

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

УДК 53.083.8, 681.753.083.8, 681.7

РАСЧЁТ ДОПУСТИМЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ КАНАЛОВ 3D-СКАНЕРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН» В РЕЖИМЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОРБИТЕ

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

¹Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41

²АО «Информационные спутниковые системы им. академика М. Ф. Решетнева»,
662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru

На базе разработанных ранее математической модели и алгоритмов функционирования системы контроля зеркальной системы обсерватории «Миллиметронт» представлены результаты численного моделирования получения допустимых значений погрешностей бортового 3D-сканера при предварительном измерении геометрических параметров пространственного расположения зеркальной системы обсерватории «Миллиметронт» с использованием оптических контрольных меток на поверхности зеркальной системы. При моделировании измерения геометрических параметров пространственного расположения контрольных меток рассмотрены два варианта их исполнения на панелях главного зеркала телескопа: вариант 1 — контрольные метки заданы в виде зеркальных сфер диаметром 10 мм, расположенных по четырём углам панелей главного зеркала; вариант 2 — контрольные метки варианта 1 дополнены миниатюрными поворотными зеркалами. Миниатюрные зеркала позволяют поворачивать измерительный луч так, чтобы через зеркало можно было измерить геометрические параметры контрольных меток, расположенных на смежных (для зеркал) панелях главного зеркала. Выявлено, что при достижении допустимых значений погрешностей работы 3D-сканера (9 мкм для дальномерного канала, 2 угл. сек для угломерных каналов) и применении комбинированных контрольных меток (вариант 2) потенциально возможно построение прибора для предварительной настройки зеркальной системы.

Ключевые слова: математическая модель, зеркальная система обсерватории «Миллиметронт», система контроля, численное моделирование, контрольные метки, 3D-сканер, погрешность измерения.

DOI: 10.15372/AUT20210611

Введение. Создающаяся в России космическая обсерватория «Миллиметронт» (Спектр-М) рассчитана для работы в миллиметровом и дальнем ИК-диапазонах (70 мкм — 10 мм) с 10-метровым охлаждаемым (~4,5 К) криогенным телескопом [1]. В силу известных технологических и массогабаритных ограничений при создании зеркал для крупногабаритных телескопов космических аппаратов применяют технологию составных (сегментированных) отражающих поверхностей [2, 3]. Совокупность всех оптических отражающих поверхностей, необходимых для обеспечения функциональности телескопа, назовём зеркальной системой (ЗС).

Основной проблемой при создании и эксплуатации крупных телескопов является обеспечение качества изображения, что, в свою очередь, требует разработки надёжных методов контроля положения составных элементов зеркальной системы [4, 5].

Различные многомерные системы контроля положения составных элементов таких телескопов требуют создания математических моделей и алгоритмов работы этих систем [6–12].

Описываемая в представленной работе оригинальная система контроля геометрии зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон» создаётся для штатного функционирования в составе бортового комплекса научной аппаратуры и рассчитывается на работу в условиях космического пространства. Система контроля в силу огромного динамического диапазона контролируемых параметров ($\geq 10^6$) состоит из двух самостоятельных ступеней: предварительной ступени на базе 3D-сканера [13, 14] и окончательной — анализатора [15].

В [13] представлена математическая модель, численно описывающая процесс предварительного контроля положения составных элементов зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон» с использованием 3D-сканера, заложенного в конструкции системы контроля зеркальной системы, и оптических контрольных меток на поверхности зеркальной системы. Линейная математическая модель позволяет связать фактические косвенные измерения зеркальной системы с неизвестными смещениями её параметров, определяющими форму телескопа.

Для проверки заложенных в [13] идей выполнения различных численных оценок и расчётов были написаны программы на языке программирования Python 3.7 (в среде Anaconda [16]), позволяющие реалистично исследовать поведение зеркальной системы [14]; симулировать работу 3D-сканера (в приближении геометрической оптики); найти пределы допустимого разброса параметров ЗС; визуализировать распространение света в зеркальной системе для наглядности и самопроверки (в пределах геометрической оптики).

Применяются штатные программные библиотеки среды программирования [16], позволяющие конструировать геометрическую модель телескопа, учитывающую возможности трассировки оптических лучей в модели и прочие атрибуты, а также методы, которые необходимы для проведения численных экспериментов и проверки технических решений.

Все отражающие поверхности зеркальной системы (плоские зеркала, параболоидные элементы главного зеркала, гиперболоидная поверхность вторичного зеркала, переключающее зеркало телескопа, перископическое зеркало, сферические контрольные метки) [13] были аппроксимированы неявными трёхмерными поверхностями второго порядка, имеющими общее уравнение поверхности, задаваемое 10 коэффициентами [14, 17].

