

# Использование гибридных методов расчёта СВЧ-антенн в ANSYS HFSS

Иван Кузнецов, Александр Курушин (Москва)

В статье приводятся результаты моделирования зеркальной антенны с помощью программного комплекса ANSYS HFSS. Расчёт антенны диаметром до 2 м выполнен на частоте 10 ГГц с использованием гибридного метода, в котором рупорная антенна-облучатель рассчитывается методом конечных элементов, а зеркало – методом интегральных уравнений или методом физической оптики. Сравниваются результаты расчёта при облучении зеркала с помощью стандартной рупорной антенны и гофрированной рупорной антенны той же апертуры. Показано, что гофрированный рупор увеличивает коэффициент направленного действия однозеркальной антенны на 2 дБ.

ANSYS HFSS [1] – это мощная программа расчёта электромагнитного поля для проектирования СВЧ-структур, использующая несколько алгоритмов. ANSYS HFSS входит в комплекс программных средств компании ANSYS, предназначенных для разностороннего анализа радиоструктур. Последняя версия программы HFSS 16.0 выполняет расчёты методом конечных элементов в частотной области, расчёт переходных процессов методом Галеркина, использует метод интегральных уравнений, метод физической оптики, а также гибридное использование всех реализованных методов расчёта.

Каждый метод в HFSS реализован в виде программы, в которой нужно создать исследуемую структуру, задать параметры материалов и рассчитываемые характеристики. После этого HFSS генерирует сетку, которая адаптивно уплотняется в зависимости от особенностей структуры и поля в ней.

Широко распространённые в настоящее время в спутниковой связи, РЛС и радиоастрономии зеркальные СВЧ-антенны имеют размеры от десятков сантиметров до сотен метров [2]. Это означает, что размеры антенн могут

составлять сотни длин волн и более. Расчёт таких больших структур строгими электродинамическими методами требует больших вычислительных затрат. Для анализа и расчёта характеристик излучения зеркальных антенн большого электрического размера в ANSYS HFSS реализованы приближённые методы, к которым относится метод физической оптики [2–3].

Метод физической оптики используется в качестве ключевого алгоритма численного расчёта формулу:

$$\vec{J}^{\circ} = 2 [\vec{H}, \vec{n}], \quad (1)$$

где  $\vec{J}^{\circ}$  [А/м] – поверхностный электрический ток на металлическом рефлекторе,  $\vec{H}$  [А/м] – вектор магнитного поля, создаваемого в данной точке первичным облучателем,  $\vec{n}$  – вектор нормали для каждой точки поверхности рефлектора.

Рассчитанные по формуле (1) электрические токи используются для определения поля излучения зеркальной антенны (вторичного поля). Расчёт вторичного поля сводится при этом к вычислению соответствующих двумерных интегралов Фурье от поверхностного электрического тока.

Таким образом, в методе физической оптики нет необходимости решать систему линейных алгебраических уравнений высокого порядка, к чему сводится большинство электродинамических методов решения системы уравнений Максвелла.

## Гибридные методы в ANSYS HFSS

Первым методом электродинамического моделирования, реализованного в HFSS, был метод конечных элементов (FEM, Finite Element Method). Этот метод доказал свою точность и надёжность при моделировании и оптимизации коаксиально-волноводных переходов, фильтров, планарных антенн, размеры которых не превосходят пяти длин волн. Однако при анализе объектов с большими размерами требования к компьютеру (объём оперативной памяти и быстродействие) значительно возрастают. На помощь пришли реализованные в версии HFSS 15 гибридные методы моделирования, когда разные части задачи можно решать разными методами (см. табл. 1).

Решим задачу облучения параболического зеркала и сравним результаты расчёта двумя методами: методом интегральных уравнений и методом физической оптики. Для антенны одной сложности решение будет выполняться на одной и той же сетке. Расчёты выполняются на частоте 10 ГГц (длина волны 30 мм). В качестве облучателя используем круглые рупорные антенны двух типов:

- 1) с гладкими стенками раскрыва;
- 2) с гофрированными стенками раскрыва.

