

## **О методе радиоголографического контроля поверхности главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 с радиальным движением опорного элемента**

© В. Б. Хайкин, М. К. Лебедев, А. М. Рипак

СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Представлены новые экспериментальные данные по развитию метода радиоголографического контроля для зеркальных антенных систем с адаптивной поверхностью. Измерения выполнены на антенной системе (АС) «Юг+Плоский» радиотелескопа РАТАН-600. За счет стабилизации скорости движения опорного щита, используемого для обеспечения линейного набега фазы, и уменьшения времени снятия голограммы удалось получить высокую повторяемость результатов восстановления как амплитудного, так и фазового распределения электрического поля по апертуре антенны. Приведены результаты моделирования применения метода для космического радиотелескопа с адаптивной поверхностью на примере проекта «Миллиметрон». Показана применимость метода для полноповоротных радиотелескопов.

**Ключевые слова:** радиоголография, зеркальные антенны с адаптивной поверхностью, РАТАН-600, «Миллиметрон».

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.47.58-63>

### **Введение. Краткое описание метода**

В 1980–90-х гг. радиоголографические (РГ) методы контроля успешно развивались для исследования радиотелескопа РАТАН-600 [1–3]. В настоящей работе представлены новые результаты применения способа записи РГ-сигнала, не требующего специальной фазостабильной аппаратуры [4]. Суть метода заключается в том, что внешний опорный сигнал формируется радиальным движением опорного элемента (щита) относительно всей антенны, а интерферограмма (голограмма) записывается радиоастрономическим приемником по космическому (рис. 1, а) или наземному источнику в режиме автоколлимации (рис. 1, б). В качестве космического источника можно использовать геостационарный спутник Земли на волне 2.5 см/1.5 см, мазеры H<sub>2</sub>O — на частоте 22 и 183 ГГц, сильные протяженные радиоисточники типа Лебедь А и Телец А — на волне длиннее 4 см, в качестве наземного — генератор синусоидальных колебаний на волне 8–10 мм, расположенный рядом с приемником на подвижной каретке облучателя радиотелескопа.

Результат сложения фокального поля от измеряемой апертуры и движущегося опорного щита на выходе мощностного приемника при движении каретки вдоль фокальной линии АС имеет вид:

$$H(x) = |V(x) + A(x)|^2 = |V(x)|^2 + |A(x)|^2 + V(x)A^*(x) + V^*(x)A(x), \quad (1)$$

где  $A(x) = A_0(x)e^{i(cx+\psi_0)}$ ,  $c$  — крутизна сдвига фазы из-за движения щита,  $\psi_0$  — начальная фаза фокального поля.

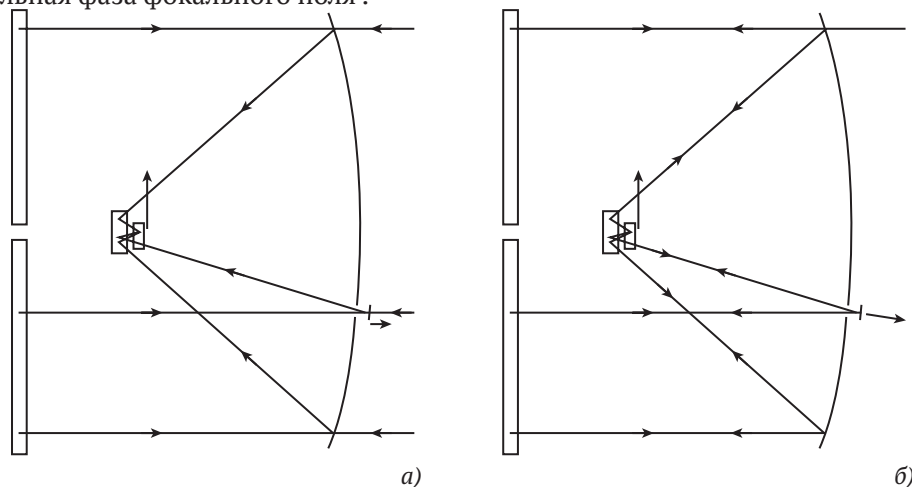


Рис. 1. Схемы формирования голограммы: *а* — по космическому источнику; *б* — в режиме автоколлимации

