С.Е.Банков, Э.М. Гутцайт, А.А.Курушин

Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS



Москва, «Оркада», 2012

УДК 621.3.049.77.029:681.3.06

Банков С.Е., Гутцайт Э.М., Курушин А.А. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS – M, ООО «Оркада», 2012, 250 с.

Данная книга представляет собой сборник задач, в котором проводится анализ ряда СВЧ структур, имеющих большую практическую важность. Впервые дается описание программы **HFSS Ansoft** версии 13.

Программа **HFSS** версии 13 предназначена для проектирования трехмерных CBЧ устройств и использует несколько методов расчета. При решении важных практических задач, повышенное внимание уделяется особенностям методов расчета и установке опций программы **HFSS** в ходе построения трехмерных моделей волноводных, микрополосковых и антенных структур. Рассмотрен ряд оригинальных неоднородных структур, фильтров и современных антенн, с линейной и круговой поляризацией, анализируемых с помощью **HFSS**. Рассматривается решение физических задач, связанных с оптикой, радиофизикой.

Для инженерно-технических работников, студентов и аспирантов, изучающих проектирование СВЧ приборов и методы расчета электромагнитных полей в неоднородных структурах.

При необходимости более детального ознакомление с предложенным САПР, Вы можете принять участие в семинарах, проводимых авторами в Учебно-консультационном центре ООО «Оркада». Предварительную заявку на обучение, а также на приобретение программы Вы можете направить по эл. адресу: info@orcada.ru, телефону +7 (495) 943-5032 и факсом +7 (495) 943-6032.

Авторы выражают признательность ООО «Оркада» за финансовую поддержку при издании пособия.

УДК 621.3.049.77.029:681.3.06

© Банков С.Е.,
© Гутцайт Э.М.
© Курушин А.А.
© ООО «Оркада» – макет, издание



Введение

HFSS v. 13 - это программа расчета электромагнитного поля для проектирования CBЧ структур, имеющая несколько алгоритмов расчета [1]. Последняя версия программы HFSS выполняет расчеты методом конечных элементов в частотной области, переходные процессы, использует метод интегральных уравнений, а также гибридный подход: метод конечных элементов + метод интегральных уравнений.

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 для решения задачи методом конечных элементов. В программе HFSS сетка генерируется адаптивно в зависимости от особенностей структуры и особенностей поля в ней.

В HFSS версии 13 сделан большой шаг вперед по сравнению с предыдущими версиями программы, разработанными в фирме Ansoft. В ней выполнены модификации алгоритмов генерации сетки и алгоритмов расчета. Новый быстрый и устойчивый алгоритм TAU генерирует более качественную тетраэдральную сетку.

Формирование системы уравнений, обеспечивающее смешанный порядок следования ее блоков, а также произвольная декомпозиция области решения, позволяют реализовать HFSS В возможности (High-Performance высокоэффективного расчета Computing HPC). Программа черчения трехмерной модели была улучшена операциями типа вставки и переноса двумерных и трехмерных моделей (imprinting), a интерфейс модифицирован был лучшего использования для И автоматизации.

HFSS рассчитывает широкий спектр внешних параметров CBЧ устройств и антенн, к которым относятся электрические и магнитные поля, токи, S-параметры, ближнее и дальнее поле, а также может рассчитать переходной процесс и временнЫе изменения электромагнитных полей [2-4]

Разработчики быть уверены точности HFSS могут В при проектировании устройств, которые включают внедряемые пассивные и "чипы" и моделировать, таким образом, активные антенны, активные многослойные интегральные схемы СВЧ, ВЧ/СВЧ компоненты И биомедицинские устройства (рис. В.1, В.2).

Новыми свойствами в HFSS 13.0 являются:

- Новый, устойчивый метод разбиения на тетраэдры;
- Реализация криволинейных элементов;
- Расчет производных изменения характеристик при варьировании переменных;
- Чтение файлов ACIS R19. 2 (19 версии);
- Улучшенная связь с программой ANSYS DesignXplorer;
- Расчет переходного режима;
- Реализация гибридного метода конечных элементов и метода интегральных уравнений;
- Интеграция с общей платформой ANSYS;
- Многопроцессорное уплотнение сетки разбиения;
- Улучшенная постпроцессорная обработка данных;
- Вывод широкополосных характеристик исследуемых структур.



Рис. В.1. Модель пятизвенного волноводного фильтра, с рассчитанным в комплексе ANSYS температурным распределением

Существенно также, что к программе HFSS -13 прилагается ряд примеров, которые можно использовать в качестве шаблонов, и которые показывают новые возможности программы.

HFSS использует в качестве основного инструмента решения электродинамических задач метод конечных элементов. В этом методе весь объем разбивается на тетраэдры, внутри которых поле представляется в виде объемных базисных функций с неизвестными коэффициентами, которые находятся из решения системы линейных уравнений.

В HFSS версии 13 добавлен программный модуль HFSS-IE, реализующий метод интегральных уравнений, который использует двумерные базисные функции, описывающие токи на поверхностях, в том числе объектов с конечной проводимостью, что позволяет описывать диэлектрические и металлические объекты с потерями. Этот метод часто называется методом моментов (МОМ). Модуль HFSS-IE разработан для моделирования больших излучающих структур. Этим методом в HFSS можно выполнить:

• расчет радиолокационного поперечника рассеяния (Radar Cross Section RCS);

• расчет антенны, расположенной на большом объекте, например на автомобиле;

- расчет коэффициента связи между удаленными антеннами;
- расчет электромагнитной совместимости;
- расчет многопортовых СВЧ структур и антенн.

Метод интегральных уравнений в силу особенностей формулировки граничной задачи рассчитывает поле в бесконечном пространстве [5,6]. Поэтому он не нуждается в поверхностях, моделирующих поглощение поля излучения: radiation boundary, perfectly matched layer и т.д. Это избавляет пользователя программы от необходимости окружать излучающий объект с условиями замкнутым воздушным объемом (box) излучения на Также поверхностях. появляется возможность расчета антенн. расположенных над поверхностью земли с конечной проводимостью.

Этот метод работает в стандартном интерфейсе HFSS. Перечислим его особенности:

• излучающие (открытые) объекты описываются без воздушного бокса;

• имеется возможность анализировать объекты, содержащие бесконечные плоские структуры, в том числе бесконечные экраны и т.д.;

• программа допускает использование дискретных источников возбуждения и источников в виде падающих плоских волн;

• программа поддерживает расчет в диапазоне частот, задаваемый в виде дискретных точек и в режиме интерполяции;

• программа производит расчет ближнего и дальнего полей;

• для структур с большими электрическими размерами HFSS-IE использует методы сжатия разряженной матрицы, ускоряющие вычислительный процесс;

• возможно разделение модели на составные части, анализируемые с помощью различных методов расчета.

В HFSS 13 легко реализуется вставка проектов разных типов друг в друга. Чтобы вставить проект HFSS или HFSS-IE достаточно кликнуть Insert

HFSS Design или Insert HFSS-IE Design и новый проект появится в дереве проекта под именем HFSSDesignn или HFSS-IEDesignn, где *n* - номер добавленного проекта в порядке его появления в общем проекте. В проект можно включить больше, чем одну установку на решение. Причем можно задать методы решения HFSS или HFSS-IE, добавляя конструкции, анализируемые разными методами. Каждая установка решения включает следующую информацию:

- общие данные о решении;
- параметры уплотнения сетки разбиения, если нужно, чтобы сетка разбиения была уплотнена в областях с высокой скоростью изменения поля;
- диапазон частот анализа.

При решении задачи методом HFSS-IE можно выполнить импорт расчета, выполненного методом конечных элементов в задачу, которая будет решаться методом интегральных уравнений. Для этого можно импортировать рассчитанные в HFSS поля в дальней зоне Far Field Wave или в ближней зоне Near Field Wave. В проект можно включить больше, чем одну установку на решение. Причем можно задать методы решения HFSS или HFSS-IE, добавляя конструкции, решаемые разными методами.



Рис. В.2. Пространственная диаграмма направленности антенной решетки, элементами которой в HFSS-13 могут быть щелевые, вибраторные, спиральные, пач-антенны, антенны Вивальди и др. излучающие элементы

В HFSS-13 реализован новый вид порта - порт Флоке. Он используется при моделировании периодических структур. Применение этого порта разберем в следующей главе, в которой будет моделироваться бесконечная граница раздела двух диэлектрических сред.

Благодарим за плодотворные дискуссии, просмотр и обсуждение рукописи к.т.н., в.н.с. Мишустина Б.А. и к.т.н. Подковырина С.И.

1. Моделирование наноструктуры в оптическом диапазоне частот

При проектировании оптических приборов часто возникает задача оптимизации характеристик отражающих поверхностей [7,8]. В качестве перспективной отражающей поверхности в научных исследованиях и прикладных разработках используют периодическую структуру, состоящую из металлических конусов (см. рис. 1.1). Такая структура считается перспективной для создания оптических усилителей, преобразователей частоты и других приборов.





Представленная на рис. 1.1 реализация отражающей поверхности не является единственно возможной. Используются также структуры с полусферическими и эллиптическими окончаниями, дисками и т.д. Во всех случаях перед системой электродинамического моделирования стоит задача расчета частотной характеристики коэффициента отражения от периодической структуры.

Формулировка граничной задачи выглядит следующим образом: на бесконечную в плоскости *XOY* периодическую структуру падает из верхнего полупространства плоская волна. Требуется найти рассеянное структурой поле.

Естественным методом анализа бесконечных периодических структур является применение условий периодичности, которые сводят задачу для бесконечной структуры к анализу одного периода.

Следует отметить, что анализ падения плоской волны на бесконечную периодическую структуру является достаточно новой задачей в практике применения таких программных средств как HFSS. Поэтому, прежде чем перейти непосредственно к расчету структуры показанной на рис. 1.1, целесообразно численно с помощью аппарата периодических граничных условий решить тестовую задачу и сравнить численное решение с аналитическим. В качестве тестовой структуры была выбрана граница раздела двух сред. Для нее известно строгое аналитическое решение в виде коэффициентов отражения и прохождения плоских волн [6, 7], которые будем сравнивать с численными результатами.

Падение плоской волны на границу раздела двух сред. При падении плоской волны на поверхность раздела двух сред, её поляризация не меняется. Если вектор *E* лежит в плоскости падения, то такая поляризация называется параллельной, если вектор *E* перпендикулярен плоскости падения – перпендикулярная поляризация.

Для моделирования бесконечных периодических структур в программе HFSS используются периодические граничные условия, которые устанавливаются на противоположных сторонах бокса, охватывающих период анализируемой структуры. Пример использования граничных условий этого типа показан на рис. 1.2. Верхний параллелепипед заполнен вакуумом с диэлектрической проницаемостью равной единице, нижний – диэлектриком с относительной проницаемостью 2.25. Размер бокса по осям *0X* и *0Y* равен в данном примере 320 нм.

Бесконечная граница раздела двух сред, строго говоря, не является периодической структурой. Поэтому применение аппарата периодических граничных условий для ее анализа нуждается в пояснении.

Рассмотрим известное [6] представление поля внутри прямоугольного канала Флоке. Под каналом Флоке понимается часть пространства, ограниченная вертикальными стенками (см. рис. 1.2), на которых установлены периодические граничные условия. Для прямоугольного канала Флоке составляющие поля E, H при z > 0 имеют следующий вид

$$E(x, y, z) = \sum_{n} \sum_{m} a_{n,m} e^{-i\kappa_n x - i\beta_m y - \gamma_{n,m} z}, \qquad (1)$$

где $L_{x,y}$ - периоды повторения структуры по осям 0X и 0Y (*puc.1.2*), $\kappa_n = \kappa_0 + 2\pi n / L_x$, $\beta_m = \beta_0 + 2\pi m / L_y$, $\gamma_{n,m} = \sqrt{k^2 - \kappa_n^2 - \beta_m^2}$, $a_{n,m}$ - амплитуды *n*, *m* гармоник, *k* - волновое число свободного пространства. Постоянные κ_0, β_0 задаются падающим полем, которое имеет вид плоской волны:

$$\kappa_0 = k \sin \theta \cos \varphi,$$

$$\beta_0 = k \sin \theta \sin \varphi,$$

 θ - меридиональный угол падения плоской волны, а φ - азимутальный угол.

Ряд (1) называется в теории периодических структур разложением поля по гармоникам Флоке, каждая из которых является членом ряда (1). Можно увидеть, что гармоника Флоке с нулевыми индексами n = m = 0, которую часто называют основной гармоникой, имеет структуру поля, совпадающую с полем падающей волны. Так как мы рассматриваем полупространство при z > 0, то она описывает поле отраженной волны.

Можно записать разложение аналогичное (1) для полупространства при z < 0. Основная гармоника в этом разложении будет соответствовать прошедшей (преломленной) волне.

Гармоники высших порядков необходимы для описания ближнего поля, которое возбуждается, если период имеет сложную структуру, например, показанную на рис. 1.1 б, в. В случае плоской поверхности вид решения электродинамической задачи известен [2,6,7]. Поле описывается отраженной и преломленной волнами. Высшие гармоники Флоке не возбуждаются.

Таким образом, применение периодических граничных условий для анализа границы раздела двух сред оправданно тем, что отраженная и преломленная волны описываются основными гармониками Флоке, а гармоники высших порядков не возбуждаются.



Рис. 1.2. Фрагмент диэлектрической подложки, на которую падает плоская волна.

Интересно отметить, что поле основной гармоники не зависит от периодов $L_{x,y}$. Поэтому при решении тестовой задачи размеры отдельных ячеек можно выбирать произвольным образом, так как зависящие от величины периодов гармоники Флоке высших порядков, как отмечалось выше, не возбуждаются.

Решение задачи о падении плоской волны с помощью HFSS. Рассмотрим далее решение тестовой задачи о падении плоской волны на границу раздела двух сред с помощью HFSS.

Черчение структуры. Установка периодических граничных условий. Установка портов Флоке.

Командой **Modeler->Units** выведем диалог, показанный на рис. 1.3, в котором зададим единицу измерения длины - нанометр (nm).

Set Model Units	×
Select units: nm	•
Rescale to new units	
OK	Cancel

Рис. 1.3. Установка единиц размеров структуры

Начертим бокс размером 320 nm x 320 нм и высотой 200 нм командой **Draw->Box** (рис. 1.4). Размеры бокса в плоскости ХОҮ несущественны. Мы выбрали их равными периодам структуры, изображенной на рис. 1.1. Создаваемый бокс расположен в нижнем полупространстве и заполнен материалом с диэлектрической проницаемостью отличной от единицы.



Рис. 1.4. Черчение бокса - фрагмента диэлектрической плоскости

Определим его параметры, нажимая на кнопку Add Material (рис. 1.5).

