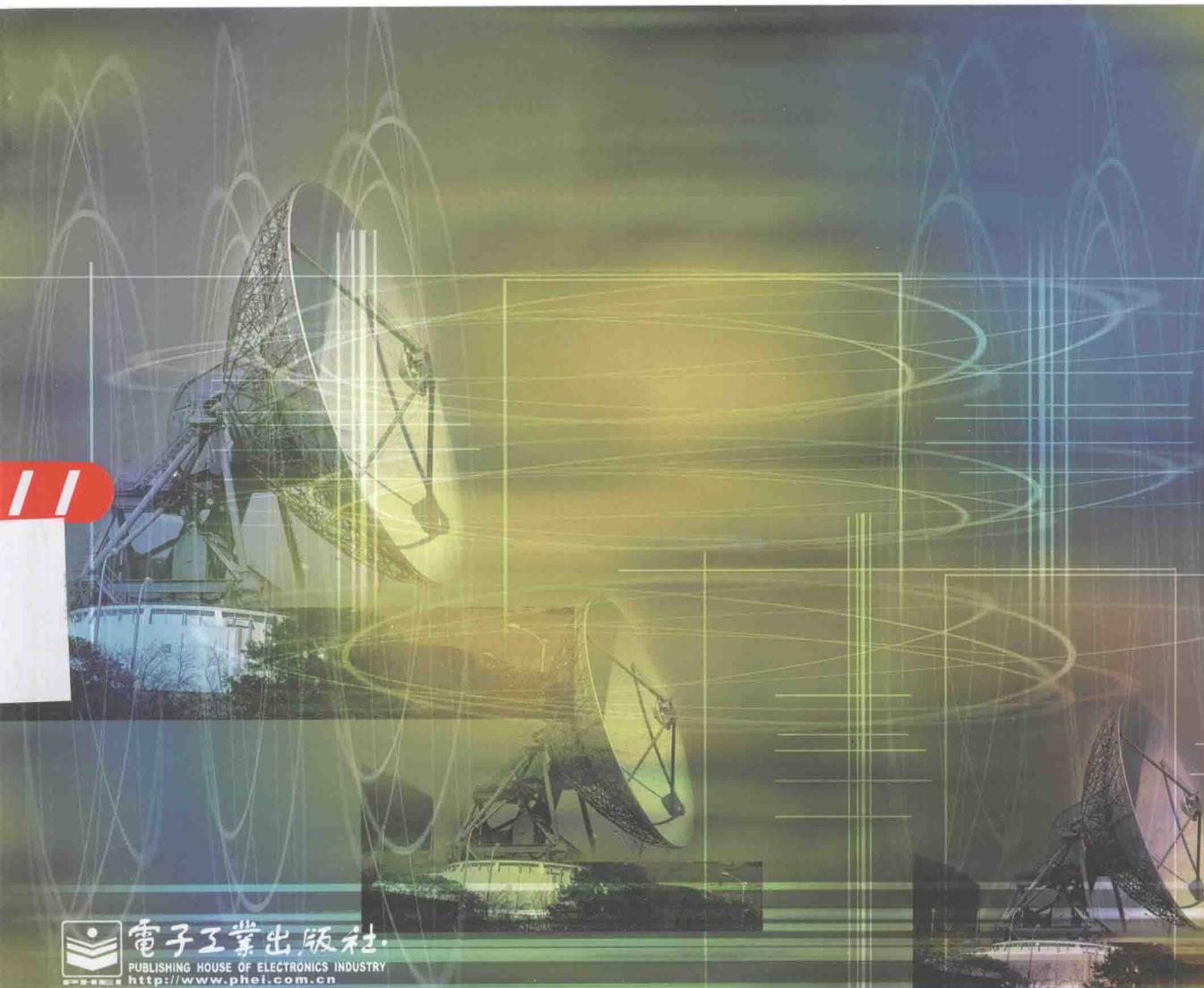


Broadview®
www.broadview.com.cn

HFSS 天线设计 (第2版)

李明洋 刘敏 编著



 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

HFSS天线设计（第2版）

全书理论和天线设计实践紧密结合，从工程设计实践出发，全面、系统地阐述了使用 HFSS 进行天线设计的全过程，让天线设计不再难。本书的写作和出版得到了易迪拓培训(www.edatop.com)同仁的大力协助和支持，在此表示感谢。书中所有天线设计实例我们都提供了相应的 HFSS 设计源文件，读者可以自行下载，下载地址为：
<http://www.edatop.com/peixun/hfss/113.html>。

