

Проектирование зеркальной антенной системы со спиральным облучателем

Андрей Пластиков, Нури Фейзулла (Московская обл.)

В статье описывается процесс компьютерного проектирования параболической однозеркальной антенны со спиральным облучателем для дециметрового диапазона волн.

ВВЕДЕНИЕ

Зеркальные антенные системы широко используются в различных областях радиоэлектроники в диапазоне длин волн от единиц миллиметров до метров, поскольку они позволяют реализовать самую высокую направленность. В настоящее время наиболее рациональным подходом к разработке подобных антенных систем является использование компьютерного моделирования.

В предлагаемой статье рассматривается проектирование параболической однозеркальной антенны дециметрового диапазона волн со спиральным облучателем. Зеркало имеет радиус раскрыва и фокусное расстояние, равные 2,5 м. Необходимо было обеспечить работу антенной системы в двух разнесённых поддиапазонах частот шириной 25 МГц – вблизи 800 и 1000 МГц. При этом требовалось реализовать близкий к единице коэффициент эллиптичности (КЭ).

Проектирование осуществлялось с помощью коммерческих программных пакетов Ansoft HFSS (High Frequency Structure Simulator) [1, 2], CST

Microwave Studio [3] и EMSS FEKO [4, 5]. Данные программы предназначены для моделирования и расчёта характеристик электромагнитных полей в сложных СВЧ-устройствах.

Использование подобных программных пакетов позволяет в значительной мере ускорить процесс разработки устройств. Для адекватности результатов следует сопоставлять их с теоретическими предпосылками, а также проводить моделирование в различных программах (использующих различные методы расчёта), сравнивая получаемые характеристики устройств между собой.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЛУЧАТЕЛЯ

Облучатель зеркала выполняется в виде двухзаходной конической спиральной антенны с экраном (см. рис. 1). Использование облучателя такого типа позволяет получить осесимметричную диаграмму направленности (ДН) с близкой к круговой поляризацией в требуемых диапазонах частот и обеспечить незначительное затенение вторичного поля зеркала.

Жёсткая коаксиальная линия, закреплённая вдоль оси антенной системы, подводит питание к облучателю (в процессе передачи) и одновременно является опорой. Для получения круговой поляризации поля излучения необходимо обеспечить противофазное питание заходов спиралей. Для этого используется микрополосковая линия, располагаемая внутри экрана. Сам экран имеет двухступенчатую форму для обеспечения возможности подвода питания.

Проектирование облучателя осуществлялось в программе HFSS. Для решения уравнений электродинамики она использует метод конечных элементов (Finite Element Method), подразумевающий разделение всего пространства на тысячи малых областей – тетраэдров – и описание поля в каждой подобласти

(элементе) локальной функцией. Данное представление структуры позволяет программе перейти от уравнений Максвелла к матричным уравнениям, которые затем решаются с помощью традиционных численных методов.

Коаксиальный тракт питания диаметром 38 мм моделировался сплошным металлическим цилиндром длиной 900 мм, а спирали – в виде бесконечно тонких ленточных структур, возбуждаемых с помощью дискретных портов. Тонкий опорный диэлектрик в модель не вводился, поскольку он существенно не влияет на характеристики спиральной антенны [6], а использование в модели столь тонкой (порядка 0,5 мм) детали конструкции приводит к существенному увеличению количества элементов разбиения в HFSS и, как следствие, времени расчёта модели.

Проведём оценку необходимой ширины ДН облучателя и уровня облучения края зеркала. Угол θ_0 , под которым из фокуса виден край зеркала, описывается выражением:

$$\theta_0 = 2 \arctg \frac{r}{2f}, \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние, r – радиус раскрыва зеркала. В нашем случае $r=f=2,5$ м и $\theta_0 \approx 53,13^\circ$.

Использование облучателя с очень широкой или излишне узкой ДН может привести к существенному уменьшению КНД по сравнению с идеальной плоской антенной такого же радиуса. Соответствующее уменьшение КНД принято характеризовать коэффициентом использования поверхности (КИП). Зависимость КИП от уровня облучения края зеркала должна иметь максимум, который и соответствует оптимальному облучателю.

