

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОГОЛОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

Г. А. Пинчук, А. А. Стоцкий

Рассматривается возможность применения радиоголографических методов для обнаружения ошибок взаимной привязки элементов главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 и получения топографии отражающей поверхности отдельного элемента. Приведены оценки основных параметров и результаты экспериментального опробования двух радиоголографических схем.

The possibility of using the radioholography methods for determination of the errors in mutual positioning of the elements of the main mirror of the radiotelescope RATAN-600 and obtaining the topography of reflecting surface of a separate element is considered. The estimations of the main parameters and the results of experimental probes of two radioholography schemes are given.

В настоящее время существует большое количество методов юстировок отражающей поверхности больших многоэлементных антенн, характерной особенностью которых является последовательное во времени измерение положения отдельных элементов отражающей поверхности и их взаимная привязка. Такие методы можно назвать дифференциальными. В качестве примера можно привести механические измерения с помощью различного рода шаблонов [1], дистанционные измерения геодезическими [2] и радиотехническими способами [3, 4], радиоастрономический метод юстировки [5].

Из-за последовательного характера процесса измерений и большого количества элементов вся процедура юстировки антенны такими методами занимает довольно длительное время (на радиотелескопе РАТАН-600 — около суток) и поэтому не может проводиться очень часто.

Для наблюдений на предельно коротких волнах необходимо получение заданной формы поверхности зеркала радиотелескопа с наибольшей возможной точностью. Это, в частности, требует более частого проведения юстировок для уменьшения влияния эффекта «старения» антенны. Оценка «старения» радиотелескопа РАТАН-600 по результатам автоколлимационных юстировок показала, что среднеквадратичная ошибка привязки элементов главного зеркала РАТАН-600 сразу после юстировки составляет 0.03—0.05 мм, в течение последующих нескольких суток она увеличивается обычно до 0.2—0.3 мм и затем возрастает со скоростью около 0.3 мм/год [6].

Ясно, что реальная точность поверхности радиотелескопа может быть повышена, если юстировки проводить чаще. Идеальным является включение юстировок непосредственно в процесс наблюдения, когда юстировка проводится непосредственно перед наблюдением. Такой режим работы радиотелескопа может быть реализован, если сам процесс юстировки будет существенно ускорен.

В последнее время в антенной технике находят широкое применение методы измерений характеристик антенн, которые можно назвать интегральными. Эти методы основаны на определении характеристик поля сразу во всей интересующей нас области пространства путем интегральных преобразований (типа Фурье) распределения поля, измеренного в другой, обычно более компактной области пространства [7]. Так, зная амплитудно-фазовое распределение поля в дальней зоне (или в области фокуса), можно определить амплитуду

и фазу поля в апертуре антенны или непосредственно около отражающей поверхности. Амплитудно-фазовое распределение поля вблизи отражающей поверхности при известном законе облучения ее первичным рупором дает в итоге топографию поверхности и ее отражающую способность.

Техника измерения амплитудно-фазового распределения основана на применении радиоголографических методов, в которых информацию об амплитуде и фазе электромагнитного поля в исследуемой области можно извлечь из результатов интерференции исследуемого сигнала с заранее известным опорным. Применение радиоголографических методов для исследования отражающей поверхности антенн описано в [8—11].

В отличие от традиционных дифференциальных методов интегральные методы существенно более оперативны и в принципе позволяют получить достаточно высокую точность измерения топографии поверхности рефлекторных антенн.

В настоящей статье рассматривается возможность применения радиоголографических методов для юстировки и исследования качества поверхности главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 в автоколлимационном режиме, нашедшем широкое применение для настройки радиотелескопа [4]. Использование автоколлимационного метода в радиоголографических измерениях дает большое отношение сигнал/шум и позволяет сравнительно просто получить когерентный опорный сигнал.

Из обозримых вариантов применения радиоголографии для исследования антенны переменного профиля можно отметить два наиболее важных:

- 1) исследование отражающей поверхности главного зеркала в целом с возможностью локализации неправильно установленных элементов;
- 2) исследование топографии отражающей поверхности отдельного элемента.

Ниже приведены оценки возможностей реализации таких измерений на примере двух опробованных схем.

Основные соотношения

Рассмотрим метод восстановления распределения поля на апертуре антенны по известному амплитудно-фазовому распределению поля в ее фокальной плоскости. Как известно, распределение комплексного поля $\hat{F}(x, y)$ в фокальной плоскости (x, y) и распределение комплексного поля $\hat{E}(\zeta, \eta)$ на апертуре антенны (ζ, η) в первом приближении связаны между собой преобразованием Фурье

$$\hat{E}(\zeta, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{F}(x, y) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda R} (x\zeta + y\eta)} dx dy, \quad (1)$$

где λ — длина волны; R — фокусное расстояние.