本书作者李明洋老师制作并主讲了多门 HFSS 和天线设计相关的视频培训课程，有兴趣的读者欢迎前往易迪拓培训官网了解详情。



@博文视点Broadview



责任编辑：贾 莉
封面设计：王 乐

上架建议：天线设计

ISBN 978-7-121-22587-1



9 787121 225871 >

定价：69.00元

HFSS 天线设计 (第2版)

李明洋 刘敏 编著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍天线设计的理念及如何使用 HFSS 仿真软件来仿真分析和设计各类天线,包括微带天线、极子天线、喇叭天线、PIFA 天线和天线阵列等。全书理论和工程实践紧密结合,多从工程角度出发,直观、透彻地讲解使用 HFSS 进行天线设计的全过程。借助于 HFSS 仿真工具,让天线设计不再困难。相信有志于进入天线设计领域的读者读完本书后,一定可以熟悉 HFSS 软件的使用,进而掌握天线设计的要领。

本书兼顾天线设计理论和 HFSS 天线设计实践,适合无线通信、微波射频、天线设计领域的工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业的教学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

HFSS 天线设计/李明洋,刘敏编著. —2 版. —北京:电子工业出版社,2014.4
ISBN 978-7-121-22587-1

I. ①H… II. ①李…②刘… III. ①天线设计—计算机仿真—应用软件 IV. ①TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 040478 号

责任编辑:贾 莉

印 刷:北京市京科印刷有限公司

装 订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:20.25 字数:557 千字

印 次:2014 年 4 月第 1 次印刷

印 数:3000 册 定价:69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前言

近年来，无线通信产业在国内蓬勃发展，诸如手机、WLAN 无线网卡、射频识别 (RFID)、蓝牙和全球卫星定位系统 (GPS) 等产品都需要使用天线来发射和接收无线电信号，因此业界对天线设计人才的需求与日俱增。HFSS 是美国 Ansoft 公司开发的一款基于电磁场有限元法的全波三维电磁仿真软件，可为天线及天线系统设计提供全面的解决方案，精确仿真计算出天线的各种性能，包括天线的辐射方向图、天线增益、轴比、表面电流分布、天线输入阻抗、电压驻波比以及 S 参数等性能参数。借助于 HFSS 软件，工程师可以更加便捷、高效地设计出各种类型的天线，从而有效地降低设计成本，提高工作效率，缩短设计周期，增强竞争力。

本书内容

本书主要介绍天线设计的基本概念以及使用 HFSS 软件仿真设计各种类型天线的分析方法、设置操作和设计流程。书中给出了微带天线、极子天线、喇叭天线、PIFA 天线和天线阵等多种不同类型天线的 HFSS 仿真分析流程和设计工程实践。

全书共分 10 章，第 1 章主要介绍天线的辐射机理以及表征天线各项性能参数的定义。第 2 章首先简要介绍使用 HFSS 软件进行天线设计的基本流程，然后详细介绍 HFSS 天线设计流程中每个设计步骤的具体操作和设置。第 3~9 章是 HFSS 天线设计的工程实践部分，介绍几种常用天线的基本理论、分析方法和 HFSS 仿真设计操作。其中，第 3 章主要介绍偶极子和单极子天线的理论与 HFSS 仿真设计实例；第 4 章主要介绍微带天线的理论和设计实例、双频天线和圆极化天线的实现，以及在 HFSS 中如何分析和设计双频与圆极化天线；第 5 章主要介绍倒 F 天线的衍变发展过程和其结构，并给出了使用 HFSS 设计分析一款工作于 2.4GHz ISM 频段印制电路板 IFA 天线的详细过程；第 6 章主要介绍手机上常用的平面倒 F 天线 (PIFA) 的理论和设计实例，给出了 PIFA 天线的基本结构、性能分析、电流/电场分布以及多频段工作的实现，本章同时也详细介绍了使用 HFSS 设计分析一款工作于 GSM900 频段的单频 PIFA 天线和一款工作于 GSM900/DCS1800 频段的双频 PIFA 天线的具体过程；第 7 章主要介绍喇叭天线理论以及如何使用 HFSS 设计喇叭天线，在本章中还讲解了双模天线的概念以及在 HFSS 中如何实现双模激励；第 8 章主要介绍天线阵

