

На правах рукописи
УДК 681.785.64

ПISKУНОВ ТАРАС СЕРГЕЕВИЧ

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО РАССОГЛАСОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ
ОСЕЙ ПРИЁМНОГО И ПЕРЕДАЮЩЕГО КАНАЛОВ ВЫСОКОТОЧНЫХ
ЛАЗЕРНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 05.11.07

«Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

Автореферат диссертации на соискание
учёной степени кандидата технических наук



Москва — 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: Барышников Николай Васильевич
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Бажанов Юрий Вадимович
доктор технических наук, профессор, ведущий
научный сотрудник АО «Научно-
производственная корпорация «Системы
прецизионного приборостроения», г. Москва

Филонов Александр Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой прикладной оптики ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет
геодезии и картографии», г. Москва

Ведущая организация: АО «Лыткаринский завод оптического стекла»,
г. Лыткарино, Московская область

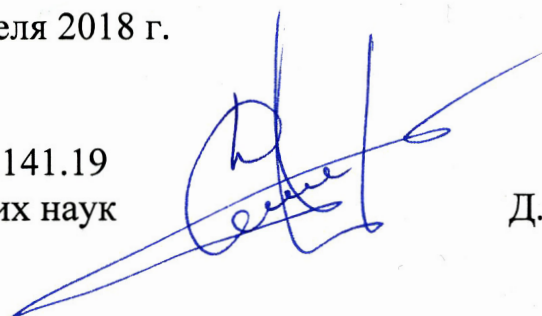
Защита диссертации состоится «23» мая 2018 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «__» апреля 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.141.19
кандидат физико-математических наук



Д.А. Семеренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время продолжается активное развитие систем лазерного зондирования пространства. К ним относятся такие лазерные оптико-электронные системы (ЛОЭС), как лазерные локационные станции (ЛЛС), лидары и дальномеры.

Перед современными ЛОЭС стоит задача дистанционного мониторинга объектов на значительных расстояниях. При этом угловые положения оптических осей приёмного и передающего каналов ЛОЭС могут изменяться случайным образом, вследствие механических вибраций конструкции. В этих условиях погрешность наведения системы на объект исследования не должна превышать единицы угловых секунд. Такая погрешность должна обеспечиваться согласованием угловых положений оптических осей каналов с помощью системы автоматической юстировки.

Механизм работы системы автоматической юстировки можно описать следующим образом. В системах с инфракрасным рабочим лазером, мощностью более нескольких КВт, используется дополнительный опорный лазер видимого диапазона, положение оси пучка излучения которого жёстко связано с оптической осью передающего канала. Пучок излучения опорного лазера параллельно смещается с помощью инвариантной оптической системы, например, уголкового отражателя, и попадает в оптическую систему приёмного канала. Под пространственной инвариантностью оптической системы понимается нечувствительность создаваемого ею изображения к изменению пространственного положения одного или нескольких оптических элементов этой системы. В приёмном канале установлен оптико-электронный блок, определяющий угловые координаты пучка излучения опорного лазера для вычисления углового рассогласования осей каналов ЛОЭС, которое компенсируется оптическими элементами приёмного или передающего каналов.

Конструкция современных высокоточных ЛОЭС в процессе работы подвергается воздействию внешних механических вибраций, которые чаще всего имеют характер гармонических колебаний. Расстояние между оптическими осями каналов системы составляет от 500 мм до 2000 мм. Практически невозможно создать уголкового отражателя таких габаритов, а системы с разнесёнными оптическими компонентами не будут обладать инвариантностью при вибрациях. Эти факторы усложняют задачу обеспечения системы автоматической юстировки информацией об относительном положении оптических осей приёмного и передающего каналов ЛОЭС.

Поэтому систему автоматической юстировки необходимо дополнить оптико-электронной системой определения углового рассогласования (СОР) оптических осей приёмного и передающего каналов. Эта система должна осуществлять параллельное смещение пучка излучения опорного лазера и определять угловые координаты смещённого пучка в системе координат, связанной с приёмным каналом. При этом вся система в целом должна обладать пространственной инвариантностью, а погрешность измерений не должна

превышать 1 угл.сек., поскольку от неё зависит точность работы ЛОЭС. Решение задач параллельного смещения и определения угловых координат единой системой позволяет преодолеть сложности, возникающие перед отдельными узлами системы автоматической юстировки.

Значительный вклад в исследование систем, обеспечивающих определение углового рассогласования оптических осей каналов ЛОЭС, внесли русские учёные, в том числе Мейтин В.А., Федосеев В.И., Колосов М.П., Барышников Н.В., Сухопаров С.А., Тимощук И.Н. Среди зарубежных учёных следует отметить Bleier Z., Lipkins M., Mallik P.C.V. Работы в данном направлении ведутся в НПО «Алмаз», Красногорском заводе им. С.А. Зверева, КБточмаш им. А.Э. Нудельмана, НПК «Системы прецизионного приборостроения», ОКБ «Гранат» им. В.К. Орлова и в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

К настоящему времени решены вопросы определения углового рассогласования осей каналов, расстояние между которыми не превышает 200 мм, с погрешностью, не превышающей единицы угловых секунд. Созданы ЛОЭС, в составе которых используются инвариантные оптические системы на основе уголкового отражателя и ромб-призм.

Остаётся нерешённой задача определения углового рассогласования в ЛОЭС с расстоянием между осями каналов от 500 мм до 2000 мм, подвергающейся воздействию температурных изменений и внешних механических вибраций. При создании инвариантных оптических систем таких габаритов также не решены проблемы экранирования оптических элементов от излучения рабочего лазера. Эти обстоятельства делают тему диссертации актуальной.

Целью работы является разработка метода для определения углового рассогласования оптических осей приёмного и передающего каналов ЛОЭС в условиях вынужденных гармонических колебаний конструкции и разработка устройства для его реализации.

Для достижения указанной цели в диссертации поставлены и решены следующие **задачи**:

- предложен критерий оптимальности оптической схемы блока параллельного смещения пучка лазерного излучения для СОР;

- разработана функциональная схема СОР на основе двух пар пентапризм, позволяющая осуществлять определение величины углового рассогласования оптических осей каналов в высокоточных ЛОЭС, работающих в условиях вынужденных гармонических колебаний конструкции с постоянным среднеквадратическим значением амплитуды;

- разработана математическая модель хода лучей в СОР на основе двух пар пентапризм, позволяющая обосновать пространственную инвариантность системы в условиях вынужденных гармонических колебаний конструкции с постоянным среднеквадратическим значением амплитуды;

- разработана методика теоретического анализа погрешности СОР, позволяющая определить требования к СОР для осуществления измерений с погрешностью, не превышающей 1 угл.сек.;

- подтверждена справедливость основных теоретических положений диссертации путём экспериментальных исследований опытного образца СОР на основе пентапризм.

