

## К вопросу о выборе схемы контроля деформации главного зеркала на телескопе БТА

В.В. Сычев<sup>1</sup>, А.И. Клем<sup>2</sup>, К.И. Короткова<sup>3</sup>, О.И. Комарова<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
107005, г. Москва, 2-я Бауманская, 5

<sup>2</sup>ПАО «Компания “Сухой”», «ОКБ Сухого»  
125284, г. Москва, ул. Поликарпова, 23а

<sup>3</sup>АО ОКБ «Гидропресс»  
142103, г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21

<sup>4</sup>ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга  
107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, 20, стр. 9

Поступила в редакцию 22.04.2021 г.

Рассмотрены необходимость и возможные пути осуществления контроля деформаций главного зеркала непосредственно на телескопе БТА во время его работы. Проведен анализ наиболее приемлемых для этого методов и схем контроля. Предложена схема, реализующая метод псевдообращения, просто и оригинально решающая задачу контроля на базе опыта работы телескопа АСТ-1200 с составным главным зеркалом. Проведена оценка возможной погрешности измерений предложенной системы контроля деформаций главного зеркала.

*Ключевые слова:* Большой Телескоп Азимутальный, контроль асферических поверхностей, интерферометр, компьютерно-синтезированная голограмма, метод псевдообращения, погрешность измерений; Large Azimuth Telescope (BTA-6), test of asphere, interferometer, computer generated hologram, pseudo-inversion method, measurement error.

### Введение

В настоящее время некогда престижный, самый крупный в Европе 6-метровый телескоп оригинальной конструкции Большой телескоп азимутальный (БТА) стал неэффективен. Основной причиной этого является деградация главного зеркала (ГЗ). Доминирующие факторы, не позволяющие реализовать высокое качество изображения в телескопе, — это температурная и весовая деформация монолитного 6-метрового ГЗ. Предварительная количественная оценка потери качества изображения по этой причине, приведенная в [1], показала неприемлемость фактической погрешности зеркала. Изготовление аналогичного зеркала на замену экономически нецелесообразно и не решит проблему. Искажения отражающей поверхности ГЗ являются следствием нежесткости 42-тонного зеркала БТА, его температурной неоднородности и нестабильности в процессе работы телескопа. Полная и достоверная информация о поведении ГЗ в период работы на БТА может быть получена только с помощью измерительной системы контроля, установленной непосредственно на трубе телескопа.

\* Виктор Васильевич Сычев (viktorsychev@list.ru); Андрей Иванович Клем (black.n.hot.ice@gmail.com); Капитолина Игоревна Короткова (korotkova\_kapitolina@mail.ru); Ольга Игоревна Комарова (olgakom1998@mail.ru).

С целью поиска путей повышения эффективности работы крупнейшего в Евразии телескопа (БТА) и выбора оптимального решения для его модернизации необходимо контролировать деформацию ГЗ в реальном времени, набрать статистику поведения зеркала и выработать средства устранения искажений его оптической поверхности.

Из существующих в оптической метрологии методов контроля асферических оптических поверхностей лучше всего подходят прецизионные бесконтактные компенсационные методы. Развитие компьютерных технологий и когерентных источников света дает возможность усовершенствовать компенсационный метод, используя в качестве компенсатора компьютерно-синтезированные голограммы.

### 1. Обзор точностных характеристик методик интерферометрического контроля формы асферической поверхности применительно к главному зеркалу БТА

Для решения актуальных научно-прикладных задач прецизионные методы контроля формы оптики должны отвечать требуемому качеству ее изготовления с погрешностью измерений порядка  $10^{-8}$  м в оценке среднеквадратического отклонения (СКО).

Так, для успешного решения метрологической задачи контроля деформаций ГЗ БТА в реальных условиях, согласно [1], требуется точность измерительной системы (ИС) не хуже  $0,005\lambda$  для видимой части спектра зондирующего излучения ( $\lambda = 0,6328 \cdot 10^{-6}$  м), т.е.  $3,164 \cdot 10^{-9}$  м (СКО). Допустимая величина погрешности ИС  $\delta_{\text{доп}}$  в соответствии с [2] принимается равной 0,1 от величины измеряемых деформаций уровня  $0,05\lambda$ .

Для прецизионного контроля формы асферических зеркал используются интерферометрические методы с оптическими компенсаторами на основе компьютерно-синтезированных голограмм вместо эталонных пластин и линзовых корректоров [3]. Прецизионный контроль формы асферических поверхностей осуществляется посредством управления параметрами контрольного лазерного излучения. В ИС используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ). ДОЭ призваны преобразовывать форму исходного волнового фронта (ВФ) в требуемую для конкретной метрологической задачи с целью получения эталонного ВФ. В нашей стране разработкой ДОЭ и лазерным интерференционным контролем асферических поверхностей зеркал успешно занимается Институт автоматики и электрометрии СО РАН: например, погрешность ВФ, формируемая ДОЭ для проекта составного ГЗ телескопа E-ELT световым диаметром 39 м, декларируется на уровне  $5,3 \cdot 10^{-9}$  м в оценке СКО [4].

