

УДК 520.272:528.5

DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-22-32

Геодезическое обеспечение выверки формы отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа с применением лазерных трекеров

А. А. Кузин^{1*}, В. В. Петров², А. А. Пефтиев²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ООО «Промышленная геодезия», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

* e-mail: kuzin_aa@pers.spmi.ru

Аннотация. В статье рассматриваются возможности применения координатоопределяющей технологии с использованием высокоточных геодезических приборов для выверки формы отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа, что имеет очень важное значение для последующей его юстировки и выполнения радиоастрономических наблюдений. Приведены общие сведения о радиотелескопах. Рассмотрены существующие классические геодезические и негеодезические методы, используемые в процессе решения поставленной задачи. Приведена методика геодезических работ по выверке формы с применением высокоточных лазерных трекеров. Методика выполнения работ включает несколько этапов: от проектирования опорной сети и станций расположения трекера до обработки и интерпретации результатов измерений. Достаточно внимания уделено условиям выполнения высокоточных измерений. Математическая обработка результатов измерений выполняется в специализированном программном обеспечении Spatial Analyzer и основана на преобразовании систем координат.

Ключевые слова: лазерный трекер, радиотелескоп, выверка формы, точность, пространственные прямоугольные координаты, система координат

Введение

Радиотелескоп (РТ) представляет собой астрономический инструмент, работающий на прием радиоизлучения от объектов, находящихся в космосе, обработку этих данных (определение координат, пространственной структуры, интенсивности излучения, спектра и поляризации) и передачу радиоизлучения для управления космическими аппаратами.

Тип антенны РТ зависит от диапазона используемых длин волн, значения которых варьируются от 0,1 до 1 000 мм. Обычно антенны РТ представляют собой отражатели в форме параболоида вращения. Примером является калязинский радиотелескоп ТНА-1 500 или РТ-64 (рис. 1). Диаметр апертуры антенны данного РТ составляет 64 м. Антенны данного класса являются полноповоротными, что позволяет вести наблюдения за космическими объектами все время нахождения в зоне видимости.

Определение направления на источник излучения происходит с некоторой ошибкой, определяемой диаграммой направленности.

Наличие ошибки измерения направления ограничивает разрешающую способность телескопа. Чем выше разрешающая способность, тем более мелкие объекты возможно наблюдать в космосе.



Рис. 1. ТНА-1 500 в г. Калязине

Улучшить разрешающую способность можно уменьшением длины волны λ или увеличением диаметра апертуры D антенны РТ. Первый способ реализуется путем повышения качества поверхности зеркал, второй – увеличением размеров антенны [1]. Чем больше диаметр апертуры и чем точнее она

коррелирует с математической моделью, тем выше разрешающая способность и чувствительность у РТ.

При улучшении разрешающей способности РТ путем уменьшения длины волны необходимо, чтобы форма поверхности отражателя главного зеркала (ГЗ) была близка к идеальной математической модели. Для этого отражающая поверхность составляется из параболических щитов малого размера, которые путем регулировок располагают в квазипараболической поверхности с некоторым среднеквадратическим отклонением m .

С помощью взаимосвязи λ и m оцениваются потери усиления по формуле Ruze [2]

$$\frac{G}{G_0} = \exp \left[- \left(4\pi \frac{m}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где G_0 и G – коэффициенты усиления на длине волны λ при отсутствии ($m = 0$) и наличии ($m \neq 0$) ошибок соответственно; m – средняя квадратическая погрешность (СКП) поверхности ГЗ.

Допустимые значения СКП определения поверхности ГЗ относительно рабочих значений λ с учетом коэффициента потери усиления антенны в 10 % приведены в таблице.

Зависимость допустимой СКП от рабочей λ

Длина волны λ , мм	Допустимая СКП, мм
15	0,40
30	0,77
40	1,03
50	1,29
80	2,07
110	2,84
180	4,65
320	8,27

Таблица показывает, что при уменьшении длины волны возрастают требования к точности юстировки поверхности главного зеркала радиотелескопа. При этом точность юстировки будет зависеть от точности методов, применяемых для определения формы самой поверхности ГЗ.

Методы выверки формы отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа

Существуют различные геодезические и негеодезические методы контроля геометрии крупногабаритных зеркальных систем. Их разработкой занимались такие ученые, как Ю. Л. Бронштейн, Б. Л. Коган, Ф. Л. Мещанский, Г. А. Терехова, Б. А. Попереченко, В. Г. Жуков, В. С. Поляк, Н. А. Есепкина, В. Н. Курильчик, А. А. Усик и др. Методы можно разделить на механические, оптико-геодезические и стереофотограмметрический [3–7].

Механические методы контроля формы главного зеркала подразумевают применение специальных флаг- или цепных шаблонов.

Использование флаг-шаблонов подходит для определения формы поверхности ГЗ диаметром менее 30 м. При большем диаметре антенны конструкция флаг-шаблона должна обладать соответствующим качеством сборки и установки.

Цепной шаблон представляет из себя конструкцию из блок-шаблонов, соединенных друг с другом посредством шарниров. Таких блоков-звеньев может быть несколько.