Объектом исследования является лазерная оптико-электронная система, работающая в условиях вынужденных гармонических колебаний конструкции с постоянным среднеквадратическим значением амплитуды.

Предметом исследования является методика минимизации погрешности определения взаимного углового положения оптических осей каналов ЛОЭС.

Методы исследований. При решении поставленных задач использованы методы геометрической оптики, аналитической геометрии, теории вероятностей и математической статистики, теории оптических систем и цифровой обработки сигналов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- показана возможность обеспечения высокоточного согласования угловых положений оптических осей приёмного и передающего каналов ЛОЭС, расстояние между которыми превышает десятки сантиметров, в условиях вынужденных гармонических колебаний конструкции, за счёт решения задач параллельного смещения пучка излучения опорного лазера и определения его угловых координат с помощью единой системы (СОР);

- разработана методика точностного анализа СОР, основанная на математической модели хода лучей в СОР на основе двух пар пентапризм, позволяющая вычислить погрешность определения углового рассогласования оптических осей каналов ЛОЭС;

- предложена новая функциональная схема эталонного зеркально-призменного блока, являющегося юстируемым разнесённым в пространстве уголкового отражателем, позволяющая обеспечить экспериментальное измерение погрешности СОР с ошибкой, не превышающей 0,4 угл.сек.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- метод, основанный на решении задач параллельного смещения пучка излучения опорного лазера и определения его угловых координат с помощью единой системы (СОР) позволяет определять угловое рассогласование оптических осей приёмного и передающего каналов ЛОЭС в условиях вынужденных гармонических колебаний конструкции;

- математическая модель хода лучей в зеркально-призменном блоке СОР, учитывающая влияние вынужденных гармонических колебаний конструкции с постоянным среднеквадратическим значением амплитуды, позволяет вычислить погрешность определения углового рассогласования;

- методика юстировки эталонного зеркально-призменного блока СОР, основанная на контроле взаимного положения граней призм по отражённым

автоколлимационным бликам, позволяет обеспечить пространственную инвариантность оптической системы этого блока.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанный метод определения углового рассогласования оптических осей приёмного и передающего каналов ЛОЭС использован в НПО «Алмаз» для обеспечения точностных характеристик современных оптических систем.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Изложенные в работе теоретические и экспериментальные результаты согласуются между собой. Экспериментальные результаты получены на сертифицированном оборудовании. Предложенные модели и сделанные выводы имеют ясную физическую трактовку. Обоснованность результатов работы подтверждается публикациями в журналах, цитированием другими авторами и результатами обсуждения на конференциях, где докладывались результаты работы.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 8 международных научных конференциях, в том числе: «Современные телевидение и радиоэлектроника». Москва, 2012, 2013, 2014; «Лазеры в науке, технике, медицине». Москва, 2014; «Опτικο-электронные комплексы наземного и космического базирования». Москва, 2014; «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО». Москва, 2013, 2014, 2017.

Внедрение и использование результатов работы. Основные результаты диссертационной работы использованы в ОКР, выполняемой НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ПАО «НПО «Алмаз», получен акт о внедрении.

Публикации результатов. Основные результаты диссертационной работы изложены в 15 научных работах, в том числе, в 7 научных статьях общим объёмом 3,4 п.л., опубликованных в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав и общих выводов, изложенных на 154 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков и 9 таблиц, список литературы из 75 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость. Приведены структура диссертации, формы апробации и реализации результатов.

В первой главе проведён обзор существующих приборов параллельного смещения и определения углового рассогласования оптических осей каналов и показано, что для осуществления автоматической юстировки ЛОЭС необходимо найти новое технологическое решение, разработать систему, которая будет осуществлять измерения с заданной точностью. Предложен метод определения углового рассогласования оптических осей приёмного и передающего каналов ЛОЭС, заключающийся в решении задач параллельного смещения пучка

излучения опорного лазера и определения его угловых координат с помощью единой системы – СОР. Разработана функциональная схема высокоточной СОР, состоящая из двух блоков: зеркально-призменного блока и блока определения угловых координат оси пучка излучения опорного лазера.

Показано, что функциональная схема блока определения угловых координат должна выглядеть следующим образом: матричное фотоприёмное устройство (МФПУ), установленное в фокальной плоскости объектива. Эта известная схема позволяет определять угловые координаты пучка лазерного излучения с высокой точностью, а также определять координаты двух и более пучков одновременно.

В качестве блока определения угловых координат может использоваться сам приёмный канал ЛОЭС. В этом случае, пучок излучения опорного лазера и пучок излучения рабочего лазера, отражённый от объекта изучения, будут иметь одинаковый оптический путь и погрешности определения их угловых координат будут равны. Другими словами, погрешности определения угловых координат пучка излучения рабочего лазера, вносимые вибрациями конструкции объектива приёмного канала, будут автоматически учитываться СОР.

Введён критерий оптимальности оптической схемы зеркально-призменного блока, в который входят его основные характеристики. В первую очередь оптическая схема характеризуется геометрическими характеристиками – диаметр окон d , расстояние смещения a . Для обобщения габаритных характеристик вводится габаритный коэффициент $k_{\text{габ}}$ – отношение габаритов рассматриваемого блока к габаритам идеализированного блока, представляющего собой параллелепипед с минимально допустимыми размерами для осуществления параллельного смещения пучка заданного диаметра.

Введены коэффициенты перекрытия входного и выходного окон – $k_{\text{пер.вх.}}$ и $k_{\text{пер.вых.}}$ – отношение площадей занимаемых зеркально-призменным блоком на входном и выходном окне к площадям входного и выходного окон ЛОЭС.

Введён точностной критерий – погрешность определения углового рассогласования оптических осей каналов $\Delta\theta$ – разница между угловыми координатами оси входного пучка лазерного излучения и угловыми координатами, полученными на выходе зеркально-призменного блока.

Основной вклад в погрешность СОР вносят следующие составляющие:

- методическая $\Delta\theta_{\text{мет}}$ – возникает в случае косвенных измерений;
- технологическая $\Delta\theta_{\text{tech}}$ – возникает вследствие ошибок в изготовлении оптических деталей;
- юстировочная $\Delta\theta_{\text{just}}$ – возникает при проведении юстировочных работ;
- вибрационная $\Delta\theta_{\text{vib}}$ – возникает при наличии разъюстировок компонентов блока вследствие воздействия внешних механических вибраций.

