

УДК 520.2.03; 520.2.062; 681.2.082.5.001.63; 681.2.082.5.001.66

Вопросы метрологического обеспечения контроля пространственного положения элементов главного зеркала 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.

Рассматриваются некоторые возможные варианты приемной аппаратуры, основанной на псевдообращении волнового фронта измерительного пучка и фотоэлектронно-оптическом усилении сигнала углового рассогласования. Оценка характеристик приемников позволяет сделать вывод о возможности создания измерительных систем, отвечающих предъявляемым к телескопу «Миллиметрон» требованиям.

Ключевые слова: космический телескоп, система адаптивного управления, датчик углового рассогласования, составное главное зеркало; space telescope, adaptive control system, sensor of angular misalignment, composite primary mirror.

Введение

Количество получаемой космическим телескопом (КТ) информации определяется качеством изображений, во многом зависящим от выбранной концепции построения и технологичности телескопа. При этом для крупногабаритного телескопа с составным главным зеркалом (СГЗ), такого как КТ «Миллиметрон», важную роль играет точность воспроизведения формы поверхности главного зеркала пространственно установленными составными зеркальными элементами (сегментами).

Для проекта «Миллиметрон» с диаметром главного зеркала 10 м необходимая точность воспроизведения формы СГЗ составляет 1 мкм (СКО). Успешное решение данной проблемы связано с вопросами метрологического обеспечения на различных этапах жизненного цикла телескопа. Анализ существующих измерительных технологий показал, что в специфических условиях работы космического телескопа требуются новые подходы к построению измерительных средств, отвечающие требованиям точности, надежности, простоты и компактности.

Номенклатура существующих измерительных средств и методов контроля формы и взаимного положения рабочих поверхностей элементов оптической системы телескопа в процессе их создания, на этапах наземной отработки конструкции и эксплуатации изделия в космосе не позволяет положительно ответить на вопрос о возможности создания

измерительных систем, отвечающих предъявляемым к КТ «Миллиметрон» требованиям. В первую очередь это относится к приемной аппаратуре, являющейся своего рода краеугольным камнем измерительной системы.

На этапе наземной отработки конструкции и технологии создания элементов СГЗ телескопа «Миллиметрон» используется целый ряд измерительных систем. В процессах мониторинга деформаций формы элементов СГЗ телескопа «Миллиметрон», в том числе на этапе криогенных испытаний, применяются лазерные датчики линейных перемещений серии RAM (WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Germany) [1], а также оптоволоконные датчики на основе интерферометра Фабри–Перо (FISO Technologies, Canada) [2].

Для промежуточного контроля точности обработки элементов СГЗ телескопа на разных технологических этапах (после снятия заготовки с оправки, термовакуумного режима испытаний, захлаживания парами жидкого азота и др.) успешно используется бесконтактная оптическая координатно-измерительная топометрическая система ATOS III Rev.02 модель 400 абсолютных измерений со вспомогательной фотограмметрической системой TRITOP (Gom GmbH, Germany) [3, 4]. ATOS представляет собой трехмерный оптический сканер, позволяющий по реальным объемным моделям создавать их трехмерные аналоги в виде массивов точек.

Достоинства этой системы заключаются в следующем:

— высокое разрешение: точность массива точек, приемлемая для задач промежуточного контроля прецизионных поверхностей элементов зеркала,

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

составляет 16 мкм (для измерительного объема $320 \times 240 \times 240$ мм) [3];

– большой массив получаемых данных измерений с высокой пространственной плотностью точек (расстояние между измеряемыми точками 0,104 мм для вышеуказанного измерительного объема) [3];

– высокая скорость обработки получаемых данных (быстрое оптическое сканирование; быстрая оцифровка);

– мобильность (простота транспортировки, калибровки);

– гибкость (большой диапазон габаритов измеряемых объектов; индифферентность к базированию измеряемых объектов);

– простота использования (простота непосредственных измерений; дружественный интерфейс ПО).

Однако минус системы ATOS, заключающийся в недостаточной фактической инструментальной точности системы (до 16 мкм), ограничивает ее применение для контроля изготовленных элементов СГЗ как не удовлетворяющей требованиям КТ «Миллиметр». В настоящее время ведутся работы по повышению точности за счет более точной склейки кадров измерений.

С целью повышения надежности получаемых результатов измерений было осуществлено дублирование измерительных систем с помощью контактной координатно-измерительной машины (КИМ) ZEISS PRISMO ultra. Данная КИМ имеет более высокую инструментальную точность $1,5 + 2$ мкм/м, не обладая при этом достоинствами системы ATOS [5].