的设计，包括均匀直线阵列天线阵因子的理论分析，以及阵元的设计分析、馈电网络的设计分析和整个天线阵列的 HFSS 设计分析全过程，第 9 章主要介绍 HFSS IE 仿真器的使用，并对比了 HFSS IE 仿真器和传统的 HFSS 仿真器的区别。在本书的最后，即第 10 章，介绍 HFSS 的天线辅助设计工具——Antenna DesignKit 的使用。

本书特点

全书理论和工程实践紧密结合，从工程角度出发，直观、透彻地讲解使用 HFSS 进行天线设计的全过程，不仅要让读者学习到各种类型天线的基本理论、设计方法，以及使用 HFSS 软件进行天线设计的详细流程和具体操作，还力求让读者理解为什么要这样操作。知其然并知其所以然，从而能够熟练掌握这些设计应用，达到举一反三、活学活用的学习目标。

本书结合 HFSS 软件从工程角度讲解天线设计，借助于 HFSS 软件，把复杂的理论直观化，让天线设计不再是一件难的事情。

全书理论和工程实践紧密结合，每个设计实例都是先从理论讲起，然后讲解 HFSS 的具体设计思路和设计过程。

本着“授人以鱼，不如授人以渔”的原则，本书不仅清楚地阐述了 HFSS 天线设计的每一步操作，还着重讲解了为什么要这样做。

本书所有的天线设计实例都创建了 HFSS 参数化模型，方便读者在后续学习中更改天线结构尺寸。

资源下载和技术支持

为了帮助读者更好地使用本书进行学习，作者提供了书中每个设计实例的 HFSS 源文件。相关设计文件读者可以登录易迪拓培训（网址：www.edatop.com）下载。

另外，为了尽可能地节约读者的学习时间，提高学习效率，作者还主讲并制作推出了《两周学会 HFSS》、《HFSS 微波器件仿真设计实例》、《HFSS 天线设计入门》和《PCB 天线 HFSS 设计实例》等多套视频培训课程。视频课程边操作边讲解，能够以更加直观、生动、高效的方式帮助读者在最短的时间内迅速熟悉并掌握 HFSS 的设计应用。有关 HFSS 视频课程的详情，读者也可以登录易迪拓培训（www.edatop.com）查看。

关注作者：<http://t.qq.com/edatop>（腾讯微博）

<http://weibo.com/mweda>（新浪微博）

李明洋

十载耕耘奠定专业地位

博文视点诚邀精锐作者加盟

以书为证彰显卓越品质

《C++Primer (中文版) (第5版)》、《淘宝技术这十年》、《代码大全》、《Windows内核情景分析》、《加密与解密》、《编程之美》、《VC++深入详解》、《SEO实战密码》、《PPT演义》……

“圣经”级图书光耀夺目,被无数读者朋友奉为案头手册传世经典。

潘爱民、毛德操、张亚勤、张宏江、咎辉Zac、李刚、曹江华……

“明星”级作者济济一堂,他们的名字熠熠生辉,与IT业的蓬勃发展紧密相连。

十年的开拓、探索和励精图治,成就博古通今、文圆质方、视角独特、点石成金的计算机图书的风向标杆:博文视点。

“风翱翔于千仞兮,非梧不栖”,博文视点欢迎更多才华横溢、锐意创新的作者朋友加盟,与大师并列于IT专业出版之巅。

英雄帖

江湖风云起,代有才人出。

IT界群雄并起,逐鹿中原。

博文视点诚邀天下技术英豪加入,

指点江山,激扬文字

传播信息技术,分享IT心得

专业的作者服务

博文视点自成立以来一直专注于IT专业技术图书的出版,拥有丰富的与技术图书作者合作的经验,并参照IT技术图书的特点,打造了一支高效运转、富有服务意识的编辑出版团队。我们始终坚持:

善待作者——我们会把出版流程整理得清晰简明,为作者提供优厚的稿酬服务,解除作者的顾虑,安心写作,展现出最好的作品。

尊重作者——我们尊重每一位作者的技术实力和生活习惯,并会参照作者实际的工作、生活节奏,量身定制写作计划,确保合作顺利进行。

提升作者——我们打造精品图书,更要打造知名作者。博文视点致力于通过图书提升作者的个人品牌和技术影响力,为作者的事业开拓带来更多的机会。



联系我们

博文视点官网: <http://www.broadview.com.cn>

CSDN官方博客: <http://blog.csdn.net/broadview2006/>

投稿电话: 010-51260888 88254368

投稿邮箱: jsj@phei.com.cn



@博文视点Broadview



微信公众账号 博文视点Broadview



目 录

第1章 天线基础	1	3.3.1 印刷偶极子天线的结构	41
1.1 电基本振子的辐射场	1	3.3.2 天线初始尺寸和 HFSS 设计 概述	42
1.2 参考天线的性能参数	3	3.3.3 HFSS 仿真设计	43
1.2.1 方向图	3	3.4 WLAN 双频单极子天线设计	62
1.2.2 辐射强度	4	3.4.1 双频单极子天线的结构	63
1.2.3 方向性系数	4	3.4.2 天线初始尺寸和 HFSS 设计 概述	63
1.2.4 效率	5	3.4.3 HFSS 仿真设计	64
1.2.5 增益	5	3.5 本章小结	80
1.2.6 输入阻抗	5	第4章 微带天线设计	81
1.2.7 天线的极化	5	4.1 微带天线概述	81
1.3 本章小结	6	4.1.1 微带天线的辐射机理	81
第2章 HFSS 天线设计流程	7	4.1.2 微带天线的馈电	82
2.1 HFSS 天线设计流程概述	7	4.1.3 矩形微带天线的特性参数	82
2.2 HFSS 天线设计详细操作	8	4.2 侧馈矩形微带天线设计	85
2.2.1 求解类型	8	4.2.1 设计要求	85
2.2.2 创建天线结构模型	9	4.2.2 设计步骤	85
2.2.3 设置边界条件	9	4.2.3 HFSS 设计概述	86
2.2.4 设置激励方式	11	4.2.4 HFSS 仿真设计	87
2.2.5 设置求解参数	14	4.3 同轴馈电矩形微带天线设计	103
2.2.6 设计检查和运行求解分析	16	4.3.1 设计要求	104
2.2.7 天线问题的数据后处理	17	4.3.2 初始设计	104
2.2.8 Optimetrics 优化设计	17	4.3.3 HFSS 设计概述	104
2.3 本章小结	21	4.3.4 HFSS 仿真设计	105
第3章 偶极子和单极子天线设计	22	4.4 双频微带天线设计	126
3.1 概述	22	4.4.1 设计要求	127
3.1.1 半波偶极子天线	22	4.4.2 HFSS 设计概述	127
3.1.2 单极子天线	24	4.4.3 HFSS 仿真设计	127
3.2 半波偶极子天线设计	25	4.5 圆极化矩形微带天线设计	141
3.2.1 HFSS 设计概述	25	4.5.1 单点馈电圆极化微带天线实现	
3.2.2 HFSS 仿真设计	25		
3.3 印刷偶极子天线设计	41		