## Создание структуры зеркальной антенны

Сечение параболического зеркала вдоль оси X строится при помощи функциональной зависимости

$$Z(x) = F_{oc} - \frac{1}{4F_{oc}}(x \times x), \quad (2)$$

где  $F_{oc}$  – фокусное расстояние параболы, связываемое с диаметром параболического зеркала  $D$  соотноше-

Таблица 1. Методы решения в ANSYS HFSS и способы их объединения

№ метода	Название метода	Суть метода
1	Метод FEM	Метод конечных элементов. Обе антенны (зеркало и облучатель) находятся в одном боксе, описанном как Radiate
2	Метод IE	Гибридный метод, когда на большой объект падает волна, эквивалентная дальнему полю облучателя, и расчёт ведётся методом IE
3	Метод FBIE	Каждая антенна охватывается отдельными боксами, внутри которых пространство считается методом FEM, а эти боксы покрываются граничными условиями IE
4	Метод IE-PO	Метод физической оптики (PO), объединённый с методом интегральных уравнений

нием  $F_{oc} / D$ . По этим данным определяются характеристики зеркальной антенны, облучаемой рупорной антенной: коэффициент направленного действия (КНД) и коэффициент использования поверхности (КИП), которые связаны между собой следующим соотношением [3]:

$$КНД = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \times КИП \quad (3)$$

Чтобы создать в HFSS поверхность параболической зеркальной антенны, прокручиваем на  $360^\circ$  вокруг оси Z линию, построенную согласно выражению (2). Фазовый центр облучателя зеркальной антенны должен быть установлен точно в фокусе зеркальной антенны.

Для заданной геометрии зеркала задачу будем решать двумя методами: методом интегральных уравнений и методом физической оптики.

Проект для анализа облучателя решается методом конечных элементов FEM и создаётся как дизайн HFSS. Характеристики дальнего поля облучателя поступают в проект зеркальной антенны в точке фокуса.

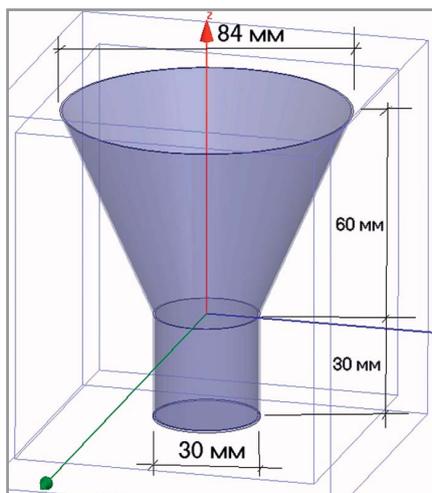


Рис. 1. Круглый рупор

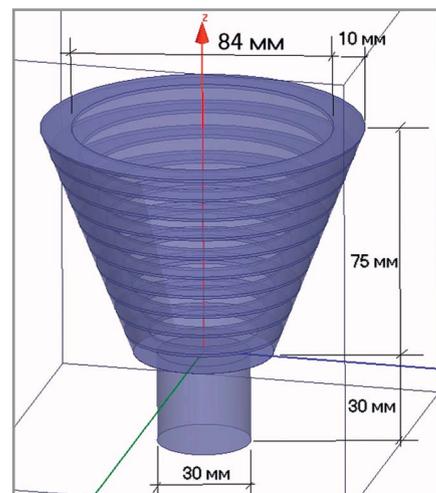


Рис. 2. Круглый гофрированный рупор

### ОБЛУЧАТЕЛЬ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Облучателем будет круглая рупорная антенна с размерами, показанными на рисунке 1 (стандартный рупор) и рисунке 2 (гофрированный рупор). Порт ставится на сечение волновода. Рассчитанные в HFSS методом FEM диаграммы направленности облучателей показаны на рисунке 3. Диаметр (а также площадь раскрыва) рассчитывается

по углу падения на зеркало. Длина раскрыва выбирается на основании допустимого искажения поверхности равной фазы.