Круг задач метрологического обеспечения на этапах жизненного цикла космического телескопа шире, и имеющихся средств измерений для их решения недостаточно.

1. Измерительные технологии контроля формы и взаимного положения элементов главного зеркала космического телескопа

Измерительные задачи на этапах жизненного цикла КТ условно можно разделить на четыре группы:

1. Измерения, применяемые при создании отдельных зеркальных оптических элементов.

Контрольные измерения элементов оптической системы телескопа и частично их сборки выполняются, как правило, в небольшом пространственном объеме на дорогостоящих КИМ с прецизионной точностью ($1,5 + 2$ мкм/м на примере КИМ ZEISS PRISMO), располагаемых в специальных помещениях с высокостабильным фундаментом.

2. Юстировка изделия в сборе.

К измерительным средствам данной группы обычно относят промышленно-геодезические системы. В настоящее время с широким внедрением оптико-электронных приборов на смену высокоточному геометрическому нивелированию и автоколлимационному методу пришла координатная измерительная технология определения геометрических параметров крупногабаритного объекта сложной формы. При

помощи координатной системы получают пространственные координаты характерных точек поверхности измеряемого объекта или облака точек поверхности с последующей их обработкой в системе автоматизированных проектов (CAD, CAM и CAE) для вычисления необходимых параметров измеряемого объекта. Подобная схема обмера обладает высокой технологичностью, гибкостью и универсальностью.

3. Измерения в процессе наземных испытаний.

К измерительным средствам этого этапа как правило предъявляются повышенные требования в части эксплуатации в условиях, моделируемых на стенде. Ввиду специфики испытаний и больших финансовых затрат на их проведение относительные измерения имеют больший приоритет, чем абсолютные.

4. Контроль взаимного положения элементов в процессе эксплуатации в космическом пространстве.

Эта задача осложняется не только жесткими условиями пребывания изделия в космосе, но и трудностью (чаще всего невозможностью) его технического обслуживания.

С учетом вышесказанного на основе анализа измерительных систем и приемной аппаратуры основными критериями при выборе конкретных измерительных схем следует принять:

– обеспечение необходимой точности измерений, обусловленной главным образом точностью воспроизведения формы СГЗ (СКО = 1 мкм);

– нерасстраиваемость системы контроля в условиях помеховых воздействий различной природы;

– высокую надежность работы измерительных средств в условиях открытого космоса, подразумевающих использование простых и технологичных технических решений;

– быстродействие измерительной системы;

– компактность и легкость измерительной системы.

2. Решение измерительных задач в проектах, подобных обсерватории «Миллиметр»

Рассмотрим варианты решения измерительных задач в космических телескопах, аналогичных по векогабаритным характеристикам КТ «Миллиметр».

Оптическая система телескопа «Миллиметр» состоит из главного зеркала диаметром 10 м (параболоид вращения) и вторичного зеркала (гиперболоид вращения), фокусы которых совмещены. Главное зеркало состоит из центрального сегмента диаметром 3 м и 24 лепестковых сегментов длиной 3,5 м. Точность отражающей поверхности главного зеркала 1 мкм (СКО). Рабочая температура отражающей поверхности главного зеркала 4,5 К [6].

Наиболее близкими к «Миллиметру» «по идеологии» и измерительным задачам являются орбитальная обсерватория Herschel (Herschel Space Observatory, EC) [7], космический телескоп JWST (James Webb Space Telescope, USA) [8] и орбитальный радиотелескоп KPT («Радиоастрон», РФ и др.) [9].

Для проектов Herschel и JWST предусмотрено захлаживание главного зеркала. Точность отражающих поверхностей для этих телескопов ожидается выше, чем у КТ «Миллиметр».

У телескопа Herschel каркас главного зеркала, выполненный из карбида кремния, диаметром 3,5 м составлен из 12 секторов. Финишная шлифовка и полировка выполнены для заготовки СГЗ в сборе как единого целого, после чего произведено напыление отражающего покрытия. Оработка технологии проводилась на нескольких прототипах.

Измерительные задачи, решенные в процессе создания телескопа Herschel:

- контроль формы и положения сегментов главного зеркала;

- контроль взаимного положения элементов зеркальной системы;

- контроль положения и ориентации телескопа в системе координат опорно-поворотного устройства (ОПУ);

- контроль деформации главного зеркала и ОПУ при вибро-, термовакуумных и других испытаниях наземной обработки.

