

УДК 520.27-32

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

© 2017 В. И. Жаров*, Ю. В. Сотникова

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 18 июля 2017 года; принята в печать 4 октября 2017 года

Рассматриваются методы определения ошибок установки элементов главного зеркала и плоского отражателя радиотелескопа РАТАН-600 с использованием современной координатно-измерительной системы на базе абсолютного лазерного трекера Leica AT402. Выполнен расчет кинематических поправок угломестных винтов. Получена оценка точности метода измерений. Проведена проверка ввода кинематических поправок в счет антенны.

Ключевые слова: *техники: радиоастрономия*

1. ВВЕДЕНИЕ

РАТАН-600 — радиотелескоп высокой разрешающей силы и большой собирающей площади [1], работает в центральном окне прозрачности земной атмосферы в диапазоне частот 610–30 000 МГц. Одним из его преимуществ является получение мгновенного радиоспектра космического источника за несколько минут [2, 3]. РАТАН является инструментом общего пользования для исследований объектов ближнего и дальнего космоса методами радиоастрономии. Для решения современных актуальных задач астрофизики требуются высокая стабильность приемно-измерительных систем и соответствующее качество собирающей поверхности, а также возможность оперативного их контроля и корректировки.

Первоначально РАТАН-600 создавался как инструмент с ручным управлением и относительно небольшой загруженностью — 10–20 объектов в сутки. Ряд мероприятий по автоматизации в 80-е и 90-е годы прошлого века привел к увеличению наблюдательных возможностей (порядка 100 объектов в сутки на каждом секторе) и предельной эксплуатации телескопа при существующем уровне механической части. Развитие приемно-измерительных систем [4–6] позволило решать новые наблюдательные задачи: исследовать массово неяркие радиоисточники, например, радиозвезды

нашей Галактики, некоторые лацертиды, сейфертовские галактики первого типа с узкими линиями [7–9]. Такие объекты наблюдаются на телескопе планоно в течение многих лет и это накладывает определенные требования на контроль качества отражающей поверхности телескопа — точности и относительной стабильности на масштабах времени между плановыми юстировками.

РАТАН-600 — радиотелескоп с антенной переменного профиля (АПП), диаграмма направленности (ДН) которой формируется в результате специального расположения отражающих элементов и вторичного зеркала, находящегося в фокусе отражающей поверхности [1]. Перемещение ДН телескопа происходит за счет изменения формы отражателя (взаимного положения отражающих элементов). Для получения спектральных плотностей потоков калибровка измерений производится на всех высотах установки антенны (от $+5^\circ$ до зенита) [6].

Успешное проведение плановых наблюдений на радиотелескопе во многом определяется состоянием поверхности главного зеркала, которое напрямую зависит от состояния отражающей поверхности отдельного элемента и точности установки каждого элемента в расчетное положение. Формирование отражающей поверхности АПП происходит выставлением каждого отдельного элемента главного зеркала в определенное положение по окружности или параболе. Высокая точность и стабильность поверхности должны быть обеспечены и на всех рабочих углах наклона антенны радиотелескопа. Поэтому необходимо регулярно проводить

*E-mail: vit@sao.ru

проверку положения элементов антенны и, если необходимо, юстировку (корректировку).

В большинстве случаев при решении перечисленных задач применяются геодезические методы с использованием различных геодезических приборов. Однако оборудование, которое имеется в распоряжении на РАТАН-600, несмотря на обеспечиваемую высокую точность, сильно отстает по производительности и скорости проведения измерений от современных, прецизионных измерительных систем. Приходится постоянно его дорабатывать, совершенствовать и разрабатывать новые методы, позволяющие проводить юстировку и контроль отражающей поверхности более качественно и в короткие сроки. Опыт эксплуатации радиотелескопа показывает, что для проведения различных работ по юстировке, проверке геометрического контроля состояния отдельных элементов и составляющих радиотелескопа недостаточно миллиметровой точности. Например, при геодезической юстировке — выставлении элементов антенны в проектное положение — точность должна быть на порядок выше, а в случае измерений отражающей поверхности вторичных зеркал необходимо иметь оборудование, позволяющее проводить измерения с микронной точностью.