Преобразование Фурье уравнения (1) после вычитания составляющей нулевого порядка голограммы приводит к следующему результату:

$$\tilde{F}[H(x)] \approx E(\xi) \otimes E_0^*(-\xi) \otimes \delta(\xi + \xi_0 + c) + E^*(-\xi) \otimes E_0(\xi) \otimes \delta(\xi - \xi_0 - c),$$

где  $E(\xi)$  и  $E_0(\xi)$  — комплексные поля на измеряемой апертуре и опорном элементе. Переменные  $\xi$  и  $\xi_0$  соответствуют угловым координатам текущего и опорного щитов,  $\xi = \sin \varphi$ , где  $\varphi$  — угловая координата положения щита в апертуре антенны. Таким образом, мнимое и действительное изображения распределения поля по апертуре оказываются разнесенными по угловой координате, что позволяет определить распределение фазы и амплитуды поля, а следовательно, и отклонение положения отражающих элементов (ОЭ) от идеальной параболы.

Метод может применяться для быстрой диагностики ошибок в положении ОЭ радиотелескопа РАТАН-600, а также других наземных и космических рефлекторных радиотелескопов с активной поверхностью. Оценочная точность метода при достижимом в эксперименте отношении сигнал/шум — не хуже  $\lambda/100$ .

## Новые экспериментальные данные

По сравнению с результатами, представленными в [4], наши основные усилия были направлены на усовершенствование методики измерений, повышение их повторяемости и точности. Выполненное моделирование показало, что неравномерность скорости движения опорного щита может самым драма-

тичным образом влиять на результаты восстановления фазы поля на апертуре. Так, неравномерность движения щита со средним квадратичным отклонением его скорости от средней на величину порядка 1.5 % приводит практически к полной потере информации о фазе поля при ее восстановлении. Поэтому стабилизация скорости движения опорного щита — безусловное требование при снятии радиоголограмм. Второй источник ошибок при записи и восстановлении голограммы — флуктуации атмосферы приземного слоя. При прохождении волн через турбулентную атмосферную среду возникают рассеянные волны, амплитуда и фаза которых зависит от изменения показателя преломления приземного слоя  $r$  ( $r \approx 50$  м) и радиуса корреляции неоднородностей в приземном слое  $\bar{n}$  (м). Зачастую второй источник ошибок является доминирующим. Поэтому наряду с записью голограммы в вечернее и ночное время при более стабильной атмосфере необходимо уменьшать время записи голограммы, увеличивая скорости движения щита и каретки.