С помощью введённых характеристик рассчитан критерий оптимальности Q различных оптических схем зеркально-призменного блока СОР по формуле:

$$Q = k_{\text{габ}} + k_{\text{пер.вх.}} + k_{\text{пер.вых.}} + \frac{\Delta\theta_{\text{рассч}}}{\Delta\theta_{\text{ТЗ}}}, \quad (1)$$

где $\Delta\theta_{\text{расч}}/\Delta\theta_{\text{ТЗ}}$ – отношение рассчитанной к требуемой погрешности определения углового рассогласования.

Наиболее подходящей схемой для обеспечения параллельного смещения на большие расстояния с малой угловой погрешностью в условиях внешних механических вибраций является та схема, критерий оптимальности которой минимален.

В диссертации доказано, что такой схемой является блок на основе двух пар пентапризм (Рис.1.). Для теоретического обоснования пространственной инвариантности оптической системы блока в условиях воздействия внешних механических вибраций в работе создана математическая модель хода лучей. В этой модели оси пучков лазерного излучения описываются как вектора $\vec{L}$, а оптические элементы системы описываются как матрицы M .

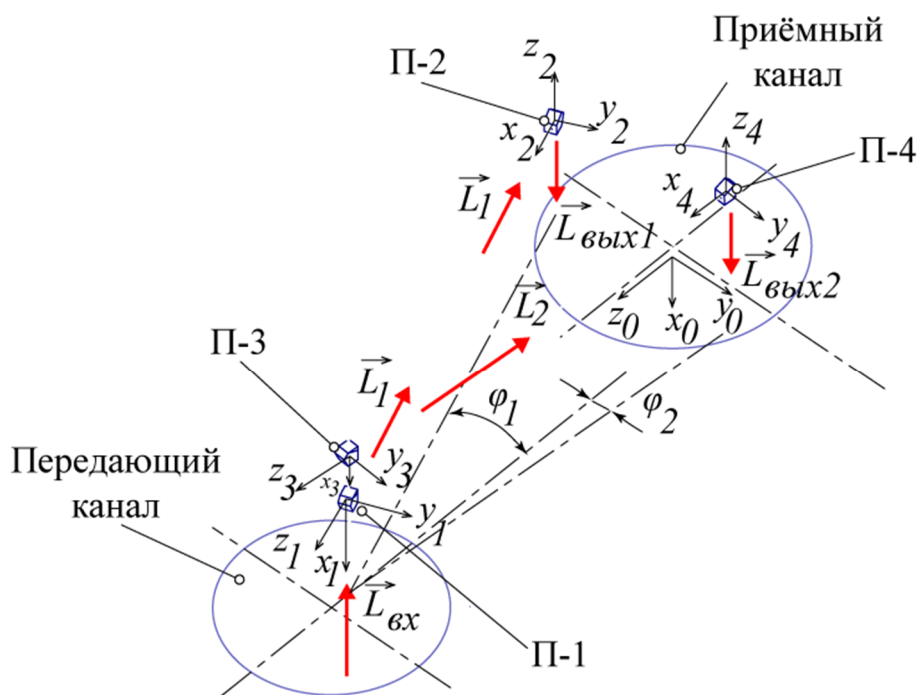


Рис. 1. Схема зеркально-призменного блока СОР на основе пентапризм

Вектор оси пучка, прошедшего пару пентапризм П-1 и П-2, $\vec{L}_{\text{вых1}}$, и вектор оси входного пучка $\vec{L}_{\text{вх}}$, записанные в системе координат $x_0y_0z_0$ равны:

$$\vec{L}_{\text{вых1}} = \begin{pmatrix} -\cos(180^\circ - \theta_{x\text{вых1}}) \\ \cos(90^\circ - \theta_{y\text{вых1}}) \\ \cos(90^\circ - \theta_{z\text{вых1}}) \end{pmatrix}, \quad \vec{L}_{\text{вх}} = \begin{pmatrix} \cos(180^\circ - \theta_{x\text{вх}}) \\ \cos(90^\circ - \theta_{y\text{вх}}) \\ \cos(90^\circ - \theta_{z\text{вх}}) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\theta_{x\text{вых1}}$, $\theta_{y\text{вых1}}$, $\theta_{z\text{вых1}}$, $\theta_{x\text{вх}}$, $\theta_{y\text{вх}}$ и $\theta_{z\text{вх}}$ – углы отклонения векторов от осей координат. Для полного описания углового положения пучка в пространстве, блок определения угловых координат должен находить только два угла: $\theta_{y\text{вых1}}$ и

θ_{z6b1x1} . Видно, что для идеального параллельного смещения должно выполняться условие равенства углов θ_{y6b1x1} и θ_{y6x} , а также θ_{z6b1x1} и θ_{z6x} .

Такое описание позволяет выразить $\vec{L}_{\text{ВЫХ}}$, как функцию от $\vec{L}_{\text{ВХ}}$ и конструктивных параметров призм K :

$$\vec{L}_{\text{ВЫХ}} = f(K, \vec{L}_{\text{ВХ}}). \quad (3)$$

В матричном виде эта функция выглядит следующим образом:

$$\vec{L}_{6b1x1} = M_x(-\varphi_1) \cdot M_y(90^\circ) \cdot M_{xyz2} \cdot M_y(90^\circ) \cdot M_{xyz2}^{-1} \cdot M_y(-90^\circ) \cdot M_{xyz1} \cdot M_y(90^\circ) \cdot M_{xyz1}^{-1} \cdot M_y(\varphi_1) \cdot \vec{L}_{6x}, \quad (4)$$

где $M_x(\varphi)$, $M_y(\varphi)$, $M_z(\varphi)$ – матрицы поворотов системы координат вокруг осей x , y и z соответственно, а матрицы M_{xyz} описывают повороты призмы вокруг осей x, y, z на углы $\gamma_i, \beta_i, \alpha_i$.

Аналогичным образом выглядит функция зависимости вектора оси пучка, прошедшего пару пентапризм П-3 и П-4, $\vec{L}_{\text{ВЫХ}2}$.

