

УДК 520.2.03; 520.2.062; 681.2.082.5.001.63; 681.2.082.5.001.66

Алгоритм управления многоэлементным зеркалом на примере космического телескопа обсерватории «Миллиметрон»

В.В. Сычев¹, А.И. Клем^{1,2*}

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

²Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский пр., 53

Поступила в редакцию 10.04.2018 г.

Для создания эффективной единой системы многообъектного контроля в условиях ограничений бюджета ошибок рассмотрен и обоснован новый алгоритм управления многоэлементным зеркалом крупногабаритного телескопа в общем случае для большого количества стыков между рядами элементов. Предложен вариант реализации данного алгоритма в системе автоматической стабилизации космического телескопа «Миллиметрон». Проведены оценка погрешности взаимного положения элементов и поиск местоположения датчиков. Полученные результаты позволяют достаточно определенно говорить об успешной применимости данного алгоритма управления в составе контура адаптации крупногабаритных телескопов с многоэлементными составными главными зеркалами.

Ключевые слова: алгоритм управления, система автоматической стабилизации, составное главное зеркало, система контроля положения; control algorithm, system of automatic stabilization, composite primary mirror, position controlling system.

Введение

Совершенствование астрономических средств наблюдения направлено на получение максимально большого объема информации и связано с получением предельных по качеству изображений. Существующим уровнем технологии неопределимое качество не обеспечивается из-за ряда ограничений, связанных с опережающим характером помехового воздействия на качество изображения при увеличении диаметра составного главного зеркала (СГЗ) крупногабаритного телескопа.

Эффективность работы крупногабаритного космического телескопа (КТ) с СГЗ во многом зависит от того, насколько точно составные элементы (сегменты) СГЗ будут лежать на общей поверхности зеркала и удерживаться в этом положении при работе телескопа. Это определит количество информации, которое можно получить от наблюдаемого объекта в соответствии с инвариантом информативности для выбранной концепции построения телескопа и технологии его изготовления [1].

При развертывании телескопа в космосе неизбежно возникновение погрешностей в первоначальной установке составляющих элементов КТ, что приводит к ухудшению основных оптических характеристик телескопа. Решение данной проблемы возможно средствами адаптивной автоматической коррекции положения элементов на поверхности зеркала. Поскольку рабочая длина волны λ космического телескопа составляет $3 \cdot 10^{-4}$ м, то она предопределяет прецизионную точность установки элементов СГЗ.

Используемые методы контроля в системе управления составной поверхностью главного зеркала телескопа по существу ограничивают его эффективность. Под эффективностью подразумевается получение максимума информации из изображения, даваемого телескопом. Для многоэлементных систем, таких как СГЗ, требуется единая система контроля с высокой точностью, имеющая единую базу измерений и обладающая свойством одновременности оценки совокупного результата измерений положений элементов. К перспективной системе адаптивного управления (САУ) КТ предъявляются жесткие требования по нерасстраиваемости, чувствительности и помехозащищенности. Рассмотренные в [2] методы контроля

* Виктор Васильевич Сычев (viktorsychev@list.ru); Андрей Иванович Клем (black.n.hot.ice@gmail.com).

пространственного положения элементов телескопа в большинстве случаев имеют недостаточные для проекта КТ «Миллиметрон» пределы точности и помехоустойчивость. Что касается интерференционных методов, они оказываются непригодными по причине неработоспособности в условиях действия телескопа.

Решением проблемы контроля многоэлементного СГЗ может стать использование в САУ нерасстраиваемой схемы с применением псевдообращения волнового фронта (ВФ) регистрируемого КТ излучения [3]. Схема, реализованная на телескопах СТ-1200 (1978 г., СССР) и АСТ-1200 (1983 г., СССР), работает на трех стыках для семи элементов СГЗ, тогда как есть проекты телескопов, к примеру, АСТ-25 диаметром СГЗ 25 м, состоящий из 612 элементов, где стыков элементов больше. Поэтому существующая нерасстраиваемая схема требует доработки применительно к космическому телескопу диаметром 10 м.

1. Система адаптивного управления в условиях действия ограничений бюджета ошибок телескопа

Как было показано в работе [4], с увеличением диаметра телескопа усиливаются различные помеховые факторы, ухудшающие качество изображения из-за искажений, вносимых в ВФ излучения. Оценку влияния каждого из искажающих факторов дает бюджет ошибок. На рис. 1 представлен примерный бюджет ошибок для телескопов космического базирования.

Меры по борьбе с искажающими факторами распространяются главным образом на внутренние факторы, являющиеся результатом деятельности человека (физические, технологические, инструментальные и эксплуатационные). Они поддаются минимизации и адаптивной коррекции искажающего действия на качество изображения в процессе функционирования КТ.

Физические факторы включают в себя в основном дифракцию на оптических элементах, аберрации оптической системы и термодформации оптических элементов.

К технологическим факторам относятся ошибки высокоточной обработки и контроля крупногабаритных элементов при их изготовлении, их взаимной юстировке, а также влияние процессов старения на геометрию оптических элементов и элементов конструкции в условиях длительного пребывания в космосе при сверхнизких температурах.

Инструментальные и эксплуатационные факторы включают нестабильности характеристик элементов и оптической системы из-за недостаточной жесткости конструкции, разъюстировки, ошибок ведения оси визирования следящим приводом, ошибок союстировки элементов компенсирующими устройствами.

