

УДК 621.396

DOI 10.26732/j.st.2025.3.02

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ
КОНИЧЕСКОЙ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ
В ДАЛЬНЕЙ ЗОНЕ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ ЦЕНТРА АПЕРТУРЫ
АНТЕННЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ВРАЩЕНИЯ
ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

В.И. Гриц✉

АО «Информационные спутниковые системы»

имени академика М. Ф. Решетнёва»

г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

В настоящее время методы измерения параметров антенн можно разделить на две основные группы: методы дальней и ближней зоны. Методы дальней зоны не требуют дорогостоящего и сложного оборудования, но для их реализации зачастую требуется антенный полигон протяженностью сотни и тысячи метров. Кроме того, становится практически невыполнимой задача экранирования измерительной трассы от влияния переотражений сигнала от различных предметов. Методы ближней зоны, напротив, лишены этого недостатка, но требуют применения сложных автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов. Метод измерения характеристик антенн в зоне Френеля позволяет организовать антенный полигон значительно меньшей длины, чем в методах дальней зоны. Настоящая статья посвящена использованию данного метода применительно к конической рупорной антенне на частоте 13 гигагерц (ГГц). Показано влияние коррекции фазовых диаграмм направленности при различных значениях размера области восстановления диаграммы направленности, а также при разных конфигурациях положения антенны на опорно-поворотном устройстве. Проведен анализ результатов восстановления диаграммы направленности для каждой конфигурации опорно-поворотного устройства. На основе анализа результатов восстановления диаграммы направленности сделан вывод о взаимосвязи необходимости коррекции фазовых диаграмм направленности и расстояния от центра апертуры антенны до точки пересечения осей вращения опорно-поворотного устройства.

Ключевые слова: антenna, зона Френеля, измерение, восстановление ДН, коррекция фазовых ДН.

Поступила в редакцию: 21.07.2025. Принята к печати: 09.09.2025.

Введение

Важнейшим этапом производства космических аппаратов (КА) является проведение наземной экспериментальной отработки (НЭО) как КА в полном сборе, так и отдельных его частей, в том числе и антенн. После прохождения антенной очередного этапа испытаний необходимо проверить соответствие ее радиотехнических характеристик (РТХ)

требованиям, заявленным в техническом задании (в технических условиях). Одной из важнейших характеристик любой антennы является её диаграмма направленности (ДН), или зависимость уровня напряженности электрического поля, излучаемого (ДН на передачу) или принимаемого (ДН на прием) антенной. Вопрос точного измерения ДН является очень важным, поскольку ДН определяет зону обслуживания антennы при ее установке на КА.

1. Методика проведения измерений

В рамках работы был проведен эксперимент, заключающийся в следующем. На выбранной частоте производится измерение одного сечения ДН антенны в дальней зоне, после чего исследуемая и вспомогательная антенны смещаются на расстояние, соответствующее зоне Френеля. Это расстояние можно определить по формулам [2]:

$$R_{\phi p} \geq 0,6D * \sqrt{D/\lambda}, \quad (1)$$

$$R_{\phi p} \geq 0,62 * (D^{3/2}/\sqrt{\lambda}), \quad (2)$$

$$R_{\phi p} \geq D^2/4\lambda, \quad (3)$$

$$R_{\phi p} \geq 0,5 * (D^{4/3}/\lambda^{1/3}), \quad (4)$$

$$R_{\phi p} \geq (D^2/10 \dots 20\lambda). \quad (5)$$

Здесь D – наибольший размер (в данном случае – диаметр) апертуры исследуемой антенны, λ – длина волны, излучаемой исследуемой антенной, $R_{\phi p}$ – расстояние измерений в зоне Френеля.

В то же время это расстояние должно быть меньше расстояния дальней зоны антенны [7, 8].

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (6)$$

Для корректного выполнения измерений необходимо добиться совмещения фазового центра исследуемой антенны с осью вращения опорно-поворотного устройства во избежание искажения фронта волны, приходящей на исследуемую антенну. Обычно у рупорных антенн фазовый центр расположен примерно в центре раскрытия [10], однако на практике необходимо получить точные значения его координат. Это можно сделать с помощью алгоритма, изложенного в [6]. С помощью данного алгоритма производится пересчет фазовых ДН (ФДН), измеренных относительно точки вращения опорно-поворотного устройства (ОПУ) к фазовому центру антенны.