Для измерения комплексной величины $\hat{F}(x, y)$ используется радиоголографический метод: в области фокуса измеряется мощность сигнала, получающегося в результате интерференции исследуемого поля $\hat{F}(x, y) = F(x, y) e^{j\Phi(x, y)}$ с опорным полем $\hat{E}_{\text{оп}}(x, y) = E_{\text{оп}}(x, y) e^{j\Phi_{\text{оп}}(x, y)}$:

$$P(x, y) = E_{\text{оп}}^2(x, y) + F^2(x, y) + 2E_{\text{оп}}(x, y) F(x, y) \cos[\Phi(x, y) - \Phi_{\text{оп}}(x, y)].$$

Удобно в качестве опорного сигнала использовать сигнал с постоянной амплитудой и фазой:

$$E_{\text{оп}}(x, y) = \text{const}(x, y) = E_0; \quad \Phi_0(x, y) = \text{const}(x, y) = \varphi_0.$$

Производя измерения при $\varphi_0 = 0$ и $\varphi_0 = \pi/2$, получаем две интерферограммы измеряемого поля:

$$\begin{aligned} P_c(x, y) &= E_0^2 + F^2(x, y) + 2E_0 F(x, y) \cos \Phi(x, y); \\ P_s(x, y) &= E_0^2 + F^2(x, y) + 2E_0 F(x, y) \sin \Phi(x, y), \end{aligned} \quad (2)$$

из которых можно найти вещественную и мнимую компоненты исследуемой функции $\hat{F}(x, y)$:

$$\begin{aligned} X(x, y) &= F(x, y) \cos \Phi(x, y); \\ Y(x, y) &= F(x, y) \sin \Phi(x, y). \end{aligned}$$

Решая систему уравнений (2), получим для $X(x, y)$ и $Y(x, y)$ следующие выражения:

$$X(x, y) = \frac{-2E_0^2 + P_c(x, y) - P_s(x, y) + \sqrt{(2E_0^2 - P_c(x, y) + P_s(x, y))^2 - 2(P_c(x, y) - P_s(x, y))^2 - 8E_0^4 + 8E_0^2 P_c(x, y)}}{4E_0};$$

$$Y(x, y) = X(x, y) + \frac{1}{2E_0} (P_c(x, y) - P_s(x, y)).$$

Таким образом, зная на основе измерения P_c и P_s распределение комплексного поля $\hat{F}(x, y)$ на фокальной плоскости, можно по (1), применяя алгоритм быстрого преобразования Фурье, получить распределение комплексного поля на апертуре антенны

$$\hat{E}(\zeta, \eta) = E(\zeta, \eta) e^{j\alpha(\zeta, \eta)}.$$

Величины $\hat{E}(\zeta, \eta)$ и $\alpha(\zeta, \eta)$ дают искомое распределение амплитуды и фазы поля на апертуре антенны, т. е. в конечном итоге качество отражающей поверхности антенны.

В полном объеме описанная процедура может использоваться для получения топографии отдельного элемента радиотелескопа (щита). Главное зеркало образовано линейной последовательностью таких элементов, поэтому для его исследования и юстировки (т. е. взаимной привязки элементов) достаточно получить и восстановить одномерную радиоголограмму.

Исследование главного зеркала

Оценим возможности применения автоколлимационного радиоголографического метода для исследования главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 на примере одной реализованной схемы.

1. Методика измерений. Схема исследования главного зеркала радиоголографическим методом в режиме автоколлимации приведена на рис. 1. Главное зеркало антенны устанавливается по окружности радиуса R с центром в точке O ; в окрестностях фокуса системы O' расположены излучающий и приемный рупоры автоколлимационной системы. Одномерное распределение поля в окрестностях фокуса измеряется путем поперечного перемещения всей системы вдоль оси x . В качестве опорного сигнала используется часть мощности генератора, подаваемая на вход квадратичного детектора через фазовращатель и направленный ответвитель. С помощью фазовращателя производится начальная установка фазы опорного сигнала и ее изменение на 90° для получения косинусной и синусной голограмм.

В результате восстановления получают одномерные распределения амплитуды и фазы вдоль главного зеркала. Распределение фазы вдоль зеркала однозначно соответствует распределению радиальной составляющей ошибок его поверхности. Поскольку в системе усреднение отраженного сигнала по вертикали происходит только в пределах высоты вторичного зеркала, то ошибки в установках отражающих элементов по углу места проявляются в восстановленном амплитудном распределении в виде «провалов».

2. Разрешающая способность. Неоднородности главного зеркала размерами a дают при автоколлимационных измерениях в фокусе составляющую поля с периодом

$$\Delta x = \frac{\lambda R}{2a \cos \psi}, \quad (3)$$

где ψ — угол между осью облучателя и направлением на измеряемый участок главного зеркала.

Величину Δx можно рассматривать как период низшей пространственной гармоники интересующего нас сигнала. Поэтому необходимо, чтобы приемный и передающий рупоры автоколлимационного устройства имели перемещение вдоль оси x не менее чем Δx . Таким образом, соотношение (3) связывает между собой разрешающую способность a , длину волны λ и величину области измерения поля в районе фокуса Δx .