Отметим, что при моделировании зеркальной антенны можно использовать связь с зеркалом как по ближнему, так и по дальнему полю. Для малых зеркал нужно создавать связь по ближнему полю, а для больших зеркал рекомендуется создавать связь по дальнему полю.

Используете несколько разных САПР для одного проекта?

Работайте с **ANSYS®** DesignerRF

Решайте комплексные задачи из **ОДНОГО** приложения

анализ целостности сигналов  
 электромеханическое моделирование  
 тепловой анализ  
 анализ интегральных микросхем  
 моделирование радиочастотных схем  
 высокопроизводительные вычисления

Техническая поддержка Обучение Дизайн-проекты

Тел.: +7 (495) 943-50-32, www.orcada.ru

**оркада**

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР

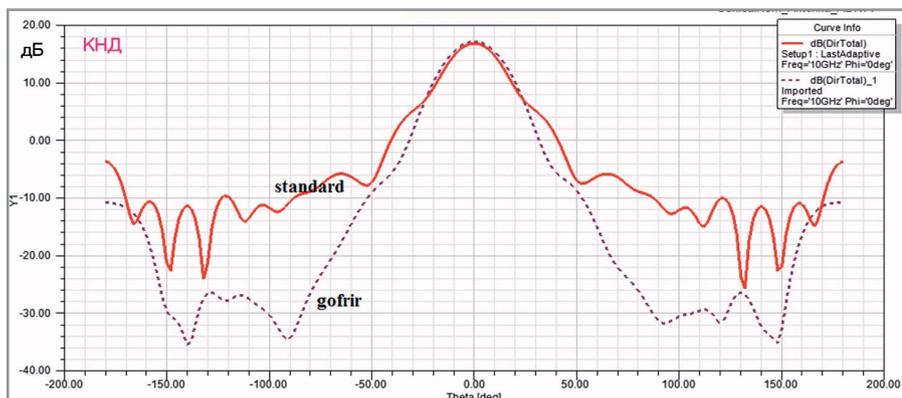


Рис. 3. Диаграмма направленности стандартного и гофрированного облучателей

Таблица 2. Результаты расчёта зеркальных антенн разного диаметра (D) и фокуса (F) с помощью метода интегральных уравнений (IE) и метода физической оптики (PO) для негофрированного (ST) и гофрированного (GF) рупора

№ расчёта	Диаметр зеркала	D, см	F, см	КНД зеркальной антенны при разных методах расчёта, дБ	Уровень боковых лепестков зеркальной антенны, дБ	Время расчёта, с, и количество треугольников разбиения зеркала (в скобках) для каждого из методов
1	2λ	6	2,4	9,39 (ST-IE) 7,78 (ST-PO) 6,05 (GF-IE) 3,06 (GF-PO)	-6,93 (ST-IE) -5,58 (ST-PO) -9,16 (GF-IE) 2,57 (GF-PO)	0,1 (570) 0,05 (478) 3,1 (570) 0,06 (478)
2	5λ	15	6	15,98 (ST-IE) 15,98 (ST-PO) 12,41 (GF-IE) 12,41 (GF-PO)	-11,98 (ST-IE) -14,68 (ST-PO) -23,28 (GF-IE) -16,02 (GF-PO)	1,17 (2308) 0,08 (1800) 5,55 (2288) 0,09 (1800)
3	10λ	30	12	23,39 (ST-IE) 23,21 (ST-PO) 19,99 (GF-IE) 20,09 (GF-PO)	-7,59 (ST-IE) -10,35 (ST-PO) -30,98 (GF-IE) -24,48 (GF-PO)	1,21 (8130) 0,09 (6400) 6,58 (8131) 0,11 (6400)
4	15λ	45	18	27,20 (ST-IE) 27,16 (ST-PO) 24,15 (GF-IE) 24,28 (GF-PO)	-7,96 (ST-IE) -8,35 (ST-PO) -17,6 (GF-IE) -17,6 (GF-PO)	3,14 (20038) 0,05 (15776) 3,15 (20038) 0,06 (15776)
5	30λ	90	36	33,86 (ST-IE) 33,78 (ST-PO) 31,14 (GF-IE) 31,14 (GF-PO)	-9,52 (ST-IE) -9,52 (ST-PO) -2,56 (GF-IE) -2,56 (GF-PO)	91 (79879) 0,2 (62892) 80 (79874) 0,2 (62892)
6	67λ	200	80	40,32 (ST-PO) 39,67 (GF-PO)	4,89 (ST-PO) 4,89 (GF-PO)	90 (290480) 103 (290480)