Search Parameters		-			Mater	ial1				
Search by Name	Search (by N	Criteria ame	C by Prope	irty	Prop	erties of the Material			15	
Crewb 1	Relativ	e Permittivity	~			Name	Туре	Value	Units	
Search						Relative Permittivity	Simple	2.25		
		1	1	1		Relative Permeability	Simple	1		
/ Name		Location	Origin			Bulk Conductivity	Simple	0	siemens/m	
hallen hanned		Suel ihome	Materiala	2		Dielectric Loss Tangent	Simple	0		
tenon_based		Systibiary	Materials	2		Magnetic Loss Tangent	Simple	0		
in		SysLibrary	Materials	1		Magnetic Saturation	Simple	0	tesla	
utanium		SysLibrary	Materials	1		Lande G Factor		2		
tungsten		SysLibrary Mat				Delta H	Simple	0	A_per_mete	
vacuum		Project	Matenals			 Measured Frequency 	Simple	9.4e+009	Hz	
vacuum		SysLibrary	Matenals	1		Mass Density	Simple	0	kg/m^3	
water_distilled		SysLibrary	Materials	81		2				
water_fresh		SysLibrary	Materials	81						
water_sea		SysLibrary	Materials	81						
zinc		SysLibrary	Materials	1	-					
zirconium		SysLibrary	Materials	-+						
4										

Рис. 1.5. Добавление диэлектрика с проницаемостью 2.25 в проект

Аналогично зададим сверху этого бокса, бокс размером 320 нм х 320 нм и высотой 800 нм. Данный бокс не имеет диэлектрического заполнения.

Нажмем далее клавишу \mathbf{F} , чтобы перевести объект в режим выделения сторон и установим на вертикальных сторонах верхнего и нижнего боксов периодические граничные условия **Master** и **Slave** (рис.1.6).



Рис. 1.6. Постановка периодических граничных условий на стороны боксов

Таким образом, в структуре будут присутствовать 4 пары поверхностей типа Master-Slave.

Для решения граничной задачи в системе HFSS на горизонтальных поверхностях, ограничивающих канал Флоке по вертикали необходимо установить порты, которые получили название портов Флоке. Для установки порта Флоке выделим нижнюю поверхность нижнего бокса и зададим команду Assign Exitation -> Floquet Port, по которой вызывается диалог рис. 1.7.

	Name: PasantPort1	FloquetPort 2
	A Direction: Defined	Lattice Coordinate System A Direction: Defined
1 separate		B Director: Defined
	<Незад Далее > Отмена	

Рис. 1.7. Установка портов Флоке на нижнюю и верхнюю сторону

Параметры порта задаются в диалоге, показанном на рис. 1.8. Данный диалог позволяет работать с многомодовыми портами Флоке. Поэтому в нем имеется возможность задания номера гармоники, которая используется для определения параметров порта. Мы работаем с двухмодовыми портами Флоке. режим соответствует каналу Такой Флоке с двумя распространяющимися гармониками. Обе они имеют индексы *n*=0, m=0. которые мы установим В данном диалоге. Отличие между двумя распространяющимися гармониками Флоке состоит В разной ИХ поляризации. В нашем случае мы имеем волны с параллельной и перпендикулярной поляризациями. В терминологии, принятой в HFSS эти две волны обозначены как волны *TM* и *TE*. Поэтому в строке число волн (number of modes) ставим цифру 2 (две волны), а в качестве мод выберем волны TM(H) и TE(E).

Gene	ral Modes	Setup Post Processing	3D Refi	nement	1
Nun	nber of Mod	es: 2			
(1)		N 1 1 1 1			
(Ple	ase click on	this button if you want as	sistance i	n setting	up modes.)
(Ple	ase click on Mo	this button if you want as	sistance i	n setting	up modes.)
(Ple	ase click on Mo Mode	this button if you want ass odes Calculator Polarization State	sistance i	n setting	up modes.) Attenuation (db/length)
(Ple	ase click on Mo Mode	this button if you want ass odes Calculator Polarization State TM	m 0	n setting n 0	up modes.) Attenuation (db/length) 0.00

Рис. 1.8. Установка параметров порта Флоке при решении задачи

В HFSS порты Флоке можно ставить только на изотропную среду с диэлектрической проницаемостью равной единице. Поэтому установить порт непосредственно на нижней поверхности диэлектрика мы не можем.

Нам необходимо создать некоторый воздушный зазор между средой и портом.

Если между нижним портом Флоке и диэлектрической средой остается зазор (рис. 1.12), то в расчет вносится погрешность из-за отражения волн от новой границы раздела. Необходимость создания такого зазора можно считать недостатком программы HFSS.

Для того, чтобы такое вторичное отражение исключить, ставим снизу вместо порта поглощающую границу Radiate, соприкасающуюся с нижней стороной диэлектрической платы. При этом мы теряем возможность расчета коэффициента прохождения через структуру, так как порт в нижней части канала Флоке заменяется указанной границей. Тем не менее, возможность расчета коэффициента отражения сохраняется.

Плоская падающая волна задается командой Assign Exitation -> Incident Wave ->Plane Wave. По этой команде появляется диалог рис. 1.9, на закладке General Data которой установим координаты точки, в которой падающая волна имеет нулевую фазу.

	General Data	Cartesian Vector Se	tup Plane Wave Op	otions Defaults	
	Name: In	cPWave1	-		
	Vester	d Farmet			
	• Ca	artesian C Sr	herical		
1111	- Excitation	Location and/or Zero	Phase Position		
	X Coord	I: 0	nm	•	
	Y Coord	I: 0	nm	-	
	Z Coord	I: 200	nm	-	
		Use	Defaults		
-					

Рис. 1.9. Закладка General диалога падающей волны

Угол падения связан с углом направления Eo, что задается в виде координат векторов k(-sin(Teta), 0, sin(Teta)), Eo(-cos(Teta), 0, sin(Teta)), которые устанавливаются в диалоге Incident Wave Source (рис. 1.10). *Teta* – переменная, которая задает угол падения волны.



Рис. 1.10. Параметризация угла падения плоской волны: вектора распространения k и вектора электрического поля E.

Чтобы рассчитать характеристики отражения и преломления падающей волны под разными углами падения, будем изменять угол падения плоской волны Θ в плоскости $ZOX(\phi=0)$ в диапазоне 0...90°.

Это выполняется с помощью параметрического анализа. Командой **Optimetric->Add->Parametric** выведем диалог (рис. 1.11) задания параметров параметрического анализа (перебора параметра *Teta*).

Set	tup Sweep	Analysis	s 📕	x
	Sweep Def	initions	Table General Calculations Options	
	Sync #	Variable	Description Add	1
		Teta	Linear Step from Odeg to 90deg, step=10deg Edit	1
			Delas	1
			Delete	-
	L		Sync UnSync	
	Operatio	n	Description	
-			ОКОтме	на

Рис. 1.11. Задание параметрического анализа при изменении угла падения

В результате такого анализа получаем характеристики поля, картины поля, углы отражения и преломления электромагнитных волн для различных углов падения.

Известны аналитические зависимости для коэффициента отражения и прохождения (передачи) при падении волны на границу раздела двух сред, т.е. при условии, что толщина платы стремится к бесконечности. Коэффициент отражения по полю для волны с параллельной поляризацией (рис. 1.12) равен [7]

$$R_{||} = \frac{\varepsilon \cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}, \qquad (2)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды, на которую падает волна, Θ - угол падения.

Коэффициент передачи поля для волны с параллельной поляризацией равен

$$T_{||} = \frac{2\sqrt{\varepsilon}\cos\theta}{\varepsilon\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}$$
(3).

В силу отмеченных особенностей HFSS, не позволяющих установить порт Флоке на поверхность с диэлектрической проницаемостью отличной от единицы нам приходится ограничить толщину диэлектрического слоя d и установить порт Флоке на поверхности отделенной от нижней поверхности слоя небольшим зазором (ср. с [14,15]). В этом случае формулы (2) и (3) непосредственно для сравнения с расчетными данными использовать нельзя. Их необходимо модифицировать с учетом второй границы диэлектрического слоя. Такую модификацию нетрудно выполнить, используя соотношения (2) и (3). В результате получаем следующие выражения для коэффициентов отражения и прохождения плоской волны через слой R_{c} , T_{c} :

$$R_{s} = R - \frac{T^{2}R}{1 - R^{2}e^{-2i\gamma kd}}e^{-2i\gamma kd}, \qquad (4)$$

$$T_s = \frac{T^2}{1 - R^2 e^{-2i\gamma kd}} e^{-i\gamma kd}$$

$$\gamma = \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta} \,,$$

где $k = 2\pi / \lambda$ - волновое число свободного пространства. В формулах (4) под R, T понимаются коэффициенты отражения и прохождения границы раздела двух сред для волн обеих поляризаций. Например, для волны параллельной поляризации в качестве R, T надо взять параметры $R_{||}, T_{||}$ (2), (3).

Расчеты, выполненные на HFSS и характеристики, рассчитанные по формулам (4), сравниваются на рис. 1.12. Кривые на рис. 1.12 построены для разных значений толщины слоя d = 100, 200 и 300 нм. Точками показаны данные полученные с помощью HFSS, а сплошными кривыми по формулам (4). Видно, что расчетные и теоретические результаты хорошо совпадают.



Рис. 1.12. Рассчитанный на HFSS коэффициент отражения в диапазоне углов падения для разных толщин подложки

Поэтому мы можем сделать вывод, что для моделирования падения электромагнитных волн оптического диапазона на металлические поверхности со сложной структурой можно использовать метод конечных элементов, реализованный в HFSS.



Рис. 1.13. Коэффициент отражения падающей плоской волны с вертикальной поляризацией

Убедившись, что численные расчеты совпадают с теоретическими результатами, можно выполнить моделирование поверхности, состоящей из конических металлических наноструктур, используемых для усиления люминесценции в оптическом усилителе (рис. 1.13). Серебряные поверхности с расположенной на них системой наноразмерных острий, используется для усиления люминисценции адсорбированных сред с ионами редкоземельных элементов, обусловленного плазмонами. С помощью HFSS-13 можно получить параметры таких систем, широко используемых в настоящее время в волоконно-оптических усилителях для длины волны 1.54 микрона[4].

2. Волноводная антенная решетка

Выполним моделирование волноводной антенной решетки [1,13]. Ее излучающая апертура состоит из открытых концов квадратных волноводов (рис. 2.1). Считаем, что ось 0z направлена вдоль осей волноводов. Плоскость z=0 совпадает с апертурой решетки.

Последовательность работы будет следующая:

- создание отдельного излучателя в виде отрезка квадратного волновода;
- создание бокса, расположенного сверху излучателя;
- задание граничных условий PerfectE на стенках волновода;
- задание порта Флоке на торцевой поверхности бокса;
- задание волноводного порта;
- установки анализа;
- запуск на расчет;
- вывод характеристик.



Рис. 2.1. Геометрия антенной решетки

Геометрия антенной решетки показана на рис. 2.1. Рассматриваем модель в виде бесконечной решетки. Волноводные порты находятся в области z < 0 и имеют вид квадратных волноводных портов (рис. 2.2) с основной волной линейной поляризации. Направление вектора электрического поля этой волны показано на рис. 2.1 в виде стрелок.



Рис. 2.2. Модель HFSS одного элемента антенной решетки с координатными векторами

Анализ бесконечной решетки можно свести к анализу одного периода благодаря теореме Флоке, упоминавшейся в главе 1. Отметим, что для бесконечной решетки понятие диаграммы направленности (ДН) не может быть корректно определено, так как оно вводится только для источников излучения с конечными размерами. Строго говоря, ДН бесконечной решетки описывается дельта – функцией и физического смысла не имеет. Тем не менее, существуют приближенные приемы, позволяющие использовать результаты анализа бесконечной структуры для оценки ДН конечной решетки. О них будем говорить ниже. Непосредственно анализ бесконечной решетки позволяет судить о решении задачи ее согласования со свободным пространством.

На рис. 2.2 показана геометрия одной ячейки бесконечной антенной решетки. Модель состоит из двух областей. Нижняя часть представляет волновод, и сверху его расположен воздушный бокс. На вертикальных гранях бокса устанавливаются периодические граничные условия. На верхней поверхности бокса задается порт Флоке.

Создание модели отдельного излучателя. Чтобы создать отдельную ячейку антенной решетки необходимо выполнить следующие действия:

1. Откройте проект и дайте ему имя AGW.

2. Командой **Draw>Box** создайте произвольный бокс, и затем отредактируйте его параметры в разделе **Edit>Properties** (рис.2.3)

3. Выберите созданный бокс и отредактируйте его прозрачность (параметр визуализации создаваемого объекта) Transparency = 0.8.

and						Commar	id					
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description		Г	Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	
Command	CreateBox				-	-	Command	CreateBox	_			
Coordinate Sys	Global						Coordinate Sys	Global				
Position	-0.3 ,-0.3 ,0	meter	-0.3meter , -0.3				Position	-0.32 ,-0.32 ,0	meter	-0.32meter , -0		
XSize	0.6	meter	0.6meter			-	XSize	0.64	meter	0.64meter		
YSize	0.6	meter	0.6meter			-	YSize	0.64	meter	0.64meter		
ZSize	1.4	meter	1.4meter				ZSize	1.4	meter	1.4meter		
				Show Hidden							Show Hidden	
				ОКС	тмена						ОК	Отм
с. 2.3.П	Гарамен	трь	і волно	вода		Puc	2.4.П	Гараме	тры	воздуі	иного	
		_				бок	ca	_	_	-		

4. Операцией **Draw>Box** создайте второй бокс и отредактируйте его размеры и свойства **Edit>Properties** (рис. 2.4).

Задание границ Master и Slave.

- 1. Нажмите на клавишу F, переводя HFSS в режим выбора поверхности, выделите боковую сторону верхнего бокса и задайте команду HFSS>Boundaries>Assign>Master. Появляется диалог границы Master.
- 2. Оставьте имя по умолчанию как Master1.
- **3.** Кликните в выплывающем меню U vector, и кликните New Vector. Появляется диалог Measure и появляется Create Line.
- **4.** Задайте вектор U координатной системы в месте, показанном на поверхности на рис. 2.2. Кликните нижний правый угол (начальная точка), и протащите курсор к левому углу (конечная точка) и кликните.
- 5. Кликните ОК, чтобы закрыть диалог.
- 6. Выберите противоположную фаску и вызовите ведомое граничное условие HFSS>Boundaries>Assign Slave... Появляется диалог Slave с выбранной закладкой General (рис. 2.5).
- 7. Выберите Master1 как ведущую границу Master.
- 8. Начертите вектор U Vector как показано на рис. 2.5.
- 9. Выберите режим Reverse direction для вектора V.
- 10. Оставьте неизменными другие установки и нажмите ОК.

slave : Phase Delay	×	
Use Scan Angles To Calculate Phase Delay		
Scan Angles		
Phi: 0 deg 💌		
Theta: 0 deg 💌		Eve1
(Applies to whole model, in the global coordinate system)		
O Input Phase Delay		
Phase Delay: 0 deg 💌		0
(Applies to this boundary only)		
Use Defaults		
< Назад Готово	Отмена	

Рис. 2.5. Диалог задания разности фаз между границами Master и Slave

11. Повторите эту процедуру для границ Master2 и Slave 2, как показано на рис. 2.6. Для вектора V на границе Master2 нужно установить обратное направление (Reverse direction).



