

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВТОРИЧНОГО ЗЕРКАЛА БОЛЬШОГО ПУЛКОВСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА

Ю. К. Зверев, А. И. Копылов

В статье дается описание методики исследования топографии отражающей поверхности вторичного зеркала Большого пулковского радиотелескопа. Приводятся основные результаты этого исследования.

A technique is described for investigating the topography of the reflecting surface of the secondary mirror of the Large Pulkovo Radio Telescope. The main results of such an investigation are given.

Как известно, в Большом пулковском радиотелескопе (БПР) преобразование плоской волны в сферическую происходит в два этапа. Сначала

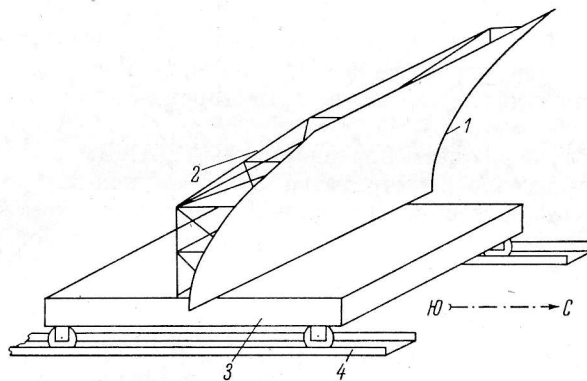


Рис. 1. Вторичное зеркало БПР.

1 — отражающая поверхность, 2 — несущая ферма,  
3 — тележка, 4 — рельсы.

отражающей поверхностью главного зеркала плоская волна преобразуется в цилиндрическую, а затем, отразившись от вторичного зеркала, цилиндрическая волна преобразуется в сферическую. Сферическая волна сходится в фазовом центре облучателя [1]. Преобразование цилиндрической волны в сферическую может быть осуществлено при помощи зеркала, изготовленного в виде параболического цилиндра. Именно такую форму имеет отражающая поверхность вторичного зеркала БПР, представляющая собой вырезку из параболического цилиндра (рис. 1). Уравнение направляющих отражающей поверхности вторичного зеркала можно представить в виде

$$y = +\sqrt{2px}, \quad (1)$$

причем  $p=2.10$  м,  $x$  принимает значения от 0 до  $+2.12$  м, а  $y$  — от 0 до  $+2.98$  м. Длина образующих равна 5.11 м. Отражающая поверхность крепится к несущей ферме, установленной на тележке, которая перемещается по рельсам.

В период реконструкции БПР [2] возник вопрос о возможности использования имеющегося вторичного зеркала для приема радиоизлучения с длиной волны 8 мм. В связи с этим было проведено изучение топографии отражающей поверхности вторичного зеркала. Это изучение проводилось с помощью специального шаблона.

**Исследование шаблона.** Шаблон для контроля и выверки поверхности вторичного зеркала представляет собой плоский элемент, рабочая кромка которого — лезвие шаблона — имеет форму кривой, определяемой уравнением (1). На плоскости шаблона проведены координатные линии: «гори-

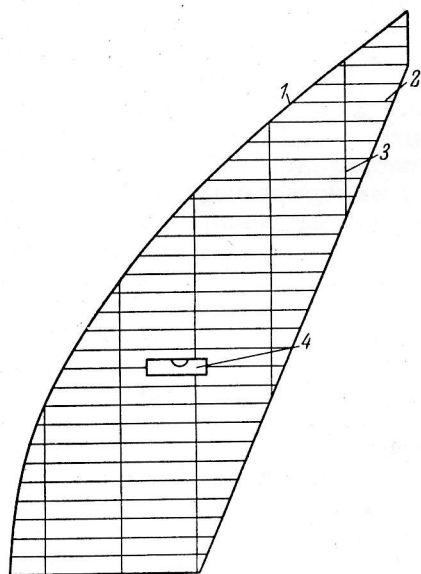


Рис. 2. Шаблон для контроля и выверки поверхности вторичного зеркала БПР.