Как видно из рисунка 3, уровень боковых лепестков у гофрированной антенны меньше, чем у стандартной. Как будет показано далее, это приводит к увеличению КНД гофрированной антенны по сравнению со стандартной.

Для совместного моделирования в HFSS отдельных частей проекта разными методами (облучатель – методом FEM, зеркало – методом интегральных уравнений или методом физической оптики) используется гибридный метод. В одном проекте будут считаться два дизайна: дизайн HFSS и дизайн IE.

Облучатель в виде круглого рупора (см. рис. 4) можно создать с помощью специальной утилиты ADK HFSS, добавляемой к HFSS.

Рассчитанные в этом проекте характеристики дальнего поля вызываются в другом проекте как источник излучения.

Создадим в общем проекте ещё один дизайн типа IE. Построим в этом дизайне зеркало размером 2λ, для чего выбираем значение F<sub>oc</sub> = 2,4 см. В результате, учитывая выбранное соотношение F<sub>oc</sub> / D = 0,4, получаем D = 6 см. Это самый маленький размер моделируемого зеркала (см. табл. 2, номер расчёта 1).

В этом же проекте выберем источник возбуждения как падающую волну в дальней зоне и выберем (кнопкой Setup Link) проект с рупором (см. рис. 5а). В этом же диалоге (см. рис. 5а) можно скорректировать