原理	141	7.2.3 设计实例分析	253
4.5.2 设计要求	142	7.2.4 HFSS 仿真设计	254
4.5.3 设计步骤	142	7.3 本章小结	267
4.5.4 HFSS 设计概述	142	第8章 微带阵列天线设计	268
4.5.5 HFSS 仿真设计	142	8.1 均匀直线阵列天线理论分析 ..	268
4.6 本章小结	159	8.2 微带阵列天线设计概述	269
第5章 倒F天线设计	160	8.3 阵元设计	270
5.1 倒F天线概述	160	8.3.1 设计概述	270
5.1.1 倒F天线的结构参数分析 ..	160	8.3.2 阵元建模和性能分析	270
5.1.2 倒F天线的辐射特性	162	8.4 馈电网络设计	283
5.2 倒F天线的设计和分析	162	8.5 天线阵列设计	284
5.2.1 倒F天线的模型结构	163	8.5.1 天线阵列设计建模	284
5.2.2 HFSS 仿真设计过程	164	8.5.2 求解设置	291
5.2.3 分析倒F天线的结构参数 对天线性能的影响	181	8.5.3 设计检查和运行仿真计算 ..	292
5.3 本章小结	187	8.5.4 查看分析结果	292
第6章 平面倒F天线 (PIFA) 设计 ..	188	8.6 本章小结	295
6.1 PIFA 天线的基本原理	188	第9章 HFSS - IE 天线设计实例	296
6.1.1 PIFA 天线的基本结构和 由来	188	9.1 设计要求	296
6.1.2 PIFA 天线的谐振频率	189	9.2 HFSS - IE 仿真设计步骤	296
6.1.3 PIFA 天线的带宽	190	9.2.1 新建设计工程	296
6.1.4 PIFA 天线的电场分布和 电流分布	191	9.2.2 设计建模	297
6.1.5 PIFA 天线多频工作的实现 ..	191	9.2.3 求解设置	304
6.2 GSM 900 单频 PIFA 天线的设计 和分析	193	9.2.4 设计检查	306
6.2.1 倒F天线的模型结构	193	9.2.5 查看分析结果	306
6.2.2 PIFA 天线的 HFSS 设计过程	194	9.2.6 保存设计	309
6.2.3 PIFA 天线的结构参数对天线 性能的影响分析	220	9.3 本章小结	310
6.2.4 保存设计	224	第10章 HFSS Antenna Design Kit ..	311
6.3 GSM 900 和 DCS 1800 双频 PIFA 天线的设计	225	10.1 安装和启动	311
6.4 本章小结	232	10.1.1 Antenna Design Kit 的安装	311
第7章 喇叭天线设计	233	10.1.2 Antenna Design Kit 的启动	311
7.1 矩形口径喇叭天线设计	233	10.1.3 在 HFSS 中集成 Antenna Design Kit	311
7.1.1 矩形口径喇叭天线的理论 ..	233	10.2 Antenna Design Kit 用户界面 ..	312
7.1.2 设计要求和初始设计	234	10.2.1 菜单栏	312
7.1.3 HFSS 仿真设计	235	10.2.2 天线类型	313
7.2 圆形口径双模喇叭天线设计 ..	251	10.2.3 模型显示和参数设置区 ..	314
7.2.1 圆形口径喇叭天线原理 ..	251	10.3 Antenna Design Kit 应用实例 ..	315
7.2.2 双模圆锥喇叭	252	10.3.1 启动 Antenna Design Kit ..	315
		10.3.2 设置介质基板	315
		10.3.3 选择天线类型并自动创建 设计模型	315
		10.4 本章小结	317

第 1 章

天线基础

自赫兹和马可尼发明天线以来,天线在人类的社会生活中发挥着越来越重要的作用。天线是发射和接收电磁波的一个重要的无线电设备,是无线通信系统中重要的一环,天线的性能将直接影响到通信系统的品质。

天线辐射的原理如图 1.1 所示。当导线上有交变电流通过时,就可以发生电磁波的辐射,辐射的能力与导线的长度和形状有关。若两条导线的距离很近,电场被束缚在两条导线之间,那么辐射很微弱。若将两条导线辐射的基本单元有电基本振子和磁基本振子,下面以电基本振子为例来讲解天线的辐射问题。

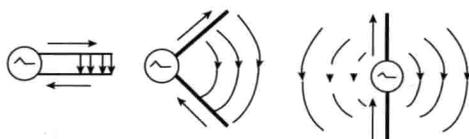


图 1.1 天线的辐射

1.1 电基本振子的辐射场

电基本振子又称电流元或者电偶极子,它是一段高频电流直导线,其长度 $dl \ll \lambda$, 其截面半径 $a \ll dl$, 导线上的电流处处等幅同相。用这样的电基本振子可以组成实际的复杂天线,所以电基本振子的辐射特性是研究复杂天线辐射特性的基础。

根据电流连续性原理,在电基本振子两端将同时积存大小相等、符号相反的时变电荷。将电基本振子的中心放置于球坐标系的坐标原点,并使长度 dl 沿着 z 轴方向,如图 1.1.1 所示。

电基本振子上的电流大小使用 I 表示,则矢量位 A 可以表示为:

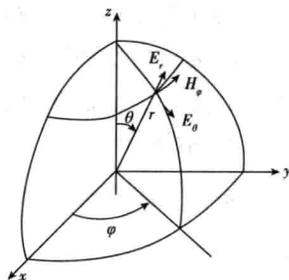


图 1.1.1 电基本振子的辐射场

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J e^{-jkr}}{r} dv = \mathbf{e}_z \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r} e^{-jkr} \quad (1-1-1)$$

在球坐标系中

$$A = \mathbf{e}_r A_r + \mathbf{e}_\theta A_\theta \quad (1-1-2)$$

$$\left. \begin{aligned} A_r &= A_z \cos\theta = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r} \cos\theta e^{-jkr} \\ A_\theta &= -A_z \sin\theta = -\frac{\mu_0 I dl}{4\pi r} \sin\theta e^{-jkr} \\ A_\phi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-3)$$