Максимальная величина Δx определяется конструкцией радиотелескопа и составляет $\Delta x_{\max} = 1.5$ м. Величина $\psi \leq \psi_0$, где $2\psi_0$ — угловой размер исследуемой

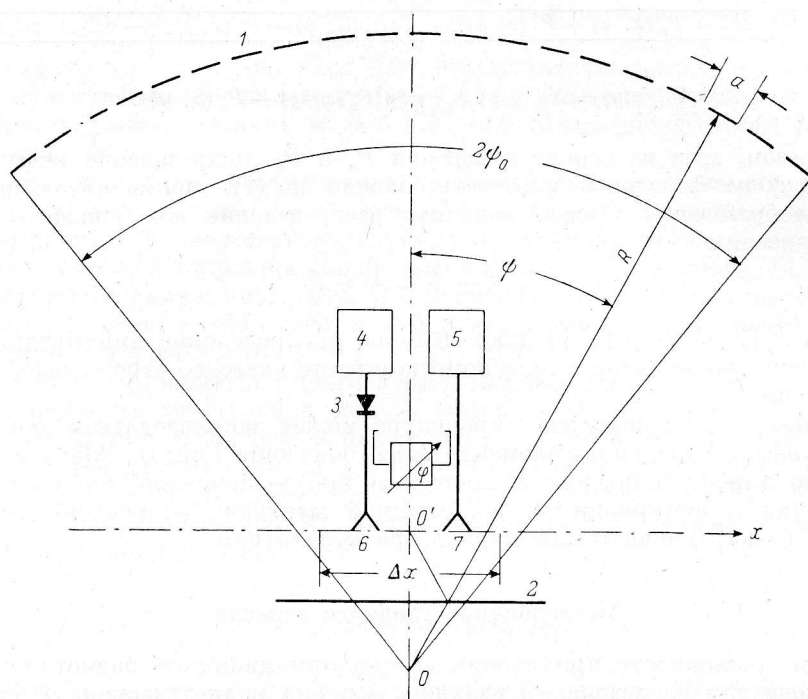


Рис. 1. Схема исследования главного зеркала РАТАН-600 радиоголографическим методом. 1 — главное зеркало; 2 — вторичное зеркало; 3 — квадратичный детектор; 4 — система регистрации; 5 — генератор со стабилизацией частоты; 6, 7 — приемный и передающий рупоры автоколлимационной системы.

дуемой части главного зеркала. Обычно при измерениях используется сектор с $2\psi_0 = 90^\circ$.

Таким образом, для получения разрешающей способности не хуже размера одного элемента главного зеркала ($a = 2$ м), получим следующее требование к длине волны:

$$\lambda \leq \frac{2\Delta x_{\max} a \cos \psi_0}{R}.$$

При $\Delta x_{\max} = 1.5$ м, $a = 2$ м, $\psi_0 = 45^\circ$, $R = 288$ м получим $\lambda \leq 1.47$ см.

3. Интервал отсчета. Высшая пространственная гармоника в автоколлимационном фокальном пятне цилиндрического зеркала с угловой апертурой $2\psi_0$ имеет период $\lambda/4\sin \psi_0$. Таким образом, в соответствии с теоремой отсчетов Котельникова для восстановления амплитудно-фазового распределения поля на этой апертуре необходимо снимать отсчеты автоколлимационного сигнала в фокусе с интервалом

$$\Delta x_{\min} \leq \frac{\lambda}{8 \sin \psi_0}.$$

4. Величина опорного сигнала. Смещение одного i -го элемента по радиусу на ϵ приводит к изменению в максимуме косинусной составляющей выходного сигнала $P_{c, \max}$ на величину ΔP_i :

$$\frac{\Delta P_i}{P_{c, \max}} \approx \frac{4\epsilon}{\lambda} \cdot \frac{E_i}{E_\Sigma} \cdot \frac{2}{1 + \frac{E_0}{E_\Sigma}}, \quad (4)$$

где E_{Σ} — поле в максимуме фокального пятна от всей антенны; E_0 — поле опорного сигнала; E_i — вклад i -го элемента поверхности в общий сигнал от всей антенны.

Ясно, что для получения наибольшей величины $\Delta P/P_{c. \max}$ необходимо иметь как можно меньшее значение для опорного сигнала; с другой стороны, для того, чтобы исключить неоднозначность записи радиоголограммы, опорный сигнал не должен быть меньше наибольшего отрицательного бокового лепестка (E_6) фокального пятна.

Таким образом, оптимальной величиной опорного сигнала является $E_{0 \text{opt}} \geq E_6$. При равномерном облучении главного зеркала $E_{0 \text{opt}} \geq 0.2E_{\Sigma}$, а при косинусоидальном с уровнем облучения края 10 дБ

$$E_{0 \text{opt}} \geq 0.01E_{\Sigma}.$$

5. Динамический диапазон. Воспользуемся формулой (4) для определения требуемой величины динамического диапазона, т. е. рассмотрим, какой минимальный сигнал (по отношению к сигналу в максимуме фокального пятна) необходимо регистрировать.

