

Математическое моделирование работы 3D-сканера при контроле зеркальной системы обсерватории «Миллиметр»

С.Н. Макаров¹, А.Г. Верховгляд¹, М.Ф. Ступак¹, Д.А. Овчинников², Ю.А. Оберемок²

¹ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
СО РАН (КТИ НП СО РАН), г. Новосибирск, 630058, ул. Русская, д. 41,

² АО «ИСС им. М.Ф. Решетнева», г. Железногорск, Красноярский край

Аннотация

Создается оригинальная система контроля геометрии зеркал обсерватории «Миллиметр» для работы в составе бортового комплекса научной аппаратуры. Система предназначена для контроля качества зеркальной системы космического телескопа и использования получаемых данных в качестве сигналов «обратной связи» для предварительной настройки и юстировки оптической системы телескопа в космическом пространстве. Задачей системы является определение многомерного вектора неизвестных параметров состояния зеркальной системы телескопа по косвенным измерениям, получаемым в результате обмера телескопа 3D-сканером. Создана не имеющая аналогов математическая модель, численно описывающая процесс предварительного обмера зеркальной системы обсерватории «Миллиметр» с использованием оптических контрольных меток на поверхности зеркальной системы. На базе созданной математической модели осуществлено численное моделирование работы бортового 3D-сканера при предварительном обмере зеркальной системы обсерватории «Миллиметр» с использованием оптических контрольных меток на поверхности зеркал в приближении геометрической оптики. Разработан новый эффективный метод предварительной оценки смещения элементов зеркальной системы телескопа по косвенным (неявным) измерениям, выполняемым 3D-сканером. Метод основан на математическом преобразовании косвенных измерений отклонений положения контрольных меток зеркал телескопа от их эталонного положения, на выходе которого выдается список оценок смещений неизвестных параметров элементов зеркальной системы, задаваемых удобным образом. Показана возможность обмера зеркальной системы телескопа с целью его предварительной настройки при использовании 3D-сканера на борту космического аппарата. Приведены оценки допустимых отклонений компонент зеркальной системы, необходимые для обеспечения функциональности телескопа.

Ключевые слова: математическая модель, численное моделирование, зеркальная система обсерватории «Миллиметр», система контроля, форма телескопа, контрольные метки, 3D-сканер.

Цитирование: Макаров, С.Н. Математическое моделирование работы 3D-сканера при контроле зеркальной системы обсерватории «Миллиметр» / С.Н. Макаров, А.Г. Верховгляд, 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.

Citation: Makarov SN, Verhoglyad AG, Stupak MF, Ovchinnikov DA, Oberemok JA. Mathematical simulation of a 3D scanner for controlling the mirror system of the Millimetron Observatory. *Computer Optics* 2021; 45(4): 541-550. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-833.

Введение

Одним из основных направлений развития бортовых космических технологий является создание многозональных высокоапертурных зеркальных телескопов, обеспечивающих сбор и обработку информации в диапазонах спектра излучения от рентгеновского до миллиметрового. Примером этого служит проект космической обсерватории «Миллиметр» (Спектр-М), рассчитанный для работы в миллиметровом и дальнем ИК-диапазонах (70 мкм – 10 мм) с 10-метровым охлаждаемым (~4,5 К) криогенным телескопом [1–3]. Главной проблемой создания крупных телескопов является обеспечение качества изображения, что, в свою очередь, требует раз-

работки высококачественных и высокоточных методов контроля формы составных элементов их зеркальной системы [4–7]. Например, в [7] дан прекрасный обзор состояния и тенденций развития космического телескопостроения за рубежом. Изложены результаты проводимых в ряде ведущих стран работ по проектированию и строительству (с акцентом на новые материалы для зеркал) совершенных оптических систем наблюдения за космосом. Основное направление – создание больших оптических телескопов. Рассмотрены находящиеся на орбите и строящиеся большие оптические телескопы с составными и гибкими зеркалами, управляемыми активными системами с целью устранения деформаций на всех этапах изготовления и эксплуатации.

Создание различных систем контроля формы составных элементов таких телескопов требует разработки математических моделей и алгоритмов работы данных контрольных систем [8–16]. В частности, в [8] изложена модель процесса юстировки составных зеркал высокоапертурных телескопов. На основе введенного понятия разностной поверхности с использованием разработанных алгоритмов геометрического и оптотехнического позиционирования зеркальных сегментов получены соотношения для оценки точности юстировки составных зеркал. В [16] кратко представлены методы юстировки и калибровки информационно-измерительных систем на борту космических аппаратов оптико-электронного и радиоэлектронного наблюдения. Эти методы основаны на известных приемах сглаживания – аппроксимации, фильтрации векторных измерений и интерполяции результатов фильтрации векторными сплайнами.

По результатам предварительного анализа бесконтактных систем контроля геометрических параметров, входящих в состав КА (и геометрических, и интерферометрических), наибольший интерес представляют приборы, созданные по принципу 3D-сканера, как наиболее оптимальные для решения отраженных в настоящем сообщении задач. Например, компания Jena-Optronik GmbH успешно разработала и применила на практике 3D-лидар/сканер RVS-3000-3D для космических применений (https://indico.esa.int/event/181/contributions/1454/attachments/1361/1586/2017_CS_ID_Kolb_RVS3000.pdf). 3D-сканер был успешно протестирован в нескольких космических программах Европейского и Японского космических агентств в основном в операциях по стыковке космических аппаратов. К настоящему времени отечественные 3D-сканирующие системы космического применения в открытой печати нами не зафиксированы.

Описываемая в настоящем сообщении оригинальная система контроля зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон» (СК ЗС) и не имеющие аналогов математическая модель и алгоритмы ее работы создаются для штатного функционирования в составе бортового комплекса научной аппаратуры обсерватории «Миллиметрон» и рассчитываются на работу в условиях космического пространства. СК ЗС в силу огромного динамического диапазона контроля ($\geq 10^6$) состоит из двух самостоятельных ступеней – предварительной (3D-сканер) и окончательной (Анализатор). В настоящем сообщении описывается моделирование работы только предварительной ступени. Она предназначена для контроля качества зеркальной системы (ЗС) космического телескопа и использования данных, получаемых СК ЗС в качестве сигналов «обратной связи» для предварительной настройки и юстировки оптической системы телескопа в космическом пространстве с формированием в фокальной плоскости телескопа пятна диаметром не более 50 мм.

1. Телескоп «Миллиметрон» и основные задачи бортовой системы контроля

Антенна телескопа представляет собой 2-зеркальную оптическую систему, построенную по схеме Кассегрена. Она состоит из главного параболического и вторичного гиперболического зеркал. Диаметр главного зеркала составляет 10 метров, что слишком велико для существующих обтекателей ракет-носителей, поэтому конструкция зеркала будет раскладывающейся. Оно состоит из нераскладываемой центральной части, диаметром 3 метра, и раскрываемой части, состоящей из 24 лепестков.