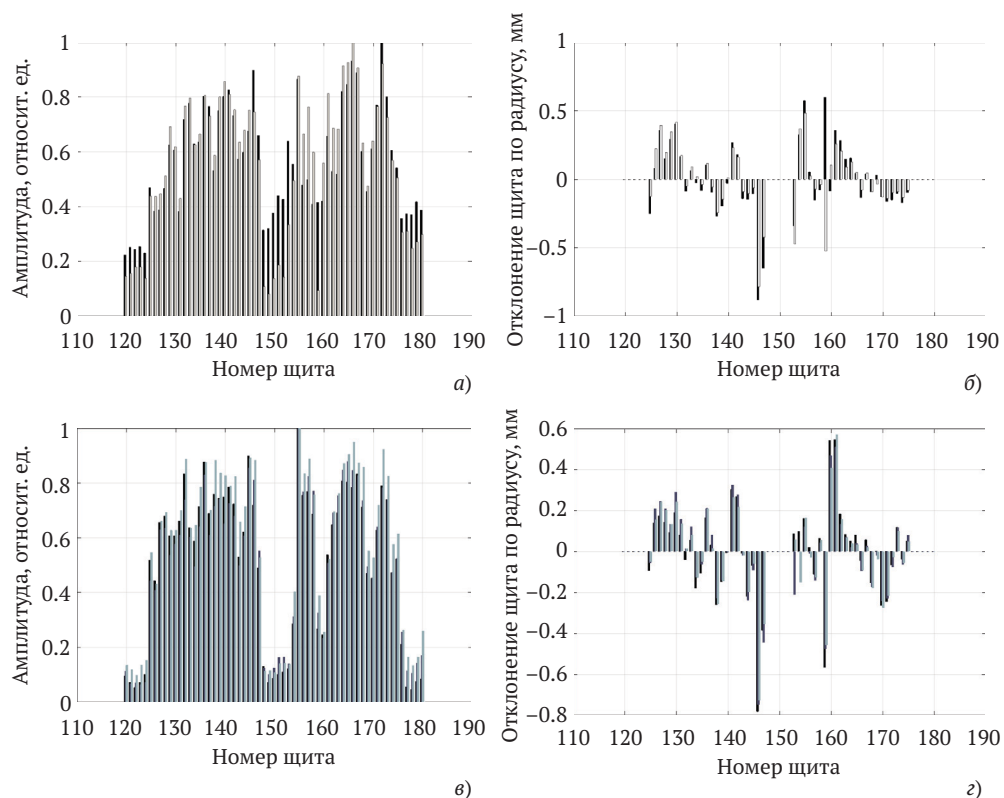


Рис. 2. Результаты восстановления профилей амплитуды и фазы поля для части Южного сектора (50 щитов) антенной системы «Юг+Плоский» с применением частотного инвертора на стандартной скорости перемещения опорного щита — а, б; и на удвоенной — в, г.

Для уменьшения влияния этих эффектов в системе управления движением опорного щита был установлен прецизионный частотный инвертор (ЧИ), обеспечивший максимальную неравномерность движения щита менее 0.5 %

и позволивший увеличить его скорость в несколько раз. Это привело к существенному улучшению повторяемости результатов восстановления. На рис. 2 приведены результаты восстановления амплитуды (а) и фазы (б) поля на апертуре для двух последовательных измерений в течение часа с использованием ЧИ с целью стабилизации номинальной скорости движения щита и для трех последовательных измерений с использованием ЧИ с удвоением скорости опорного щита (рис. 2, в и 2, г). Мерой повторяемости результатов независимых голографических измерений принят их коэффициент взаимной корреляции  $R_{1,2}$ .

Из рис. 2 видно, что стабилизация скорости движения опорного щита и уменьшение времени измерений позволили увеличить  $R_{1,2}$  с 0.8 до 0.97. Такая повторяемость результатов, а также успешное восстановление радиальных положений контрольных щитов, позволяют переходить к следующему этапу работы — корректировке положений щитов по данным обработки голограмм.

### Возможности применения метода для других инструментов

Данный метод применим для контроля поверхности других рефлекторных радиотелескопов с активной поверхностью (например, проект «Миллиметрон»). Моделирование показало принципиальную возможность восстановления амплитудного и фазового профилей полноповоротных радиотелескопов. В качестве примера использована 10-метровая антенна проекта «Миллиметрон».

