

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ОБЛУЧАТЕЛЯ РАТАН-600

Ю. К. Зверев

Описывается методика контроля качества отражающей поверхности вторичного зеркала (облучателя) радиотелескопа РАТАН-600 и приводятся результаты геодезических измерений на облучателе № 2. Показано, что примененная методика, которая, кстати, использовалась и при первоначальной юстировке, вполне эффективна и обеспечивает достаточную точность. Так, взаимная привязка установочных уровней и отражающей поверхности контролируется с точностью лучше $5''$, координаты опорных точек из одного цикла измерений определены со среднеквадратичной ошибкой ± 0.069 мм, а положение панелей поверхности относительно этих точек — с ошибкой ± 0.037 мм. Стабильность положения опорных точек за прошедшее время (больше 5 лет) характеризуется ср. кв. ошибкой ± 0.063 мм. Сохранность качества поверхности может быть признана удовлетворительной. В результате выполненной частичной корректировки получена отражающая поверхность со ср. кв. ошибкой, меньшей ± 0.12 мм.

The control technique of quality of the reflected surface of the secondary mirror (the feed) of the radio telescope RATAN-600 is described and the results of geodesic measurements carried out on the feed N2 are presented. It is shown the applied technique which was used at first adjustment, is quite effective and provides a sufficient accuracy. So, the mutual connection of the setting levels and the reflecting surface is controlled with an accuracy better than $5''$. The coordinates of calibrated points are determined with the meansquare error ± 0.069 mm, but the position of the panels of surface according to these points is determined with an accuracy of ± 0.037 mm. The position stability of the calibrated points is characterized by the meansquare error ± 0.063 mm during the last few years (more than 5). The quality of the surface can be considered satisfactory. The reflected surface with the mean square error less than ± 0.12 mm was derived as a result of the partially fulfilled correction.

Облучатели, или вторичные зеркала, являются обязательной принадлежностью радиотелескопа РАТАН-600 [1, 2]. В настоящее время радиотелескоп имеет три облучателя одного типа с отражающей поверхностью в виде параболического полуцилиндра [2].

Необходимую точность отражающей поверхности облучателей можно рассчитать, исходя из следующих соображений. Как показано в [3], для обеспечения нормальной работы радиотелескопа РАТАН-600 на волне 8 мм отражающая поверхность его главного зеркала должна иметь среднюю квадратическую ошибку (ср. кв.) $\sigma_s \leq 0.32$ мм. Погрешности вторичного зеркала должны оказывать на точность главного пренебрежимо малое влияние. При коэффициенте обеспечения точности $K=2.5$ получим, что значение ср. кв. ошибки отражающей поверхности облучателя не должно превышать величины $\sigma_{s_{обл}} = \sigma_s / 2.5 \approx 0.13$ мм. Это значение не противоречит требованиям, указанным в [2].

Юстировка всех трех зеркал была выполнена в течение 1975 г. геодезическим методом [4] и включала в себя как формирование точной отражающей поверхности, так и привязку ее к установочным уровням. В течение 1980—1981 гг. при радиоастрономических наблюдениях с использованием облучателя № 2 обнаружилось постепенное ухудшение радиоизображения исследуемых источников, поэтому возникла необходимость проверки качества поверхности вторичного зеркала и привязки его к установочным уровням. Оказалось целесообразным использовать при контрольных измерениях тот же метод и те же инструменты, что и при юстировке, поэтому работа распалась на два этапа: проверка правильности положения опорных точек при одновременном контроле взаимной привязки уровней и поверхности и съемка «рельефа» отражающей

поверхности с последующим исправлением в случае необходимости. Перед началом измерений на каркасе зеркала была установлена дополнительная контрольная база для фиксации положения зеркала и его изменений относительно отвесной линии.

