, например, Aerotech [49, с. 12–15], который может обеспечить погрешность перемещения не более (0,4–1) мкм и диапазон перемещения тест-объекта в фокальной плоскости объектива до 390 мм.

2.2 Методика калибровки коллиматором с цифровым микрзеркальным устройством

Коллиматор устанавливается перед калибруемым ОЭА на минимальном расстоянии. При этом не должно быть срезания выходного зрачка коллиматора, либо оно должно быть минимальным. Оптические оси коллиматора и калибруемого ОЭА визуально выставляются в плоскость горизонта.

Исходя из параметров калибруемого ОЭА (оптических характеристик объектива и размера пикселя фотоприёмника) в специальном программном обеспечении при помощи ПК 9 пользователь задаёт форму, размер и контраст элементов изображения рисунка тест-объекта 2 (рисунок 2.1). Задавать или изменять указанные выше параметры при необходимости можно также в

процессе работы с самим коллиматором. Форма, размер и контраст элементов изображения рисунка тест-объекта 2 определяются положением микрозеркал. Управление положением каждого микрозеркала осуществляется независимо. Если микрозеркало находится в положении «+ α », то падающий на него световой поток, отражаясь, распространяется вдоль оптической оси коллиматора и формирует изображение рисунка тест-объекта 2. В положении «- α » световой поток отражается в сторону. Для задания требуемого контраста изображения рисунка тест-объекта 2, световой поток модулируется микрозеркалами путём задания пользователем частоты их колебаний, то есть перехода микрозеркал из положения «+ α » в «- α » за единицу времени.

Световой поток от осветителя 1 отражается от светоделителя 5 и освещает тест-объект 2, являющийся DMD. Молочное стекло 8 создаёт равномерную засветку всех микрозеркал. Световой поток, отражённый от микрозеркал тест-объекта 2 в положении «+ α », распространяется вдоль оптической оси коллиматора, проходя полупрозрачную пластину 5, попадает в передающий объектив 4. Передающий объектив 4 уменьшает размер элементов изображения рисунка тест-объекта 2 и строит изображение рисунка тест-объекта 2 в передней фокальной плоскости объектива 3, который в свою очередь проецирует это изображение в бесконечность.

Далее изображение рисунка тест-объекта 2 формируется в плоскости фотоприёмника калибруемого ОЭА. По изображению (форме, размеру, положению, контрасту) рисунка тест-объекта 2 в плоскости фотоприёмника калибруют параметры ОЭА.

При необходимости калибровки ОЭА с полем зрения, большим чем поле микрозеркального устройства, фокальный блок перемещается по полю автоматически при помощи двухкоординатного стола.

При необходимости калибровки ОЭА с апертурой большей, чем апертура коллиматора, калибровка производится по нескольким усреднённым приёмам путём установки коллиматора в разных частях апертуры калибруемого ОЭА.

При калибровке ОЭА, состоящих из нескольких разных по оптическим характеристикам оптико-электронных каналов, задавать и изменять форму, размер и контраст элементов изображения рисунка тест-объекта можно непосредственно в процессе работы.

Коллиматор может также использоваться при определении частотно-контрастных характеристик контролируемого ОЭА, поскольку коллиматор позволяет осуществлять в процессе контроля изменение контраста с малым шагом (таблица 1.1). Это позволяет сформировать большое количество значений освещённости, что расширяет его область применения.

Коллиматор можно использовать для проведения калибровок ОЭА в динамическом режиме. Так, например, DMD может имитировать движение подстилающей поверхности ОЭА ДЗЗ. Для этого можно использовать в качестве тест-объекта DLP Discovery 4100 (с DLP 7000) (таблица 2.1), с микроконтроллером, обеспечивающим самую высокую скорость смены кадров из всех DMD [47, с. 1, 20–22].

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики микрозеркального устройства для имитации бега местности подстилающей поверхности ОЭА ДЗЗ

Наименование параметра	Численное значение
Модель микрозеркального устройства	DLP Discovery 4100 (с DLP 7000)
Количество микрозеркал в массиве	1024×768
Размер микрозеркала, мкм	13,68
Частота смены кадров в бинарном режиме (8-бит), Гц	32552 (1900)
Время поворота одной строки микрозеркал, нс	40
Время загрузки данных, мкс	13

Например, для вариантов ОЭА ДЗЗ (таблица 2.2), отличающихся величиной фокусного расстояния (2–15) м и, соответственно, величиной проекции пикселя на Землю (1,75–0,23) м DMD позволяет обеспечить требуемую скорость бега местности с дискретностью, равной количеству микрозеркал DMD, приходящихся на один пиксель ОЭА – (1–10) шт..

Таблица 2.2 – Оценка возможности микрозеркального устройства имитировать бег местности подстилающей поверхности для различных ОЭА ДЗЗ

Наименование параметра	Численное значение			
	2	5	10	15
Фокусное расстояние, м	2	5	10	15
Высота орбиты, км	500	500	500	500
Наклонение орбиты, °	97	97	97	97
Размер пикселя, мкм	7	7	7	7
Проекция пикселя на Землю, м	1,75	0,70	0,35	0,23
Скорость бега местности пересчитанная в фокальную плоскость ОЭА, мм/с	28,5	71,2	142,5	213,7
Максимальное число шагов ВЗН ОЭА, пикселей	128	128	128	128
Количество микрозеркал приходящиеся на один пиксель ОЭА	10	4	2	1
Скорость колебаний проецируемых микрозеркал, мм/с	30,1	75,3	150,6	301,2
Примечания 1 Частота колебаний микрозеркал рассчитывается по формуле, определяемая параметрами DLP Discovery 4100 (с DLP 7000) $1 / (n \cdot 40 \text{ нс} + 13 \text{ мкс})$; где n – количество проецируемых строк микрозеркал. 2 Расчёт произведён для положения ОЭА над экватором. 3 Прецессия Земли пренебрегается.				

Выводы по главе 2

Представлено обоснование входящих в состав коллиматора оптических компонентов. Предложены различные варианты с цифровым микрозеркальным устройством DLP LightCrafter 4500 или DLP Discovery 4100 с DLP 7000. Применение в качестве тест-объекта DMD, подключённого к управляющему персональному компьютеру, позволяет формировать любую форму, размер и контраст элементов изображения рисунка тест-объекта, в том числе изменять их в процессе калибровки ОЭА, снижает продолжительность и трудоёмкость, а также наилучшим образом соответствует решению поставленной задачи.

Вариант коллиматора со светоделителем позволяет расположить осветительный и проекционный каналы перпендикулярно друг другу и обеспечивает компактность конструкции. Вариант коллиматора с оптической системой для формирования требуемого разрешения позволяет расширить диапазон возможных размеров элементов изображения рисунка тест-объекта, получить изображение рисунка тест-объекта требуемого разрешения, соответствующего калибруемому ОЭА. Перемещение всего фокального блока, включающего осветитель, DMD, светоделитель, оптическую систему для формирования требуемого разрешения, на автоматизированном высокоточном двухкоординатном столе позволяет быстро и автоматически контролировать ОЭА с большими полями зрения и имеющими в фокальной плоскости большое количество фотоприёмников.

Показана возможность применения коллиматора и DMD для определения частотно-контрастных характеристик и калибровки ОЭА в динамическом режиме, что необходимо, например для имитации движения подстилающей поверхности ОЭА ДЗЗ [А-5, А-16, А-17].

ГЛАВА 3

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПОГРЕШНОСТЬ КАЛИБРОВКИ, И МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ

3.1 Пространственно-энергетические параметры изображения рисунка тест-объекта

Рассмотрим часто встречающуюся схему в задачах калибровки, контроля и юстировки ОЭА [10; 20, с. 99–103], когда оптическая схема состоит из следующих компонентов:

- калибровочного, в данном качестве выступает коллиматор, включающий проецирующий объектив и эталонный тест-объект, и осветитель для его подсветки;

- калибруемого: ОЭА, включающей изображающую оптическую систему (объектив), фотоприёмник, расположенный в задней фокальной плоскости объектива, и устройство обработки сигнала (рисунок 3.1) [А-4]. Взаимное расположение элементов изображения рисунка тест-объекта является эталоном. В ОЭА фотоприёмник является устройством, которое формирует информационный сигнал и в то же время является измерительной «шкалой», служащей для определения геометрических координат элементов рисунка тест-объекта. Часто элементами изображения рисунка тест-объекта выступает массив кругов с известными расстояниями между их центрами.

Погрешность определения координат и, соответственно, расстояний между элементами изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике калибруемого ОЭА является одним из определяющих факторов величины погрешности калибровки. Для достижения наименьшей величины погрешности калибровки необходимо согласовать компоненты оптической схемы, то есть должен быть согласован размер элемента изображения рисунка тест-объекта, функция рассеяния точки (ФРТ) объектива и размер пикселя фотоприёмника. Чтобы устранить искажения, обусловленные дискретизацией, ФРТ объектива должна быть минимум в два раза больше размера пикселя фотоприёмника (таблица 3.1). Для исследования свойств и величины погрешности определения энергетического центра тяжести элемента изображения рисунка тест-объекта на матричной структуре фотоприёмника была построена математическая модель. Для упрощения расчётов объектив коллиматора выбран таким же, как и объектив ОЭА. В качестве фотоприёмника в модели используются параметры цифровой камеры CV-M2CL, JAI [50, с. 36–37] с панхроматическим ПЗС фотоприёмником KAI-2020 как одной из наиболее распространённых в промышленности [51, с. 5–21].

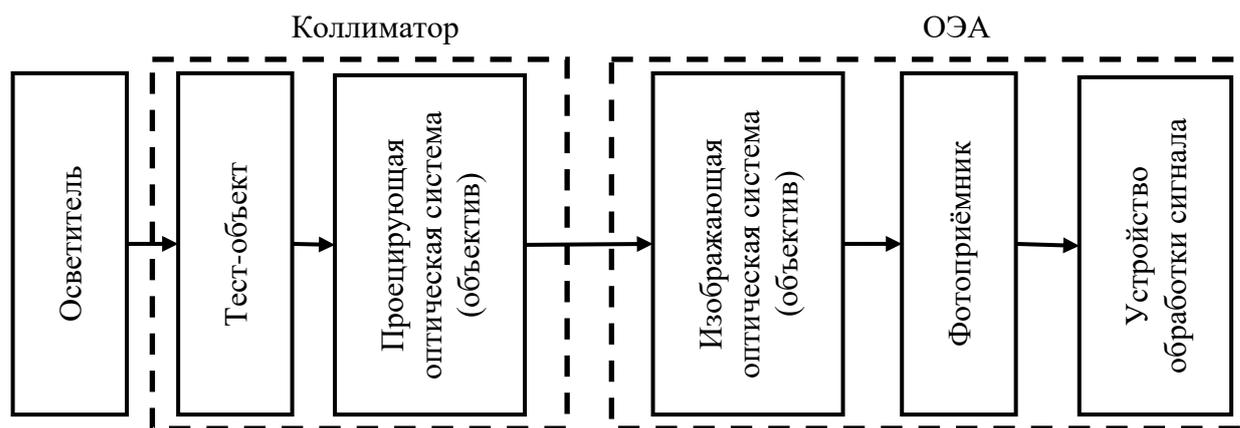


Рисунок 3.1 – Структурная схема калибровки

Таблица 3.1 – Пример соотношений параметров компонентов оптической схемы контроля

Размер элемента изображения рисунка тест-объекта	ФРТ объектива коллиматора	ФРТ объектива ОЭА	Размер пикселя фотоприёмника
Ø37,5 мкм	Ø15 мкм	Ø15 мкм	□7,4 мкм (~ 7,5 мкм)
5 пикселей	2 пикселя	2 пикселя	1 пиксель

В модели использовались следующие параметры объектива: фокусное расстояние $f' = 1500$ мм, диаметр выходного зрачка $D' = 150$ мм. Рисунок тест-объекта описывается функцией $r(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$. Шаг дискретизации (рисунок 3.2), используемый в математической модели, составляет $dx, dy = 2,5$ мкм ($\sim 1/3$ пикселя), меньший шаг дискретизации не приводит к существенному уменьшению погрешности расчёта, при этом значительно увеличивая продолжительность вычислений. Если принять допущение, что в объективе отсутствуют aberrации, то его передаточная функция выражается ФРТ, которая описывается функцией Бесселя 1 рода 1 порядка J_1 [52, с. 544–548]

$$B(r) = \left(\frac{2J_1(m(r))}{m(r)} \right)^2; \quad (3.1)$$

где $m(r) = 2 \cdot \pi \cdot NA' \cdot r / \lambda$;

NA' – числовая апертура объектива в пространстве изображений;

λ – основная длина волны.

Для получения распределения энергии изображения рисунка тест-объекта $E1(r)$, спроецированного коллиматором, необходимо произвести свёртку функции рисунка тест-объекта $T(r)$ и ФРТ объектива

$$E1(r) = B(r) * T(r). \quad (3.2)$$

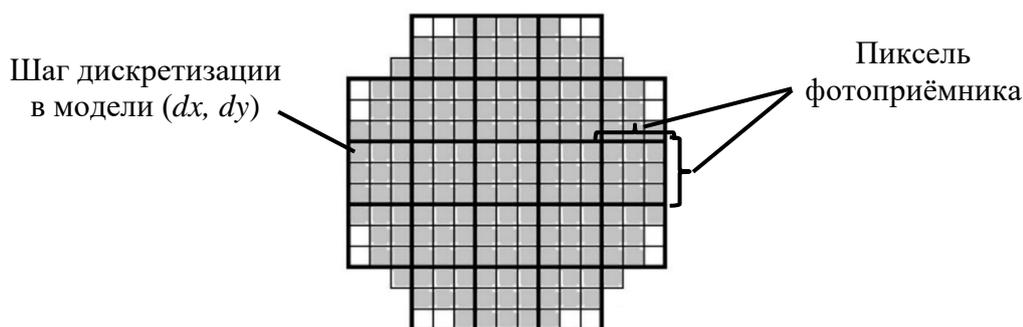


Рисунок 3.2 – Соотношение между размером 5 пикселей круглого элемента изображения рисунка тест-объекта (серая область) и размером пикселя фотоприёмника

Существенными шумами, являются: дробовый шум полезного и темнового сигнала, шум считывания.

Дробовый шум подчиняется распределению Пуассона, в соответствии с которым дисперсия $\sigma_{др}^2$ числа носителей заряда (электронов) равна среднему значению. Носители заряда в фотоприёмнике могут быть сгенерированы и в отсутствии внешней засветки, поэтому различают составляющие дробового шума: шум, создаваемый фотогенерированными зарядами (фотонный), и шум темнового сигнала $n_{темн}$ [53, с. 43–50, 68–71], определяемый

$$n_{темн} = i \cdot t; \quad (3.3)$$

где i , э⁻/с – темновой ток;

t , с – время накопления заряда для фотоприёмника.

Тогда дисперсия дробового шума, являющаяся параметром распределения Пуассона, определяется значением распределения энергии изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике и $E1(r)$ и темновым сигналом $n_{темн}$. С учётом данного параметра Пуассона распределение [54, с. 213–218] энергии на фотоприёмнике с дробовым шумом определяется

$$E_{др}(r) = \frac{\sigma_{др}^2 r}{r!} e^{-\sigma_{др}^2}. \quad (3.4)$$

При численном моделировании отрицательные значения распределения энергии изображения рисунка тест-объекта принимаются равными нулю.

Распределение энергии аналогового изображения рисунка тест-объекта после преобразования цифровой камерой становится дискретным $E2(r)$. С учётом предельной ёмкости фотоприёмника КАИ-2020 [51, с. 5–21] и глубиной цвета 10 бит, шаг квантования составит ~ 40 э⁻.

Для фотоприёмника КАИ-2020 при максимальной частоте считывания 20 МГц среднеквадратическое отклонение шума считывания составляет $\sigma_{сч} = 16$ э⁻ и определяется конструкцией фотоприёмника и схемы усиления.

При условии что шум подчиняется распределения Гаусса и допущении о линейной модели цифровой камеры составляющие шума считывания независимы [55, с. 9–10]. Тогда распределение [54, с. 116–123; 56, с. 31] энергии, вызванной шумом считывания $E_{сч}(r)$ имеет вид

$$E_{сч}(r) = \frac{1}{\sigma_{сч}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(r-\mu)^2}{2\sigma_{сч}^2}}. \quad (3.5)$$

Таким образом, распределение энергии изображения рисунка тест-объекта, преобразованное фотоприёмником с учётом шумов, будет определяться суммой [55, с. 9–10] из-за линейной модели цифровой камеры

$$E3(r) = E2(r) + E_{сч}(r). \quad (3.6)$$

3.1.1 Влияние шумов фотоприёмника на погрешность определения координат

Наличие неравномерного по пространству шума приводит к погрешности определения координат энергетического центра тяжести элемента изображения рисунка тест-объекта. Координаты C_x , C_y в долях пикселя определяются [57, с. 245–250; 58]

$$C_x = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m} \cdot n}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m}}; \quad C_y = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m} \cdot m}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m}}; \quad (3.7)$$

где $I_{n,m}$ – уровень сигнала в пикселе n , m распределения энергии $E3(r)$;

n , m – порядковые номера пикселей по столбцам и строкам фотоприёмника;

N , M – общее число столбцов и строк области вычисления координат центра тяжести (должно быть на ~10 пикселей больше размера элемента изображения рисунка тест-объекта с каждой стороны).

По результатам моделирования установлено, что погрешность определения координат энергетического центра тяжести элемента изображения рисунка тест-объекта, вызванная шумами, составила 0,022 пикселя (σ), для выборки 100 изображений.

Для уменьшения влияния шумов предложено фильтровать сигнал путём введения порога шумов [А-9], значения ниже которого принимаются равными нулю. Рассмотрим суть метода на примере профиля сигнала E (рисунок 3.3) для n столбца фотоприёмника с частью изображения рисунка тест-объекта. Метод заключается в фильтрации зашумленного фонового сигнала: сигнал меньше определённого значения (например $0,2E$) принимается равным величине порога шумов (рисунок 3.4). Величина порога шумов определяется таким образом, чтобы отфильтровать все значения зашумлённого фонового

сигнала в области расчёта. Таким образом, фильтруется не только зашумлённый фоновый сигнал, но и края элемента изображения рисунка тест-объекта, что ведёт к несущественному росту погрешности определения координат энергетического центра тяжести элемента изображения рисунка тест-объекта. Стоит отметить, чтобы метод не вносил значительной погрешности предпочтительней использовать его для симметричного профиля сигнала и рекомендуемого отношения сигнал/шум.

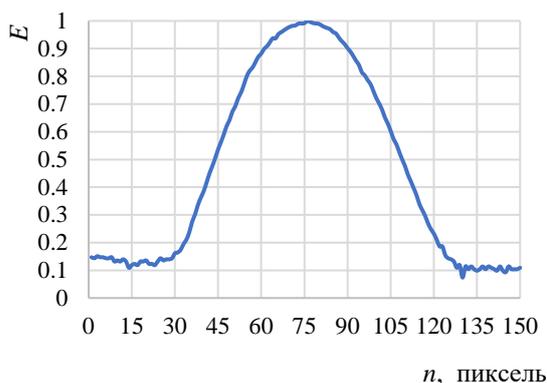


Рисунок 3.3 – Пример профиля сигнала E столбца n фотоприёмника с частью изображения рисунка тест-объекта

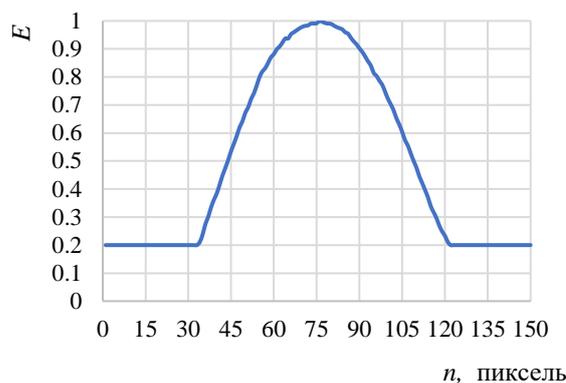


Рисунок 3.4 – Пример отфильтрованного профиля сигнала E столбца n фотоприёмника с частью изображения рисунка тест-объекта

По результатам моделирования определена зависимость между погрешностью определения координат, вызванной шумами фотоприёмника и порога шумов (рисунок 3.5). Использовались значения порога в единицах среднеквадратического отклонения шумов – σ – для цифровой камеры CV-M2CL, JAI. Погрешность определялась для выборки в 100 значений. Существенное улучшение наблюдается для порога в 2σ . Увеличение порога более 3σ не приводит к видимым улучшениям показателей. Для исключения влияния единичных пикселей, значительно отличающихся по уровню сигнала от соседних, или «горячих» пикселей, перед введением порога можно отфильтровать сигнал с помощью фильтра Винера [59, с. 183–186].

Для экспериментальной оценки влияния шумов на погрешность определения координат энергетического центра тяжести элемента изображения рисунка тест-объекта использовались распространённые промышленные цифровые камеры (таблица 3.2). Уровень сигнала составлял 80 % от максимального значения квантования. Из-за присутствия случайных составляющих, в основном шумов, положение элемента изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике не было статичным. Производилась съёмка из серии 100 кадров для каждой цифровой камеры в течении 2 минут, за этот

период фотоприёмник не успевал значительно нагреться. По каждому кадру определялись координаты энергетического центра тяжести элемента изображения рисунка тест-объекта, исключался незначительный тренд и вычислялась погрешность.

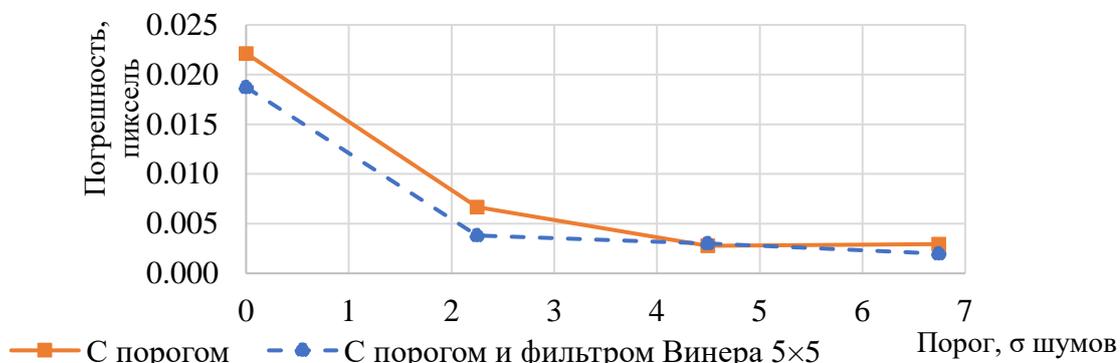


Рисунок 3.5 – Погрешность определения координат центров элементов изображения рисунка тест-объекта для различных значений порога шумов

Таблица 3.2 – Погрешность определения координат энергетического центра тяжести элемента изображения рисунка тест-объекта

Модель камеры	Погрешность, пикселя	
	без обработки	с порогом и фильтром Винера 5x5
CV-M2CL, JAI [50, с. 36–37] с ПЗС KAI-2020	0,038	0,011
Genie HM1400 XDR CR-GM01-H1400, Teledyne DALSA [60, с. 8–16] с КМОП	0,053	0,010

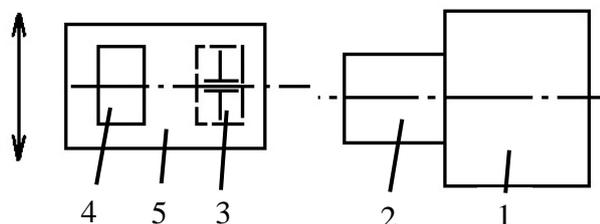
Полученные результаты являются практически идентичными для двух цифровых камер. Описанные методы уменьшения влияния шумов обеспечивают погрешность не более ~0,01 пикселя, уменьшение ~ (3–5) раз.

3.1.2 Влияние уровня сигнала на погрешность определения координат

На погрешность определения энергетического центра тяжести элемента изображения рисунка тест-объекта влияет также уровень сигнала в изображении на фотоприёмнике, калибруемого ОЭА и отношение к величине шумов. Уровень сигнала определяется величиной светового потока осветителя, который формирует изображение рисунка тест-объекта во входном зрачке оптической системы коллиматора, а также срезаются ли зрачки в системе коллиматор–объектив калибруемого ОЭА.

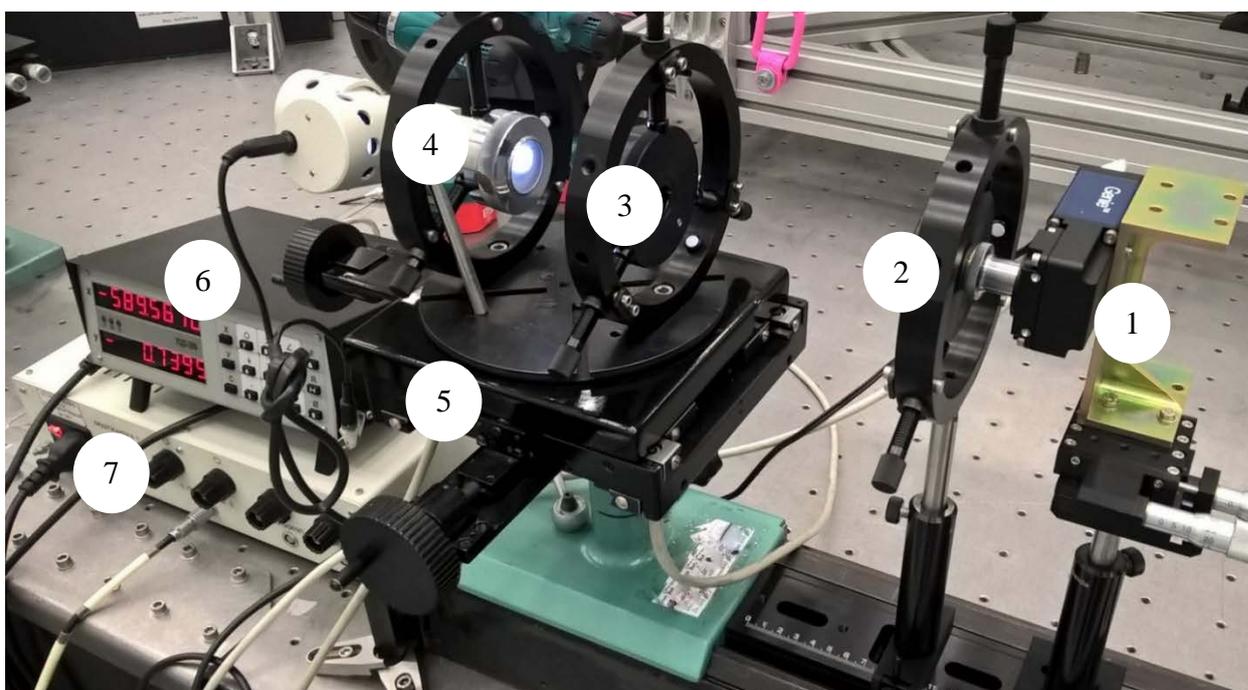
Для определения зависимости использовалась цифровая камера Genie HM1400 XDR CR-GM01-H1400 1 [60, с. 8–16] (рисунок 3.6, рисунок 3.7). Для фокусирования изображения в плоскости фотоприёмника цифровой камеры использовался микрообъектив 2 с 10^{\times} увеличением. В качестве тест-объекта

выступала диафрагма 3 диаметром 2 мм, что эквивалентно 25 пикселям фотоприёмника цифровой камеры, подсвечиваемая с противоположной стороны осветителем 4. Диафрагма 3 и осветитель 4 устанавливались на стол 5 с высокоточным микрометрическим отсчётным механизмом (из состава скамьи оптической ОСК-2ЦЛ).



1 – цифровая камера, 2 – микрообъектив, 3 – диафрагма, 4 – осветитель,
5 – стол с микрометрическим отсчётом

Рисунок 3.6 – Схема оценки влияния уровня сигнала в изображении рисунка тест-объекта на погрешность определения координат энергетического центра тяжести



1 – цифровая камера Genie HM1400 XDR CR-GM01-H1400;
2 – микрообъектив, 3 – диафрагма, 4 – осветитель, 5 – столик с микрометрическим отсчётом, 6 – устройство цифровое отсчётное УЦО-2,
7 – блок питания осветителя и цифровой камеры

Рисунок 3.7 – Схема оценки влияния отношения сигнал/шум на величину погрешности определения энергетического центра тяжести элемента рисунка изображения тест-объекта

Координаты энергетического центра тяжести изображения рисунка тест-объекта, вычисленные по распределению сигнала на фотоприёмнике, сравнивались с величиной перемещения стола 5. Погрешность отсчёта стола 5 в пределах перемещения 2 мм составляет не более 0,5 мкм. Микрообъектив 2 установлен таким образом, чтобы формировать уменьшенное изображение диафрагмы 3, поэтому, учитывая линейное увеличение объектива, в поле зрения которого перемещается диафрагма 3, установленная на столе 5, погрешность отсчёта перемещения составит 0,05 мкм.

Описание методики измерений:

1 Изображение диафрагмы 3 фокусируется в плоскость фотоприёмника подвижкой микрообъектива 2 и цифровой камеры 1 вдоль оптической оси.

2 Плоскости перемещения стола 5, диафрагмы 3, и фотоприёмник цифровой камеры 1 выставляются параллельно друг другу поворотом микрообъектива 2 и цифровой камеры 1 вокруг осей перпендикулярных оптической оси, добиваются, чтобы изображение диафрагмы 3 было круглым, а при перемещении стола не происходила расфокусировка.

3 Строки пикселей фотоприёмника цифровой камеры 1 выставляются параллельно перемещению платформы стола 5 поворотом цифровой камеры 1 вокруг оптической оси.

4 Устанавливают уровень сигнала изображения рисунка диафрагмы 3 на фотоприёмнике цифровой камеры 1 (80–90) % от максимального значения квантования регулировкой силы тока питания осветителя 4.

5 Цифровая камера 1 прогревается в течение (1,5–2) ч.

6 Производится съёмка 100 кадров.

7 Рассчитывается и усредняется по серии кадров энергетический центр тяжести изображения диафрагмы 3 по столбцам $x1$ (таблица 3.3).

8 Изображение диафрагмы перемещается на ~2 мм в поперечной плоскости перемещением платформы стола 5, на которой установлены диафрагма 3 и осветитель 4, снимается отсчёт величины перемещения стола 5 $x_{ст}$

9 Производится съёмка 100 кадров.

10 Рассчитывается и усредняется по серии кадров энергетический центр тяжести изображения диафрагмы 3 по столбцам $x2$.

11 Вычисляется величина перемещения изображения диафрагмы 3 как разница координат $x1$, $x2$ с учётом размера пикселя цифровой камеры 1.

12 Уточняется увеличение микрообъектива 2 как отношение между величиной перемещения $x_{ст}$ стола 5 и величиной перемещения изображения диафрагмы 3 по фотоприёмнику

$$\beta = \frac{x_{cm}}{(x1 - x2) \cdot p} = \frac{2000}{187,701} = 10,655^{\times}; \quad (3.8)$$

где p – размер пикселя фотоприёмника.

13 Для определения влияния величины уровня сигнала на погрешность определения координат энергетического центра тяжести производятся измерения аналогично (4–11) для различных величин уровня сигнала изображения диафрагмы 3.