Общая ошибка, исходя из допущения, что составляющие ошибок не зависят друг от друга и имеют равновероятностный характер проявления [4], будет определяться как

$$\Delta_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 =$$

$$= \Delta_{\text{АБ}}^2 + \Delta_{\text{ИЗГ}}^2 + \Delta_{\text{САУ}}^2 + \Delta_{\text{ЮСТ}}^2 + \Delta_{\text{ДИФ}}^2 + \Delta_{\text{ТД}}^2 + \Delta_{\text{РЮ}}^2, (1)$$

где $\Delta_{\text{АБ}}$ — ошибка, обусловленная аберрациями оптической системы; $\Delta_{\text{ИЗГ}}$ — ошибки изготовления оптики; $\Delta_{\text{САУ}}$ — ошибки САУ; $\Delta_{\text{ЮСТ}}$ — ошибки юстировки и союстировки; $\Delta_{\text{ДИФ}}$ — ошибки из-за дифракции на элементах СГЗ; $\Delta_{\text{ТД}}$ — ошибки из-за термодформации элементов конструкции; $\Delta_{\text{РЮ}}$ — ошибки из-за разъюстировки.

Эффективность использования САУ из работы [1] выше при меньшем значении суммарной ошибки ВФ. Отсюда следует, что необходимо использовать средства минимизации искажений, чтобы получить максимальную эффективность адаптивной коррекции искаженного ВФ. Минимизация искажений ВФ может производиться либо полным исключением

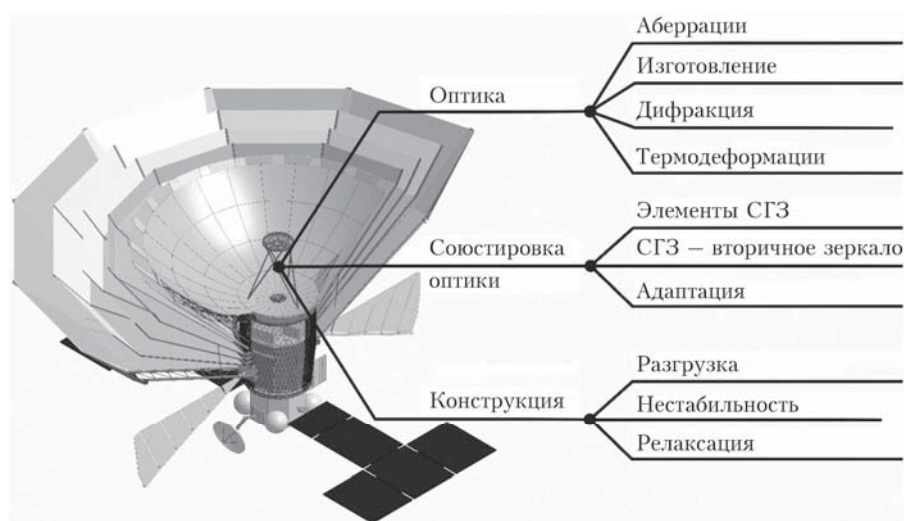


Рис. 1. Бюджет ошибок космического телескопа «Миллиметрон»

некоторых искажающих факторов, например устранением фазового корректора в выходном зрачке телескопа, либо уменьшением влияния каждого из факторов до величины, соответствующей дифракционному пределу оптики телескопа. В этом случае цена вклада каждого из факторов в суммарную ошибку искажений ВФ снижается, а допуск на величину влияния этих факторов остается в разумных пределах [5].

На бюджете ошибок благоприятно сказывается упрощение оптической схемы КТ с отказом от дополнительных оптических элементов, являющихся источниками собственных искажений. Технические решения в части оптики, конструкции, датчиков и приводов должны быть простыми, чтобы не вносить новые искажения. Простые технические решения, в свою очередь, благоприятно отражаются на надежности работы телескопа в условиях космоса.

Во избежание неоправданных осложнений технических решений в проекте КТ в качестве критерия эффективности выбран инвариант информативности из [1], характеризующий рациональность концептуального построения телескопа:

$$\xi_{\text{ТЕОР}} = 0,545\tau_{\text{ОПТ}}\pi D^4 \text{tg}^2 W/\lambda, \quad (2)$$

где $\xi_{\text{ТЕОР}}$ — инвариант информативности телескопа дифракционного качества; $\tau_{\text{ОПТ}}$ — коэффициент пропускания оптической системы телескопа, характеризующий потери информации в оптической системе; D — диаметр главного зеркала телескопа, м; W — угловое поле, рад; λ — длина волны излучения, м.

Определяющий искажающий фактор в телескопе космического базирования — инструментальная погрешность КТ, обусловленная в первую очередь точностью формы отражающей поверхности всего СГЗ. В [3] для контроля соблюдения заданной точности формы СГЗ в реальном времени предлагается использовать двухуровневую САУ. На первом уровне поддерживается исходная юстировка и проводится в реальном времени динамическая союстировка силами системы автоматической стабилизации (САС). На втором уровне решается автономная задача контроля СГЗ: для точного наведения на объект наблюдения проводится непрерывная доюстировка динамически съюстированных на первом уровне системой автоматической стабилизации СГЗ и вторичного зеркала. Таким образом, на первом этапе производится внутренняя юстировка телескопа при помощи САС, а на втором САС отключается и по сигналу с анализаторов изображения включается более точная доюстировка по внешнему опорному источнику (звезде).

Теперь, когда определена архитектура САУ КТ, требуется разработка алгоритма автоматической выверки и контроля положения элементов СГЗ телескопа (т.е. приведение его в рабочее состояние) в условиях эксплуатации, обеспечивающего работоспособность и оптимальную структуру управления САУ. Другими словами, алгоритм управления должен обеспечивать контроль СГЗ и оптической системы в целом и минимизировать любые погрешности, чтобы уложиться в бюджет ошибок КТ.