Рис. 2.6. Границы Master и Slave устанавливаемые на противоположные грани воздушного бокса модели антенны

В диалоге на рис. 2.5 имеются две опции установки задержки фазы между границами Master - Slave: по углам сканирования Scan Angle и по задержке фазы Input Phase Delay.

Задание волноводного порта. Отрезок волновода содержит 4 стороны, на которых нужно задать граничные условия **PerfectE**. Это будет соответствовать тому, что стороны металлические. Удерживая клавишу **Ctrl**, выделим 4 стороны нижнего бокса и зададим их как идеальные электрические стенки командой **Assign Boundarys -> Perfect E**.

2		
1000	Perfect E Boundary	×
fasterz	Name: PerfE1	
v and the second s	Infinite Ground Plane	
	Use Defaults	
	OK Cancel	

Рис. 2.7. Задание границы идеальной проводимости на стенках волновода

Чтобы задать волноводный порт:

1. Выберите нижнюю грань нижнего бокса (рис. 2.8).

2. Нажмите правой кнопкой мыши и из выплывающего меню выберите Assign>Excitations>WavePort. Появляется ассистент WavePort.

3. Установите в нем количество мод равное 2.

Wave Port : Modes	
Number of Modes: 2 Mode Integration Line Chara Defined Zpi 2 Defined Zpi	acteristic Impedance (
Mode Alignment and Polarity:	
Align modes using integration lines Align modes analytically using coordinate system U Axis Undefined Filter modes for reporter Use Defaults	Reverse V Direc

Рис. 2.8. Задание интегральных линий квадратного волноводного порта

5. В разделе Integration Line выберите New line и начертите две взаимно перпендикулярные интегральные линии для каждой моды, как показано на рис. 2.5.

6. Оставьте другие установки, используя команду Next для перехода к другой странице и кликните **OK**. Заданный волноводный порт появляется в списке **Excitation**.

Отметим, что выбор двух мод в порту обусловлен тем, что квадратный волновод является двухмодовым волноводом, в котором существуют две распространяющиеся волны, отличающиеся поляризацией поля. Задание интегральных линий показывает, что мы в качестве волн в порту используем волны двух ортогональных линейных поляризаций.

Установка портов Флоке. На верхней грани верхнего бокса устанавливается порт Флоке. В отличие от граничного условия излучения и РМL этот порт позволяет рассчитать и вывести значение коэффициента передачи S₂₁ из волноводного порта в порт Флоке.

Для установки порта Флоке надо выполнить следующие действия:

1. Выделите верхнюю грань верхнего бокса.

2. Нажмите правой кнопкой мыши и выберите Assign>Excitation>Floquet **Port** из выплывающего меню. Появляется ассистент порта Флоке (рис. 2.9).

Floquet Port : General	
Name: FloquetPort1	Î
	FloquetPort1
Lattice Coordinate System	b
A Direction: Defined	a 💦
B Direction: Defined	

Рис. 2.9. Выбор направлений веркторов согласования портов Флоке

3. В разделе Lattice Coordinate System определяются направления А и В порта Флоке.

4. Щелкните **Next**, принимая Phase Delay по умолчанию, и снова Next для перехода к странице установке мод порта Флоке Modes Setup (рис. 2.10).

По умолчанию диалог параметров мод Флоке включает две моды порта Флоке. Моды Флоке определяются двумя индексами *n*, *m* и поляризацией

Polarisation State. Индексы *n, m* можно понять из формулы (1) в главе 1. Основная мода Флоке имеет нулевые индексы. Эта мода (волна) распространяется при любых, сколь угодно малых, периодах решетки. Если период решетки достаточно велик, то появляются распространяющиеся волны с ненулевыми индексами. Каждой паре индексов *n, m* соответствуют две волны, отличающиеся поляризацией.

Floqu	et Port : Mo	des Setup				Ľ			ī
N (F	umber of Mod Yease click or	es: 2	sistance i	n setting	up modes.)		Î	FloquetPort1	
	M	odes Calculator					b		
Г	Mode	Polarization State	m	n	Attenuation (db/length)			a	
	1	TE	0	0	0.00				
	2	ТМ	0	0	0.00				
				~					

Рис. 2.10. Выбор характеристик каналов Флоке

Последний столбец таблицы мод маркируется "Attenuation (Затухание)". Это - затухание моды вдоль направления, нормального к плоскости решетки в дБ на единицу длины. Значения для зеркальных мод составляет 0 дБ, так как они распространяются в свободном пространстве и поэтому не ослабляются. Данный параметр не задается, а рассчитывается программой.

Моды высших типов могут быть как распространяющимися, так и затухающими. Режим их распространения зависит от угла сканирования. Возможны ситуации, в которых при малых углах сканирования мода высшего порядка затухает, а при увеличении угла она становится распространяющейся. Если периоды решетки меньше половины длины волны в свободном пространстве, то при любых углах сканирования распространяются только две основные моды. В нашем случае периоды больше половины длины волны. Поэтому при больших углах сканирования в дополнение к основным модам должны появляться распространяющиеся моды с ненулевыми индексами.

Mode	e Table Calc	ulator					
Nur	nber of Modes:	10					
Parameters For Mode Selection							
Fr	equency:	299.79	MHz 💌				
So	an Angles:						
	Phi						
	Start	90	deg 💌				
	Stop	90	deg 💌				
	Step Size	0	deg 💌				
	- Theta						
	Start	0	deg 💌				
	Stop	90	deg 💌				
	Step Size	0.5	deg 💌				

Рис. 2.11. Задание углов сканирования, от диапазона которых зависит количество задаваемых мод в портах Флоке

Нажмите на кнопку Modes Calculator (рис.2.12). Данный диалог необходим для расчета параметров мод Флоке и правильного выбора числа мод, необходимых для корректного описания порта. В появившемся диалоге нужно поставить углы, по которым будет выполняться сканирование луча в антенной решетке. Выше отмечалось, что наша решетка при больших углах сканирования может функционировать в многомодовом режиме. Рассчитаем параметры десяти мод (рис. 2.12), установив 10 в разделе Number of Modes.

G	General Modes Setup Post Processing 3D Refinement									
1	Number of Modes: 10									
	,									
1	(Please click on this button if you want assistance in setting up modes.)									
[Mades Calculator									
l	Modes Calculator									
		Mode	Polarization State	m	n	Attenuation (db/length)				
		1	TE	0	0	0.00				
		2	ТМ	0	0	0.00				
		3	TE	0	-1	0.00				
		4	TM	0	-1	0.00				
		5	TE	1	0	60.00				
		6	TE	-1	0	60.00				
		7	TE	0	1	60.00				
		8	ТМ	1	0	60.00				
		9	TM	0	1	60.00				
		10	ТМ	-1	0	60.00				
l										

Рис. 2.12. Установленные моды в портах Флоке

5. В закладке Post Processing задается положение отсчетной плоскости.

Установка отсчетных плоскостей используется, когда пользователя интересует фаза параметра рассеяния. По умолчанию отсчетная плоскость находится в плоскости волнового порта. Операция de-embeding позволяет изменить положение отсчетной плоскости. Данное изменение влияет только на фазы параметров рассеяния и не влияет на их модули.

6. В закладке **3D Refinement** можно моды Флоке, которые участвуют в адаптивном измельчении 3-D сетки.

Сетка разбиения, которая создается HFSS на последующих шагах адаптации, является фактически компромиссной для одновременного анализа всех мод одновременно.

7. Примите другие настройки по умолчанию, и нажмите **OK**, чтобы закрыть мастер портов Флоке. Порт Флоке появляется в дереве проекта в разделе Excitation.

Зададим углы сканирования как переменные проекта, для чего:

1. В меню задайте команду **Project >Project Variables**. Это вызовет окно Properties для этого проекта (рис. 2.13).

2. Кликните кнопку Add. Это вызовет диалог Add Property.

G 14	1			C Turing	C Committee	C. Outurn
va va	aue v	Optimization		(luning	Sensitivity	C Statistics
	Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
	\$Phi_scan	0		0		
	Add	Edit		Remove	Show Hi	idden
Prope	Add	Edit		Remove	I Show Hi	idden
P rope Name	Add erty \$theta_scan	Edit		Remove	✓ Show Hite e ○ Separate	idden or
Prope Name Type	Add erty \$theta_scan > None	Edit		Remove © Variable	I Show Hi	idden or

Рис. 2.13. Диалог переменных проекта

3. Установите имя переменной \$phi_scan, и ее величину 0 deg. Эта переменная будет использоваться в качестве азимутального угла.

4. Кликните OK. Теперь переменная \$phi_scan будет добавлена в окно проекта Properties.

5. Кликните кнопку Add чтобы показать снова диалог Add Property.

6. Установите имя переменной, описывающей угол места name = $theta_scan$ и его величину 0 deg.

7. Кликните **OK**. Диалог **Add Property** закрывается и добавляется переменная проекта \$theta_scan.

8. Кликните OK, чтобы закрыть окно проекта Properties.

Нужно заметить, что при использовании углов сканирования в моделях элементарной ячейки, плоскость периодичности (здесь плоскость антенной решетки) должна быть параллельной плоскости ХОҮ в глобальной системе координат.

Установки на решение. Чтобы сделать установки на анализ выполните следующие операции:

1. Нажмите правой кнопкой мыши на Analysis в дереве проекта и выберите Add Solution Setup. Откроется диалог Solution Setup (рис.2.14).

2. В закладке **General**, установите частоту решения Solution frequency = 299.79 Mhz, Maximum Number of Passes = 5, и Maximum Delta S = 0.02.

Solution Setup	Solution Setun
Solution Setup X General Options Advanced Expression Cache Derivatives Defaults Setup Name: Setup 1 Image: Setup 1 <th>Solution Setup X General Options Initial Mesh Options Initial Mesh Options I Do Lambda Refinement Lambda Target: Use Free Space Lambda Value Adaptive Options Initial Mesh Options</th>	Solution Setup X General Options Initial Mesh Options Initial Mesh Options I Do Lambda Refinement Lambda Target: Use Free Space Lambda Value Adaptive Options Initial Mesh Options
Maximum Number of Passes: 5 Maximum Delta S Use Matrix Convergence Set Magnitude and Phase	Maximum Refinement Per Pass: 30 % Maximum Refinement: 10000000 Minimum Number of Passes: 5 Minimum Converged Passes: 2
Use Defaults	Solution Options Order of Basis Functions: First Order Finale Iterative Solver Relative Residual: Enable Use of Solver Domains
ОК Отмена	Use Defaults OK OTMEHa

Рис. 2.14. Диалог установки на решение

3. В закладке **Options**, отметьте режим Do Lamda Refinement и установите опцию Lambda = Use Default.

4. Установите Maximum Refinement Per Pass = 30%,

Minimum Number of Passes = 5, и

Minimum Converged Passes = 2.

5. Выберите базовые функции Order Basis function: First Order, и кликните OK.

Запуск расчета и просмотр результатов. Запустите расчет командой HFSS>Analyze. После завершения, нажмите на иконку Results и выберите Solution Data.

На рис. 2.15 показано окно с матрицей рассеяния, которое появляется после завершения расчета. Отметим следующее.

• S-матрица имеет размерность 6×6 с учетом 2-х мод портов Флоке.

• Моды Флоке в этой S-матрице перечисляются в порядке, заданном в панели установки порта Флоке. При обращении к этой панели, мы, таким образом, имеем в виду, что

FloquetPort1:1 относится к моде Флоке ТЕОО и FloquetPort1:2 относится к моде Флоке ТМОО.

Simulation:	Setup1		•	LastAda	aptive		2	-
Design Variation:	\$phi_scan='9	0degʻ\$theta_s	can='60de	eg'				
Profile Conve	rgence Matrix	Data Mesh S	itatistics					
🔽 S Matrix	🗆 Gamma 🛛	99.79 (MHz)		-]Ех	kport Matrix D	ata	
C Y Matrix		Display All Fre	eqs.		Equis	valent Circuit I	Export	
Magnitude/F	Phase(dec_▼					Check Passiv	/ity	
				Passivit	y Toleran	ce: 0001		
Freq		S:aWavePo	ort1:1	S:aWave	Port1:2	S:Floquet	Port1:1	S:Flo
299.79 (MHz)	aWavePort1:1	(0.27994,	171) (0.0006829	3, 16.2)) (0.0010373	, -159)	(0.666
	aWavePort1:2	(0.00045045,	4.36) (0.013706,	116)	(0.59163,	-174)	(0.000
	FloquetPort1:1	(0.00041241,	-121) (0.59186,	35.7)	(0.64962,	17.3)	(0.000
	FloquetPort1:2	(0.66825, 🚽	142) (0.0006722	1, 32.7]) (0.001009,	-173)	(0.507
0	FloquetPort1:3	(0.0010939,	-95.7) (0.80592,	-111)	(0.47746,	51.5)	(0.001
	FloquetPort1:4	(0.68925, 8	(0.2) (0.0002536	7, 171]) (0.0003824	3, 6.45) (0.545

Рис. 2.15. Диалог данных решения Solution Data

• Столбцы и строки в матрице на рис. 2.15 соответствуют стандартному определению матрицы рассеяния. Столбцы соответствуют волнам, падающим на разные порты, а строки - волнам отраженным от разных портов. Например, первый столбец матрицы соответствует возбуждению падающей волной волнового порта 1. Элементы этого столбца равны амплитудам волн отраженных от разных портов в режиме, когда возбуждается только один волновой порт 1. Возбуждение волнового порта соответствует работе решетки на передачу.

• Столбцы, соответствующие портам Флоке описывают параметры решетки в приемном режиме.

Параметрическое свипирование угла сканирования. Чтобы показать возможности порта Флоке, рассчитаем зависимость коэффициента отражения решетки по волновому порту, как функцию угла сканирования. Когда сканирование происходит в Е-плоскости решетки, при угле 27.5° наблюдается эффект ослепления. Чтобы показать это, нужно найти характеристики в Е-плоскости при изменении угла сканирования от scan = 0° до scan = 90°.

Чтобы выполнить такой параметрический анализ:

1. Нажмите на Optimetrics в дереве проекта и выберите Add Parametric.

Это выводит диалог Setup Sweep Analsysis с закладкой Sweep Definitions.

2. Кликните кнопку Add. Это выводит диалог Add/Edit Sweep.