Заслуживает внимания работа [5], где для технологического и аттестационного контроля сборки и юстировки составного ГЗ проекта обсерватории «Миллиметрон» световым диаметром 10 м предложено использовать лазерный ИК-интерферометр с системой соосных бинарных синтезированных голограмм. Особенностью предложенной измерительной системы является оправданный, с учетом специфики формы и условий эксплуатации ГЗ «Миллиметрона» [2, 6], отказ от автоколлимационной схемы контроля, где осевые синтезированные голограммы играют роль нуль-корректоров, формируя пучок лучей, «совпадающий с расчетной конгруэнтной нормалью контролируемой асферической поверхности» [5]. Для образца репликации сегмента ГЗ «Миллиметрона» погрешность разработанной интерференционной измерительной системы с контрольной длиной волны  $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$  м составила  $0,175\lambda$  в оценке СКО ВФ.

Применительно к БТА представляют интерес работы [7, 8], в которых анонсированы элементы комплексной измерительной системы, решающей метрологические задачи: от контроля геометрических параметров центрального сегмента световым диаметром 3 м составного ГЗ «Миллиметрон» с погрешностью измерений формы поверхности не более  $2 \cdot 10^{-6}$  м (СКО) до полного контроля оптической системы «главное и вторичное зеркало» телескопа с погрешностью не более  $0,05\lambda$  ( $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$  м) в оценке СКО. В частности, с такой погрешностью ( $0,5 \cdot 10^{-6}$  м в оценке СКО) для контроля центрального сегмента ГЗ предлагается компенсационный метод контроля ИК-интерферометром с отражатель-

ным внеосевым ДОЭ (компьютерно-синтезированной голограммой) [8].

Таким образом, ввиду высокой точности интерферометрические компенсационные измерительные системы с синтезированными голограммами могут быть адаптированы для контрольного излучения в видимом диапазоне применительно к контролю деформации поверхности ГЗ БТА.

## 2. Методика интерферометрического контроля формы главного зеркала БТА с применением компьютерно-синтезированной голограммы

Компенсационный метод с использованием компьютерно-синтезированной голограммы применялся для контроля формы центрального параболического зеркала космического телескопа обсерватории «Миллиметрон» [8]. Этот метод адаптирован для контроля деформации поверхности ГЗ БТА (рис. 1).

Вспомогательный лазер 1 формирует узкий пучок параллельных лучей, идущих вдоль оптической оси (юстировочный пучок лучей). С помощью наклонного зеркала 3, расположенного под углом  $45^\circ$  к оси лазера 1, лучи меняют направление на  $90^\circ$ . Проходя сквозь телескопическую систему 5, пучок лучей расширяется и с помощью наклонного зеркала 6, расположенного под углом  $45^\circ$ , меняет направление на  $90^\circ$ . Объектив 7 фокусирует лучи в определенной точке S. Светоделительный кубик 8 разделяет луч на две части, одна часть проходит сквозь кубик, другая отклоняется на  $90^\circ$  и попадает на эталонное сферическое зеркало 9. Отраженный луч имеет сферический ВФ; меняя направление с помощью зеркала 15, расположенного под углом  $45^\circ$  к оси, он попадает на наклонное зеркало 16, расположенное под углом  $10^\circ$ . Отражаясь от зеркала 16, луч попадает на центральную юстировочную зону компьютерно-синтезированной голограммы 10 и возвращается обратно в интерферометр; при необходимости расположение вспомогательных зеркал или интерферометра изменяется для получения расчетного расположения оптических элементов.

He-Ne-лазер 2 формирует пучок параллельных лучей (основной пучок лучей), до вспомогательного зеркала 16 лучи проходят тот же путь, что и юстировочные. Далее лучи попадают на основную и кольцевую зоны компьютерно-синтезированной голограммы. Основная зона формирует асферический ВФ, совпадающий с теоретической формой контролируемой поверхности зеркала, и направляет его на ГЗ 11. От зеркала отражается ВФ, повторяющий форму контролируемой поверхности зеркала (отраженный пучок лучей). Кольцевая зона отражает и дифрагирует падающий на нее сферический ВФ точно назад в интерферометр (опорный пучок лучей).

В результате интерференции отраженного и опорного лучей формируется интерференционная картина.

