

Министерство образования и науки Российской Федерации

Московский государственный университет геодезии и картографии
(МИИГАиК)

На правах рукописи

Скляр Сергей Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СОГЛАСОВАНИЯ
КАНАЛОВ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ
КОМПЛЕКСОВ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Якушенков Ю.Г.

Москва – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Современные устройства проверки согласования каналов многоспектральных оптико-электронных комплексов	11
1.1. Внешние устройства проверки согласования каналов.....	13
1.2. Встроенные устройства проверки согласования каналов.....	27
Выводы по главе 1.....	35
Глава 2. Анализ погрешностей устройств проверки согласования каналов и выбор рациональных схем построения устройств проверки согласования каналов.....	37
2.1 Схемы устройств проверки согласования каналов с единым тест- объектом.....	38
2.2. Схемы устройств проверки согласования каналов с несколькими тест- объектами.....	46
2.2.1. Простые многоколлиматорные устройства проверки согласования каналов	46
2.2.2. Многоколлиматорные устройства проверки согласования каналов с использованием инвариантных коллиматоров.....	51
2.3. Схемы устройств проверки согласования каналов без материальных тест-объектов	62
2.4. Схемы комбинированных устройств проверки согласования каналов.....	66
2.5. Узлы устройств проверки согласования каналов	67
2.5.1. Автоколлимационное углоизмерительное устройство с двумя угловыми полями	67

2.5.2. Устройства коллинеарного переноса на основе зеркального ромба и на основе пентапризм	72
2.5.3. Устройства коллинеарного переноса на основе углового отражателя.....	92
Выводы по главе 2.....	94
Глава 3. Разработка устройств проверки согласования каналов многоспектральных оптико-электронных комплексов	96
3.1. Разработка автоколлимационного углоизмерительного устройства с двумя угловыми полями и методики его юстировки	96
3.2. Разработка устройства коллинеарного переноса на основе призмы БкР-180° и методики его юстировки.....	103
3.3. Разработка устройства проверки согласования каналов многоспектрального оптико-электронного комплекса на основе инвариантных коллиматоров.....	106
3.4. Разработка устройства проверки согласования каналов многоспектрального оптико-электронного комплекса	110
Выводы по главе 3.....	115
Глава 4. Практическая реализация устройств проверки согласования каналов многоспектральных оптико-электронных комплексов. Экспериментальная проверка результатов	116
4.1. Автоколлимационная труба с двумя угловыми полями.....	116
4.2. Призменный блок выверки	117
4.3. Устройство проверки согласования каналов телевизионного и тепловизионного каналов	119
4.4. Коллиматор согласования каналов многоспектрального оптико- электронного комплекса.....	121

Выводы по главе 4.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	126
Приложение А. Оптическая схема АКТ с двумя угловыми полями	133
Приложение Б. Общий вид АКТ с двумя угловыми полями	134
Приложение В. Оптическая схема призмы выверки.....	135
Приложение Г. Сборочный чертеж призмы выверки	136
Приложение Д. Оптическая схема установки коллиматорной	137
Приложение Е. Общий вид установки коллиматорной	138
Приложение Ж. Оптическая схема коллиматора выверки	139
Приложение И. Сборочный чертеж коллиматора выверки.....	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертации определяется тем, что в современных оптико-электронных комплексах (ОЭК) постоянно увеличивается количество спектральных каналов, которые необходимо согласовывать между собой. При этом известные устройства проверки согласования каналов разрабатывались под конкретные многоспектральные (многодиапазонные) оптико-электронные комплексы и вопрос их создания в обобщенном виде не нашел в литературе необходимого освещения. Отсутствуют математические модели погрешностей устройств и методики, позволяющие на основе выбора схемы устройства согласования определить ее основные конструктивные параметры.

Степень разработанности темы

Разработке устройств проверки согласования каналов многоспектральных ОЭК посвящены исследования и публикации ряда авторов (А. М. Бурбаев, М. П. Колосов, В. А. Мейтин, С. А. Сухопаров, А. Daniels, Т. Е. Godfrey). В этих источниках рассмотрены некоторые схемы привязки оптических осей отдельных спектральных каналов ОЭК к базовым направлениям, описаны отдельные элементы этих устройств, приводятся патентные описания, содержащие результаты разработки ряда систем.

Анализ известных работ показывает, что ряд актуальных вопросов нуждается в доработке и совершенствовании. Так, следует рассмотреть источники погрешностей, существующие в устройствах согласования, и методы их устранения, рассмотреть более подробно взаимосвязь устройства согласования с выверяемыми каналами ОЭК, разработать методику определения основных конструктивных параметров устройств согласования, основанную на анализе математических моделей погрешности устройств согласования.

Цель диссертационной работы

Целью настоящей диссертации является установление связей между точностными и основными конструктивными характеристиками устройств

проверки согласования каналов многоспектральных ОЭК, а также разработка методик юстировки для уменьшения инструментальных погрешностей этих устройств.

Для этого в диссертации следует решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих оптико-электронных каналов современных многоспектральных комплексов и способов определения положения их оптической оси.
2. Провести анализ существующих устройств проверки согласования осей.
3. Исследовать новые схемы построения устройств проверки согласования каналов.
4. Разработать математические модели погрешностей типовых схем устройств проверки согласования каналов.
5. Предложить методики юстировки устройств проверки согласования каналов многоспектральных оптико-электронных комплексов.
6. Провести апробацию предлагаемых математических моделей и методик юстировки на конкретном примере.

Область исследования

Диссертационная работа выполнена в соответствии с пунктом 2 – «Разработка, совершенствование и исследование характеристик приборов, систем и комплексов с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона волн, предназначенных для решения задач: создания оптических и оптико-электронных приборов и систем для медицины; создания оптического и оптико-электронного оборудования для научных исследований в различных областях науки и техники» паспорта специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

Объектом исследования являются теория, методы и принципы построения аппаратуры для проверки согласования каналов многоспектральных ОЭК.

Предметом исследования являются устройства проверки согласования каналов многоспектральных ОЭК, принципы их построения, связь между точностными и основными конструктивными характеристиками устройств, а также зависимости погрешности выполнения согласования от параметров проверяемого канала ОЭК.

Методы исследований

При решении поставленных задач диссертационной работы использованы методы и положения теоретической и прикладной оптики, основные положения теории планирования эксперимента, пакет программ расчёта оптических систем Zemax, программная среда Excel.

Экспериментальные исследования проводились в процессе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, приемо-сдаточных испытаний в производственных условиях и условиях опытной эксплуатации.

Достоверность результатов исследований подтверждается совпадением данных, полученных в математических моделях устройств проверки согласования и при реализации предложенных методик юстировки, с результатами экспериментальных исследований, проводимых в процессе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также приемо-сдаточных испытаний образцов устройств проверки согласования.

Научная новизна заключается в том что:

1. математические модели погрешностей устройств проверки согласования каналов составлены с учетом аберрационных характеристик объективов и влияния внешних механических воздействий;
2. методика определения основных конструктивных параметров устройств согласования основывается на аналитических зависимостях, устанавливающих взаимосвязь с инструментальной погрешностью.

Основные новые научные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Разработанные математические модели и базирующаяся на них методика позволяют определить основные конструктивные параметры и инструментальные погрешности устройств согласования.

2. Разработанные методики юстировки позволяют уменьшить инструментальные погрешности устройств проверки согласования без ужесточения технологических допусков на входящие в них элементы.

3. Результаты практической реализации и экспериментальных исследований устройств согласования и методик их юстировки подтверждаются допустимой степенью достоверности выдвигаемых теоретических положений:

– уменьшить увод изображения в 14 раз (с 35" до 2,5") для автоколлимационной трубы с двумя угловыми полями;

– уменьшить двоение изображения в 4 раза (с 10" до 2,6") для призмного устройства коллинеарного переноса;

– обеспечить стабильность параллельности выходящих пучков в пределах угловой секунды для коллиматора согласования каналов многоспектрального оптико-электронного комплекса.

Практическая значимость, реализация и внедрение результатов диссертационной работы состоят в обосновании метода рационального выбора схем устройств проверки согласования каналов, в предложенных методиках юстировки, позволяющих уменьшить погрешность устройств без ужесточения допусков на их изготовление. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования, использованы при разработке и производстве оптико-электронных комплексов в ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева».

Научная значимость работы. Показано, что рациональный выбор схемы устройства согласования, основанный на анализе математической модели погрешностей, позволяет разработать устройство с наименьшим количеством

элементов, а предложенная методика юстировки позволяет повысить точность устройств согласования без повышений требований к допускам на изготовление.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертационной работы докладывались на конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК в 2015 и 2016 гг., а также на XI-м международном форуме «Оптические системы и технологии — OPTICS-EXPO 2015» (г. Москва). Кроме того, апробация проводилась при экспериментальных исследованиях, проводимых в процессе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также приемо-сдаточных испытаний образцов устройств проверки согласования.

Публикации результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано две печатных работы в изданиях из перечня ВАК, три патента, из них два на изобретения, один на полезную модель:

1. Скляр С.Н. Инвариантные коллиматоры для согласования каналов оптико-электронных комплексов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 5. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С.138–146

2. Скляр С.Н. Устройства проверки согласования оптических осей каналов оптико-электронных комплексов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 9. С.741-749

3. Патент 2491586С9, РФ, МКП G02В 27/30. Автоколлимационное углоизмерительное устройство. Скляр С.Н., Семенов О.Б., Щеглов С.И.– Оpubл. 27.08.2013, БИ№31.

4. Патент 2555218С1, РФ, МКП G01В 11/27. Устройство для контроля параллельности оптических осей. Скляр С.Н.–Оpubл.10.07.2015, БИ№19.

5. Патент на полезную модель RU164129U1, РФ, МКП G01В 11/27. Устройство для контроля параллельности оптических осей. Скляр С.Н., Савелова Е.М.– Оpubл. 20.08.16, БИ№23.

Личный вклад автора

Все исследования, проведённые по теме диссертации, выполнены автором. Личный вклад автора состоит в сопоставлении различных устройств согласования, в составлении моделей погрешностей, определении зависимостей между погрешностями и конструктивными параметрами, разработке методик юстировки устройств проверки согласования и рекомендаций по выбору оптимальных схем.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованной литературы, включающего 78 наименования, и 8 приложений. Диссертация содержит в целом 140 страниц, 65 рисунков и 1 таблица.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА ПРОВЕРКИ СОГЛАСОВАНИЯ КАНАЛОВ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

До середины 50-х годов прошлого века для визирования приборов в основном использовались визуальные системы. Развитие и современное состояние оптико-электронного приборостроения известно из [5, 27, 28, 46, 50] существенно расширило номенклатуру каналов зрения, которые стали называться техническими, а также позволило создать системы управления, основанные на передаче информационного сигнала посредством излучения оптического диапазона. Каналы технического зрения повысили возможности обнаружения и распознавания объектов за счет использования специальных алгоритмов обработки сигналов и существенного расширения спектральных областей работы приборов. Вместе с каналами технического зрения за счет использования спектральной и пространственной селекции были созданы оптико-электронные каналы управления, отличающиеся высокой помехозащищенностью и скрытностью. Таким образом, современные оптико-электронные комплексы (ОЭК) зачастую содержат несколько каналов технического зрения сопряженных с оптико-электронными каналами управления. Это обстоятельство актуализирует задачу проверки согласования всех каналов оптико-электронного комплекса между собой. Настоящая диссертация посвящена рассмотрению некоторых методов проверки согласования каналов сложных оптико-электронных комплексов.

Задача выверки каналов в ОЭК возникает на разных стадиях их «жизненного цикла. В первую очередь, на стадии их производства, во вторую очередь – при их периодической поверке во время регламентных работ, а в отдельных случаях непосредственно перед или во время эксплуатации. В зависимости от решаемой задачи оборудование может быть разбито на три группы: цеховое оборудование, контрольно-поверочная аппаратура (КПА) и встроенные системы контроля. Соответственно, условия эксплуатации и

требования к этим группам различные: цеховое оборудование имеет наименьшие ограничения по условиям эксплуатации и расширенные требования по решаемым задачам, КПА имеет условия эксплуатации близкие к условиям эксплуатации проверяемого изделия, встроенные системы контроля должны обеспечивать решение задачи в составе проверяемого изделия в процессе эксплуатации. По номенклатуре каналов современные ОЭЖ, как правило, содержат не менее двух каналов технического зрения, лазерный дальномер и оптико-электронный канал управления. Из [1, 30, 44] известно, что наиболее широко распространены ОЭЖ, в которых один из каналов технического зрения работает в первом окне прозрачности атмосферы 0,3-1,3 мкм (видимый и ближний ИК-диапазон), а второй в одном из ИК-окон прозрачности 3-5 или 8-13 мкм, а канал лазерного дальномера работает на длине волны 1,06 или 1,54 мкм. При этом канал управления может быть построен как пеленгатор, работающий в диапазоне чувствительности кремниевого фотодиода, так и как лучевой канал управления, работающий, как правило, на длине волны 1,06 мкм. Таким образом, требования к устройствам проверки согласования современных ОЭЖ, учитывая возможные спектральные диапазоны и принципы работы выверяемых каналов, представляются весьма сложными. Задача несколько упрощается, если выверять не все каналы относительно друг друга, а определить один или несколько базовых каналов, к которым происходит привязка остальных. Как правило, в качестве базового канала выбирается тот, который является основным источником информации при работе изделия. Кроме того, при выборе базового для выверки канала необходимо учитывать не только возможность оценки рассогласования между выверяемыми каналами, но и возможность реализации устранения или учета данного рассогласования.

Различие условий выполнения проверки согласования каналов определяет конструктивное исполнение этих устройств. Цеховые устройства и устройства, используемые как КПА, выполняются конструктивно внешними по отношению к ОЭЖ, а устройства используемые для проверки во время эксплуатации, как правило, выполняют встроенными в ОЭЖ.

1.1. Внешние устройства проверки согласования каналов

Рассмотрим некоторые используемые устройства проверки согласования каналов. К наиболее простым устройствам проверки согласования каналов можно отнести устройство, состоящее из длиннофокусной линзы и фокального узла в соответствии с рисунком 1.1. Такая схема, ввиду ее габаритов может быть использована в основном в цеховых устройствах выверки каналов и реже в КПА. Линза в таком устройстве выполняет роль коллиматора, в фокальной плоскости которого находится тест, который позволяет произвести оценку рассогласований каналов ОЭК. Фокусное расстояние и форма линза, как правило, определяется из условий ничтожного влияния на ошибку выверки, а материал из условия пропускания в спектральных диапазонах выверяемых каналов ОЭК. Конструкция фокального узла определяется особенностями функциональной работы выверяемых каналов.

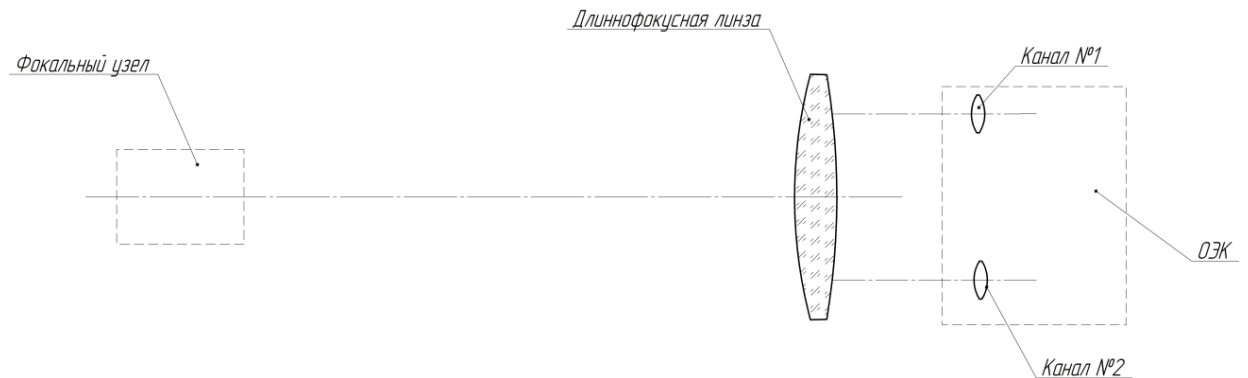
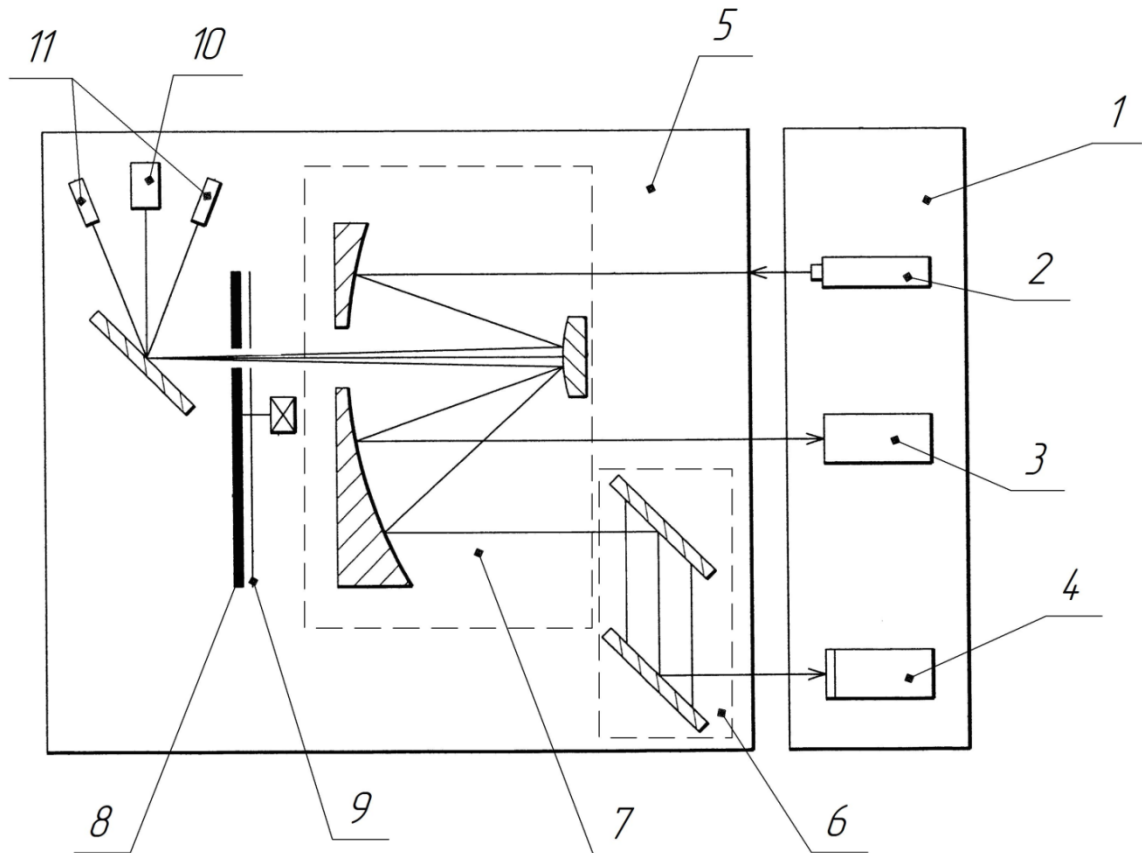


Рисунок 1.1 - Устройство проверки согласования на основе длиннофокусной линзы

Так, для выверки телевизионного канала и излучающего канала дальномера фокальный узел выполняется в виде визуализатора лазерного излучения, который может быть выполнен в виде специальной керамической пластины с нанесенным покрытием из антистоксового люминофора или обычной фотобумаги. В первом случае, в телевизионном канале будет наблюдаться свечение люминофора под воздействием лазерного излучения, во втором же отпечаток лазерного луча в виде

прожигу. Поскольку лазер, как правило, работает в импульсном режиме, то в первом случае характер процесса выверки можно считать динамическим процессом, а во втором статическим. Поэтому проверку согласования лазерного и телевизионного канала в процессе производства выполняют с использованием фотобумаги или фотопленки – это упрощает процесс оценки величины рассогласования и метрологического обеспечения данной методики. Для выполнения в цеховых условиях выверки ОЭК, имеющего в своем составе дополнительно тепловизионный канал, может быть использовано устройство, описанное в [77] и представленное на рисунке 1.2. Устройство работает следующим образом: излучение от импульса лазерного канала фокусируется зеркальным объективом, формирует точечную диафрагму вследствие прожигу от теплового воздействия на транспарант, который представляет собой бумагу или фольгу. Точечная диафрагма, подсвечивается источниками излучения, создающими излучение в тепловом и видимом спектральном диапазоне, и наблюдается через зеркальный объектив и зеркальный ромб каналами видимого и тепловизионного диапазонов. При последующей выверке турель поворачивается на следующую позицию диафрагмы и процесс выверки повторяется, и так до тех пор, пока не останется позиций турели без прожигу, затем транспарант меняется. Из описанного порядка работ можно предположить, что необходимость периодичной замены транспаранта, относит его к цеховым устройствам согласования. Кроме того, несколько спорным моментом является использование точечной диафрагмы для согласования тепловизионного канала. Это утверждение основывается на том, что уровень усиления в тракте тепловизионного канала будет определяться интегральным сигналом, который формируется как за счет излучения прошедшего через точечную диафрагму, так и за счет собственного излучения транспаранта. А поскольку процесс образования точечной диафрагмы в данном случае не может обеспечивать постоянство ее площади, то и подбор яркости ИК-источника излучения для оптимального соотношения полезного сигнала от диафрагмы и фона от транспаранта в каждом отдельном случае может

быть эмпирическим, что является еще одним доводом в пользу того, что данное устройство является цеховым или лабораторным.

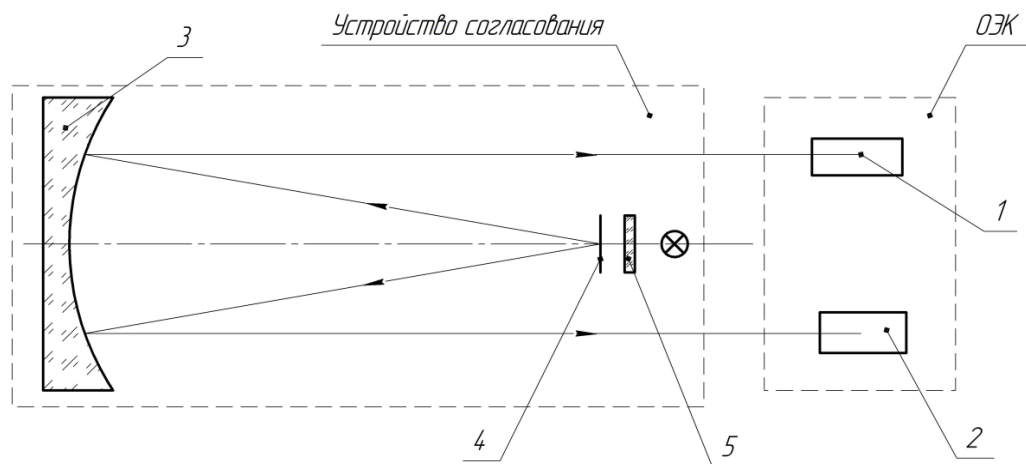


1- ОЭК, 2 – канал лазерного излучателя, 3 – канал видимого диапазона, 4 - канал тепловизионного диапазона, 5 – устройство проверки согласования, 6 – зеркальный ромб, 7 – зеркальный объектив, 8 – вращающаяся турель с диафрагмами, 9 – транспарант, 10 – источник ИК-излучения, 11 – источники видимого излучения

Рисунок 1.2 - Устройство проверки согласования комбинированного ОЭК

В случае, же если выверяемые каналы работают только на прием излучения, то фокальный узел представляет собой излучатель. Его конструкция в зависимости от сочетания выверяемых каналов ОЭК может быть сложной, например, в случае выверки каналов ОЭК, работающих в несогласованных спектральных диапазонах, или если один из выверяемых каналов выделяет объект по принципу временной селекции импульсных сигналов, а второй работает в режиме визирования. Известны, конструктивные исполнения устройств проверки

согласования с комбинированными фокальными узлами, которые реализуют оба случая. Так, например, в [62] описано устройство в виде зеркального коллиматора в соответствии с рисунком 1.3. Оно имеет фокальный узел, который формирует излучение от тест-объекта в видимом и тепловизионном диапазоне. Тепловое излучение формируется за счет нагрева тест-объекта, выполненного из токопроводящих нитей из нихрома, а видимое за счет подсветки того же тест-объекта излучателем с матовым стеклом. Такая конструкция фокального узла может быть использована для выверки каналов технического ОЭК, например, телевизионного и тепловизионного. Здесь длиннофокусная линза заменена на сферическое зеркало, что обеспечивает отсутствие влияния хроматизма на точность выверки в таком устройстве. Использование же параболического зеркала позволит устранить влияние сферической аберрации.

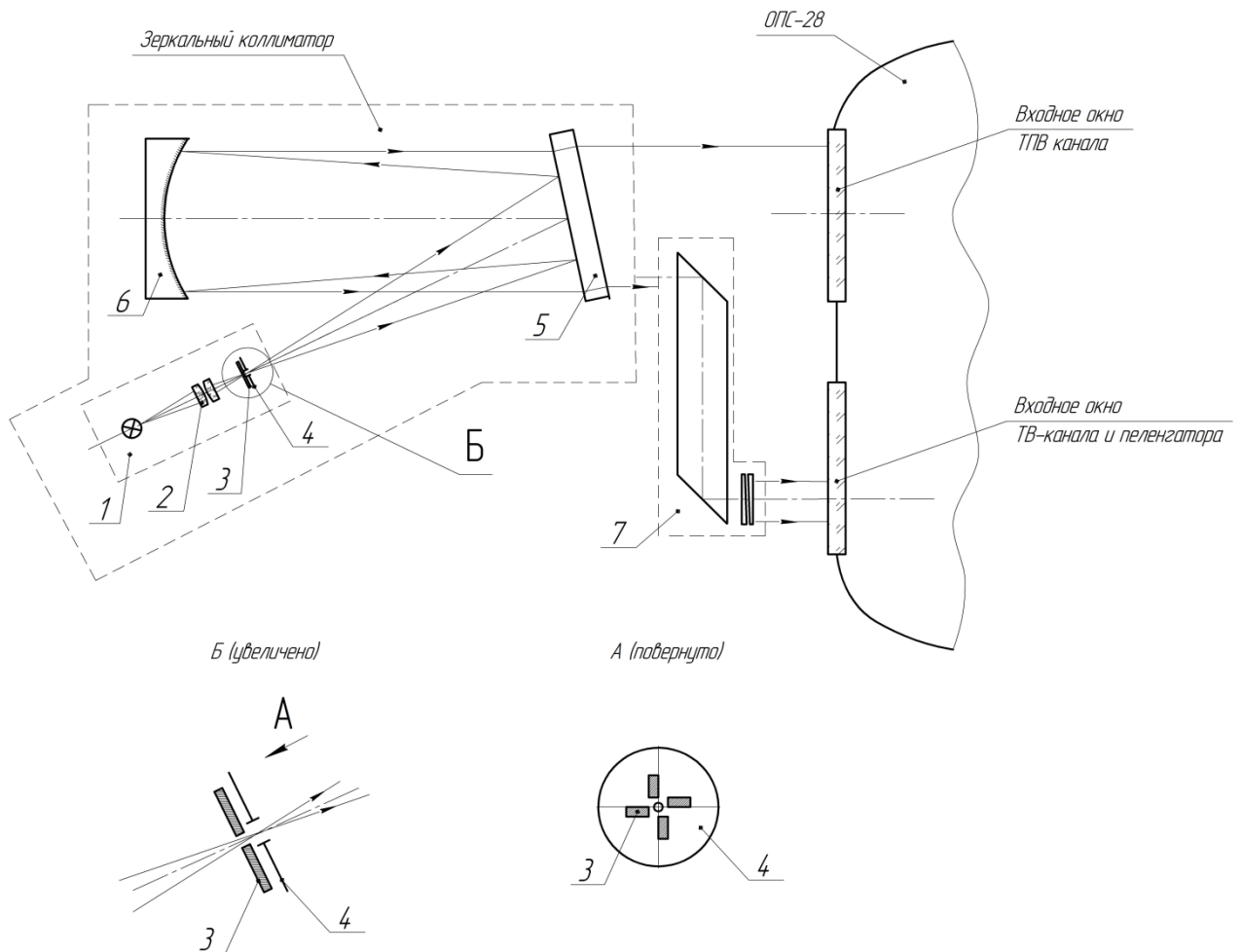


1 – канал видимого диапазона, 2 – канал тепловизионного диапазона, 3 –
зеркальный объектив, 4 – тест-объект, 5 – матовое стекло

Рисунок 1.3 - Устройство согласования с зеркальным объективом

К достоинству такой схемы следует отнести ее простоту, а к недостаткам – наличие центрального экранирования и большие габариты, вследствие чего использование данного устройства в качестве КПА, которое должно использоваться в эксплуатации с ОЭК, ограничено. Автором настоящей диссертационной работы был разработан коллиматор согласования осей для КПА

обзорно-прицельной станции вертолета Ми-28Н (ОПС-28), который изображен на рисунке 1.4. Фокальный узел данного коллиматора формирует излучение от тест-объекта в видимом и тепловизионном диапазоне. Это обеспечивается за счет того, что тест-объект выполнен в виде транспаранта, отверстия в котором подсвечиваются источниками излучения видимого и ИК-диапазонов. Точность согласования осей для видимого и тепловизионного каналов на выходе коллиматора определяется точностью изготовления транспаранта. Светоделительная пластина выполнена из селенида цинка. На ее внутренней стороне нанесено многослойное диэлектрическое покрытие, которое обеспечивает работу данного коллиматора в видимом и дальнем ИК-диапазонах. Для выполнения проверки согласования осей телевизионного и тепловизионного каналов в состав КПА дополнительно входит призмное устройство, которое устанавливается непосредственно на прибор управления ОПС-28. Оно представляет из себя ромб-призму, которая инвариантна к угловым наклонам в параллельных пучках, что позволяет существенно снизить требования к ее установке. В процессе проектирования коллиматора по приведенной оптической схеме необходимо обратить внимание на один ее недостаток. Проблема заключается в светоделительной пластине, а точнее в неизбежном вторичном изображении, формируемом лучами вследствие остаточного отражения от внешней стороны пластины. Вторичное изображение будет выглядеть как двоение расфокусированного тест-объекта. Поскольку полное исключение этого недостатка в данной схеме невозможно, необходимо снижать коэффициент остаточного отражения от внешней стороны пластины до уровня, при котором сигнал от вторичного изображения на выходе коллиматор не будет соизмерим с уровнем шумов выверяемого канала. Кроме того, достаточно сложной технологической задачей является изготовление ромб-призмы большой длины. Кроме необходимости достижения хорошего качества оптических поверхностей призмы нужно учитывать также влияние параметров стекла, которые играют при значительной длине хода луча в материале едва ли не решающую роль.



1 – фокальный узел, 2 – конденсор, 3 – источник ИК-излучения, 4 – транспарант, 5 – светоделительная пластина, 6 – сферическое зеркало, 7- устройство призмное

Рисунок 1.4 - Зеркальный коллиматор согласования осей

Описанные выше устройства можно объединить в группу устройств проверки согласования с одним выходным зрачком и комбинированным фокальным узлом. Габаритные размеры устройств данной группы определяются в основном размером выходного зрачка, так как фокусное расстояние прямо пропорционально ему и связано с ним через диафрагменное число. Таким образом, в случае, если выверяемые каналы ОЭЖ будут находиться на значительном расстоянии, то выходной зрачок устройства проверки согласования и его фокусное расстояние будут велики, что приведет к большим габаритам.

Для реализации устройств выверки каналов ОЭЖ, имеющих значительное расстояние между каналами, известны различные схемы с разнесенными

выходными лучами. Их можно разделить на устройства проверки согласования с несколькими фокальными узлами и устройства с комбинированными фокальными узлами в сочетании с устройствами коллинеарного переноса.

К наиболее простым устройствам выверки с разнесенными лучами и несколькими фокальными узлами следует отнести устройства, описанные в [13]. Они представляют собой набор коллиматоров (рисунок 1.5), оптические оси которых параллельны. Каждый коллиматор имеет собственный фокальный узел с маркой и источником излучения, позволяющим выполнить визирование соответствующего канала ОЭК. Это позволяет уменьшить длину устройства за счет того, что выходные лучи для каждого из каналов невелики, что определяет малые фокусные расстояния каждого из коллиматоров. Однако в этом случае, предъявляются очень жесткие требования к конструкции, обеспечивающей стабильность параллельности оптических осей всех коллиматоров. Требование к стабильности конструкции может быть существенно снижено, если многоколлиматорное устройство проверки согласования будет построено с использованием пространственно-инвариантных объективов [43]. Устройство согласования, изображенное на рисунке 1.6, в этом случае будет состоять из плоского зеркала и пространственно-инвариантных объективов с фокальными узлами. В этой схеме поперечные смещения и повороты объективов вокруг осей, перпендикулярных оптической, не вызывают угловых смещений изображений, а основные ошибки возникают вследствие изгиба плоского зеркала. Таким образом, обеспечив неизменность формы зеркальной поверхности, можно добиться высокой стабильной точности устройства. Некоторую сложность представляет то, что фокальные узлы в пространственно-инвариантных объективах должны иметь тест-объект в узловой точке объектива. Это усложняет организацию его подсветки и приводит к центральному экранированию, что несколько снижает качество изображения тест-объекта.

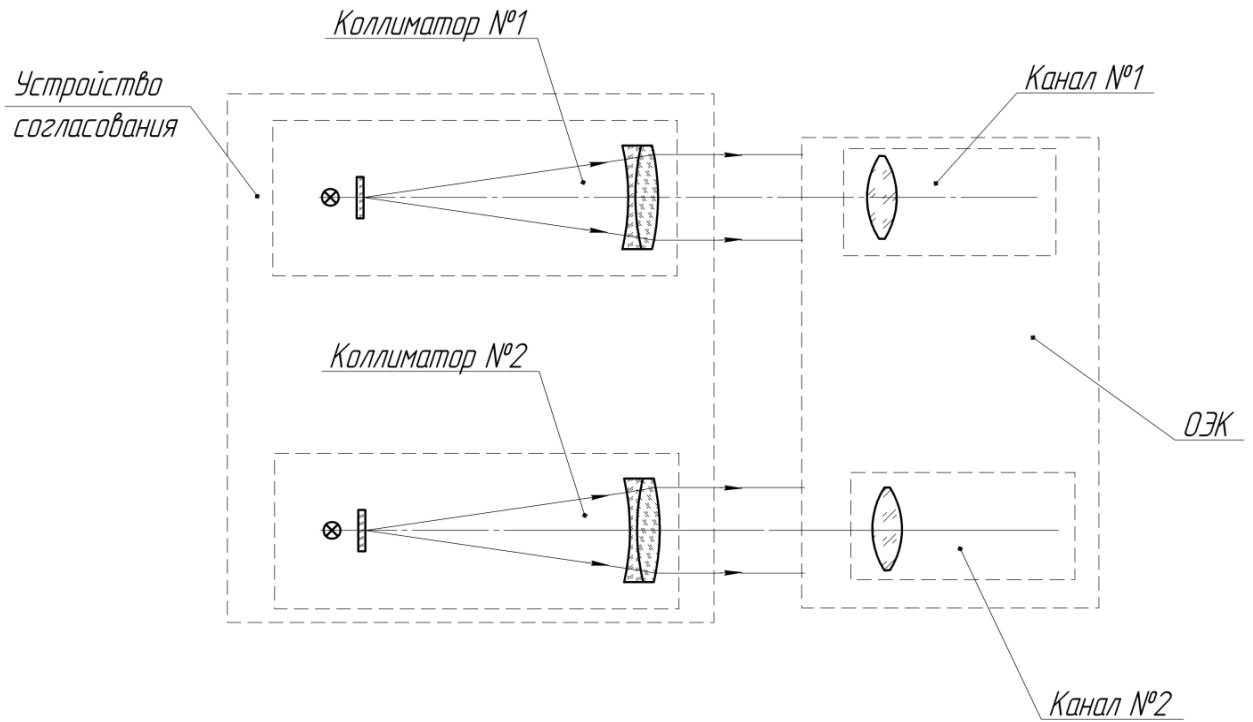


Рисунок 1.5 - Устройство согласования с несколькими коллиматорами

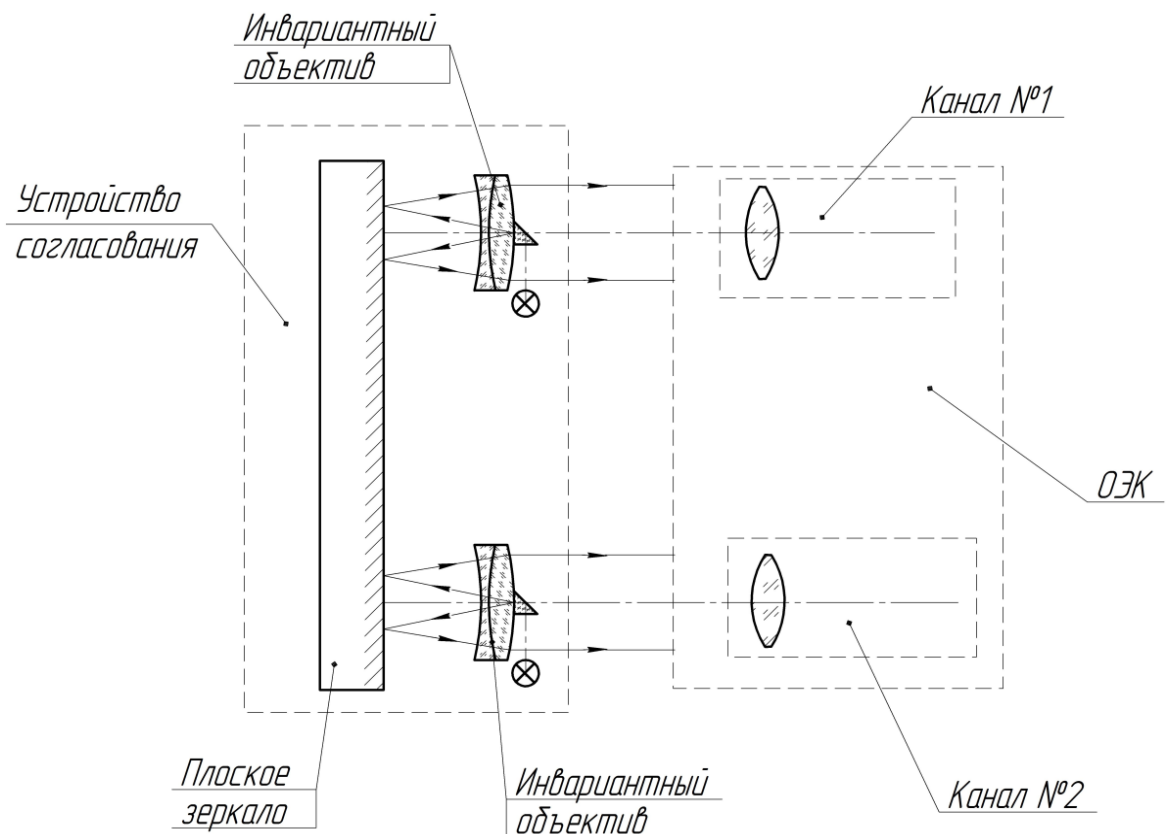


Рисунок 1.6- Устройство проверки согласования с инвариантными объективами

Такого недостатка лишены устройства проверки согласования, построенные по схеме классического коллиматора и дополненные устройствами коллинеарного

переноса, инвариантными к их смещениям и поворотам [7]. Коллиматор имеет оптическую систему и комбинированный фокальный узел, которые обеспечивают визирование любого из каналов. Устройство коллинеарного переноса позволяет получить межзрачковое расстояние, превышающее размер выходного зрачка устройства, и выполняется в виде зеркально-призменного блока [11]. В зависимости от выбранной конструкции устройства коллинеарного переноса устройство проверки согласования будет иметь различное назначение. Так, если в качестве устройства коллинеарного переноса используется зеркально-призменный блок в виде зеркального ромба, то такое устройство будет размещаться вне корпуса ОЭЖ. Если же в качестве устройства коллинеарного переноса используется зеркально-призменный блок в виде зеркального триэдра, то такое устройство проверки согласования может быть встроенным. При необходимости одна из граней зеркально-призменного блока может быть выполнена спектроделительной. Это позволяет геометрически совместить зрачки выверяемых каналов и соответственно уменьшить размер выходного зрачка устройства, что приводит к уменьшению его размеров. Рассмотрим некоторые типовые схемы устройств с зеркально-призменными блоками.

