

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 681.77+681.2.08

СТАРОСОТНИКОВ
Николай Олегович

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.07 – оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

Минск, 2023

Работа выполнена в ОАО «Пеленг» и Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель: **ФЁДОРЦЕВ Ростислав Валерьевич**,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Лазерная техника и технология»
Белорусского национального технического
университета

Официальные оппоненты: **ТАТУР Михаил Михайлович**,
доктор технических наук, профессор, профес-
сор кафедры «Электронные вычислительные
машины» Белорусского государственного уни-
верситета информатики и радиоэлектроники;

БЕЛЯЕВ Юрий Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, заведую-
щий лабораторией оптико-физических
измерений Института прикладных физиче-
ских проблем имени А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация Научно-производственное унитарное пред-
приятие «Научно-технический центр
«ЛЭМТ» БелОМО»

Защита диссертации состоится «23» 06 2023 г. в 16.00 на заседании
совета по защите диссертаций Д02.05.17 при Белорусском национальном
техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости,
65, ауд. 202. Телефон ученого секретаря 8(017) 293-96-18, e-mail:
D.02.05.17@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского
национального технического университета.

Автореферат разослан «23» 05 2023 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук



Н. Н. Ризноока

© Старосотников Н. О., 2023
© Белорусский национальный
технический университет, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Важным применением снимков земной поверхности с высоким пространственным разрешением является их использование для создания топографических планов и карт. Формирование таких снимков осуществляется съемочной оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Необходимо калибровать геометрические параметры ОЭА. Традиционная калибровка предусматривает длительный процесс в течение нескольких месяцев съемок и обработки подходящих объектов после запуска космического аппарата (КА). Для сокращения времени калибровки в полете предлагается предварительно проводить калибровку в лабораторных условиях. С учетом 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 фотоприемников, 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 нанесенным на ее поверхность способом литографии индивидуальным рисунком. Предлагается в качестве тест-объекта использовать цифровое микрозеркальное устройство (Digital Micromirror Device (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.

Распространенной особенностью ОЭА ДЗЗ является использование нескольких фотоприемников, обеспечивающих увеличение снимаемой площади земной поверхности и количества спектральных каналов по сравнению с вариантом использования одного фотоприемника. 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 утвержденным 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 твердотельных лазеров на их основе, светосильных объективов и зеркальных систем, технологии финишной обработки линз малой жесткости, аксионов и оптических деталей лазерных гироскопов» ГБ 16-246 от 22.12.2020.

Цель и задачи 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 многоатричных ОЭА, в том числе температурного смещения пространственной структуры микрозеркал цифрового микрозеркального устройства и элементов фотоприемника ОЭА. 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 счет 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 фотоприемнике 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 фотоприемника 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 аберрации, которые при расчете оптической системы необходимо свести к минимуму: астигматизм, дисторсия, хроматизм увеличения, а также хроматизм положения и термооптические аберрации, но на порядок меньшей степени;

– установлены временные параметры калибровок для уменьшения температурного смещения элементов DMD и фотоприемника 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 многоатричных ОЭА, основанная на разделении элементов внешнего ориентирования путем обработки измеренных данных по всем фотоприемникам и элементов внутреннего ориентирования по каждому фотоприемнику 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, присвоением значениям сигнала квадратичных весовых коэффициентов, а также вписыванию в площадку фотоприемника 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 путем 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 фотоприемниками, включающих: температурное смещение элементов фотоприемников оптико-электронного аппарата, элементы внешнего ориентирования (пространственную ориентацию оптико-электронного аппарата относительно коллиматора) путем обработки измеренных данных по всем фотоприемникам, элементы внутреннего ориентирования (фотограмметрическое фокусное расстояние, расположение фотоприемников в фокальной плоскости, коэффициенты аппроксимации дисторсии) по каждому фотоприемнику 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. Федорцевым, 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 полете 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.).

Опубликование 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 ученых степеней и присвоении ученых 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.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассмотрены основные методики калибровки геометрических параметров ОЭА и способы формирования структурированного света при помощи пространственных модуляторов, в частности в проекционных системах, которые можно применить в качестве тест-объекта в схемах калибровки.

Тест-объект для калибровки геометрических параметров широкого круга современных съемочных 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 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;
- высокие динамические характеристики для формирования быстроизменяющихся объектов не менее 4–30 кГц;
- высокая контрастность $1/2^8$ – $1/2^{16}$;
- возможность работы в УФ, видимой, ближней ИК области спектра.

Для использования в качестве тест-объекта предпочтительной является технология цифрового управления светом (DLP), которая обеспечивает более точную и стабильную пространственную геометрическую структуру, а также однородность и стабильность энергетических характеристик по полю

за счет DMD по сравнению с пространственными модуляторами света на основе жидких кристаллов на кремнии (LCoS), жидкокристаллического дисплея (LCD), решетчатого светового затвора (GLV).