Задача по определению формы поверхности ГЗ РТ оптико-геодезическими методами требует высокой точности измерений. К тому же они являются косвенными, так как измеряются не непосредственно отклонения фактической поверхности от проектной, а различные геометрические величины и их комбинации, по которым производится вычисление отклонений [8, 9].

Таковыми геометрическими величинами могут быть: координаты X , Y , длина дуги S , углы θ и φ , расстояние r (рис. 2). Основными методами контроля являются определение положения контрольных точек по следующим комбинациям величин (координат): (Y, X) ; (Y, S) ; (θ, r) ; (θ, S) [1].

Суть первых двух методов (Y, X) ; (Y, S) состоит в определении координаты Y через измерение превышений высокоточными нивелирами над относительно выбранным нулем; координата X в первом методе определяется по флаг-шаблону, длина дуги S во втором ме-

тоде определяется посредством откладывания последовательных хорд от вершины ГЗ до контролируемой точки. Главными недостатками методов, в которых определяется

координата Y , является невозможность контроля поверхности ГЗ на углах места (УМ), отличных от зенита, а также в большом количестве времени на выполнение съемки.

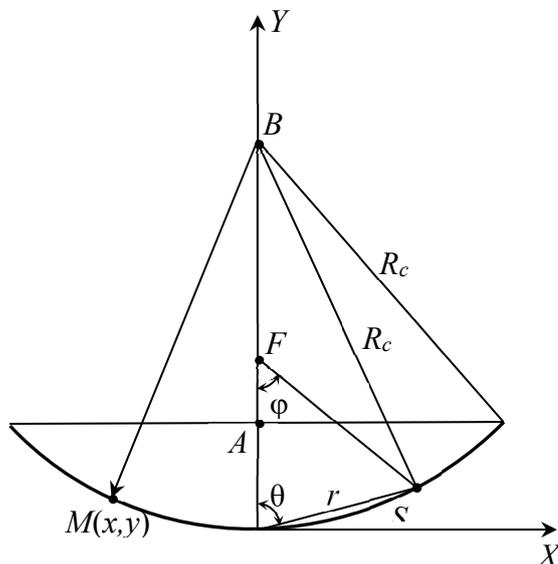


Рис. 2. Параметры, измеряемые при геодезическом контроле ГЗ

Суть методов 3 (θ, r) и 4 (θ, S) заключается в определении координат точек, расположенных на краях фасетов (металлических щитов, из которых состоит отражающая поверхность ГЗ), образующих поверхность ГЗ. Главной определяемой величиной является угол θ , который измеряется высокоточным теодолитом или специальной угломерной системой, установленными в фокальной оси ГЗ. Второй определяемой величиной является длина хорды r и длина дуги S , которая измеряется с высокой точностью мерными лентами и рулетками (для $\lambda > 5$ см) или по специально разработанным методикам (для $\lambda < 5$ см).

Существует также стереофотограмметрический метод, основанный на фотографировании марок, расположенных на контрольных точках щитов фотоаппаратом, у которого известны параметры внутреннего ориентирования.

Вышеобозначенные методы определения формы поверхности ГЗ радиотелескопа являются рабочими, но имеют ограничения по точности и трудности в самом процессе измерений. Современные лазерные трекеры и электронные тахеометры и получили широкое распространение для ряда прикладных задач [10–

14]. Применение трекеров позволит повысить точность определения формы ГЗ радиотелескопа, проводить юстировку формы ГЗ для работы с волнами длиной менее 20 мм, сократить время проведения геодезических измерений и сделать их более информативными.

Методика измерений лазерными трекерами

В основе методики работы с лазерным трекером лежит определение пространственных полярных координат точки по измерениям вертикальных (ν) и горизонтальных (β) углов, а также наклонного расстояния (L) [15].

По измеренным данным вычисляются пространственные прямоугольные координаты определяемых точек в системе координат (СК) прибора по формулам

$$X = L \cos \nu \cos \beta;$$

$$Y = L \cos \nu \sin \beta;$$

$$Z = L \sin \nu,$$

где L – наклонное расстояние; β – горизонтальный угол; ν – угол наклона.

Ошибки определения координат можно вычислить по формулам

$$\begin{aligned}
 m_X &= \sqrt{(\cos v \cos \beta)^2 m_L^2 + (L \sin v \cos \beta)^2 \left(\frac{m_v}{\rho}\right)^2 + (L \cos v \sin \beta)^2 \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2}; \\
 m_Y &= \sqrt{(\cos v \sin \beta)^2 m_L^2 + (L \sin v \sin \beta)^2 \left(\frac{m_v}{\rho}\right)^2 + (S \cos v \cos \beta)^2 \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2}; \\
 m_Z &= \sqrt{\sin^2(v) m_L^2 + (L \cos v)^2 \left(\frac{m_v}{\rho}\right)^2},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где m_L – ошибка измерения расстояния трекером; m_β – ошибка измерения горизонтального угла; m_v – ошибка измерения угла наклона; L – измеряемое расстояние (наклонное); β – горизонтальный угол, v – угол наклона.

