

На правах рукописи



Клем Андрей Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ  
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ МНОГОСЕГМЕНТНЫХ ОБЪЕКТОВ В  
СЛОЖНЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

05.11.15 Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Москва, 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный  
руководитель

**Сычев Виктор Васильевич**  
доктор технических наук

Официальные  
оппоненты:

**Минаев Владимир Леонидович**  
доктор технических наук,  
начальник лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений, г. Москва

**Голыгин Николай Христофорович**  
кандидат технических наук,  
главный метролог - начальник лаборатории аккредитованной метрологической службы Московского государственного университета геодезии и картографии, профессор кафедры проектирования оптических приборов, г. Москва

Ведущая  
организация

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, г. Москва

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2020 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д212.141.18 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», по адресу 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)  
Телефон для справок: +7 (499)267 09 63

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.141.18,  
кандидат технических наук,  
доцент



Мешков Сергей Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Совершенствование астрономических средств наблюдения неразрывно связано с реализацией предельных по качеству получаемых изображений. Качество получаемых телескопом изображений зависит от ряда факторов (технология изготовления зеркал, стабильность юстировки оптической системы, аберрации оптической системы, деформации конструкции, тепловые неоднородности элементов, союстировка сегментов составного главного зеркала, наличие турбулентной атмосферы и других) и определяется количеством получаемой им информации. В свою очередь количество информации, которое может быть получено оптическим телескопом, во многом зависит от выбранной концепции построения и технологичности технических средств. Существующим уровнем технологии предельное качество изображений не обеспечивается из-за существенного влияния погрешностей, вызванных вышеуказанными факторами на качество изображения при увеличении диаметра зеркал оптических телескопов (диаметр главного зеркала более десяти метров). Необходимы новые подходы и решения в части метрологического обеспечения функционирования комплекса, использующего средства адаптивной оптики и новые алгоритмы управления.

Данной проблеме уделяется большое внимание, ей посвящены работы российских и зарубежных ученых, среди которых J. M. Beefier, I. S. Bowen, G. A. Chanan, A. D. Gleckler, Shu Ker-Li, J. E. Nelson, B. Schaefer, S. Shaklan, B. L. Ulich, Л. А. Больбасова, А. Г. Верхогляд, М. А. Воронцов, А. В. Демин, Е. В. Ермолаева, В. А. Зверев, Ф. Ю. Канев, В. П. Лукин, Д. Д. Максutow, А. М. Савицкий, М. Н. Сокольский, В. Г. Сурдин, В. В. Сычев, В. Г. Тараненко, В. Ю. Теребиж, О. И. Шанин, В. И. Шмальгаузен, Б. М. Шустов и др.

**Цель диссертации** заключается в разработке методов и средств измерения и контроля пространственного положения сегментов крупногабаритного составного главного зеркала (СГЗ) астрофизического комплекса в реальном времени, реализующих высокую точность и надежность адаптивной коррекции качества изображения.

Для достижения этой цели в диссертации сформулированы следующие **задачи**:

- провести исследование эффективности применения различных принципов измерения и контроля крупногабаритных многосегментных объектов в сложных астрофизических комплексах с позиции уменьшения погрешности позиционирования сегментов;
- разработать алгоритм управления сегментами СГЗ астрофизического комплекса и коррекции погрешностей волнового фронта (ВФ) принимаемого излучения;
- разработать порядок информационно-метрологического обеспечения, включая приемные технические средства, а также средства контроля положения сегментов составного главного зеркала;
- разработать численную модель адаптивной системы измерения и контроля сегментов главного зеркала и провести метрологическую аттестацию модели с целью оценки ее достоверности.

**Методология исследования.** При решении поставленных задач исследования и разработки системы адаптивного управления (САУ) главного зеркала использовались методы математического и регрессионного анализа, теории вероятностей и математической статистики, принцип псевдообращения контрольного пучка излучения и фотоэлектроннооптического усиления сигнала углового рассогласования, векторного управления и теории линейных систем, математического моделирования.

**Научная новизна.** На основе метрологического анализа возможных информационно-измерительных средств контроля пространственного положения сегментов многообъектной структуры крупногабаритного зеркала астрофизического комплекса сформулирована метрологическая задача минимизации погрешностей оптической системы на базе нового подхода к проведению измерений, исключающая сложный, неопределенный и неточный процесс обработки избыточной информации о каждом отдельном сегменте. Новый подход заключается в разработке методов контроля углового рассогласования между соседними сегментами, а не непосредственного измерения пространственного положения сегментов. Это позволило реализовать высоко точный компенсационный (нулевой) метод коррекции взаимного положения сегментов на общей поверхности составного главного зеркала, отвечающего требованиям формирования оптимального волнового фронта излучения.

В рамках нового подхода к решению проблемы уменьшения погрешностей оптической системы впервые повышение информативности получаемого астрофизическим комплексом изображения осуществляется перераспределением и выравниванием по полю погрешностей изображения.

Разработано метрологическое обеспечение метода, включающее разработку датчиков стыка, реализующих высокоточный принцип псевдообращения контрольного излучения и высокочувствительный, помехоустойчивый метод электронно-оптического усиления сигнала рассогласования. Разработана и отлажена методика коррекции положения сегментов информационно-измерительной системы главного зеркала астрофизического комплекса для режимов автоматической стабилизации исходной юстировки и адаптивного управления по внешнему источнику (энергетическому центру). Разработаны рекомендации по алгоритму управления многосегментным зеркалом применительно к проекту космической обсерватории «Миллиметрон», основанный на методе трех точек.

На базе метрологического обеспечения разработана численная модель системы адаптивного управления главного зеркала, моделирующая раскрытие составного главного зеркала космического телескопа из транспортного в рабочее положение и поддержание формы главного зеркала с погрешностью позиционирования сегментов в допустимых пределах.

**Практическая значимость.** Результаты, полученные в диссертации, использованы в производственном процессе предприятия ООО «Проектно-исследовательский центр АРЕС», являющегося дочерним предприятием Астрокосмического центра Физического института имени П. Н. Лебедева РАН, при создании космической обсерватории «Миллиметрон» в части метрологического обеспечения (технологическая документация промежуточного и аттестационного контроля поверх-

ностей элементов составного главного зеркала).

Результаты исследования могут быть также использованы при адаптивной коррекции искажений в многосегментных объектах сложных систем, не ограничивающихся областью астрофизических исследований. Приложениями результатов исследования помимо средств получения информации, могут быть, к примеру, повышение эффективности оптических средств за счет улучшения фокусировки луча в формирующих оптических системах, решающих задачи энергетического плана: транспортировка солнечной энергии на наземные приемные устройства, формирование и транспортировка мощного лазерного излучения в космос для борьбы с космическим мусором, либо для функционального подавления работы наблюдательных спутников вероятного противника, создание установок, реализующих управляемые термоядерные реакции, а также задачи предотвращения астероидной опасности. Разработанные методы измерения и контроля пространственного положения многосегментного главного зеркала телескопа позволят значительно увеличить информативность оптических средств наблюдения за счет повышения эффективности адаптивной коррекции искажений в изображении.

