

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 621.396 EDN QENHFA

**Методики и результаты экспериментальных исследований
радиоастрономическим способом
характеристик крупногабаритных зеркальных антенн
наземных комплексов космической связи**

А. В. Калинин, д. т. н., с. н. с., kalinin@rf.unn.ru

*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

Н. А. Дугин, д. ф.-м. н., с. н. с., dugin@nirfi.unn.ru

*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

Е. Е. Калинина, kalinina@nirfi.unn.ru

*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

С. П. Моисеев, moiseev@rf.unn.ru

*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

В. М. Ватутин, д. т. н., профессор, vatutin_vm@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. А. Ежов, д. т. н., профессор, ezhov_sa@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. В. Щербаков, shcherbakov_mv@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Поляков, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются особенности методик измерений радиоастрономическим методом характеристик наземных крупногабаритных зеркальных полноповоротных антенн космической связи в разных частотных диапазонах от L\S до Ka. Анализируются результаты экспериментальных исследований основных радиотехнических характеристик (коэффициента усиления, диаграммы направленности по мощности, шумовой температуры) нескольких действующих антенн. Приводятся примеры эффективности применения разработанных методик и аппаратуры для дополнительной юстировки зеркальных систем антенн с целью повышения их усиления на высоких частотах.

Ключевые слова: космическая связь, наземная зеркальная антенна, коэффициент усиления, диаграмма направленности, радиоастрономический способ измерений

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Methods and Results of Experimental Studies of the Characteristics of Large-Sized Mirror Antennas of Ground-Based Space Communications Complexes Using the Radio Astronomy Method

A. V. Kalinin, *Dr. Sci. (Engineering), senior researcher, kalinin@rf.unn.ru*
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

N. A. Dugin, *Dr. Sci. (Engineering), senior researcher, dugin@nirfi.unn.ru*
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

E. E. Kalinina, *kalinina@nirfi.unn.ru*
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

S. P. Moiseev, *moiseev@rf.unn.ru*
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

V. M. Vatutin, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., vatutin_vm@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. A. Ezhov, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., ezhov_sa@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M. V. Scherbakov, *shcherbakov_mv@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. V. Polyakov, *Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. This article explores the features of methods for measuring the characteristics of ground-based large-sized mirror full-rotation antennas for space communications in different frequency ranges from L\ S to Ka. The results of experimental studies of the main radio technical characteristics (gain, power radiation pattern, noise temperature) of several operating antennas are analyzed. Examples are given of the effectiveness of using the developed techniques and equipment for additional adjustment of mirror antenna systems in order to increase their gain at high frequencies.

Keywords: space communications, ground-based reflector antenna, gain, radiation pattern, radio-astronomical measurement method

Введение

Радиоастрономические методы антенных измерений [1–4] позволяют экспериментально исследовать основные радиотехнические характеристики крупногабаритных антенн, используемых в дальней космической связи и радиоастрономии, такие как диаграмма направленности (ДН) по мощности, коэффициент усиления (КУ), эффективная площадь ($S_{эфф}$), а также шумовая температура ($T_{ш}$) и некоторые другие.

«Методы измерения ДН, КУ и $S_{эфф}$ 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» [5].

«Излучение естественных радиоисточников имеет шумовой характер и непрерывный спектр, что дает возможность экспериментально исследовать характеристики антенн на их рабочих частотах» [6]. Все естественные внеземные радиоисточники находятся в дальней зоне антенн любых размеров, в то время как в измерениях по наземному генератору это условие, как правило, невозможно реализовать для крупных антенн.

Еще одно преимущество радиоастрономического метода заключается в том, что измерения параметров антенн могут проводиться непосредственно на объекте эксплуатации и при нахождении радиоисточника на разных углах места, практически от горизонта до зенита, и на разных азимутах.

«Основные ограничения радиоастрономических методов антенных измерений обусловлены относительной слабостью сигналов естественных радиоисточников. Для измерений необходимо использовать высокочувствительные приемники слабых шумовых сигналов (радиометры)» [6]. В настоящее время подобные измерительные приемники отечественной промышленностью не выпускаются.

В предыдущих работах авторов [5, 7, 8] рассматривались вопросы разработки методики и создания макетов высокочувствительных приемников для измерения характеристик антенн наземных комплексов космической связи. В данной работе

рассмотрены некоторые особенности методик и основные результаты измерений, выполненных на ряде однотипных крупногабаритных антенн.

Схема метода и основные соотношения

На рис. 1 представлена упрощенная блок-схема радиоастрономического метода измерения ДН и КУ антенны (А) по сигналам внеземного радиоисточника (S).

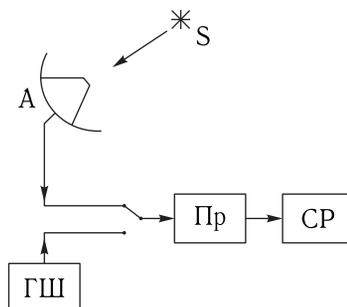


Рис. 1.

Метод реализуется с использованием высокочувствительного приемника (Пр), измеряющего уровень мощности на выходе антенны, эталонного генератора шума (ГШ) и системы регистрации (СР).

Угловое распределение мощности излучения протяженных внеземных радиоисточников характеризуется яркостной температурой $T_{я}$, измеряемой в кельвинах (К). Мощность сигналов от радиоисточников, ограниченных угловыми размерами $\Omega_{и} \ll \pi$, определяется спектральной плотностью потока S_{ν} , измеряемой в Вт/(м²Гц) или янских, $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Гц})$

$$S_{\nu} = \frac{2k}{\lambda^2} \int_{\Omega_{и}} T_{я}(\theta, \phi) d\Omega, \quad (1)$$

где S_{ν} — спектральная плотность потока мощности радиоисточника на рабочей частоте, $\Omega_{и}$ — телесный угол, занимаемый источником, $T_{я}(\theta, \phi)$ — распределение яркостной температуры по источнику, λ — длина волны, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Вт}/\text{град} \cdot \text{Гц}$ — постоянная Больцмана.