Существуют различные модели лазерных трекеров. Наиболее современные позволяют измерять углы и расстояния в отражательном и безотражательном режимах, а например, абсолютный лазерный трекер Leica ATS600 обладает функцией сканирования. При выполнении измерений на отражатель СКП определения координат точек составляет $15 \text{ мкм} + 6 \text{ мкм} \cdot L$, где L – расстояние от системы до визирной цели в метрах (до 80,0 м); а в безотражательном режиме до 0,3 мм.

Leica ATS600 позволяет выполнять измерения при любой ориентации оси вращения относительно горизонта, что особенно важно при проведении работ полноповоротной антенной системы при УМ, отличного от зенита [16].

Первый этап работы – определение расположения опорных пунктов и станций трекера на радиотелескопе. Конструкция РТ не позволяет выполнить измерения на поверхности рефлектора с одной станции в связи с отсутствием видимости части за надзеркальной кабиной и опорными конструкциями контррефлектора (КР), поэтому для исключения «слепых зон» измерения ведутся с двух станций трекера. При этом перекрытие зон видимости с двух станций составляет порядка 80 %.

Объединить измерения, выполненные с двух станций, становится возможным после создания опорной геодезической сети на радиотелескопе. В качестве пунктов опорной геодезической сети могут выступать призматические отражатели, устанавливаемые на L -кронштейны или кольцеобразные магниты (рис. 3, а) на неподвижных металлических конструкциях надзеркальной кабины.

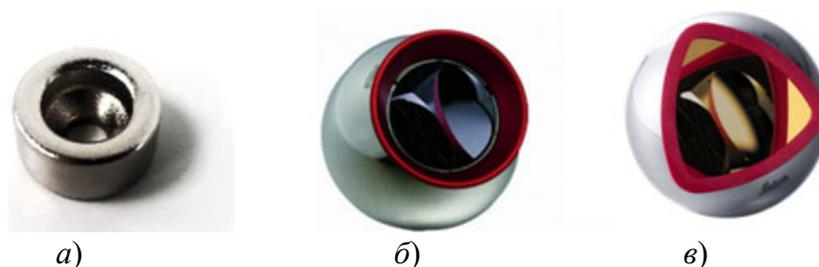


Рис. 3. Составляющие опорной сети на объекте:

а) кольцеобразный магнит; б) отражатель RRR; в) отражатель BRR

В качестве визирной цели, устанавливаемой на магнит, применяются отражатели BRR (Break Resistant Reflector) или RRR (Red-

Ring Reflector), имеющие сферическую поверхность (рис. 3, б, в) диаметром 1,5". Отклонение от сферы отражателя RRR составляет

не более 0,003, а для отражателя BRR – не более 0,001 5 мм. В отражателях RRR устанавливается трипельпризма, которая центрируется в сферическом корпусе с точностью не хуже $\pm 0,01$ мм. Угол визирования для отражателей типа BRR и RRR составляет $\pm 30^\circ$. Таким образом, за счет высокоточного изготовления поверхности сферы и центрирования оптики вращение установленного в магнит сферического отражателя вдоль осей, проходящих через его центр, не вызывает смещения его узловых точки. Использование сферических отражателей также позволяет мини-

мизировать погрешности наведения при использовании режима «Автонаведение» лазерного трекера Leica AT5600.

Главный критерий выбора места установки пунктов опорной сети – возможность проводить измерения с обеих станций, то есть чтобы опорные точки были связующими. В связи с этим определяется область возможной установки пунктов опорной сети (рис. 4). При этом необходимо расположить пункты на жестких, неподвижных частях надзеркальной кабины и на максимально возможной удаленности друг от друга.