Отражающие поверхности зеркальной системы телескопа описываются вектором смещений \mathbf{x} (определяемых в системах координат приводов коррекции положения соответствующей поверхности). При функционально настроенном телескопе все смещения принимаются за нулевые ($\mathbf{x} = \mathbf{0}$). Непосредственно вектор \mathbf{x} недоступен для прямого измерения, поэтому в работе [14] создан и описан метод предварительной оценки смещения элементов ЗС телескопа по косвенным (неявным) измерениям. Косвенные измерения выполняются 3D-сканером, формирующим вектор измерений \mathbf{y} , содержащий отклонения положений оптических контрольных меток телескопа от их эталонного положения в системе координат 3D-сканера. Решение обратной задачи [14] позволяет по косвенному набору измерений \mathbf{y} выполнить оценки смещений неизвестных параметров \mathbf{x} элементов ЗС, задаваемых удобным образом.

В [14] показана возможность контроля геометрии зеркальной системы телескопа в целях его предварительной настройки при использовании 3D-сканера на борту космического аппарата, вычислены пределы допустимых отклонений компонент зеркальной системы, необходимые для обеспечения функциональности телескопа в режимах предварительной (грубой) и точной настройки.

Целью предлагаемого исследования является описание моделирования допустимых значений погрешностей 3D-сканера при работе предварительной ступени для настройки и

юстировки оптической системы телескопа в космическом пространстве с формированием в фокальной плоскости телескопа пятна диаметром не более 50 мм. На базе математической модели работы системы контроля зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон» [13] и представленных в [14] алгоритмов и методики контроля геометрии зеркальной системы телескопа описываются результаты численного моделирования по выявлению значений погрешностей бортового 3D-сканера при предварительном контроле зеркальной системы обсерватории с использованием оптических контрольных меток на поверхности зеркальной системы.

Численное моделирование допустимых погрешностей бортового 3D-сканера при предварительном контроле зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон». Погрешность измерения положения контрольных меток 3D-сканером влияет на погрешность определения неизвестных параметров смещений \mathbf{x} оптических отражающих поверхностей [14].

3D-сканер как часть системы контроля предназначен для контроля положения составных элементов телескопа только в целях его предварительной настройки. Под предварительной (грубой) настройкой телескопа подразумеваются такие требования к его форме [14] (положению всех его оптических отражающих поверхностей), при которых параллельные лучи, приходящие от далёкого источника (например, звёзды), должны фокусироваться в плоскости изображения телескопа в пятно радиусом не более 25 мм.

Регистрируется максимальное отклонение волнового фронта (длины оптического пути), а также максимальное отклонение попадания луча от центра изображения. Этот эксперимент проводится по всем панелям главного зеркала. Напомним, что диаметр главного зеркала составляет 10 м. Оно состоит из раскрываемой части 24×4 лепестков главного зеркала, расположенных по 24 лепестка в каждом из 4 ярусов [13, 14]. Результаты моделирования с панелями, заданными в глобальной системе координат зеркальной системы телескопа [13], приведены в табл. 1.

Табл. 1 содержит предельно допустимые отклонения параметров положения оптических отражающих поверхностей (панелей, вторичного зеркала) зеркальной системы телескопа, при которых телескоп может сформировать изображение звезды необходимого качества (в пятно радиусом 25 мм). Следовательно, для выставления поверхностей телескопа в настроенное состояние неизвестные параметры отклонения поверхностей от настроенного состояния должны определяться системой контроля не хуже указанных в данной таблице.

Полагая, что контролируемые параметры имеют нормальное случайное распределение, выберем доверительный интервал их измерения в 3 стандартных отклонения (сигма), при котором предполагаем, что неизвестный параметр оценён правильно с вероятностью 0,997.

Введём вектор допустимых стандартных отклонений (1 сигма) \mathbf{a}_x неизвестных параметров \mathbf{x} оптических отражающих поверхностей. В таком случае любой параметр оптических отражающих поверхностей с индексом k становится допустимым или настроенным, если выполняется условие

$$-3\mathbf{a}_x[\mathbf{k}] \leq \mathbf{x}[\mathbf{k}] \leq 3\mathbf{a}_x[\mathbf{k}]. \quad (1)$$

Введём вектор \mathbf{s}_x как вектор стандартных отклонений (1 сигма), описывающих случайный разброс положений \mathbf{x} оптических отражающих поверхностей после вывода телескопа на орбиту, полагая, что параметры оптических отражающих поверхностей после вывода на орбиту распределены по закону нормального распределения (с нулевым средним, соответствующим исходному настроенному состоянию телескопа).