Далее снимается несколько сечений ДН в зоне Френеля, затем с помощью специального математического алгоритма восстанавливается ДН антенны в дальней зоне. При снятии сечений задается диапазон угловых перемещений ОПУ в азимутальной плоскости, в настоящей работе – от минус 50 до 50°. Перед началом измерений ОПУ устанавливается по углу места в самое дальнее отрицательное сечение (отрицательное – ниже центрального). Переход между сечениями осуществляется в угломестной плоскости до достижения самого дальнего положительного сечения (положительное – выше центрального). Центральное сечение соответствует плоскости 0°. При снятии сечения ОПУ перемещается до противоположной границы диапазона перемещений, останавливаясь в каждой измеряемой точке в соответствии с заданным при подготовке к измерению шагом по углу, по достижении правой границы переходит к следующему сечению и процесс повторяется в обратном направлении. В каждой точке сечения снимается один отсчет поля, представляющий собой два значения: амплитуда и фаза поля.

Минимально необходимое количество сечений определяется по формуле [1, 3, 9]:

$$N_{min} = 2 \left[\frac{T_x^2}{2\lambda R} \right] + 1, \quad (7)$$

где T_x – наибольший линейный размер исследуемой антенны, R – расстояние между исследуемой и вспомогательной антеннами, λ – длина волны исследуемой антенны. Полученное значение округляется до ближайшего большего нечетного целого числа.

Измерения выполнялись для двух конфигураций положения антенны на ОПУ: с расстоянием от центра апертуры (ЦА) до азимутальной плоскости вращения ОПУ 0,5 метра (рисунок 1) и 0,15 метра (рисунок 2).

Характеристики эксперимента приведены в таблице 1.

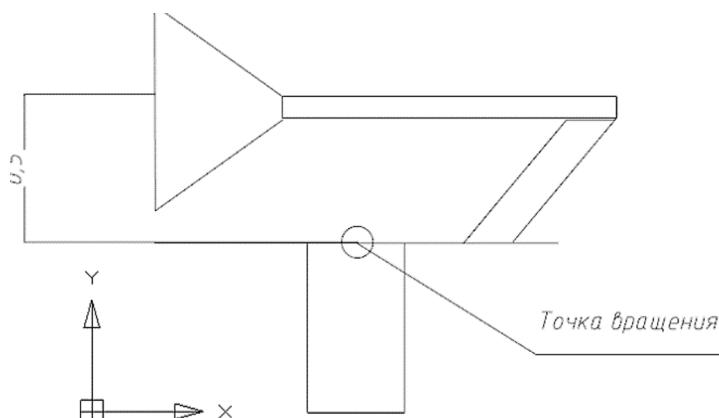


Рисунок 1. Расположение антенны на ОПУ до коррекции положения ЦА

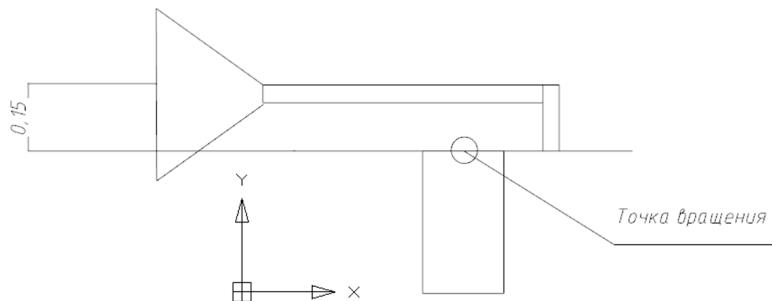


Рисунок 2. Расположение антенны на ОПУ после коррекции положения ЦА

Характеристики эксперимента

Таблица 1

Параметр	Значение
Рабочая частота исследуемой антенны, ГГц	13
Диаметр раскрыта исследуемой антенны, м	0,17
Расстояние дальней зоны (ДЗ), м	2,56
Расстояние измерений в зоне Френеля, м	0,373 (до коррекции положения ЦА); 0,246 (после коррекции положения ЦА)
Количество измеряемых сечений в зоне Френеля	3
Сектор измерений, градус	±50