Наиболее простой является схема устройства проверки согласования описанная в [37]. Устройство, изображенное на рисунке 1.7, состоит из длиннофокусной линзы 1, призменного блока 2 и блока клиньев 3. Линза 1, рассчитана на минимум сферической аберрации и служит для формирования бесконечно удаленного предмета. Призменный блок 2 выполнен в виде склеенной призмы, которая состоит из ромб-призмы и прямоугольной призмы, на гипотенузную грань которой нанесено светоделительное покрытие. Призменный блок 2 служит для совмещения центров зрачков выверяемых каналов №1 и №2 с центром входного зрачка линзы 1. Блок клиньев 3 состоит из двух клиньев с одинаковым углом клина при вершине, которые могут вращаться относительно оптической оси как вместе, так и независимо друг друга. Блок клиньев 3 служит для компенсации ошибок изготовления призменного блока 2, при этом клинья путем разворота должны быть установлены таким образом, чтобы луч,

выходящий из блока призмного в направлении канала №1, и луч, выходящий из блок призмного в направлении канала №2 и прошедший блок клиньев 3, были параллельны.

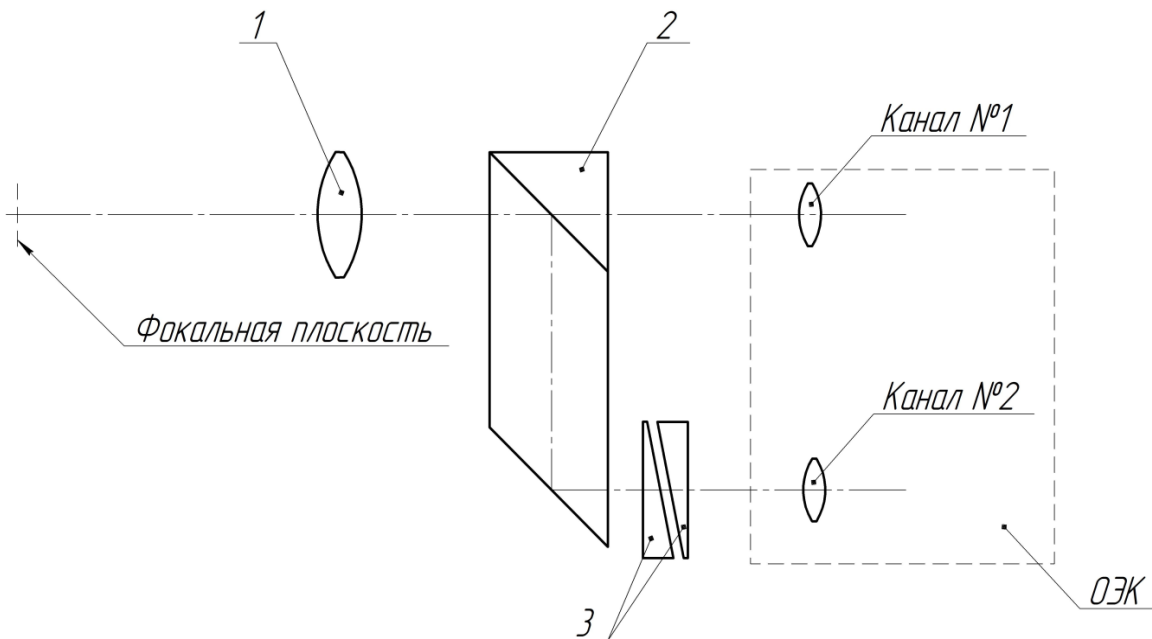


Рисунок 1.7 - Схема устройства проверки согласования на основе линзы и призмного блока

Устройство может работать в двух режимах: в режиме выверки приемных каналов, например, телевизионного канала и пеленгационного канала, и в режиме приемного и излучающего канала, например, телевизионного канала и лазерного канала. Для выполнения выверки телевизионного и излучающего канала в фокальной плоскости линзы 1 устанавливается фотобумага, на которой нарисована прицельная марка, например, в виде креста. ОЭК с помощью телевизионного канала визируется на прицельную марку. Затем производится однократный импульс излучающего канала дальномера, излучение которого фокусируется на фотобумаге и вследствие теплового воздействия оставляет темное пятно. Рассогласование оценивается по величине угла, который определяется как отношение линейного рассогласования, измеренного на фотобумаге и фокусного расстояния линзы.

Для выполнения выверки телевизионного и пеленгационного каналов в фокальной плоскости линзы устанавливается комбинированный излучатель, в соответствии с рисунком 1.8, который содержит диафрагму, подсвечиваемую двумя источниками излучения. Источник излучения 1 синхронизирован с пеленгационным каналом ОЭК по спектру и частоте импульсов, что обеспечивает устойчивое слежение за ним пеленгационного канала, а источник 2 подсвечивает диафрагму, которая в отраженном свете наблюдается в телевизионном канале ОЭК. Выверка выполняется следующим образом: ОЭК визируется телевизионным каналом на центр подсвечиваемой диафрагмы, а пеленгационный канал при этом работает в следящем режиме, выдавая величину рассогласования.

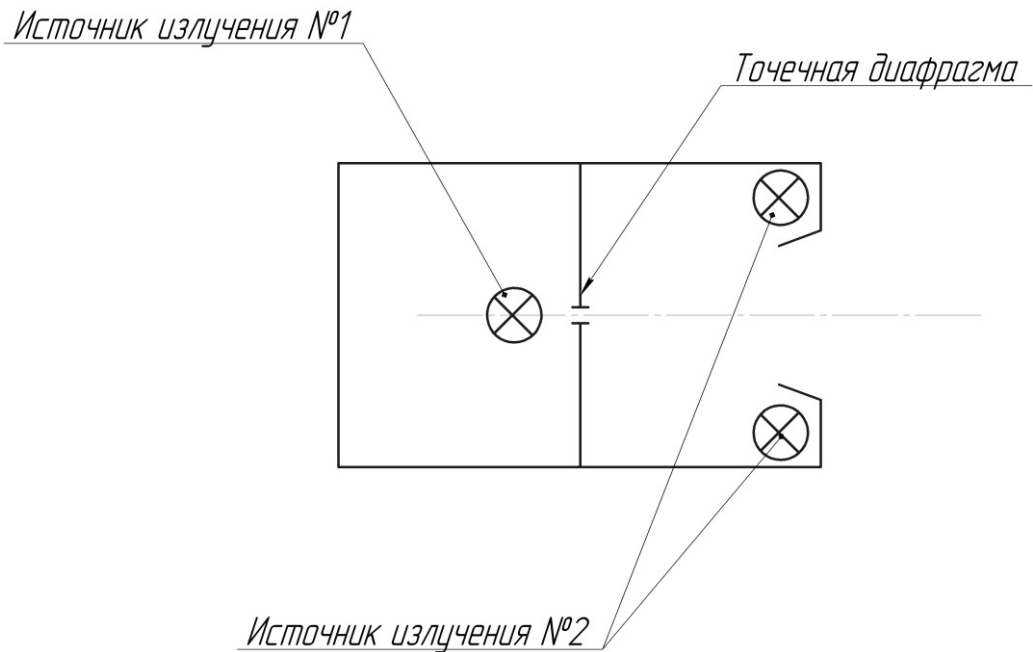


Рисунок 1.8 - Комбинированный излучатель для выверки телевизионного и пеленгационного каналов

Данная конструкция была успешно опробована при создании устройства проверки согласования телевизионного и пеленгационного каналов обзорно-прицельной станции вертолета Ми-28Н (ОПС-28). Описанное устройство в виду ограниченной спектральной полосы пропускания материала пригодно для

выверки каналов, работающих в видимом и ближнем ИК окне прозрачности атмосферы, что не позволяет произвести проверку согласования каналов, работающих в других ИК окнах прозрачности атмосферы.

В [6] описан коллиматор из состава КПА тепловизионного прицела 1ПН86-ВИ «Муллат-115», изображенный на рисунке 1.9, который используется для проверки согласования тепловизионного и визирного каналов. Он представляет из себя зеркальный коллиматор с призмным блоком. В состав коллиматора входят: фокальный узел, параболическое и плоское зеркало с отверстием, формирующие бесконечно удаленное изображение тест-объекта, находящегося в фокальном узле, призмный блок, состоящий из ромб-призмы и блока клиньев, который передает часть пучка для выверки визуального канала, экранируя при этом часть зрачка для выверки тепловизионного канала. К достоинствам данной схемы следует отнести отсутствие сферической аберрации и стабильность взаимного положения отражающих граней призмного блока. Однако, применить призмный блок такой конструкции для выверки каналов, расположенных на значительном расстоянии технически сложно. В этом случае требуется длинная ромб-призма с небольшим сечением. Несмотря на то, что угловые ошибки, неизбежно возникающие при изготовлении, можно скомпенсировать блоком клиньев, изготовить такую призму технологически крайне сложно. Сложность заключается, как в подборе материала, обладающего высокой однородностью, бесвильностью и двулучепреломлением, так в обработке отражающих граней с высокими требованиями по общей и местной ошибке. Несоблюдение этих требований приведет к снижению разрешающей способности, что может привести к ошибке оператора при наведении на тест-объект, передаваемый призмным блоком с низким качеством.

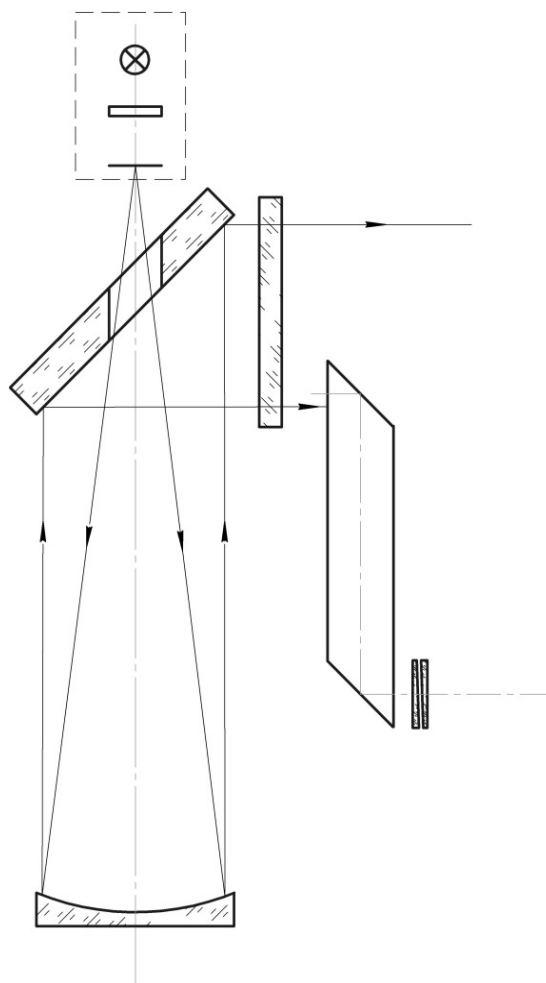


Рисунок 1.9 - Коллиматор из состава КПА тепловизионного прицела 1ПН86-ВИ
«Мулат-115»

Для уменьшения влияния дефектов материала призмы и местных ошибок отражающих поверхностей авторами патента [59] было предложено устройство для контроля непараллельности тепловизионного и визуального каналов комбинированных прицелов. Это устройство выполнено с использованием зеркального ромба, одна из граней которого выполнена спектроделительной. Оно, как показано на рисунке 1.10, содержит зеркальный коллиматор и зеркальный ромб, который геометрически согласовывает тепловизионный и визуальный каналы комбинированного прицела. Зеркальный коллиматор 1 включает в себя зеркальный объектив 2, в фокальной плоскости которого установлена сетка 3 с прозрачными для видимого и ИК излучения штрихами. Сетка 3 подсвечивается источником излучения 4, который состоит из нагревательного элемента 5 с

устройством регулировки его температуры 6, и источника видимого излучения 7 с устройством регулировки его яркости 8. Источник видимого излучения 7 оптически сопряжен с нагревательным элементом 5. Зеркальный ромб содержит спектроделительную пластину 10 и компенсатор ошибок направления световых пучков 11, выполненный в виде двух клиновидных пластин, имеющих возможность вращаться вокруг оси. На оси визуального канала комбинированного прицела 14, в фокальной плоскости объектива 15, установлена сетка 16, которая рассматривается через окуляр 17 визуального канала. Центральная марка на сетке 16 определяет положение визирной оси визуального канала. На оси ИК канала установлена тепловизионная камера 18, выход которой подключен к видеосмотровому устройству 19. Марка, рассматриваемая на видеосмотровом устройстве 19, определяет положение визирной оси тепловизионного канала.

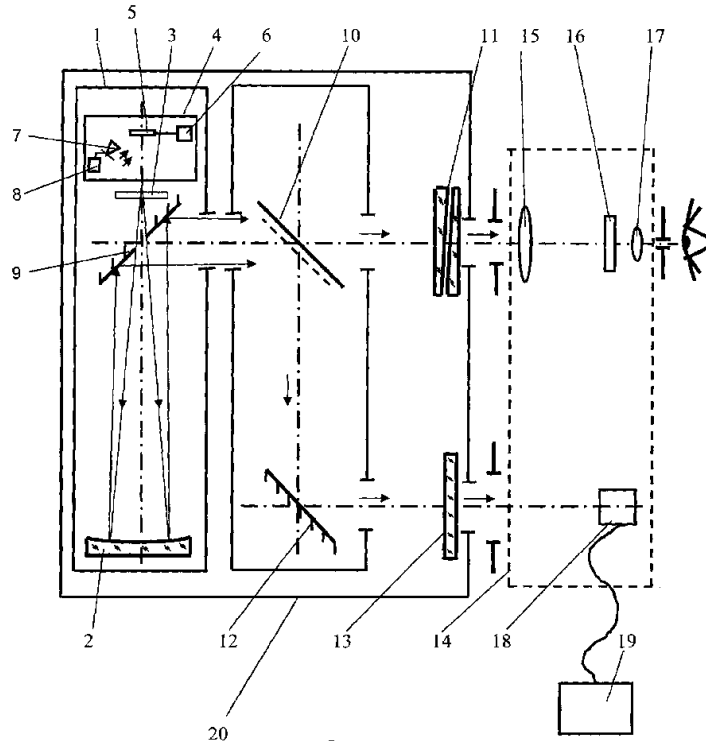


Рисунок 1.10 - Устройство для контроля непараллельности тепловизионного и визуального каналов комбинированных прицелов

1.2. Встроенные устройства проверки согласования каналов

Приведенные выше устройства проверки согласования были разработаны как цеховые, или устройства КПА. Наибольший интерес представляют устройства, которые обеспечивают выверку каналов ОЭК в процессе эксплуатации. Так, в [70] описан ряд устройств проверки согласования, используемых ОЭК различной авиационной техники.

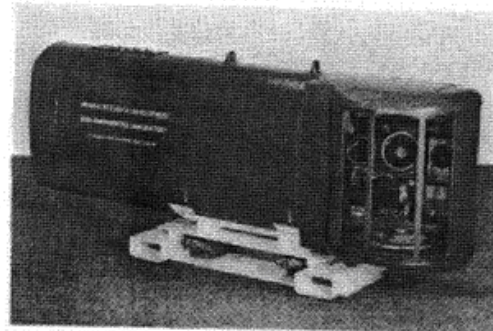
Так, бортовая система лазерного целеуказания на стабилизированной платформе (SPAL – Stabilized Platform Airborne Laser, см. рисунок 1.11) разработанная фирмой Northrop для армии США, состоящая из лазерного целеуказателя-дальномера и ТВ-камеры, устанавливаемых на платформе с двух осевой стабилизацией, выверяется по обратному ходу отраженного лазерного луча уменьшенной мощности, направленного в кремниевый видикон ТВ камеры (см. рисунок 1.12). Точность выверки обеспечивается призмным отражателем типа БкР-180, который установлен в корпусе SPAL. Выверка производится при развороте стабилизированной платформы в походное положение. Установленный на борту вертолета УН-1, SPAL давал целеуказание по танковым мишеням на большой дальности во время первой успешной стрельбы ракетами Hellfire (с лазерным наведением на цель) на испытаниях в 1974 году.

Система лазерного целеуказания AN/AVQ-27 (LTDS – Laser Target Designator Set), предназначенная для лазерного целеуказания, наблюдения, разведки и возможности записи бомбовых разрушений, устанавливаемая на самолеты типа Northrop F-5B и F-5F, содержит фотокамеру, визуальный канал и высокомогущный лазер, который проходит через объектив, общий с визуальным телескопом. Прицельная сетка визуального канала прицела ОЭК выверяется по визуально наблюдаемым вспышкам, создаваемых лазерным лучом, сфокусированным на мишень в тестовом коллиматоре в соответствии с рисунком 1.13.

Вертолетная система светового наблюдения и захвата цели/целеуказания (LOHTADS – Light Observation Helicopter Target Acquisition / Designation System) включает в себя тепловизионный канал и лазерный целеуказатель/дальномера. Компания Northrop предлагает производить выверку тепловизионного канала системы LOHTADS на борту, юстировкой по выходному коллимированному излучению от «яркой вспышки», создаваемой лазером, при фокусировке зеркального телескопа, в соответствии с рисунком 1.14.



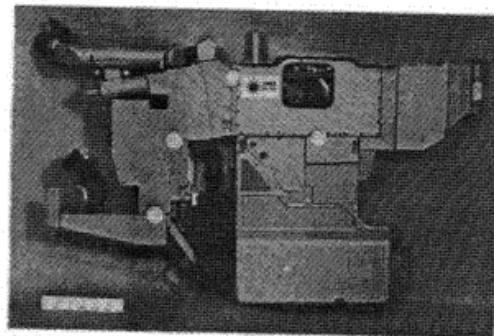
Система SPAL на вертолете AH-1G



БОРТОВОЕ ЛАЗЕРНОЕ УСТРОЙСТВО
НА СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ
ПЛАТФОРМЕ (SPAL)



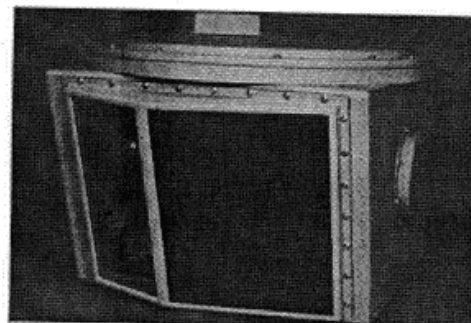
СИСТЕМА LTDS НА САМОЛЕТЕ F-5F



ЛАЗЕРНЫЙ ЦЕЛЕУКАЗАТЕЛЬ (LTDS)



СИСТЕМА LOHTADS,
УСТАНОВЛЕННАЯ НА ВЕРТОЛЕТЕ
НОН-6



СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ И
ЦЕЛЕУКАЗАНИЯ ЛЕГКИХ
РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫХ ВЕРТОЛЕТОВ
(LOHTADS)

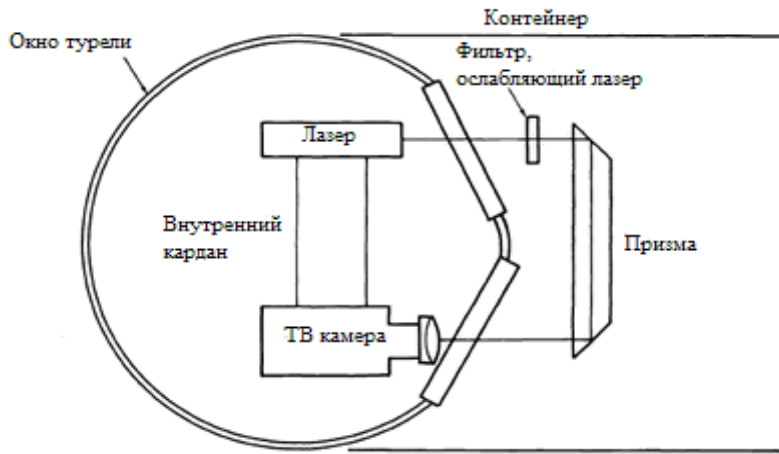


Рисунок 1.12 - Схема выверки ОЭК SPAL



Рисунок 1.13- Схема выверки ОЭК AN/AVQ-27

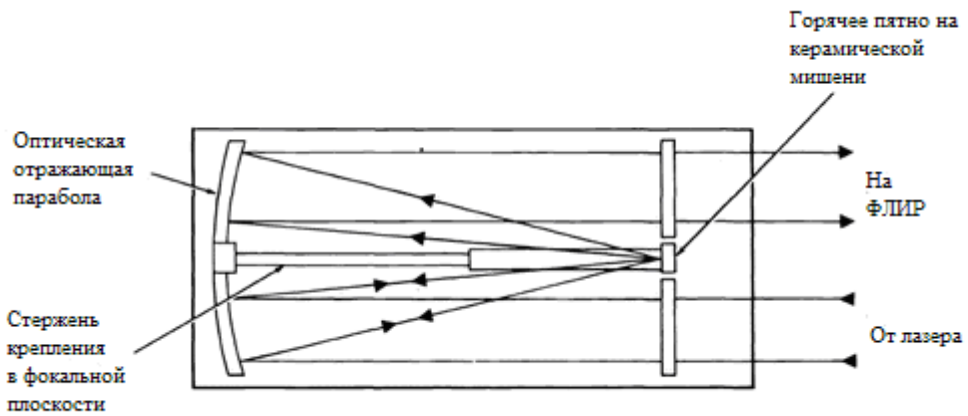


Рисунок 1.14- Схема выверки ОЭК LOHTADS

ОЭК TADS современного ударного вертолета (ААН- Advanced Attack Helicopter) УАН-64 армии США, показанный на рисунке 1.15, требует точной юстировки ТВ-канала, визуального канала (DVO – Direct View Optics) и тепловизионного канала (FLIR) с высокомоощным лазерным дальномером/целеуказателем (LRF/D – Laser Rangefinder/Designator). Эта система включает в себя также лазерный пеленгатор для захвата цели. ОЭК TADS содержит многорежимный объектив, являющийся общим для ТВ, DVO и лазерного приемного канала. Выверка выполняется с развернутой назад вращающейся платформой TADS в походном положении так, чтобы входные зрачки каналов были установлены напротив выходных зрачков модуля выверки, изображенного на рисунке 1.16.



Рисунок 1.15 - Оптико-электронная станция TADS

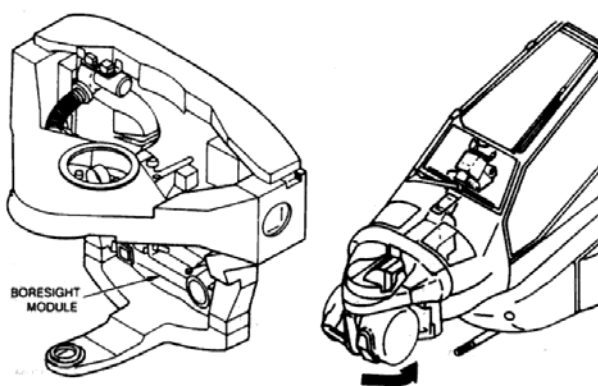


Рисунок 1.16 -Модуль выверки каналов ОЭК TADS

Первоначально предлагалось выверять TADS обратным отражением пучка лазера через угольную отражающую призму, как показано на рисунке 1.17, с тем, чтобы выверять ТВ-канал с излучающим каналом дальномера. Затем, удерживая оптическую ось ТВ-канала на марке коллиматора видимого диапазона при помощи автомата сопровождения цели, выполнить выверку ТВ-канала с визуальным (DVO) и тепловизионным (FLIR) каналом при помощи коллиматора видимого диапазона или параллельно стоящим с ним коллиматора, работающим в ИК-диапазоне спектра. Ограниченность этой методики заключалась в том, что вибрации вертолета в полете не позволяют выполнять точное слежение за маркой коллиматора видимого диапазона, приводя к неточной выверке визирного и тепловизионного каналов.

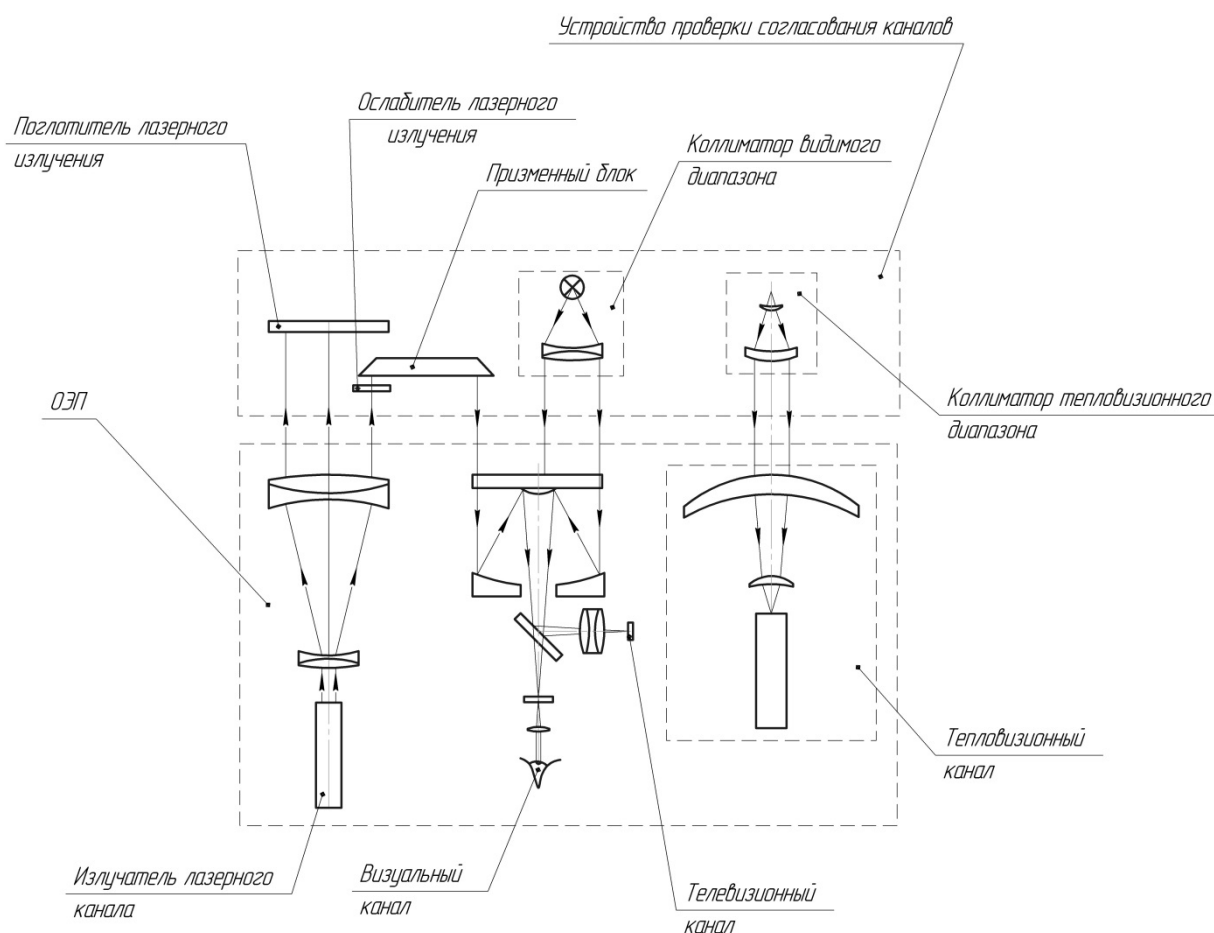


Рисунок 1.17 - Первоначальный вариант модуля выверки ОЭК TADS

Для исключения указанного недостатка в [73] был предложен модуль построенный на методе «горячей точки». Этот метод основан на том, что выверка

каналов ОЭК ведется по небольшой яркой горячей вспышке на керамическом элементе, который излучает как абсолютно черное тело, в соответствии с рисунком 1.18, видимое во всех трех каналах TADS.

Устройство, изображенное на рисунке 1.19, выполнено в виде модуля 1, который состоит из зеркального коллиматора 2 с керамическим элементом 3 в фокальной плоскости и зеркального ромба 4, содержащего светоделительную пластину 5, зеркало 6, германиевое окно 7, блок клиньев 8 и ослабляющий фильтр 9. Устройство работает следующим образом: излучение от дальномера-подсветчика, работающего на длине волны 1,06 мкм, попадает в устройство согласования через блок клиньев 8 и ослабляющий фильтр 9, отражается от зеркала 6 и проходит через светоделительную пластину 5 и фокусируется зеркальным коллиматором 2 на керамическом элементе 3, где происходит диффузное отражение излучения, часть которого по обратному пути попадает в телевизионный канал. Керамический элемент 3 при кратковременном облучении локально нагревается, и тепловое излучение от него посредством коллиматора 2, отражаясь от светоделительной пластины 5 через германиевое окно 6 попадает в тепловизионный канал. Ослабляющий фильтр 9 обеспечивает необходимый и достаточный уровень энергии входящего/выходящего лазерного излучения для работы приемной аппаратуры телевизионного канала, а также позволяет продлить срок службы керамического элемента. В качестве материала мишени – керамического элемента выбран минерал муллит. Этот материал обладает высокой термической прочностью и малой теплопроводностью, что позволяет выдерживать ему более 600 000 циклов облучения и достаточный уровень сигнала для тепловизионного канала вследствие малого рассеяния энергии.

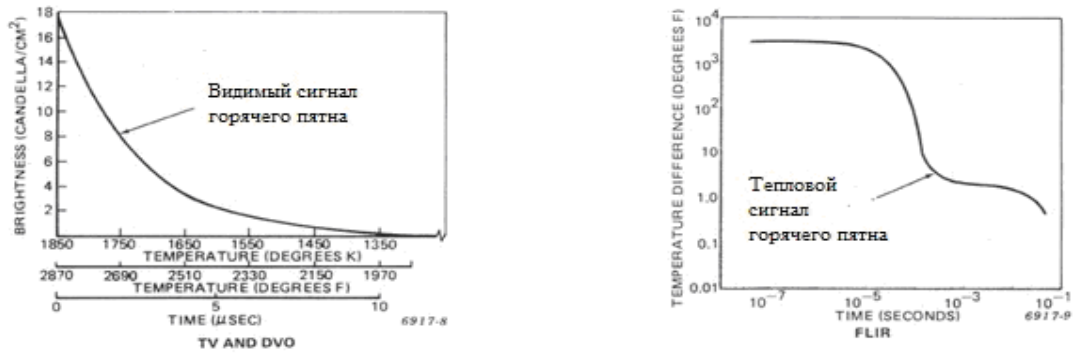


Рисунок 1.18 - Графики зависимости сигнала выверки от времени

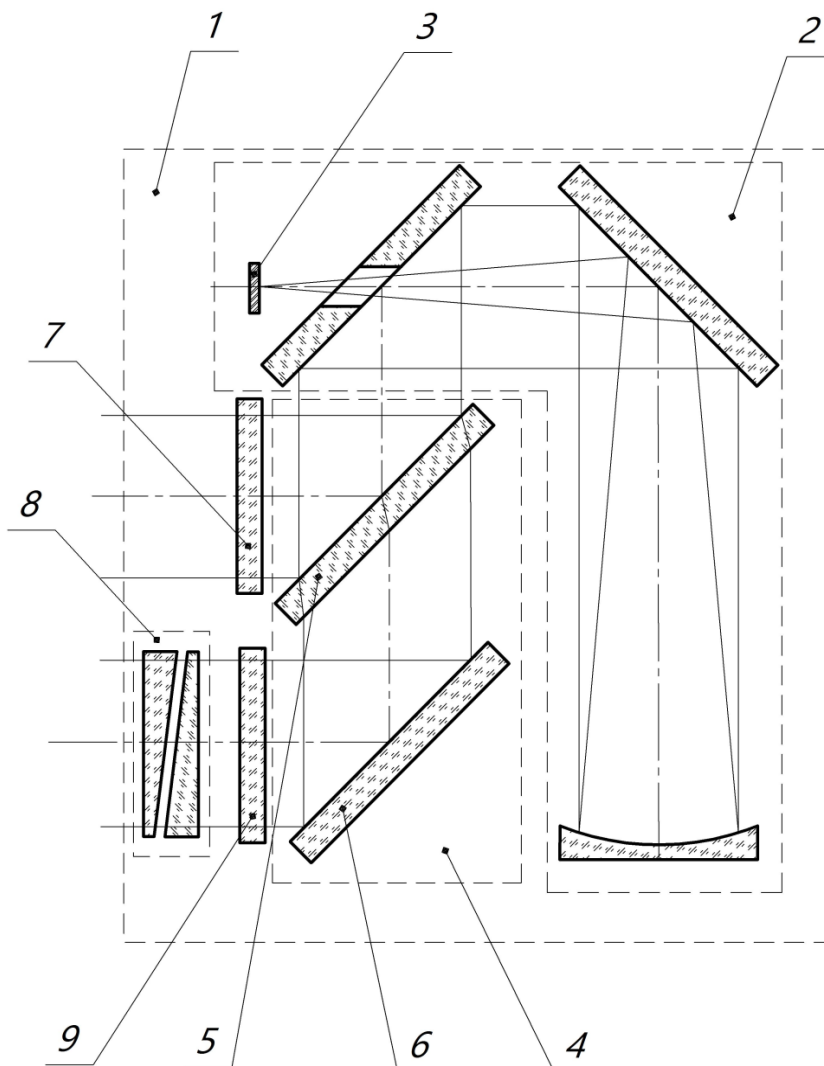


Рисунок 1.19 - Принципиальная схема устройства проверки согласования каналов
ОЭП TADS

Использование описанной схемы устройства проверки согласования, при которой отсутствует материальная марка, задающая направление, позволяет использовать его при наличии вибраций и ошибки взаимного положения оптико-электронного комплекса и устройства проверки согласования. Это обусловлено тем, что влияние вибрации не сказывается на ошибке согласования ввиду краткости импульса лазерного дальномера. А сама схема аналогична схеме зеркально-линзового отражателя, свойства которого описаны [2], что и определяет ее инвариантность к ошибке взаимного положения оптико-электронного комплекса и устройства проверки согласования.