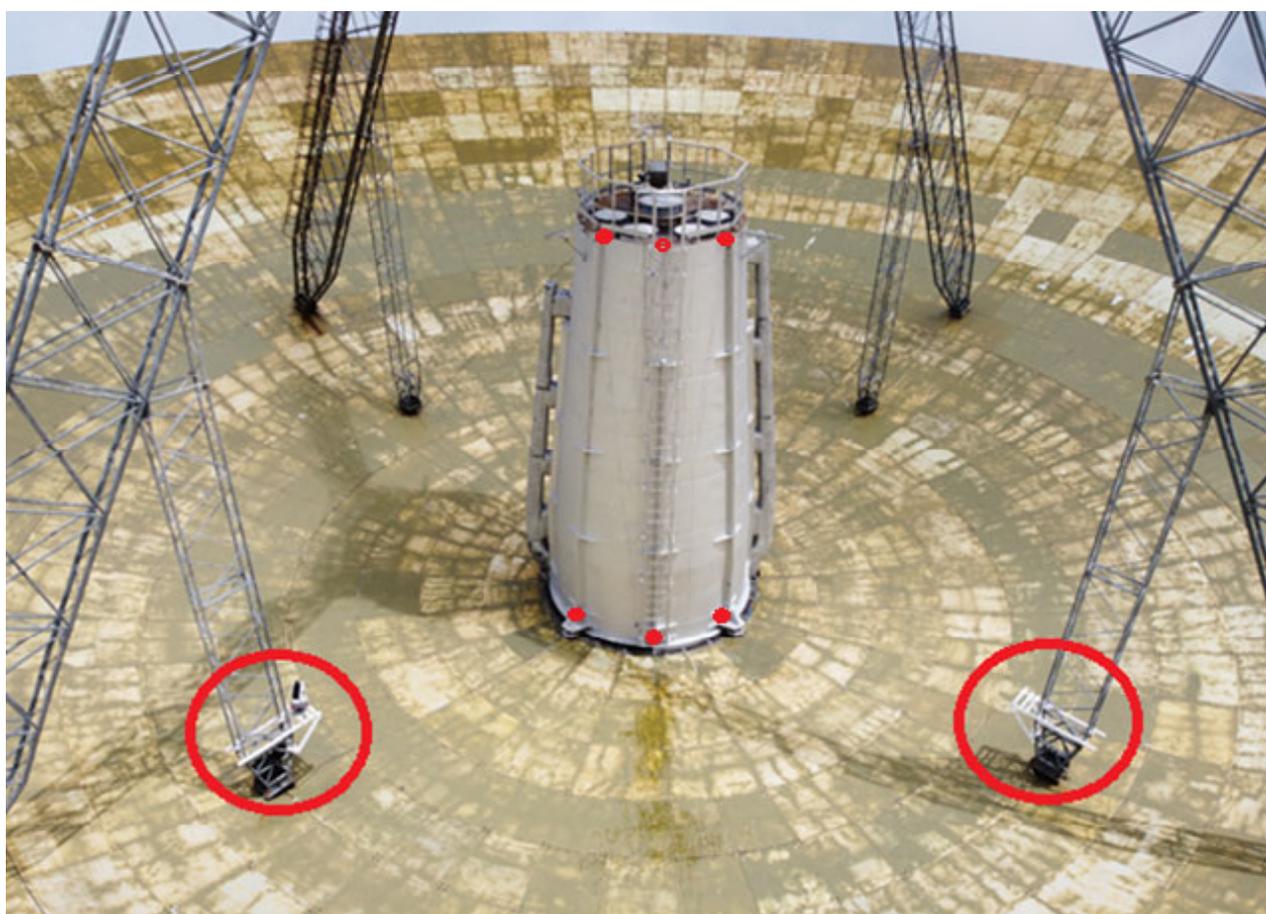


Рис. 4. Возможные места расположения станций (красные круги) и пунктов опорной сети (красные точки)

При подобном взаимном расположении опорной геодезической сети и установленного на станции лазерного трекера расстояние от станций до пунктов составляет 8–13 м, диапазон вертикального угла – от 15 до 35°, диапазон горизонтального угла – от 25 до 45°. СКП определения координат XYZ опорных

точек при такой конфигурации, рассчитанные по формулам (2), не будут превышать 0,1 мм.

Для стабильной установки лазерного трекера на поверхности ГЗ на опорах контррефлектора антенны устанавливаются специальные крепления консольного типа (рис. 5), на которых размещается поворотный столик.

Данный способ установки трекера, разработанный специалистами ООО «Промышленная геодезия», позволяет менять положение его оси вращения, что помогает избежать образования незначительных «слепых зон», созданных, например, другими опорами КР.



Рис. 5. Установка лазерного трекера Leica ATS600

Второй этап работы – выполнение измерений. Для обеспечения паспортной точности определения координат в процессе измерений необходимо учитывать ряд факторов, таких как стабильность установки прибора, стабильность опорной геодезической сети, внешние факторы и пр. [17].

При измерениях на открытом воздухе для минимизации влияния локальных нагревов трекера, рефракции и конвекционных токов воздуха рекомендуется проводить работы ночью в сухую и безветренную погоду. Это позволит также избежать температурных деформаций каркаса ГЗ и щитов отражающей поверхности.

Перед началом работ рекомендуется установить прибор в рабочее положение и дождаться, пока он примет температуру окружающей среды.

Контроллер трекера оснащается датчиками температуры, давления и влажности, что позволяет выполнять автоматическую компенсацию изменения этих параметров в процессе измерений.

Измерения на 1-й станции начинают с определения координат опорных точек в системе координат трекера. После этого выполняют сканирование поверхности ГЗ РТ. Стабиль-

ность установки трекера контролируется повторным определением координат XYZ опорных точек. При изменении координат более чем на треть от заданного допуска измерения выполняются заново. Далее приступают к аналогичным измерениям опорных пунктов и сканированию на 2-й станции.

Следует отметить, что все измерения ведут при УМ = 30°.