于是, 可以求得辐射的磁场强度为:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{r^2 \sin\theta} \begin{vmatrix} \mathbf{e}_r & r\mathbf{e}_\theta & r\sin\theta\mathbf{e}_\varphi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \\ A_r & rA_\theta & 0 \end{vmatrix} \quad (1-1-4)$$

即

$$\left. \begin{aligned} H_r &= 0 \\ H_\theta &= 0 \\ H_\varphi &= \frac{1}{\mu_0 r} \left[\frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial(A_r)}{\partial \theta} \right] = j \frac{Idl}{2\lambda r} \sin\theta \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-5)$$

再利用麦克斯韦方程, 可以求得电场强度为:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \frac{1}{r^2 \sin\theta} \begin{vmatrix} \mathbf{e}_r & r\mathbf{e}_\theta & r\sin\theta\mathbf{e}_\varphi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \\ 0 & 0 & r^2 H_\varphi \sin\theta \end{vmatrix} \quad (1-1-6)$$

即:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= j \frac{Idl}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cos\theta \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \\ E_\theta &= j \frac{Idl}{2\lambda r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sin\theta \left(1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{k^2 r^2} \right) e^{-jkr} \\ E_\varphi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-7)$$

式中, \mathbf{E} 为电场强度, 单位为 V/m; \mathbf{H} 为磁场强度, 单位为 A/m; 下标 r 、 θ 、 φ 分别表示球坐标系的各个方向分量; ϵ_0 为自由空间的介电常数, $\epsilon_0 = 1 \times 10^{-9}/36\pi$, 单位为 F/m; μ_0 为自由空间导磁率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, 单位为 H/m; k 是自由空间相位常数, $k = 2\pi/\lambda = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$, λ 是自由空间波长。

1. 近区场

$kr \ll 1$ 的区域称为近区, 此时 $\frac{1}{kr} \ll \frac{1}{(kr)^2} \ll \frac{1}{(kr)^3}$, $e^{-jkr} \approx 1$, 则式 (1-1-5) 和式 (1-1-7) 可以近似为:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= -j \frac{2Idl \cos\theta}{4\pi\omega\epsilon_0 r^3} \\ E_\theta &= -j \frac{Idl \sin\theta}{4\pi\omega\epsilon_0 r^3} \\ H_\varphi &= \frac{Idl \sin\theta}{4\pi r^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-8)$$

由此可以看出, 近区电场和磁场存在 $\pi/2$ 的相位差, 于是坡印廷矢量的平均值为:

$$\mathbf{S}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = 0 \quad (1-1-9)$$

由于能量在电场和磁场以及场和源之间交换而没有能量辐射, 因此近区场也称为感应场。

2. 远区场

$kr \gg 1$ 的区域称为远区, 此时 $\frac{1}{kr} \gg \frac{1}{(kr)^2} \gg \frac{1}{(kr)^3}$, $e^{-jkr} \approx 1$, 则式 (1-1-5) 和式 (1-1-7) 可以近似为:

$$\left. \begin{aligned} E_{\theta} &= j \frac{Idl}{2\lambda r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sin\theta e^{-jkr} \\ H_{\varphi} &= j \frac{Idl}{2\lambda r} \sin\theta e^{-jkr} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-10)$$

由此可以看出, 在远区内, 电场只有 E_{θ} 分量, 磁场只有 H_{φ} 分量, 且电场和磁场的相位相同。此时, 坡印廷矢量的平均值为:

$$\mathbf{S}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = \frac{1}{2} \text{Re}[E_{\theta} H_{\varphi}^*] \mathbf{e}_r \quad (1-1-11)$$

由于电磁波沿着球坐标系的 r 方向向外辐射, 因此远区场也称为辐射场。

对于电基本振子的辐射场而言, 电场、磁场和传播方向三者相互垂直, 在传播方向上电场和磁场的分量为零, 故称为横电磁波, 即 TEM 波。而且, 电场分量 E_{θ} 和磁场分量 H_{φ} 的比值为常数, 我们将其称为媒质的波阻抗。对于自由空间而言, 媒质的波阻抗为:

$$\eta_0 = \frac{E_{\theta}}{H_{\varphi}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi\Omega \quad (1-1-12)$$

