

УДК 520.2.03, 520.27

СПОСОБ РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600 С РАДИАЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ОПОРНОГО ЭЛЕМЕНТА

В. Б. Хайкин^{1,2}, М. К. Лебедев^{1,2}, А. М. Рипак^{1,2}

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербургский филиал,
196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65

²НПФ Айсберг-НТ, 192007, Санкт-Петербург, Лиговский пр., 195

Статья поступила в редакцию 16 ноября 2017 г.

Аннотация. Радиоголографические методы контроля широко применяются в последние десятилетия в антенной технике и радиоастрономии. Рассмотрен новый способ записи радиоголографического сигнала на радиотелескопе РАТАН-600, не требующий применения специальной фазостабильной радиоголографической аппаратуры. В предложенном способе внешний опорный сигнал формируется радиальным движением опорного элемента (щита) относительно всей антенны, а интерферограмма (голограмма) записывается обычным радиоастрономическим приемником в процессе движения каретки облучателя в направлении взаимного разбегания с опорным щитом. Приводится схема, математическое описание нового способа формирования радиоголографического сигнала и результаты моделирования восстановленного распределения амплитуды и фазы поля на апертуре с привязкой к щитам Главного зеркала. Дана оценка требований к источнику радиоголографического сигнала для обеспечения временной и пространственной когерентности. Найдены оптимальные соотношения скорости движения каретки облучателя и опорного щита, достигаемое пространственное разрешение a и максимальный размер измеряемой апертуры D . По нашим оценкам, a не хуже размера одного щита, D превышает 100 м с перспективой достижения $D = 150-200$ м. Представлены первые результаты применения нового радиоголографического метода на антенной системе

«Юг+Плоский» радиотелескопа РАТАН-600 по сигналу геостационарного спутника Земли на волне 2.5 см и в режиме автоколлимации на волнах 1.8 см и 1 см. Повторяемость выполненных радиоголографических измерений в хороших погодных условиях можно охарактеризовать коэффициентом корреляции 0.9 по амплитуде и 0.7 по фазе (радиусу). По нашим оценкам, точность метода пока не выше 0.2 мм (СКО) и ограничивается турбулентностью атмосферы приземного слоя в дневное время. В ночное время в условиях низкий фазовых пространственных вариаций атмосферы приземного слоя ожидаемая точность не хуже 0.1 мм (СКО).

Ключевые слова: многоэлементный радиотелескоп, активная поверхность, радиоголографический контроль и юстировка.

Abstract. In recent decades, radioholographic methods of antenna measurements are widely used in the antenna technology and radio astronomy. We consider a new method of the radioholographic signal recording for RATAN-600 radio telescope, which does not require any special phase-stabilized instrumentation. In the method proposed, the reference signal is formed with a radial movement of the reference element (shield) relative to the whole antenna, while the interferogram (hologram) is recorded using a conventional radio astronomy receiver as the feed carriage moves in the direction opposed to that of the reference shield. We give the scheme and the mathematical description of the new method of the radioholographic signal recording, as well as the results of the modeling of the reconstruction of the electrical field amplitude and phase distribution in the telescope aperture related to the positions of the main mirror shields. We estimate the characteristics of the source of the radioholographic signal required in order to provide the necessary degree of the time and space coherence. We found the optimal relation between the speeds of movement of the feed carriage and the reference shield, the spatial resolution a which can be achieved, and the maximum dimension D of the aperture being measured. According to our estimates, a is not larger than the size of a single shield, while D is more than 100 m and $D = 150-200$ m seems to be feasible. We present the first results of the application of the new method to the measurement of the antenna system “South

sector + Flat reflector” of RATAN-600 radio telescope using the signal from a geostationary Earth satellite at the wavelength of 2.5 cm and in the autocollimation mode at the wavelengths of 1.8 cm and 1.0 cm. The repeatability of the performed radioholographic measurements is characterized by the correlation coefficient of 0.9 in amplitude and 0.7 in phase (radial position). Yet we estimate the accuracy of the method to be not better than 0.2 mm RMS, it is limited by the turbulence of the near-surface atmosphere layer during the daytime. At night, when the spatial phase variance of the near-surface layer is low, the expected method accuracy should be no worse than 0.1 mm RMS.

Key words: multielement radiotelescope, active surface, radioholographic measurements and adjustment.