Ключевые параметры антенны «Миллиметрона» достигаются за счет нескольких оригинальных конструктивных решений:

- Материал для отражающей поверхности панелей и основной конструкции лепестков – углеродное волокно, армированное пластиком (CFRP). Данный материал обеспечивает высокий удельный модуль и низкий коэффициент теплового расширения.
- Каждый лепесток главного зеркала состоит из каркаса и трех независимых отражающих панелей.
- Каждая панель устанавливается на каркас лепестка с помощью трех линейных актюаторов.
- Регулировка панелей будет осуществляться бортовой активной системой контроля поверхности.

Данные решения позволят корректировать отклонения положения панелей, связанные с процессом раскрытия, а также искажения поверхности, связанные с температурными эффектами [3].

Оптическая схема зеркальной системы обсерватории (телескопа) «Миллиметрон» приведена на рис. 1.

Телескоп может быть представлен в виде физической модели, состоящей из множества оптических отражающих поверхностей (ОП) со стабильной формой. Совокупность всех ОП телескопа назовем зеркальной системой телескопа. Примерами таких ОП являются (см. рис. 1): вторичное зеркало (ВЗ); переключающее зеркало (ПЗ); любая из панелей (фрагментов) многоэлементного параболоида главного зеркала (ГЗ).

Глобальная система координат (ГСК) телескопа определяется положением начала координат и координатными осями. Вершина параболоида ГЗ принимается за начало ГСК, в предположении идеальной формы параболоида ГЗ. Вектор оси Х ГСК направлен вдоль оси параболоида ГЗ от его вершины в направлении ВЗ. Вектор оси Y от центра ПЗ в сторону фокуса приемника, обозначенного как F_2 на рис. 1. Ось Z однозначным образом дополняет оси X, Y, образуя полный ортогональный базис из векторов X, Y, Z ГСК, при котором ГСК является правой системой координат.

Однозначное положение каждой ОП как поверхности твердого объекта в пространстве определяется:

- выбранной **базовой точкой на твердом объекте, содержащем ОП**. Положение этой базовой точки объекта определено ее координатами в ГСК;

скопа потенциально могут быть обмерены в заводских условиях, однако в этой информации нет необходимости, как это будет показано ниже.

При настроенном состоянии телескопа ЗС выполняется обмер всех ее КМ $k=0, \dots, K-1$ при помощи 3D-сканера по всем каналам измерения 3D-сканера $m=0, 1, 2$. Создается массив начальных измерений $\tilde{\mathbf{Y}} = \{ \tilde{f}_{m,k} \}$ (для настроенного телескопа на Земле), который соответствует настроенному вектору параметров $\tilde{\mathbf{X}}$ ЗС:

$$\tilde{f}_{m,k} = f_{m,k}(\tilde{\mathbf{X}}) = f_{m,k}(\tilde{x}_0, \tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_{p-1}), \quad (1)$$

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \{ f_{m,k}(\tilde{\mathbf{X}}) \}. \quad (2)$$

Массив измерений настроенного телескопа $\tilde{\mathbf{Y}}$ запоминается. После вывода телескопа на орбиту и его раскрытия в рабочее положение ЗС телескопа расстроена, поэтому в новом положении телескопа на орбите его параметры ОП $\hat{\mathbf{X}} = \{ \hat{x}_p \}$ случайно смещены по отношению к исходному (настроенному) состоянию.

Формулируем задачу следующим образом: определить изменения положения ОП от идеального настроенного $\mathbf{x} = \{ \Delta x_p \} = \hat{\mathbf{X}} - \tilde{\mathbf{X}}$ по изменению положения КМ на орбите от их идеально настроенного $\mathbf{y} = \{ \Delta f_{m,k} \} = \hat{\mathbf{Y}} - \tilde{\mathbf{Y}}$.

При этом известна матричная зависимость (прямая задача) $\mathbf{y} = \mathbf{H} \times \mathbf{x}$, где \mathbf{H} – вычисляемая по чертежам постоянная дизайн-матрица. То есть необходимо решить обратную задачу: $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{H}, \mathbf{y})$.

Было реализовано применение дифференциальных измерений КМ, т.е. попарная разница расстояний или углов каналов 3D-сканера до близко расположенных КМ существенно снизит систематическую ошибку измерения расстояний или углов 3D-сканера.

Чтобы формализовать такое преобразование общим способом (в виде линейной комбинации измерений), вводим матрицу преобразования первичных измерений \mathbf{D} . Получаем новую замену переменных, переводя первичные измерения \mathbf{y} в дифференциальные \mathbf{u} , как $\mathbf{u} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{y}$.

Для решения задачи был вычислен матричный решатель (матрица) \mathbf{F} такой, что оценка $\hat{\mathbf{x}}$ неизвестного вектора системных параметров \mathbf{x} по дифференциальным измерениям \mathbf{u} есть

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{u}. \quad (3)$$

При вычислении матрицы \mathbf{F} необходимо было подобрать ее таким образом, чтобы отклонение

$\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}$ истинного смещения \mathbf{x} и его найденной оценки $\hat{\mathbf{x}}$ было минимально в статистическом смысле.

Подчеркнем, что Решатель – это вычисляемая оригинальная матрица, позволяющая оптимальным образом в линейном приближении найти все параметры \mathbf{x} по измеренным значениям \mathbf{u} . Даже краткий вывод формулы нашего оптимального Решателя (как и изложение используемой математической модели) выходит далеко за рамки цели и объема настоящего сообщения и не является основным предметом сообщения.

Таким образом, решив систему уравнений (3) и получив оценку $\hat{\mathbf{x}}$ вектора смещений параметров \mathbf{x} , нам становится известно, как и какие ОП необходимо «довернуть» или сместить на орбите, чтобы вернуть их в исходное заводское положение, которое соответствует настроенному телескопу.

Если степени свободы неизвестных абсолютных параметров \mathbf{X} (определен заглавной буквой ранее) при определении ОП выбрать удобным образом, соответствующим имеющимся актюаторам ОП (например: положение ВЗ задается 6 приводами гексапода, которые могут быть определены как неизвестные компоненты вектора \mathbf{X}), то это дает определенные удобства. В таком случае расчетный вектор смещения $\hat{\mathbf{x}}$ является вектором, сообщающим, **«насколько каждый из приводов ОП смещен от идеального (исходного) положения»** и, по сути, сколько необходимо сделать шагов привода, чтобы рассматриваемая ОП «встала» на исходное место. Таким образом, вычисленный вектор $\hat{\mathbf{x}}$ может быть непосредственным входом для механизмов коррекции ЗС телескопа.

Применение описанного алгоритма настройки телескопа имеет существенные положительные практические качества:

- малость изменений положения ОП позволяет свести задачу к системе линейных уравнений. Это позволяет использовать методы линейной алгебры и дает точное единственное решение обратной задачи с прогнозируемой точностью работы алгоритма;
- нет необходимости знать абсолютные значения параметров x_p для ОП;
- нет необходимости точно знать абсолютное положение КМ в системе координат спутника и места установки их на ОП. Не требуется высокой точности установки КМ на панели ГЗ и другие ОП.

