

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОГОЛОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

Г. А. Пинчук, А. А. Стоцкий

Рассматривается особенность восстановления амплитудно-фазового распределения на апертуре широкоугольной фокусирующей системы методом радиоголографии. Показано, что при применении для восстановления изображения Фурье-преобразования в широкоугольной антенной системе возникают ошибки в восстановлении амплитуды. Приведены результаты математического моделирования радиоголографического процесса для радиотелескопа РАТАН-600 в автоколлимационном режиме.

The peculiarity of reconstruction of the amplitude and phase distribution on the aperture of wide-angle focusing system by the radioholography method is considered. It is shown that when the Fourier-transform is used, the errors in reconstruction of the amplitude appear. The results of mathematical modelling of the radioholography process for RATAN-600 radio telescope in autocollimation mode are given.

В [1] рассмотрена возможность применения радиоголографических методов для исследования отражающей поверхности радиотелескопа РАТАН-600. Одномерное амплитудно-фазовое распределение поля вдоль элементов главного зеркала (что при известном законе его облучения дает в итоге профиль поверхности и ее отражающую способность) получается в результате обработки радиоголограммы, снятой вдоль прямой линии в области фокуса антенны.

В данной схеме измерений радиоголограмма является результатом интерференции волны, отраженной от главного зеркала в автоколлимационном режиме [2] с внутренним опорным сигналом.

Как известно, распределения полей в фокальной плоскости антенны и на ее апертуре в первом приближении связаны между собой преобразованием Фурье. Это справедливо только в непосредственной близости от оси антенны. Поэтому применение преобразования Фурье для восстановления распределения поля на апертуре широкоугольной антенной системы, которую представляет собой антенна переменного профиля, по распределению поля в фокальной плоскости не совсем корректно. Однако если при этом не возникают значительные отклонения в определении амплитудно-фазового распределения вдоль элементов главного зеркала, то замена более сложных интегральных преобразований преобразованием Фурье может быть оправдана существованием в настоящее время хорошо разработанных алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

Рассмотрим подробно процесс восстановления изображения и ограничения, связанные с применением преобразования Фурье для восстановления отражающей способности и профиля поверхности главного зеркала АПП. На рис. 1 приведена схема получения радиоголограммы в автоколлимационном режиме. Главное зеркало в данном случае представляет собой часть кругового цилиндра.

Здесь: $\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1$ — угловые размеры главного зеркала из центра антенной системы; $\Delta x = x_2 - x_1$ — пределы движения приемного рупора автоколлимационной системы при снятии амплитудно-фазового распределения поля $F(x)$ вдоль оси x . (Для простоты изложения рассмотрим случай $x_2 = -x_1 = \Delta x/2$); R — радиус антенной системы; $E(\psi)$ — заданное амплитудно-фазовое распределение поля вдоль элементов главного зеркала.

Распределение поля вдоль оси x будет

$$F(x) = \int_{\psi_1}^{\psi_2} E(\psi) e^{jk \cdot 2l(x, \psi)} d\psi, \quad (1)$$

где $k=2\pi/\lambda$; λ — длина волны; $l(x, \psi)$ — расстояние от точки главного зеркала с координатой ψ до точки фокальной линии с координатой x . Коэффициент 2 в выражении (1) связан с тем, что передающий и приемный рупоры автоколлимационной системы совмещены в одной и той же точке x .

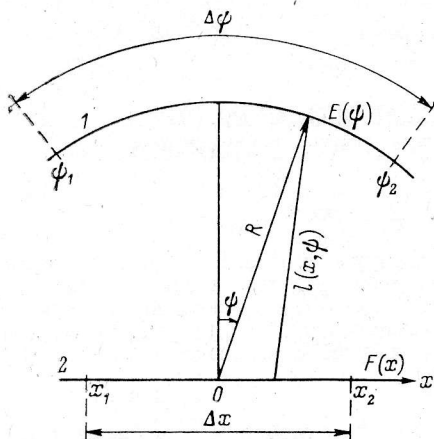


Рис. 1. Схема автоколлимационных измерений на радиотелескопе РАТАН-600.

1 — главное зеркало; 2 — линия перемещения облучателя.

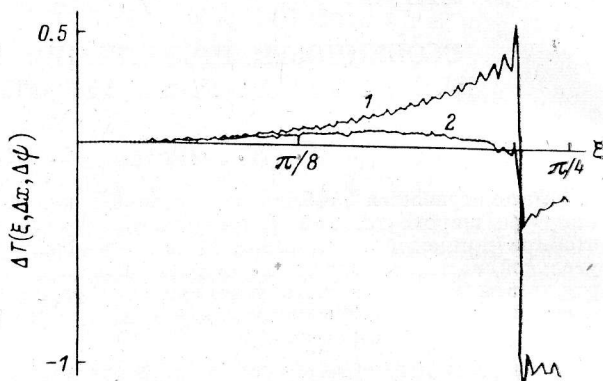


Рис. 2. Вносимая ошибка по амплитуде в восстановленное изображение.

