# Расчёт зеркальных параболических антенн с помощью современных САПР СВЧ

### Александр Курушин, Евгений Лаврецкий, Сергей Чадов (Москва)

Для анализа и расчёта характеристик излучения зеркальных антенн большого электрического размера существуют приближённые методы. В последнее время всё бо́льшую популярность приобретает метод физической оптики, который используется в программах GRASP, Mirror и FEKO.

### Введение

Зеркальные антенны, используемые в спутниковой связи и радиоастрономии, имеют размеры от десятков сантиметров до сотен метров [1]. Это означает, что электрические размеры антенн могут составлять сотни длин волн. Расчёт таких больших структур строгими электродинамическими методами потребовал бы больших вычислительных затрат. Поэтому для анализа и расчёта характеристик излучения зеркальных антенн большого электрического размера используют приближённые методы, к которым относятся методы геометрической оптики и геометрической теории дифракции, а также методы физической оптики и физической теории дифракции [2-4].

В настоящее время, благодаря высокой эффективности и точности, большую популярность приобрёл метод физической оптики, который даёт аппроксимацию поверхностного электрического тока для идеально проводящих рассеивателей (рефлекторов). Этот метод использует в качестве ключевого алгоритма численного расчёта формулу:

$$\dot{I}^{\circ} = 2 \left[ \vec{H}, \vec{n} \right], \tag{1}$$



Рис. 1. Облучаемая рупором зеркальная параболическая антенна с рассчитанными поверхностными токами

где *n* – вектор нормали для каждой точки поверхности рефлектора,  $\tilde{H}$  – вектор магнитного поля, создаваемого в данной точке первичным облучателем ([A/м]),  $\bar{J}^{\circ}$  – поверхностный электрический ток на металлическом рефлекторе ([А/м]). Далее по известному электрическому току (1) находят поле излучения зеркальной антенны (вторичное поле), а сам расчёт вторичного поля сводится к вычислению соответствующих двумерных интегралов Фурье от поверхностного электрического тока. Таким образом, в отличие от большинства электродинамических методов, которые сводятся к решению системы уравнений Максвелла, метод физической оптики не требует решения системы линейных алгебраических уравнений большого порядка.

По сравнению с методом физической оптики, метод физической теории дифракции [3, 4] позволяет учесть более тонкие эффекты дифракции первичного поля облучателя на кромке зеркала. Как правило, это даёт уточнение уровня дальних боковых лепестков поля излучения антенны. Однако численная реализация метода физической теории дифракции является более сложной и менее универсальной, а его применение, с практической точки зрения, не является необходимым для анализа больших антенн.

Заметим, что метод геометрической оптики даёт меньшую точность при анализе зеркальных антенн, чем метод физической оптики, так как не учитывает поляризационные эффекты (в частности, при анализе зеркальных антенн апертурным методом). Метод геометрической теории дифракции по точности примерно эквивалентен методу физической оптики.

Анализ и проектирование зеркальных антенн обычно выполняют с помощью уникальных программ, приспособленных для решения конкретных задач. Программа GRASP, разработанная в компании TICRA [5], является коммерчески распространяемой специализированной программой для расчёта зеркальных антенн и представляет собой промышленный стандарт точного моделирования зеркальных антенн.

Программа Mirror [6] также предназначена для решения специализированных задач, в том числе, задачи облучения рефлектора системой излучателей. Как правило, скорость решения задач в подобных программах очень высокая, что позволяет просчитать большое число вариантов на этапе эскизного проектирования.

Ещё одной программой, с помощью которой может быть эффективно рассчитана зеркальная антенна (см. рис. 1), является одна из самых мощных САПР СВЧ – система FEKO [7]. Эта универсальная система позволяет создавать, проектировать и оптимизировать разнообразные излучающие структуры. Однако, по нашему опыту, время расчёта бывает значительным.

В программах GRASP, Mirror и FEKO для расчёта зеркальных антенн используется метод физической оптики.

### Расчёт осесимметричной зеркальной антенны в программе Mirror

Программа Mirror предназначена для расчёта характеристик излучения рефлекторных антенн с одиночным или многоэлементным облучателем. Работа в программе Mirror начинается с выбора параметров задачи. По команде Reflector выводится диалог, приведённый на рисунке 2. Для анализа антенны, близкой по размерам к офсетной зеркальной антенне [8], выберем в этом диалоге размер зеркала диаметром 268 см с фокусным расстоянием 138 см. Затем, по команде Array Feed System, появляется диалог, в котором можно задать самые разнообразные способы возбуждения зеркальной антенны (см. рис. 3).