3. Численное моделирование работы бортового 3D-сканера с использованием оптических контрольных меток на поверхности зеркальной системы

С целью проведения численного эксперимента, позволяющего моделировать измерения и визуализировать их, было разработано семейство программ на языке Python 3.7 (в среде Anaconda [17]).

Совместно с поверхностями второго порядка, описанными в моделирующем ПО [18], также применяется графическая библиотека VTK [19]. Библиотека VTK применяется для визуализации 3-мерных объектов, которые можно задавать самым общим уравнением поверхности второго порядка, что дает наглядность и возможность визуальной самопроверки закладываемых уравнениями поверхностей ограничений и алгоритмов трассировки лучей в ЗС. Типичный пример генерируемого графического отображения распространения лучей от 3D-сканера через систему поворотных зеркал до обмеряемых КМ отображен на рис. 2.

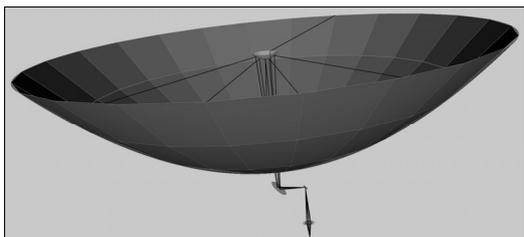


Рис. 2. Пример трассировки лучей к набору КМ: от 3D-сканера до панелей ГЗ

Процесс измерения КМ выполняется численно следующим образом:

- а) выполняется трассировка (распространение) луча от объектива 3D-сканера СК ЗС, через набор ОП, в направлении к обмеряемой КМ;
- б) в процессе распространения луча выполняется алгоритм глобальной оптимизации углового положения СЗ 3D-сканера для того, чтобы распространяющийся луч, пройдя весь оптический путь, в итоге попал точно в центр обмеряемой КМ;
- в) при попадании луча в КМ находятся параметры 3D-сканера, эквивалентные реальному измерению:
 - 1) длина оптического пути по всему пути трассировки луча (измерения дальномерного канала (ДК));
 - 2) угловые положения СЗ 3D-сканера (угломерные каналы измерения).

3.1. Построение дизайн-матрицы, проверка адекватности линейной модели

Для проверки адекватности матричного уравнения $y = H \cdot x$ как модели, связывающей небольшие изменения параметров x ЗС с изменениями в данных обмера, получаемых 3D-сканером y , были решены две задачи численного моделирования:

- построение дизайн-матрицы H по чертежным данным;
- проверка адекватности применения линейной математической модели $y = H \cdot x$ для характеристики поведения телескопа при расстройке его ЗС, характеризующейся вектором x .

В результате использования разработанных алгоритмов программой автоматически строится дизайн-матрица H всей ЗС. Поскольку матрица H считается постоянной, то измерения матрицы выполняются только однократно. Затем посчитанная матрица H со-

храняется в файл. Для дальнейших исследований и оценки точностных характеристик модели ЗС достаточно знать только H .

Для проверки адекватности применения линейной модели при характеристике геометрии телескопа проводится следующий численный «точный» эксперимент, выполняющий моделирование обмера:

- моделируется обмер идеально настроенной ЗС телескопа 3D-сканером, с использованием трассировки лучей до всех КМ. Пусть \tilde{Y} – это вектор, описывающий совокупность результатов данных обмера всех КМ 3D-сканером;
- имитируется расстройка ЗС телескопа. Для этого создается случайное отклонение (возмущение) параметров всех элементов ЗС в допустимых техническим заданием пределах, которое обозначим как x ;
- моделируется обмер ЗС телескопа 3D-сканером, с использованием трассировки лучей до всех КМ в условиях расстройки ЗС. Пусть \hat{Y} – это вектор, описывающий совокупность результатов всех данных обмера всех КМ после внесения возмущения x в ЗС;
- вычисляем вектор изменения обмера в «точном» эксперименте под влиянием возмущения x как: $y_0 = \hat{Y} - \tilde{Y}$.

Таким образом, получено значение изменения положения КМ в координатах 3D-сканера $y_0 = f(x)$ как изменения неизвестных параметров x ЗС.

Назовем полученную зависимость $y_0 = f(x)$ «точной», «нелинейной».

Теперь сравним результат «нелинейного» моделирования с использованием трассировки лучей $y_0 = f(x)$ с результатом, получаемым при помощи дизайн-матрицы (линейной модели). Для этого матрично умножим (предварительно рассчитанную) дизайн-матрицу H на вектор возмущения ЗС x , получим предсказанное моделью изменение обмера КМ:

$$y_1 = H \cdot x. \quad (4)$$

3.2. Сравнение результатов численного моделирования измерений и линейной модели с использованием дизайн-матрицы

Сравниваем значение смещения результатов моделирования y_0 со значением смещения y_1 , продуцируемым линейной моделью. Результаты представлены в виде трех графиков. Каждый график соответствует измерениям соответствующего канала 3D-сканера. Дальномерный канал (ДК) 3D-сканера представлен на рис. 3. Два угломерных канала 3D-сканера представлены на рис. 4 и 5.

Как видно из результатов численного эксперимента, матричная модель относительно неплохо предсказывает влияние возмущений ЗС на результаты обмера КМ.

4. Исследование допустимого разброса параметров ЗС

Для определения требований к СК ЗС необходимо оценить максимальные отклонения параметров разных компонентов телескопа от их исходного положе-

ния (вторичного зеркала, ПЗ, всех панелей главного зеркала), чтобы луч, попадающий в апертуру телескопа с бесконечности, попадал на выходе из схемы телескопа (в плоскости его изображения, где распо-

ложены приемники изображения) в пятно с указанным диаметром:

- 50 мм (после предварительной настройки ЗС);
- 2 мм (после точной настройки ЗС).

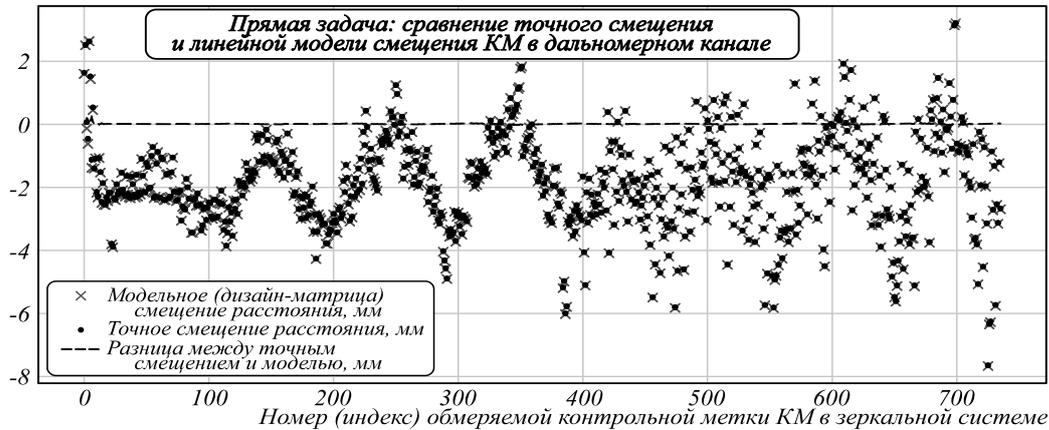


Рис. 3. Сравнение выхода точного измерения и модели на основе дизайн-матрицы по ДК.