Величина E_i/E_{Σ} зависит от характера облучения главного зеркала:

$$\frac{E_i}{E_{\Sigma}} = \frac{1}{N} g(\psi_i) \gamma,$$

где N — количество элементов поверхности; $g(\psi_i) = E(\psi_i)/E(0)$ — нормированное распределение поля по элементам главного зеркала; ψ_i — угловая координата i -го элемента из центра антенны; $\gamma = 2\psi_0 \int_{-\psi_0}^{\psi_0} g(\psi) d\psi$ — коэффициент порядка единицы.

Обозначим

$$\frac{2}{1 + \frac{E_0}{E_{\Sigma}}} = f\left(\frac{E_0}{E_{\Sigma}}\right).$$

Таким образом, получаем

$$\frac{\Delta P}{P_{c. \max}} \approx \frac{g(\psi_i)}{N} \gamma f\left(\frac{E_0}{E_{\Sigma}}\right).$$

Если задаться величиной определяемой ошибки установки элемента ε , то это приведет к требуемой величине динамического диапазона

$$D \geq \frac{N\lambda}{4\varepsilon g(\psi_i) \gamma f\left(\frac{E_0}{E_{\Sigma}}\right)}.$$

Обычно при антенных измерениях исследуется сектор, состоящий из $N = 225$ элементов. Полагая $\lambda = 1.3$ см и $\varepsilon = 0.01\lambda$, получим, что при равномерном амплитудном распределении [$\gamma = 1$; $f(E_0/E_{\Sigma}) = 1.67$] необходимо иметь $D \geq 3 \cdot 10^3$. При косинусоидальном распределении с уровнем облучения края -10 дБ ($\gamma = 2.2$; $f(E_0/E_{\Sigma}) = 2$): $D \geq 1.4 \cdot 10^4$.

Реализуемая величина D может зависеть от многих причин, например от атмосферных флуктуаций, пространственной точности положения датчика, регистрирующего интенсивность интерферограммы, величины уровня дискретизации выходного сигнала, наконец, от величины шумов приемной аппаратуры.

6. Монохроматичность сигнала. Требуемая стабильность частоты определяется необходимостью сохранения разности фаз исследуемого и опорного сигналов за время, равное разности времен прохождения этих сигналов по своим каналам:

$$\frac{\Delta f}{f} < \frac{\lambda}{l_{\text{иссл}} - l_{\text{оп}}} \cdot \frac{2\varepsilon}{\lambda} = \frac{2\varepsilon}{l_{\text{иссл}} - l_{\text{оп}}},$$

где $\Delta f/f$ — требуемая относительная стабильность частоты; ε — измеряемые отклонения отражающей поверхности; $l_{\text{иссл}}$ — электрическая длина канала исследуемого сигнала; $l_{\text{оп}}$ — электрическая длина канала опорного сигнала.

При $l_{\text{иссх}} - l_{\text{оп}} = 2R = 576$ м, $\varepsilon = 0.1$ мм, получим $\Delta f/f < 3.5 \cdot 10^{-7}$. Такая стабильность легко может быть обеспечена при применении кварцевых стандартов частоты.

Допустимая ширина полосы сигнала обусловлена требованием отсутствия замыывания дифракционной картины из-за разной длины путей в каналах исследуемого сигнала при отражении от разных точек зеркала антенны. В автоколлимационном режиме эта разность не превышает

$$\Delta \rho_{\text{max}} = \Delta x_{\text{max}} \cos \psi_0 = \frac{\lambda R}{2a}.$$

Таким образом, относительная ширина полосы сигнала должна быть равна

$$\frac{\Delta f}{f} < \frac{\lambda}{\Delta \rho_{\text{max}}} = \frac{2a}{R}.$$

При $a = 2$ м и $R = 288$ м получим $\Delta f/f < 3.25 \cdot 10^{-3}$, что легко реализуется на практике.

7. Влияние атмосфер. Влияние пространственных флуктуаций показателя преломления атмосферы удобно оценить с помощью структурной функции электрической длины трасс от центра антенны до точек зеркала, разнесенных на угол ψ [12]:

$$D(\psi) = 2.91 \cdot \frac{3}{8} C_n^2 R^{5/3} \left(2 \sin \frac{\psi}{2} \right)^{5/3}.$$

Измерения показали, что величина структурного коэффициента показателя преломления атмосферы C_n в приземном слое обычно лежит в пределах $(0.01 \div 0.1) \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1/3}$ [12, 13]. Используя эти данные и полагая $R = 288$ м, получим следующую оценку среднеквадратичной ошибки, вносимой атмосферной неоднородностью в измерение фазового распределения на апертуре, а следовательно, и топографии отражающей поверхности главного зеркала относительно его середины:

$$\sigma(\psi) = \sqrt{\frac{D(\psi)}{2}} = (0.0116 \div 0.116) \sin^{5/6} \frac{\psi}{2} \text{ (см)}.$$

Для наиболее удаленных от середины зеркала точек ($\psi = \psi_0 = 45^\circ$) атмосферная ошибка в зависимости от метеоусловий может достигать величины $\sigma(45^\circ) = (0.005 \div 0.05)$ мм. Следует отметить, что основной вклад в эту ошибку вносят крупномасштабные составляющие, близкие к фазовой ошибке, пропорциональной $\sin \psi$, возникающей при развороте зеркала [14]. Их влияние при исследовании деформаций многоэлементного зеркала в ряде случаев несущественно.