В программе Mirror предусмотрено создание до 32 произвольно расположенных и ориентированных в пространстве объектов класса *Feed* (пита-



Рис. 2. Выбор геометрии рефлектора в диалоге программы Mirror

ющих антенн). Функции этого класса рассчитывают электрический ток, наводимый объектом на поверхности рефлекторов, и поле излучения объекта в ближней или дальней зоне (для электродинамических моделей). Каждый из объектов этого класса, как и элемент фазированной антенной решётки (ФАР), может быть выбран следующим образом:

- табулированной диаграммой направленности (ДН), например, полученной экспериментальным путем;
- ДН, аппроксимированной аналитической функцией;
- простой моделью пирамидального рупора;
- электродинамической моделью гладкого конического рупора и конического рупора с изломом;

Array feed system			
Array aperture © rectangular C hexagon C circular C arbitrary >> number of elements o element spacing on X	Array lattice (rectangular C triangular on X-axis C triangular on Y-axis 1X-axis axis, cm 5.00	Aroy operture and latice sample $\begin{bmatrix} \mathbf{x} & \mathbf{f} \\ \mathbf{h} \\ 0 \\ \mathbf$	
number of elements on Y-axis 1 element spacing on Y-axis 5.00		Апертура ФАР	
Array element		on X-exis,cm 0.00 on Y-exis,cm 0.00 on Z-exis,cm 0.00	
Array phase distribution		Rotation angle in plane ZOX, deg 0.0 in plane ZOY, deg 180.0	
ОК		Cancel	

Рис. 3. Диалог задания характеристик антенной решётки, облучающей зеркальную антенну

 электродинамической моделью многосекционного круглого и прямоугольного волноводов, которая позволяет реализовать любую геометрию рупорного облучателя, включая рупор с канавками.

Диаграмму направленности элемента возбуждения, рассчитанную в программе, можно сохранить в файле с расширением \*.dat. Впоследствии этот файл



Рис. 4. Сечение диаграммы направленности (слева) и ток в раскрыве апертуры зеркальной антенны (справа), рассчитанные в программе Mirror



Рис. 5. График расчёта кросс-поляризации

можно использовать для расчёта в других программах. Полученные поля облучателя используются для расчёта токов на зеркале (см. рис. 4).

После расчёта распределения токов производится расчёт диаграммы излучения, которая строится в окне отображения ДН. Для сечения диаграммы излучения строится компонента по основной поляризации и кроссполяризационная компонента. В окне диалога (см. рис. 4) выводится диаграмма направленности, ток в сечении зеркала и параметры зеркальной антенны. Для нашей антенны получаем коэффициент направленного действия (КНД), равный 47,9 дБ.

### Расчёт офсетной зеркальной антенны в программе Mirror

В зеркальной антенне с осесимметрическим расположением облучателя, последний и его штанги затеняют лучи прямого прохождения и таким образом ухудшают КНД. Поэтому на практике часто применяется офсетная зеркальная антенна [8]. Анализируемая антенна подсвечивается снизу под углом  $\approx 50^{\circ}$ . Сечение антенны также повёрнуто по отношению к вертикальной плоскости примерно на 26°. Рабочая поверхность рефлектора является вырезкой из параболоида вращения, описываемого уравнением  $z = (x^2 + y^2)/4F$ , где F = 138 см. Центр вырезки расположен на расстоянии 134,5 см от фокальной оси.

Антенна имеет следующие паспортные параметры [8]:

- размеры 240 × 267 см (раскрыв Ø240 см);
- диапазон частот 10,7...12,75 ГГц;
- ширина диаграммы направленности не более 0,7° (11,3 ГГц);
- коэффициент усиления 47,6 дБ (11,3 ГГц);
- уровень боковых лепестков не более -25 дБ.

Рассчитаем офсетную антенну, облучаемую открытым концом круглого волновода. В программе Mirror воздействие осуществляется по дальнему полю. Вначале рассчитывается излучающий элемент и его дальнее поле на каждом элементе сетки зеркальной антенны. Эта процедура даёт диаграмму направленности зеркальной антенны, а также её кросс-поляризационную составляющую [9,10] в диалоге сечения диаграммы направленности *Pattern cut* (см. рис. 5). В результате расчёта офсетной антенны получаем КНД = 48,35 дБ, коэффициент использования поверхности 67,6% и ширину луча по уровню –3 дБ, равную 0,72°. Эти результаты близки к паспортным данным антенны [8].

### Расчёт облучаемой круглым волноводом осесимметричной зеркальной антенны в программе **FEKO**

Программа FEKO тоже позволяет рассчитать зеркальную антенну большого размера методом физической оптики [2], когда токи на поверхности зеркальной антенны рассчитываются по формуле (1). Эти токи находятся в центре каждого элемента декомпозиции зеркальной антенны (треугольник), в центре которого FEKO рассчитывает нормаль. Конечный размер треугольника, а также замена плавной поверхности параболоида срезанными плоскостями, являются источником погрешности численного расчёта методом физической оптики.

Начертим параболоид Ø240 см с помощью команды *Draw* → *Paraboloid*. В появившееся окно (см. рис. 6) вводим фокусное расстояние 138 см. Для черчения излучателя в другой системе координат создадим рабочую систему координат, смещённую на 138 см относительно глобальной системы координат.