14 Пересчитывается величина перемещения стола 5 с учётом уточнённого увеличения микрообъектива 2 в плоскость фотоприёмника $x_{cm}\Phi\Pi_i$

$$x_{cm}\Phi\Pi_i = \frac{x_{cmi}}{\beta} = \frac{-787}{10,655} = -73,862 \text{ мкм}. \quad (3.9)$$

15 Вычисляется погрешность определения координат энергетического центра тяжести как разность между отсчётами по столу 5 и по координатам с фотоприёмника

$$\Delta x_i = x_{cm}\Phi\Pi_i - (x1_i - x2_i) \cdot p, \text{ мкм}. \quad (3.10)$$

Таблица 3.3 – Результаты измерений для определения влияния уровня сигнала на погрешность определения координат энергетического центра тяжести

Нормированные значения сигнала в пикселе фотоприёмника от величины максимального значения квантования	Расстояние по отсчётам стола	Координаты энергетического центра тяжести изображения диафрагмы на фотоприёмнике в двух положениях		Отношение сигнал/шум
		$x1_i$, пиксель	$x2_i$, пиксель	
E_i , %	x_{cmi} , мкм	$x1_i$, пиксель	$x2_i$, пиксель	SNR
9	787	215,972	206,056	8
12	787	216,011	206,050	10
40	787	216,430	206,449	30
65	787	216,506	206,516	55
95	787	216,549	206,559	90
110	787	216,472	206,483	–
95 (для определения линейного увеличения объектива)	2000	198,523	173,158	90

По результатам измерений (таблица 3.3 и рисунок 3.8) рассчитывалось отношение сигнал/шум как отношение среднего уровня сигнала и σ в центре изображения диафрагмы $SNR = \overline{I_{n,m}} / \sigma_{I_{n,m}}$. Для наименьшей погрешности определения координат энергетического центра тяжести изображения диафрагмы необходимо, чтобы сигнал был более ~30 % от максимального

значения квантования фотоприёмника. Превышение сигнала величины максимального значения квантования фотоприёмника (засветка) приводит к увеличению размера изображения, но не влияет на погрешность. Для случая, когда нет возможности увеличить уровень сигнала в изображении, при расчёте координат энергетического центра тяжести, можно присвоить значению сигнала квадратичные весовые коэффициенты ($w = 2$)

$$C_x = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (I_{n,m})^w \cdot n}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (I_{n,m})^w}; C_y = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (I_{n,m})^w \cdot m}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (I_{n,m})^w}. \quad (3.11)$$

Таким образом, повышается резкость края изображения. Исходя из величин погрешностей определения координат энергетического центра тяжести изображения диафрагмы с квадратичными весовыми коэффициентами сигнала (рисунок 3.8 (пунктирная кривая)) достаточен уровень сигнала более ~12 % максимального значения квантования фотоприёмника. Весовой коэффициент $w = 2$ обеспечивает меньшую погрешность определения координат энергетического центра тяжести для большинства вариантов распределения сигнала в изображении по сравнению с вариантами $w = 1, 1, 1, 4; 2, 5; 3; 4$.

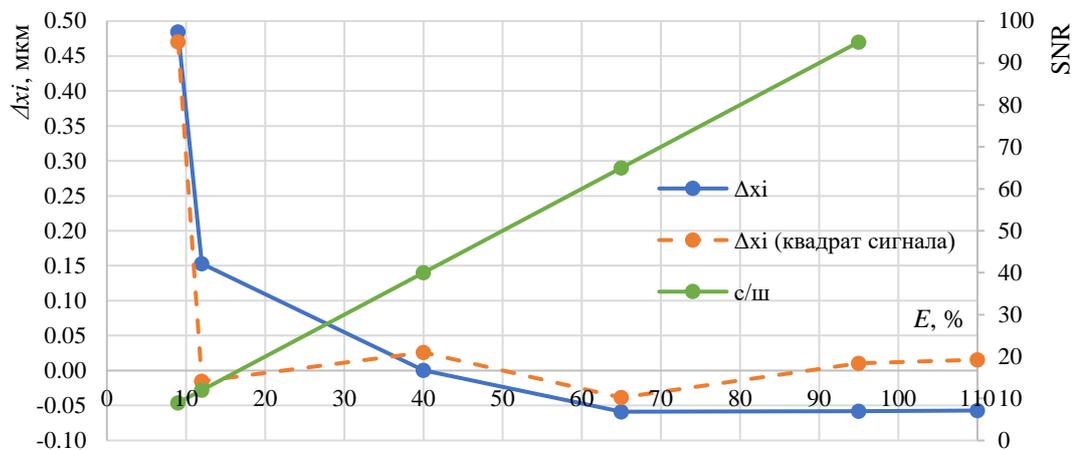


Рисунок 3.8 – Зависимость погрешности определения координат энергетического центра тяжести изображения от уровня сигнала от максимального значения квантования фотоприёмника

3.1.3 Влияние размера элемента изображения рисунка тест-объекта на погрешность определения координат

С помощью формул (3.11) производится непосредственно оценка координат элемента изображения рисунка тест-объекта, а также осуществляется интерполяция результатов измерений дискретной матричной структурой фотоприёмника на внутренние точки интервалов дискретизации (пиксели). С помощью формул (3.11) можно оценить координаты элемента

изображения рисунка тест-объекта с погрешностью меньшей, чем интервал дискретизации фотоприёмника, то есть на субпиксельном уровне. Погрешность определения по формулам (3.11) имеет две составляющие: интерполяционную и флуктуационную (шумовую) [61, с. 183–194].

Интерполяционная зависит от положения центра элемента изображения рисунка тест-объекта относительно центра пикселя, представляет собой отклонение математического ожидания оценки от истинного значения координаты и является систематической при заданных форме распределения и шаге дискретности матричной структуры фотоприёмника. Погрешность интерполяции тем меньше, чем меньше шаг дискретности фотоприёмника.

Флуктуационная (шумовая) порождается, в основном, дробовым шумом наблюдаемого поля и характеризуется среднеквадратическим отклонением оценки от его среднего значения. Снизить данную погрешность можно путём уменьшения размера элемента изображения рисунка тест-объекта при сохранении общей энергии сигнала в изображении рисунка тест-объекта. Это приводит к увеличению резкости края элемента изображения рисунка тест-объекта. Если размер элемента рисунка тест-объекта становится сопоставимым по размерам с пикселем, то большинство энергии сигнала концентрируется на одном пикселе, что приводит к увеличению погрешности [61, с. 183–194]. Другим способом уменьшения погрешности является уменьшение размера пикселя при сохранении размера элемента изображения рисунка тест-объекта.

Необходимо определить размер элемента изображения рисунка тест-объекта, который в рассматриваемой оптической схеме калибровки (рисунок 3.1) будет вызывать меньшую погрешность определения координат энергетического центра тяжести, определяемую дискретностью фотоприёмника калибруемого ОЭА.

Чтобы определить величину интерполяционной погрешности, производилось смещение элемента изображения рисунка тест-объекта относительно матричной структуры фотоприёмника. Погрешность при смещении по одной координате имеет периодический характер, описываемый синусоидальной функцией [62, А-7], с периодом 1 пиксель. При смещении элемента изображения рисунка тест-объекта на величину 0,25 пикселя и 0,75 пикселя относительно первоначального положения, погрешность будет максимальной, а при смещении на 0,5 пикселя либо 1 пиксель относительно первоначального положения, погрешность равняется нулю (рисунок 3.9). Однако, погрешность также носит случайный характер, поскольку неизвестно первоначальное расположение изображения рисунка тест-объекта относительно матричной структуры фотоприёмника, и – кроме как при математическом моделировании – невозможно предварительно её исключить,

поэтому стоит задача в её исследовании, поиске сбалансированного размера элемента изображения рисунка тест-объекта, других методов математической обработки для уменьшения погрешности.

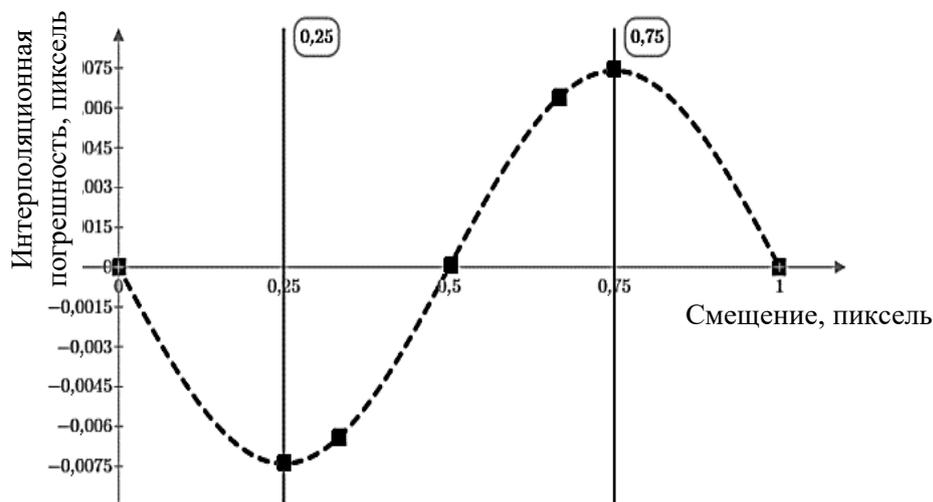


Рисунок 3.9 – Интерполяционная погрешность в зависимости от смещения элемента изображения рисунка тест-объекта относительно матричной структуры фотоприёмника

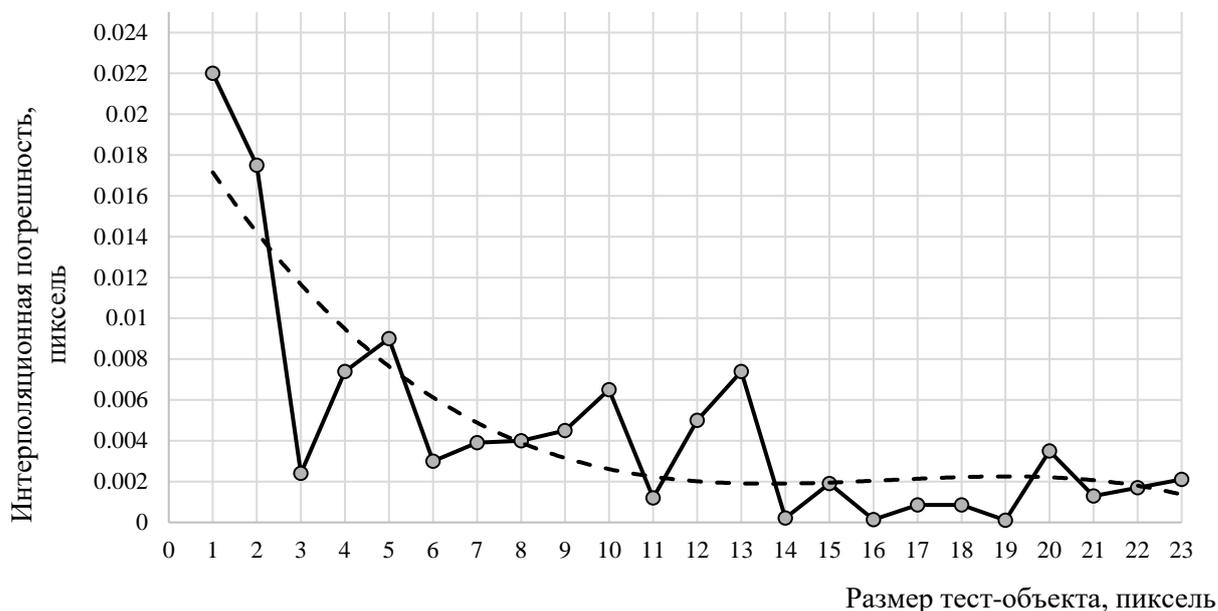


Рисунок 3.10 – Интерполяционная погрешность для элементов изображения рисунка тест-объекта различных размеров

Для определения сбалансированного размера элемента изображения рисунка тест-объекта смоделированы элементы изображения рисунка тест-объекта различных диаметров. По результатам моделирования определена интерполяционная погрешность с различными размерами элементов изображения рисунка тест-объекта (рисунок 3.10) [А-1, А-7]. Из анализа

полученных результатов видно, что к наименьшей интерполяционной погрешности не более 0,01 пикселя приводят элементы изображений рисунка тест-объекта размером более 3 пикселей.

На полученную величину погрешности влияет не только размер элемента изображения рисунка тест-объекта. Изображение точки из-за дифракции представляет собой центральный круг, в котором сосредоточена основная энергия и концентрическое кольцо с значительно меньшей энергией. Наличие кольца влияет на величину погрешности из-за малого порядка самой погрешности, поскольку при расчёте учитывается не только положение круга в центре относительно матричной структуры фотоприёмника, но и кольца. Это приводит к резким перепадам величины погрешности при увеличении размера рисунка тест-объекта. Несмотря на это сохраняется общий тренд: с увеличением размера элемента изображения рисунка тест-объекта величина погрешности уменьшается.

Стоит отметить, что из-за дифракции, после преобразования оптическими системами, размер элемента изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике размывается и становится больше, например, для элементов рисунка тест-объекта размером 5 пикселей его изображение на фотоприёмнике становится равным ~ 7 пикселям, несмотря на то что основная энергия в изображении сосредоточена в пределах 5 пикселей.

Уменьшение погрешности с увеличением размера элемента изображения рисунка тест-объекта связано с тем, что определение координат энергетического центра тяжести происходит по большему количеству пикселей фотоприёмника. Однако меньший размер позволяет более эффективно использовать поле зрения, калибруемого ОЭА, поскольку возникает необходимость калибровки ОЭА с фотоприёмниками, например, для ДЗЗ работающих в режиме ВЗН, вытянутыми вдоль одной стороны, в то время как размер короткой стороны может быть порядка (10–100) пикселей. Также в некоторых случаях, например, в системах оптико-электронной пеленгации, не всегда удаётся обрабатывать изображение больших размеров.

3.2 Алгоритм и математическая модель поиска центров элементов изображения рисунка тест-объекта

В основе математической обработки данных в автоколлиматорах [А-6], звёздных датчиках [63], датчиках Шака-Гартмана [64], схемах калибровки ОЭА [21], различных следящих систем лежит определение координат изображения, спроецированного на фотоприёмник ОЭА. Для уменьшения погрешности измерений необходимо исследовать влияние различных параметров на погрешность определения координат изображения. В (3.1) и

работе [А-4] был исследован алгоритм и методы уменьшения погрешности определения координат изображения по энергетическому центру тяжести. Авторами в работе [65] для калибровки цифровой камеры предложено предварительно определять контур проецируемого массива кругов, а в последующем определять их центры. Рассмотрим погрешность алгоритма определения координат, заключающегося в определении контура изображения в виде окружности, аппроксимации данного контура и нахождении его центра, который в свою очередь совпадает с центром изображения. Определение контура выполнялось при помощи операторов Собела, Прюитт, Робертса, лапласиан гауссиана, Канни. Данные операторы наиболее часто используются в задачах цифровой обработки изображений для обнаружения границ по разрыву яркости [59, с. 401–410]. Также рассмотрен алгоритм определения координат по кросскорреляции [59, с. 508–510; 66].

3.2.1 Описание математической модели

В основе исследований заложена математическая модель схемы контроля, которая описана в (3.1) и работе [А-4]. Объектив коллиматора проецирует рисунок тест-объекта в виде круга на фотоприёмник ОЭА. Для упрощения модели объективы коллиматора и ОЭА являются идентичными, с фокусным расстоянием 1000 мм. Длина волны подсветки тест-объекта коллиматора – 0,6 мкм. Расчёт производился для рисунков тест-объектов следующих размеров 5, 10, 20, 30, 40, 50 пикселей фотоприёмника. Размер пикселя фотоприёмника 5,5 мкм распространённой промышленной цифровой камеры Basler ace acA2040-90 um (КМОП фотоприёмник CMOSIS CMV4000) [67, с. 7–40]. Шаг дискретизации в модели 0,9 мкм, таким образом, на один пиксель фотоприёмника приходится 5×5 элементов модели. Поскольку основная цель исследования состоит в оценке погрешности и сравнении алгоритмов определения координат центров изображений, не учитывались: температурное смещение элементов фотоприёмника; aberrации.

Смоделированный рисунок тест-объекта проецируется объективом коллиматора в ОЭА, объектив которого формирует изображение на фотоприёмнике. В модели данные явления математически описаны операцией свёртки функции, задающей изображение рисунка тест-объекта, и ФРТ объектива с наименьшим диаметром ФРТ.

В модели учитывались следующие шумы, характерные для промышленных цифровых камер: дробовый полезного сигнала (фотонный) и дробовый темнового сигнала, считывания и пространственная неоднородность элементов фотоприёмника. Дробовый шум описывается распределением Пуассона. Шум считывания – распределением Гаусса с $\sigma_{сч} = 15 e^-$. Темновой сигнал – $15 e^-$. Также учитывается квантование

фотоприёмником изображения рисунка тест-объекта. Шаг кантования – 10 бит.

Для снижения влияния шумов применялся фильтр Винера размером 5×5 пикселя, а также вводился порог, значения яркости ниже которого принимались равными нулю. Величина порога была в 10 раз больше среднего значения фоновой яркости. Размер фильтра и величина порога определялись для достижения достоверного вычисления контуров, то есть при данных значениях определяется только один замкнутый контур, например, круга изображения рисунка тест-объекта. Помимо этого, данные меры уменьшают погрешность расчёта центра круга изображения рисунка тест-объекта по энергетическому центру тяжести.

Выполнялось смещение изображения рисунка тест-объекта относительно матричной структуры фотоприёмника. Оценивалась погрешность смещения, которая будет основным критерием сравнения алгоритмов определения центра изображения.

3.2.2 Описание алгоритмов

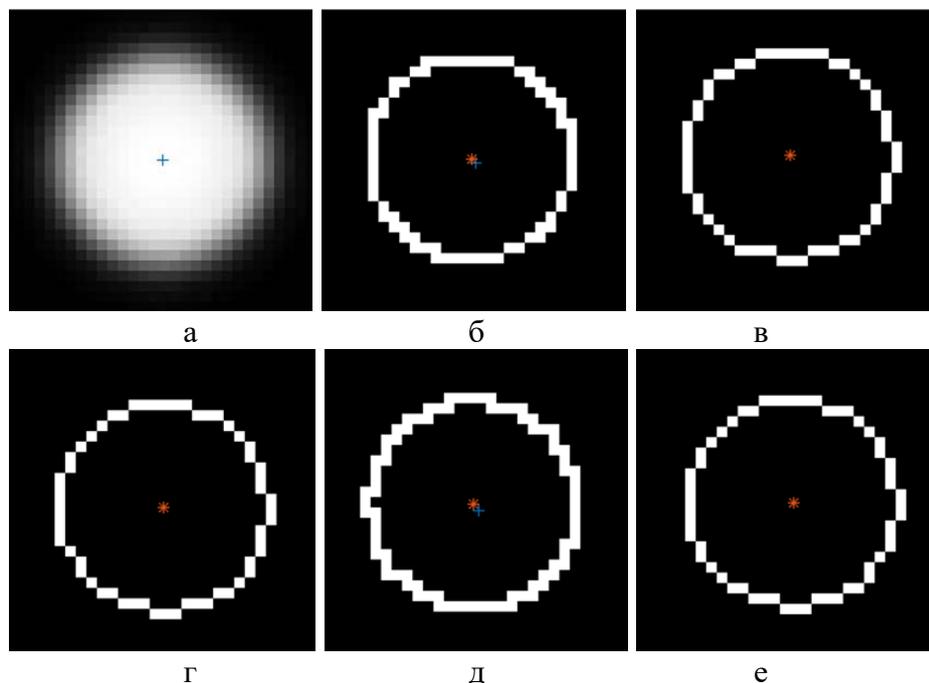
3.2.2.1 По центру тяжести

Определение координат по центру тяжести осуществляется по формулам (3.11).

3.2.2.2 По контуру

Алгоритм определения координат по контуру заключается в определении контура изображения и аппроксимации полученного контура геометрической фигурой с известными параметрами (координаты центра, радиус). Исследовалось изображение рисунка тест-объекта на фотоприёмнике в двумерном представлении в виде круга, тогда его контуром будет являться окружность, а центр окружности будет являться центром изображения на фотоприёмнике. Определение контура заключается в обработке изображения с фотоприёмника скользящим оператором, что осуществляется путём операции свёртки. От оператора и будет зависеть форма и достоверность контура. Оператор Собела, Прюитт и Робертса использует фильтры для численного приближения производных [59, с. 401–410] по строкам и столбцам. Лапласиан гауссиана обнаруживает края, выполняя поиск пересечений нулевого уровня сигнала в пикселе после фильтрации. При использовании оператора Канни [68] изображение первоначально сглаживается гауссовым фильтром для уменьшения шума. В каждой точке вычисляется градиент и направление края. Точки перепада определяются как точки локального максимума градиента. Алгоритм отслеживает этот максимум и присваивает точкам вне максимума нулевые значения. Результатом является контур.

Данный контур подвергается двухпороговой обработке, в результате добавляются дополнительные точки для формирования плавного контура. Результатом обработки изображения рисунка тест-объекта (рисунок 3.11 а) будут являться логические массивы данных («0» и «1») (рисунок 3.11 б–е).



а – изображение рисунка тест-объекта на фотоприёмнике,
 б – результат обработки оператором Канны,
 в – результат обработки оператором лапласиан гауссиана,
 г – результат обработки оператором Прюитт,
 д – результат обработки оператором Робертса,
 е – результат обработки оператором Собела

Рисунок 3.11 – Представление изображения рисунка тест-объекта с указанием центра

Массивы данных контуров, полученные при помощи применения разных операторов, аппроксимируются окружностью, чтобы затем определить её центр. Аппроксимация является минимизацией следующей суммы квадратов

$$J = \sum_{i=1}^N w_i ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - R^2)^2; \quad (3.12)$$

где суммирование ведётся по всем контурным элементам x_i, y_i с учётом их весов w_i для $i = 1 \dots n$ путём дифференцирования J по x_0, y_0 и R [69]. Тогда x_0, y_0 и R определяются

$$x_0 = \frac{ByCx - BxCy}{AxBy - AyBx}; y_0 = \frac{AyCx - AxCy}{AyBx - AxBy};$$

$$R^2 = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2)^2 \quad (3.13)$$

где

$$W = \sum_{i=1}^N w_i; \bar{x} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i x_i; \bar{y} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i y_i;$$

$$Ax = \sum_{i=1}^N w_i (x_i - \bar{x}) x_i; Bx = \sum_{i=1}^N w_i (x_i - \bar{x}) y_i; Cx = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_i (x_i - \bar{x}) (x_i^2 + y_i^2);$$

$$Ay = \sum_{i=1}^N w_i (y_i - \bar{y}) x_i; By = \sum_{i=1}^N w_i (y_i - \bar{y}) y_i; Cy = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_i (y_i - \bar{y}) (x_i^2 + y_i^2).$$

Вычисляются для каждого элемента контура веса w_i . В первоначальной итерации веса всех элементов контура будут равны 1. Затем все контурные точки повторно оцениваются в зависимости от их отклонения от аппроксимированной окружности, и вычисление x_0 , y_0 и R повторяется. Наиболее естественным выбором для весов является обратное квадрату расстояние от отдельных элементов контура x_i , y_i к ранее определённой окружности, то есть $w_i = 1/d^2$, где $d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - R$ – невязки. Помимо этого, исключаются элементы массива, которые явно не относятся к истинной окружности. Веса определяются

$$w_i = 1 - d_i/(2\sigma) \text{ для } |d_i| < 2\sigma; \text{ иначе } 0 \quad (3.14)$$

где СКО

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \frac{d_i^2}{(n-1)}. \quad (3.15)$$

Процедура определения весов и пересчёта параметров аппроксимирующей окружности выполняется итерационно. Критерием остановки итераций является прекращение уменьшения σ^2 . Обычно необходимо выполнить три итерации. Центр окружности будет являться центром изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике.

3.2.2.3 По кросскорреляции

При наличии на фотоприёмнике некоего паразитного изображения

метод определения координат изображения по энергетическому центру тяжести не будет работать. В таком случае можно использовать кросскорреляционный алгоритм.

Формирование шаблона осуществлялось по серии 100 изображений. Изображения отличаются за счёт случайного характера шумов. Шаблон формировался путём усреднения значений интенсивности в каждом пикселе, с минимизированным влиянием на него шумов.

Нормализованная кросскорреляция $\gamma(u, v)$ [66; 70, с.316–317] вычисляется между шаблоном t и изображением $f(x, y)$ с фотоприёмника ОЭА

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} (f(x, y) - \bar{f}_{u,v}) (t(x - u, y - v) - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{x,y} (f(x, y) - \bar{f}_{u,v})^2 \sum_{x,y} (t(x - u, y - v) - \bar{t})^2}} \quad (3.16)$$

где \bar{t} – среднее значение сигнала изображения шаблона;

$\bar{f}_{u,v}$ – среднее значение сигнала изображения $f(x, y)$ в области с шаблоном.

3.2.3 Сравнение алгоритмов

Численные исследования проводились на разработанной математической модели. Произведён расчёт погрешности определения координат центра тяжести различными алгоритмами для рисунков тест-объекта следующих размеров: 5, 10, 20, 30, 40, 50 пикселей фотоприёмника, а также значений отношения сигнал/шум: 200, 100, 70, 20, 10. Расчёт производился для выборки, состоящей из 100 изображений, для каждого размера тест-объекта. Изображения отличались друг от друга из-за случайного характера шумов фотоприёмника. По каждому изображению определялся центр тяжести. Задавалось смещение изображения рисунка тест-объекта на 0,25 пикселей по одному из направлений, например, по столбцам, и вычислялась погрешность как разница между заданным и фактическим смещением изображения рисунка тест-объекта относительно матричной структуры фотоприёмника. Затем значения погрешности усреднялись по всей выборке с учётом весов.

Уступают контурные алгоритмы по величине вычислительных мощностей (таблица 3.4), на каждый из которых необходимо – по сравнению с энергетическим – затратить больше времени, это обусловлено необходимостью выполнения дополнительной операции по аппроксимации окружностью и проведением нескольких итераций во время расчёта. Кросскорреляционный алгоритм по сравнению с контурными требует больше вычислительных мощностей. Относительные значения необходимых вычислительных мощностей определялись средствами стандартного

математического пакета по затрачиваемому времени вычислений на каждый алгоритм.

Таблица 3.4 – Сравнение алгоритмов по величине вычислительных мощностей

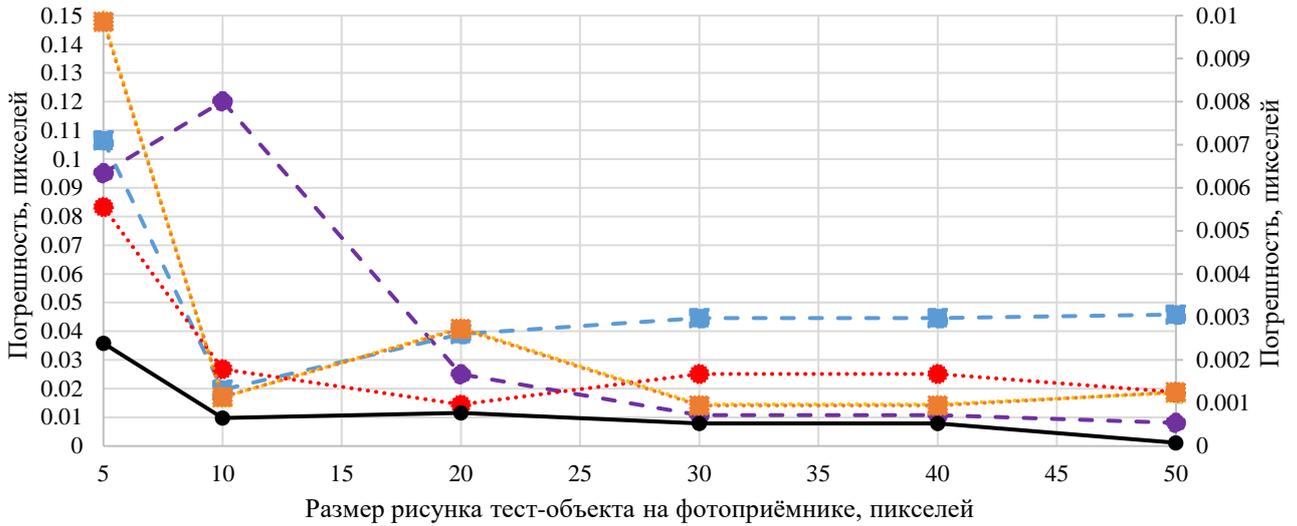
Энергетический	Контурные					Кросскорреляционный
	Канни	Лапласиан гауссиана	Прюитт	Робертс	Собел	
x	$14,4x$	$14,1x$	$12,5x$	$12,5x$	$12,2x$	$18x$

Получены средневзвешенные результаты зависимости погрешности определения центра изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике от размера рисунка тест-объекта для различных алгоритмов (рисунок 3.12 [А-2] и рисунок 3.13 [А-13]). Погрешность определения координат по энергетическому центру тяжести превосходит контурные алгоритмы для всех рассмотренных размеров рисунка тест-объекта и отношения сигнал/шум примерно на порядок. С увеличением отношения сигнал/шум уменьшается погрешность определения координат на (0,5–1) порядок. Уменьшение погрешности с увеличением размера рисунка тест-объекта наиболее характерно для больших отношений сигнал/шум: 70 и более. В этом случае для оператора Канни характерное уменьшение погрешности заметно для рисунков тест-объектов размером 20 пикселей и более, для остальных – 10 пикселей и более.

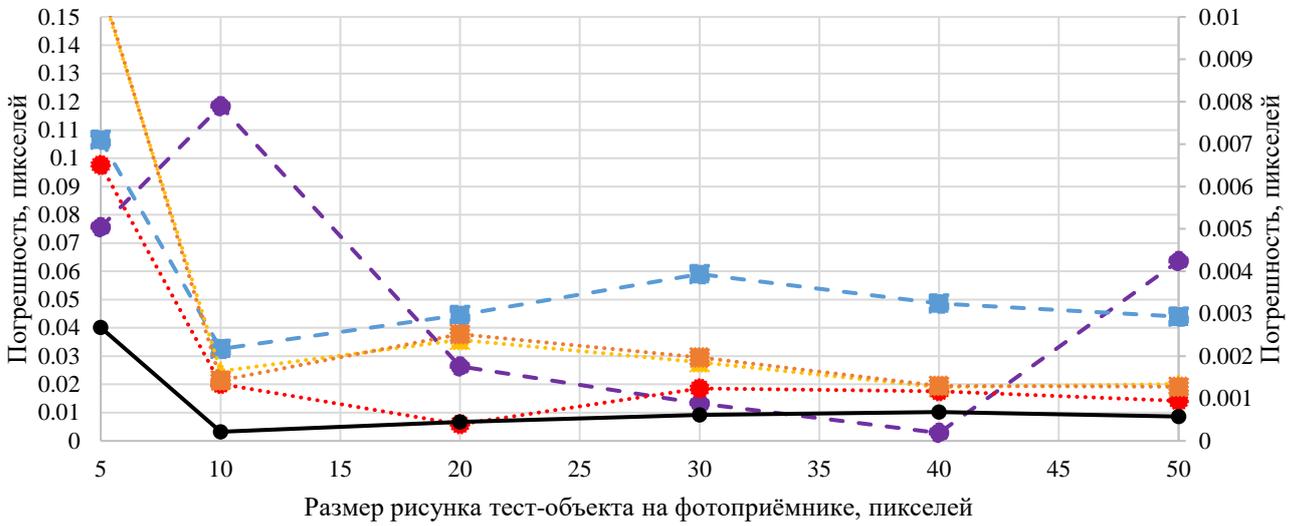
Погрешность определения координат по энергетическому центру тяжести превосходит погрешность кросскорреляционного алгоритма. Для отношения сигнал/шум более 20 и для размера рисунка тест-объекта менее 30 пикселей погрешность кросскорреляционного алгоритма сравнима с погрешностью алгоритма по центру тяжести.