Во второй главе описано устройство и принцип работы коллиматора для калибровки геометрических параметров ОЭА с DMD в качестве тест-объекта для формирования эталонной связки векторов.

Использование в качестве тест-объекта DMD, управляемого компьютером, позволяет формировать любую форму, размер и контраст рисунка тест-объекта. Такие свойства тест-объекта позволяют экспериментально подобрать наилучший вид рисунка, который будет полностью соответствовать решаемой задаче. Отсутствие необходимости в замене тест-объекта для калибровки разных ОЭА обеспечивает снижение продолжительности и трудоемкости калибровки.

Таким образом, коллиматор с тест-объектом в виде DMD позволяет:

- проводить калибровку геометрических параметров ОЭА;
- имитировать подстилающую поверхность ОЭА ДЗЗ, работающих в режиме ВЗН, в динамическом режиме для отработки алгоритмов работы ОЭА;
- контролировать качество изображения и оценивать разрешающую способность ОЭА при помощи шпальных мир переменного контраста, по дифракционной точке.

Для осуществления вышеперечисленных задач коллиматор позволяет формировать рисунок тест-объекта в виде одного круга, матрицы кругов, расположенных по полю, шпальных и синусоидальных мир, других рисунков, по желанию пользователя.

В третьей главе исследуются факторы, влияющие на погрешность калибровки геометрических параметров ОЭА, а также методы уменьшения их воздействия.

Рассмотрено влияние на погрешность определения координат центров элементов изображения рисунка тест-объекта, их соотношение с пикселем фотоприемника калибруемого ОЭА, отношение сигнал / шум, шумы фотоприемника. Погрешность определения координат и, соответственно, расстояний между элементами изображения рисунка тест-объекта на фотоприемнике калибруемого ОЭА будет одним из определяющих факторов величины погрешности калибровки.

Для исследования свойств и величины погрешности определения центров элементов изображения рисунка тест-объекта на матричной структуре фотоприемника была разработана математическая модель калибровки с учетом передаточных функций объективов, коллиматора и калибруемого ОЭА, шумов фотоприемника калибруемого ОЭА.

По результатам моделирования установлено, что погрешность определения координат центра изображения рисунка тест-объекта, вызванная шумами на примере параметров распространенной промышленной цифровой камеры с ПЗС, составила 0,022 пикселя. Для уменьшения влияния шумов предложено фильтровать выходной фоновый сигнал путем введения порога шумов, значения ниже которого принимаются нулевыми. По результатам моделирования определено, что улучшение в ~ 4 раза наблюдается для порога в 2σ , где σ – среднее квадратическое отклонение шумов. Увеличение порога более 3σ не приводит к существенным улучшениям. Предлагается также перед введением порога фильтровать сигнал с помощью фильтра Винера. Экспериментально определено, что для распространенных промышленных моделей цифровых камер погрешность составила: с ПЗС – 0,038 пикселя; с КМОП – 0,053 пикселя. Уменьшение погрешности предложенными методами составило ~ 3 –5 раз (не более $\pm 0,010$ пикселя).

На погрешность определения центра элемента изображения рисунка тест-объекта влияет уровень сигнала в изображении на фотоприемнике и его отношение к величине шумов. Уровень сигнала определяется величиной светового потока осветителя, который формирует изображение рисунка тест-объекта во входном зрачке оптической системы коллиматора. Для экспериментального определения зависимости использовалась цифровая камера с КМОП. Установлено, что для наименьшей погрешности определения координат центра изображения рисунка тест-объекта необходимо, чтобы сигнал был более ~ 30 % максимального значения квантования. Установлено, что для случая, когда нет возможности увеличить уровень сигнала в изображении рисунка тест-объекта аппаратными средствами, необходимо присвоить значению сигнала квадратичные весовые коэффициенты w , которые обеспечивают увеличение резкости края изображения. Квадратичные весовые коэффициенты являются более предпочтительными по сравнению с другими рассмотренными степенными весовыми коэффициентами. В таком случае достаточен уровень сигнала 12 % от максимального значения квантования.