2. Результаты измерений

Одним из важных параметров при обработке результатов измерений является область восстановления ДН (ОВДН). Это прямоугольная область вокруг апертуры антенны, по которой производится интегрирование поля при вычислении коэффициентов Фурье [1]. Согласно [1], для правильного восстановления ДН эта область должна полностью включать в себя апертуру антенны. Однако, как показано в [5], увеличение ОВДН до величины более 2–3 размеров апертуры приводит к появлению искажений на восстановленной ДН.

Результаты восстановления ДН для области восстановления ДН 0,189 на 0,189 метра приведены на рисунках 3–6.

Результаты восстановления ДН для области восстановления ДН 0,24 на 0,24 метра приведены на рисунках 7–10.

Результаты восстановления ДН для области восстановления ДН 0,263 на 0,263 метра приведены на рисунках 11–14.

Заключение

На основании представленных результатов можно сделать вывод о том, что коррекция ФДН имеет смысл, если ЦА рупорной антенны удален от точки пересечения осей вращения (далее – точка вращения) ОПУ более чем на 2–3 диаметра раскрытия. Если необходимо проводить измерения, сблизив ЦА и точку вращения, то коррекция ФДН приводит к появлению искажений на восстановленной ДН.

Влияние ОВДН было ранее рассмотрено в [5]. В данном случае стоит отметить лишь тот факт, что после уменьшения расстояния между центром апертуры антенны и точкой вращения ОПУ увеличение ОВДН вносит более заметное ухудшение качества восстановления ДН.

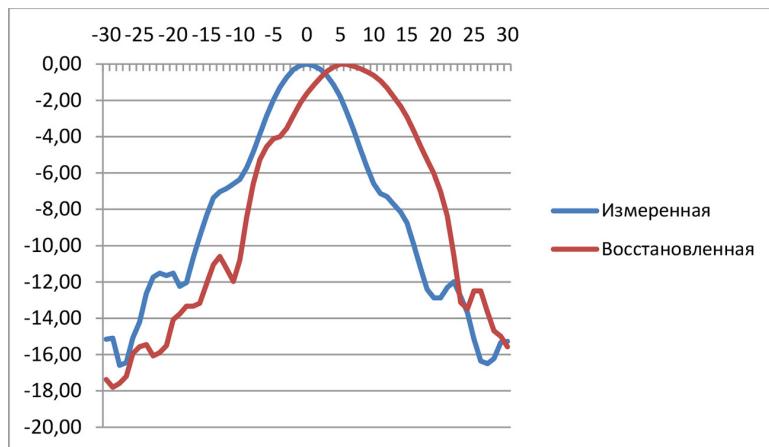


Рисунок 3. Без коррекции ФДН, ОВДН 0,189, до коррекции положения центра апертуры

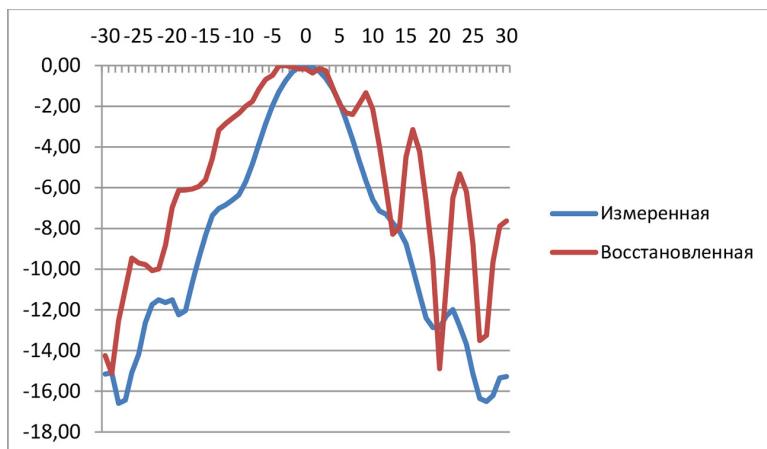


Рисунок 4. Без коррекции ФДН, ОВДН 0,189, после коррекции положения центра апертуры