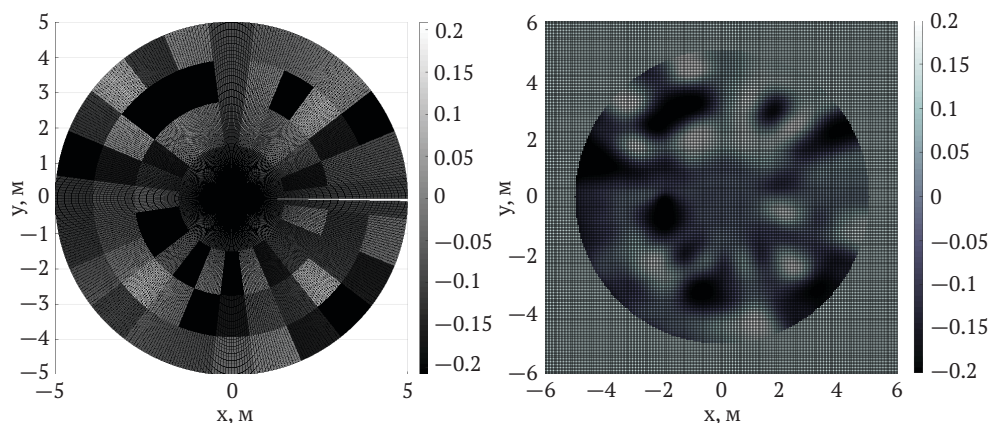


Рис. 3. Исходное (а) и восстановленное (б) распределение фазы в апертуре главного зеркала радиотелескопа «Миллиметрон» при отношении сигнал/шум 60 дБ

Из представленных на рис. 3 результатов видно, что можно ожидать точность СКО метода не хуже  $\lambda/50$  при отношении сигнал/шум 60 дБ или до 30 мкм на частоте 183 ГГц.

Возможность замены непрерывного линейного сдвига фазы дискретным периодическим с фиксированным шагом фазового сдвига либо непрерывным периодическим в пределах  $360^\circ$  позволяет сократить диапазон перемещения

опорного щита до одной длины волны, на которой производится снятие голограммы. Применение шага линейного сдвига фазы  $120^\circ$  в несколько раз повысит отношение сигнал/шум при измерении голограммы по космическому источнику.

Работа выполнена в рамках Государственного задания: №АААА-А17-117011810013-4, при частичной поддержке Программы ПРАН №28 «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей», проект 1Д.

## Л и т е р а т у р а

1. Пинчук Г. А., Стоцкий А. А. Особенности применения методов радиолографии для исследования радиотелескопа РАТАН-600. — Препринт САО АН СССР № 3Л. — Л.: САО АН СССР, 1983. — 15 с.

2. Синянский В. И., Стоцкий А. А. Радиолографический метод исследования и юстировки радиотелескопа РАТАН-600. — Препринт САО АН СССР № 55Л. — Л.: САО АН СССР, 1988. — 45 с.

3. Khaikin V. B. New applications of radio holography for MM observations with RATAN-600 radio telescope / In Proceed. of IAU Colloquim 140, Hakone, Japan, 1992, ASP conference series. — 1994. — V. 59. — P. 104–112.

4. Хайкин В. Б., Лебедев М. К., Рупак А. М. Способ радиолографического контроля поверхности главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 с радиальным движением опорного элемента // Журнал радиоэлектроники. — 2017. — № 11. — URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/13/text.pdf> (accessed: 28.10.2018).

# **Method of Radio Holography Diagnostics of Surface of RATAN-600 Radio Telescope Main Mirror using Radial Movement of Reference Element**

**V. B. Khaikin, M. K. Lebedev, A. M. Ripak**

We report the new experimental data on the development of the radio holography diagnostics method application to the mirror antenna system with an adaptive surface. Measurements were performed on the “South sector with Flat reflector” antenna system of the RATAN-600 radio telescope. We were able to obtain the high repeatability of reconstruction for both amplitude and phase distribution of the electric field over the antenna aperture due to the stabilization of speed of the reference panel movement used to produce a linear phase shift. We present the results of modeling of the considered method application to the space telescope with an adaptive surface on the example of the Millimetron project. The applicability of the method to the diagnostics of full steerable telescopes is shown.

**Keywords:** radio holography, mirror antenna with adaptive surface, RATAN-600, “Millimetron”.