Телескоп Herschel в течение двух недель подвергался воздействию низких температур до $-178\text{ }^{\circ}\text{C}$ с целью проверки устойчивости к холоду и вакууму зеркал телескопа и их разгрузочных приспособлений. Для регистрации деформаций материала телескопа было снято несколько тысяч фотографий под разными углами, по которым строилась трехмерная картина деформаций зеркал и мест их крепления. Аналогичные испытания были проведены со всеми элементами телескопа Herschel, в результате чего было установлено недопустимое смещение фокуса при захлаживании. После повторных испытаний, подтвердивших этот эффект, была проведена соответствующая коррекция конструкции. Необходимость в такой процедуре возникла, поскольку Herschel не имеет системы адаптации и ремонт, подобный ремонту на телескопе HST, для него не представляется возможным.

При сборке сегментов каркаса главного зеркала и юстировке зеркальной системы телескопа проекта Herschel (контроль сборки каркаса главного зеркала, привязка осей главного зеркала телескопа Herschel к системе координат ОПУ и др.) применялся лазерный трекер Leica LTD840 [7].

Главное зеркало JWST диаметром 6,5 м изготовлено из 18 гексагональных сегментов из бериллия диаметром 1,3 м и весом 21 кг каждый. На этапе выведения на орбиту главное зеркало свернуто в транспортное положение, затем оно разворачивается в единое СГЗ, восстанавливая свою форму с помощью системы адаптации.

К измерительным задачам наземной обработки, перечисленным выше, с учетом существенно больших размеров JWST добавляется контроль работоспособности системы адаптации. При производстве бериллиевых шестигранников и вторичного зеркала контроль их формы и деформаций после фрезерования сот с тыльной стороны выполнялся на КИМ

ZEISS PRISMO. Контроль работоспособности системы адаптации выполнялся на макете главного зеркала телескопа JWST с автоколлимационным теодолитом Leica TM5100A. Аналогичным образом проводилась юстировка приемной оптической системы JWST [8].

Поскольку телескоп «Миллиметр» будет работать в другом диапазоне длин волн (0,03...0,3 мм), чем указанные выше инструменты, требования по точности отражающей поверхности его СГЗ на два порядка ниже, однако размеры значительно больше — 10 м. При решении измерительных задач родственного проекта «Радиоастрон» широко применялся мультитеодолитный метод, а на завершающем этапе — лазерный радар [9].

Следует отметить, что в рассмотренных телескопах, подобных КТ «Миллиметр», широко применяются все представленные выше измерительные системы.

3. Анализ измерительных систем и приемной аппаратуры применительно к космическому телескопу «Миллиметр»

Как упоминалось ранее, для измерительных задач контроля сборок элементов оптической системы телескопа широко используются координатные технологии, точность которых определяется погрешностями элементной базы, методики измерений, количества и представительности получаемых точек. Для обмера крупногабаритных объектов, каковым является СГЗ телескопа «Миллиметр», применяются промышленно-геодезические системы, реализующие полярный, мультитеодолитный и фотограмметрический методы определения координат.

Полярный метод определения координат основан на вычислении прямоугольных координат из измеренных пространственных полярных. Для обеспечения стабильности положения прибора во время измерений требуется регулярный контроль пунктов опорной геодезической сети.

Достоинства полярного метода — малая трудоемкость и высокая скорость измерений (порядка 100 точек в секунду). Недостатки — бесконтрольное определение положения точек, что не дает надежного контроля качества измерений, а также необходимость в промежуточных опорных точках для съемки объекта с разных ракурсов с целью исключения слепых зон измерений. Перестановки прибора с привязкой к опорным точкам снижают точность и скорость выполнения работ. Возможные средства прецизионного контроля данной группы могут быть реализованы на базе высокоточного электронного тахеометра, лазерного трекера и лазерного радара.

В тахеометрических системах возможно совмещение автоколлимационных измерений с мультитеодолитными, т.е. определение угловой ориентации элементов СГЗ и их пространственного положения.

Современные тахеометрические системы позволяют добиться точности определения ориентации юстировочного элемента СГЗ до долей секунды, что соответствует микронным деформациям. Факторами, ограничивающими точность измерения прецизионными автоколлимационными тахеометрами, являются размеры помещения для измерений и качество отражающей поверхности элементов СГЗ.