На погрешность определения координат центра элемента изображения рисунка тест-объекта влияет соотношение его размера с размером пикселя фотоприемника. Чтобы определить величину погрешности, в модели производилось смещение элемента изображения рисунка тест-объекта относительно матричной структуры фотоприемника. Погрешность имеет периодический характер, описываемый синусоидальной функцией, с периодом в 1 пиксель. При смещении изображения рисунка тест-объекта на величину 0,25 пикселя или 0,75 пикселя относительно первоначального положения, погрешность будет максимальной, а при смещении на 0,5 пикселя

или 1 пиксель относительно первоначального положения погрешность равняется нулю. Смоделированы изображения круглого элемента рисунка тест-объекта различных диаметров для определения сбалансированного размера. По результатам моделирования определено, что наименьшая погрешность не более $\pm 0,01$ пикселя получена для изображения элемента рисунка тест-объекта размером более 3 пикселей. С увеличением размера уменьшается погрешность, а с уменьшением размера – возможно более эффективное использование поля зрения калибруемого ОЭА, поскольку существует необходимость калибровки ОЭА с фотоприемниками, например, для случая калибровки ДЗЗ работающих в режиме ВЗН, вытянутыми вдоль одной стороны (соотношение сторон может быть порядка 1/10–1/100), в то время как размер короткой стороны может быть порядка 10–100 пикселей.

Рассмотрены погрешности алгоритмов определения координат центров элементов изображения рисунка тест-объекта (C_x , C_y). По энергетическому центру тяжести для столбцов и строк

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

где $I_{n,m}$ – уровень сигнала в пикселе n , m ;

N , M – общее число столбцов и строк области вычисления координат центра тяжести;

$w = 2$ – весовой коэффициент.

Алгоритм определения координат центров элементов изображения рисунка тест-объекта по контуру заключается в определении контура изображения и аппроксимации полученного контура геометрической фигурой с известными параметрами (центр, радиус). Вычисление контура осуществляется скользящим оператором, путем операции свертки. Оценивались операторы Собела, Прюитт, Робертса, лапласиан гауссиана, Канни.

Использовались параметры распространенной промышленной цифровой камеры с КМОП. Произведен расчет погрешности определения координат центра различными алгоритмами для тест-объектов различных размеров, а также значений отношения сигнал / шум. Изображения отличались друг от друга из-за случайного характера шумов фотоприемника. По каждому изображению определялся центр. Задавалось смещение тест-объекта на 0,25 пикселя по одному из направлений и вычислялась погрешность как разница между заданным и фактическим смещением тест-объекта относительно матричной структуры фотоприемника.

Установлено, что погрешность определения координат по энергетическому центру тяжести меньше, чем для контурных алгоритмов и для кросскорреляционного алгоритма для всех рассмотренных размеров элементов рисунка тест-объекта и отношения сигнал / шум примерно на

порядок, с увеличением отношения сигнал / шум уменьшается погрешность определения координат на 0,5–1 порядок. Кросскорреляционный алгоритм при наличии на фотоприемнике паразитных изображений находит полезное изображение лучше, чем контурные алгоритмы, тогда как у контурных алгоритмов может быть наличие ложных определений полезного изображения.

Аналитически рассмотрено влияние качества оптических компонентов и сборки оптической системы коллиматора на погрешность калибровки. Их влияние можно разделить на две составляющие: искажение формы элемента изображения рисунка тест-объекта и искажение пространственных координат элементов изображения рисунка тест-объекта. Искажение формы приводит к погрешности определения координат центра элемента изображения рисунка тест-объекта. Существенными являются те дефекты, которые вызывают несимметричность в распределении сигнала элементов изображения рисунка тест-объекта. Искажение пространственных координат вызывают: дисторсия, хроматизм увеличения, хроматизм положения, а также терморастраиваемость. Данные остаточные аберрации можно измерить и учитывать в дальнейшем как постоянные величины.

В четвертой главе описана методика калибровки геометрических параметров ОЭА, в частности рассматривается влияние температурных эффектов, возникающих из-за нагрева электронных компонентов DMD и ОЭА в процессе их работы, на погрешность калибровки. В зависимости от режима работы нагрев может составлять от нескольких единиц до десятков градусов. При использовании DMD в качестве тест-объекта, размеры микрорезеркал которого являются измерительной шкалой, важно, чтобы пространственная структура микрорезеркал оставалась постоянной. Изменение пространственной структуры менее 1 мкм является приемлемым для большинства задач калибровки геометрических параметров ОЭА.

В задачах калибровки геометрических параметров ОЭА матричная структура фотоприемника калибруемого ОЭА также является измерительной шкалой. Помимо нагрева DMD также подвержен нагреву сам фотоприемник ОЭА, что приводит к изменению достоверности фиксируемых значений. Поэтому необходимо оценивать величину изменения пространственной структуры фотоприемника калибруемого ОЭА. Данная оценка позволит принять решение о длительности работы в течение которого изменение пространственной структуры фотоприемника ОЭА остается приемлемым, а также о необходимости применения дополнительной системы для его охлаждения.

В общем случае калибровка температурных смещений заключается в проецировании на фотоприемник цифровой камеры, используемой в качестве калибруемого ОЭА, тестового массива, состоящего из матрицы кругов с постоянным расстоянием между их центрами и оценке изменения расстояния в течение времени работы DMD, которое будет изменяться за счет нагрева DMD.