Определены границы применимости математической модели, т.е. диапазон углов отклонения осей пучков лазерного излучения и разворота пентапризм при которых условие пространственной инвариантности не нарушается. Показано, что если углы $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \theta_{y\text{ВХ}}, \theta_{z\text{ВХ}}$ не превышают десятка угл.мин., то матрицы M_{xyz} можно привести к виду:

$$M_{xyz_i} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \alpha_i & -\sin \beta_i \\ -\sin \alpha_i & 1 & \sin \gamma_i \\ \sin \beta_i & -\sin \gamma_i & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_i & -\beta_i \\ -\alpha_i & 1 & \gamma_i \\ \beta_i & -\gamma_i & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Подставляя (5) и (2) в (4) получим уравнение:

$$\vec{L}_{6b1x1} = \begin{pmatrix} -\cos(180^\circ - \theta_{x6x}) \\ \cos(\varphi_1) [-\alpha_1 - \gamma_1 - \alpha_2 - \gamma_2 + \theta_{y6x} \cos(\varphi_1) + \theta_{z6x} \sin(\varphi_1)] - \sin(\varphi_1) [\theta_{y6x} \sin(\varphi_1) - \theta_{z6x} \cos(\varphi_1)] \\ \sin(\varphi_1) [-\alpha_1 - \gamma_1 - \alpha_2 - \gamma_2 + \theta_{y6x} \cos(\varphi_1) + \theta_{z6x} \sin(\varphi_1)] + \cos(\varphi_1) [\theta_{y6x} \sin(\varphi_1) - \theta_{z6x} \cos(\varphi_1)] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos(180^\circ - \theta_{x6b1x1}) \\ \theta_{y6b1x1} \\ \theta_{z6b1x1} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Решая это уравнение, получим аналитические формулы для расчёта угловых координат оси пучка на входе в блок $\theta_{y\text{ВХ}}$ и $\theta_{z\text{ВХ}}$ по зарегистрированным координатам на выходе $\theta_{y\text{ВЫХ}1}, \theta_{y\text{ВЫХ}2}, \theta_{z\text{ВЫХ}1}, \theta_{z\text{ВЫХ}2}$:

$$\begin{aligned} \theta_{y\text{ВХ}} &= (A \cos \varphi_2 - B \cos \varphi_1) / (\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \cos \varphi_2 \sin \varphi_1), \\ \theta_{z\text{ВХ}} &= (A \sin \varphi_2 - B \sin \varphi_1) / (\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \cos \varphi_2 \sin \varphi_1), \end{aligned} \quad (7)$$

где коэффициенты A и B равны:

$$\begin{aligned} A &= \theta_{y\text{ВЫХ}1} \sin \varphi_1 - \theta_{z\text{ВЫХ}1} \cos \varphi_1, \\ B &= \theta_{y\text{ВЫХ}2} \sin \varphi_2 - \theta_{z\text{ВЫХ}2} \cos \varphi_2. \end{aligned} \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) позволяют рассчитать координаты оси пучка на входе в блок с помощью полученных координат на выходе, независимо от углов поворотов призм α_i , β_i , γ_i , что говорит о пространственной инвариантности СОР на основе пентапризм.

Для обоснованного выбора функциональной схемы СОР важным шагом является анализ методической составляющей $\Delta\theta_{met}$ погрешности, которая напрямую определяется конструктивными параметрами приёмного и передающего каналов и блока определения угловых координат. В главе проведён анализ этой составляющей для системы на основе пентапризм. Получена зависимость методической погрешности рассчитанных координат на входе в зеркально-призменный блок от погрешностей регистрации координат на его выходе.

Таким образом, разработана функциональная схема перспективной оптической системы, обеспечивающей параллельное смещение пучков лазерного излучения на расстояния, превышающие десятки сантиметров, а также показана принципиальная возможность достижения погрешности СОР, не превышающей одну угловую секунду.

Во второй главе описана методика теоретического анализа технологической, юстировочной и вибрационной составляющих погрешности СОР.

Первой частью методики является анализ технологической составляющей погрешности $\Delta\theta_{tech}$. Проведён анализ этой составляющей для СОР на основе пентапризм.

На первом этапе анализа разработана математическая модель хода лучей в одной призме, грани которой установлены с ошибками. Преобразование вектора оси пучка излучения $\vec{L}$ пентапризмой описывается следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\vec{L}_{\text{прел}_1} &= \frac{1}{n}\vec{L} - \vec{N}_1 \left[\frac{1}{n}(\vec{L}\vec{N}_1) + \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}((\vec{L}\vec{N}_1)^2 - 1)} \right]; \\ \vec{L}_{\text{отр}_2} &= \vec{L}_{\text{прел}_1} - 2\vec{N}_2(\vec{L}_{\text{прел}_1}\vec{N}_2); \\ \vec{L}_{\text{отр}_3} &= \vec{L}_{\text{отр}_2} - 2\vec{N}_3(\vec{L}_{\text{отр}_2}\vec{N}_3); \end{aligned} \tag{9}$$

$$\vec{L}' = \vec{L}_{\text{прел}_4} = \frac{1}{n}\vec{L}_{\text{отр}_3} - \vec{N}_4 \left[n(\vec{L}_{\text{отр}_3}\vec{N}_4) + \sqrt{1 + n^2((\vec{L}_{\text{отр}_3}\vec{N}_4)^2 - 1)} \right],$$

где $\vec{L}'$ – вектор оси пучка лазерного излучения, прошедшего одну пентапризму, $\vec{L}_{\text{прел}_i}$ и $\vec{L}_{\text{отр}_i}$ – вектора осей преломившихся и отразившихся пучков от i -й грани, $\vec{N}_i$ – вектор нормали к i -й грани призмы, n – показатель преломления материала призмы.

Эти выражения позволяют определить зависимость ошибки угловых координат оси пучка, прошедшего пентапризму $\delta\theta_{y1}$, $\delta\theta_{z1}$ от углов отклонения граней от номинального положения, которые легко преобразовать в ошибки углов, получившиеся в результате реализации технологического допуска на угол

между наклонными гранями пентапризмы $\delta 45$. В данном случае вероятностная величина допуска $\delta 45$ используется в качестве детерминированной величины – максимального значения отклонения граней призмы от идеального положения. При $n = 1,51$ (показатель преломления стекла К8), ошибки равны:

$$\delta \theta_{y1} = \delta \theta_{z1} \approx 3,5 \cdot \delta 45. \quad (10)$$

На втором этапе определяется зависимость ошибки угловых координат оси пучка, прошедшего пару пентапризм от наихудшей реализации технологических погрешностей:

$$\begin{aligned} \delta \theta_{12} &= \delta \theta_1 + \delta \theta_2, \\ \delta \theta_{34} &= \delta \theta_3 + \delta \theta_4. \end{aligned} \quad (11)$$

Полученные выражения позволяют оценить ошибку отклонения пучка лазерного излучения двумя парами пентапризм и рассчитать $\Delta \theta_{tech}$, подстановкой $\delta \theta_{y12}$, $\delta \theta_{z12}$, $\delta \theta_{y34}$, $\delta \theta_{z34}$ в (7), (8).