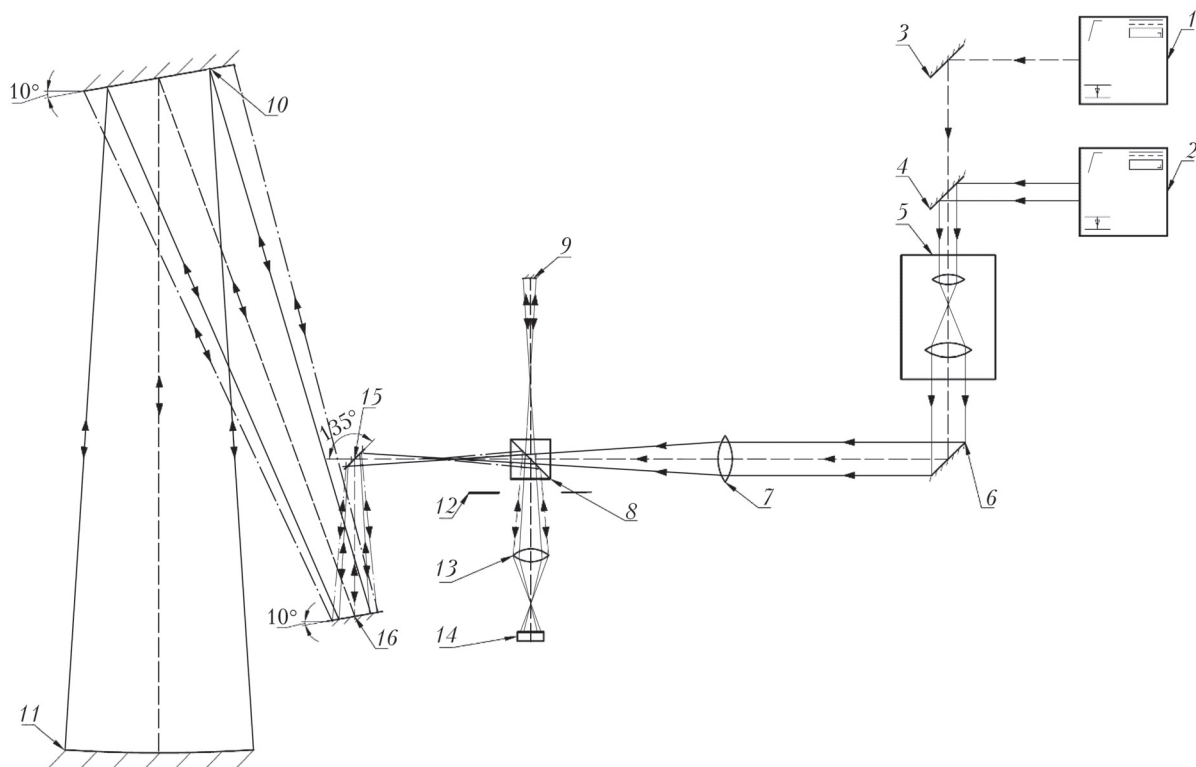


Рис. 1. Схема контроля деформаций ГЗ БТА с использованием компьютерно-синтезированной голограммы: 1 – вспомогательный лазер; 2 – основной лазер; 3, 4, 6, 15, 16 – наклонные зеркала; 5 – телескопическая система; 7 – объектив; 8 – куб-призма; 9 – эталонное сферическое зеркало; 10 – компьютерно-синтезированная голограмма; 11 – главное зеркало телескопа; 12 – шторка; 13 – выпуклая линза; 14 – светочувствительный элемент; пунктирная линия – юстировочный пучок лучей, формируемый лазером 1, направленный вдоль оптической оси, что упрощает юстировку зеркала относительно синтезированной голограммы и интерферометра; штрихпунктирная линия – отраженный от синтезированной голограммы пучок лучей сферического ВФ точно назад в интерферометр; сплошная линия – основной пучок лучей, параллельный до зеркала 5, сферический после зеркал 7 и 8, совпадающий с формой контролируемой поверхности после зеркала 9

На рис. 2 представлен вариант возможной установки такой системы непосредственно на трубу БТА. На верхней штанге на расстоянии 13,8 м от центра тяжести трубы телескопа закрепляется кронштейн 7 для крепления компьютерно-синтезированной голограммы 6 с помощью шарнирного соединения; для жесткой фиксации голограммы под углом  $10^\circ$  аналогичное крепление предусмотрено для вспомогательных зеркал 3 и 4. Зеркало 3 закрепляется на кронштейне 8, кронштейн закреплен на расстоянии 4,8 м от центра тяжести трубы телескопа. Интерферометр 5 закрепляется на стойке высотой 4,5 мм.

### 3. Недостатки компенсационного метода контроля формы главного зеркала БТА с применением компьютерно-синтезированной голограммы

Для контроля непосредственно всей поверхности ГЗ диаметр компьютерно-синтезированной голограммы, установленной на трубу телескопа длиной 27 м, составляет 1,5 м, что является основным недостатком этой схемы.

Помимо крупногабаритной компьютерно-синтезированной голограммы, на трубу БТА необходимо установить вспомогательные зеркала. Большие габариты вспомогательных оптических элементов нарушают физико-механические характеристики телескопа и делают невозможным применение такой системы контроля в процессе его работы.

Измерительные системы с компьютерно-синтезируемой голограммой технически сложны, оснащены большим количеством дополнительных оптических элементов, вносящих собственные погрешности в результат измерения, зачастую некомпактны. Эти факторы, в свою очередь, увеличивают требования к жесткости конструкции трубы телескопа и материалам, из которых он изготавливается. Оптические компенсаторы ВФ на основе ДОЭ требуют прецизионной юстировки оптической системы относительно интерферометра и контролируемой асферической поверхности, могут иметь оптические искажения в построении ее изображения, что накладывает жесткие требования на качество оптической подложки ДОЭ и использование безабрационного источника монохроматического контрольного излучения. В случае с автоколлимационной схемой добавляется проблема низкой интенсивности получаемого полезного сигнала. Интерференционные методы с ДОЭ в видимой области