Для калибровки температурных смещений DMD использовалась цифровая камера с КМОП фотоприемником, которая включается только на время съемки серии кадров с высокой частотой (длительность менее 1 мин) и быстро отключается от электропитания, это позволяет уменьшить время ее нагрева и как следствие исключить влияние температуры нагрева. Далее цифровая камера остывает до температуры помещения, а DMD продолжает работать. Цифровая камера производит съемки с интервалом 20 мин в первый час, 30 мин – второй час, 1 ч – оставшиеся два часа поскольку вначале работы наблюдается наибольшее смещение. Общее время съемки составляет 4 ч. Для калибровки температурных смещений DMD совместно с цифровой камерой электропитание не отключалось, съемка серии кадров производилась каждую минуту в течение четырех часов.

Анализ полученных данных показал, что смещение микрзеркал DMD происходит в основном вдоль строк. Самое интенсивное смещение происходит в первые 20 мин работы, далее происходит стабилизация процесса. Равномерность расширения DMD определяет погрешность калибровки и не превышает 1 мкм.

Таким образом, DMD можно использовать в качестве тест-объекта в задачах калибровки геометрических параметров ОЭА. При необходимости меньшей погрешности калибровки полученные результаты можно использовать в качестве коэффициентов компенсации изменения пространственной структуры DMD из-за температурных эффектов в процессе работы.

В главе описана методика калибровки геометрических параметров многоматричных ОЭА на примере с двумя и тремя фотоприемниками. Представлена методика разделения элементов внешнего ориентирования за счет обработки измеренных данных по всем фотоприемникам и элементов внутреннего ориентирования (ЭВО) за счет обработки по каждому фотоприемнику в противоположных положениях коллиматора.

Схема калибровки включает коллиматор и ОЭА (рисунок 1). Коллиматор состоит из объектива и тест-объекта, расположенного в фокальной плоскости объектива. Рисунок тест-объекта является массив кругов, который подобран таким образом, чтобы равномерно спроецировать их изображения в центре и по краям всех фотоприемников ОЭА. Объектив ОЭА, в фокальной плоскости которого установлены фотоприемники, формирует изображение тест-объекта, спроецированного коллиматором, на

фотоприемник. Калибровка производится на одной длине волны. 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, для которого коллиматор был сфокусирован и калибровался.

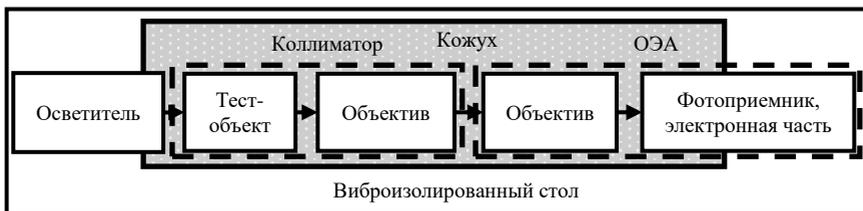


Рисунок 1 – Структурная схема калибровки

Схема фокальной плоскости ОЭА с двумя фотоприемниками (рисунок 2, *а*) характерна для ОЭА, в которых требуется увеличить поле зрения; с тремя фотоприемниками (рисунок 2, *б*) – для ОЭА, осуществляющих маршрутные съемки, когда ОЭА движется относительно объекта съемки и производит съемку в режиме ВЗН. Для ОЭА с количеством фотоприемников больше, чем три вдоль оси OY калибровка будет аналогичной.

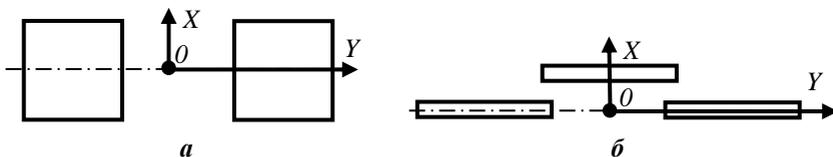


Рисунок 2 – Типы калибруемых схем фокальной плоскости ОЭА

Коллиматор, калибруемый ОЭА и осветитель визуально выставляются соосно. Определяется величина тока питания светодиодов или экспозиция ОЭА, чтобы обеспечить освещенность фотоприемника ОЭА на уровне 80–90 % максимального значения квантования. ОЭА выдерживается во включенном состоянии для достижения рабочего режима съемки. ОЭА выключается и остывает до температуры помещения. Производится съемка серии кадров изображения рисунка тест-объекта. Для исключения систематических погрешностей коллиматора, коллиматор поворачивается вокруг своей оптической оси на 180° . И вновь производится съемка серии кадров изображения рисунка тест-объекта. Для исключения влияния на погрешность возможных локальных искажений волнового фронта коллиматора и калибруемого ОЭА, коллиматор устанавливается соосно $\pm 1^\circ$ с калибруемым ОЭА по осям OX и OY . При необходимости повторяются съемки для противоположных положений коллиматора несколько раз с различными углами поворота коллиматора.

