

Оптимизация измерений параметров зеркальных антенн

О. Грицан¹, А. Кантышев², А. Пивак, к. т. н.³, С. Потапов⁴

УДК 621.317 | ВАК 05.11.01

Зеркальные антенны – наиболее распространенный тип остронаправленных антенн в диапазоне СВЧ. Широкое распространение зеркальных антенн объясняется главным образом принципиальной простотой радиотехнического устройства, возможностью получения высокой направленности, сохранением направленных свойств в широкой полосе частот, простотой конструкции и т. д. При этом увеличение объемов передаваемой информации приводит к росту частоты сигнала несущей, используемого в системах связи. Это в свою очередь приводит к ужесточению требований к параметрам зеркальных антенн, обеспечения которых тяжело достичь только расчетными и конструктивными методами. Для разработки и производства антенн, удовлетворяющих данным требованиям, необходимо проводить измерение их параметров. О решениях, позволяющих оптимизировать процесс таких измерений, рассказывается в статье.

Антенны как звено радиолинии в значительной мере определяют ее свойства, в частности отношение сигнал-шум. В этом плане представляют особый интерес так называемые энергетические характеристики антенн: коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, коэффициент полезного действия, шумовая температура и др.

Методы измерений характеристик антенн можно разбить на две группы: измерения в дальней и ближней зонах. Они, в свою очередь, делятся на подгруппы.

Классический метод дальней зоны отличает простота схемы измерений, физической реализации измерительного комплекса и подходов к оценке их метрологических характеристик. Однако большие электрические размеры многих зеркальных антенн приводят к тому, что условия дальней зоны начинают выполняться на расстояниях, исчисляемых сотнями метров. Построение испытательных полигонов таких больших размеров и классические измерения в дальней зоне на таких расстояниях являются сложными техническими и организационными задачами.

Другой вариант – использование коллиматоров для создания квази-дальней зоны, что позволяет существенно уменьшить размеры полигона. Тем не менее, изготовление параболических зеркал для коллиматоров требует высокой механической точности производства (до 0,01 длины волны) при больших размерах, чем у тестируемых зеркальных антенн, и поэтому представляется сложной технической задачей, для решения которой необходимы высокие затраты. Следовательно, целесообразность использования таких измерительных установок в производственных условиях при массовом выпуске антенн остается под вопросом.

В качестве третьего варианта решения данной задачи можно рассмотреть системы, основанные на измерениях поля в ближней зоне и дальнейшем пересчете из ближней зоны в дальнюю. Они, в определенных конфигурациях, могут быть достаточно компактны. Но в них большие электрические размеры зеркальных антенн требуют малых шагов перемещения зондов при сканировании ближнего поля, что эквивалентно большим временам измерения, которые также недопустимы в условиях массового производства.

Исследования, рассматриваемые далее, были направлены на оптимизацию времени измерения зеркальных антенн в системах ближнего поля типа TS8991 компании Rohde & Schwarz (R&S) (рис. 1).

Система представляет собой программно-аппаратный комплекс, в котором параметры антенн в дальней зоне рассчитываются по результатам измерений распределения напряженности поля в ближней зоне. Распределение ближнего поля снимается со сферической поверхности, при этом перемещение пробника осуществляется

¹ АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва, зам. начальника управления 155, gritsan@iss-reshetnev.ru.

² АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва, ведущий инженер-конструктор, kantAV@iss-reshetnev.ru.

³ ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС», руководитель группы технической поддержки, Alexey.Pivak@rohde-schwarz.com.

⁴ ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС», инженер технической поддержки, Sergey.Potapov@rohde-schwarz.com.

с помощью позиционера маятникового типа. Позиционер, посредством программной синхронизации с векторным анализатором цепей (ВАЦ), выступающим в роли измерителя, поддерживает режим «шаг-шаг», в котором оба привода – азимутальный и угломестный – вращаются пошагово. Также поддерживаются более скоростные режимы «шаг-скан» и «скан-скан», в первом из которых азимутальный привод вращается непрерывно, а угломестный пошагово, а во втором оба привода вращаются непрерывно (так называемое спиральное сканирование). При этом синхронизация с ВАЦ осуществляется в аппаратном режиме в реальном времени. В качестве пробника поля используется двухполяризованная антенна Вивальди, что позволяет измерять две поляризации поля одновременно.