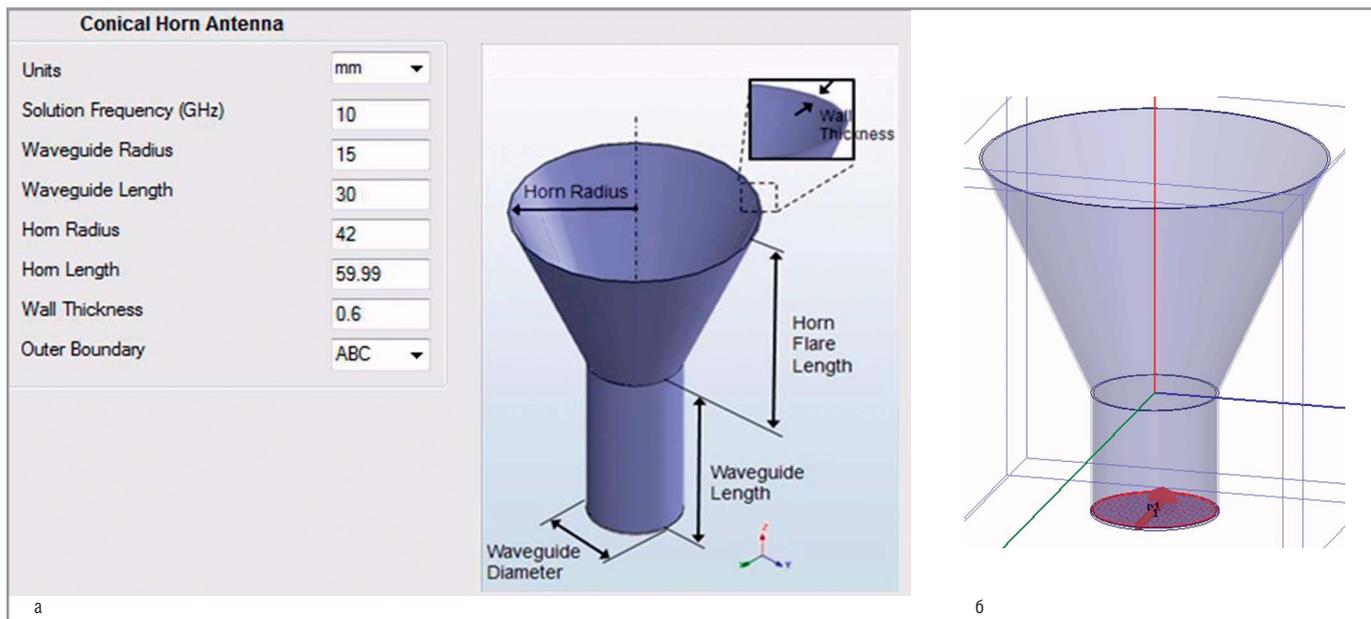


Рис. 4. Конструирование облучателя: а – облучатель зеркальной антенны в виде круглого рупора в интерфейсе утилиты ADK HFSS;

б – порт, устанавливаемый в сечении круглого волновода

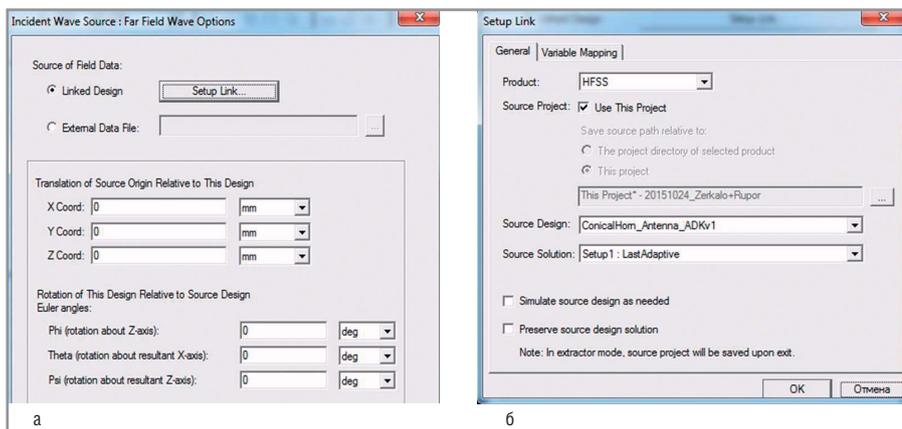


Рис. 5. Установки проекта: а – установление связи между проектами облучателя и проектом с зеркалом; б – выбор проекта облучателя в виде конической антенны

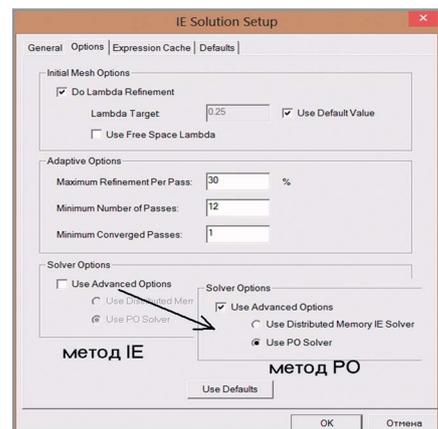


Рис. 6. Перевод расчёта методом IE к расчёту методом физической оптики

положение фазового центра облучателя относительно фокуса зеркала и угол смещения рупора.

Проекты рупорной и зеркальной антенн связываются по дальнему или по ближнему полю (см. рис. 5б). Первый случай даёт более точные результаты для зеркала большого размера.

Диаграмму направленности (ДН) облучателя, рассчитанную методом IE, можно также экспортировать и запомнить в виде файла с расширением .ffd. В проекте HFSS-IE метод IE выбирается по умолчанию (см. рис. 6).

Чтобы вывести на один график сечения ДН, полученные методом IE и PO, можно после расчёта методом IE создать отдельную папку и в неё перенести полученные данные, а после расчёта методом PO перенести на этот график данные, рассчитанные методом PO.

Метод физической оптики PO выбирается в диалоге установки на решение, активизируя опцию Use Advanced Options (см. рис. 6) и далее – Use PO Solver. Включение опции Do Lambda Refinement означает, что будет использоваться метод адаптивного анализа по критерию уплотнения по длине волны.