- 3. Из выплывающего меню Variable, выберите \$theta_scan.
- **4.** Выберите Linear step.
- 5. Установите Start=0 deg, Stop=90 deg, и Step = 3 deg (рис. 2.17).

Add/Edit Sweep	×	
Variable \$theta_scan	Variable Description \$theta Linear Step from 0 to 90, step	
◯ Single value		Setup Sweep Analysis
• Linear step		
C Linear countAdd >>		Sweep Definitions Table General Calculations Options
C Decade count		
C Octave count Update >>		
C Exponential count		I ✓ Save Helds And Mesh
Start: 0		Copy geometrically equivalent meshes
Stop: 90		
Step: 3	OK Cancel	
Рис. 2.17. Задани	ие диапазона	Рис. 2.18. Выбор опции сохранения
изменение угл	а Theta в	поля и сетки разбиения при
параметрической	оптимизации	выполнении параметрической
		оптимизации

6. Кликните кнопку Add и OK, чтобы закрыть диалог Add/Edit Sweep. Диалог Setup Sweep Analysis включает переменную \$theta_scan.

7. Откройте закладку General и убедитесь, что в Sim Setup установлен режим Setup1 with the Include.

8. Откройте закладку Options чтобы убедиться, что опции Save Fields and Mesh отмечены, и что опция Copy Geometrically Equivalent Meshes (рис. 2.18) не отмечена. В этом случае на каждом шаге параметрического анализа будут сохраняться характеристики дальнего поля.

9. Кликните ОК. В разделе Optimetrics появляется установка Parametric.

Текущая пара основных мод, достаточных для описания нормального падения волны, должна быть дополнена модами высших типов для описания

решетки при больших углах сканирования. Подготовка мод для параметрического свипирования состоит из следующих шагов:

1. Повторно войдите в панель установки порта Флоке и щелкните по вкладке типов волн. Для того, чтобы определить список мод, нужных для моделировании при всех углах сканирования, используем калькулятор мод. 2. Вызовите калькулятор мод, щелкая по кнопке Modes Calculator.

Расчет калькулятора является дополнительной информацией, для создания списка рекомендуемых мод для порта Флоке. Его результаты нужны для выбора числа мод и не влияют на расчетную модель решетки.

3. Выберите 10 мод для порта (с запасом). Вероятно, мы уменьшим это число, но для этого требуется дополнительное исследование.

4. Установите частоту 299.97 МНz, на которой будет выполняться моделирование. Если установки задачи содержат две или больше частот свипирования, обычно выбирается наивысшая частота для того, чтобы обнаружить появление распространяющихся мод высоких порядков.

5. Чтобы установить набор типов волн, который будет достаточным для каждого направления сканирования в параметрической развертке, углы сканирования развертки вводятся в формате "start-stop-step". Вводимые углы - сферические полярные углы в глобальной системе координат.

Для данного случая угол Phi = 90°, так что введите это значение как стартовое значение и конечное значение в полях Phi. Угол сканирования Theta в развертке меняется от 0 до 90° с шагом 0.5° , так что введите эти те же самые значения в полях калькулятора Theta.

6. Нажмите **ОК**, чтобы запустить на расчет калькулятор и просмотреть рекомендуемый список мод (как на рис. 2.12).



Рис. 2.20. Характеристики сканирования отражения и прохождения характеристик типов волн

Отметим следующее:

• Исходная пара основных мод ТЕОО и ТМОО остается сверху таблицы мод Флоке (рис. 2.12). Затухание их равно нулю, что означает, что эти моды распространяются без ослабления, то есть являются распространяющимися.

• Затем в таблице идет вторая пара мод ТЕ01 и ТМ01. Они распространяются без затухания, по крайней мере, в одном направлении.

• Затем следуют шесть мод с минимальным затуханием 60 дБ/м. Эти моды не распространяются ни в одном из выбранных направлений.

Теперь нужно сделать окончательный выбор числа мод, учитываемых в порту Флоке. Этот выбор основан на следующих соображениях. Любые моды Флоке, распространяющиеся хотя бы в одном направлении должны быть учтены в таблице мод. Поэтому в нее нужно включить первые четыре моды, которые достигнут порта Флоке неослабленными.

Оставшиеся типы волн, имеющие ненулевое затухание, являются кандидатами на исключение из таблицы. С точки зрения эффективности моделирования и интерпретации результатов лучше их удалить.

В связи с этим отметим:

Поскольку длина элементарной ячейки составляет 1.25 м, любая из последних шести мод, при возбуждении в прямоугольной апертуре, достигнет порт Флоке с затуханием равным 1.25 * 60.00 = 75 дБ, то есть очень сильно ослабленной. Поэтому в большинстве случаев такими модами при описании порта Флоке можно пренебречь.

7. Таким образом, введем число мод в поле Number of Modes = 4. В списке мод остаются только моды TE00, TM00, TE01, и TM01.

8. Кликните **ОК**, чтобы выбрать этот набор мод и затем запустите параметрический анализ (это займет определенного время расчета).

Просмотр результатов параметрического анализа.

Как только моделирование закончено, элементы S-матрицы как функции угла сканирования можно видеть в закладке Matrix Data или на графике. Анализируя матрицу рассеяния для разных углов сканирования, можно видеть, что связи между типами волн TE00 и TE01 очень маленькие.

Чтобы вывести зависимости модулей коэффициентов отражения и передачи ТМ, как функций угла сканирования выполните следующие действия:

1. Кликните правой кнопкой на Results в дереве проекта, и выберите Create **Modal Solution Data Report>Rectangular Plot**. Появляется диалог **Report**.

2. В закладке Trace, в разделе Х выберите \$theta_scan.

3. Для Y выберите S Parameter как Category, S(Wave Port1:1) как характеристику (Quantity) и модуль Mag как Function.

4. Кликните **ОК** чтобы создать новый график. Новый отчет выводится на экран и добавляется под именем **Result** в дереве проекта с первой трассировкой, приведенной под графиком. Кнопка **Add Trace** становится активной в диалоге **Reports**.

- **5.** Выберите имя характеристики в дереве проекта. Это выводит окно свойств для Trace.
- **6.** Отметьте опцию **Specify Name** чтобы открыть поле **Name** и измените имя на *Reflection*. Этим будет изменяться имя на характеристике.
- Добавьте два дополнительных графика и измените их имена: mag(S(WavePort1:1, FloquetPort1:2)) соответствует TM00 Transmission; mag(S(WavePort1:1,FloquetPort1:4)) соответствует TM01 Transmission.
- **8.** В дереве проекта выберите X Y Plot 1. Это показывает свойства Properties для графика.
- 9. Отредактируйте поля Name на Reflection и Transmission и нажмите Enter.

Результаты параметрического анализа представлены на рис. 2.20. Заметим, что коэффициент отражения стремится к единице при угле 27.5°. Этот эффект получил название эффекта ослепления, поскольку в окрестности угла ослепления эффективность решетки резко падает, т.к. вся энергия, поступившая на волновой порт не излучается в пространство, отражается.

Также отметим, что тип волна TM01 становится распространяющейся приблизительно при угле 30°. Об этом говорит резкий рост коэффициента передачи из волнового порта в волну TM01 порта Флоке при углах больших 30°.

В данном примере рассмотрены вопросы согласования: коэффициент отражения решетки. В следующем разделе будут рассматриваться и характеристики излучения антенной решетки.

3. Антенная решетка из антенн Вивальди

Выполним расчет антенной решетки, составленной из элементарных излучателей, каждый из которых представляет собой широкополосную антенну Вивальди. Решетка из антенн Вивальди создается, используя периодические граничные условия и порты Флоке.

Антенна питается коаксиальной линией с волноводным портом. На верхней поверхности ячейки антенной решетки устанавливается порт Флоке (см. рис. 3.1). На боковых сторонах ячейки вводятся периодические граничные условия. При этом противоположные и параллельные друг другу стороны объявляются границами **Master** и **Slave**. Подложка имеет диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_r = 6$ и толщину 1.27 mm. Полосковые проводники являются 2D объектами с граничными условиями **PerE**. Расчет выполняется на частоте 4.5 ГГц и в режиме интерполяции в диапазоне 2 ... 5 ГГц.



Рис. 3.1. Интерфейс HFSS с отдельной антенной Вивальди

3.1. Черчение антенны Вивальди

Установим единицы измерения длины – миллиметры и начертим диэлектрическую плату в виде параллелепипеда размером 34 x 60 x 1.27 мм (рис. 3.2) командой **Create -> Box**.



Рис. 3.2. Размеры антенны Вивальди, являющейся элементом антенной решетки

Внесем диэлектрик в раздел переменных и зададим проницаемость параллелепипеда равной 4. Параметры параллелепипеда можно отредактировать в диалоге рис. 3.3.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateBox		
Coordinate Sys	Global		
Position	0 ,-17 ,33.3	mm	0mm , -17mm , 33.3mm
XSize	-1.27	mm	-1.27mm
YSize	34	mm	34mm
ZSize	-33.3	mm	-33.3mm

Рис. 3.3. Размер подложки с проницаемостью 6 и толщиной 1.27 мм

Антенна Вивальди работает в большой полосе частот, и наибольшая широкополосность достигается при экспоненциальном изменении щели от начала рупора к растру.

Начертим проводники антенны Вивальди, используя функциональные зависимости. Черчение линии, которая задается в виде функции, выполняется по команде Geometry -> Curve -> Analitic Curve. Появляется диалог рис. 3.4, в который введем функциональную зависимость координат точек на ребре полоскового проводника от переменной t. Координата Z зависит от переменной t линейно. Поэтому зависимость координаты Y от t можно рассматривать, как зависимость от координаты Z.

ʻ I			
Name	Value	Unit	Evaluated Valu
Command	CreateEquationCurve		
Coordinate Sys	Global		
X(_t)	0		0
Y(_t)	(0.25mm)*exp(0.123*_t)		
Z(_t)	_t*(1mm)		
Start _t	0		0
End _t	33.3		33.3
Number of Poi	24		24

Рис.3.4. Задание функций, по которым чертится кривая

Используем для задания формы кромки проводника экспоненциальную функцию:

Ширина зазора между проводниками в самом узком месте при t=0 равна 0.5 мм. Переменная t меняется от 0 до 33.3 (рис. 3.4). Функциональная зависимость задается в 24 точках.

Теперь дополним экспоненциальные кривые прямыми линиями и окружностью, которые играют роль симметрирующего устройства системы питания антенны Вивальди (рис. 3.7).



Рис. 3.5. Топология и размеры симметрирующего резонатора

Далее начертим окружность, играющую роль резонатора симметрирующего устройства антенны Вивальди (рис. 3.5).

Properties: phased_array_unitcell - HFSSDesign1 - Modeler							
Comma	nd						
	Name	Value	Unit	Evaluated Value			
	Command	CreateCircle					
	Coordinate Sys	Global					
	Center Position	0 ,3.5 ,4.915	mm	0mm , 3.5mm , 4.915mm			
	Axis	X					
	Radius	2.5	mm	2.5mm			
	Number of Seg	24		24			

Рис. 3.6. Параметры круглого резонатора, который является частью симметрирующего устройства

Теперь начертим прямоугольник, который сформирует щелевую линию связывающую резонатор и коаксиальную линию (рис. 3.7).
Properties Comman	: 20110609_Vival	dy_1 - HFSSDesign1 -
	Name	
	Command	CreateRectangle
	Coordinate Sys	Global
	Position	0 .1 .0
	Axis	х
	YSize	0.5
	ZSize	5

Рис. 3.7. Черчение прямоугольника для создания щелевой линии

После подготовки к черчению сложной формы, которая включает окружность, экспоненциальную линию, и все поверхности будущей антенны Вивальди, зададим команду **Draw->** Line и выполним захват одной точки экспоненциальной кривой. Когда дойдем до точки, в которой нужно сделать переход на окружность, переведем режим черчения в Center Point Arc (рис.3.8)



Рис. 3.8. Переход из режима черчения отрезков линий (Straight) в режим черчения окружности с помощью центра и радиуса.

Теперь нужно объединить экспоненциальный отрезок с ломаной линией командой Unite. Далее из замкнутой формы создадим плоскость командой Modeler -> Surface -> Cover Line.



Рис. 3.9. Полосковый проводник антенны Вивальди с симметрирующим устройством

Далее выделим экспоненциальный отрезок и развернем его на 180°, просто переменой знака координаты Y(t) (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Черчение второго полоскового проводника

Возбудить антенну Вивальди можно разными способами. Можно, например, поставить дискретный порт между вибраторами антенны. А можно включить в структуру реальный отрезок коаксиальной линии, на вход которой включается СВЧ генератор. Начертим внутреннюю жилу коаксиальной линии в виде цилиндра длиной 8 мм. Черчение коаксиальной линии выполняется командой **Draw->Cilinder**, по которой появляется диалог (рис. 3.11).

	Propert	ies: Project1 - HFSS	Design1 - Modeler
	Comm	land	
		Name	
		Command	CreateCylinder
		Coordinate Sys	Global
		Center Position	0 ,0.625 ,0
		Axis	Z
		Radius	0.375
11		Height	-8
		Number of Seg	0

Рис. 3.11. Параметры внутреннего провода коаксиальной линии радиусом 0.375 мм длинной 8 мм

Далее начертим внешнюю оболочку коаксиальной линии, также командой **Draw->Cilinder**, и зададим параметры, показанные на рис. 3.12.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateCylinder		
Coordinate Sys	Global		
Center Position	0 ,0.625 ,0	mm	0mm , 0.625mm , 0m
Axis	Z		
Radius	0.875	mm	0.875mm
Height	-8	mm	-8mm
Number of Seg	0		0

Рис. 3.12. Черчение внешнего цилиндра outer, на его верхней поверхности автоматически устанавливается условие Perfect E

Далее начертим бокс излучения, окружающий антенну Вивальди, командой **Draw** -> **Box** и установим его размеры, показанные на рис. 3.13.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	
Command	CreateBox			
Coordinate Sys	Global		-18mm , -17mm , 0mm	
Position	-18 ,-17 ,0	mm		
XSize	36	mm	36mm	
YSize	34	mm	34mm	
ZSize	60	mm	60mm	

Рис. 3.13. Задание размеров бокса, окружающего антенну Вивальди 34 х 36 х 60 мм

На сторонах этого бокса зададим граничное условие **Radiate**. Зададим порт на торце коаксиальной линии (рис. 3.14).



Порт Флоке используется при моделировании бесконечных периодических структур (см. главы 1 и 2). Анализ бесконечной структуры сводится к анализу одного периода структуры (элементарной ячейки). На ее противоположных боковых сторонах задаются условия периодичности. На верхней поверхности необходимо выполнить ОДНО ИЗ возможных «открытых» граничных условий, моделирующих процесс излучения в свободное пространство. В качестве поверхностей с «открытыми» граничными условия в HFSS используются PML, поверхность излучения и порт Флоке.