Основными источниками погрешностей согласования в данном устройстве являются зеркальный ромб и лазерный излучатель. Погрешности ромба возникают вследствие погрешности взаимного углового положения зеркала и светоделительной пластины, которая удваивается на его выходе. Для повышения стабильности их взаимного углового положения с учетом температурных и механических условий эксплуатации данного устройства, авторам потребовалось создание полукинематической конструкции с использованием инвара. Погрешности, связанные с лазерным излучателем заключаются в том, что расходимость лазерного излучения, как правило, в несколько раз больше, чем требуемая точность углового согласования прицельных каналов, при том, что имеется некоторое смещение центра энергетического пятна многомодового излучения лазера от импульса к импульсу. Строго говоря, данным устройством можно произвести согласование телевизионного и тепловизионного каналов с излучающим каналом дальномера. Результаты испытания данного устройства приведены на рисунке 1.20 и в [70].

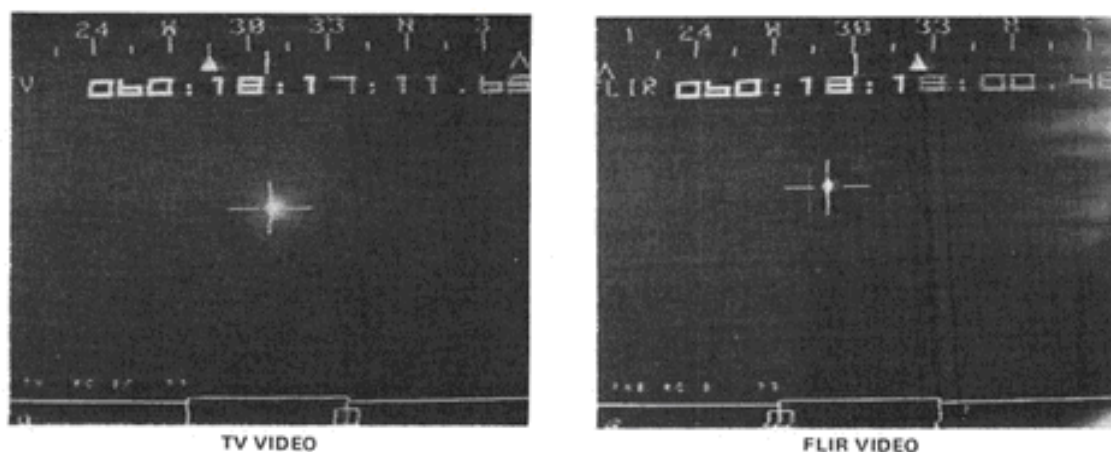


Рисунок 1.20 - Кадры видеозаписи при выверке телевизионного и тепловизионных каналов ОЭК TADS

Выводы по главе 1

В главе 1 рассмотрены различные схемы устройств проверки согласования каналов ОЭК. Простейшие устройства проверки согласования представлены устройствами, где в качестве объектива использована одиночная линза или одиночное зеркало. По сути оба устройства являются коллиматорами, апертура которых перекрывает согласуемые зрачки ОЭК. Устройство с одиночным зеркалом отличается от линзового только наличием экранирования и увеличенным рабочим спектральным диапазоном. Основным недостатком этих схем являются большие габариты, обусловленные с тем, что фокусное расстояние таких объективов для минимизации сферической аберрации должно быть до 10 раз больше выходного зрачка устройства.

Добавление к простейшим устройствам проверки согласования устройств коллинеарного переноса, например ромб-призмы, позволяет уменьшить габаритные размеры устройств проверки согласования, так как в этом случае выходной зрачок объектива устройства соизмерим с входным зрачком

согласуемого канала ОЭК. В зависимости от рабочих спектральных диапазонов согласуемых каналов ОЭК объективы устройств согласования могут линзовыми или зеркальными, а устройства коллинеарного переноса призмными или зеркальными. С ростом расстояния между оптическими осями согласуемых каналов ОЭК появляется недостаток таких систем – сложность в создании высокостабильного устройства коллинеарного переноса больших размеров;

Устройства проверки согласования с инвариантными коллиматорами лишены перечисленных выше недостатков, так как размеры выходных зрачков объективов устройства соизмеримы с входными зрачками согласуемых каналов ОЭК, а проверка согласования каналов, расположенных на большом межосевом расстоянии, обеспечивается за счет единого плоского зеркала. Однако следует отметить, что схема проверки самого устройства традиционными методиками при большом межзрачковом расстоянии представляется сложной;

Встроенные устройства, использующие для согласования в качестве тест-объекта сфокусированное на мишени лазерное излучение. К достоинствам таких устройств следует отнести высокую устойчивость к погрешностям взаимного положения устройства согласования и проверяемых каналов, а к недостаткам – зависимость погрешности согласования от формы и энергетических характеристик сфокусированного пятна.

Техническая литература, исследованная в рамках настоящей диссертационной работы, не содержит классификаций и моделей погрешностей устройств проверки согласования каналов многоспектральных ОЭК. Создание таких моделей будет способствовать всестороннему анализу схем согласования и их реализации на практике.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ УСТРОЙСТВ ПРОВЕРКИ СОГЛАСОВАНИЯ КАНАЛОВ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ УСТРОЙСТВ ПРОВЕРКИ СОГЛАСОВАНИЯ КАНАЛОВ

Основываясь на обзоре, выполненном в главе 1, можно условно разделить схемы построения рассмотренных устройств проверки согласования каналов на несколько классов. Классификацию схем можно выполнить по признакам устройства узла тест-объекта (см. рисунок 2.1): он может быть единым для всех каналов, их может быть несколько, его может не существовать материально и, очевидно, его устройство может быть комбинированным.

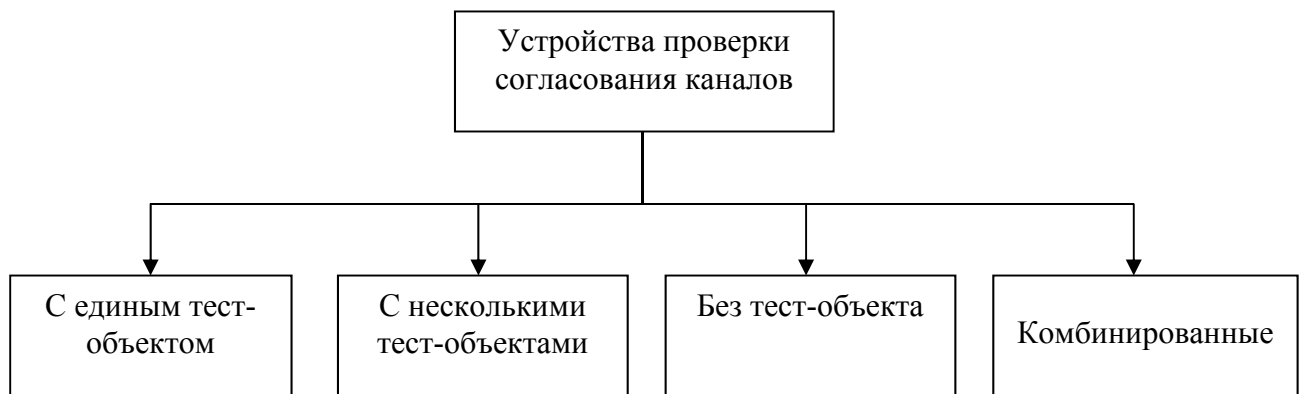


Рисунок 2.1 - Классификация устройств проверки согласования каналов

Данная классификация достаточно условна, но позволяет некоторым образом структурировать то многообразие схем, которое существует в настоящий момент. Далее при подробном рассмотрении выделенных классов будет показано возможное развитие схем устройств проверки согласования каналов, которое зачастую не может быть отражено в данной классификационной схеме.

2.1 Схемы устройств проверки согласования каналов с единым тест-объектом

Как видно из названия, схемы устройств из данного класса построены с использованием одного тест-объекта, который должен наблюдаться всеми проверяемыми каналами. Это обстоятельство формирует требование не только к источнику излучения, который должен формировать излучение во всех спектральных диапазонах проверяемых каналов, но и оптической системе устройства проверки согласования, которое должно обеспечить его передачу на каналы ОЭП.

Одним из наиболее простых устройств проверки согласования каналов ОЭП является устройство, построенное на основе длиннофокусной линзы и тест-объекта, установленного в фокальной плоскости линзы (см. рисунок 2.2). Преимуществом данной схемы является простота конструкции, однако хроматизм, присущий однолинзовой схеме, ограничивает рабочий спектральный диапазон устройства. При этом его расширение за счет усложнения оптической схемы (например, применение дублета и др.) не является оправданным, так как ахроматизация в диапазоне от видимого до дальнего инфракрасного излучения требует применения дорогостоящих материалов [47, 72].

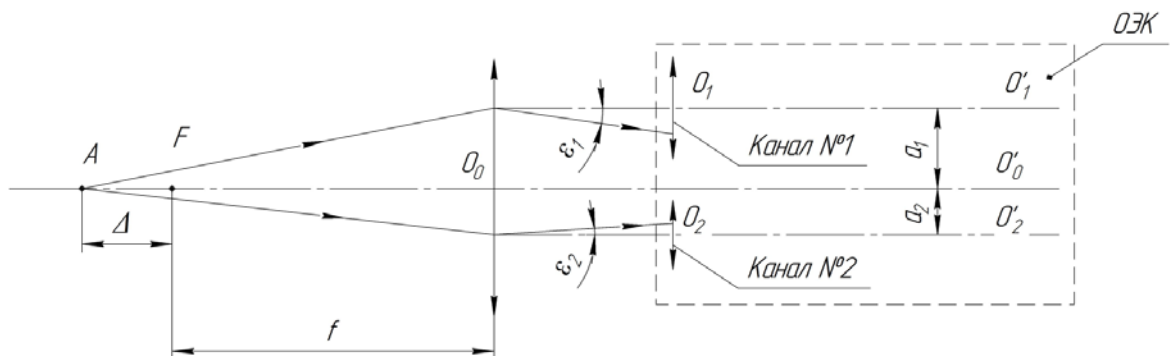


Рисунок 2.2 - Устройство проверки согласования на основе длиннофокусной линзы

Данный способ отличается своей простотой и отсутствием сложного оборудования, однако при его использовании необходимо учитывать возможные источники погрешностей, влияющие на точность согласования. Первой из наиболее значимых погрешностей является погрешность, связанная с неточностью установки визуализатора (или имитатора) в фокальную плоскость линзы, ее также можно назвать погрешностью фокусировки. Вторая по значимости погрешность связана со сферической aberrацией линзы, а третья – со сферохроматической aberrацией.

Рассмотрим подробнее указанные погрешности, определяемые в угловой мере, для наиболее простой схемы, изображенной на рисунке 2.2, в которой выверке подлежат два канала ОЭК, расстояние от оптических осей которых $O_1 - O'_1$ и $O_2 - O'_2$ до оси устройства выверки $O_0 - O'_0$, соответственно будут a_1 и a_2 , рабочие длины волн каналов соответственно λ_1, λ_2 . При этом устройство выверки представляет собой линзу, рассчитанную на минимум сферической aberrации. Поскольку перечисленные погрешности носят систематический характер и не оказывают друг на друга значимого влияния, то удобнее рассматривать их отдельно, объединив затем в одну формулу с учетом знаков:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\Delta} + \varepsilon_{\Delta S'} + \varepsilon_{\Delta S'xp} \quad (2.1)$$

где ε_{Δ} – погрешность устройства согласования, связанная с расфокусировкой, $\varepsilon_{\Delta S'}$ – погрешность устройства согласования, связанная со сферической aberrацией, $\varepsilon_{\Delta S'xp}$ – погрешность устройства согласования, связанная со сферохроматической aberrацией.

В указанном случае погрешность устройства согласования, вносимая устройством выверки вследствие неточности установки в фокальную плоскость объектива визуализатора (имитатора), будет характеризоваться формулой

$$\varepsilon_{\Delta} = \varepsilon_{1\Delta} + \varepsilon_{2\Delta}, \quad (2.2)$$

где $\varepsilon_{1\Delta}$ и $\varepsilon_{2\Delta}$ являются погрешностями согласования каждого канала в отдельности и определяются формулой с учетом правила знаков, принятого в геометрической оптике :

$$\varepsilon_{i\Delta} = a_i \times \Delta / (f \times (f + \Delta)), \quad (2.3)$$

где $\varepsilon_{i\Delta}$ – погрешность устройства согласования i -го канала, a_i – расстояние от оптической оси объектива устройства выверки до оптической оси i -го канала, Δ – величина расфокусировки, f – фокусное расстояние объектива устройства выверки.

Из формул (2.2 и 2.3) следует, что погрешность устройства согласования вследствие расфокусировки будет равна нулю при отсутствии расфокусировки ($\Delta = 0$), или при соосном расположении зрачков выверяемых каналов ($a_i = a_{i+1} = \dots = a_k$).

Рассмотрим теперь для этого же устройства влияние сферической aberrации и сферохроматизма. Продольная сферическая aberrация линзы, рассчитанной на минимум сферической aberrации, при малых относительных отверстиях пропорциональна квадрату высоты луча на выходном зрачке [14]. Аналогично рассуждая, приняв за величину расфокусировки Δ продольную сферическую aberrацию $\Delta S'$ и высоту оси выверяемого канала на зрачке h за a в выражении (2.2), можно записать, что величина рассогласования, вносимая устройством и связанная с наличием сферической aberrации, присущей ему, будет определяться по формуле

$$\varepsilon_{\Delta S'} = \varepsilon_{1\Delta S'} + \varepsilon_{2\Delta S'} \quad (2.4)$$

где $\varepsilon_{1\Delta S'}$ и $\varepsilon_{2\Delta S'}$ являются ошибками согласования каждого канала в отдельности и описываются формулой

$$\varepsilon_{i\Delta S'} = h_i \times \Delta S'_i / (f \times (f + \Delta S'_i)), \quad (2.5)$$

где $\varepsilon_{i\Delta S'}$ – погрешность устройства согласования для i -го канала, h_i – высота главного луча i -го выверяемого канала в плоскости зрачка объектива устройства проверки согласования, $\Delta S'_i$ – величина продольной сферической аберрации, соответствующая высоте h_i , f – фокусное расстояние устройства выверки.

Для объективов с малой сферической аберрацией можно пренебречь ее значением в знаменателе (2.5) и записать ее как

$$\varepsilon_{i\Delta S'} = h_i \times \Delta S'_i / f^2 \quad (2.6)$$

Таким образом, (2.4) примет вид

$$\varepsilon_{\Delta S'} = (h_1 \times \Delta S'_1 - h_2 \times \Delta S'_2) / f^2 \quad (2.7)$$

Учитывая, что сферическая аберрация симметрична относительно оптической оси, $\varepsilon_{\Delta S'}$ может равняться нулю только в трех случаях: либо $\Delta S'_1 = \Delta S'_{i+1} = \dots = \Delta S'_k = 0$, либо $h_i = h_{i+1} = \dots = h_k = 0$, либо $h_i \times \Delta S'_i = h_{i+1} \times \Delta S'_{i+1} = \dots = h_k \times \Delta S'_k$. Иными словами, либо должна отсутствовать сферическая аберрация, либо зрачки проверяемых каналов должны при проверке быть соосны как между собой, так и с устройством выверки, что, строго говоря, приведет к выполнению первого требования, или, как для третьего случая, центры зрачков выверяемых каналов должны находиться на одинаковых высотах h_k , например, по окружности, а плоскость визуализатора (имитатора) должна отстоять от фокальной плоскости

объектива на величину сферической aberrации $\Delta S_k'$, соответствующей данной высоте в плоскости зрачка.

Аналогично, рассматривая погрешность устройства согласования, связанную с наличием сферохроматизма, приняв в формуле (2.7) за сферическую aberrацию $\Delta S'$ сферохроматическую $\Delta S_{сф}'$, можно записать

$$\varepsilon_{\Delta S'_{xp}} = (h_1 \times \Delta S'_{1xp} - h_2 \times \Delta S'_{2xp}) / f^2 \quad (2.8)$$

где h_1 и h_2 – высоты главных лучей каналов №1 и №2 в плоскости зрачка объектива устройства проверки согласования, $\Delta S'_{1xp}$, $\Delta S'_{2xp}$ – величины хроматизма положения для 1-го и 2-го выверяемых каналов для соответствующих рабочих длин волн λ_1 , λ_2 и соответствующие высотам h_1 и h_2 , f – фокусное расстояние устройства выверки.

Таким образом, исходя из (2.8), можно сделать вывод, что сферохроматическая aberrация не будет вносить погрешностей если:

- выполнена ахроматизация оптической системы устройства выверки для рабочих диапазонов выверяемых каналов;
- если центры зрачков выверяемых каналов совпадают с центром зрачка устройства выверки.

Проанализировав причины возникновения погрешностей и условий, при которых они не влияют на результирующую ошибку, перейдем к поиску возможных путей их устранения в данном устройстве проверки согласования каналов, что позволит определить эволюцию устройств данного типа. Так, влияние хроматизма возможно исключить, использовав вместо линзы сферическое зеркало. А если зеркало будет параболическим, то и сферическая aberrация будет равна нулю, что позволит исключить ее влияние на результирующую погрешность. Остается устранить только ошибку согласования возникающую вследствие погрешности фокусировки, но это возможно, если устройство проверки согласования и выверяемые каналы будут располагаться

соосно, что следует из (2.3). А из (2.7) и (2.8) следует, что выполнения условия $a_i = a_{i+1} = \dots = a_k$ приведет к тому, что влияние сферической и хроматической aberrации на погрешность согласования каналов также будет сведено к нулю.

Вывод: располагая зрочки выверяемых каналов соосно с устройством проверки согласования каналов возможно устранить влияние на погрешность согласования таких факторов как расфокусировки, сферическая и хроматическая aberrации.

Пример реализации такого простейшего устройства приведен на рисунке 2.3. При этом следует отметить, что использование зеркальной и анаберрационной оптической системы в устройстве, построенном по такой схеме для устранения влияния сферической aberrации и сферохроматизма, не является необходимым. Использование зеркальной оптической системы может быть оправдано лишь в случае, если линзовая оптическая система не обеспечивает необходимого пропускания в спектральных диапазонах выверяемых каналов, так как, например, в устройстве проверки согласования визирного и тепловизионного каналов, показанном на рисунке 1.10. При этом в некоторых случаях вместо призмённого блока необходимо использовать зеркальный ромб, одна из граней которого имеет спектроразделительное покрытие. Преимущество зеркального ромба перед призмой-ромбом заключается в том, что отсутствует ход луча в призме. Это позволяет не предъявлять требований к однородности и бесшвильности материала, что особенно важно в оптических деталях с большим оптическим путем.

На основе выполненного анализа схем устройств проверки согласования каналов предлагается эволюционная классификация в соответствии с рисунком 2.3, этапы которой делятся по количеству факторов, влияющих на погрешность согласования. Из классификации очевидно следует, что схемы с использованием ромб-призмы и зеркального ромба наиболее предпочтительны с точки зрения отсутствия погрешностей связанных с такими источниками погрешностей, как расфокусировка, сферическая и сферохроматическая aberrация. Однако, следует

отметить, что данное утверждение справедливо только при условии, что устройство согласования спроектировано таким образом, что ромб-призма или зеркальный ромб сводят оптические оси к одной, совпадающей с объективом устройства согласования. Выполнение этого условия, кроме прочего устранит влияние термоаббераций, что показано в [19].

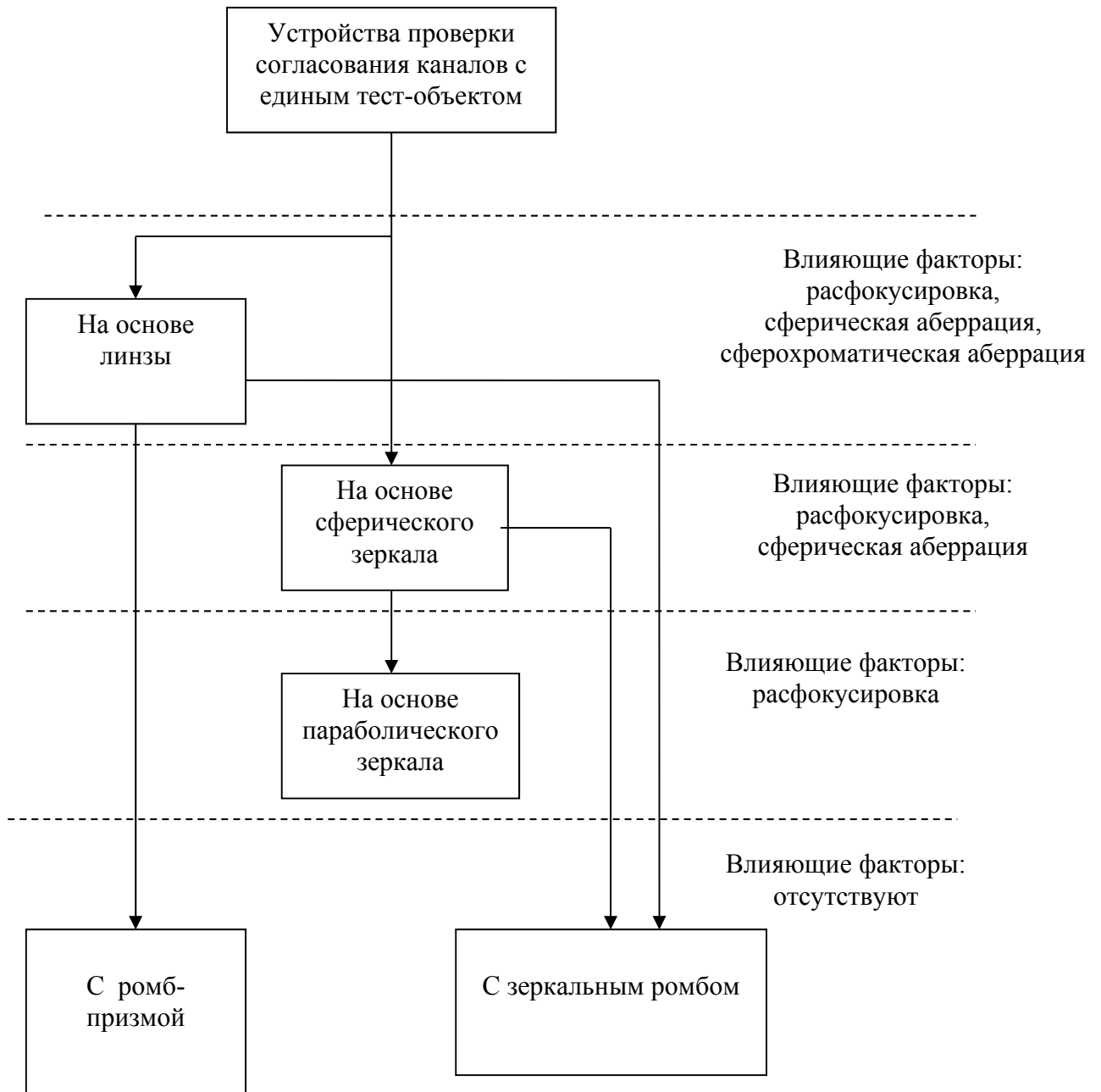


Рисунок 2.3 - Классификация схем устройств проверки согласования каналов с единым тест-объектом

2.2. Схемы устройств проверки согласования каналов с несколькими тест-объектами

Схемные решения устройств проверки согласования с несколькими тест-объектами позволяют организовать выверку каналов через различные оптические тракты, которые в свою очередь согласованы между собой. В связи с этим устройства с несколькими тест-объектами, как правило, применяются в двух случаях:

– спектральные диапазоны и режимы работы выверяемых каналов не могут быть реализованы в конструкции с единым тест-объектом;

– расстояние между выверяемыми каналами велико, и их зрачки не могут быть приведены к одному с помощью устройств коллинеарного переноса разумных размеров.

2.2.1. Простые многоколлиматорные устройства проверки согласования каналов

Наиболее простая схема реализации устройств такого типа представлена на рисунке 5 и содержит два коллиматора, каждый из которых согласован со своим каналом ОЭП. Такой способ методически практически не вызывает трудностей, так как каждый из коллиматоров может быть спроектирован под конкретный канал ОЭП и учитывать все его особенности (по спектральному диапазону, зрачку, угловым полям, виду тест-объекта и режиму его работы, и др.). В данном способе особо следует остановиться на согласовании между собой самих коллиматоров, так как непараллельность их визирных осей напрямую будет вносить ошибку в результат согласования каналов ОЭП. Согласование осей коллиматоров может быть выполнено как с помощью универсальных приборов, а также специальных устройств.

Согласование осей коллиматоров при помощи универсальных измерительных приборов может быть выполнено по схеме с использованием двух

теодолитов (см. рисунок 2.4). Методика согласования в этом случае будет следующей: теодолиты выставляются «труба в трубу», как описано в [34], фиксируется «нулевой» отсчет, а затем каждый из них визируется на тест-объект соответствующего коллиматора, и снимается отсчет по теодолитным лимбам. По разнице величин углов определяется величина рассогласования коллиматоров. Этот способ технически прост, но требует соответствующей квалификации исполнителей.

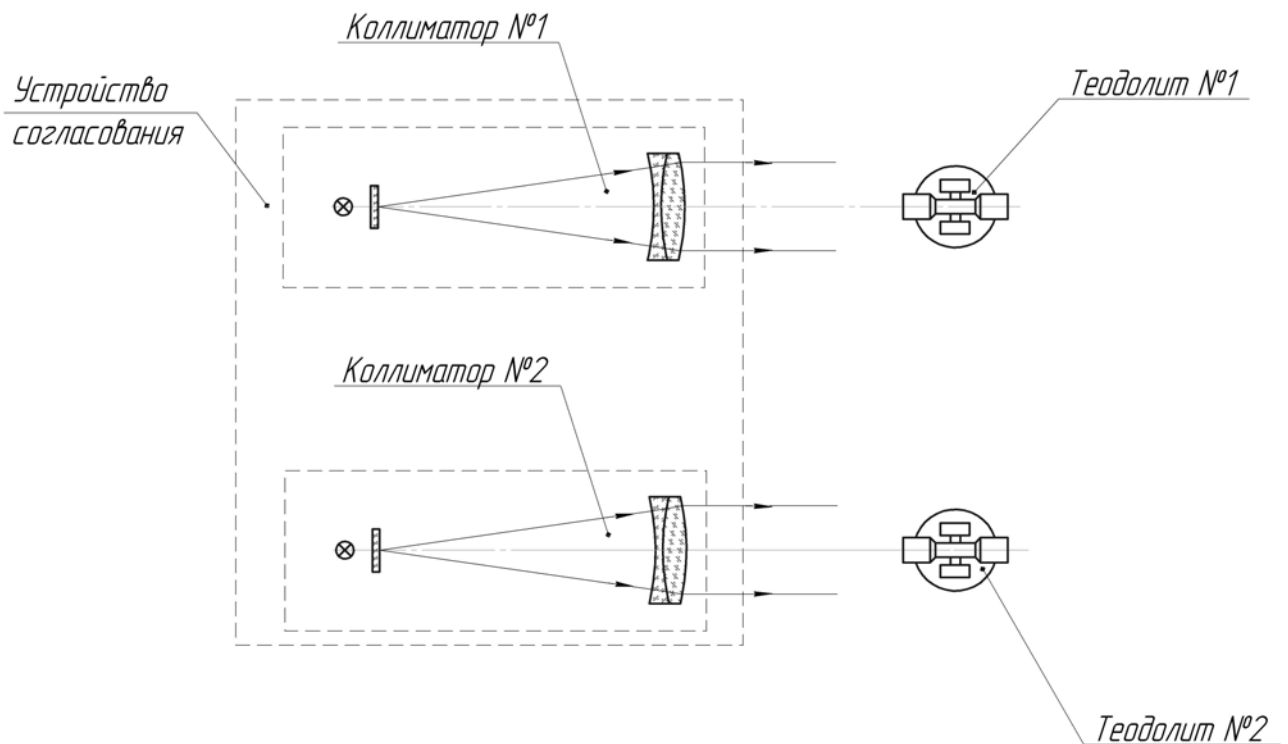


Рисунок. 2.4 - Схема согласования двух коллиматоров с помощью теодолитов

Использование специальных устройств и приспособлений в сочетании с применением универсальных приборов позволяет разработать методики, не требующие специальных навыков у обслуживающего персонала.

Так, например, автоколлимационный метод проверки согласования двух коллиматоров с использованием плоскопараллельной пластины и двух автоколлимационных труб (см. рисунок 2.5) значительно упрощает процесс согласования. Методика состоит в следующем: перед коллиматорами приблизительно соосно за счет линейных перемещений устанавливаются две

автоколлимационные трубы, между автоколлимационными трубами и коллиматорами устанавливается плоскопараллельная пластина таким образом, чтобы нормаль к ее поверхности была параллельна оси одной из автоколлимационных труб, затем вторая автоколлимационная труба посредством наклонов также выставляется так, чтобы ее ось была перпендикулярна к поверхности плоскопараллельной пластины. Таким образом, оси обеих автоколлимационных труб параллельны и коллиматоры согласовываются с каждой из них поочередно.

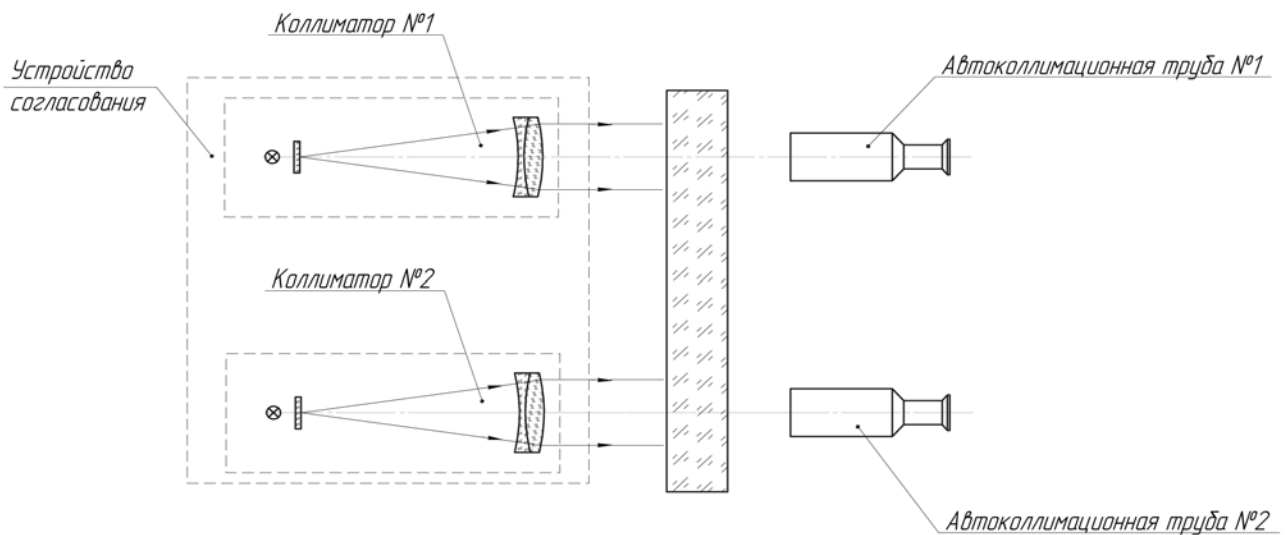


Рисунок 2.5 - Схема согласования двух коллиматоров при помощи плоскопараллельной пластины и двух автоколлимационных труб

Погрешность согласования в данном случае зависит только от неплоскостности пластины и погрешности визирования [39] по автоколлимационным трубам. Очевидно, что неплоскостность пластины может быть проконтролирована с высокой точностью интерферометрическим способом. Ошибка визирования является случайной величиной, и из [31] известно, что для случая простого визирования с биссектированием описывается формулой

$$\varepsilon_{\text{Визир}} = 15'' / \Gamma, \quad (2.9)$$

где $\varepsilon_{\text{Визир}}$ – среднеквадратическая ошибка визирования, Γ - угловое увеличение визиера.

Учитывая, что кроме ошибки визирования автоколлимационных труб на коллиматоры будет присутствовать ошибка визирования при автоколлимационном наведении автоколлимационных труб на плоскопараллельную пластину, результирующую среднюю квадратическую погрешность можно записать как

$$\varepsilon_{\text{Визир}} = \sqrt{(\varepsilon_{\text{ВизирАК1}}^2 + \varepsilon_{\text{ВизирАК2}}^2 + \varepsilon_{\text{ВизирК1}}^2 + \varepsilon_{\text{ВизирК2}}^2)}, \quad (2.10)$$

где $\varepsilon_{\text{ВизирАК1}}$, $\varepsilon_{\text{ВизирАК2}}$ – средние квадратические погрешности визирования автоколлимационных труб 1 и 2 на плоскопараллельную пластину;

$\varepsilon_{\text{ВизирК1}}$, $\varepsilon_{\text{ВизирК2}}$ – средние квадратические погрешности визирования автоколлимационных труб 1 и 2 на коллиматоры 1 и 2.

Приняв

$$\varepsilon_{\text{ВизирК1}} = \varepsilon_{\text{ВизирК2}} = 15'' / \Gamma$$

и

$$\varepsilon_{\text{ВизирАК1}} = \varepsilon_{\text{ВизирАК2}} = 7,5'' / \Gamma$$

можно записать (2.10) как

$$\varepsilon_{\text{Визир}} = \sqrt{(7,5'' / \Gamma)^2 + (7,5'' / \Gamma)^2 + (15'' / \Gamma)^2 + (15'' / \Gamma)^2} = 23,7'' / \Gamma. \quad (2.11)$$

Таким образом, из (2.11) можно сделать вывод, что погрешность визирования может быть уменьшена за счет увеличения автоколлимационной трубы. Практическое применение данного метода проверки согласования коллиматоров ограничивается размером плоскопараллельной пластины, максимальный размер которой, как правило, не превышает одного метра. При

этом следует отметить, что рост увеличения приводит к уменьшению углового поля автоколлимационной трубы, что затрудняет ее наведение. Задача создания автоколлимационной трубы с большим полем и большим увеличением будет рассмотрена в главе 3.

Кроме того, для согласования коллиматоров, расстояние между оптическими осями которых превышает один метр, возможно, как показано на рисунке 2.6, использование устройств коллинеарного переноса (УКП).

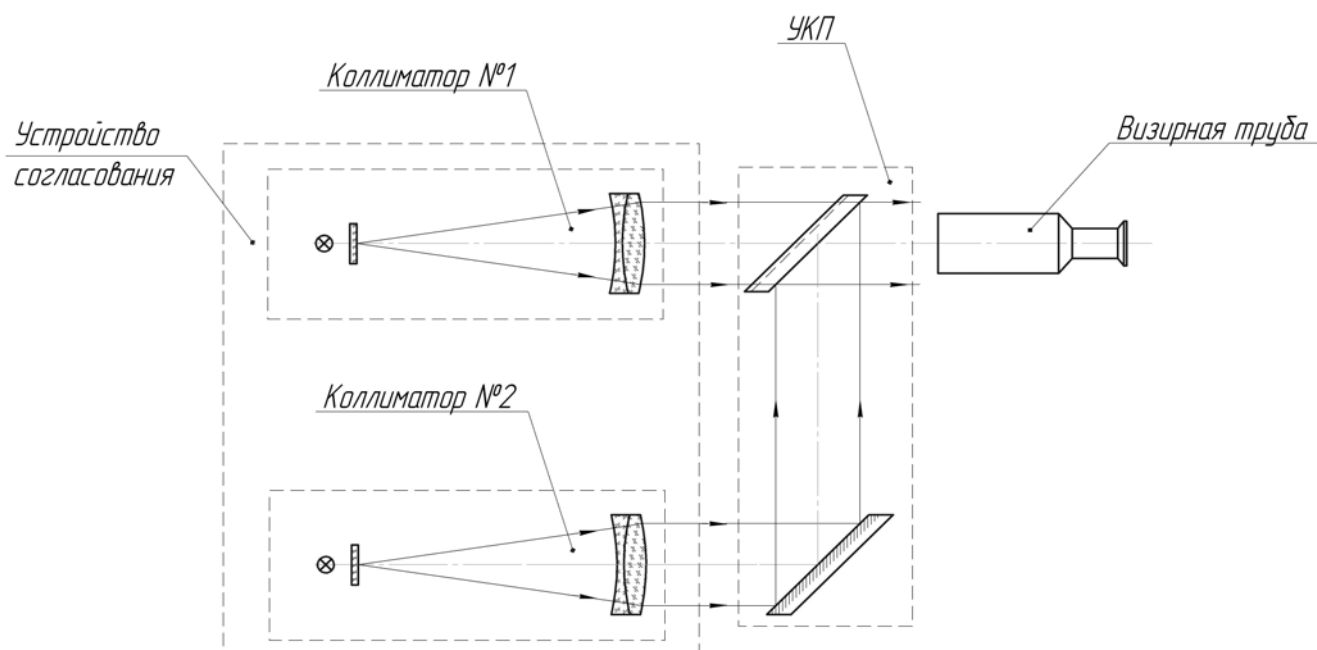


Рисунок 2.6 - Схема согласования двух коллиматоров при помощи УКП

Известны различные УКП, позволяющие создать достаточно большую перископичность. Это и УКП, создающие перископичность и изменяющие направление луча на 180° , аналогично призме БкР- 180° , и создающие только перископичность, аналогично ромб-призме БС- 0° . В УКП, построенных по аналогии с призмой БкР- 180° , необходимо наличие двугранного угла (крыши) или дополнительной отражающей поверхности для организации пространственного хода луча как в УКП, описанной в [54]. Наличие ошибки изготовления двугранного угла приводит к двоению изображения, что может уменьшить точность наведения на тест-объект, а устранение ошибки изготовления технологически сложно. Введение дополнительной грани, например, на пентапризме позволяет организовать пространственный ход луча и полностью

убрать двоение, однако такая призма также сложна в изготовлении. Поэтому, если это возможно, необходимо использовать УКП, создающие только перископичность (аналог БС-0°). Более подробно модель ошибок различных УКП будет рассмотрена ниже.

