

О возможности юстировки Главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 лазерными измерительными системами

© В. И. Жаров, Ю. В. Сотникова

САО РАН, пос. Нижний Архыз, Россия

Реферат

Рассмотрены возможности новой методики геометрического контроля больших антенных поверхностей с использованием современных высокоточных лазерных измерительных систем на базе тахеометра Leica TDRA6000 и абсолютного лазерного трекера Leica AT402. Показаны возможности юстировки антенны переменного профиля радиотелескопа РАТАН-600 на примере определения радиального положения отдельных элементов. Приведена краткая характеристика традиционных геодезических методов определения радиального положения элементов Южного сектора с использованием оборудования и инструмента, применявшегося как при строительстве, так и при последующей эксплуатации антенны радиотелескопа (РТ). Проанализированы ошибки, возникающие при использовании традиционных геодезических методов. Рассмотрены преимущества использования современных лазерных координатно-измерительных систем при юстировке элементов Южного сектора по радиусу. Проведена предварительная оценка точности метода измерений с использованием современных лазерных измерительных систем.

Тахеометром проведены измерения знаков опорной геодезической сети РТ и разработаны рекомендации по применению опорной геодезической сети для определения планового положения отдельных элементов Южного сектора. Апробированы различные типы метрологических отражателей и адаптеров для установки отражателей на знаки опорной геодезической сети РТ. Проведены тестовые измерения радиального положения элементов Южного сектора. После планового профилактического ремонта отдельных групп элементов Южного сектора проведена геодезическая юстировка элементов с использованием высокоточного тахеометра Leica TDRA6000. Проведена оценка сходимости измерений по выборочным группам элементов в разных частях антенны.

Дополнительно рассмотрены ошибки планового положения элементов, возникающие из-за ошибок привязки отражающей поверхности к плоскости представительных площадок.

Рассмотрена методика определения планового положения элементов Плоского отражателя с использованием тахеометра. Показаны возможности корректировки элементов с максимальными значениями отклонений с использованием абсолютного лазерного трекера Leica AT402. Проведены тестовые измерения планового положения элементов Плоского отражателя. Приведены выводы по результатам корректировки отдельных групп элементов Плоского отражателя.

Разработаны рекомендации по использованию полученных результатов и проведению дальнейших работ по доработке методики.

Ключевые слова: радиотелескопы, большие антенные поверхности, методы измерений, точность измерений.

Контакты для связи: Жаров Виталий Иванович (vit@sao.ru).

Для цитирования: Жаров В. И., Сотникова Ю. В. О возможности юстировки Главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 лазерными измерительными системами // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 56. С. 14–21.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.56.14-21>

On the Possibility of Adjusting the Main Mirror of the RATAN-600 Radio Telescope Using Laser Measuring Systems

V. I. Zharov, Yu. V. Sotnikova

Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, Russia

Abstract

The new method of a large variable profile antenna surface geometric control is presented using RATAN-600 radio telescope as an example. The modern high-precision laser systems based on the Leica TDRA6000 total station and the Leica AT402 absolute laser tracker were utilized. The possibilities of variable profile antenna adjustment are shown for the radial position measurements of the antenna elements. A brief description is given of the standard geodetic methods for the radial position determination of the southern RATAN sector elements, with the equipment and tools used during both the construction and the subsequent antenna operation. We analyze the standard geodetic method errors and advantages of modern laser coordinate measuring systems for elements along the radius. The preliminary estimation of the method accuracy was made.

We carried out the geodetic reference frame (GRF) signs measurements by the total station and providing the recommendations for using GRF in case of individual elements position determination. Various types of metrological reflectors and adapters for the GRF setting have been tested. We tested the elements radial positions measurements at the RATAN Southern sector. The geodetic adjustment of the elements was carried out after preventive maintenance of individual elements groups using a high-precision Leica TDRA6000 total station. An estimation of the measurements convergence for selected groups in different antenna parts is carried out.

Additionally, the errors of element positions due to the errors of the reflecting surface binding to the representative sites plane were considered.

The technique of the Flat reflector elements position determination is considered. The possibilities of correcting elements with maximum deviations using the absolute laser tracker Leica AT402 are shown. Test measurements of the Flat reflector elements positions were carried out. Conclusions are given on the results of correcting individual element groups.

The recommendations based on the above results and further work for the method improvement are suggested.

Keywords: radio telescopes, large antenna surface, methods, accuracy of measurements.