1 — $E(\psi)=1$; 2 — $E(\psi)=\cos(1.74\psi)$.

Определим вид функции $l(x, \psi)$ при условии $x \ll R^*$:

$$l(x, \psi) = \sqrt{R^2 + x^2 - 2Rx \cos(90^\circ - \psi)} \approx R - x \left(\psi - \frac{\psi^3}{6} \right) + \frac{1}{2} \frac{x^2}{R} (1 - \psi^2) + \dots \quad (2)$$

Исключая постоянный фазовый член и учитывая только линейный и квадратичный члены разложения (2), получаем:

$$F(x) = \int_{\psi_1}^{\psi_2} E(\psi) e^{-j2kx \left(\psi - \frac{\psi^3}{6} \right) + jk \frac{x^2}{R} (1 - \psi^2)} d\psi.$$

Сделаем замену $x' = 2\pi \cdot 2x/\lambda$:

$$F(x') = \int_{\psi_1}^{\psi_2} E(\psi) e^{-jx' \left(\psi - \frac{\psi^3}{6} \right) + j \frac{\lambda}{8\pi R} (1 - \psi^2)} d\psi.$$

Воспользуемся Фурье-преобразованием для восстановления распределения поля вдоль главного зеркала из полученного распределения поля на оси x .

$$\begin{aligned} T(\xi, \Delta x, \Delta \psi) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\Delta x'}{2}}^{\frac{\Delta x'}{2}} \left(\int_{\psi_1}^{\psi_2} E(\psi) e^{-jx' \left(\psi - \frac{\psi^3}{6} \right) + j \frac{\lambda x'^2}{8\pi R} (1 - \psi^2)} d\psi \right) e^{jx'\xi} dx' = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\Delta x'}{2}}^{\frac{\Delta x'}{2}} \int_{\psi_1}^{\psi_2} E(\psi) e^{-jx' \left(\psi - \frac{\psi^3}{6} - \xi \right) + j \frac{\lambda x'^2}{8\pi R}} d\psi dx', \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta x' = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x$.

* Для радиотелескопа РАТАН-600 $\Delta x/2R \leq 2.5 \cdot 10^{-3}$.

В выражении (3) поменяем порядок интегрирования и рассмотрим внутренний интеграл

$$S = \int_{-\frac{\Delta x'}{2}}^{\frac{\Delta x'}{2}} e^{-jx' \left(\psi - \frac{\psi^3}{6} - \xi \right)} e^{j \frac{\lambda}{8\pi R} x'^2 (1 - \psi^2)} dx'. \quad (4)$$

Второй множитель в подынтегральном выражении по сравнению с первым представляет собой медленно меняющуюся функцию. Для приближенного вычисления интеграла (4) представим его в виде суммы интегралов:

$$S = \int_{-\frac{\Delta x'}{2}}^{\frac{\Delta x'}{2} + \Delta} \dots dx' + \int_{-\frac{\Delta x'}{2} + \Delta}^{\frac{\Delta x'}{2} + 2\Delta} \dots dx' + \dots + \int_{\frac{\Delta x'}{2} - \Delta}^{\frac{\Delta x'}{2}} \dots dx', \quad (5)$$

где $\Delta \ll \Delta x'/2$.

В каждом из этих интегралов медленно меняющийся множитель заменим его средним значением в интервале интегрирования.

В результате приближенным решением выражения (5) будет

$$S \approx 2 \frac{\sin \frac{\Delta x'}{2} \left(\psi - \frac{\psi^3}{6} - \frac{\lambda}{8\pi R} \frac{\Delta x'}{2} (1 - \psi^2) - \xi \right)}{\psi - \frac{\psi^3}{6} - \xi} \approx 2 \frac{\sin \frac{\Delta x'}{2} \left(\psi - \frac{\psi^3}{6} - \xi \right)}{\psi - \frac{\psi^3}{6} - \xi}.$$

Здесь учтено, что $\Delta x'/2R \ll 1$, и не рассматривается область в окрестности $\psi=0$.