При наведении антенны максимумом ДН на радиоисточник с угловыми размерами, много

меньшими ширины лепестка ДН («точечный» источник), на выходе антенны возникает приращение мощности сигнала, которое в радиоастрономии принято характеризовать изменением эквивалентной шумовой температуры антенны ΔT_a относительно приема фонового излучения «опорной» области» [6]:

$$\Delta T_a = \frac{\lambda^2}{8\pi k} S_\nu G \frac{1}{K_{\text{атм}}}, \quad (2)$$

где G — КУ антенны в максимуме ДН, а множителем $K_{\text{атм}}$ вводится коррекция на поглощение сигнала в атмосфере, существенное в диапазоне частот выше 3 ГГц и оцениваемое как $K_{\text{атм}} = \exp(\gamma_i)$, где $\gamma_i = \Gamma_0 \csc h$, Γ_0 — полное вертикальное поглощение на рабочей частоте, h — угол места радиоисточника.

При известной величине спектральной плотности потока радиоисточника из (2) может быть определен КУ антенны:

$$G = \frac{8\pi k}{\lambda^2} \frac{\Delta T_a}{S_\nu} K_{\text{атм}}. \quad (3)$$

Усиление антенны может также характеризоваться ее эффективной площадью $S_{\text{эфф}}$:

$$S_{\text{эфф}} \eta = \frac{\lambda^2}{4\pi} G = \frac{2k}{S_\nu} \Delta T_a K_{\text{атм}}, \quad (4)$$

и коэффициентом использования поверхности (КИП) — отношением $S_{\text{эфф}}$ к геометрической площади апертуры.

КИП антенны характеризует уменьшение усиления антенны по сравнению с его максимально возможным значением, вызванное различными причинами. Для зеркальных антенн это могут быть неоптимальность облучения зеркала, разного рода расфокусировки и пр. На высоких частотах снижение усиления антенны может быть обусловлено неровностями отражающих поверхностей зеркал. Соответствующий парциальный КИП оценивается по т. н. формуле Рузе [9]:

$$\text{КИП}_\sigma = e^{-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2}, \quad (5)$$

где σ — среднеквадратичная неровность зеркал.

Из соотношения (2) очевидно, что при смещении антенны от направления на используемый радиоисточник приращение антенной температуры

изменяется пропорционально ДН антенны по мощности. Соответственно для измерения ДН проводится сканирование антенны относительно перемещающегося по небесной сфере источника. Полученные экспериментальные значения ширины главного лепестка ДН $\Delta\theta_{0,5}$ могут сравниваться с теоретическими оценками, проводимыми по формуле [9]:

$$\Delta\theta_{0,5} [\text{град}] \approx (65-70) \frac{\lambda}{D}, \quad (6)$$

где D — диаметр зеркала антенны.

Особенности методик измерений по наиболее мощным радиоисточникам

Для антенн с относительно небольшими КУ измерения могут быть выполнены лишь по наиболее интенсивным радиоисточникам — остаткам сверхновых Кассиопея А (ЗС461) и Телец А (ЗС144), радиогалактике Лебедь А (ЗС405) и некоторым другим, угловые размеры которых составляют единицы минут. При измерении характеристик таких антенн в верхней части СВЧ-диапазона (X , K_u , K_a) ширина их ДН становится сравнима или примерно равна угловым размерам источников. В этом случае возникает необходимость введения дополнительной коррекции на угловые размеры радиоисточника.

Если угловые размеры источника $\Omega_{\text{ист}}$ сравнимы с шириной ДН антенны, соотношение (2) принимает вид:

$$\Delta T_a = \frac{1}{4\pi} G \frac{1}{K_{\text{атм}}} \int_{\Omega_i} F(\theta, \varphi) T_{\text{ярк}}(\theta, \varphi) d\Omega, \quad (7)$$

где $F(\theta, \varphi)$ — нормированная ДН антенны по мощности.

Очевидно, что при этом приращение мощности на выходе антенны будет несколько меньше, чем при приеме всего излучения с таким же потоком S_ν через главный максимум ДН. В соответствии с соотношением (7) изменяются формулы для расчета КУ антенны. На практике в формулы (3) и (4) вводится корректирующий множитель, рассчитываемый по известным угловым распределениям яркостной температуры источника и ДН

антенны, и определение КУ и $S_{\text{эфф}}$ антенны производится по формулам

$$G = \frac{8\pi k}{\lambda^2} \frac{\Delta T_a}{S_\nu} K_{\text{атм}} \cdot K_{\text{ист}}, \quad (8)$$

$$S_{\text{эфф}} \eta = \frac{2k}{S_\nu} \Delta T_a K_{\text{атм}} \cdot K_{\text{ист}},$$

где коэффициент коррекции $K_{\text{ист}}$ рассчитывается по формуле

$$K_{\text{ист}} = \frac{\int_{\Omega_{\text{и}}} T_{\text{я}}(\theta, \varphi) d\theta d\varphi}{\int_{\Omega_{\text{и}}} T_{\text{я}}(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) d\theta d\varphi}. \quad (9)$$

Для слабонаправленных антенн и некоторых упрощенных моделей распределений $T_{\text{я}}(\theta, \varphi)$ значение коэффициента $K_{\text{ист}}$ может быть оценено по формулам из работ [3, 4, 10]. Для более точного расчета корректирующего множителя необходимо знание ДН антенны в пределах главного лепестка, а также карты распределения радиояркости по источнику на рабочей частоте. Погрешности измерений КУ, обусловленные неточным заданием параметров радиисточника, могут составлять единицы процентов и более при ширине луча ДН антенны, равной или превышающей $\Omega_{\text{и}}$.

Еще одной причиной ошибок определения КУ могут стать некорректные данные о современных значениях плотностей потоков источников S_ν на рабочих частотах.