Для ускорения расчёта на первом этапе выполним анализ открытого конца круглого волновода и рассчитаем ближнее поле в сечении растра. Плотность точек, в которых рассчитывается ближнее поле, зависит от шага Increment (см. рис. 7). Чтобы рассчитанные поля Е и Н в этих точках сохранить для дальнейшего расчёта, в закладке Advanced выберем вариант сохранения параметров поля в этих точках в файлы с расширением \*.efe и \*.hfe. Используем эти данные для создания плоской апертуры для возбуждения зеркала, а точки апертуры поместим в точки, где рассчитывалось ближнее поле.

Программа FEKO довольно долго производит разбиение металлического зеркала на треугольники. От каждого элемента апертуры, указанной на рисунке 7 как перекрестие, рассчитывается луч, по которому распространя-





Рис. 6. Вид параболоида с фокусным расстоянием 138 см и диаметром 240 см, вычерченного в программе FEKO

Рис. 7. Диалоги установки апертуры облучателя



Рис. 8. Диаграмма направленности осесимметричной зеркальной антенны (расчёт в программе FEKO)

ется волна *H*, создающая токи на зеркале. Затем, используя интегральные уравнения и функции Грина, программа FEKO рассчитывает характеристики в дальней зоне, в том числе направленность.

Из диаграммы направленности, показанной на рисунке 8, следует, что КНД зеркальной антенны равен 48 дБ. Результаты расчёта зеркальной антенны, показанные на рисунках 5 и 8, совпадают с расчётами в программе Mirror. При прочих равных условиях, скорость расчёта в программе Mirror оказалась в 5 раз выше, однако система FEKO является более гибким инструментом решения подобных задач. Кроме того, она позволяет рассчитывать структуры с диэлектриками и структуры с потерями в металлических и диэлектрических средах.

## Расчёт офсетной зеркальной антенны в программе FEKO

Рассмотрим структуру офсетной антенны, показанную на рисунке 9.

Облучатель устанавливается в фокус параболоида. Зеркало вырезается из параболоида с помощью объёмного цилиндра, в результате чего оно приобретает эллиптическую форму. В сечении круглого волновода, выполняющего функцию облучателя, установим сферу, на поверхности которой можно сохранить значения ближнего поля. Это позволит нам разделить задачу на две: расчёт облучателя и построение падающего на зеркало поля на основе полученных данных. В программе FEKO такое разделение можно выполнить и по дальнему полю, как в программе Mirror.

Эту систему можно рассчитать и «в целом», без связи между облучателем и зеркалом. В качестве облучателя используем отрезок круглого волновода (см. рис. 7), на котором также приводится сечение ДН. В результате получаем ширину ДН такого облучателя по уровню –3 дБ, равную 80°. Выполнив (методом физической оптики) расчёт зеркала, облучённо-

Рис. 9. Зеркальная антенна со смещением облучателя

го такой круглой антенной, получаем КНД = 48 дБ по основной поляризации (см. рис. 10).

Облучатель

Кросс-поляризацию следует учитывать в антенне системы связи с поляризационным уплотнением, когда паразитный сигнал может привести к нарушению приёма. Типовое требование к уровню кросс-поляризации в максимуме ДН антенны составляет – 30 дБ (в системах с двумя линейными ортогональными поляризациями). Значение кросс-поляризации в максимуме равно 28 дБ (см. рис. 11), что на 20 дБ меньше сигнала в максимуме ДН основной поляризации.

### Выводы

В статье продемонстрировано разделение сложной задачи проектирования антенны на более простые задачи, с заменой облучателя зеркальной антенны на апертурные излучатели. Для осесимметричной и офсетной зеркальной антенн получено хорошее совпадение результатов расчёта



Рис. 10. Диаграмма направленности офсетной зеркальной антенны [8] (расчёт в FEKO)



Рис. 11. Кросс-поляризационная составляющая диаграммы направленности офсетной зеркальной антенны [8] (расчёт в FEKO)

в программе Mirror и в программе FEKO с данными, приведёнными изготовителем антенны. В обоих случаях использован метод физической оптики.

### Литература

- *1. Baars J.* The Paraboloidal Reflector Antenna in Radio Astronomy and Communication. Springer. 2007.
- 2. Хенл Х., Мауэ А., Вестпфаль К. Теория дифракции. Мир. 1964.
- Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. Советское радио. 1962.
- 4. Shore R.A., Yaghjian A.D. Incremental Diffraction Coefficients for Planar Surfaces. IEEE Trans. AP. 1988. Vol. 36, № 1. P. 55–70.
  5. www.ticra.com.
- 5. www.ticra.com
- Программа «Міггог» (авторы-разработчики: Чадов С.Е., Кондратьев А.С., Лаврецкий Е.И. Особое Конструкторское бюро МЭИ). www.kiasystems.ru.
- 7. www.feko.com
- Паспорт офсетной зеркальной антенны СТВ-2,4-1.1 АУМ. ОАО «АлМет». www.supral.ru.
- Parkinson J.R., Mebler M. Convergence of PO Integrals by Ludwig Technique. Electronics Lett. Vol. 22. № 22. 1986. P. 1161–1162.
- Ludwig A.C. The Definition of Cross Polarization. IEEE Trans. Antennas Propagat. Vol. AP-21, Jan. 1973. P. 116–119.