2.2.2. Многоколлиматорные устройства проверки согласования каналов с использованием инвариантных коллиматоров

Современные оптико-электронные комплексы, как правило, содержат несколько каналов визирования, предназначенных для наблюдения и наведения вооружения, что делает актуальной задачу согласования их оптических осей весьма актуальной. При этом зачастую межзрачковое расстояние согласуемых каналов достаточно велико, а процедуру проверки согласования осей необходимо производить в эксплуатации на разных стадиях технического обслуживания [38]. В таких случаях наиболее оптимальным представляется использование схемы с инвариантными коллиматорами, подробно описанными в [41]. Такие схемы обладают рядом преимуществ, среди которых большая межзрачковая база, которая практически ограничивается разумным размером плоского зеркала, и инвариантность положения объектива относительно плоского зеркала, что позволяет обеспечить необходимую точность проверки в самых сложных условиях при относительно простой конструкции.

Из [42, 43] известно, что для обеспечения инвариантности объектива необходимо, чтобы тест-объект коллиматора находился в одной из главных плоскостей объектива, а зеркало, соответственно, на половине фокусного расстояния. В этом случае направление лучей, выходящих из коллиматора, будет совпадать с нормалью к отражающему зеркалу.

Определим влияние ошибок установки элементов коллиматора на отклонение лучей от нормали к отражающему зеркалу. В [17] рассмотрена математическая модель инвариантного коллиматора для случая наклона отражающего зеркала. Рассмотрим более общий случай, когда кроме наклона

зеркала присутствует его смещение вдоль оси, а также смещение тест-объекта относительно главной точки объектива. Пусть центр тест-объекта совпадает с точкой E (см. рисунок 2.7) и находится на расстоянии h от главной точки объектива, в данном случае бесконечно тонкой линзы. При этом проекции вектора \overline{HE} на оси X и Y соответственно будут равны Δx и Δy .

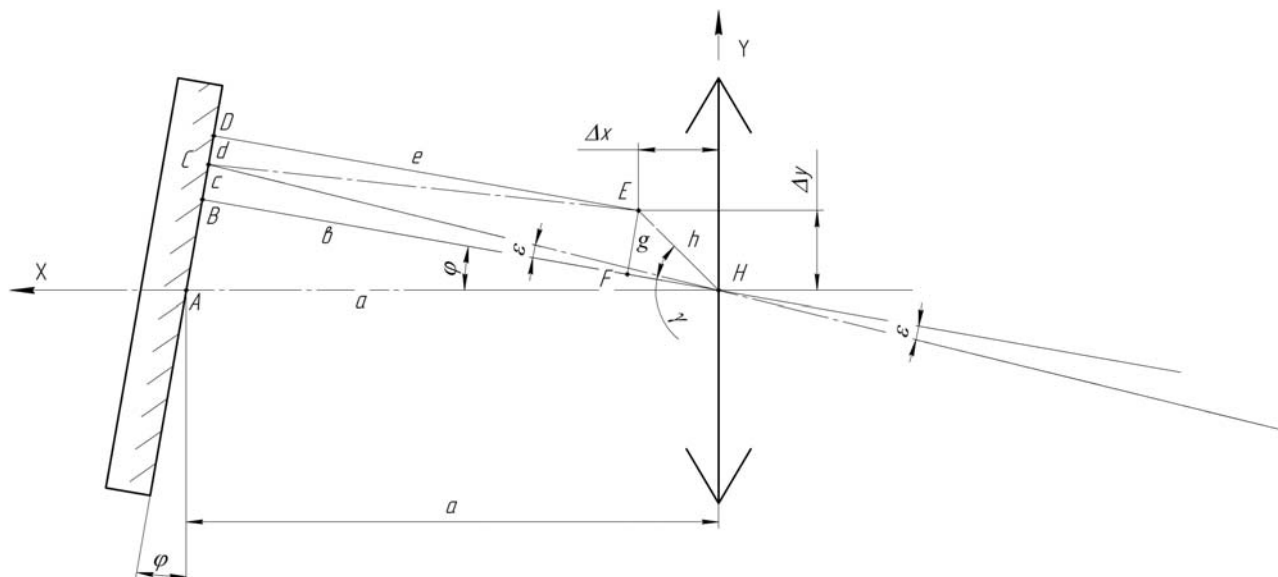


Рисунок 2.7 - Инвариантный коллиматор

Зеркало будет находиться на расстоянии a от объектива и наклонено на угол φ . Отступление от инвариантности, выраженное в отклонении выходящего главного луча от нормали к отражающему зеркалу, будет определяться углом ε . Найдем его из отношения катетов треугольника HBC

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{c}{b}. \quad (2.12)$$

Катет $HВ$ может быть определен из треугольника ABH

$$b = a \cdot \cos \varphi. \quad (2.13)$$

Длину катета BC можно определить из решения системы уравнений, составленной из условия подобия треугольников HBC и EDC . Треугольники

являются подобными на основании равенства двух углов, а именно, углы при вершине C равны вследствие выполнения закона отражения, а углы при вершинах B и D прямые, т.к. вектора \overline{DE} и \overline{BH} являются нормальными к одной отражающей поверхности. Из подобия треугольников HBC и EDC

$$\frac{b}{e} = \frac{c}{d}, \quad (2.14)$$

где c —длина катета CD ; d —длина катета DE .

Из рисунка 2.7 очевидно, что стороны DB и EF прямоугольника $DBFE$ равны, отсюда

$$d + c = g, \quad (2.15)$$

где g —длина стороны EF .

Из (2.14) и (2.15) составим систему уравнений

$$\begin{cases} d + c = g \\ \frac{b}{e} = \frac{c}{d} \end{cases} \quad (2.16)$$

Решая систему уравнений (2.16), определим из (2.14) значение длины катета BC :

$$d = \frac{c \cdot e}{b}. \quad (2.17)$$

Подставляем (2.17) в (2.15) и решаем линейное уравнение относительно c

$$c = \frac{g \cdot b}{e + b} \quad (2.18)$$

В выражении (2.18) являются неизвестными длина отрезка DE и длина отрезка EF .

Согласно рисунка 2.7 длина отрезка DE равна

$$e = b - h \cdot \cos \gamma. \quad (2.19)$$

Значение $h \cdot \cos \gamma$ определим из скалярного произведения векторов \overline{HB} и \overline{HE}

$$\overline{HB} \cdot \overline{HE} = |\overline{HB}| \cdot |\overline{HE}| \cos \gamma = b \cdot h \cdot \cos \gamma.$$

Отсюда

$$h \cdot \cos \gamma = \frac{\overline{HB} \cdot \overline{HE}}{b}. \quad (2.20)$$

Поскольку вектора можно записать как

$$\begin{aligned} \overline{HB} &= (b \cdot \cos \varphi; b \cdot \sin \varphi), \\ \overline{HE} &= (\Delta x; \Delta y), \end{aligned}$$

а с учетом (2.13)

$$\overline{HB} = (a \cdot \cos^2 \varphi; a \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi),$$

скалярное произведение двух векторов

$$\overline{HB} \cdot \overline{HE} = (\Delta x \cdot a \cdot \cos^2 \varphi + \Delta y \cdot a \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi) = a \cdot \cos \varphi (\Delta x \cdot \cos \varphi + \Delta y \cdot \sin \varphi).$$

Подставляем полученное выражение скалярного произведения в (2.20) с учетом (2.13)

$$h \cdot \cos \gamma = \frac{a \cdot \cos \varphi (\Delta x \cdot \cos \varphi + \Delta y \cdot \sin \varphi)}{a \cdot \cos \varphi} = \Delta x \cdot \cos \varphi + \Delta y \cdot \sin \varphi. \quad (2.21)$$

Выражение (2.19) с учетом (2.21) примет вид

$$l = a \cdot \cos \varphi - \Delta x \cdot \cos \varphi - \Delta y \cdot \sin \varphi. \quad (2.22)$$

Из прямоугольного треугольника HFE определим значение отрезка EF

$$g = \sqrt{h^2 - (b - e)^2}.$$

Учитывая $h^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$, а также (2.13) и (2.22),

$$\begin{aligned} g &= \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 - (a \cdot \cos \varphi - a \cdot \cos \varphi + \Delta x \cdot \cos \varphi + \Delta y \cdot \sin \varphi)^2} = \\ &= \sqrt{\Delta x^2 (1 - \cos^2 \varphi) + \Delta y^2 (1 - \sin^2 \varphi) - 2\Delta x \cdot \Delta y \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Определим значение тангенса угла ε из (2.12) с учетом выражений (2.13), (2.18), (2.22), (2.23)

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\sqrt{\Delta x^2 (1 - \cos^2 \varphi) + \Delta y^2 (1 - \sin^2 \varphi) - 2 \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi}}{2a \cdot \cos \varphi - \Delta x \cdot \cos \varphi - \Delta y \cdot \sin \varphi} \quad (2.24)$$

Для малых углов φ и ε выражение (2.24) можно записать как

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\Delta y^2 (1 - \varphi^2) - 2 \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \varphi}}{2a - \Delta x - \Delta y \cdot \varphi}. \quad (2.25)$$

Полученное выражение (2.25) связывает ошибки сборки инвариантного коллиматора с отклонением выходящего главного луча от нормали к отражающему зеркалу.

Проанализируем (2.25):

1. При отсутствии наклона зеркала, т. е. $\varphi=0$, выражение (2.25) примет вид

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{2a - \Delta x}. \quad (2.26)$$

Значением Δx в знаменателе (2.26) можно пренебречь, так как $2a$ существенно больше Δx

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{2a}. \quad (2.27)$$

Из (2.27) следует, что значение угла ε при угле наклона зеркала φ , стремящемся к нулю, прямо пропорционально смещению тест-объекта с оптической оси Δy . Если тест-объект неподвижно связан с главной точкой объектива ($\Delta y = const$) и соблюдается постоянство расстояния a до зеркала, погрешность коллиматора, определяемая углом ε , будет систематической.

2. При $\Delta y = 0$ получим $\varepsilon = 0$, т. е. отклонение главного луча не зависит от смещения марки Δx , угла наклона φ зеркала и расстояния a до зеркала. При этом направление выходящего луча совпадает с нормалью к отражающему зеркалу. Этот вывод определяет инвариантность коллиматора и совпадает с выводом, приведенным при рассмотрении упрощенной модели [17].

Однако следует учесть, что в настоящей модели рассматривается погрешность отклонения главного луча от нормали к зеркалу, т. к. в случае $\Delta x \neq 0$ и $a \neq f'/2$, где f' - фокусное расстояние объектива, на выходе из инвариантного коллиматора пучок не будет коллимированным. Это приведет к расфокусировке тест-объекта в выверяемом канале ОЭП, а в случае, если канал ОЭП работает при выверке в режиме угломера, т. е. измеряет угол рассогласования с инвариантным коллиматором и учитывает его для согласования с другими каналами, возникнет погрешность измерения этого угла.

Пусть в инвариантном коллиматоре, изображенном на рисунке 2.8, объектив имеет фокусное расстояние $f'_{\text{кол}}$, марка для упрощения расчетов находится в главной точке O объектива ($\Delta x = \Delta y = 0$), расстояние от объектива до зеркала $a = (f'_{\text{кол}} + \Delta)/2$, а выверяемый канал ОЭП наклонен на угол ω относительно коллиматора и имеет объектив с фокусным расстоянием $f'_{\text{ОЭП}}$, входной зрачок которого расположен на расстоянии S_p .

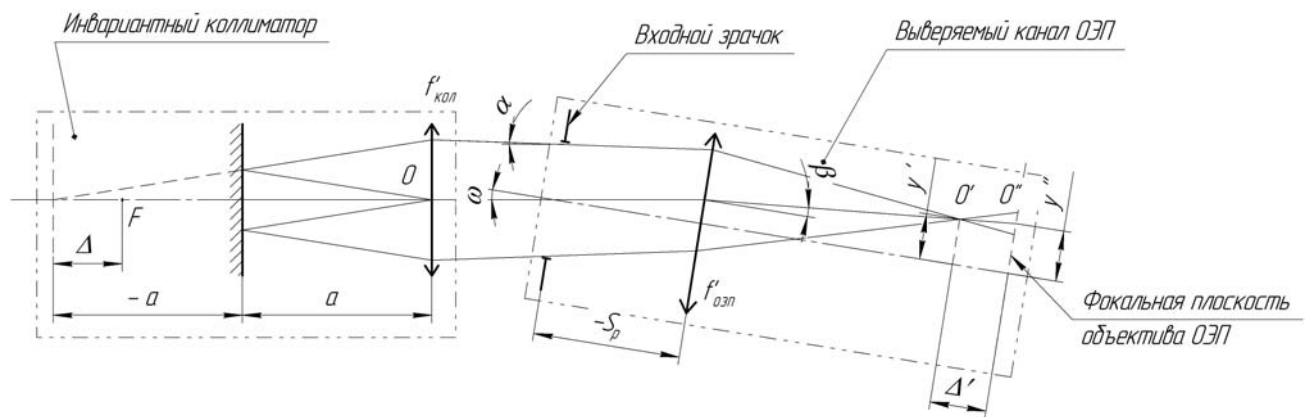


Рисунок 2.8 - Инвариантный коллиматор с выверяемым ОЭП

Измерение угла отклонения ω от базового направления, задаваемого инвариантным коллиматором, в ОЭП производится путем измерения величины смещения изображения марки в фокальной плоскости от некой нулевой точки, в данном случае точки, образованной пересечением фокальной плоскости и оптической оси объектива канала ОЭП. Посредством объектива коллиматора и объектива выверяемого канала ОЭП марка проецируется в точку O' . Поскольку пучок на выходе коллиматора не коллимирован, то плоскость, на которой находится точка O' , не совпадает с фокальной плоскостью объектива канала ОЭП. В фокальной плоскости формируется световое пятно, энергетическим и геометрическим центром которого является точка O' . Поскольку измерение угла отклонения в данном случае будет производиться по энергетическому или геометрическому центру, то погрешность измерения угла можно определить по формуле:

$$\Delta\omega = \operatorname{arctg} \frac{y''}{f'_{\text{ОЭП}}} - \operatorname{arctg} \frac{y'}{f'_{\text{ОЭП}}}. \quad (2.28)$$

Для малых углов ω выражение (2.28) примет вид

$$\Delta\omega = \frac{y''}{f'_{\text{ОЭП}}} - \frac{y'}{f'_{\text{ОЭП}}} = \frac{(y' + \Delta' \cdot \operatorname{tg} \beta) - y'}{f'_{\text{ОЭП}}} = \frac{\Delta' \cdot \operatorname{tg} \beta}{f'_{\text{ОЭП}}}, \quad (2.29)$$

где β – угол главного луча, $f'_{\text{ОЭП}}$ – фокусное расстояние объектива ОЭП.

Величину расфокусировки Δ' можно определить как

$$\Delta' = \Delta \cdot Q, \quad (2.30)$$

где Δ – величина расфокусировки в коллиматоре, Q – продольное увеличение.

В случае малой величины Δ продольное увеличение Q из [29]

$$Q = \left(\frac{f'_{\text{ОЭП}}}{f'_{\text{кол}}} \right)^2, \quad (2.31)$$

где $f'_{\text{кол}}$ – фокусное расстояние объектива инвариантного коллиматора.

Выражение для тангенса главного луча из рисунка 2.8 с учетом формул и знаков для расчетов лучей в идеальных оптических системах примет вид

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \omega - \frac{S_p \cdot \operatorname{tg} \omega}{f'_{\text{ОЭП}}} = \operatorname{tg} \omega \cdot \left(1 - \frac{S_p}{f'_{\text{ОЭП}}} \right). \quad (2.32)$$

Выражение (2.29) с учетом (2.30), (2.31), (2.32)

$$\Delta\omega = \Delta \cdot \left(\frac{f'_{\text{ОЭП}}}{f'_{\text{кол}}} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{S_p}{f'_{\text{ОЭП}}} \right) \cdot \operatorname{tg} \omega \quad (2.33)$$

Из (2.33) следует, что ошибка измерения угла $\Delta\omega$ на базовое направление будет равна нулю, если

а) $\Delta=0$, т. е. инвариантный коллиматор сфокусирован;

б) $\omega=0$, т. е. оси инвариантного коллиматора и канала ОЭП параллельны;

в) $S_p = f'_{\text{ОЭП}}$, т. е. оптическая система канала ОЭП имеет в пространстве изображений телецентрический ход лучей.

Рассмотрев математическую модель ошибок инвариантного коллиматора, перейдем к методам их устранения. Из (2.25), как было отмечено выше, следует, что основную ошибку вносит смещение марки с оптической оси объектива. Погрешность, возникающая в результате постоянного смещения марки, квазиинвариантна. Это свойство позволяет использовать наиболее простой способ ее устранения – использование одного и того же объектива и одного зеркала для выверки нескольких каналов. В этом случае важным требованием является выполнение поступательного движения объектива при сохранении расстояния между зеркалом и объективом. Данный метод может быть применен при проверке согласования каналов ОЭП, в которых возможно наблюдение марки от одного и того же инвариантного коллиматора, т. е. они должны работать в спектральном диапазоне данного коллиматора.

Использование одного и того же инвариантного коллиматора в случае, когда каналы ОЭП работают в разных спектральных диапазонах, например, видимом и ИК, – задача технически сложная. Проблема заключается в создании объектива, работающего в разных спектральных диапазонах. В [22, 47, 53, 71] описаны объективы, работающие одновременно в видимом и инфракрасных диапазонах, но оптические схемы таких объективов построены как зеркально-линзовые, и в связи с этим размещение марки в главной плоскости не представляется возможным, т. к. она конструктивно находится перед вторичным зеркалом, которое, соответственно, непрозрачно. Таким образом, решение задачи находится в области создания устройства проверки согласования осей каналов с несколькими объективами и одним общим зеркалом. Однако в этом случае

необходимо решить проблему юстировки каждого из инвариантных коллиматоров. Классически данная проблема решается при помощи автоколлимационной трубы [4], которая имеет возможность одновременного (или поочередного) измерения угла наклона φ зеркала и угла отклонения γ оптической оси коллиматора от оси визирования, как показано на рисунке 2.9. Юстировка заключается в поперечных смещениях марки в главной плоскости объектива до равенства углов φ и γ , как описано в [54].

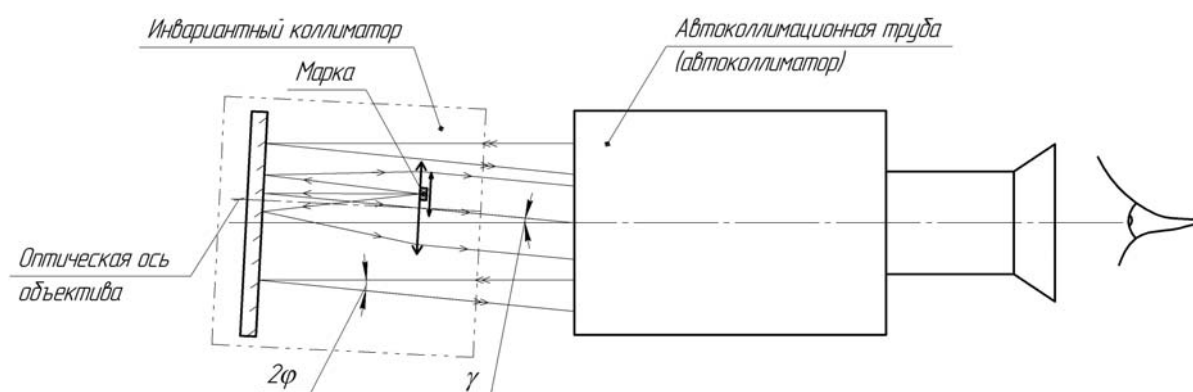


Рисунок 2.9 - Юстировка инвариантного коллиматора с помощью автоколлимационной трубы

Однако для юстировки тепловизионного канала в таком случае потребуется тепловизионный автоколлиматор, который сам по себе является сложным прибором. Для юстировки и поверки таких инвариантных коллиматоров предлагается методика, построенная на свойствах этого коллиматора. Как было установлено выше, при малых углах отклонения оптической оси объектива от нормали к зеркалу, а также постоянстве взаимного положения марки и главной точки объектива, отклонение выходящего из инвариантного коллиматора луча от нормали к зеркалу является величиной постоянной. В таком случае, в соответствии с рисунком 2.10 возможна оценка данной ошибки при вращении объектива с маркой вокруг оптической оси объектива на 180° . Наблюдение при этом производится доступным наблюдательным прибором, работающим в спектральном диапазоне инвариантного коллиматора.

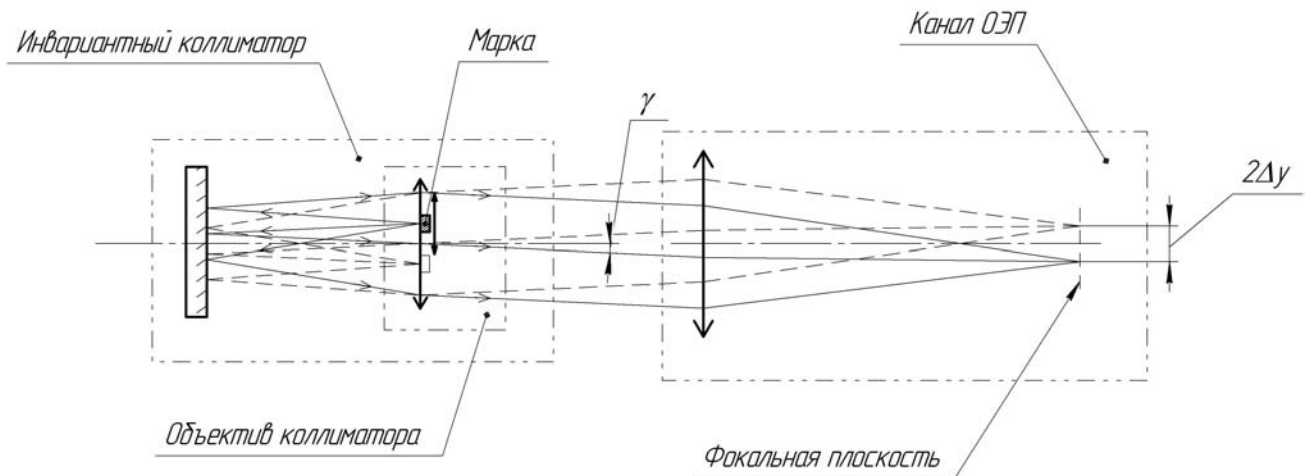


Рисунок 2.10 - Юстировка инвариантного коллиматора с помощью канала ОЭП

В случае $\gamma \neq 0$ в наблюдательном приборе будет наблюдаться смещение марки $\Delta y'$. Определив направление и величину смещения, можно определить необходимую подвижку марки в главной плоскости объектива коллиматора. Таким образом можно добиться того, что при вращении смещение будет отсутствовать. Чувствительность этого метода зависит от разрешающей способности наблюдательного прибора. Очевидно, чтобы остаточная ошибка угла γ не влияла на погрешность оценки согласования каналов ОЭП, необходимо при юстировке и проверке инвариантных коллиматоров использовать наблюдательные приборы с разрешающей способностью не ниже, чем у проверяемых каналов ОЭП. Отсюда же следует одно из главных преимуществ данного метода: в качестве наблюдательных приборов могут быть использованы проверяемые каналы ОЭП. В таком случае перед проверкой согласования каналов ОЭП при необходимости можно выполнить проверку инвариантного коллиматора без применения специальных приборов. Это обстоятельство дает еще один аргумент в пользу использования инвариантных коллиматоров в качестве

устройств проверки согласования каналов как контрольно-проверочной аппаратуры при эксплуатации.

2.3. Схемы устройств проверки согласования каналов без материальных тест-объектов

В данном пункте будут рассмотрены схемы, в которых материальный тест-объект фактически будет отсутствовать. В таких схемах в качестве направления, относительно которого определяется рассогласование каналов, выбирается направление излучения одного из излучающих каналов ОЭК. Такими каналами, как предложено в [74, 76, 78], является либо излучающий канал лазерного дальномера (ЛД) либо канал лазерно-лучевой системы управления. Рассмотрим особенности данных схем и возможные источники погрешностей при выполнении проверки согласования каналов ОЭК.

Поскольку опорный канал, относительно которого выполняется проверка согласования, является принадлежностью ОЭК, то такие схемы возможно использовать для построения систем встроенного контроля. При этом возможны как минимум два варианта наблюдения излучения опорного канала: при помощи визуализатора и регистрации вторичного излучения или прямой регистрации излучения на фотоприемном устройстве выверяемого канала. Первый вариант, основанный на наблюдении отраженного и вторичного вынужденного излучения мишени подробно описан в главе 1 и в [69, 70]. Второй случай можно проиллюстрировать рисунком 2.11, на котором изображен ОЭК, имеющий по крайней мере два канала – излучающий канал ЛД и приемный телевизионный канал (ТВ). Излучение от ЛД посредством призмы БкР-180, вводимой в тракт на время выполнения проверки согласования, попадает в ТВ-канал, где регистрируется фотоприемным устройством. По величине несовпадения центра зарегистрированного пятна от ЛД и прицельной марки, задаваемой на видеоконтрольном устройстве ТВ-канала, определяется величина

рассогласования этих двух каналов. При этом следует учесть, что излучение, дошедшее до фотоприемного устройства ТВ-канала, должно быть ослаблено. В противном случае фотоприемное устройство ТВ-канала может быть выведено из строя вследствие воздействия излучения ЛД- канала с высоким уровнем энергии.

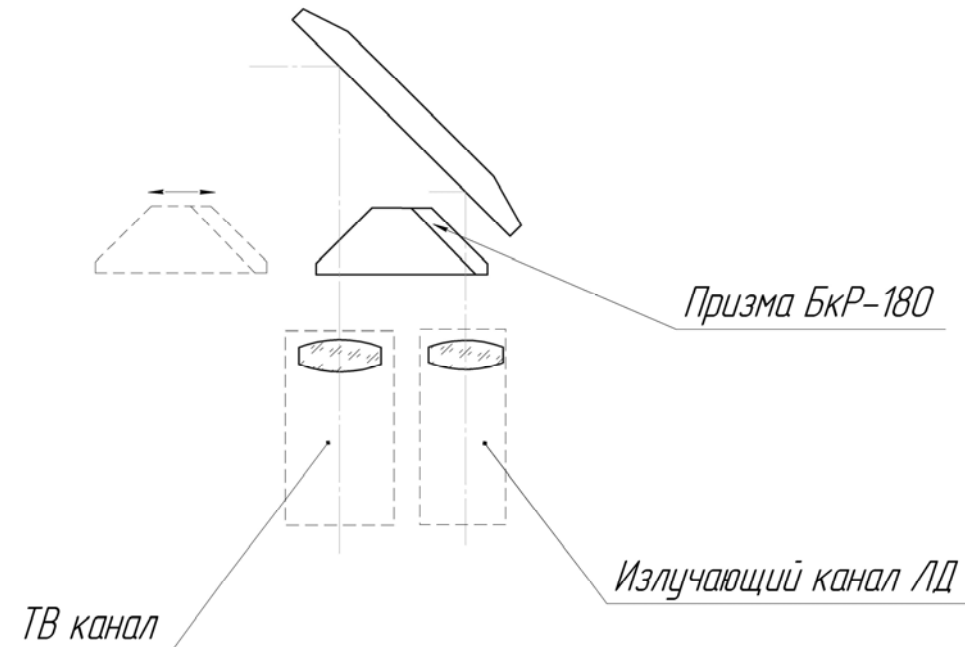


Рисунок 2.11 - Схема выверки ОЭК с ЛД

Структурные схемы этих устройств проверки согласования можно представить так, как показано на рисунках 2.12 и 2.13.

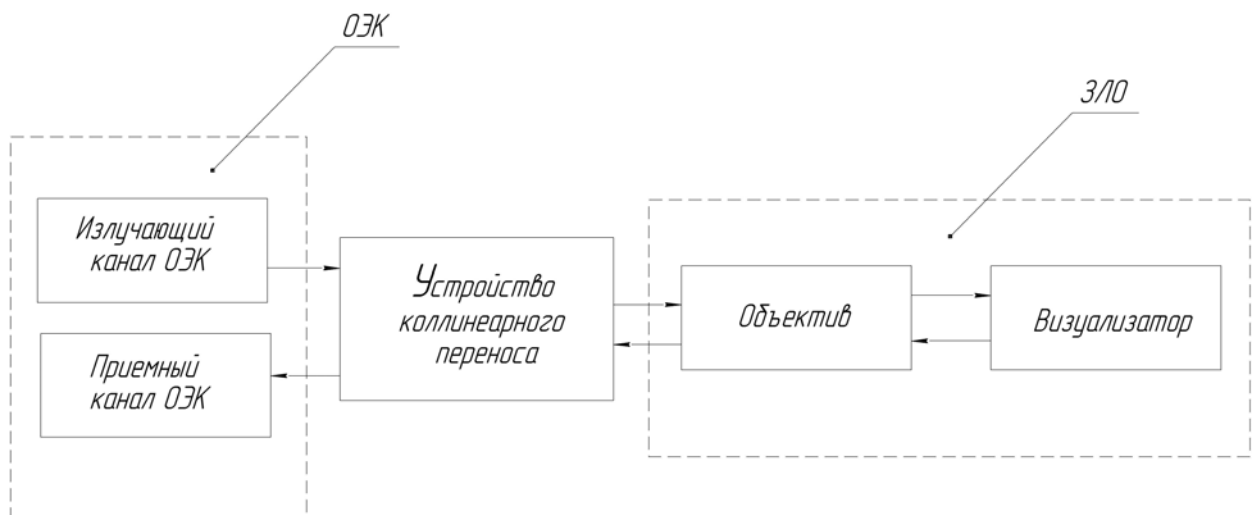


Рисунок 2.12 - Структурная схема устройства проверки согласования с регистрацией вторичного излучения

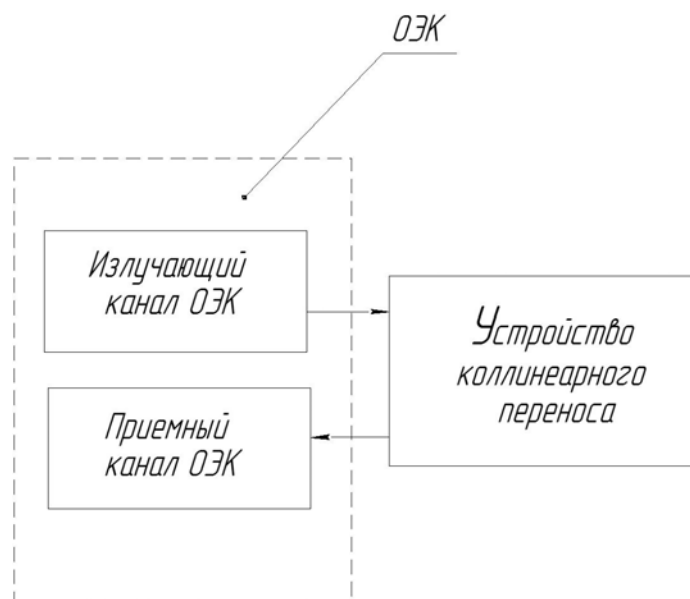


Рисунок 2.13 - Структурная схема устройства проверки согласования с прямой регистрацией излучения

Структурная схема устройства проверки согласования с регистрацией вторичного излучения состоит из ОЭК, содержащего излучающий и приемный канал, устройства коллинеарного переноса (УКП), объектива и визуализатора. Устройство коллинеарного переноса в этой схеме по принципу действия равносильно действию ромб-призмы, одна из граней которой выполнена полупрозрачной и дополнена прямоугольной призмой до плоскопараллельной пластины так, как показано на рисунке 1.7. Это позволяет расположить излучающий и приемный канал на оси объектива, что позволяет повысить точность устройства, как показано в разделе 2.1 настоящей диссертации. Объектив и стоящий в его фокальной плоскости визуализатор образуют зеркально-линзовый отражатель (ЗЛО), который, как известно из [3], как и триэдр, обладает инвариантностью своего пространственного положения к входящим и отраженным лучам. Таким образом, учитывая, что ромб-призма и ЗЛО инвариантны по своему пространственному положению к ОЭК, приходим к заключению, что данная схема устройства проверки согласования не чувствительна к угловым и линейным перемещениям. Возможными источниками ошибок в данной схеме могут быть: характеристики излучающего канала, а также

нарушение инвариантности УКП и ЗЛО. Ошибки, возникающие в ЗЛО подробно рассмотрены в [3] и в рамках настоящей диссертации рассматриваться не будут. Ошибки, возникающие в УКП будут рассмотрены в п.2.5.2. Возможные ошибки, связанные с характеристиками излучателя, могут возникнуть при использовании твердотельных лазеров вследствие флуктуационного характера излучения, который может приводить к временному перераспределению энергии по модам [25]. Для практического подтверждения этого эффекта в рамках выполнения данной диссертационной работы было проведено исследование двух твердотельных дальномеров. Суть эксперимента сводилась к регистрации «отпечатка» сфокусированного лазерного излучения на фотобумаге, установленной в фокальной плоскости длиннофокусной линзы. Результаты эксперимента приведены на рисунке 2.14.



Рисунок 2.14 - Отпечаток лазерного излучения

Из рисунка 2.14 видно, что определение энергетического центра такого пятна является затруднительной задачей, а если принять во внимание, что приемные каналы ОЭК, как правило, телевизионный или тепловизионный каналы, не имеют функциональных возможностей по анализу распределения освещенности и определению энергетического центра пятна, то эта функция выполняется оператором ОЭК визуально – «на глаз». Учитывая при этом, что расходимость твердотельных лазеров в современных ОЭК составляет единицы

угловых минут, погрешность проверки согласования, наибольший вклад в которую будет вносить ошибка визирования, может достигать десятков угловых секунд. Таким образом, устройство проверки согласования, построенное по такой схеме, может быть использовано для ОЭК, к которым предъявляются относительно невысокие требования по согласованию каналов – с погрешностями порядка 20–30", и применяться в самых жестких условиях эксплуатации.

Устройство проверки согласования с прямой регистрацией излучения отличается от устройства проверки согласования с регистрацией вторичного излучения тем, что в качестве УКП используется отражатель, по действию эквивалентный триэдру, и излучение от излучающего канала напрямую попадает в приемный канал ОЭК. Источниками ошибок, влияющих на погрешность этого устройства, являются источник излучения и УКП. Ошибки, возникающие в УКП, будут рассмотрены в разделе 2.5.3, а возможные ошибки, возникающие вследствие характеристик излучателя, описаны выше. Следует добавить, что применение данной схемы ограничено согласованностью спектральных диапазонов излучателя и проверяемых приемных каналов, но устройство, построенное по такой схеме обладает наименьшими габаритными размерами и может также применяться в самых жестких условиях эксплуатации.

2.4. Схемы комбинированных устройств проверки согласования каналов

Комбинированные устройства проверки согласования каналов являются разновидностью устройств проверки согласования каналов с несколькими тест-объектами. В зависимости от состава каналов ОЭК схемы комбинированных устройств проверки могут быть построены как с использованием тест-объектов, так и без них [56, 61, 75]. В зависимости от предъявляемых точностных характеристик, условий эксплуатации и конструктивных требований в схемах комбинированных устройств могут быть использованы элементы схем от рассмотренных выше устройств проверки согласования. Однако с учетом

рассмотренных выше схем следует руководствоваться следующими общими рекомендациями. Так, если в составе ОЭК присутствуют каналы управления, работающие на принципе пеленгации синхронизированного модулированного излучения, то в составе устройства проверки согласования должен быть тест-объект с источником излучения, позволяющим выполнить эту модуляцию. Если в составе ОЭК присутствуют излучающие каналы, например, лазерный дальномер или лучевой канал управления, то в зависимости от согласованности спектральных диапазонов излучаемого и выверяемого канала следует использовать схему с прямой регистрацией излучения или регистрацией вторичного излучения, рассмотренные в предыдущем пункте. Если в составе ОЭК присутствуют несколько приемных каналов, то достаточно одного коллиматора, имеющего согласованный с приемными каналами источник излучения, с одним тест-объектом и устройствами коллинеарного переноса.