1. Введение

Радиоголографический (РГ) метод метрологии крупной рефлекторной антенны был предложен в работе [1]. В 80-х годах были предложены различные методы радиоголографического контроля и юстировки Главного зеркала (ГЗ) радиотелескопа РАТАН-600 в режиме автоколлимации (АК) и самофокусировки антенны по удаленному наземному источнику сигнала [2-5]. Все они, а также корреляционные методы измерения антенн [6] требовали создания специальной фазостабильной аппаратуры для формирования и записи радиоголограмм (интерферограмм), после восстановления (обработки) которых можно было найти поле на апертуре, определить и исправить ошибки в положении отражающих элементов (ОЭ) ГЗ радиотелескопа. Эффективные способы записи голограммы с внешним опорным сигналом требовали построения двухрупорной и двухканальной схемы приемной аппаратуры [5].

Однако наиболее привлекательным является способ радиоголографической записи, в котором радиоголограмма формируется самой антенной и принимается однорупорным радиометрическим приемником. Ниже дано описание и приводятся результаты применения такого методически и технически простого радиоголографического метода. Первые результаты

использования предложенного метода на АС «Юг+Плоский» радиотелескопа РАТАН-600 приведены в [9].

2. Описание и результаты моделирования нового способа записи радиоголографического сигнала

В предложенном способе записи радиоголограммы внешний опорный сигнал формируется радиальным движением опорного ОЭ на краю апертуры относительно всей измеряемой антенны, а интерферограмма (голограмма) записывается обычным радиоастрономическим приемником в процессе движения каретки облучателя в направлении взаимного разбегания с движущимся опорным щитом. При этом не несущая полезной информации и мешающая восстановлению поля на апертуре мощностная часть голограммы при необходимости может быть удалена вычитанием тут же измеренной мощностной диаграммы направленности или АК фокального пятна радиотелескопа.

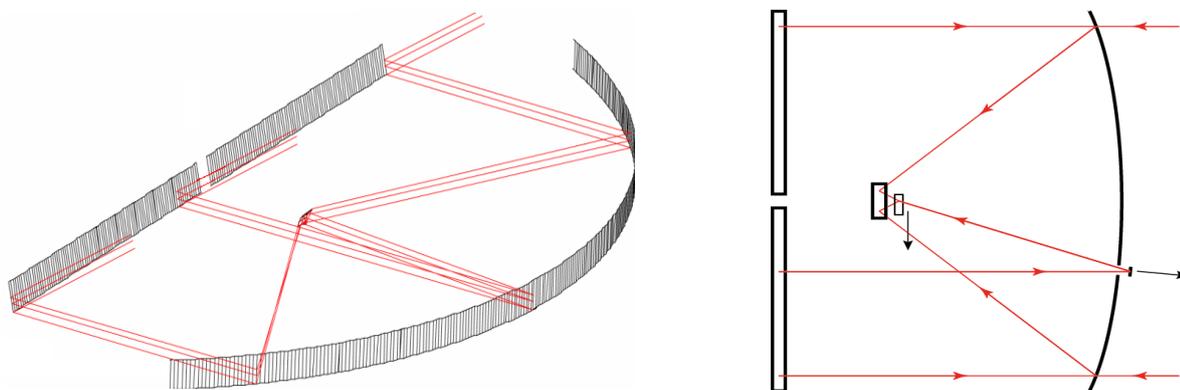


Рис.1. Схема радиоголографического эксперимента по космическому источнику на АС «Юг+Плоский»

Таким образом, в процессе антенных измерений с помощью приемника на подвижной каретке записывается мощностное фокальное пятно и голограмма с движущимся опорным щитом. Схема измерений по сигналу космического источника (например, геостационарного спутника Земли (ГСЗ)) на антенной

системе (АС) «Юг+Плоский» приведена на рис. 1.

Результат сложения фокальных полей от измеряемой апертуры $V(x)$ и движущегося опорного щита $A(x)$ на выходе мощностного приемника на фокальной линии каретки будет иметь вид:

$$H(x) = |V(x) + A(x)|^2 = |V(x)|^2 + |A(x)|^2 + V(x)A^*(x) + V^*(x)A(x).$$

Учтем линейный сдвиг фазы поля при движении опорного щита с крутизной c и возьмем Фурье-преобразование от голограммы $H(x)$:

$$A(x) = A_0(x)e^{i(cx+\psi_0)},$$

$$\begin{aligned} H(x) &= |V(x)|^2 + |A_0(x)|^2 + V(x)A_0^*(x)e^{-i(cx+\psi_0)} + V^*(x)A_0(x)e^{i(cx+\psi_0)} = \\ &= |V(x)|^2 + |A_0(x)|^2 + |V(x)||A_0(x)|\cos(cx + \psi_0 + \psi_v), \end{aligned}$$

где ψ_0 и ψ_v — начальные фазы фокальных полей $A(x)$ и $V(x)$.