В работе представлен новый метод определения кинематических характеристик угломестных винтов главного отражателя РАТАН-600 с использованием современных высокоточных лазерных измерительных систем на примере абсолютного лазерного трекера Leica AT402.

2. ОСОБЕННОСТИ АПП

Отражающая поверхность главного зеркала формируется из отдельных отражающих элементов (щитов), и при этом большое значение имеет точность установки элементов антенны на рассчитанные углы наклона β в зависимости от высоты наблюдаемого радиосточника h . Для расчета углов наклона отражающей поверхности элементов антенны применяются формулы, приведенные в работе [10]. Механизм перемещения элемента обеспечивает точную установку отражающей поверхности на заданный угол.

Перемещение щитов в расчетное положение осуществляется в автоматическом режиме. При этом возникают ошибки, обусловленные неточностью изготовления механизмов перемещения элемента, в частности угломестных винтов. Несмотря на высокие требования, при изготовлении некоторых из них были допущены технологические ошибки, которые связаны с несоответствием винта номинальным параметрам. Кроме того, в процессе эксплуатации происходит изменение параметров пары винт-гайка и соответственно элемент

устанавливается на заданный угол с некоторой ошибкой. Такие ошибки устраняются своевременной юстировкой после проведения регламентных работ, а ошибки, вызванные неточностью изготовления угломестных винтов, выявляются геодезическими методами и учитываются в счете антенны. Тем самым удается повысить точность установки отдельных элементов и улучшить качество всей поверхности главного зеркала радиотелескопа в целом. Вычисление и ввод в счет антенны так называемых кинематических поправок проводится на основе измеренных значений ошибок при установках щитов.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ТРЕКЕРОМ LEICA AT402

Для проведения работ по контролю точности установки элементов используется современная координатно-измерительная система на базе абсолютного лазерного трекера Leica AT402. Применение такого оборудования позволяет совершенствовать методы измерений и избавиться от некоторых независимых ошибок, таких как неточность наведения, ошибки наблюдателя, некорректность записи отсчетов в журнал, а также существенно увеличить скорость и точность определения ошибок за счет проведения измерений в автоматическом режиме и управления антенной в автоматике.

В разработанной в настоящее время методике измерения ошибок установок элементов по углу места с использованием лазерного трекера Leica AT402 реализован принцип координатоопределяющей технологии [11]. Определяются пространственные координаты точки и передаются в программный пакет Spatial Analyzer (SA) компании New River Kinematics (NRK). Управление системой на основе трекера Leica AT402 также происходит с помощью программного обеспечения Spatial Analyzer. В программе используется своя условная система координат, которую нет необходимости привязывать к сети.

Ранее при исследовании ошибок установок измерение кинематических характеристик отдельных элементов антенны и определение фактических углов установки щитов проводились относительно угломестной оси щита. Измерялись углы поворота оси относительно вертикального положения щита и сравнивались с расчетными значениями. Такая методика не давала полной картины положения отражающей поверхности на больших углах наклона, так как не учитывались деформации фермы щита.

С использованием координатно-измерительной системы на базе абсолютного лазерного трекера Leica AT402 проводится измерение пространственного положения поверхности отдельного элемента,



Рис. 1. Размещение сферических полудюймовых отражателей.

одновременно на несколько стандартных сферических призмных отражателей, диаметром 0.5 или 1.5 дюйма, в полуавтоматическом режиме. В основном используются сферические полудюймовые отражатели со съёмным кольцом — TBR (Tooling Ball Reflector). Для увеличения апертуры отражателя, особенно при проведении измерений на элементах плоского отражателя, кольцо снимается. Сферический полуторадиймовый отражатель — Black-Ring Reflector (BRR) — используется для измерения опорных точек (при контроле стабильности прибора) и проведения процедуры инициализации при включении трекера.

Отражатели устанавливаются на отражающей поверхности элементов (см. рис. 1) с применением специальной оснастки, которая исключает их смещение во время измерений. Затем, после включения трекера, проводится поиск отражателей с помощью встроенной камеры обзора.