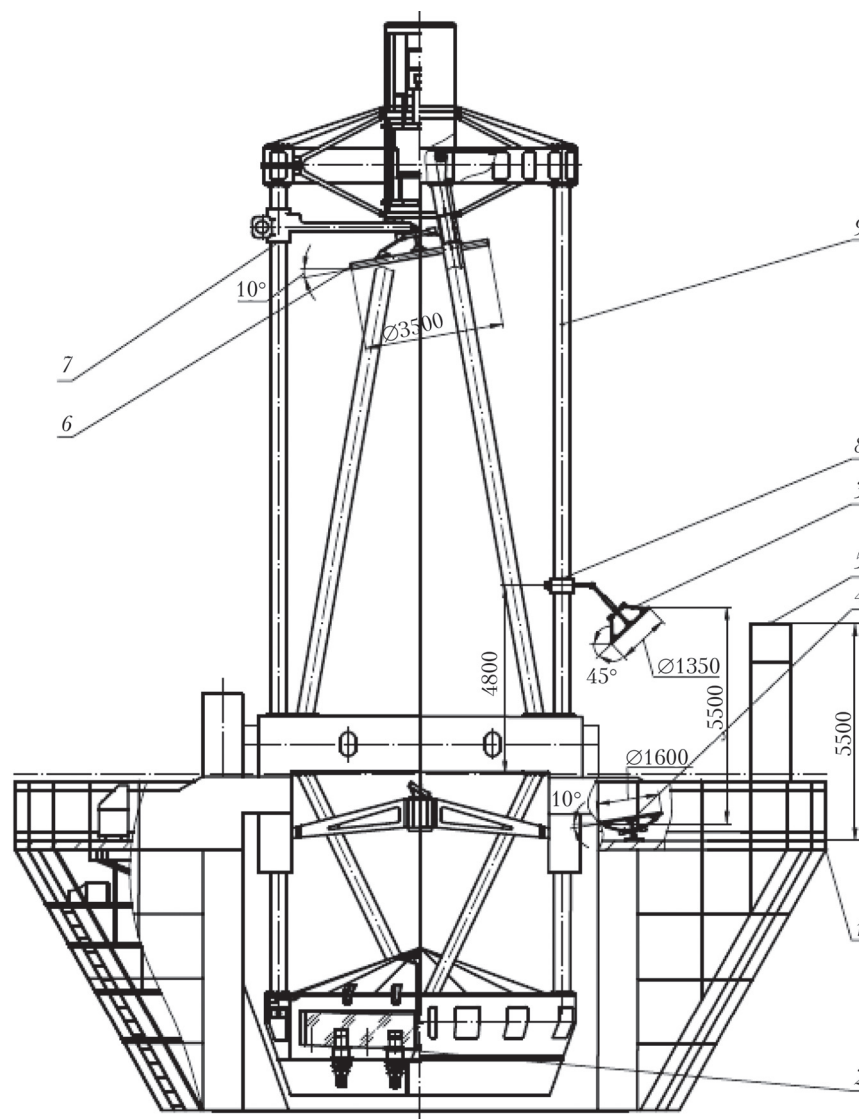


Рис. 2. Схема трубы телескопа с установленной системой контроля (размеры в мм): 1 – основание трубы телескопа; 2 – главное зеркало телескопа; 3, 4 – вспомогательные зеркала; 5 – интерферометр; 6 – компьютерно-синтезированная голограмма; 7, 8 – кронштейн; 9 – верхняя штанга трубы телескопа

спектра требуют высокого качества обработки отражающей поверхности измеряемого объекта. Для применения рассматриваемой системы контроля в условиях космоса, помимо ее громоздкости, могут возникнуть проблемы, связанные с низкой устойчивостью измерительной системы к внешним воздействиям и высоким энергопотреблением. Само по себе создание синтезированной голограммы – финансово затратная, специфическая задача, в решении которой далеко не всегда удастся удачно использовать готовые покупные решения.

Таким образом, формирование эталонных ВФ компенсационными методами с применением компьютерно-синтезированной голограммы является сложной научной задачей. Большие габариты элементов рассмотренной измерительной системы не позволяют использовать ее на БТА.

#### 4. Схема компенсационного метода контроля формы главного зеркала БТА с псевдообращением контрольного излучения

В качестве перспективной альтернативы предложена система контроля, основанная на методе псевдообращения (рис. 3).

При контроле деформации ГЗ БТА используется He-Ne-лазер 1, излучение которого с  $\lambda = 0,6328 \cdot 10^{-6}$  м вводится в схему телескопа через плоскую вершину усеченной призмы 3 с зеркальными гранями (рис. 4), расположенную в фокальной плоскости телескопа вне поля изображения. После отражения от плоского зеркала 4 узкий пучок лазерного излучения, пройдя двухлинзовый