Достоинством порта Флоке является то, что с его помощью можно описывать не только отражение волны, поступающей на вход антенны Вивальди, но и передачу энергии в свободное пространство. В бесконечной периодической структуре поле в свободном пространстве имеет вид гармоник Флоке. Каждая из таких гармоник является плоской волной, распространяющейся в пространстве под определенным углом. Как отмечалось в главе 1 и 2 большая часть гармоник Флоке является нераспространяющимися, а основная гармоники и одна-две гармоники высших типов могут распространяться. При этом гармоники высших порядков могут при одних углах сканирования быть распространяющимися, а при других нераспространяющимися.

Использование порта Флоке позволяет рассчитывать коэффициенты передачи из волноводного порта в гармоники Флоке и наоборот. Как и в

случае волноводного порта, эта информация дается в форме S-матрицы, связывающей отраженные и падающие волны (рис. 3.19-3.24).

iet l	Port				×
nera	Modes	Setup Post Processing	3D Ref	inement	
lumb Pleas	er of Mode e click on	s: 🖸	sistance i	in setting	up modes.)
	Mo	des Calculator			
_					
Т	Mode	Polarization State	m	n	Attenuation (db/length)
T	1	TE	0	0	0.00
1	2	тм	0	0	0.00
1	3	TE	0	-1	0.71
Î	4	ТМ	0	-1	0.71
1	5	TE	-1	0	0.84
1	6	ТМ	-1	0	0.84
_					ОК Отмена

Рис. 3.16. Параметры порта Флоке, в таблице указано номер моды, состояние поляризации, индекс моды, затухание и режим уплотнения Affects Refinements

Далее зададим центральную частоту 4.5 ГГц и выполним расчет антенной решетки в диапазоне частот от 2 до 5 ГГц. Результаты расчета частотной характеристики $|S_{11}|$ показаны на рис. 3.17.



Рис. 3.17. Частотная характеристика коэффициента отражения от антенны Вивальди



Рис. 3.18. Ближнее поле в сечении антенны Вивальди и ток на поверхностях полосковых проводников

Из рис. 3.18 видно, что антенна возбуждается симметрично, чего не было бы, если бы в структуре отсутствовало симметрирующее устройство.



Отметим, что с точки зрения электродинамики использование модели решетки в виде канала Флоке не позволяет рассчитывать ДН антенны этого типа, так как эта модель строго может использоваться исключительно для анализа бесконечной решетки, которая имеет ДН с нулевой шириной, то есть в виде дельта функции. Однако, в HFSS имеется возможность расчета ДН канала Флоке путем замены одного из портов Флоке на поверхность излучения. К этой возможности следует относится с осторожностью, имея ввиду, что получаемая ДН не является ни ДН решетки, ни отдельного ее элемента. Она дает лишь качественное представление о ДН решетки, когда она возбуждается по одному из ее входов. В антенной технике такую ДН называют ДН излучателя в составе решетки. Тем не менее, надо помнить, что расчет по описанной выше методике позволяет получить указанную характеристику лишь приближенно.

4. Антенная решетка на вибраторных антеннах

Рассмотрим антенную решетку из четырех вибраторных антенн с металлическим отражателем (рис. 4.1). В такой решетке положением луча можно управлять, изменяя фазы напряжений, подводимым к отдельным ее элементам. Отражательная панель улучшает характеристики решетки, создавая в горизонтальной плоскости однонаправленное излучение.

Выполнить анализ такой антенной решетки можно в единой конструкции, т.е. не применяя периодических граничных условий.



Рис. 4.1. Антенная решетка с отражателем

Элементы решетки расположены на тефлоновой подложке толщиной 1.6 мм. Возбуждения осуществляются через дискретные порты. Граница излучения задается на сторонах воздушного бокса. Переменная фазового сдвига для постпроцессорной обработки имеет имя **phase_shift**. Центральная частота, на которой работает антенная решетка 1.9 GHz.



Рис. 4.2. Геометрия одной из четырех антенн, расположенных с шагом по оси Z равным 103 мм

Начертим диэлектрическую подложку толщиной 1.6мм (диэлектрическая проницаемость 4), командой **Draw->Box**. Полученные размеры подложки можно откорректировать в диалоге рис. 4.3.

							22
					20		
						20	
					\sim		
			Me de la	_			
tie	es: Project1 - I	HFSSDesign1	- modele	11			
tie	es: Project'l - I	HFSSDesign1	- modele	ir -			
tie and	es: Project1 - I d	HFSSDesign1	- Modele	ł.)			
tie and	es: Project1 - I	HFSSDesign1	- modele	41			
tie and	d Name	Value	Unit	Evaluated Value	INNNN		
and	d Name	Value CreateBox	Unit	Evaluated Value	NNNNN		
ntie	Name Command Coordinate Sys	Value CreateBox Global	Unit	Evaluated Value	NNNNNN		
and	d Name Command Coordinate Sys Position	Value CreateBox Global 0 ,-0.5 ,0	Unit mm	Evaluated Value	ANNNNNN A		
ntie	A Name Command Coordinate Sys Position XSize	Value CreateBox Global 0 ,-0.5 ,0 40	Unit mm mm	E valuated Value	NNNNNNNNN		
and	Ame Command Coordinate Sys Position XSize YSize	Value CreateBox Global 0 ,-0.5 ,0 40 1	Unit Unit mm mm mm	E valuated Value	NNNNNNNNN		

Рис. 4.3. Диалог фрагмента диэлектрической платы

Передвинем координатную систему на плоскость, на которой будем чертить вибратор, выделив сначала курсором одну из плоскостей (предварительно нажав F), командой Modeler->Coordinate System ->Create ->Face CS.

Далее начертим вибратор, по точкам, как многоугольник, задавая команду Draw -> Polyline.



Рис. 4.3. Черчение одной части вибратора

Далее создадим новую систему координат, сдвинутую относительно начала системы по оси X на 18 мм, равную половине длины подложки командой Modeler-> Coordinat System -> Create -> Relative CS->Offset. И сделаем разворот с копированием этой части вибратора на 180° командой Edit->Duplicate->Around Axis.

Duplicate Aro	und Axis	X
Axis:	⊙× ⊙Y	Οz
Angle:	180	deg 💌
Total number:	2 .	
Attach To Origin	nal Object: 🛛 🗌	1
NOTE: When ' face/edge assig on duplicates w consistency, wh	Attach to Origina gnments (e.g. bo ill be lost, to ens nen 'Total Numb	al Object' is selected, undaries/excitations) ure model er' is edited.
ОК		Cancel

Рис. 4.4. Выбор оси Y, вокруг которой прокручивается вибратор с копированием

Теперь между линиями вибратора начертим прямоугольник (рис. 4.5), на который затем устанавливается дискретный порт командой HFSS->Excitation->Assign->Lumped Port.



Рис. 4.5. Постановка интегральной линии на дискретный порт

Далее выполним копирование со сдвигом этой вибраторной антенны, чтобы получить 4 антенны, составляющих антенную решетку (рис. 4.7).

Черчение отражателя. Конфигурация металлического отражателя уголкового типа показана на рис. 4.6. Взаимное расположение отражателя и диэлектрической платы с вибраторами представлено на рис. 4.7. Отражатель содержит отверстия, которые могут использоваться ДЛЯ вывода возбуждающих линий и соединения их с выходами делителя мощности, который играет роль схемы питания решетки.



Общая высота диэлектрической подложки 420 мм, а диэлектрическая проницаемость ε =4. После черчения решетки, можно задать установки на расчет и диапазон частот анализа. При проведении расчета решетки нужно учесть, что антенная решетка представляет собой СВЧ многополюсник, имеющий четыре входа. HFSS рассчитывает матрицу рассеяния такого многополюсника в установленном диапазоне частот. Однако, получаемые при этом значения коэффициентов отражения не равны, представляющим наибольший практический интерес коэффициентам отражения решетки в рабочем режиме, в котором одновременно возбуждаются все четыре входа.



Рис. 4.7. Структура и размеры антенной решетки. Общая высота рефлектора 420 мм

Для определения коэффициентов отражения решетки в рабочем режиме Si,j_corr (i,j=1,...4) необходимо их рассчитать, используя элементы матрицы рассеяния S(i,j) по формулам, которые представлены на рис. 4.8.

_		
2	Fi_2	0
3	Fi_3	0
4	Fi_4	0
5	S11_corr	S(1,1)+V2*S(1,2)/V1+V3*S(1,3)/V1+V4*S(1,4)/V1
6	S22_corr	V1*S(2,1)/V2+S(2,2)+V3*S(2,3)/V2+V4*S(2,4)/V2
7	S33_corr	V1*S(3,1)/V3+V2*S(3,2)/V3+S(3,3)+V4*S(3,4)/V3
8	S44_corr	V1*S(4,1)/V4+V2*S(4,2)/V4+V3*S(4,3)/V4+S(4,4)
9	V1	cmplx(V_port1*cos(Fi_1),V_port1*sin(Fi_1))
10	V2	cmplx(V_port2*cos(Fi_2),V_port2*sin(Fi_2))
11	V3	cmplx(V_port3*cos(Fi_3),V_port3*sin(Fi_3))
12	V4	cmplx(V_port4*cos(Fi_4),V_port4*sin(Fi_4))
13	V_port1	0.66
14	V_port2	1
15	V_port3	1
16	V_port4	0.66
17	Z11_	50*(1+S11_corr)/(1-S11_corr)
18	Z22_	50*(1+S22_corr)/(1-S22_corr)
19	Z33_	50*(1+S33_corr)/(1-S33_corr)
20	Z44_	50*(1+S44_corr)/(1-S44_corr)
_	-	

Рис. 4.8. Переменные, по которым считаются S-параметры антенны при одновременном возбуждении ее входов

На рис. 4.8 под Vi понимаются комплексные амплитуды напряжений, возбуждающих элементы решетки.

Известно, что для уменьшения уровня боковых лепестков антенной решетки крайние элементы нужно возбуждать с меньшей амплитудой, чем в центре. Амплитуды возбуждения можно задать в качестве переменных (см. рис. 4.8). Если принять V_port1= V_port4 = 0.66 и V_port2= V_port3 = 1, то получим ДН, показанную на рис. 4.9.

Разность фаз питания двух соседний антенн задается переменной **phase_shift** на этапе постпроцессорной обработки. Для создания такого режима, в диалоге, выводимом по команде HFSS>Fields>Edit Sources, в котором находится переменная offset phase. Задайте множитель переменной сдвига фазы phase_shift.

Задать переменную **phase_shift** можно, нажимая на имя проекта HFSSDesign2, в дереве проекта. Переменные проекта можно видеть в окне Properties. В этом окне можно изменить величину phase_shift. Выберем phase_shift = 30° , что будет соответствовать графику на рис. 4.9.



Рис. 4.9. ДН отдельного вибратора антенной решетки



Рис. 4.10. Трехмерная ДН антенной решетки

При большом количестве элементов антенной решетки ее уже невозможно рассчитать в виде единой конструкции. Для решения такой задачи нужно использоваться периодические граничные условия.

Возбуждение каждого элемента антенной решетки выполняется с помощью многоканального делителя мощности (МДМ). Пример МДМ вместе с вибраторами показан на рис. 4.11. В случае синфазного возбуждения порты возбуждаются так, что поля в дальней зоне суммируются в направлении оси 0у. Этот процесс виден из распределения поля, показанного на рис. 4.11.



Рис. 4.11. Ближнее поле в плоскости хОу антенной решетки

Отметим, что совместный расчет излучающей решетки вместе со схемой питания представляет собой для HFSS весьма сложную задачу, которая требует больших затрат компьютерных ресурсов. Такое положение обусловлено тем, что разветвленная микрополосковая схема, реализующая МДМ требует для своего анализа использования весьма густой сетки. Пример такой сетки представлен на рис. 4.12, на котором также показано распределение токов на металлических проводниках.



Рис. 4.12. Вибраторная решетка, отражатель и схема распределения

Учитывая большую трудоемкость решения обсуждаемой задачи в HFSS, представляет интерес применение комплексного подхода, в котором сочетается использование разных программных средств для расчета разных фрагментов сложной структуры. При этом каждая часть анализируется с помощью методов в наибольшей степени адекватных физике ее функционирования.

Расчет МДМ в системе МWO. Схему распределения мощности будем Microwave Office (MWO) проектировать В системе используя подпрограмму EMSight, которая осуществляет расчет полосковых структур методом моментов. Такой подход для анализа полосковых схем намного эффективнее метода конечных элементов, который HFSS. При этом излучающая решетка используется В будет анализироваться с помощью HFSS. Ниже мы обсудим возможность корректного использования данных полученных с помощью одной системы для расчетов в другой. В данном случае в МWO.

Проблема согласования расчетных данных, полученных в разных системах проектирования решается путем использования дискретных портов. Для этого при моделировании вибраторов применяется модель, показанная на рис. 4.13. Ее особенностью является использование двух дискретных портов P1.2, включенных между проводниками линии передачи, возбуждающей вибратор и металлическим отражателем. При таком представлении элемента решетки она рассчитывается в HFSS как CBЧ многополюсник восемью выходами (шестнадцатиполюсник С В

терминологии, принятой в России и восьмиполюсник по англоязычной терминологии – eight port junction).



Рис. 4.13. Модель вибратора с двумя портами

Использование такой модели позволяет рассчитать матрицу рассеяния решетки без МДМ размером 8х8.

Рассмотрим далее основные этапы проектирования МДМ в системе MWO. МДМ представляет собой комбинацию нескольких элементарных делителей мощности ЭДМ на два канала, соединенных друг с другом линиями передачи. Структурная схема МДМ показана на рис. 4.14.



Рис. 4.14. Структура МДМ

В состав МДМ показанного на рис. 4.14 входят ЭДМ Д1, осуществляющий деление мощности пополам, ЭДМ Д2, делящий мощность в отношении 3:7 и возбудитель вибраторов В. Неравное деление мощности в ЭДМ Д2 обеспечивает спадающее распределение поля на краях решетки, благодаря которому снижается уровень боковых лепестков ее ДН в вертикальной плоскости.

Возбудитель В выполняет роль устройства питания вибраторной антенны. Выходами 1,2 он соединен с вибратором, который имеет два входа (см. рис. 4.13).

Первый этап проектирования МДМ включает проектирование ЭДМ и возбудителя. Их топология показана на рис. 4.15 а-в. На рис. 4.15 а,б показаны топологии делителей Д1,2, а на рис. 4.15 в топология возбудителя. Они выполнены на подложке с проницаемостью 4.6 и толщиной 2 мм.