Кросскорреляционный алгоритм при наличии на фотоприёмнике паразитных изображений позволяет находить полезное изображение лучше, чем контурные алгоритмы, тогда как как у контурных может быть наличие ложных определений полезного изображения.

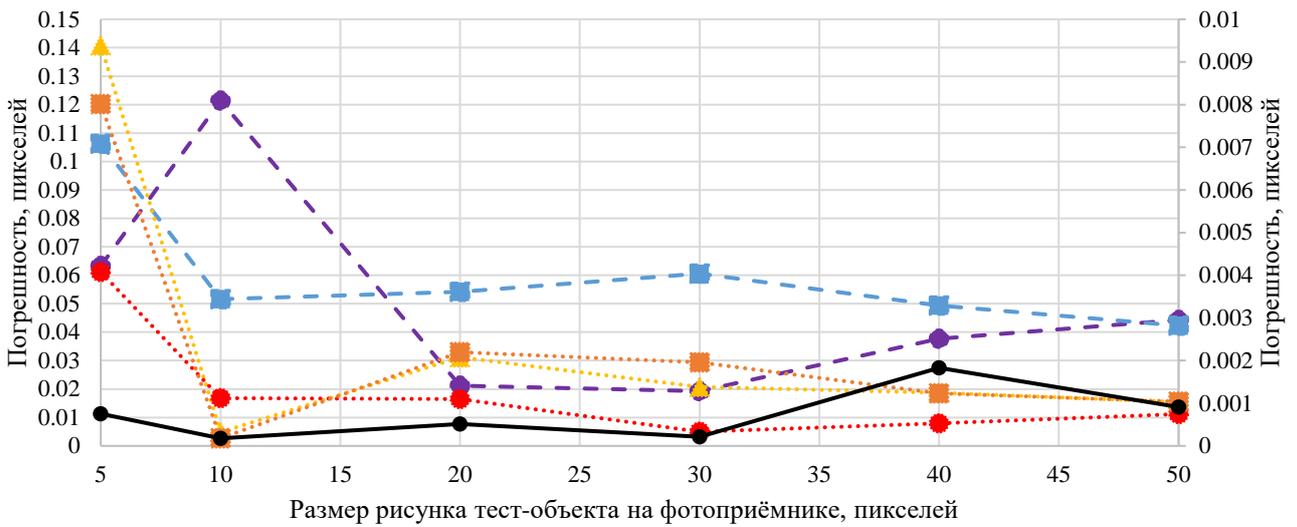
Контурные и кросскорреляционный алгоритмы можно использовать для предварительного автоматического поиска области с изображением элемента рисунка тест-объекта. Поскольку предварительно известна форма, размер и период расположения изображений элементов рисунка тест-объекта, можно исключить ошибочные обнаружения, например из-за пыли или посторонней засветке на фотоприёмнике. Таким образом обеспечивается автоматизация поиска центров элементов рисунка тест-объекта. В зависимости от субъективности оператора, выполняющего действия в ручном режиме сокращение времени может составить от 20 до 100 раз.



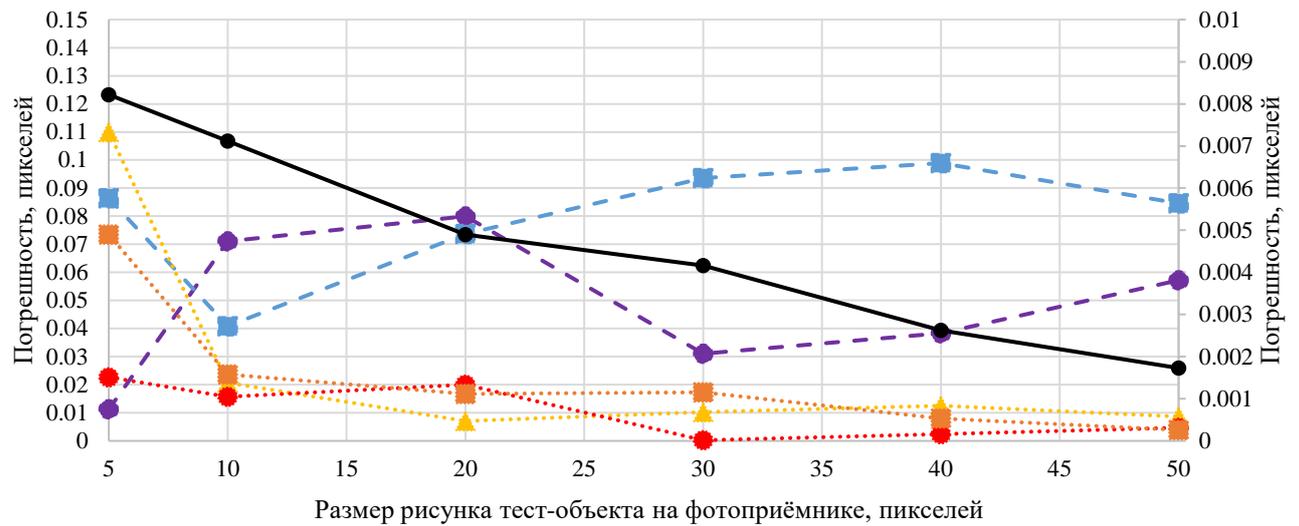
а – отношение сигнал/шум 200



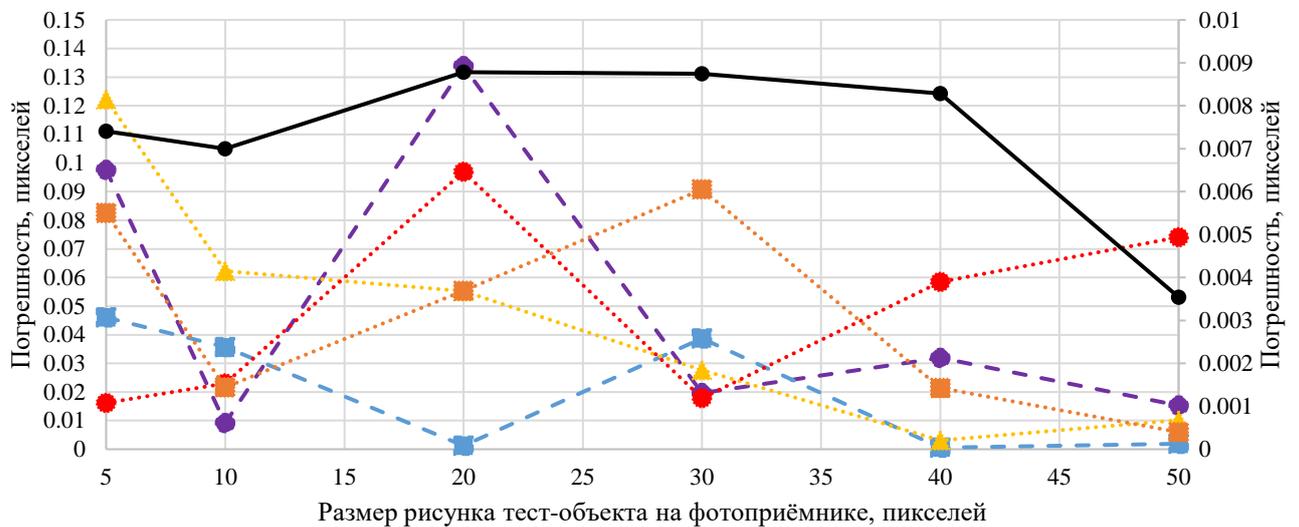
б – отношение сигнал/шум 100



в – отношение сигнал/шум 70



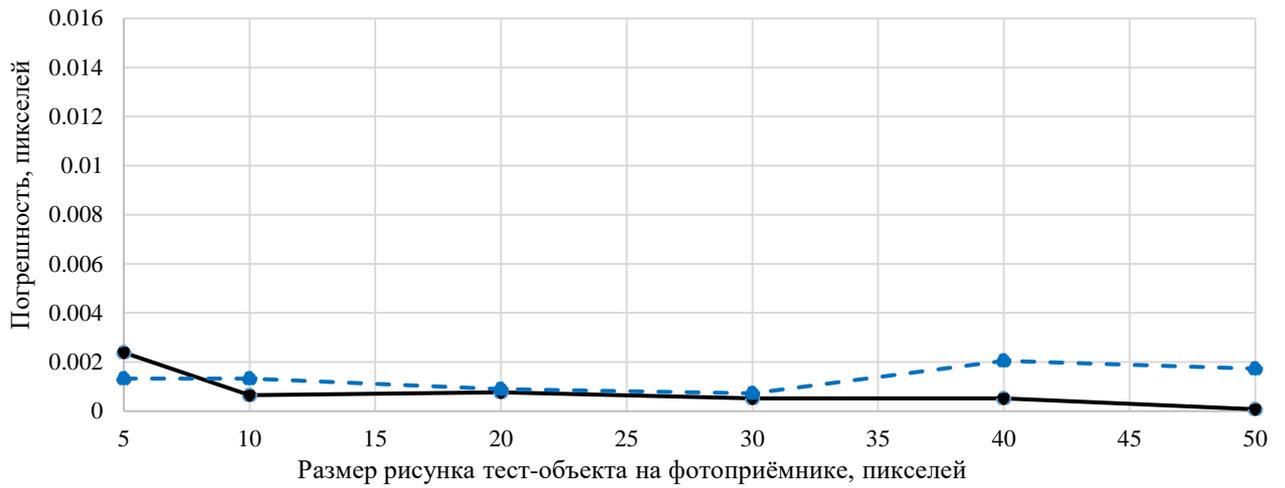
Г – отношение сигнал/шум 20



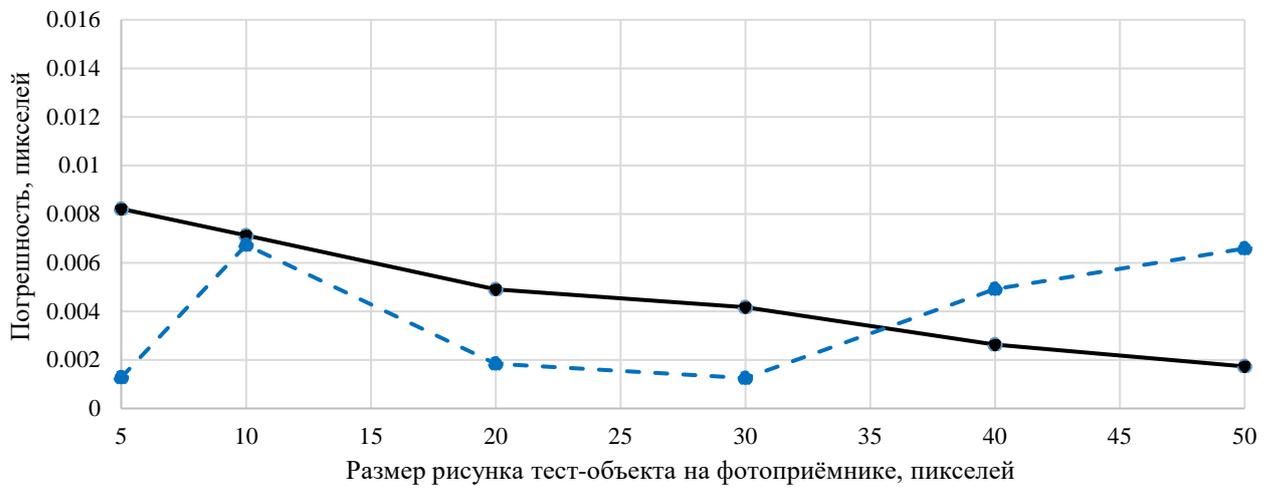
Д – отношение сигнал/шум 10

- Канни (левая ось)
- Лапласиан гауссиана (левая ось)
- ▲— Прюитт (левая ось)
- Робертс (левая ось)
- Собел (левая ось)
- Энергетический центр тяжести (правая ось)

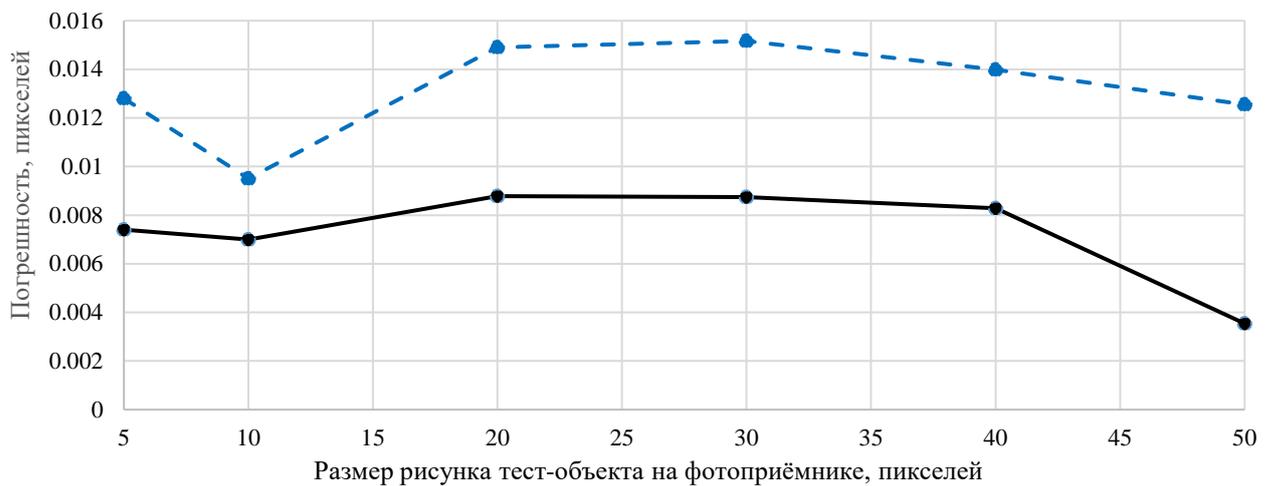
Рисунок 3.12 – Погрешность определения центра изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике по контуру и по энергетическому центру тяжести для различных размеров рисунка тест-объекта



а – отношение сигнал/шум 200



б – отношение сигнал/шум 20



в – отношение сигнал/шум 10

—●— Энергетический центр тяжести
 - -●- - Кросскорреляционный

Рисунок 3.13 – Погрешность определения центра изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике кросскорреляционным и энергетическим алгоритмами для различных размеров рисунка тест-объекта

3.3 Аберрации и качество сборки оптических компонентов

Рассмотрим аналитически влияние качества оптических компонентов и точность сборки оптической системы коллиматора на погрешность калибровки. Такое влияние является комплексным понятием и его можно разделить на две составляющие: искажение формы элемента изображения рисунка тест-объекта и искажение пространственных координат элементов изображения рисунка тест-объекта.

Искажение формы элемента изображения рисунка тест-объекта приводит к погрешности определения координат энергетического центра тяжести изображения рисунка тест-объекта [А-11]. Существенными являются те дефекты, которые вызывают несимметричность в распределении энергии изображения рисунка тест-объекта. Дифракционное изображение точки, создаваемое идеальной оптической системой, имеет резко очерченный яркий центральный кружок и одно слабо освещённое кольцо при нахождении предмета в бесконечности [71, с. 81–83, 134–139]. При наличии сферической аберрации форма изображения рисунка тест-объекта остаётся симметричной поэтому не вызывает погрешности при определении координат энергетического центра тяжести изображения рисунка тест-объекта. При наличии комы искажённая форма изображения будет оставаться постоянной по всему полю зрения и не будет оказывать влияния на относительное определение центров элементов изображения рисунка тест-объекта. Астигматизм приводит к искажению формы изображения рисунка тест-объекта и будет вызывать разную погрешность определения координат энергетического центра тяжести для разных частей поля зрения.

Искажение пространственных координат элементов изображения рисунка тест-объекта вызывают: дисторсия, хроматизм увеличения, хроматизм положения, терморастраиваемость. Данные остаточные аберрации можно измерить и учитывать при калибровках. Поскольку из-за дисторсии по полю искажаются пространственные координаты элемента изображения рисунка тест-объекта, то её наличие в оптической системе коллиматора будет приводить к погрешности калибровки ОЭА. Хроматизм увеличения при калибровке на разных длинах волн влияет таким же образом, как и дисторсия. Дисторсия и хроматизм увеличения коллиматора обычно должны быть не более (0,01–0,5) мкм.

Терморастраиваемость, кривизна изображения и хроматизм положения приводят к возникновению параллакса, который в свою очередь приводит также к искажению значений координат элемента изображения рисунка тест-объекта [73, с. 87–86, 106]. Для уменьшения влияния терморастраиваемости при конструировании подбирают материал корпуса, например, сплав

алюминия, в котором установлен объектив коллиматора, например, сплав титана, и тест-объект, с таким ТКЛР, чтобы они компенсировали изменение фокусного расстояния объектива. В случае нетерморастраиваемого варианта исполнения могут использовать углепластики и инвар (например сплав прецизионный с заданным ТКЛР 32НКД ГОСТ 14082-78). Терморастраиваемость также влияет на погрешность определения эффективного фокусного расстояния, калибруемого ОЭА. Обычно требования к терморастраиваемости и хроматизму положения назначают на 1 порядок менее жёстче, чем для дисторсии и хроматизма увеличения, что будет эквивалентно влиянию на погрешность калибровки ОЭА.

К технологическим дефектам относятся: ошибки сборки (децентрировка оптических компонентов для поверхностей линз – не более (0,01–0,5) мм, блоков линз – не более 0,03 мм, наклоны – не более (0,1–0,3)' для объектива до $\varnothing_{св}150$ мм, которая может быть обеспечена при использовании автоколлимационных оправ, и величина их деформации в оправках, которая минимизируется доведением резьбовых колец крепления только до контакта с оптическими деталями, без натяга); дефекты в стекле: свили, пузыри, камни [72, с. 93–127, 8–14; 74, с. 6–11]; к качеству обработки рабочих поверхностей оптических компонентов жёстких требований не предъявляется (общая точность формы не более $N = (2–3)$ интерференционных колец Ньютона, и местная ошибка $\Delta N = (0,2–0,3)$). Грубая децентрировка проявляется в виде несимметричной фигуры – комы. Отклонение оптических компонентов от правильной сферической формы или односторонняя деформация от неправильного зажатия при сборке. Внутренние остаточные натяжения в стекле или натяжения, вызванные деформацией линз из-за пережатия их в оправках, могут вызвать формирование треугольной формы элемента изображения.

При расфокусировке симметрия дифракционной точки не нарушается, однако расфокусировка может приводить к параллаксу. Изображение тест-объекта формируется увеличенным, сглаживаются неточности нанесения рисунка тест-объекта с использованием литографии, уменьшается погрешность определения координат энергетического центра тяжести изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике, однако энергия в изображении становится менее концентрированной. С другой стороны, как показано выше, при определённых условиях уменьшается отношение сигнал/шум, и как следствие – значительно увеличивается погрешность. Таким образом, необходимо осуществлять фокусировку руководствуясь компромиссным вариантом между двумя вышеперечисленными факторами.

При относительных измерениях, например, в цифровых автоколлиматорах или для определения ЭВО ОЭА, технологические дефекты

не влияют на величину погрешности полученных результатов, поскольку форма, искажённого из-за данных дефектов изображения рисунка тест-объекта, остаётся постоянной по полю зрения оптической системы. В иных случаях необходимо использовать оптические системы с исправленными вышеперечисленными дефектами.

При проектировании устройств для калибровок стараются исключить все вышеперечисленные влияющие aberrации. При необходимости более высоких точностей калибровок при помощи DMD можно откорректировать остаточные aberrации оптической системы, а также погрешности изготовления DMD. Наличие погрешностей изготовления DMD проявляется в основном астигматическими фазовыми искажениями и означает, что отражённый от микродзеркал волновой фронт не будет плоским. Стоит отметить, что в экспериментах визуально не были заметны данные искажения. Изображения, сформированные микродзеркалами DMD (рисунок 4.5 и рисунок 4.6), имеют правильную форму ромбов без каких-либо хвостов.

Информация о поверхностных искажениях пространственных модуляторов света, в том числе DMD, обычно определяется с использованием интерферометрических методов [75]. Посредством взаимодействия эталонного волнового фронта с отражённым от DMD, можно увидеть по интерферограмме искажения волнового фронта. В работе [76] сферичность волнового фронта всего массива микродзеркал DLP3000 DMD оценена в 1,5 кольца Ньютона ($\lambda = 632,8$ нм). Сферичность приводит к параллаксу и соответственно вносит погрешность в координаты микродзеркал.

Для выравнивания волнового фронта пространственных модуляторов света может использоваться метод оптического вихревого изображения, при котором информация об искажении поверхности извлекается из формы одиночного оптического вихря, который создаётся модулятором света [77]. Концепция метода заключается в том, что моды Лагерра–Гаусса с малым индексом чувствительны к фазовым искажениям. Следовательно, наблюдая искажения моды Лагерра–Гаусса с $l = 1$ в плоскости Фурье, можно вывести искажения всего волнового фронта, поскольку в плоскости Фурье фазовые искажения проявляются как амплитудные. В частности, волновой фронт определяется путём применения алгоритма фазового восстановления к наблюдаемой интенсивности искажённого изображения. Для этого используется алгоритм Гершберга–Сакстона. Найденная фаза представляет собой сумму искажённого волнового фронта и заданной спиральной фазы. Отделяя спиральную фазу и искажённый волновой фронт, можно скомпенсировать его для всех последующих генерируемых изображений.

Поскольку алгоритм Гершберга–Сакстона способен восстанавливать фазовые искажения порядка одной или двух длин волн, а астигматизм,

являющийся основной составляющей искажений волнового фронта, может иметь большую величину, то для применения алгоритма Гершберга–Сакстона предлагается предварительно вручную откорректировать весовые коэффициенты полиномов Цернике по визуальной оценке изображения (рисунок 3.14) [78].



Рисунок 3.14 – Пример экспериментальной коррекции волнового фронта DLP 6500 FYE DMD

Таким образом, осуществляется коррекция не только искажений волнового фронта, вносимого погрешностью изготовления DMD, но и оптических компонентов, в том числе светоделиителя, передающего и фокусирующего объективов.

При использовании тест-объекта в виде стеклянной пластины, плоскую поверхность для нанесения рисунка тест-объекта можно отполировать с высокой точностью ($N = 0,05\lambda$). Рисунок тест-объекта в таком случае наносится с использованием литографии. Технология изготовления обеспечивает погрешность взаимного пространственного расположения элементов рисунка тест-объекта не более 0,01 мкм за счёт использования установок формирования изображений, например, Heidelberg DWL 66+ [79] или КБТЭМ-ОМО ЭМ-5189-02 [80]. Для обеспечения измерения перемещения координатного стола в этих установках используются дифференциальные интерферометрические системы высокого разрешения, например, Renishaw RLD10, обеспечивающая погрешность измерения не более ± 1 нм [81].

Выводы по главе 3

Результаты математического моделирования схемы калибровки ОЭА показывают, что наличие шумов различного характера приводит к появлению погрешности не более 0,01 пикселя калибруемого ОЭА. Аналогичные

результаты экспериментально получены на изображениях двух моделей промышленных цифровых камер.

Минимальная погрешность определения координат энергетического центра тяжести элемента изображения тест-объекта в схемах калибровки будет при учёте следующих факторов и соблюдении соотношений:

– диаметр ФРТ объектива коллиматора должно быть минимум в 2 раза больше пикселя калибруемого фотоприёмника ОЭА;

– размер элемента изображения рисунка тест-объекта должен быть более 3 пикселей фотоприёмника, в этом случае допустимая погрешность калибровки составит не более 0,01 пикселя;

– осуществление фильтрации сигнала путём введения порога в 2σ шумов, значения ниже которого принимаются равными нулю. Для исключения влияния единичных пикселей, значительно отличающихся по уровню сигнала от соседних, или «горячих» пикселей, перед введением порога, исходный сигнал обрабатывается с помощью фильтра Винера.

Экспериментально подтверждено, что для минимизации погрешности необходимо, чтобы сигнал в изображении тест-объекта на фотоприёмнике калибруемого ОЭА был более 30 % максимального значения квантования, что соответствует величине отношения сигнал/шум (10–20). При присвоении значению сигнала квадратичных весовых коэффициентов ($w = 2$) достаточен уровень сигнала более 12 % максимального значения квантования фотоприёмника. Рекомендуется при возможности в схемах калибровки ОЭА формировать сигнал на уровне (80–90) % максимального значения квантования, чтобы он был равномерным по полю, отличие – не более (5–10) %.

Результаты математического моделирования показали, что предпочтительным алгоритмом определения центра элемента изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике калибруемого ОЭА является определение по энергетическому центру тяжести. При наличии в элементе изображения рисунка тест-объекта неравномерности сигнала целесообразно использовать контурные алгоритмы. При наличии на изображении фотоприёмника помимо полезного сигнала посторонних засветок, объектов, например, пыли, других изображений, одновременно проецируемых на фотоприёмник ОЭА во время калибровки, необходимо предварительно использовать контурные или кросскорреляционные методы для предварительного поиска области с изображением тест-объекта, а затем в этой области точно определять координаты элемента изображения рисунка тест-объекта по энергетическому центру тяжести.

Установлено, что на погрешность в схемах калибровки ОЭА наибольшее влияние оказывают следующие аберрации: кома, астигматизм, дисторсия,

хроматизм увеличения; в меньшей – хроматизм положения и терморастраиваемости.

Построение качественной контрольно-измерительной оптической системы возможно при учёте следующих технологических факторов: обеспечении минимальной децентрировки оптических компонентов при сборке изделия (наклоны – не более $(0,1-0,3)'$ для объектива до $\varnothing_{св}150$); обеспечении минимальной величины деформации при установке и фиксации оптических компонентов в оправе в процессе их крепления резьбовыми кольцами только до контакта, без натяга; обеспечении качества оптических материалов (минимизация неоднородных включений).

Для выравнивания волнового фронта формируемого пространственным модулятором на основе DMD целесообразно использовать метод коррекции на основе оптического вихревого изображения с применением алгоритма Гершберга-Сакстона для восстановления фазовых искажений одной или двух длин волн, с дополнительной предварительной визуальной оценкой изображения и последующей ручной коррекцией с учётом весовых коэффициентов в полиномах Цернике [А-1, А-2, А-4, А-5, А-6, А-7, А-9, А-10, А-11, А-13, А-15].

ГЛАВА 4

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ

4.1 Влияние температурного смещения микрозеркальной структуры и элементов фотоприёмника

При использовании DMD в качестве тест-объекта, размеры элементов которого являются измерительной шкалой, в частности, в задачах калибровки ОЭА [82, 83, А-5], важно, чтобы пространственная структура микрозеркал оставалась постоянной. Пространственная структура микрозеркал может нарушаться из-за нагрева в процессе работы и, соответственно, расширения КМОП матрицы, в ячейках которой установлены микрозеркала [44, с. 1–11]. Изменение пространственной структуры микрозеркал можно компенсировать. При равномерном расширении – одним масштабным коэффициентом, либо двумя – по горизонтали и вертикали. При неравномерном расширении – полиномом компенсации для каждого участка DMD в зависимости от длительности его работы. Смещение всех микрозеркал DMD в одном направлении влияет на погрешность при проведении калибровки в течение длительного времени. Изменение пространственной структуры менее 1 мкм является приемлемым для большинства задач калибровки ОЭА и сравнимо по величине погрешности с высокоточными двухкоординатными столами [49], в которые можно установить тест-объект в виде стеклянной пластины с нанесённым на неё рисунком с использованием литографии, и применять их, перемещая тест-объект в фокальной плоскости коллиматора, для калибровки ОЭА.

В задачах калибровки ОЭА матричная структура фотоприёмника является измерительной шкалой [84, А-4]. Помимо нагрева DMD фотоприёмник ОЭА также подвержен нагреву, и, соответственно, изменению его пространственной структуры. Необходимо оценить величину изменения пространственной структуры фотоприёмника калибруемого ОЭА, чтобы не задавать завышенные требования по величине погрешности калибровки. Данная оценка позволит принять решение о длительности работы, в течение которого изменение пространственной структуры фотоприёмника ОЭА приемлемо, а также о необходимости дополнительной системы охлаждения фотоприёмника ОЭА. Для снижения величины погрешности калибровки её необходимо проводить за приемлемо малый промежуток времени и с учётом изменяющихся параметров окружающей среды: температуры, атмосферного давления, относительной влажности и др.

4.2 Методика калибровки температурного смещения

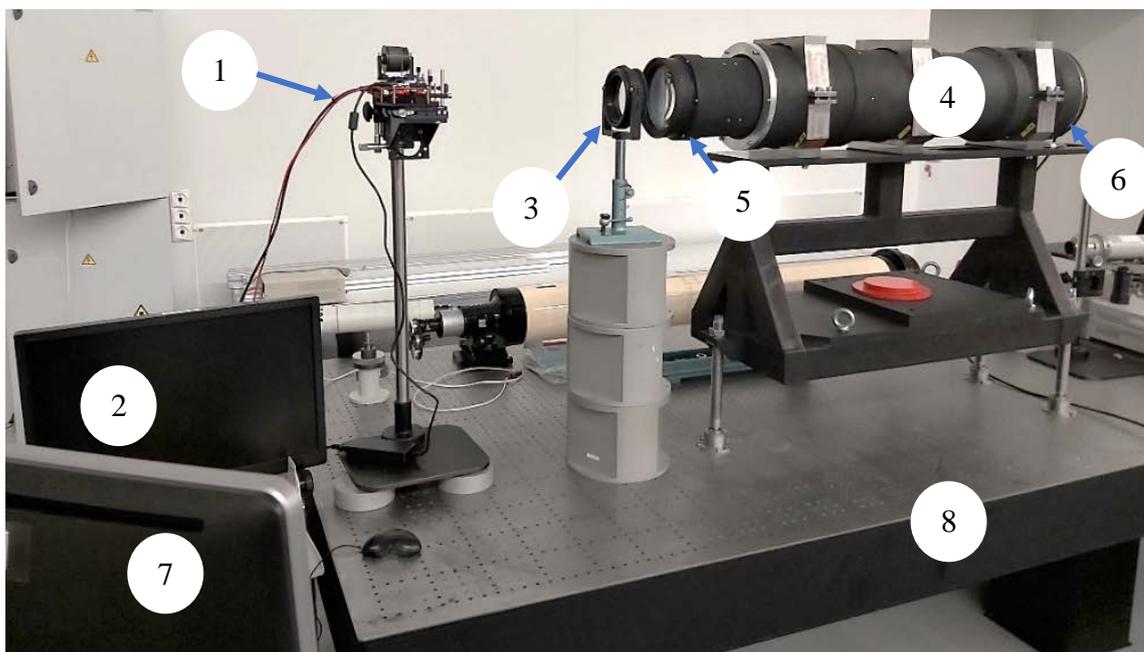
Сущность калибровки температурного смещения заключается в проецировании на фотоприёмник цифровой камеры, используемой в качестве калибруемого ОЭА, тестового массива кругов, расположенных на равном расстоянии друг от друга и оценке изменения этих расстояний вследствие нагрева при длительном времени работы DMD. Особенностью схемы калибровки температурного смещения DMD по сравнению со схемой калибровки остальных геометрических параметров ОЭА (рисунок 3.1), является то, что в данном случае система объектив DMD–объектив цифровой камеры увеличивает изображение DMD в $(3-5)^{\times}$ для увеличения всех неточностей изготовления DMD, тогда как в схемах калибровки ОЭА принято использовать систему объектив коллиматора–объектив ОЭА, уменьшающую изображение в $(3-1)^{\times}$ для снижения влияния неточности изготовления, юстировки и калибровки коллиматора.