Различие старых и вновь определенных прямоугольных координат опорных точек, относительно которых выполняется установка панелей отражающей поверхности облучателя в проектное положение, может быть обусловлено как смещением этих точек, так и нарушением взаимной привязки поверхности и установочных уровней, а также разностью температур во время юстировки и контрольных измерений. На рис. 1 показано, к чему может привести нарушение привязки уровней. Если XOY — система координат, в которой производилась

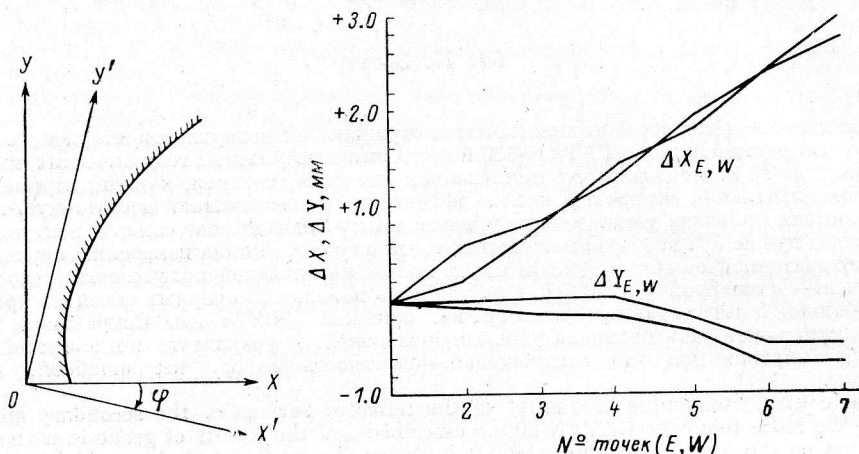


Рис. 1. Изменение координат опорных точек вследствие нарушения взаимной привязки поверхности и установочных уровней.

Рис. 2. Разность старых и вновь определенных из первого цикла измерений координат опорных точек.

юстировка, то после появления погрешности в положении уровня прямоугольные координаты опорных точек при контрольных измерениях будут определяться в системе $X'OY'$:

$$X' = (X - X_0) \cos \varphi + (Y - Y_0) \sin \varphi;$$

$$Y' = (Y - Y_0) \cos \varphi - (X - X_0) \sin \varphi,$$

где угол φ и есть появившаяся погрешность уровня.

Именно такой характер имеет разность координат опорных точек — старых и определенных из первого цикла контрольных измерений: значения ΔX изменяются от 0 до +2.96 мм, а значения ΔY — от 0 до -0.62 мм при достаточно высокой точности измерений (рис. 2).

Поскольку угол φ мал, то $\cos \varphi$ будет близок к единице, а произведения $X_0 \sin \varphi$ и $Y_0 \sin \varphi$ — исчезающе малы, и приведенная выше система уравнений еще более упростится. Разность температур во время юстировки и контрольных измерений может привести к заметному изменению масштаба зеркала, что также отразится на разностях значений как Y , так и X .

С учетом всех этих замечаний можно составить уравнения поправок следующего вида:

$$-Y_i u + B_i t + w - \Delta X_i = v_{X_i}; \quad X_i u + Y_i t + z - \Delta Y_i = v_{Y_i},$$

где $u = \sin \varphi$; $w = X_0$; $z = Y_0$; $\Delta X_i = X_i - X'_i$; $\Delta Y_i = Y_i - Y'_i$; $t = \alpha \Delta T$; α — коэффициент линейного расширения материала, из которого изготовлен каркас облучателя; ΔT — разность температур во время юстировки и контрольных измерений; B_i — коэффициент, учитывающий расширение каркаса облучателя по горизонтали.