1 — рабочая кромка, 2 — «горизонтальная» координатная линия, 3 — «вертикальная» координатная линия, 4 — цилиндрический уровень.

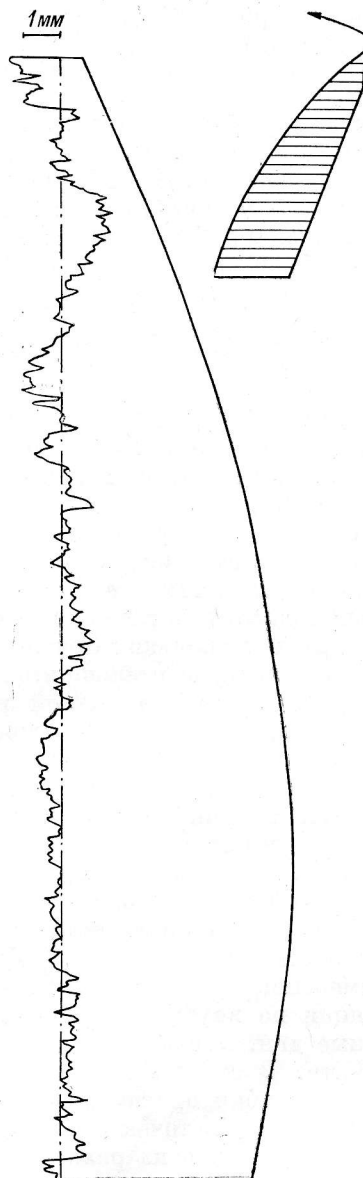


Рис. 3. Профиль лезвия шаблона. Аппроксимирующая парабола развернута в прямую.

зонтальные», параллельные оси  $x$ , через 10 мм, и «вертикальные», параллельные оси  $y$ , через 200—300 мм (рис. 2). Для определения формы кривой лезвия шаблона измерялись расстояния от «вертикальных» координатных линий до точек пересечения «горизонтальных» координат-

ных линий с лезвием шаблона. По разностям двойных измерений была вычислена средняя квадратичная ошибка одного измерения; она оказалась равной  $\pm 0.18$  мм. Для удобства обработки результатов измерений шаблон был ориентирован относительно осей координат так, чтобы уравнение лезвия шаблона имело вид

$$y = ax^2 + bx + c. \quad (2)$$

В этом уравнении значения  $x$  заданы, а значения  $y$  были найдены по измеренным величинам.

Таким образом, для каждой точки лезвия шаблона с известными значениями  $x$  и  $y$  оказалось возможным написать уравнение (2), в котором коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  — неизвестные. Данные неизвестные были найдены по способу наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} a &= +0.00023816270 \text{ мм}^{-1}, \\ b &= +0.005517, \\ c &= +0.040 \text{ мм} \end{aligned}$$

По этим коэффициентам были вычислены случайные отклонения точек лезвия шаблона от плавной кривой и получен профиль лезвия шаблона (рис. 3). Эти отклонения характеризуются средней квадратичной ошибкой, равной  $\pm 0.47$  мм.

**Исследование поверхности вторичного зеркала.** Исследование отражающей поверхности вторичного зеркала производилось путем измерения зазора между исследуемой поверхностью и лезвием шаблона в точках с известными координатами. Измерения были выполнены в нескольких сечениях отражающей поверхности. Ориентирование шаблона относительно вторичного зеркала производилось по струне диаметром 0.5 мм, натянутой параллельно образующим поверхности, по цилиндрическому уровню, укрепленному на шаблоне так, чтобы его ось была параллельна «горизонтальным» координатным линиям, и по следам вертикальных нормальных плоскостей на отражающей поверхности зеркала. При помощи струны шаблон всегда выставлялся на одну и ту же высоту (провес струны учитывался) и перемещался от сечения к сечению по прямой. По цилиндрическому уровню шаблон в каждом сечении устанавливался в одно и то же положение по углу места (в плоскости  $xy$ ). И, наконец, по линиям, соответствующим следам нормальных плоскостей на отражающей поверхности, шаблон выставлялся нормально образующим.