Далее элементы выводятся в вертикальное положение и трекером проводятся измерения координат отражателей. Определяются и записываются координаты каждой отдельной измеренной точки. Элементы антенны устанавливаются на заранее рассчитанные отсчеты, соответствующие теоретическим углам наклона.

При вычислении теоретических углов наклона за исходное значение принимается кратное 10 число оборотов угломестного винта от вертикального положения элемента, так называемого места нуля (МО). МО элемента определяется при юстировке всего сектора или отдельного элемента.

В основном используются места нулей, полученные при проведении юстировки радиотехническим методом [12], который называется сейчас автоколлимационным, с использованием модернизированного двухчастотного юстировочного комплекта радиометров [13], и обладает некоторыми преимуществами по точности юстировки главного зеркала и скорости проведения работ.

На некоторых элементах Южного сектора и всех элементах плоского отражателя места нулей определяются только геодезическими методами, для установки элементов в вертикальное положение используется специальный угломестный юстировочный инструмент, представляющий собой квадрант оптический КО-10 с увеличенной базой.

Для повышения точности измерений определение вертикального положения и места нуля датчика отсчетно-установочного устройства (ОУУ) проводится при двух положениях квадранта (подсветкой налево и подсветкой направо). При установке отдельных элементов в проектное положение (юстировке) приняты допуски, исходя из точности 0.1λ [10], составляющие $\pm 20''$ для элементов кругового и $\pm 15''$ для элементов плоского отражателя [14]. Цена деления точного сельсина меняется в зависимости от угла наклона щита (рис. 2) и в среднем равна $25''$ [15]. Соответственно точность установки элементов антенны по датчикам ОУУ составляет ± 0.8 деления точного сельсина.

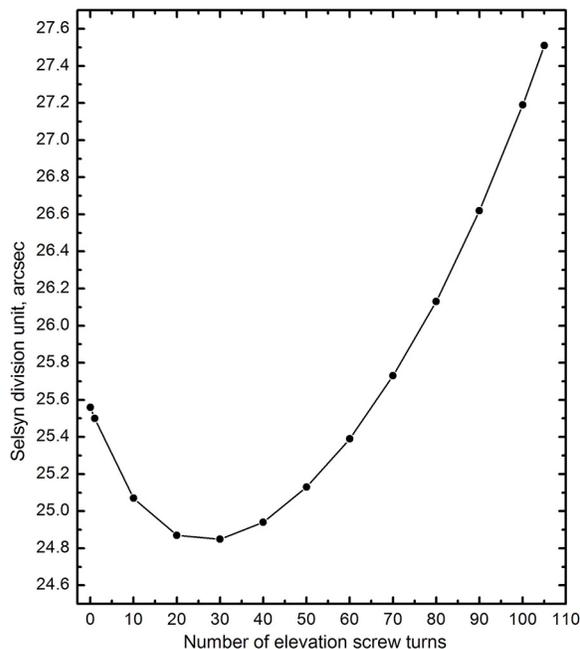


Рис. 2. Цена деления точного сельсина датчика угломестного винта.

Повышение точности установки щитов по углу места возможно только при замене датчика. При этом нужно принять во внимание то обстоятельство, что при установке щитов в вертикальное положение необходимо будет учитывать уклонение отвесной линии. Для радиотелескопа с диаметром 600 метров величина уклонения будет существенной. Различие величины уклонения отвесной линии при установке двух диаметрально противоположных щитов в вертикальное положение можно оценить с учетом разности их широт $\Delta\varphi = \varphi_{600} - \varphi_{150}$, где 600 и 150 — номера щитов, или по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{S}{R} \rho, \quad (1)$$

где R — средний радиус Земли (6 371 302 м), S — средний радиус радиотелескопа (576 м), а ρ — число секунд в радиане (206 265"). Отсюда $\Delta\varphi = 19''$. Для точного расчета можно воспользоваться формулами из справочника [16] (раздел II.1.13).

Учет уклонения отвесной линии при выставлении элементов в проектное положение при использовании существующих датчиков ОУУ, с ошибкой установки ± 0.8 деления точного сельсина, является нецелесообразным.