**Достоверность результатов работы.** Разработанная концепция построения системы измерения и контроля в САУ сегментами крупногабаритных многосегментных объектов в сложных астрофизических комплексах построена на известных физических принципах и методах исследования и подтверждается аналитическими методами. Структурные решения и алгоритм контроля многосегментного зеркала базируются на анализе передового опыта создания систем управления крупногабаритных адаптивных оптических телескопов. Расчет оптимального расположения базовых точек приемной измерительной аппаратуры системы контроля сегментов зеркала проведен на лицензионном ПО MathCAD, абберационный расчет и оптимизация оптической системы объекта исследования – на лицензионном ПО Zemax EE, математическая модель САУ главного зеркала реализована на лицензионном ПО MATLAB Simulink. Достоверность математической модели подтверждена в ходе метрологической аттестации в соответствии с действующим стандартом Р 50.2.004 2000.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на совещании в Астрокосмическом Центре Физического института имени П. Н. Лебедева РАН (Москва 2016) и на XII, XIII и XIX Всероссийском совещании-семинаре «Инженерно-физические проблемы новой техники» (Москва 2016, 2018, 2020).

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Научно-техническое обоснование принципов построения системы адаптивного управления составного главного зеркала диаметром 10 м астрофизического комплекса космического базирования с точностью воспроизведения поверхности зеркала  $10^{-5}$  м в оценке среднего квадратического отклонения.
2. Алгоритм измерения и контроля пространственного положения сегментов составного зеркала, позволяющий повысить точность и устойчивость адаптивного управления, а также эффективность подавления погрешностей волнового фронта излучения, регистрируемого телескопом излучения.

3. Концепция информационно-метрологического обеспечения жизненного цикла составного главного зеркала крупногабаритного астрофизического комплекса космического базирования, использующая предложенный принцип стыковочного автоколлимационного датчика контроля взаимного положения сегментов зеркала, обеспечивающего точность измерений не хуже 0,1".
4. Разработанная численная модель адаптивного управления сегментами составного главного зеркала астрофизического комплекса, обладающая высокой достоверностью, подтвержденной в ходе метрологической аттестации в соответствии со стандартом Р.50.2.004 2000.

**Публикации результатов работы.** Результаты диссертационной работы представлены публикациями в 9 научных работах в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ [1-9], из которых 4 переводные версии научных работ, индексируются в Scopus [1-4], патентом на полезную модель (№ 189 105 РФ) [10] и технологической документацией внедрения результатов работы в практическую деятельность создания космического телескопа «Миллиметр».

**Структура диссертации.** Работа состоит из введения, трех глав, общих выводов по диссертации, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 124 наименований и приложений. Она содержит 112 страниц машинописного текста, 32 рисунка, 6 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цели и задачи работы, определено ее содержание, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматривается состояние вопроса о развитии систем адаптивного управления в астрофизических оптических комплексах наблюдения. При создании подобных объектов естественным является стремление увеличить объем получаемой информации наблюдений. Объем получаемой информации во многом зависит от выбранной концепции построения и технических решений, заложенных в астрофизическом комплексе и от технологии его изготовления. Оценку эффективности астрофизического комплекса целесообразно проводить по критерию информативности, пропорциональному четвертой степени диаметра главного зеркала и связывающему характеристики диаметра главного зеркала, углового поля, длины волны регистрируемого излучения и характеризующего потери информации в оптической системе коэффициента пропускания оптики. Множество существующих проектов астрофизических комплексов неоптимальны по информативности, так как на них оказывают сильное негативное влияние факторы союстировки и поддержания элементов оптической схемы с высокой точностью.

Поддержание идеальной формы составного главного зеркала и компенсация искажений приходящего на телескоп волнового фронта излучения, вызванных влиянием вышеперечисленных факторов, осуществляется методами и средствами

адаптивной оптики. Данные методы позволяют управлять пространственной структурой искаженного волнового фронта излучения, значительно нивелируя искажающие факторы.

Большой вклад в развитие систем адаптивного управления внесли отечественные ученые. Сотрудники Института космических исследований РАН под началом академика Прохорова А.М. (Витриченко Э.А., Евсеев О.А., Войцехович В.В. и др.) впервые внедрили на астрофизическом комплексе адаптивную коррекцию дрожания изображения. Сотрудники НПО «Астрофизика» (научный руководитель работ Сычев В.В.) впервые создали адаптивный телескоп с составным главным зеркалом (Димов Н.А., Евдокимов Е.Б., Гвоздев М.И., Путиловский М.Ю., Касперский В.Б., Дмитриев В.Л. и др.). Развитием методов и средств адаптивной коррекции волнового фронта оптического излучения занимались научные коллективы МГУ, ЦКБ «Алмаз», ГОИ им. С.И. Вавилова, Института оптики атмосферы СО РАН, Института машиноведения РАН, АО ЦНИИЭП им. Б.С. Мезенцева, ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект» и другие.

Весомый вклад в развитие современной элементной базы адаптивных оптических систем принадлежит сотрудникам МГТУ имени Н.Э. Баумана: кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» РЛ-2 (Пахомов И.И., Мосягин Г.М., Пуряев Д.Т.) в части разработки оптических систем, кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МТ-11 (Деулин Е.А., Михайлов В.П.) в части разработки высокоточных приводов микроперемещений, кафедры «Прикладная механика» РК-5 (Вафин Р.К., Ширшов А.А., Зябликов В.М.) в части прочностных расчетов и моделирования жесткости конструкций.

Впервые адаптивная система была реализована в проекте СТ-1200 (1978 г, СССР) в рамках союстировки семи элементов оптической системы для обеспечения работоспособности телескопа в режиме автоматической стабилизации исходной юстировки оптической системы (САС). В качестве системы контроля была использована оригинальная схема с псевдообращением контрольного сигнала. Дальнейшая модернизация СТ-1200 (АСТ-1200) позволила реализовать на телескопе режим адаптивного управления (САУ) по натурному источнику (звезде). И только потом САУ была реализована на телескопах NTT (1989 г, США), Кеск-1 (1992 г, США), VLT (2012 г, ЕС) и др. В настоящее время широко распространены системы компенсации атмосферных искажений (САУ NAOMI телескопа WHT, САУ Goodrich телескопа SOAR и др.). Передовой мировой и, в первую очередь, отечественный опыт создания крупногабаритных оптических телескопов позволил создать проект наземного адаптивного супертелескопа АСТ-25 (головная организация ГУП «НПО Астрофизика»). Данный проект был рассмотрен и получил высокую оценку Президиума Российской академии наук в 2005 году (Постановление РАН № 28 от 17.03.2005 г.).