Contacts: Vitaliy I. Zharov (vit@sao.ru).

For citation: Zharov V. I., Sotnikova Yu. V. On the possibility of adjusting the Main mirror of the RATAN-600 radio telescope using laser measuring systems // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 56. P. 14–21.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.56.14-21>

Введение

РТ РАТАН-600 [1] САО РАН представляет собой антенну переменного профиля (АПП) кольцевой формы с диаметром 600 м. АПП является одним из альтернативных решений [2] проблемы последствий весовых деформаций конструкции главного зеркала РТ [3–5] при достижении большой эффективной площади и высокого углового разрешения. Принципиальная ограниченность в разрешающей силе и площадях сплошных параболоидов приводит к решению механического расчленения конструкций, что дает возможность довести относительную точность РТ до геодезического предела $(1-3) \times 10^{-6}$ [1].

Многоэлементная конструкция и большая геометрическая площадь РАТАН-600 налагают требование систематического контроля точности поверхности и ее оперативной корректировки. РАТАН является инженерной системой для коллективного использования, с помощью которой реализуются плановые наблюдательные программы в круглосуточном режиме одновременной работы Южного, Западного, Северного секторов и Плоского отражателя [6]. Для геодезической юстировки секторов выделяется антенное время, что часто занимает до 3–4 недель в год. Вопрос больших временных затрат на юстировку является принципиальным в силу неэффективного использования телескопа в это время для решения научных астрофизических задач, в том числе срочных, требующих постоянной готовности РТ к работе.

Задача юстировки и контроля геометрии крупногабаритных антенных систем — целое направление прикладной геодезии [5], которое является ключевым в повышении точности радиоастрономических измерений. Актуальным является вопрос оптимизации существующих и развития новых методов юстировки больших антенных по-

верхностей (сотни кв. м), которые значительно сократили бы время проведения таких работ.

На примере юстировки АПП РАТАН-600 предложена новая методика геометрического контроля и определения радиального положения элементов Южного сектора с использованием высочайших лазерных измерительных систем.

Краткая характеристика существующих методов

Поверхность Главного зеркала РАТАН-600 представляет собой АПП, которая сформирована из отдельных, механически не связанных между собой отражающих элементов (щитов), расположенных по дуге окружности с заданным радиусом. Формирование отражающей поверхности АПП происходит за счет перемещения элементов антенны из проектного положения в расчетное — по радиусу (R), углу места (U) и азимуту (A). Построение точной поверхности в расчетном положении основывается на определении нулевого положения — мест нулей (MO) (каждого отдельного элемента, расчете необходимых приращений ΔR , ΔU , ΔA и введении их в расчет установок антенны совместно с кинематическими поправками R_{kin} — по радиусу и U_{kin} — по углу места. Кинематические поправки представляют собой ошибки, которые связаны с неточностью изготовления механизмов перемещения элемента. Поправки определены для каждого элемента [7, 8] и используются при вычислении установок антенны.

При достаточной точности перемещения элементов АПП по трём координатам учет кинематических поправок позволяет получать отражающую поверхность, близкую по точности к поверхности отдельного элемента (0.2–0.3 мм). Поэтому основной задачей геодезической юстировки всего сектора является установка отдельных элементов АПП

в проектное положение, в котором элементы антенны выставлены вертикально на исходную окружность радиусом 288 м.

До недавнего времени юстировка отдельных элементов антенны РТ проводилась геодезическими методами, достаточно подробно изложенными в [9], с использованием приборов и технологий, позволяющих проводить измерения положения элементов главного зеркала с ошибкой 0.2–0.3 мм. Измерения проводились от специальных юстировочных точек на поверхности элемента — представительных площадок, которые расположены в одной плоскости, нормаль к которой при юстировке должна быть направлена в центр окружности (или перпендикулярна касательной к окружности). В данном случае вопрос о согласовании плоскости представительных площадок и отражающей поверхности элементов остаётся открытым и требует отдельного исследования и поиска решения. Использование этих методов достаточно трудоёмко и требует специально выделенного антенного времени, а что особенно важно — такие методы не позволяют в полной мере учесть все случайные ошибки.