Во второй половине прошлого века в результате многолетних наблюдений разных групп отечественных и зарубежных радиоастрономов был получен большой объем данных об интенсивности излучения основных дискретных радиисточников [10–14]. Составлялись каталоги с указанием плотностей потоков этих источников на разных частотах для исследования стабильности потоков во времени и определения спектрального индекса (зависимости потока от частоты). Было, в частности, установлено, что излучение радиогалактики Лебедь А является наиболее стабильным во времени и для антенных измерений можно пользоваться старыми данными о величинах S_ν . Кассиопея А и Телец А имеют заметный «вековой ход» — уменьшение потока со временем.

К сожалению, в последние десятилетия в нашей стране значительно уменьшился объем регулярных измерений потоков наиболее мощных радиисточников. Интерполяция данных о потоках на современную эпоху с учетом «векового хода» за период 15–20 лет может приводить к значительным погрешностям определения КУ антенн.

Для уменьшения погрешностей необходимо проводить измерения КУ не по одному, а по нескольким радиисточникам.

Результаты измерений характеристик антенн

С использованием разработанных методик и макетов приемников [5, 8] были выполнены экспериментальные исследования основных радиотехнических характеристик нескольких однотипных крупногабаритных зеркальных антенн наземных комплексов космической связи в разных частотных диапазонах.

На рис. 2 представлены результаты измерений эффективной площади одной из антенн в Ку- и Ка-частотных диапазонах по трем радиисточникам.

Приведенный результат демонстрирует, что значения $S_{\text{эфф}}$, определенные по источникам 3С461

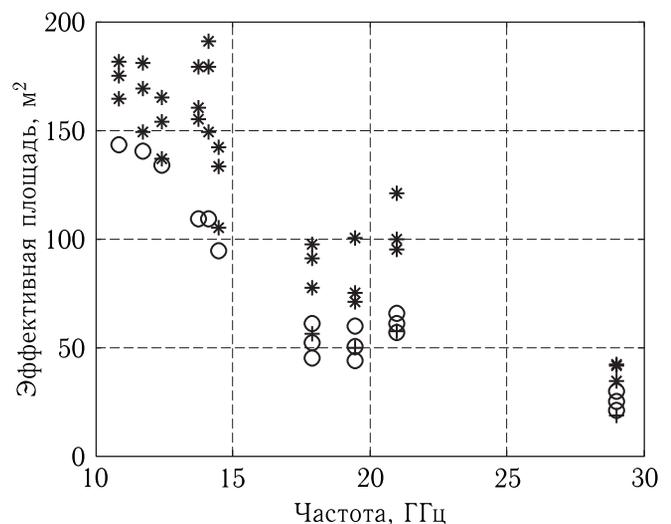


Рис. 2. Сравнение результатов определения эффективной площади антенны в Ку- и Ка-частотных диапазонах по трем радиисточникам: «*» — 3С405, «O» — 3С461, «+» — 3С144

и ЗС144 с использованием поправочных коэффициентов $K_{ист}$, меньше значений, полученных по ЗС405. Это связано с тем, что в данном частотном диапазоне ширина лепестка ДН становится равна или меньше угловых размеров этих источников и моделирование дает заниженную оценку коэффициентов $K_{ист}$. Поэтому при анализе характеристик этой антенны в качестве основных использовались данные, полученные по радиисточнику ЗС405. Результаты измерений по ЗС161 и ЗС144 рассматривались как вспомогательные.

На рис. 3 показана аппроксимация методом наименьших квадратов значений $S_{эфф}$, полученных по ЗС405, зависимостью от частоты, задаваемой формулой (5).

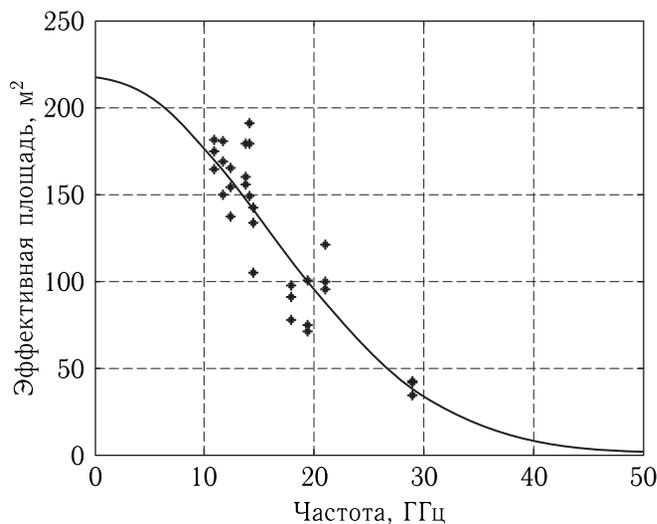


Рис. 3. Результаты измерений $S_{эфф}$ по радиисточнику ЗС405 в сравнении с аппроксимацией МНК зависимостью от частоты по формуле Рузе

По результатам аппроксимации значение среднеквадратичной неровности σ в формуле (5) составило 1,09 мм. Эта величина соответствует данным обследования зеркал этой антенны методами лазерной дальнометрии, выполненного в 2010 г. специалистами ООО «Промышленная геодезия».

Измерения параметров ДН той же антенны проводились по радиисточнику ЗС405, а также по сигналам геостационарных ИСЗ на отдельных частотах. На рис. 4 показана полученная по результатам измерений зависимость от частоты ширины главного лепестка ДН по уровню -3 дБ в сравне-

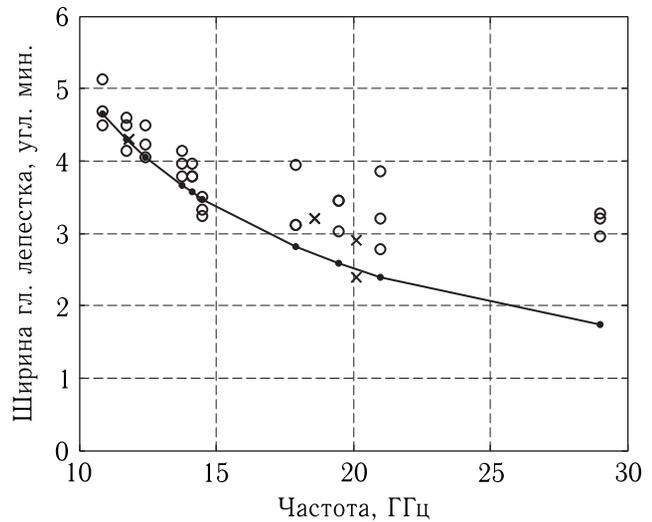


Рис. 4. Результаты измерения ширины главного лепестка ДН по уровню -3 дБ в сравнении с теоретической зависимостью от частоты, рассчитанной по формуле (6); « \circ » — ЗС405, « \times » — ИСЗ

нии с теоретической зависимостью, задаваемой формулой (6) при численном коэффициенте, равном 70.