2. Алгоритм управления многоэлементным составным главным зеркалом

Рассмотрим алгоритм работы САС в общем виде для большого числа элементов зеркала на примере панельной структуры поверхности СГЗ, составленной из гексагональных элементов $a_{i,j}$ (рис. 2, а). Гексагональные элементы получили широкое распространение в телескопостроении ввиду высокой технологичности их изготовления [6]. Ярким примером использования многоэлементного состоящего из гексагональных элементов главного зеркала является проект телескопа АСТ-25 с 612 элементами СГЗ [7].

Выберем стационарный элемент $a_{0,0}$ в качестве первичной базы измерений и три главных направления относительно базы: элементы с $j = ki + 1$, где множитель k принимает значения 0 и 3 для первого направления, 1 и 4 — для второго, 2 и 5 — для третьего. Примем за положительное направление обхода лепестковые сегменты (ЛС) при их угловой коррекции в окружном направлении против часовой стрелки.

В общем виде алгоритм подразумевает две стадии. На первой стадии элементы, принадлежащие главным направлениям $ki + 1$, 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 ускорения юстировки, выравнивание производится одновременно от всех главных направлений начиная с $j = ki + 2$ элементов и далее против часовой стрелки. Коррекция элементов на второй стадии производится путем наклона элементов относительно их продольной оси симметрии до момента равенства сигналов датчиков, находящихся на стыках между корректируемым и соседними элементами в пределах ряда i . Далее принимаем скорректированные элементы ряда i за новую базу измерений, и цикл повторяется с элементами ряда $i + 1$.

Разберем действие алгоритма подробнее на примере $i = 0...3$. Для $i = 1$ все элементы ряда — главные. После коррекции углового положения в главных направлениях относительно первичной базы $a_{0,0}$ на второй стадии производится коррекция взаимного положения элементов в ряду. Далее принимаем скорректированные элементы первого ряда с $a_{0,0}$ за вторичную базу измерений и переходим ко второму ряду элементов. Во втором ряду цикл повторяется. На второй стадии производится коррекция элементов $j = ki + 2$ относительно главных $ki + 1$ элементов. Для $i = 3$ аналогичная коррекция производится последовательно: сначала для $j = ki + 2$, затем для $j = ki + 3$ элементов. Таким образом, мы движемся от главных элементов последовательно по элементам ряда, например против часовой стрелки.

Выше было отмечено, что наибольший вклад в бюджет ошибок вносит несоблюдение точности формы отражающей поверхности всего СГЗ. В общем