Иными словами, если для какого-то параметра оптической отражающей поверхности

Таблица 1

**Предельно допустимые отклонения одиночных параметров ЗС
для формирования изображения звезды
в пятно радиусом $R = 1$ мм и радиусом $R = 25$ мм**

Параметр	R , мм	\pm смещение параметра для пятна указанного радиуса (λ/x — погрешность волнового фронта при заданном смещении, $\lambda = 300$ мкм)			
		Панель 1-го яруса	Панель 2-го яруса	Панель 3-го яруса	Панель 4-го яруса
Панели главного зеркала					
параметр 0, поворот относительно оси Y , рад	1	$\pm 7,23 \cdot 10^{-6}$ ($\lambda/876$)	$\pm 7,58 \cdot 10^{-6}$ ($\lambda/252$)	$\pm 8,34 \cdot 10^{-6}$ ($\lambda/115$)	$\pm 9,39 \cdot 10^{-6}$ ($\lambda/70$)
	25	$\pm 1,83 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/3,54$)	$\pm 1,89 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/3,06$)	$\pm 2,09 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/2,28$)	$\pm 2,35 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/1,72$)
параметр 1, поворот относительно оси Z , рад	1	$\pm 7,21 \cdot 10^{-6}$ ($\lambda/23$)	$\pm 7,01 \cdot 10^{-6}$ ($\lambda/9,9$)	$\pm 6,87 \cdot 10^{-6}$ ($\lambda/6,3$)	$\pm 6,85 \cdot 10^{-6}$ ($\lambda/4,7$)
	25	$\pm 1,80 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/1,25$)	$\pm 1,76 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/0,4$)	$\pm 1,72 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/0,26$)	$\pm 1,72 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/0,19$)
параметр 2, поворот относительно оси X , рад	1	$\pm 3,87 \cdot 10^{-5}$ ($\lambda/541$)	$\pm 1,8 \cdot 10^{-5}$ ($\lambda/138$)	$\pm 1,38 \cdot 10^{-5}$ ($\lambda/62$)	$\pm 1,31 \cdot 10^{-5}$ ($\lambda/37$)
	25	$\pm 9,66 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/3,55$)	$\pm 4,49 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/2,72$)	$\pm 3,46 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/1,74$)	$\pm 3,28 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/1,18$)
параметр 3, смещение вдоль оси Y , мм параметр 4, смещение вдоль оси Z , мм	1	$\pm 3,45 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/86$)	$\pm 3,78 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/18,7$)	$\pm 4,58 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/8,3$)	$\pm 5,78 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/5$)
	25	$\pm 0,86$ ($\lambda/2,24$)	$\pm 0,95$ ($\lambda/0,72$)	$\pm 1,15$ ($\lambda/0,33$)	$\pm 1,46$ ($\lambda/0,2$)
параметр 5, смещение вдоль оси X , мм	1	$\pm 6,66 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/2,1$)	$\pm 5,29 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/2,5$)	$\pm 5,29 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/2,5$)	$\pm 5,88 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/2,3$)
	25	$\pm 1,67$ ($\lambda/0,08$)	$\pm 1,33$ ($\lambda/0,1$)	$\pm 1,33$ ($\lambda/0,1$)	$\pm 1,48$ ($\lambda/0,09$)
Контррефлектор (вторичное зеркало)					
параметр 0, поворот относительно оси Y , рад	1	$\pm 1,4 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/165$)	$\pm 1,46 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/39$)	$\pm 1,6 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/19$)	$\pm 1,75 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/13$)
	25	$\pm 3,5 \cdot 10^{-3}$ ($\lambda/2,73$)	$\pm 3,66 \cdot 10^{-3}$ ($\lambda/1,27$)	$\pm 4,0 \cdot 10^{-3}$ ($\lambda/0,71$)	$\pm 4,4 \cdot 10^{-3}$ ($\lambda/0,5$)
параметр 2, смещение оси Y , мм параметр 3, вдоль оси Z , мм	1	$\pm 3,58 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/83$)	$\pm 3,93 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/18$)	$\pm 4,8 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/7,9$)	$\pm 6,13 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/4,7$)
	25	$\pm 0,89$ ($\lambda/2,14$)	$\pm 0,98$ ($\lambda/0,69$)	$\pm 1,21$ ($\lambda/0,31$)	$\pm 1,55$ ($\lambda/0,18$)

Таблица 1 (окончание)