1.2 参考天线的性能参数

要进入天线设计领域, 首先必须了解表征天线的基本性能参数, 如方向图、辐射强度、方向性系数、效率、增益、输入阻抗和天线的极化等。下面就来向读者简单地介绍一下表征天线的主要性能参数及其定义。

天线的辐射场在固定距离上随球坐标系的角坐标 (θ, φ) 分布的图形被称为天线的辐射方向图或辐射波瓣图, 简称方向图。方向图通常是在远区确定的。用辐射场强表示的方向图称为场强方向图, 用辐射功率密度表示的方向图称为功率方向图, 用相位表示的方向图称为相位方向图。方向图习惯上采用极坐标绘制, 角度表示方向, 矢径长度表示场强值或功率密度值。

1.2.1 方向图

完整的天线方向图应该用如图 1.2.1 所示的球坐标系下的三维立体方向图来表示, 但在计算机辅助设计普及之前, 三维空间的立体方向图绘制复杂, 工程上常用包含主瓣轴的剖面图来表示。此时, 方向图的表示一般需要用两个相互垂直的剖面, 我们将其称为主平面方向图, 如图 1.2.1 中的 xz 面和 yz 面。图 1.2.2 (a) 和图 1.2.2 (b) 所示为极坐标系中电场和功率的主平面方向图, 图 1.2.2 (c) 是将图 1.2.2 (a) 的主平面方向图改成在直角坐标系中用对数 (或 dB) 刻度表示, 这样能够更详细地给出旁瓣电平。

按半功率电平点夹角定义的波束宽度称为半功率波束宽度 (HPBW) 或者 -3dB 波束宽度; 按主瓣两侧第一个零点夹角定义的波束宽度称为第一零点波束宽度 (FNBW), 如图 1.2.2 所示。这两