Из решения нормальных уравнений по результатам первого цикла измерений были найдены все неизвестные и поправки к разностям координат. Последние характеризуются ср. кв. ошибкой $m_{v_I} = \pm 0.118$ мм. Если предположить, что наличие поправок целиком обусловлено погрешностями измерений и что точность старых и новых координат одинакова, то точность определения новых координат можно найти, как $m_{x,y,I} = m_{v_I} / \sqrt{2} = \pm 0.084$ мм. Из неизвестных для нас существенно прежде всего значение u , или $\sin \varphi$, так как по нему непосредственно определяется ошибка привязки уровня. Из первого цикла найдено значение $\varphi_I = \arcsin u = -02' 10''$, которое определяется со ср. кв. ошибкой

$$m_{\varphi} = \frac{m_v}{\cos \varphi \sqrt{P_u}} \rho'' \cdot 10^{-3} = \pm 4.2,$$

где P_u — вес неизвестного, определенный из решения нормальных уравнений; 10^{-3} — коэффициент соразмерности.

После исправления продольного установочного уровня был проведен следующий цикл измерений с аналогичной обработкой. В результате получен вто-

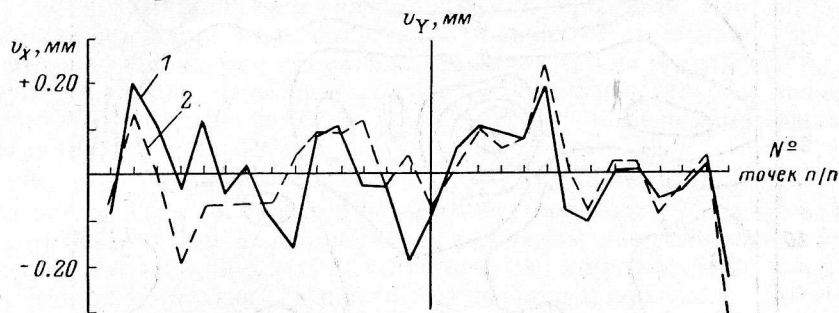


Рис. 3. Значение поправок к измеренным разностям координат из первого цикла контрольных измерений (1) и из второго (2).

рой ряд поправок v с $m_{v_{II}} = \pm 0.115$ мм и соответственно $m_{x,y,II} = \pm 0.081$ мм. Значения величин $m_{x,y}$ свидетельствуют о равноточности измерений в обоих циклах.

Ряды величин v_I и v_{II} , полученные из независимых измерений, содержат в себе информацию, с одной стороны, о случайных ошибках измерений, а с другой — о возможных смещениях опорных точек, которые в данном случае будут выступать в виде систематического влияния. Действительно, разности Δv представляют собой надежный материал для оценки точности измерений. Оказывается, что из одного цикла измерений координаты опорных точек определяются со ср. кв. ошибкой

$$m_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta v)^2}{2(n-4)}} = \pm 0.069 \text{ мм.}$$

В то же время графики величин v_I и v_{II} близки по форме (рис. 3). Так, коэффициент корреляции между ними равен $r = +0.638$. Доверительный интервал для этого значения по уровню вероятности 95% заключен между 0.35 и 0.82, а критическое значение, при котором с той же вероятностью еще может быть принята нулевая гипотеза, равняется 0.37. Таким образом, наличие корреляции можно считать установленным, хотя она в значительной мере «замывается» ошибками измерений. Другими словами, смещения опорных точек, если они произошли в течение пяти лет, сравнимы с ошибками измерений.

Координаты опорных точек при юстировке 1975 г. были определены как средние по результатам двух циклов измерений, поэтому будет целесообразным при сравнении с ними в качестве новых координат также брать осредненные значения. Для этого результаты измерения первого цикла были приведены ко второму, осреднены и затем уже сравнены со старыми координатами. Ср. кв. ошибка, характеризующая разброс величин $v_{\overline{81}}$, оказалась равной $m_{v_{\overline{81}}} = \pm 0.105$ мм. Это значение складывается из ошибок измерений во время первой юстировки (по данным из [4] $M_{x,y,75} = \pm 0.067$ мм), из ошибок измерений во время проверки

зеркала ($M_{X,Y,81} = \pm 0.069/\sqrt{2}$ мм) и смещений опорных точек за прошедшее пятилетие. Отсюда следует, что стабильность опорных точек за пятилетний период характеризуется ср. кв. ошибкой $\sigma_{\Delta} = \pm 0.063$ мм, т. е., как и предполагалось, величиной, близкой к точности измерений.