Относительная ошибка модели к формируемой величине (как отношение стандартных отклонений величин) не более 1%

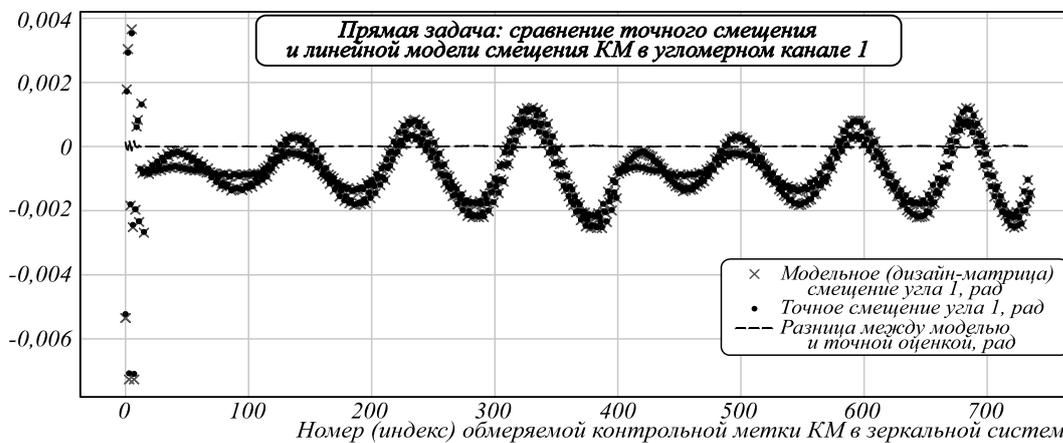


Рис. 4. Сравнение выхода точного измерения и модели на основе дизайн-матрицы по угломерному каналу 1.

Относительная ошибка модели к формируемой величине (как отношение стандартных отклонений величин) не более 1,8%

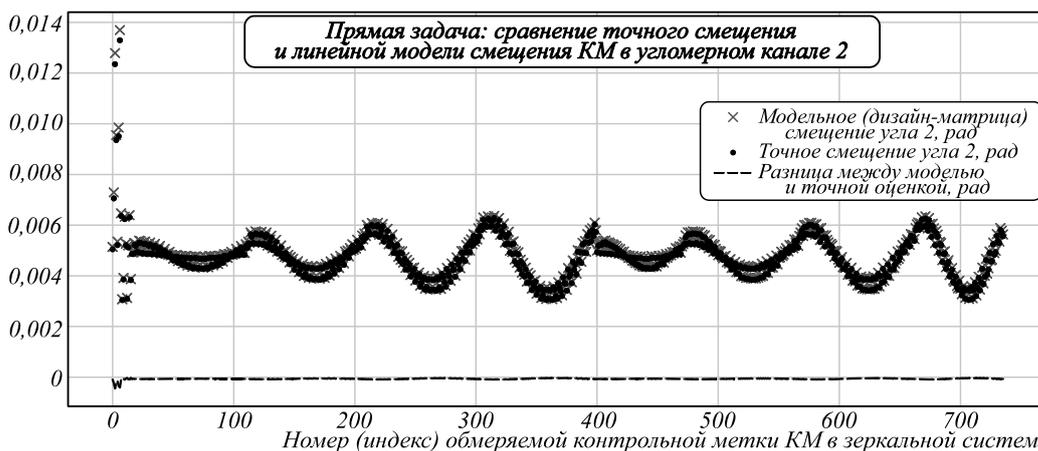


Рис. 5. Сравнение выхода точного измерения и модели на основе дизайн-матрицы по угломерному каналу 2.

Ошибка модели к формируемой величине (как отношение стандартных отклонений) не более 3%

Помимо этого, необходимо оценить качество волнового фронта, собираемого телескопом в области изображения, в единицах длины минимальной волны $\lambda \approx 300$ мкм, то есть получить пиковую величину качества волнового фронта λ/k .

Условно, для «хороших» оптических систем при заданной минимальной длине волны $\lambda \approx 300$ мкм полагаем здесь иметь: $k \geq 10 \dots 30$.

Для имитации распространения света рассматриваем распространение луча света по следующим оп-

тическим путем: **Звезда на бесконечности => Центр панели и ее углы (ГЗ) => Контррефлектор => ПЗ => Плоскость изображения телескопа.**

Существуют 4 типа панелей (расположенных на 4 разных ярусах), составляющих ГЗ, поэтому для них будут разные требования к параметрам положения. Требования на параметры положения ВЗ и параметры ПЗ также будут зависеть от того, от какого типа панели (ярус на ГЗ) отразился луч от звезды.

Имеем приблизительно следующую задачу распространения света, как проиллюстрировано на рис. 6.

На рис. 6 изображены 5 параллельных лучей (истекающих из красных сфер параллельно оси ГЗ), имитирующих свет далекой звезды. Лучи звезды попадают в центр панели ГЗ и ее 4 угла, с целью покрыть наибольшие искажения оптического хода света при неправильной установке панели в ЗС. Последовательно отразившись от панели, затем от ВЗ и ПЗ, лучи попадают в плоскость изображения телескопа. В плоскости изображения фиксируется радиальное смещение попадания каждого из лучей от идеального – фокальной точки всей оптической системы. Регистрируется максимальное отклонение волнового фронта (длины оптического пути), а также максимальное отклонение попадания луча от центра изображения.

Этот эксперимент проводится по всем панелям для каждого яруса ГЗ.

Результаты моделирования для формирования изображения звезды в пятне диаметром 2 мм определяют требования к точности измерения положения элементов ЗС в базовой системе координат при эксплуатации на орбите. Эти итоговые требования приведены в табл. 1.

5. Численное моделирование решения обратной задачи. Сравнение оригинального решателя с существующими методами решений уравнений. Проверка качества алгоритмов и формул

Важной задачей является оценка восстановления неизвестного (неявного) вектора x по известным y и H .

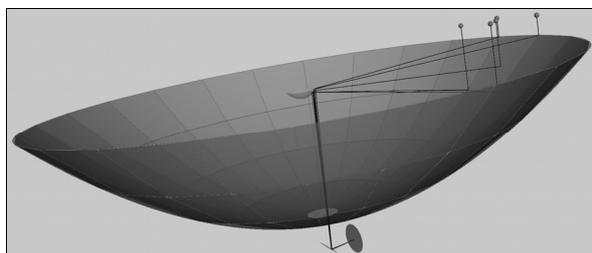


Рис. 6. Иллюстрация распространения света по пути: Звезда=>Панель ГЗ=>ВЗ=>ПЗ=> фокальная плоскость изображения

Т.е. необходимо решение обратной задачи $\hat{x} = g(H, y)$ в условиях предположения зависимости $y = H \times x$. Помимо этого, известно, что вектор смещения измерений y на практике не может быть точно известен и содержит шум контрольной аппаратуры.