Считаем, что проектируемый облучатель имеет осесимметричную ДН. После её аппроксимации нормированной функцией вида

$$F(\theta) = \cos^n \frac{\theta}{2}, \quad 0 \leq \theta \leq 180^\circ, \quad (2)$$

можно показать, что зависимость КИП η параболической антенны с круглым раскрывом от показателя степени n и угла θ_0 , под которым виден край зер-

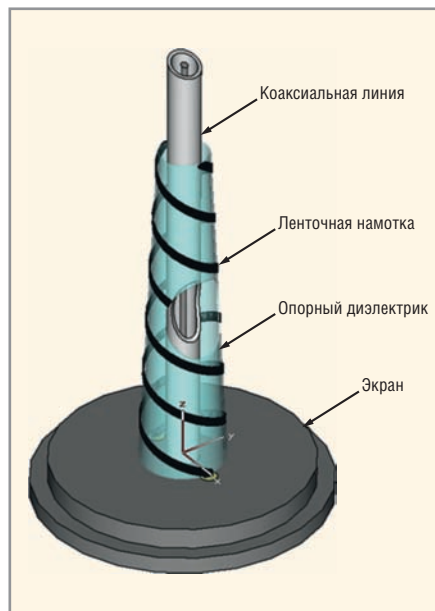


Рис. 1. Конструкция облучателя (с вырезом)

кала, можно оценить следующим выражением:

$$\eta = \frac{4(n+1)}{n^2} \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta_0}{2} \left[1 - \cos^n \frac{\theta_0}{2} \right]^2. \quad (3)$$

Из формулы (2) получаем, что выраженный в децибелах уровень облучения края зеркала N равен:

$$N = -20 \lg \frac{1}{\cos^n \frac{\theta_0}{2}} = 10 \lg \left(\cos^{2n} \frac{\theta_0}{2} \right). \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) позволяют для определённого выше угла θ_0 получить зависимость η от N при вариации n (см. рис. 2). Эта зависимость имеет слабо выраженный максимум $\eta_m = 0,796$, соответствующий значению $N = -9,6$ дБ. Задавшись допустимым снижением КИП в 2% от оптимального значения, получаем, что в пределах рабочих частотных диапазонов проектируемый облучатель должен обеспечивать уровень облучения края зеркала в пределах от $-12,3$ до $-7,5$ дБ.

Для снижения уровней бокового и заднего излучения в конструкцию облучателя был введён дополнительный элемент – двойное четвертьволновое дроссельное устройство, крепящееся непосредственно на экран спиральной антенны и препятствующее затеканию токов на нижнюю поверхность экрана. Характеристики поля излучения окончательной модели облучателя (см. рис. 3, здесь и далее размеры указаны в миллиметрах) сведены в таблицу 1.

Облучатель устанавливается вдоль оси рефлектора так, чтобы его фазовый центр (ФЦ) совпадал с фокусом зеркальной системы.

В программе HFSS отсутствует возможность непосредственного определения ФЦ антенны. Но такая возможность имеется в программе Microwave Studio, которая схожа по функциональности с HFSS, но использует другой метод расчёта – метод конечного интегрирования (Finite Integration Technique) на базе дискретизации уравнений Максвелла в интегральной форме. Данный метод может быть реализован как во временной, так и в частотной областях, с использованием гексагональной (в виде прямоугольных параллелепипедов) или тетраэдральной сетки разбиения.

В программе Microwave Studio использовался анализ во временной области. Вследствие использования гексагональной сетки разбиения были

спроектированы спирали с круглым сечением. Питание к облучателю проводилось посредством двух коаксиальных линий, продолжением центральных жил которых являются заходы спиральной антенны.