Поскольку

$$\tilde{F}[\cos(cx + \psi_0)] = \sqrt{\frac{\pi}{2}}(\delta(\xi - \xi_0 - c) + \delta(\xi + \xi_0 + c)),$$

получаем

$$\begin{aligned} \tilde{F}[H(x)] &= \tilde{F}[V(x)] \otimes \tilde{F}[V^*(x)] + \tilde{F}[A_0(x)] \otimes \tilde{F}[A_0^*(x)] + \\ &+ \sqrt{\frac{\pi}{2}} \tilde{F}[V^*(x)A_0(x)] \otimes \delta(\xi - \xi_0 - c) + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \tilde{F}[V(x)A_0^*(x)] \otimes \delta(\xi + \xi_0 + c). \end{aligned}$$

Здесь, как и в [3], переменные ξ и ξ_0 соответствуют угловым координатам текущего и опорного щитов, $\xi = \sin \varphi$, где φ — угловая координата положения щита в апертуре антенны. При этом полагается, что угловой размер опорного щита много меньше углового размера исследуемой апертуры, что дает основание в этом приближении описать его положение по угловой координате функцией $\delta(\xi - \xi_0)$. Значение коэффициента c находится по простой формуле:

$$c = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \varphi_0) \frac{v_{sh}}{v_{car}},$$

где φ_0 — угловая координата опорного щита, v_{sh} — скорость движения опорного щита, v_{car} — скорость движения каретки. Поскольку $v_{sh} = \text{const}$, а значение коэффициента c для неискаженного восстановления поля на апертуре нужного размера можно найти по модели, из приведенной выше формулы находят оптимальную v_{car} .

В случае устранения (вычитания) мощностного члена голограммы автокорреляционные составляющие уйдут и останутся свертки комплексно-сопряженных полей с δ -функцией:

$$\begin{aligned} \tilde{F}[H(x)] &\approx \sqrt{\frac{\pi}{2}} \tilde{F}[V(x)] \otimes \tilde{F}[A_0^*(x)] \otimes \delta(\xi + \xi_0 + c) + \\ &+ \sqrt{\frac{\pi}{2}} \tilde{F}[V^*(x)] \otimes \tilde{F}[A_0(x)] \otimes \delta(\xi - \xi_0 - c) = \\ &= E(\xi) \otimes E_0^*(-\xi) \otimes \delta(\xi + \xi_0 + c) + E^*(-\xi) \otimes E_0(\xi) \otimes \delta(\xi - \xi_0 - c), \end{aligned}$$

где $E(\xi)$ и $E_0(\xi)$ — комплексные поля на измеряемой апертуре и опорном элементе.

Поскольку амплитуда и фаза поля на неподвижном ОЭ постоянны, свертка с ним при его движении ОЭ будет сглаживать смещенное восстановленное поле прямоугольным окном масштаба щита и этим наряду с другими факторами ограничивать пространственное разрешение метода. На рис. 2 представлена модель голограммы с движущимся опорным щитом и результат ее восстановления с помощью БПФ, где видны восстановленные провалы амплитуды поля в раскрыве и заданные контрольные сдвиги фаз. Видимая связь скачков фазы и амплитуды объясняется тем, что Фурье-преобразование не полностью подходит для восстановления поля в раскрыве широкоапертурных антенн, где кроме линейного в показателе экспоненты возникает квадратичный член, что при скачках амплитуды и фазы неизбежно вызывает перекрестные искажения и переколебания. Однако указанные искажения снижаются при выполнении нескольких итераций в процессе юстировки ГЗ РАТАН-600 [2].