Решение обратной задачи $\hat{x} = g(H, y)$ сводится к задаче решения системы линейных уравнений с определенными ограничениями и кратко рассмотрено в параграфе 2.

Табл. 1. Расчетные требования к точности контроля положения элементов ЗС в базовой системе координат при эксплуатации

Требование/наименование параметра	Значение	Примечание
Положение ВЗ по координатам Y и Z	≤ 35 мкм	
Положение ВЗ по координате X	≤ 66 мкм	
По угловым перемещениям ВЗ	$\leq 28''$	$\leq 1,4e-4$ радиан
Смещение панелей ГЗ в направлении Y и Z	≤ 35 мкм	
Смещение панелей ГЗ в направлении X	≤ 66 мкм	
По углу места ПЗ относительно оптической оси	$\leq 2,8'$	$\leq 8,37e-4$ радиан, вокруг оси Z
По азимутальному углу ПЗ относительно оптической оси	$\leq 2,8'$	$\leq 8,37e-4$ радиан, вокруг оси X
По углу поворота ПЗ вокруг оси Y	$\leq 4'$	$\leq 1,18e-3$ радиан

Для проверки основных положений, кратко описанных в параграфе 2, был проведен численный эксперимент, подтверждающий их работоспособность. Он был проверен сравнением оригинального оптимального решателя (см. параграф 2) с двумя классическими способами решения систем линейных уравнений. На входе эксперимента имелась дизайн-матрица H системы, имеющая размерность (2208×511) , полученная в результате численного моделирования распространения света в телескопе, связывающая смещения КМ и неизвестные изменения параметров в соответствии с уравнением $y = H \times x$. Расчетная дизайн-матрица системы H оказалась крайне близкой к сингулярной с «числом обусловленности» [20] порядка 3×10^9 .

Поэтому для решения такой задачи необходимо было искать приближенные решения и использовать ограничения (различные регуляризации).

Численно сравнивалось качество решения уравнения $y = H \times x$ с использованием следующих решателей:

- а) P1 – оригинальный решатель;
- б) P2 – классическое решение методом наименьших квадратов (МНК);
- в) P3 – решение с использованием регуляризации (Тихоновская регуляризация с подобранным параметром регуляризации, [21]).

Численный эксперимент проводился следующим образом:

- генерировался случайный вектор отклонения ЗС от исходного положения x , состоящий из 511 параметров смещения (смещения положения всех панелей ГЗ, ВЗ, ПЗ, относительного положения 3D-сканера и др.). Для простоты сравнения использовался одинаковый единичный разброс па-

раметров ЗС, что давало необходимую однородность неизвестного вектора x ;

– имитировался реальный контроль параметров ЗС: для этого вычислялось смещение КМ по модели $y = H \times x$, к которому добавлялся шум измерения каналов 3D-сканера СК ЗС. Вектор измерений состоял из 2208 значений (все каналы 3D-сканера по всем КМ);

– по вектору зашумленного измерения y каждым решателем (P1, P2, P3) восстанавливалось смещение ЗС как: x_1 (P1), x_2 (P2), x_3 (P3);

– вычислялась погрешность восстановления параметров x как вектора $\epsilon_1 = x_1 - x$ (для P1), $\epsilon_2 = x_2 - x$ (для P2), $\epsilon_3 = x_3 - x$ (для P3).

Эксперимент повторялся в цикле 100 раз, и накапливалась статистика ошибок восстановления каждого из

параметров x для каждого из решателей. По каждому из параметров x для каждого из решателей было вычислено (на 100 экспериментах) среднеквадратичное значение ошибки (СКО). На рис. 7, 8 представлено сравнение шума восстановления параметров тремя решателями.

Из результатов моделирования, представленных на рис. 7 и 8, следует, что разработанный метод P1 имеет точность существенно выше (СКО практически на порядок ниже), чем стандартные методы решений линейных уравнений (МНК, Тихоновская регуляризация с подобранным параметром регуляризации) применительно к решению уравнения $y = H \times x$ для ЗС телескопа, поэтому он предпочтителен в данной работе. Численными экспериментами доказана работоспособность P1.

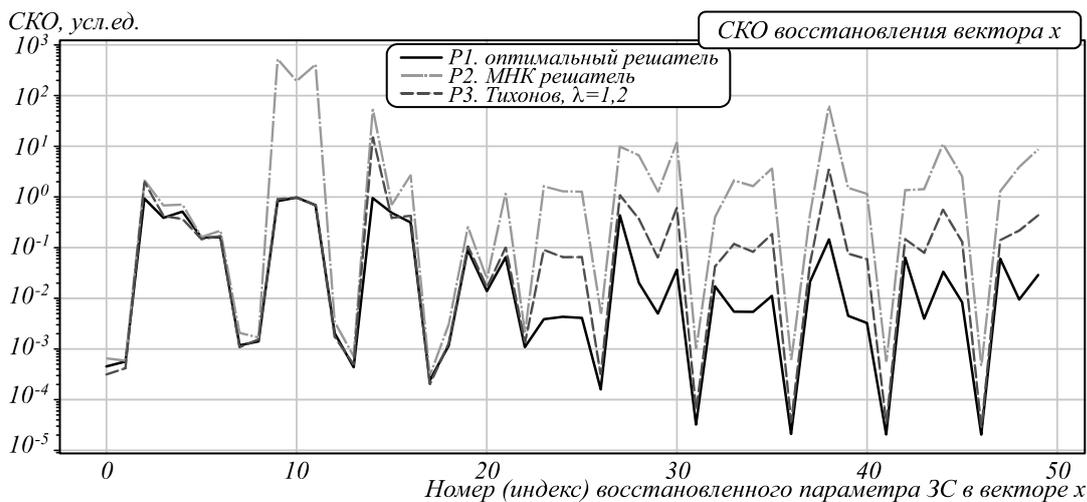


Рис. 7. СКО восстановления параметров x (на выборке из 100 тестов) только для первых 50 параметров вектора x