Таким образом, в случае широкоугольной апертуры распределение поля вдоль главного зеркала, восстановленное путем преобразования Фурье, в первом приближении будет иметь вид

$$T(\xi, \Delta x, \Delta \psi) = \frac{1}{\pi} \int_{\psi_1}^{\psi_2} E(\psi) \frac{\sin \frac{\Delta x'}{2} \left(\psi - \frac{\psi^3}{6} - \xi \right)}{\psi - \frac{\psi^3}{6} - \xi} d\psi.$$

В случае длиннофокусной системы ($\Delta \psi \ll 1$), когда кубическим членом и более высокими степенями в разложении (2) можно пренебречь, восстановленное поле можно записать в виде

$$T_1(\xi, \Delta x, \Delta \psi) = \frac{1}{\pi} \int_{\psi_1}^{\psi_2} E(\psi) \frac{\sin \frac{\Delta x'}{2} (\psi - \xi)}{\psi - \xi} d\psi.$$

Для того чтобы исключить из рассмотрения ошибки, связанные с конечностью области измерения распределения поля вблизи фокуса вдоль оси x , определим функцию ошибок как

$$\Delta T(\xi, \Delta x, \Delta \psi) = T(\xi, \Delta x, \Delta \psi) - T_1(\xi, \Delta x, \Delta \psi). \quad (6)$$

Данное выражение определяет ошибки в восстановлении исходного изображения методом Фурье-преобразования как разницу между восстановленным изображением $T(\xi, \Delta x, \Delta \psi)$ и восстановлением $T_1(\xi, \Delta x, \Delta \psi)$, которое было бы справедливо при условии существования в данной схеме (рис. 1) прямого и обратного преобразований Фурье между функциями $E(\psi)$ и $F(x)$.

Из рассмотрения выражения (6) видно, что для случая сфазированной антенной системы ошибки будут вноситься только в амплитуду изображения.

На рис. 2 представлен результат численного счета на ЭВМ выражения (6) при следующих параметрах антенной системы: $\Delta x = 1.42$ м, $\psi_2 = -\psi_1 = \pi/4$, $E(\psi) = 1$ — кривая 1 и $E(\psi) = \cos(1.74\psi)$ — кривая 2.

Видно, например, что при равномерном амплитудном распределении вносимая ошибка $\Delta T(\xi, \Delta x, \Delta \psi)$ может достигать 50 % исходной амплитуды.