Показано, что эта технологическая составляющая погрешности $\Delta \theta_{tech}$ превышает 7 угл.сек. при допуске параллельности 1 мкм. Однако, $\Delta \theta_{tech}$ является систематической ошибкой и поэтому может быть компенсирована введением в оптическую схему юстировочных оптических клиньев.

Разработана методика теоретического анализа влияния внешних механических воздействий на погрешность СОР. В рамках этого анализа, на первом этапе, необходимо определить зависимость амплитуды и частоты колебаний оптических компонентов от внешних условий. Для этого необходимо, с помощью известных методик, провести исследование конкретной конструкции, на которую будет устанавливаться СОР и вычислить амплитуды и частоты колебаний точек крепления оптических элементов в зависимости от внешних и внутренних воздействий.

Достаточно большие амплитуды колебаний пентапризм могут привести к выходу пучка лазерного излучения из поля зрения приёмного устройства, что приведёт ко временной потере сигнала. В диссертации проведено исследование воздействия вибраций на вероятность временной потери сигнала, позволяющее определить допустимые величины амплитуд и частот колебаний пентапризм.

Показано, что в СОР необходимо учитывать вибрации призм, частоты которых значительно ниже частоты кадров МФПУ блока определения угловых координат, т.к. это приводит к увеличению средней погрешности за определённый промежуток времени. При частотах вибраций превышающих частоту кадров МФПУ происходит смазывание изображения, но его энергетический центр остаётся на месте и это не приводит к увеличению погрешности.

В результате исследования получены зависимости, позволяющие согласовать конструктивные параметры МФПУ и объектива для обеспечения требуемых характеристик системы (Рис. 2.). Угловое разрешение объектива блока определения угловых координат задаёт минимальную величину погрешности измерений, а минимизация вероятности временной потери сигнала

является важной задачей при построении системы с обратной связью (системы автоматической юстировки), частью которой является СОР.

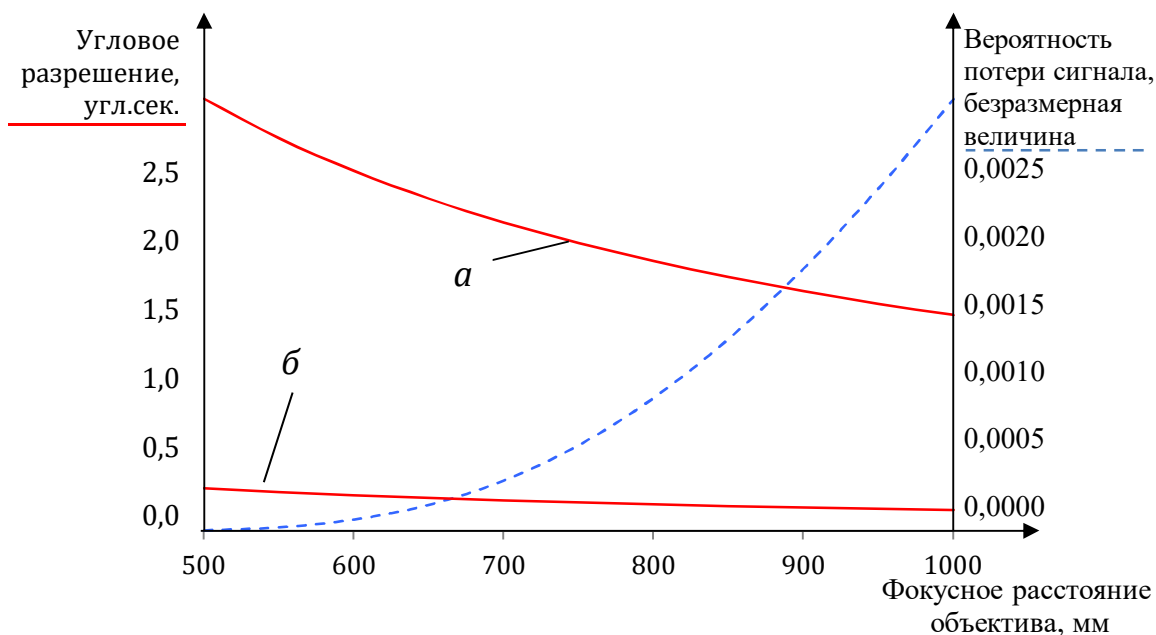


Рис. 2. Зависимость углового разрешения блока определения угловых координат и вероятности потери сигнала от фокусного расстояния объектива: *а* – угловое разрешение при определении угловых координат по координатам геометрического центра пятна; *б* – по координатам энергетического центра пятна

Вибрации конструкции также приводят и к появлению вибрационной составляющей погрешности, вносимой зеркально-призменным блоком $\Delta\theta_{vib}$. Разработана методика анализа этой составляющей на основе разработанной в первой главе математической модели. В данном случае, матрицы пентапризм имеют общий вид (4), а углы разворота призм являются случайными величинами (Рис.3.). Задавая координаты оси пучка лазерного излучения на входе модели, можно получить координаты осей пучков на выходе и рассчитать вибрационную составляющую погрешности СОР.

Таким образом можно определить предельный уровень амплитуды вибраций пентапризм для обеспечения заданной погрешности СОР. Показано, в частности, что при амплитуде вибраций до 5 угл.мин., вибрационная составляющая погрешности $\Delta\theta_{vib}$ не превышает 1 угл.сек.

Эта методика позволяет исследовать и юстировочную составляющую погрешности $\Delta\theta_{just}$, которая возникает при наличии ошибки угла разворота пар пентапризм $\Delta\varphi$. Важно, что в работе получены выражения, позволяющие внести корректировку в алгоритм расчёта угловых координат для полной компенсации этой ошибки.