Параметр	R , мм	± смещение параметра для пятна указанного радиуса (λ/x — погрешность волнового фронта при заданном смещении, $\lambda = 300$ мкм)			
		Панель 1-го яруса	Панель 2-го яруса	Панель 3-го яруса	Панель 4-го яруса
параметр 4, смещение относительно оси X , мм	1	$\pm 6,65 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/2,1$)	$\pm 5,27 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/2,5$)	$\pm 5,27 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/2,5$)	$\pm 5,85 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/2,4$)
	25	$\pm 1,66$ ($\lambda/0,08$)	$\pm 1,31$ ($\lambda/0,09$)	$\pm 1,31$ ($\lambda/0,09$)	$\pm 1,45$ ($\lambda/0,09$)
параметр 5, масштаб, $\times(1+s)$, s — безразмерный параметр	1	$\pm 5,65 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/30$)	$\pm 4,57 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/23$)	$\pm 4,58 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/23$)	$\pm 5,29 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/41$)
	25	$\pm 1,43 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/0,91$)	$\pm 1,15 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/0,73$)	$\pm 1,15 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/0,73$)	$\pm 1,33 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/1,12$)
Переключающее зеркало					
параметр 0, поворот относительно оси Y , рад	1	$\pm 1,19 \cdot 10^{-3}$ ($\lambda/357$)	$\pm 1,19 \cdot 10^{-3}$ ($\lambda/352$)	$\pm 1,18 \cdot 10^{-3}$ ($\lambda/339$)	$\pm 1,18 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/323$)
	25	$\pm 2,96 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/0,57$)	$\pm 2,96 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/0,57$)	$\pm 2,96 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/0,57$)	$\pm 2,96 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/0,57$)
параметр 1, поворот относительно оси Z , рад	1	$\pm 8,39 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/357$)	$\pm 8,39 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/352$)	$\pm 8,38 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/338$)	$\pm 8,37 \cdot 10^{-4}$ ($\lambda/323$)
параметр 2, смещение вдоль оси Y , мм	25	$\pm 2,09 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/0,57$)	$\pm 2,09 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/0,57$)	$\pm 2,09 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/0,57$)	$\pm 2,092 \cdot 10^{-2}$ ($\lambda/0,57$)
	1	$\pm 24,48$ ($\lambda/0,01$)	$\pm 24,0$ ($\lambda/0,012$)	$\pm 23,67$ ($\lambda/0,012$)	$\pm 23,3$ ($\lambda/0,012$)
параметр 3, смещение вдоль оси X , мм	25	$\pm 0,98$ ($\lambda/0,31$)	$\pm 0,96$ ($\lambda/0,31$)	$\pm 0,95$ ($\lambda/0,32$)	$\pm 0,93$ ($\lambda/0,32$)
	1	$\pm 24,48$ ($\lambda/0,01$)	$\pm 24,48$ ($\lambda/0,01$)	$\pm 24,48$ ($\lambda/0,01$)	$\pm 24,48$ ($\lambda/0,01$)

с индексом k выполняется условие (1), то его фактический разброс не превышает допустимый:

$$s_{\mathbf{x}}[\mathbf{k}] \leq a_{\mathbf{x}}[\mathbf{k}]. \quad (2)$$

Положение зеркальной системы, полностью описываемое вектором \mathbf{x} , содержит множество параметров. В табл. 2 представлены выбранные для моделирования значения начального (после вывода на орбиту) $s_{\mathbf{x}}$ и допустимого (после грубой коррекции формы телескопа) $a_{\mathbf{x}}$ разброса параметров \mathbf{x} .

При моделировании измерения пространственного положения контрольных меток заложены два варианта их исполнения на панелях главного зеркала телескопа:

— вариант 1 (простые метки): контрольные метки заданы в виде зеркальных сфер (шариков диаметром 10 мм), расположенных по углам панелей главного зеркала, по 4 контрольные метки на каждую панель (рис. 1, 2);

Таблица 2

Стандартные отклонения $s_x[k]$ параметров ЗС до её настройки и допустимых $a_x[k]$ стандартных отклонений этих параметров, необходимых для предварительной настройки

Параметр		Панель 1-го яруса	Панель 2-го яруса	Панель 3-го яруса	Панель 4-го яруса
Панели главного зеркала					
параметр 0, актюатор панели, наклон панели по уровню, dh0, мм	$s_x[k]$	0,333	0,333	0,333	0,333
	$a_x[k]$	0,035	0,039	0,0408	0,0397
параметр 1, актюатор панели, наклон панели по азимуту, dh1, мм	$s_x[k]$	0,333	0,333	0,333	0,333
	$a_x[k]$	0,011	0,0218	0,033	0,043
параметр 3, поворот панели вокруг её нормали, рад	$s_x[k]$	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$
	$a_x[k]$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
параметр 4, смещение панели межъярусное, мм	$s_x[k]$	0,333	0,333	0,333	0,333
	$a_x[k]$	0,288	0,321	0,42	0,594
параметр 5, смещение панели внутриярусное, мм	$s_x[k]$	0,333	0,333	0,333	0,333
	$a_x[k]$	0,288	0,315	0,383	0,485
параметр 6, изотропное изменение масштаба панели, t как множитель $\times(1+t)$, где t — безразмерный параметр	$s_x[k]$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	$a_x[k]$	$4,856 \cdot 10^{-4}$	$4,597 \cdot 10^{-4}$	$5,036 \cdot 10^{-4}$	$6,046 \cdot 10^{-4}$
Контррефлектор (вторичное зеркало)					
параметр 0, поворот вокруг оси Y , рад параметр 1, поворот вокруг оси Z , рад	$s_x[k];$ $a_x[k]$	$5,8 \cdot 10^{-3}; 1,166 \cdot 10^{-3}$			
параметр 2, смещение по оси Y , мм параметр 3, смещение по оси Z , мм		0,333; 0,297			
параметр 4, смещение по оси X , мм		0,333; 0,437			
параметр 5, изотропное изменение масштаба панели, t как множитель $\times(1+t)$, где t — безразмерный параметр		$1 \cdot 10^{-5}; 3,836 \cdot 10^{-3}$			
Переключающее зеркало					
параметр 0, поворот вокруг оси Y , рад параметр 1, поворот вокруг оси Z , рад параметр 2, смещение по оси Y , мм параметр 3, смещение по оси Z , мм параметр 4, смещение по оси X , мм	$s_x[k];$ $a_x[k]$	$1,7 \cdot 10^{-2}; 9,863 \cdot 10^{-3}$ $1,7 \cdot 10^{-2}; 6,973 \cdot 10^{-3}$ 0,003; 7,766 0,003; 25 0,003; 8,16			