Опцию решения методом интегральных уравнений можно выбрать как ACA (Adaptive Cross Approximation) или как MLFMM (Multipole Fast Method), причём последний метод более эффективен для больших размеров анализируемой модели, чем метод ACA. Опция Lambda Target (см. рис. 6) устанавливает параметры окружающего материала. По умолчанию используется величина  $0,25\lambda$ .

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Зеркальная антенна в виде трёхмерного параболоида диаметром

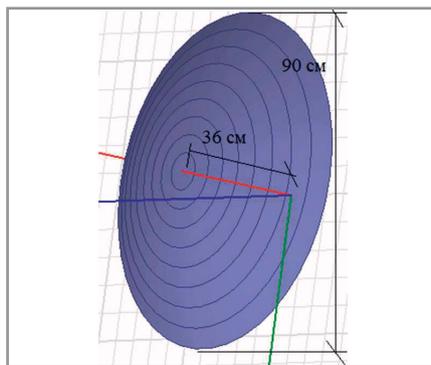


Рис. 7. Геометрия зеркала антенны диаметром 90 см

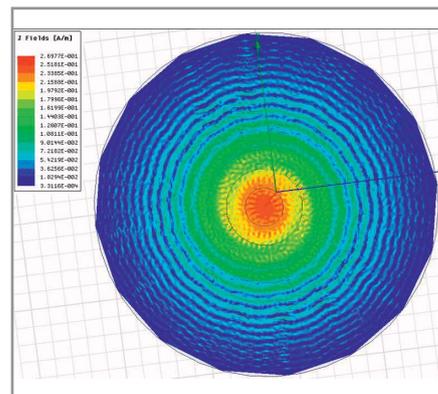


Рис. 8. Ток на поверхности зеркала

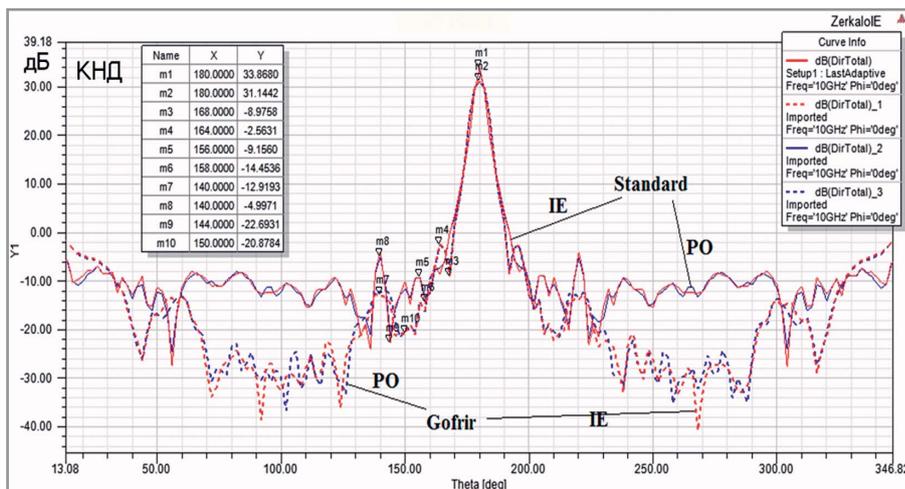


Рис. 9. Сечение диаграммы направленности для двух углов и двух методов расчёта и диаметра  $D = 30\lambda$  (90 см)

$D=30\lambda=90$  см имеет фокусное расстояние  $F = 36$  см (см. рис. 7). Эта антенна создаётся в проекте HFSS-IE и в нём можно рассчитать токи, текущие по поверхности зеркала (см. рис. 8)

Расчёт зеркальной антенны при возбуждении негофрированным рупором делает КНД:

- по формуле (3), равным 34,5 дБ (2826 ед.);
- методом PO (см. рис. 9), равным 33,9 дБ (2450 ед.).

Учитывая разницу, полученную в этих расчётах, можно заключить, что коэффициент использования поверхности, приведённый в формуле (3), равен 0,87.