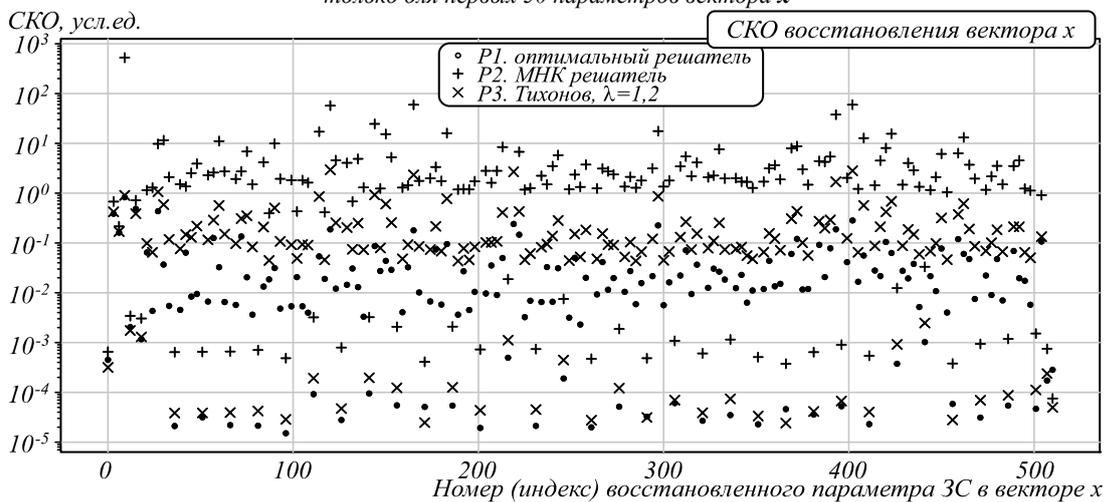


Рис. 8. СКО восстановления параметров x (на выборке из 100 тестов) для всех параметров вектора x . Единицы оси ординат – безразмерные

Дополнительно были проверены выводы модели, предсказывающие точность P1. Рис. 9 демонстрирует сравнение СКО метода P1 и предсказание СКО P1 по формулам модели.

Как видно из рис. 9, формула СКО оптимального решателя работает корректно. Следовательно, можно сделать основные выводы:

а) все формулы для восстановления смещений параметров ЗС, полученные в нашей модели, рабочие, и их можно применять на практике и в разработке ПО космической обсерватории;

б) необходимость длительных вычислительных экспериментов при исследовании эффективности моделей (для различных конфигураций располо-

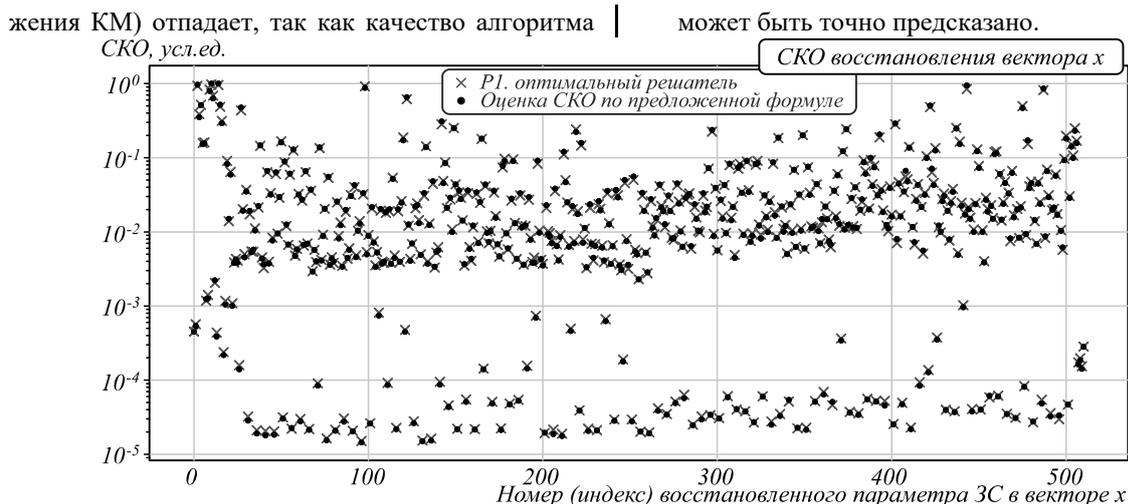


Рис. 9. Сравнение СКО оптимального решателя, полученной в численном эксперименте, с результатами аналитической формулы СКО оптимального решателя

Заключение

Создан не имеющий аналогов метод предварительной оценки смещения элементов ЗС телескопа по косвенному (неявному) контролю, выполняемому 3D-сканером.

Метод основан на математическом преобразовании косвенных измерений отклонений у положения КМ ЗС телескопа от их эталонного положения, на выходе которого выдается список оценок смещений неизвестных параметров x элементов ЗС, задаваемых удобным образом (например, пространственное положение, положение исполнительных механизмов, определение формы ОП).

Этот метод универсален и применим к любым сложным конструкциям (и функциональным зависимостям), претерпевающим небольшие отклонения от идеальной формы. Поэтому метод применим к многомерным системам любого вида (обмеряемым не только оптическими средствами, но и произвольными неявными зависимостями). Обмеряемые и восстанавливаемые величины могут быть произвольной природы. Например, метод вполне может быть использован в дальнейших работах с крупногабаритными трансформируемыми конструкциями и сложными условиями их обмера, что типично для космических антенн и иных протяженных, сложных и труднодоступных объектов со сложными многомерными взаимодействиями.

Создан набор математических формул, позволяющий оптимально решать обратную задачу на основе системы линейных уравнений для восстановления многомерных параметров объекта по многомерным косвенным измерениям, в условиях вероятностного разброса параметров и произвольных данных о типе, каналах и о шумах контрольной аппаратуры.

Показана возможность контроля параметров ЗС телескопа с целью его предварительной настройки при использовании 3D-сканера на борту КА. Вычислены пределы допустимых отклонений компонент ЗС, необходимые для обеспечения функциональности телескопа.

Созданы оригинальные практические алгоритмы как основа для решения подобных задач моделирования в будущих работах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФГБУН КТИ НП СО РАН в части проекта АААА-А20-120102190007-5.

Литература

1. Кардашев, Н.С. Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон / Н.С. Кардашев, И.Д. Новиков, В.Н. Лукаш, С.В. Пилипенко, Е.В. Михеева, Д.В. Бисикало, Д.З. Вибе, А.Г. Дорошкевич, А.В. Засов, И.И. Зинченко, П.Б. Иванов, В.И. Костенко, Т.И. Ларченкова, С.Ф. Лихачёв, И.Ф. Малов, В.М. Малофеев, А.С. Позаненко, А.В. Смирнов, А.М. Соболев, А.М. Черепашук, Ю.А. Щекинов // Успехи физических наук. – 2014. – Т. 184, № 12. – С. 1319-1352. – DOI: 10.3367/UFNr.0184.201412c.1319.
2. Smirnov, A.V. Space mission Millimetron for terahertz astronomy / A.V. Smirnov, A.M. Baryshev, S.V. Pilipenko, N.V. Myshonkova, V.B. Bulanov, M.Y. Arkhipov, I.S. Vinogradov, S.F. Likhachev, N.S. Kardashev // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8442. – 84424C. – DOI: 10.1117/12.927184.
3. Сайт Астрокосмического центра ФИАН, г. Москва [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://millimetron.ru/>.
4. Лукин, А.В. Контроль зеркала контррефлектора телескопа «Миллиметрон» на основе использования синтезированной голограммы / А.В. Лукин, А.Н. Мельников, А.Ф. Скочиллов // Фотоника. – 2016. – № 5. – С. 44-48.
5. Полещук, А.Г. Разработка интерференционно-голографической ИК системы контроля формы центрального параболического зеркала космического телескопа обсерватории «Миллиметрон» / А.Г. Полещук, Р.К. Насыров, А.Е. Маточкин, В.Н. Хомутов, В.В. Черкашин, А.Е. Качкин, А.Г. Верховляд, Л.Б. Касторский, В.М. Михалкин // Труды «Интерэкспо Гео-Сибирь». – 2015. – Т. 1. – С. 51-58.
6. Верховляд, А.Г. Система контроля геометрических параметров центрального зеркала космического телескопа «Миллиметрон» / А.Г. Верховляд, В.М. Михалкин,