Третий этап работы – преобразование систем координат. Началом систем координат на 1-й и 2-й станциях является точка пересечения горизонтальной и вертикальной осей вращения трекера, ось Z совпадает с вертикальной осью вращения трекера, ось X направлена на первую наблюдаемую цель, ось Y дополняет систему до правой. Для объединения измерений с двух станций в одну систему координат выполняют преобразование координат из одной системы координат (СК) в другую. Такое преобразование возможно выполнить в программном обеспечении Spatial Analyzer. Для определения 7 параметров преобразования СК с последующим уравниванием по методу наименьших квадратов необходимо не менее трех опорных точек с координатами. Каждая точка дает три уравнения вида [18]

$$\begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_1 & 0 & -Z_1 & Y_1 \\ 0 & 1 & 0 & Y_1 & Z_1 & 0 & -X_1 \\ 0 & 0 & 1 & Z_1 & -Y_1 & X_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ m \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix},$$

где X_1, Y_1, Z_1 – прямоугольные координаты связующей точки в СК1; X_2, Y_2, Z_2 – прямоугольные координаты связующей точки в СК2; $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – линейные элементы трансформирования; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые элементы трансформирования; m – масштабный коэффициент.

Уравнения зависимостей координат первой и второй систем нелинейны и решаются методом итераций под условием $[pvpv] = \min$.

Поскольку помимо опорных пунктов на 2-й станции выполняют сканирование поверхности ГЗ радиотелескопа, все точки преобра-

зуют из СК2 в СК1 по вычисленным значениям $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$:

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = m \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix},$$

где R_1, R_2, R_3 – матрицы вращения, образованные при поворотах систем координат на величины $\omega_x, \omega_y, \omega_z$.

После выполнения измерений опорной сети и сканирования поверхности ГЗ координаты точек перевычисляются в единую систему главного зеркала, которая задается следующим образом (рис. 6):

- начало системы координат (СК) помещено в вершине квазипарабооида;
- ось $+Z$ направлена вдоль фокальной (геометрической) оси рефлектора в сторону контр-рефлектора;
- ось $+X$ перпендикулярна оси Z и направлена в сторону точки «УМ Лево» рефлектора;
- ось $+Y$ дополняет СК до правой.

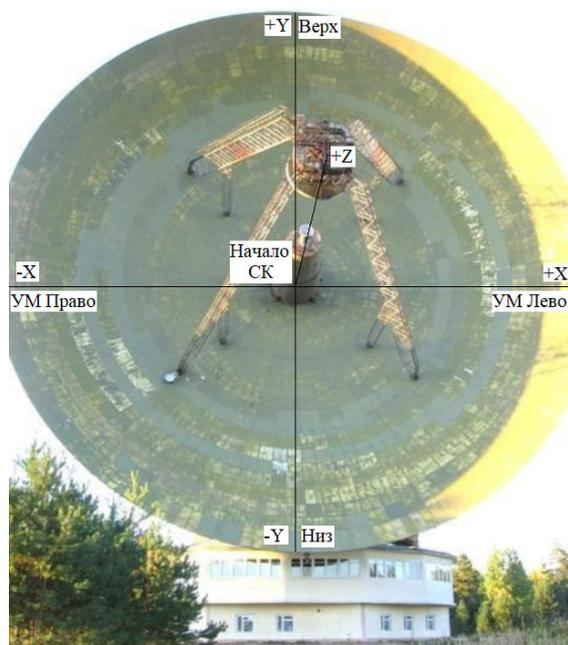


Рис. 6. Схема ориентации осей принятой СК рефлектора

Четвертый этап работы – определение формы ГЗ радиотелескопа и расчет отклонений. Для определения фактических отклоне-

ний отражающей поверхности ГЗ радиотелескопа с применением координатоопределяющей технологии создается ее САД-модель на основе формулы

$$Z_{R_i} = \frac{R_i^2}{4 \cdot f},$$

где Z_i – высота точки; R_i – текущий радиус зеркала; f – фокусное расстояние.

Такая модель позволяет определить положение любой точки на поверхности теоретического квазипарабооида и вычислить расстояние от произвольно выбранной точки на поверхности реального зеркала до этой теоретической модели.

Для определения отклонений δ точек фактической поверхности ГЗ от математической модели в измеренное облако точек аппроксимируется по методу наименьших квадратов созданная САД-модель парабооида. Для корректной обработки измерений предварительно отбраковываются точки, измеренные не на поверхности ГЗ. Отклонения определяются по нормали от поверхности парабооида.

Значение СКП определяется путем проведения аппроксимирующего парабооида, максимально приближенного к измеренным точкам n фактической поверхности ГЗ со свободными параметрами q : смещения вершины зеркала d , изменение фокусного расстояния Δf и угла поворота фокальной оси Φ [1]:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n - q}},$$

где δ – отклонение i -й точки поверхности ГЗ от аппроксимирующего парабооида; n – количество точек для аппроксимации; q – количество параметров.

По полученным значениям выполняется расчет картограммы отклонений (рис. 7).

Пятый этап работы – юстировка главного зеркала радиотелескопа. По картограмме отклонений поверхности ГЗ РТ от ее математической модели совместно со специалистами в области радиофизики выполняется юстировка радиотелескопа. Отражающая поверхность ГЗ РТ выполнена из пара-

болических щитов, юстировка которых осуществляется при ориентации антенны в зенит ($УМ = 90^\circ$). По полученным в результате обработки данным составляется схема регулировки щитов со значениями всех отклоне-

ний, превышающих 1,00 мм. После окончания юстировки поверхности ГЗ выполняются повторные измерения для определения СКП и составления новой картограммы отклонений.