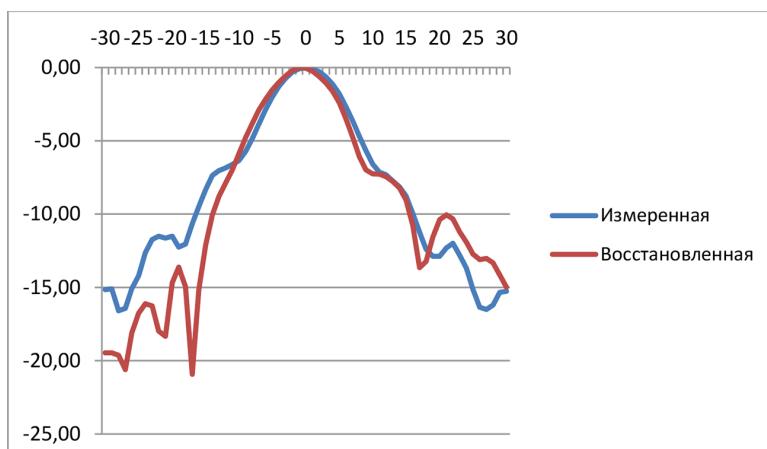


Рисунок 5. С коррекцией ФДН, ОВДН 0,189, до коррекции положения центра апертуры

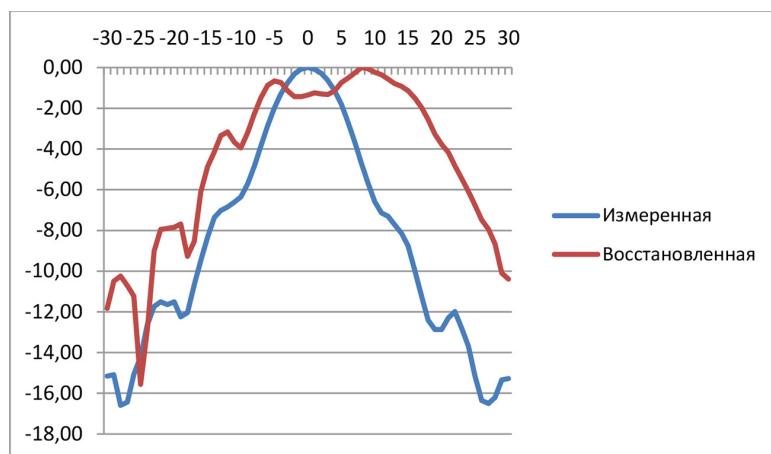


Рисунок 6. С коррекцией ФДН, ОВДН 0,189, после коррекции положения центра апертуры