В работах [9, 10] СКО определения положения элементов по радиусу m_r определялось по формуле:

$$m_r = m_1 \sqrt{\frac{n-1}{2}},$$

где m_1 — СКО радиального положения щита, следующего сразу за опорным щитом, находящимся над знаком геодезической сети, оно составляет $m_1 = \pm 0.035$ мм и для крайнего в группе щита — $m_{75} = \pm 0.30$ мм. Однако величина m_r дополнительно зависит от ошибки установки элемента по углу места m_β . Даже при точности установки элементов по углу места в пределах ± 1 точного деления датчика отсчётно-установочного устройства ошибка установки элемента по углу места составит $\pm 25''$ [7]. При этом положение верхней представительной площадки изменится на 0.1 мм. Поскольку определение положения по радиусу проводится от верхних представительных площадок, то даже минимальная ошибка в положении элемента по углу места приводит к неконтролируемому накоплению ошибки m_r , и в результате ошибка m_β только одного элемента приводит к установке целой группы элементов по дуге окружности с другим радиусом. Ошибки положения элементов по углу места могут быть случайны и не поддаваться учёту, соответственно, в этом случае представленная выше формула расчёта СКО положения элементов по радиусу оптимальной не будет.

В работе [10] рассмотрено только влияние параллактического угла q — ошибки наведения, но она поддается учёту путем чередования знаков угла q . Влияние ошибки положения элемента по

азимуту m_α на ошибку m_r менее существенно. Для повышения точности предлагалось проводить уравнивание и дополнительные измерения — определять невязку и распределять такие ошибки линейно по группе элементов между опорными щитами. Но такие ошибки относятся к случайным и не поддаются учёту, а дополнительные измерения требуют выделения антенного времени.

Несмотря на значительную трудоёмкость и большое количество времени, геодезические методы определения мест нулей элементов Главного зеркала РАТАН-600 применяются до сих пор — именно таким методом сейчас проводится юстировка группы из опорных щитов для ее привязки к автоколлимационной (АК) юстировке всего сектора.

В свое время была разработана и успешно применялась ещё одна методика определения мест нулей элементов Южного сектора по радиусу — метод угловой засечки с использованием теодолита ОТ-02 [11]. Измерения проводились от знаков плановой сети, и для обеспечения соответствующей точности радиального положения элементов необходимо было провести ряд дополнительных измерений с потерями антенного времени.

Для уменьшения количества времени на юстировку разработана методика юстировки щитов Южного сектора по радиусу, азимуту и углу места с использованием тахеометра REC ELTA2 производства Carl Zeiss с точностью измерения угла 0.6'' [7]. При стандартном отклонении измерения расстояния дальномером тахеометра в 2 мм + 2 ppm, угловыми измерениями удавалось получить поверхность антенны Южного сектора с ошибкой установки элементов в пределах 0.2–0.3 мм. Тахеометр устанавливался на знаки геодезической сети, расположенные под антенной и проводились измерения горизонтальных углов и расстояний на отражателях, установленных на представительных площадках каждого щита. В качестве исходных пунктов использовались ближайшие знаки опорной плановой сети. По измеренным данным рассчитывалось и корректировалось положение каждого элемента. Полученные места нулей использовались как исходные при проведении АК юстировки, а на краях сектора МО использовались для радиоастрономических наблюдений. Несмотря на увеличение скорости проведения работ и возможность проводить юстировку как группы элементов, так и отдельного щита, этот метод не получил широкого распространения ввиду необходимости проведения дополнительных измерений на краях групп элементов и щитов над знаками опорной плановой сети РТ.

Все перечисленные методы определения радиальных мест нулей вполне достаточны по точности измерений, но юстировка этими методами занимает достаточно долгое время, из-за необходимости проведения дополнительных измерений.

Преимущества использования лазерных измерительных систем

С целью уменьшения количества выделяемого антенного времени на юстировку возникла необходимость разработки новых методов с использованием современных координатно-измерительных систем, которые позволяют оперативно проводить высокоточные измерения. Развитие лазерных технологий позволяет применять современные лазерные измерительные системы для юстировки крупногабаритных антенных поверхностей, а также проверки положения отдельных элементов главного зеркала РТ ПАТАН-600.