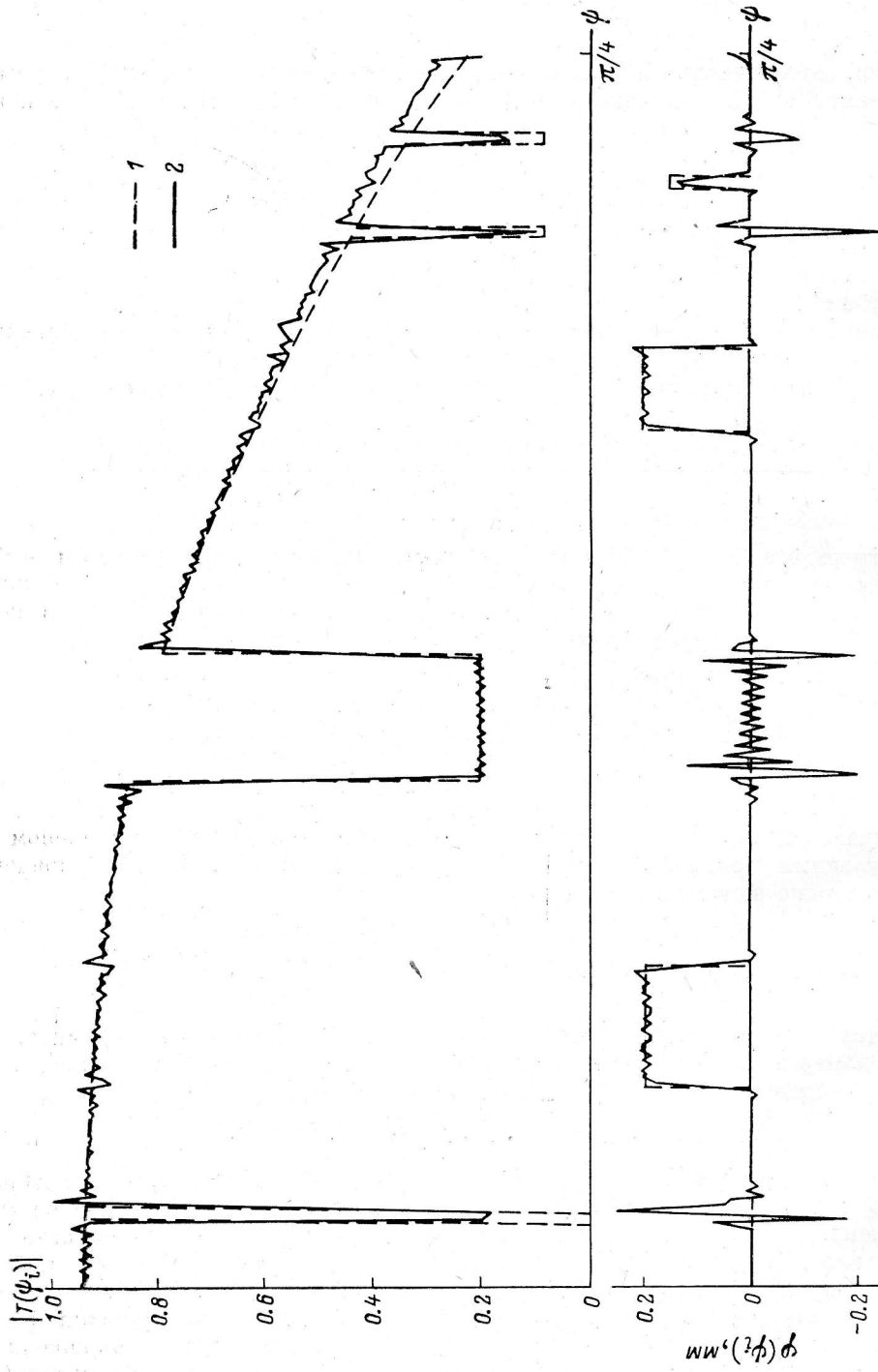


Рис. 3. Пример диагностики ошибок главного зеркала РАТАН-600 на основе результатов математического моделирования.
 1 — заданное распределение амплитуды и фазы; 2 — восстановленное распределение амплитуды и фазы.

Второй эффект — «сокращение» восстановленной апертуры, вызванное разницей между величинами ψ и $\psi - \psi^2/6$, причем следует отметить, что изменение масштаба будет зависеть от значения величины ψ .

Таким образом, из приведенных выше вычислений следует, что применение преобразования Фурье для восстановления отражающей способности и профиля поверхности главного зеркала антенны переменного профиля по радиоголограммам, снятым в автоколлимационном режиме, приводит к появлению в восстановленном изображении дополнительных ошибок по амплитуде, которые могут достигать значительной величины, если исследуется часть главного зеркала с большой угловой апертурой. Вносимая же при этом ошибка по фазе в первом приближении будет пренебрежимо мала.

При восстановлении исходного изображения вносимую ошибку по амплитуде можно учесть путем вычисления выражения (6) для предварительно заданного закона облучения главного зеркала первичным рупором.

При реальной обработке голограмм следует также учитывать в восстановленной функции $T(\psi)$ изменение масштаба по координате ψ .

С целью исследования особенностей процесса восстановления исходного изображения для антенн переменного профиля было проведено его математическое моделирование. Главное зеркало антенны представляется в виде решетки дискретных излучателей с шагом $\delta\psi$. Амплитудно-фазовое распределение поля $E(\psi_i)$ по элементам главного зеркала считается заданным. Распределение поля вдоль фокальной линии рассчитывается сложением всех амплитуд исходного распределения поля $E(\psi_i)$ с учетом реальных фаз $(2\pi/\lambda)2l(\psi_i)$.

Восстановленное изображение $T(\psi_i)$ есть результат Фурье-преобразования над вычисленным распределением поля $F(x)$ вдоль фокальной линии.

Задавая различные $\Delta\psi$, Δx , λ , а также различные исходные амплитудно-фазовые распределения $E(\psi_i)$, можно на модели изучить качество восстанавливаемого изображения, т. е. отличие изображения $T(\psi_i)$ от исходного $E(\psi_i)$.

Такое моделирование было осуществлено на ЭВМ М4030 для реальной модели антенны переменного профиля — радиотелескопа РАТАН-600 при следующих параметрах антенной системы: $R=288000.0$ мм, $\Delta\psi=\pi/2$, $\Delta x=1400$ мм, $\delta\psi=0^\circ 4$ на волне $\lambda=8$ мм.

На рис. 3 приведен фрагмент восстановленного изображения амплитуды $T(\psi_i)$ и фазы $\varphi(\psi_i)$ для одного из секторов РАТАН-600 (сплошные линии). На этом же рисунке штриховой линией показано заданное распределение амплитуды и фазы по элементам главного зеркала.

Анализ результатов моделирования для широкоугольных антенных систем показывает, что радиоголографический метод восстановления амплитудно-фазового распределения вдоль элементов главного зеркала по автоколлимационным радиоголограммам может с успехом использоваться для обнаружения ошибок взаимной привязки элементов по радиальной координате (фазовое распределение) и диагностики наличия ошибок по угловым координатам (амплитудное распределение).

Литература

1. Пинчук Г. А., Стоцкий А. А. Применение радиоголографии для исследования радиотелескопа РАТАН-600. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1982, 16, с. 135—145.
2. Ходжамухаммедов Н., Стоцкий А. А., Боровик В. Н. Автоколлимационный метод юстировки и контроля антенны переменного профиля. — Радиотехника и электроника, 1970, 2, с. 257—262.

Поступила в редакцию 10 октября 1982 г.