Излучение подобных антенн описывается при помощи сферических волновых функций высоких порядков, поэтому такие антенны называют пробниками высокого порядка. Достоинством таких пробников является



Рис. 1. Измерительный комплекс TS8991

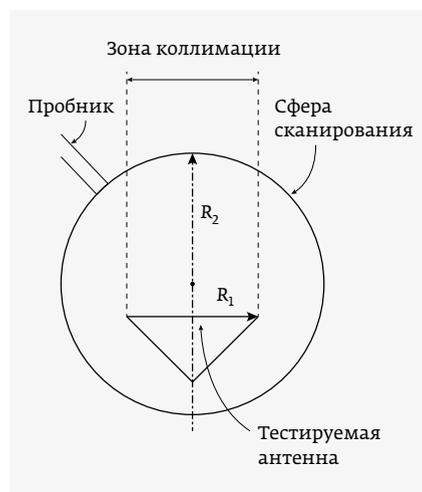


Рис. 2. Определение минимального сектора сферического сканирования ближнего поля

широкая полоса рабочих частот. Применение такого пробника и режима «скан-скан» существенно сокращает время измерения, но предъявляет специальные требования к алгоритму обработки измерительной информации. Он должен поддерживать неэквидистантное расположение точек получения данных о ближнем поле и коррекцию диаграммы направленности пробников высокого порядка. К такому алгоритму расчета относится FIAFTA [1], поддерживаемый TS8991. Однако FIAFTA требует измерения амплитудно-фазового распределения поля по замкнутой поверхности или, в практических условиях, – по максимальному сектору углов места, что естественно приводит к увеличению времени измерения.

Представляет интерес определение минимального сектора углов, в котором необходимо проводить сканирование для зеркальных антенн. Данный сектор можно определить на основе априорных знаний об антенне как сектор, за пределами которого отсутствует излучение или им можно пренебречь. Тогда алгоритм FIAFTA замещает отсутствующую измерительную информацию нулями.

Для зеркальных антенн, при условии оптимального облучения кромки, поле в раскрыве от границы зоны реактивных полей, лежащей в пределах 1–2 длин волн λ от раскрыва с наибольшим размером D , и, условно, до границы зоны Френеля $\sqrt[3]{\frac{D}{2\lambda} \cdot \frac{D}{2} + \lambda}$ [2] можно считать сосредоточенным, главным образом, в цилиндре с основанием в виде зеркала (так называемая зона коллимации). Тогда, исходя из размеров тестируемой антенны и позиционера, решение геометрической задачи дает следующую оценку для минимального сектора углов (рис. 2):

$$\alpha^\circ = 57 \cdot \arcsin(R_1 / R_2),$$

где R_1 – радиус зеркальной антенны; R_2 – радиус сканирования позиционера.

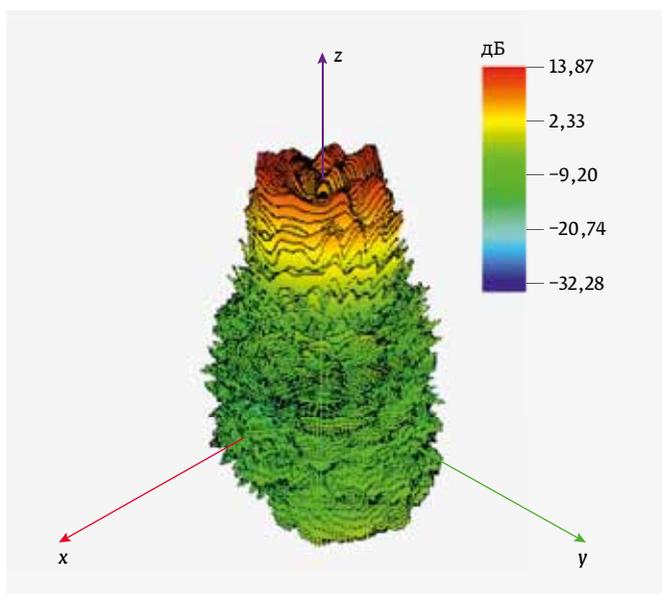


Рис. 3. Трехмерная ДН в ближней зоне антенны AC008

Данная формула в целом совпадает с выражением, полученным в [3] для минимальных углов сканирования. При этом необходимо отметить, что если есть предположения о неполном перехвате энергии облучателя зеркалом (либо несколькими зеркалами в случае многозеркальных систем), то минимальный сектор сканирования необходимо увеличить, чтобы учесть перетекание энергии в ближние боковые лепестки диаграммы направленности (ДН) антенны. Такие эффекты могут иметь место вследствие неоптимальности облучателя зеркальной системы, в частности из-за переоблучения кромки зеркала, а также по причине прямого излучения облучателя за кромку зеркала.

Экспериментальная проверка проводилась для антенны R&S AC008 с облучателем HL050 и $R_1 = 0,45$ м на частоте 9 ГГц с типовыми значениями коэффициента усиления и ширины диаграммы направленности антенны (K_y и ШДН) порядка 33,5 дБ и 2,5° соответственно, с использованием позиционера с $R_2 = 1$ м по следующему алгоритму. Сначала проводились сканирование в секторе углов

места 120° и расчет полной 3D-диаграммы, которая после сравнения измеренного K_y со значением, указанным в спецификации, использовалась в качестве референсной. Затем выполнялось усеченное сканирование в секторах углов, близких к расчетному. Полученные после расчета диаграммы сравнивались с референсной по K_y и ширине луча диаграммы направленности.