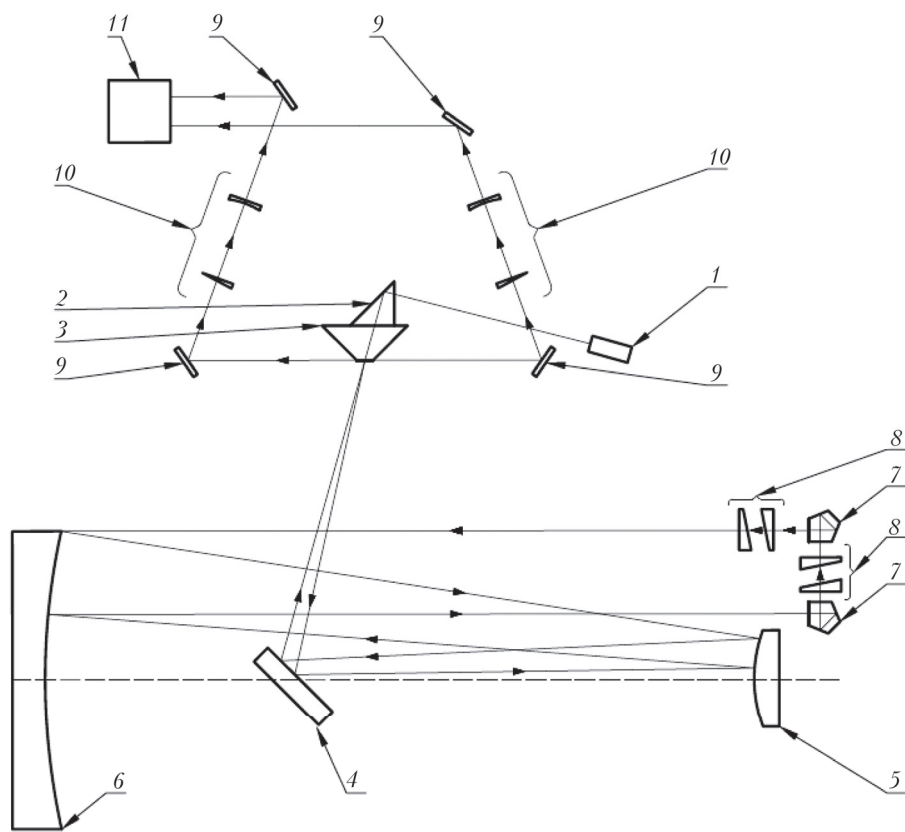


Рис. 3. Оптическая схема компенсационной системы контроля с псевдообращением контрольного излучения: 1 – He–Ne-лазер; 2 – треугольная призма; 3 – усеченная призма; 4 – наклонное зеркало; 5 – вторичное зеркало телескопа; 6 – главное зеркало телескопа; 7 – пентапризма; 8 – клиновые компенсаторы; 9 – вспомогательные наклонные зеркала; 10 – двухлинзовый компенсатор; 11 – анализатор ВФ (в основе усеченная пирамида)

компенсатор, отражается вторичным зеркалом на поверхность ГЗ. Отраженное от опорной точки на зеркале излучение направляется в призмную возвратную систему, состоящую из пентапризм 7 и клиновых компенсаторов 8. Эта система расположена так, что вышедший из нее пучок лучей попадает в точку поверхности ГЗ 6, положение которой контролируется. После отражения от контролируемой точки зеркала пучок лучей падает

на вторичное зеркало 5, проходит двухлинзовый компенсатор 10 и фокусируется на вершине призмы 11.

При отсутствии углового рассогласования между опорной и контролируемой точками на противоположные грани призмы 11 попадают равные по величине потоки контрольного излучения. Пройдя формирующую оптику, излучение через световоды направляется на фотоприемное устройство. Его схема устроена так, что излучение от противоположных граней призмы поочередно поступает на один фотоприемник. В результате вырабатывается последовательность импульсов равной амплитуды. При появлении углового рассогласования между контролируемой и опорной точками пятно контрольного излучения смещается с вершины призмы, равенство сравниваемых потоков нарушается, и на нагрузке фотоприемника появляется последовательность импульсов, разность амплитуд которых пропорциональна угловому рассогласованию контролируемой точки зеркала относительно опорной.

Основным достоинством метода псевдообращения, на основе которого построена система контроля деформации на рис. 3, является нерасстраиваемость (нечувствительность к любым искажающим

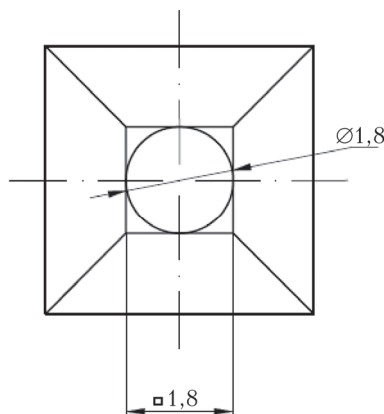


Рис. 4. Положение пучка лучей при юстировке системы контроля (размеры в мм)

воздействиям на измерительную систему), что было доказано при его реализации в отечественном адаптивном телескопе АСТ-1200 с составным ГЗ [9].

## 5. Погрешности измерительной системы с псевдообращением контрольного излучения

Теперь рассмотрим основные погрешности системы контроля, основанной на методе псевдообращения.

Погрешность такой системы контроля заключается в смещении ВФ принимаемого излучения из-за воздействия различных искажающих факторов. Представление о допустимой величине этих ошибок дает сопоставительный анализ влияния основных искажающих факторов на смещение ВФ:

- перемещения и смещения оптических элементов;
- погрешности изготовления оптических элементов;
- погрешность определения координат контролируемой точки;
- градиент температур телескопа и подкупольного пространства, приводящий к изменению температуры внутри оптических элементов;
- плохое качество изображений из-за турбулентности атмосферы;
- конвекционные потоки воздуха в трубе телескопа, попадающие в его оптическую часть.