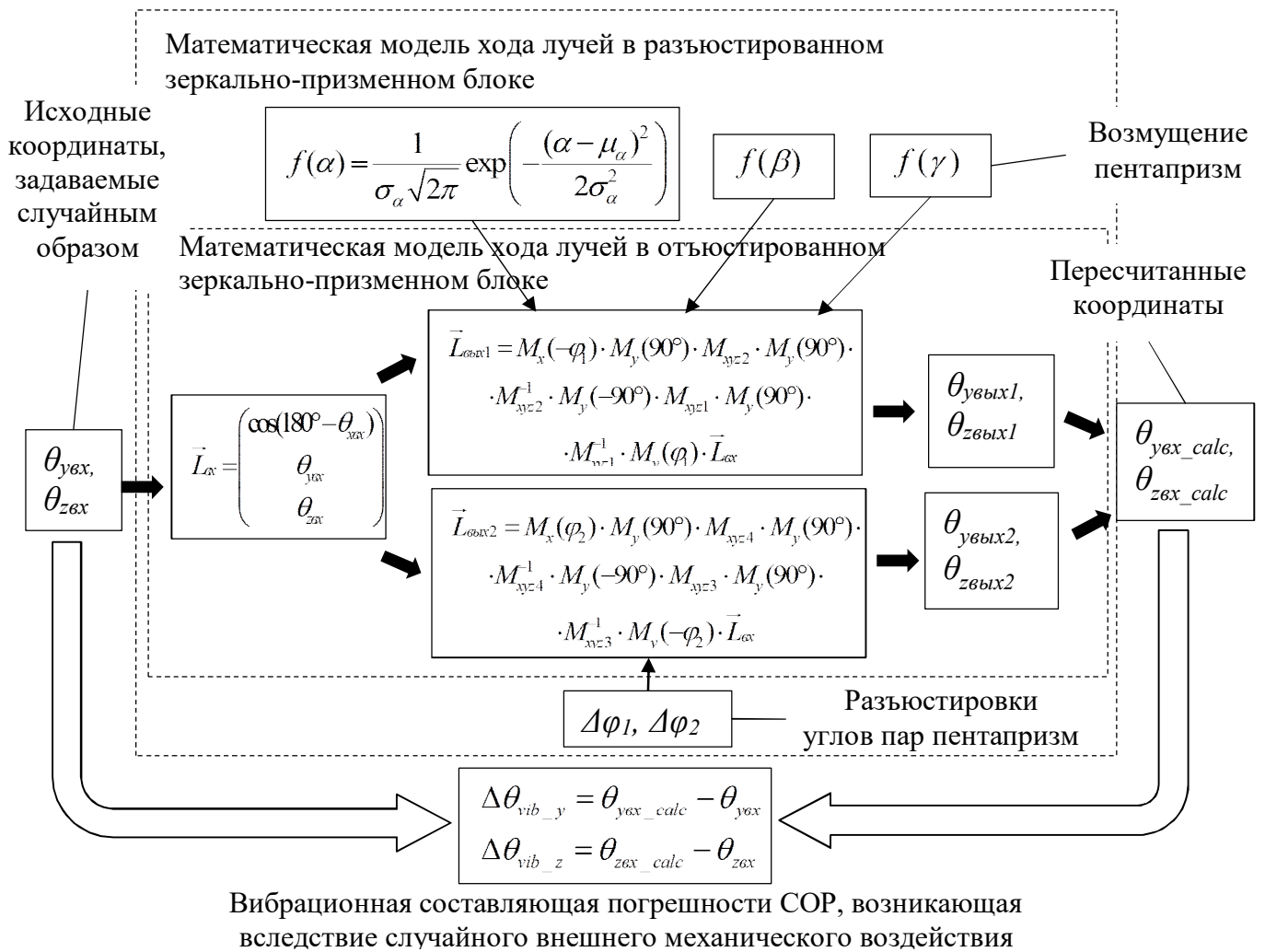


Рис. 3. Схема математической модели оценки вибрационной составляющей погрешности СОР на основе пентапризм

В результате проведённых исследований сформулирована методика точностного анализа СОР, состоящая из пяти основных этапов:

- первый этап – определение исходных данных:
 - допустимая погрешность СОР $\Delta\theta_{ТЗ}$;
 - расстояние параллельного смещения a , световые диаметры входного $d_{вх}$ и выходного $d_{вых}$ окон, диаметр пучка излучения d ;
 - допустимые коэффициенты перекрытия входного и выходного окон ЛОЭС – $k_{пер.вх.}$ и $k_{пер.вых.}$;
- второй этап – выбор функциональной схемы на основе введённого критерия оптимальности Q ;
- третий этап – теоретическая оценка погрешности блока определения угловых координат;
- четвёртый этап – теоретическая оценка погрешности зеркально-призменного блока. Зеркально-призменный блок может вносить следующие составляющие в погрешность СОР:

- методическую $\Delta\theta_{met}$;
- технологическую $\Delta\theta_{tech}$;
- юстировочную $\Delta\theta_{just}$;
- вибрационную $\Delta\theta_{vib}$;
- пятый этап – экспериментальная оценка погрешности зеркально-призменного блока.

Описанные во второй главе теоретические исследования обосновали возможность создания СОР на основе пентапризм, обеспечивающей параллельное смещение пучков лазерного излучения на расстояние 500-2000 мм и измерение углового рассогласования оптических осей каналов ЛОЭС с погрешностью на уровне единиц угловых секунд в условиях вынужденных гармонических колебаний конструкции с постоянным среднеквадратическим значением амплитуды.

По результатам исследований разработана конструкция и создан опытный образец СОР на основе пентапризм, конструкция призменного блока которого показана на Рис. 4. Она представляет собой три разнесённых в пространстве блока: блок пентапризм П-1 и П-3, устанавливаемый в передающем канале и два блока пентапризм П-2 и П-4, устанавливаемые в приёмном канале. Все блоки имеют подвижки для грубой и точной угловой юстировки.