Исследования показали, что для многосегментных систем нужна единая система контроля с высокой точностью, имеющая единую базу измерений и обладающая свойством одновременности оценки совокупного результата измерений положения элементов. Наибольший интерес для решения проблемы контроля многосегментного зеркала представляет схема, реализованная на телескопе АСТ-1200, с

применением псевдообращения контрольного пучка излучения. Однако данная нерасстраиваемая схема работала на трех стыках сегментов главного зеркала для шести управляемых элементов. Для крупногабаритных составных главных зеркал существующая нерасстраиваемая схема требует усложнения, что приводит к невозможности ее использования в крупногабаритных оптических системах с большим количеством сегментов.

Из опубликованных работ известно, что для крупногабаритных составных главных зеркал с увеличением их диаметра возрастает влияние искажающих факторов технологического и инструментального характера, которое снижает эффект увеличения информации за счет увеличения диаметра зеркала. Поэтому, увеличение количества информации за счет увеличения диаметра зеркала становится с определенного значения диаметра составного зеркала физически невозможным. Опережающий рост влияния искажений на количество получаемой крупногабаритным телескопом информации ограничивает размеры СГЗ. По результатам исследования искажающих факторов, препятствующих получению предельного качества изображений и предварительной оценки их влияния на бюджет ошибок, одним из факторов, оказывающих наибольшее влияние, является инструментальная погрешность, обусловленная в первую очередь точностью формы отражающей поверхности всего главного зеркала. Эффективным способом уменьшить бюджет ошибок является использование простых технических решений в части оптики, конструкции и приводов, чтобы не вносить новых искажающих факторов.

В ходе анализа вариантов построения адаптивных оптических систем наиболее приемлемым выбран принцип, реализующий систему адаптивного управления, помещенную во входном зрачке оптической схемы, т.е. на главном зеркале. Рассмотренные наряду с данным принципом адаптация на главном зеркале с помощью лазерного стереодальномера, адаптация на вторичном зеркале и адаптация в выходном зрачке оптической системы приводят к усложнению оптической системы и конструкции телескопа и имеют недостаточную точность измерения пространственного положения сегментов зеркала. Для пространственного разделения опорного фонового излучения с ярко выраженными энергетическими центрами в видимой области спектра и рабочего излучения далекой инфракрасной области спектра ( $\lambda_{\text{раб}}$ ) от исследуемого пространства, проходящих через один и тот же тракт, предлагается оптическую ось опорного фонового излучения сместить с оптической оси телескопа так, чтобы поля зрения опорного и рабочего полей зрения не накладывались друг на друга. Погрешность от несовпадения влияния искажающих факторов в этих каналах пренебрежимо мала. К тому же подобное разнесение каналов позволяет избежать значительного усложнения технической реализации схемы САУ. Поиск опорного энергетического центра излучения в видимой ( $0,5 \cdot 10^{-6}$  м) области позволяет решить проблему с выбором чувствительных приемников.

По итогам анализа принципиальных схем построения системы адаптивного управления составного главного зеркала телескопа обоснован выбор системы адаптивного управления составного главного зеркала телескопа с параллельным съемом информации об угловом положении каждого сегмента главного зеркала телескопа с матрицей квадрантных фотоприемников. Данная схема динамической юс-



тировки зеркала имеет высокую частоту съема информации о положении контролируемых сегментов и использует всю поверхность контролируемого сегмента для выработки сигналов рассогласования.

Для контроля соблюдения заданной точности формы главного зеркала в реальном времени предлагается использовать двухуровневую систему адаптивного управления. На первом уровне поддерживается исходная юстировка и проводится в реальном времени динамическая союстировка силами системы автоматической стабилизации. На втором уровне решается автономная задача контроля составного главного зеркала: для точного наведения на объект наблюдения проводится непрерывная доюстировка динамически съюстированного на первом уровне системой автоматической стабилизации главного и вторичного зеркала.

В рамках разработки алгоритма автоматической выверки и контроля положения сегментов в общем случае рассмотрен вариант панельной структуры поверхности составного главного зеркала, составленной из гексагональных элементов. Выбирается стационарный элемент в качестве первичной базы измерений и три главных направления относительно базы. На первой стадии элементы, принадлежащие главным направлениям, корректируются по углу наклона вдоль вышеуказанных направлений относительно базы измерений на общих с базой стыках. На второй стадии производится выравнивание элементов, находящихся в одном ряду между элементами главных направлений. Чтобы избежать большого накопления ошибок и для ускорения юстировки выравнивание производится одновременно от всех главных направлений в положительном направлении обхода элементов при их угловой коррекции в окружном направлении. Коррекция элементов на второй стадии производится путем наклона относительно их продольной оси симметрии до момента равенства сигналов датчиков, находящихся на стыках между корректируемым и соседними элементами в пределах ряда. Далее скорректированные элементы ряда принимаются за новую базу измерений, и цикл повторяется с элементами последующего ряда.

В качестве частного случая применения вышеуказанного алгоритма рассмотрено составное главное зеркало с геометрическими параметрами космической обсерватории «Миллиметрон», выполненное в виде параболоида вращения, составленного из центрального и двадцати четырех лепестковых сегментов. Наряду с лепестковыми сегментами (ЛС) имеется неразрезной центральный сегмент (ЦС),

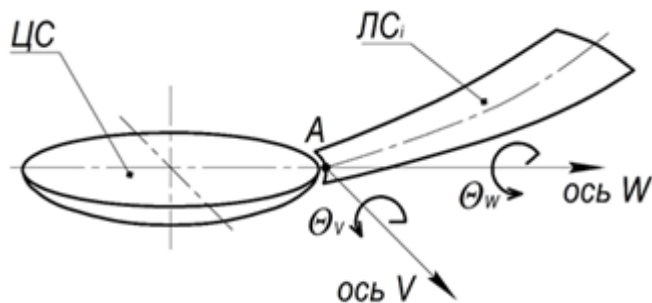


Рис. 1. Положение осей вращения ЛС составного главного зеркала  $W$  и  $V$

что форма поверхности сегментов главного зеркала недеформируема (в том числе,

представляющий центральную стационарную чашу для крепления опор главного зеркала. Проведена оценка ошибок ориентирования лепестков при их вращении относительно двух осей:  $V$  и  $W$  на углы  $\theta_V$  и  $\theta_W$ , соответственно по отношению к идеальному (невозмущенному) положению. Расположение осей вращения ЛС пояснено на Рис. 1. С учетом допущений,

под действием температуры и нагрузок), а волновые фронты, создаваемые сегментами главного зеркала, синфазны и образуют единый волновой фронт составного зеркала, а также что технологические погрешности в смещении и наклоне сегментов главного зеркала распределены по нормальному закону и при этом дисперсии всех смещений одинаковы, допустимые значения линейного смещения  $\Delta l_k$  и наклона  $\theta$  каждого из сегментов проектируемого многосегментного главного зеркала:

$$\Delta l_k \cong \pm \frac{\lambda_{раб}}{20}, \theta_x = \theta_y \cong \pm \frac{\lambda_{раб}}{5 \cdot D_k}, \theta = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2} = \pm \frac{\lambda_{раб}}{3,5 \cdot D_k} \quad (1)$$

где  $\lambda_{раб}$  – длина волны рабочего излучения ( $0,3 \cdot 10^{-3}$  м);

$D_k$  – размер сегмента в соответствующем направлении.