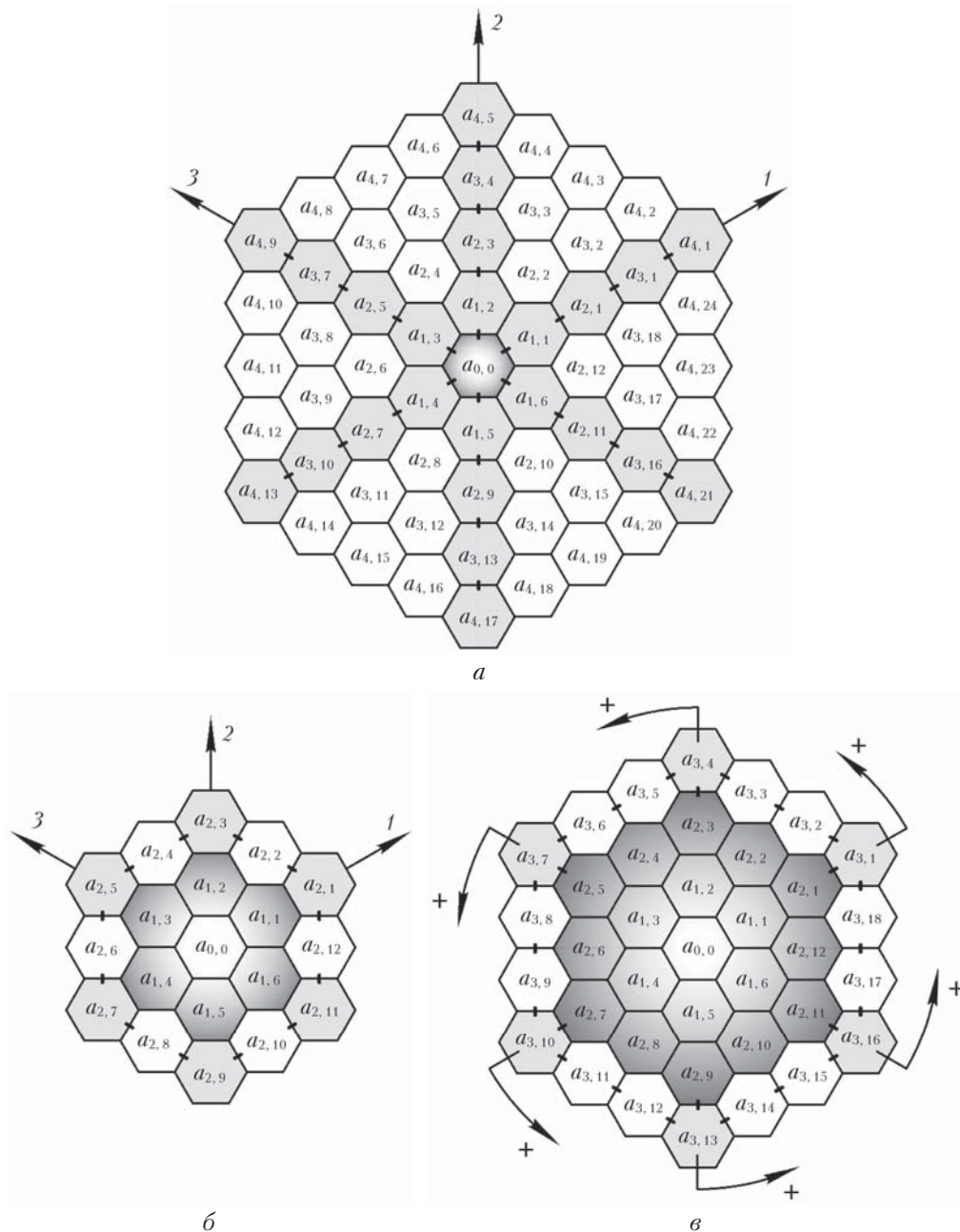


Рис. 2. Общий вид поверхности СГЗ, составленной из гексагональных элементов $a_{i,j}$ (а), где i – порядковый номер ряда элементов, $i = 1..4$; j – порядковый номер элемента в соответствующем ряду, $j = 1..6i$. Реализация алгоритма управления многоэлементным объектом с большим числом стыков для $i = 2$ (б) и $i = 3$ (в). Градиентной черно-белой заливкой отмечена единая первичная база измерений $a_{0,0}$, серым – элементы указанных стрелками главных направлений начальной юстировки относительно единой базы $j = ki + 1$, где $k = 0$ или 3 – первое, $k = 1$ или 4 – второе, $k = 2$ или 5 – третье главные направления. Белым отмечены элементы последующей юстировки поочередно в пределах ряда в направлении, указанном стрелками

виде эффективность работы алгоритма САУ определяется геометрией элементов СГЗ, наиболее близко воспроизводящей идеальный параболоид, что достигается минимумом целевой функции вида

$$S = \sum_m (x_{\text{ИЗМ}} - x_{\text{ТЕОР}})_m^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где S – целевая функция эффективности работы САУ на СГЗ; m – номер элемента СГЗ; $x_{\text{ИЗМ}}$ – измеренное положение m -го элемента СГЗ; $x_{\text{ТЕОР}}$ – невозмущенное положение m -го элемента СГЗ.

Оценка отклонения положения элементов телескопа от идеального производится с помощью сравнения целевой функции с минимально достижимым

значением этой функции, исходя из бюджета ошибок телескопа.

3. Алгоритм управления составным главным зеркалом космического телескопа «Миллиметр»

Как было отмечено в разд. 1, бюджет ошибок ограничен числом элементов главного зеркала КТ. Контролировать СГЗ при большом количестве его элементов намного сложнее. Чтобы уложиться в допустимый бюджет ошибок и упростить схему контроля СГЗ, целесообразно разбить главное зеркало на стационарный центральный сегмент (ЦС) и жесткие ЛС, коррекция положения которых осуществляется САС. В таком случае достаточно проводить юстировку с базой (ЦС) в трех точках жесткого ЛС, однозначно определяющих его пространственное положение.

В качестве частного случая применения вышеуказанного алгоритма рассмотрим СГЗ, выполненное в виде параболоида вращения, который составлен из ЦС и 24 ЛС. Рассматриваемая структура поверхности главного зеркала показана на рис. 3, а. Имеется неразрезной ЦС: центральная стационарная чаша для крепления опор СГЗ, радиус которой принят равным 1,5 м. Угловые границы лепестков в данном примере начинаются с 0° и далее идут с шагом 15°, т.е. первому лепестку параболоида соответствуют границы от 0 до 15°. Положительное направление отсчета принято против часовой стрелки.

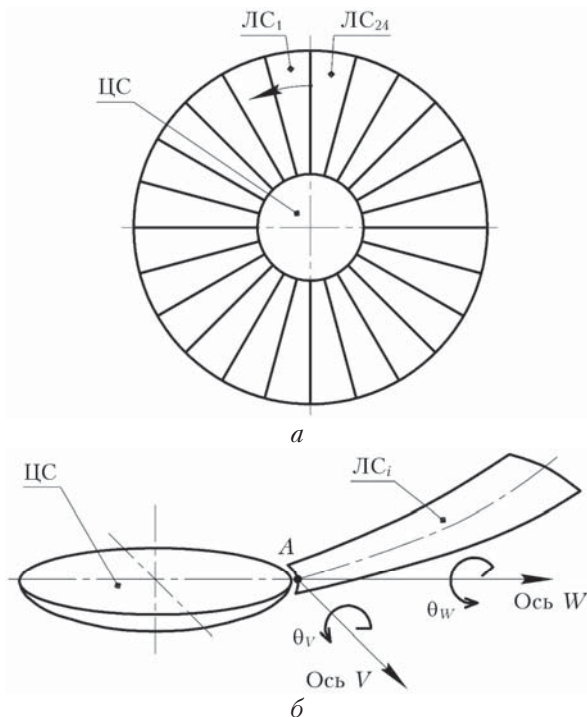


Рис. 3. Лепестковая структура поверхности СГЗ (а) и положение осей вращения лепестков СГЗ V и W (б) (A – точка расположения стыковочного датчика на продольной оси симметрии ЛС)

Искажения поверхности, связанные с наличием разрезных лепестков главного зеркала, проявляются при их неполном развертывании на орбите. Причина неполного развертывания лепестков главного зеркала может быть связана с ошибками работы привода, одинаковым образом соединенного с каждым из лепестков поверхности. В результате каждый из лепестков ориентируется таким образом, что поверхность в целом уже не является параболоидом вращения. При этом ошибка ориентирования различных лепестков оказывается практически одинаковой, что приводит к регулярному возмущению поверхности исходного рефлектора и значительно влияет на качество изображения (размер дифракционного пятна) в фокальной плоскости КТ.