2.5. Узлы устройств проверки согласования каналов

2.5.1. Автоколлимационное углоизмерительное устройство с двумя угловыми полями

В разделе 2.2.1. отмечено, что для уменьшения погрешности проверки согласования в целом, необходимо уменьшение ошибки визирования, которая напрямую связана с увеличением автоколлимационного устройства. Также в разделе 2.2.1 было отмечено, что рост увеличения приводит к уменьшению углового поля автоколлимационной трубы, что затрудняет ее наведение. Наиболее простым решением данной проблемы является создание автоколлимационной трубы с двумя угловыми полями: для наводки и измерения. Поскольку угловое поле глаза ограничено, то целесообразно производить изменение увеличения за счет изменения фокусного расстояния объектива автоколлимационного устройства. Однако при реализации объектива с дискретно изменяющимся фокусным расстоянием возникает дополнительная ошибка.

Причина ее возникновения связана с уводами оптической оси, которые возникают при перемещении оптического элемента, изменяющего фокусное расстояние объектива [12]. Уменьшение уводов оптической оси за счет ужесточения допусков на механические детали объектива, отвечающие за перемещение оптического элемента, имеет физические пределы, определяемые технологически реализуемыми точностями. Таким образом, целесообразно исследовать проблему устранения ошибки автоколлимационного углоизмерительного устройства с двумя угловыми полями, возникающую вследствие увода оптической оси объектива.

В качестве модели для исследования возьмем объектив, в котором фокусное расстояние изменяется за счет введения дополнительного компонента. Для упрощения исследования модель объектива представим в виде бесконечно тонких компонентов. Оптическая схема объектива в обратном ходе представлена на рисунке 2.15.

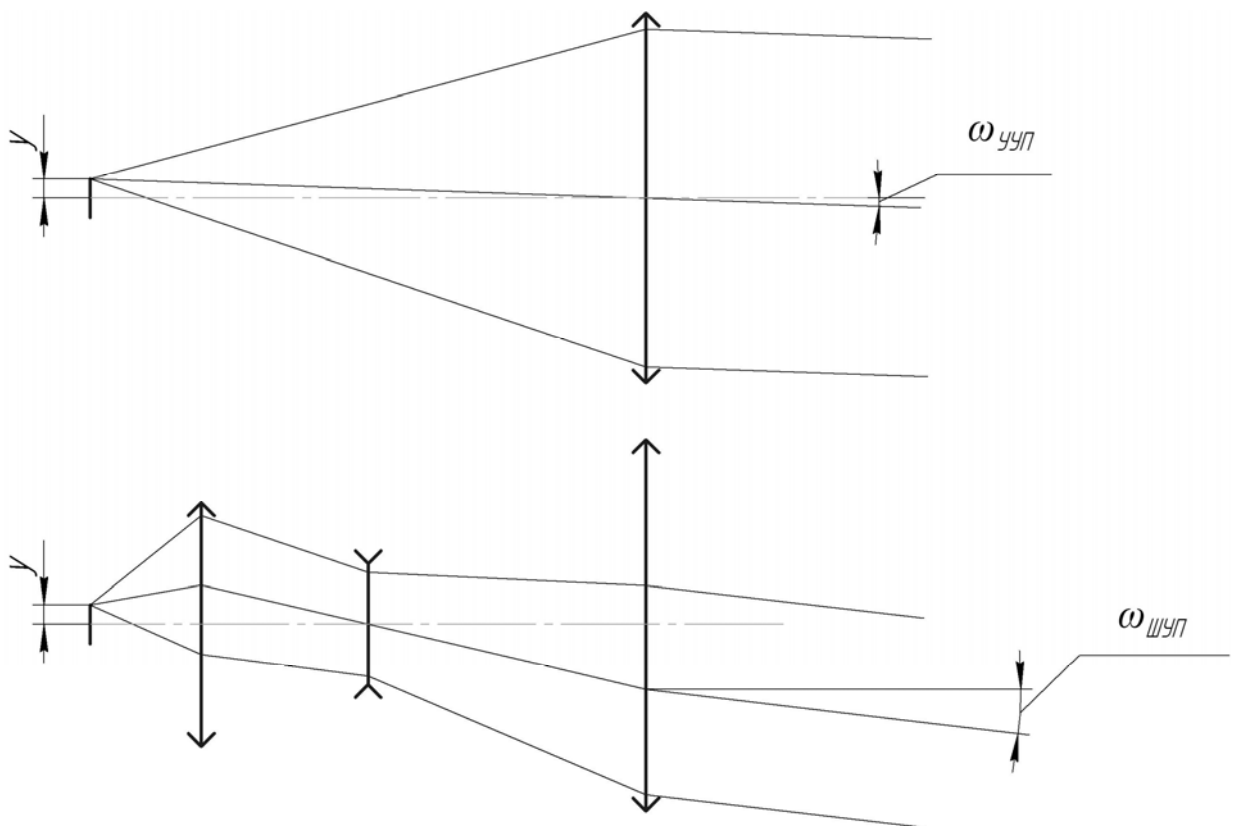


Рисунок 2.15 - Схема объектива с дискретно изменяемым фокусным расстоянием

Определим углы в пространстве предметов для объектива при постоянном линейном размере изображения y . Пусть величина y мала, соответственно углы также малы.

Для узкого углового поля (УУП), соответствующего наибольшему фокусному расстоянию, угол в пространстве предметов можно определить как

$$\omega_{\text{УУП}} = \frac{y}{f'_{\text{max}}} . \quad (2.34)$$

Аналогично для широкого углового поля (ШУП), соответствующего наименьшему фокусному расстоянию, угол в пространстве предметов будет определен как

$$\omega_{\text{ШУП}} = \frac{y}{f'_{\text{min}}} . \quad (2.35)$$

Определим разницу углов в пространстве предметов между УУП и ШУП с учетом выражений (2.34) и (2.35)

$$\varepsilon = \omega_{\text{УУП}} - \omega_{\text{ШУП}} = \frac{y \cdot (f'_{\text{min}} - f'_{\text{max}})}{f'_{\text{max}} \cdot f'_{\text{min}}} . \quad (2.36)$$

Из выражения (2.36) очевидно, что связь между разностью углов в пространстве предметов и величиной изображения прямо пропорциональна с

коэффициентом $\kappa = \frac{(f'_{\text{min}} - f'_{\text{max}})}{f'_{\text{max}} \cdot f'_{\text{min}}} .$

Предположим, что в некотором визирном устройстве, содержащем объектив с двумя (или более) фокусными расстояниями, марка, определяющая ось визирования устройства, смещена с оптической оси объектива. В таком случае в соответствии с (2.36) между визирными осями устройства для разных фокусных

расстояний возникнет угловое рассогласование, пропорциональное y . Отсюда следует, что смещая марку с оптической оси объектива можно компенсировать увод оптической оси устройства, возникающий из-за смещения с оптической оси элемента (линзы или блока линз) объектива. Определим величину смещения марки для компенсации увода.

Пусть марка, определяющая ось визирования устройства, смещена с оптической оси объектива на величину y . В таком случае для УУП, в пространстве предметов угол оси визирования будет определяться так же, как в выражении (2.34). Пусть в ШУП один из компонентов, отвечающих за изменение фокусного расстояния, оказывается смещенным с оптической оси, как показано на рисунке 2.16. Это приводит к дополнительному наклону оптической оси

$$\omega_{ШУП} = \frac{y}{f'_{\min}} + \Delta\omega, \quad (37)$$

где $\Delta\omega$ – величина увода оптической оси вследствие смещения компонента.

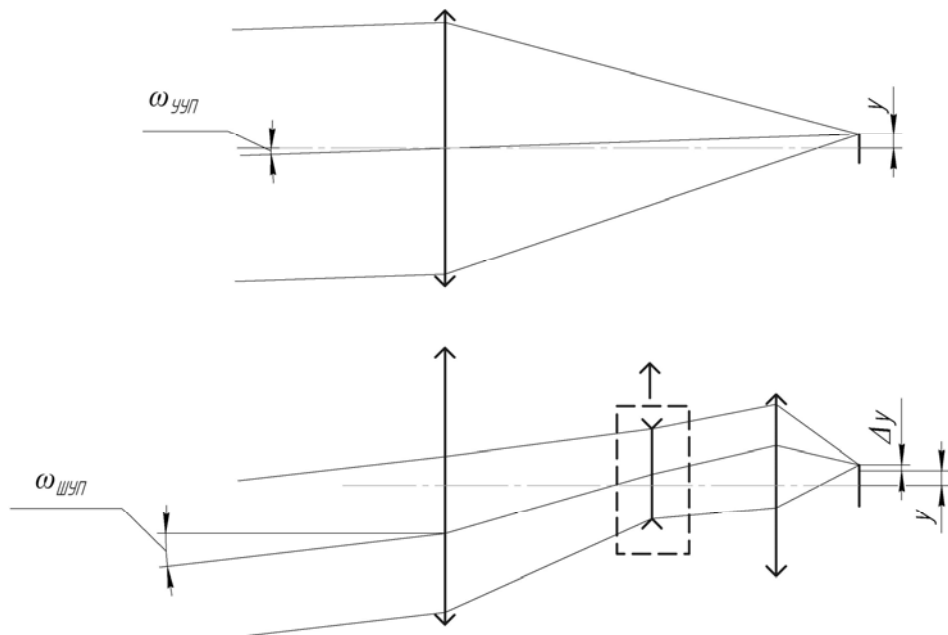


Рисунок 2.16 - Схема объектива с дискретно изменяемым фокусным расстоянием и смещенным компонентом

Величину увода оптической оси $\Delta\omega$ можно привести к фокальной плоскости как

$$\Delta\omega = \frac{\Delta y}{f'_{\min}}, \quad (2.38)$$

где Δy – приведенная величина увода оптической оси вследствие смещения компонента.

Для того, чтобы при переключении фокусных расстояний не было увода оптической оси, необходимо выполнение условия $\omega_{\text{ввп}} = \omega_{\text{швп}}$. С учетом формул (2.34), (2.37), (2.38) это условие будет записано как

$$\frac{y}{f'_{\max}} = \frac{y}{f'_{\min}} + \frac{\Delta y}{f'_{\min}} \quad (2.39)$$

Решая уравнение (2.39) относительно y , получим

$$y \cdot \frac{f'_{\min} - f'_{\max}}{f'_{\max} \cdot f'_{\min}} = \frac{\Delta y}{f'_{\min}},$$

$$y = \Delta y \frac{f'_{\max}}{f'_{\min} - f'_{\max}}. \quad (2.40)$$

Таким образом, получена зависимость, позволяющая определить необходимое смещение марки y для компенсации увода оптической оси Δy . Это позволяет расширить допуски на положение вводимых компонентов объектива, а увод, вносимый ими, компенсировать при юстировке марки. При этом необходимо учитывать, что увод, вносимый вводимыми компонентами объектива, должен быть стабильным, а качество изображения существенно не ухудшалось.

2.5.2. Устройства коллинеарного переноса на основе зеркального ромба и на основе пентапризм

Известны несколько видов УКП, построенных по принципу ромб-призмы. Это собственно ромб-призма $BC-0^\circ$, зеркальный ромб, и как частный случай УКП, построенное на пентапризмах. Рассмотрим погрешности, которые могут вносить каждое из УКП.

В ромб-призме $BC-0^\circ$ и зеркальном ромбе основной погрешностью, влияющей на точность согласования, является непараллельность отражающих поверхностей. Однако эта погрешность достаточно легко устраняется компенсационными клиньями [23] и в случае ее стабильности при различных внешних условиях никак не проявляется. Наиболее высокой стабильностью в этом отношении обладает ромб-призма $BC-0^\circ$, однако изготовить призму больших размеров (более 200 мм) является задачей технологически сложной. Кроме того, следует учитывать, что при увеличении длины хода лучей в стекле начинают существенно сказываться такие его свойства, как однородность и бессвильность. Эти характеристики напрямую не влияют на среднее отклонение лучей относительно главного луча, определяющего направление пучка, но влияют на качество волнового фронта, и при определенных условиях могут его ухудшить таким образом, что измерение истинного направления будет выполнено с ошибкой [10]. От этих недостатков свободны УКП, выполненные в виде зеркального ромба. Использование зеркального ромба вместо призмы позволяет снизить требования к местным ошибкам отражающих поверхностей в 2 раза [26] при прочих равных условиях, а требования к материалу в части однородности не предъявлять.

Однако использование зеркального ромба требует разработки специальной конструкции, обеспечивающей высокую стабильность параллельности отражающих поверхностей. Как правило, такая конструкция содержит высокостабильный геометрический эталон (ВГЭ), который установлен в корпус. При разработке такой конструкции необходимо учитывать влияние внешних

воздействий собственно на ВГЭ и воздействие на ВГЭ корпуса, который играет роль футляра. Известны конструкции [51], в которых зеркала в зеркальном ромбе заменяются на пентапризмы (см. рисунок 2.17). Использование пентапризм позволяет несколько упростить юстировку УКП и повысить стабильность УКП за счет их инвариантности к поворотам вокруг оси Z , однако не избавит от погрешностей при разворотах вокруг осей X и Y . И если в статике их можно компенсировать (кроме разворота изображения) клиновым компенсатором, то нестабильность их положения будет оказывать влияние на погрешность УКП.

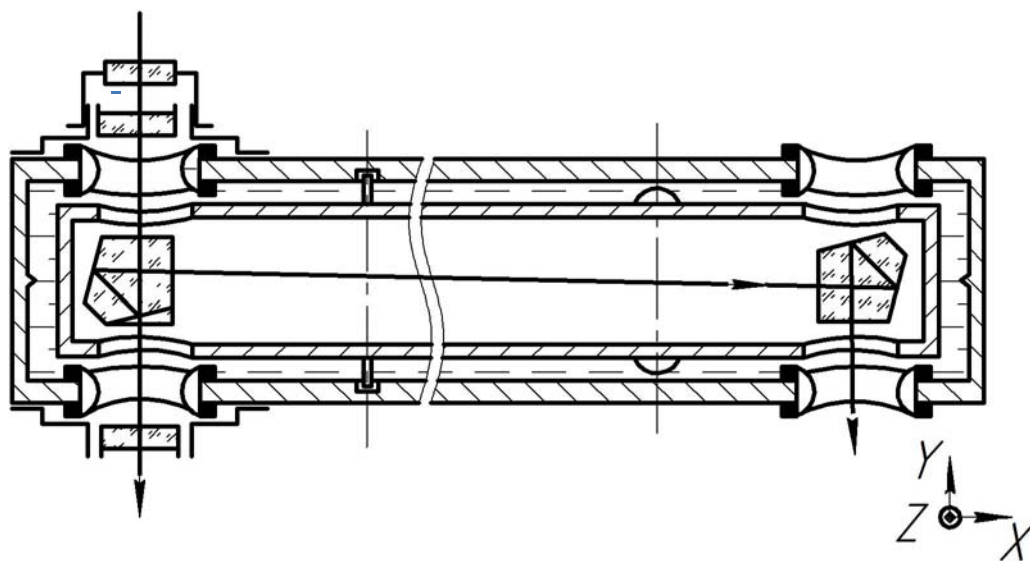
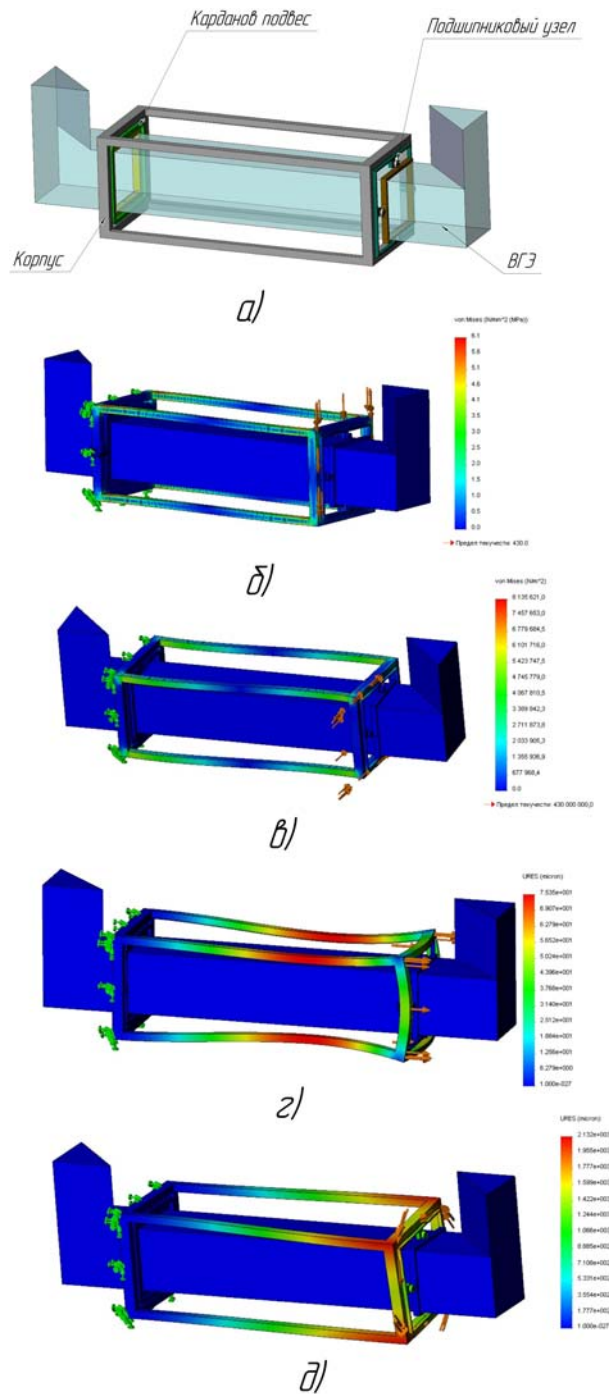


Рисунок 2.17 - Устройство коллинеарного переноса с пентапризмами

Влияние на ВГЭ внешнего корпуса может быть устранено за счет использования полукинематической схемы базирования, описанной в [54]. Суть схемы базирования поясняется на рисунке 2.18: ВГЭ крепится к внешнему корпусу при помощи двух опор, при этом одна из опор выполнена в виде карданного подвеса, а другая в виде шарикоподшипника. В этом случае деформации внешнего корпуса вследствие внешних воздействий будут передаваться на ВГЭ только через трение в опорах, которое может быть очень мало. Таким образом, погрешности, возникающие вследствие деформаций внешнего корпуса, можно исключить из анализа, как пренебрежимо малые.



а – ВГЭ в корпусе, б – эпюра напряжений при изгибе корпуса в вертикальном направлении, в – эпюра напряжений при изгибе корпуса в горизонтальном направлении, г – эпюра деформаций при растяжении корпуса, д – эпюра деформаций при скручивании корпуса

Рисунок 2.18 - Полукинематическая схема базирования ВГЭ

В [51, 54] также предложен способ для устранения деформаций ВГЭ под действием силы тяжести. Он заключается в том, что ВГЭ помещается в

герметичный объем с жидкостью. В этом случае, при обеспечении нейтральной плавучести ВГЭ, можно добиться минимального влияния силы тяжести на деформацию ВГЭ. Но из рисунка 2.17 видно, насколько сложна конструкция такого УКП, а также не учитывается влияние сильфонов на передачу деформаций от внешнего корпуса на ВГЭ.

Учитывая, что УКП, как правило, используются в одном пространственном положении, исследуем влияние деформаций ВГЭ на основе зеркального ромба и на основе двух пентапризм. Будем считать, что в каждом из положений, соответствующих плоскостям XU и YZ , база ВГЭ изогнется таким образом, что зеркала и пентапризмы развернутся на углы δ .

Для расчета влияний разворотов зеркал воспользуемся формулами, приведенными в [36]. Этот поворот можно произвести при помощи матрицы поворота пространства [20], которую можно преобразовать к виду

$$M_{\delta} = \begin{bmatrix} \cos \delta + \tau c_1^2 & \tau c_1 c_2 - c_3 \sin \delta & \tau c_1 c_3 + c_2 \sin \delta \\ \tau c_1 c_2 + c_3 \sin \delta & \cos \delta + \tau c_2^2 & \tau c_2 c_3 - c_1 \sin \delta \\ \tau c_1 c_3 - c_2 \sin \delta & \tau c_2 c_3 + c_1 \sin \delta & \cos \delta + \tau c_3^2 \end{bmatrix},$$

где c_1, c_2, c_3 – координаты орта с оси поворота; δ – угол поворота; $\tau = 1 - \cos \delta$.

При этом нужно учитывать знак угла δ . В дальнейшем будем считать угол δ положительным, если при наблюдении на конец орта c поворот совершается против направления движения часовой стрелки. В противном случае δ будет отрицательным.

При малых углах поворота матрица M_{δ} упрощается. Так, если в элементах этой матрицы сохранять только члены первого порядка малости, то она принимает вид:

$$M_{\delta} = \begin{bmatrix} 1 & -c_3 \delta & c_2 \delta \\ c_3 \delta & 1 & -c_1 \delta \\ -c_2 \delta & c_1 \delta & 1 \end{bmatrix}.$$

Если осуществлять поворот вокруг одной из координатных осей, то в этом случае матрица упрощается. Матрицы поворота вокруг осей X , Y , Z соответственно имеют вид

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \cos \delta & 0 & \sin \delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \delta & 0 & \cos \delta \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \cos \delta & -\sin \delta & 0 \\ \sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.41)$$

Вначале рассмотрим влияние деформаций основания ВГЭ зеркального ромба в плоскости главного сечения YZ . Из рисунка 2.19 очевидно, что в данном случае можно обойтись простыми геометрическими вычислениями.

Пусть луч, представленный вектором $a = (0, 0, 1)$, входит в зеркальный ромб. В номинальном положении, когда отражающие грани и соответственно их орты c_1 и c_2 параллельны, выходящий луч, представленный вектором a' , параллелен входящему. Пусть основание ромба изогнется в плоскости YZ таким образом, что поперечное сечение основания в плоскости установки зеркал, а значит и зеркала повернуться на малые углы, соответственно $\pm \delta$. Поскольку изгиб и повороты зеркал происходят в плоскости перпендикулярной отражающим граням, то и отклонения выходного луча a'' будет находиться в той же плоскости и очевидно будет равен

$$\gamma = 4 \times \delta. \quad (2.42)$$

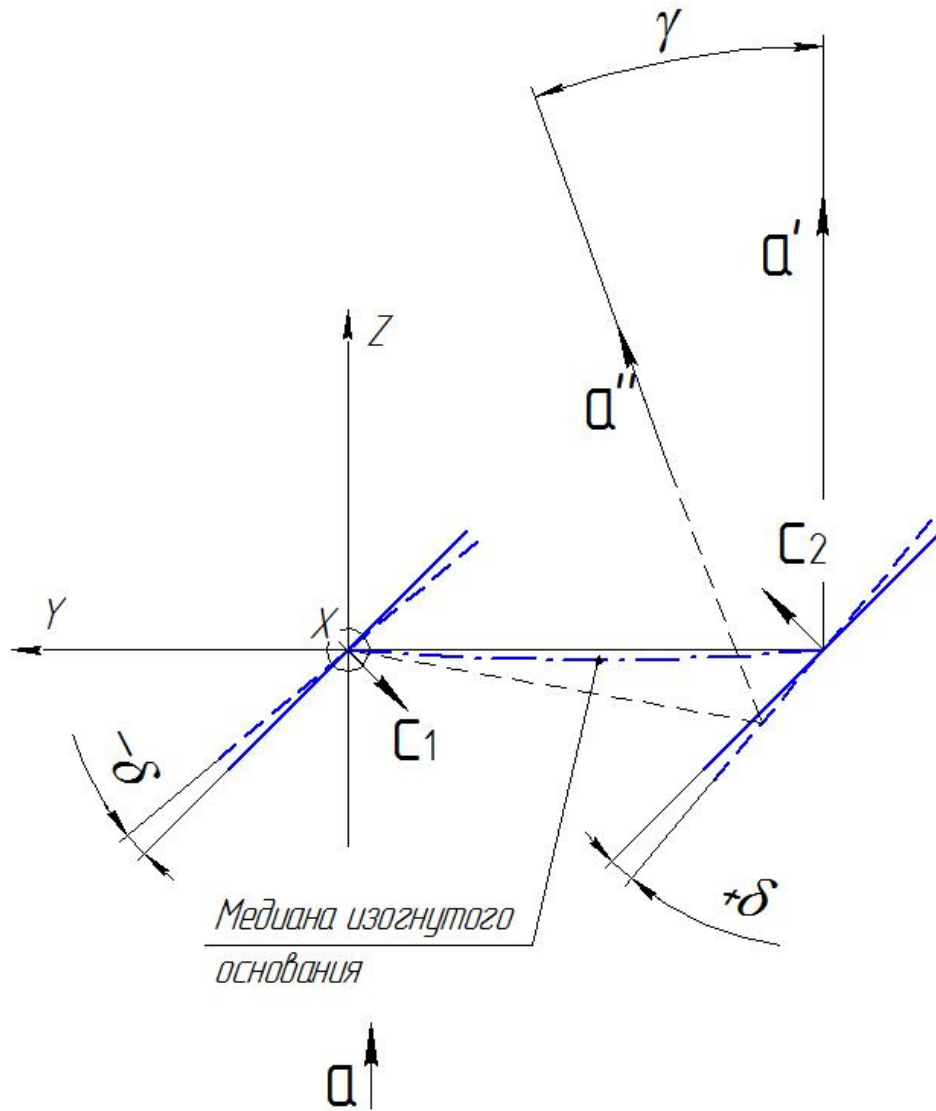


Рисунок 2.19 - Ход луча при изгибе ВГЭ зеркального ромба в плоскости главного сечения

Рассмотрим влияние изгиба основания ромба в плоскости XU . Так же, как и в предыдущем случае луч, входящий в зеркальный ромб, записывается вектором $a = (0, 0, 1)$. Пусть нормали отражающих зеркал c_1 и c_2 при изгибе основания ВГЭ развернутся вокруг оси Z на малые углы, соответственно $\pm\delta$, как изображено на рисунке 2.20.

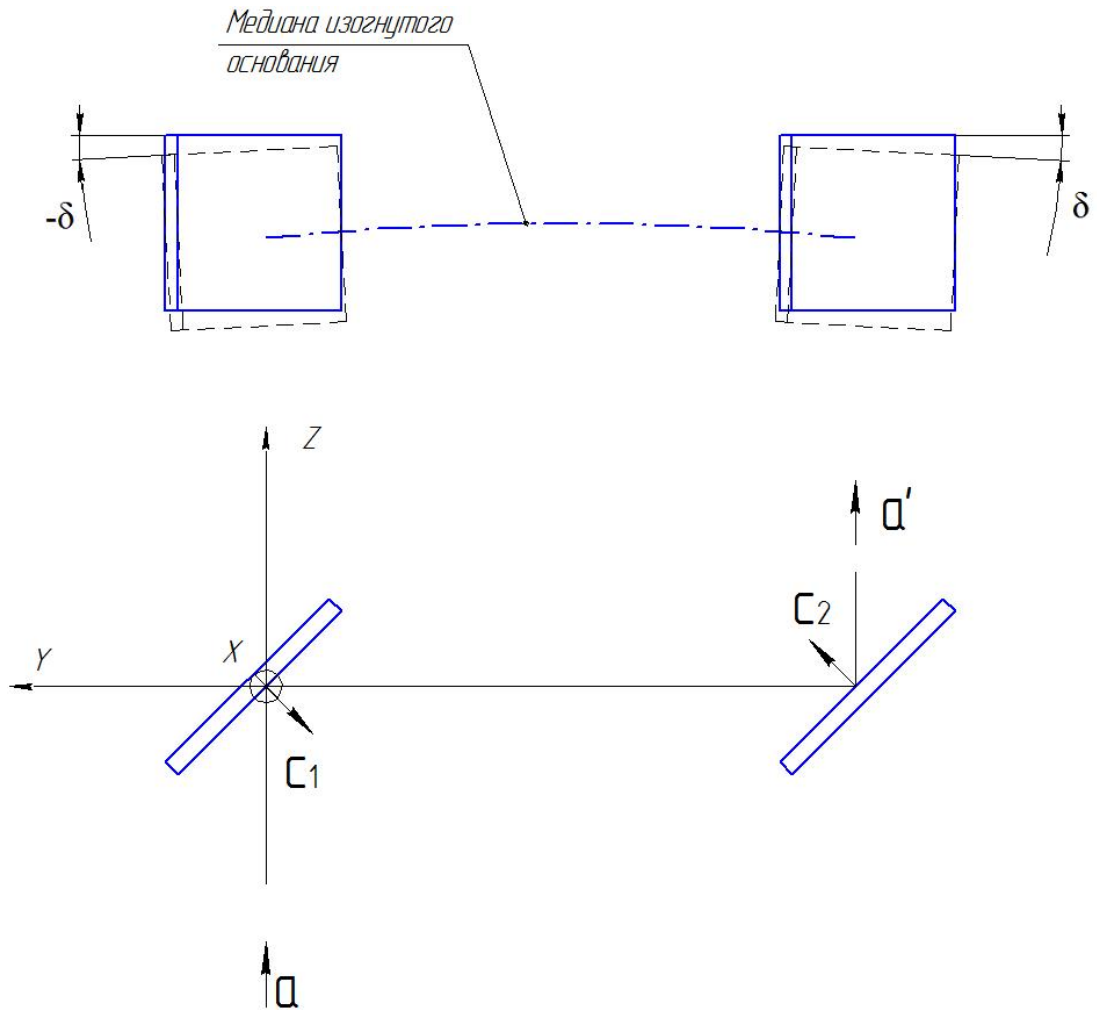


Рисунок 2.20 - Ход луча при изгибе ВГЭ зеркального ромба в плоскости перпендикулярной плоскости главного сечения

В номинальном положении орты нормалей первого и второго зеркал можно записать $c_1 = (0, -\sqrt{0,5}, -\sqrt{0,5})$, $c_2 = (0, \sqrt{0,5}, \sqrt{0,5})$. Для определения направления нормалей c'_1 и c'_2 после разворота на малые углы $\pm\delta$ воспользуемся формулой (2.43) для разворотов вокруг оси Z .

Для нормали c'_1 можно записать

$$c'_1 = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\delta) & -\sin(-\delta) & 0 \\ \sin(-\delta) & \cos(-\delta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\sqrt{0,5} \\ -\sqrt{0,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{0,5} \cdot \sin \delta \\ -\sqrt{0,5} \cdot \cos \delta \\ -\sqrt{0,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta \cdot \sqrt{0,5} \\ -\sqrt{0,5} \\ -\sqrt{0,5} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Соответственно для нормали c'_2 можно записать

$$C'_2 = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta & 0 \\ \sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{0,5} \\ \sqrt{0,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{0,5} \cdot \sin \delta \\ \sqrt{0,5} \cdot \cos \delta \\ \sqrt{0,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta \cdot \sqrt{0,5} \\ \sqrt{0,5} \\ \sqrt{0,5} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Направление луча после отражения от первого зеркала можно определить, воспользовавшись матрицей действия плоского зеркала [33]

$$M' = \begin{pmatrix} 1 - 2n_x^2 & -2n_x n_y & -2n_x n_z \\ -2n_x n_y & 1 - 2n_y^2 & -2n_y n_z \\ -2n_x n_y & -2n_y n_z & 1 - 2n_z^2 \end{pmatrix}, \quad (2.45)$$

где n_x, n_y, n_z – координаты орта нормали зеркала.

Для этого необходимо выполнить умножение матрицы действия M' на одностолбцовую матрицу A , составленную из координат орта вектора входящего луча a . Координаты орта отраженного луча определяются из одностолбцовой матрицы – результата произведения:

$$M_A = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11}a_1 + m_{12}a_2 + m_{13}a_3 \\ m_{21}a_1 + m_{22}a_2 + m_{23}a_3 \\ m_{31}a_1 + m_{32}a_2 + m_{33}a_3 \end{pmatrix}. \quad (2.46)$$

Для уменьшения громоздкости формул вначале определим матрицы действия M'_1 и M'_2 для повернутых зеркал по (2.45) с учетом (2.43) и (2.44)

$$M'_1 = \begin{pmatrix} 1 - 2(-\delta \cdot \sqrt{0,5})^2 & -2\delta \cdot \sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} & -2\delta \cdot \sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} \\ -2\delta \cdot \sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} & 1 - 2(-\sqrt{0,5})^2 & -2\sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} \\ -2\delta \cdot \sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} & -2\sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} & 1 - 2(-\sqrt{0,5})^2 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 - \delta^2 & -\delta & -\delta \\ -\delta & 0 & -1 \\ -\delta & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.47)$$

$$M'_2 = \begin{pmatrix} 1 - 2(-\delta \cdot \sqrt{0,5})^2 & 2\delta \cdot \sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} & 2\delta \cdot \sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} \\ 2\delta \cdot \sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} & 1 - 2(\sqrt{0,5})^2 & -2\sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} \\ 2\delta \cdot \sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} & -2\sqrt{0,5} \cdot \sqrt{0,5} & 1 - 2(\sqrt{0,5})^2 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 - \delta^2 & \delta & \delta \\ \delta & 0 & -1 \\ \delta & -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.48)$$

В соответствии с (2.46) и с учетом (2.47) определим координаты орта отраженного после первого зеркала луча

$$M'_1 A = \begin{pmatrix} 1 - \delta^2 & -\delta & -\delta \\ -\delta & 0 & -1 \\ -\delta & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\delta \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.49)$$

Зная из (2.49) координаты орта, отраженного после первого зеркала луча, и матрицу действия второго наклонного зеркала M'_2 с помощью той же формулы (2.46) определим орт a' на выходе из зеркального ромба

$$a' = M'_2(M'_1 A) = \begin{pmatrix} 1 - \delta^2 & \delta & \delta \\ \delta & 0 & -1 \\ \delta & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\delta \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta^3 - 2 \cdot \delta \\ -\delta^2 \\ 1 - \delta^2 \end{pmatrix}. \quad (2.50)$$

Угол отклонения луча в плоскости главного сечения YZ можно вычислить из отношения проекций вектора a' (2.50) на оси Y и Z

$$\gamma \approx \operatorname{tg} \gamma = \frac{A'_y}{A'_z} = \frac{-\delta^2}{1-\delta^2}. \quad (2.51)$$

Соответственно угол отклонения луча в плоскости ZX перпендикулярной плоскости главного сечения можно вычислить из отношения проекций вектора a' на оси X и Z

$$\beta \approx \operatorname{tg} \beta = \frac{A'_x}{A'_z} = \frac{\delta^3 - 2 \cdot \delta}{1 - \delta^2}. \quad (2.52)$$

Отклонение выходящего луча от входящего луча можно найти из скалярного произведения векторов a и a'

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \arccos \left(\frac{(a \cdot a')}{|a| \times |a'|} \right) = \arccos \left(\frac{1 - \delta^2}{\sqrt{(\delta^3 - 2 \cdot \delta)^2 + \delta^4 + (1 - \delta^2)^2}} \right) = \\ &= \arccos \left(\frac{1 - \delta^2}{\sqrt{\delta^6 - 2\delta^4 + 2\delta^2 + 1}} \right). \end{aligned} \quad (2.53)$$

Аналогично рассмотрим влияние изгиба основания ВГЭ с пентапризмами. На рисунке 2.21 представлена схема, из которой видно, что в этом случае разворот пентапризм происходит в плоскости перпендикулярной ребрам двугранных углов P_1 и P_2 . Из [33] известно, что поворот пентапризмы вокруг ребра двугранного угла, образованного отражающими поверхностями, не приводит к отклонению выходящего луча. Таким образом, в этом случае угол отклонения $\gamma = 0$.