Вычисляются усредненные по серии кадров координаты изображений кругов рисунка тест-объекта по изображениям с фотоприемников ОЭА.

Выполняется пересчет координат изображений кругов рисунка тест-объекта из системы координат фотоприемников в систему координат фокальной плоскости ОЭА. Эталонные координаты кругов рисунка тест-объекта пересчитываются в фокальную плоскость калибруемого ОЭА с учетом задних фокусных расстояний коллиматора f_k' и ОЭА f' (рисунок 3).

По невязкам с эталонными координатами вычисляется и компенсируется угол поворота вокруг оптической оси для каждого фотоприемника. По полученным значениям вычисляется эффективное фокусное расстояние. Далее весь расчет повторяется с новым эффективным фокусным расстоянием. Вычисления производятся в векторном виде.

Порядок компенсации элементов внешнего и внутреннего ориентирования:

- компенсируется угол поворота вокруг оптической оси OZ как среднее значение поворота всех фотоприемников. Для вычисления угла поворота вокруг оптической оси OZ координаты изображения кругов рисунка тест-объекта всех фотоприемников отдельно для противоположных положения коллиматора приводятся к общему центру;

- компенсируется угол поворота вокруг оси OX , а затем OY ;

- выполняется пересчет с уточненными элементами внешнего ориентирования;

- уточняется угол поворота вокруг оптической оси OZ для каждого фотоприемника как среднее значение для противоположных положений коллиматора;

- уточняются линейные координаты для каждого фотоприемника X_{np0} , Y_{np0} как среднее значение для противоположных положений коллиматора;

- выполняется пересчет с уточненными ЭВО.

Вычисляются коэффициенты остаточного полинома аппроксимации ЭВО решением системы линейных алгебраических уравнений методом наименьших квадратов.

Представленная методика калибровки ЭВО обеспечивает низкую погрешность – не более 0,2–1,0" (3 σ).