В случае с исследуемым СГЗ допустимые значения линейного смещения  $\Delta l_k$  и наклона  $\theta$  каждого из  $m$  сегментов составят  $\Delta l_k = \pm 0,015 \cdot 10^{-3}$  м,  $\theta = \pm 2,14 \cdot 10^{-5}$ .

Допустимое отклонение  $W_{ско}$  формы поверхности каждого из сегментов главного зеркала такое же, как и допустимое отклонение поверхности всего главного зеркала, то есть порядка  $\lambda_{раб}/14$  в среднеквадратическом значении. Допуск формы поверхности каждого сегмента зеркала  $W_{ско} = 0,021 \cdot 10^{-3}$  м.

Для обеспечения заданной формы составного главного зеркала с учетом вышеуказанных допущений целесообразна схема коррекции положения сегментов зеркала, основанная на методе трех точек, которая представлена на Рис. 2. Поскольку стыки сегментов определяются однозначно, их взаимное положение достаточно фиксировать только в одной зоне на каждый общий стык попарно для соседних сегментов (пары точек  $A, A'$  и  $B, B'$  и  $C, C'$  на Рис. 2). Опорные точки необходимо позиционировать по трём линейным координатам при сборке конструкции главного зеркала ( $A \equiv A', B \equiv B'$  и  $C \equiv C'$ ), а при дальнейшей работе космического телескопа (КТ) достаточно позиционировать опорные точки лишь по углу между соседними

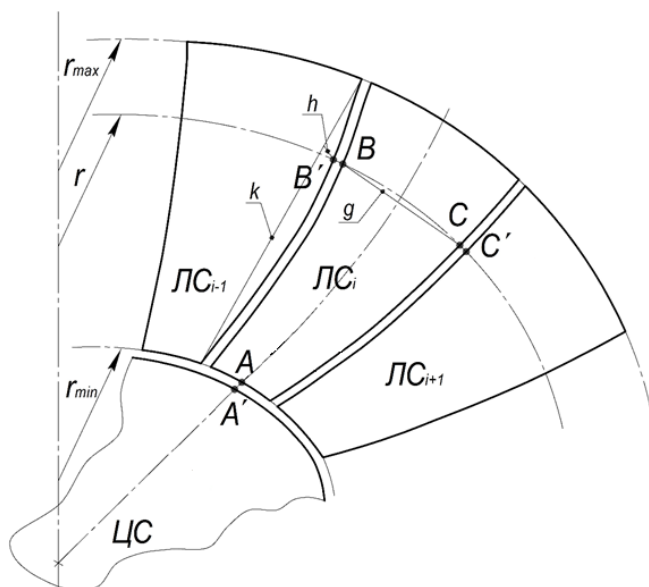


Рис. 2. Схема сопряжения сегментов составного главного зеркала

сегментами. Для точного воспроизведения формы составного главного зеркала сопрягаемые опорные точки должны иметь одинаковые нормали.

Во второй главе представлен анализ измерительных задач, технологий и средств измерения и контроля формы и взаимного положения элементов главного зеркала космического телескопа. В ходе рассмотрения используемых при создании сегментов главного зеркала КТ «Миллиметр» измерительных технологий определено, что имеющиеся средства измерений не способны решить весь объем измерительных задач, и есть необхо-

димось в дополнительных и более универсальных измерительных технологиях, в особенности в условиях, связанных с пребыванием телескопа на орбите. Выявлены критерии в части высокой точности и надежности, нерасстраиваемости, быстродействия, легкости и компактности, которым должны удовлетворять измерительные технологии.

В рассмотренных решениях измерительных задач в проектах, подобных обсерватории «Миллиметрон», таких как космическая обсерватория Herschel (Herschel Space Observatory, ЕС), КТ JWST (James Webb Space Telescope, США) и орбитальный радиотелескоп КРТ «Спектр-Р» (проект «Радиоастрон», РФ), широко применяются измерительные системы, задействованные в телескопе «Миллиметрон».

По итогам анализа промышленно-геодезических измерительных систем и приемной аппаратуры, реализующих полярный, мультитеодолитный и фотограмметрический метод определения координат применительно к космическому телескопу «Миллиметрон» показано, что номенклатура существующих измерительных средств и методов контроля формы и взаимного положения рабочих поверхностей элементов оптической системы телескопа в процессе их создания, на этапе наземной отработки конструкции и на этапе эксплуатации изделия в космосе не позволяет положительно ответить на вопрос о возможности создания измерительных систем, отвечающих предъявляемым к космическому телескопу «Миллиметрон» требованиям. В первую очередь это относится к приемной аппаратуре, являющейся своего рода краеугольным камнем измерительной системы. Применение современных прецизионных координатных измерительных систем также возможно и для размерного контроля на этапе сборки и юстировки составного главного зеркала с созданием специальных методик измерений, учитывающих габариты главного зеркала и требования по точности. Однако эффективность проведения измерений с помощью систем данного класса во время термовакуумных и криогенных испытаний неочевидна.

Решением данной проблемы могут стать относительные измерения деформаций предварительно проконтролированных и съюстированных отражающих поверхностей элементов главного зеркала. Другим путем является применение абсолютных прецизионных систем измерений с помощью лазерных трекеров и их аналогов. Полностью готовых решений, позволяющих измерять десятиметровый объект с необходимой точностью на этапе наземной отработки и эксплуатации в условиях космоса не существует. Необходим новый подход к созданию специальных измерительных средств и методик.

Предъявляемым к телескопу требованиям и критериям контроля может удовлетворять приемная аппаратура контроля углового положения сегментов главного зеркала на основе псевдообращения и фотоэлектронных оптических усилителей, размещаемых на стыках элементов главного зеркала. Данная измерительная технология может быть применена на этапе наземной отработки совместно с лазерными трекерами, а в условиях эксплуатации – лечь в основу САС в рамках системы адаптивного управления.