Измерение зазора выполнялось щупом. Точность измерения зазора, оцененная по внутренней сходимости при исследовании одного сечения в разные дни, характеризуется средней квадратичной ошибкой, равной  $\pm 0.28$  мм. В эту величину наряду с ошибками собственно измерений вошли и ошибки ориентирования шаблона.

Отклонения  $h_i$  точек сечений отражающей поверхности от расчетной кривой находились из равенства

$$h_i = \zeta_i + v_i \sin \alpha_i,$$

где  $\zeta_i$  — измеренный зазор,  $v_i$  — поправка ординаты точки лезвия шаблона,  $\alpha_i$  — угол между касательной к параболе и «горизонтальной» координатной линией в точке  $i$ . Для уменьшения величин зазора в отдельных сечениях шаблон смещался относительно струны по направлению к зеркалу. В этом случае

$$h_i = \zeta_i + v_i \sin \alpha_i + \delta \sin \alpha_i,$$

где  $\delta = \zeta_{\text{стр}} - \zeta_0$  ( $\zeta_{\text{стр}}$  — зазор между струной и отражающей поверхностью при свободном состоянии струны,  $\zeta_0$  — зазор между струной и отражающей

поверхностью при смещении струны шаблоном). Измерения зазоров были произведены в 10 сечениях. Абсциссы точек, в которых производились

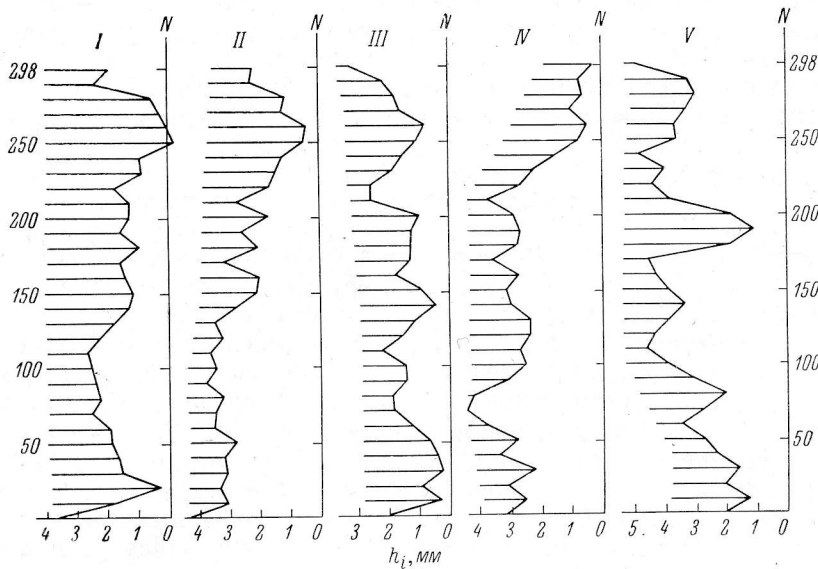


Рис. 4. Профили сечений I—V отражающей поверхности вторичного зеркала БПР.

$h_i$  — «глубины» точек сечений,  $N$  — номера точек сечений.

измерения, кратны 100 мм. На рис. 4 в качестве иллюстрации показаны профили пяти сечений. Отклонения точек отражающей поверхности в сечениях от параболы характеризуются средними квадратичными ошибками от  $\pm 0.63$  до  $\pm 1.23$  мм. Причем в эти величины, кроме ошибок поверхности, вошли ошибки измерений зазоров, ошибки ориентирования и исследования шаблона. Если величины  $h_i$  принять за «глубины» точек отражающей поверхности, отсчитанные от параболического цилиндра, определяемого шаблоном, то по ним при помощи линий равных глубин — изобат — можно изобразить «рельеф» отражающей поверхности вторичного зеркала, что и показано на рис. 5. Отражающая поверхность развернута в плоскость. Изобаты проведены через 1 мм. Среднеквадратичное отклонение отражающей поверхности от расчетной оказалось равным  $\pm 1.05$  мм, при средней квадратичной ошибке величин  $h_i$ , равной  $\pm 0.31$  мм.