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Новая методика позволяет проводить измерения сразу на нескольких щитах, по количеству отражателей, существенно увеличивая скорость работы. При управлении антенной в полуавтоматическом режиме после установки элемента в вертикальное положение необходимо согласовать шкалы ОУУ и установить в нулевое положение показания шкалы точного сельсина. Если управление осуществляется в автоматическом режиме, движение элемента начинается от нулевого (проектного положения элемента). При отработке методики и проверке сходимости измерений на поверхности одного элемента размещались несколько отражателей. В дальнейшем оказалось достаточным устанавливать по одному отражателю на каждый элемент.

После установки полудюймовых отражателей на поверхность элементов и поиска их камерой обзора для контроля стабильности прибора проводятся контрольные измерения при вертикальном положении элемента. Если величина расхождения между измерениями не превышает предельно допустимого значения, при СКО измерения угла для трекера Leica AT402 $m\beta = 0''5$ [17] на расстоянии 15 метров эта величина составляет 0.036 мм, группа элементов устанавливается в автоматике на следующий отсчет и трекером автоматически проводятся измерения координат отражателей. Измерения координат проводятся во всем диапазоне

рассчитанных значений углов при установках щита прямо и обратно. Для элементов плоского отражателя 10 оборотов винта соответствуют наклону в 6° , а для элементов кругового отражателя — 4° . Затем по координатам точек x, y, z определяется величина смещения элемента при движении на заданный угол наклона. При движении щита отражатель перемещается по дуге окружности, радиус которой определяется при обработке измерений. Величина смещения элемента и радиус окружности представляют собой исходные данные для определения угла наклона элемента. По полученным значениям вычисляется разность значений между установками щита прямо и обратно и по известной формуле:

$$\cos \beta = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}, \quad (2)$$

где a, b, c — стороны кинематического треугольника (рис. 3), находятся углы наклона β_{real} . Однако, так как отражатель установлен непосредственно на отражающей поверхности элемента в точке «Ref» (рис. 4), то в результате измерений определяются фактические углы β_j наклона отражающей поверхности отдельного элемента. При этом длины сторон a_j, b_j, c_j кинематического треугольника для каждого элемента различны и вычисляются с помощью формулы:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}, \quad (3)$$

где x_1, y_1, z_1 соответствуют координатам отражателя Ref при нулевом положении элемента, а x_2, y_2, z_2 — при установке щита на расчетное значение угла наклона.

Далее определяется ошибка установки щита по углу места:

$$\Delta\beta = \beta_{\text{real}} - \beta_{\text{calc}}, \quad (4)$$

где β_{calc} рассчитывается по формуле (4) из [18].

В основе метода лежит работа по исследованию угломестных ошибок кругового отражателя [18], с использованием в качестве средства измерения квадранта оптического КО-10. Главная особенность новой методики в том, что проводятся измерения положения поверхности щита Surf (рис. 4), и при этом, в отличие от измерений на оси щита, определяется реальное положение отражающей поверхности, с учетом весовых деформаций фермы щита. Как показали контрольные измерения с использованием квадранта оптического КО-10 и трекера Leica AT402, при равных условиях наблюдений ошибки установки варьируются в пределах $1'$ (рис. 5). Различие обусловлено деформацией фермы щита. А сравнение данных величин на масштабах всего сектора (рис. 6) показывает систематические отклонения до $2'$ на углах наклона, близких к 42° .

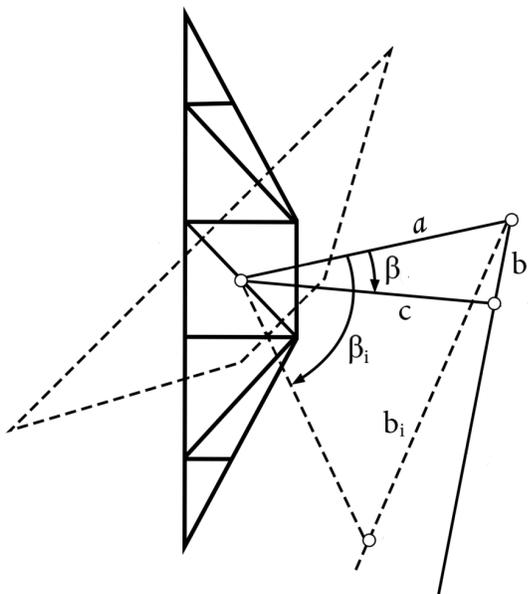


Рис. 3. Схема механизма наклона щита.