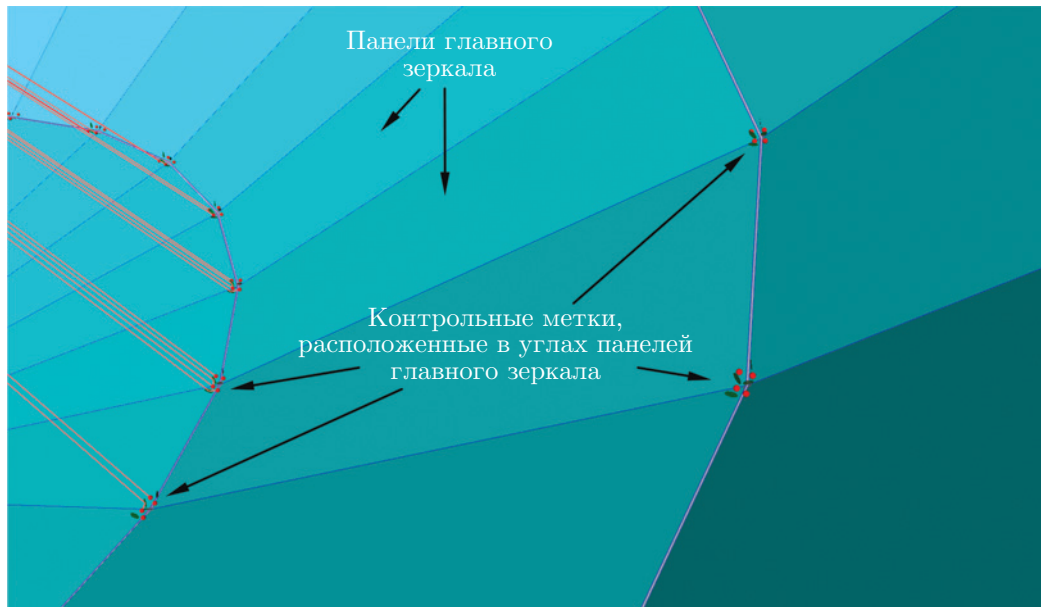


Рис. 1. Расположение контрольных меток по углам каждой панели главного зеркала

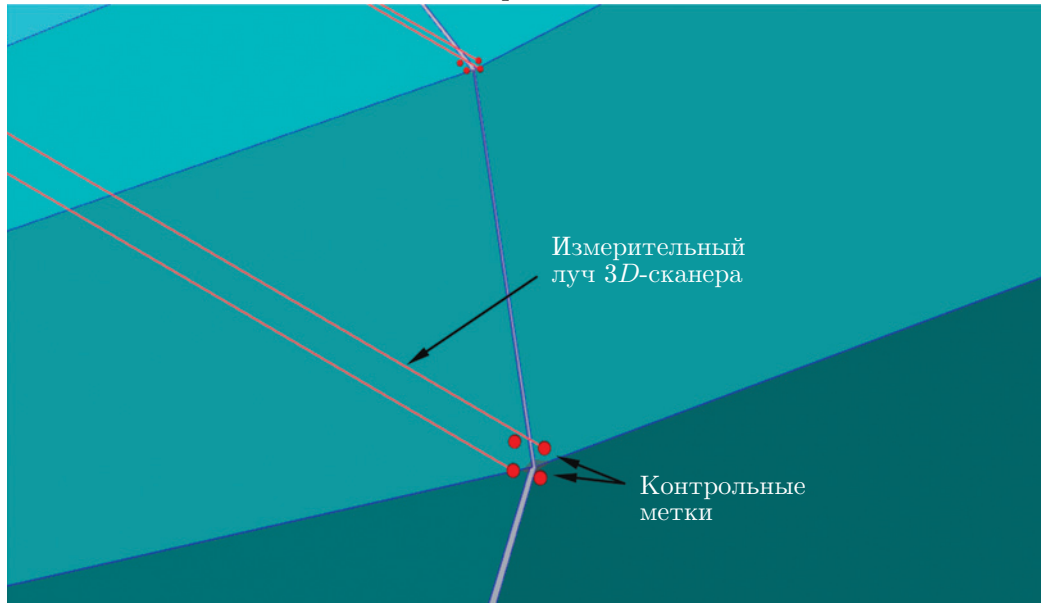


Рис. 2. Расположение и измерение положений только обычных (сферических) контрольных меток измерительными лучами (вариант 1). Каждая панель главного зеркала содержит 4 такие метки