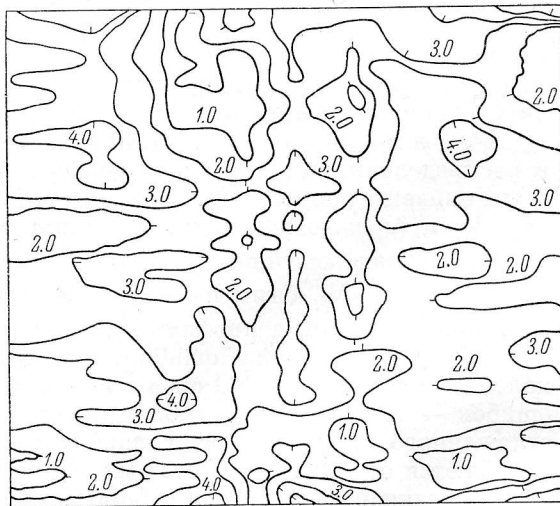


Рис. 5. «Рельеф» отражающей поверхности вторичного зеркала.

Параболический цилиндр, определяемый вышеуказанными значениями коэффициентов  $a$ ,  $b$ , и  $c$ , строго говоря, не является аппроксимирующим для отражающей поверхности данного зеркала. Аппроксимирующий параболический цилиндр может иметь несколько иные значения этих коэффициентов и может быть слегка развернут относительно оси  $z$  (струны). В этом случае, учитывая малую величину ошибки ориентирования струны, для каждой точки любого сечения  $j$  можно написать следующее уравнение ошибок:

$$x_i^2 \delta a_0 + x_i \delta b_0 + \delta c_0 + (2ax_i + b) z_j d + z_j g + \frac{h_{ji}}{\sin \alpha_i} = v_{ji}, \quad (3)$$

где  $z_j$  — аппликата сечения;  $d$  и  $g$  — неизвестные коэффициенты, определяющие ориентирование струны;  $\delta a_0$ ,  $\delta b_0$  и  $\delta c_0$  — неизвестные поправки к коэффициентам  $a$ ,  $b$  и  $c$ , найденным при исследовании шаблона. В случае наличия ошибки в положении струны, могущей привести к изменению ориентировки аппроксимирующего параболического цилиндра относительно оси  $z$ , должна существовать связь между значениями  $z_j$  и координатами вершин парабол, аппроксимирующих сечения  $j$ . Однако такая связь не была установлена (коэффициенты корреляции оказались  $r_{x/z} = -0.18$ ,  $r_{y/z} = +0.18$ ), поэтому коэффициенты  $d$  и  $g$  были исключены из уравнений ошибок (3). Коэффициенты аппроксимирующего параболического цилиндра, найденные по способу наименьших квадратов, оказались равными:

$$\begin{aligned} a_0 &= a + \delta a_0 = +0.00023811526 \text{ мм}^{-1}, \\ b_0 &= b + \delta b_0 = +0.004873, \\ c_0 &= c + \delta c_0 = -2.00 \text{ мм}. \end{aligned}$$

По этим коэффициентам были вычислены ошибки  $\Delta_{0ji}$  точек отражающей поверхности, отсчитываемые по нормали

$$\Delta_{0ji} = -v_{ji} \sin \alpha_i.$$

Средняя квадратичная ошибка отражающей поверхности вторичного зеркала равна  $\pm 1.04$  мм, что свидетельствует о достаточно хорошей аппроксимации отражающей поверхности зеркала параболическим цилиндром, определяемым шаблоном.

