

Высокоточная двухступенчатая система контроля положения зеркальных элементов космической обсерватории «Миллиметр»

П.С. Завьялов
Конструкторско-технологический
институт научного
приборостроения СО РАН
Новосибирск, Россия
zavyalov@tdisie.nsc.ru

С.Н. Макаров
Конструкторско-технологический
институт научного
приборостроения СО РАН
Новосибирск, Россия
makarovsn@tdisie.nsc.ru

М.Ф. Ступак
Конструкторско-технологический
институт научного
приборостроения СО РАН
Новосибирск, Россия
stupak@tdisie.nsc.ru

А.Г. Верхогляд
Конструкторско-технологический
институт научного
приборостроения СО РАН
Новосибирск, Россия
verhog@tdisie.nsc.ru

А.Г. Елесин
Конструкторско-технологический
институт научного
приборостроения СО РАН
Новосибирск, Россия
elesin.andrei@tdisie.nsc.ru

М.А. Завьялова
Конструкторско-технологический
институт научного
приборостроения СО РАН
Новосибирск, Россия
mzav@tdisie.nsc.ru

М.С. Кравченко
Конструкторско-технологический
институт научного
приборостроения СО РАН
Новосибирск, Россия
max@tdisie.nsc.ru

Д.С. Скоков
Конструкторско-технологический
институт научного
приборостроения СО РАН
Новосибирск, Россия
15823@mail.ru

Е.В. Власов
Конструкторско-технологический
институт научного
приборостроения СО РАН
Новосибирск, Россия
vlasov@tdisie.nsc.ru

А.В. Ермоленко
Конструкторско-технологический
институт научного
приборостроения СО РАН
Новосибирск, Россия
eralexx@tdisie.nsc.ru

Аннотация—В работе рассматриваются вопросы разработки высокоточной системы контроля положения элементов оптической системы обсерватории "Миллиметр". Показана необходимость применения двух измерительных каналов. В результате моделирования показано, что точность измерения углового положения панелей главного зеркала телескопа составит около 0,3".

Ключевые слова— обсерватория «Миллиметр», лазерный дальномер, метод ножа Фуко.

1. ВВЕДЕНИЕ

Обсерватория «Миллиметр» предназначена для использования в космическом пространстве. Имея диаметр главного зеркала 10 м, она не может быть доставлена на орбиту в развёрнутом состоянии в силу известных ограничений по габаритам ракет-носителей. Поэтому, конструкция такого телескопа является трансформируемой, а главное зеркало будет состоять из 96 сегментов.

После выведения телескопа на орбиту и его раскрытия необходимо обеспечить высокое качество изображения в оптической системе телескопа. Для этого требуется юстировка каждого оптического элемента таким образом, чтобы все сегменты главного зеркала работали как единое зеркало. Данная работа посвящена разработке опытного образца системы контроля зеркальной системы обсерватории «Миллиметр», предназначенного для высокоточного и надёжного контроля элементов

зеркальной системы телескопа после его выведения и раскрытия в космическом пространстве.

2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ

Главная задача, решаемая при создании и эксплуатации телескопов с составным зеркалом, это обеспечение высокого качества изображения. Для этого требуется разработка надежных методов контроля положения используемых зеркальных элементов. Передовым инструментом в данной области является James Webb Space Telescope (JWST) [1, 2], запущенный в декабре 2021 г. Его главное зеркало состоит из 18 сегментов и имеет диаметр 6,5-метров. Для первоначальной юстировки такой оптической системы на орбите будет применяться метод настройки по изображению точечного источника, в котором путем небольших смещений зеркал сначала будут идентифицироваться, а затем фокусироваться и сводиться в одну точку пятна от отдельных элементов [3, 4]. Обнаружить, идентифицировать и переместить блики от сегментов его зеркала долгий и сложный процесс. Выполнить подобную задачу с главным зеркалом обсерватории «Миллиметр» очень трудоемко, так как сложно разделить блики от 96 сегментов (Рис. 1).

Поэтому, в соответствии со спецификой решаемой задачи (большой динамический диапазон контролируемых параметров $\geq 10^6$), разработан оригинальный подход [5]. Система из двух самостоятельных измерительных каналов –

предварительной настройки (первый канал) на базе лазерного 3D-сканера [6] и точной настройки (второй канал) – анализатора [7]. Необходимость применения двух методов измерения обусловлена низкой точностью механических систем раскрытия телескопа в космическом пространстве. Анализатор позволит получить необходимое качество оптической системы телескопа, но для его работы необходимо получить пятно рассеяния диаметром менее 50 мм. Такую точность раскрытия не обеспечивает механика телескопа. Поэтому для предварительной настройки зеркал телескопа должна использоваться измерительная система, обладающая большим диапазоном измерений – лазерный дальномер-интерферометр с модуляцией длины волны излучения.