Рис. 4 демонстрирует, что в Ку-диапазоне результаты эксперимента соответствуют теоретическим оценкам. В Ка-диапазоне с ростом частоты не происходит ожидаемого сужения лепестка ДН, что может быть объяснено влиянием неровностей зеркал.

На рис. 5 представлены результаты измерений по трем радиисточникам в С- и Х-частотных

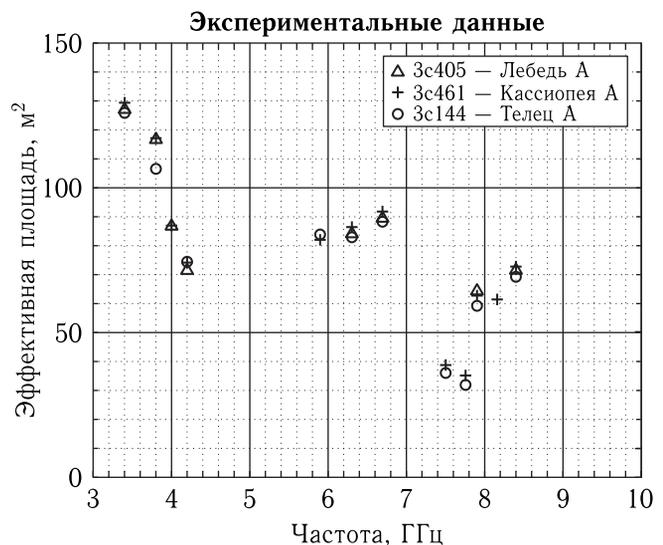


Рис. 5. Результаты измерения $S_{эфф}$ в С- и Х-диапазонах по источникам ЗС405 (Δ), ЗС461 (+) и ЗС144 (\circ)

диапазонах эффективной площади другой антенны с такими же размерами зеркал.

Приведенные результаты демонстрируют, что значения эффективной площади этой антенны, полученные по разным радиоисточникам, совпадают в пределах точности измерений. Кроме того, полученные результаты показывают, что на всех рабочих частотах у этой антенны эффективная площадь значительно меньше ожидаемой (около 200 м^2). Это не может быть объяснено неровностями зеркал, поскольку у этой антенны неровности отражающих

поверхностей имеют примерно такие же величины, как у предыдущей.

Измерения ДН этой антенны в С- и Х-диапазонах проводились по тем же радиоисточникам (ЗС405, ЗС461, ЗС144), а также на некоторых частотах по сигналам ИСЗ.

На рис. 6 и 7 приведены примеры сечений ДН на разных частотах, измеренных по геостационарному ИСЗ и по радиоисточнику ЗС405. Как видно на рисунках, ДН имеет глубокие нули, что свидетельствует о хорошей фокусировке зеркальной

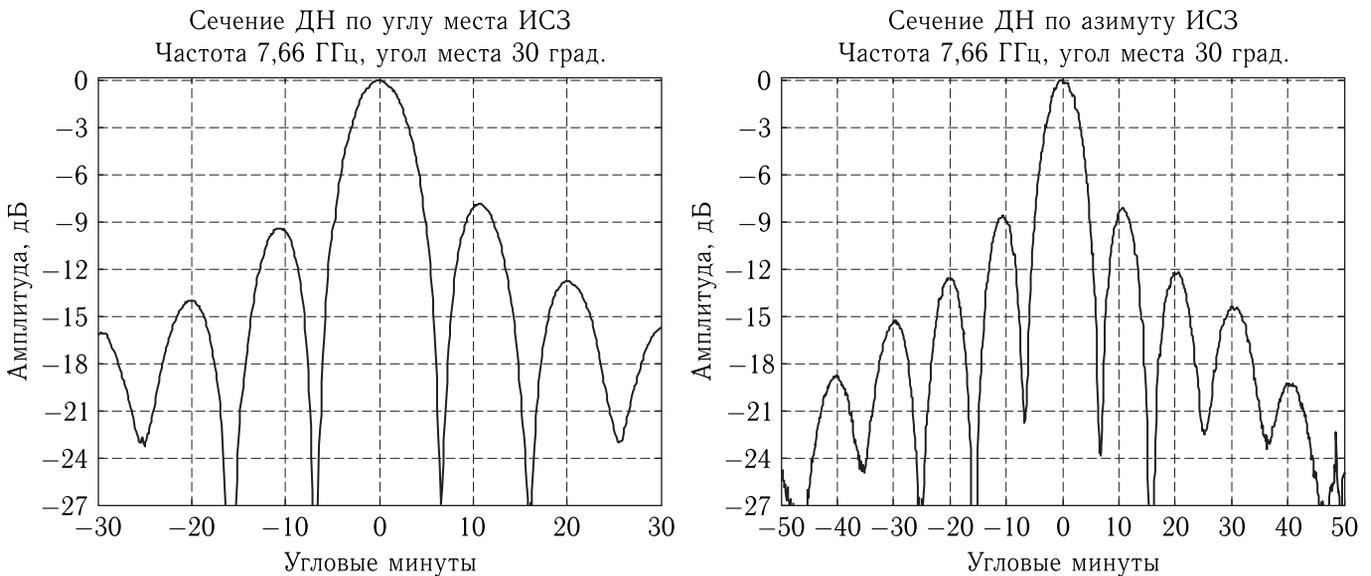


Рис. 6. Угломестное (слева) и азимутальное (справа) сечения ДН. Х-диапазон, частота 7,66 ГГц, ИСЗ