Реализованная схема калибровки (рисунок 4.7) включает DLP LightCrafter 4500 (рисунок 4.2), объектив $f_{об}' = 500$ мм (из состава скамьи оптической ОСК-2ЦЛ), который проецирует изображение DLP LightCrafter 4500 в коллиматор. DLP LightCrafter 4500 включает DMD, которое подсвечено осветительной системой (рисунок 4.3). В DLP LightCrafter 4500 штатный объектив снят (рисунок 4.4). В коллиматоре вместо штатного тест-объекта установлена распространённая промышленная цифровая камера Basler ace acA2040-90um.

Корпус коллиматора выполнен из инвара (сплав прецизионный с заданным ТКЛР 32НКД ГОСТ 14082-78), который обладает низким ТКЛР: $1 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$, что обеспечивает минимальную терморастраиваемость, то есть стабильность положения цифровой камеры относительно объектива $f_k' = 1500$ мм коллиматора. Объектив $f' = 1500$ мм коллиматора рассчитан и сконструирован таким образом, чтобы обеспечить минимальную терморастраиваемость.

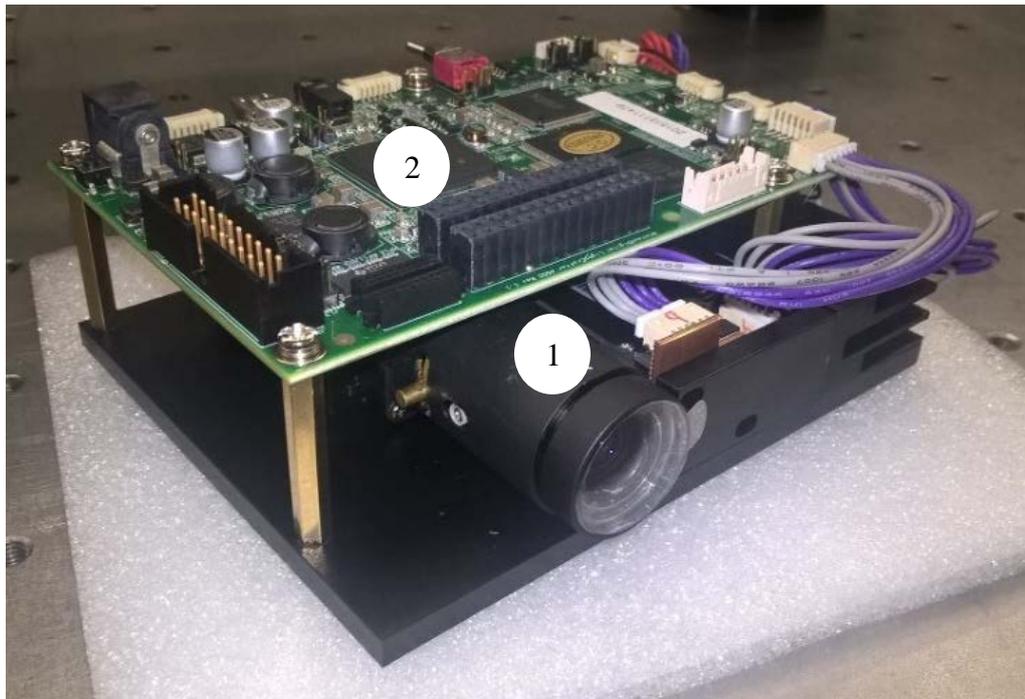
DMD является бистабильным пространственным модулятором света, включающим массив подвижных микрзеркал, функционально установленных в ячейках памяти на КМОП матрице. КМОП матрица управляет положением микрзеркал. Имеется возможность программно управлять положением зеркал и, таким образом, формировать требуемый рисунок, который можно использовать в качестве тест-объекта. Поскольку микрзеркала установлены в ячейках КМОП матрицы, то DMD свойственны тепловые эффекты аналогичные цифровым камерам с КМОП фотоприёмниками.

Для устранения искажений в оптическом тракте схемы калибровки из-за рефракции воздуха оптический тракт закрывается кожухом. Использование кожуха устраняет влияние перемещения воздушных масс в помещении на процесс калибровки. Кожух оставляет открытыми не входящие в оптический тракт схемы калибровки части осветителя и цифровой камеры. Это необходимо для свободного отвода выделяемого ими тепла во время калибровки. Помимо этого, кожух должен быть пористым, чтобы обеспечить отвод тепла из оптического тракта, а также устранить застаивания воздушных масс. Предъявляются требования по температуре к помещению [84, 85] такие же, как и при калибровке остальных геометрических параметров ОЭА. Изменения температуры в помещении минимизируются (за время измерений составили не более $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [А-3]). Для снижения влияния вибраций оборудование устанавливается на виброизолирующий стол. Фактические микровибрации помещения и виброизолированного стола, где проводились эксперименты, составили: $0,5\text{ мкм}$ – $0,7\text{ Гц}$; $0,15\text{ мкм}$ – $(3\text{--}6)\text{ Гц}$; $0,1\text{ мкм}$ – $(6\text{--}10)\text{ Гц}$; $0,01\text{ мкм}$ – более 10 Гц . Перечисленные методы устранения влияния внешних факторов позволяют приблизить калибровку к идеальным условиям и измерить непосредственно температурное смещение.



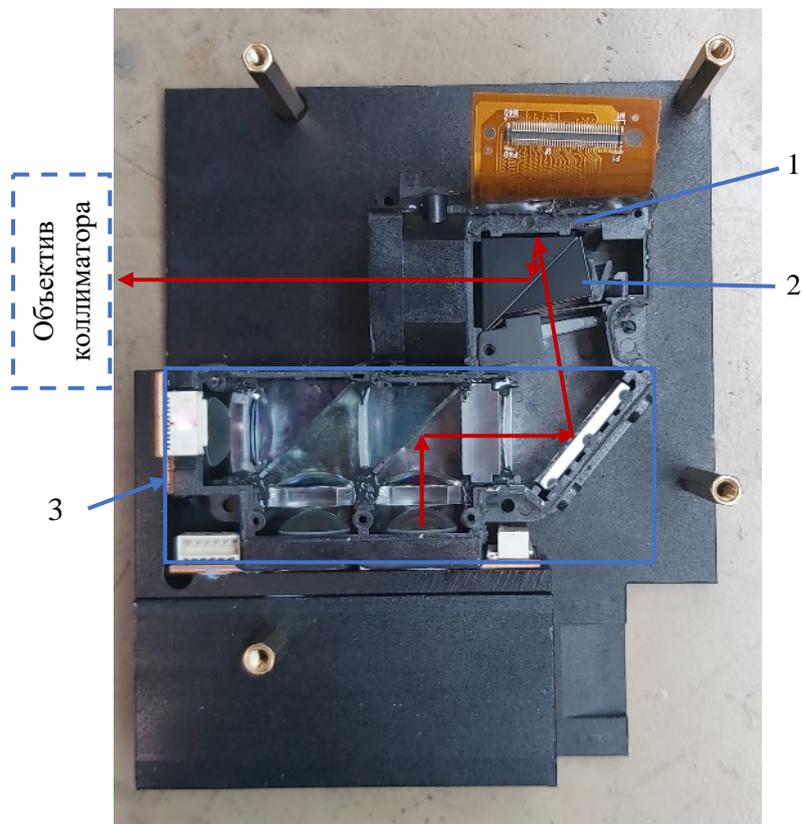
- 1 – DLP LightCrafter 4500; 2 – ПК управления DLP LightCrafter 4500;
3 – объектив $f' = 500\text{ мм}$; 4 – коллиматор; 5 – объектив $f' = 1500\text{ мм}$;
6 – цифровая камера; 7 – ПК управления цифровой камерой;
8 – виброизолированный стол

Рисунок 4.1 – Схема калибровки температурного смещения (кожух не показан)



1 – объектив; 2 – электронная плата

Рисунок 4.2 – Внешний вид DLP LightCrafter 4500



1 – DMD; 2 – светоделительная призма; 3 – осветительная система

Рисунок 4.3 – Внутренний вид DLP LightCrafter4500 (объектив и электронная плата сняты), с ходом излучения от красного светодиода

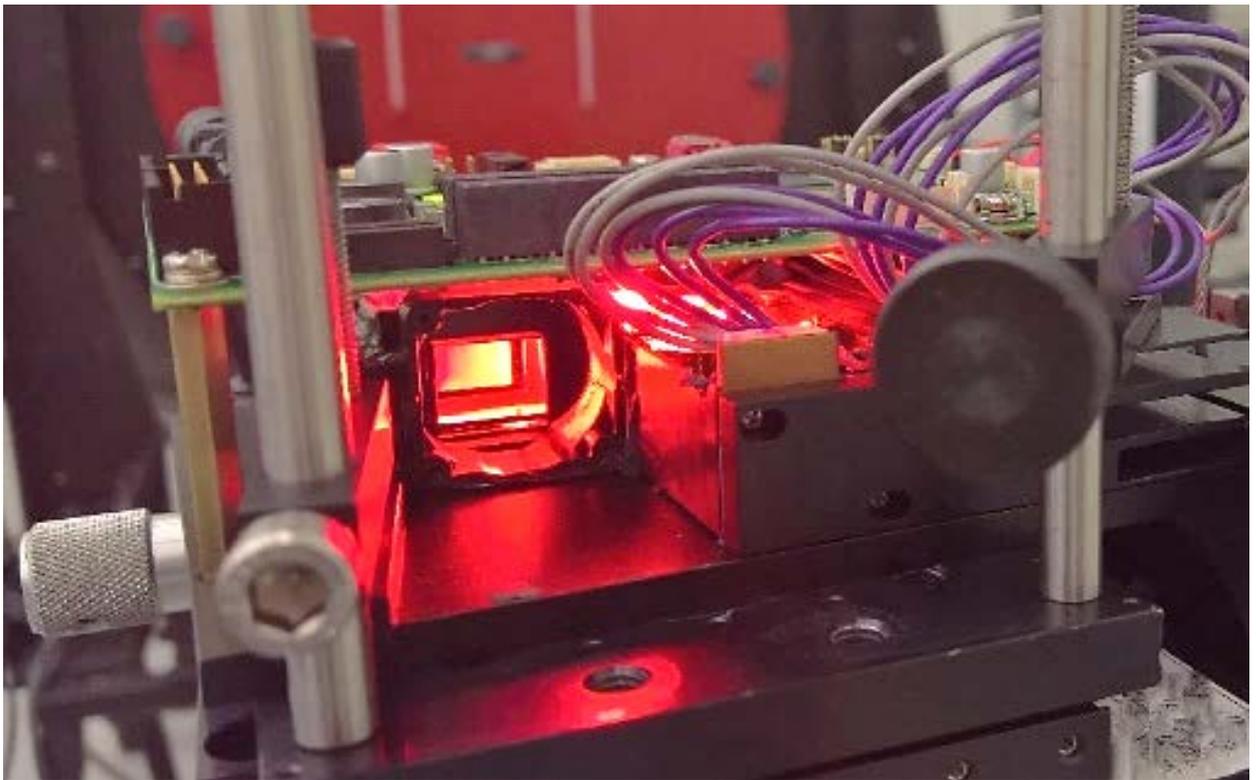


Рисунок 4.4 – Внешний вид DLP LightCrafter 4500 (штатный объектив снят)

4.2.1 Калибровка DMD

4.2.1.1 DMD, объектив $f' = 500$ мм, коллиматор визуально выставляются соосно [А-2, А-14].

4.2.1.2 Формируется рисунок в любом математическом пакете с требуемым периодом кругов. Значения пикселей, в рисунке, которые будут выступать для формирования эталонной связки векторов, задаются равными «1», остальные – «0». Учитывается, что программное обеспечение DLP LightCrafter 4500 преобразовывает ортогональное изображение в диагональное, соответствующее структуре микрзеркал, а период счёта для строк в 2 раза меньше, чем для столбцов (рисунок 4.5) [41, с. 18–22, 22–28]. Поэтому, для однозначного задания координат по столбцам рекомендуется задавать чётные номера столбцов.

4.2.1.3 DLP LightCrafter 4500 и цифровая камера включаются. В DMD загружается рисунок тест-объекта с требуемым периодом и размером кругов.

4.2.1.4 Определяется величина тока осветителя DLP LightCrafter 4500 или экспозиция цифровой камеры, чтобы обеспечить освещённость фотоприёмника цифровой камеры на уровне (80–90) % максимального значения квантования (рисунок 4.6). Таким образом, обеспечивается увеличение отношения сигнал/шум за счёт повышения уровня. Это необходимо для точного вычисления центров изображений кругов. А также исключается область (более 90 %), которая характеризуется наибольшей возможной нелинейностью фотоприёмника ОЭА. При необходимости в DMD

может быть загружен рисунок тест-объекта с градиентным уровнем сигнала по полю зрения, чтобы компенсировать перепады освещённости. При недостаточности диапазона регулировки величины тока осветителя в осветительную систему устанавливают несколько слоёв матовой плёнки Folarex HS 1x matt 140, которая работает аналогично молочному стеклу: уменьшает световой поток на ~50 % и делает его равномерным. Совместно с величиной тока питания осветителя подбирается частота работы микрозеркал таким образом, чтобы из-за погрешности несинхронности работы отдельных микрозеркал или блоков микрозеркал DMD и из-за несогласованности частоты работы DMD и цифровой камеры не было наличия мерцания. Проверяется, чтобы рисунок тест-объекта не формировался нерабочими микрозеркалами (микрозеркалами которые не переходят из номинального состояния в рабочее, для DLP LightCrafter 4500 не более 10 шт. на DMD), при необходимости в DMD загружается смещённый на несколько микрозеркал рисунок.

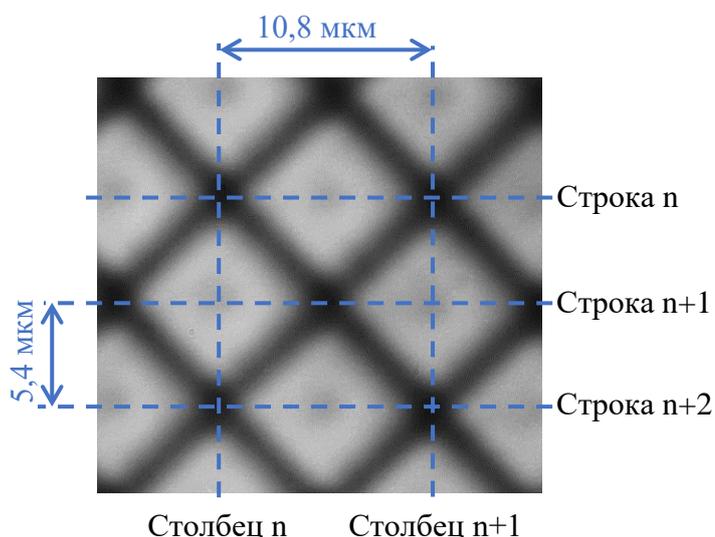


Рисунок 4.5 – Нумерация и период строк и столбцов диагональной структуры микрозеркал DLP LightCrafter 4500 на примере части изображения

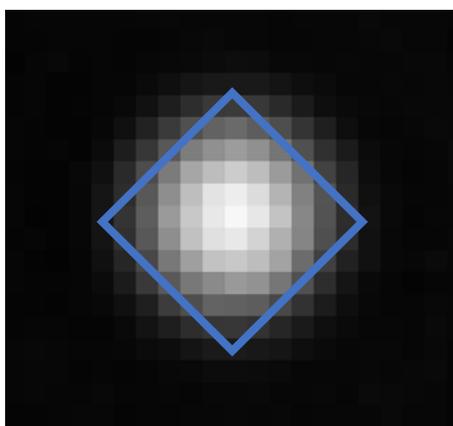


Рисунок 4.6 – Пример изображения, сформированного одним микрозеркалом

4.2.1.5 По изображению с фотоприёмника цифровой камеры достигается расположение изображения 25 кругов, сформированных DMD, в центре фокальной плоскости путём поворотов коллиматора вокруг трёх осей.

4.2.1.6 Цифровая камера, DLP LightCrafter 4500 выключаются и остывают до температуры помещения.

4.2.1.7 DLP LightCrafter 4500 и цифровая камера включаются. Производится съёмка 100 кадров с частотой 90 кадр/с. После завершения съёмки цифровая камера сразу выключается, то есть с неё снимается электропитание. Это позволяет при анализе температурного смещения DMD исключить влияние температурного смещения цифровой камеры, поскольку цифровая камера не успевает значительно нагреться за время включения, съёмки и выключения – менее 1 мин. Цифровая камера остывает до температуры помещения.

4.2.1.8 Общее время съёмки – 4 ч. Повторяется (4.2.1.7) с интервалом 20 мин в первый час, 30 мин – второй час, 1 ч – оставшиеся два часа поскольку вначале наблюдается наибольшее температурное смещение.

4.2.1.9 Изображения каждые 100 кадров усредняются. Вычисляются координаты центров изображений кругов. Строится график смещения всех 25 центров изображений кругов. Производится анализ температурного смещения.

4.2.2 Калибровка DMD совместно с цифровой камерой

4.2.2.1 DLP LightCrafter 4500 и цифровая камера остывают до комнатной температуры [A-2, A-12, A-14].

4.2.2.2 DLP LightCrafter 4500 и цифровая камера включаются. Производится съёмка 100 кадров рисунка DMD каждую минуту в течении четырёх часов. После завершения съёмки DLP LightCrafter 4500 и цифровая камера выключаются.

4.2.2.3 Изображения каждые 100 кадров усредняются. Вычисляются координаты центров изображений кругов. Строится график смещения всех 25 центров изображений кругов в течении четырёх часов с шагом 1 мин, производится анализ смещения в интервалах 20 мин в первый час, 30 мин – второй час, 1 ч – оставшиеся два часа.

4.3 Анализ результатов калибровки температурного смещения

4.3.1 Усредняется значение сигнала $I_{n,m}$ в каждом пикселе n, m , характеризующее преобразованной в электронном тракте цифровой камеры освещённости пикселя для снятых 100 кадров. Для снижения влияния шумов к усреднённым кадрам применяется фильтр Винера размером 5×5 пикселя, а

также вводится порог, значения сигнала ниже которого принимались «0». Величина порога в 5 раз больше среднего значения фонового сигнала.

4.3.2 С учётом известного шага между микрозеркалами [41, с. 1, 18–20, 22–28] и увеличения системы объективов определяются предварительные координаты центров изображений кругов, которые используются для задания центра области вычисления точных координат.

4.3.3 Определяются точные координаты $C_c = (C_x, C_y)$ изображения каждого круга по энергетическому центру тяжести по формулам (3.11).

4.3.4 Для каждого изображения кругов строятся графики их положения на матричной структуре фотоприёмника в разные моменты съёмки в течении 4 ч.

4.3.5 Вычисляется величина смещения относительно координат изображений кругов на фотоприёмнике предыдущих интервалов времени работы

$$D_{t+1} = (C_c)_{t-1} - (C_c)_t; \quad (4.1)$$

где $t = 0, 1, 2, \dots, 8$ – моменты съёмки 0 мин, 20 мин, 40 мин, 60 мин, 90 мин, 120 мин, 180 мин, 240 мин работы DMD.

4.3.6 Для анализа величины и характера смещения вычисляется средняя величина смещения по всем изображениям кругов, σ и максимальный разброс. Производится пересчёт полученных величин V из системы координат цифровой камеры в пикселях в систему координат DMD

$$V_{DMD} = V \cdot p / v; \quad (4.2)$$

где $p = 5,5$ мкм – размер пикселя цифровой камеры;

$v = 3$ – увеличение системы объектив коллиматора–объектив цифровой камеры.

4.3.7 Для анализа относительного смещения вычисляется величина изменения расстояния по строкам и столбцам между изображениями соседних кругов на фотоприёмнике (характеризует насколько смещение одинаково по всему массиву)

$$T_{Ns+1} = (C_c)_{Ns+1} - (C_c)_{Ns}; \quad (4.3)$$

где $Ns = 0, 1, 2, \dots, 4$ – номер строки или столбца.

Аналогично (4.3.5) вычисляется величина изменения относительного смещения с течением времени, аналитично (4.3.6) вычисляется средняя величина относительного смещения по всем изображениям кругов, σ и максимальный разброс.

4.3.8 Для наглядного представления смещения на графиках величина смещения увеличивается на подбираемый масштабный коэффициент k

$$D_{t+1} = k \cdot D_{t+1} - (C_c)_0. \quad (4.4)$$

4.3.9 По полученным графикам, значениям среднего, σ и максимального разброса можно судить о смещении микрозеркал DMD и микрозеркал DMD совместно с пикселями цифровой камеры.

Смещение изображений кругов, сформированных микрозеркалами DMD в течении 4 ч (таблица 4.1, рисунок 4.7) [А-2], происходит в основном вдоль строк. Помимо смещения изображений кругов можно отметить его незначительную неравномерность для разных участков массива микрозеркалами DMD.

Таблица 4.1 – Величина смещения микрозеркал DMD относительно координат изображений кругов на фотоприёмнике предыдущих интервалов времени работы (мкм) (пересчитано в систему координат DMD)

Смещение изображений всех кругов		Интервал времени работы, мин						
		20	40	60	90	120	180	240
По столбцам	Среднее	14,84	2,64	0,38	0,99	0,54	-0,19	-0,79
	σ	0,65	0,13	0,08	0,31	0,26	0,09	0,03
	Макс. разброс	1,99	0,37	0,26	0,92	0,80	0,33	0,11
По строкам	Среднее	0,52	-0,88	-0,15	-0,14	-0,15	-0,19	0,70
	σ	0,68	0,15	0,08	0,20	0,31	0,09	0,07
	Макс. разброс	2,23	0,43	0,25	0,63	0,96	0,32	0,23

Среднее смещение всех изображений кругов характеризует **величину смещения всей микрозеркальной структуры DMD**, которое будет влиять на погрешность калибровки ОЭА во времени. При необходимости проведения геометрической калибровки длительное время необходимо предварительно прогреть DMD до тех пор, пока величина смещения микрозеркал станет такой, что не будет оказывать существенного влияния на требуемую величину погрешности калибровки. При этом необходимо компенсировать величину изменения периода микрозеркал от первоначального состояния DMD.

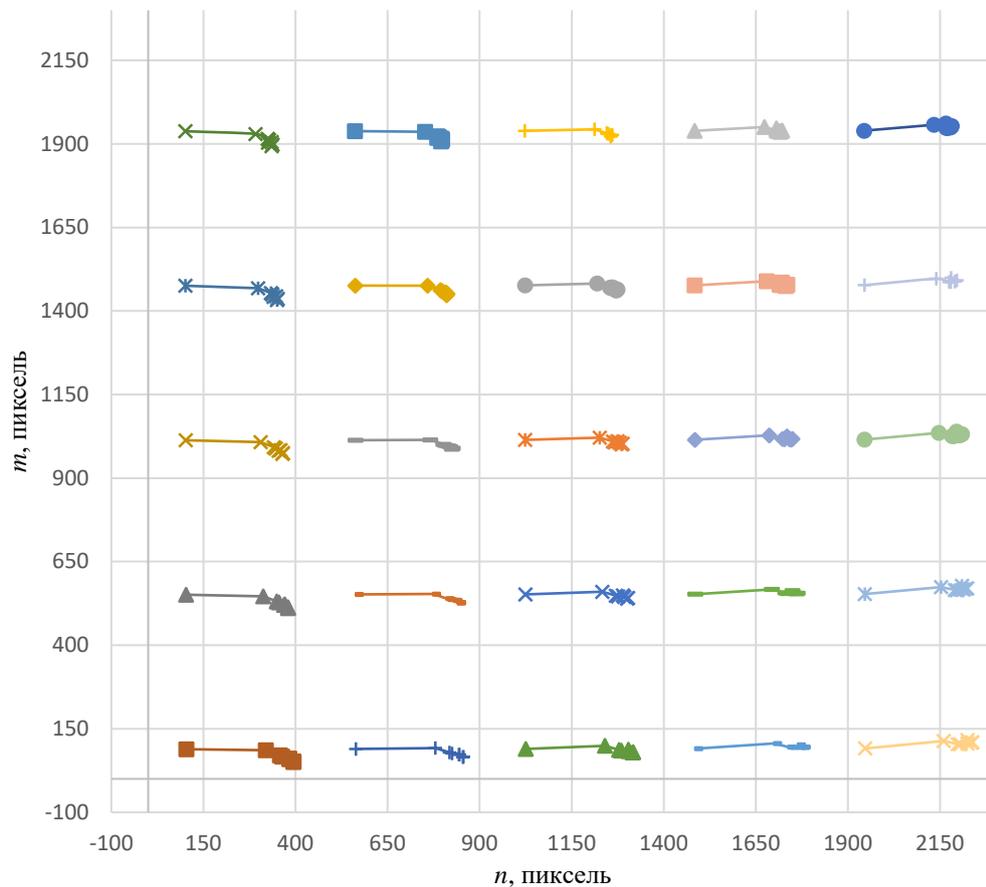


Рисунок 4.7 – Смещение изображений кругов, обусловленное микрозеркалами DMD в течении 4 ч (точки соответствуют смещению после 20 мин, 40 мин, 60 мин, 90 мин, 120 мин, 180 мин, 240 мин работы DMD), величина смещения увеличена в 25 раз

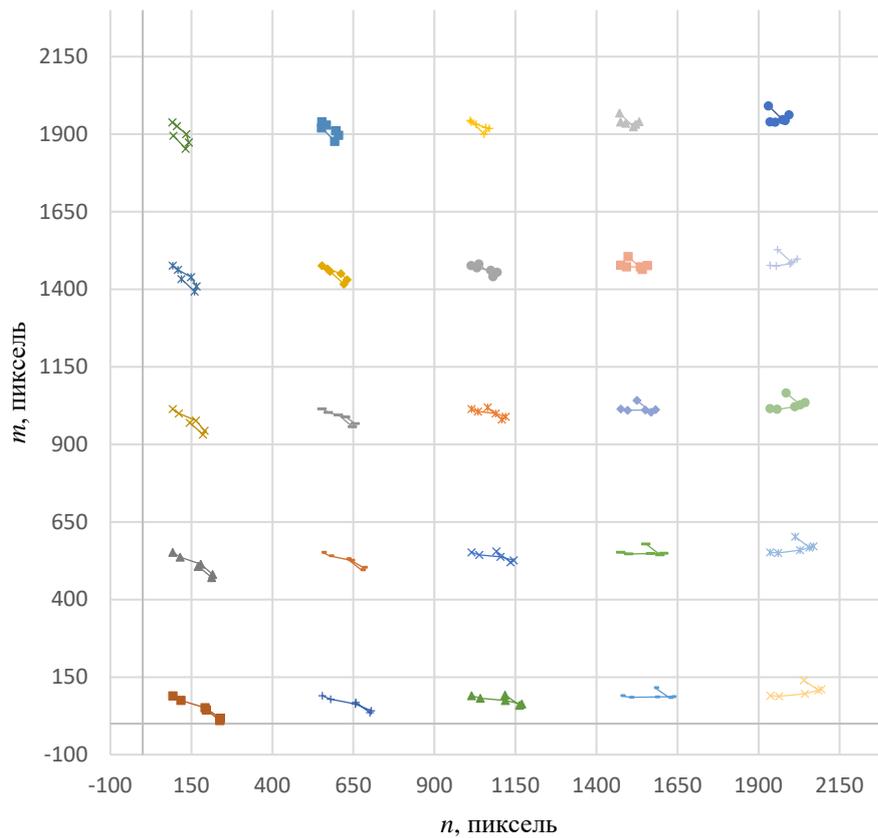
Можно отметить преобладание смещения по столбцам в первые 40 мин работы (таблица 4.1). Среднее смещение после 20 мин работы по изображениям всех кругов в 28 раз больше, чем по строкам. Наибольшее среднее смещение по столбцам в первые 20 мин работы: до 15 мкм. Величина смещения всех изображений кругов после 60 мин работы составляет менее 1 мкм. Колебание средней величины смещения после 60 мин работы обусловлено в большей степени случайными процессами, в первую очередь шумами фотоприёмника цифровой камеры и вибрациями. Таким образом, DMD необходимо прогревать перед калибровкой ОЭА (60–120) мин. σ смещения изображений всех кругов характеризует **равномерность расширения DMD**, которая будет определять погрешность калибровки ОЭА с помощью DMD, поскольку при неравномерном расширении будет нарушаться периодичность микрозеркал, то есть не будет известно взаимное расположение микрозеркал друг относительно друга. Величина σ смещения изображений всех кругов микрозеркал DMD составляет не более 0,7 мкм. Максимальный разброс в первые 20 мин работы DMD по строкам и столбцам

– 2 мкм, в остальное время – не превышает 1 мкм. Изменение расстояния между изображениями соседних кругов также характеризует **равномерность расширения DMD**. Среднее изменение расстояний между изображениями соседних кругов – не более 0,1 мкм (таблица 4.2). Таким образом, можно считать, что величина изменения расстояния между изображениями соседних кругов одинакова по всему массиву микрозеркал, пренебрежимо мала и носит случайный характер. Изменения расстояния между изображениями соседних кругов с течением времени работы не происходит. Остаточное влияние неравномерного расширения DMD во время калибровки ОЭА при помощи DMD можно компенсировать путём определения коэффициентов неравномерного смещения для каждого микрозеркала DMD.