На рис. 3 показана трехмерная ДН в ближней зоне (непосредственно данные измерений до трансформации в дальнее поле) антенны AC008. Как можно видеть, предположение о характере ближнего поля, упомянутое выше, находит практическое подтверждение.

Результаты измерений с указанием времени, затраченного на различные процедуры, приведены в табл. 1. На рис. 4 представлены двумерные ДН для разных секторов и методов сканирования. Необходимо отметить несколько моментов:

- сканирование «шаг-шаг» является очень времязатратным и данные по времени сканирования для него приведены только справочно;
- сканирование «шаг-скан» и расчет по алгоритму SWE, согласно которому ДН измеряемой антенны представляется как сумма сферических волновых функций [4], является для малых шагов сканирования соизмеримым по времени со сканированием в режиме «скан-скан», но при условии применения широкополосного двухполяризованного пробника. К сожалению, алгоритм SWE в настоящее время не поддерживает коррекцию на диаграмму направленности такого пробника, что при измерениях остронаправленных антенн приводит к ошибкам в определении K_y до величин вплоть до нескольких децибел [4]. Использование пробников типа открытого конца волновода, для которых коррекция на ДН реализуется наиболее просто, требует удвоенного времени измерения из-за поворота пробника на 90°, к тому же такие пробники являются значительно более узкополосными;
- в условиях массового тестирования серийной продукции, при использовании спирального сканирования, временной промежутков, в течение которого

Таблица 1. Результаты измерения параметров антенны

Режим сканирования	Время сканирования, мин	Время передачи данных, мин	Время расчета, мин	Измеренные значения K_y /ШДН
«Скан-скан», сектор 120° с шагом 1,5°	9	8	7	33,1 дБ/2,2°
«Скан-скан», сектор 30° с шагом 1,5°	3	2	7	32,8 дБ/2,2°
«Шаг-скан», сектор 30° с шагом 1,5°		8	1	31,9 дБ/2,2°
«Шаг-шаг», сектор 30° с шагом 1,5°	244		–	–