Для прецизионных измерений крупногабаритных объектов сложной формы в измерительном пространстве, сопоставимом с габаритами телескопа, широко используются лазерные трекары, где фактически совмещен интерференционный дальномер с полноповоротным угломерным прибором. С использованием приставки-сканера и установкой визируемых объектов лазерного трекара на поверхности главного зеркала можно определять форму отражающих поверхностей элементов СГЗ и контролировать деформации конструкции с прецизионной точностью.

Для выполнения прецизионных линейных измерений (от 0,05 мм) без применения отражателя, т.е. непосредственно до поверхности обмеряемого объекта, используются лазерные радары. Для прецизионных измерений также требуются визируемые объекты (калиброванные металлические шарики), с применением которых скорость измерений падает до одной точки в 6–8 с. Для других визируемых объектов точность дальномера ниже. Кроме того, максимальная точность сканирования поверхности лазерным радаром может быть достигнута при перпендикулярной ориентации обмеряемой поверхности к визирному лучу радара. На этапе виброиспытаний использование вышеуказанных визируемых объектов в качестве деформационных марок недопустимо из-за их возможного смещения и отрыва.

В мультитеодолитных системах в ходе измерений горизонтальных направлений и зенитных расстояний характерных точек объекта из пунктов стояния прецизионных теодолитов строится пространственная угловая сеть. Координаты характерной точки определяются с двух и более точек стояния для повышения достоверности измерений.

Фотограмметрические системы определения координат, реализующие пространственную фотограмметрическую засечку, используются не только при юстировке изделия в сборе. Данный класс систем стал штатным средством контроля деформаций в проектах *Herschel* и *JWST* в процессе наземных испытаний, так как обладает возможностью фиксации мгновенного состояния объекта (несколькими камерами) в большом количестве точек. Погрешность определения координат данной системы (на примере системы *TRITOP*, Germany) [10] составляет 5 мкм + 2 мкм/м. Для размещения оборудования в крио- и барокамерах необходимы специальные боксы с оптическими иллюминаторами, минимизирующими искажения в оптической схеме измерительной системы. Размещение же измерительной системы внутри камеры потребует создания специальных измерительных средств.

4. Выводы о возможности создания измерительных систем, отвечающих требованиям «Миллиметра»

Из анализа применяемых решений в аналогичных проектах и для схожих измерительных задач следует, что современные измерительные технологии пригодны и позволяют достичь необходимой точности измерений на этапе создания элементов СГЗ только в наземных условиях. В условиях производства это прецизионные контактные КИМ и бесконтактные оптические сканирующие системы с доработкой методики измерений и обработки получаемых данных.

Применение современных прецизионных координатных измерительных систем возможно и для размерного контроля на этапах сборки и юстировки СГЗ с созданием специальных методик измерений, учитывающих габариты СГЗ и требования по точности. Однако эффективность проведения измерений с помощью систем данного класса во время термовакуумных и криогенных испытаний неочевидна. Решением этой проблемы могут стать относительные измерения деформаций предварительно проконтролированных и съюстированных отражающих поверхностей элементов СГЗ. Другим путем является применение абсолютных прецизионных систем измерений с использованием лазерных трекаров и их аналогов. В частности, в целях контроля элементов СГЗ при наземной отработке и предварительной юстировке КТ могут быть задействованы абсолютные прецизионные оптические преобразователи для условий сверхвысокого вакуума серии *RESOLUTE* (Renishaw, Great Britain), успешно применяемые в наземных испытаниях космического аппарата *MTG* (*SYMETRIE*, France) [11] и юстировке изделия в сборе.

Итак, полностью готовых решений, позволяющих выполнить обмер десятиметрового объекта с необходимой точностью на этапе наземной отработки и эксплуатации в условиях космоса, не существует. Необходимо новый подход к созданию специальных измерительных средств и методик. Предъявляемым к телескопу требованиям и критериям контроля может удовлетворять приемная аппаратура контроля углового положения элементов СГЗ на основе псевдообращения и фотоэлектронных оптических усилителей, размещаемых на стыках элементов главного зеркала [12, 13]. Данная измерительная технология может быть применена на этапе наземной отработки совместно с лазерными трекарами, а в условиях эксплуатации — лечь в основу системы автоматической стабилизации (САС) в рамках системы адаптивного управления (САУ).