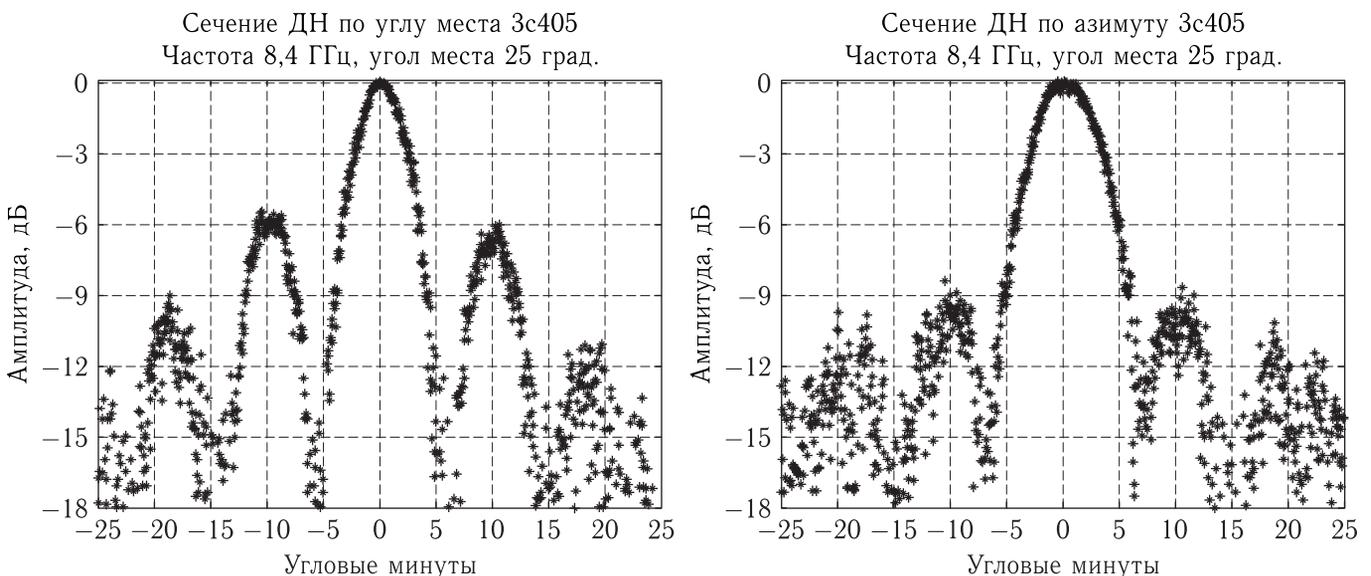


Рис. 7. Угломестное (слева) и азимутальное (справа) сечения ДН. Х-диапазон, частота 8,4 ГГц, ЗС405

системы. Вместе с этим во всех сечениях заметен существенно повышенный уровень боковых лепестков. Уровень первого бокового лепестка составляет около -6 – -9 дБ, тогда как, согласно теории [5], уровень первого бокового лепестка должен составлять около -17 дБ и ниже.

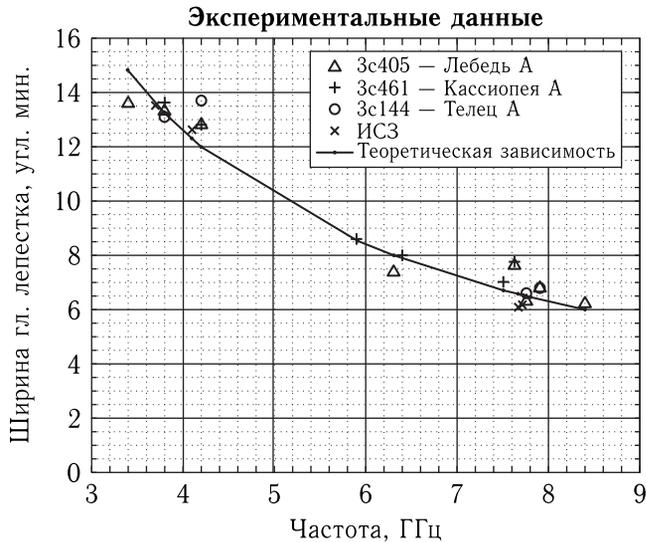


Рис. 8. Результаты измерения ширины главного лепестка ДН по уровню -3 дБ в сравнении с теоретической зависимостью от частоты, рассчитанной по формуле (6); « Δ » — ЗС405, «+» — ЗС461, « \circ » — ЗС144, « \times » — ИСЗ

На рис. 8 представлены результаты измерения ширины главного лепестка ДН на рабочих частотах по нескольким источникам в сравнении с теоретической зависимостью, рассчитанной по формуле (6) с коэффициентом 70. Рисунок демонстрирует, что ширина главного лепестка ДН этой антенны соответствует теоретическим значениям на всех рабочих частотах.

Приведенные результаты показывают, что данная антенна имеет недостаточное усиление и повышенный уровень боковых лепестков, но при этом ее ДН сформирована, имеет симметричную форму и глубокие минимумы, ширина лепестков соответствует теоретическим оценкам. Причиной этого может быть переоблучение основного зеркала, в результате которого по краю апертуры вместо необходимого спада амплитудного распределения образуется «кольцо» с повышенным значением амплитуды поля.

Методики радиоастрономических измерений могут при необходимости использоваться для до-

полнительной юстировки зеркал антенн. Приведем пример такой юстировки на третьей антенне, на которой проводились измерения в С- и Ku-частотных диапазонах.

Первые результаты измерений на этой антенне показали, что ее зеркальная система сильно расфокусирована и необходима дополнительная юстировка положения контррефлектора (КР). Расфокусировка проявлялась в искажении формы ДН, уширении ее главного лепестка, а также в значениях КУ и $S_{эфф}$ значительно меньше требуемых, особенно на высоких частотах.