Расчёты характеристик зеркальных антенн, полученные разными методами, сведены на один график (см. рис. 9).

Применение в качестве облучателя стандартного рупора даёт КНД зеркальной антенны равный 31,14 дБ

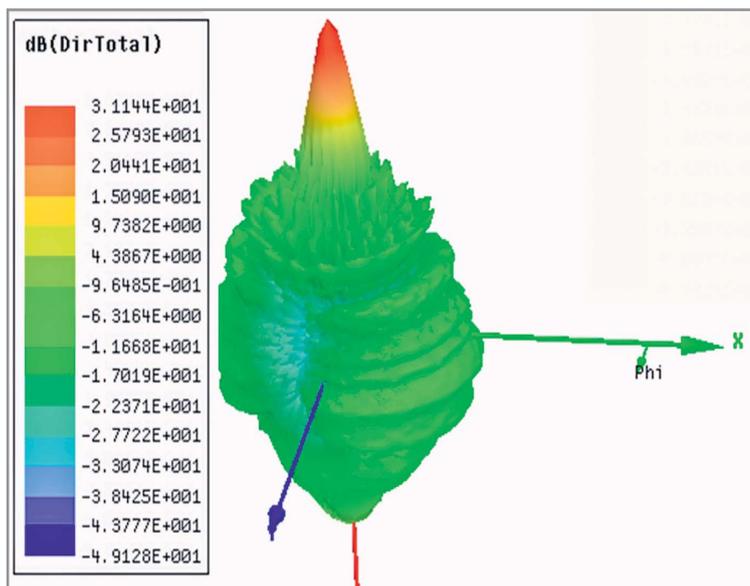


Рис. 10. ДН зеркальной антенны, облучаемой стандартным рупором

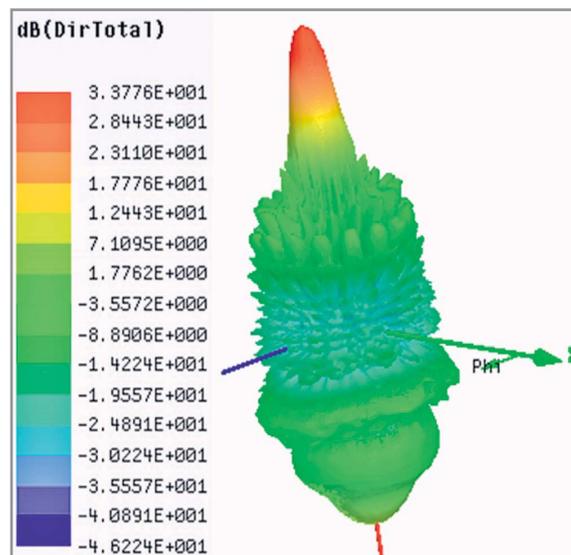


Рис. 11. ДН зеркальной антенны, облучаемой гофрированным рупором

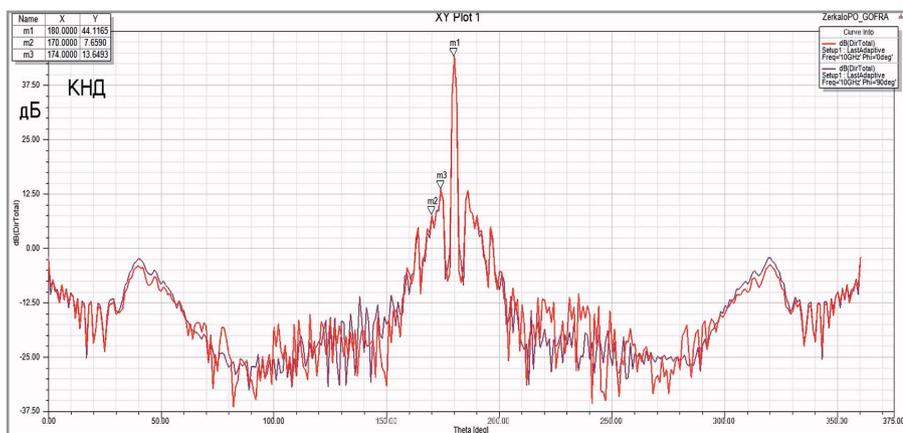


Рис. 12. ДН зеркальной антенны диаметром 2 м, облучаемой гофрированным рупором

(см. рис. 10), а в случае применения гофрированного рупора КНД = 33,86 дБ (см. рис. 11). Выигрыш составил более 2 дБ. Из рисунка 9 также видно, что средний уровень боковых лепестков относительно уровня главного лепестка для случая гофрированного рупора снижен примерно до -50 дБ, а для негофрированного рупора – до -40 дБ. Заметим, что это лишь количественная оценка, поскольку модель не учитывает элементов затенения, принципиально существующих в реальной антенне.

Результаты расчёта для нескольких размеров зеркала (каждый для случая  $F / D = 0,4$ ) сведены в таблицу 2. Для сравнения приведены требуемые ресурсы: время счёта и количество треугольников, на которые разбивается поверхность зеркальной антенны. Последняя строка в таблице 2 относится к расчёту зеркальной антенны диаметром 2 м, которая была рассчитана на компьютере с процессором Intel Core i7-3770 и памятью объёмом 16 Гбайт методом

физической оптики за 103 секунды. ДН этой антенны приведена на рисунке 12.

При расчёте методом физической оптики присутствуют следующие источники ошибок, которые отмечены в работе «Моделирование зеркальной антенны с помощью ANSYS HFSS» [4]: ошибки геометрического построения, грубость сетки разбиения металлической поверхности на треугольники, точность совмещения фазового центра облучателя с фокусом зеркальной антенны. Расчёты показали, что фазовый центр гофрированного рупора лежит на расстоянии 15 мм вне рупора, а фазовый центр стандартной антенны лежит на расстоянии 10 мм внутри рупора. Оптимизация положения облучателя позволяет улучшить КНД зеркальной антенны до 0,5 дБ. Таким образом, общий выигрыш в КНД зеркальной антенны при применении гофрированного рупора превысит 2 дБ.