Разработан вариант исполнения автоколлимационного датчика системы автоматической стабилизации, удовлетворяющий вышеуказанным критериям реше-

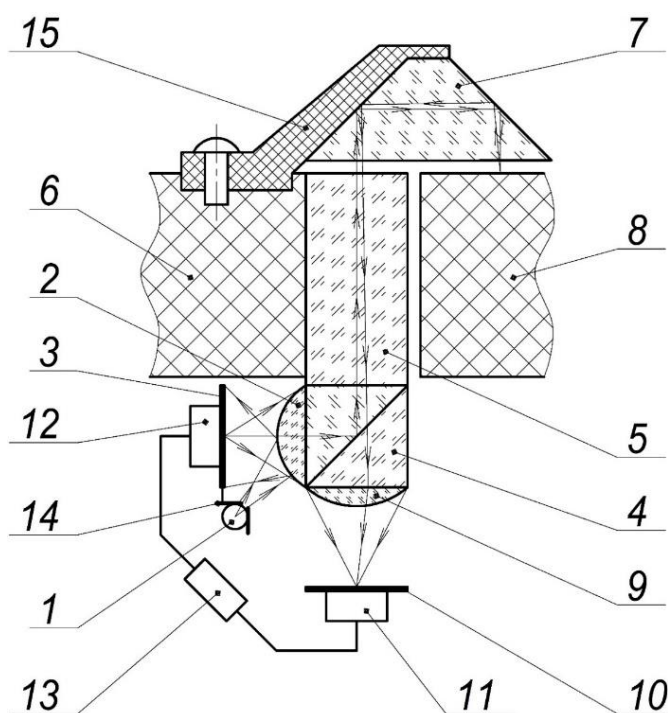


Рис. 3. Принципиальная схема датчика САС (обозначения по тексту)

элементом 6, где расположен датчик. Отраженный световой пучок поджимается за счет кривизны элемента 8 и проходит обратный путь через элементы 7, 5, 4 и фокусируется выпуклой линзой 9 на маску-негатив 10.

Фотоприемные устройства 11 и 12 на выходе каналов маски-позитива 3 и маски-негатива 10 включены навстречу друг другу по дифференциальной схеме. При отсутствии углового рассогласования между сегментами 6 и 8 на выходе светочувствительного элемента 11 будет нулевой сигнал. При наличии углового рассогласования между этими сегментами на выходе будет сигнал, пропорциональный величине этого рассогласования. В случае углового рассогласования измеряемого сегмента относительно опорного зеркала 6 на выходе фотоприемника канала маски-позитива 3 сигнал будет уменьшаться, а на выходе фотоприемника маски-негатива 10 – увеличиваться, а разность этих сигналов в блоке сумматора будет возрастать. Изображение маски-позитива 3 накладывается на маску-негатив 10. Маска-позитив 3 и маска-негатив 10 выполнены в виде чередующихся прозрачных и непрозрачных концентрических колец, как показано на Рис.4, а направление углового рассогласования определяется с помощью квадрантных фотоприемников на выходах каждой из масок. Аналогичный принцип работы фотоприемного устройства ранее был реализован в серийном спектрометре ИКС-12 и был положен в основу разработки данного датчика стыка.

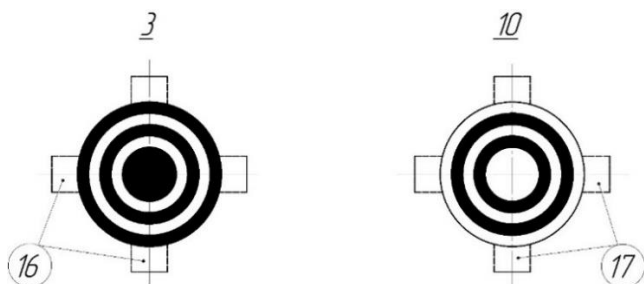


Рис. 4. Вид маски-позитив 3 и маски-негатив 10 (16 и 17 – квадрантные фотоприемники)

ния измерительных задач жизненного цикла КТ. Принцип работы описываемого автоколлимационного датчика системы автоматической стабилизации космического телескопа базируется на принципе псевдообращения контрольного пучка излучения. Принципиальная схема разработанного датчика представлена на Рис. 3.

В качестве источника света используется ИК-фотодиод 1. Свет от источника падает на выпуклую линзу 2 и освещает маску-позитив 3, расположенную в фокальной плоскости линзы 2. Далее отражаясь от 3, свет параллельным пучком проходит через оптические куб-призму 4, оптический световод 5 и прямоугольную призму 7, попадая на сегмент СГЗ 8, сопрягаемый с

выходах каждой из масок. Аналогичный принцип работы фотоприемного устройства ранее был реализован в серийном спектрометре ИКС-12 и был положен в основу разработки данного датчика стыка.

Таким образом, световые пучки, прошедшие через маску-позитив 3 и маску-негатив 10, регистрируются на квадрантных фотоприемниках 16 и 17

светочувствительных элементов 3 и 10 соответственно. Дифференциальный преобразователь 13 формирует сигнал управления для исполнительного механизма (актуатора), отрабатывающего рассогласование.

Во избежание засветки маски-позитива 3, последняя прикрывается от источника 1 шторками 14. Положение источника 1 сбоку от маски-позитива 3 подбирается таким образом, чтобы не создавать помехового воздействия на приходящий с элемента 8 отраженный световой сигнал. Расчеты показывают, что световой мощности ИК-диода достаточно для формирования изображения в плоскости маски-негатива 10. Оптическая система в составе световода 5, куб-призмы 4, объективов и обеих масок (3 и 10) жестко закреплены на опорном зеркале 6. Для обеспечения целостности выступающей за габарит сегмента 6 СГЗ оптической прямоугольной призмы 7, последняя выполняется с механизмом 15 поворота её в рабочее положение после раскрытия конструкции составного главного зеркала в космосе. Оборачивающая система 15 закреплена на опорном зеркале 6 с возможностью поворота вокруг оси, перпендикулярной поверхности опорного зеркала.