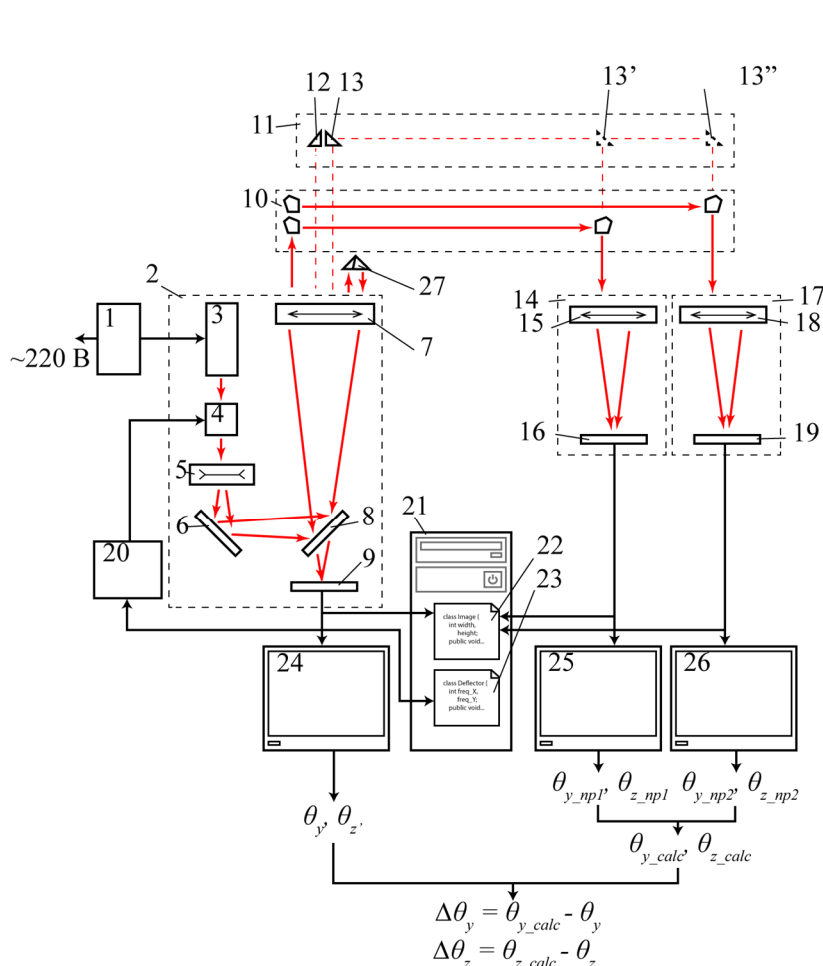


Рис. 4. Конструкция призменного блока опытного образца СОР на основе пентапризм

В третьей главе описана установка для экспериментального исследования точностных характеристик СОР и методика проведения измерений.

Разработана обобщённая функциональная схема установки (Рис. 5.) и требования к её основным узлам. Установка включает передающий канал 2, акусто-оптический дефлектор 4 который с высокой точностью изменяет угол оси пучка лазерного излучения 3 на входе в исследуемая СОР 10. Приёмный канал 14-17 построен на основе объективов и матричных фотоприемников, обеспечивающих высокоточное измерение угловых координат осей пучков. С помощью программно-аппаратного комплекса 20-26 реализованы разработанные алгоритмы вычисления погрешности СОР.

Основными характеристиками экспериментальной установки являются погрешность параллельности оптических осей приёмного и передающего каналов менее 0,4 угл.сек., расстояние между осями 500-2000 мм и диаметр входного окна приёмного канала 200-500 мм. Эти характеристики приближают экспериментальную установку к реальным высокоточным ЛОЭС.



- 1 – блок питания лазера;
- 2 – цифровой автоколлиматор;
- 3 – лазер; 4 – дефлектор;
- 5 – объектив; 6 – юстировочное зеркало; 7 – объектив;
- 8 – полупрозрачное зеркало;
- 9 – МФПУ; 10 – исследуемый зеркально-призмный блок;
- 11 – эталонный зеркально-призмный блок; 12 – АР-90;
- 13 – АКР-90; 14, 17 – видеокамеры приёмного канала; 15, 18 – объективы; 16, 19 – МФПУ;
- 20 – драйвер дефлектора;
- 21 – персональный компьютер;
- 22 – программа цифровой обработки изображений;
- 23 – программа управления дефлектором;
- 24 – монитор МФПУ автоколлиматора;
- 25 – монитор видеокамеры 14;
- 26 – монитор видеокамеры 17;
- 27 – угловой отражатель.

Рис. 5. Функциональная схема разработанной экспериментальной установки

Ранее известные методы юстировки не позволяют обеспечить требуемую погрешность параллельности осей в заданных условиях. В диссертации описан разработанный эталонный зеркально-призмный блок с использованием двух призм – АР-90° и АКР-90°, в совокупности работающих как угловой отражатель. На гранях призм блока нанесено отражающее покрытие в определённых зонах (Рис.6), позволяющее с высокой точностью контролировать их взаимное расположение.

Разработана методика юстировки и экспериментального исследования эталонного зеркально-призмного блока. Юстировка эталона и определение

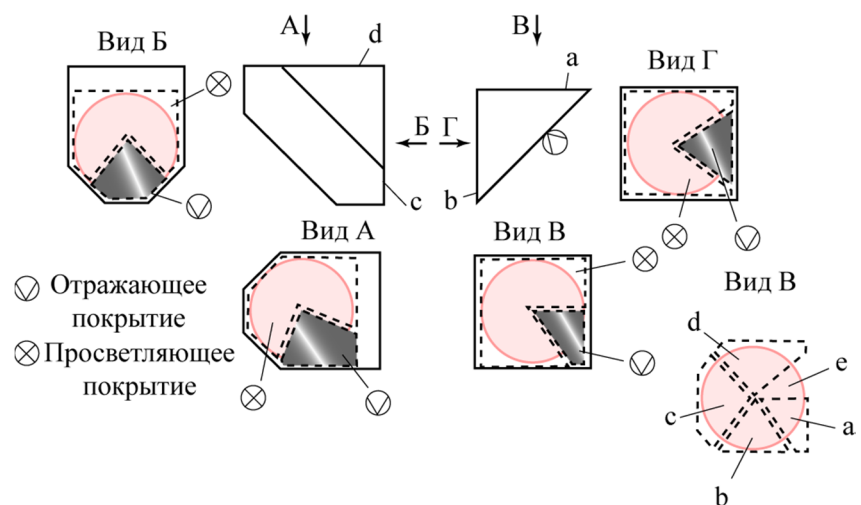


Рис. 6. Схема нанесения покрытий на грани призм

его погрешности осуществляется с помощью цифрового автоколлиматора 2, Рис. 5 и проходит в два этапа. На первом этапе обе призмы находятся в поле зрения автоколлиматора. С помощью угловых подвижек призмы устанавливаются в такое взаимное положение, при котором отражающая грань АР-90° и крыша АКР-90° перпендикулярны. В поле зрения цифрового автоколлиматора присутствует 4 дополнительных блика от отражающих покрытий, которые характеризуют положение граней. На втором этапе призмы располагаются на требуемом расстоянии в полях зрения приёмного и передающего каналов и юстируются таким образом, чтобы восстановить полученное на первом этапе взаимное положение граней.

С помощью матричного описания оптических элементов получена зависимость угловой погрешности параллельного смещения эталонного зеркально-призменного блока ($\Delta\theta_3$) от угловой погрешности взаимного положения граней (ω):

$$\Delta\theta_3 = 4\omega. \quad (12)$$

Экспериментальные исследования возможности юстировки эталона показывают, что разработанная методика позволяет обеспечить пространственную инвариантность оптической системы этого блока и достигнуть погрешности параллельного смещения менее 0,4 угл.сек.

Разработана методика экспериментального определения угловой погрешности СОР в условиях вибраций. Показано, что наиболее ответственным этапом методики является юстировка эталонного зеркально-призменного блока, точность работы которого в значительной степени определяет точность всей установки. Создана конструкция лабораторной установки (Рис. 7.).