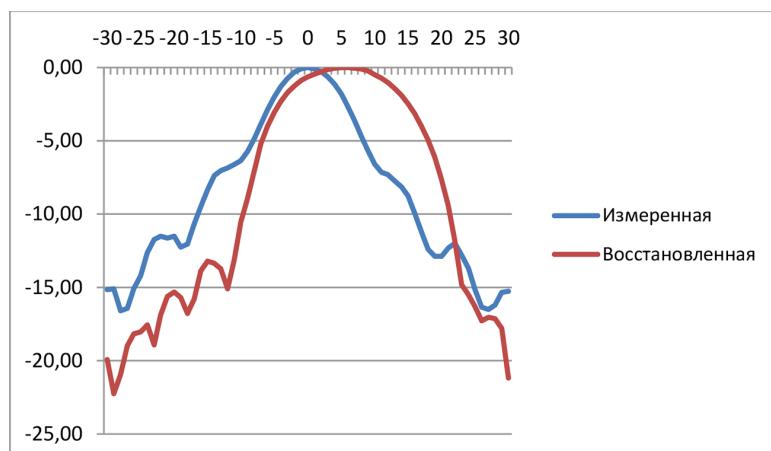


Рисунок 7. Без коррекции ФДН, ОВДН 0,24, до коррекции положения центра апертуры

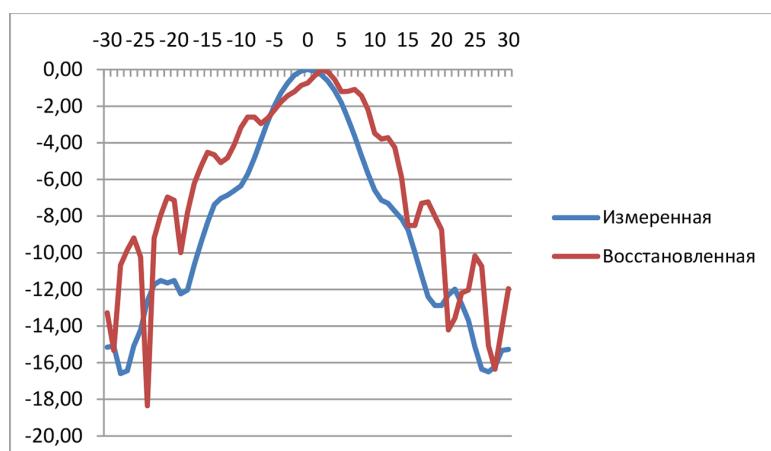


Рисунок 8. Без коррекции ФДН, ОВДН 0,24, после коррекции положения центра апертуры

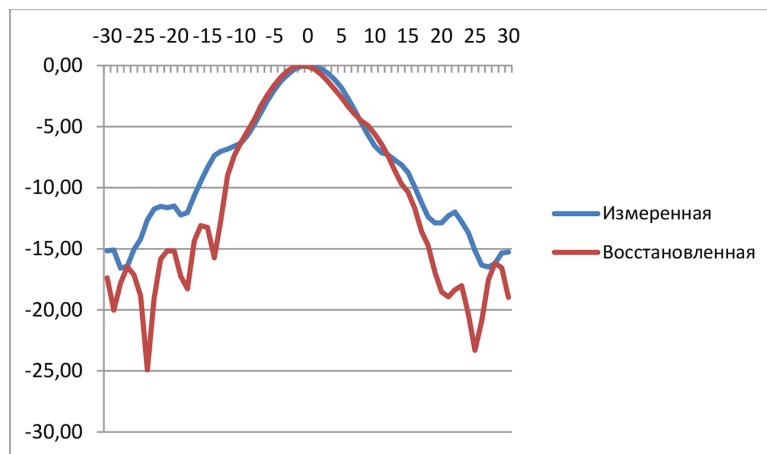


Рисунок 9. С коррекцией ФДН, ОВДН 0,24, до коррекции положения центра апертуры

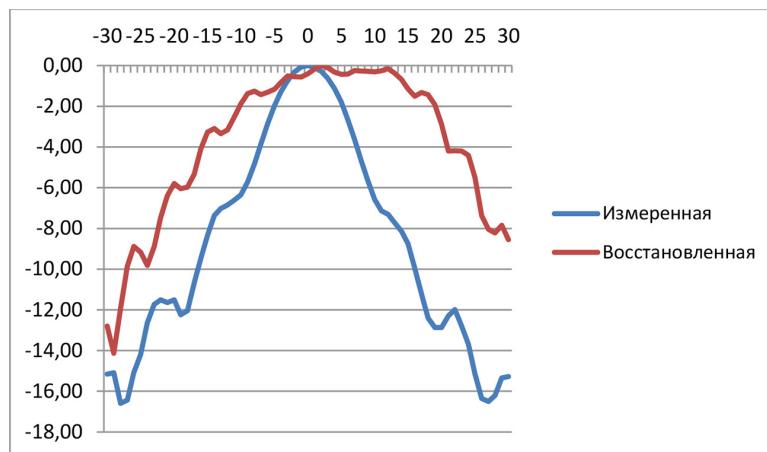


Рисунок 10. С коррекцией ФДН, ОВДН 0,24, после коррекции положения центра апертуры