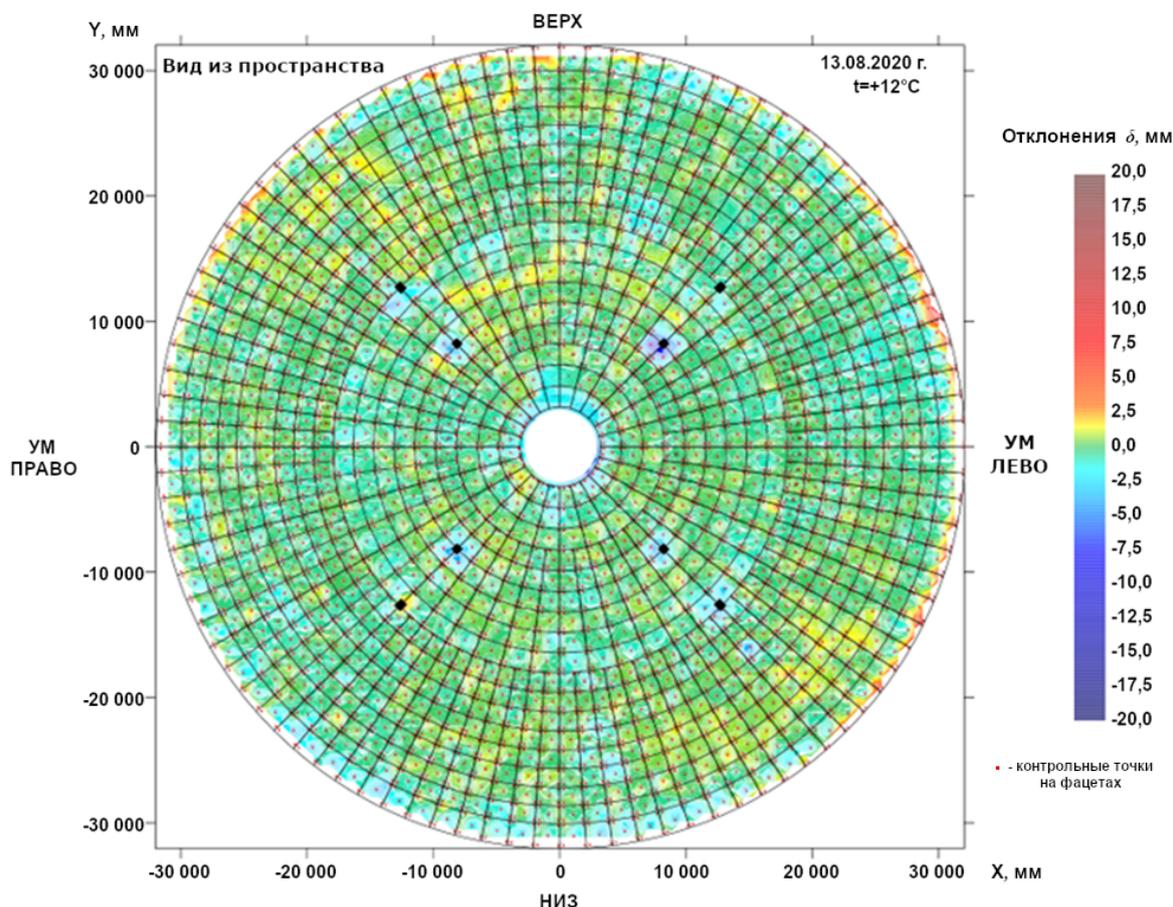


Рис. 7. Картограмма отклонений поверхности рефлектора ТНА-1 500 от проектного профиля при ориентации ЗС по $УМ = 30^\circ$

Выводы

Применение современных высокоточных лазерных трекеров позволяет существенно увеличить точность отражающей поверхности ГЗ при сокращении трудозатрат на производство геодезических работ. Сканирующие лазерные трекеры осуществляют сбор данных бесконтактным способом с точностью не более 0,3 мм. При выполнении измерений с нескольких станций точность получаемых координат связующих точек не превышает 0,1 мм, что позволяет использовать лазерные трекеры и в других отраслях производства, где необходима высокая точность измерений крупногабаритных объектов.