Рис. 4.15. Топологии ЭДМ и возбудителя

Поскольку делитель Д1 имеет симметрию относительно портов 2 и 3, то его проектирование сводится к согласованию по входу 1. Все выходы устройства выполнены в виде микрополосковых линий с характеристическим сопротивлением 50 Ом. В качестве портов используются дискретные порты. Боковые плечи делителя содержат четвертьволновые трансформаторы, которые обеспечивают согласование выходных линий передачи со входной линией. На рис. 4.16 показана частотная характеристика коэффициента отражения делителя по входу 1. Видно, что наилучшее согласование достигается в окрестности частоты 1.7 ГГц. При удалении от нее коэффициент отражение растет, оставаясь однако достаточно малой величиной, не превышающей – 26 дБ в полосе 1.6 – 1.8 ГГц.



Рис. 4.16. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения делителя Д1 по входу 1

Делитель Д2 не имеет симметрии относительно входов 2 и 3, так как он обеспечивает несимметричное деление мощности. Поэтому его проектирование требует не только согласования по входу 1, но и реализации заданных значений коэффициентов передачи от входа 1 ко входам 2 и 3. Они должны быть равны следующим значениям: $S_{21} = -1.5$ дБ, $S_{31} = -5.34$ дБ.

На рис. 4.17 показаны частотные зависимости модулей коэффициента отражения S_{11} и коэффициентов передачи S_{21} и S_{31} делителя Д2. Видно,

что он достаточно хорошо согласован по входу 1 и обеспечивает заданные значения коэффициентов передачи.



Рис. 4.17. Частотные характеристики делителя Д2

Возбудитель вибратора должен выполнить следующие функции. Он выполняет деление мощности, поступающей на вход 1 в равном отношении между входами 2 и 3. При этом фазы сигналов на портах 2 и 3 должны быть сдвинуты на 180⁰. В этом случае в двухпроводной линии, которая питает вибратор, будет возбуждаться ее основная волна, у которой токи на проводниках также сдвинуты по фазе на 180°. Важно также, чтобы выходы возбудителя были согласованы со входным сопротивлением вибратора. Его параметры подбирались В HFSS таким образом, чтобы входное сопротивление в точках размещения портов имело активную часть равную 60 Ом и нулевую реактивную часть.

Исходя из этих условий, осуществлялась оптимизация топологии возбудителя. В результате были получены частотные характеристики, представленные на рис. 4.18 а,б. На рис. 4.18 а показана частотная зависимость коэффициента отражения по входу 1, а на рис. 4.18 б частотные зависимости фаз коэффициентов передачи S_{21} и S_{31} . Видно, что возбудитель хорошо согласован и обеспечивает противофазное деление мощности.

В системе MWO имеется возможность визуализации распределения токов на полосковых проводниках. Пример такого распределения на проводниках возбудителя показан на рис. 4.19.



Рис. 4.18. Частотные характеристики возбудителя

56



Рис. 4.19. Распределение токов на полосковых проводниках возбудителя

Заключительная стадия проектирования МДМ состоит в расчете его выходных параметров. Топология МДМ показана на рис. 4.20.



Рис. 4.20. Топология МДМ

В качестве примера на рис. 4.21 представлена частотная зависимость коэффициента отражения МДМ по центральному входу 1 (см. Рис. 4.14). Видно, что согласование МДМ несколько хуже согласования ЭДМ, однако в полосе частот коэффициент отражения не превышает – 20 дБ.

Следующий этап проектирования решетки состоит в расчете ее параметров с учетом результатов проектирования МДМ и излучающей части решетки в виде четырех вибраторов, выполненной в HFSS.

Эту часть работы удобно выполнить, экспортируя файлы данных из HFSS и MWO и обрабатывая их с помощью таких вычислительных систем как Маткад или Матлаб.

Файлы данных содержат матрицы рассеяния многополюсников, рассчитанные в HFSS и MWO. Матрица рассеяния решетки S_a представляет собой матрицу 8х8 в соответствии с числом ее входов. Аналогично матрица рассеяния МДМ S_d имеет размерность 9х9.



Рис. 4.20. Частотная зависимость коэффициента отражения МДМ по входу 1

Матрица S_d имеет следующую структуру:

$$S_d = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{1\alpha} \\ S_{\alpha 1} & S_{\alpha \alpha} \end{bmatrix},\tag{5}$$

где α - группа входов с номерами 2 – 9. Таким образом, $S_{\alpha\alpha}$ - это матрица размером 8х8, $S_{1\alpha}$ - матрица – строка размером 1х8, $S_{\alpha1}$ - матрица – столбец размером 8х1 и S_{11} - коэффициент отражения по входу 1.

Для расчета результирующего коэффициента отражения антенны *R* необходимо провести анализ каскадного соединения двух многополюсников, показанных на рис. 4.21.



Рис. 4.21. Каскадное соединение МДМ и решетки

Для определения коэффициента отражения *R* воспользуемся соотношениями, приведенными в [20]:

$$R = S_{11} + S_{1\alpha} \left(E - S_{\alpha\alpha} S_{\alpha} \right)^{-1} S_{\alpha\alpha} S_{\alpha 1}, \tag{6}$$

где *Е* - единичная матрица размером 8х8.

Также, из анализа каскадно-соединенных многополюсников, мы можем найти амплитуды падающих на входы решетки волн U_n , n = 1...8. Их можно использовать далее для задания условий возбуждения решетки с учетом влияния МДМ. Зная эти амплитуды, мы можем с помощью HFSS рассчитать ДН антенны (рис. 4.10).

Использование разных программных средств, описанное выше позволяет рационально использовать их для решения тех задач, которые решаются с их помощью с наименьшими затратами компьютерных ресурсов. В данном случае HFSS используется для анализа трехмерной излучающей структуры, а MWO для анализа планарной полосковой схемы. В результате общее время, необходимое для получения конечного результата существенно сокращается. Кроме того, повышаются точность и достоверность решения.

5. Моделирование частотно-селективной поверхности

К числу наиболее интересных задач прикладной электродинамики относятся задачи дифракции волн на периодических структурах. Широкое применение находят двумерно-периодические планарные решетки, которые получили название частотно-селективных поверхностей (ЧСП). Они используются в качестве пространственных фильтров, поляризационных фильтров, антенных обтекателей, средств радиозащиты и т.д.

упоминания заслуживает ЧСП Отдельного использование В рефлекторных квазиоптических фидерах антенн метеорологических Применение ЧСП для построения спутников. частотно-селективных устройств позволяет существенно улучшить массогабаритные ИХ характеристики.

К устройствам этого типа предъявляются жесткие требования. Так, например, радиометр Европейского Космического Агентства MASTER должен обеспечивать разделение сигналов диапазонов 294-306, 316-326 и 342-349 ГГц [13-17]. При этом вносимые потери не должны быть больше более 0.5 дБ, а развязка между каналами не меньше 20 дБ для уверенного детектирования слабых излучений молекул в атмосфере. Для минимизации вносимых потерь применяют апертурные ЧСП, позволяющие исключить диэлектрики и связанные с ним потери. Улучшение избирательных характеристик может быть достигнуто использованием многослойных структур, содержащих несколько параллельных слоев и многоэлементных периодических структур, содержащих несколько отражателей (апертур) в одной элементарной ячейке периодической структуры ЧСП. Проектирование такого рода устройств является актуальной задачей, решение которой сложно осуществить вне рамок строгого электродинамического моделирования.

Создание модели ЧСП. Будем анализировать ЧСП с помощью периодических граничных условий, выделяя элементарную ячейку структуры в виде канала Флоке.

Элементарная ячейка ЧСП может быть создана с использованием связанных границ с периодическими граничными условиями и двух портов Флоке. Результат решения граничной задачи анализа ЧСП представляется в виде S-матрицы, связывающей моды Флоке в соответствующих портах.

В качестве примера, который рассмотрим в данной главе, служит проводящий экран, содержащий гексагональную решетку круговых апертур (отверстий). Геометрия решетки показана на рис. 5.1. На рис. 5.1 векторы решетки показаны углом. Угол между векторами решетки составляет 60°.



Рис.5.1. Геометрия частотно-селективной поверхности

Рассмотрим нормально падающую плоскую волну на экран с поляризацией вектора электрического поля, показанной на рис. 5.1 красными стрелками.

Рассчитаем модули и фазы элементов матрицы рассеяния, как функции от частоты. Полоса частот от 8 до 20 ГГц.

Модель одной ячейки показана на рис. 5.2. Длины стороны равна 1.73 см, диаметр круглой апертуры равен 1.2 см и высота ячейки равна 4 см. Видно, что ячейка состоит из планарного металлического ромба с отверстием и бокса ромбической формы, на поверхностях которого заданы периодические граничные условия и порты Флоке. Приступим к созданию элементарной ячейки средствами HFSS. На первом этапе создадим ромбический бокс.

Создание ромбического бокса. Для решения задачи выполните следующие действия:

1. Откройте новый проект и назовите его **RhombicArray.** Установите единицы измерения длины – сантиметры (ст).



Рис. 5.2. Ромбовидная ячейка гексагональной ЧСП

2. Кликните **Draw>Line**, кликните в произвольном месте, чтобы установить начальную точку, затем кликните три другие произвольные точки и затем вернитесь к начальной точке, чтобы замкнуть фигуру.

3. Кликните правой кнопкой, чтобы вызвать выплывающее меню и выберите команду **Done**. Этим создается многоугольник.

4. В дереве проекта packpoйте **Sheets>Unassigned>CreatePolyline**, выбрав первую операцию **CreateLine** чтобы увидеть свойства этой линии.

Segm	ient		
		Name	
		Segment Type	Line
		Point1	0,0,0
		Point2	0.865,1.4982,0

5. Установите координаты первой точки Point1 = (0,0,0).

6. Отредактируйте координаты Point2 = (0.865, 1.4982, 0). Это будет сдвиг сегмента первой ломаной линии, который даст требуемый размер объекта.

7. Повторите этот процесс со следующими тремя операциями CreateLines в дереве создания и отредактируйте в них значения Point2, Point3 и Point4 (рис. 5.3) следующим образом:

Point2 (0.865, 1.4982, 0) Point3 (2.595, 1.4982, 0) Point4 (1.73, 0, 0)

Созданный плоский ромб можно использовать для создания ромбообразного бокса. Перед этим сделайте, командой Сору, копию ромба, которая будет полезна для создания металлического ромба.



Рис. 5.3. Ромб как сечение будущей ячейки частотно-селективной поверхности

8. Чтобы преобразовать плоский 2D объект в 3D ячейку, нажмите Draw>Sweep>Along Vector.

9. В строке состояния, введите нули в ячейки Х, Ү, Z, чтобы задать начальную точку.

Это помещает курсор в первую точку, задающую вектор, и изменяет сообщение строки состояния на "Input the second point of the sweep vector (ввести вторую точку вектора развертки)". Метки ячейки показывают величины сдвигов dX, dY, и dZ.

10. В статус-баре введите 0, 0, и 4 и нажмите Enter. Это начертит линию от начальной до конечной точки, и выведет диалог Sweep Along Vector (рис. 5.4).

dX:	0	dY:	0	dZ:	4	Relative	 Cartesian 	-	cm
								the second se	J

11. В диалоге Sweep Along Vector, оставьте 0 deg как черновой угол, и выберите Round из выпадающего меню как тип Draft type. Затем нажмите OK.

Sweep along v	ector 🔀
Draft angle:	
Draft type:	Round
OK	Cancel
HH	
H	
H	
-Click to ch	inge reference position.

Рис. 5.4. Завершение операции свипирования по вектору

12. Эта операция преобразует ромб в 3D объект.

13. Теперь сдвинем этот объект вниз на 2 см, используя операцию *Edit-Arrange-> Move.*

14. Откроется диалог **Measure data** и появляется возможность ввести через статус-бар, а также курсором, опорную точку Х, Ү, и Z, как первую точку вектора сдвига.

15. В статус-баре установите Z = 0, и нажмите Enter.

16. В статус-баре установите dZ = -2.0 и нажмите Enter.

Это сдвинет объект на нужное расстояние.

Создание плоского ромба с отверстием. Если Вы сделали копию плоского ромба, то далее ее можно использовать. В противном случае повторите шаги 1 - 7.

1. Кликните копию плоского ромба.

2. Командой **Draw>Circle** начертите круг, установив курсор в центре многоугольника.

3. Откройте диалог свойств окружности и установите ее радиус 0.6 ст.

4. Выберите одновременно окружность и прямоугольник и кликните **Modeler> Boolean>Subtract**. Откроется диалог Subtract.

Рис. 5.5. Ячейка частотно-селективной поверхности



5. Переведите Rectangle в список Blank, а окружность в список Tool.

6. Кликните **ОК**, чтобы закрыть диалог и создать апертуру вычитанием окружности из прямоугольника.

Задание границ Master и Slave.

Для того, чтобы смоделировать ЧСП, которая состоит из периодически расположенных элементов, необходимо задать периодические граничные условия на противоположных стенках.

Зададим границы Master и Slave на ромбическом объекте следующим образом.

1. Выберите поверхность, показанную на рис. 5.6 и задайте команду **HFSS>Boundaries>Assign>Master.** Появляется диалог Master Boundary.

2. Оставьте имя по умолчанию как Master1.

3. Чтобы установить вектор U вдоль по ребру кликните New Vector. Появляется диалог Measure dialog и Create Line.

4. Начертите вектор U vector на выбранной поверхности. Кликните на нижний левый угол как начальную точку, и прочертите курсор к правому углу и кликните **Master1.**



Рис. 5.6.3адание границ Master(ведущая) и Slave(ведомая)

5. В диалоге **Master Boundary**, для вектора V Vector, выберите опцию Reverse direction и нажмите **OK**.

6. Выберите противоположную сторону и задайте команду HFSS>Boundaries>Assign Slave. Появляется диалог Slave с выбранной закладкой General.

7. Для этой ведомой поверхности выберите Master1 как ведущую границу.

8. Начертите вектор U Vector как показано на рис. 5.6 и нажмите OK.

9. Повторите процедуру для границ Master2 и Slave 2.



Рис. 5.7. Создание второй пары периодических границ

Далее зададим граничное условие Perfect Е для ромба с отверстием. Для этого нужно выбрать поверхность Aperture из дерева хронологии и задать команду HFSS>Boundaries>Assign>Perfect E. Граница PerfE1 появляется в списке Boundary.

Задание портов Флоке.

Порты Флоке нужно установить на нижнюю и верхнюю поверхности модели.

1. Выберите верхнюю поверхность модели и кликните HFSS>Excitations>Assign>Floquet Port. Появляется ассистент порта Флоке, показывающий страницу General.

2. Для координатной системы Lattice Coordinate System, из выплывающего меню для направления A, выберите New Vector.

3. Начертите вектор, нажимая нижний угол по оси Z начальную точку, и затем нажимая соседний угол вдоль по оси X. Когда вы сделаете двойной клик для завершения построения вектора, диалоги Measure Data и Create line исчезают, и снова появляется ассистент Floquet Port, показывая, что вектор a определен. Повторите эту процедуру для вектора b.