Следующий этап работы — определение положения панелей относительно струн, натянутых между опорными точками. Зазоры между струной и отражающей поверхностью измерялись специальным оптико-механическим микрометром, описанным в [4]. Распределение разностей $\Delta\zeta$ измеренных и расчетных (для первой юстировки) значений зазоров характеризуется ср. кв. ошибкой ± 0.14 мм при точности измерений ≤ 0.037 мм. Явно преобладают отрицательные разности: $\overline{\Delta\zeta} = -0.20$ мм, и имеется несколько больших по абсолютной

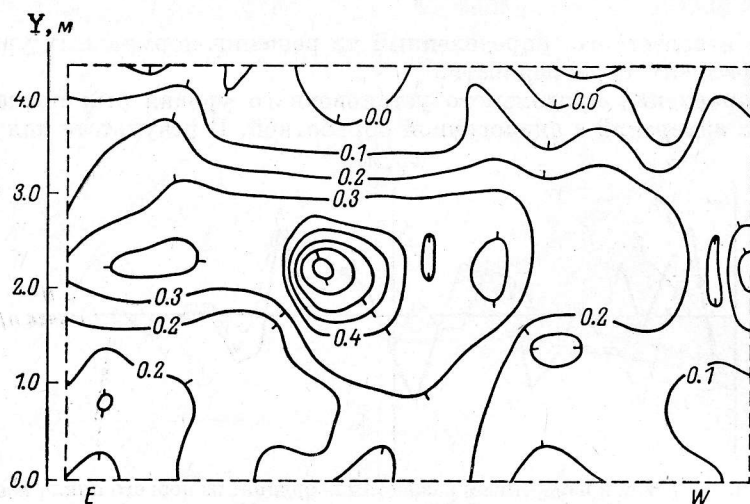


Рис. 4. «Топография» отражающей поверхности облучателя на момент начала контрольных измерений.

«Горизонтالي» проведены через 0.1 мм.

величине значений — до -0.83 мм. Поскольку панели с большими отклонениями находятся в центральной части зеркала, их ошибки будут приводить к большим искажениям результатов радиоастрономических наблюдений, чем можно было бы ожидать от зеркала со ср. кв. ошибкой 0.14 мм, поэтому корректировка обнаруженных больших погрешностей обязательна. Карта «рельефа» отражающей поверхности показана на рис. 4.

Данные о положении панелей относительно струн в совокупности с поправками к разностям координат опорных точек могут быть использованы для ответа на вопрос, чем вызвано наличие больших значений $v_{X,Y}$ — ошибками измерений или смещением опорных точек. Смещение одной опорной точки должно проявиться в систематическом ходе изменений величин $\Delta\zeta_j$, имеющем линейный вид, и в смещении центра их группирования. При смещении двух опорных точек будем иметь

$$\Delta\zeta_j = (\Delta_W - \Delta_E) z_j + \Delta_E,$$

где Δ_E и Δ_W — смещения опорных точек по нормали к поверхности зеркала; z — положение исследуемой точки поверхности на оси, параллельной образующим, выраженное в долях расстояния между опорными точками.

Коэффициенты данного уравнения регрессии определяются с весами $P_1 = 1.4$, $P_2 = 4.1$. Очевидно, что

$$\Delta_E = \Delta\zeta(0) \quad \text{и} \quad \Delta_W = (\Delta_W - \Delta_E) + \Delta_E.$$

Но в нашем случае дело осложняется двумя обстоятельствами: во-первых, наличием относительно большой систематической разности $\overline{\Delta\zeta}$, которая, однако, никак не влияет на точность поверхности, и, во-вторых, сравнительно малыми

значениями поправок v_{81} . Например, при ср. кв. ошибке определения разности координат $M_{\Delta} = \sqrt{M_{75}^2 + M_{81}^2} = \pm 0.083$ мм и $q=5\%$ формально можно считать незначимыми поправки до ± 0.17 мм. Большие по абсолютной величине значения поправок имеют только две точки: 6E с $v_Y = +0.230$ мм и 7W с $v_Y = -0.286$ мм. Для обоих профилей (6E—6W и 7E—7W) были вычислены уравнения аппроксимирующих прямых (они же уравнения регрессии), коэффициенты корреляции между $\Delta\zeta_j$ и z_j , а также была выполнена проверка наличия смещения центра группирования величин $\Delta\zeta_j$ с помощью критерия Аббе.