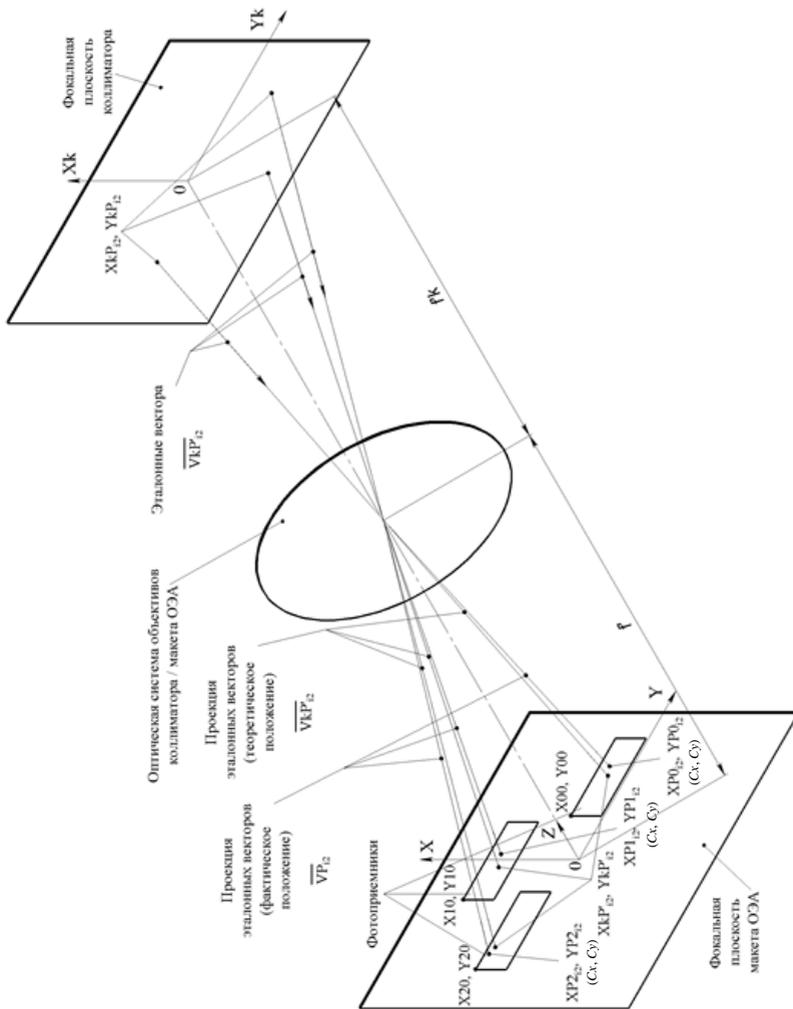


Рисунок 3 – Модель калибровки

В пятой главе дается описание калибровки геометрических параметров макета многоматричного ОЭА с тремя фотоприемниками разными способами формирования эталонной связки векторов и сравнение по погрешности: последовательным проецированием зрительной трубой тахеометра перекрестия сетки на фокальную плоскость ОЭА, тест-объектом с рисунком в виде массива кругов нанесенным на стеклянную пластину с использованием литографии, тест-объектом с рисунком в виде массива кругов, сформированным DMD.

Тест-объектом является стеклянная пластина с рисунком в виде массива прозрачных кругов на непрозрачном фоне, сформированным с использованием литографии, который обеспечивает субмикронную погрешность взаимного расположения элементов рисунка.

В случае, когда для формирования эталонной связки векторов используется *DMD*, в схеме калибровки со стеклянным тест-объектом, вместо тест-объекта и осветителя устанавливался DLP LightCrafter 4500 без объектива. Формируется изображение в любом математическом пакете с шагом аналогичным стеклянному тест-объекту. После калибровки температурного смещения, уточняется номинальный период микрозеркал. При необходимости в *DMD* может быть загружен рисунок тест-объекта с градиентным уровнем сигнала по полю зрения, чтобы компенсировать перепады освещенности.

Третий рассматриваемый способ формирования эталонной связки векторов заключается в использовании в общем случае теодолита. Для этого используются функции измерения углов и проецирования сетки зрительной трубы *тахеометра* Leica TS30, имеющего маленькую погрешность измерения угла не более $\pm 0,5''$ (σ) во всем диапазоне углов и дискретность $0,1''$, для калибровки используется обычно не более $1-10^\circ$. Вместо стандартного окуляра в зрительную трубу тахеометра устанавливается специально разработанный осветитель для обеспечения требуемого регулируемого уровня подсветки сетки зрительной трубы.

Методика калибровки при помощи тахеометра заключается в последовательном проецировании перекрестия сетки тахеометра по полю фотоприемников с шагом аналогичным расположению кругов рисунка тест-объекта на тест-объекте в виде стеклянной пластины. На следующем этапе зрительная труба тахеометра переводится через зенит, а алидада тахеометра поворачивается на 180° в плоскости горизонта для устранения систематической погрешности тахеометра. Далее оборудование выключается и остывает до нормальной температуры помещения лаборатории, затем производится последовательное проецирование перекрестия сетки тахеометра на фотоприемники.

Поскольку изображение перекрестия сетки тахеометра проецируется на все фотоприемники не одновременно, то существуют особенности в математической обработке изображений для поиска центра перекрестия. Для предварительного приближительного поиска на всем изображении фотоприемника вычисляется нормализованная кросскорреляция между шаблоном перекрестия сетки тахеометра и изображением с фотоприемника.

Погрешность калибровки в зависимости от способа формирования эталонной связки векторов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Погрешность калибровки

Погрешность (3σ) определения параметра	Способ задания эталонной связки векторов		
	Тахеометр Leica TS30	Рисунок тест-объекта в виде массива кругов	
		нанесенный на стеклянную пластину с использованием литографии	сформированный DLP LightCrafter 4500
Фотограмметрическое фокусное расстояние, мкм	20,7	4,8	18,3
Калибровка геометрических параметров ОЭА, угл. с	0,48	0,21	0,09

Все три способа задания эталонной связки векторов для калибровки сравнимы по величине погрешности не более $\pm 0,5''$, однако можно отметить, что по погрешности определения фотограмметрического фокусного расстояния лучший вариант – тест-объект с рисунком в виде массива кругов, нанесенным на стеклянную пластину с использованием литографии. По погрешности калибровки геометрических параметров ОЭА, характеризующей погрешность определения положения фотоприемников макета ОЭА и компенсации дисторсии предпочтительный вариант – тест-объект с рисунком в виде массива кругов, сформированным DMD. Погрешность калибровки реализованных способов формирования эталонной связки векторов меньше в 3–10 раз по сравнению с существующими, описанными в литературе.

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 микрозеркальное 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 многоатричного ОЭА с тремя фотоприемниками разными способами формирования эталонной связки векторов: последовательным проецированием зрительной трубой тахеометра перекрестия сетки на фокальную плоскость ОЭА, тест-объектом с нанесенным 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, нанесенным на стеклянную пластину с использованием литографии. По погрешности калибровки, характеризующей погрешность определения положения фотоприемников макета ОЭА и компенсации дисторсии, предпочтительный вариант – тест-объект с рисунком в виде массива кругов, сформированным DMD [5, 8, 10, 15, 16, 17].