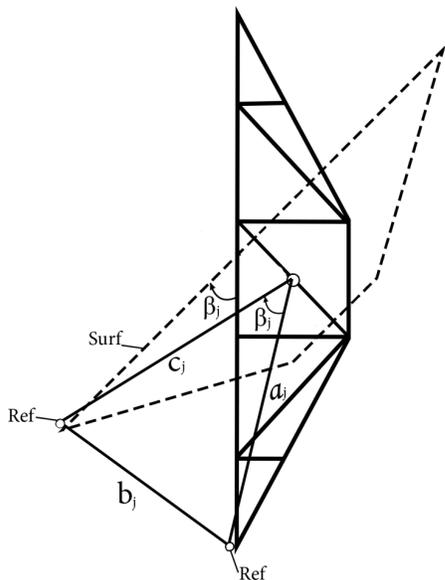


Рис. 4. Схема измерений трекером Leica AT402 по новой методике.

По разностям двойных равноточных измерений проведена оценка точности методики измерений. После обработки результатов измерений по пяти элементам максимальная средняя квадратическая ошибка одного измерения составила ± 0.07 мм, что в угловом выражении составляет $\pm 3''$ наклона поверхности. Ранее определение кинематических

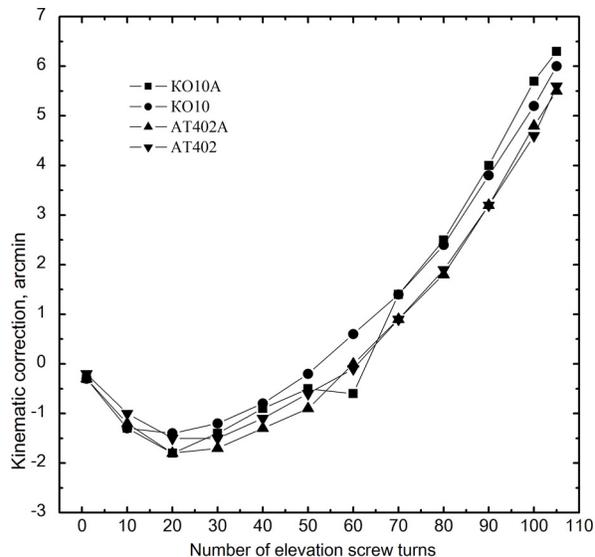


Рис. 5. Сводка кинематических поправок. Проверка сходимости измерений.

поправок проводилось квадрантом оптическим с предельной погрешностью определения угла $\pm 10''$.

После проведения работ по измерению кинематических характеристик угломестных винтов, расчету и введению кинематических поправок в счет антенны отмечено значительное повышение точности установки элементов Южного сектора по углу места.

По результатам этих измерений на всех элементах Южного сектора сделана оценка ошибок установок элементов по углу места. В целом на элементах Южного сектора наблюдается следующее распределение ошибок: элементов с ошибкой установки по углу места до $4'$ — 35 шт. (16%), до $10'$ — 108 шт. (48%), свыше $10'$ — 82 шт. (36%). Таким образом, по величине ошибок элементы можно условно разделить на три группы. Такое же разделение отмечено при исследованиях угломестных ошибок в самом начале эксплуатации радиотелескопа [18]. На рис. 7 показаны элементы, ошибки которых наиболее точно характеризуют каждую из групп.

Работы по исследованию ошибок установок по углу места также проводились на элементах Северного сектора. Были измерены ошибки и определены кинематические поправки для всего сектора. В результате введения кинематических поправок в счет антенны уменьшилось количество элементов, имеющих неточность в установке более $80''$, в 4 раза, с 21% до 5%, количество элементов, имеющих неточность в установке до $80''$, уменьшилось с 23% до 8%.