Для улучшения характеристик антенны была выполнена серия измерений, направленных на определение оптимального положения КР и установку его в это положение — измерен КУ антенны в Ku-диапазоне при нескольких положениях КР вдоль фокальной оси.

Результаты измерений зависимости КУ (в относительных единицах) от положения КР представлены на рис. 9. Значению «0» по горизонтальной оси соответствует исходное положение КР, отрицательным значениям — смещение КР в направлении к основному зеркалу.

Измерения проводились по источникам ЗС405 и ЗС461 одновременно на двух частотах — 11,7 ГГц и 14,1 ГГц. Наиболее полный набор данных был получен на частоте 14,1 ГГц по радиоисточнику

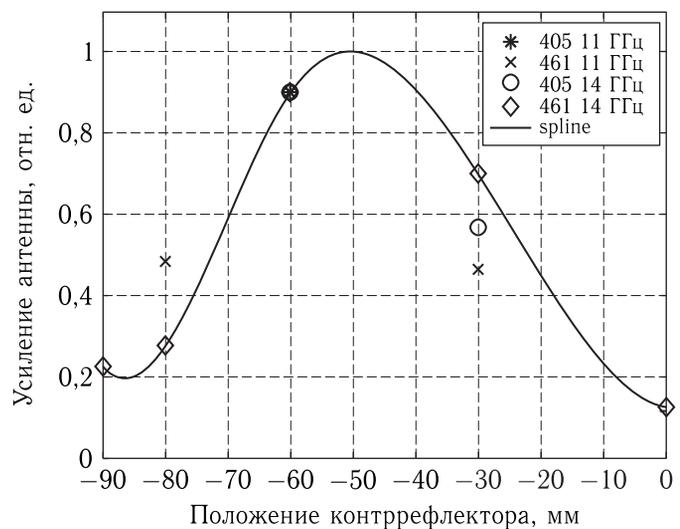


Рис. 9. Зависимость КУ антенны от положения КР вдоль фокальной оси, измеренная по источникам ЗС405 и ЗС461 на частотах 11,7 ГГц и 14,1 ГГц

ЗС461, для которого на рисунке приведена сплайновая интерполяция.

По полученным результатам в качестве оптимального было принято положение КР со смещением вдоль фокальной оси на -50 мм от исходного.

Эффективность выполненной юстировки КР может быть проиллюстрирована следующими результатами.

На рис. 10 и 11 приведены сравнения центральных сечений ДН, измеренных по сигналам ИСЗ

на рабочей частоте С-диапазона до и после коррекции положения КР.

На рис. 12 представлены двумерные распределения ДН антенны, измеренные по ИСЗ в Ки-диапазоне до и после коррекции положения КР.

В исходном положении КР ДН антенны не была сформирована в обоих частотных диапазонах. Ширина главного лепестка превышала расчетные значения, в Ки-диапазоне наблюдалось значительное раздвоение главного максимума. Коррекция

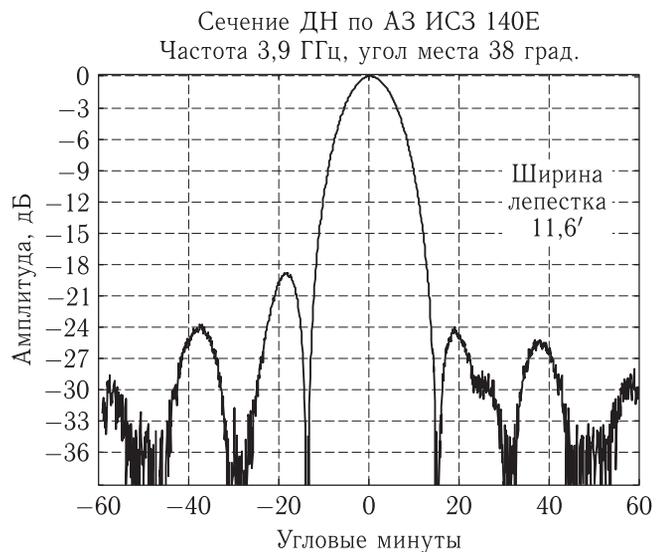
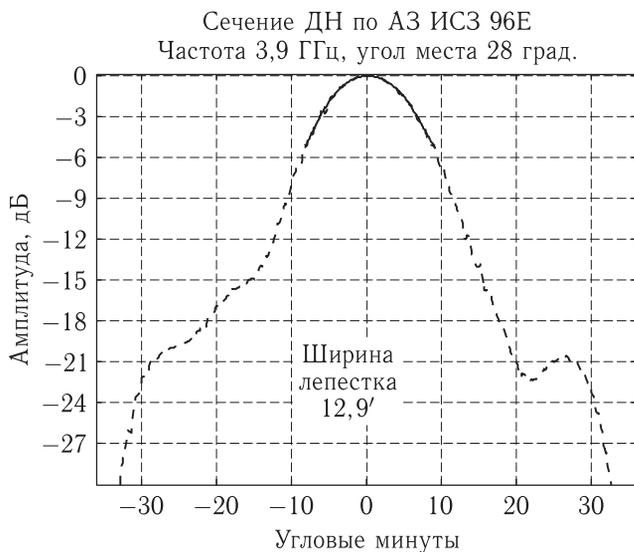


Рис. 10. Сечения ДН в азимутальной плоскости. Слева — до коррекции положения КР, справа — после коррекции. С-диапазон, частота 3,9 ГГц. ИСЗ