### 5.1. Погрешности от перемещений и смещений оптических элементов

Так как в этой оптической схеме во время проведения контроля подлежит перемещению только одна пентапризма, ошибки от перемещений других элементов оптической схемы отсутствуют.

Рассмотрим основной принцип действия пентапризм для точного определения погрешностей их перемещения.

Как показано на рис. 5, пентапризма отклоняет падающий луч на  $90^\circ$  независимо от ее ориентации в пространстве.

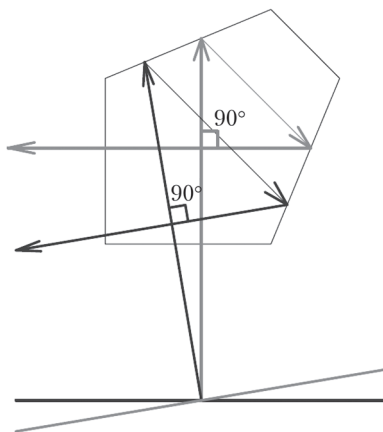


Рис. 5. Ход лучей в пентапризме

Таким образом, результаты измерений не зависят от положения призмы. Поэтому для крепления и перемещения призмы не требуется использование высокоточных направляющих.

Ошибки от неверной начальной установки минимизируются за счет начальной юстировки оптической схемы.

Отклонение ВФ из-за перемещений

$$\delta_{\text{ППВФ}} = 0. \quad (1)$$

### 5.2. Погрешности изготовления оптических элементов

*Усеченная призма.* Погрешность из-за непараллельности усеченной площадки призмы (рис. 6)

$$\delta_{\text{УППП}} = \frac{\lambda}{10} = 63,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad (2)$$

что эквивалентно отклонению ВФ

$$\delta_{\text{УПВФ}} = 0,000032''. \quad (3)$$

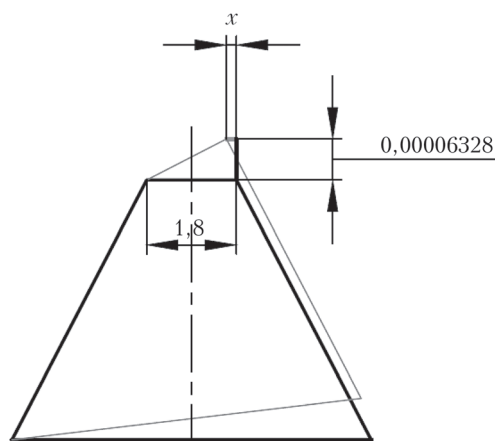


Рис. 6. Погрешность усеченной призмы

*Наклонное зеркало телескопа.* Наклонное зеркало телескопа входит в оптическую схему фокуса Несмита, погрешность его изготовления

$$\delta_{\text{НЗ}} = \frac{\lambda}{10} = 31,64 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad (4)$$

что эквивалентно отклонению ВФ

$$\delta_{\text{НЗВФ}} = 0,00043''. \quad (5)$$

*Вторичное зеркало телескопа.* Вторичное зеркало телескопа также входит в оптическую схему фокуса Несмита, его погрешность изготовления

$$\delta_{\text{ВЗ}} = \frac{\lambda}{20} 0,1 = \frac{632,8}{20} 0,1 = 3,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad (6)$$

что эквивалентно отклонению ВФ:

$$\delta_{ВЗВФ} = 0,00015 \text{ мкрад} = 0,000031'' \quad (7)$$

*Пентапризмы.* Погрешности будут определяться максимальным значением отклонения на рис. 7:

$$\max(\delta\theta) = 0,51\delta 45 + 2,79\delta 45 \approx 3,5\delta 45 \quad (8)$$

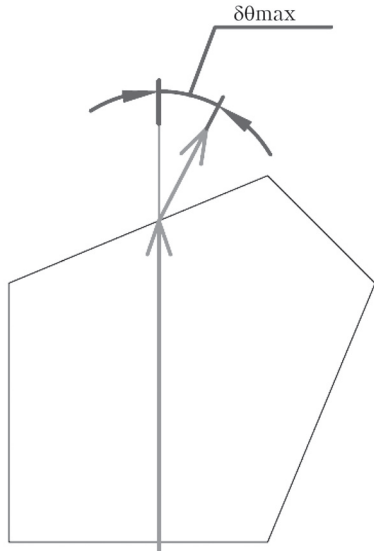


Рис. 7. Погрешность пентапризмы

Так как была выбрана стандартная призма, согласно паспорту погрешность ее изготовления составляет

$$\delta 45 = 1' \quad (9)$$

Тогда

$$\max(\delta\theta) \approx 3,5 \cdot 1' \approx 3,5' \quad (10)$$

При известных погрешностях неидеальной пентапризмы нетрудно определить их влияние на общую погрешность зеркально-призменного блока на основе двух пентапризм в виде технологической составляющей. Пусть отклонение от идеального положения луча, прошедшего первую пентапризму, равно  $\delta\theta_1$ , прошедшего вторую —  $\delta\theta_2$ . Они внесены неидеальностью взаимного расположения граней