5. Структура датчика системы автоматической стабилизации главного зеркала космического телескопа

Один из возможных вариантов исполнения автоколлимационного датчика САС, удовлетворяющий

вышеуказанным критериям решения измерительных задач жизненного цикла КТ, представлен на рис. 1. Принцип работы описываемого датчика базируется на принципе псевдообращения контрольного пучка излучения и фотоэлектронно-оптического усиления сигнала углового рассогласования [12, 13].

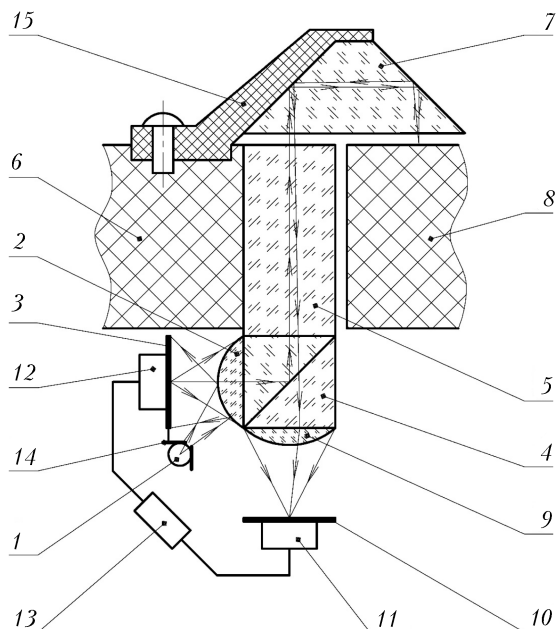


Рис. 1. Принципиальная схема датчика САС КТ «Миллиметр»: 1 – источник света (ИК-диод); 2, 9 – выпуклая линза; 3 – маска-позитив; 4 – куб-призма; 5 – оптический световод; 6, 8 – сопрягаемые сегменты СГЗ; 7 – прямоугольная призма (световозвращатель); 10 – маска-негатив; 11, 12 – светочувствительный элемент; 13 – дифференциальный преобразователь сигнала; 14 – шторка; 15 – механизм поворота призмы 7

В качестве источника света используется ИК-фотодиод 1. Свет от источника падает на выпуклую линзу 2 и освещает маску-позитив 3, расположенную в фокальной плоскости линзы 2. Далее, отражаясь от 3, свет параллельным пучком проходит через оптические куб-призму 4, оптический световод 5 и прямоугольную призму 7, попадая на элемент СГЗ 8, сопрягаемый с элементом 6, где расположен датчик. Отраженный световой пучок поджимается за счет кривизны элемента 8 и проходит обратный путь через элементы 7, 5, 4, а затем фокусируется выпуклой линзой 9 на маску-негатив 10. Изображение маски-позитива 3 накладывается на маску-негатив 10.

При отсутствии углового рассогласования между сегментами 6 и 8 на выходе светочувствительного элемента 11 будет нулевой сигнал. При наличии углового рассогласования между этими сегментами на выходе будет сигнал, пропорциональный величине этого рассогласования.

Дифференциальный преобразователь 13 формирует сигнал управления для исполнительного механизма (актуатора), обрабатывающего рассогласование.

Во избежание засветки маски-позитива 3 последняя прикрывается от источника 1 шторками 14.

Положение источника 1 сбоку от маски-позитива 3 подбирается таким образом, чтобы не создавать помехового воздействия на приходящий с элемента 8 отраженный световой сигнал. Расчеты показывают, что световой мощности ИК-диода достаточно для формирования изображения в плоскости маски-негатива 10.

Для обеспечения целостности выступающей за габарит элемента 6 СГЗ оптической прямоугольной призмы 7 последняя выполняется с механизмом 15 поворота ее в рабочее положение после раскрытия конструкции СГЗ в космосе.

В результате обработки сигналов в 13 вырабатывается соответствующее управляющее воздействие и производится коррекция в соответствующих угловых координатах элементов СГЗ. При достаточной жесткости элементов СГЗ для однозначного определения положения элемента в пространстве достаточно трех вышеописанных датчиков: один контролирует положение элемента относительно метрологической базы измерений, два других контролируют оптический ноль (знак рассогласования и его величину) положения элемента относительно соседних сегментов в пределах одного ряда. Для повышения координатной чувствительности угловой коррекции взаимного положения элементов при их автоматической выверке возможно дублирование датчиков по одному на каждый общий стык для соседних сегментов с использованием среднего арифметического сигнала датчиков. Управляющие воздействия на жесткие недеформируемые сегменты СГЗ достаточно проводить тремя актуаторами на каждый элемент СГЗ.