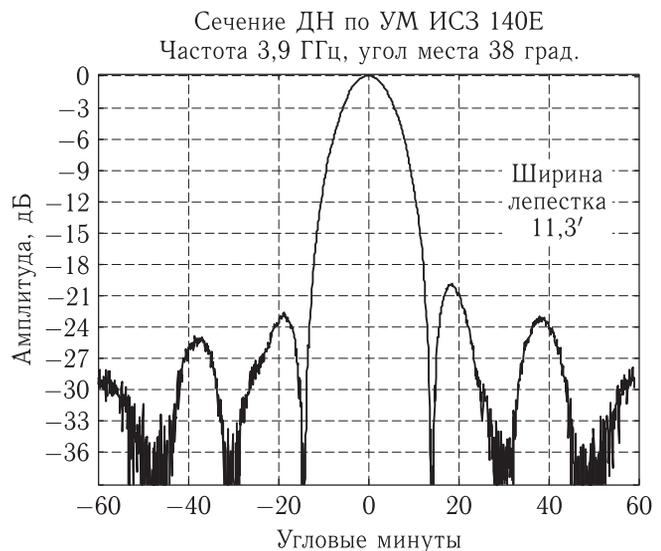
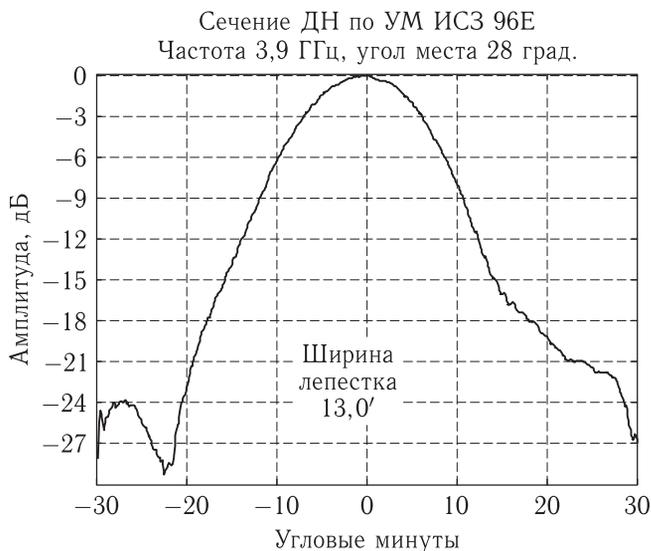


Рис. 11. Сечения ДН в угломестной плоскости. Слева — до коррекции положения КР, справа — после коррекции. С-диапазон, частота 3,9 ГГц. ИСЗ

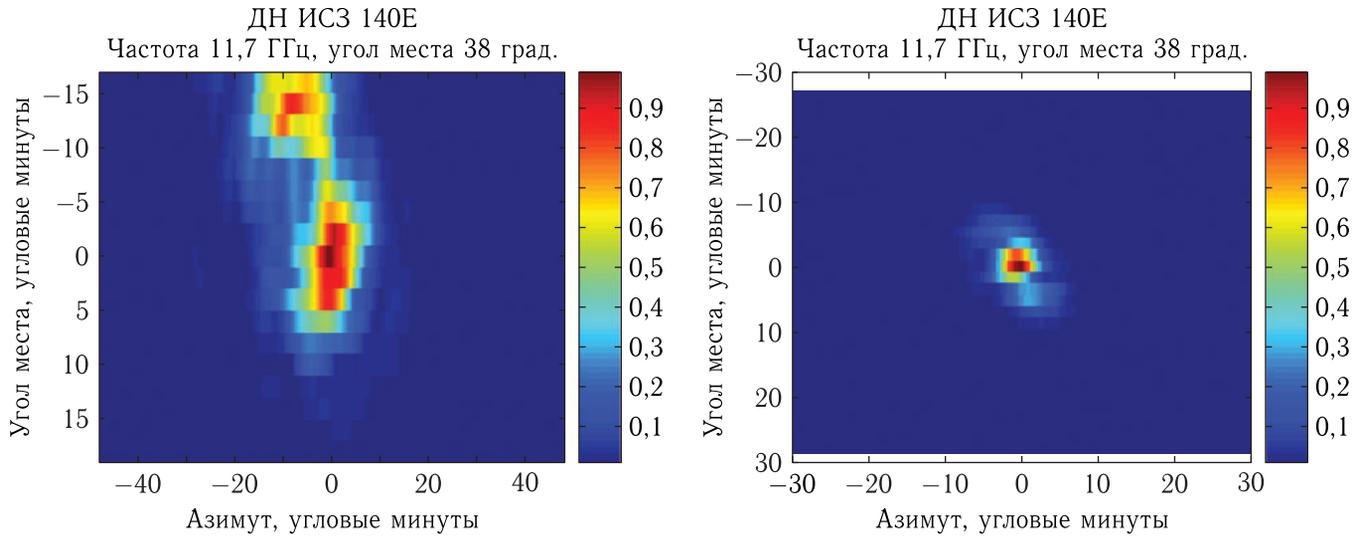


Рис. 12. Двумерная нормированная ДН антенны на частоте 11,7 ГГц. Слева — до коррекции положения КР, справа — после коррекции. Линейная цветовая шкала