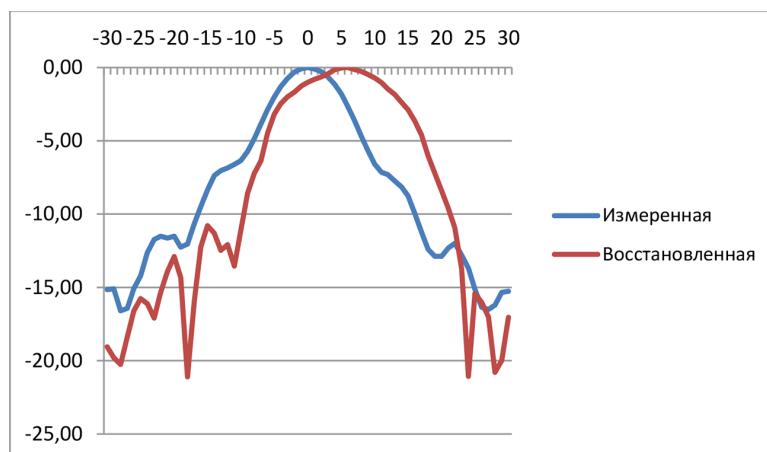


Рисунок 11. Без коррекции ФДН, ОВДН 0,263, до коррекции положения центра апертуры

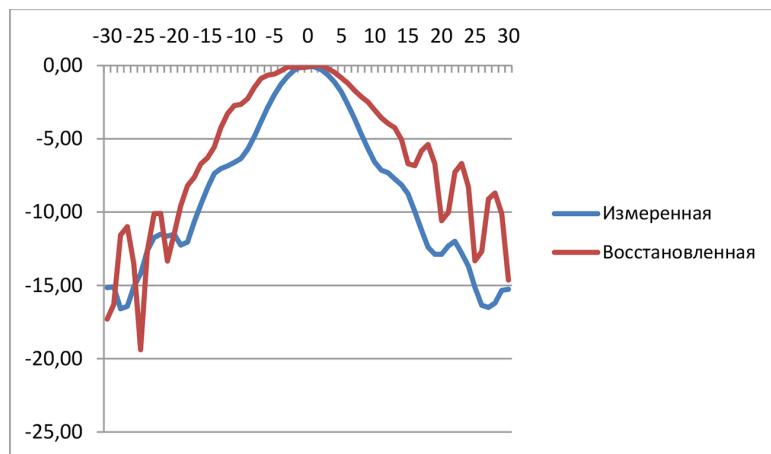


Рисунок 12. Без коррекции ФДН, ОВДН 0,263, после коррекции положения центра апертуры