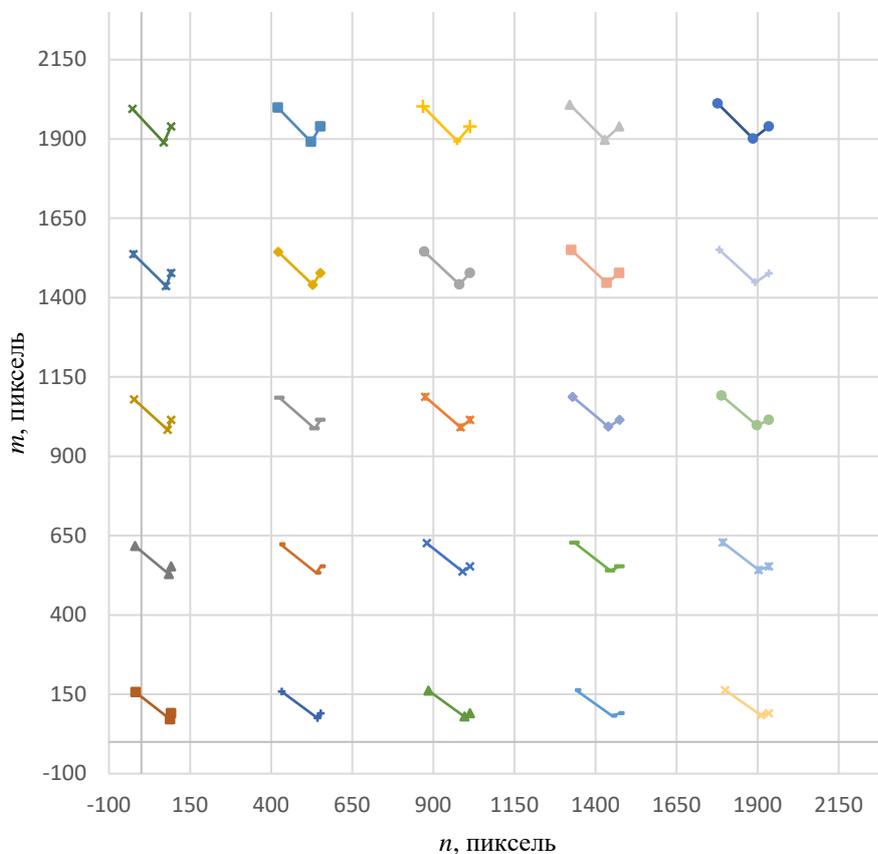
Для смещения изображений кругов за 3 ч после 1 ч прогрева (рисунок 4.8), изображения кругов смещаются в 2 раза больше для левой нижней части DMD, чем для правой верхней части DMD. Смещение изображений кругов за 2 ч после 2 ч прогрева становится равномерным. Остаточное неравномерное смещение изображений кругов может быть вызвано параллаксом, непараллельностью плоскости предмета, формируемой микрозеркалами DMD, и плоскостью фотоприёмника цифровой камеры.

Таблица 4.2 – Величина изменения расстояния между изображениями соседних кругов на фотоприёмнике (характеризует, насколько смещение микрозеркал DMD одинаково по всему массиву микрозеркал) относительно координат изображений кругов на фотоприёмнике предыдущих интервалов времени работы (мкм) (пересчитано в систему координат DMD)

Смещение изображений всех кругов		Интервал времени работы, мин						
		20	40	60	90	120	180	240
По столбцам	Среднее	-0,04	0,00	0,01	0,01	0,02	-0,05	-0,01
	σ	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02
	Макс. разброс	0,09	0,04	0,02	0,03	0,05	0,07	0,05
По строкам	Среднее	-0,08	0,00	0,01	-0,01	0,03	-0,06	0,05
	σ	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01
	Макс. разброс	0,11	0,01	0,02	0,05	0,09	0,09	0,07



в течении 3 ч после 1 ч прогрева, величина смещения увеличена в 100 раз



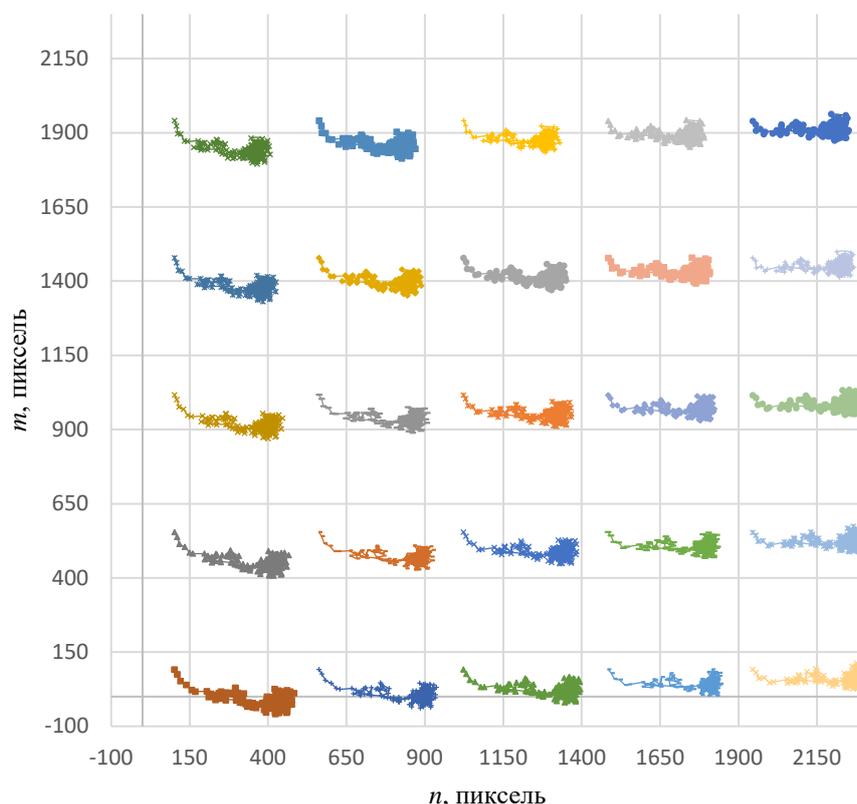
в течении 2 ч после 2 ч прогрева, величина смещения увеличена в 250 раз

Рисунок 4.8 – Смещение изображений кругов, обусловленное микрозеркалами DMD

Оценивалось смещение изображений кругов за счёт микрозеркал DMD и пикселей цифровой камеры в течении 4 ч (таблица 4.3, рисунок 4.9).

Таблица 4.3 – Величина смещения микрозеркал DMD и пикселей цифровой камеры относительно координат изображений кругов на фотоприёмнике предыдущих интервалов времени работы (мкм) (пересчитано в систему координат DMD)

Смещение изображений всех кругов		Интервал времени работы, мин						
		20	40	60	90	120	180	240
По столбцам	Среднее	17,19	4,75	3,92	1,47	0,86	0,17	0,47
	σ	1,21	0,41	0,21	0,36	0,19	0,07	0,08
	Макс. разброс	3,71	1,39	0,75	1,19	0,62	0,29	0,28
По строкам	Среднее	-2,00	-1,85	0,40	1,06	0,32	-0,08	-0,53
	σ	1,32	0,31	0,05	0,04	0,09	0,14	0,13
	Макс. разброс	3,98	0,99	0,19	0,14	0,37	0,54	0,51



в течении 4 ч, шаг 1 мин, величина смещения увеличина в 25 раз

Рисунок 4.9 – Смещение изображений кругов, обусловленное микрозеркалами DMD и пикселями цифровой камеры

Можно отметить преобладание смещения по столбцам в первые 120 мин работы (таблица 4.3). Среднее смещение после 20 мин работы по изображениям всех кругов в 8,6 раза больше, чем по строкам. Наибольшее среднее смещение по столбцам в первые 20 мин работы – 17 мкм. При

сравнении со смещением только за счёт DMD (таблица 4.1) проявилось дополнительное влияние цифровой камеры на смещение изображений кругов. Величина смещения изображений всех кругов после 120 мин работы составляет 1 мкм. Таким образом, DMD и цифровую камеру в случае калибровки цифровой камеры необходимо прогревать не менее 120 мин. При калибровке другой цифровой камеры или какого-либо фотоприёмника (или несколько фотоприёмников) ОЭА необходимо проводить исследование температурного смещения их элементов. Однако время для предварительного прогрева будет примерно одинаковым – 120 мин.

Величина σ смещения изображений всех кругов составляет менее 0,5 мкм, кроме первых 20 мин, что достаточно для большинства случаев калибровки ОЭА. В первые 20 минут наблюдается наибольшее неравномерное расширение $\sigma = 1,5$ мкм. Максимальный разброс в первые 20 мин работы по строкам и столбцам – 4 мкм, в остальное время – не превышает 1 мкм. Среднее изменение расстояний между изображениями соседних кругов – не более 0,1 мкм (таблица 4.4). Таким образом, можно считать, что величина изменения расстояния между изображениями соседних кругов одинакова, пренебрежимо мала и носит случайный характер. Изменения расстояния между изображениями соседних кругов с течением времени не происходит.

Таблица 4.4 – Величина изменения расстояния между изображениями соседних кругов на фотоприёмнике (характеризует насколько смещение микрозеркал DMD одинаково по всему массиву микрозеркал) относительно координат изображений кругов на фотоприёмнике предыдущих интервалов времени работы (мкм) (пересчитано в систему координат DMD)

Смещение изображений всех кругов		Интервал времени работы, мин						
		20	40	60	90	120	180	240
По столбцам	Среднее	0,05	-0,07	0,13	-0,24	0,09	-0,05	0,03
	σ	0,06	0,04	0,08	0,08	0,07	0,03	0,04
	Макс. разброс	0,18	0,15	0,32	0,48	0,25	0,14	0,14
По строкам	Среднее	0,06	0,02	0,03	0,00	-0,01	0,07	-0,06
	σ	0,03	0,03	0,02	0,06	0,07	0,05	0,03
	Макс. разброс	0,13	0,11	0,08	0,17	0,26	0,17	0,11

Смещение изображений кругов за 3 ч после 1 ч прогрева (рисунок 4.10) показывает, что изображения кругов смещаются в основном вдоль строк и больше для левой части, чем для верхней части.

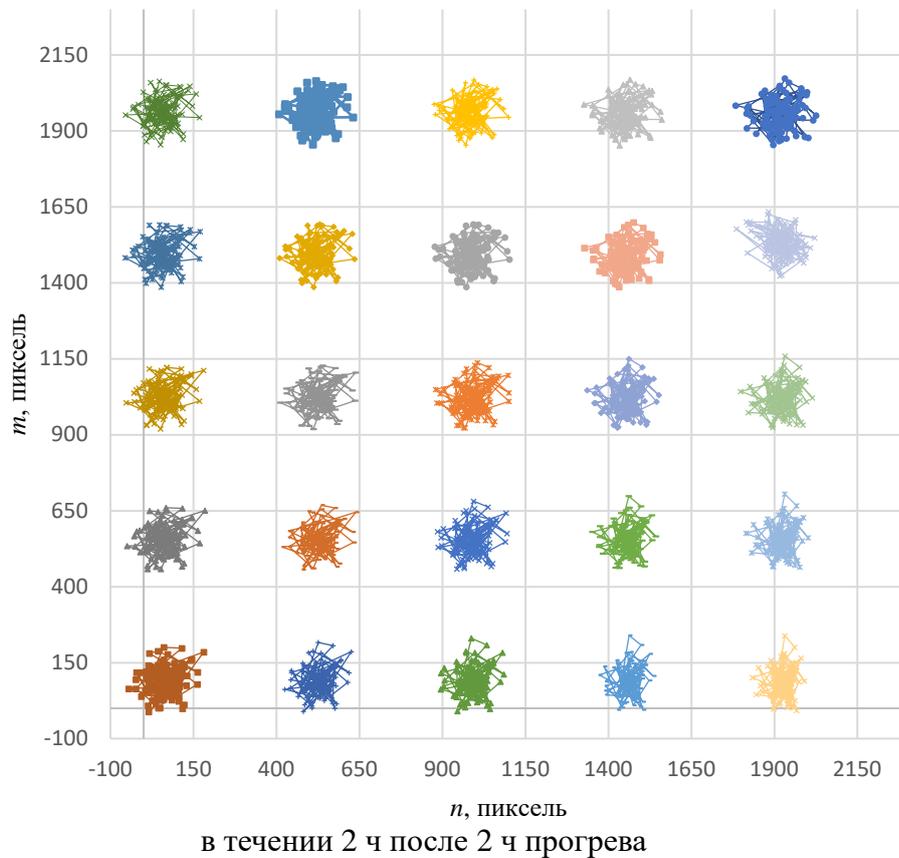
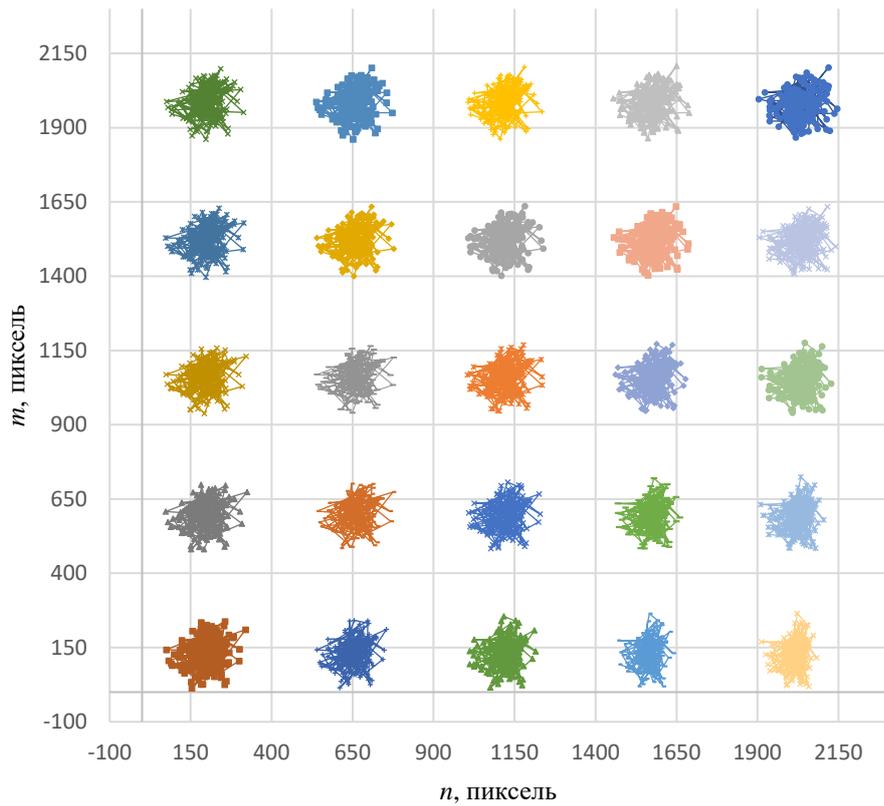
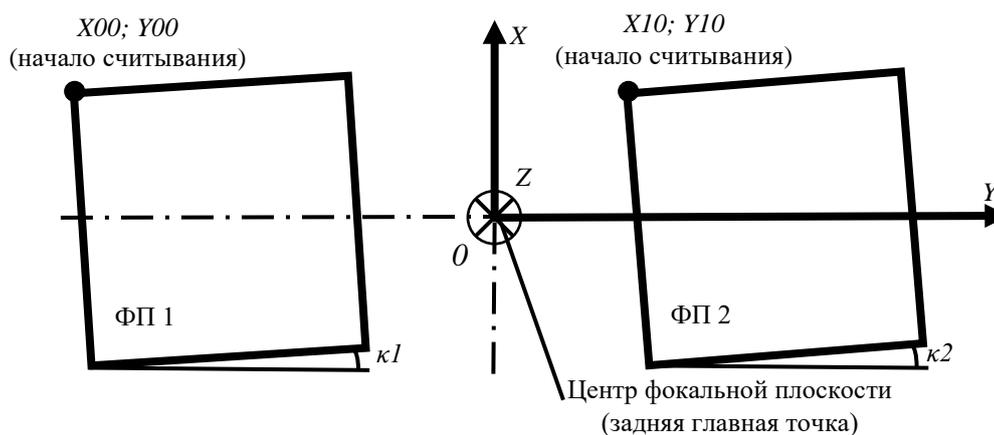


Рисунок 4.10 – Смещение изображений кругов, обусловленное микрозеркалами DMD и пикселями цифровой камеры, шаг 1 мин, величина смещения увеличена в 100 раз

Смещение изображений кругов за 2 ч после 2 ч прогрева становится более равномерным. Остаточный разброс положения одного и того же изображения круга может быть обусловлен шумами фотоприёмника цифровой камеры, флуктуациями воздуха, вибрациями, более выраженный разброс для правого нижнего угла обусловлен остаточным параллаксом.

4.4 Методика калибровки геометрических параметров многоматричных оптико-электронных аппаратов

Рассмотрена схема калибровки макетов ОЭА с двумя – ОЭА-2ФП и тремя – ОЭА-3ФП фотоприёмниками. Схема фокальной плоскости макета ОЭА с двумя фотоприёмниками (рисунок 4.11) характерна для ОЭА, в которых требуется увеличить поле зрения; с тремя фотоприёмниками (рисунок 4.12) – для ОЭА, осуществляющих маршрутные съёмки, когда ОЭА движется относительно объекта съёмки и производит съёмку в режиме ВЗН. Для ОЭА с большим количеством фотоприёмников чем три вдоль оси OY : десятки–сотни калибровка будет аналогичной.



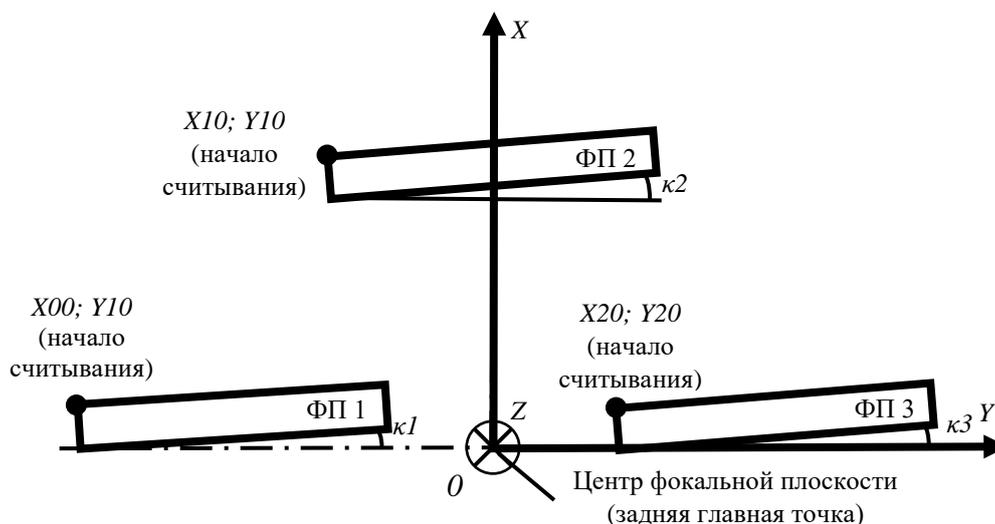
$X10, Y10, X20, Y20$ – координаты начальных пикселей фотоприёмников;

$\kappa1, \kappa2$ – углы поворота фотоприёмников;

X, Y – проекция осей $X_{OЭА-2ФП}, Y_{OЭА-2ФП}$ на фокальную плоскость

Рисунок 4.11 – Схема фокальной плоскости ОЭА-2ФП

(вид со стороны объектива)



$X_{10}, Y_{10}, X_{20}, Y_{20}, X_{30}, Y_{30}$ – координаты начальных пикселей фотоприёмников;

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ – углы поворота фотоприёмников;

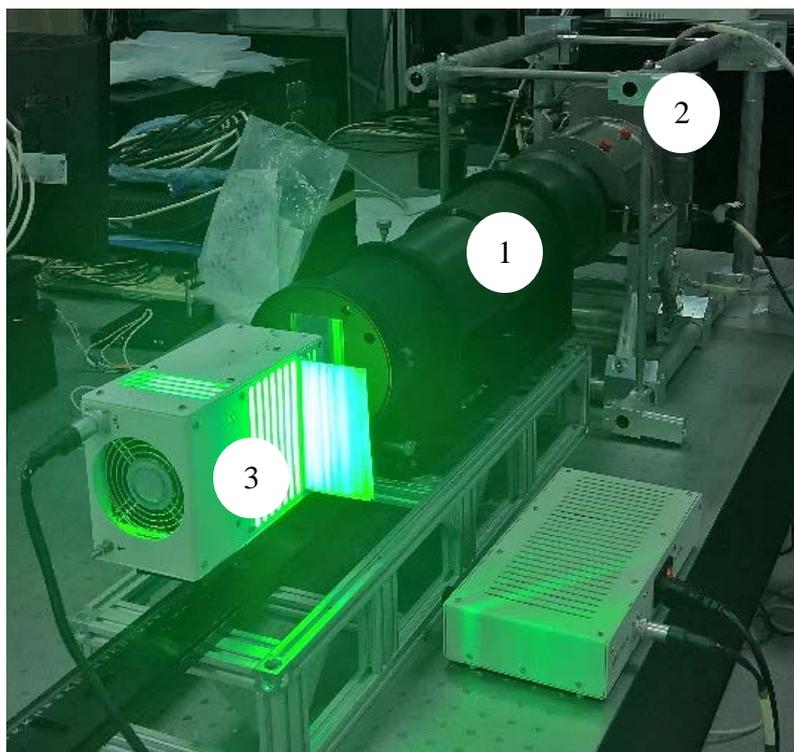
X, Y – проекция осей $X_{OZA-3FP}, Y_{OZA-3FP}$ на фокальную плоскость

Рисунок 4.12 – Схема фокальной плоскости ОЭА-3ФП
(вид со стороны объектива)

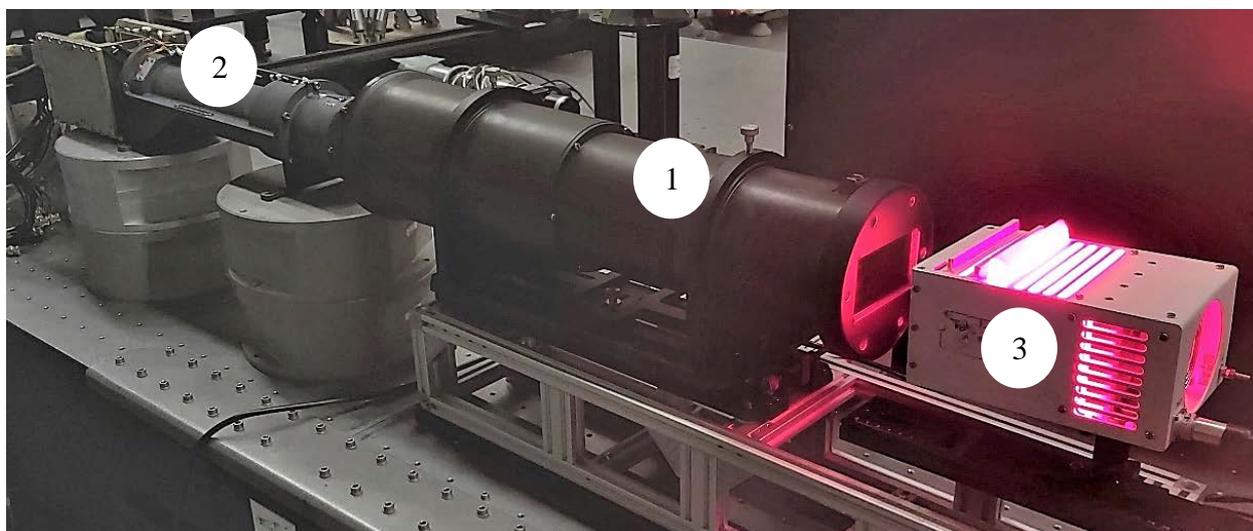
Схема калибровки (рисунок 3.1) включает коллиматор и макет ОЭА (рисунок 4.11, рисунок 4.12). Коллиматор включает объектив, тест-объект, расположенный в фокальной плоскости объектива. Осветитель включает массив светодиодов и молочное стекло для обеспечения равномерной подсветки рисунка тест-объекта. Плата, на которой установлены светодиоды, с тыльной стороны охлаждается вентилятором. Объектив макета ОЭА, в фокальной плоскости которого установлены фотоприёмники, формирует изображение тест-объекта, спроецированного коллиматором, на фотоприёмник. Объективы рассчитаны на минимум дисторсии, астигматизма, комы. Калибровка производится на одной длине волны.

Рисунком тест-объекта является массив кругов. Расстояния между кругами подобрано таким образом, чтобы равномерно спроецировать их изображения в центре и по краям всех фотоприёмников макета ОЭА и оставалось достаточная область между изображениями кругов на фотоприёмниках для автоматического вычисления координат их центров (рисунок 4.15, рисунок 4.16).

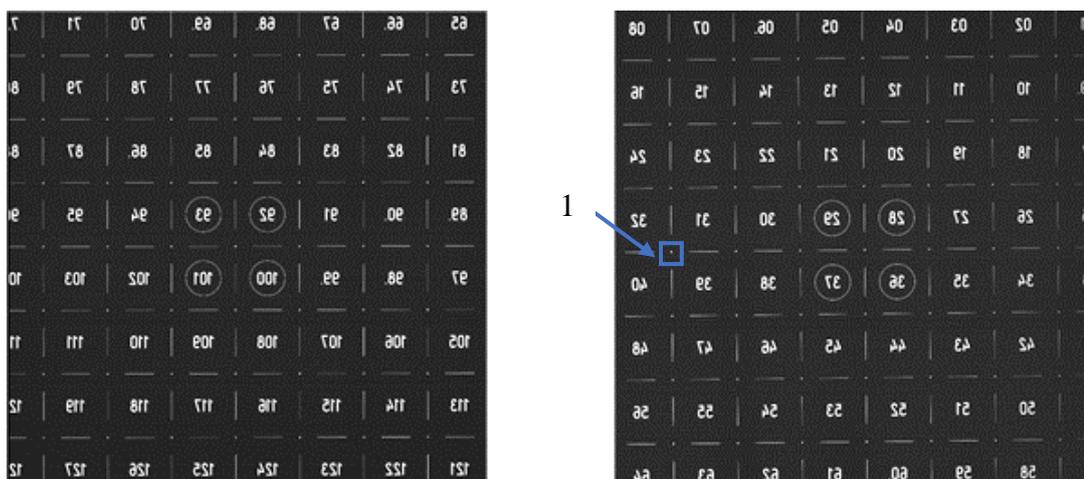
Для устранения и уменьшения влияний воздействующих факторов на погрешность калибровки реализованы специальные мероприятия (глава 3).



1 – коллиматор, 2 – макет ОЭА, 3 – осветитель
Рисунок 4.13 – Схема калибровки макета ОЭА-2ФП
(кожух не показан)

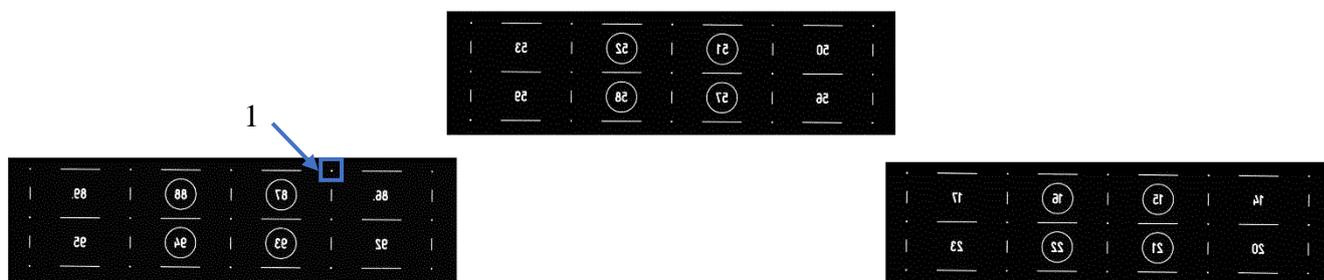


1 – коллиматор, 2 – макет ОЭА, 3 – осветитель
Рисунок 4.14 – Схема калибровки макета ОЭА-3ФП
(кожух не показан)



1 – один из элементов изображения рисунка тест-объекта коллиматора

Рисунок 4.15 – Пример изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмниках макета ОЭА-2ФП



1 – один из элементов изображения рисунка тест-объекта коллиматора

Рисунок 4.16 – Пример изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмниках макета ОЭА-3ФП

Последовательность операций калибровки

4.4.1 В коллиматор устанавливается специально рассчитанное фокусирующее кольцо. Это необходимо при калибровке линзовых ОЭА, работающих в вакууме или ОЭА, работающих в диапазоне спектра, отличном от диапазона спектра, при котором коллиматор фокусировался и калибровался.

4.4.2 Коллиматор, калибруемый макет ОЭА и осветитель визуально выставляются соосно.

4.4.3 Обеспечивается освещённость с учётом интегральной чувствительности фотоприёмников макета ОЭА на уровне (80–90) % максимума освещённости.

4.4.4 По изображению с фотоприёмников макета ОЭА достигается расположение рисунка тест-объекта коллиматора в центре фокальной плоскости путём поворотов коллиматора вокруг трёх осей.

4.4.5 Макет ОЭА выдерживается во включённом состоянии для достижения рабочего режима съёмки. При необходимости макет ОЭА

выключается и остывает до температуры помещения. Производится съёмка 100 кадров рисунка тест-объекта.

4.4.6 Коллиматор поворачивается вокруг своей оптической оси на 180° .

4.4.7 Производится повторная съёмка 100 кадров рисунка тест-объекта.

4.4.8 Полученные данные обрабатываются по алгоритму аналогично (4.5).

4.4.9 Для набора большей статистики, исключения влияния на погрешность возможных локальных искажений волнового фронта коллиматора и калибруемого макета ОЭА в (4.4.2) и (4.4.4) коллиматор может устанавливаться относительно соосного положения с калибруемым ОЭА на $\pm(1-2)^\circ$ по двум осям. Для каждого положения повторяются (4.4.5–4.4.7). Таким образом, проводится серия измерений включающая (2–6) приёмов.

4.5 Алгоритм обработки и анализ результатов калибровки

4.5.1 Вычисление координат спроецированных коллиматором кругов изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике аналогично (4.3.1–4.3.3).

4.5.2 Вычисление ЭВО ОЭА.

4.5.2.1 Переходят из системы координат фотоприёмника в систему координат фокальной плоскости макета ОЭА [А-4]

$$\begin{pmatrix} XP_{np_{i1}} \\ YP_{np_{i1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{np0} \\ Y_{np0} \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} \cos(\alpha_{np0}) & -\sin(\alpha_{np0}) \\ \sin(\alpha_{np0}) & \cos(\alpha_{np0}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} CP_{np_{i1,0}} \\ CP_{np_{i1,1}} \end{pmatrix};$$

$$XP_{i2}, YP_{i2} = \begin{pmatrix} XP_{0_{i1}}, YP_{0_{i1}} \\ XP_{1_{i1}}, YP_{1_{i1}} \\ \dots \\ XP_{np_{i1}}, YP_{np_{i1}} \end{pmatrix}; \quad (4.5)$$

где $XP_{np_{i2}}, YP_{np_{i2}}$ – координаты кругов изображения рисунка тест-объекта коллиматора в системе координат фокальной плоскости макета ОЭА;

X_{np0}, Y_{np0} – линейные координаты нулевых пикселей фотоприёмников;

α_{np0} – угол поворота фотоприёмников вокруг визирной оси макета ОЭА;

p – размер пикселя фотоприёмника;

$CP_{np_{i1}} = (C_{x_{i1}}, C_{y_{i1}})$ – координаты центров тяжести кругов изображения рисунка тест-объекта на фотоприёмнике;

$np = 0 \dots Nm - 1$ – номер фотоприёмника;

Nm – количество фотоприёмников макета ОЭА;

$i1 = 0 \dots T - 1$ – номер круга рисунка тест-объекта коллиматора, спроецированного на фотоприёмник;

T – количество кругов рисунка тест-объекта коллиматора, спроецированных на фотоприёмник;

$i2 = 0 \dots T \cdot Nm - 1$ – номер круга рисунка тест-объекта коллиматора, спроецированного на фокальную плоскость макета ОЭА;

$P = 1, 2$ – положение коллиматора 1 – прямое; 2 – противоположное, перевёрнутое на 180° вокруг оптической оси коллиматора.