Проведена оценка погрешности позиционирования сегментов СГЗ и местоположения чувствительных датчиков. Сегменты не являются взаимно связанными, а находятся на общем жёстком основании, относительно которого осуществляется коррекция их положения. В цепи обратной связи используются датчики, работающие от одной общей базы, поэтому требования на суммарную погрешность измерений и отработку привода для каждого сегмента определяются выражениями (1). Данные условия выполняются для опорных точек  $A-A'$ , поэтому можем считать, что допуск  $\Delta x_A$  соответствует значению  $\Delta l_k$ . Для точек  $B-B'$  и  $C-C'$  такой подход некорректен, ввиду отсутствия общей базы измерений и влияния каждой погрешности на общую форму главного зеркала. Погрешности  $\Delta x_B = \Delta x_C$  несовмещения опорных точек в зоне  $B, B'$  и  $C, C'$  приводят к повороту (наклону) сегмента  $ЛС_i$  вокруг своей продольной оси симметрии. В результате расчета, приведенного в диссертации, допуск  $(\Delta x_C)_{don}$  несовмещения опорных точек зон  $B, B'$  и  $C, C'$  составил  $2,6 \cdot 10^{-6}$  м. Положение опорных зон  $B, B'$  и  $C, C'$ , обеспечивающее наибольшую жесткость конструкции главного зеркала, определено в 3,258 м от центральной оси составного главного зеркала.

**В третьей главе** приводятся материалы разработки математической модели системы автоматической стабилизации главного зеркала космического телескопа и приводятся результаты численного моделирования системы адаптивного управления с учетом ограничений аппаратно-программной реализации.

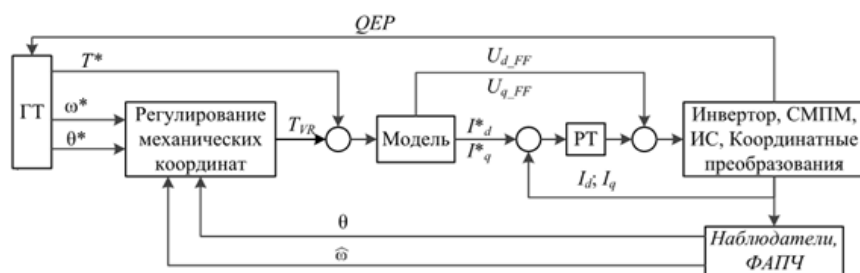
Одной из ключевых задач системы адаптивного управления космического телескопа наряду с поддержанием требуемой формы всего СГЗ при наведении на объект наблюдения является автоматическая стабилизация юстировки элементов зеркала, предваряющей адаптивное управление. Автоматическая стабилизация реализована в модели по упрощенной схеме контроля положения сегментов главного зеркала, описанной в Главе 2. Геометрические параметры составного главного зеркала взяты из оптической схемы космического телескопа «Миллиметрон». Для моделирования работы САУ космического телескопа рассматриваются три соседних

лепестковых сегмента относительно центрального. Кинематика лепестковых сегментов задается вращением относительно двух осей:  $V$  и  $W$  на углы  $\theta_V$  и  $\theta_W$ , соответственно (см. Рис. 1). В модели рассматривается:

- раскрытие лепестковых сегментов из сложенного в транспортном положении состояния с угловыми положениями лепестковых сегментов  $\theta_{W0}$  по оси  $W$  и  $\theta_{V0}$  по оси  $V$  соответственно в рабочее угловое положение  $\theta_{Wраб}$ ,  $\theta_{Vраб}$  лепестков. Скорость раскрытия ЛС ограничена по аналогии с проектной у «Миллиметрона».
- поддержание формы рассматриваемых сегментов составного главного зеркала при наведении на объект наблюдения.

Для управления положением сегментов главного зеркала КТ использованы прямые прецизионные сервоприводы на синхронных машинах с постоянными магнитами (СМПМ) в режиме вентильного двигателя. Из опубликованных работ в качестве базовой линейной структуры управления положением прецизионного привода в САУ космического телескопа выбрана структура с пропорционально-интегрально-дифференцирующим регулятором положения с динамическим ослаблением поля СМПМ. Данная структура обеспечивает высокую траекторную точность и требует наименьшего количества вычислений, что делает предпочтительным её использование в системах управления прецизионными приводами.

Система управления, показанная на Рис. 5, состоит из двух идентичных синхронизируемых контуров: управление наклоном в направлении оси  $W$  и оси  $V$ , с обратной связью (QEP сигналы). Генератор траекторий (ГТ) формирует вектор задания координат  $(\theta^*, \omega^*, T^*)$ , состоящий из заданий положения  $\theta^*$ , скорости  $\omega^*$ , и ускорения  $T^*$ . Синхронизация вращений сегментов СГЗ по двум осям также осуществляется на этапе генерации траектории. Динамическая модель задает токи  $I_d^*$  и  $I_q^*$  в осях  $d-q$  и формирует прямые программные связи по напряжению ( $U_{d\_FF}$ ;



$U_{q\_FF}$ ), компенсирующие перекрестные связи и статическую противо-ЭДС. Управление координатами привода осуществляется с помощью регулятора тока (РТ) и структуры регулирования механических координат, формирующей

Рис. 5. Структура контура системы управления сервопривода, обозначения по тексту

сигнал коррекции задания момента ( $T_{VR}$ ). Обратные связи по току и положению ( $I_d$ ,  $I_q$  и  $\theta$ ) формируются измерительной системой (ИС) тока, координатными преобразованиями, а также системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) в качестве наблюдателя положения. Необходимость в обратной связи (ОС) на основе ФАПЧ связана с тем, что используемые в модели датчики положения предоставляют только информацию о стыковке сегментов и не могут использоваться для формирования обратной связи по положению.

Для формирования прямых программных связей по динамической модели, а также при построении симуляционной модели привода использованы следующие уравнения математической модели идеализированной неявнополюсной трехфазной синхронной машины с постоянными магнитами:



$$\begin{cases} U_d = I_d R + L \frac{dI_d}{dt} - \omega p L I_q; & U_q = I_q R + L \frac{dI_q}{dt} + \omega (p L I_d + K_{Tph}); \\ T - T_{cog}(\theta) - T_{cf} - T_{vf}(\omega) - T_L = J_{me} \frac{d\omega}{dt}; & T = 1,5 K_{Tph} I_q; \\ U_d^2 + U_q^2 \leq U_m^2; & I_d^2 + I_q^2 \leq I_p^2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $R, L$  – сопротивления и индуктивности статора в осях  $d-q$ ;  $K_{Tph}$  – коэффициент момента;  $p$  – число пар полюсов;  $T, T_{cog}, T_L, T_{cf}, T_{vf}$  – электромагнитный, зубцовый моменты, момент нагрузки, сухое и вязкое трение;  $J_{me}$  – момент инерции;  $j, \varepsilon, \omega, \theta$  – механические рывок, ускорение, скорость и положение соответственно;  $I_d, I_q, U_d, U_q$  – токи и напряжения статора в осях системы координат ротора  $Odq$  соответственно;  $U_m$  – ограничение амплитуды напряжения;  $I_p$  – ограничение амплитуды пикового тока.

Параметры системы линейны, распределение поля в зазоре си синусоидально, зубцовый момент и силы трения пренебрежимо малы.