Благодаря обновлению приборной базы появилась возможность разработать методику геометрического контроля больших антенных поверхностей с использованием современных лазерных измерительных систем фирмы Leica Geosystems — прецизионного тахеометра Leica TDRA6000 и абсолютного лазерного трекера Leica AT402. Если рассматривать точность определения положения элементов АПП по радиусу исходя из точности прибора и в качестве исходных данных взять точность угловых датчиков горизонтального и вертикального круга 0.5" [12], то можно определить количество элементов, радиус которых можно определить при измерениях на одной станции прибора. Оптимальным считается положение прибора при расположении опорных знаков равномерно вокруг прибора. При среднем расстоянии между знаками опорной плановой сети РТ в 144 м можно рассчитать точность определения радиального положения элементов АПП. При СКО измерения угла 0.5" и среднем расстоянии от прибора до элементов АПП ~72 м СКО определения радиального положения элемента составит 0.17 мм. На практике, в результате установки прибора на большем расстоянии от знаков, СКО может несколько отличаться.

Так как антенна РТ представляет собой вырезку из кругового цилиндра и формирование отражающей поверхности при юстировке происходит путем установки каждого отдельного элемента в проектное положение — окружность, то при строительстве было удобнее использовать полярную систему координат, тем более что основное влияние на точность поверхности главного зеркала в целом оказывает радиальное положение каждого отдельного элемента антенны. При использовании лазерных координатно-измерительных систем для задач юстировки крупногабаритных антенных систем на примере Плоского отражателя (400 × 8 м) удобнее использовать прямоугольную систему координат. Опорная геодезическая сеть ПАТАН-600 заложена с учетом использования её в полярной системе координат. Поэтому задача юстировки

Южного сектора разделяется на подготовительные и собственно юстировочные работы.

Подготовительные работы включают в себя создание некоторой опорной геодезической сети и временных реперов для привязки опорных щитов, определения координат отдельных элементов антенны и определения отклонений или ошибок их положения относительно проектного значения. Так как опорная геодезическая сеть уже заложена и требования к ней заложены с большим запасом, то задача по созданию опорной геодезической сети существенно упрощается. Для использования плановых координат сети необходимо измерить и вычислить прямоугольные координаты каждого знака сети и впоследствии использовать их при ориентировании координатно-измерительной системы, в частности тахеометра. Перед проведением измерений проводятся работы по подбору отражателей, оптимально подходящих для оперативного измерения координат знаков опорной геодезической сети РТ.

В результате проведены работы по изготовлению оснастки для установки отражателей на знаки сети. Изготовлены два типа держателей: для отражателей 1.5" и 0.5". При поисковых работах по подбору отражателей были использованы также высокоточные отражатели Leica GRN1P с точностью центрирования 0.3 мм. Оптимальным оказалось использование трипель-призмных отражателей в сферическом корпусе диаметром 1.8".

Предварительные работы по юстировке включают в себя измерения опорной геодезической сети, при которых существенно сокращено антенное время. Фактически при идеальных погодных условиях появилась возможность проведения измерений части сети, используемой для привязки при юстировке Южного сектора, за 3 часа. Ранее необходимо было установить прибор на каждый знак и провести серию измерений с последующей обработкой, теперь достаточно двух станций (А:0 и А:1) для измерения всех знаков сети (рис. 1). Измерения опорной геодезической сети возможно провести и с одной станции, повторные измерения проводятся для минимизации погрешностей измерений. Благодаря использованию программного комплекса Spatial Analyzer (SA) фирмы New River Kinematics (NRK) для управления тахеометром, обработка измерений занимает также минимум времени. Такой результат и существенное уменьшение времени на юстировку удалось получить благодаря подбору и измерению характеристик различных отражателей, используемых при самих измерениях и ориентации прибора относительно знаков опорной геодезической сети.