Другой вид ошибок, обусловленных атмосферой, связан с временной нестабильностью показателя преломления воздуха. Он особенно опасен в схеме, использующей внутренний опорный сигнал. Так как в этом случае исследуемый сигнал проходит в приземном слое атмосферы, а опорный — нет, то изменение показателя преломления атмосферы во время измерения амплитудно-фазового распределения в фокальной плоскости приводит к ошибке измерения фазы радиоголограммы. Среднеквадратичная величина изменения фазы радиоголограммы вследствие флуктуаций показателя преломления атмосферы равна

$$\sigma(\tau) = \frac{4\pi R}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\frac{D(\tau)}{2}} = \frac{4\pi R}{\sqrt{2}\lambda} C_{n\tau} \tau^{1/3},$$

где $D(\tau) = C_{n\tau}^2 \tau^{2/3}$ — временная структурная функция показателя преломления атмосферы.

Полагая, что в зависимости от метеоусловий, времени года и суток структурный коэффициент $C_{n\tau}$ может изменяться в пределах $(0.01 \div 1) \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1/3}$, получим оценки величины $\Delta l = \sigma\lambda/(2\pi)$, характеризующей ошибку измерения положения фазового фронта на апертуре при $R = 288$ м (табл. 1).

Длительность записи распределения поля в области фокального пятна определяется скоростью перемещения автоколлимационной системы и составляет около 1 мин. Произведенные оценки показывают, что при такой длительности

ТАБЛИЦА 1
Зависимость Δl от τ

$C_n, 10^{-6}$ $\text{см}^{-1/3}$	$\Delta l, \text{мм}$				
	1 с	10 с	1 мин	10 мин	1 ч
1	1.2	2.5	4.6	9.9	18.0
0.01	0.01	0.03	0.05	0.10	0.18

измерений определение формы главного зеркала с точностью, лучшей 0.1 мм, возможно лишь при благоприятных метеорологических условиях. Наблюдения подтверждают эти оценки: измерения, выполненные при спокойном состоянии атмосферы (ночью) дают устойчивые записи распределения поля в фокусе.

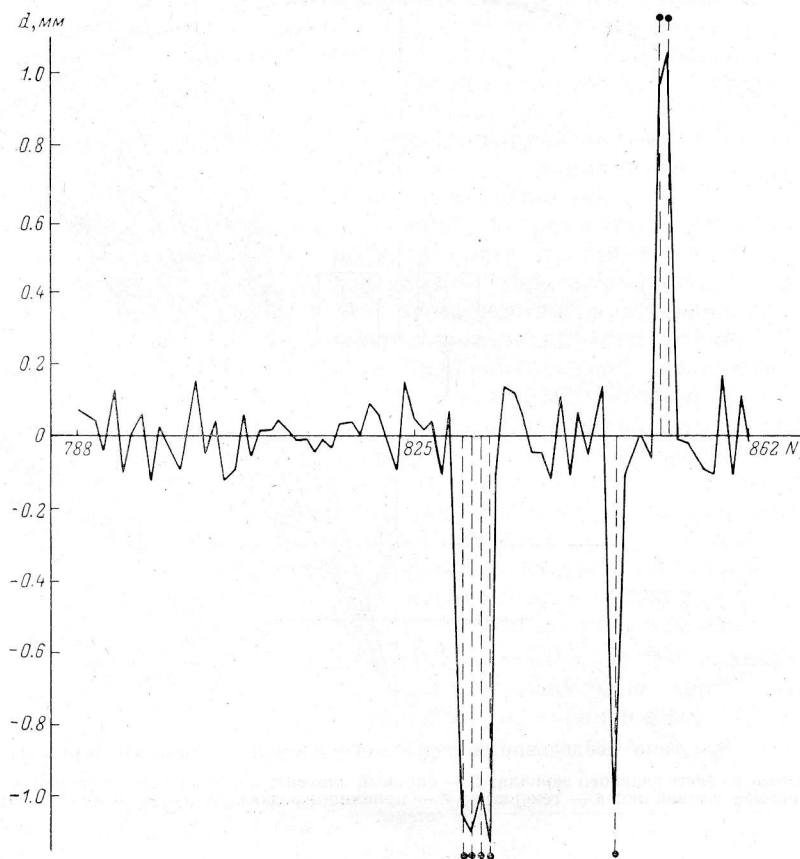


Рис. 2. Диагностика ошибок главного зеркала на основе восстановленного распределения фаз.
N — номер элемента главного зеркала. Штриховой линией показаны внесенные ошибки.

При дневных наблюдениях, особенно при наличии быстрых изменений температуры воздуха (восход и заход солнца), наблюдаются очень сильные атмосферные помехи.