С использованием вышеприведенной методики компанией ООО «Промышленная геодезия» было выполнено определение формы радиотелескопа ТНА-1 500 в г. Калязине. По результатам анализа обработанных данных можно сделать следующие выводы: СКП отражающей поверхности составляет 1,15 мм, что выше допустимого значения в соответствии с таблицей (при рабочем $УМ = 30^\circ$ и юстировочном $УМ = 90^\circ$ СКП = 0,84 мм), следовательно, радиотелескоп может выполнять свои задачи корректно, используя значения λ от 50 мм и больше; максимальное отклонение +12,31 мм; минимальное отклонение – 9,82 мм; отрицательные экстремумы в основном находятся в областях крепления опор КР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бронштейн Ю. Л. Геометрия и юстировка крупных зеркальных систем. – М. : ДПК Пресс, 2020. – 816 с.
2. Ruze J. Antenna tolerance theory. A review // IEEE. – 1966. – Vol. 54, No. 4. – 640 p.
3. Жаров В. И., Сотникова Ю. В. Методика определения кинематических характеристик элементов главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 с использованием современных лазерных измерительных систем // *Астрофизический бюллетень*. – 2017. – Т. 72, № 4. – С. 520–526.
4. Курильчик В. Н. Радиотелескоп. Физика космоса: Маленькая энциклопедия / Редкол.: Сюняев Р. А. (гл. ред.) и др. – 2-е изд. – М. : Советская энциклопедия, 1986. – 783 с.
5. Можаров Э. О., Растворов С. А. Анализ качества поверхности зеркальных антенн с помощью геодезического тахеометра // *Антенны*. – 2017. – № 11 (243). – С. 3–9.
6. Попереченко Б. А., Попов Ю. В., Волконский В. Б. и др. Методика и аппаратура высокоточного контроля зеркала радиотелескопа ТНА-1500 // *Антенны*. – 1984. – № 31. – С. 28–35.
7. Терехова Г. А. Геодезический контроль рефлекторов больших антенн // *Геодезия и картография*. – 1983. – № 9. – С. 12.
8. Дугин Н. А., Калинин А. В., Тихомиров Ю. В. и др. Сравнение возможностей оптических и радиоастрономических методов измерения параметров крупных антенн. – СПб. : ИПА РАН, 2019. – С. 41–49.
9. Поляк В. С., Соколов А. Г. Конструкция зеркального радиотелескопа ТНА-1500 // *Антенны* / Под ред. А. А. Пистолькорса. – 1982. – № 30. – С. 13–26.
10. Бузык В. В., Бузык Г. Б. Калибровка промышленного оборудования высокоточными геодезическими методами с применением абсолютных лазерных трекеров Leica // *Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование : сб. материалов III Всероссийской науч.-практ. конф. / науч. ред. О. А. Лазебник*. – СПб. : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2019. – С. 146–151.
11. Буренков Д. Б., Мурзинцев П. П., Полянский А. В., Пупков Ю. А., Сердаков Л. Е. Геодезическое обеспечение создания бустера для NSLS-II // *Геодезия и картография*. – 2013. – № 6. – С. 13–16.
12. Мурзинцев П. П., Полянский А. В., Сердаков Л. Е. Об оптимизации опорных геодезических кольцевых сетей ускорителей при использовании лазерных трекеров // *Геодезия и картография*, 2017. – Т. 78, № 5. – С. 2–6.
13. Самойленко А. Н., Монюк Б. Е. Исследование метрологических характеристик горизонтального круга лазерных трекеров FARO X и FARO ION // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2013. – № 5. – С. 46–52.
14. Тихонов В. Е., Захаров Г. С., Сердаков Л. Е. Геометрический контроль производства дипольного магнита лазерным трекером // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр.*, 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 7 : Международная научно-технологическая конференция студентов и молодых ученых «Молодежь. Инновации. Технологии». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 1. – С. 84–90.
15. Голыгин Н. Х. Принципы метрологического обеспечения координатных оптико-электронных средств измерений // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2015. – № 5. – С. 107–110.
16. Мещанский Ф. Л., Терехова Г. А., Гаров И. М. и др. Геодезическое обеспечение антенных комплексов / под ред. Ф. Л. Мещанского. – М. : Недра, 1991. – 107 с.
17. Зубов А. В., Павлов Н. С. Оценка стабильности опорных и деформационных маркшейдерско-геодезических сетей // *Маркшейдерский вестник*. – 2013. – № 2 (94). – С. 21–23.
18. Машимов М. М. Уравнивание геодезических сетей. – М. : Недра, 1979. – 367 с.

Об авторах

Антон Александрович Кузин – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии.

Владимир Викторович Петров – кандидат технических наук.

Александр Алексеевич Пештиев – инженер-геодезист.

Получено 02.10.2022

© А. А. Кузин, В. В. Петров, А. А. Пештиев, 2023

Geodetic supply of alignment the reflecting surface's shape of the main mirror of a radio telescope using laser trackers

A. A. Kuzin^{1*}, V. V. Petrov², A. A. Peftiev²

¹ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

² LLC Industrial Geodesy, St. Petersburg, Russia

* e-mail: kuzin_aa@pers.spmi.ru

Abstract. The article discusses the possibilities of coordinate-determining technology using high-precision geodetic instruments for alignment of reflecting surface shape of the radio telescope main mirror. It's important for adjustment of reflecting surface shape and consequently performance of radio astronomy observations. The article provides general information about radio telescopes and considers the existing classical geodesic and non-geodesic methods used in the process of solving the problem of shape alignment. The text describes the method of geodetic work on the form alignment using high-precision laser trackers. The methodology includes several stages from designing the geodetic control network and tracker location stations and processing and interpreting the measurement results. The conditions for performing high-precision measurements are given in the thesis. Mathematical processing of measurement results is performed in the Spatial Analyzer and based on coordinate systems transformation.