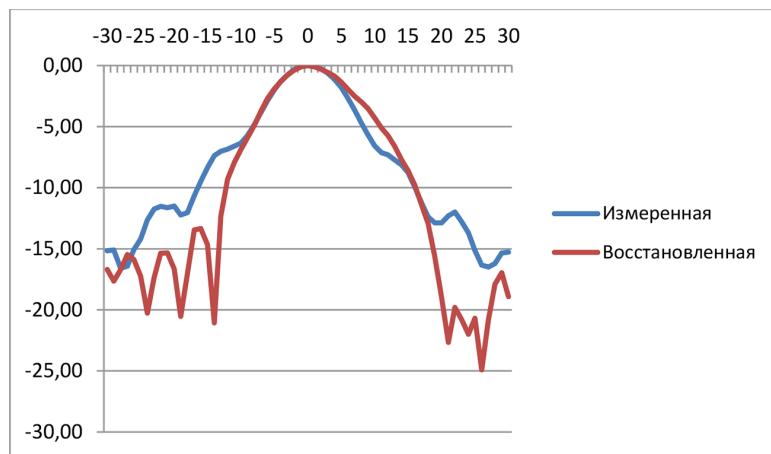


Рисунок 13. С коррекцией ФДН, ОВДН 0,263, до коррекции положения центра апертуры

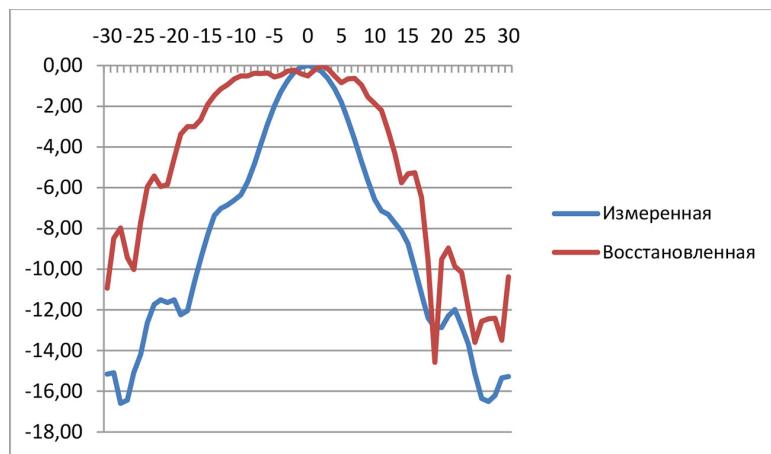


Рисунок 14. С коррекцией ФДН, ОВДН 0,263, после коррекции положения центра апертуры

Список литературы

[1] Кривошеев Ю. В. Измерение характеристик антенн в зоне Френеля на разреженной сетке углов: специальность 05.12.07 «Антенны, СВЧ – устройства и их технологии»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кривошеев Юрий Вячеславович; ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ». Москва, 2014. 146 с. Текст: непосредственный.

[2] Доманов С. К. Влияние технологических факторов на радиотехнические характеристики антенн космических аппаратов: специальность 05.12.07 "Антенны, СВЧ-устройства и их технологии": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Доманов Сергей Константинович. Томск, 2018. 144 с.

[3] Восстановление диаграммы направленности антенны по измерениям в зоне Френеля на стенде для измерений в дальней зоне / И. Л. Виленко, А. А. Медухин, Ю. А. Сусеров [и др.] // Антенны. 2005. № 1. С. 46–52.

[4] Гриц В. И. Восстановление диаграммы направленности конической рупорной антенны в дальней зоне по измерениям в зоне Френеля // Современные проблемы радиоэлектроники: материалы XXIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвящённой 129-й годовщине Дня радио. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2024. С. 118–121. ISBN 978-5-9905691-6-4.

[5] Гриц В. И. Влияние увеличения размера области восстановления диаграммы направленности рупорной антенны в зоне Френеля на результат восстановления диаграммы направленности в дальней зоне // Материалы XXVIII Международной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию со Дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2024. С. 349–352.

[6] Калинин Ю. Н. Измерение координат фазового центра антенны // Антенны. 2014. № 4. С. 54–62.

[7] Озеров М. А., Титаренко А. В. Синтезирование пространственной импульсной характеристики антенны для восстановления диаграммы направленности, измеренной в неидеальных условиях // Вестник метролога. 2016. № 4. С. 14–18. – ISSN 2413-1806

[8] Озеров М. А. Разработка высоконформативных методов измерений характеристик направленности антенн и рассеивающих свойств материалов в промежуточной зоне излучения // Материалы XI научно-технической конференции "Метрология в радиоэлектронике". Менделеево: ФГУП "ВНИИФТРИ", 2016. С. 26–31. ISBN 978-5-903232-70-3

[9] Fresnel Field to Far Field Transformation Based on Two-Dimensional Fourier Series Expansion / Y. V. Krivosheev, A. V. Shishlov, A. K. Tobolev, I. L. Vilenko // Advanced Electromagnetics Symposium. Paris: AES-2012, 2012, pp. 1–8.

[10] Фрадин А. З., Рыжков Е. В. Измерение параметров антенно-фидерных устройств. М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1962. 317 с.

COMPARISON OF THE RESULTS OF RESTORING THE RADIATION PATTERN OF A CONICAL HORN ANTENNA IN THE FAR ZONE BASED ON MEASUREMENTS IN THE FRESNEL ZONE AT DIFFERENT POSITIONS OF THE ANTENNA APERTURE CENTER RELATIVE TO THE CENTER OF ROTATION OF THE SUPPORT AND ROTATION DEVICE