4. В закладке **Modes setup**, введите Number of Modes= 14. Таким образом, заполнится таблица Mode, которая будет иметь четырнадцать строк (рис. 5.9).



Рис. 5.8. Порт Флоке в пространстве ячейки частотно-селективной поверхности

5. Кликните кнопку **Modes Calculator** для получения информации по установке мод. Появляется калькулятор мод. Установите частоту Frequency = $20 \Gamma \Gamma \mu$ (рис. 5.9).

oque	t Port : I	Nodes Setup				×	Mode Table Calculator
Num	ber of Mod	es: 14					Number of Modes: 14
							Parameters For Mode Selection
(Plea	ase click or	this button if you want as	sistance i	in setting	up modes.)		Frequency: 20 GHz 🔻
	М	odes Calculator	ſ				Scan Angles:
	Mode	Polarization State		n	Attenuation (db/length)		Phi
_	1	TF	0	0	Attendation (donength)		Start 0 deg 💌
-	2	TM	0	0	0.00	3 - C	Stop 0 deg 🗸
-	3	3 TE	0	0	0.00	1	Step Size
-	4	TE	0	0	0.00	=	
	5	TE	0	0	0.00		- Theta
	6	TE	0	0	0.00		
	7	TE	0	0	0.00	4	Start 0 deg 💌
	8	TE	0	0	0.00		Stop 0 deg 👻
	9	TE	0	0	0.00		Step Size 0 deg 👻
	10	TE	0	0	0.00		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
<		1				×	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
						_	OK Cancel
				Назад	Далее > Отг	1ена	
							1.5

Рис. 5.9. Калькулятор мод и установки на его запуск

6. Оставьте остальные величины по умолчанию и кликните **ОК**, чтобы закрыть калькулятор. Это заполнит таблицу с рассчитанными данными.

7. Выберите опцию **Deembed**, и задайте Distance = 2.0 cm.

8. Кликните Next для перехода на страницу 3D Refinement.

9. Для 1-й моды Mode 1, выберите опцию уплотнения Affects Refinement (рис. 5.10) и кликните Next для перехода на страницу **Post Processing**.

Mode	Polarization State	m	n	Affects Refinement	<u>^</u>	Į
1	TE	0	0	~		
2	тм	0	0			
3	TE	1	1		≡	
4	TE	-1	0			
5	TE	-1	-1			
6	TE	1	0			ļ
7	ТМ	-1	-1			
8	ТМ	1	0			
9	тм	1	1			
					×	J
	Clos	Polin	omont	Selections		
	Clea	r Hefin	ement	Selections		

Рис. 5.10. Результаты работы калькулятора мод

10. Кликните **ОК**. Первый порт Флоке появится в разделе Excitations в дереве проекта.

11. Выберите нижнюю поверхность модели, и повторите процесс, чтобы установить второй порт Флоке. Информация первого порта Флоке копируется.



Рис. 5.11. Ближнее поле в сечении ячейки частотно-селективной поверхности

Установка на анализ. Для этого выполните следующие операции:

1. Нажмите правой кнопкой на Analysis в дереве проекта и выберите Add Solution Setup. Открывается диалог Solution Setup.

2. В закладке General установите Solution frequency = 20 GHz. Установите Maximum Number of Passes = 10, и Maximum Delta S = 0.02.

3. В закладке Options, отметьте режим Do Lamda Refinement, и установите Lambda target = 0.2.

4. Установите Maximum Refinement Per Pass = 20%, the Minimum Number of Passes = 6, μ Minimum Converged Passes = 2.

5. Выберите функцию First Order Basis, и кликните OK.

Interpolation Bas	is Co	nvergence			×
Entry Selection:	All		▼		
Mode Selection:	All		•		
		FloquetPort1:1	FloquetPort1:2	FloquetPort1:3	Floq 🔺
FloquetPort1:13	3				
FloquetPort1:14	1				
FloquetPort2:1		ON			
FloquetPort2:2					
FloquetPort2:3					
FloquetPort2:4					_
•					•
Set		Ch	ear	Clear	41
		OK	Cancel		

Рис. 5.12. Выбор типов волн, по которым контролируется сходимость процесса

Расчет характеристик в диапазоне частот. Чтобы выполнить расчет в полосе частот:

1. Кликните правой кнопкой мыши на Setup1 в дереве проекта и выберите **Add Frequency Sweep**. Появляется диалог **Edit Sweep**.

2. Для Sweep Туре, выберите опцию сглаживания данных расчета в диапазоне частот **Interpolating**.

4. Установите Max Solutions = 50, и Error Tolerance = 0.5%.

5. Кликните кнопку Advanced Options чтобы показать диалог Interpolating Sweep Advanced Options.

6. Установите Minimum Solutions = 5, μ Minimum number of Subranges = 1.

7. Для установки сходимости Interpolation Convergence, выберите кнопку Use Selected Entries Radio, и кликните кнопку Select Entries. Появляется диалог Interpolation Basis Convergence (рис. 5.12).

8. В диалоговом окне Interpolation Basis Convergence, оставьте Entry Selection и Mode Selections как All. Это значит, что все моды Флоке будут перечислены в таблице. Затем используйте вертикальную полосу прокрутки, найдите строку FloquetPort2:1 и установите значение ON в столбце FloquetPort1:1.

9. В строке FloquetPort1:1 и в строке Floquet Port2:1 также установите опцию **ON**.

10. Нажмите **OK**, чтобы закрыть этот диалог, OK чтобы закрыть Interpolating Sweep Advanced Options, и OK, чтобы закрыть диалог Edit Sweep.

На рис. 5.13 – 5.14 показаны рассчитанные распределения полей разных мод канала Флоке.



11. Нажмите Analyze для запуска расчета.

Просмотр результаты расчетов. Несколько частотных зависимостей модулей и фаз коэффициентов отражения и прохождения по основным типам волн показаны на рис. 5.15, 5.16.



Рис. 5.15. Фазо-частотная характеристика коэффициента передачи из порта Флоке 1 в порт 2 по основной волне

Из рис. 5.15 видно, что ЧСП обладает частотной селективностью для основной моды. Из 5.16 видно, что на частоте 18 ГГц ЧСП полностью прозрачна для падающей волны, так как на этой частоте ее коэффициент отражения стремится к нулю.

Интересно также рассчитать свойства ЧСП для волн, падающих под разными углами на частотно-селективную поверхность. В этом случае нужно задать плоскую волну, угол падения которой будет параметрически меняться.



Рис. 5.16. Частотные характеристики модулей коэффициентов отражения и передачи ЧСП по основной волне

Отметим, что также можно рассчитать свойства ЧСП для волн, падающих под разными углами на частотно-селективную поверхность. В этом случае нужно задать плоскую волну, угол падения которой будет параметрически меняться. К частотно-селективным поверхностям можно отнести резонансную структуру, рассмотренную в гл.1.

Материалы можно задать так, что они будут иметь частотную зависимость своих параметров. Пример частотной зависимости материалов показывается на рис. 5.17.

	.02		
perties of th	ie Materia		
Name	Туре	Value	U
Relativ	Simple	4.11483 + 0.0281238*In((2.53303e+022 + Freq*Freq)/(4.95658e+009 + Freq*Freq))	
Relativ	Simple	1	
Bulk C	Simple	1e-12+3.12919e-012*Freq*(atan(Freq/70403)-atan(Freq/1.59155e+011))	
Dielectr	Simple	0	
Magnet	Simple	0	
Magnet	Simple	0	tesla
Lande	Simple	2	
Delta H	Simple	0	A_per_meter
• Meas	Simple	9.4e+009	Hz
Mass D	Simple	0	ka/m^3

Рис. 5.17. Частотные зависимости материала (из примера ViaWizard)

Библиотека материалов HFSS можно пополнять моделями с линейноломанными частотными зависимостями, моделями моделями Дебая, моделями Дворжека-Сахарова, а также пользовательскими моделями, все параметры которых можно ввести в табличном виде [1].
6. Падение плоской волны на объект и расчет радиолокационного сечения рассеяния

Радиолокационное сечение рассеяния характеризует способность объекта рассеивать падающие на него электромагнитные волны. В англоязычной литературе ему эквивалентен термин Radar Cross Section (RCS). Этот параметр используется для оценки возможности обнаружения объекта (цели) с помощью радиолокатора [4,5]. Кроме этого параметра, для оценки параметров цели используется эффективная площадь рассеяния (ЭПР).

Рассмотрим определения параметра RCS. Выделяют два разных случая. В первом передающая антенна, облучающая исследуемый объект и приемная антенна, принимающая отраженные от него волны находятся в одном месте. В этом случае говорят о моностатической локации и параметры цели описывают с помощью моностатического RCS.

Во втором случае приемная и передающая антенны находятся в разных точках (см. рис. 6.1). В этом случае говорят о бистатической радиолокации и используют, соответственно, бистатическое RCS.



Рис. 6.1. Схема бистатической радиолокации

Параметры RCS и ЭПР связаны следующим образом:

$$RCS = \sigma/\lambda^2, \tag{7}$$

где λ – длина волны в свободном пространстве, σ – ЭПР [м²]. RCS, определенный соотношением (6.1) называют также нормированным

радиолокационным коэффициентом отражения, поскольку он является безразмерной величиной.

ЭПР определяется через напряженность электрического поля падающей на объект волны E_{nag} в месте расположения объекта и напряженность поля волны рассеянной объектом в направлении расположения приемной антенны E_{orp} в месте расположения приемной антенны:

$$\sigma = 4\pi r^2 |E_{orp}|^2 / |E_{nag}|^2, \qquad (8)$$

где r – расстояние от объекта до приемной антенны.

Отметим, что соотношение (6.2) может использоваться как в случае бистатической, так и моностатической радиолокации при соответствующем изменении напряженности поля рассеянной волны.

Из соотношения (6.2) видно, что ЭПР характеризует исключительно энергетические свойства объекта, так как в его определение входят абсолютные значения поля. Если представляет интерес фаза рассеянной волны, то в этом случае используют комплексный РСР, определяемый через комплексную ЭПР:

$$\sqrt{\sigma} = \sqrt{4\pi} r \cdot E_{omp} / E_{na\partial}$$
(9).

HFSS-13 рассчитывает бистатический, нормированный бистатический, комплексный бистатический и моностатический РСР. В этом примере мы рассчитаем нормированные РСР для бистатического и моностатического положений радиолокатора и цели. Меняя угол IWavePhi от 0 до 180 градусов (рис. 6.2), мы как бы совершаем «облет» цели, облучая цель со всех сторон (рис. 6.3) и принимая отраженный сигнал.

Incident Wave	Source	×
General Data S	pherical Vector Setup Plane Wave Options Defaults	
- IWavePhi		
Start D	deg 💌 Step 3 deg 💌	
Stop 180	deg 💌 View Point List	
- IWaveTheta-		
Start 90	deg 💌 Step 0 deg 💌	
Stop 90	deg 💌 View Point List	
- Eo Vector		
Phi 1	V/m	
Theta 0	V/m	
	Use Defaults	
	ОК Отмен	a

Рис. 6.2. Параметры плоской волны с установками для расчета моноимпульсного RSC

Общая процедура расчета RCS объекта методом конечных элементов, в частотной области, состоит из следующих шагов:

1. Создание проекта HFSS.

2. Черчение геометрической модели, включающее:

- установку область черчения (бокс, в котором будет размещен объект);
- создание объекта;
- задание материала объекта (в нашем случае объект, на который падает плоская волна, идеально проводящий).

3. Установка параметров решения задачи:

- установка граничных условий на поверхностях бокса (мы будем использовать условия PML);
- установка источника возбуждения (плоская волна);
- установка критериев сходимости и параметров разбиения.
- 4. Pacчeт RCS.

5. Постпроцессорная обработка для визуализации RCS.

Применим этот алгоритм для расчета рассеяния от простейшего объекта - идеально проводящего куба в пространстве.

Создание модели (RCS Model). Выбираем тип задачи Driven Modal.

Чтобы установить единицы длины:

1. Кликните Modeler>Units. Появляется диалог Set Model Units.

2. Выберите единицы meter из меню Select units. Опция Rescale to new units не включается.

Если установлена опция **Rescale to new units**, то геометрическая сетка автоматически масштабирует расстояние между линиями сетки к единицам, введенным так, что разница будет соответствовать установленным единицам. **3.** Кликните **OK**, чтобы установить метры, как единицы длины для этой модели.

Построим идеально проводящий (PEC) куб, окруженный воздушным боксом (рис.6.3). На поверхностях бокса установлены граничные условия PML.

На этот куб падает плоская волна. Выполним расчет RCS- Radar Cross Section.



Рис. 6. 3. Проводящий куб внутри воздушного бокса

Для создания куба, используем команду **Draw>Box.** Идеально проводящий куб имеет ребро длиной 0.75 метра (рис.6.4).

Prope	operties: 20110913_RCS-1 - HFSSDesign1 - Modeler						
Comm	hand						
	Name	Value	Unit	Evaluated Value			
	Command	CreateBox					
	Coordinate Sys	Global					
	Position	-0.375 ,-0.375 ,-0.375	meter	-0.375meter , -0			
	XSize	0.75	meter	0.75meter			
	YSize	0.75	meter	0.75meter			
	ZSize	0.75	meter	0.75meter			

Рис. 6.4. Параметры проводящего куба

Чтобы установить свойства куба:

1. Выберите созданный бокс и кликните **Properties** из выплывающего меню. Это выводит диалог **Properties.**

- 2. Дайте имя объекту.
- 3. В поле материала задайте материал рес из списка и нажмите ОК.
- **4.** В диалоге **Properties** отредактируйте цвет и выберите его красным.
- 5. Установите прозрачность 0.6.
- 6. Кликните ОК, чтобы выбрать эти установки и закрыть диалог.

Создание воздушного бокса. Начертим бокс размером 1.4 м с центром в начале координат, с прозрачностью 0.9. Назовем его air_box. Начертим воздушный бокс по команде **Draw>Box**, и отредактируем его размеры в диалоге, показанном на рис. 6.5.

	DUYI			- · · ·	
Prope	rties: 20110913	8_RCS-1 - HFSSDesign1 - Mo	deler		
Comn	nand				
	Name	Value	Unit	Evaluated Value	
	Command	CreateBox			Γ
	Coordinate Sys.	Global			
	Position	-0.7 ,-0.7 ,-0.7	meter	-0.7meter , -0.7	
	XSize	1.4	meter	1.4meter	
	YSize	1.4	meter	1.4meter	
	ZSize	1.4	meter	1.4meter	

Рис. 6.5. Размеры воздушного бокса

Стороны воздушного бокса будут удалены от исследуемого идеально проводящего куба на расстояние большее, чем длина волны, учитывая частоту 300 МГц, которую мы будем использовать.