**Анализ ошибок.** Для выявления некоторых закономерностей в распределении ошибок отражающей поверхности для каждого сечения были найдены аппроксимирующие параболы путем вычисления поправок  $\delta a_j$ ,  $\delta b_j$  и  $\delta c_j$  к коэффициентам  $a$ ,  $b$  и  $c$ , а затем были вычислены ошибки  $\Delta_{ji}$  точек отражающей поверхности в сечениях, отсчитываемые по нормали. По величинам  $\Delta_{ji}$  были построены и потом сглажены профили каждого сечения. Сглаженные профили позволили выявить некоторую периодичность в распределении ошибок. Периоды ошибок отдельных сечений колеблются от 100 до 200 см в плоскости раскрыва зеркала, а величины ошибок — от  $+0.86$  до  $-0.69$  мм. Для осредненного по всем сечениям сглаженного профиля период ошибок составляет 140 см, а величины их колеблются от  $+0.46$  до  $-0.22$  мм. Коэффициент корреляции между точками осредненного сглаженного профиля отражающей поверхности и соответствующими точками сглаженного профиля лезвия шаблона равен  $+0.56$ . Это свидетельствует о том, что периодичность ошибок отражающей поверхности зеркала может быть объяснена ошибками шаблона. На рис. 6 приведен график автокорреляционной функции, являющейся средней из автокорреляционных функций каждого сечения. Радиус корреляции, соответствующий  $r_i = 0.5$ , оказался равным 7 см в плоскости раскрыва зеркала, а период «низкочастотной» составляющей около 120 см. Распре-

деление ошибок отражающей поверхности  $\Delta_{0ji}$  вторичного зеркала, отсчитываемых по нормали, показано на рис. 7.

Проведенные исследования отражающей поверхности вторичного зеркала БПР показали следующее.

1. Исследованное вторичное зеркало БПР не пригодно для наблюдений на волне 8 мм.

2. Ошибки отражающей поверхности этого зеркала при наблюдении на длинах волн от 3 см и больше не вносят существенных искажений в радиоизображение.

3. Метод исследования отражающей поверхности с помощью

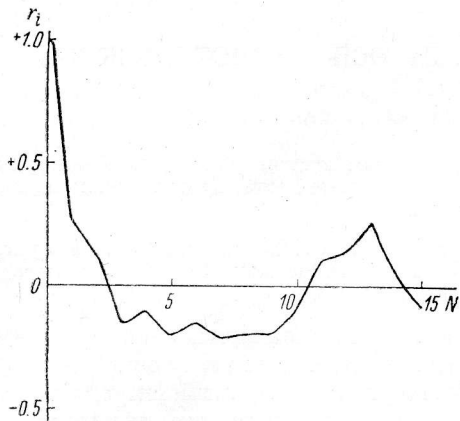


Рис. 6. Усредненная автокорреляционная функция.

$r_i$  — значения функции,  $N$  — номера точек сечений.

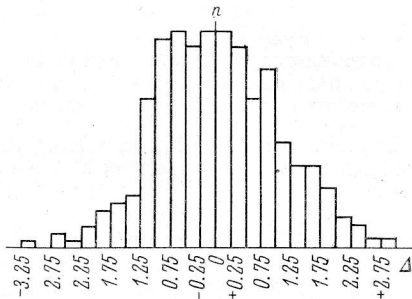


Рис. 7. Распределение ошибок отражающей поверхности  $\Delta_{0ji}$  вторичного зеркала БПР (гистограмма).

$\Delta$  — интервалы ошибок,  $n$  — число ошибок в интервале.

шаблона вполне пригоден для зеркал со средней квадратичной ошибкой поверхности от  $\pm 0.5$  мм и больше.

4. Для исследования более точных зеркал требуется изменение конструкции шаблона с целью повышения точности его изготовления, исследования, ориентирования и производства измерений.

Точность исследования отражающей поверхности может быть повышена также путем усовершенствования методики измерений.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. Н. Парийскому и А. А. Стоцкому за внимание к работе и ряд ценных замечаний.

#### Литература

1. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский и др. Изв. Глав. астр. obs. в Пулкове, № 164, 3, 1960.
2. Ю. К. Зверев, А. И. Копылов, О. Н. Шиврис, Изв. Глав. астр. obs. в Пулкове, № 185, 219, 1970.

Декабрь 1969 г.