8. Измерения. Описанная методика радиоголографических измерений была опробована на радиотелескопе РАТАН-600. Был создан комплекс радиоголографической аппаратуры на длину волны $\lambda=1.31$ см с фазовой стабилизацией частоты генератора. Пределы перемещения рупоров вдоль оси x составляли 1.5 м. На рис. 2 показана разность двух восстановленных распределений фаз от части восточного сектора РАТАН-600 (75 элементов). Одна из голограмм была снята от антенны, в которую предварительно внесли ошибки (7 элемен-

тов сдвинуты по радиусу на известную величину), другая — от антенны без внесенных ошибок. Как видно из этого рисунка, смещение отдельных элементов легко обнаруживается.

Исследование отдельных элементов главного зеркала

Важной задачей совершенствования радиотелескопа РАТАН-600 является повышение точности отражающей поверхности элементов, образующих главное зеркало. Каждый элемент представляет собой почти плоское зеркало высотой 7.4 м и шириной 2 м. Отражающая поверхность выполнена из алюминиевого листа, который крепится к силовой раме с помощью регулировочных винтов.

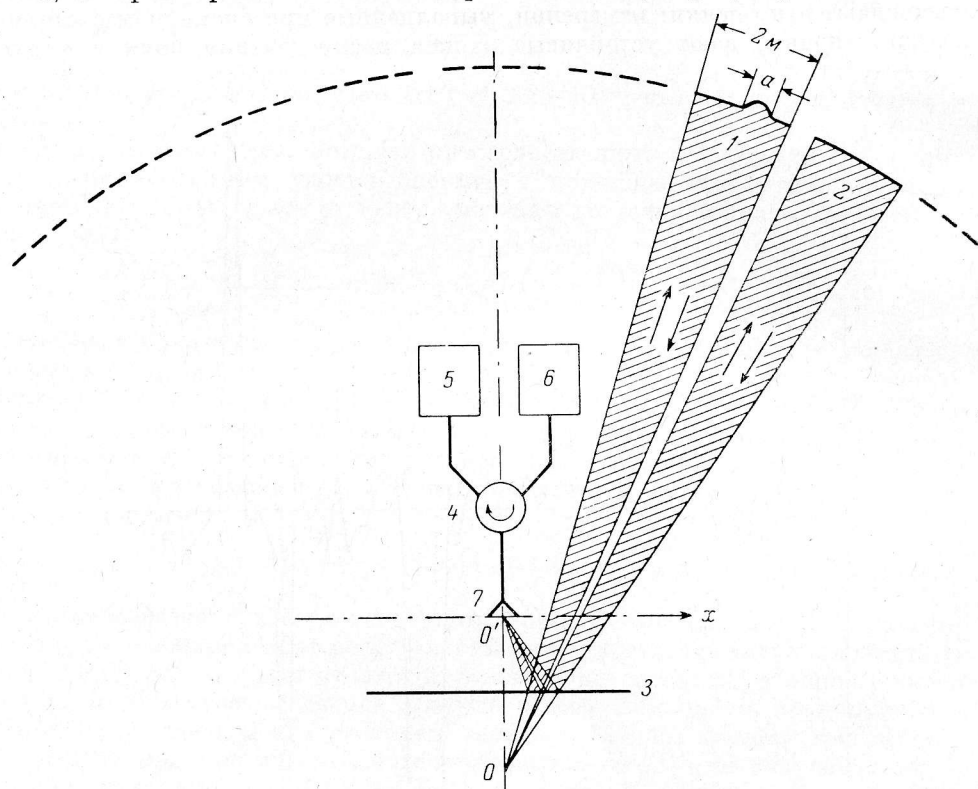


Рис. 3. Схема исследования отдельного элемента главного зеркала.

1 — исследуемый элемент главного зеркала; 2 — опорный элемент; 3 — вторичное зеркало; 4 — циркулятор; 5 — приемное устройство; 6 — генератор; 7 — приемно-передающий рупор автоколлимационной системы.

наименьшее расстояние между которыми составляет 250 мм. Элементы могут перемещаться по азимуту на $\pm 6^\circ$ и по углу места от -1.25 до $+53^\circ$. Обычные геодезические методы определения топографии элементов требуют удаления их из отражающей поверхности для обмера на специальном стапеле. Этот процесс довольно трудоемкий и занимает много времени, кроме того, после установки элемента на место требуется снова производить его привязку.

Радиологграфический метод позволяет исследовать топографию элементов без удаления их из зеркала и занимает гораздо меньше времени. Рассмотрим возможную схему определения топографии отдельных элементов радиологграфическим методом в автоколлимационном режиме (рис. 3). В центре антенны располагается приемопередающий рупор автоколлимационной системы. При измерениях принимается отраженный сигнал от исследуемого и опорного элементов. Остальные элементы главного зеркала отвернуты по углу места и вклада в отраженный сигнал не дают. В качестве опорного элемента может использоваться любой из элементов зеркала. Исследуемый элемент вращается

по азимуту при дискретных положениях по углу места, опорный элемент неподвижен. В результате интерференции волн, отраженных от вращающегося и неподвижного опорного элементов, на выходном приборе автоколлимационной системы регистрируется двумерная радиоголограмма. Для получения косинусной и синусной голограмм измерения проводятся при двух положениях опорного элемента по радиусу, отличающихся на величину $\lambda/4$.