- В.А. Куклин, В.И. Халиманович, Ю.В. Чугуй // Сборник трудов «Решетневские чтения». – 2014. – Т. 1(18). – С. 61-63.
7. **Кириченко, Д.В.** Крупногабаритные оптические космические телескопы / Д.В. Кириченко, В.В. Клеймёнов, Е.В. Новикова // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 7. – С. 589-602. – DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-589-602.
 8. **Демин, А.В.** Оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения / А.В. Демин, А.В. Денисов, А.В. Летуновский // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 3. – С. 51-59.
 9. **Демин, А.В.** Математическая модель процесса юстировки составных зеркал / А.В. Демин // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 901-907. – DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-901-907.
 10. **Демин, А.В.** Алгоритм юстировки составных зеркал / А.В. Демин, П.В. Ростокин // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 291-294. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-291-294.
 11. **Olczak, G.** Wavefront calibration testing of the James Webb Space Telescope primary mirror center of curvature optical assembly / G. Olczak, C. Wells, D.J. Fischer, M.T. Connolly // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8450. – 84500R. – DOI: 10.1117/12.927003.
 12. **Конкет, Б.** Алгоритм и математическая модель геометрического позиционирования асферического составного зеркала / Б. Конкет, Л.Ф. Самбрано, Н.К. Артюхина, Р.В. Фёдорцев, А.Р. Силие // Приборы и методы измерений. – Том 9, № 3. – С. 234-242. – DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-3-234-242.
 13. **Батшев, В.И.** Оптическая система и методика контроля позиционирования сегментов составного параболического зеркала радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон» / В.И. Батшев, Д.Т. Пуряев // Измерительная техника. – 2009. – № 5. – С. 29-31.
 14. **Пуряев, Д.Т.** Метод контроля качества выпуклого гиперболического зеркала радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон» [Электронный ресурс] / Д.Т. Пуряев, В.И. Батшев, О.В. Польшикова // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 7. – 833. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/833.html> (дата обращения 03.11.2020).
 15. **Сычев, В.В.** Алгоритм управления многоэлементным зеркалом на примере космического телескопа обсерватории «Миллиметрон» / В.В. Сычев, А.И. Клем // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – № 7. – С. 578-586. – DOI: 10.15372/AOO20180712.
 16. **Сомов, С.Е.** Юстировка и калибровка информационно-измерительной системы для определения ориентации спутника землеобзора и его наблюдательного оборудования / С.Е. Сомов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2018. – Т. 20, № 1(81). – С. 87-96. – DOI: 10.24411/1990-5378-2018-00127.
 17. **Anaconda** [Electronical Resource]. – URL: www.anaconda.com (request date 03.11.2020).
 18. **Ильин, В.А.** Линейная алгебра и аналитическая геометрия / В.А. Ильин, Г.Д. Ким. – М.: Проспект, 2012. – 400 с.
 19. **VTK (Visualization Toolkit)** [Electronical Resource]. – URL: <https://vtk.org/> (request date 03.11.2020).
 20. **Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity** / D.A. Belsley, E. Kuh, R.E. Welsch. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1980. – P. 100-104.
 21. **Линейная алгебра** / В.А. Ильин, Э.Г. Позняк. – М.: Физматлит, 2004. – 280 с. – ISBN: 5-9221-0481-0.

Сведения об авторах

Макаров Сергей Николаевич, 1973 года рождения, в 1997 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Физика», работает старшим научным сотрудником в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН). Область научных интересов: физическая и прикладная оптика, приборостроение, программирование, компьютерная оптика, численное моделирование процессов. E-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru.

Верхогляд Александр Григорьевич, 1957 года рождения, окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Физика». Работает и.о. зам. директора Конструкторско-технологического института научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН). Область научных интересов: физическая и прикладная оптика, приборостроение, лазерная физика и лазерные технологии. E-mail: verhog@tdisie.nsc.ru.

Ступак Михаил Федорович, 1947 года рождения, к.ф.-м.н., доцент кафедры, в 1969 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Физика», работает ведущим научным сотрудником в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН). Область научных интересов: физическая и нелинейная оптика, приборостроение, лазерная физика. E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru.

Овчинников Дмитрий Аркадьевич, 1978 года рождения, окончил Сибирскую аэрокосмическую академию им. академика М.Ф. Решетнева по специальности «Электронное машиностроение». Работает заместителем начальника отдела 355 АО «ИСС». Область научных интересов: прикладная оптика, приборостроение, космические технологии. E-mail: dao@iss-reshetnev.ru.

Оберемок Юрий Алексеевич, 1964 года рождения, окончил Тольяттинский политехнический институт по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». Работает начальником отдела в АО «ИСС». Область научных интересов: прикладная оптика, приборостроение, космические технологии. E-mail: oberemok@iss-reshetnev.ru.

ГРНТИ: 29.31.29; 89.15.45; 59.45.37

Поступила в редакцию 10 ноября 2020 г. Окончательный вариант – 17 марта 2021 г.

Mathematical simulation of a 3D scanner for controlling the mirror system of the Millimetron Observatory

S.N. Makarov¹, A.G. Verhoglyad¹, M.F. Stupak¹, D.A. Ovchinnikov², J.A. Oberemok²

¹ Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, 630058, Russian, 41,

² "ISS by M.F. Reshetnev", Zzheleznogorsk, Krasnoyarsk Region

Abstract

We develop an original system for controlling the mirror geometry of the Millimetron observatory as a part of the on-board scientific equipment. The system is designed to monitor the quality of the space telescope's mirror system and use the data received as feedback signals for pre-setting and adjusting the telescope's optical system in outer space. The system aims to determine a multi-dimensional vector of unknown parameters that define the state of the telescope's mirror system by indirect measurements of the telescope with a 3D scanner. An unparalleled mathematical model has been created, numerically describing a process of pre-measurement of the mirror system of the Millimetron Observatory using optical control marks on the surface of the mirror system. Using the mathematical model created and the geometric optics approximation, we numerically simulate the performance of the on-board 3D scanner in the course of preliminary measurements of the mirror system of the Millimetron Observatory using optical control marks applied on the mirror surfaces. A new effective method of pre-estimation of the displacement of elements of the AP telescope by indirect (implicit) measurements performed with the 3D scanner has been created. The method is based on the mathematical transformation of indirect measurements of deviations of the position of the telescope's mirror control marks from their reference position, which provides an easy-to-use list of estimates of the offsets of the unknown parameters of the mirror system elements. A possibility to measure the telescope's mirror system with the aim to pre-configure it using a 3D scanner on board the spacecraft is shown. Estimates of acceptable deviations of the mirror system component needed to ensure the telescope's functionality are given.