и определяются по (8). На выходе второй пентапризмы отклонения возрастут. В итоге погрешность ВФ на выходе второй призмы

$$\delta_{\theta\Sigma} = \delta\theta_1 + \delta\theta_2 = 3,5' + 3,5' = 7' \quad (11)$$

Рассмотрим использование двух клиньев на рис. 8, вращаемых в противоположных направлениях на равные углы, в качестве компенсаторов при измерениях. При вращении клиньев угол отклонения рассматриваемой пентапризмы полностью компенсируется:

$$\delta_{ПП2ВФ} = 0 \quad (12)$$

Таким образом, суммарная погрешность изготовления

$$\delta_{ИВФ} = k \sqrt{F} = 0,000011'',$$

$$F = \delta_{УП2ВФ}^2 + \delta_{Н32ВФ}^2 + \delta_{В32ВФ}^2 + \delta_{ПП2ВФ}^2 - \delta_{УП2ВФ}^2 - 0,9\delta_{В32ВФ}^2 - \delta_{Н32ВФ}^2 \quad (13)$$

где  $k$  — коэффициент равномерного распределения вероятностей,  $k = 1,1$ . Слагаемые суммарной погрешности частично либо полностью вычитаются при обратном ходе контрольного пучка излучения оптической системы, представленной на рис. 3.

### 5.3. Погрешность определения координат контролируемой точки

Погрешность определения координат контролируемой точки задана погрешностью перемещения пентапризмы по шарико-винтовой передаче в соответствии с классом последней:

$$\delta_{ОК} = \frac{0,125}{2} = 0,0625 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad (14)$$

что эквивалентно погрешности ВФ

$$\delta_{ОКВФ} = 0,0043'' \quad (15)$$

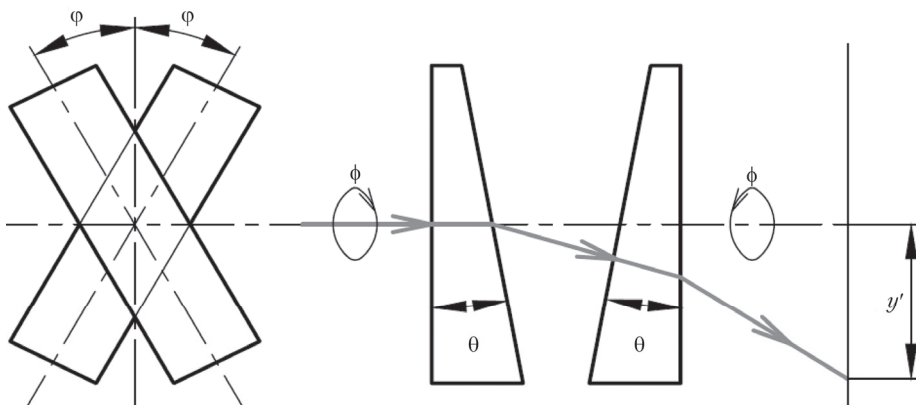


Рис. 8. Клиновые компенсаторы

#### 5.4. Другие источники погрешностей

Градиент температур телескопа и подкупольного пространства, приводящий к изменению температуры внутри оптических элементов. Прямоугольная призма, усеченная призма и пентапризмы изготовлены из материала ВК7, достаточно чувствительного к температурным градиентам. В [10] был проведен термический анализ, который показал, что при изменении температуры в призмах на  $0,01^\circ\text{C}$  луч отклоняется на

$$\delta_{\text{ППВФ}} = 0,00351'' \quad (16)$$

Примем погрешность ВФ из-за усеченной призмы и наклонного зеркала

$$\delta_{\text{УПВФ}} = \delta_{\text{ППВФ}} = \delta_{\text{НЗВФ}} = 0,00351'' \quad (17)$$

Суммарная погрешность из-за градиента температур

$$\delta_{\text{ТВФ}} = k\sqrt{F} = 0,00559'',$$

$$F = \delta_{\text{УПВФ}}^2 + \delta_{\text{НЗВФ}}^2 + \delta_{\text{ВЗВФ}}^2 + 2\delta_{\text{ППВФ}}^2 - 0,9\delta_{\text{НЗВФ}}^2 - \delta_{\text{НЗВФ}}^2 - \delta_{\text{УПВФ}}^2 \quad (18)$$

Плохое качество изображений из-за турбулентности атмосферы. Погрешности по спектральному составу в виду обращения ВФ резко уходят в высокочастотную часть спектра и легко отстраиваются от основного спектра погрешностей, поэтому принимаем

$$\delta_{\text{ТУРБВФ}} = 0 \quad (19)$$

Конвекционные потоки воздуха в трубе телескопа, попадающие в его оптическую часть. Конвекционные потоки внутри трубы телескопа минимизируются путем:

– более широкого открывания створок купола телескопа;

– закрытия трубы телескопа кожухом.

Принимаем

$$\delta_{\text{КОНВВФ}} = 0 \quad (20)$$

#### 5.5. Общая погрешность измерений

Так как законы распределения составляющих погрешностей неизвестны, то предполагается, что они подчиняются равномерному закону распределения как наихудшему из всех одномодальных законов распределения [11].