При обработке голограмм следует учитывать изменение положения фазового центра элемента при его вращении из-за несовпадения осей вращения с поверхностью элемента. В результате обработки можно получить контурные карты, которые позволяют локализовать и измерять ошибки поверхности, подобно тому как это было сделано в [8]. При достаточно близком расположении исследуемого и опорного элементов влияние нестабильности атмосферы пренебрежимо мало из-за близости путей распространения сигналов для исследуемого и опорного элементов. По этой же причине требования к стабильности частоты генератора также невысокие.

Оценим угловые перемещения элемента по углу места и азимуту, необходимые для достижения заданной линейной разрешающей способности в восстановленном изображении. Неоднородности размерами a дают в автоколлимационной диаграмме низшую пространственную гармонику с периодом $\Delta\varphi = \lambda/a$. Следовательно, для восстановления топографии поверхности элемента с разрешающей способностью a необходимо записать радиоголограмму при развороте элемента в пределах $\pm\Delta\varphi/2$ относительно электрической оси автоколлимационной системы. При допустимых в существующей конструкции разворота по углу места $\Delta\varphi_y = 2.5^\circ$ и по азимуту $\Delta\varphi_x = 12^\circ$ получим величины разрешающей способности по вертикали a_y и по горизонтали a_x в зависимости от длины волны, представленные в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

a , мм	λ , мм			
	4	8	16	32
a_x	19	38	76	153
a_y	92	183	367	733

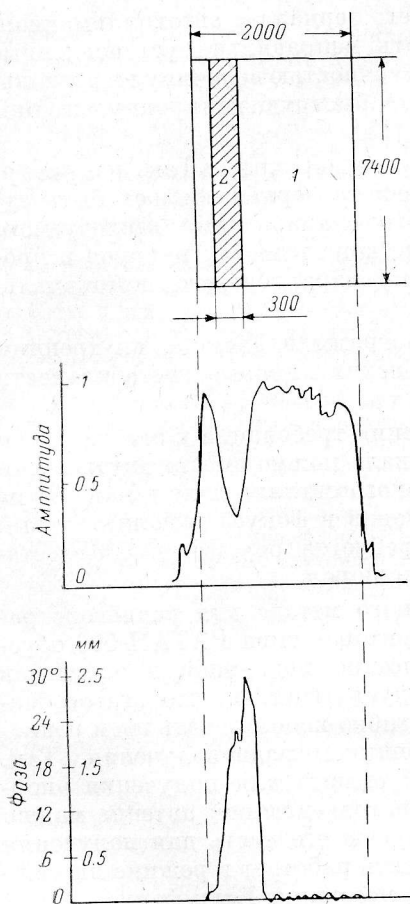


Рис. 4. Восстановленные распределения амплитуды и фазы по одному элементу главного зеркала (усреднение по вертикали).

1 — отражающий элемент; 2 — внесенная неоднородность.

Для получения разрешающей способности, соответствующей минимальному расстоянию между регулировочными винтами ($a=250$ мм), необходимо производить измерения на волне $\lambda \leq 11$ мм.

Описанная выше методика измерений была опробована при определении топографии одного из элементов главного зеркала РТАН-600. Измерения проводились с помощью штатной автоколлимационной аппаратуры на волне 3.2 см. На поверхность исследуемого элемента была предварительно внесена неоднородность путем наложения вертикальной алюминиевой полосы шириной 300 и толщиной 2.5 мм. На рис. 4 приведены восстановленные распределения амплитуды и фазы сигнала по результатам обработки главного сечения

его диаграммы направленности в горизонтальной плоскости. Ясно видно смещение эффективной отражающей поверхности в области полосы и уменьшение величины отраженного сигнала из-за рассеяния на ее неоднородностях.

Заключение

Проведенные оценки и пробные эксперименты показали, что методами радиоголографии можно осуществить быстрый контроль качества отражающей поверхности радиотелескопа РАТАН-600.

Топография отдельного отражающего элемента может быть восстановлена из двумерной радиоголограммы, полученной обычным способом углового сканирования исследуемого элемента. Автоколлимационная методика в этом случае позволяет легко получить когерентный опорный сигнал с высокой фазовой стабильностью.

Одномерные голограммы, полученные от всего зеркала в автоколлимационном режиме, позволяют не только обнаружить неправильно установленные отдельные элементы, но и измерить с достаточной точностью величину их радиального смещения, а следовательно, и осуществить быструю юстировку антенны по наиболее важной радиальной координате [15].

Кроме опробованных схем возможны и другие варианты. Так, например, процесс регистрации радиоголограммы от главного зеркала может быть существенно ускорен, если вместо механического сканирования исследуемого поля установить на фокальной линии радиотелескопа решетку рупоров и производить их быстрый последовательный опрос или параллельную многоканальную регистрацию сигнала.

Ускорение процесса регистрации радиоголограмм в схеме с внутренним опорным сигналом особенно важно для уменьшения влияния нестабильности атмосферы.

Для устранения влияния атмосферы и снижения требований к стабильности частоты при получении голограмм главного зеркала можно вместо внутреннего опорного сигнала использовать в качестве опорного сигнала поле в максимуме автоколлимационного фокального пятна, установив в фокусе дополнительный неподвижный рупор. При этом, однако, потребуются осуществить фазостабильную связь подвижного и неподвижного рупоров.