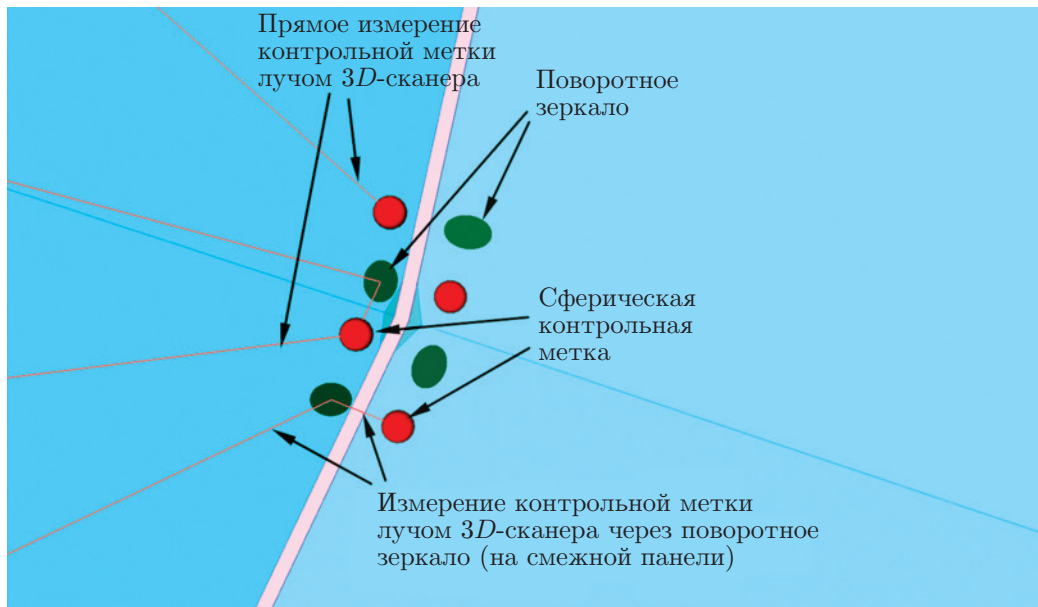


Рис. 3. Расположение контрольных меток, поворотных зеркал и их функциональность при измерении положения контрольных меток (вариант 2). Каждая панель содержит зеркала, сопряжённые с контрольными метками смежных панелей

— вариант 2 (простые метки + зеркальные метки): контрольные метки варианта 1 дополнены миниатюрными поворотными зеркалами (рис. 3). Миниатюрные зеркала расположены на панелях главного зеркала и позволяют поворачивать измерительный луч так, чтобы через зеркало можно было контролировать смежные контрольные метки, которые установлены на панелях главного зеркала, смежных к панели с поворотным зеркалом. В таком случае измеряемая контрольная метка и поворотное зеркало механически не связаны между собой, так как они установлены на разных панелях рядом. Рис. 1–3 демонстрируют расположение контрольных меток по оптическим отражающим поверхностям телескопа, используемых в модели.

Было проведено моделирование допустимых погрешностей 3D-сканера — дальномерного канала и угломерных каналов, применяемых при измерении положения контрольных меток, в целях удовлетворения требованиям грубой настройки зеркальной системы телескопа на основе данных табл. 1.

Формирование геометрической модели телескопа осуществлялось на основе чертежей телескопа и параметров его оптических отражающих поверхностей, указанных в техническом задании [13].

В модели были использованы сферические контрольные метки диаметром 10 мм:

- на поворотном зеркале по периметру светового контура, 8 шт.;
- на вторичном зеркале по периметру светового контура, 8 шт.;
- на панелях главного зеркала (4 яруса по 24 панели) по краям каждой панели, 4 шт. (см. рис. 1, 2);

— дополнительно для исследования варианта 2 в модели также применялись миниатюрные поворотные зеркала для контроля положения сферических контрольных меток «сбоку» со смежных панелей: 4 зеркала на панель (2-й и 3-й ярусы главного зеркала) и 3 зеркала на панель (1-й и 4-й ярусы главного зеркала) (см. рис. 3).

Таблица 3

Требования к точности измерения положения контрольных меток 3D-сканером

Максимально допустимые погрешности измерения каналов 3D-сканера		
Каналы измерения 3D-сканера	Только обычные сферические контрольные метки (вариант 1)	Контрольные метки, дополненные поворотными зеркалами (вариант 2)
Дальномерный канал 3D-сканера, погрешность не более	1,5 мкм	9 мкм
Угломерные каналы 3D-сканера, погрешность не более	0,25 угл. с	2 угл. с

Математическая модель основана на предположении о линейной функциональной зависимости искоемых смещений оптических отражающих поверхностей телескопа от наблюдаемых 3D-сканером (косвенных, неявно наблюдаемых) смещений положений контрольных меток.

Численно показано [14], что при малых деформациях зеркальной системы телескопа при выводе его на орбиту линейная зависимость адекватно описывает взаимосвязи искоемых и неявно наблюдаемых параметров, так как зеркальная система изменяет свою геометрию несущественно по сравнению с размерами телескопа.

Линейная зависимость между искомыми и наблюдаемыми параметрами описывается матричной зависимостью, называемой здесь дизайн-матрицей.

Алгоритм вычисления дизайн-матрицы представлен в [14].