Определив положение ФЦ как среднее арифметическое от координат точек ФЦ на центральных частотах двух рабочих диапазонов, получаем, что ФЦ спроектированной спиральной антенны находится на её оси и отстоит от экрана на 112,9 мм (соответствующая точка отмечена на рисунке 3). Заметим, что полученные в программе Microwave Studio диаграммы направленности имеют более низкие (1...2 дБ) уровни бокового и заднего излучения по сравнению с рассчитанными в HFSS. Отличия же в области углов $\theta \leq \theta_0$ являются минимальными.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ПЛАТЫ ПИТАНИЯ ОБЛУЧАТЕЛЯ

Схема питания облучателя расположена внутри его экрана (см. рис. 4). Микрополосковая разводка начинается соответствующим переходом из коаксиального тракта, имеющего волновое сопротивление 50 Ом. Для обеспечения противофазного питания заходов облучателя используется полуволновая фазовращательная линия. Согласование с нагрузкой (входными сопротивлениями спиралей) осуществляется с помощью четвертьволновых трансформаторов и параллельных согласующих шлейфов, подключаемых непосредственно к нагрузке.

Моделирование и расчёт платы питания проводились в программе HFSS. Совместный электродинамический анализ (и, тем более, оптимизация) облучателя и его схемы питания как единого целого требует значительных затрат вычислительных ресурсов. Поэтому микрополосковая плата рассчитывалась отдельно. При этом учитывались данные, полученные при анализе облучателя.

Заметим, что построенная таким образом схема позволяет обеспечить

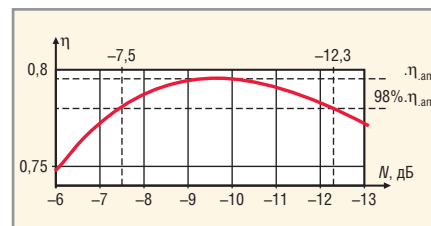


Рис. 2. Зависимость КИП η от уровня облучения края зеркала N вблизи максимума

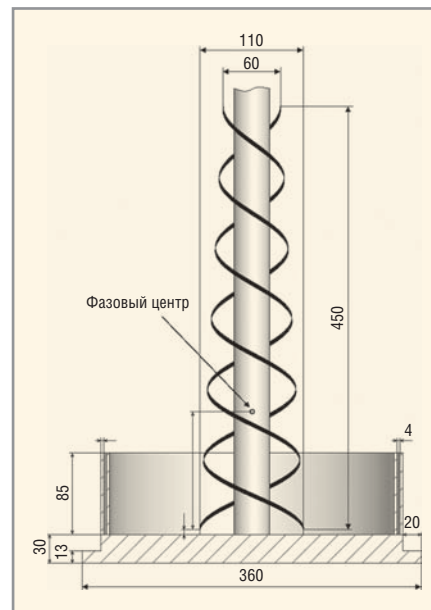


Рис. 3. Окончательная модель облучателя

лишь узкополосное согласование с облучателем. Наилучшее согласование требовалось получить в нижнем диапазоне частот. Для реализации широкополосного согласования можно было бы использовать, например, эффект связанных линий.

Используемый облучатель можно рассматривать как четырёхполюсник, входы которого не являются развязанными вследствие взаимодействия его элементов через свободное пространство. Последний факт не учитывается в программе HFSS при выводе получаемой матрицы Z-параметров облучателя.

Входные сопротивления $Z_{вх, n}$ ($n = 1, 2$) заходов спиралей рассматриваемой двухэлементной антенны могут быть найдены по аналогии с [7] и с учётом известного соотношения, связывающего коэффициент отражения в линии

Таблица 1. Характеристики поля модели облучателя на центральных частотах рабочих диапазонов

Характеристика	Диапазон частот	
	нижний (800 МГц)	верхний (1000 МГц)
Уровень облучения края зеркала (усреднённый по ф), дБ	-7,6	-9,8
Максимальный уровень боковых лепестков, дБ	-16,0	-8,2
Уровень заднего излучения, дБ	-12,0	-10,2
Значение КЭ в направлении оси/на краю зеркала (усреднённое по ф)	0,98/0,65	0,95/0,65