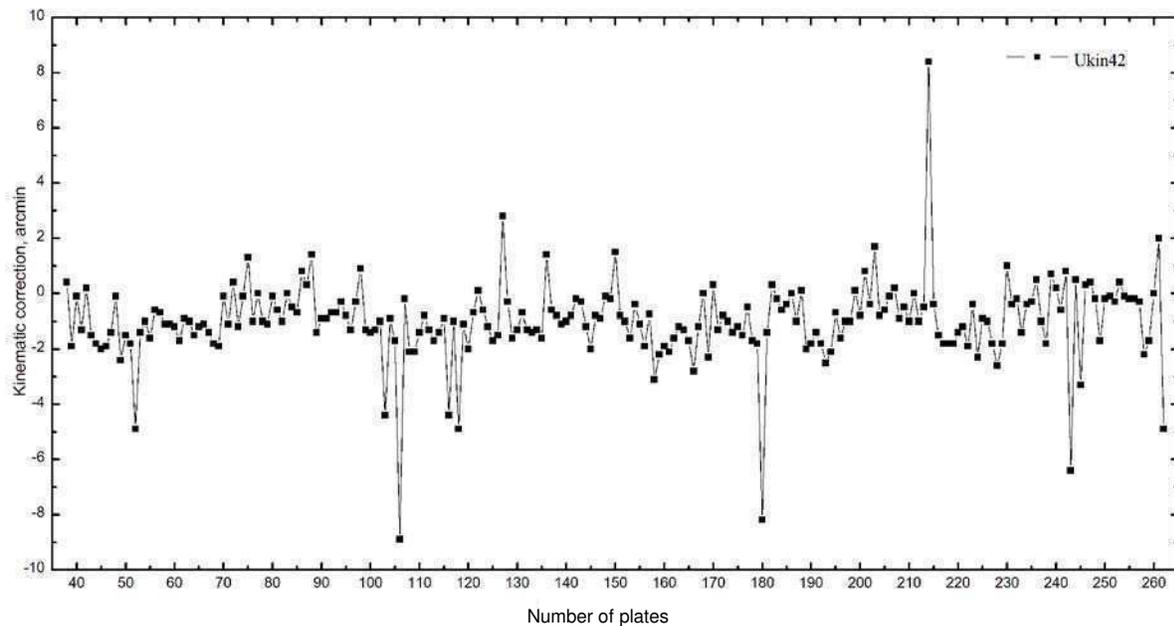


Рис. 6. Сводка поправок в минутах на углах наклона 42° .

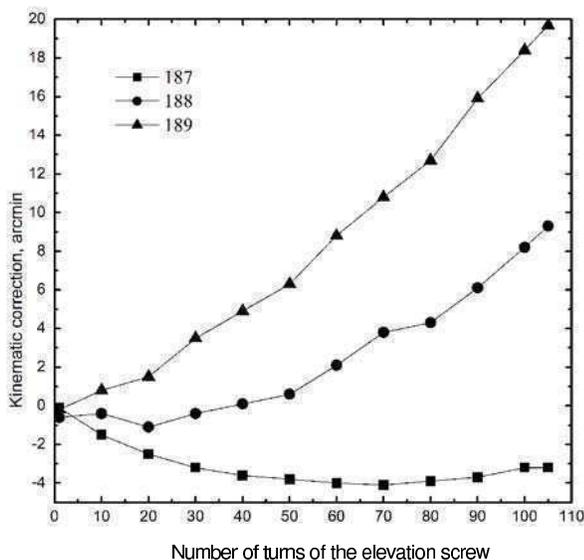


Рис. 7. Распределение ошибок винтов по группам.

Проведение работ по поиску и устранению источников ошибок на элементах с ошибкой установки более $80''$ выявило влияние на точность установки датчиков угломестных винтов и в некоторых случаях редукторов из-за дефектов сборки.