С использованием начального разброса параметров и варьируемого шума измерения 3D-сканера вычислялся оптимальный решатель линейной системы в соответствии с формулой (16) из [13]. Для оптимального решателя вычислялась погрешность восстановления искоемых параметров оптических отражающих поверхностей телескопа по измерениям контрольных меток в соответствии с формулой (19) из [13].

Погрешность восстановления искоемых параметров сравнивалась с требованиями, указанными в табл. 1. Итеративно подбирались такие параметры максимально допустимой погрешности каналов измерения 3D-сканера, при которых требования для грубой настройки телескопа удовлетворялись. По результатам моделирования получены следующие требования к 3D-сканеру системы контроля (табл. 3).

Как следует из табл. 3, применение поворотных зеркал, расположенных на смежных к контрольным меткам панелях, существенно (на порядок) снижает требования к допустимым погрешностям дальномерного и угломерного каналов 3D-сканера. При указанных требованиях к 3D-сканеру возможно построение системы предварительного грубого контроля геометрии телескопа в целях его последующей грубой настройки по описанным выше критериям.

Качественно эффект от применения поворотных зеркал объясняется тем, что:

— смещения контрольных меток в направлении, перпендикулярном измерительному лучу, требуют высоких угломерных точностей 3D-сканера, так как типичная длина оптического пути от сканера до контрольных меток достаточно велика (8–9 м), однако с помощью миниатюрных поворотных зеркал поперечные угловые смещения контрольных меток эффективно конвертируются в дальномерные, обладающие существенно меньшей эквивалентной погрешностью;

— за счёт дополнительных зеркал объём измеряемой информации (количество изме-

рений) эффективно возрастает почти в 2 раза, что тоже вносит положительный вклад в итоговую погрешность решения поставленной задачи.

Поэтому рекомендуется использовать решение (вариант 2) с миниатюрными поворотными зеркалами. Несмотря на более сложное техническое исполнение, применение его предпочтительнее ввиду существенного вклада в уменьшение погрешности предварительного измерения геометрических параметров пространственного расположения элементов зеркальной системы.

Процесс изготовления зеркал может быть автоматизирован. Миниатюрные ненастраиваемые зеркала при необходимости могут быть автоматически спроектированы в специализированном программном обеспечении и выданы как код для станка с числовым программным управлением индивидуально для каждого поворотного зеркала. Изготовление зеркал возможно из подходящих легкообрабатываемых металлических сплавов.

Применение дополнительных контрольных меток, например, в центре панелей главного зеркала или на других оптических отражающих поверхностях не противоречит модели и, как это было численно установлено, только улучшит точность определения положения оптических отражающих поверхностей. Однако необходим компромисс между количеством устанавливаемых контрольных меток и массой/трудоемкостью изделия. Указанное выше количество и тип контрольных меток (вариант 2) минимальны рекомендуемым.

Численные эксперименты показали, что разработанный алгоритм допускает пропуски измерений, неточные измерения и работает по принципу — чем больше контрольных меток подвергнуто измерению 3D-сканером (больше известной информации о системе), тем точнее конечный результат. Однако он может работать и на произвольном подмножестве контрольных меток, при этом сам автоматически ограничит погрешность определения положений оптических отражающих поверхностей в рамках исходного разброса положения. Последнее означает, что если информации, получаемой в результате измерения пространственного положения контрольных меток, недостаточно для восстановления в соответствии с требованиями положения оптической отражающей поверхности (т. е. выполнения условия $\mathbf{s}_x[\mathbf{k}] \leq \mathbf{a}_x[\mathbf{k}]$ для любого из параметров с индексом k), то погрешность определения положения оптической отражающей поверхности по данным ограниченных измерений не выйдет за рамки начального разброса положений этой поверхности, описываемой вектором $\mathbf{s}_x[\mathbf{k}]$.

Процесс вычислений положения оптических отражающих поверхностей по измерениям контрольных меток по рабочему алгоритму достаточно трудоёмок для настольного компьютера (Intel i3-2130 считает обратную задачу за время порядка 10 с в среде Python 3.7). Конечно, по завершении этапа моделирования процесс вычислений имеет смысл проводить в другой программной среде в системе реального времени. Но и в этом случае объём памяти, требуемой для работы алгоритмов, будет составлять сотни Мегабайт, что может быть критичным для бортового программного обеспечения. Кроме того, объём первичной информации (измерение пространственного положения множества контрольных меток), достаточной для вычислений, не превышает 100–200 Кбайт и может быть легко передан на Землю через магистральный последовательный интерфейс космического аппарата. Поскольку измерение пространственного положения контрольных меток — это длительное и редкое событие, не требующее решения задачи в реальном времени, то практичнее выполнять процесс грубой настройки ЗС следующим итеративным способом: измерять пространственное положение всех или подмножества контрольных меток 3D-сканером на орбите; передавать результаты измерения положения контрольных меток (небольшой объём первичных данных) на Землю (100–200 Кбайт); обрабатывать измерения трудоёмкими алгоритмами на Земле; визуализировать результаты на Земле; принимать однократное решение оператором о коррекции зеркальной системы; отсылать небольшой объём инфор-

мации (< 100 Кбайт) для исполнительных механизмов космического аппарата в целях грубой коррекции зеркальной системы телескопа.