Анализатор спектра и сигналов высшего класса FSW

Новый стандарт анализа
в миллиметровом диапазоне

3 года
гарантии



Анализ импульсных сигналов
ЛЧМ и ППРЧ



5G



6G



WLAN



Защита
пользовательских
данных



Тестирование
спутниковой связи



www.rohde-schwarz.com/ru

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



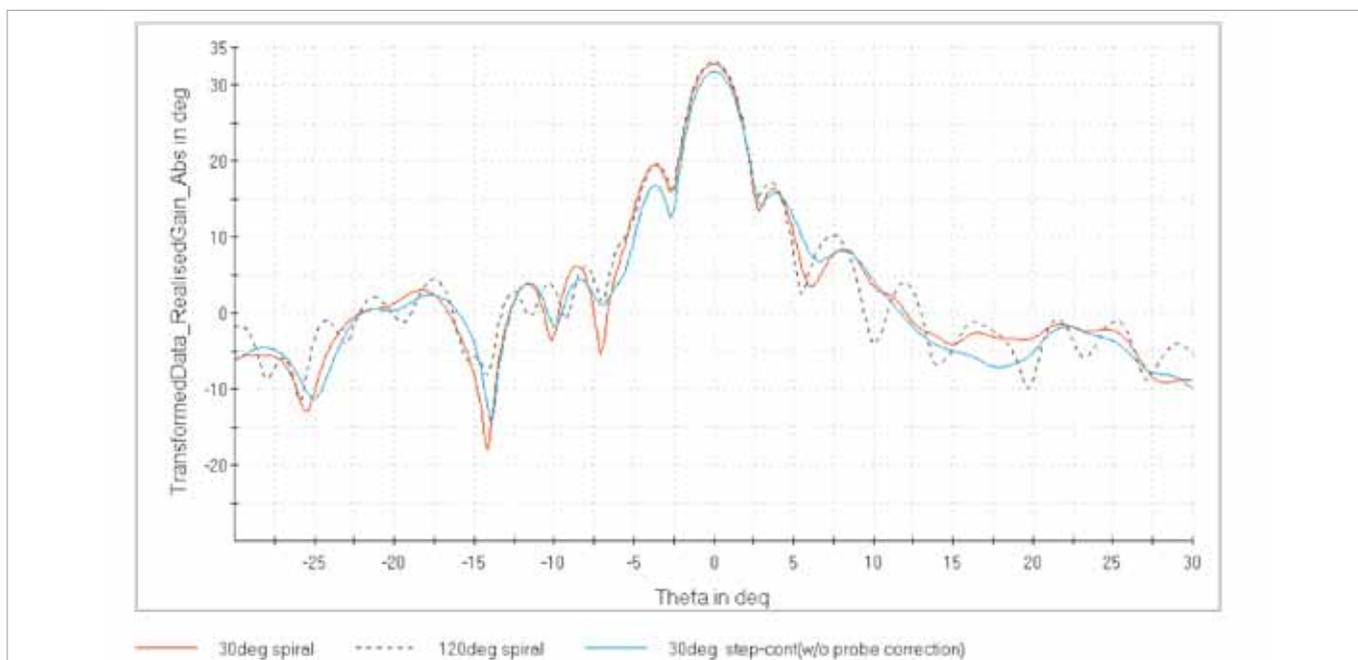


Рис. 4. Диаграмма направленности антенны АС008 для различных методик и секторов сканирования

передаются данные, может быть использован для установки на стенд следующей антенны, а расчет производится на выделенном сервере (рабочей станции) параллельно с процессом измерения следующего образца;

- из простых геометрических соображений (см. рис. 2) можно заключить, что увеличение радиуса сканирования ведет к снижению минимального угла сканирования. Это является ключевым преимуществом сферического сканирования перед другими типами (плоским и цилиндрическим) [2].

Указанные в табл. 1 временные интервалы зависят от геометрии и диапазона частот конкретной антенны, а также от мощности компьютера, на котором проводится расчет (в работе использован CPU Intel Core i9 с 16-ю физическими ядрами и тактовой частотой 4 ГГц), но основные соотношения сохраняются.

Анализ результатов показывает, что использование усеченного сектора сканирования на основании априорных знаний об антенне позволяет получать результаты измерений, соответствующие, в пределах погрешности системы TS8991, полноугловому сканированию. Кроме этого, временные затраты оказываются существенно меньше, что позволяет использовать такой подход в условиях массового производства.

Апробирование для условий массового изготовления проводилось для зеркальной антенны диаметром 0,5 м АО «ИСС», аналогичной описанной в [5]. Спиральное сканирование данной антенны в секторе углов 18° с шагом 0,6° на частоте 44 ГГц и последующая трансформация

поля по алгоритму FIAFTA заняли 16 мин и 27 мин соответственно. При этом измеренное значение $K_y \approx 43,2$ дБ соответствовало ожидаемому. Для частоты 19 ГГц при таком же секторе углов и шаге 1,5° временные затраты на сканирование поля и последующую трансформацию составили 3 и 10 мин соответственно при $K_y \approx 37$ дБ. Таким образом, весь процесс измерения двухчастотной антенны занял менее 1 ч, что являлось целевым показателем данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Eibert T. F., Kilic E., Lopez C., Mauermayer R. A. M., Neitz O., Schnattinger G.** Electromagnetic Field Transformations for Measurements and Simulations (Invited Paper) // Progress in Electromagnetics Research (PIER). 2015. V. 151. PP. 127–150.
2. **Yaghjian A. D.** An Overview of Near-Field Antenna Measurements // IEEE Transactions of Antennas and Propagation. 1986. V. Ap-34. No. 1. PP. 30–45.
3. Spherical Near-Field Antenna Measurements. Hansen J. E. Exeter, U.K., 1988.
4. **Neitz O., Mauermayer R. A. M., Weitsch Y., Eibert T. F.** A Propagating Plane-Wave-Based Near-Field Transmission Equation for Antenna Gain Determination from Irregular Measurement Samples // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. V. 65, No. 8. PP. 4230–4238.
5. **Тайгин В. Б., Лопатин А. В.** Разработка зеркальной антенны космического аппарата с ультралёгким высокоточным размеростабильным рефлектором // Космические аппараты и технологии. 2019. № 3. С. 121.



КОМПЛЕКСНЫЕ ПОСТАВКИ ЭКБ

**ВСЯ ПОСТАВЛЯЕМАЯ
ПРОДУКЦИЯ ПРОХОДИТ
«ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ»
И «ИДЕНТИФИКАЦИЮ»**

АО «ТЕСТПРИБОР» осуществляет комплексные поставки электронных компонентов отечественного и иностранного производства для различного применения классов:

- Industrial, ▪ Military, ▪ Space



ПРОГРАММА ПОСТАВОК

- Микросхемы
- ПЛИС
- СБИС
- Источники питания
- Преобразователи
- Конденсаторы
- Резисторы
- Транзисторы
- Диоды
- Реле
- Переключатели
- Разъемы
- Фильтры
- Атенюаторы
- Ответвители