Тогда

$$\begin{aligned} \delta_{\Sigma\text{ВФ}} &= k\sqrt{\delta_{\text{ПВФ}}^2 + \delta_{\text{ИВФ}}^2 + \delta_{\text{КВФ}}^2 + \delta_{\text{ТВФ}}^2} = \\ &= 1,1\sqrt{0,0072^2 + 0,000011^2 + 0,0043^2 + 0,00559^2} = \\ &= 1,1\sqrt{0,000101578} = 0,011'', \end{aligned} \quad (21)$$

$$\delta_{\text{доп}} = \frac{\lambda}{20} 0,1 = 3,164 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad (22)$$

что эквивалентно допускаемой погрешности по ВФ

$$\delta_{\text{доп ВФ}} = 0,1'' \quad (23)$$

Так как

$$\delta_{\Sigma\text{ВФ}} < \delta_{\text{доп ВФ}}, \quad (24)$$

то метод соответствует установленной норме точности.

#### Заключение

Система контроля с использованием компьютерно-синтезированной голограммы не может быть использована в реальных условиях работы БТА, так как она сложна, громоздка и меняет физико-механические характеристики самого телескопа. Схема принципиально приемлема для использования в реальных условиях работы БТА.

Система контроля, основанная на методе псевдообращения, обладает высокой точностью, так как лучи проходят практически один и тот же путь и в обратном ходе погрешности, накапливаемые при прямом ходе, вычитаются. Предложенная система контроля, основанная на методе псевдообращения, благодаря простоте, надежности и высокой точности может быть реализована в крупнейшем в России телескопе.

Реализация этой системы контроля поможет определить пути модернизации БТА на базе, например, использования облегченных и сегментированных конструкций крупногабаритных зеркал [2, 6]. Авторы убеждены, что это позволит вернуть отечественный БТА в строй самых лучших и востребованных телескопов.

1. Сычев В.В., Короткова К.И. Измерение деформаций крупногабаритных зеркал в реальных условиях действия телескопа на примере телескопа БТА // Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19, № 7. С. 55–59.
2. Сычев В.В., Клем А.И. Проблемы адаптации в космическом телескопе обсерватории «Миллиметрон» // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 93–102. DOI: 10.15372/AOO20170113; Sychev V.V., Klem A.I. Adaptation problems in the space telescope of the Millimetron observatory // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 20, N 4. P. 389–398.
3. Полещук А.Г., Хомутов В.Н., Маточкин А.Е., Насыров Р.К., Черкашин В.В. Современные лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2016. № 2. С. 47–52.
4. Полещук А.Г., Корольков В.П., Насыров Р.К. Дифракционные оптические элементы для управления параметрами лазерного излучения и прецизионного контроля формы асферических поверхностей // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2015. № 2. С. 232–238.
5. Лукин А.В., Мельников А.Н., Скоцилов А.Ф., Пышинов В.Н. О возможностях лазерно-голографического контроля процессов сборки и юстировки составного главного зеркала телескопа на примере космической



- обсерватории «Миллиметр» // Опт. журн. 2017. Т. 15, № 12. С. 45–49.
6. Сычев В.В., Клем А.И. Вопросы метрологического обеспечения контроля пространственного положения элементов главного зеркала космического телескопа обсерватории «Миллиметр» // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 7. С. 587–592. DOI: 10.15372/AOO20170113; Sychev V.V., Klem A.I. Metrological control of the spatial positions of elements of the Millimetron telescope primary mirror // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 6. P. 676–681.
  7. Верхогляд А.Г., Михалкин В.М., Куклин В.А., Халиманович В.И., Чугуй Ю.В. Система контроля геометрических параметров центрального зеркала космического телескопа «Миллиметр» // Решетневские чтения. 2014. № 18. С. 61–63.
  8. Полещук А.Г., Насыров Р.К., Маточкин А.Е., Хомутов В.Н., Черкашин В.В., Качкин А.Е., Верхогляд А.Г., Касторский Л.Б., Михалкин В.М. Разработка интерференционно-голографической ИК системы контроля формы центрального параболического зеркала космического телескопа обсерватории «Миллиметр» // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2015. № 1. С. 51–58.
  9. Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении: монография. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2005. С. 364–367.
  10. Su P., Burge J.H., Cuerden B., Sasian J., Martin H.M. Scanning pentaprism measurements of off-axis aspherics // Proc. SPIE. V. 7018. DOI: 10.1117/12.789588.
  11. Крушняк Н.Т., Комшин А.С. Точностной анализ измерительных технологий: метод. пособие. Москва, 2012. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

*V.V. Sychev, A.I. Klem, K.I. Korotkova, O.I. Komarova.* **Ways to solve the problem of controlling the deformation of the primary mirror on BTA-6 telescope.**

The necessity and possible ways of monitoring the deformations of the primary mirror directly on the BTA telescope during its operation are discussed. The analysis of the most acceptable methods and control schemes is carried out. A scheme is proposed that implements the pseudo-reversal method, which simply and originally solves the control problem based on the experience of AST-1200 telescope with a composite primary mirror. The possible magnitude of the measurement errors of the system proposed for controlling the deformations of the primary mirror is estimated.