Рассмотрим ошибки ориентирования лепестков при их вращении относительно двух осей V и W на углы θ_V и θ_W соответственно по отношению к идеальному (невозмущенному) положению. Расположение осей вращения лепестков пояснено на рис. 3, б.

Считаем, что форма поверхности сегментов главного зеркала недеформируема (в том числе под действием температуры и нагрузок), а ВФ, создаваемые сегментами СГЗ, синфазны и образуют единый ВФ составного зеркала. Также примем, что технологические погрешности в смещениях и наклоне элементов СГЗ распределены по нормальному закону и при этом дисперсии всех смещений одинаковы.

Определим допустимые значения линейного смещения Δl_k и наклона θ каждого из m элементов проектируемого зеркала. Из теории расчета допусков на расположение и формы поверхностей элементов составного зеркала [8]:

$$\Delta l_k = \pm \frac{\lambda}{20} \cdot \sqrt{\frac{m}{m-1}}; \quad \theta_x = \theta_y = \pm \frac{\lambda}{5D_k} \cdot \sqrt{\frac{m}{m-1}}, \quad (4)$$

где λ – длина волны рабочего излучения; D_k – размер элемента в соответствующем направлении.

Для многоэлементных систем при $m \geq 5$ можно положить

$$\Delta l_k \cong \pm \frac{\lambda}{20}; \quad \theta_x = \theta_y \cong \pm \frac{\lambda}{5D_k};$$

$$\theta = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2} = \pm \frac{\lambda}{3,5D_k}. \quad (5)$$

В нашем случае $\Delta l_k = \pm 0,015$ мм; $\theta = \pm 2,14 \cdot 10^{-5}$ рад.

Как показано в [8, 9], допустимое отклонение $W_{\text{СКО}}$ формы поверхности каждого из элементов СГЗ такое же, как и допустимое отклонение поверхности всего главного зеркала, т.е. порядка $\lambda/14$ в среднеквадратическом значении. В нашем случае допуск $W_{\text{СКО}} = 0,021$ мм.

Рассмотрим, каким образом может быть обеспечена заданная форма СГЗ, т.е. какие условия необходимо выполнить, чтобы сборка элементов приобрела точную форму параболоида вращения. При выверке и фиксации с расчетной точностью взаимного положения стыков сегментов на этапе юстировки СГЗ при его изготовлении повторная сборка

конструкции зеркала, обеспечивающая точность сопряжений его сегментов, будет воспроизводить исходную форму СГЗ. При сборке СГЗ ЛС сопрягаются с соседними сегментами по трем стыкам: по одному с базовым ЦС и по двум с соседними ЛС, образуя жесткую фигуру. Таким образом, для недеформируемых ЛС, имеющих одну общую базу измерений (круговой ЦС), целесообразна схема коррекции положения элементов СГЗ, основанная на методе трех точек.

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. 4). Для удобства будем называть данные точки опорными. Опорные точки необходимо позиционировать по трем линейным координатам при сборке конструкции СГЗ ($A \equiv A', B \equiv B'$ и $C \equiv C'$), а при дальнейшей работе КТ достаточно позиционировать опорные точки лишь по углу между соседними сегментами. Для опорных точек A_i это угол между ЦС и ЛС $_i$ в плоскости меридионального направления ρ СГЗ, для опорных точек B_i — угол между ЛС $_{i-1}$ и ЛС $_i$ в плоскости окружного направ-

ления φ СГЗ, для опорных точек C_i — угол между ЛС $_i$ и ЛС $_{i+1}$ в плоскости окружного направления φ СГЗ, где $i = 1 \dots 23$ (ЛС $_{24}$ замыкается на первый ЛС). Другими словами, для точного воспроизведения формы СГЗ сопрягаемые опорные точки должны иметь одинаковые нормали ($n_A \equiv n_{A'}, n_B \equiv n_{B'}$ и $n_C \equiv n_{C'}$).

На аппаратном уровне алгоритм управления элементами СГЗ должен обеспечивать управление системой соответствующих приводов, в цепи обратной связи которой используется координатная информация абсолютных преобразователей угловых смещений взаимного положения точек A, A' и B, B' и C, C' . При этом желательно, чтобы конструктивное исполнение системы выверки и собственно ее алгоритм по возможности удовлетворяли принципу независимости юстировки зеркала, согласно которому исключение или минимизация одной из первичных ошибок не должны вносить изменения в величину других устраняемых погрешностей.