Задание границ РМL. Чтобы создать границы РМL:

- 1. Установите опцию выбора поверхности и введите команду Edit>Select>Face, или нажимая клавишу F.
- 2. Выберите Edit>Select>By Name, или выберите значок в меню. Это выведет диалог Select by Face.

~	· · ·						
	8	№?	0	0	\diamond	\bigcirc	Q
	#	S	Fa	ace		•	l
	n	n					

- 3. В списке имен объектов, выберите air_box. Этот список называется air_box faces.
- 4. Удерживая клавишу Ctrl, кликните каждую поверхность бокса. Все поверхности air_box должны быть подсвечены (рис. 6.6).

Select Face	
Object name: air_box target	Face ID: Face91 Face92 Face93 Face94 Face95 Face96
OK	Cancel

Рис. 6.6. Выбор всех сторон воздушного бокса

5. В окне черчения, вызовите правой кнопкой мыши всплывающее меню и выберите Assign Boundary> PML Setup Wizard. Появляется ассистент установки (рис. 6.7).

	Uniform Layer Thickness
	Use Default Formula
	Create joining corner and edge objects
) Us	e Selected Object as PML Cover
(U s	e this option to cover non-planar faces)
	Corresponding Base Object: Box_air
	Uniform Layer Thickness: 1
	Orientation in Local Coordinates: C X Axis C Y Axis C Z Axis
D Do	o Not Create New Cover Objects
e Fac	ce Radiation Properties
	Radiating Only

Рис. 6.7. Ассистент установки поверхности РМL

6. В поле Uniform Layer Thickness (рис. 6.7), установите толщину слоя 0.4 м. Параметры слоев РМL будут откорректированы автоматически в соответствии с новой толщиной.

7. Установите опцию согласования углов и ребер: Create joining corner and edge objects и кликните Next. Это создаст объекты PML и появится диалог Material Parameters (рис. 6.8).

PM	IL Objects Continue Guided Waves
	Propagation Constant at Min Frequency: 20 1/m
inimur	m Radiating Distance:
0.3	3 Use Default Formula

Рис. 6.8. Установки для расчета параметров РМL

8. Установите минимальную частоту Min Frequency = 0.3 GHz, и минимальную дистанцию излучения Minimum Radiating Distance = 0.3 м.

9. Кликните Next чтобы вывести итоговый диалог PML Summary (рис. 6.9).

PML Group	Thickness	Material Statu	IS		
PMLGroup1	0.7meter	Assigned			
Modify Paramel	ers Of Selected	PML Group			
Modify Paramet	ters Of Selected	PML Group	0.3		GHz
Modify Paramel Free Radia Guided Wa	ters Of Selected tion Min Free ave Prop. Co	PML Group quency: onst. at Min Freq:	0.3		GHz 1/m
Modify Paramet Free Radia Guided Wa Minimum Radia	tion Min Free tion Min Free ave Prop. Co ating Distance:	PML Group quency: onst. at Min Freq: 0.3	0.3 20		GHz 1/m
Modify Paramet Free Radia C Guided Wa Minimum Radia	tion Min Fred ave Prop. Co ating Distance:	PML Group quency: onst. at Min Freq: 0.3	0.3 20		GHz •
Modify Paramet Free Radia Guided Wa Minimum Radia Update	ers Of Selected tion Min Free ave Prop. Co ating Distance:	PML Group quency: onst. at Min Freq: 0.3	0.3 20 mete		GHz 1/m
Modify Paramet Free Radia Guided Wa Minimum Radia Update	tion Min Frected Min Frected ave Prop. Co	PML Group quency: onst. at Min Freq; 0.3	0.3 20		GHz 1/m
Modify Paramet Free Radia Guided Wa Minimum Radia Update	ters Of Selected tion Min Frec ave Prop. Co ating Distance:	PML Group	0.3 20 mete	T	GHz 1/m

Рис. 6.9. Завершающие установки в работе ассистента РМL

10. Кликните **Finish** чтобы закрыть диалог рис. 6.9. Границы PML появляются в разделе Boundaries в дереве проекта, и объекты PML перечисляются в дереве проекта. *Разбиение на тетраэдры воздушного бокса*. Параметры разбиения бокса air_box будут сильно влиять на точность расчета диаграммы направленности. Для установки этих параметров:

1. Выделите поверхности бокса air_box.

2. Кликните правой кнопкой мыши на Mesh Operations в дереве проекта.

3. Кликните Assign>On Selection>Length Based. Это выведет диалог Element Length Based Refinement (рис. 6.10).

Element Length Based Refinement	×
Name: Length1	
Length of Elements	
Restrict Length of Elements	
Maximum Length of Elements:	
0.2 meter 💌	
Number of Elements	
Restrict the Number of Elements	
Maximum Number of Elements:	
1000	
OK Cancel	

Рис. 6.10. Диалог задания параметров разбиения

4. Установите в нём параметр Maximum length of Elements = 0.2 м.
5. Кликните OK чтобы закрыть этот диалог. В дереве проекта в папке Mesh Operations появится значек Length1.

Установка параметров падающей волны.

- Задайте команду из меню HFSS>Excitations>Assign>Incident Wave>Plane Wave. Появляется страница Incident Wave Source: General Data (рис. 6.11).
- 2. Напечатайте имя источника в боксе Name.
- **3.** Выберите в разделе Vector Input Format как Spherical.
- 4. Введите 0, 0, 0 для Х-, Y-, и Z-координат of the Excitation Location and/or Zero Phase Position (исходная точка для падающей волны).

Рис. 6.11. Задание фазового центра падающей планарной волны

5. Кликните Next.

6. Появляется диалог Incident Wave Source: Spherical Vector Setup (рис. 6.12).

a. В разделе **IWaveTheta**, введите **Start=**0 deg, **Stop** = 90 deg, и **Step=3deg**. Для моностатического случая, RCS будет рассчитываться только для углов **IWaveTheta**, введенных здесь. Таким образом, радиолокационный коэффициент отражения будет рассчитываться для тридцати углов.

b. Кликните View Point List (рис. 6.12) чтобы видеть заданные значения угла θ.

Incident Wave Sou	rce : Spherical Vector Setup	Theta Values
Start 0	deg 💌 Step 0 deg 💌	0 deg
Stop 0	deg 💌 View Point List	3 deg 6 deg 9 deg
- IWaveTheta -		12 deg 15 deg
Start 0	deg ▼ Step 3 deg ▼	21 deg 24 deg
Stop 90	deg 🗨 View Point List	27 deg 30 deg
Eo Vector		33 deg 36 deg 39 deg
Phi 1	V/m	42 deg 45 deg
Theta 0	V / m	48 deg 51 deg 54 deg
	Use Defaults	57 dea
		Done
	< Назад Далее > Отмена	

Рис. 6.12. Параметры падающей плоской волны

7. Кликните Next. Появляется страница Incident Wave Source: Plane Wave Options (рис. 6.13).

8. В разделе **Туре of Plane Wave** выберите **Regular/Propagating**; все другие поля станут неактивные.

Incident Wave Source : Plane Wave Options	×
Type of Plane Wave Image: Regular/Propagating Image: Evanescent Image: Elliptically Polarized Propagation Constant: (1/m) Real: Image: Im	1/m
Use Defaults	
< Назад Готово	Отмена

Рис. 6. 13. Параметры падающей волны

10. Кликните **Finish**. Падающая волна, которую Вы определили, добавляется в список **Excitations** и линии ее падения можно видеть на рис. 6.14.



Рис. 6.14. Исследуемый куб и углы, для которых будет рассчитываться RCS

Далее опишем, как выполнить установки параметров бесконечных сфер для моностатического и бистатического эксперимента. Для этих конфигураций можно рассчитать графики нормированного бистатического и моностатического RCS.

Создание бесконечной сферы для определения дальнего поля. Чтобы рассчитать излучаемые поля в дальней зоне, нужно установить сферу, которая окружает объект излучения.

Для этого примера, создадим установки для бистатического и моностатического случаев.

Когда вы устанавливаете сферическую поверхность, чтобы анализировать ближние поля или поля в дальней зоне, Вы задаете диапазон изменения и шаг изменения углов φ и θ (азимутальный угол и угол места). Они указывают направления, в котором Вы хотите оценить излучаемые поля (см. рис. 6.15). Для каждого значения угла φ имеется соответствующий диапазон значений для θ , и наоборот. Это создает сферическую сетку. Число точек сетки определяется размером шага для φ и θ .



Рис. 6.15. Сферическая система координат

Установка параметров в моностатическом случае Monostatic Setup.

1. Кликните HFSS>Radiation>Insert Far Field Setup>Infinite Sphere. Появляется диалог Far Field Radiation Sphere Setup (рис. 6.16).

Far Field Radiation Sphere Setup						
Infinite Sphere Coordinate System Radiation Surface						
Name Infinite Sphere1						
Phi			- I			
Start	0	deg 💌				
Stop	360	deg 💌				
Step Size	10	deg 💌				
- Theta						
Start	0	deg 💌				
Stop	180	deg 💌				
Step Size	10	deg 💌				
Save As Defaults View Sweep Points						
	OK	Отмена	Справка			

Рис. 6.16. Задание сферы, на которой задаются точки, в которых рассчитываются характеристики дальнего поля

2. В закладке **Infinite Sphere**, напечатайте имя для сферы в окне **Name**. Для моностатической сферы напечатайте имя *monostatic*.

3. Определите диапазон изменения углов в диалоге рис. 6.16. Для моностатического случая углы не меняются, так как положение приемной антенны фиксировано и совпадает с положением передающей антенны. Поэтому RCS рассчитывается только в направлении, определяемом падающей волной. Это направление определяется углами IWavetheta и IWavephi, которые уже были заданы при определении источника возбуждения (рис 6.12).

4. Откройте закладку Coordinate System (рис. 6.16), и сориентируйте сферу в глобальной системе координат (CS). Выберите Use global coordinate system. Если вы хотите сориентировать сферу в соответствии с системой координат, выбранной пользователем, можно выбрать Use local coordinate system и выбрать систему координат из списка Choose from existing coordinate systems.

5. Кликните закладку Radiation Surface. Оставьте выбор Use Boundary Radiation Surfaces. Если вы хотите задать поверхность другого типа, то нужно использовать Use Custom Radiation Surface.

6. Кликните ОК. Моностатическая сфера создана.

Задание сферы в бистатическом случае.

1. В дереве проекта, кликните правой кнопкой на Radiation и из выплывающего меню кликните Insert Far Field Setup>Infinite Sphere. Появляется диалог Far Field Radiation Sphere Setup.

- 2. Введите имя "Bistatic".
- 3. Установите величины Phi Start, Stop, и Step = 0.
- 5. Установите Theta Start = 0, Stop = 180 deg u Step = 1.
- 6. Кликните ОК, чтобы закрыть диалог.

Установка Bistatic появляется в разделе Radiate в дереве проекта. Зададим далее частоту 0.3 ГГц и запустим программу на расчет.

Создание графика для бистатического RCS. Чтобы задать параметры графика, выполните следующие действия:

1. Нажмите правой кнопкой мыши на Results в дереве проекта и выберите Create Far Fields Report>Rectangular Plot. Появится диалог New Report - New Traces.

2. Оставьте в разделе **Solution** вариант выбора решения как Setup1: LastAdaptive.

3. Чтобы вывести график RCS, вы выбираете одну из геометрий в списке **Geometry**. Для этого графика выберите **Bistatic**.

4. В разделе Category, выберите **Normalized Bistatic RCS**. Этот выбор предполагает список **Quantity** чтобы показать NormRCS для Total, Phi, Theta, X, Y, и Z, с выбором Total Selected.

5. Для этой функции, выберите dB. После этого выбора поле Y в разделе Trace показывает db(NormRCSTotal).

🔀 Report: RCS example - HFSSDesign1 - XY Plot 1 - dB(NormRCSTotal)					
Context	Trace Families Families Display				
Solution: Setup1 : LastAdaptive	Primary Sweep: Theta				
Geometry: Bistatic	X: Default Theta				
	Y: dB(NormRCSTotal)				
Update Report	Category: Quantity: filter-text rE NormRCSTotal Directivity NormRCSPhi Polarization Ratio NormRCSTheta Axial Ratio NormRCSX Bistatic RCS NormRCSY NormRCSZ NormRCSZ				
Output Variables Options	New Report Apply Trace Add Trace				

Рис. 6.17. Выбор характеристики бистатического радиолокационного коэффициента отражения

- 6. Откройте закладку Families и проверьте, что угол IWaveTheta=0.
- 7. Кликните New Report. Выводится график рис. 6.18.



Рис. 6.18. График радиолокационного RCS для бистатического случая

По оси х этого графика – угол наблюдения.

Создание графика для моностатического RCS. Последовательность создания графика моностатического RCS аналогична описанной выше для бистатического случая.

1. Щелкните правой кнопкой мыши на значке Result в дереве проекта, и выберите Create Far Field Report>Rectangular Plot. Это открывает диалог характеристик (рис. 6.19).

2. В рамке Context, в разделе Geometry выберите Monostatic.

3. В списке Category, выберите MonostaticRCS, а в списке Quantity выберите MonostaticRCSTotal.

5. Из списка Function, выберите dB. Тогда коэффициент отражения будет в dB.

6. Выберите в поле Х характеристики IWaveTheta.

7. Нажмите New Report. Это создает отчет и добавляет его в дерево проекта.

Report: 20110913_RCS-1 - HFSSDe	sign1 - XY Plot 2 - dB(Mono	staticRCSTotal)	×		
Context Solution: Setup1 : LastAdaptive	Trace Families Families Displa	ay	1		
Geometry: Monostatic	static v Kristeka and Kristeka v All				
	Y: dB(MonostaticRCSTotal)	Range Function		
	Category:	Quantity; filter-text	Function:		
Update Report I Real time Update ▼	Variables Output Variables rE Directivity Polarization Ratio Axial Ratio Bistatic RCS Normalized Bistatic RCS Complex Bistatic RCS Complex Bistatic RCS Anterna Params Design	MonostaticRCSThel MonostaticRCSPhi MonostaticRCSPhi MonostaticRCSY MonostaticRCSY MonostaticRCSY MonostaticRCSPhi NormMonostaticRCSPhi NormMonostaticRCSPhi NormMonostaticRCSY ComplexMonostaticRCSTheta ComplexMonostaticRCSTheta ComplexMonostaticRCSTheta ComplexMonostaticRCSY ComplexMonostaticRCSY ComplexMonostaticRCSY ComplexMonostaticRCSY NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCSTheta NormComplexMonostaticRCST	acos acos acosh ang_deg ang_rad asin atan atan atan atan atan atan atan at		
Output Variables Options	New Report Apply Trace	Add Trace	Close		

Рис. 6.19. Диалог для задания параметров графика в моностатическом случае



Рис. 6.20. Зависимость RCS от угла падения падающей плоской волны (моностатический режим)

На рис. 6.20 показан пример зависимости RCS как функции угла падения плоской волны.