Заключение. По результатам данной работы можно сделать вывод, что при достижении допустимых погрешностей работы 3D-сканера (9 мкм, 2 угл. с) и применении комбинированных контрольных меток (зеркальные шарики диаметром ≥ 10 мм) совместно с поворотными зеркалами на смежных панелях главного зеркала потенциально возможно построение прибора для предварительной настройки зеркальной системы.

В связи с необходимостью присутствия оператора при контроле коррекции формы телескопа рекомендуется проводить сложные вычисления обратной задачи и визуализацию в наземных условиях на основе первичных данных анализа положения контрольных меток.

Сами первичные данные и результат измерения пространственного положения контрольных меток имеют небольшой объем информации и могут быть легко переданы по существующим каналам связи. Равно как и результат вычислений, требуемый для грубой коррекции зеркальной системы, занимает малый объем информации и легко может быть передан обратно на космический аппарат в целях коррекции его формы.

Финансирование. Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № АААА-А20-120102190007-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Космическая обсерватория Миллиметрон.** URL: <https://millimetron.ru/> (дата обращения: 10.06.2021).
2. **Демин А. В., Денисов А. В., Летуновский А. В.** Оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. **53**, № 3. С. 51–59.
3. **Кириченко Д. В., Клеймёнов В. В., Новикова Е. В.** Крупногабаритные оптические космические телескопы // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. **60**, № 7. С. 589–602. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-589-602.
4. **Лукин А. В., Мельников А. Н., Скочилов А. Ф.** Контроль зеркала контррефлектора телескопа “Миллиметрон” на основе использования синтезированной голограммы // Фотоника. 2016. **59**, № 5. С. 44–48.
5. **Верхогляд А. Г., Михалкин В. М., Куклин В. А. и др.** Система контроля геометрических параметров центрального зеркала космического телескопа “Миллиметрон” // Сб. тр. Междунар. конф. “Решетневские чтения”. Красноярск, 11-14 нояб., 2014. Ч. 1. С. 61–63.
6. **Conquet V., Zambrano L. F., Artyukhina N. K.** Algorithm and mathematical model for geometric positioning of segments on aspherical composite mirror // Devices and Methods of Measurements. 2018. **9**, N 3. P. 234–242. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-3-234-242.
7. **Демин А. В., Денисов А. В., Летуновский А. В.** Оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. **53**, № 3. С. 51–59.
8. **Демин А. В., Ростокин П. В.** Алгоритм юстировки составных зеркал // Компьютерная оптика. 2017. **41**, № 2. С. 291–294. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-291-294.
9. **Olczak G., Wells C., Fischer D. J., Connolly M. T.** 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.
10. **Пуряев Д. Т., Батшев В. И., Польщикова О. В.** Метод контроля качества выпуклого гиперболического зеркала радиотелескопа космической обсерватории “Миллиметрон” // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. **19**, № 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/833.html> (дата обращения: 10.06.2021).

11. **Сомов С. Е.** Юстировка и калибровка информационно-измерительной системы для определения ориентации спутника землеобзора и его наблюдательного оборудования // Изв. Самарского научного центра РАН. 2018. **20**, № 1. С. 87–96. DOI: 10.24411/1990-5378-2018-00127.
12. **Сычев В. В., Клем А. И.** Алгоритм управления многоэлементным зеркалом на примере космического телескопа обсерватории “Миллиметрон” // Оптика атмосферы и океана. 2018. № 7. С. 578–586. DOI: 10.15372/AOO20180712.
13. **Макаров С. Н., Верхогляд А. Г., Ступак М. Ф. и др.** Математическая модель зеркальной системы обсерватории “Миллиметрон” и описание метода предварительного обмера телескопа в рамках данной модели // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. **22**, № 1. С. 151–165. DOI: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-151-165.
14. **Макаров С. Н., Верхогляд А. Г., Ступак М. Ф. и др.** Математическое моделирование работы 3D-сканера при контроле зеркальной системы обсерватории “Миллиметрон” // Компьютерная оптика. 2021. **45**, № 4. С. 541–550. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-833.
15. **Завьялов П. С., Кравченко М. С., Жимулева Е. С.** Разработка системы контроля и юстировки рефлектора обсерватории «Миллиметрон» // Автометрия. 2020. **56**, № 4. С. 48–60. DOI: 10.15372/AUT20200406.
16. **Data science** technology for human sensemaking. Anaconda Inc., 2021. URL: <https://www.anaconda.com/> (дата обращения: 10.06.2021).
17. **Ильин В. А., Ким Г. Д.** Линейная алгебра и аналитическая геометрия. М.: Проспект, 2012. 400 с.

Поступила в редакцию 10.06.2021

После доработки 15.07.2021

Принята к публикации 02.08.2021