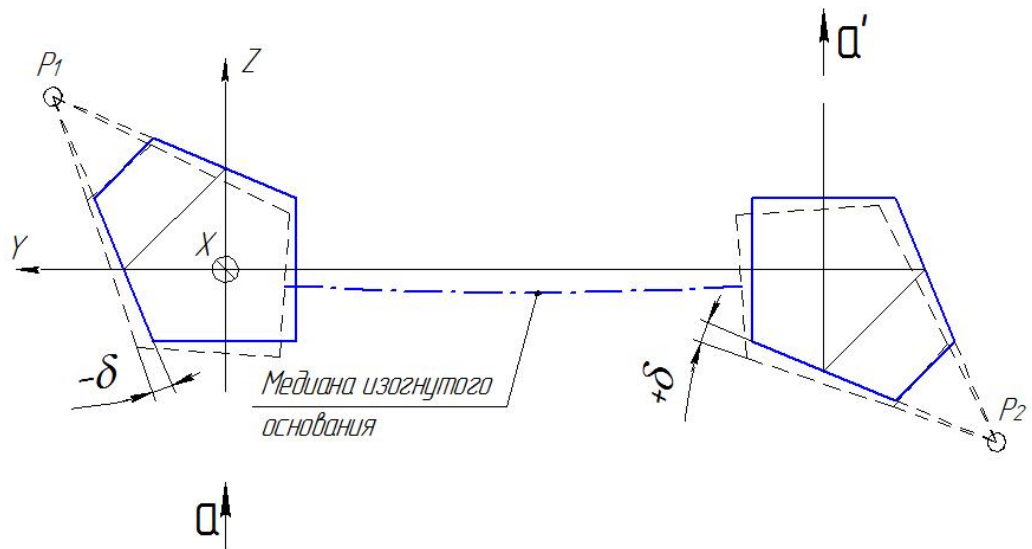


Рисунок 2.21 - Ход луча при изгибе ВГЭ с пентапризмами в плоскости главного сечения

Случай, когда изгиб ВГЭ происходит в плоскости XU показан на рисунке 2.22

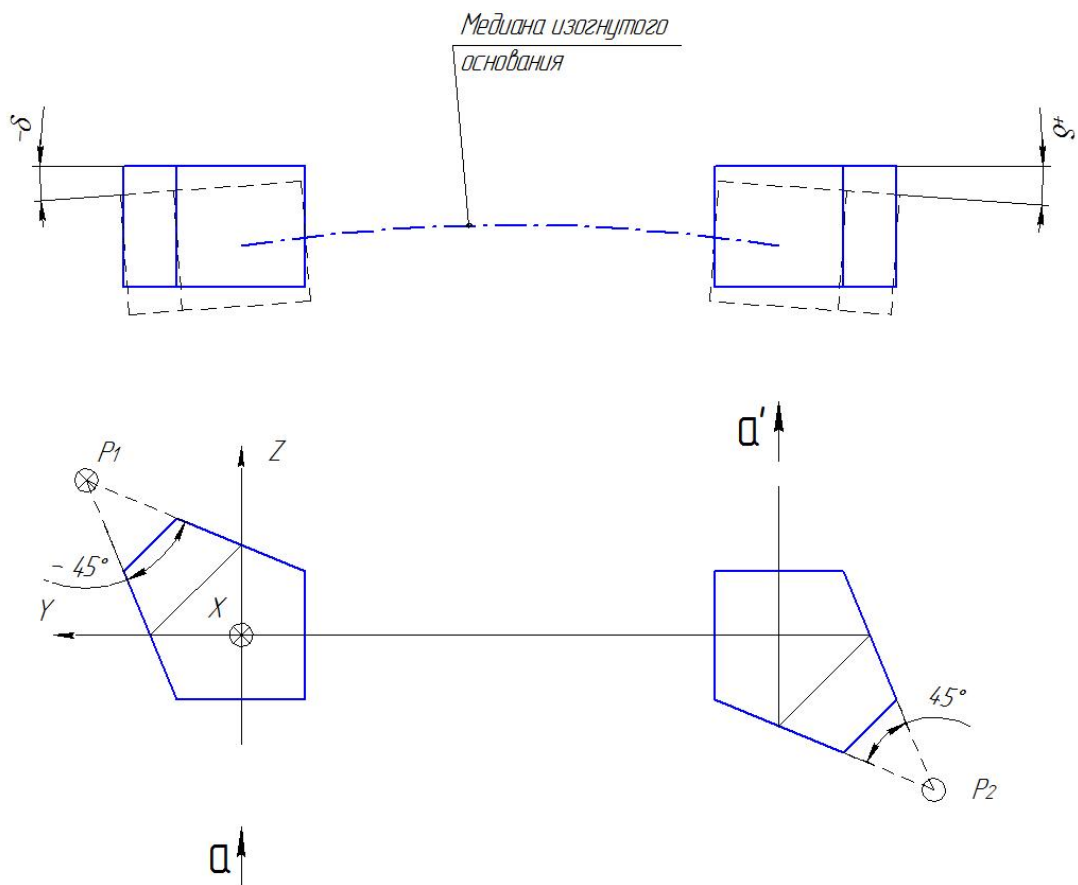


Рисунок 2.22 - Ход луча при изгибе ВГЭ с пентапризмами в плоскости перпендикулярной плоскости главного сечения

Для расчета луча через данную систему воспользуемся векторно-матричным методом. Так, направление луча, выходящего после отражения из первой пентапризмы, может быть определено из произведения матрицы действия углового зеркала на направление входящего луча $\vec{a} = (0, 0, 1)$. Выражение для матрицы действия углового зеркала из [33] в общем виде записывается как:

$$M' = \begin{pmatrix} [\cos 2\sigma + 2p_x^2 \sin^2 \sigma] & [-p_z \sin 2\sigma + 2p_x p_y \sin^2 \sigma] & [p_y \sin 2\sigma + 2p_x p_z \sin^2 \sigma] \\ [-p_z \sin 2\sigma + 2p_x p_y \sin^2 \sigma] & [\cos 2\sigma + 2p_y^2 \sin^2 \sigma] & [-p_x \sin 2\sigma + 2p_y p_z \sin^2 \sigma] \\ [-p_y \sin 2\sigma + 2p_x p_z \sin^2 \sigma] & [p_x \sin 2\sigma + 2p_y p_z \sin^2 \sigma] & [\cos 2\sigma + 2p_z^2 \sin^2 \sigma] \end{pmatrix}, \quad (2.54)$$

где p_x, p_y, p_z - координаты вектора направленного вдоль ребра двухгранного угла; σ - значение двухгранного угла с учетом правила знаков.

Для первой пентапризмы двугранный угол $\sigma = +45^\circ$, соответственно $\cos 2\sigma = 0$, а $\sin 2\sigma = 1$. Таким образом, для первой пентапризмы на недеформированном основании ($\delta=0$) матрицу действия M'_1 в соответствии с (2.54) можно записать как

$$M'_1 = \begin{pmatrix} p_{1x}^2 & -p_{1z} + p_{1x}p_{1y} & p_{1y} + p_{1x}p_{1z} \\ p_{1z} + p_{1x}p_{1y} & p_{1y}^2 & -p_{1x} + p_{1y}p_{1z} \\ -p_{1y} + p_{1x}p_{1z} & p_{1x} + p_{1y}p_{1z} & p_{1z}^2 \end{pmatrix}. \quad (2.55)$$

Для второй пентапризмы двугранный угол $\sigma = -45^\circ$, соответственно $\cos 2\sigma = 0$, а $\sin 2\sigma = -1$. Таким образом, для второй пентапризмы на недеформированном основании матрицу действия M'_2 можно записать как

$$M'_2 = \begin{pmatrix} p_{2x}^2 & p_{2z} + p_{2x}p_{2y} & -p_{2y} + p_{2x}p_{2z} \\ -p_{2z} + p_{2x}p_{2y} & p_{2y}^2 & p_{2x} + p_{2y}p_{2z} \\ p_{2y} + p_{2x}p_{2z} & -p_{2x} + p_{2y}p_{2z} & p_{2z}^2 \end{pmatrix}. \quad (2.56)$$

В (2.55) и (2.56) $p_{1x}, p_{1y}, p_{1z}, p_{2x}, p_{2y}, p_{2z}$ – координаты ортов ребер двугранных углов пентапризм.

Для призм на недеформированном основании из рисунка 2.22 следует, что орты ребер двугранных углов до разворота будут:

$$P_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad P_2 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Координаты развернутых на угол δ вследствие деформации основания ВГЭ ортов ребер P_1 и P_2 вокруг оси Z с учетом знаков и матрицы преобразования (2.44)

$$P'_1 = M'_{(+\delta)} P_1 = \begin{pmatrix} \cos(-\delta) & -\sin(-\delta) & 0 \\ \sin(-\delta) & \cos(-\delta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta \\ -\sin \delta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -\delta \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.57)$$

$$P'_2 = M'_{(-\delta)} P_2 = \begin{pmatrix} \cos \delta & -\sin \delta & 0 \\ \sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \delta \\ -\sin \delta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ -\delta \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.58)$$

Матрицы действия M'_1 и M'_2 с учетом (2.57) и (2.58) можно записать как

$$M'_1 = \begin{pmatrix} 1 & -\delta & -\delta \\ -\delta & \delta^2 & -1 \\ \delta & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.59)$$

$$M'_2 = \begin{pmatrix} 1 & \delta & \delta \\ \delta & \delta^2 & -1 \\ -\delta & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.60)$$

Направление луча после прохождения через первую пентапризму можно определить как произведения матрицы действия M_1' , определенной по (2.59), на орт входящего луча

$$M_1'A = \begin{pmatrix} 1 & -\delta & -\delta \\ -\delta & \delta^2 & -1 \\ \delta & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\delta \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.61)$$

Направление орта луча, прошедшего через вторую пентапризму, определим как произведение матрицы действия второй призмы, определенной по (2.60), на направление луча $M_1'A$ (2.61)

$$a' = M_2'(M_1'A) = \begin{pmatrix} 1 & \delta & \delta \\ \delta & \delta^2 & -1 \\ -\delta & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\delta \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2\delta \\ 0 \\ \delta^2 - 1 \end{pmatrix}. \quad (2.62)$$

Угол отклонения луча в плоскости главного сечения YZ можно вычислить из отношения проекций вектора a' (2.62) на оси Y и Z

$$\gamma \approx \operatorname{tg} \gamma = \frac{A'_y}{A'_z} = \frac{0}{\delta^2 - 1} = 0. \quad (2.63)$$

Соответственно угол отклонения луча в плоскости ZX перпендикулярной плоскости главного сечения можно вычислить из отношения проекций вектора a' на оси X и Z

$$\beta \approx \operatorname{tg} \beta = \frac{A'_x}{A'_z} = \frac{-2\delta}{\delta^2 - 1} = \frac{2\delta}{1 - \delta^2}. \quad (2.64)$$

Отклонение выходящего луча от входящего луча можно найти из скалярного произведения векторов \mathbf{a} и \mathbf{a}'

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \arccos\left(\frac{(\mathbf{a} \cdot \mathbf{a}')}{|\mathbf{a}| \times |\mathbf{a}'|}\right) = \arccos\left(\frac{\delta^2 - 1}{\sqrt{4\delta^2 + (\delta^2 - 1)^2}}\right) = \\ &= \arccos\left(\frac{1 - \delta^2}{\sqrt{\delta^4 + 2\delta^2 + 1}}\right) = \arccos\left(\frac{1 - \delta^2}{\delta^2 + 1}\right). \end{aligned} \quad (2.65)$$

Для сравнения полученных выражений (2.25), (2.34) – (2.36) и (2.64)–(2.65) выполним численный расчет погрешностей, вносимых устройствами вследствие изгибов. Пусть изгиб оснований ВГЭ приведет к наклонам отражателей, в соответствии с рисунками 2.19-2.22, на углы $\delta = 5''$, в этом случае лучи на выходе из ВГЭ будут иметь погрешности приведенные в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Значения углов отклонения луча при деформации ВГЭ

Направление определения отклонения	Величина угла отклонения луча при деформации ВГЭ	
	зеркальный ромб	пентапризмы
При изгибе основания ВГЭ в плоскости главного сечения		
Относительно оси Z в плоскости YZ	20"	0
Относительно оси Z в плоскости ZX	0	0
Относительно входящего луча	20"	0
При изгибе основания ВГЭ в плоскости перпендикулярной плоскости главного сечения		
Относительно оси Z в плоскости YZ	0,0001"	0
Относительно оси Z в плоскости ZX	10,05"	10,05"
Относительно входящего луча	10,05"	10,05"

Сравнив полученные зависимости (2.25), (2.34)–(2.36) и (2.63)–(2.65) и численные значения, приведенные в таблице 2.1, можно сделать вывод о том, что при изгибе основания ВГЭ в плоскости главного сечения использование пентапризм предпочтительнее, зеркальному ромбу, а при изгибе в плоскости перпендикулярной главному сечению ВГЭ ошибки вносимые устройствами будут практически одинаковыми.

Кроме ошибок, связанных с изгибом ВГЭ, следует также учитывать ошибки, возникающие вследствие остаточного фокусного расстояния пентапризм и зеркал. Остаточное фокусное расстояние равно наименьшему допускаемому фокусному расстоянию и обусловлено сферичностью поверхностей. В [35] рассмотрен случай для ВГЭ с отражающими элементами с одинаковой фокусностью. Показано, что ошибка, возникающая вследствие наклона ВГЭ на угол β определяется как

$$\psi = \frac{B \times \beta}{f'}, \quad (2.66)$$

где B – база ВГЭ, f' – остаточное фокусное расстояния отражающего элемента ВГЭ.

Определим влияние погрешностей изготовления деталей ВГЭ на остаточную фокусность, и, соответственно, погрешность передачи углов.

В зеркальном ромбе в качестве отражателя используется зеркало с внешним отражением. В таком случае остаточное фокусное расстояние отражателя, может быть записано как

$$f'_{\text{Зеркала}} = \frac{r}{2}, \quad (2.67)$$

где r – радиус отражающей поверхности зеркала.

Связь между отклонением N и радиусом поверхности r из [26] описывается формулой

$$r = \frac{D^2}{4 \cdot N \cdot \lambda} \approx \frac{450 \cdot D^2}{N}, \quad (2.68)$$

где D – световой диаметр, на котором определено отклонение от плоскости N ; λ – длина волны, на которой определено отклонение от плоскости N .

С учетом формулы (2.68) зависимость (2.67) примет вид

$$f'_{\text{Зеркала}} = \frac{225 \cdot D^2}{N}. \quad (2.69)$$

Погрешность ВГЭ на основе зеркального ромба, возникающая вследствие наклона, в соответствии с формулой (38) с учетом (41) составит

$$\psi_{\text{зерк. ромб}} = \frac{N \cdot B \cdot \beta}{225 \cdot D^2}. \quad (2.70)$$

Рассмотрим аналогичную модель ошибок ВГЭ, в которой в качестве отражателей используются пентапризмы. Пентапризма может быть представлена в виде плоскопараллельной пластины и двух зеркал с внутренним отражением, причем остаточные фокусные расстояния пластины и зеркал существенно больше расстояния между ними. В таком случае остаточное фокусное расстояние пентапризмы, может быть записано как

$$f'_{\text{Пентапризмы}} = \frac{f'_{\text{Пластины}} \times f'_{\text{Экв.Зеркал}}}{f'_{\text{Пластины}} + f'_{\text{Экв.Зеркал}}}, \quad (2.71)$$

где $f'_{\text{Пластины}}$ – остаточное фокусное расстояние плоскопараллельной пластины, $f'_{\text{Экв.Зеркал}}$ – остаточное эквивалентное фокусное расстояние системы из двух зеркал с внутренним отражением.

Остаточное фокусное расстояние плоскопараллельной пластины также может быть определено из условия, что радиусы кривизны существенно больше ее толщины

$$f'_{\text{Пластины}} = \frac{1}{(n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}, \quad (2.72)$$

где n – коэффициент преломления материала пентапризмы, r_1, r_2 – радиусы поверхностей плоскопараллельной пластины.

Из (2.72) следует, что если $r_1 = r_2$, то $f'_{\text{Пластины}} = \infty$. Это случай, когда одна из поверхностей изготовлена «на бугор», т.е. отклонение от плоскости N имеет положительный знак, другая поверхностей изготовлена «на яму», т.е. отклонение от плоскости N имеет отрицательный знак, а алгебраическая сумма отклонений равна нулю. Данный случай соответствует благоприятному сложению допусков на изготовление поверхностей.

Рассмотрим случай, когда $r_1 = -r_2 = r$. В этом случае формула (2.72) примет вид

$$f'_{\text{Пластины}} = \frac{r}{2 \cdot (n-1)}, \quad (2.73)$$

где r – радиус преломляющей поверхности пластины, n – коэффициент преломления материала.

Это случай, когда обе поверхности изготовлены либо «на бугор», либо «на яму», алгебраическая сумма отклонений равна удвоенному значению. Данный случай соответствует неблагоприятному сложению допусков на изготовление поверхностей и в дальнейших рассуждениях будет рассматриваться только он.

С учетом формулы (2.68) выражение (2.73) может быть записано как

$$f'_{\text{Пластины}} = \frac{225 \cdot D^2}{(n-1) \cdot N_{\Pi}}, \quad (2.74)$$

где N_n - отклонение от плоскости преломляющей поверхности.

Остаточное эквивалентное фокусное расстояние системы из двух зеркал с внутренним отражением может быть определено по формуле

$$f'_{\text{Экв.Зеркал}} = \frac{f'_{\text{Зеркала1}} \times f'_{\text{Зеркала2}}}{f'_{\text{Зеркала1}} + f'_{\text{Зеркала2}}}, \quad (2.75)$$

где $f'_{\text{Зеркала1}}$, $f'_{\text{Зеркала2}}$ - фокусные расстояния первого и второго зеркал с внутренним отражением.

Остаточное фокусное расстояние зеркала с внутренним отражением может быть определено как [40]

$$f'_{\text{Зеркала}} = \frac{r}{2 \cdot n}, \quad (2.76)$$

где r – радиус отражающей поверхности зеркала, n – коэффициент преломления материала.

Связь между отклонением N и остаточным радиусом поверхности такое же как и в выражении (2.68). Учитывая это, а также выражение (2.76), формулу (2.75) можно записать как

$$f'_{\text{Экв.Зеркал}} = \frac{\frac{450 \cdot D^2}{N_{\text{Зеркала1}} \cdot 2n} \times \frac{450 \cdot D^2}{N_{\text{Зеркала2}} \cdot 2n}}{\frac{450 \cdot D^2}{N_{\text{Зеркала1}} \cdot 2n} + \frac{450 \cdot D^2}{N_{\text{Зеркала2}} \cdot 2n}} = \frac{225 \cdot D^2}{n \cdot (N_{\text{Зеркала1}} + N_{\text{Зеркала2}})}, \quad (2.77)$$

где $N_{\text{Зеркала1}}$, $N_{\text{Зеркала2}}$ – отклонение от плоскости отражающих поверхностей первого и второго зеркал.

Из формулы (2.77) следует, что если алгебраическая сумма отклонений от плоскости отражающих поверхностей первого и второго зеркал будет равна нулю, т.е. одна из поверхностей изготовлена «на бугор», а другая поверхность изготовлена «на яму» ($N_{\text{Зеркала1}} = -N_{\text{Зеркала2}}$), то $f'_{\text{Экв.Зеркал}} = \infty$, что соответствует благоприятному сложению допусков на изготовление поверхностей.

В случае же, если сложение допусков неблагоприятное и $N_{\text{Зеркала1}} = N_{\text{Зеркала2}} = N_3$, выражение (2.77) примет вид

$$f'_{\text{Экв.Зеркал}} = \frac{112,5 \cdot D^2}{n \cdot N_3}. \quad (2.78)$$

Таким образом, при условии, что материал и диаметр одинаковы для пластины и зеркала с учетом (2.71), (2.74) и (2.78) можно записать, что остаточное фокусное расстояние пентапризмы может быть записано как

$$f'_{\text{Пентапризмы}} = \frac{\frac{225 \cdot D^2}{N_{\text{П}} \cdot (n-1)} \times \frac{112,5 \cdot D^2}{n \cdot N_3}}{\frac{225 \cdot D^2}{N_{\text{П}} \cdot (n-1)} + \frac{112,5 \cdot D^2}{n \cdot N_3}} = \frac{225 \cdot D^2}{(2 \cdot N_3 \cdot n + N_{\text{П}} \cdot (n-1))}. \quad (2.79)$$

Принимая во внимание, что большинство призм изготавливается из стекла с коэффициентом близким к $n=1,5$ из (2.79) можно получить приближенную формулу для вычисления остаточного фокусного расстояния пентапризмы

$$f'_{\text{Пентапризмы}} \approx \frac{225 \cdot D^2}{(2 \cdot N_3 \cdot 1,5 + N_{\text{П}} \cdot (1,5 - 1))} = \frac{225 \cdot D^2}{3 \cdot N_3 + 0,5 \cdot N_{\text{П}}}. \quad (2.80)$$

Таким образом, ошибка вследствие наклона ВГЭ, в котором в качестве отражателей используются пентапризмы, определяемая по формуле (2.66), будет определяться выражением

$$\Psi_{\text{Пентаприм.ВГЭ}} = \frac{(3 \cdot N_3 + 0,5 \cdot N_{\text{П}}) \cdot B \cdot \beta}{225 \cdot D^2}. \quad (2.81)$$

Если принять $N_3 = N_{II} = N$, то формула (2.81) примет вид

$$\psi_{\text{Пентапризм.ВГЭ}} = \frac{3,5 \cdot N \cdot B \cdot \beta}{225 \cdot D^2}. \quad (2.82)$$

Сравнивая зависимости (2.70) и (2.82), можно прийти к выводу, что при равных значениях допусков на изготовление поверхностей отражателей погрешность вследствие наклона в 3,5 раза больше для ВГЭ с использованием пентапризм, чем для ВГЭ с внешними зеркалами.

2.5.3. Устройства коллинеарного переноса на основе углового отражателя

Свойства угловых отражателей известны и описаны [21], а их применение в оптических приборах широко [8, 52, 65]. Практически используются два типа угловых отражателей – полые и в виде призм. Из-за технологических трудностей полые угловые отражатели менее распространены. При этом при использовании угловых отражателей в виде призм необходимо учитывать возникающие в них поляризационные явления, описанные в [15, 49]. В устройствах коллинеарного переноса, используемых для согласования каналов, обычно применяют угловые отражатели в виде призм БкР-180°, как это показано в [57, 60], поэтому далее будет рассматриваться именно этот тип углового отражателя. Рассмотрим погрешности, которые может внести эта призма, и возможные пути их уменьшения.

Из [16] известно, что вследствие технологического несовершенства изготовления углов призм БкР-180° возникает два рода погрешностей. Это погрешность непараллельности входящего и выходящего лучей и двоение изображения. Первая ошибка легко устраняется включением в узел призмы клинового компенсатора, юстируя который, можно добиться необходимой параллельности входящего и выходящего лучей [31, 58, 64]. Вторая, а именно

двоение изображения, связана с погрешностью при изготовлении угла крыши призмы, и определяется по формуле из [16]

$$\varepsilon_{\text{Двоения}} = 4 \cdot \Delta_K \cdot n \cdot \cos \gamma, \quad (2.83)$$

где Δ_K – ошибка угла крыши, n – коэффициент преломления материала призмы, γ – угол падения осевого луча на ребро крыши.

Для призмы БкР-180° угол падения осевого луча на ребро крыши $\gamma = 45^\circ$. А если принять, что она сделана из стекла с коэффициентом $n=1,5$, то двоение в соответствии с формулой (2.83) составит

$$\varepsilon_{\text{Двоения}} = 4,2 \cdot \Delta_K. \quad (2.84)$$

Из зависимости (2.84) следует, что компенсация двоения в призмах типа БкР-180° зависит только от погрешности изготовления призмы и не может быть скомпенсирована за счет других параметров призмы. Таким образом, в случае если необходимое двоение не может быть обеспечено технологически путем ужесточения допуска, то необходимо введение дополнительного компенсационного элемента (клина). Это возможно, так как на выходе из призмы БкР-180° вошедший в призму пучок разделен на два, угол между которыми $\varepsilon_{\text{Двоения}}$. При этом пучки имеют границу раздела, которая действительно проходит по грани двугранного угла – крыше призмы. В плоскости зрачка эта граница с некоторым допущением совпадает с ее проекцией. Допущение состоит в том, что поскольку после «границы» пучков уже два, и они идут под некоторым углом друг к другу, то на некотором расстоянии от «границы» происходит их смешивание. Но поскольку угол фактически мал и, как правило, имеет величину в единицы угловых секунд, и расстояние мало, то можно пренебречь этим смешиванием ввиду малости площади зрачка, которую занимает «смешанный» пучок. Кроме того, ввиду его малости им можно без ущерба пожертвовать, поставив экран.

Выводы по главе 2

1. Разработана математическая модель погрешностей и классификация устройств проверки согласования каналов с единым тест-объектом. Показано, что соосное расположение проверяемых каналов и коллиматора исключает влияние на результат проверки расфокусировки коллиматора, сферической и сферохроматической аберраций объектива коллиматора.

2. Разработана математическая модель погрешностей схемы согласования двух коллиматоров при помощи плоскопараллельной пластины и двух автоколлимационных труб. Показано, что погрешность схемы обратно пропорциональна увеличению автоколлимационных труб.

3. Разработана математическая модель погрешностей инвариантного коллиматора отдельно и совместно с выверяемым ОЭП. Показано, что если в проверяемом канале ОЭК организован телецентрический ход лучей, погрешность фокусировки инвариантного коллиматора не влияет на погрешность проверки согласования. Предложена методика юстировки инвариантных коллиматоров с использованием выверяемых каналов ОЭП.

4. Исследованы схемы устройств проверки согласования каналов по лазерному излучению одного из каналов ОЭК, и показано, что погрешность в значительной мере зависит от характеристик лазерного излучения.

5. Исследовано автоколлимационное углоизмерительное устройство с двумя полями зрения. Построена математическая модель погрешностей и разработана методика его юстировки. Показана возможность полной компенсации увода оптической оси за счет юстировки тест-объекта.

6. Исследованы конструкции устройств коллинеарного переноса на основе пентапризм и зеркального ромба, построены математические модели погрешностей. Сравнительный анализ математических моделей показал, что УКП на основе пентапризм имеет преимущество перед УКП на основе зеркального ромба только в случае изгиба основания УКП в плоскости главного сечения пентапризм.

7. Исследовано УКП на основе призмы БкР-180°, и предложена методика его юстировки для устранения двоения путем добавления клинового компенсатора, перекрывающего только половину зрачка.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ ПРОВЕРКИ СОГЛАСОВАНИЯ КАНАЛОВ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

3.1. Разработка автоколлимационного углоизмерительного устройства с двумя угловыми полями и методики его юстировки

В пункте 2.2.1. настоящей работы была показана целесообразность создания автоколлимационного углоизмерительного устройства с двумя угловыми полями. Эта целесообразность объясняется тем, что в углоизмерительном устройстве с двумя угловыми полями возможно решить проблему сочетания высокой чувствительности и большого поля обзора. А в 2.5.1. было показано, что для создания такого устройства необходимо разработать двухпольный объектив и методику его юстировки, позволяющую исключить влияние увода оптической оси вследствие неточности установки перемещаемых линз.

При разработке автоколлимационной трубы с двумя угловыми полями (АКТ) введем ряд ограничений, которые позволят унифицировать ее с уже выпускаемой продукцией. Так, в качестве унифицированного узла разрабатываемой АКТ используем узел окуляра со светоделительной призмой, маркой и отсчетной сеткой от автоколлимационной трубы [67], выпускаемой на ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева». В этом случае при разработке АКТ потребуется вновь разработать только объектив с двумя угловыми полями. Параметры этого объектива можно определить из условия заимствования отсчетной сетки, минимальной цены деления АКТ и максимальной величины поля зрения АКТ.

Фокусное расстояние, соответствующее узкому угловому полю (УУП), следует определять как

$$f'_{\text{УУП}} = \frac{h}{\text{tg}\mu_{\text{УУП}}}, \quad (3.1)$$

где h – расстояние между штрихами отсчетной сетки, $\mu_{УУП}$ – минимальная цена деления АКТ в угловой мере.

Фокусное расстояние соответствующее широкому угловому полю (ШУП) следует определять как

$$f'_{ШУП} = \frac{D_{Сетки}}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_{ШУП}}{2}\right)}, \quad (3.2)$$

где $D_{Сетки}$ – световой диаметр сетки, $\omega_{ШУП}$ – величина максимального поля АКТ.

При разработке АКТ с двумя угловыми полями приняты следующие исходные данные:

- сетка имеет характеристики : $h = 0,014$ мм, $D_{Сетки} = 17,5$ мм;
- минимальная цена деления АКТ $\mu_{УУП} = 5''$;
- величина максимального поля зрения АКТ $\omega_{ШУП} = 5^\circ$.

Используя формулы (3.1) и (3.2) можно определить, что $f'_{УУП} = 580$ мм и $f'_{ШУП} = 200$ мм. Поскольку от оптической системы АКТ не требуется высокой светосилы, то примем ее равной 1:4, что позволит рассчитать объектив относительно несложной конструкции. В качестве прототипа объектива был взят объектив с дискретным изменением фокусного расстояния [55]. В результате оптимизации и изменения формы и количества линз был получен объектив, представленный на рисунке 3.1. Объектив представляет собой неподвижный оптический блок (поз.1) и подвижный оптический блок (поз.2), который встает на оптическую ось неподвижного оптического блока. Неподвижный оптический блок формирует изображение для УУП, а совместно с подвижным блоком изображение для ШУП, в той же плоскости, что и для УУП.

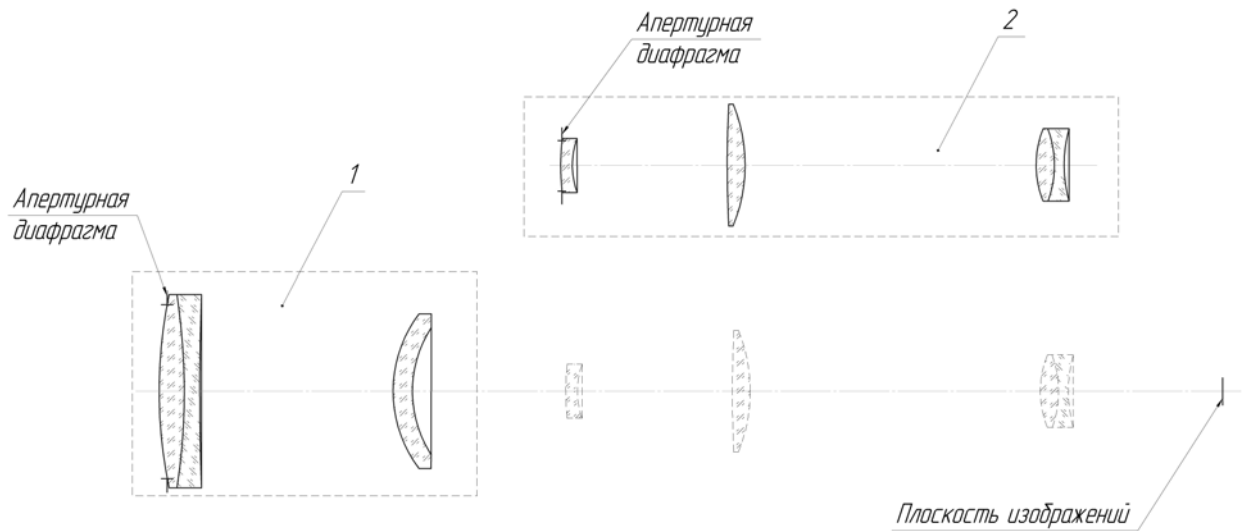
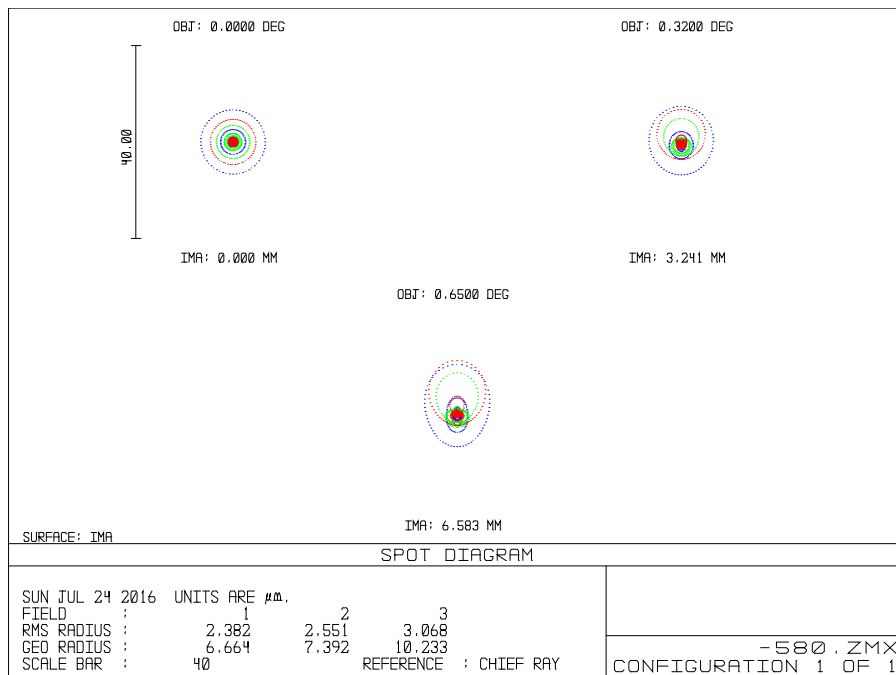


Рисунок 3.1 – Объектив с дискретно изменяемым фокусным расстоянием

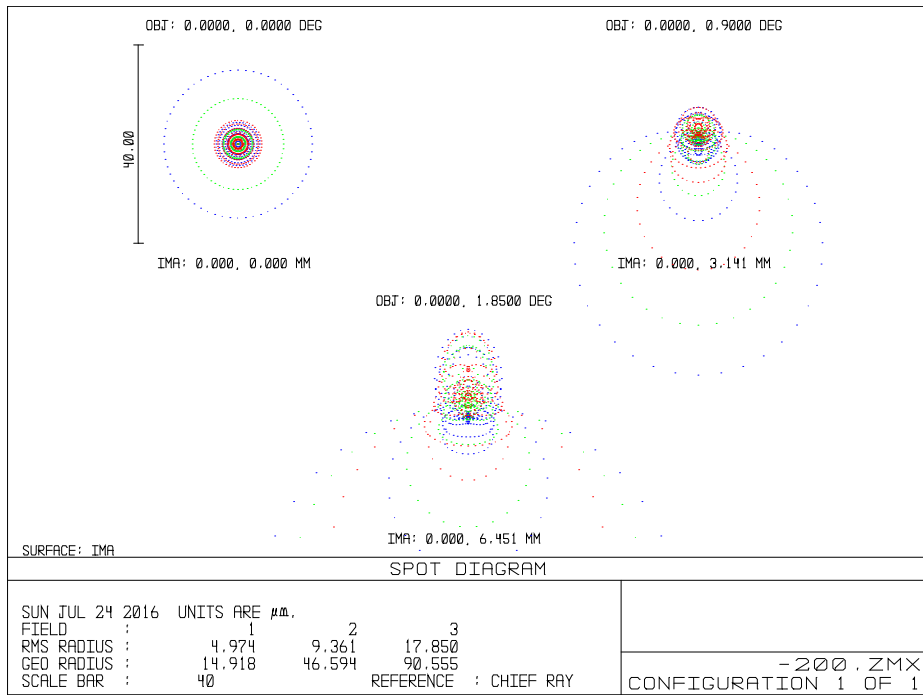
Объектив имеет следующие характеристики:

- фокусное расстояние 580 мм/200 мм;
- угловое зрение в пространстве предметов $1^{\circ}40' / 5^{\circ}$;
- длина оптической системы – 560 мм.

Параметры качества объектива представлены диаграммами пятен рассеяния в соответствии с рисунком 3.2, графиками астигматизма и дисторсии в соответствии с рисунком 3.3, рассчитанные с помощью программы Zemax.