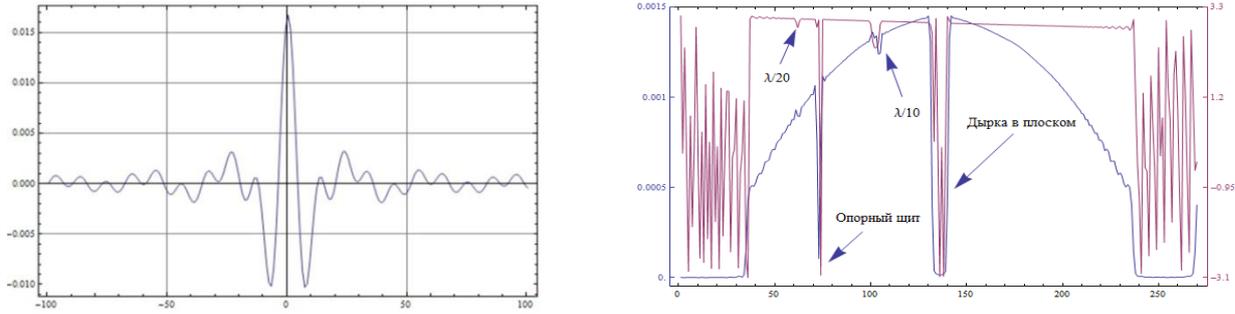


Рис. 2. Модельная голограмма (слева) и восстановленное амплитудно-фазовое распределение поля на апертуре ГЗ с заданными на ней и восстановленными сдвигами фазы.

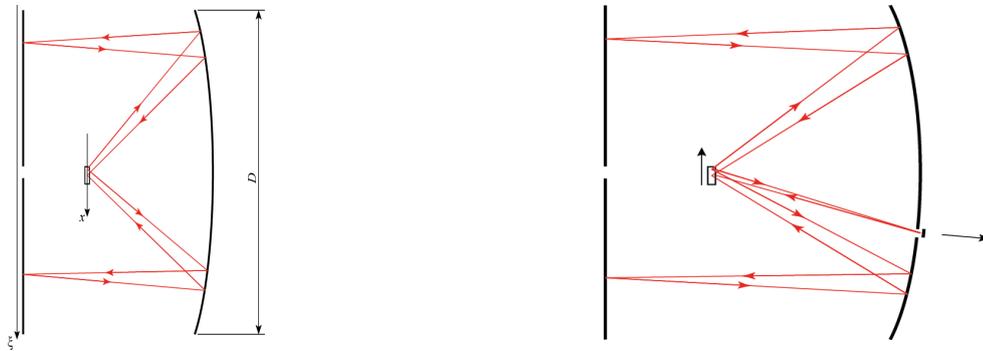


Рис. 3. Схема АК измерений (слева) и голографии в АК режиме (справа).

Схема эксперимента в АК режиме на АС «Юг+Плоский» РАТАН-600 представлена на рис. 3. В АК режиме ГЗ выставляется в форме параболы, как и в режиме космического источника, но Перископ устанавливается вертикально. Как и в режиме измерений по ГСЗ (рис. 1) оптимальным в процессе записи голограммы является взаимное удаление (разбегание) каретки и опорного щита, что дает правильный дополнительный линейный сдвиг фаз опорной волне на фокальной линии, улучшая качество голограммы и восстановленного изображения.

Для разрешения ОЭ с геометрическим размером a в любой точке восстановленной апертуры область измерения вдоль оси X определяется линейным размером полуширины диаграммы направленности любого ОЭ в фокусе антенны:

$$\Delta x = \frac{\lambda \rho_1(\psi)}{a_{\text{эфф}}}$$

где $\rho_1(\psi)$ — расстояние из фокуса до измеряемого ОЭ под углом ψ в полярных координатах, $a_{\text{эфф}}$ — эффективный размер элемента, проекция ОЭ на ось X, $a_{\text{эфф}} = a \cos \psi$, a — горизонтальный размер ОЭ ГЗ, ψ — угол между осью антенны и направлением на измеряемый ОЭ из фокуса.

Тогда пространственное разрешение метода равно

$$a' = \frac{\lambda \rho_1(\psi)}{\Delta x \cos \psi}.$$

Входящие в приведенную формулу расстояния и углы можно получить из геометрии схемы эксперимента (рис. 1, 3) и уравнения параболы в полярных координатах:

$$\rho_1(\psi) = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\Delta l}{R_{\text{max}}}\right)^2}}{1 + \cos \psi} R_{\text{max}},$$

$$\psi = \arctg \frac{\sin \varphi}{\left[\cos \varphi - 1 + \frac{\rho_1(0)}{R_{\text{max}}} \right]},$$

где φ — угол между осью антенны и направлением на измеряемый ОЭ из центра, R_{max} — максимальный радиус окружности из центра, на который перемещаются ОЭ (288500 мм), Δx — диапазон перемещения каретки (максимум 1500 мм), Δl — диапазон перемещения ОЭ по радиусу (1 м), $\rho_1(0)$ — расстояние из фокуса до центрального ОЭ (132000 м).