Гофрированная рупорная антенна имеет меньшие ошибки фазового

центра [3], что даёт меньшую чувствительность результатов расчёта к положению облучателя относительно зеркальной антенны. С гофрированной антенной уменьшаются различия ДН в Е- и Н-плоскостях.

### Выводы

Гибридные методы, реализованные в пакете ANSYS HFSS, позволяют использовать эту программу для расчёта больших зеркальных антенн. При анализе зеркальной антенны, облучаемой рупором, точности расчёта методом интегральных уравнений и методом физической оптики показали результаты, отличающиеся не более чем на 5%. Метод физической оптики даёт хорошую точность для металлических моделей. Начиная с определённых размеров излучающей структуры, когда решить задачу методом моментов не удастся из-за невозможности решения системы уравнений, рекомендуется применение метода физической оптики. При этом время счёта методом физической оптики в десятки раз меньше, чем при использовании метода интегральных уравнений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. [www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS+HFSS](http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS+HFSS).
2. Сазонов Д.М., Марков Г.Т. Антенны. М. Радио и связь 1973. 500 с.
3. Коган Б.Л. Поляризационные характеристики антенн. МЭИ. 2014. 95 с.
4. Курушин А.А., Лаврецкий Е.И., Дергачёв С. Моделирование зеркальной антенны с помощью ANSYS HFSS. Современная электроника. 2015. №2.





# СВЯЗЬ

## 10–13.05

### 2016

Международная выставка  
информационных  
коммуникационных  
технологий.

 **ЭКСПОЦЕНТР**

Организатор: ЗАО «Экспоцентр»

При поддержке:

- Министерства связи и массовых коммуникаций РФ
- Министерства промышленности и торговли РФ
- Федерального агентства связи (Россвязь)
- Правительства Москвы

Под патронатом  
Торгово-промышленной палаты РФ



12+

Реклама



Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр»

[www.sviaz-expo.ru](http://www.sviaz-expo.ru)