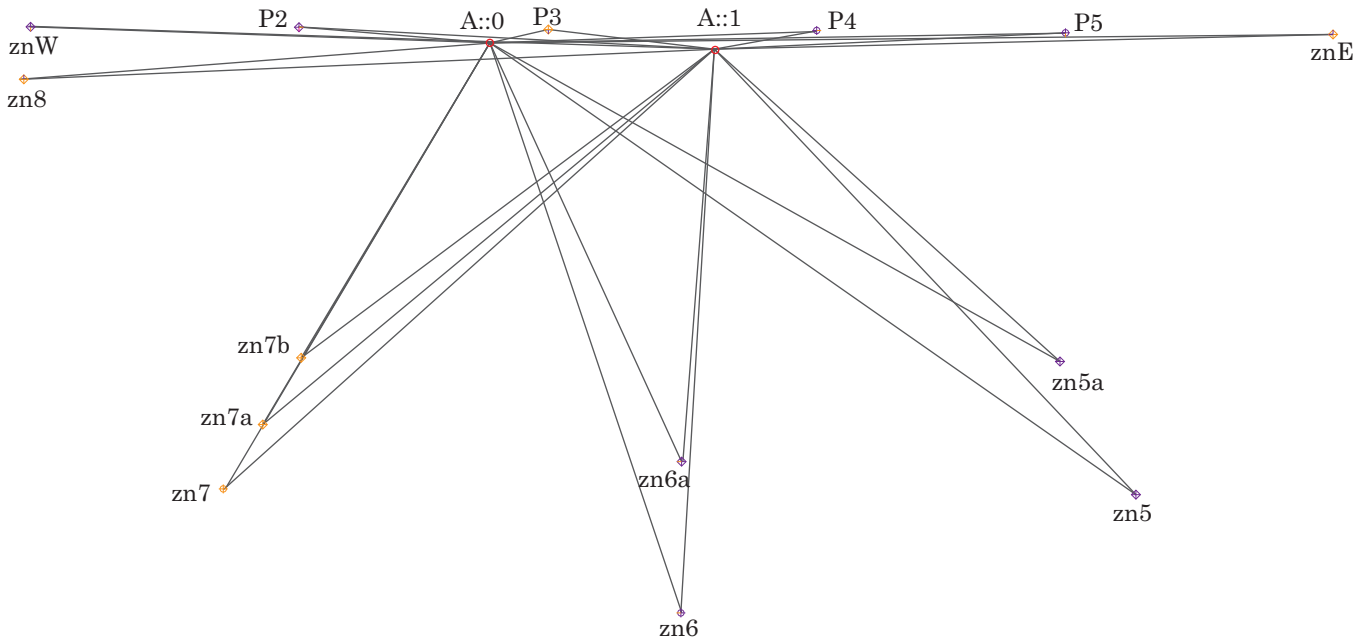


Рис. 1. Схема измерения знаков опорной геодезической сети

Применение методики позволяет отказаться от необходимости наведения на центральный знак опорной геодезической сети РТ, исключить накопление ошибок и делает возможным проводить юстировку как отдельного элемента, так и группы элементов АПП независимо друг от друга, используя пункты геодезической сети. Методика особенно важна для проведения юстировки элементов Южного сектора, так как отсутствует видимость на центр РТ и юстировка зрительной трубой с окулярным микрометром возможна только при укладке Плоского отражателя на землю. Но это связано с трудностями его последующей юстировки, поэтому разработка методики геометрического контроля больших антенных поверхностей лазерными измерительными системами имеет ключевое значение при круглосуточном использовании РТ.

Определение радиального положения элементов Южного сектора

Для формирования высокоточной отражающей поверхности АПП при юстировке сектора необходимо учитывать такие факторы, как ошибки определения положения элементов по углу, радиусу и азимуту. При юстировке сектора с использованием зрительной трубы с окулярным микрометром [10] определение радиального положения элементов требует достаточно длительного времени, и любая перестановка сектора в перерывах между измерениями приводит к неконтролируемому накоплению ошибки по радиусу. Даже при проектной точности установки элемента по углу места в $25''$ [4, 7] ошибка положения представительной площадки на одном элементе приводит

к накоплению ошибки по радиусу m_r . Поэтому оперативное и точное определение ошибок установки элементов по радиусу является основной задачей геодезической юстировки и важной частью методики определения радиального положения отдельных элементов.

После планового профилактического ремонта отдельных групп проведена полная геодезическая юстировка Южного сектора с использованием современных лазерных измерительных систем на базе тахеометра и лазерного трекера. Ранее подобные работы проводились с использованием только трекера: они занимали достаточно длительное время из-за ограничения измерения дистанции в идеальных условиях — до 160 м — и в реальных — примерно до 120 м, для повышения точности измерения проводились на дистанции 80 м. Использование тахеометра позволяет значительно ускорить проведение измерений при юстировке. Примерная оценка времени самих измерений составляет 2 ч — на измерение части антенны (одна станция — установка прибора примерно в середине антенны). Для повышения точности измерений таких стоянок делают две — в разных частях антенны (рис. 2). После доработки методики измерений трекером: при использовании координатно-измерительной системы на базе тахеометра и различных типов и количества отражателей, измерения всего сектора возможно проводить за один день. В то время как раньше определение положения элементов Южного сектора по радиусу без учета подготовительных работ занимало около 10 дней.