Возможность применения автоколлимационного метода для радиоголографического исследования многоэлементных рефлекторов типа РАТАН-600 обусловлена легкостью их перефокусировки вследствие подвижности элементов отражающей поверхности. В связи с этим следует отметить, что эта особенность многоэлементных зеркал позволяет более гибко использовать идеи радиоголографического метода и с внеземным источником радиоизлучения. Так, вместо специальной антенны с фазостабильной связью для получения опорного сигнала, как это было сделано в [8], в многоэлементной антенне можно использовать одну часть зеркала, применяя другую его часть для получения опорного сигнала. В этом случае исследуемая часть работает в режиме пассажного инструмента, а другая часть сопровождает источник. Если фокусы обеих частей главного зеркала совмещены, то прием можно производить общим радиометром, который сразу будет регистрировать радиоголограмму, образующуюся в результате интерференции исследуемого и опорного сигналов. На радиотелескопе РАТАН-600 такие измерения станут возможными после завершения проводящейся сейчас автоматизации управления элементами главного зеркала [16].

Авторы благодарны Т. М. Егоровой и Н. Ф. Рыжкову за предоставленную возможность использовать при экспериментах аппаратуру спектрально-измерительного комплекса РАТАН-600, М. Н. Кайдановскому за помощь при создании радиоголографического устройства и Б. С. Минченко за реализацию программы быстрого Фурье-преобразования.

Литература

1. Зверев Ю. К., Копылов А. И., Шиврис О. Н. Реконструкция большого пулковского радиотелескопа. — Изв. ГАО АН СССР, 1970, № 185, с. 219—235.
2. Белевитин А. Г., Зверев Ю. К. Геодезические работы при строительстве и юстировке радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО АН СССР, 1972, № 188, с. 114—122.
3. Стоцкий А. А., Шиврис О. Н. Юстировка и установка антенны переменного профиля с помощью фазового компаратора. — Изв. ГАО АН СССР, 1970, № 185, с. 236—241.
4. Ходжамухаммедов Н., Стоцкий А. А., Боровик В. И. Автоколлимационный метод юстировки и контроля антенны переменного профиля. — Радиотехника и электроника, 1970, т. 2, с. 257—262.
5. Гельфрейх Г. Б. Радиоастрономический способ юстировки антенны переменного профиля. — Изв. ГАО АН СССР, 1972, № 188, с. 139—148.
6. Стоцкий А. А., Пинчук Г. А., Калихевич Г. Н., Гогина И. В., Магамадова Т. А., Дибжигов А. Д. Некоторые оценки качества фокусирующей системы РАТАН-600 по автоколлимационным измерениям. — В кн.: XI Всесоюзная радиоастрономическая конференция. Тезисы. Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1978, с. 160—162.
7. Бахрах Л. Д., Курочкин А. П. Голография в микроволновой технике. М., «Сов. радио», 1979.
8. Scott P. F., Ryle M. A rapid method for measuring the figure of a radio telescope reflector. — Mon. Not. Royal Astr. Soc., 1978, vol. 178, N 3, p. 539—545.
9. Vennet J. C., Anderson A. P., McInnes Peter A., Whitaker A. J. T. Microwave holographic metrology of large reflector antennas. — IEEE Trans. Antennas Propagat., 1976, vol. AP-24, N 3, p. 295—303.
10. Napier P. Y., Bates R. H. T. Antenna-aperture distribution from holographic type of radiation-pattern measurements. — Proc. IEE, 1973, vol. 120, N 4, p. 30—34.
11. Турчин В. И., Цейтлин Н. М. К вопросу об измерении диаграммы направленности в зоне Френеля. — ДАН СССР, 1972, т. 205, № 4, с. 280—283.
12. Стоцкий А. А. Измерение флуктуаций разности фаз сантиметровых радиоволн, распространяющихся в приземном слое атмосферы. — Радиотехника и электроника, 1969, т. 14, № 9, с. 1547—1551.
13. Гошджанов М., Полтев А. К., Стоцкий А. А., Умарбаева Н. Д. Суточные и сезонные вариации интенсивности флуктуаций разности фаз радиоволн, распространяющихся в приземном слое атмосферы. — Изв. АН ТуркмССР, 1969, № 3, с. 21—24.
14. Стоцкий А. А. Аберрации главного зеркала антенны переменного профиля и сканирование диаграммы направленности путем смещения облучателя. — Изв. ГАО АН СССР, 1972, № 188, с. 63—76.
15. Брауде Б. В., Есепкина Н. А., Кайдановский Н. Л., Хайкин С. Э. Исследование влияния случайных ошибок на электрические характеристики остронаправленных зеркальных антенн с отражателем переменного профиля. — Радиотехника и электроника, 1960, т. 5, вып. 4, с. 584—596.
16. Голубчин Г. С. Система автоматизированного управления элементами кругового и плоского отражателей антенны переменного профиля. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1975, № 7, с. 226—236.

Поступила в редакцию 20.05.8