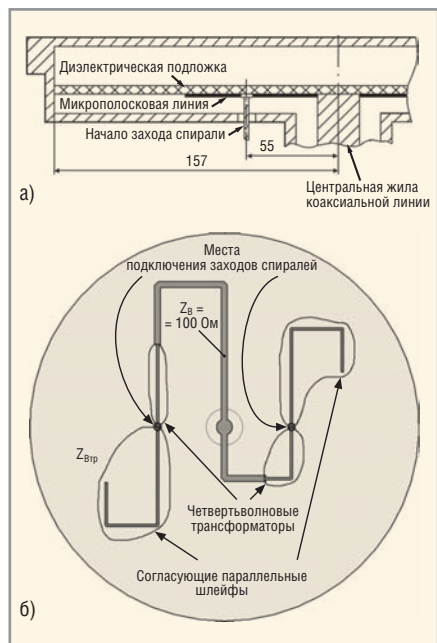


Рис. 4. Конструкция схемы питания облучателя
(а) Разрез сбоку и (б) вид на микрополосковую линию

передачи с входным сопротивлением нагрузки, следующим образом:

$$Z_{вх.n} = Z_0 \frac{1 + R_n}{1 - R_n}, \quad (5)$$

где Z_0 – характеристическое сопротивление линии передачи. Для обеспечения противофазного равноамплитудного питания элементов облучателя необходимо выполнить равенства:

$$R_1 = S_{11} - S_{12}, R_2 = S_{22} - S_{21}. \quad (6)$$

Искомые входные сопротивления заходов спиралей определялись на основе выражений (5) и (6) с учётом S-матриц, рассчитанных в программе HFSS. Полученные зависимости отражены в таблице 2 в виде значений сопротивлений на краях рабочих диапазонов частот и соответствующих центральных частотах. В таблицу 2 также занесены усреднённые значения данных сопротивлений, определённые как среднее арифметическое соответствующих значений для двух заходов.

Таблица 2. Реальные и мнимые части входных сопротивлений заходов спиралей

Диапазоны	Частота	Re($Z_{вх1}$), Ом	Re($Z_{вх2}$), Ом	Re($Z_{вх}$), Ом	Im($Z_{вх1}$), Ом	Im($Z_{вх2}$), Ом	Im($Z_{вх}$), Ом
Нижний диапазон	Нижняя	183,46	186,16	184,8	-56,55	-55,90	-56,2
	Центральная	185,16	187,79	186,5	-59,87	-59,27	-59,6
	Верхняя	185,76	188,38	187,1	-63,97	-63,41	-63,7
Верхний диапазон	Нижняя	155,84	154,96	155,4	-48,82	-46,61	-47,7
	Центральная	163,11	162,30	162,7	-42,86	-40,17	-41,5
	Верхняя	173,75	173,07	173,4	-40,26	-36,89	-38,6

Вследствие симметрии (вращения) задачи анализа модели облучателя следовало ожидать совпадения входных сопротивлений обоих заходов. Однако из-за несимметричного разбиения модели на ячейки (тетраэды) в программе HFSS полученные для этих двух спиралей зависимости отличаются.

Соответствующие расчёты платы питания в двух рабочих диапазонах частот проводились отдельно. В качестве нагрузок микрополосковых линий использовались дискретные порты с комплексным сопротивлением (своим в каждом диапазоне), соответствующим полученным на центральных частотах усреднённым значениям входных сопротивлений спиралей (см. таблицу 2).

Таким образом, мы пренебрегли изменением входных сопротивлений заходов облучателя в рассматриваемых диапазонах частот. Сами полосковые линии проектировались бесконечно тонкими. Возбуждающий волноводный порт задавался в сечении коаксиального тракта.

В качестве диэлектрической пластины моделировался материал СТ-3 (сополимер стирола, модифицированный двуокисью титана) толщиной 1 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 10 \times 10^{-4}$ [8].

После оптимизации описанной структуры платы удалось получить КСВ в нижнем диапазоне частот менее 1,10, а в верхнем диапазоне – 2,27...2,52. Заметим, что соединение заходов спиралей с платой увеличит КСВ рассчитанной схемы.

Полученные зависимости коэффициентов передачи показывают, что в нижнем диапазоне частот удаётся получить практически равноамплитудное возбуждение заходов облучателя (разность составляет не более 1%). При этом в диапазоне верхних частот коэффициенты передачи отличаются на 22...39%. Максимальное отклонение

разности фаз от требуемых 180° составляет около 23° . Анализ облучателя с полученными отклонениями в возбуждении заходов спиралей показал, что интересующие нас характеристики поля излучения не претерпевают существенных изменений.