4.5.2.2 Пересчитываются координаты с учётом поправок

$$XP_{i2}, YP_{i2} = P_{i3,pp} \cdot XP_{i2}, YP_{i2}; \quad (4.6)$$

где $P_{i3,pp}$ – коэффициенты полинома аппроксимации (при первой итерации равны нулю),

pp – степень полинома.

4.5.2.3 Пересчитываются координаты коллиматора в систему координат фокальной плоскости макета ОЭА

$$XkP'_{i2}, YkP'_{i2} = \nu \cdot XkP_{i2}, YkP_{i2} \cdot (f' / f_k); \quad (4.7)$$

где XkP_{i2}, YkP_{i2} – эталонные координаты кругов рисунка тест-объекта коллиматора;

$\nu = 1$ для $P = 1$, $\nu = -1$ для $P = 2$ – коэффициент характеризующий поворот коллиматора на 180° вокруг оптической оси;

f' – фокусное расстояние объектива макета ОЭА;

f_k – фокусное расстояние объектива коллиматора.

Модель калибровки (рисунок 4.17) показывает эталонные вектора, которые определяются через линейные эталонные координаты кругов рисунка тест-объекта коллиматора XkP_{i2}, YkP_{i2} и фокусное расстояние объектива коллиматора f_k ; проекции эталонных векторов (теоретические) XkP'_{i2}, YkP'_{i2} и проекции эталонных векторов (фактические) $XPnp_{i2}, YPnp_{i2}$. Объектив коллиматора и объектив макета ОЭА показаны единой оптической системой для возможности показать прохождения эталонных векторов через одну узловую точку для упрощения.

С точки зрения математических преобразований оптическую систему объектива коллиматора и объектива макета ОЭА можно представить, как одно целое, пересчитав координаты центров кругов изображения рисунка тест-объекта в фокальную плоскость макета ОЭА с помощью масштабного коэффициента, определяемого как отношение фокусов объектива коллиматора и макета ОЭА. Из-за искажений объектива макета ОЭА изображения спроецируются в некоторых других положениях. Количество векторов задаётся таким образом, чтобы равномерно спроецировать их по всей площади фотоприёмников калибруемого макета ОЭА.

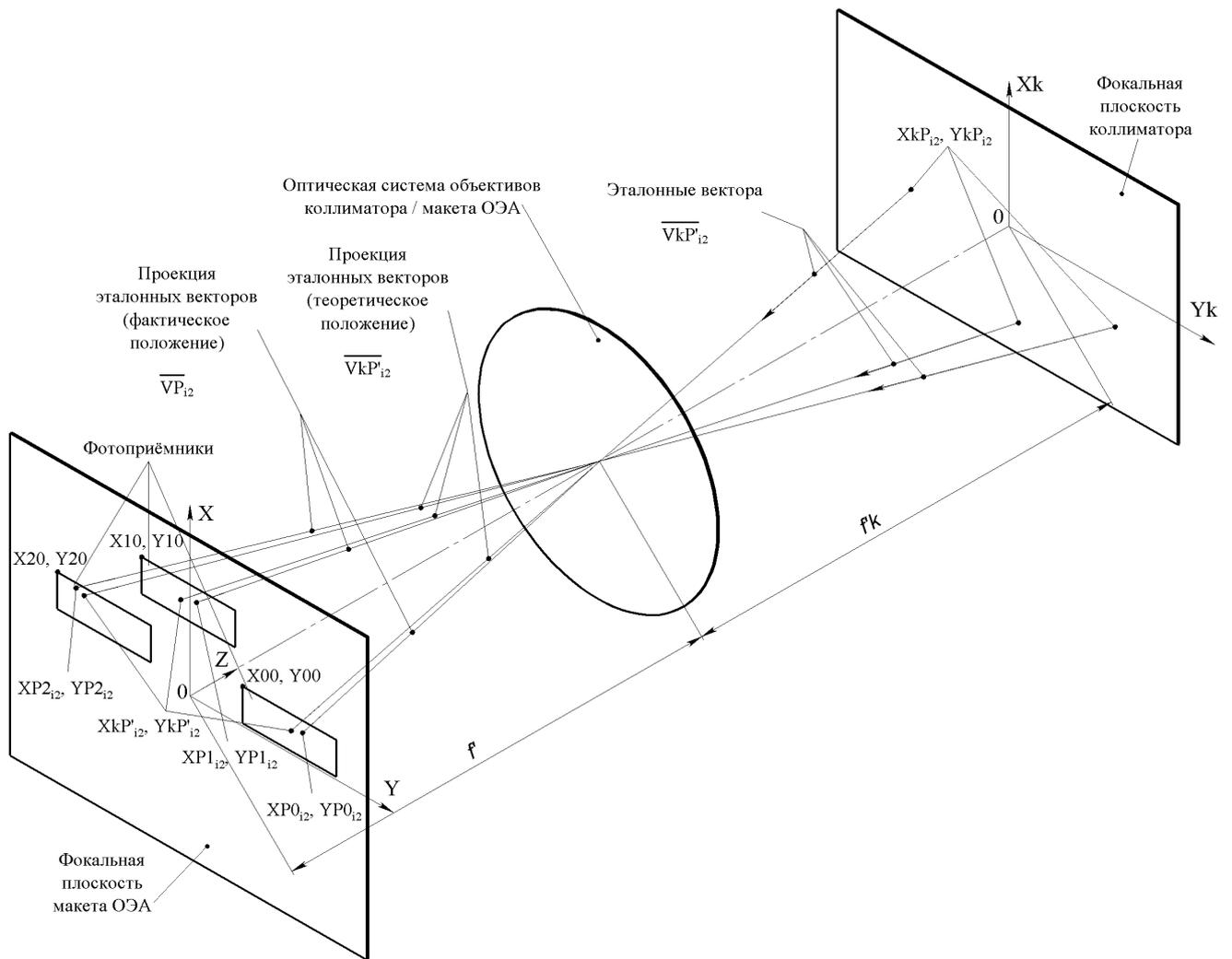


Рисунок 4.17 – Модель калибровки на примере макета ОЭА-3ФП

4.5.2.4 Вычисление эффективного фокусного расстояния.

4.5.2.4.1 Координаты приводятся к общему центру XfP_{i2} , YfP_{i2} ; $XkfP_{i2}$, $YkfP_{i2}$.

4.5.2.4.2 Вычисляются невязки.

4.5.2.4.3 Вычисляется угол поворота вокруг оптической оси для каждого фотоприёмника.

4.5.2.4.4 Компенсируется угол поворота вокруг оптической оси для каждого фотоприёмника.

4.5.2.4.5 Вычисляется эффективное фокусное расстояние методом наименьших квадратов

$$f'_{эф} = f' + f' \cdot \frac{\sum \left(\left(\sqrt{XfP_{i2}^2 + YfP_{i2}^2} - \sqrt{XkfP_{i2}^2 + YkfP_{i2}^2} \right) \left(\sqrt{XkfP_{i2}^2 + YkfP_{i2}^2} \right) \right)}{\sum \left(\sqrt{XkfP_{i2}^2 + YkfP_{i2}^2} \right)}. \quad (4.8)$$

4.5.2.4.6 Пересчитываются невязки $dXfP_{i2}$, $dYfP_{i2}$ с новым эффективным фокусным расстоянием.

4.5.2.4.7 Вычисляется погрешность определения эффективного фокусного расстояния

$$\sigma f'_{\text{эф}} = \sqrt{\sum_P \left(\sqrt{\frac{\sum (dXfP_{i2})^2}{T \cdot Nm - 1}} \cdot \sqrt{\frac{\sum (dYfP_{i2})^2}{T \cdot Nm - 1}} \right)^2}. \quad (4.9)$$

4.5.2.4.8 Выполняется повторный расчёт с уточнённым фокусным расстоянием.

4.5.2.5 Проводится компенсация элементов внешнего ориентирования.

4.5.2.5.1 Координаты переводятся в векторный вид направляющих косинусов

$$\overrightarrow{VkP_{i2}}, \overrightarrow{VP_{i2}} = \frac{1}{\sqrt{(XkP_{i2}, XP_{i2})^2 + (YkP_{i2}, YP_{i2})^2 + (f'_{\text{эф}})^2}} \begin{pmatrix} XkP_{i2}, XP_{i2} \\ YkP_{i2}, YP_{i2} \\ f'_{\text{эф}} \end{pmatrix}. \quad (4.10)$$

4.5.2.5.2 Вычисляются элементы внешнего ориентирования в первом приближении.

4.5.2.5.2.1 Приводятся координаты к общему центру для вычисления угла поворота вокруг оптической оси OZ .

4.5.2.5.2.2 Вычисляются невязки.

4.5.2.5.2.3 Вычисляется угол поворота вокруг оптической оси OZ

$$\kappa P_{np} = \frac{\sum_T (XnP_{i2} \cdot dXP_{i2})}{\sum_T (XnP_{i2}^2)}. \quad (4.11)$$

4.5.2.5.2.4 Вычисляется угол поворота вокруг оси OX

$$\omega P_{np} = \text{arctg} \left(\frac{\sum_T dYP_{i2}}{T \cdot f'} \right). \quad (4.12)$$

4.5.2.5.2.5 Вычисляется угол поворота вокруг оси OY

$$\alpha P_{np} = \text{arctg} \left(\frac{\sum_T dXP_{i2}}{T \cdot f'} \right). \quad (4.13)$$

4.5.2.5.2.6 Выполняется пересчёт векторов с учётом компенсации элементов внешнего ориентирования

$$\overrightarrow{VkP_{i2}} = Mx(\omega P) \cdot My(\alpha P) \cdot Mz(\kappa P) \cdot \overrightarrow{VkP_{i2}}; \quad (4.14)$$

где M_x, M_y, M_z – матрицы поворота вокруг осей OX, OY, OZ .

4.5.2.5.2.7 Пересчитываются невязки.

4.5.2.5.3 Уточнение ЭВО.

Вычисляется уточнённый угол поворота вокруг оптической оси для каждого фотоприёмника

$$\kappa P_{np} = \kappa P_{np} + \frac{1}{2} \sum_P \frac{\Sigma_T(XnP_{i1} \cdot dXP_{i1})}{\Sigma_T(XnP_{i1}^2)}. \quad (4.15)$$

Вычисляются уточнённые линейные координаты для каждого фотоприёмника

$$X_{np0}, Y_{np0} = X_{np0}, Y_{np0} + \frac{1}{2} \sum_P \frac{\Sigma_T dXP_{i1}, \Sigma_T dYP_{i1}}{T}. \quad (4.16)$$

4.5.2.5.4 Порядок компенсации элементов внешнего и внутреннего ориентирования по формулам из (4.5.2.5):

– компенсируется угол поворота вокруг оптической оси OZ – κP как среднее поворота для ФП1 и ФП3 κP_{np} для положения коллиматора $P = 1$ и $P = 2$;

– компенсируется угол поворота вокруг оси OX – ωP как среднее поворота для ФП1 и ФП3 ωP_{np} для положения коллиматора $P = 1$ и $P = 2$;

– компенсируется угол поворота вокруг оси OY – αP как среднее поворота для ФП1 и ФП3 αP_{np} для положения коллиматора $P = 1$ и $P = 2$;

– выполняется повторный расчёт с уточнёнными элементами внешнего ориентирования;

– уточняется угол поворота вокруг оптической оси для каждого фотоприёмника κP_{np} как среднее в двух положениях коллиматора;

– уточняется линейные координаты для каждого фотоприёмника X_{np0}, Y_{np0} как среднее в двух положениях коллиматора;

– выполняется повторный расчёт с уточнёнными ЭВО.

4.5.2.6 Вычисление коэффициентов полинома аппроксимации дисторсии и остаточных поправок геометрического положения фотоприёмников.

4.5.2.6.1 Вычисляются невязки dX_{i3}, dY_{i3} по всем измерениям в противоположных положениях коллиматора, где $i3 = 0 \dots (T \cdot Nm - 1) \cdot 2$ – номер круга изображения рисунка тест-объекта коллиматора, спроецированного на фокальную плоскость макета ОЭА, в противоположных положениях коллиматора.

4.5.2.6.2 Решением системы линейных алгебраических уравнений методом наименьших квадратов вычисляются остаточные невязки

$$\begin{aligned}
DX_{i3} &= f'x \frac{(\vec{V}_{i3})_0}{(\vec{V}_{i3})_2} + Sfx' \left(\frac{(\vec{V}_{i3})_0}{(\vec{V}_{i3})_2} \right)^2 \\
DY_{i3} &= f'y \frac{(\vec{V}_{i3})_1}{(\vec{V}_{i3})_2} + Sfy' \left(\frac{(\vec{V}_{i3})_1}{(\vec{V}_{i3})_2} \right)^2.
\end{aligned} \tag{4.17}$$

4.5.2.6.3 Пересчитываются невязки.

4.5.2.6.4 Вычисляются весовые коэффициенты Q_x , Q_y всех параметров из системы линейных алгебраических уравнений (4.5.2.6.2).

4.5.2.6.5 Вычисляется погрешность определения эффективного фокусного расстояния

$$\sigma_{f'_{\text{эф}}} = \sqrt{\sqrt{\frac{\sum(dX_{i3})^2}{(T \cdot Nm - 1) \cdot 2 - 1}} Q_x \cdot \sqrt{\frac{\sum(dY_{i3})^2}{T \cdot Nm - 1}} Q_y}. \tag{4.18}$$

4.5.2.6.6 Вычисляются коэффициенты остаточного полинома аппроксимации ЭВО решением систем линейных алгебраических уравнений методом наименьших квадратов

$$P_{i3,pp} = Xn_{i3}^{pm} \cdot Yn_{i3}^{pn}; \tag{4.19}$$

где $pm = 0 \dots \sqrt{pp}$; $pn = 0 \dots \sqrt{pp} - pm$; pp – степень полинома, номер комбинации pm и pn .

4.5.2.6.7 Вычисляются невязки с учётом вычисленных остаточных поправок.

4.5.2.6.8 Вычисляется погрешность калибровки.

$$\sigma = \sqrt{\arctg \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum(d3X_{i3})^2}{(T \cdot Nm - 1) \cdot 2 - 1}}}{f'_{\text{эф}}} \right) \cdot \arctg \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum(d3Y_{i3})^2}{(T \cdot Nm - 1) \cdot 2 - 1}}}{f'_{\text{эф}}} \right)}. \tag{4.20}$$

4.5.3 Анализ результатов.

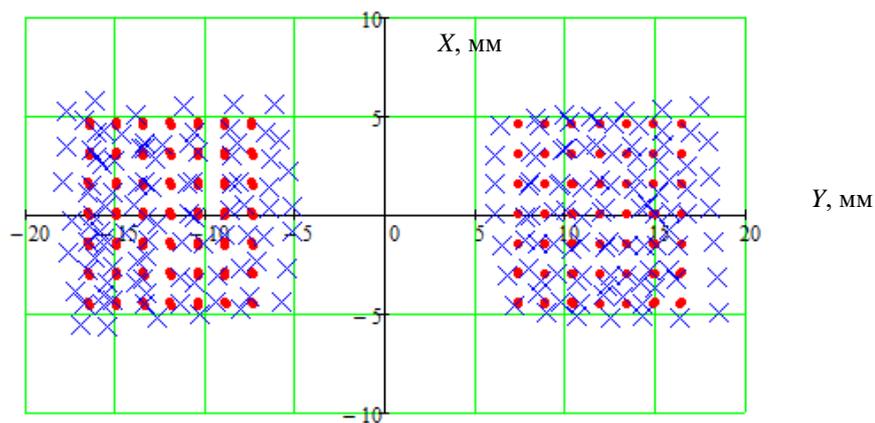
Представленная методика калибровки обеспечивает низкую погрешность не более $(0,2-1,0)''$ (3σ) (таблица 4.5) [А-4].

Таблица 4.5 – Результаты калибровки макетов ОЭА

Наименование технического параметра макета ОЭА	Численное значение	
	ОЭА-2ФП	ОЭА-3ФП
Фотограмметрическое фокусное расстояние $f'_{эф}$, мм	500,0862	999,7519
Погрешность определения фотограмметрического фокусного расстояния (3σ), мм	0,0018	0,0048
Уточнённые координаты нулевых пикселей фотоприёмников $X0, Y0$, мм	-17,3127; 5,5174 5,9948; 5,7996	-16,6448; 2,7087 -5,5754; 16,9043 5,4350; 3,1564
Угол поворота фотоприёмников κ , рад	0,0017381 -0,0070609	-0,0002675 -0,0009363 -0,0021266
Коэффициенты полинома аппроксимации $K2$	6,2e-04; 3,8e-05 -6,9e-05; -3,9e-06 -4,1e-06; -9,9e-08 4,4e-07; 1,7e-08 -3,6e-07; -1,4e-04 6,4e-07; 6,8e-07 -5,8e-08; 3,2e-07 1,5e-07; -1,6e-06 4,0e-07; 9,0e-08 4,7e-07; 7,2e-07	-5,71e-6; 8,2e-7 -7,11e-7; -7,8e-8 1,9e-8; -7,8e-10 1,69e-9; 4,65e-10 -7,05e-7; 1,99e-6 -9,33e-9; 2,43e-9 -1,37e-10; 1,2e-10 3,09e-7; -4,29e-7 2,79e-9; 1,03e-9 -1,45e-8; 2,03e-8
Погрешность калибровки (3σ), мкрад (угл. с)	3,6 (0,75)	1,0 (0,21)

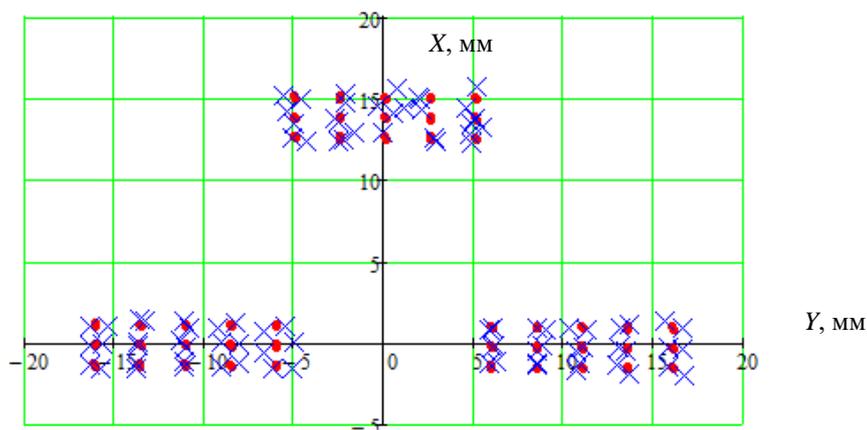
Калибровка для макета ОЭА-3ФП в 3 раз точнее, что может быть связано с в 2 раза меньшим полем зрения чем у макета ОЭА-2ФП.

Результаты калибровки оцениваются по характеру и величинам остаточных невязок в сравнении с проекциями эталонных координат кругов рисунка тест-объекта коллиматора в системе координат фокальной плоскости макета ОЭА (рисунок 4.18 и рисунок 4.19). Для наглядности представления некомпенсированные невязки увеличены в 3000 раз. Отсутствие одновременного смещения всех невязок для какого-либо фотоприёмника характеризует достоверность определения его положения. Отсутствие подушкообразного расположения невязок одновременно противоположных положений коллиматора, а также для всех фотоприёмников подтверждает достоверное определение коэффициентов, описывающих дисторсию объектива. Видно, что невязки носят случайный характер.



- – проекции эталонных кругов рисунка тест-объекта коллиматора;
- × – увеличенные в 3000 раз остаточные невязки восстановления направления на круги рисунка тест-объекта

Рисунок 4.18 – Результаты калибровки в системе координат фокальной плоскости макета ОЭА-2ФП



- – проекции эталонных кругов рисунка тест-объекта коллиматора;
- × – увеличенные в 3000 раз остаточные невязки восстановления направления на круги рисунка тест-объекта

Рисунок 4.19 – Результаты калибровки в системе координат фокальной плоскости макета ОЭА-3ФП

Выводы по главе 4

Высокая точность калибровки ОЭА обеспечивается при условии сохранения пространственной структуры и равномерности расширения микрозеркал DMD.

Предложена и апробирована методика калибровки температурного смещения микрозеркал DMD из-за нагрева во время функционирования путём проецирования массива кругов, сформированных DMD, на фотоприёмник цифровой камеры и оценке изменения расстояний между кругами.

Результаты экспериментальных исследований показали, что смещение микрозеркал DMD происходит в основном вдоль строк. Средняя величина смещения микрозеркал DMD после 20 мин работы – 15 мкм (по строкам), меньше 1 мкм (по столбцам), после 60 мин работы – требуемое минимальное время прогрева DMD – меньше 1 мкм (по строкам и столбцам). Среднеквадратическое отклонение смещения изображений всех кругов массива, сформированных DMD, составляет менее 1 мкм. Максимальный разброс в первые 20 мин работы DMD. Среднее изменение расстояний между изображениями соседних кругов – не более 0,1 мкм. Таким образом, можно считать, что величина изменения расстояния между изображениями соседних кругов одинакова по всему массиву микрозеркал, пренебрежимо мала и носит случайный характер.

Средняя величина смещения микрозеркал DMD совместно с цифровой камерой после 20 мин работы – 17 мкм (по строкам), меньше 2 мкм (по столбцам), после 120 мин работы – требуемое минимальное время прогрева DMD и цифровой камеры – меньше 1 мкм (по строкам и столбцам).

После прогрева DMD можно использовать в качестве тест-объекта в задачах калибровки ОЭА без дополнительных устройств охлаждения. При необходимости более точных калибровок ОЭА полученные результаты можно использовать в качестве коэффициентов компенсации температурных эффектов в процессе работы для корректировки изменений пространственной структуры микрозеркал DMD.

Разработана методика калибровки ОЭА, в том числе многоматричных, разделением элементов внешнего ориентирования за счёт обработки измеренных данных по всем фотоприёмникам и ЭВО за счёт обработки по каждому фотоприёмнику в противоположных положениях коллиматора. Проведена апробация на примере калибровки многоматричных макетов ОЭА с двумя и тремя фотоприёмниками. Предложенная методика калибровки ОЭА и методы снижения влияющих факторов на погрешность обеспечивают малую погрешность, не более $(0,2-1,0)''$ (3σ) [А-3, А-4, А-10, А-12, А-14].

ГЛАВА 5 АПРОБАЦИЯ СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЭТАЛОННОЙ СВЯЗКИ ВЕКТОРОВ

5.1 Описание сравниваемых способов

5.1.1 Схема калибровки с **рисунком тест-объекта в виде массива кругов, нанесённых на стеклянную пластину** (рисунок 5.1) подробно описанна в (4.4). Тест-объектом является стеклянная пластина с рисунком, нанесённым с использованием литографии, которая обеспечивает погрешность нанесения рисунка в доли микрометров. Рисунком тест-объекта является массив прозрачных кругов на непрозрачном фоне. Массив прозрачных кругов нанесён таким образом, чтобы равномерно спроецировать их на все фотоприёмники калибруемого макета ОЭА (рисунок 4.16). Стеклянная пластина выполнена из материала с нулевым ТКЛР: $0 \pm 0,02 \cdot 10^{-6} \cdot K$, что обеспечивает стабильность линейных размеров.

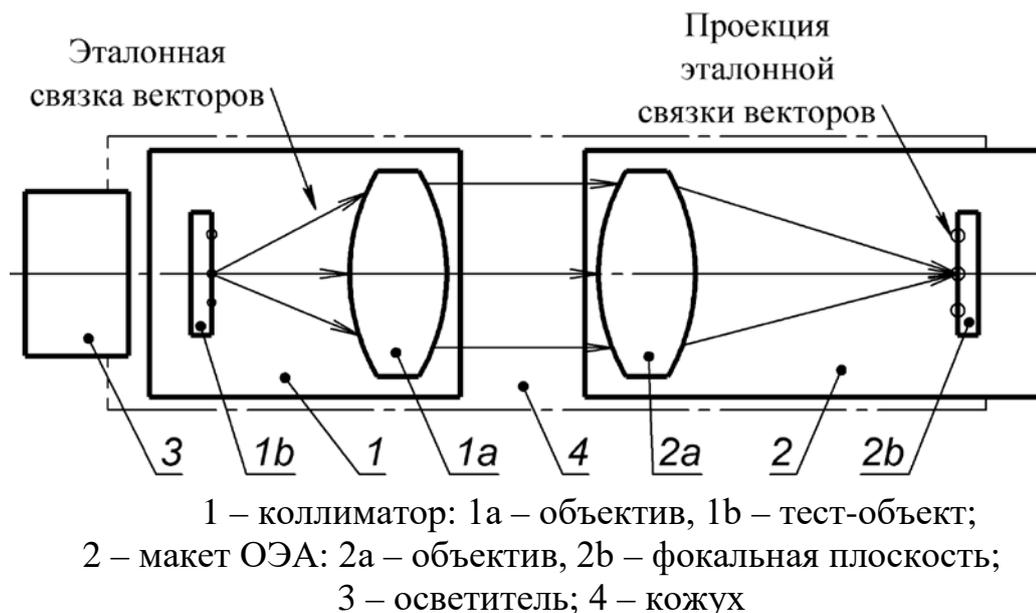
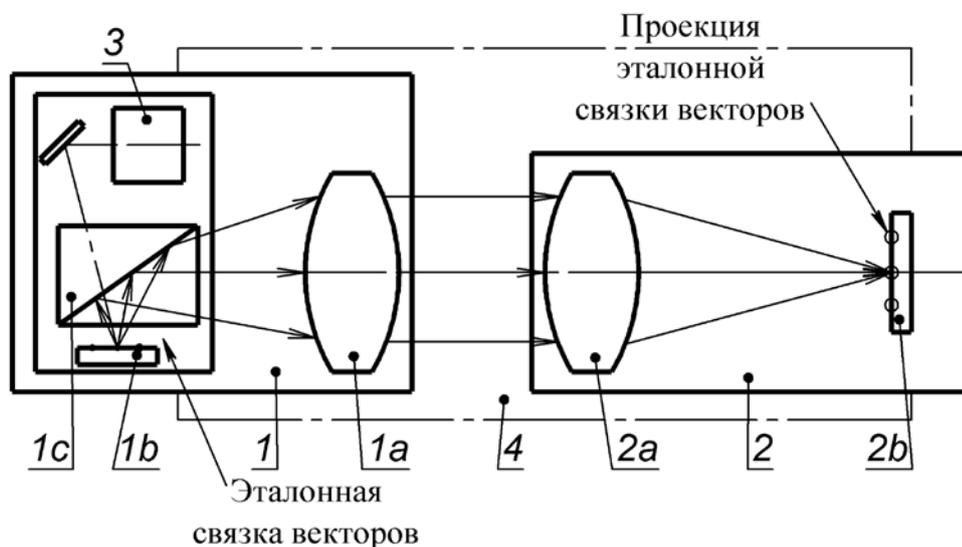


Рисунок 5.1 – Схема калибровки с ходом луча одного из векторов эталонной связки, сформированной тест-объектом в виде стеклянной пластины

5.1.2 В случае, когда для формирования **рисунка тест-объекта в виде массива кругов** используется **DMD** из состава DLP LightCrafter 4500 (рисунок 5.2), в схеме калибровки (рисунок 3.1) вместо тест-объекта и осветителя устанавливается DLP LightCrafter 4500 без объектива 1 (рисунок 4.2). DLP LightCrafter 4500 обеспечивает пространственно-временное управление световым потоком от осветительной системы 3 (рисунок 4.3) через программное обеспечение [84] за счёт DMD 1. DMD выполнено с

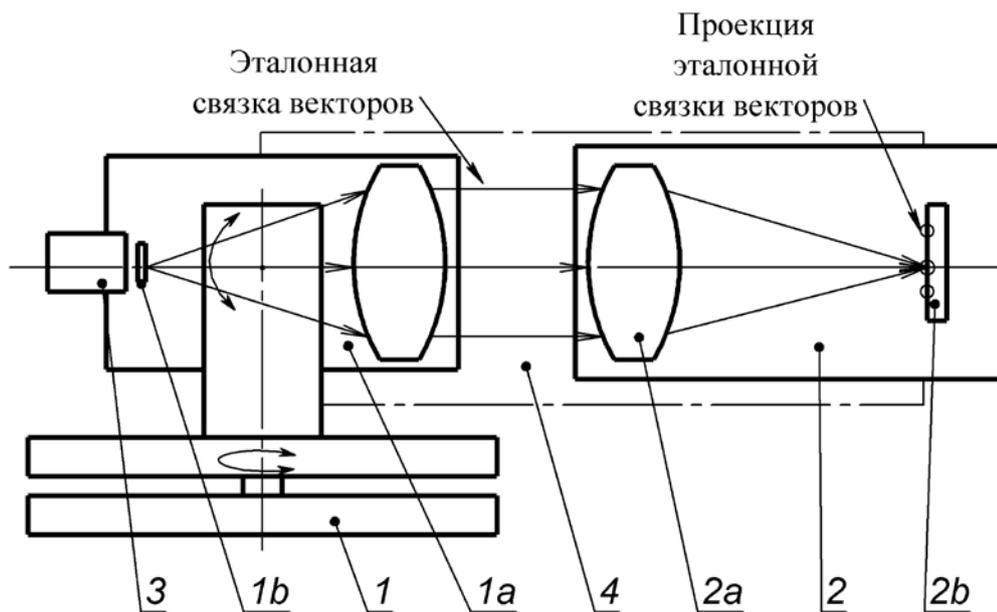
использованием микроэлектронных технологий, что обеспечивает одинаковую пространственную структуру микрозеркал с погрешностью доли микрометров и позволяет использовать массив микрозеркал в качестве измерительной шкалы.



- 1 – коллиматор: 1а – объектив; 1b – DMD, 1с – светоделительная призма;
 2 – макет ОЭА: 2а – объектив, 2b – фокальная плоскость;
 3 – осветитель; 4 – кожух

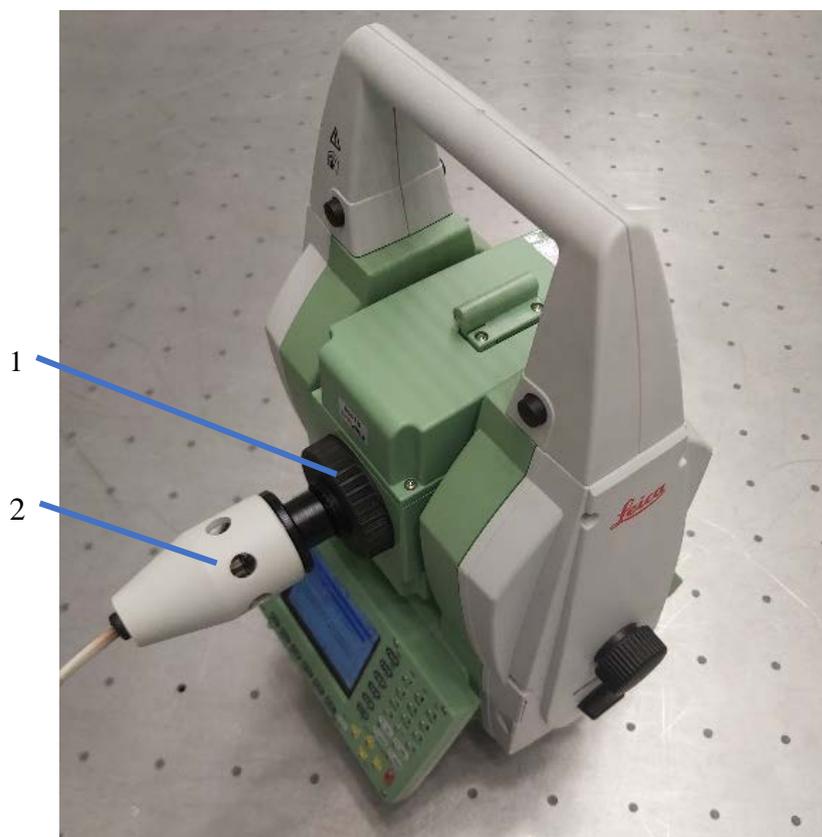
Рисунок 5.2 – Схема калибровки с ходом луча одного из векторов эталонной связки, сформированной DLP LightCrafter 4500

5.1.3 Третий рассматриваемый способ (рисунок 5.3) заключается в использовании в общем случае теодолита. Для этого используются функции измерения углов и проецирования сетки зрительной трубы **тахеометра** Leica TS30 (рисунок 5.4), имеющего малую погрешность измерения угла – 0,5". Тахеометр Leica TS30 устанавливается в схеме (рисунок 3.1) вместо коллиматора. Вместо стандартного окуляра в зрительную трубу 1 (рисунок 5.4) тахеометра Leica TS30 устанавливается специально разработанный осветитель 2 для обеспечения требуемого регулируемого уровня подсветки сетки зрительной трубы.