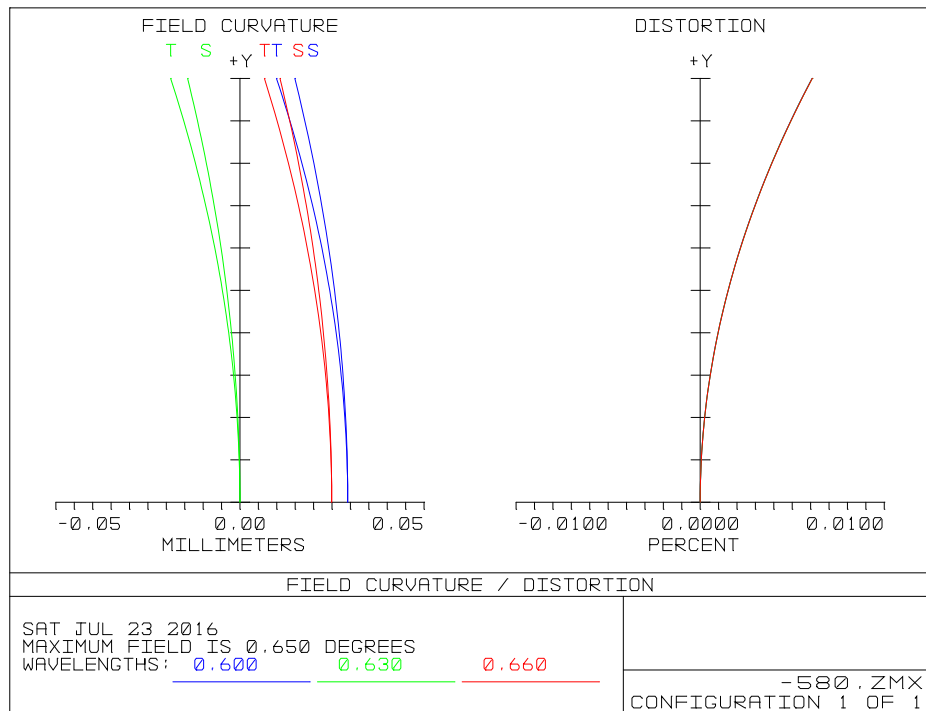


a)

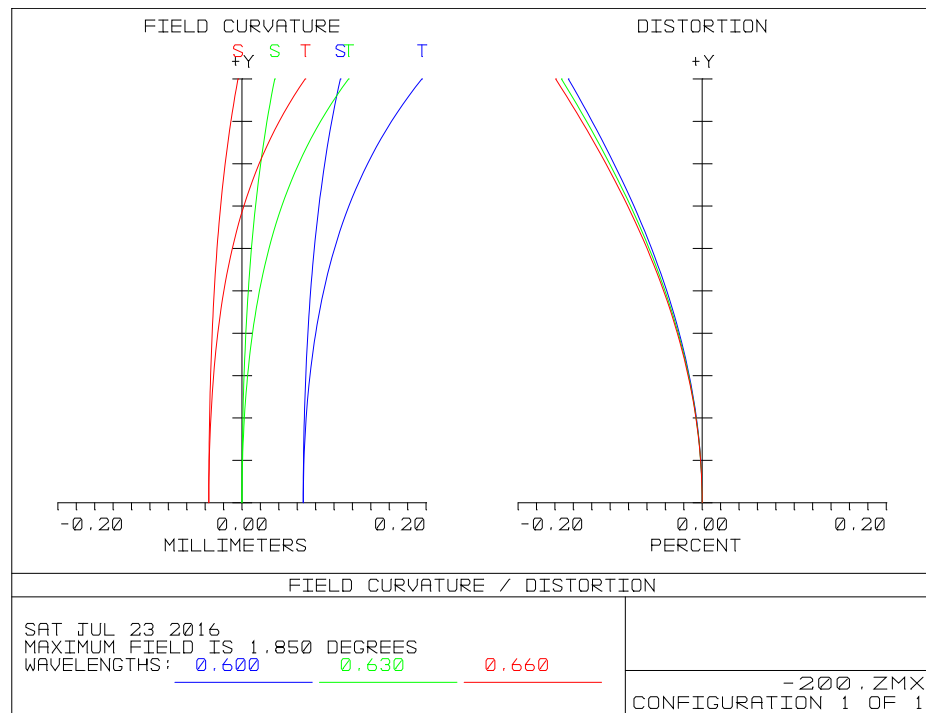


б)

Рисунок 3.2 – Диаграммы пятен рассеяния: а – для УУП, б – для ШУП



а)



б)

Рисунок 3.3 – Графики астигматизма и дисторсии: а – для УУП, б – для ШУП

С использованием зависимости (2.40), выведенной в п.2.5.1 настоящей работы, разработаем методику юстировки АКТ. Эта методика должна обеспечивать возможность компенсации увода оптической оси, возникающего вследствие неточной установки оптического блока, за счет изменения положения отсчетной сетки.

Пусть оператор наблюдает в ШУП трубы целевой знак, который совмещен с центром отсчетной сетки, как показано на рисунке 3.4. При переключении АКТ в режим УУП изображение целевого знака увеличится и сместится вследствие увода оптической оси, как показано на рисунке 3.5.

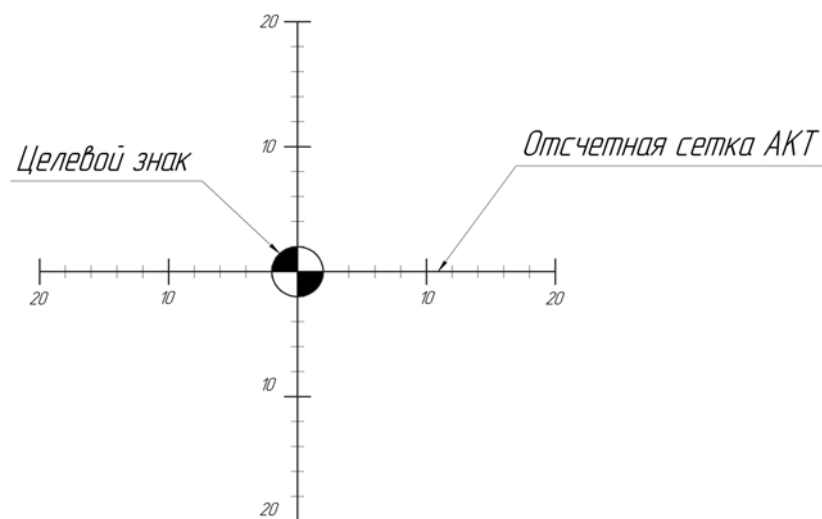


Рисунок 3.4 – Вид поля зрения АКТ в режиме ШУП

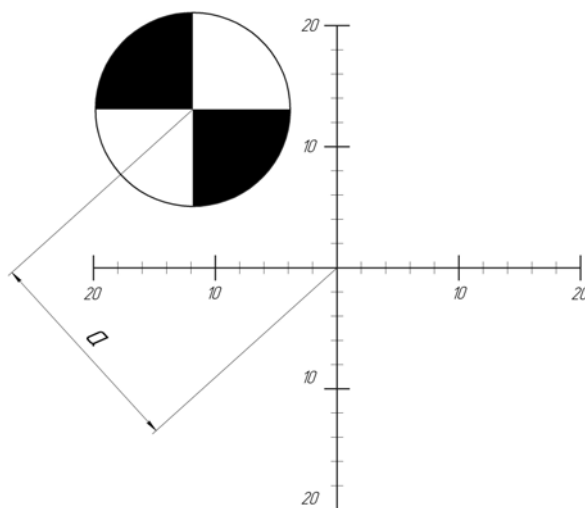


Рисунок 3.5 – Вид поля зрения АКТ в режиме УУП

Из формулы (2.40) следует, что для компенсации увода необходимо переместить отсчетную сетку в направлении обратном имеющемуся уводу, на

величину $v = \left| a \frac{f'_{\max}}{f'_{\min} - f'_{\max}} \right|$, как показано на рисунке 3.6.

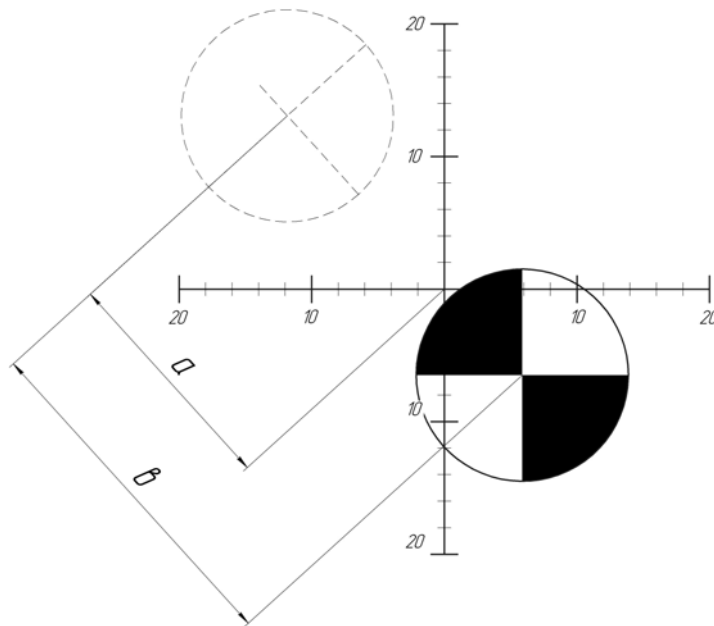


Рисунок 3.6 – Вид поля зрения АКТ в режиме УУП при юстировке

Выполним численную проверку методики применительно к разработанному объективу. Пусть подвижный оптический блок при переключении в режиме ШУП не совмещен с оптической осью объектива на 0,1 мм. В этом случае увод оптической оси, определяемый по главному лучу в ШУП в линейной мере составит 0,065 мм. Если установить центр отсчетной сетки в эту точку, то при переключении в УПЗ этот увод в угловой мере составит 23", что больше в четыре раза, чем цена деления проектируемой трубы.

Для устранения увода оптической оси в соответствии с формулой (2.40) необходимо переместить отсчетную сетку, контролируя ее положение в УУП, на 0,099 мм в сторону уменьшения рассогласования как показано на рисунке 3.6. В результате моделирования в программе Zemax получаем, что после смещения отсчетной сетки рассогласование между УУП и ШУП составило 0,9", что менее цены деления АКТ. Таким образом, подтверждено, что изменением положения отсчетной сетки можно добиться устранения увода оптической оси. При этом качество изображения в ШУП остается практически неизменным, что иллюстрируется диаграммами пятен рассеяния, представленными на рисунке 3.7.

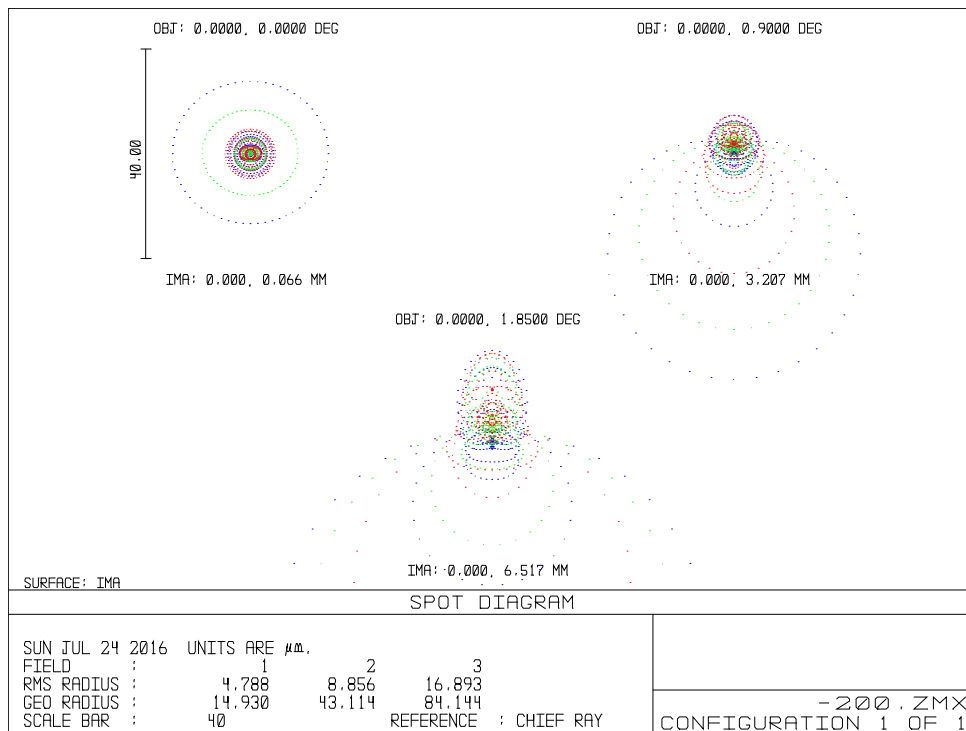


Рисунок 3.7 – Диаграммы пятен рассеяния для ШУП

На основе выполненного расчета была разработана оптическая схема АКГ с двумя угловыми полями, оптическая схема и общий вид которой приведены в приложении А и Б. На данную разработку была подана заявка и получен патент на изобретение [63].

3.2. Разработка устройства коллинеарного переноса на основе призмы БкР-180° и методики его юстировки

В п.2.5.3. диссертационной работы было рассмотрено УКП на основе уголкового отражателя и в частности призмы БкР-180°. В том же пункте при рассмотрении модели ошибок, возникающих в таких устройствах, было предложено использовать для компенсации двоения клин, который перекрывает только половину пучка, а его главное сечение перпендикулярно проекции ребра двугранного угла в плоскости зрачка УКП. Суть предложения поясняется на рисунке 3.8.

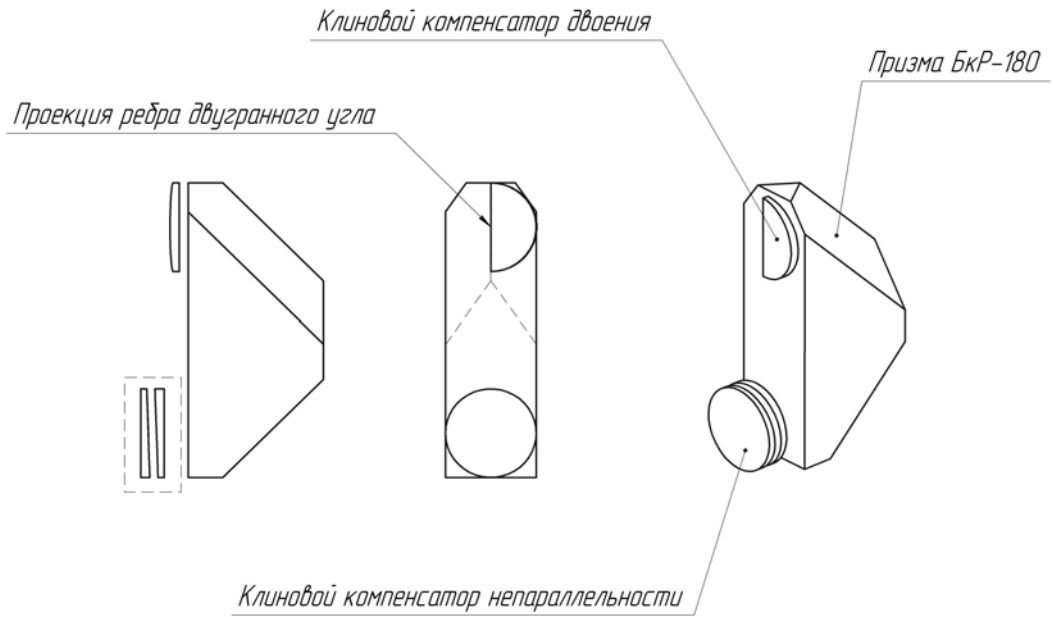


Рисунок 3.8 – Призма БкР-180° с компенсаторами

На рисунке 3.8 изображена призма БкР-180° с двумя компенсаторами. Один из них известный двухклиновой компенсатор, служащий для устранения непараллельности входящего и выходящего лучей. А второй для компенсации двоения изображения в выходящем пучке лучей.

Методика юстировки данного УКП заключается в следующем – вначале подбирается клин, компенсирующий двоение, а затем разворотом клиньев в двухклиновом компенсаторе устраняется непараллельность входящего и выходящего пучков лучей. Эти операции поясняются рисунками 3.9 и 3.10.

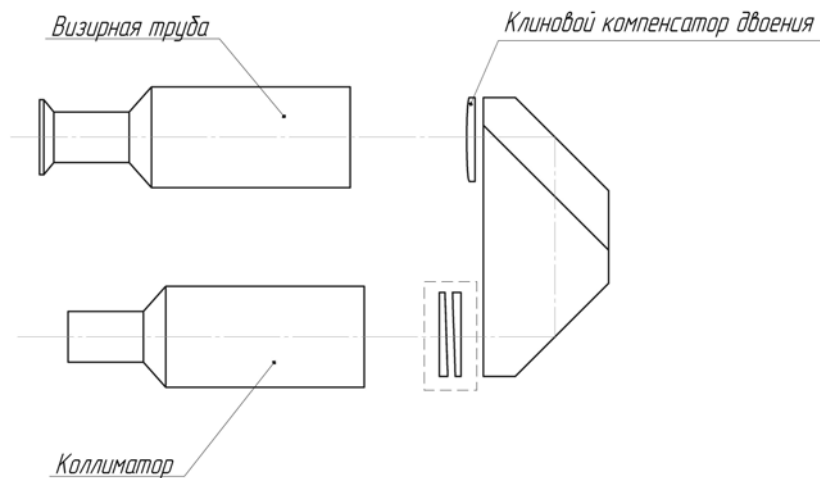


Рисунок 3.9 – Подбор клинового компенсатора двоения

На рисунке 3.9 показана схема, используемая при подборе клинового компенсатора двоения. Подбор осуществляется следующим образом – напротив входного зрачка УКП устанавливается коллиматор, а напротив выходного зрачка – зрительная труба с угломерной шкалой, увеличение которой подбирается таким образом, чтобы наблюдатель мог различить предельно допустимое двоение изображения. С помощью угломерной шкалы определяется двоение изображения мира, находящейся в фокальной плоскости коллиматора, и если оно больше предельно допустимого, то из набора клиньев подбирается и устанавливается клин с наиболее близким к величине двоения углом отклонения. При этом в наборе компенсаторов должно быть столько различных вариантов (с разными углами отклонения) клиньев, чтобы они перекрывали весь диапазон возможных углов двоения изображения, формируемого призмой БкР-180°, а разность углов отклонения между ближайшими клиньями не превышать предельно допустимого двоения изображения УКП. Количество клиньев в наборе в таком случае будет определяться формулой

$$N = \frac{W}{V},$$

где W – максимальный угол двоения изображения, формируемого призмой БкР-180°, V – предельно допустимое двоение изображения УКП.

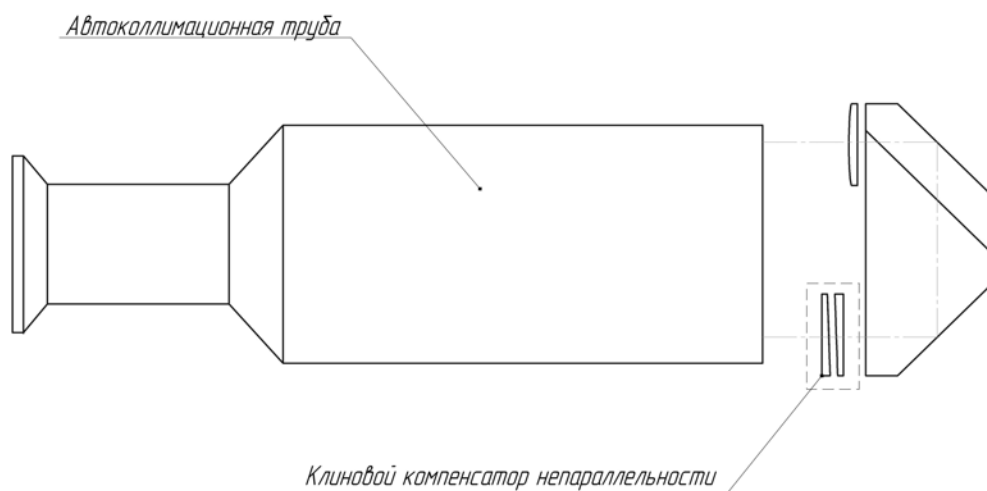


Рисунок 3.10 – Юстировка клинового компенсатора непераллельности

На рисунке 3.10 показана схема, используемая при юстировке клинового компенсатора непараллельности. Юстировка осуществляется следующим образом – перед УКП устанавливается автоколлимационная труба, увеличение которой подбирается таким образом, чтобы наблюдатель мог различить предельно допустимое отклонение от параллельности входящего и выходящего лучей, затем по угломерной сетке определяется величина непараллельности входящего и выходящего лучей. После этого путем взаимного разворота клиньев вокруг их оптической оси компенсируется величина непараллельности, а совместным разворотом ее направление. При этом разность углов отклонения клиньев в паре не должна превышать предельно допустимое значение непараллельности УКП, а величина угла отклонения одного клина быть больше половины возможного угла непараллельности, формируемого призмой БкР-180°.

На основе описанной методики было разработано призмное УКП, оптическая схема и общий вид которого приведены в приложениях В и Г. На данную разработку была подана заявка и получен патент на изобретение [64].

3.3. Разработка устройства проверки согласования каналов многоспектрального оптико-электронного комплекса на основе инвариантных коллиматоров.

В п. 2.2.2. настоящей диссертационной работы были рассмотрены устройства согласования каналов с использованием инвариантных коллиматоров и там же было отмечено, что они обладают высокой степенью устойчивости к различным воздействиям. Учитывая это, в рамках выполнения диссертационной работы была поставлена задача создания устройства проверки согласования телевизионного и тепловизионного каналов обзорно-прицельной станции ОПС-28 во время вибрационных испытаний. Задача устройства – формирование двух коллимированных параллельных пучков, которые соответственно должны будут регистрироваться телевизионным и тепловизионным каналами ОПС-28,

непараллельность которых должна быть не более 20". Поскольку проверка согласования каналов должна происходить во время испытаний изделия ОПС-28 на вибрационном стенде, который помимо поступательных движений имеет паразитные угловые колебания, для их исключения было предложено установить устройство непосредственно в изделие ОПС-28, как показано на рисунке 3.11. При этом двустороннее зеркало устройства согласования, нормаль к которому определяет направление обоих выходящих пучков, должно было быть жестко связано с базовой плоскостью изделия ОПС-28.

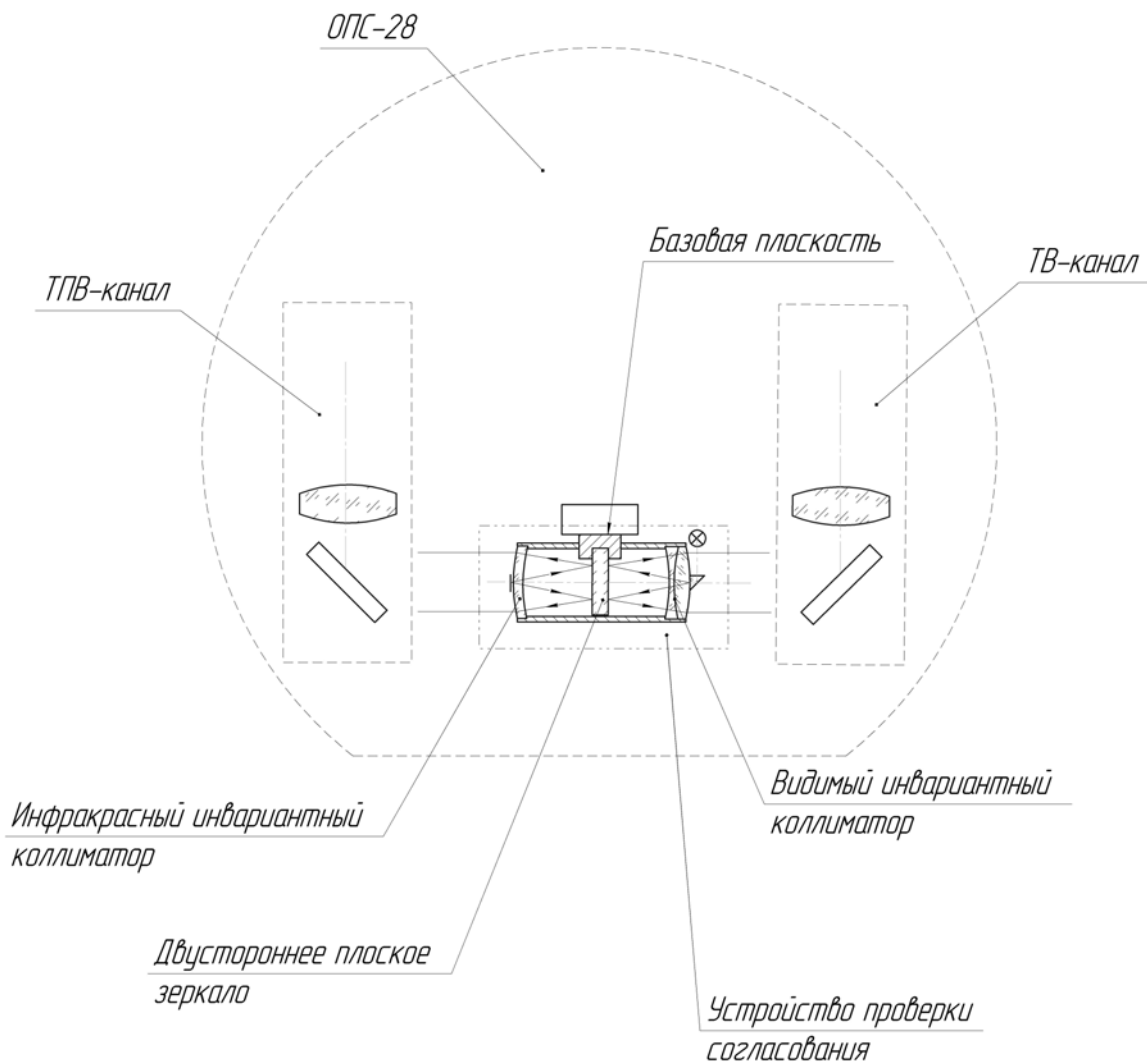


Рисунок 3.11 – Схема применения устройства проверки согласования телевизионного и тепловизионного каналов обзорно-прицельной станции ОПС-28 во время вибрационных испытаний

В состав инвариантного коллиматора, кроме зеркала, должны входить объективы, которые работают в видимом и ИК диапазоне. Поскольку нет требований о том, что каждый из объективов должен работать в обоих диапазонах, то для упрощения схемного решения разработаем разные объективы для обоих каналов. В [43] подробно рассмотрен вопрос разработки пространственно-инвариантных объективов и приведен расчет конструктивных параметров для объектива, состоящего из склеенных линз. Этот расчет использован для определения конструктивных параметров объектива инвариантного коллиматора для ветви устройства, работающей в видимом диапазоне. Для ветви устройства, работающей в ИК-диапазоне, достаточно использовать однолинзовый положительный мениск, изготовленный из германия. Поскольку объективы обоих инвариантных коллиматоров были рассчитаны в виде положительных менисков в соответствии с рисунком 3.12, что позволит без дополнительных конструктивных решений установить в их главные точки тест-объекты.

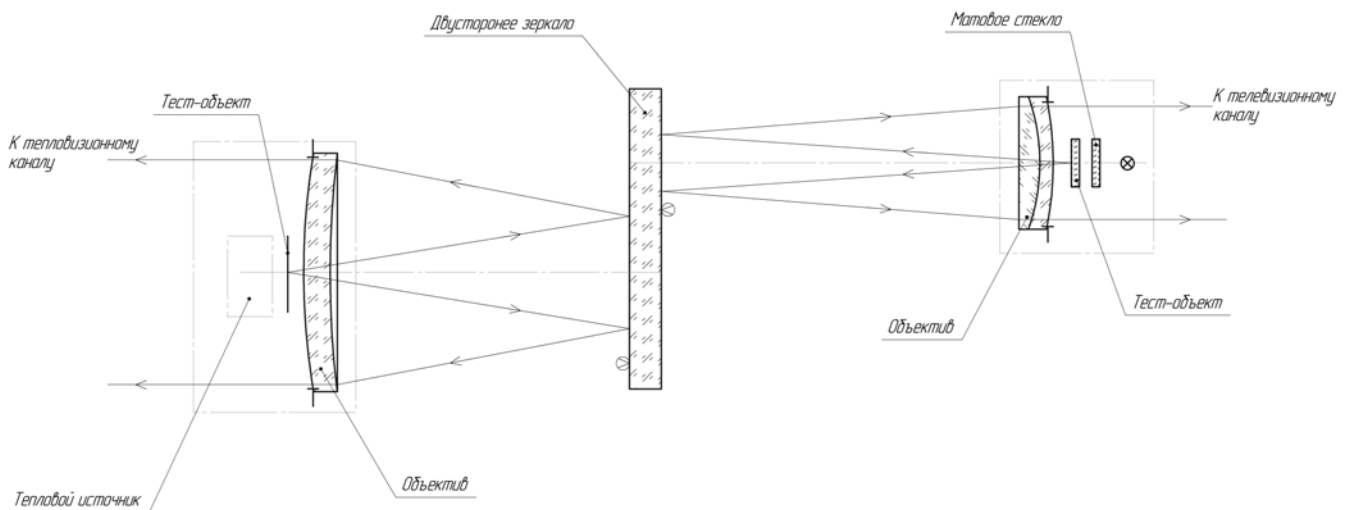


Рисунок 3.12 – Принципиальная схема устройства проверки согласования телевизионного и тепловизионного каналов

Допуск на непараллельность отражающих поверхностей двустороннего зеркала, равный 5", был определен из общего бюджета ошибок, в который кроме зеркала вносили свой вклад ошибка юстировки тест-объекта тепловизионного коллиматора, принятая равной 10", и ошибка юстировки тест-объекта телевизионного коллиматора, принятая равной 5". Для юстировки тест-объектов обоих коллиматоров по методике, изложенной в п.2.2.2. настоящей диссертационной работы, в конструкции предусмотрена возможность вращения объективов вокруг своих оптических осей. Оценка отступления от инвариантности будет производиться с использованием проверяемых каналов ОЭП. Юстировка каждого из инвариантных коллиматоров будет заключаться в поперечном оптической оси перемещении тест-объекта до тех пор, пока будет регистрироваться смещение изображения тест-объекта при вращении объектива инвариантного коллиматора, наблюдаемое посредством соответствующего канала технического зрения ОЭП. Перемещение тест-объекта необходимо производить по прямой, в которой происходит смещение его изображения, в направлении минимизации этого смещения. Если канал технического зрения ОЭП имеет возможность измерения в угловой мере максимального смещения изображения тест-объекта, приведенного к пространству предметов, то величину перемещения тест-объекта при юстировке можно определить по формуле:

$$\Delta = f'_{кол} \cdot tg(\eta / 2) ,$$

где $f'_{кол}$ – фокусное расстояние юстируемого коллиматора, η – максимальное смещения изображения тест-объекта в угловой мере.

В случае, же если канал технического зрения ОЭП не имеет возможности измерения отклонений в угловой мере, то необходимо перемещать тест-объект, производя контроль перемещения по его изображению на видеоконтрольном устройстве канала. Критерием выполнения правильной юстировки является отсутствие перемещения изображения тест-объект при вращении объектива.

Оптическая схема и общий вид устройства проверки согласования каналов обзорно-прицельной станции ОПС-28 на основе инвариантных коллиматоров приведены в приложениях Д и Е.

3.4. Разработка устройства проверки согласования каналов многоспектрального оптико-электронного комплекса

В рамках выполнения диссертационной работы была предусмотрена разработка устройства проверки согласования телевизионного и тепловизионного каналов, расстояние между оптическими осями которых составляет 220 мм, а их зрачки разнесены так, что прямая, их соединяющая, параллельна горизонту.

В п.2.1. настоящей диссертационной работы было выполнено исследование схем построения устройств проверки согласования каналов с единым тест-объектом, и дана их классификация, на основании которой выбрана схема устройства со сферическим зеркалом и зеркальным ромбом. Она позволяет разработать устройство проверки согласования, которое будет работать в обоих спектральных диапазонах ОЭК и обеспечит согласование каналов с разнесенными зрачками. В качестве прототипа схемы коллиматора была взята схема известная из [6]. Ее преимуществом является то, что она построена с использованием плоского зеркала с отверстием, установленного вблизи фокальной плоскости коллиматора под углом 45° , как показано на рисунке 1.9.

Объектив коллиматора схемы-прототипа выполнен в виде параболического зеркала, что в данном случае следует отнести к недостаткам, так как:

- изготовление параболического зеркала технологически сложно;
- юстировка параболического зеркала требует точных поворотов и поперечного перемещения, для совмещения центра тест-объекта и оптической оси параболического зеркала;

– поле зрения параболического зеркала с высоким качеством волнового фронта ограничено единицами минут вследствие быстрорастущей комы и не зависит от положения входного зрачка [24].

Единственным положительным моментом использования параболической поверхности для зеркала коллиматора является отсутствие сферической аберрации, но в ходе исследований, проведенных в п.2.1, показано, что при соосном размещении выверяемых каналов и коллиматора сферическая аберрация не оказывает влияния на погрешность согласования каналов.

Таким образом в разрабатываемом коллиматоре в отличии от прототипа было использовано сферическое зеркало, что дало следующие преимущества:

- технологическую простоту изготовления сферического зеркала;
- юстировка сферического зеркала может осуществляться только поворотами или поперечным перемещением, что равнозначно для совмещения центра тест-объекта и оптической оси сферического зеркала;
- установка входного зрачка в центр кривизны сферического зеркала освобождает оптическую систему от комы и астигматизма [24];
- сферическая аберрация сферического зеркала при диафрагменном числе 7 и более не превышает дифракционного предела для оптических систем, работающих в видимом диапазоне [24].

Таким образом, при подборе необходимого соотношения относительного отверстия и положения входного зрачка сферическое зеркало имеет преимущество перед параболическим зеркалом. Так, исходя из изложенного, относительное отверстие коллиматора выбиралось по максимальному значению, которое определялось для тепловизионного канала, и было выбрано 1:4. Именно при таком относительном отверстии сферическая аберрация сферического зеркала равна дифракционному пределу для ИК-диапазона. Для телевизионного канала диафрагменное число определялось световым диаметром клинового компенсатора и равнялось 13,5, что больше чем 7, и соответственно сферическая аберрация меньше дифракционного предела для видимого диапазона.

Еще одним отличием от прототипа в разрабатываемой схеме являлось то, что в качестве УКП использована не ромб-призма БС-0, а ее зеркальный аналог. Преимущества зеркального ромба перед ромб-призмой БС-0 подробно описаны в п.2.5.5 настоящей работы.

В результате принятых по отношению к прототипу изменений получена принципиальная оптическая схема, приведенная на рисунке 3.13. Схема состоит из зеркального коллиматора, содержащего сферическое и плоское зеркала, тест-объект, молочные стекла и источник света, зеркального ромба, клинового компенсатора и защитного стекла. Тест-объект выполнен в виде двух скрещенных под углом 90° токопроводящих нитей, которые при прохождении через них электрического тока нагреваются и излучают в ИК-диапазоне. ИК-излучение от тест-объекта через коллиматор и защитное стекло попадают в тепловизионный канал ОЭК. Источник света выполнен в виде диода, квазимонохроматическое излучение которого не требует ахроматизации клиньев в клиновом компенсаторе. Источник света через молочные стекла формирует светлый фон, на котором непрозрачный тест-объект, наблюдаемый в телевизионном канале через коллиматор, зеркальный ромб и клиновой компенсатор, кажется черным. Защитное стекло выполнено из селенида цинка, который прозрачен в видимом и ИК-диапазоне. Это позволяет наблюдать тест-объект визуально в обоих ветвях устройства – для телевизионного канала и тепловизионного канала и производить его юстировку клиновым компенсатором до получения параллельности оптических осей обеих ветвей с помощью двух автоколлимационных труб и пластины (см. рисунок 2.5) по методике, изложенной в п.2.2.1. При юстировке базовый канал принимается тепловизионный, поскольку он не имеет юстировочных элементов, а телевизионный канал принимается за юстируемый.

Конструкция УКП в виде зеркального ромба при ее горизонтальном расположении равнозначна УКП с пентапризмами, как было показано в 2.5.2, и при ее кинематическом базировании необходимо учитывать только влияние изгиба основания УКП под действием силы тяжести. Это влияние можно минимизировать, решив дифференциальное уравнение изгиба балки и определив

места установки шарниров, для которых угол изгиба балки в точках установки отражающих элементов равен нулю, что соответствует нулевому наклону отражающих элементов. В рамках настоящей работы эта задача была решена численно и ее результат показан на рисунке 3.14.

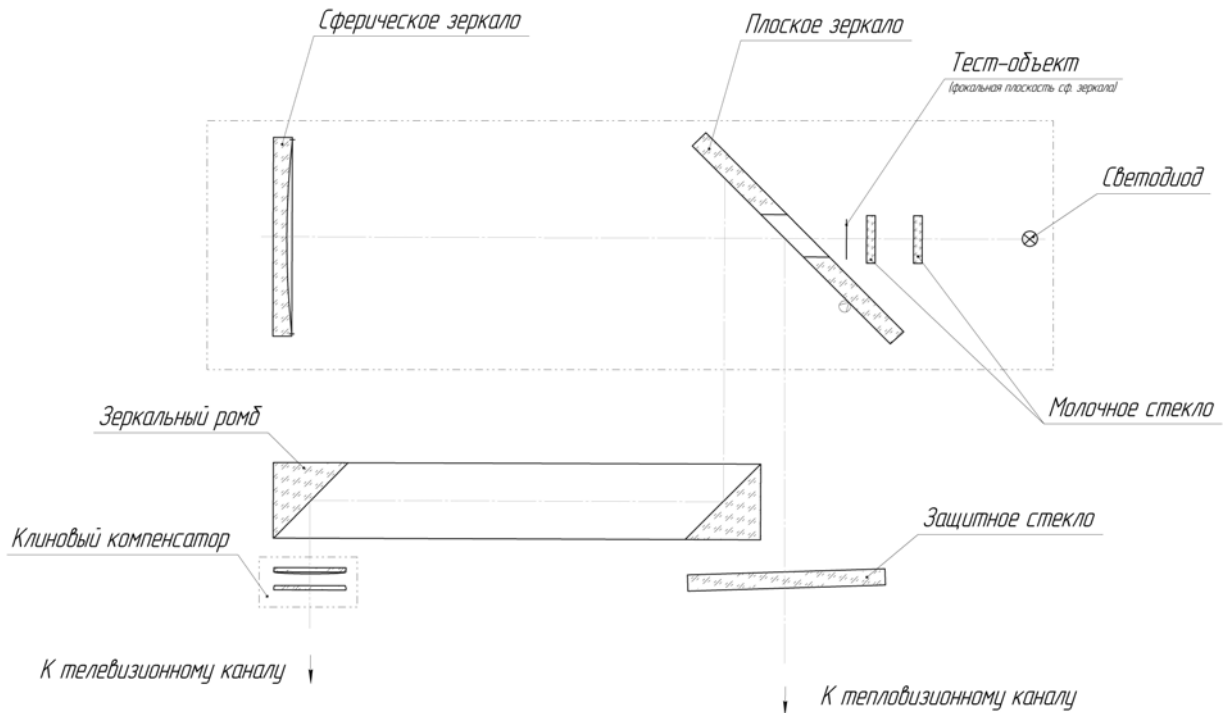


Рисунок 3.13 – Принципиальная схема коллиматора проверки согласования телевизионного и тепловизионного каналов

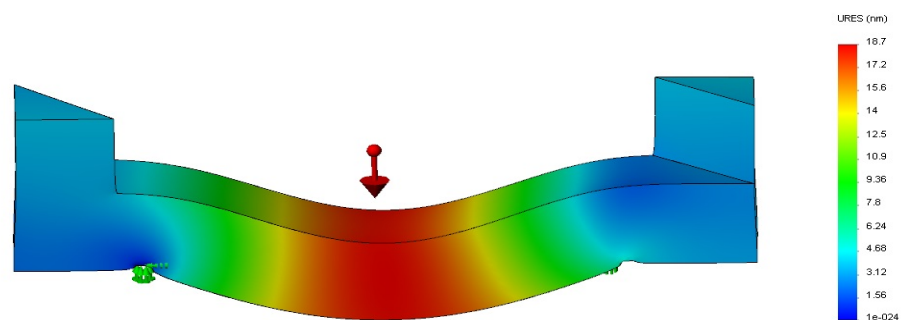


Рисунок 3.14 – Результат численного решения дифференциального уравнения изгиба основания зеркального ромба

Материал для УКП выбирался из условия его наилучшей стабильности и возможности получения поверхности оптического качества. Наилучшие показатели из доступных материалов у плавленного кварца и ситалла [9, 18]. Для опытного образца был выбран плавленный кварц.