Для $\varphi = 45^\circ$ получаем $\psi \approx 40^\circ$; $\rho_1(0^\circ) = 162987$ мм, $a'(0^\circ, \lambda = 10 \text{ мм}) = 880$ мм, $a'(0^\circ, \lambda = 15 \text{ мм}) = 1320$ мм; $\rho_1(40^\circ) = 162987$ мм, $a'(40^\circ, \lambda = 10 \text{ мм}) = 1418$ мм, $a'(40^\circ, \lambda = 15 \text{ мм}) = 2127$ мм.

В АК режиме разрешение удваивается из-за перемещения источника вместе с приемником, что сжимает масштаб и позволяет прописать больше интерференционных лепестков голограммы, однако для использования полного диапазона перемещения каретки необходимо размещать рупор приемника в ее

центре или рупоры источника и приемника симметрично относительно центра. Таким образом, теоретически разрешение на краях сектора на волне 15 мм по космическому источнику может достигать горизонтального размера щита ($a' \approx 2$ м) а на волне 10 мм в АК режиме — половины щита ($a' \approx 1$ м). Однако из-за свертки восстановленного изображения с прямоугольным окном масштаба опорного щита получить разрешение выше эффективного размера опорного щита на краю сектора $a'_{\text{эфф}} = a \cos \psi \approx 0.8a$ не удастся даже в центре апертуры. Преодолеть это ограничение можно, только закрыв половину щита поглощающим материалом, что в два раза уменьшит его эффективный размер.

Для записи голограммы с большим числом интерференционных лепестков предпочтителен монохроматический источник сигнала, его требуемая кратковременная нестабильность частоты определяется отношением величины измеряемой ошибки поверхности к разности длин измеряемого и опорного каналов в процессе записи голограммы. Под кратковременной нестабильностью понимается $\Delta f/f$ за время взаимной задержки измеряемой и опорной волн. В нашем случае радиального движения опорного щита в пределах диапазона $\Delta l = 1$ м и измеряемой ошибки 0.1 мм $\Delta f/f$ требуется не выше 10^{-5} и может сегодня достигаться монохроматическим генератором типа ГУН с умножителем частоты. Для достижения более высоких точностей следует применять синтезатор частоты с умножителем.

Требование к временной когерентности РГ сигнала также определяются разностью длин измеряемого и опорного каналов в процессе записи голограммы Δl . В случае АК режима на АС «Юг+Плоский» Δl не более 2 м, что даст задержку $\tau_3 = \Delta l/c = 0.007$ мкс. Полосу частот, в которой временная когерентность соблюдается можно найти из условия достижения допустимой фазовой ошибки: $\Delta F < 1/(8\tau_3)$ и $\Delta F < 9$ МГц.

Нарушение пространственной когерентности в процессе РГ записи возникает из-за различий в длинах путей измеряемого сигнала (основной волны) на краю каретки, что может приводить к замыванию интерференционных лепестков в полосе сигнала ΔF . В предложенном способе

эти требования в два раза ниже ($\Delta F < 18$ МГц), чем для обеспечения временной когерентности.

3. Результаты применения нового способа записи радиоголографического сигнала

Радиоголограммы предложенным способом впервые на РАТАН-600 получены по сигналу ГСЗ Turksat 2A/3A на волне 2.5 см, а также в АК режиме по высокостабильному монохроматическому генератору на синтезаторе частоты на волне 1.8 см [9]. Способ и результаты измерения характеристик АС «Юг+Плоский» по ГСЗ описаны в [7-8].

Для достижения приемлемого разрешения, безусловного выполнения условий временной и пространственной когерентности и качественного разделения изображений в первых экспериментах были взяты сокращенные апертуры размером 65 м (33 щита) по ГСЗ и 42 м (21 щит) в АК режиме. По мере укорочения длины волны, оптимизации скорости движения каретки и других параметров эксперимента они могут быть расширены в несколько раз до эффективного размера сектора АС «Юг+Плоский» (167 щитов). Примеры записанных голограмм по ГСЗ и в АК режиме при движении каретки облучателя показан на рис. 4.

На рис. 5, 6 показаны первые восстановленные изображения. На распределениях амплитуды и фазы поля на апертуре на месте прохода в перископическом отражателе (рис. 1), как и на модели рис. 2, видна дырка в центре распределения амплитуды поля отведенные контрольные щиты.

Достигнутое пространственное разрешение метода в центре апертуры составило 1.5 щита по ГСЗ и 1 щит в АК режиме. В дальнейшем планируется использовать волну 1.5 см на ГСЗ Turksat 4A и Экспресс-АМУ1 и волну 1 см в АК режиме и достичь разрешения в 1 щит по ГСЗ и лучше в АК режиме, что позволит точнее определять и однозначно исправлять ошибки в положении ОЭ. Использование АК режима наряду с рабочим режимом наблюдений космического источника позволяет изучить разницу в положении ОЭ на различных углах наблюдений.

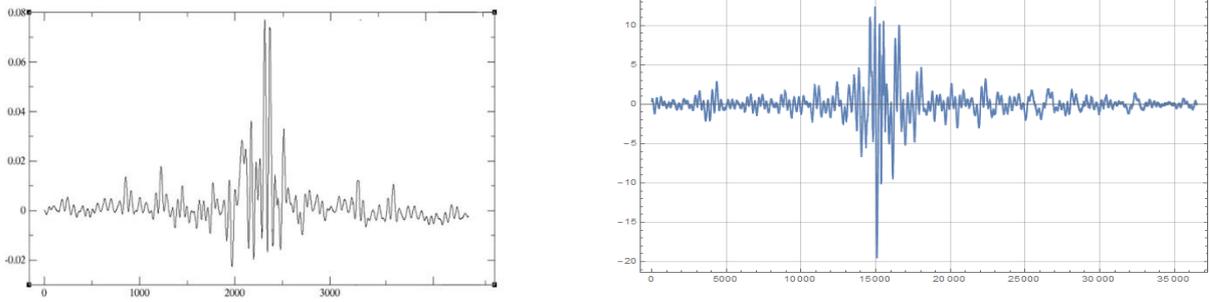


Рис. 4. Пример записанной голограммы по ГСЗ на $\lambda=2.5$ см (слева) и в АК режиме $\lambda=1.8$ см (справа)

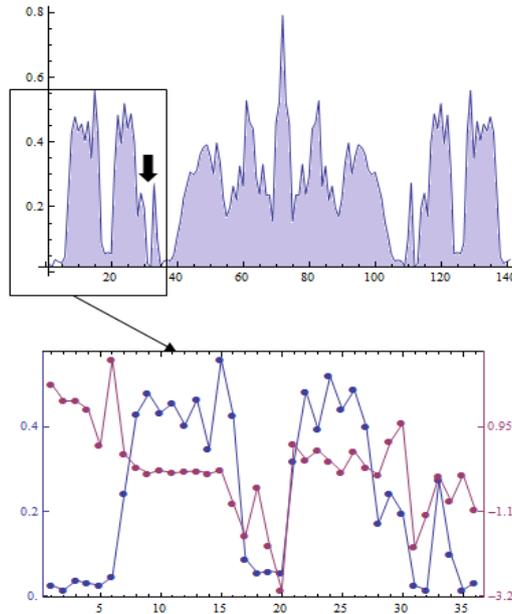


Рис. 5. Восстановленное действительное и мнимое изображение и остаточная автокорреляционная функция (вверху), жирной стрелкой указан контрольный щит, восстановленная амплитуда и фаза поля (внизу)

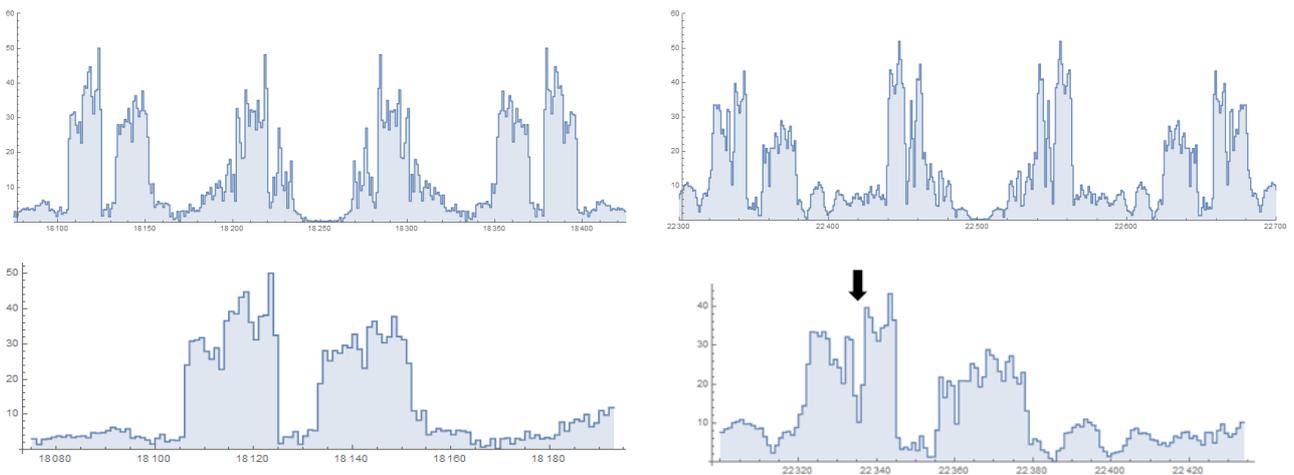


Рис. 6. Восстановленная амплитуда поля на апертуре в АК режиме на волне 1.8 см без (слева) и с отведенным контрольным щитом в середине левой половины антенны (справа)

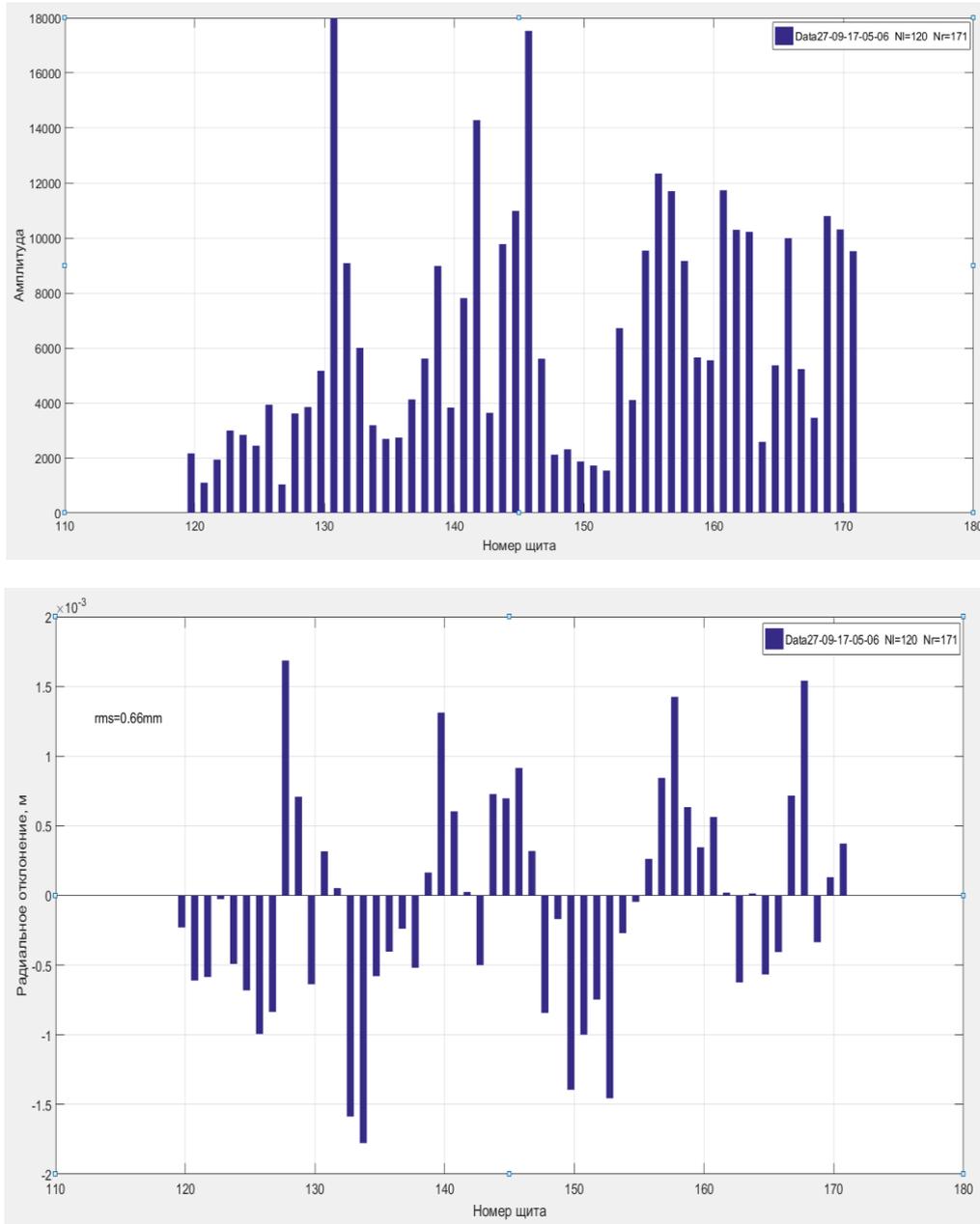


Рис. 7. Результат РГ диагностики двух центральных групп АС «Юг+Плоский» (щиты 120-171) 27.09.2017, амплитуда вверху, относительная фаза (отклонение от идеальной параболы в радиальном направлении в м) внизу, СКО 0.66 мм

Результаты РГ диагностики двух центральных групп АС «Юг+Плоский» (щиты 120-171) 27.09.2017 с улучшенным источником РГ сигнала приведены на рис.7. Они показали низкий КПД (вклад) более половины щитов двух центральных групп Южного сектора из-за состояния Плоского отражателя после ремонта и до выполнения очередной юстировки. Повторяемость РГ

измерений в хороших погодных условиях можно охарактеризовать коэффициентом корреляции 0.9 по амплитуде и 0.7 по радиусу. По нашим оценкам точность нового РГ метода пока не выше 0.2 мм (СКО) и ограничивается временными и пространственными флуктуациями атмосферы приземного слоя в дневное время, в ночное время в более спокойных условиях атмосферы приземного слоя ожидаемая точность не хуже 0.1 мм (СКО).

Предложенный способ подходит для радиоголографического контроля топографии поверхности отдельных панелей радиотелескопа РАТАН-600 в АК режиме [9]. Новый способ может быть применен для радиоголографической диагностики других рефлекторных радиотелескопов с активной поверхностью по сигналу ГСЗ на волне 1.5 см, однако в двумерном случае это требует более сложного анализа для корректного применения обратимого преобразования Фурье или его разновидностей (Фурье-Бесселя, например) при восстановлении двумерной радиоголограммы, измеренной в сферических координатах.

Литература

1. J. C. Bennet, A. P. Anderson, P. A. Mcinnes, A. J. T. Whitaker. Microwave holographic metrology of large reflector antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-24, May 1976, p. 295-303.
2. Г. А. Пинчук, А. А. Стоцкий. Особенности применения методов радиоголографии для исследования радиотелескопа РАТАН-600. Препринт САО АН СССР N3Л. Ленинград, 1983.
3. В. И. Синянский, А. А. Стоцкий. Радиоголографический метод исследования и юстировки радиотелескопа РАТАН-600. Препринт САО АН СССР N55Л. Ленинград, 1988.
4. G. A. Pinchuk, V. I. Sinyanskii, A. A. Stotskii and V. B. Khaikin. Use of autocollimation radioholographic method for the RATAN-600 radio telescope testing / Proc. of International Workshop Holography testing of large radio telescopes. N. Arkhyz, 1990.

5. V. Khaikin V. New applications of radio holography for MM observations with RATAN-600 radio telescope / *Proc. of IAU Colloquium 140*, Hakone, Japan, 1991.

6. Н. В. Векслер, А. В. Калинин, В. С. Коротков, В. И. Турчин. Измерение поляризационных и фазовых диаграмм направленности и амплитудно-фазового распределения корреляционным методом с использованием наземных источников радиоизлучения // *Изв. вузов. Радиофизика*. Т. 27. № 3, 1984. С. 341-349.

7. В. Б. Хайкин, М. К. Лебедев, Н. Н. Бурсов, А. А. Стороженко. Контроль характеристик радиотелескопа РАТАН-600 по ГСЗ // *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*. 2015. № 7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul15/3/text.pdf>

8. В. Б. Хайкин, А. В. Шендрик, Н. Н. Бурсов, М. К. Лебедев, А. А. Стороженко. Способы и результаты контроля характеристик антенной системы «Юг+Плоский» радиотелескопа РАТАН-600 в многоазимутальном режиме работы по сигналу геостационарных спутников Земли / Тезисы докладов X Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Нижний Новгород, март 2016 г.

9. V. Khaikin, M. Lebedev, N. Bursov, N. Ovchinnikova, S. Menshikov. Radiophysical Methods of Fast Diagnostics of Main Mirror Condition and Panels Surface of RATAN-600 Radio Telescope / *Proc. of RSEMW*, June 2017, Divnomorskoe, Russia.

Ссылка на статью:

В. Б. Хайкин, М. К. Лебедев, А. М. Рипак. Способ радиоголографического контроля поверхности главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 с радиальным движением опорного элемента. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2017. №11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/13/text.pdf>