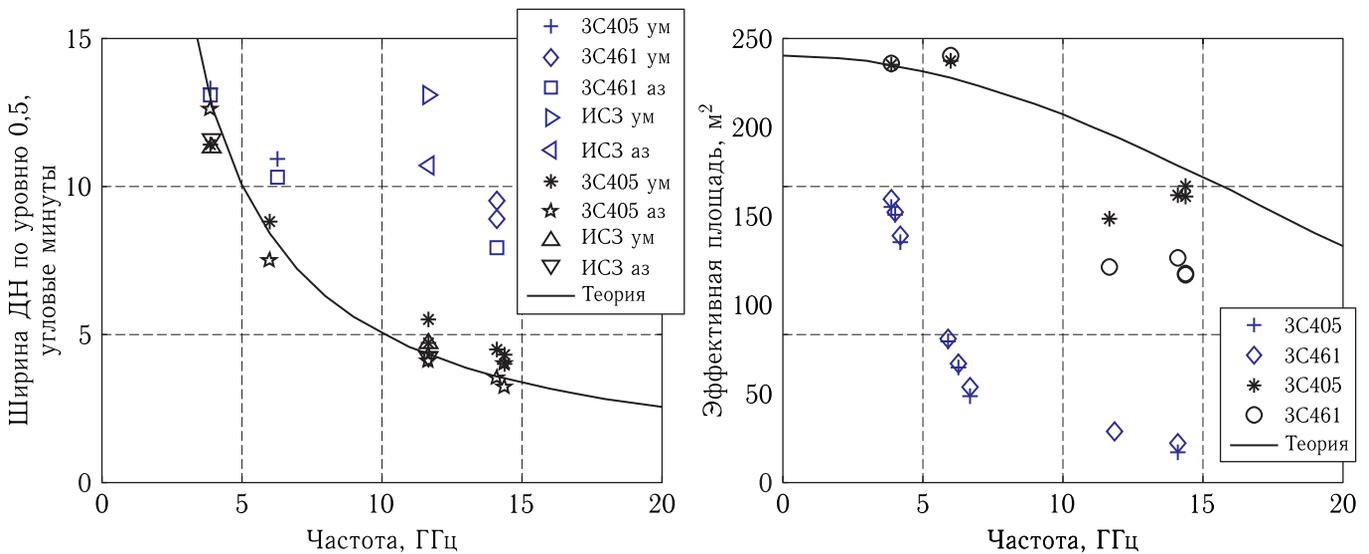


Рис. 13. Ширины главного лепестка ДН (слева) и $S_{эфф}$ (справа) в С- и Ки-диапазонах, измеренные по разным радиоисточникам. Синий цвет — до коррекции положения КР, черный — после коррекции

положения КР обеспечила существенное улучшение параметров главного и боковых лепестков в С-диапазоне и главного лепестка в Ки-диапазоне.

На рис. 13 представлены результаты измерений ширины главного лепестка ДН и $S_{эфф}$ в С- и Ки-частотных диапазонах по разным радиоисточникам. Синим цветом показаны данные, полученные до коррекции положения КР, черным цветом — после коррекции. Результаты измерения ДН представлены в сравнении с теоретической зависимостью ширины луча от частоты, рассчитанной

по формуле (6). Для значений $S_{эфф}$, измеренных по источнику 3С405 после коррекции положения КР, показана аппроксимация МНК по формуле (5).

Результаты, представленные на рис. 13, дополнительно демонстрируют эффективность проведенной юстировки антенны. После коррекции положения КР ширина лепестка ДН соответствует расчетным значениям во всем рабочем диапазоне частот антенны. Усиление антенны после юстировки увеличено в разы, на верхних частотах Ки-диапазона — примерно на порядок.

С точки зрения методики измерений следует отметить совпадение результатов измерения $S_{эфф}$ по разным источникам при исходном положении КР, когда ширина лепестка ДН антенны превышала угловые размеры всех использованных радиоисточников, и существенное расхождение данных по $S_{эфф}$, полученных в Ки-диапазоне по ЗС405 и ЗС461 после юстировки, когда ширина лепестка ДН антенны стала примерно равна угловым размерам ЗС461.

Совпадение результатов измерения усиления антенн по радиоисточникам ЗС405, ЗС461 и ЗС144 при относительно широких лепестках ДН свидетельствует о корректности использованных при обработке значениях их спектральных плотностей потока мощности.

Заключение

С использованием разработанных ранее методик и аппаратуры выполнены измерения основных радиотехнических характеристик ряда крупногабаритных зеркальных антенн наземных комплексов космической связи в рабочих частотных диапазонах. Полученные результаты показали соответствие параметров антенн требуемым значениям и предоставили информацию для дальнейшей доработки их зеркальных и облучающих систем.

Работы выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект Н-029-0_2023-2025, мнемокод проекта FSWR-2023-0031.

Список литературы

1. *Троицкий В.С.* Радиоастрономические методы исследования антенн // Радиотехника и электроника, 1956, т. 1, №5. С. 601.
2. *Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е.* Радиоастрономические методы измерений параметров антенн. М.: Сов. радио, 1964. 184 с.
3. *Цейтлин Н.М.* Антенная техника и радиоастрономия. М: Сов. радио, 1976. 350 с.
4. *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.
5. *Калинин А.В., Дугин Н.А., Моисеев С.П., Поляков А.В., Ватулин В.М., Ивашина А.В.* Методы и методики экспериментального исследования радиотехнических характеристик антенн наземных комплексов управления // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, вып. 3. С. 52-64.
6. *Гавриленко В.Г., Калинин А.В.* Методы измерения характеристик антенн по сигналам внеземных радиоисточников: Электронное учебно-методическое пособие по дисциплине «Антенны и распространение радиоволн». Н. Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2012. 58 с.
7. *Калинин А.В., Калинин В.А., Егоров М.Н., Акулов А.Ю., Шишов М.В., Рогов А.Е.* Проблемы аппаратного обеспечения измерений характеристик больших антенн по сигналам внеземных радиоисточников // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, вып. 4. С. 41-47.
8. *Калинин А.В., Калинин В.А., Егоров М.Н., Моисеев С.П., Ватулин В.М., Поляков А.В., Сидоров А.В., Соболев Д.Б.* Разработка высокочувствительных приемников для исследования характеристик антенн наземных комплексов космической связи в верхней части СВЧ диапазона // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 3. С. 23-32.
9. *Марков Г.Т., Сазонов Д.М.* Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.
10. *Vaars J. W. M.* History of Flux-Density Calibration in Radio Astronomy // Radio Science Bulletin №348 (March 2014). P. 47-66. Max Plank Inst. For Radioastronomy, Bonn.
11. *Иванов В.П., Станкевич К.С.* Радиоастрономическая абсолютная шкала потоков // Изв. вузов. Радиофизика, 1986, т. 29, №1. С. 3.
12. *Perley R. A., Butler B. J.* An accurate flux density scale from 1 to 50 GHz. The Astrophysical Journal Supplement Series, 204:19 (20 pp.), 2013 February.
13. *Vaars J. W. M.* Feasibility of in-orbit testing of inflatable antennas with celestial sources // ESA STM-243, Max Plank Inst. For Radioastronomy, Bonn, 1990.
14. *Дугин Н.А.* О технике и методике прецизионных измерений интенсивности внеземных источников радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика, 2002, т. 45, №2. С. 144.

Дата поступления рукописи
в редакцию 25.05.2023
Дата принятия рукописи
в печать 11.10.2023