В ходе анализа типа преобразователя (датчика), который в наибольшей мере удовлетворяет требованиям вышеуказанной задачи, использовались следующие основные критерии:

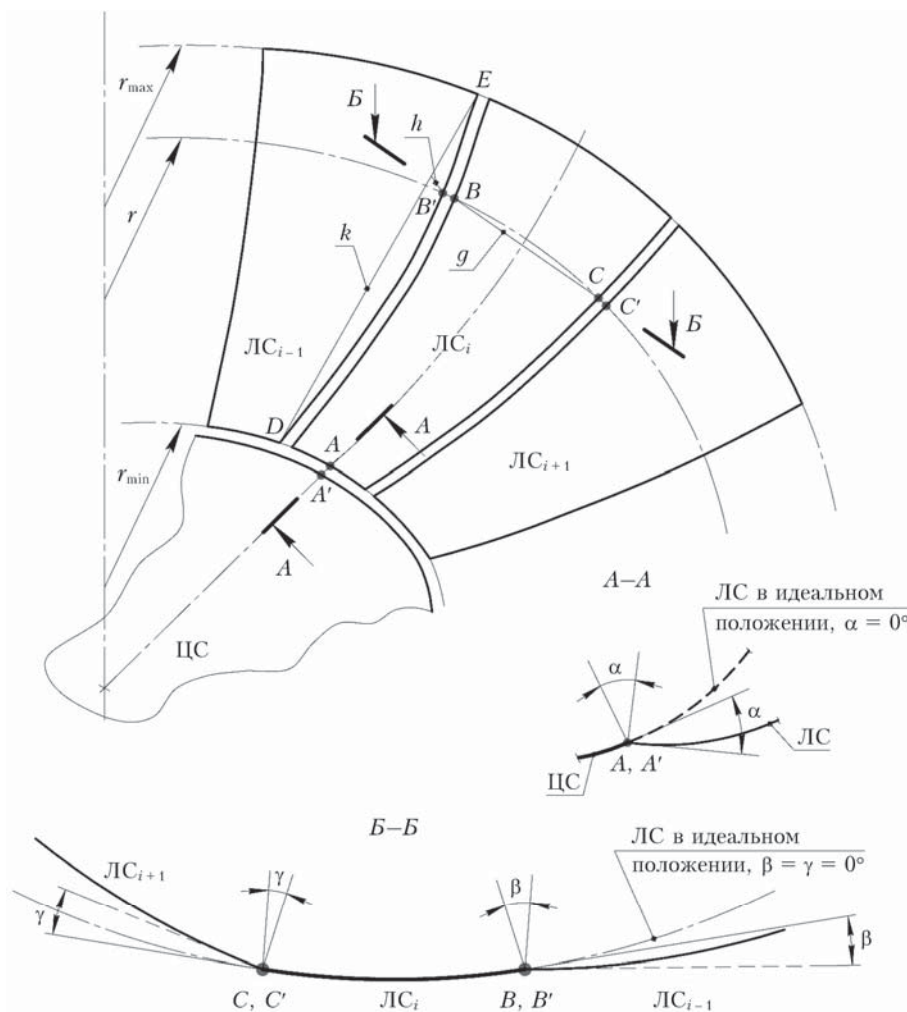


Рис. 4. Схема сопряжения сегментов СГЗ

- бесконтактный принцип работы (допускается не влияющий на точность измерений зазор между измерительной считывающей головкой и мерой);

- обеспечение необходимой точности;
- возможность координатных (абсолютных) измерений, а не только перемещений или поворотов;
- высокая надежность;
- быстродействие;
- компактность.

В целях контроля элементов СГЗ при наземной отработке и предварительной юстировке КТ вышеуказанным критериям удовлетворяют абсолютные прецизионные оптические преобразователи для условий сверхвысокого вакуума серии RESOLUTE компании Renishaw. В частности, доработанные датчики серии RESOLUTE используются компанией SYMETRIE для космического аппарата MTG в измерениях при проведении наземных испытаний и для юстировки изделия в сборе [10].

На этапе эксплуатации телескопа в космических условиях возникает необходимость в максимально простом, неразстраиваемом, надежном и технологичном датчике. Таковым требованиям могут удовлетворять электронные оптические усилители с использованием метода псевдообращения контрольного сигнала, устанавливаемые на стыках элементов СГЗ [11].

4. Оценка погрешности позиционирования элементов составного главного зеркала и местоположения чувствительных датчиков

При реализации схемы сопряжения элементов СГЗ весьма затруднительно расположить точки съема информации о пространственном положении элементов на поверхности зеркала. Данная проблема связана и с конструктивным оформлением датчиков, согласованным с местом их встраивания. Тем не менее это не является препятствием для реализации рассмотренной в разд. 3 схемы. Точки A , B и C могут быть перенесены эквидистантно от поверхности зеркала.

Оценим погрешность, с которой допустимо осуществлять взаимное позиционирование элементов для обеспечения требований, описываемых выражениями (4) и (5) [8].

Если элементы не являются взаимно связанными, а находятся на общем жестком основании, относительно которого осуществляется коррекция их положения, а в цепи обратной связи используются датчики, работающие от одной общей базы, то требования на суммарную погрешность измерений и отработку привода для каждого элемента определяются выражениями (4) и (5). Данные условия выполняются для опорных точек $A-A'$, поэтому можем считать, что $\Delta l_k = \Delta x_A = \pm 0,015$ мм.

Для точек B , B' и C , C' такой подход некорректен ввиду отсутствия общей базы измерений и влияния каждой погрешности на общую форму главного зеркала.

Рассмотрим, как изменяется форма зеркала при наличии погрешностей в совмещении составляющих его элементов.

Пусть совмещение в каждой из двух зон опорных точек B , B' и C , C' осуществляется с предельной погрешностью, равной Δx_B .

Рассмотрим случай, когда точки B_i находятся на одной окружности радиусом r , принадлежащей поверхности параболоида главного зеркала (см. рис. 4), и имеется погрешность их совмещения вдоль этой окружности. Общее число зон совмещения равно количеству элементов m .