Для оценки корректности вводимых кинематических поправок в счет антенны были проведены работы по проверке точности установки отдельных элементов Северного сектора с их учетом. Ошибка установки элемента на углах наклона 42° при проверке составила $25''$. При точности ав-

томатического выставления ± 0.8 деления точного сельсина можно с уверенностью сказать, что проектная точность установки элементов реализуется, и поправки работают правильно.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение качества отражающей поверхности геодезическими методами на радиотелескопе проводится постоянно. Определение и введение, как их принято называть, кинематических поправок в счет антенны по-прежнему актуально, проверка угломестных винтов и определение ошибок установки щитов после проведения регламентных работ или ремонта является важной частью методики повышения точности поверхности АПП и позволяет получить более качественную отражающую поверхность Главного зеркала в целом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность специалистам ООО «Промышленная геодезия» В. В. Петрову и В. О. Медяникову за всестороннюю поддержку и консультации по использованию современных измерительных систем, а также сотрудникам группы антенных измерений А. А. Бойко и П. О. Фомину за помощь в обработке результатов измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. E. Khaikin, N. L. Kaidanovskii, Yu. N. Pariiskij, and N. A. Esepkina, *Izvestiia Glavnoi astronomicheskoi observatorii v Pulkove* **188**, 3 (1972).

2. D. V. Korolkov and Yu. N. Pariiskij, *Sky Telesc.* **57**, 324 (1979).
3. Yu. N. Pariiskij, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **35**(4), 7 (1993).
4. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 109 (2011).
5. P. G. Tsybulev, M. V. Dugin, A. B. Berlin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 240 (2014).
6. R. Yu. Udovitskiy, Yu. V. Sotnikova, M. G. Mingaliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 496 (2016).
7. A. Rushton, R. E. Spencer, G. Pooley, and S. Trushkin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **401**, 2611 (2010).
8. M. G. Mingaliev, Yu. V. Sotnikova, R. Yu. Udovitskiy et al., *Astron. and Astrophys.* **572**, A59 (2014).
9. A. Lähteenmäki, E. Järvelä, T. Hovatta, et al., *Astron. and Astrophys.* **603**, A100 (2017).
10. S. E. Khaikin, N. L. Kaidanovskii, N. A. Esepkina, and O. N. Shivriv, *Izvestiia Glavnoi astronomicheskoi observatorii v Pulkove* **164**(5), 3 (1960).
11. В. В. Петров, в *Тезисах докладов научной конференции «Полезные ископаемые России и их освоение»* (СПбГГИ, Санкт-Петербург, 1996), с. 93.
12. Н. Ходжамухамедов, А. А. Стоцкий, В. Н. Боровик, *Радиотехника и электроника* **15**(2), 258 (1970).
13. В. Б. Хайкин, В. Н. Радзиховский, С. Е. Кузьмин, С. В. Шлензин, *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал* **5** (2014).
14. А. З. Amstislavskii, А. I. Kopylov, and М. I. Prosmushkin, *Izvestiia Glavnoi astronomicheskoi observatorii v Pulkove* **188**, 89 (1972).
15. Ю. К. Зверев и др. *Научно-технический отчет. САО АН СССР* (1977).
16. В. Д. Большаков и др. *Справочник геодезиста (в двух книгах)*, 3-е изд. (Недра, Москва, 1985).
17. В. В. Петров, В. О. Медяников, Е. В. Краев, *Металлообработка и станкостроение* **11**, 14 (2012).
18. Yu. K. Zverev and S. Y. Krilova *Astrofiz. Issled. (Izv. SAO)* **13**, 106 (1981).

A Method of Determining the Kinematic Properties of the Primary Mirror Elements of the RATAN-600 Radio Telescope Using Modern Laser Measuring Systems

V. I. Zharov and Yu. V. Sotnikova

We review the methods of determining the alignment errors of the primary mirror and flat reflector elements of the RATAN-600 radio telescope using a modern coordinate measuring system based on the Leica absolute tracker AT402. We computed the kinematic corrections for the elevation drives. The accuracy of the measurement method was estimated. The antenna readout with the introduced kinematic corrections was tested.

Keywords: *techniques: radar astronomy*