V. I. Grits

JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

Currently, antenna parameter measurement methods can be divided into two main groups: far-range and near-range methods. Long-range methods do not require expensive and complex equipment, but their implementation often requires an antenna range hundreds and thousands of meters long. In addition, the task of shielding the measuring path from the influence of signal

reflections from various objects becomes almost impossible. Near-field methods, on the contrary, are devoid of this disadvantage, but require the use of complex automated measurement and computing systems. The method of measuring antenna characteristics in the Fresnel zone makes it possible to organize an antenna range of significantly shorter length than in the methods of the far zone. This article is devoted to the use of this method in relation to a conical horn antenna at a frequency of 13 gigahertz (GHz). The effect of correction of phase direction pattern is shown for different values of the size of the direction pattern recovery area, as well as for different configurations of the antenna position on the control unit. The direction pattern recovery results was analyzed for each control unit configuration. Based on the analysis of the results of the direction pattern restoration results, a conclusion was made about the relationship between the need to correct the phase direction pattern and the distance from the center of the antenna aperture to the intersection of the axes of rotation of the control unit.

144

Keywords: antenna, Fresnel zone, measurement, restoration of direction pattern, phase pattern correction

Submitted: 21.07.2025. Accepted: 09.09.2025.

References

- [1] Krivosheev Yu. V. Measurement of antenna characteristics in the Fresnel zone on a sparse grid of angles: specialty 05.12.07 "Antennas, microwave devices and their technologies": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Krivosheev Yuri Vyacheslavovich; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "NRU "MEI". Moscow, 2014. 146 p. Text: direct.
- [2] Domanov S. K. The influence of technological factors on the radio technical characteristics of spacecraft antennas: specialty 05.12.07 "Antennas, microwave devices and their technologies": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Domanov Sergey Konstantinovich. Tomsk, 2018. 144 p. ill.
- [3] Restoration of the antenna radiation pattern from measurements in the Fresnel zone on a stand for measurements in the far zone / I. L. Vilenko, A. A. Medukhin, Yu. A. Suserov [et al.] // The antennas. 2005. № 1, pp. 46–52.
- [4] Grits V.I., Salomatov Yu. P. Restoration of the radiation pattern of a conical horn antenna in the far zone from measurements in the Fresnel zone // Modern problems of radio electronics: proceedings of the XXIV All-Russian Scientific and Technical conference with international participation dedicated to the 129th anniversary of Radio Day. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2024, pp. 118–121. ISBN 978-5-9905691-6-4.
- [5] Grits V. I. The influence of an increase in the size of the area of restoration of the directional pattern of the horn antenna in the Fresnel zone on the result of the restoration of the directional pattern in the far zone // Proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of the General designer of rocket and space systems of Academician Mikhail Fedorovich Reshetnev. Krasnoyarsk: SibSU named after M. F. Reshetnev, 2024, pp. 349–352.
- [6] Kalinin Yu. N. Measuring the coordinates of the antenna phase center // Antennas. 2014. № 4, pp. 54–62.
- [7] Ozerov M. A., Titarenko A. V. Synthesizing the spatial impulse response of an antenna to restore a radiation pattern measured under non-ideal conditions // Bulletin of the metrologist. 2016. № 4, pp. 14–18. ISSN 2413-1806
- [8] Ozerov M. N. A. N. Development of highly informative methods for measuring antenna directional characteristics and scattering properties of materials in the intermediate radiation zone // Proceedings of the XI Scientific and Technical Conference "Metrology in Radio Electronics". Mendeleev: FSUE "VNIIFTRI", 2016, pp. 26–31. ISBN 978-5-903232-70-3
- [9] Fresnel Field to Far Field Transformation Based on Two-Dimensional Fourier Series Expansion / Y. V. Krivosheev, A. V. Shishlov, A. K. Tobolev, I. L. Vilenko // Advanced Electromagnetics Symposium. Paris: AES-2012, 2012, pp. 1–8.
- [10] Fradin A. Z., Ryzhkov E. V. Measuring the parameters of antenna-feeder devices. M.: State Publishing House of Literature on Communications and Radio, 1962, 317 p.

Сведения об авторе

Гриц Виктор Игоревич – инженер II категории АО «РЕШЕТНЁВ». Окончил СибГУ имени академика М. Ф. Решетнёва в 2020 году. Область научных интересов: космическая техника, антенны.