Keywords: laser tracker, radio telescope, shape alignment, accuracy, spatial rectangular coordinates, coordinate systems

REFERENCES

1. Bronstein, Yu. L. (2020). *Geometriia i iustirovka krupnykh zerkal'nykh sistem [Geometry and alignment of large mirror systems]*. Moscow: DPK Press Publ., 816 p. [in Russian].
2. Ruze, J. (1966). Antenna tolerance theory. A review. *IEEE*, 54(4), 640 p.
3. Zharov, V. I., & Sotnikova, Yu. V. (2017). Method for determining the kinematic characteristics of the elements of the main mirror of the RATAN-600 radio telescope using modern laser measuring systems. *Astrofizicheskii biulleten' [Astrophysical Bulletin]*, 72(4), 520-526 [in Russian].
4. Kurilchik, V. N. (1986). *Radioteleskop. Fizika kosmosa [Radio telescope. Space Physics]* (2nd ed.). Moscow: Soviet Encyclopedia, 783 p. [in Russian].
5. Mozharov, E. O., & Rastvorov, S. A. (2017). Analysis of the quality of the surface of reflector antennas using a geodetic total station. *Antenny [Antennas]*, 11(243), 3–9 [in Russian].
6. Poperechenko, B. A., Popov, Yu. V., & Volkonskii, V. B. (1984). Methods and equipment for high-precision control of the mirror of the TNA-1500 radio telescope. *Antenny [Antennas]*, 31, 28–35 [in Russian].
7. Terekhova, G. A. (1983). Geodetic control of reflectors of large antennas. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 9, 12 p. [in Russian].
8. Dugin, N. A., Kalinin, A. V., & Tikhomirov, Yu. V. (2019). *Sravnenie vozmozhnostei opticheskikh i radioastronomicheskikh metodov izmereniia parametrov krupnykh antenn [Comparison of the possibilities of optical and radio astronomical methods for measuring the parameters of large antennas]* (pp. 41–49). St. Petersburg: Institute of Applied Astronomy of RAS Publ. [in Russian].
9. Polyak, B. C., & Sokolov, A. G. (1982). The design of the mirror radio telescope TNA-1500. *Antenny [Antennas]* A. A. Pistol'kors (Ed.), 30, 13–26 [in Russian].
10. Buzik, V. V., & Buzik, G. B. (2019). Calibration of industrial equipment by high-precision geodetic methods using Leica absolute laser trackers. In *Sbornik materialov III vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: Geodeziia, kartografiia, geoinformatika i kadastry. Nauka i obrazovanie [Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference: Geodesy, Cartography, Geoinformatics and Cadastres. Science and Education]* (pp. 146–151). O. A. Lazebnik (Scientific Ed.). Saint Petersburg: Herzen University Publ. [in Russian].
11. Burenkov, D. B., Murzintsev, P. P., Polyansky, A. V., Pupkov, Yu. A., & Serdakov, L. E. (2013). Geodetic support for creating a booster for NSLS-II. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 6, 13–16 [in Russian].
12. Murzintsev, P. P., Polyansky, A. V., & Serdakov, L. E. (2017). On the optimization of reference geodetic ring networks of accelerators using laser trackers. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 78(5), 2–6 [in Russian].

13. Samoylenko, A. N., & Monyuk, B. E. (2013). Study of the metrological characteristics of the horizontal circle of laser trackers FARO X and FARO ION. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 5, 46–52 [in Russian].
14. Tikhonov, V. E., Zakharov, G. S., & Serdakov, L. E. (2021). Geometric control of the production of a dipole magnet by a laser tracker. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2021: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 7, no. 1. Molodezh'. Innovatsii. Tekhnologii [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2021: International Scientific Conference: Vol. 7, No. 1. Youth. Innovation. Technologies]* (pp. 84–90). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
15. Golygin, N. Kh. (2015). Principles of metrological support of coordinate optical-electronic measuring instruments. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 5, 107–110 [in Russian].
16. Meshchansky, F. L., Terekhova, G. A., Garov, I. M., & et al. (1991). *Geodezicheskoe obespechenie antenykh kompleksov [Geodetic support for antenna systems]*. F. L. Meshchansky (Ed.). Moscow: Nedra Publ., 107 p. [in Russian].
17. Zubov, A. V., & Pavlov, N. S. (2013). Evaluation of the stability of supporting and deformation mine surveying and geodetic networks. *Marksheiderskii vestnik [Mine Surveying Bulletin]*, 2(94), 21–23 [in Russian].
18. Mashimov, M. M. (1979). *Uravnivanie geodezicheskikh setei [Adjustment of geodetic networks]*. Moscow: Nedra Publ., 367 p. [in Russian].

Author details

Anton A. Kuzin – Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy.

Vladimir V. Petrov – Ph. D.

Alexander A. Peftiev – Engineer-Geodesist.

Received 02.10.2022

© A. A. Kuzin, V. V. Petrov, A. A. Peftiev, 2023