Дальнейшее исследование симуляционной модели вращающегося привода с СМРМ TMRIGF-WC с использованием численных методов проведено в среде MATLAB Simulink в соответствии с (2) и вышеуказанными допущениями. В модели учитываются погрешности измерительной системы тока, а также погрешности наблюдаемых механических координат сервопривода.

В результате начальной юстировки нулевые положения по осям  $W$  и  $V$  соответствуют раскрытому в рабочее положение СГЗ. Раскрытие главного зеркала осуществляется путем синхронной подачи на вход ГТ нулевого задания положения скачком при любом положении лепестковых сегментов, отличном от нулевого по обоим осям вращения. На Рис. 6 представлено реальное положение ЛС №2 по осям  $W$  и  $V$  на этапе раскрытия составного главного зеркала. Реальное положение ЛС  $\theta_{Wраб}$  и  $\theta_{Vраб}$  принято за нулевое по осям  $W$  и  $V$  соответственно.

По результатам симуляции проведена оценка погрешности поддержания

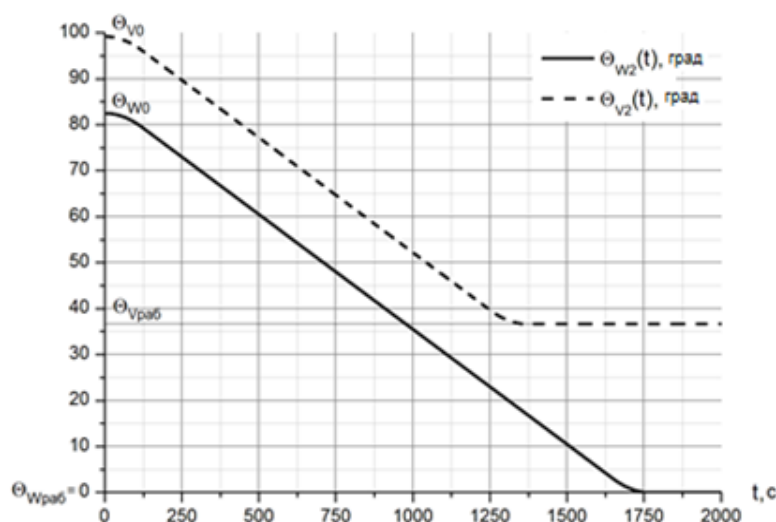


Рис. 6. Графические зависимости реальных угловых положений ЛС №2  $\theta_{W2}$  относительно оси  $W$  и  $\theta_V$  – относительно оси  $V$ , при раскрытии из транспортного в рабочее положение

формы составного главного зеркала для лепесткового сегмента №2, представленных на Рис. 7. Наибольшие погрешности углового положения ЛС №2 составили  $\Delta\theta_{W2} = \pm 8 \cdot 10^{-6}$  радиан по оси  $W$  и  $\Delta\theta_{V2} = \pm 7,2 \cdot 10^{-6}$  радиан по оси  $V$  соответственно.

Для сравнения полученных в ходе симуляции отклонений ЛС №2 составного главного зеркала использованы:

- полученный в Главе 2 из теории расчёта допусков на расположение и формы поверхностей сегментов составного зеркала допуск наклона

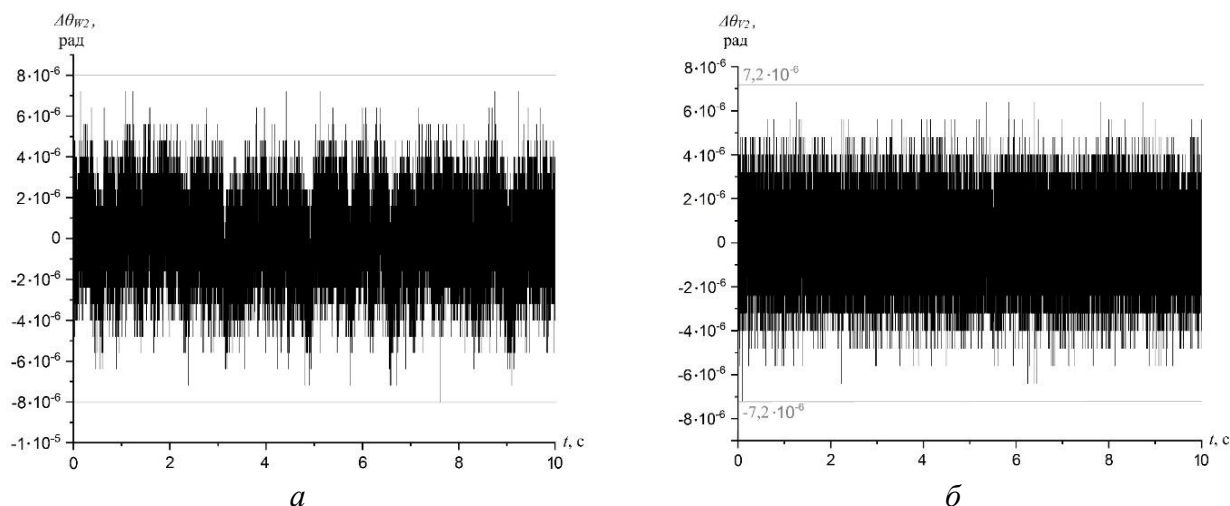


Рис. 7. Графические зависимости значений угловых погрешностей позиционирования ЛС №2 –  $\Delta\theta_{W2}$  и  $\Delta\theta_{V2}$  при поддержании формы зеркала относительно оси  $W$  (а) и оси  $V$  (б) соответственно

$(\Delta\theta_2)_{don} = \pm 2,14 \cdot 10^{-5}$  радиан каждого из двадцати четырех сегментов СГЗ.

Полученный по итогам симуляции наклон ЛС №2 с учетом (1) составил:  $\Delta\theta_2 = \pm 1,076 \cdot 10^{-5}$  радиан, что в 2 раза меньше допускаемого значения.

- определяющий допуск на величину погрешности  $\Delta x_C$  несовмещения опорных точек  $CC'$  (см. Рис. 2) в зоне размещения стыковочных датчиков из Главы 2, составляющий  $(\Delta x_C)_{don} = \pm 2,6 \cdot 10^{-3}$  м. Полученное в результате моделирования несовмещение опорных точек:

$$\Delta x_C = \Delta\theta_2 \cdot h, \quad (3)$$

где  $h$  – значение стрелки прогиба в точке  $C$ , рассчитанное в Главе 2,

$h = 264 \cdot 10^{-3}$  м. Таким образом, с учетом (1) погрешность  $\Delta x_C = \pm 2,84 \cdot 10^{-6}$  м, и выполняется условие:

$$\Delta x_C < (\Delta x_C)_{don}, \quad (4)$$

что свидетельствует о пригодности разработанной модели САУ.