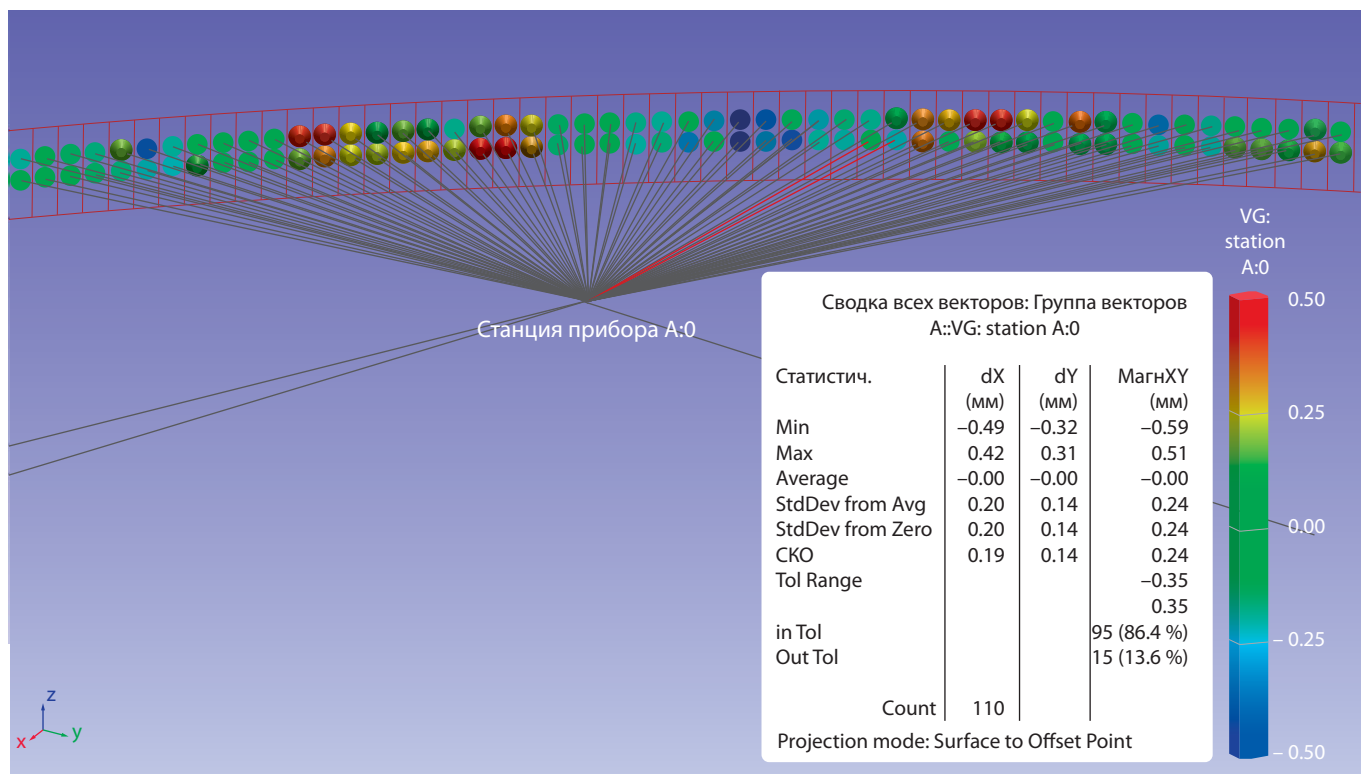


Рис. 2. Состояние поверхности и схема измерений элементов Южного сектора

Контрольные измерения всего сектора не проводились ввиду отсутствия антенного времени. Предварительная оценка точности показывает, что возможна установка отдельного элемента с максимальной ошибкой 0.35 мм на краю сектора, когда ошибка складывается из точности угловых измерений самого прибора 0.5", и в середине сектора — 0.2 мм. Так как определение положения элементов антенны проводилось по частям с несколькими стоянками, для контроля точности измерения проводились с некоторым перекрытием. Оценить точность измерений возможно по этим нескольким элементам. Оценка сходимости измерений на разных частях антенны показала СКО в пределах от ± 0.24 мм до ± 0.30 мм по краям и ± 0.16 мм в центре.

В таблице приведена сравнительная характеристика методов, оборудования и времени для проведения измерений группы из 53 элементов при юстировке Южного сектора. Полная оценка точности методики возможна по определению внутренней сходимости измерений после проведения полноценных контрольных измерений. Для этого необходимо определить радиальное положение группы элементов Южного сектора по новой методике тахеометром или лазерным трекером, и по разностям двойных равноточных измерений провести оценку метода.