РАСЧЁТ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ В ПРОГРАММЕ FEKO

Задача анализа зеркальной антенны (вследствие больших габаритов) является очень сложной для реализуемых в программах HFSS и Microwave Studio численных методов расчёта. Программа FEKO, помимо численных методов, может реализовать и асимптотические методы физической оптики и равномерной теории дифракции, что позволяет моделировать с её помощью достаточно большие объекты, подобные рассматриваемой антенной системе. Отметим, что в последних версиях программы Microwave Studio появилась возможность использования метода интегральных уравнений (Integral Equation Solver), обеспечивающего анализ крупных структур.

Для расчёта вторичного поля зеркальной системы в программе FEKO использовалась возможность задания внешнего источника излучения с заранее сохранённой ДН. Таким образом, задача анализа зеркальной антенны была сведена к двум подзадачам: отдельному расчёту облучателя с последующим расчётом самого зеркала, облучаемого точечным источником с ДН-облучателя.

Для расчёта облучателя окончательная модель спиральной антенны была экспортирована из программы HFSS. Впрочем, подобная структура может быть построена и в самой программе FEKO. Возбуждение задавалось посредством источников напряжения (портов VoltageSource). В программе FEKO отсутствует адаптивное наложение сетки разбиения, поэтому параметры

Таблица 3. Характеристики поля антенной системы на центральных частотах рабочих диапазонов

Характеристика	Диапазон частот	
	нижний (800 МГц)	верхний (1000 МГц)
Кoeffициент усиления, дБ	29,2	30,9
Максимальный уровень боковых лепестков (относительно максимума), дБ	-24	-27
КЭ в направлении оси	0,89	0,89

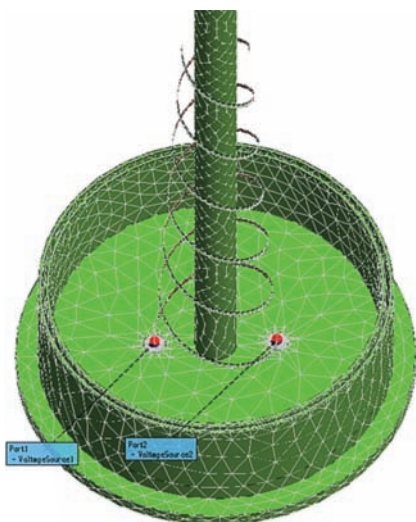


Рис. 5. Модель облучателя в программе FEKO

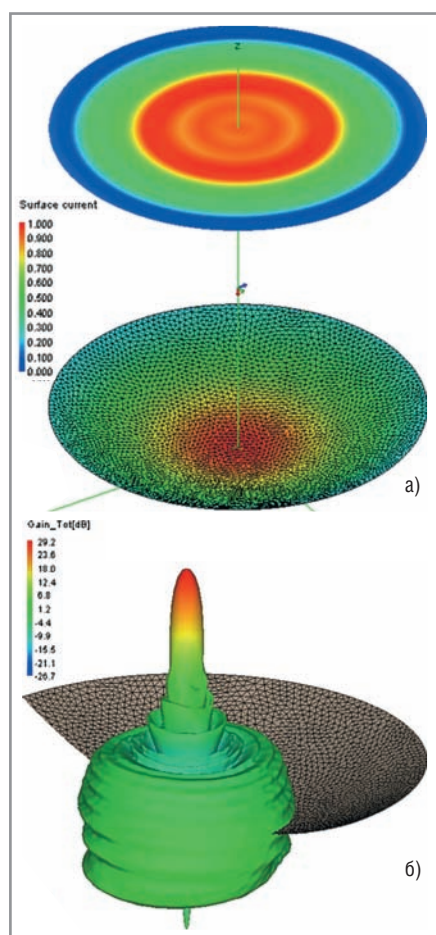


Рис. 6. Результаты анализа, визуализированные в программе FEKO

разбиения модели на ячейки устанавливались вручную (см. рис. 5).