Keywords: mathematical model, numerical modeling, mirror system of the Millimetron Observatory, control system, telescope shape, control tags, 3D scanner.

Citation: Makarov SN, Verhoglyad AG, Stupak MF, Ovchinnikov DA, Oberemok JA. Mathematical simulation of a 3D scanner for controlling the mirror system of the Millimetron Observatory. *Computer Optics* 2021; 45(4): 541-550. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-833.

Acknowledgements: This work was supported by the RF Ministry of Science and Higher Education under project AAAA-A20-120102190007-5.

References

- [1] Kardashev NS, Novikov ID, Lukash VN, Pilipenko SV, Mikheeva EV, Bisikalo DV, Wiebe DZ, Doroshkevich AG, Zasov AV, Zinchenko II, Ivanov PB, Kostenko VI, Larchenkova TI, Likhachev SF, Malov IF, Malofeev VM, Pozanenko AS, Smirnov AV, Sobolev AM, Cherepashchuk AM, Shchekinov YuA. Review of scientific topics for Millimetron space observatory. *Phys Usp* 2014; 57: 1199-1228. DOI: 10.3367/UFNe.0184.201412c.1319.
 - [2] Smirnov AV, Baryshev AM, Pilipenko SV, et al. Space mission Millimetron for terahertz astronomy. *Proc SPIE* 2012; 8442: 84424C. DOI: 10.1117/12.927184.
 - [3] The website of the ASTrospace Center of FIAN, Moscow. Access mode: <http://millimetron.web2.ru/ru/>.
 - [4] Lukin AV, Melnikov AN, Skolyarov AF. Control of the mirror counter-reflector of the telescope "Millimetron" based on the use of a synthesized hologram [In Russian]. *Photonics* 2016; 5: 44-48.
 - [5] Poleschuk AG, Nasyrov RK, Matochkin AE, et al. development of the interfering-holographic IR system to control the shape of the central parabolic mirror of the Millimetron Observatory space telescope [In Russian]. *Works of Inter-expo Geo-Siberia* 2015; 1: 51-58.
 - [6] Verhoglyad AG, Michalkin VM, Kuklin VA, Halimanovitch VI, Chugui YV. System of control of geometric parameters of the central mirror of the Millimetron Space Telescope [In Russian]. Collection of works "Reshetnev Readings" 2014; 1(18): 61-63.
 - [7] Kirichenko DV, Kleimyonov VV, Novikova EV. Large optical space-based telescopes [In Russian]. *Journal of Instrument Engineering* 2017; 60(7): 589-602. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-589-602.
 - [8] Demin AV, Denisov AV, Letunovsky AV. Spaceborne optical-digital systems and complexes [In Russian]. *Journal of Instrument Engineering* 2010; 53(3): 51-59.
 - [9] Demin AV. Mathematical model of composite mirror adjustment process [In Russian]. *Journal of Instrument Engineering* 2015; 58(11): 901-907. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-901-907.
 - [10] Demin AV, Rostokin PV. Alignment algorithm for composite mirrors. *Computer Optics* 2017; 41(2): 291-294. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-291-294.
 - [11] Olczak G, Wells C, Fischer DJ, Connolly MT. Wavefront calibration testing of the James Webb Space Telescope primary mirror center of curvature optical assembly. *Proc SPIE* 2012; 8450: 84500R. DOI: 10.1117/12.927003.
 - [12] Conquet B, Zambrano LF, Artyukhina NK, Fiodortsev RV, Silie AR. Algorithm and mathematical model for geometric positioning of segments on aspherical composite mirror. *Devices and Methods of Measurements* 2018; 9(3): 234-242. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-3-234-242.
-

-
- | | |
|--|---|
| <p>[13] Batshev VI, Puryaev DT. Optical system and positioning control techniques of the composite parabolic mirror segments of the millimetron space observatory radio telescope [In Russian]. <i>Measuring Technology</i> 2009; 5: 29-31.</p> <p>[14] Puryaev DT, Batshev VI, Pashevova OV. Optical testing of "Millimetron" space observatory convex hyperbolic mirror [In Russian]. <i>Engineering Journal: Science and Innovation</i> 2013; 7: 833. Source: (http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/833.html).</p> <p>[15] V.V. Sychev, A.I. Klem. Algorithm for controlling a multi-element mirror using the space telescope of the "Millimetron" observatory as an example [In Russian]. <i>Optika Atmosfery i Okeana</i> 2018; 7: 578-586. DOI: 10.15372/AOO20180712.</p> <p>[16] Somov SE. Alignment and calibration of an information-measuring system for the orientation determining a land-</p> | <p>imagery satellite and its observing equipment [In Russian]. <i>Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences</i> 2018; 20(1:81): 87-96. DOI: 10.24411/1990-5378-2018-00127.</p> <p>[17] Anaconda. Source: (www.anaconda.com).</p> <p>[18] Ilyin VA, Kim GD. <i>Linear algebra and analytical geometry</i> [In Russian]. Moscow: "Prospect" Publisher; 2012.</p> <p>[19] VTK (Visualization Toolkit). Source: (https://vtk.org/).</p> <p>[20] Belsley DA, Kuh E, Welsch RE. <i>Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity</i>. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons; 1980: 100-104.</p> <p>[21] Ilyin VA, Pozniak EG. <i>Linear algebra</i> [In Russian]. Moscow: "Fisimatlit" Publisher; 2004. ISBN: 5-9221-0481-0.</p> |
|--|---|
-

Authors' information

Sergey Makarov, born in 1973, graduated from Novosibirsk State University in 1997 with a degree in Physics and works as a senior researcher at the Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Areas of scientific interest: physical and applied optics, instrumentation, programming, computer optics, numerical modeling processes. E-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru.

Aleksandr Verhoglyad, born in 1957, graduated from Novosibirsk State University with a degree in Physics. The acting deputy works. Director of the Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Areas of scientific interest: physical and applied optics, instrumentation, laser physics and laser technologies. E-mail: verhog@tdisie.nsc.ru.

Mikhail Stupak, born in 1947, Ph.D., assistant professor of department, graduated from Novosibirsk State University in 1969 with a degree in Physics, and works as a leading researcher at the Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Areas of scientific interest: physical and non-linear optics, instrumentation, laser physics. E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru.

Dmitri Ovchinnikov, born in 1978, graduated from the Siberian Aerospace Academy with a degree in Electronic Mechanical Engineering. He works as deputy head of the department 355 of ISS. Areas of scientific interest: applied optics, instrumentation, space technologies. E-mail: dao@iss-reshetnev.ru.

Yuri Oberemok, born in 1964, graduated from Tolyattin Polytechnic Institute with a degree in Internal Combustion Engines. He works as the head of the department in ISS. Field of scientific interests: applied optics, instrumentation, space technology. E-mail: oberemok@iss-reshetnev.ru.

Received November 10, 2020. The final version – March 17, 2021.