В отношении линии 7E—7W все указывает на то, что при определении ординаты точки 7W во время первой юстировки была допущена ошибка. Относительно же точки 6E ничего определенного сказать нельзя. Корреляции между величинами $\Delta\zeta_j$ и z_j нет ($r=0.378$). Однако, согласно критерию Аббе, имеется намек на наличие смещения центра группирования величин $\Delta\zeta_j$: фактическое значение статистики $\delta_{\text{фак}}$ хоть и не намного, но все же больше табличного при $q=5\%$, что свидетельствует в пользу изменения положения исследуемой точки за время между юстировкой и контрольными измерениями. Поэтому одинаково возможны и изменения положения опорной точки 6E, и ошибка при определении ее ординаты во время юстировки. Тем более, что на результаты анализа неблагоприятно влияют ошибки в положении точек поверхности; например, для линии 6E—6W отклонения точек поверхности от аппроксимирующей прямой характеризуются $\sigma=0.079$ мм.

Можно было бы попытаться исключить при анализе влияние систематической разности $\Delta\zeta$, т. е. проверить наличие корреляции между величинами $(\Delta_W - \Delta_E)$, найденными по поправкам к разностям координат и из уравнений аппроксимирующих прямых для соответствующих профилей, но для этого уже оказывается недостаточной точность определения поправок v . Действительно, при полученной точности определения координат $m_{X,Y}$ ср. кв. ошибку коэффициента $(\Delta_W - \Delta_E)$ можно вычислить как

$$m_{\Delta\Delta} = m_{X,Y} \sqrt{2},$$

т. е. она будет иметь значение чуть меньше 0.1 мм. И хотя искомый коэффициент корреляции оказался больше 0.5 ($r=0.705$), значение его весьма ненадежно и уверенного вывода о том, что гипотеза о смещении опорных точек подтверждается результатами съемки «рельефа» поверхности зеркала, сделать нельзя.

Подробный анализ влияния различных факторов на точность поверхности облучателя приведен в [4]. Используя вновь определенные координаты и учитывая их точность, указанную выше, можно получить отражающую поверхность облучателя со ср. кв. ошибкой $\sigma_{\text{собр}} = \pm 0.094$ мм. Однако в силу сложившихся обстоятельств было решено, во-первых, корректировать положение только тех панелей, отклонения которых превышают по абсолютной величине 0.25 мм, и, во-вторых, принять обнаруженные различия в значениях координат за ошибки измерений. Для этого случая точность определения [координат опорных точек будет несколько грубее:

$$M_X = \sqrt{\frac{\sum v_{X,81}^2}{n-3}}; \quad M_Y = \sqrt{\frac{\sum v_{Y,81}^2}{n-3}}.$$

С учетом того, что после частичной юстировки отклонения панелей от расчетного положения стали характеризоваться ср. кв. ошибкой ± 0.07 мм (рис. 5), получаем следующее значение ср. кв. ошибки поверхности облучателя по юстируемым точкам:

$$\sigma_{\text{собр}} = \pm 0.115 \text{ мм},$$

которое оказывается больше того, что можно было бы получить (0.094 мм), но в допустимых пределах.

Перед вводом исправленного вторичного зеркала в эксплуатацию с его использованием была проведена автоколлимационная юстировка [5] одного из секторов кругового отражателя и затем оценка точности поверхности главного зеркала по результатам радиоастрономического наблюдения Луны [6] (рис. 6).