Так как погрешности Δx_B некоррелированы, суммарная погрешность от их действия составит $\Delta L_r = \pm \Delta x_B / \sqrt{m}$. Значение ΔL_r равно изменению длины образующей параболоид окружности, что приведет к изменению ее радиуса на величину

$$\Delta r = \pm \frac{\Delta L_r}{2\pi} = \pm \frac{\Delta x_B}{2\pi\sqrt{m}}. \quad (6)$$

Заметим, что Δr не зависит от радиуса окружности r .

Если положить $\Delta x_B = 0,1$ мм, то получим $\Delta r = \pm 0,00325$ мм.

Сравнивая данное значение с величиной $\Delta l_k = \pm 0,015$ мм, видим, что допустимая деформация волнового фронта более чем в 5 раз превышает деформацию, вызванную действием рассмотренной погрешности.

Обратимся теперь к действию погрешностей несовмещения опорных точек A , A' в плоскостях соответствующих стыков ЛС с ЦС элементами СГЗ. Наибольшее влияние оказывает погрешность несовмещения, когда оптическая поверхность одного из элементов как бы приподнимается (или опускается) относительно поверхности соседнего элемента. Допустимая величина такой погрешности, очевидно, может быть оценена на основании выражения (4) и соответствует значению $\Delta l_A = \pm 0,015$ мм.

Погрешности $\Delta x_B = \Delta x_C$ несовмещения опорных точек в зоне B , B' и C , C' приводят к повороту (наклону) элемента $ЛС_i$ вокруг своей продольной оси симметрии. Действие этого наклона подпадает под требование допуска (5), где значение D_k берется равным значению наибольшей ширины элементов СГЗ. Однако вследствие того, что наклоны элементов в меридиональном направлении взаимосвязаны, требование (5) необходимо заменить более жестким требованием, ограничивающим выход за предельное значение накопленной на всех элементах ошибки формы Δw_m .

Последовательное вероятностное сложение действий ошибок углового позиционирования $\Delta \psi = \Delta x_B / h$ элементов (см. рис. 4) по всей окружности радиуса r_B общей апертуры, содержащей рассматриваемые зоны совмещения, позволяет сформулировать следующее требование к допустимой величине погрешности Δx_C на этом радиусе [9]:

$$\Delta x_C = \frac{\Delta w_m \cdot h \cdot \sqrt{m}}{2r_C \cdot \sin(\pi \cdot m^{-1}) \cdot m}, \quad (7)$$

где $2r_C \cdot \sin(\pi \cdot m^{-1}) = g$ – длина хорды (см. рис. 4); h – расстояние от точки C до линии k .

Для точки E , соответствующей крайней апертурной зоне зеркала радиусом r_{\max} (в нашем случае $r_{\max} = 5000$ мм), длина хорды будет больше и, следовательно, допуск будет жестче в $k = r_C/r_{\max}$ раз. Этот допуск $(\Delta x_C)_{\text{доп}}$ и будет определяющим.

Окончательно получим

$$(\Delta x_C)_{\text{доп}} = \frac{\Delta \omega_m \cdot h \cdot \sqrt{m}}{2r_{\max} \cdot \sin(\pi \cdot m^{-1}) \cdot m}. \quad (8)$$

Выбрав точки D и E на параболической поверхности зеркала $f(x) = \sqrt{2px}$, где p – фокальный параметр, $p = 4800$ мм, запишем уравнение прямой k в виде

$$y(x) = f(x_1) + \frac{(x - x_1)[f(x_2) - f(x_1)]}{x_2 - x_1}, \quad (9)$$

где $f(x_1)$ и $f(x_2)$ – расстояние точек D и E от оси зеркала соответственно, $f(x_1) = r_{\min}$, $f(x_2) = r_{\max}$. Согласно оптической схеме телескопа $p = 4800$ мм, $r_{\min} = 1500$ мм, $r_{\max} = 5000$ мм; x_1 и x_2 определяют из уравнения параболы (рис. 5).

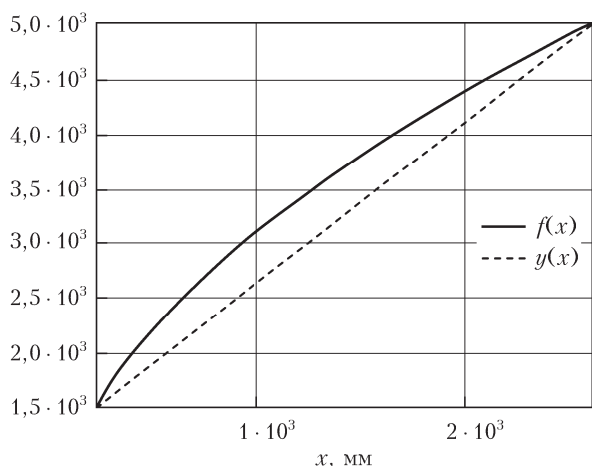


Рис. 5. Общий вид прямой k (штриховая линия) на параболическом ЛС (сплошная линия)

Пусть точки B и C удалены от оси соответственно на величины $f(x_1) = 250$ мм и $f(x_2) = 2600$ мм, т.е. расположены почти по краям параболоида вращения ЛС, тогда легко вычислить значения стрел $h(x)$ (таблица и рис. 6):

$$h(x) = (f(x) - y(x)) \cdot \arctg\left(\frac{y(x_2) - y(x_1)}{x_2 - x_1}\right). \quad (10)$$

Для наглядности внесем результаты в таблицу.