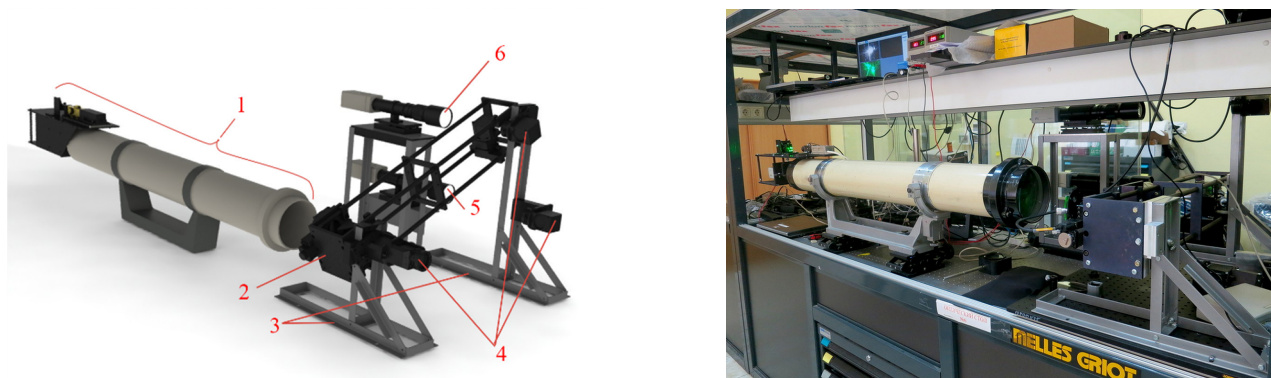


Рис. 7. Конструкция экспериментальной установки: 1 – цифровой автоколлиматор; 2 – эталонный зеркально-призменный блок; 3 – стойки крепления; 4 – зеркально-призменный блок на основе пентапризм; 5,6 – видеокамеры приёмного канала

Для измерения точностных характеристик СОР на созданной установке разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий управлять акусто-оптическим дефлектором и проводить цифровую обработку результатов измерений. Программа цифровой обработки позволяет осуществлять измерения

координат энергетического центра с субпиксельной точностью, а также пересчитывать координаты двух пучков на выходе зеркально-призменного блока на основе пентапризм по полученным в первой главе формулам.

Проведены экспериментальные исследования суммы всех составляющих погрешности СОР на основе пентапризм в отсутствии вибраций и других внешних механических воздействий. Исследования показывают, что в этом случае погрешность не превышает рассчитанную по методике теоретических исследований величину методической составляющей погрешности $\Delta\theta_{met}$, равную 0,5 угл.сек.

Проведены экспериментальные исследования суммы всех составляющих погрешности СОР $\Delta\theta$ в условиях воздействия внешних механических вибраций. Результаты исследования показывают, что общая угловая погрешность опытного образца системы на основе пентапризм не превышает 1 угл.сек. Это согласуется с результатами теоретического анализа, что доказывает адекватность разработанной методики.

В общих выводах сформулированы основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы:

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертации получены следующие научные и практические результаты:

1. Предложен метод, основанный на решении задач параллельного смещения пучка излучения опорного лазера и определения его угловых координат с помощью единой системы, СОР, позволяющий определять угловое рассогласование оптических осей приёмного и передающего каналов ЛОЭС в условиях вынужденных гармонических колебаний конструкции.

2. Предложен критерий оптимальности оптических схем СОР, основанный на габаритных и точностных характеристиках ЛОЭС. Критерий позволяет выбрать оптимальную функциональную схему для определения углового рассогласования оптических осей.

3. Доказана пространственная инвариантность оптической схемы СОР на основе двух пар пентапризм для высокоточных ЛОЭС, работающих в условиях вынужденных гармонических колебаний конструкции с постоянным среднеквадратическим значением амплитуды.

4. Разработана методика анализа погрешности СОР с помощью исследования математической модели хода лучей в СОР для выявления методической, вибрационной, технологической и юстировочной составляющих общей погрешности. Методика позволяет определить требования к СОР для осуществления измерений углового рассогласования оптических осей каналов ЛОЭС в условиях вынужденных гармонических колебаний конструкции с постоянным среднеквадратическим значением амплитуды с угловой погрешностью, не превышающей 1 угл.сек.

5. Предложена методика экспериментального определения угловой погрешности СОР в условиях вибраций на основе разработанного эталонного

зеркально-призменного блока, являющегося юстируемым разнесённым в пространстве уголковым отражателем. Показано, что эта методика позволяет обеспечить экспериментальное измерение погрешности СОР с ошибкой, не превышающей 0,4 угл.сек.

6. Метод определения углового рассогласования оптических осей каналов ЛОЭС апробирован при создании опытного образца СОР на основе пентапризм, который использовался для экспериментальных исследований. Проведённые экспериментальные исследования подтвердили правильность основных теоретических положений диссертации.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Барышников Н.В., Пискунов Т.С. Исследование влияния излучения рабочего лазера на работу систем автоюстировки высокоточных лазерных приборов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эл. № ФС 77-48211. 2011. URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/241632.html> (дата обращения: 10.02.2018) (0,6 п.л. / 0,5 п.л.).

2. Пискунов Т.С., Барышников Н.В., Животовский И.В. Исследование влияния угловых аберраций объектива оптико-электронного координатора на погрешности измерения взаимного углового рассогласования осей лазерных пучков // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эл. № ФС 77-48211. 2012. URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/479575.html> (дата обращения: 10.02.2018) (0,6 п.л. / 0,5 п.л.).

3. The operating stability of an automatic adjustment system with a parallel transfer device using a pentaprism / T.S. Piskunov [et al.] // Measurement Techniques. 2013. Т. 55, № 12. Р. 1371-1378 (0,5 п.л. / 0,4 п.л.).

4. Пискунов Т.С., Чибисов П.В. Особенности проектирования оптических систем устройств параллельного переноса оси лазерного пучка // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 4. С. 58-62 (0,6 п.л. / 0,5 п.л.).

5. Piskunov T.S., Baryshnikov N.V., Zhivotovskii I.V. An Investigation Of The Precision Characteristics Of A Device Based On Pentaprisms For Parallel Transfer Of A Beam Of Laser Radiation // Measurement Techniques. 2015. Т. 58, № 3. Р. 292-299 (0,5 п.л. / 0,4 п.л.).

6. Точностные характеристики устройства параллельного переноса пучка лазерного излучения, построенного на основе пентапризм / Т.С. Пискунов [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 3. С. 140-146 (0,8 п.л. / 0,7 п.л.).

7. Экспериментальные исследования точностных характеристик устройств параллельного переноса пучка лазерного излучения / Т.С. Пискунов [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 2. С. 130-133 (0,5 п.л. / 0,4 п.л.).