Как и в программе HFSS, в FEKO отсутствует возможность непосредственного вычисления ФЦ антенны. Разработчики программы предлагают использовать косвенный метод определения положения ФЦ, реализуемый посредством анализа зависимости величины ближнего поля вдали антенны от расстояния (для сферической волны модуль поля в дальней зоне должен убывать обратно пропорционально расстоянию). Но данный подход как минимум неудобен, поэтому вычисления полей облучателя проводились относительно точки ФЦ, определённой в программе Microwave Studio.

Анализ спиральной антенны на двух центральных частотах проводился методом моментов (Method of Moments). Рассчитанные характеристики дальнего поля облучателя дополнительно сохранялись в файлах *.ffe для дальнейшего использования. Отметим, что полученные ДН спиральной антенны незначительно отличались от аналогичных характеристик, рассчитанных в программе HFSS (не более чем на 1дБ во всём диапазоне углов).

Сохранённые поля спиральной антенны далее использовались для облучения зеркала, рассчитываемого методом физической оптики. Полученные численные характеристики вторичного поля системы сведены в таблицу 3. Расчёт посредством теории дифракции дал схожие результаты. На рисунке 6 приведены некоторые результаты анализа, визуализированные в программе FEKO.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описан алгоритм разработки однозеркальной параболической антенной системы, работающей на двух разнесённых поддиапазонах дециметровых волн. В расчётах использовались взаимодополняющие воз-

можности трёх распространённых программных пакетов – HFSS, Microwave Studio и FEKO.

Проведена оценка необходимого уровня облучения края зеркала. Спроектированы облучатель в виде двухзаходной конической спиральной антенны и микрополосковая схема его питания. Поля излучения модели спиральной антенны, рассчитанные во всех трёх программах, хорошо согласуются друг с другом, что свидетельствует об адекватности полученных результатов.

Для вычисления вторичного поля всей зеркальной системы использовался анализ в программе FEKO, реализующий асимптотические методы расчёта.

Проектирование антенных систем с привлечением современных программных пакетов позволяет уменьшить трудоёмкость разработки и повысить достоверность результатов для последующих натурных экспериментов.

Авторы выражают благодарность к.т.н. Курушину А.А. за помощь в осуществлении расчётов.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.ansoft.com.
2. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация трёхмерных СВЧ-структур с помощью HFSS. Под ред. С.Е. Банкова. Изд. 2-е, доп. СОЛОН-Пресс, 2005.
3. www.cst.com.
4. www.feko.info.
5. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчёт излучаемых структур с помощью FEKO. НИИ «Родник», 2008.
6. Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. Советское радио, 1974.
7. Банков С., Давыдов А., Курушин А. Проектирование многоэлементных антенн со сложными системами питания. EDA Express 2007. № 16.
8. Полосковые платы и узлы. Проектирование и изготовление. Под ред. Е.П. Котова и В.Д. Каплуна. Советское радио, 1979. ©

Новости мира News of the World Новости мира

Samsung на пути к 5-нм техпроцессу

Samsung Electronics заявила о переходе производства чипов на технологию EUV (extreme ultraviolet, сверхглубокого ультрафиолета). Компания уже начала работу над производством чипов по EUV-технологии и заказала необходимое оборудование у голландской ASML Holding NV. Как считает Ким Ки Нам (Kinam Kim), глава научного подраз-

деления Samsung, развитие EUV-литографии позволит уже в ближайшем будущем выпускать чипы по 5-нм техпроцессу.

Для овладения технологией предстоит преодолеть много технических барьеров, таких как недорогой, но мощный источник жёсткого ультрафиолета и инфраструктура маски. Стоит заметить, что заявление Samsung – очередной звонок для Intel, которая пока не спешит использовать EUV-литографию для

массового производства чипов. Впрочем, стоимость перехода на эту перспективную технологию призывает скорее к консолидации усилий членов «EUV-клуба», нежели к привычному соперничеству на рынке. По крайней мере, Samsung, несмотря на существенную господдержку, надеется на сотрудничество как с Intel, так и с Sematech, уже добившейся успехов на этом поприще.

eetimes