Заключение

Предложенные в результате анализа измерительных технологий технические решения и концепция построения приемной аппаратуры для САС и САУ КТ «Миллиметр» позволяют положительно ответить на вопрос – можно ли получить качественную, надежную и стабильную систему контроля пространственного положения элементов СГЗ, отвечающую требованиям технического задания «Миллиметра», которая обеспечит высокое качество изображения КТ в реальных условиях космоса.

1. *LASER* Аналоговый датчик перемещений. Серия RAM. Техническое описание // Тр. ЗАО «Сенсор Системс». М., 2015. 9 с.
2. *FTI-10* operating manual. Quebec: FISO Technologies inc., 2002. 52 p.
3. *ATOS II* и *ATOS III Triple Scan* с держателем камер 400 мм и 800 мм: Техническое руководство пользователя / Тр. ОАО «Национальный институт авиационных технологий». М., 2012. 45 с.
4. *Клем А.И.* Измерение рабочей поверхности астронавальной матрицы центрального зеркала: Технологическая инструкция / Тр. ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. М., 2015. 82 с.
5. *PRISMO®*. Технические характеристики. Российская редакция / Тр. ООО «ОПТЭК». М., 2016. 6 с.
6. *Борисов К.В., Зеленый Л.М., Кардашев Н.С., Макаров Ю.Н., Торжова Е.Д., Хайлов М.Н.* Федеральная космическая программа России на 2006–2015 годы,

раздел I. Техническое задание на СЧ ОКР «Создание БКНА и НКК КК «Спектр-М»» / под общ. ред. М.Н. Хайлова / Тр. Федерального космического агентства. М., 2015. 49 с.

7. Doyle D., Pilbratt G., Tauber J. The Herschel and Planck Space Telescopes // Proc. SPIE. 2009. V. 97, N 8. P. 1403–1411.
8. Hadaway J., Chaney D., Carey L. The optical metrology system for cryogenic testing of the JWST primary mirror segments // Proc. SPIE. Optical Manufacturing and Testing IX. 2011. V. 8126. DOI: 10.1117/12.894582.
9. Александров Ю.А., Андреев В.В., Бабакин Н.Г., Бабьшин В.Е., Белоусов К.Г., Беляев А.А., Бирюков А.В., Бубнов А.Е., Быкадоров А.А., Васильков В.И., Виноградов И.С., Гвамичава А.С., Зиновьев А.Н., Комаев Р.В., Каневский Б.З., Кардашев Н.С., Ковалев Ю.А., Ковалев Ю.Ю., Коваленко А.В., Корнеев Ю.А., Костенко В.И., Крейсман Б.Б., Кукушкин А.Ю., Ларионов М.Г., Лихачев С.Ф., Лихачева Л.Н., Медведев С.Ю., Мелехин М.В., Мизякина Т.А., Николаев Н.Я., Новиков Б.С., Новиков И.Д., Павленко Ю.К., Пономарев Ю.Н., Попов М.В., Пышинов В.Н., Рожков В.М., Сахаров Б.А., Серебренников В.А., Смирнов А.И., Степаньянц В.А., Федорчук С.Д., Шацкая М.В., Шейхет А.И., Ширишаков А.Е., Якомов В.Е. Радиоастрон (проект «Спектр-Р») – радиотелескоп много больше Земли. Основные параметры и испытания // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2011. № 3. С. 11–19.
10. TRITOP. Руководство пользователя / Тр. ОАО «Национальный институт авиационных технологий». М., 2007. 134 с.
11. Компания SYMÉTRIE для своих гексаподов выбирает усовершенствованные абсолютные энкодеры RESOLUTE™ компании Renishaw. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.renishaw.ru/ru/symetrie-hexapods-choose-renishaws-advanced-resolute-absolute-encoders-38342> (дата обращения: 31.03.2018).
12. 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., 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.
13. Федотов Г.И., Ильин Р.С., Новицкий Л.А. Лабораторные оптические приборы. М.: Машиностроение, 1979. 446 с.

V.V. Sychev, A.I. Klem. Metrological control of the spatial positions of elements of the “Millimetron” telescope primary mirror.

Possible variants of the sensor equipment based on the pseudo-circulation of the wave front of the measuring beam and photoelectronic-optics amplification of the angular misalignment signal are considered. Evaluation of the characteristics of these sensors allows us to conclude a possibility of creating measuring systems that meet the requirements of the “Millimetron” telescope.