1 – тахеометр Leica TS30: 1a – зрительная труба, 1b – сетка;
 2 – макет ОЭА: 2a – объектив, 2b – фокальная плоскость;
 3 – осветитель; 4 – кожух

Рисунок 5.3 – Схема калибровки с ходом луча одного из векторов эталонной связки, сформированной тахеометром



1 – зрительная труба; 2 – осветитель

Рисунок 5.4 – Внешний вид тахеометра Leica TS30 для калибровки

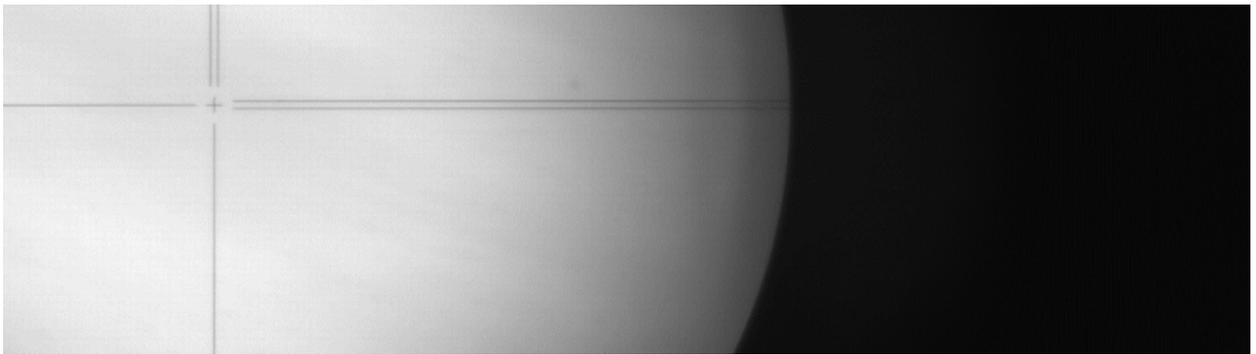


Рисунок 5.5 – Пример изображения сетки тахеометра на фотоприёмнике макета ОЭА

5.2 Особенности методик калибровки и обработки измеренных данных

5.2.1 Для **тест-объекта с рисунком в виде массива кругов** методика подробно описанна в (4.4). В случае формирования рисунка тест-объекта при помощи DMD существуют особенности в режиме работы во время калибровки для минимизации температурных эффектов, которые подробно описаны в (4.2).

5.2.1.1 Коллиматор, калибруемый макет ОЭА и осветитель визуально выставляются соосно.

5.2.1.2 В DMD загружается рисунок тест-объекта с требуемым периодом и размером кругов.

5.2.1.3 Обеспечивается освещённость с учётом интегральной чувствительности фотоприёмников макета ОЭА на уровне (80–90) % максимума освещённости.

5.2.1.4 По изображению с фотоприёмников макета ОЭА достигается расположение изображения рисунка тест-объекта коллиматора в центре фокальной плоскости путём поворотов коллиматора вокруг трёх осей.

5.2.1.5 Макет ОЭА и DMD выключаются и остывают до температуры помещения.

5.2.1.6 Макет ОЭА и DMD выдерживаются во включённом состоянии для достижения рабочего режима съёмки. Производится съёмка ~100 кадров изображения рисунка тест-объекта.

5.2.1.7 Коллиматор поворачивается вокруг своей оптической оси на 180° для устранения систематической погрешности, связанной с коллиматором или DMD.

5.2.1.8 Макет ОЭА и DMD выключаются и остывают до температуры помещения.

5.2.1.9 Макет ОЭА и DMD выдерживаются во включённом состоянии

для достижения рабочего режима съёмки. Производится съёмка ~100 кадров изображения рисунка тест-объекта.

5.2.1.10 Производится математическая обработка измеренных данных аналогично (4.5). Особенностью математической обработки изображения рисунка тест-объекта, сформированного DMD, является, то, что необходимо уточнить период микрозеркал DMD, изменяющийся из-за нагрева DMD и погрешности изготовления микрозеркал DMD. На первой итерации уточнения эффективного фокусного расстояния макета ОЭА (4.5.2.4) при наличии ошибки масштаба, которая приводит к увеличению погрешности, уточняется период микрозеркал. Желательно это сделать предварительно, когда DMD установлена в системе объектив коллиматора–объектив ОЭА с увеличением $(3-5)^{\times}$. Так, после калибровки номинальный период микрозеркал составил: по столбцам 10,786 мкм ($-0,014$ мкм), по строкам 5,409 мкм ($+0,009$ мкм) после 4 ч прогрева DMD.

5.2.2 С помощью тахеометра.

5.2.2.1 Зрительную трубу 2 (рисунок 5.4) тахеометра 1 и калибруемый макет ОЭА визуально выставляют соосно.

5.2.2.2 Обеспечивается освещённость с учётом интегральной чувствительности фотоприёмников макет ОЭА на уровне (80–90) % максимума освещённости.

5.2.2.3 Линейными перемещениями тахеометра, тахеометр и макет ОЭА точно выставляются соосно. Для этого добиваются, чтобы зрачки тахеометра и макета ОЭА не срезались, разница освещённости по всей фокальной плоскости макета ОЭА должна быть не более (5–20) %.

5.2.2.4 Макет ОЭА выключается и остывает до температуры помещения.

5.2.2.5 Макет ОЭА выдерживается во включённом состоянии для достижения рабочего режима съёмки.

5.2.2.6 Поворотом зрительной трубы перекрестие сетки тахеометра (рисунок 5.5) наводится в один из углов фотоприёмника макета ОЭА. Производится съёмка ~100 кадров изображения сетки тахеометра.

5.2.2.7 Зрительная труба поворачивается таким образом, чтобы последовательно спроецировать перекрестие сетки тахеометра на каждый фотоприёмник макета ОЭА аналогично расположению кругов изображения рисунка тест-объекта (рисунок 4.16) и производится съёмка ~100 кадров для каждого положения.

5.2.2.8 Зрительная труба тахеометра переводится через зенит, алидада тахеометра поворачивается на 180° в плоскости горизонта для устранения систематической погрешности тахеометра.

5.2.2.9 Макет ОЭА выключается и остывает до температуры помещения.

5.2.2.10 Макет ОЭА выдерживается во включённом состоянии для достижения рабочего режима съёмки. Производятся действия аналогично (5.2.2.6–5.2.2.7).

5.2.2.11 Поскольку изображение сетки тахеометра является крестом, и проецируется на все фотоприёмники не одновременно, то существуют особенности в математической обработке измеренных данных.

Для одного из положений изображения сетки тахеометра на фотоприёмнике макета ОЭА выбирается область с перекрестием (~30×30 пикселей), используемая в качестве шаблона для приблизительного поиска центра на всём изображении (рисунок 5.6).

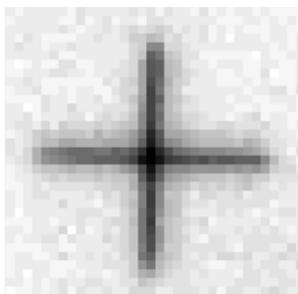


Рисунок 5.6 – Шаблон для предварительного поиска центра перекрестия на изображении сетки тахеометра

Вычисляется нормализованная кросскорреляция $\gamma(u,v)$ между шаблоном t перекрестия сетки тахеометра (рисунок 5.6) и изображением $f(x,y)$ с фотоприёмника макета ОЭА (рисунок 5.5) по формуле (3.14).

Таким образом, для каждого пикселя вычисляются коэффициенты корреляции. Пиксель с максимальным значением коэффициента корреляции будет являться приблизительным центром перекрестия сетки тахеометра. Номер пикселя с максимальным значением корреляции используется для задания центра области расчёта энергетического центра тяжести перекрестия. Область вычисления точных координат центра перекрестия использовалась 40×40 пикселей.

Поскольку рисунок сетки тахеометра непрозрачный на прозрачном фоне, то изображение и шаблон инвертируются. Для снижения влияния шумов значению сигнала присваиваются квадратичные весовые коэффициенты. Для снижения влияния на погрешность вычисления координат центра тяжести перекрестия сетки тахеометра фонового сигнала вводится порог, значения сигнала ниже которого принимаются «0». Величина порога – в 3 раза больше среднего значения фонового сигнала. Фоновый сигнал для разных положений перекрестия сетки тахеометра на фотоприёмниках макета ОЭА может

отличаться из-за остаточной несоосности зрачков зрительной трубы тахеометра и макета ОЭА при проецировании сетки тахеометра в разные части поля зрения макета ОЭА. Отличие фонового сигнала на 15 % в эксперименте может вызвать погрешность до 1 пикселя без введения порога [А-5].

Далее производится математическая обработка измеренных данных аналогично (4.5) за исключением (4.5.2.3), вместо которого пересчитываются угловые координаты положения зрительной трубы тахеометра в линейные.

5.3 Сравнение погрешности способов формирования эталонной связки векторов

Оценена суммарная погрешность калибровки геометрических параметров макетов ОЭА и её составляющие в зависимости от способа задания эталонной связки векторов (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Суммарная погрешность калибровки геометрических параметров макетов ОЭА и её составляющие в зависимости от способа задания эталонной связки векторов, угл. с

Наименование погрешности	Тахеометр Leica TS30	Рисунок тест-объекта в виде массива кругов		
		Нанесённый на стеклянную пластину с использованием литографии	Сформированный DLP LightCrafter 4500	
Для типа макета ОЭА	ОЭА-3ФП	ОЭА-2ФП	ОЭА-3ФП	ОЭА-3ФП
Формирование эталонной связки векторов:	1,5	0,004	0,004	0
Дисторсия объектива коллиматора	–	0,183	0,026	0,026
Кривизна волнового фронта объектива коллиматора	–	0,0005	0,0005	0,0005
Терморастраиваемость коллиматора (вдоль оптической оси)	–	0,101	0,052	0,052
Неплоскостность (сферичность) плоскости формирования рисунка тест-объекта	–	0,046	0,023	0,008
Неравномерность расширения пространственной структуры плоскости формирования рисунка тест-объекта (поперёк оптической оси)	–	0	0	0,046
Алгоритм поиска центров тяжести изображений	0,03	0,055	0,03	0,03
Неравномерность освещённости по полю зрения	0,03	0,055	0,03	0,03
Нестабильность калибруемого макета ОЭА:				
Изменение пространственной структуры пикселей фотоприёмника из-за нагрева	0,313	0,330	0,022	0,022
Шумы фотоприёмника	0,09	0,165	0,09	0,09
Суммарная погрешность (3σ)	1,54	0,46	0,14	0,14

Оценивались следующие способы формирования эталонной связки векторов для калибровки: тахеометром Leica TS30, тест-объектом с рисунком в виде массива кругов нанесённом на стеклянную пластину с использованием литографии и сформированном DLP LightCrafter 4500. Суммарная погрешность определяется суммой квадратов составляющих погрешностей Δ_i под корнем $\Delta = (\sum \Delta_i^2)^{0,5}$. Некоторые влияющие факторы такие как градиент показателя преломления и движение воздушных масс, нестабильность оптических характеристик осветителя, вибрации поверхности, на которой расположено оборудование, представлены без численной оценки, их влияние считается пренебрежимо малым и исключённым за счёт мероприятий (глава 3), реализованных в методиках калибровок.

Результаты предположительной оценки погрешности калибровки показывают, что погрешность способов формирования эталонной связки векторов тест-объектом с рисунком в виде массива кругов нанесённым на стеклянную пластину с использованием литографии и сформированным DLP LightCrafter 4500 сравнима по погрешности и меньше, чем для тахеометра Leica TS30.

Апробированы экспериментально способы формирования эталонной связки векторов, получена погрешность калибровки для макета ОЭА с тремя фотоприёмниками в зависимости от способа формирования эталонной связки векторов (таблица 5.2) [А-5], которая больше при использовании тахеометра Leica TS30. Это обусловлено погрешностью однократного измерения углов тахеометром Leica TS30 во всём диапазоне углов – 0,5" (σ) с дискретностью – 0,1". Предполагается, что эта величина включает систематическую и случайную составляющие. Общую погрешность удалось уменьшить в 3 раза. За счёт большого количества измерений – случайную погрешность. Измерением малых углов, в диапазоне нескольких градусов, переводом через зенит зрительной трубы и поворотом алидады тахеометра на 180° в плоскости горизонта удалось уменьшить систематическую погрешность. Основной отличительной особенностью способов формирования эталонной связки векторов, которая вносит вклад в погрешность калибровки, при использовании тест-объекта в виде стеклянной пластины и DLP LightCrafter 4500 является погрешность технологии их изготовления в части формирования рисунка, для DLP LightCrafter 4500 погрешность меньше в ~2 раза.

Таблица 5.2 – Погрешность калибровки макета ОЭА

Наименование погрешности (3σ)	Способ задания эталонной связки векторов		
	Тахеометр Leica TS30	Рисунок тест-объекта в виде массива кругов	
		Нанесённый на стеклянную пластину с использованием литографии	Сформированный DLP LightCrafter 4500
Определения фотограмметрического фокусного расстояния, мкм	20,7	4,8	18,3
Калибровка остальных геометрических параметров, угл. с	0,48	0,21	0,09

Погрешность определения фотограмметрического фокусного расстояния ~ 4 раза больше при использовании тахеометра Leica TS30 по сравнению с тест-объектом в виде стеклянной пластины, что обусловлено необходимостью вручную изменять положение зрительной трубы для проецирования перекрестия сетки по всей фокальной плоскости макета ОЭА. Это приводит к увеличению времени калибровки – более (1,5–2) ч, что больше, чем для тест-объекта в виде стеклянной пластины и DLP LightCrafter 4500, в (5–6) раз. За это время фотоприёмники макета ОЭА нагреваются, изменяют свои геометрические размеры, изменяют своё расположение друг относительно друга. Погрешность определения фотограмметрического фокусного расстояния также больше при использовании DLP LightCrafter 4500, из-за нагрева DMD, которого нет при использовании тест-объекта в виде стеклянной пластины.

Погрешность калибровки реализованных способов формирования эталонной связки векторов меньше в (3–10) раз по сравнению с существующими, описанными в литературе [21, 23, 24, 25, 26, 27].

Выводы по главе 5

Предложены методики и описаны особенности математической обработки результатов вычисления центров изображений для способов задания эталонной связки векторов в задачах калибровки ОЭА путём последовательного проецирования зрительной трубой тахеометра перекрестия сетки на фокальную плоскость калибруемого макета ОЭА; тест-объектом с нанесённым на стеклянную пластину рисунком в виде массива кругов с

использованием литографии; тест-объектом, реализованным при помощи DMD.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что погрешность калибровки макета ОЭА при использовании тахеометра – не более 0,48"; тест-объекта с нанесённым на стеклянную пластину рисунком в виде массива кругов с использованием литографии – не более 0,21"; тест-объекта, реализованного при помощи DMD, – не более 0,09". Полученные экспериментальные результаты, погрешности калибровки макета ОЭА соответствуют их теоретическим оценкам.

Погрешность калибровки реализованных способов формирования эталонной связки векторов в (3–10) раз меньше по сравнению с существующими другими известными методами, описанными в литературе.

Предложенный способ формирования эталонной связки векторов в задачах калибровки ОЭА при помощи DMD обеспечивает сокращение времени калибровки в 4 раза по сравнению со способом последовательного проецирования зрительной трубой тахеометра перекрестия сетки на фокальную плоскость калибруемого макета ОЭА составляющим (1,5–2) ч. Предложенный способ позволяет проводить калибровку ОЭА с различными параметрами и количеством фотоприёмников без необходимости изготовления специального под калибруемый ОЭА тест-объекта на стеклянной пластине с использованием литографии [А-4, А-5, А-10, А-15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Рассмотрены различные пространственные модуляторы света, которые могут использоваться в качестве тест-объекта в задачах калибровки геометрических параметров ОЭА. Предпочтительным является цифровое микрзеркальное устройство (DMD), имеющее более точную и стабильную пространственную геометрическую структуру, а также однородность и стабильность энергетических характеристик по полю. Предложено устройство коллиматора с DMD, позволяющее использовать его в качестве тест-объекта в задачах калибровки геометрических параметров ОЭА. Рассмотрены варианты исполнения коллиматора в зависимости от калибруемого ОЭА.

Проведена калибровка геометрических параметров макета многоматричного ОЭА с тремя фотоприёмниками разными способами формирования эталонной связки векторов: последовательным проецированием зрительной трубой тахеометра перекрестия сетки на фокальную плоскость ОЭА, тест-объектом с нанесённым на стеклянную пластину рисунком в виде массива кругов с использованием литографии, тест-объектом с рисунком в виде массива кругов, сформированным DMD. Описаны методики калибровки, методы уменьшения влияющих на погрешность факторов, особенности математической обработки для каждого способа формирования эталонной связки векторов. Все три способа задания эталонной связки векторов в общем сравнимы по величине погрешности. Стоит отметить, что по погрешности определения фотограмметрического фокусного расстояния лучший вариант – тест-объект с рисунком в виде массива кругов, нанесённым на стеклянную пластину с использованием литографии. По погрешности калибровки, характеризующей погрешность определения положения фотоприёмников макета ОЭА и компенсации дисторсии, предпочтительный вариант – тест-объект с рисунком в виде массива кругов, сформированным DMD [А-5, А-8, А-10, А-15, А-16, А-17].

2. Исследованы факторы, влияющие на погрешность определения координат центров элементов изображения рисунка тест-объекта, проецируемых коллиматором: соотношение с размером пикселя фотоприёмника, шумы фотоприёмника, соотношение уровня сигнала с величиной максимального значения квантования фотоприёмника, отношение сигнал/шум, влияние качества оптической системы. Установлены пороговые численные значения влияющих факторов. Снижение влияния шумов при математической обработке достигается за счёт сглаживания флуктуаций сигнала с помощью фильтра Винера, применением порога сигнала, значения ниже которого принимаются равными нулю, присвоения значению сигнала

квадратичных весовых коэффициентов. Даны требования к качеству оптической системы [А-1, А-2, А-6, А-7, А-9, А-11].

3. Предложен алгоритм математической обработки изображения с произвольным количеством элементов рисунка тест-объекта по их энергетическим центрам тяжести, что важно в задачах калибровки, где обрабатываются серии изображений с большого количества фотоприёмников. Алгоритм заключается в предварительном поиске требуемой области обнаружения путём применения контурных алгоритмов, а также вычислении кросскорреляции между рисунком тест-объекта и его изображением, что обеспечивает возможность автоматизации процесса поиска, исключение регистрации ложных объектов и уменьшает время обработки от 20 до 100 раз в зависимости от субъективности оператора [А-1, А-2, А-5, А-6, А-7, А-9, А-13].

4. Представлена методика оценки температурного смещения пространственной структуры микрозеркал DMD и пикселей фотоприёмника ОЭА. Величина измеренного температурного смещения DMD, его равномерность характеризуют возможность использования DMD в качестве тест-объекта, которую можно использовать в качестве калибровочных коэффициентов в зависимости от временных режимов калибровки. Представлена методика разделения элементов внешнего ориентирования за счёт обработки измеренных данных по всем фотоприёмникам и ЭВО за счёт обработки измеренных данных по каждому фотоприёмнику в противоположных положения коллиматора. Методика была апробирована при калибровке многоматричных ОЭА с двумя и тремя фотоприёмниками, и позволяет применять её для ОЭА с большим количеством фотоприёмников (десятки–сотни). Методика калибровки, а также методы снижения влияющих на погрешность факторов обеспечивают малую погрешность от $\pm 0,2''$ до $\pm 1,0''$ (3σ), что от 3 до 10 раз меньше по сравнению с существующими методиками [А-3, А-4, А-5, А-10, А-12, А-14].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Предлагаемое устройство коллиматора с DMD в качестве тест-объекта может использоваться как устройство для калибровки геометрических параметров ОЭА, позволяющее формировать требуемый рисунок тест-объекта непосредственно в процессе калибровки, а также проводить калибровки в динамическом режиме [А-5, А-16, А-17].

2. Представленные методы снижения влияния шумов на изображениях в ОЭА, оценка влияния отношения сигнал/шум, уровня сигнала в изображении по сравнению с величиной максимального значения квантования

фотоприёмника, соотношения с размером пикселя фотоприёмника ОЭА на погрешность определения координат центров объектов, исследованные алгоритмы определения центра изображения объекта могут быть полезны в задачах, где необходимо определять и отслеживать смещение центров объектов на изображениях: в задачах калибровки геометрических параметров ОЭА, звёздных датчиках, автоколлиматорах, пеленгаторах, датчиках Шака-Гартмана и других ОЭА [А-1, А-2, А-4, А-5, А-6, А-7, А-9, А-10, А-11, А-13, А-15].

3. Представленная методика калибровки температурного смещения как DMD, так и цифровой камеры может применяться для исследования пространственной стабильности матричной структуры фотоприёмников ОЭА, что особенно важно, когда матричная структура фотоприёмника является измерительной шкалой, а также когда ОЭА осуществляют съёмку в течение длительного промежутка времени; в ОЭА ДЗЗ, когда по снимкам производится картографирование; в системах машинного зрения, автоколлиматорах и других ОЭА [А-3, А-12, А-14].

4. Представленная методика разделения элементов внутреннего и внешнего ориентирования может применяться для калибровки многоматричных ОЭА с разным количеством фотоприёмников [А-4].

5. Представленные особенности реализации распространённых методов калибровки при помощи коллиматора с тест-объектом в виде стеклянной пластины с рисунком, нанесённым с использованием литографии и тахеометром могут использоваться для калибровки геометрических параметров ОЭА, в том числе ОЭА ДЗЗ [А-5].

Устройство коллиматора с DMD в качестве тест-объекта защищено патентами на изобретение в Республике Беларусь и Российской Федерации (ПРИЛОЖЕНИЕ А) [А-16, А-17]. Результаты исследований используются в ОАО «Пеленг» и на кафедре «Лазерная техника и технология» БНТУ (ПРИЛОЖЕНИЕ Б).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Библиографический список

1. БЕЛТА – Новости Беларуси [Электронный ресурс]. – Режим доступа: belta.by. НАН Беларуси и «Роскосмос» подписали соглашение о расширении группировки спутников. 21.01.2020. <https://www.belta.by/society/view/nan-belarusi-i-roskosmos-podpisali-soglashenie-o-rasshirenii-gruppirovki-sputnikov-376705-2020/>. – Дата доступа: 21.01.2020.
2. ESA Earth Observation Portal. Directory Satellite Missions Airborne Sensors Observation of the Earth and its Environment [Electronic resource]. – Mode of access: directory.eoportal.org. WorldView-4 <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-4>. – Date of access: 01.10.2020.
3. FGDC-STD-007.3-1998 Geospatial Positioning Accuracy Standards. Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. Subcommittee for Base Cartographic Data. Federal Geographic Data Committee. – fgdc.com – 28 p.
4. Вершинин, В.И. Априорная оценка точности координатных определений по космическим снимкам / В.И. Вершинин. – М.: Типография «Новости», 2011. – 250 с.
5. Лобанов, А.Н. Фотограмметрия / А.Н. Лобанов // Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
6. ISO 19130-1 Geographic information – Imagery sensor models for geopositioning Part 1: Fundamentals. – iso.org – 152 p.
7. Воронин, Е.Г. Технология фотограмметрической обработки космических снимков, имеющих перекрытия / Е.Г. Воронин // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. – № 2(13). – С. 23–27.
8. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. В.В. Еремеева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 460 с.
9. Семенцов, А. В. Сравнение результатов калибровки камер, полученных с использованием различных методик и моделей дисторсии / А. В. Семенцов, В. Н. Никитин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2015. – № 4(1). – С. 17–23.
10. Jacobsen, Karsten. Issues and method for in-flight and on-orbit calibration / Karsten Jacobsen // Workshop on Radiometric and Geometric Calibration, Gulfport, 2004. – P. 83–92.
11. Jacobsen, Karsten. Calibration of imaging satellite sensors / Karsten Jacobsen // ISPRS Workshop: Topographic mapping from space (with special

emphasis on small satellites), ISPRS volume number: XXXVI-1/W41, Ankara, Turkey, 2006. – 7 p.

12. Comp, Chris. WorldView-3 Geometric Calibration / Chris Comp, David Mulawa // 14th JACIE (Joint Agency Commercial Imagery Evaluation) Workshop, 5–7 May 2015, Tampa. – 19 p.

13. Lebègue, Laurent. Pleiades satellites image quality in-orbit calibration and assessment / Laurent Lebègue [et al.] // JACIE 2015 Session № 6, 5–7 May 2015, Tampa. – 42 p.

14. Самойлов, С.Ю. Способы уменьшения погрешности географической привязки снимков с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / С.Ю. Самойлов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2012. – № 2(13). – С. 19–22.

15. e-GEOS an ASI/Telespazio company. Price list. Pléiades, SPOT, Vision-1, TerraSAR-X, Elevation 10, WorldDEM™. – e-geos.it, 10 May 2022 – 17 p

16. e-GEOS an ASI/Telespazio company. Price List. WorldView-1/2/3/4, GeoEye-1, QuickBird, IKONOS. – e-geos.it, 10 May 2022 – 11 p.

17. Astrium GEO-Information Services. Pléiades International Price List. Astrium an EADS company. – intelligence-airbusds.com – 4 p.

18. Apollo Mapping. The Image Hunter [Electronic resource]. – Mode of access: apollomapping.com. Pléiades Neo Satellite Imagery Samples. Pricing. <https://apollomapping.com/pleiades-neo-satellite>. – Date of access: 10.05.2022.

19. Геопространственное агентство «Иннотер» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: innoter.com. Космические снимки сверхвысокого разрешения. <https://innoter.com/articles/kosmicheskie-snimki-sverkhvysokogo-razresheniya/>. – Дата доступа: 10.05.2022.

20. Оптические измерения: учеб. пособие / А.Н. Андреев, Е.В. Гаврилов, Г.Г. Ишанин, и др. – М.; Университетская книга; Логос, 2008. – 416 с.

21. Архипов, С.А. Фотограмметрические параметры оптико-электронной аппаратуры / С.А. Архипов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2008. – № 4. – С. 105–115.

22. Poli, Daniela. Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors: A dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Daniela Poli // Zurich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2005. – DISS. ETH NO. 15894. – 205 p.

23. Савицкий, А.М. Фотограмметрическая калибровка ОЭК ВР «Элегия» / А.М. Савицкий [и др.] // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Материалы XVII научно-технической конференции – 13–18 сентября 2021 г., Сочи. – 17 с.

24. Li, Jin. Optical focal plane based on MEMS light lead-in for geometric camera calibration / Jin Li, Zilong Liu // Microsystems & Nanoengineering. – 2017.

– № 3. – P. 1–7.

25. Li, Jin. Micro Coded-Aperture Lead-In of Light for Calibrating Remote Sensing Cameras / Jin Li, Yuan Zhang // IEEE Photonics Technology Letters, 15 November 2017. – Vol. 29, № 22. – P.1939–1942.

26. Wang, Peng. Self-registration shape measurement based on fringe projection and structure from motion / Peng Wang, Liyan Zhang // Appl. Opt. – 2020. – 59. – P. 10986–10994.

27. Zhang, Wei. Sub-pixel projector calibration method for fringe projection profilometry / Wei Zhang // Opt. Express. – 2017. – 25. – P. 19158-19169.

28. Hog, E. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars / E. Hog, [et al.] // Ibid. – 2000. – Vol. 355. – P. L27–L30.

29. Rubinsztein-Dunlop, H. Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop [et al.] // J. Opt. – 2016. – 19. – P. 013001.

30. Handbook of Optoelectronics Second Edition Enabling Technologies Volume 2. Edited by John P. Dakin, Robert G. W. Brown. Taylor & Francis, CRC Press, 2019 – 705 p.

31. Lazarev, Grigory. Beyond the display: phase-only liquid crystal on Silicon devices and their applications in photonics / Grigory Lazarev [et al.] // Opt. Express. – 2019. – 27. – P. 16206–16249.

32. Tom's Hardware Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: thg.ru. Устройство проекторов: обзорная статья. Редакция THG. 17.04.2014. http://www.thg.ru/display/ustroistvo_proektorov_tehnologii/index.html. – Дата доступа: 17.10.2015.

33. Baker, Matthew J. A contrast between DLP and LCD digital projection technology for triangulation based phase measuring optical profilometers / Matthew J. Baker [et al.] // Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology III; Event: Optics East 2005, Boston, MA, United States. – 12 p.

34. Lizana, A. Characterization and analysis of LCoS displays: application to diffractive optics / A. Lizana [et al.] // Optics and Photonics for Information Processing III, 2019. – 12 p.

35. Huang, Y. Liquid-Crystal-on-Silicon for Augmented Reality Displays / Y. Huang // Applied Sciences. – 2018. – 8(12). – P. 2366.

36. Silicon Light Machine [Electronic resource]. – Mode of access: siliconlight.com. IV Response. <http://www.siliconlight.com/en/technology/iv-response.html>. – Date of access: 18.05.2021.

37. Silicon Light Machine [Electronic resource]. – Mode of access: siliconlight.com. GLV Modules. <http://www.siliconlight.com/en/products/module.html>. – Date of access: 18.05.2021.

38. Forbes, Andrew. Structured Light: Tailored for Purpose / Andrew Forbes

// Optics & Photonics News. – 2020. – 31(6). – P. 24–31.

39. Moreno, Ignacio. Special Section Guest Editorial: Spatial Light Modulators: Devices and Applications / Ignacio Moreno [et al.] // Optical Engineering. – 2021. – 59(4). – P. 041201.

40. Bartlett, Terry A. Adapting Texas Instruments DLP technology to demonstrate a phase spatial light modulator / Terry A. Bartlett, William C. McDonald, James N. Hall. // Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications XI. Event: SPIE OPTO, 2019, San Francisco, California, United States. – 13 p.