Для измерения первым каналом положения зеркальных элементов на каждом из них будут расположены контрольные метки в виде зеркальных сфер. Будут определены их угловые координаты и относительное положение по углу в собственной системе координат до запуска телескопа в космическое пространство и после выведения на заданную орбиту. В результате будут получены отклонения каждой контрольной метки от расчетного положения, которые будут скомпенсированы механикой телескопа.

При испытаниях в нормальных климатических условиях 3D-сканер продемонстрировал следующие характеристики:

- Дальномерный канал: при контроле положения метки на расстоянии 10 м разрешение сканера (среднеквадратичное отклонение) составляло менее 0,7 мкм.
- Угломерные каналы: значения среднеквадратичного отклонения для углов $3,0^\circ$; $2,5^\circ$; $1,0^\circ$; 0° ; $-1,0^\circ$; $-2,5^\circ$; $-3,0^\circ$ не превышала $0,5''$

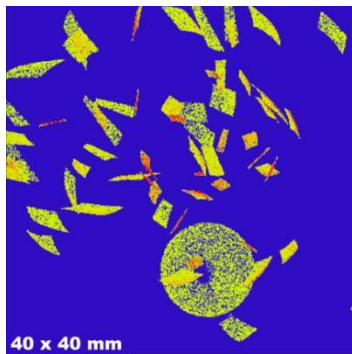


Рис. 3. Модельное изображение в фокальной плоскости телескопа обсерватории «Миллиметрон» после раскрытия

Второй канал реализует финальную юстировку рефлекторов с помощью метода ножа Фуко. Оптическая система реализуется таким образом, что каждый элемент исследуемого составного зеркала будет занимать строго определенное положение на изображении, которое не меняется от его угла наклона и линейного смещения (Рис.2).

Вместо этого, в зависимости от положения ножа Фуко, изображение каждого отдельного элемента на фукограмме будет иметь свою яркость, по которой можно определить наклон или смещение этого элемента. По

направлению угасания изображения элемента главного зеркала при сканировании фокальной плоскости можно также оценить величину расфокусировки каждого элемента. В результате моделирования в программном пакете Zemax системы контроля установлено, что точность измерения углового положения панелей главного зеркала телескопа может составить не менее $0,3''$.

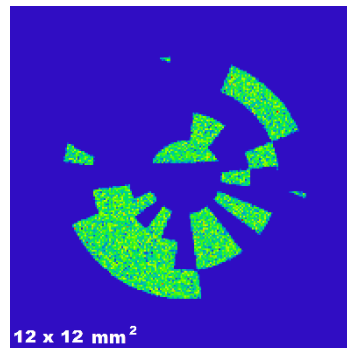


Рис. 4. Фукограмма при перекрытии ножом Фуко половины пятен

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены предварительные результаты разработки двухканальной системы контроля телескопа космической обсерватории «Миллиметрон». Погрешность работы 3D-сканера составила 9 мкм, $2''$, что обеспечит пятно рассеяния в фокальной плоскости телескопа диаметром не более 50 мм. Точность измерения углового положения панелей главного зеркала анализатором составит не менее $0,3''$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] James Webb space telescope Goddard space flight center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.jwst.nasa.gov/content/observatory/ote/mirrors/index.html> (22.02.2022).
- [2] Knight, J.S. Predicted JWST imaging performance / J.S. Knight, P. Lightsey, A. Barto // Space Telescopes and Instrumentation: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Proc. SPIE. – 2012. – Vol. 8442. – P. 84422G-1–84422G-13. DOI: 10.1117/12.926817.
- [3] Contos, A.R. Verification of the James Webb Space Telescope (JWST) wavefront sensing and control system / A.R. Contos, D.S. Acton, A.A. Barto // Space Telescopes and Instrumentation: Optical, Infrared, and Millimeter. – 2008. – P. 70100S-1–70100S-13. DOI: 10.1117/12.786984.
- [4] Knight, J.S. Image quality verification analysis of the JWST / J.S. Knight, P. Lightsey, A. Barto, D.S. Acton // Modeling, Systems Engineering and Project Management for Astronomy IV. Proc. SPIE. – 2010. – Vol. 7738. – P. 77381Z-1–77381Z-8. DOI: 10.1117/12.858348.
- [5] Zavyalov, P.S. Development of a two-channel system for monitoring the mirror elements of the Millimetre space observatory / P.S. Zavyalov, S.N. Makarov, A.V. Smirnov // Appl. Opt. – 2022. – Vol. 61. – P. 588-596.
- [6] Макаров, С.Н. Математическое моделирование работы 3D-сканера при контроле зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон» / С.Н. Макаров, А.Г. Верхогляд, М.Ф. Ступак, Д.А. Овчинников, Ю.А. Оберемок // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 4. – С. 541-550. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-833.
- [7] Zavyalov, P.S. Control and positioning system for reflector of “Millimetre” observatory: design and development / P.S. Zavyalov, M.S. Kravchenko, E.S. Zhimuleva // Optoelectron. Instrum. Data Process. – 2020. – Vol. 56. – P. 356-367. DOI: 10.3103/S8756699020040159.