Зону опорных точек B , C целесообразно выбирать в точке параболы, соответствующей наибольшему значению стрелы $h(x)$ (выделено серым в таблице). Тем самым после фиксации взаимного положения элементов достигается максимальная жесткость конструкции СГЗ.

Таким образом, если каждый лепесток зеркала выполнить как единое целое, допустимое значение на-

Табуляция функции стрел $h(x)$

x , мм	$h(x)$, мм	x , мм	$h(x)$, мм
250	14,641	2000	153,559
500	167,379	2250	95,558
750	236,412	2500	29,484
1000	262,116	2520	23,887
1106	264,09	2540	18,246
1250	260,13	2560	12,563
1500	238,476	2580	6,837
1750	201,917	2600	1,069

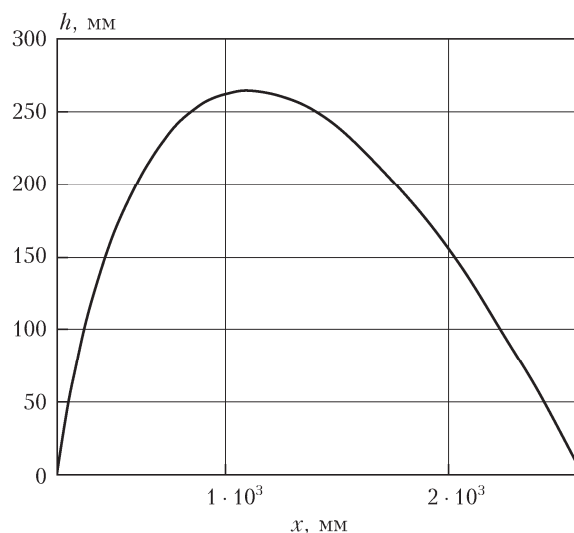


Рис. 6. Зависимость величины стрел $h(x)$ от местоположения точек B и C на стыках между ЛС (величина x)

копленной ошибки формы зеркала принять равным $\Delta \omega_m = 3W_{\text{СКО}} = 0,063$ мм, а значение стрелы $h = 264$ мм, то получим $(\Delta x_C)_{\text{доп}} = 0,0026$ мм.

Приведенные выше расчеты носят оценочный характер и будут уточнены в процессе дальнейшей работы при принятии конкретных конструкторских решений.

Заключение

Разбиение главного зеркала на большое количество элементов в общем случае приводит к значительному усложнению схемы контроля положения элементов СГЗ, что делает практически невозможной необходимую автоматическую стабилизацию юстировки элементов, предваряющую адаптивное управление. Предложенный алгоритм управления на примере КТ «Миллиметрон» позволяет решить проблему за счет упрощения схемы контроля СГЗ путем разбиения главного зеркала на базовый ЦС и жесткие ЛС. Предложена схема съема информации о пространственном положении ЛС для союстировки их с ЦС в трех точках, однозначно определяющих их пространственное положение.

1. Сычев В.В. К вопросу об эффективности крупногабаритных оптических телескопов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 1. С. 101–113. DOI: 10.7463/0115.0754723.

2. Сычев В.В., Клем А.И. Проблемы адаптации в космическом телескопе обсерватории «Миллиметрон» // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 93–103. 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. 30, N 4. P. 389–398.
3. Васильев А.С., Высоцкий Ю.П., Гутников Б.Я., Духопел И.И., Евдокимов Е.Б., Крюков В.И., Путиловский М.Ю., Рябова Н.В., Стешенко Н.В., Сычев В.В., Тарасов Г.П., Устинов Н.Д., Чемоданов Б.К. Астрономический телескоп АСТ-1200 с составным главным зеркалом / под общ. ред. Н.Д. Устинова // Опт.-механ. промышл. 1985. № 11. С. 22–25.
4. Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2005. 464 с.
5. Сычев В.В. Основные постулаты адаптивной коррекции искажений волнового фронта в крупногабаритных оптических системах // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 3. С. 310–328. DOI: 10.7463/0314.0700488.
6. Сычев В.В. Технологические аспекты создания крупногабаритных оптических телескопов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 2. С. 269–285. DOI: 10.7463/0215.0755509.
7. Сычев В.В. Новые технологии изготовления крупногабаритных облегченных конструкций // Конверсия в машиностроении. 2002. № 6. С. 28–36.
8. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. 221 с.
9. Рябова Н.В., Ган М.А. Исследование качества изображения, создаваемого фазированным составным зеркалом // Опт.-механ. промышл. 1981. № 8. 25 с.
10. Компания SYMETRIE для своих гексаподов выбирает усовершенствованные абсолютные энкодеры RESOLUTE™ компании Renishaw. URL: <http://www.renishaw.ru/ru/symetrie-hexapods-choose-renishaws-advanced-resolute-absolute-encoders-38342> (дата обращения: 6.12.2017).
11. Федотов Г.И., Ильин Р.С., Новицкий Л.А. Лабораторные оптические приборы. М.: Машиностроение, 1979. 446 с.

V.V. Sychev, A.I. Klem. Algorithm for controlling a multi-element mirror using the space telescope of the “Millimetron” observatory as an example.

To create an effective unified control system for several objects in the conditions of error budget constraints, a new algorithm for controlling a multi-element mirror of a large telescope is generally considered and justified in the general case for a large number of joints between element rows. A version of this algorithm is suggested in the autostabilization system of Millimetron. An error in the relative positioning of the elements and the search for the location of the sensors was evaluated. The results obtained make it possible to state quite accurately the successful applicability of this control algorithm as a part of the contour of adaptation of large telescopes with multi-element primary mirrors.