41. DLP4500 .45 WXGA DMD. Datasheet. Literature Number: DLPS151 – ti.com, January 2019 – 56 p.

42. DLP® Technology and Products. Literature Number: DLPB010E – ti.com, Q2 2016 – 9 p.

43. DLP660TE 0.66 4K UHD DMD. Datasheet. Literature Number: DLPS163 – ti.com, April 2019 – 45 p.

44. Lee, Benjamin. Introduction to ± 12 Degree Orthogonal Digital Micromirror Devices (DMDs) / Benjamin Lee // DLPA008B – ti.com, July 2008 – Revised February 2018 – 13 p.

45. TI DLP® LightCrafter™ 4500. Evaluation Module. User's Guide. Literature Number: DLPU011F – ti.com, July 2013 – Revised July 2017 – 66 p.

46. DLP2010 .2 WVGA DMD. Datasheet. Literature Number: DLPS123 – ti.com, February 2019 – 43 p.

47. DLP7000 DLP® 0.7 XGA 2x LVDS Type A DMD. Datasheet. Literature Number: DLPS026F – ti.com, August 2012 – Revised June 2019 – 55 p.

48. Coupling prism assembly and projection system using the same. US5309188A G02B27/1026 / Herschel C. Burstyn, Plainsboro, N. J. David Sarnoff Research Center, Inc., Princeton, N. J. – 03.05.1994.

49. Aerotech PlanarDLA Hardware Manual. Revision: 1.03.00. – aerotech.com – 52 p.

50. Digital Monochrome and Color 2 Megapixel Progressive Scan Camera CV-M2CL CV-M8CL. Operation Manual. Camera: Revision D Manual: Version 2.2. – jai.com – 44 p.

51. Datasheet: KAI-2020 1600 (H) x 1200 (V) Interline CCD Image Sensor. Publication Order Number: KAI-2020/D. – kodak.com, December, 2015 – Rev. 4. – 48 p.

52. Handbook of optics. Vol. II. Design, Fabrication and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry. Third edition. Michael Bass [et al.]. – 2010. – 1272 p.

53. Ляшко, О.М. Проектирование оптико-электронных приборов наблюдения: учебно-методическое пособие / О.М. Ляшко. – Минск: БНТУ,

2009. – 77 с.

54. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок. Пер. с англ. / Дж. Тейлор – М.: Мир, 1985. – 272 с.

55. EMVA Standard 1288 Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras. Release 4.0. Linear. – emva.org, 16 June 2021 – 51 p.

56. Формозов, Б.Н. Аэрокосмические фотоприёмные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах / Б.Н. Формозов. Учеб. пособие / СПбГУАП. СПб., 2002. – 120 с.

57. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. Соифера В.А. – 2-е изд., испр. – М.: Физмалит, 2003 – 784 с.

58. ГОСТ 26086-84 Группа Т35. Межгосударственный стандарт. Лазеры. Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения. – Введ. 01.07.1985. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 16 с.

59. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MatLab; пер. с англ. / Р. Гонсалес., Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Изд-во «Техносфера», 2006. – 616 с.

60. GigE Vision Area Scan Camera. Genie™ HM/HC Series Camera User's Manual Genie Framework 2.00. Document Date: April 5, 2013. Document Number: SA-GENM-HUM00. – teledynedalsa.com – 141 p.

61. Федосеев, В.И. Приём пространственно-временных сигналов в оптико-электронных системах (пуассоновская модель): монография / В.И. Федосеев – М.: Университетская книга, 2011. – 232 с.

62. Аванесов, Г.А. Исследование смещения энергетического центра изображений звёзд относительно геометрического центра на ПЗС матрице и коррекция методической ошибки / Г.А. Аванесов, Т.В. Кондратьева, А.В. Никитин // 22–25 сентября 2008, Таруса. Сборник трудов. М.: ИКИ РАН, 2009. – С. 421–446.

63. Jinyun, Yan. Dynamic Imaging Model and Parameter Optimization for a Star Tracker / Yan Jinyun, Jiang Jie, Zhang Guangjun // Optics Express. – 2016. – Vol. 24, Iss. 6. – P. 5961–5983.

64. Yin, Xiaoming. Adaptive Thresholding and Dynamic Windowing Method for Automatic Centroid Detection of Digital Shack-Hartmann Wavefront Sensor / Xiaoming Yin [et al.] // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48, Iss. 32, – P. 6088–6098.

65. Zhengrong, Huang. Accurate projector calibration based on a new point-to-point mapping relationship between the camera and projector images / Huang Zhengrong [et al.] // Applied Optics. – 2015. – Vol. 54, Iss. 3. – P. 347–356.

66. Lewis, J.P. Fast Normalized Cross-Correlation / J.P. Lewis // Vision Interface. – 1995. – P. 120–123.

67. Addendum to EMVA Data Report. Basler acA2040-90um EMVA Standard 1288. Document Number: BD000594 Version: 03. – basler.com – 42 p.

68. Canny, John. A Computational Approach to Edge Detection / John Canny // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine intelligence, Nov. 1986. – Vol. PAMI-8, Issue 6. – P. 679–698.
69. Groe, E. Determination of ocular torsion by means of automatic pattern recognition / E. Groe [et al.] // IEEE Transactions on biomedical engineering, 1996. – Vol. 43, Issue 5. – P. 471–479.
70. Haralick, Robert M. Computer and Robot Vision / Robert M. Haralick, Linda G. Shapiro // Volume II, Addison-Wesley, 1992. – 630 p.
71. Гвоздева, Н.П. Прикладная оптика и оптические измерения / Н.П. Гвоздева, К.И. Коркина // Серия: Учебник для техникумов. – М.: Машиностроение, 1976. – 383 с.
72. Окатов, М.А. и др. Справочник технолога-оптика. Под ред. М.А. Окатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.
73. Сакин, И.Л. Инженерная оптика / И.Л. Сакин // Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1976. – 288 с.
74. Технология производства оптических деталей: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию / В.И. Шамкалович, Н.О. Старосотников, А.С. Козерук, В.О. Кузнечик; Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Лазерная техника и технология». – Минск: БНТУ, 2017. – 97 с.
75. Kelly, Thu-Lan. Phase-aberration correction with dual liquid-crystal spatial light modulators / Thu-Lan Kelly, J. Munch // Appl. Opt. – 1998. – 37 (22). – P. 5184–5189.
76. Chen, Guanghao. Light recycling beam steering on a DMD lidar / Guanghao Chen // Proc. SPIE 10757, Optical Data Storage 2018: Industrial Optical Devices and Systems, 107570G, 14 September 2018. – 8 p.
77. Jesacher, A. Wavefront correction of spatial light modulators using an optical vortex image / A. Jesacher [et al.] // Opt. Express. – 2007. – 15(9). – P. 5801–5808.
78. Scholes, Stirling. Structured light with digital micromirror devices: a guide to best practice / Stirling Scholes [et al.] // Optical Engineering. – 2019. – 59(4). – P. 041202.
79. Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH. DWL 66+ The Ultimate Photolithography Tool. – heidelberg-instruments.com, Brochure. 09.2019.– 4 p.
80. Плебанович, В.И. Безмасковая литография – требование сегодняшнего дня / В.И. Плебанович // Электроника НТБ. – 2015. – № 7. – С. 112–118.
81. Renishaw plc. High-precision laser interferometer feedback systems. – renishaw.com, Brochure. Issued 0112 L-9904-2496-04-A.– 24 p.

82. Chen, Rui. Accurate calibration method for camera and projector in fringe patterns measurement system / Rui Chen [et al.] // *Appl. Opt.* – 2016. – 55. – P. 4293–4300.

83. Li, Zhongwei. Accurate calibration method for a structured light system / Zhongwei Li [et al.] // *Optical Engineering.* – 2008. – 47(5). – P. 053604.

84. Архипов, С.А. Юстировка и аттестация длиннофокусного трёхзеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения / С.А. Архипов [и др.] // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение».* – 2009. – № 4. – С. 24–36.

85. ГОСТ 8.050-73 Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений (Изменённая редакция, Изм. № 1). – Введ. 01.01.1975. – М.: Издательство стандартов, 1975. – 24 с.

Список публикаций соискателя учёной степени

Статьи в научных журналах

А-1. Старосотников, Н.О. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприёмниками / Н.О. Старосотников, Р.В. Фёдорцев // *Наука и техника.* – 2015. – № 5. – С. 71–76.

А-2. Старосотников, Н.О. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах / Н.О. Старосотников, Р.В. Фёдорцев // *Наука и техника.* – 2018. – 17(1). – С. 79–86.

А-3. Starasotnikau, M.A. Assessment of Temperature Effects in Interior Orientation Parameters Calibration of Optoelectronic Devices / M.A. Starasotnikau // *Devices and Methods of Measurements.* – 2020. – 11(2). – С. 122–131.

А-4. Старосотников, Н.О. Методика определения элементов внутреннего ориентирования многоматричных оптико-электронных аппаратов / Н.О. Старосотников, И.В. Подскребкин, Р.В. Фёдорцев // *Наука и техника.* – 2020. – Т. 19, № 5. – С. 428–436.

А-5. Старосотников, Н.О. Точность определения элементов внутреннего ориентирования оптико-электронных аппаратов различными способами формирования эталонной связки векторов. / Н.О. Старосотников, Р.В. Фёдорцев // *Фотоника.* – 2022. – 16(1). С. 60–74.

Материалы и тезисы докладов конференций

А-6. Старосотников, Н.О. Высокоточный цифровой автоколлиматор для измерения малых углов / Н.О. Старосотников // *Новые направления развития приборостроения: материалы 7-й Международ. студ. науч.-техн. конф., 23–25 апр. 2014 г.* – Минск: БНТУ, 2014. – С. 244.

А-7. Старосотников, Н.О. Моделирование методической погрешности определения центра тяжести изображения тест-объекта в оптических измерительных приборах с матричными приёмниками / Н.О. Старосотников, Р.В. Федорцев // Приборостроение-2014: материалы 7-й Международной научно-технической конференции, 19–21 ноября 2014 г., Минск / ред. колл.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 385–386.

А-8. Старосотников, Н.О. Сравнение изображающих устройств для контрольно-юстировочных операций оптико-электронных приборов / Н.О. Старосотников, Р.В. Фёдорцев // Новые направления развития приборостроения: материалы 8-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., 22–24 апреля 2015 г. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 226.

А-9. Старосотников, Н.О. Метод снижения влияния шумов фоновое сигнала при определении координат энергетического центра тяжести изображения в ОЭП / Н.О. Старосотников, Р.В. Фёдорцев // Приборостроение-2016: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф., 23–25 ноября 2016 г. – Минск: БНТУ, 2016. – С. 133–135.

А-10. Кожевников, Д.А. Методы геометрической калибровки оптико-электронных приборов / Д.А. Кожевников, Р.В. Федорцев, Н.О. Старосотников // Приборостроение-2016: материалы 9-й международной научно-технической конференции, 23–25 ноября 2016 г., Минск / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2016. – С. 332–334.

А-11. Старосотников, Н.О. Анализ влияющих аберраций на точность в ОЭП с определением координат энергетического центра тяжести изображений / Н.О. Старосотников, Д.А. Кожевников // Новые направления развития приборостроения: материалы 10-й международной научно-технической конференции молодых учёных и студентов, 26–28 апреля 2017 г., Минск: в 2 т. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2017. – Т. 2. – С. 62–63.

А-12. Старосотников, Н.О. Методика калибровки температурного дрейфа фоточувствительных элементов промышленных цифровых видеокамер / Н.О. Старосотников, Р.В. Фёдорцев // Новые направления развития приборостроения: материалы 11-й Международной научно-технической конференции молодых учёных и студентов, 18–20 апреля 2018 г., Минск / пред. редкол. О.К. Гусев. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 278.

А-13. Старосотников, Н.О. Точность кросскорреляционного алгоритма определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах / Н.О. Старосотников, Р.В. Фёдорцев // Приборостроение-2018: материалы 11-й Международной научно-технической конференции, 14–16 ноября 2018 г.,

Минск / редкол.: О.К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 398–400.

А-14. Старосотников, Н.О. Методика калибровки пространственной стабильности матричной структуры микрзеркальных устройств, применяемых в качестве измерительных устройств / Н.О. Старосотников, Р.В. Федорцев // Новые направления развития приборостроения: материалы 12-й Международной научно-технической конференции молодых учёных и студентов, 17–19 апреля 2019 г., Минск / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 272–273.

А-15. Старосотников, Н.О. Особенности схем определения элементов внутреннего ориентирования оптико-электронных аппаратов / Н.О. Старосотников, Р.В. Фёдорцев // Приборостроение-2019: материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 13–15 ноября 2019 г., Минск / редкол.: О.К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 411–413.

Патенты

А-16. Цифровой коллиматор: патент на изобретение. ВУ 21592 С1. 2017.02.28 Респ. Беларусь, МПК G 02В 27/30 (2006/01), G 01М 11/00 (2006/01) / Д.В. Незаконов, И.В. Подскребкин, Н.О. Старосотников: заявитель Открытое акционерное общество «Пеленг» (ВУ) – № а 20150333; заявл. 2015.06.18 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2018. – № 1. – С. 152.

А-17. Цифровой коллиматор: патент на изобретение. RU 2664542 С2. 2018.08.20 РФ, МПК G02В 27/30 (2006.01), H04N 5/74 (2006.01), G02В 26/08 (2006.01) / Н.О. Старосотников, И.В. Подскребкин, Д.В. Незаконов: заявитель Открытое акционерное общество «Пеленг» (ВУ) – № а 2016118945; заявл. 2017.11.20.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Материалы, подтверждающие право соискателя на результаты
интеллектуальной деятельности

РЭСПУБЛІКА БЕЛАРУСЬ



ПАТЭНТ

НА ВЫНАХОДСТВА

№ 21592

Цифровой коллиматор

выдадзены

Нацыянальным цэнтрам інтэлектуальнай уласнасці
ў адпаведнасці з Законам Рэспублікі Беларусь
«Аб патэнтах на вынаходствы, карысныя мадэлі, прамысловыя ўзоры»

Патэнтаўладальнік (патэнтаўладальнікі):

Открытое акционерное общество "Пеленг" (ВУ)

Аўтар (аўтары):

Незаконов Денис Владимирович; Подскребкин Иван Вячеславович; Старосотников Николай Олегович (ВУ)

Заяўка № **а 20150333** Дата падачы: **18.06.2015**

Зарэгістравана ў Дзяржаўным рэестры
вынаходстваў: **30.10.2017**

Дата пачатку дзеяння: **18.06.2015**

Генеральны дырэктар

П.М. Броўкін

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2664542

ЦИФРОВОЙ КОЛЛИМАТОР

Патентообладатель: *Открытое акционерное общество "Пеленг"*
(ВУ)

Авторы: *Старосотников Николай Олегович (ВУ), Подскребкин Иван Вячеславович (ВУ), Незаконов Денис Владимирович (ВУ)*

Заявка № 2016118945

Приоритет изобретения 18 июня 2015 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 20 августа 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 16 мая 2036 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Материалы о практическом использовании (внедрении) результатов
диссертации



АДКРЫТАЕ АКЦЫЯНЕРНАЕ ТАВАРЫСТВА «ПЕЛЕНГ»

ул. Макаёнка, 23, 220023, г. Минск, Республика Беларусь
тэл.: +375 17 267 33 70 факс: +375 17 263 65 42
р/р 3012540170173 у ЗАТ "РРБ-Банк" г. Минска, код 110
e-mail: info@peleng.by www.peleng.by

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ПЕЛЕНГ»

ул. Макаёнка, 23, 220023, г. Минск, Республика Беларусь
тел.: +375 17 267 33 70 факс: +375 17 263 65 42
р/с 3012540170173 в ЗАО "РРБ-Банк" г. Минска, код 110
e-mail: info@peleng.by www.peleng.by



АКТ

о практическом использовании результатов исследования
в производстве

Комиссия из состава сотрудников НКУ «Космос» ОАО «Пеленг» подтверждает, что при выполнении работ по проектированию изделия «Коллиматор проекционный» из состава «Установки для измерения элементов внутреннего ориентирования оптико-электронных аппаратов» учтена оценка влияния уровня сигнала в изображении тест-объекта, формируемого на видеокамере коллиматора проекционного, на точность определения пространственных координат изображения энергетического центра тяжести тест-объекта, сделанная Н.О. Старосотниковым, магистрантом БНТУ. Результаты исследования представлены в работе «Факторы, влияющие на точность определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприёмниками».

Вед. инженер ОАО «Пеленг»

М.Н. Котов

Нач. сектора ОАО «Пеленг»

Д.В. Незаконов

Инженер-конструктор 1 кат. ОАО «Пеленг»

И.В. Подскребкин

Старосотников Н.О., (017) 263-23-37



Система менеджменту якасці ААТ «Пеленг» сертыфікавана па ISO 9001:2008
Система менеджмента якасця ОАО «Пеленг» сертыфіцыравана па ISO 9001:2008



АДКРЫТАЕ АКЦЫЯНЕРНАЕ ТАВАРЫСТВА «ПЕЛЕНГ»

ул. Макаёнка, 25, 220114, г. Минск, Республика Беларусь
тэл.: +375 17 267 33 70 факс: +375 17 369 75 42
IBAN BY23 REDJ 3012 1000 0390 2000 0933
у ЗАТ «РРБ-Банк» г. Мінска, BIC REDJBY22
e-mail: info@peleng.by www.peleng.by

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ПЕЛЕНГ»

ул. Макаёнка, 25, 220114, г. Минск, Республика Беларусь
тэл.: +375 17 267 33 70 факс: +375 17 369 75 42
IBAN BY23 REDJ 3012 1000 0390 2000 0933
в ЗАО «РРБ-Банк» г. Мінска, BIC REDJBY22
e-mail: info@peleng.by www.peleng.by



АКТ

о практическом использовании результатов исследования в производстве

Комиссия из состава сотрудников НКУ «Космос» ОАО «Пеленг» подтверждает, что Н.О. Старосотниковым были проведены исследования, результаты которых применены при выполнении ОКР «Разработка установки для измерения дисторсии оптико-электронных аппаратов» в ОАО «Пеленг». Проведённые исследования включают:

- оценку возможности использования микрозеркального устройства в качестве тест-объекта для калибровки элементов внутреннего ориентирования оптико-электронных аппаратов;
- оценку влияния температурных эффектов во время работы микрозеркального устройства на периодичность матричной структуры микрозеркал.

Нач. отдела ОАО «Пеленг»

И.В. Подскребкин

Зам. нач. отдела ОАО «Пеленг»

М.Н. Котов

Зам. нач. отдела ОАО «Пеленг»

Д.В. Незаконов

Старосотников Н.О. (017) 369-83-37



Система менеджменту якасці ААТ «Пеленг» сертыфікавана па ISO 9001:2015
Система менеджмента качества ОАО «Пеленг» сертифицирована по ISO 9001:2015



АДКРЫТАЕ АКЦЫЯНЕРНАЕ ТАВАРЫСТВА «ПЕЛЕНГ»
вул. Макаёнка, 25, 220114, г. Мінск, Рэспубліка Беларусь
тэл.: +375 17 389 11 00 факс: +375 17 389 11 24
IBAN BY23 REDJ 3012 1000 0390 2000 0933
у ЗАТ «РРБ-Банк» г. Мінска, BIC REDJBY22
e-mail: info@peleng.by www.peleng.by

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ПЕЛЕНГ»
ул. Макаёнка, 25, 220114, г. Минск, Республика Беларусь
тел.: +375 17 389 11 00 факс: +375 17 389 11 24
IBAN BY23 REDJ 3012 1000 0390 2000 0933
в ЗАО «РРБ-Банк» г. Минска, BIC REDJBY22
e-mail: info@peleng.by www.peleng.by



АКТ
о практическом использовании результатов исследования
в производстве

Комиссия из состава сотрудников НКУ «Космос» и КПУ «Пеленг-Оптик» ОАО «Пеленг» подтверждает, что Н.О. Старосотниковым были проведены исследования, результаты которых применены в «Установке для измерения углов между аппаратами»:

- при разработке методики измерений с учётом влияния температурных эффектов фотоприёмников калибруемых оптико-электронных аппаратов;
- для повышения точности вычисления координат изображений тест-объектов на фотоприёмниках калибруемых оптико-электронных аппаратов.

Зам. нач. управления ОАО «Пеленг»		И.В. Подскребкин
Зам. нач. отдела ОАО «Пеленг»		М.Н. Котов
Зам. нач. отдела ОАО «Пеленг»		Д.В. Незаконов

Старосотников (017) 389-12-40



Система менеджменту якасці ААТ «Пеленг» сертыфікавана па ISO 9001:2015
Система менеджмента качества ОАО «Пеленг» сертифицирована по ISO 9001:2015



Проректор по учебной работе

д.т.н., профессор

О.К. Гусев

2021 года

АКТ № 214

о практическом использовании результатов исследований в учебном процессе

Комиссия в составе: декана приборостроительного факультета, к.т.н., доцента Свистуна А.И., заведующего кафедрой «Лазерная техника и технология» д.ф.-м.н., профессора Кулешова Н.В., д.т.н., профессора кафедры «Лазерная техника и технология» Козерука А.С., настоящим подтверждает, что на кафедре «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета осуществлено внедрение в учебный процесс при изучении дисциплины «Специальные оптические приборы» методов и способов геометрической калибровки оптико-электронных аппаратов (ОЭА) для дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) в зависимости от их технических характеристик, разработанных Старосотниковым Николаем Олеговичем.

Научно обоснованные предложения позволили дополнить и актуализировать курс для студентов, обучающихся по специальности 1-38.01.02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы».

Предложена методика геометрической калибровки ОЭА дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), с оптической системой, сфокусированной на бесконечность, в которых итоговое изображение формируется путём «сшивки» фрагментов изображений, сформированных несколькими фотоприёмниками. Для формирования тест-объекта применяется цифровое микрзеркальное устройство (DMD), которое позволяет создавать в цифровом виде практически любую форму и размер рисунка тест-объекта, а пространственная структура чувствительных элементов фотоприёмников является измерительной шкалой.

Внедрено в качестве лекционного материала в рамках раздела 6. Сборка оптических приборов. Тема 6.1. Контроль и юстировка поворота изображения и разворота сетки в телескопических приборах. Дополнено пунктом 6.1.1. Геометрическая калибровка оптико-электронных аппаратов (ОЭА) по учебной дисциплине «Специальные оптические приборы» (рег. № УД-ПСФ 84-70/уч.).

Внедрение в учебный процесс результатов научных исследований направлено на повышение качества образования, овладения студентами кафедры специальными знаниями, умениями и навыками в области методов и способов юстировки оптико-электронных приборов и аппаратов.

Внедрение в учебный процесс рассмотрено на заседании кафедры «Лазерная техника и технология» (протокол заседания кафедры №8 от «21» апреля 2021 г.).

Члены комиссии:

А.И. Свистун

Н.В. Кулешов

А.С. Козерук

С.А. Сидоров

Согласовано: Начальник ЦРИО и ОУП



АДКРЫТАЕ АКЦЫЯНЕРНАЕ ТАВАРЫСТВА «ПЕЛЕНГ»

вул. Макаёнка, 25, 220114, г. Мінск, Рэспубліка Беларусь
тэл.: +375 17 389 11 00 факс: +375 17 389 11 24
IBAN BY23 REDJ 3012 1000 0390 2000 0933
у ЗАТ «РРБ-Банк» г. Мінска, BIC REDJBY22
e-mail: info@peleng.by www.peleng.by

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ПЕЛЕНГ»

ул. Макаёнка, 25, 220114, г. Минск, Республика Беларусь
тел.: +375 17 389 11 00 факс: +375 17 389 11 24
IBAN BY23 REDJ 3012 1000 0390 2000 0933
в ЗАО «РРБ-Банк» г. Минска, BIC REDJBY22
e-mail: info@peleng.by www.peleng.by

Утверждаю
Начальник НКУ «Космос»
ОАО «Пеленг»

Д.А. Сикорский
«03» 06 2021 г.



АКТ

о практическом использовании результатов исследования в производстве

Комиссия из состава сотрудников НКУ «Космос» и КПУ «Пеленг-Оптик» ОАО «Пеленг» подтверждает, что Н.О. Старосотников проводил лабораторные и полётные геометрические калибровки оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) изготовленной ОАО «Пеленг». Результаты лабораторной геометрической калибровки подтвердились и использовались для полётной геометрической калибровки. Были откалиброваны:

– 5 образцов ОЭА ДЗЗ с проекцией пикселя на Землю 2,1 м из состава следующих космических аппаратов: «Канопус-В-ИК», «Канопус-В №3», «Канопус-В №4», «Канопус-В №5», «Канопус-В №6;

– ОЭА ДЗЗ с проекцией пикселя на Землю менее 1 м.

Лабораторная калибровка проводилась с использованием оборудования ОАО «Пеленг», полётная калибровка проводилась, в том числе, с использованием специального полигона, показанного в приложении (3 листа).

Зам. нач. управления ОАО «Пеленг»



И.В. Подскребкин

Зам. нач. отдела ОАО «Пеленг»



М.Н. Котов

Вед. инж.-исследователь ОАО «Пеленг»



А.В. Чеботарёв

Старосотников (017) 389-12-40

**Приложение к «Акту о практическом использовании результатов
исследования в производстве»
Специальный полигон
для полётной геометрической калибровки ОЭА ДЗЗ**

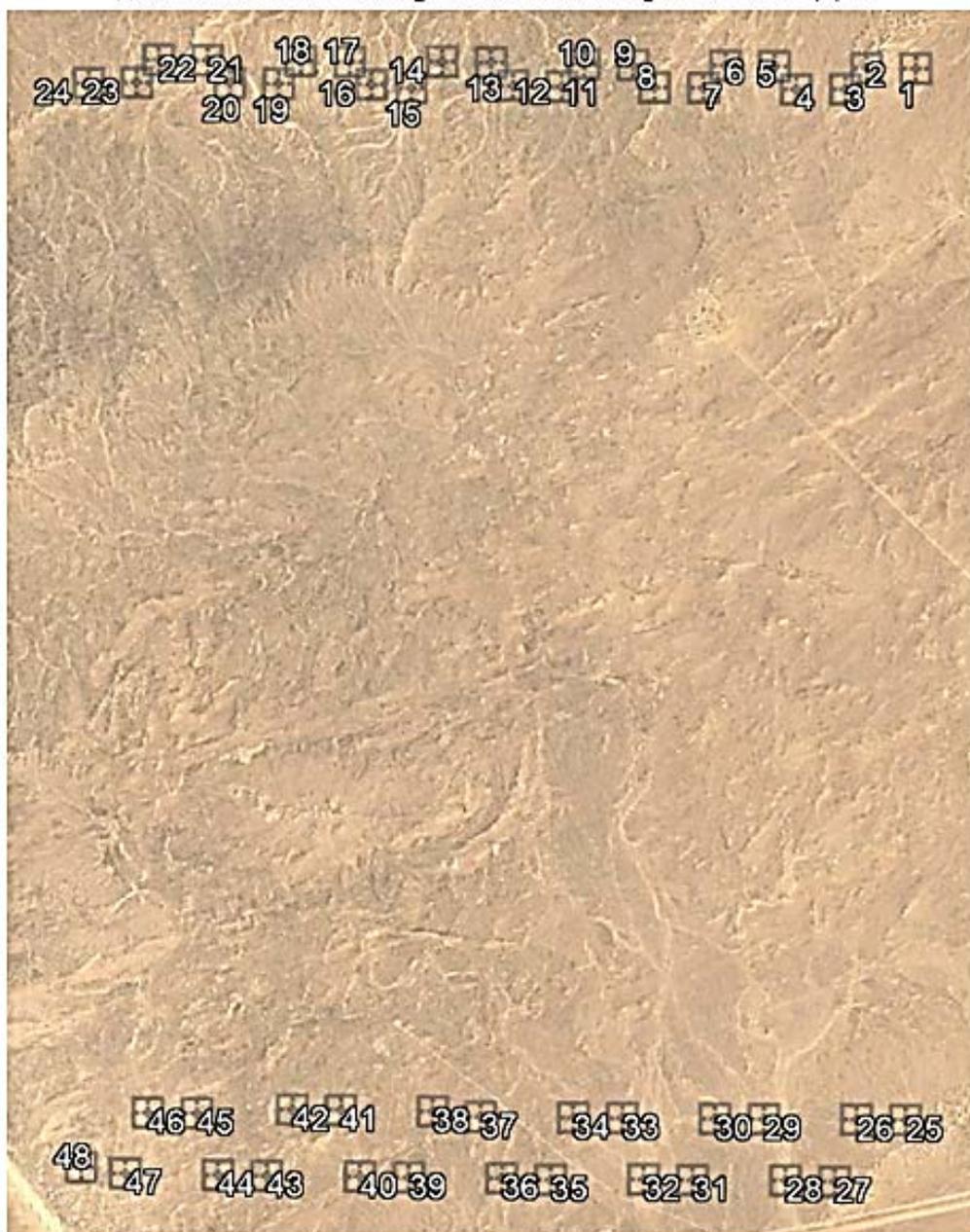


Рисунок 1 – Взаимное расположение опорных объектов (Google Earth)



Рисунок 2 – Взаимное расположение опорных объектов (обведены кругами)
(снято ОЭА ДЗЗ с проекцией пикселя на Землю менее 1 м)



Рисунок 3 – Опорные объекты (обведены кругами)
(снято ОЗА ДЗЗ с проекцией пикселя на Землю менее 1 м)

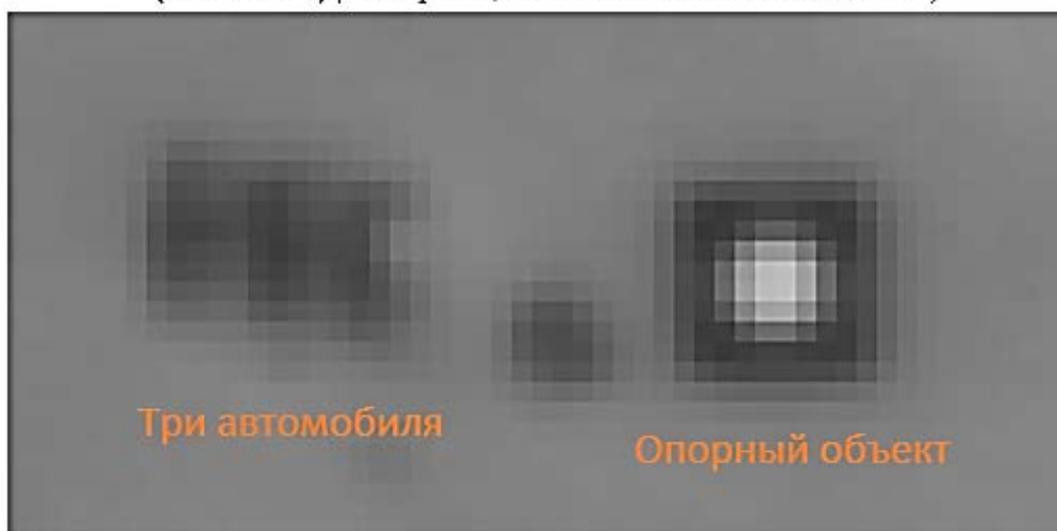


Рисунок 4 – Опорный объект и автомобили
(снято ОЗА ДЗЗ с проекцией пикселя на Землю менее 1 м)