Метрологическая аттестация разработанной математической модели в соответствии со стандартом Р.50.2.004 2000 показала высокую достоверности модели.

Проведенная оценка погрешности поддержания формы смоделированного фрагмента главного зеркала и оценка погрешности неадекватности модели показали, что полученные в ходе симуляции работы системы адаптивного управления результаты позволяют утверждать об успешной применимости разработанной математической модели системы адаптивного управления крупногабаритных телескопов с многосегментными составными главными зеркалами.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В соответствии с поставленными в диссертации задачами исследования были получены следующие результаты:

В результате решения метрологической задачи минимизации погрешностей позиционирования составных элементов оптической системы на базе нового под-



хода к проведению измерений, исключая сложный, неопределенный и неточный процесс обработки избыточной информации о каждом отдельном сегменте, разработан высокоточный компенсационный (нулевой) метод коррекции взаимного положения сегментов на общей поверхности многосегментного крупногабаритного составного главного зеркала астрофизического комплекса космического базирования.

Разработано метрологическое обеспечение метода коррекции положения сегментов информационно-измерительной системы главного зеркала телескопа, включающее разработку стыковочных автоколлимационных датчиков контроля углового положения сегментов главного зеркала, реализующий высокоточный принцип псевдообращения контрольного излучения и высокочувствительный, помехоустойчивый метод электронно-оптического усиления сигнала рассогласования.

Разработана методика коррекции положения сегментов информационно-измерительной системы главного зеркала астрофизического комплекса для режимов автоматической стабилизации исходной юстировки и адаптивного управления по внешнему источнику (энергетическому центру). Разработаны рекомендации по алгоритму управления многосегментным зеркалом применительно к проекту космической обсерватории «Миллиметрон», основанному на методе трех точек.

На базе метрологического обеспечения разработана численная модель системы адаптивного управления главного зеркала, моделирующая раскрытие составного главного зеркала астрофизического комплекса космического базирования из транспортного в рабочее положение и поддержание формы главного зеркала с погрешностью позиционирования сегментов в допустимых пределах.

Таким образом, результаты исследований и предложенные методы полностью соответствуют поставленным в диссертации задачам и подтверждают выполнение требований, предъявляемых к сложным астрофизическим комплексам космического базирования. Полученные результаты могут быть использованы при создании системы измерения и контроля многосегментных объектов и, в частности, в проекте телескопа космического базирования обсерватории «Миллиметрон» для достижения цели соблюдения точности формы отражающей поверхности составного главного зеркала телескопа эквивалентным диаметром десять метров с минимальными погрешностями союстировки сегментов при сборке составного главного зеркала и в режиме функционирования в условиях глубокого космоса.

## ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. V.V. Sychev, A.I. Klem. Adaptation problems in the space telescope of the millimetron observatory // Atmospheric and Oceanic Optics 2017. Vol. 20. Issue 4. С. 389-398. (0,84 п.л. / 0,72 п.л.)
2. V.V. Sychev, A.I. Klem. Algorithm for Controlling a Multielement Mirror using the Millimetron Space Telescope as an Example // Atmospheric and Oceanic Optics 2018. Vol. 31. Issue 6. С. 667-675. (1,16 п.л. / 1,04 п.л.)

3. V.V. Sychev, A.I. Klem. Metrological Control of the Spatial Positions of Elements of the Millimetron Telescope Primary Mirror // Atmospheric and Oceanic Optics 2018. Vol. 31. Issue 6. С. 676-681. (0,77 п.л. / 0,66 п.л.)
4. E.K. Samygina, A.I. Klem. Numerical Simulation of the Adaptive Control System of the Composite Primary mirror of a Large-Size Space Telescope // Atmospheric and Oceanic Optics 2019. Vol. 32. Issue 5. С. 590-596. (0,55 п.л. / 0,37 п.л.)
5. Сычев В.В., Клем А.И. Проблемы адаптации в космическом телескопе обсерватории «Миллиметрон» // Оптика атмосферы и океана 2017. Т. 30. № 1. С. 93-102. (0,88 п.л. / 0,75 п.л.)
6. Сычев В.В., Клем А.И. Алгоритм управления многоэлементным зеркалом на примере космического телескопа обсерватории «Миллиметрон» // Оптика атмосферы и океана 2018. Т. 31. № 7. С. 578-586. (1,19 п.л. / 1,06 п.л.)
7. Сычев В.В., Клем А.И. Вопросы метрологического обеспечения контроля пространственного положения элементов главного зеркала космического телескопа обсерватории «Миллиметрон» // Оптика атмосферы и океана 2018. Т. 31. № 7. С. 587-592. (0,94 п.л. / 0,82 п.л.)
8. Самыгина Е.К., Клем А.И. Численное моделирование системы адаптивного управления составного главного зеркала крупногабаритного космического телескопа // Оптика атмосферы и океана 2019. Т. 32. № 4. С. 317-323. (0,63 п.л. / 0,32 п.л.)
9. Сычев В.В., Клем А.И. Информационно-метрологическая оптимизация погрешностей волнового фронта излучения, регистрируемого телескопом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение 2020. №3 (132). С. 37-51. (0,64 п.л. / 0,6 п.л.)
10. Датчик углового рассогласования: пат. 189105 Рос. Федерация, МПК G01B 9/06. / В.В. Сычев, А.И. Клем (РФ). – № 2018139195; заявл. 07.11.18; опубл. 13.05.19. Бюл. № 14. 6 с.
11. Сычев В.В., Клем А.И. Адаптивная коррекция искажений в телескопе космической обсерватории «Миллиметрон» // Инженерно-физические проблемы новой техники: Сборник материалов XII Всероссийского совещания-семинара. М.: НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 74-77. (0,25 п.л. / 0,24 п.л.)
12. Сычев В.В., Клем А.И. Вопросы метрологического обеспечения многоэлементного зеркала крупногабаритного телескопа на примере обсерватории «Миллиметрон» // Сборник материалов XIII Всероссийского совещания-семинара «Инженерно-физические проблемы новой техники», 2018. С. 47-51. (0,49 п.л. / 0,41 п.л.)
13. Сычев В.В., Клем А.И. Вопросы информационно-метрологической оптимизации погрешностей волнового фронта оптической системы // Инженерно-физические проблемы новой техники: Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвящённой 85-летию со дня рождения заслуженного работника ВШ РФ, д. ф.-м. н., профессора Киселёва М. И., (Москва, 17-19 марта 2020 г.) / ред. кол.: А. А. Крансуцкая, Е. В. Тумакова, Е. В. Кречетова. М.: Диона. 2020. С. 87-88. (0,1 п.л. / 0,09 п.л.)