2. Исследованы факторы, влияющие на погрешность определения координат центров элементов изображения рисунка тест-объекта, проецируемых коллиматором: соотношение с размером пикселя фотоприемника, шумы фотоприемника, соотношение уровня сигнала с величиной максимального значения квантования фотоприемника, отношение сигнал/шум, влияние качества оптической системы. Установлены пороговые численные значения влияющих факторов. Снижение влияния шумов при математической обработке достигается за счет 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 [1, 2, 6, 7, 9, 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 фотоприемников. Алгоритм заключается в предварительном поиске требуемой области обнаружения путем 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 в зависимости от субъективности оператора [1, 2, 5, 6, 7, 9, 13].

4. Представлена методика оценки температурного смещения пространственной структуры микрозеркал DMD и пикселей фотоприемника 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 счет обработки измеренных данных по всем фотоприемникам и ЭВО за счет обработки измеренных данных по каждому фотоприемнику в противоположных положениях коллиматора. Методика была апробирована при калибровке многоматричных ОЭА с двумя и тремя фотоприемниками, и позволяет применять ее для ОЭА с большим количеством фотоприемников (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 [3, 4, 5, 10, 12, 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 [5, 16, 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 фотоприемника, соотношения с размером пикселя фотоприемника 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, звездных датчиках, автоколлиматорах, пеленгаторах, датчиках Шака-Гартмана и других ОЭА [1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 15].

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

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

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

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



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных журналах

1. Старосотников, Н. О. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприемниками / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // Наука и техника. – 2015. – № 5. – С. 71–76.
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. – № 1. – С. 79–86.
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. – № 2. – P. 122–131.
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. – № 5. – С. 428–436.
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. – № 1. – С. 60–74.

Материалы и тезисы докладов конференций

6. Старосотников, Н. О. Высокоточный цифровой автоколлиматор для измерения малых углов / Н. О. Старосотников // Новые направления развития приборостроения: материалы 7-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., 23–25 апр. 2014 г. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 244.
7. Старосотников, Н. О. Моделирование методической погрешности определения центра тяжести изображения тест-объекта в оптических измерительных приборах с матричными приемниками / Н. О. Старосотников, Р. В. Федорцев // Приборостроение-2014: материалы 7-й Между-народной научно-технической конференции, 19–21 ноября 2014 г., Минск / ред. колл.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 385–386.
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.
9. Старосотников, Н. О. Метод снижения влияния шумов фонового 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 нояб. 2016 г. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 133–135.

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.

11. Старосотников, Н. О. Анализ влияющих aberrаций 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 ученых 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.

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 ученых и студентов, 18–20 апреля 2018 г., Минск / пред. редкол. О. К. Гусев. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 278.

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.

14. Старосотников, Н. О. Методика калибровки пространственной стабильности матричной структуры микрозеркальных устройств, применяемых в качестве измерительных устройств / Н. О. Старосотников, Р. В. Федорцев // Новые направления развития приборостроения: материалы 12-й Международной научно-технической конференции молодых ученых 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.

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

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) – № а20150333; заявл. 2015.06.18 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2018. – №1. – С. 152.

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) – № а2016118945; заявл. 2017.11.20.

РЭЗІЮМЭ

Старасотнікаў Мікалай Алегавіч

Сродкі і метады геаметрычнай каліброўкі оптыка-электронных апаратаў для дыстанцыйнага зондавання Зямлі

Ключавыя словы: каліброўка, элементы знешняга арыентавання, элементы унутранага арыентавання, оптыка-электронная прылада, фотапрыёмнік, лічбавая мікралюстэркавая прылада.

Мэта працы: памяншэнне хібнасці і часу каліброўкі геаметрычных параметраў оптыка-электронных апаратаў з шырокім дыяпазіонам характарыстык.

Метады даследвання і выкарыстанная апаратура: лікавае мадэляванне і эксперыментальныя даследванні, макеты оптыка-электронных апаратаў, модуль лічбавай мікралюстэркавай прылады DLP LightCrafter4500, тахеометр Leica TS30, тры мадэлі распаўсюджаных лічбавых прамысловых камер JAI CV-M2CL, Teledyne Dalsa Genie HM1400 XDR CR-GM01-H1400, Basler ace acA2040-90 um.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: прапанавана прылада для каліброўкі геаметрычных параметраў оптыка-электронных апаратаў з шырокім дыяпазіонам тэхнічных характарыстык за кошт выкарыстоўвання ў якасці тэст-аб'екта лічбавай мікралюстэркавай прылады, якая забяспечвае дакладнасць не горш стандартных метадаў; даследаваны фактары, якія ўплываюць на дакладнасць каліброўкі, дадзены патрабаванні да іх парогавых значэнняў, прапанаваны спосабы памяншэння іх уплыву; прапанавана метадыка каліброўкі для шматматрычных оптыка-электронных апаратаў рознымі метадамі фармавання эталоннага звязку вектароў, якая забяспечвае аўтаматызацыю апрацоўкі з хібнасцю ад $\pm 0,2''$ да $\pm 1,0''$ (3σ).

Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна карыстання: атрыманыя вынікі могуць быць ужытыя для каліброўкі геаметрычных параметраў оптыка-электронных апаратаў шырокага кола прыстасавання, дзе патрабуецца высокая дакладнасць і выкарыстоўваюцца ў НКВ «Космас» ААТ «Пеленг» пры практаванні лабараторных прылад і для каліброўкі геаметрычных параметраў оптыка-электронных апаратаў дыстанцыйнага зондавання Зямлі.

РЕЗЮМЕ

Старосотников Николай Олегович

Средства и методы геометрической калибровки оптико-электронных аппаратов для дистанционного зондирования Земли

Ключевые слова: калибровка, элементы внешнего ориентирования, элементы внутреннего ориентирования, оптико-электронный аппарат, фотоприемник, цифровое микрозеркальное устройство.

Цель работы: уменьшение погрешности и времени калибровки геометрических параметров оптико-электронных аппаратов с широким диапазоном характеристик.

Методы исследования и использованная аппаратура: численное моделирование и экспериментальные исследования, макеты оптико-электронных аппаратов, модуль цифрового микрозеркального устройства DLP LightCrafter4500, тахеометр Leica TS30, три модели распространенных цифровых промышленных камер JAI CV-M2CL, Teledyne Dalsa Genie HM1400 XDR CR-GM01-H1400, Basler ace acA2040-90 um.

Полученные результаты и их новизна: предложено устройство для калибровки геометрических параметров оптико-электронных аппаратов с широким диапазоном технических характеристик за счет использования в качестве тест-объекта цифрового микрозеркального устройства (DMD), которое обеспечивает погрешность не хуже стандартных методов; исследованы факторы, влияющие на погрешность калибровки, даны требования к их пороговым значениям, предложены методы уменьшения их влияния; предложена методика калибровки для многоматричных оптико-электронных аппаратов разными способами формирования эталонной связки векторов, обеспечивающая автоматизацию обработки с погрешностью от $\pm 0,2''$ до $\pm 1,0''$ (3σ).

Рекомендации по использованию и область применения: полученные результаты могут быть применены для калибровки геометрических параметров оптико-электронных аппаратов широкого круга назначений, где требуется высокая точность и используются в НКУ «Космос» ОАО «Пеленг» при проектировании лабораторного оборудования и для калибровки геометрических параметров оптико-электронных аппаратов дистанционного зондирования Земли.

SUMMARY

Starasotnikau Mikalai Alegavich

Instruments and methods for geometric calibration of optoelectronic devices for Earth remote sensing

Keywords: digital micromirror device, camera, calibration, elements of external orientation, elements of internal orientation, optoelectronic device, interior orientation parameters, image sensor.

The aim of the work is to reduce the error and time of a calibration of geometric parameters of optoelectronic devices with a wide range of characteristics.

Research methods and equipment: numerical modeling and experimental research, layouts of optoelectronic devices, digital micromirror device module DLP LightCrafter4500, total station theodolite Leica TS30, three models of common digital industrial cameras JAI CV-M2CL, Teledyne Dalsa Genie HM1400 XDR CR-GM01-H1400, Basler ace acA2040-90 um.

Results and novelty: the device for calibration of geometric parameters of optoelectronic devices with a wide range of technical characteristics are proposed due to the use of a digital micromirror device (DMD) as a test-object, which provides an accuracy appropriate to standard methods are proposed; the factors influencing the accuracy of the calibration are investigated, the requirements for their threshold values are given, the ways to reduce their influence are proposed; a method of calibration for multi-matrix optoelectronic devices by different methods of forming a reference vector bundle are proposed, which ensures the automation of processing with the error of from $\pm 0.2''$ to $\pm 1.0''$ (3σ).

Recommendations for use and an application area: the obtained results can be used for calibration of geometric parameters of optoelectronic devices of a wide range of purposes, where high accuracy is required. The obtained results have been utilized in the design of laboratory equipment and for calibration of geometric parameters of optoelectronic devices for Earth remote sensing in Space Division of JSC "Peleng".

Научное издание

СТАРОСОТНИКОВ
Николай Олегович

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.07 – оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

Подписано в печать 17.05.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.

Усл. печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,43. Тираж 65. Заказ 430.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий №1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск