

УДК 621.396

Методы и методики экспериментального исследования радиотехнических характеристик антенн наземных комплексов управления

А. В. Калинин¹, Н. А. Дугин², С. П. Моисеев³,
А. В. Поляков⁴, В. М. Ватулин⁵, А. В. Ивашина⁶

¹д. т. н., ²д. ф.-м. н., ⁴к. т. н., ⁵д. т. н., проф.

^{1,2,3}Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

^{4,5}АО «Российские космические системы»

⁶Министерство обороны Российской Федерации

e-mail: andrey@kalinin.nnov.ru

Аннотация. Рассматриваются возможности известных способов измерения характеристик больших наземных антенн в СВЧ-диапазоне. В дополнение к хорошо известному радиоастрономическому методу, обеспечивающему возможность измерения диаграммы направленности по мощности и коэффициенту усиления, рассматривается радиологический способ антенных измерений. Существенным преимуществом последнего является возможность восстановления распределения амплитуды и фазы поля в апертуре, позволяющая проводить целенаправленную дополнительную юстировку зеркальной системы антенны с целью повышения ее усиления. Подобная юстировка особенно актуальна для проводимых в настоящее время работ по модернизации крупных зеркальных антенн наземных комплексов управления и освоению на них более высоких частотных диапазонов. Обсуждаются разработанные для полноповоротных зеркальных антенн методики измерений по сигналам естественных внеземных радиостанций, а также геостационарных ИСЗ. Приводятся экспериментальные результаты исследования диаграмм направленности и распределений поля в апертуре, полученные радиоастрономическим и радиологическим способами на крупнейших отечественных наземных полноповоротных антеннах с зеркалами от 25 до 70 м.

Ключевые слова: космическая связь, зеркальная антенна, радиоастрономия, внеземные радиостанции, радиологическая

Exploratory Test of Radio-Technical Characteristics of Antennas of Ground-Based Command Complexes

A. V. Kalinin¹, N. A. Dugin², S. P. Moiseev³, A. V. Polyakov⁴, V. M. Vatutin⁵, A. V. Ivashina⁶

¹doctor of engineering science, ²doctor of physics and mathematics,

⁴candidate of engineering science, ⁵doctor of engineering science, professor

^{1,2,3}Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

^{4,5}Joint Stock Company "Russian Space Systems"

⁶Ministry of Defense of the Russian Federation

e-mail: andrey@kalinin.nnov.ru

Abstract. This article considers the capabilities of known methods of characteristics measurement for large ground-based antennas in the microwave range. In addition to the well-known radio-astronomical method, capable of measuring the power directivity pattern and absolute gain, a radio holographic antenna measurement method is considered. A significant advantage of the latter method is the ability to reconstruct the distribution of field amplitude and phase in the aperture, which enables one to conduct additional targeted adjustment of a parabolic antenna system in order to increase its gain. This adjustment is particularly relevant for the ongoing effort to upgrade larger parabolic antennas of ground-based command systems and utilize their higher frequency ranges. Measurement techniques of natural signals from extraterrestrial radio sources, as well as geostationary satellites, designed for fully steerable parabolic antennas are discussed. The paper presents experimental results of measurement of power directivity and field distribution patterns in aperture, received with radio-astronomical and radio-holographic methods from the largest Russian fully steerable ground-based antennas with reflectors from 25 to 70 meters large.

Keywords: satellite communication, parabolic antenna, radio astronomy, extraterrestrial radio sources, radio holography

Радиоастрономический метод

Радиоастрономический способ [1–3] позволяет экспериментально исследовать основные характеристики излучения антенн, такие как диаграмма направленности (ДН), точнее, ее параметры: угловое положение главного максимума и его ширина, положение и уровни боковых лепестков, коэффициент усиления (КУ), а также шумовую температуру ($T_{ш}$) и некоторые другие энергетические характеристики антенны.

Измерения ДН и КУ основаны на использовании естественных космических источников радиоизлучения в качестве «генераторов» сигнала. При измерении $T_{ш}$ источники не используются, а принимаются меры для минимизации приема антенной излучения из окружающего пространства.

Поскольку все естественные внеземные радиоисточники находятся практически на бесконечном расстоянии от Земли (расстояние до источников измеряется тысячами и миллионами световых лет), то для антенны любых размеров заведомо обеспечивается условие дальней зоны, что весьма трудно реализовать при наземных измерениях, особенно для крупных антенн.

Излучение естественных радиоисточников имеет шумовой характер и непрерывный спектр, что дает возможность экспериментально исследовать характеристики антенн непосредственно на их рабочих частотах.

Еще одно преимущество радиоастрономического метода заключается в том, что измерения могут выполняться на достаточно высоких углах места источника, при этом уменьшаются искажения, вносимые отражением от земли.

Основные недостатки радиоастрономических методов антенных измерений обусловлены относительной слабостью сигналов естественных радиоисточников. Для измерений приходится использовать специальные приемники слабых шумовых сигналов — радиометры. При исследовании ДН динамический диапазон ограничен в лучшем случае уровнем первых боковых лепестков.

Поскольку излучение естественных радиоисточников, как правило, неполяризовано, «обычными» радиоастрономическими методами измеряется ДН по мощности и не могут быть исследованы

характеристики антенн на отдельных поляризациях. Кроме того, этими методами не измеряются фазовые характеристики антенны.

На рис. 1 представлена упрощенная блок-схема радиоастрономического метода измерения ДН и КУ антенны (А) по сигналам источника (S). Метод реализуется с использованием высокочувствительного приемника (Пр), измеряющего мощность на выходе антенны, эталонного генератора шума (ГШ) и системы регистрации (СР).

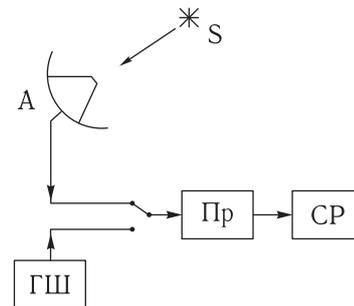


Рис. 1

При наведении антенны максимумом ДН на радиоисточник с угловыми размерами, много меньшими ширины лепестка ДН («точечный» источник), и плотностью потока S_{ν} , на выходе антенны возникает приращение мощности сигнала, которое в радиоастрономии принято характеризовать изменением эквивалентной шумовой температуры антенны ΔT_a :

$$\Delta T_a = \frac{\lambda^2}{8\pi k} S_{\nu} \cdot G \cdot e^{-\gamma_{и}}, \quad (1)$$

где G — КУ антенны в максимуме ДН, λ — длина волны, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/град · Гц — постоянная Больцмана, S_{ν} — спектральная плотность потока радиоисточника, измеряемая в $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{Гц}}$, или в янских, $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{Гц}}$.

Множитель $e^{-\gamma_{и}}$ характеризует поглощение радиоволн в атмосфере, существенное в диапазоне частот выше 3 ГГц.

Из (1) получаем соотношение для определения КУ антенны при измерениях по «точечному» радиоисточнику:

$$G = \frac{8\pi k}{\lambda^2} \frac{\Delta T_a}{S_{\nu}} \cdot e^{\gamma_{и}}. \quad (2)$$

Т а б л и ц а

Источник	Угловые размеры	S_{ν} , Ян 3,7 ГГц	S_{ν} , Ян 8,4 ГГц	S_{ν} , Ян 11,5 ГГц	S_{ν} , Ян 21 ГГц
3C123	30" × 5"	22	9,2	7	3,59
3C144 Телец А	~ 4'	618	509	472	
3C147	1" × 1"		4,5		1,9
3c196	5" × 1"		2,3		0,82
3C273	~ 15"	40	38–40	45	
3C286	1,5" × 1,5"		5,1		2,73
3C274 Дева А	–	100	50	38	
3C405 Лебедь А	106"	525	190	127	
3C461 Кассиопея А	~ 4'	814	445	349	
ДР21	20" × 20"		22		

Из соотношения (1) очевидно, что при смещении антенны от направления на выбранный точечный радиоисточник приращение антенной температуры изменяется пропорционально диаграмме направленности антенны по мощности.

Если угловые размеры источника $\Omega_{\text{ист}}$ сравнимы с шириной диаграммы направленности антенны, выражение (1) представляется в виде:

$$\Delta T_a = \frac{1}{4\pi} \cdot G \cdot e^{-\gamma_{\text{и}}} \int_{\Omega_{\text{ист}}} F(\theta, \varphi) T_{\text{я}}(\theta, \varphi) d\Omega, \quad (3)$$

где $F(\theta, \varphi)$ — нормированная ДН антенны по мощности, $T_{\text{я}}(\theta, \varphi)$ — распределение яркостной температуры по источнику.

В частном случае равномерного распределения яркостной температуры по источнику соотношение (3) может быть записано в виде:

$$\Delta T_a = \frac{\lambda^2}{8\pi k} \cdot S_{\nu} G \cdot e^{-\gamma_{\text{и}}} \frac{\int_{\Omega_{\text{ист}}} F(\theta, \varphi) d\Omega}{\Omega_{\text{ист}}}. \quad (4)$$

Нетрудно убедиться в том, что в последних случаях приращение мощности на выходе антенны будет несколько меньше, чем при приеме всего излучения источника с таким же потоком S_{ν} через главный максимум ДН (при «точечном» источнике).

Выбор радиоисточников

Выбор калибровочных источников является одной из основных задач, от которых зависит точность измерений в различных диапазонах длин волн, для антенн разных размеров.

Дискретные радиоисточники: Кассиопея А (3С 461), Лебедь А (3С 405), Телец А (Крабовидная туманность, 3С 144), Дева А (3С 274), а также Орион А, Геркулес (3С 348), 3С 353 имеют достаточно сильное излучение и угловые размеры в единицы угловых минут, что позволяет широко использовать их в радиоастрономических методах измерений. Однако для крупных антенн в сантиметровом диапазоне эти источники являются слишком протяженными — Кассиопея А и Телец А порядка 4', Лебедь А ~ 2'. Поэтому при калибровке крупных антенн приходится использовать «точечные» радиоисточники с небольшими (менее 50 Ян) плотностями потоков (квазары, радиогалактики, мазеры и др.).

Требования к радиоисточнику для решения двух основных задач — юстировки и измерения эффективной площади (КУ) — различаются, и в группу калибраторов для построения оптимального графика измерений следует включать объекты с различными характеристиками.

В таблице приведены примеры плотностей потоков на частотах С-, Х-, Ku- и Ka-диапазонов для нескольких наиболее широко применяемых радиоисточников [3–5].

Методика измерения коэффициента усиления

Для определения коэффициента усиления антенны радиоастрономическим способом производится регистрация мощности сигнала на выходе антенны (приращения антенной температуры) при приеме радиоизлучения внесемного источника с известной спектральной плотностью потока. Расчет усиления антенны выполняется по формуле (2). Для определения приращения антенной температуры ΔT_a , обусловленной излучением радиоисточника, производится измерение разности сигналов на выходе системы регистрации («ступеньки» по напряжению $\Delta V_{ист}$) при наведении антенны максимумом ДН на источник и на опорную область. В качестве опорной области используется направление, отстоящее от направления на источник по одной из координат (желательно по азимуту) на угол, равный нескольким (порядка 3–5) размерам лепестка ДН. При измерении характеристик остро-направленных антенн в СВЧ-диапазоне угол отведения от источника, как правило, не превышает несколько десятков угловых минут. Пересчет измеренных значений $\Delta V_{ист}$ в приращение антенной температуры проводится по результатам калибровок с использованием эталонов шумовой температуры. В качестве эталонов применяются охлаждаемые (заправляемые жидким азотом) согласованные нагрузки (ОСН) и внешние «горячие» (в частности, газоразрядные) генераторы шума (ГШ).

Методика измерения шумовой температуры

Для определения шумовой температуры антенны радиоастрономическим способом производится измерение мощности сигнала на выходе антенны при направлении главного лепестка ее ДН в область неба с минимальными значениями яркостной температуры. Обычно в качестве такой области выбирается направление в зенит. Одновременно про-

водится калибровка по охлаждаемой согласованной нагрузке. По результатам измерений шумовая температура антенны рассчитывается по формуле:

$$T_{ш}^A = T_{СН} - (T_{СН} - T_{ОСН}) \times \frac{\Delta V_{зенит}}{\Delta V_{ОСН}}, \quad (5)$$

где $T_{СН}$ — температура внутренней согласованной нагрузки радиометра; $T_{ОСН}$ — шумовая температура ОСН, заправленной жидким азотом; $\Delta V_{зенит}$ — разность показаний системы регистрации при подключении на вход радиометра внутренней согласованной нагрузки и выхода антенны, направленной в зенит; $\Delta V_{ОСН}$ — разность показаний системы регистрации при подключении на вход радиометра внутренней согласованной нагрузки и ОСН.

Радиоголографический метод [6]

Блок-схема радиоголографического способа антенных измерений показана на рис. 2. Способ предусматривает использование вспомогательной (опорной) антенны и двухканального фазометрического приемника. При измерениях производится перемещение (сканирование) ДН исследуемой антенны относительно выбранного радиоисточника, опорная антенна постоянно направлена на этот источник максимумом своей ДН. Опорной антенной может служить расположенная рядом антенна на отдельном опорно-поворотном устройстве или небольшое зеркало, установленное на исследуемую антенну.

Источниками сигналов служат естественные радиоисточники, а также геостационарные ИСЗ. Измерения по ИСЗ выполняются либо по узкополосным маякам (CW beacons), присутствующим в передаваемых спутниками сигналах, либо по квазишумовым сигналам связанных каналов (телефонных, радиовещательных, телевизионных и т.п.). Для антенных измерений такие сигналы рассматриваются как очень сильные внесемные точечные источники со спектром, близким к равномерному в полосе частот приемника (единицы МГц).

В качестве приемника используется корреляционный радиометр либо другой фазометрический приемник (амплифазометр, анализатор цепей и т.д.). В первом случае измерения могут проводиться как по шумовым, так и по квазисинусои-

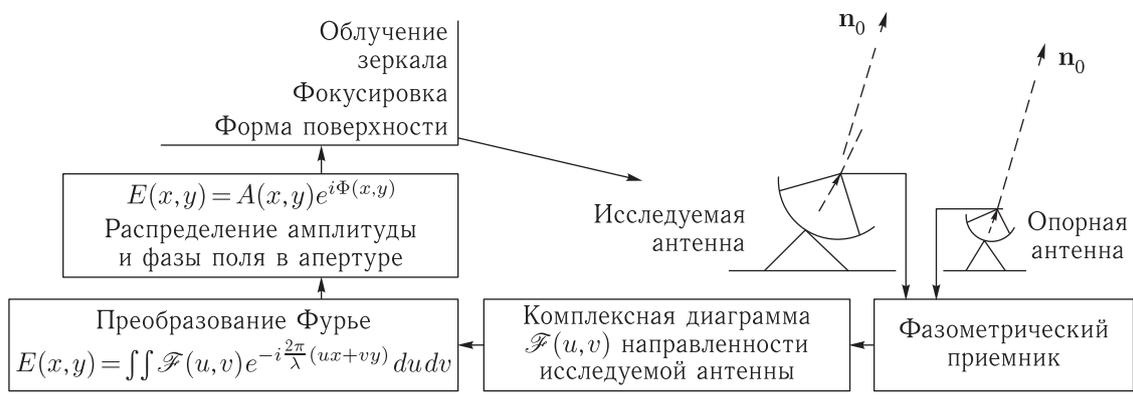


Рис. 2

дальним сигналам. Во втором — измерения проводятся лишь по узкополосным сигналам ИСЗ.

По измеренной двумерной комплексной ДН антенны $F(u, v)$, используя преобразование Фурье, можно восстановить распределение поля в апертуре $E(x, y)$ (или распределение токов по поверхности зеркала). Основанием для этого являются известные соотношения, связывающие поле антенны в дальней зоне с распределением поля в ее апертуре или с распределением токов на поверхности зеркала.

Восстановленное распределение поля в апертуре может быть использовано для анализа дефектов облучающей и зеркальной систем антенны. При этом преобразование полей зеркальной системой антенны рассматривается в приближении геометрической оптики. Например, по отклонениям $\Delta\Phi(x, y)$ фазы поля в апертуре могут быть определены локальные смещения ΔS соответствующего участка параболоида с фокусным расстоянием F . Для малых отклонений

$$\begin{aligned} \Delta S(x, y) &= \frac{\lambda}{4\pi \cos \psi} \Delta\Phi(x, y) = \\ &= \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{1 + \frac{x^2 + y^2}{4F^2}} \Delta\Phi(x, y). \end{aligned} \quad (6)$$

Методики радиоголографических измерений

Реализация высокоточных радиоголографических измерений на крупных антенных системах требует, помимо специальной аппаратуры, разработки полностью автоматизированных методик измерений.

Как уже отмечалось, радиоголографические измерения могут быть выполнены по сигналам есте-

ственных радиоисточников, а также по сигналам геостационарных ИСЗ. Очевидно, что для восстановления карты зеркала с высоким разрешением предпочтительнее использовать при измерениях мощные сигналы ИСЗ. Однако угол места наблюдения геостационарных спутников ограничен. Для крупных российских радиотелескопов наблюдаемый угол места ИСЗ не превышает 25° – 35° . Следовательно, исследование гравитационных деформаций зеркал, возникающих при более высоких углах, может быть выполнено только по естественным радиоисточникам. То обстоятельство, что такие деформации имеют, как правило, средне- и крупномасштабный характер, позволяет использовать для их измерений более слабые сигналы и восстанавливать поле в апертуре с меньшим разрешением, чем это требуется для получения карты положений щитов. Для полного исследования разного рода деформаций рефлектора целесообразно сочетать измерения по ИСЗ и по радиоисточникам.

Частота, на которой выполняются голографические измерения, определяется требуемой точностью восстановления формы зеркала. Как правило, чем меньше длина волны, тем выше точность измерения деформаций. Однако с ростом частоты возрастают технические сложности реализации фазовых измерений при больших расстояниях между антеннами. Кроме того, при измерениях по ИСЗ выбор частоты ограничен имеющимися на спутниках каналами. На многих геостационарных ИСЗ имеется по несколько мощных связных каналов в диапазонах 4 и 11 ГГц, поэтому значительное число голографических измерений выполняются именно на этих частотах. В диапазоне 11 ГГц

при реализации точности фазовых измерений около $1^\circ\text{--}3^\circ$ достижима точность восстановления формы поверхности порядка 40–100 мкм, чего на практике вполне достаточно.

Измерение ДН выполняется в отдельных точках (угловых направлениях) u_n, v_m ограниченного сектора сканирования. При этом соотношение для расчета поля в апертуре принимает вид дискретного преобразования Фурье (ДПФ):

$$E(x, y) = \sum_n \sum_m F(u_n, v_m) \exp(-i2\pi(u_n x + v_m y)/\lambda). \quad (7)$$

Если реализуется растровое сканирование ДН с записью данных в сетке координат $u_n = u_0 + \Delta u \times n, n = 0, 1, \dots, N - 1; v_m = v_0 + \Delta v \cdot m, m = 0, 1, \dots, M - 1$, то для восстановления поля в апертуре может быть использован алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), который существенно сокращает время обработки. Однако следует иметь в виду, что по алгоритму БПФ расчет поля в апертуре производится в ортогональной сетке координат $x_k = x_0 + \Delta x \cdot k, k = 0, 1, \dots, N - 1, y_l = y_0 + \Delta y \cdot l, l = 0, 1, \dots, M - 1$ с фиксированным дискретом $\Delta x = \lambda/(\Delta u \cdot N), \Delta y = \lambda/(\Delta v \cdot M)$. Подобная сетка может оказаться неприемлемой для расчета карты смещений регулировочных узлов щитов зеркала, имеющих полярную симметрию. Интерполяция данных из одной сетки координат в другую может вносить дополнительную погрешность. По этой причине может оказаться предпочтительнее использование алгоритма ДПФ.

Размер сектора измерения ДН $\theta_{\text{изм}}$ определяется требуемым разрешением поля в апертуре Δx : $\sin \theta_{\text{изм}} \sim \Delta u \cdot N \geq \lambda/\Delta x$. К примеру, для реализации разрешения $\Delta x \approx 1$ м угловой сектор измерений должен составлять около $\pm 1^\circ$ и $\pm 2,5^\circ$ в диапазоне частот 11 ГГц и 4 ГГц соответственно. Дискрет измерения ДН зависит от размера области восстановления поля в апертуре и должен удовлетворять условию $\Delta u < \lambda/D$. Общий объем массива измеряемых данных должен соответствовать объему восстанавливаемых значений. Например, для восстановления поля в апертуре 70-метровой антенны с разрешением около 1 м требуется измерить не менее $70 \times 70 \approx 5000$ комплексных значений ДН. Реально для исключения влияния краевых эффек-

тов и повышения отношения сигнал/шум измеряются гораздо большие массивы.

Значительные объемы измеряемых массивов ДН определяют большую продолжительность голографических измерений. Для уменьшения влияния на измеряемые характеристики внешних возмущающих факторов желательно, чтобы длительность сеанса не превышала нескольких часов. Измерения с целью определения карты зеркала для последующей его регулировки проводятся обычно в ночное время в пасмурную безветренную погоду. При большой продолжительности измерений медленные изменения (дрейфы) параметров аппаратуры, трактов и сигналов могут существенно повлиять на точность. Поэтому серьезное внимание должно уделяться организации калибровок. При голографических измерениях по ИСЗ калибровки выполняются с целью контроля не только медленных изменений уровней сигналов в трактах комплекса, но также и изменений угловых координат ИСЗ, обусловленных его суточным дрейфом.

Экспериментальные результаты

На рис. 3 показано сечение ДН 25-метровой антенны КТНА200, измеренное на частоте 8,4 ГГц по сигналу радиисточника ЗС405. На рис. 4 и 5 показаны соответственно азимутальное и угломестное сечения ДН этой же антенны, измеренные на частоте 3,7 ГГц по сигналу ИСЗ. На рис. 6 и 7 представлены аналогичные результаты, полученные на частоте 11,5 ГГц.

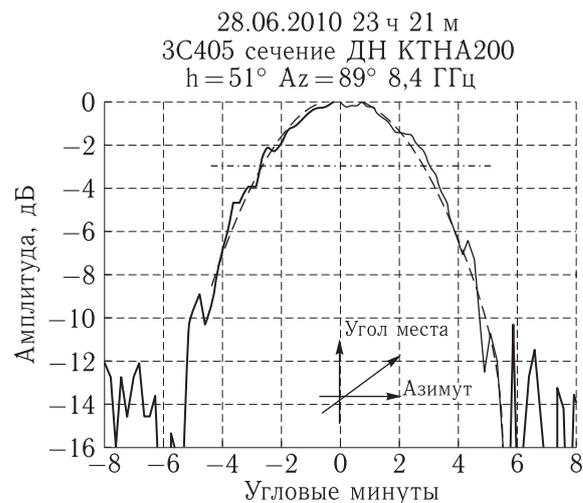


Рис. 3

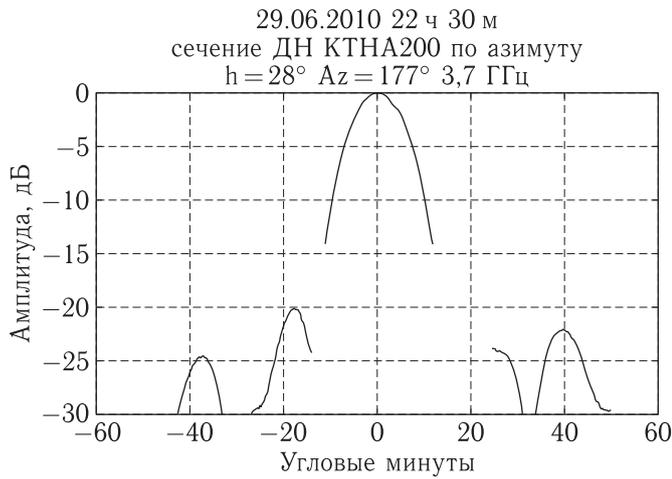


Рис. 4



Рис. 5

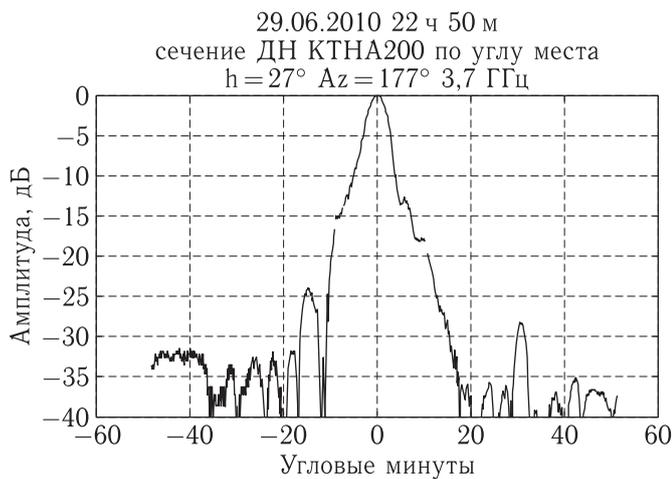


Рис. 6

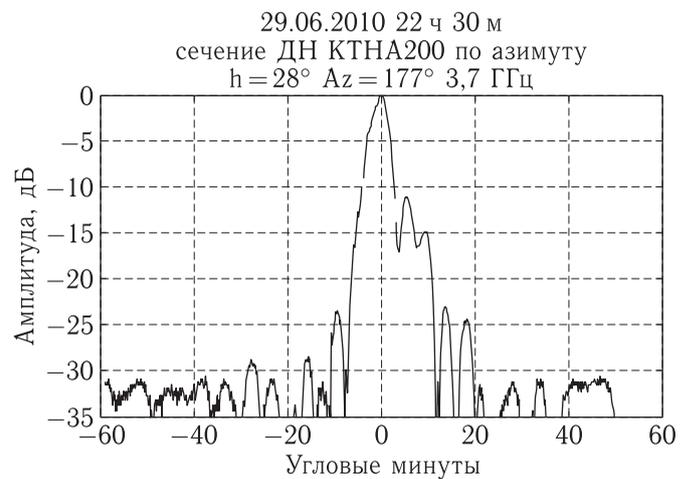


Рис. 7

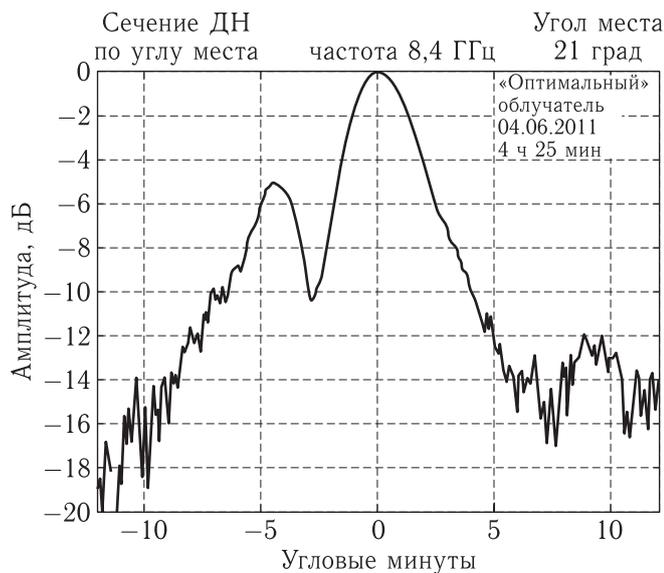


Рис. 8

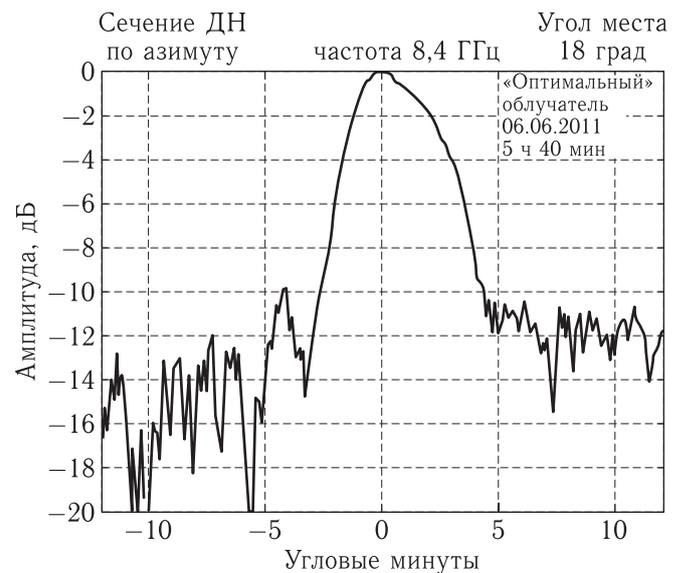


Рис. 9

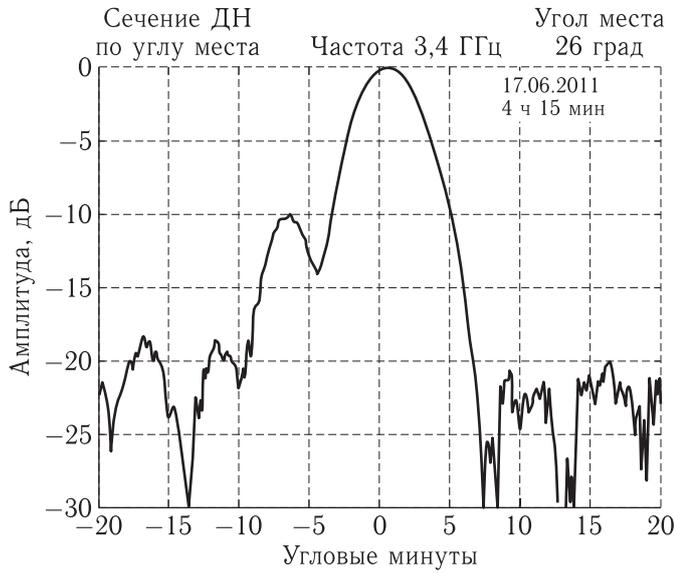


Рис. 10

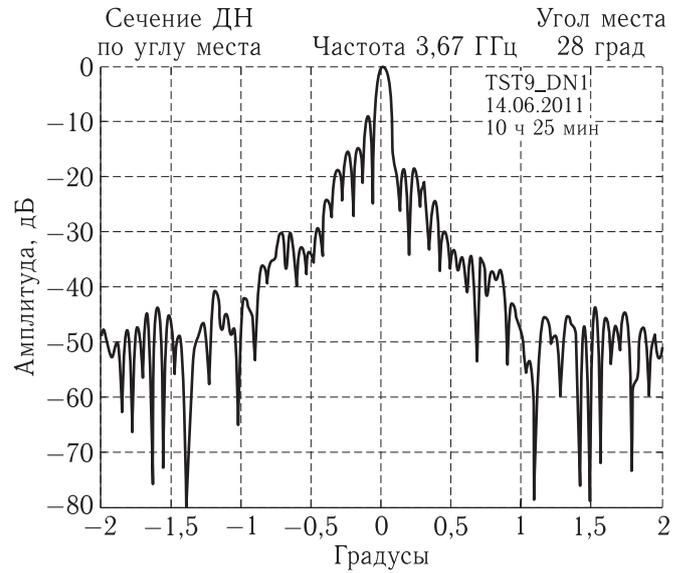


Рис. 11

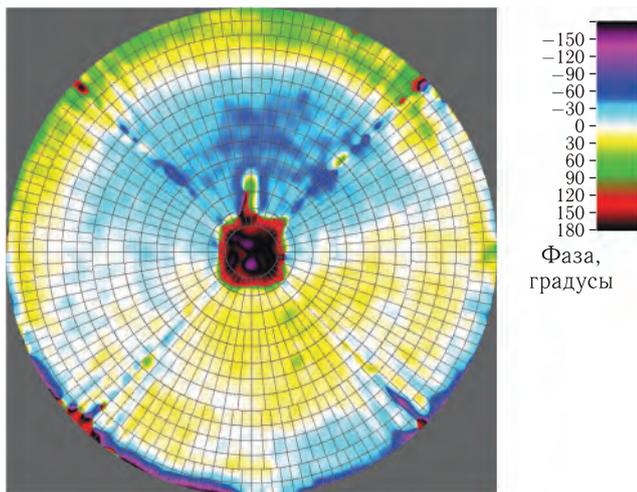


Рис. 12

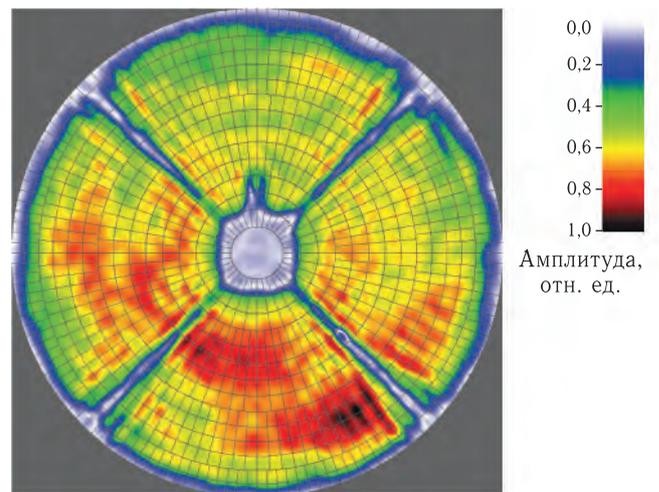


Рис. 13

В представленных угломестных сечениях ДН заметна несимметрия первых боковых лепестков, особенно на более высокой частоте. Наиболее вероятной причиной этого является смещение контррефлектора антенны в вертикальной плоскости.

На рис. 8 и 9 представлены угломестное и азимутальное сечения ДН антенны П2500, измеренные радиоастрономическим способом на частоте 8,4 ГГц по источнику ЗС405. На рис. 10 и 11 показано угломестное сечение ДН, измеренное на частоте 3,4 ГГц по сигналу источника ЗС405 и ИСЗ.

В представленных угломестных сечениях ДН также хорошо видна несимметрия первых боковых

лепестков, обусловленная смещением контррефлектора антенны.

На рис. 12 и 13 показаны распределения фазы и амплитуды поля в апертуре антенны П2500 на частоте 3,4 ГГц, восстановленные радиоголографическим методом по сигналам ИСЗ. Фазовое распределение демонстрирует наличие кубических искажений в вертикальной плоскости, обусловленных ошибками установки контррефлектора.

Заключение

Разработаны методики измерения по сигналам внеземных радиоисточников характеристик

больших полноповоротных зеркальных антенн наземных комплексов управления. Традиционным радиоастрономическим способом измеряются такие параметры, как коэффициент усиления (эффективная площадь), шумовая температура, ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню минус 3 дБ; несовмещение электрической и геометрической осей антенны (разъюстировка). При необходимости дополнительной юстировки зеркальной системы целесообразно проводить радиолографические измерения с восстановлением распределения поля в апертуре антенны. С использованием разработанных методик были выполнены измерения характеристик антенн П2500 и КТНА200 в нескольких частотных диапазонах. В ближайшее время планируется проведение измерений еще на нескольких антеннах — КТНА-200, П-200П, П-200С, П-400.

Список литературы

1. *Кузьмин А. Д., Саломонович А. Е.* Радиоастрономические методы измерений параметров антенн. М.: Сов. радио, 1964. 184 с.
2. *Цейтлин Н. М.* Антенная техника и радиоастрономия. М: Сов. радио, 1976. 350 с.
3. *Vaars J. W. M.* The measurement of large antennas with cosmic radio sources // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1973, vol. AP-21, n. 4. P. 461–474.
4. *Perley R. A., Butler B. J.* An accurate flux density scale from 1 to 50 GHz // Astrophysical journal supplement series, 2013, 204. P. 19–38.
5. *Vaars J. W. M.* History of flux-density calibration in radio astronomy // Radio science bulletin, 2014, n. 348. P. 46–66.
6. *Калинин А. В.* Радиолографический метод измерения характеристик антенн радиотелескопов // Антенны, 1998, № 2(41). С. 51–67.