В результате был разработан коллиматор проверки согласования телевизионного и тепловизионного каналов, показанный на рисунке 3.15.

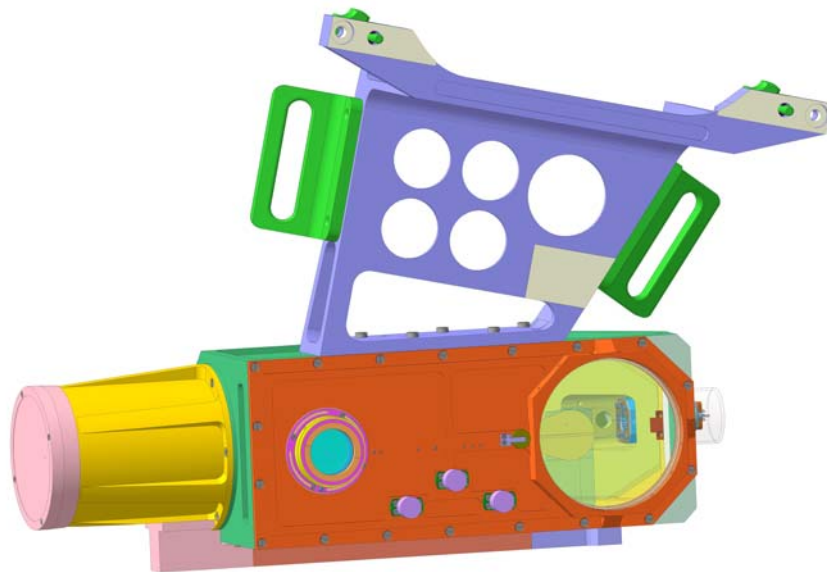


Рисунок 3.15 – Модель коллиматор проверки согласования телевизионного и тепловизионного каналов

Оптическая схема и сборочный чертеж на коллиматор приведены в Приложении Ж и Приложении И. На данную разработку была подана заявка и получен патент на полезную модель [66].

Выводы по главе 3

1. Разработано автоколлимационное углоизмерительное устройства с двумя полями зрения и методика его юстировки, позволяющая компенсировать увод оптической оси, возникающий при смене оптических компонентов, за счет перемещения отсчетной сетки. Получен патент на изобретение [63].

2. Разработано устройство коллинеарного переноса на основе призмы бкр-180° и методики его юстировки, позволяющая за счет введения дополнительного клина, перекрывающего только половину зрачка устройства устранять двоение изображения, возникающее вследствие ошибки изготовления угла крыши призмы. Получен патент на изобретение [64].

3. Разработано устройство проверки согласования каналов многоспектрального оптико-электронного комплекса на основе инвариантных коллиматоров и методики его юстировки, позволяющая выполнить юстировку с использованием проверяемых каналов.

4. На основе заключений, сделанных в п. 2.1, 2.2.1 и 2.5.2 разработано устройство проверки согласования каналов многоспектрального оптико-электронного комплекса и методики его юстировки. Получен патент на полезную модель [66].

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВ ПРОВЕРКИ СОГЛАСОВАНИЯ КАНАЛОВ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Автоколлимационная труба с двумя угловыми полями

В соответствии с оптической схемой и сборочным чертежом, приведенными в Приложении А и Б, была изготовлена зрительная автоколлимационная труба с двумя полями зрения, внешний вид которой показан на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1– Автоколлимационная труба с двумя полями зрения

В результате первоначальной сборки и первичного контроля увод оптической оси при переключении полей зрения составлял 35". Причина увода – линзовый блок, в который входят линзы 4,5, 6 и 7 (см. оптическую схему Приложение А) и отвечающий за смену полей зрения, при переключении не вставал строго на оптическую ось объектива из-за технологических допусков на

изготовление деталей фиксатора и подшипникового узла поворота блока. В соответствии с методикой, разработанной в п. 3.1 и формулой (2.40) отсчетная сетка была перемещена при помощи юстировочных винтов на 0,15 мм. По результатам вторичного контроля увод оптической оси составил половину отсчетного деления – 2,5". Очевидная причина того, что увод не был устранен полностью заключается в том, что юстировочных винты не снабжены отсчетными шкалами и перемещение производилось ориентировочно на 1/3 оборота (шаг юстировочного винта составляет 0,5 мм). Дальнейшее уменьшение увода не производилось в связи с тем, что осуществить поворот юстировочного винта на 1/46 оборота для устранения увода в 2,5" в существующей конструкции практически сложно, а полученный увод соответствовал техническим требованиям, предъявляемым к данной зрительной АКТ. Автоколлимационная труба была передана в опытную эксплуатацию для использования в контрольно-юстировочных работах.

4.2. Призменный блок выверки

В соответствии с техническим описанием, приведенным в п. 3.2, оптической схемой и сборочным чертежом, приведенными в Приложении В и Г, была изготовлена призма выверки. При изготовлении узла призмы выверки была использована призма БкР-180 (см. поз.10, Приложение В) с отступлением угла крыши от номинального значения равным 3". Это приводило к двоению изображения равному 12,6". Одновременно были изготовлены клинья (см. поз.2-5 и 6-9, Приложение В), углы отклонения лучей, у которых соответствовали 2,5", 5", 7,5" и 10". Путем установки клина с углом отклонения лучей равным 10" двоение изображения было уменьшено до 2,6". Поскольку получившееся двоение изображения соответствовало техническим требованиям, предъявляемым к узлу призмы выверки его дальнейшее уменьшение не производилось. Но как показал эксперимент, при изготовлении клина с углом отклонения равным углу двоения, последние можно получить равным нулю.

Дополнительно была изготовлена еще одна прима выверки, которая вместе с первой вошли в состав призмного блока выверки, показанного на рисунке 4.2, который был использован в качестве устройства выверки каналов обзорно-прицельной станции ОПС-28, как показано на рисунке 4.3.

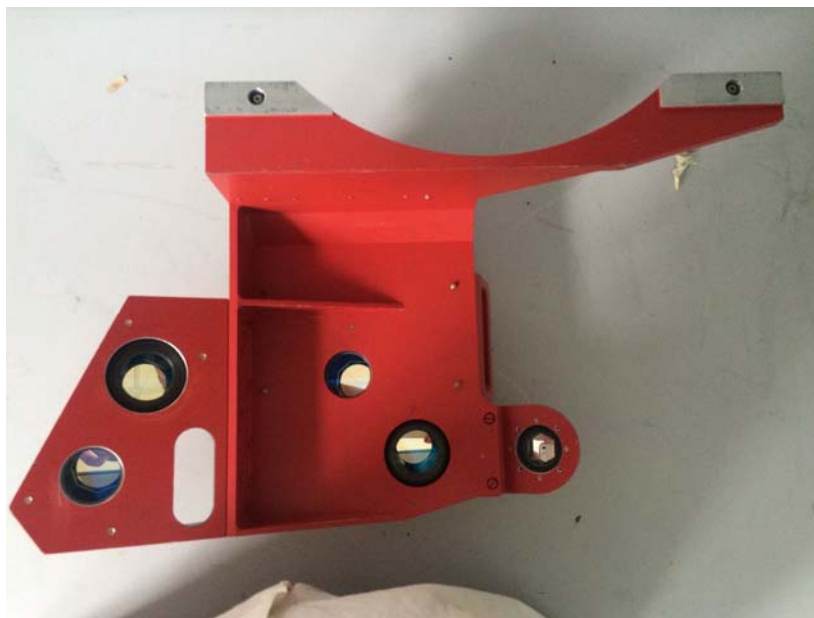


Рисунок 4.2– Призмный блок



Рисунок 4.3– Призмный блок установленный на ОПС-28

Призмный блок совместно с ОПС-28 работает следующим образом: излучение от встроенного в ОПС-28 коллиматора попадает во входное окно призмы выверки, проходит через нее и выходит в выходном окне, которое конструктивно расположено соосно с выверяемым каналом, далее происходит проверка канала, а поскольку каналов несколько и их расположение различно предусмотрена вторая призма выверки, которая связывает расположение коллиматора и второго проверяемого канала.

4.3. Устройство проверки согласования каналов телевизионного и тепловизионного каналов

В соответствии с оптической схемой и общим видом, приведенными в Приложении Д и Е, была изготовлена установка коллиматорная, внешний вид которой показан на рисунке 4.4, а описание приведено в п. 3.3.



Рисунок 4.4– Установка коллиматорная

Поскольку на практике коллиматорная установка применяется для проверки согласования тепловизионного и телевизионного каналов ОПС-28, не являющихся угломерами, то юстировка коллиматорной установки проводилась по второй части методики, изложенной в п. 3.3, а именно: по уменьшению наблюдаемого смещения изображения тест-объекта при вращении объектива коллиматора. При неизменном положении коллиматорной установки, помещенной в корпус ОПС-28, поочередно с помощью видеоконтрольного устройства наблюдалось телевизионное (см. рисунок 4.5) и тепловизионное (см. рисунок 4.6) изображения тест-объектов. Объективы обоих коллиматоров вращались, и производилась юстировка тест-объектов.



Рисунок 4.5 – Телевизионное изображение тест-объекта

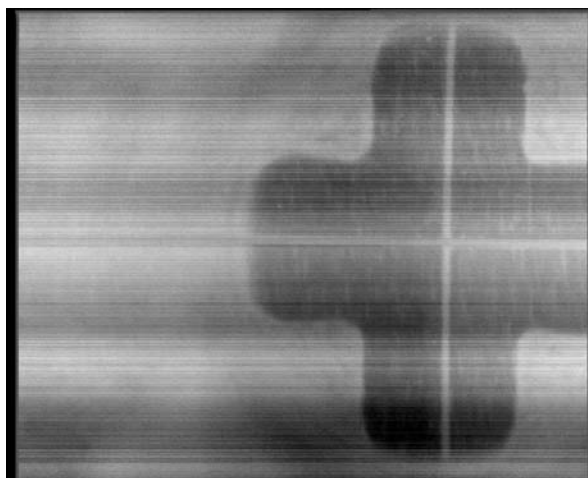


Рисунок 4.6 – Тепловизионное изображение тест-объекта

В результате описанных действий удалось добиться устранения отступления от инвариантности для обоих коллиматоров, которое можно было оценить как смещение изображения тест-объектов при вращении объективов в одну телевизионную строку на видеоконтрольном устройстве. Далее коллиматорная установка в составе ОПС-28 была передана на проверку виброустойчивости тепловизионного и телевизионного каналов. Результаты проверки, выполненные на вибрационном стенде, показали что на определенных частотах изображение тест-объектов в тепловизионном и телевизионном канале колебались, но частота, начальная фаза и амплитуда совпадали, что говорит о том, что эти колебания связаны не с виброустойчивостью контролируемых каналов, а с жесткостью закрепления зеркала относительно корпуса ОПС-28.

4.4. Коллиматор согласования каналов многоспектрального оптико-электронного комплекса

Коллиматор согласования каналов (см. рисунок 4.7), описанный в п. 3.4, был изготовлен в соответствии с оптической схемой и сборочным чертежом, приведенными в Приложении Ж и И.

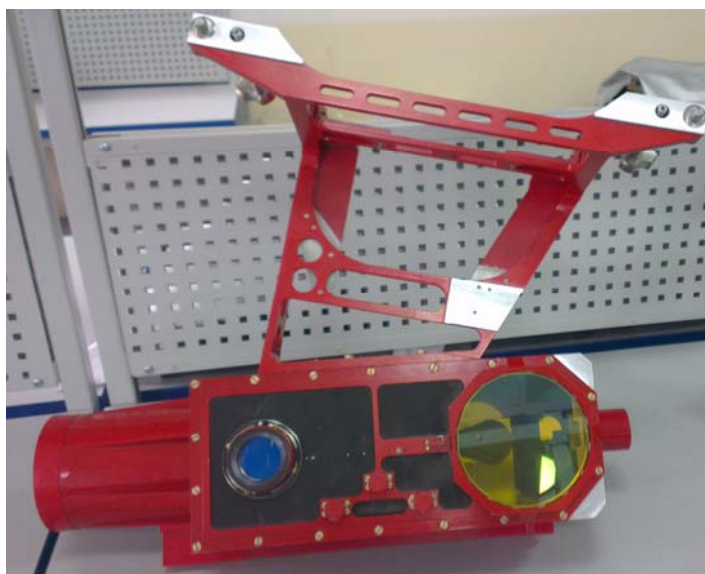


Рисунок 4.7 – Коллиматор согласования каналов

Результаты автономных климатических и механических испытаний на соответствие коллиматора группе 1.10 по ГОСТ РВ 20.39.304-98 [68] показали, что изменение параллельности выходящих пучков для телевизионного и тепловизионного каналов составило не более 2". Высокая стабильность параллельности выходящих пучков свидетельствует о правильности технических решений, заложенных при разработке в п.3.4. После испытаний коллиматор согласования был установлен на ОПС-28, как показано на рисунке 4.8, и передан для совместных предварительных испытаний.

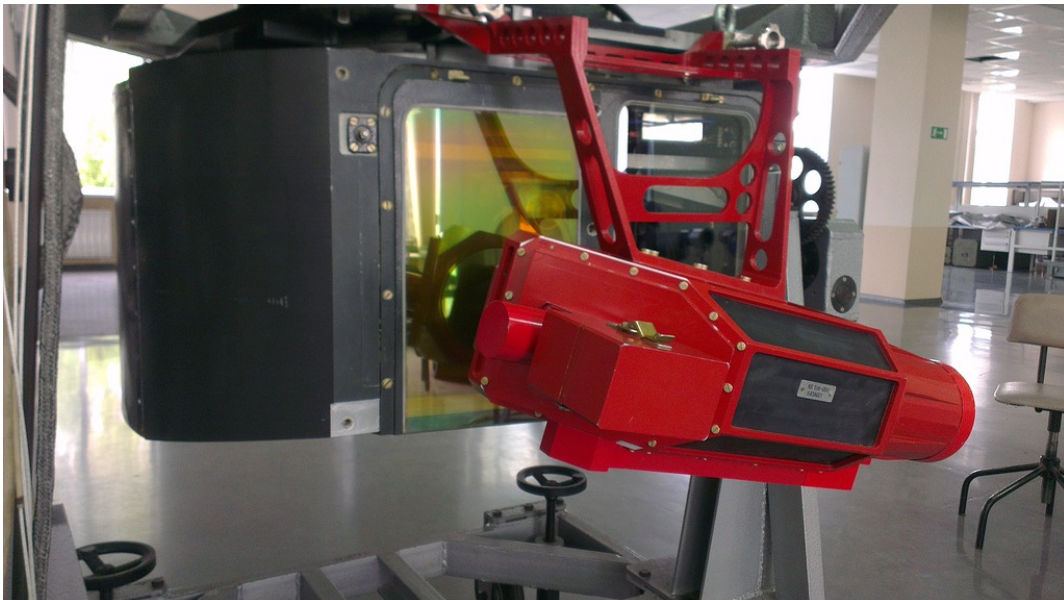


Рисунок 4.8 – Коллиматор согласования каналов с ОПС-28

Выводы по главе 4

1. Выполнена практическая реализация – изготовлена автоколлимационная труба с двумя полями зрения. Проведена экспериментальная проверка методики юстировки тест-объекта. Полученный результат – уменьшение увода оптической оси, что подтверждает теоретические заключения.

2. Выполнена практическая реализация – изготовлена призма выверки. Проведена экспериментальная проверка методики уменьшения двоения

изображения за счет введения дополнительного клина. Результат – уменьшение двоения изображения, что подтверждает теоретические заключения.

3. Выполнена практическая реализация – изготовлена коллиматорная установка. Проведена экспериментальная проверка методики юстировки инвариантного коллиматора с использованием проверяемого канала ОЭК. Результат – отступление от инвариантности устранено, что подтверждает теоретические заключения.

4. Выполнена практическая реализация – изготовлен коллиматор согласования каналов. Проведены автономные климатические и механические испытания. Результат – высокая стабильность параллельности выходящих пучков, что подтверждает теоретические заключения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К основным **итогам** диссертационного исследования следует отнести:

- на основе аналитического обзора существующих устройств проверки согласования каналов оптико-электронных многоспектральных комплексов установлены перспективные направления их усовершенствования за счет рационального построения, минимизации и компенсации погрешностей;
- построены математические модели погрешностей устройств проверки согласования каналов многоспектральных ОЭК;
- предложены методики юстировки устройств проверки согласования каналов многоспектральных оптико-электронных комплексов;
- проведена апробация предлагаемых математических моделей и методик юстировки на примере устройств проверки согласования обзорно-прицельной станции ОПС-28.

Получены следующие **основные результаты**, позволившие обеспечить выполнение требований к эффективности, надежности и качеству создаваемых устройств проверки согласования каналов многоспектральных ОЭК:

- установлена взаимосвязь конструктивных параметров устройств и погрешности проверки согласования каналов многоспектральных ОЭК, позволяющая определить их численные значения;
- разработаны методики юстировки устройств проверки согласования каналов, позволяющие уменьшить погрешности, возникающие вследствие технологических отклонений при их изготовлении;
- сформулированы **рекомендации**, позволяющие определить рациональную схему при проектировании новых устройств проверки согласования.

Суть рекомендаций заключается в том, что:

- при соосном расположении проверяемых каналов и устройства проверки на погрешность согласования не влияют расфокусировка и

абберационные характеристики оптических схем, что позволяет спроектировать устройство с минимальным количеством элементов;

– устройство коллинеарного переноса на основе зеркального ромба при изгибе его основания в плоскости, ортогональной плоскости главного сечения и проходящей через ось между отражательными элементами, имеет такую же погрешность что и устройство коллинеарного переноса на основе пентапризм, но гораздо меньшую погрешность вследствие погрешности изготовления отражающих поверхностей.

Перспективы дальнейшего развития темы диссертации и соответствующих исследований состоят в совершенствовании методов учета и компенсации величин рассогласований каналов ОЭК

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин Б.С., Бондаренко А.В., Волков В.Г., Драб Э.С., Цибульский Л.М. Оптические приборы наблюдения, обработки и распознавания объектов в сложных условиях. М.: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 1999. 140 с.
2. Аникст Д. А., Голубовский О. М., Петрова Г. В. и др. Оптические системы геодезических приборов // М.: Недра, 1981. 345 с.
3. Афанасьев В.А., Жилкин А.М., Усов В.С. Автоколлимационные приборы. М.: Недра, 1982. 147 с.
4. Бардин А. Н. Сборка и юстировка оптических приборов. М.: Высшая школа, 1968. – 328 с.
5. Белозёров А.Ф. Оптика России. Очерки истории и развития. - Казань : Центр инновационных технологий. Т. 1, 2012. – 604 с.
6. Бугаенко А.Г., Никитин Ю.П., Пантелеев Н.Л. Коллиматоры для проверки тепловизионных прицелов // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 2. С. 32–36.
7. Бурбаев А. М., Леонтьева А. И., Одиноких Г. А., Френкель Д. А. Применение инвариантных оптических систем в схемах контроля и юстировки ОЭП, изв. ВУЗов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 11.
8. Бурмистров В. Б., Садовников М. А., Соколов А. Л., Шаргородский В. Д., Кольцевая ретрорефлекторная система из уголковых отражателей со специальным покрытием/ Квант. электрон., 43:9 (2013), 800–806.
9. Гаврюсев В. И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций. Л.: ЦНИИ «Румб», 1990. 113 с.
10. Гебгарт, А.Я. Нерасстраиваемые оптические системы угломеров с неподвижной линией визирования/ А.Я. Гебгарт, М.П. Колосов // Оптический журнал. – 2010. –Т. 77, № 10. – С. 48-53.
11. Грейм И.А. Зеркально-призменные системы. М.: Машиностроение, 1981.–125 с.

12. Гришин Б. С. Юстировка сложных оптических приборов. М.: Машиностроение, 1976. – 205 с.
13. Дубиновский А.М. Стендовые испытания и регулировка оптико-электронных приборов. Ленинград: Издательство «Машиностроение». Ленинградское отделение, 1986.
14. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. Учебник для вузов. — М.: Логос, 2000. — 584 с.: ил.
15. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. М.: Машиностроение, 1985. 124 с.
16. Кожевников Ю.Г. Оптические призмы. Проектирование, исследование, расчет. М.: Машиностроение, 1984. 152 с.
17. Колосов М.П. Оптика адаптивных угломеров. М.: ООО «СКАН-1». 1997. 212 с.
18. Колосов М.П. О стабильности характеристик оптических элементов угломерных приборов // ОМП. 1992. № 4. С.21–23.
19. Колосов М.П., Гебгарт А.Я., Карелин А.Ю. О роли положения зрачков в нерасстраиваемых оптических системах угломеров с каналом геометрического эталона // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 2. С. 48–53
20. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
21. Кравцов В. Угловые отражатели / В.Кравцов, И.Сербин // Квант : журнал. - 1978. - № 12. - С. 7-9.
22. Лаптев Е.В. Разработка многоспектральной оптической системы с двумя зеркалами Манжена / ГЕО-Сибирь 2011. Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, нанотехнологии. Ч. 1 :сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011», 19-29 апреля 2011 г., Новосибирск. - Новосибирск: СГГА, 2011. - с. 171-176.
23. Латыев С. М. Компенсация погрешностей в оптических приборах. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 248 с.
24. Максудов Д. Д. Астрономическая оптика.– 2-е изд.– Л.: Наука, 1979

25. Малышев В. И., Масалов А. В., Миланич А. И. Распределение энергии неодимового лазера по модам, Квант. электрон., 2:9 (1975), 1963–1968.
26. Мальцев М.Д., Расчет допусков на оптические детали. - Москва : Машиностроение, 1974. - 169 с.
27. Медведев А.В. Практические достижения в технике ночного видения: монография / А.В. Медведев, А.В. Гринкевич, С.Н. Князева. - Ростов-Великий: Рост.оптико-механический завод, 2009. – 944 с
28. Медведев А.В. Практические достижения в оптико-электронной технике. Ч.2. / А.В. Медведев, А.В. Гринкевич, С.Н. Князева. - Ростов Великий, 2010. – 735 с.
29. Можаров Г.А. Основы геометрической оптики: Учеб. пособие. - М.: «Университетская книга», «Логос», 2006. - 280 с.
30. Оптико-электронные системы и лазерная техника - Энциклопедия XXI век. Оружие и технологии России. Том 11. Под общей редакцией МО РФ С.Иванова // М.: Издательский дом «Технологии и оружие», 2005, 720с.
31. Парвулюсов Ю.Б., Родионов С.А., Солдатов В.П., Шехонин А.А., Якушенков Ю.Г. Проектирование оптико-электронных приборов / Учебник для вузов 2-е изд. - Москва: Логос, 2000. - 488 с.
32. Плотников В.С. Геодезические приборы: Учебник для вузов. - М.: Недра, 1987. - 396 с.
33. Погарев Г.В., Киселев Н.Г. Оптические юстировочные задачи. Л.: Машиностроение, 1989.
34. Руководство по астрономо-геодезическим работам при топогеодезическом обеспечении войск. М.: Редакционно-издательский отдел ВТС, 1980. Ч. 1. 424 с.
35. Сакин И.Л. Выверитель параллельности осей оптических систем. ОМП, 1960, N 12, с. 26.
36. Сивцов Г.П. Пространственные оптические системы. Новосибирск: СГГА, 2011. 331 с.

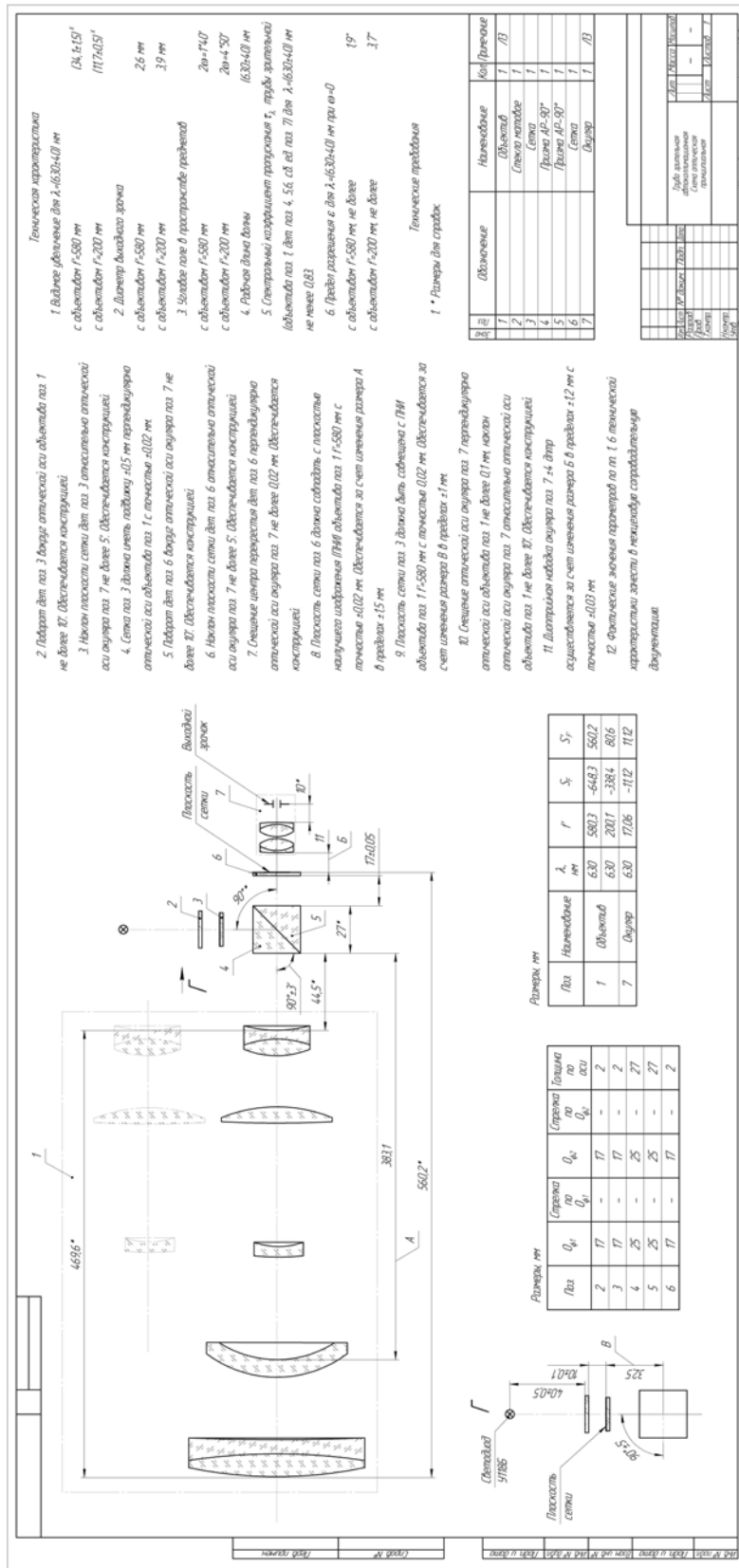
37. Склярлов С.Н. Устройства проверки согласования оптических осей каналов оптико-электронных комплексов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 9. С.741-749
38. Склярлов С.Н. Инвариантные коллиматоры для согласования каналов оптико-электронных комплексов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 5. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С.138–146
39. Смирнова Е.В., Латыев С.М. Изучение погрешностей совмещения марок при поперечных наводках // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2009. № 06(64). С. 9-13.
40. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989.-221 с.
41. Сухопаров С.А. На службе оптическому приборостроению. – СПб.: СПбГУ ИТМО, Серия книг «Выдающиеся ученые Университета ИТМО» Вып. 14. 2008. – 218 с.
42. Сухопаров С.А. Пространственно-инвариантные схемы оптических приборов/Изв. Вузов "Приборостроение", 1982 г., №11, с. 58-66.
43. Сухопаров С.А., Горлушкина Н.Н., Тимощук И.Н. Проектирование и расчет пространственно-инвариантных объективов. // ОМП.1991. № 1. С.40–43.
44. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. - М.: Логос, 2007. - 192 с.
45. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
46. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Современное состояние и перспективы развития зарубежных тепловизионных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. -2013. - № 3 (79). - С. 1-13.
47. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Современные проблемы инфракрасной техники. - М.: Изд. МИИГАиК, 2011. – 84 с.

48. Ушаков О. К. Теория юстировки: учеб. пособие для вузов. Новосибирск: СГГА, 2009. – 164с
49. Ханох Б.Ю. Оптические отражатели тетраэдрического типа в активных системах / Минск : Изд-во БГУ, 1982. - 160 с.
50. Якушенков Ю.Г. Тенденции развития малогабаритных инфракрасных систем 3-го поколения, работающих активно-пассивным методом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2012. - № 3 (79). - С. 11–14.
51. Авторское свидетельство 957147 А1, СССР, МКП G02В 27/10. Устройство для коллинеарного переноса оптических осей/ Мейтин В.А.– Оpubл. 07.09.1982.
52. Авторское свидетельство 1704122 А1, СССР, МКПG02В 5/122. Уголковый отражатель. Процко С.В., Титов А.Д.– Оpubл. 07.01.1992.
53. Заявка на изобретение 2010107645А, РФ, МКПG02В 27/08. Двухспектральный объектив. Медведев А.В., Гринкевич А.В., Князева С.Н.– Оpubл. 10.09.2011.
54. Патент 2063059 С1, РФ, МКП G02В 27/10. Устройство для коллинеарного переноса оптических осей/ Мейтин В.А., Ражев С.И.–Оpubл.27.06.1996.
55. Патент 2112256 С1, РФ, МКП G02В 15/02. Объектив с дискретным изменением фокусного расстояния. Михеева Г.А.– Оpubл.27.05.1998
56. Патент 2191971, С2, РФ, МКПF41G 7/00. Прицел-прибор наведения с излучающими каналами и способ выверки параллельности оптических осей. Шипунов А.Г., Погорельский С.Л., Савченко Д.И., Якунин О.Г., Амосов Н.В., Тельшев В.А.– Оpubл. 27.10.2002.
57. Патент 2249786 С2, РФ, МКП G02В 11/27. Устройство для проверки параллельности осей/ Радкевич Л.П., Богданов В.Ф., Гусева Т.П., Ибаев И.С.– Оpubл. 10.04.2005
58. Патент 2280881С1, РФ, МКП G02В 5/04. Призмный узел с компенсатором/ Даниш В.Д., Щеглов С.И.– Оpubл. 27.06.2006.

59. Патент 2314491С2, РФ, МКП G01В 11/26. Устройство для контроля непараллельности тепловизионного и визуального каналов комбинированных прицелов. Голубев В.А., Горбачевская О.Р., Поконечный З.И., Тареев А.М., Топленикова Т.В.– Оpubл. 10.01.2008.
60. Патент 2443988 С2, РФ, МКП G0М 11/00. Способ выверки параллельности визирных осей мультиспектральных комплексов. Броун Ф.М., Волков Р.И., Филатов М.И.– Оpubл. 27.02.2012
61. Патент 2464601 С1, РФ, МКПG02В 23/02. Прицел-прибор наведения с лазерным дальномером. Литвяков С.Б., Тареев А.М., Батюшков В.В., Покрышкин В.И., Синаторов М.П., Шандора В.В., Мышалов П.И.–Оpubл. 02.06.2011.
62. Патент 2489744 С9, РФ, МКП G02В 27/30. Коллиматор. Федченко Г.И., Щеглов С.И.–Оpubл. 10.08.2013г.
63. Патент 2491586С9, РФ, МКП G02В 27/30. Автоколлимационное углоизмерительное устройство. Склярлов С.Н., Семенов О.Б., Щеглов С.И.– Оpubл. 27.08.2013, БИН№31.
64. Патент 2555218С1, РФ, МКП G01В 11/27. Устройство для контроля параллельности оптических осей. Склярлов С.Н.–Оpubл.10.07.2015, БИН№19.
65. Полезная модель 84141U1, РФ, МКПG02В5/122. Уголковый отражатель. Соколов А.В., Васильев А.П., Садовников М.А., Шаргородский В.Д.– Оpubл. 27.01.2009.
66. Полезная модель RU164129U1, РФ, МКП G01В 11/27. Устройство для контроля параллельности оптических осей. Склярлов С.Н., Савелова Е.М.– Оpubл. 20.08.16, БИН№23.
67. КЮА для проверки и контроля приборов, объективов - видимой области спектра [Электронный ресурс]. – Новосибирск (URL:<http://npzoptics.ru/kua-visual-spectr/>) (дата обращения 15.07.2016)
68. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного

- назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. – М.: Госстандарт России, 1998. – 55 с.
69. Daniels A., Adel M.E., Cabib D., Lavi M., Robert A. Buckwald R.A. Boresighting of laser range finder or designator systems with and without laser/FLIR synchronization. – SPIE Proc., V. 1341 Infrared Technology XVI, 127 (November 1, 1990).
 70. Godfrey T.E., Clark W.M. Boresighting Of Airborne Laser Designator Systems. – SPIE Proc., V. 0251, Optical Alignment I, 78 (December 31, 1980).
 71. Morrison R., Stack R., Athale R. et al. An alternative approach to infrared optics. - SPIE Proc., V. 7660 (2010), P. 76601Y-1...11
 72. Snyder M.P., Visgaitis J.N. Optical design study for the 1-5 m spectral band. - SPIE Proc., V. 7298 (2009), P. 729810-1...12
 73. U.S. Patent 4422758A. Thomas E. Godfrey, Lovere A. Moesser. Boresighting of airborne laser designation systems. Dec. 07. 1983.
 74. U.S. Patent 5047638 A. Jeffery A. Cameron, Deborah L. Fraley, Passive boresighting system. Sept 10. 91.
 75. U.S. Patent 5054917 A. Christian Pepin, Vincent Vilbois, Marc Audion. Automatic boresighting device for an optronic system. Oct. 8. 91.
 76. U.S. Patent US5251003 B. Jean-Francois Vigouroux, Jean-Marc Rouchon, Jean-Louis Ricci, Marc Wally. Device for monitoring of alignment of two optical paths and laser designation system equipped with such a monitoring device. Oct. 05. 1993.
 77. U.S. Patent 6211951 B1. Steve Guch, Jr. Boresight alignment method. Apr. 03. 2001.
 78. U.S. Patent 6307623 B1. Michel Papuchon, Denis Rabault, Martin Defour, Jean-Paul Pocholle. Device for harmonizing a laser emission path with a passive observation path. Oct. 23. 2001.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Оптическая схема АКТ с двумя угловыми полями



Размеры мм

Паз	Наименование	λ, мм	f, мм	S _p	S _r
1	Объектив	630	580,3 - 648,3	560,2	
7	Окуляр	630	200,1 - 338,4	206	
		630	17,06	-11,2	11,2

Размеры мм

Паз	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀	Q ₁₁	Q ₁₂
2	17	-	17	-	17	-	17	-	17	-	17	-
3	17	-	17	-	17	-	17	-	17	-	17	-
4	25	-	25	-	25	-	25	-	25	-	25	-
5	25	-	25	-	25	-	25	-	25	-	25	-
6	17	-	17	-	17	-	17	-	17	-	17	-

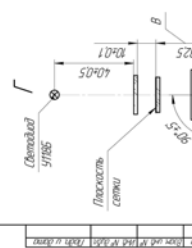


Таблица с техническими характеристиками и требованиями к материалам.

Материал	Требования	Класс	Группа
Линзы	Линзы оптические	Л	Л
Объективы	Объективы оптические	О	О
Окуляры	Окуляры оптические	О	О
Сетки	Сетки оптические	С	С
Протурки	Протурки оптические	П	П
Трубы	Трубы оптические	Т	Т
Валы	Валы оптические	В	В
Детали	Детали оптические	Д	Д

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Общий вид установки коллиматорной