По расчетам О. И. Крат, точность главного зеркала (северный сектор) после всех выполненных юстировок характеризуется ср. кв. ошибкой $\sigma_S = \pm 0.43$ мм. Надежность этого значения подтверждается результатами последующих радиоастрономических наблюдений, приведенными, например, в [7].

В заключение необходимо отметить, что разработанная и примененная методика юстировки и контроля вторичного зеркала типа II—III оказалась достаточно эффективной и ресурсы ее по точности еще не исчерпаны.

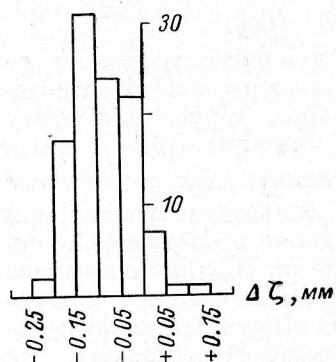


Рис. 5. Распределение величин $\Delta\zeta$ после частичной корректировки положения панелей поверхности облучателя.

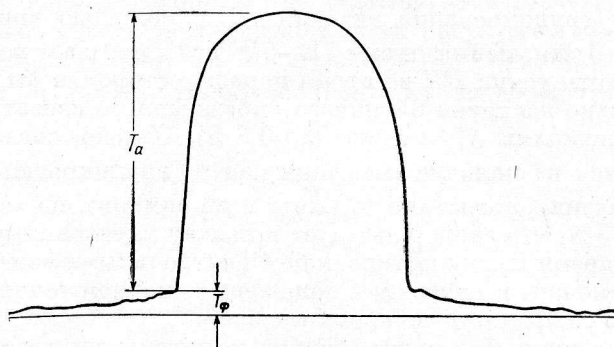


Рис. 6. Результат наблюдения Луны на волне 1.35 см после частичной юстировки облучателя и полной автоколлимационной юстировки северного сектора (20.05.81, $H < 30^\circ$).

За время эксплуатации обмеренного облучателя значительного искажения отражающей поверхности не произошло, стабильность опорных точек в общем удовлетворительная: разброс величин $v_{x,y}$ характеризуется ср. кв. ошибкой, близкой к точности измерений.

Как показали результаты вычислений, осреднение координат опорных точек, полученных из разных циклов измерений, следует выполнять с использованием уравнений поправок, учитывающих изменение масштаба зеркала вследствие разности температур.

Автор считает своим долгом выразить признательность О. И. Крат за предоставленные ею результаты оценки точности главного зеркала, В. М. Белякову и А. П. Глумову — за помощь при измерениях.

Литература

1. Радиотелескоп РАТАН-600 / С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, Н. А. Есепкина. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 3—12.
2. Амстиславский А. З., Копылов А. И., Просмушин М. И. Конструкция отражающих элементов и облучателя радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 89—96.
3. Зверев Ю. К. Геодезические методы юстировки больших радиотелескопов с антеннами переменного профиля (БПР, РАТАН-600). Автореф. канд. дис. МИИГАиК, 1974.
4. Зверев Ю. К., Коркин Э. И., Глумов А. П. Геодезическая юстировка облучателя радиотелескопа РАТАН-600. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1978, 10, с. 139—145.
5. Стоцкий А. А., Лавров А. П., Магамадова Т. А. Радиотехническая юстировка радиотелескопа РАТАН-600. — В кн.: VIII Всесоюзная конференция по радиоастрономии. Тезисы докладов. Пуццино, 1975, с. 26—27.
6. Использование космических источников радиоизлучения для исследования характеристик радиотелескопа РАТАН-600 / Б. В. Брауде, Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев и др. — Радиотехника и электроника, 1981, 26, № 7, с. 1530—1544.
7. Наблюдения радиолинии H_2O в источниках W 49 и Орион А / А. П. Венгер, И. В. Госачинский, Т. М. Егорова и др. — Письма в АЖ, 1981, 7, № 11, с. 677—681.

Поступила в редакцию 16.04.82