Для полноценной оценки метода планируется проведение юстировочных (исследовательских) работ по определению радиального положения

элементов с использованием зрительной трубы с окулярным микрометром [9, 10] и лазерными измерительными системами на базе тахеометра Leica TDRA6000 и лазерного трекера Leica AT402 с целью сравнения результатов и лазерных измерительных систем.

Привязка отражающей поверхности элементов к плоскости представительных площадок

Измерения при проведении геодезической юстировки проводятся от представительных площадок каждого элемента, а положение отражающей поверхности элемента в свое время корректировалось с использованием в качестве средства измерения трубы измерительной визирной ППС-11 от некоторого среднего положения всех точек поверхности без учета расстояния до представительных площадок. Несмотря на высокую точность проведенных работ, расстояние от поверхности представительных площадок до отражающей поверхности элемента оказались различными на каждом элементе, и фактически реальное положение отражающей поверхности главного зеркала не соответствует вышеуказанной точности. Очевидна необходимость дополнительных работ по определению положения отражающей поверхности отдельных элементов относительно представительных площадок.

На данный момент проблема «согласования» поверхности и площадок решена проведением радиотехнической или автоколлимационной (АК)

юстировки. Поэтому дополнительно проводятся радиотехнические измерения для определения более точного положения отдельных элементов и поверхности главного зеркала в целом. Так как радиотехническая юстировка не захватывает полностью весь сектор из-за спада сигнала на краях антенны, то края антенны юстируются только геодезическими методами. На практике это выглядит так — проводится геодезическая юстировка крайних групп Южного сектора и нескольких элементов в центральной части вместе с опорным щитом, затем проводится радиотехническая юстировка, и по результатам АК юстировки принимается решение о корректировке геодезических или автоколлимационных мест нулей. В результате получается поверхность сектора, которая фактически состоит из двух частей: середина — после АК юстировки, края — после геодезической юстировки. Возникает вопрос о точности поверхности всего сектора АПП, которая сформирована фактически из нескольких поверхностей с различными радиусами кривизны. Несмотря на высокую точность геодезической юстировки, результаты радиоастрономических наблюдений показывают потери эффективной площади антенны именно на краях сектора (см. таблицу).

Таблица

Сравнительная оценка определения радиального положения группы элементов Южного сектора

Средство измерения	Мак СКО определения положения элемента по радиусу	Оценка рабочего времени
Зрительная труба с окулярным микрометром [10]	± 0.30 мм	3 раб. дня
Теодолит ОТ-02	± 0.35 мм	Оценки нет
Тахеометр REC ELTA2	± 0.22 мм	4 раб. дня
Лазерные измерительные системы на базе тахеометра Leica TDRA6000 и лазерного трекера Leica AT402	± 0.17 мм	50 мин

Применение высокоточных лазерных измерительных систем для юстировки позволяет оперативно контролировать состояние отражающей поверхности АПП — получить геодезические места нулей всего сектора, затем полученные значения места нулей корректируются АК юстировкой по максимуму сигнала от поверхности каждого элемента. Такой порядок проведения юстировки намного улучшит качество поверхности Главного зеркала в целом. А высокая точность и скорость проведения измерений лазерными измеритель-

ными системами позволит значительно сократить потери антенного времени.

Работы по юстировке Плоского отражателя

Для наблюдения в режиме системы Южный сектор с Плоским отражателем необходимо проводить регулярный контроль состояния поверхности отражателя. Контроль в целом заключается в выполнении следующих условий:

— представительные площадки щитов должны быть выставлены в единую вертикальную и горизонтальную плоскость с ошибкой положения не более ± 0.3 мм;

— эта плоскость должна быть перпендикулярна плоскости меридиана с точностью не менее $\pm 2.0''$.

Юстировка щитов Плоского отражателя заключается в выставлении горизонтальных представительных площадок щитов в створ плановых пунктов западный — восточный. Для соблюдения этих условий необходимо проведение ряда подготовительных работ. В качестве подготовки к юстировке Плоского отражателя проведены пробные створные измерения промежуточных знаков и группы элементов Плоского отражателя и разработана методика геометрического контроля поверхности Плоского отражателя лазерными измерительными системами. Методика заключается в определении отклонений поверхности щитов от дополнительных плановых пунктов опорной геодезической сети и позволяет производить юстировку щитов плоского отражателя автономными группами по 5, 10, 20 щитов в цикле.

Так же с использованием высокоточного тахеометра Leica TDRA6000 проведены работы по измерению планового положения отдельных элементов Плоского отражателя. Измерения можно назвать тестовыми, так как проводилась отработка методики и работы по корректировке больших отклонений от проектного значения. На центральной части элементов измерения проводились по четырем площадкам для получения более полной картины планового положения элементов. В результате измерений получены значения отклонений элементов от проектного положения. Также была проведена корректировка планового положения элементов с максимальными значениями отклонений.

По результатам работы можно сделать краткие выводы:

— работы по измерению планового положения элементов Плоского отражателя возможно провести в кратчайшие сроки (1–2 дня);

— работы по корректировке планового положения элементов Плоского отражателя возможно провести без существенных затрат антенного времени после проведения необходимых подготовительных работ.

Разработка рекомендаций по использованию полученных результатов и перспективы дальнейшего развития метода

1. На данный момент разрабатывается методика по повышению точности измерений тахеометром Leica TDRA6000 — измерение положения отражающих элементов антенны с нескольких стоянок и последующее уравнивание измерений с использованием программного комплекса Spatial Analyzer фирмы New River Kinematics (NRK).

2. Проводятся работы по определению положения отражающей поверхности относительно представительных площадок каждого элемента. Проведение этих работ позволит существенно повысить точность определения положения элементов и соответственно точность отражающей поверхности АПП.

3. Дополнительно планируется проведение работ по определению планового положения элементов Плоского отражателя и последующей юстировки — установке элементов в створ с азимутом 90°.

Заключение

Применение современных высокоточных лазерных измерительных систем на базе тахеометра Leica TDRA6000 и абсолютного лазерного трекера Leica AT402 позволяет существенно увеличить точность отражающей поверхности Главного зеркала и дает возможность проводить оперативный контроль состояния антенны радиотелескопа.

Использование оборудования такого класса позволит решить множество важных задач по повышению точности отражающей поверхности и при разработке соответствующих методик позволит применять лазерные измерительные системы в большинстве работ, проводимых с использованием радиотелескопа.

Литература

1. Есенкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 416 с.
2. Wielebinski R., Junkes N., Grahl B. H. The Effelsberg 100-m radio telescope: construction and forty years of radio astronomy // Journal of Astronomical History and Heritage. 2011. Vol. 14, no. 1. P. 3–21.
3. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л. // Приборы и техника эксперимента. 1959. Т. 2. С. 19–24.
4. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Есенкина Н. А., Шиврис О. Н. // Изв. ГАО АН СССР. 1960. Т. 21, № 164. С. 3.
5. Бронштейн Ю. Л. Геометрия и юстировка крупных зеркальных систем. Москва: ДПК Пресс, 2020. 820 с.
6. ФГБУН САО РАН. Архив расписаний наблюдений РАТАН-600 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sao.ru/ratan/schedule/archive.html> (дата обращения 20.11.2020).
7. Зверев Ю. К., Батурицева Е. В., Крылова С. Я. Исследование ошибок установки элементов кругового отражателя радиотелескопа РАТАН-600 по углу места. Научно-технический отчет. САО АН СССР, 1977.
8. Жаров В. И., Сотникова Ю. В. Методика определения кинематических характеристик элементов главного зеркала РАТАН-600 с использованием современных лазерных измерительных систем // Астрофизический бюллетень. 2017. Т. 72, № 4. С. 520–526.
9. Зверев Ю. К. Геодезические методы юстировки больших радиотелескопов с антеннами переменного профиля (БПР, РАТАН-600): дис. канд. техн. наук. МИИГАиК, Москва. 1974. 222 с.
10. Зверев Ю. К., Коркин Э. И., Батурицева Е. В. Геодезические методы определения мест нулей элементов кругового отражателя радиотелескопа РАТАН-600: Научно-технический отчет. САО АН СССР, 1976.
11. Зверев Ю. К. Вариант геодезической юстировки радиотелескопа РАТАН-600 // Астрофизические исследования (Изв. САО). 1986. № 22. С. 128.
12. Петров В. В., Медяников В. О., Краев Е. В. Применение лазерного трекера // Металлообработка и станкостроение. 2012. № 11. С. 14–16.