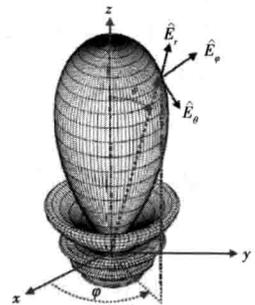


图 1.2.1 三维场方向图

种波束宽度都是重要的方向图参数。

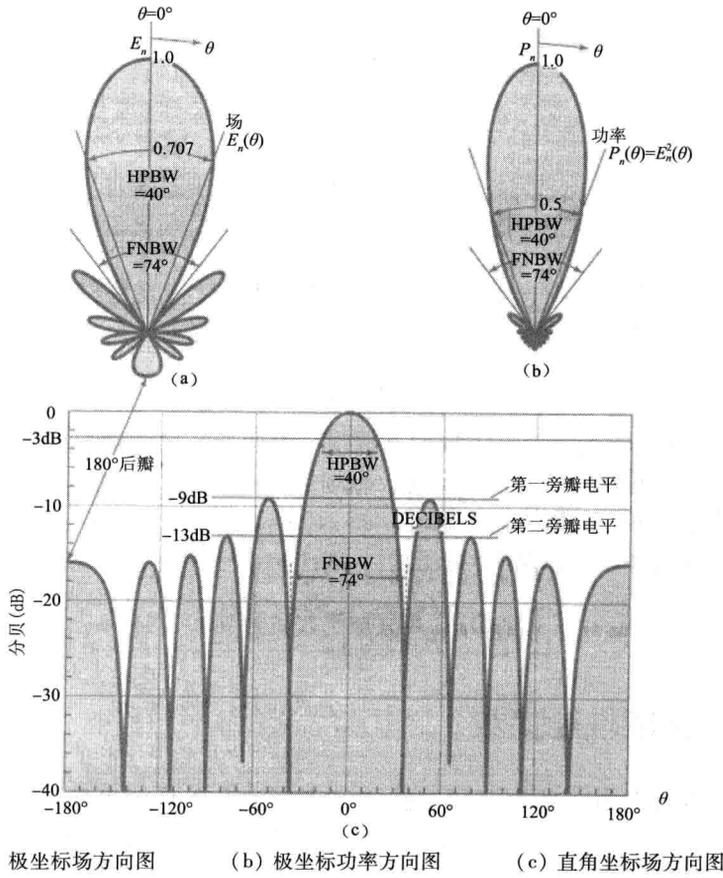


图 1.2.2 主平面方向图

1.2.2 辐射强度

每单位立体角内由天线辐射出的功率称为辐射强度 U ，单位为 W/Sr (瓦/立方弧度)。辐射强度可以由下式定义：

$$U(\theta, \varphi) = S(r, \theta, \varphi)r^2 \tag{1-2-1}$$

可见，与坡印廷幅值 S 反比于距离的平方不同，辐射强度 U 与距离无关。

1.2.3 方向性系数

天线的方向性系数 D 是指在远区场的某一球面上天线的辐射强度与平均辐射强度之比，即：

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0} \tag{1-2-2}$$

式中，平均辐射强度 U_0 实际上是辐射功率除以球面积，即：

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \tag{1-2-3}$$

通常所说的方向性系数指的都是最大辐射方向上的方向性系数，即：

$$D = \frac{U_{\max}}{U_0} \tag{1-2-4}$$

1.2.4 效率

由于天线系统中存在导体损耗、介质损耗等，因此实际辐射到空间内的电磁波功率要比发射机输送到天线的功率小。天线效率就是表征天线将输入高频能量转换为无线电波能量的有效程度，定义为天线辐射功率和输入功率的比值。假设分别用 P_{in} 和 P_{rad} 表示天线的输入功率和辐射功率，则天线效率为：

$$\eta_A = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{in}}} \quad (1-2-5)$$

1.2.5 增益

方向性系数是以辐射功率为基点的，没有考虑天线将输入功率转换为辐射功率的效率，为了更完整地描述天线特性，特以天线的输入功率为基点定义了一个增益。天线增益是表征将输入给它的功率按特定方向辐射的能力，定义为在相同输入功率、相同距离的条件下，天线在最大辐射方向上的功率密度与无方向性天线在该方向上的辐射功率密度的比值。设该天线和无方向性天线的输入功率分别为 P_{in} 和 $P_{\text{in}0}$ ，且 $P_{\text{in}} = P_{\text{in}0}$ ，则该天线的增益 G 可以由下式计算：

$$G = S_{\text{max}}/S_0 \quad (1-2-6)$$

对比式 (1-2-1)、(1-2-4)、(1-2-5) 和式 (1-2-6)，且考虑到 $P_{\text{in}} = P_{\text{in}0}$ ，可以得到：

$$G = \eta_A D \quad (1-2-7)$$

1.2.6 输入阻抗

天线一般都是通过馈线和发射机相连的，天线和馈线的连接处称为天线的输入端，天线输入端呈现的阻抗值定义为天线的输入阻抗。

天线作为发射机的负载，它把从发射机得到的功率辐射到空间。这就有一个天线与馈线阻抗匹配的问题，阻抗匹配的程度将直接影响功率传输的效率。在射频微波频段，馈线通常是使用 50Ω 标准阻抗。所以在设计天线时，需要尽可能地把天线的输入阻抗设计在 50Ω ，在工作频带内保证尽可能小的驻波比。

天线的输入阻抗取决于天线的结构、工作频率和周围环境的影响，仅在极少数情况下可以用理论严格计算。工程中通常采用近似计算或者用实验方法测量。

1.2.7 天线的极化

天线的极化通常是指天线辐射电磁波的电场的方向，即时变电场矢量端点运动轨迹的形状、取向和旋转方向。根据电场矢量端点轨迹呈直线、椭圆和圆形等不同形状，天线极化可以分为线极化、椭圆极化和圆极化，如图 1.2.3 所示；对于椭圆极化和圆极化而言，根据其旋转方向的不同，又可分为左旋极化和右旋极化两种类型。

考察由页面向外（沿 z 轴方向）行进的平面波，一般而言，电场同时有 x 分量和 y 分量，在确定的 z 点处电场矢量 \mathbf{E} 作为时间的函数而旋转，若其端点轨迹为椭圆，则称为椭圆极化波，如图 1.2.3 (b) 所示。椭圆极化有两种极端情况，一是电场只有 x 分量或者只有 y 分量，此时电场始终沿着 x 轴方向或者 y 轴方向，我们将其称为线极化，如图 1.2.3 (a) 所示；二是电场 x 分量和 y 分量相等，此时称为圆极化，如图 1.2.3 (c) 所示。

对于任意方向的椭圆极化波，可以分别用沿 x 轴方向和 y 轴方向的两项线极化分量来描述，如图 1.2.4 所示。如果波沿着 z 轴方向（即垂直于纸面向外）行进，则 x 轴方向和 y

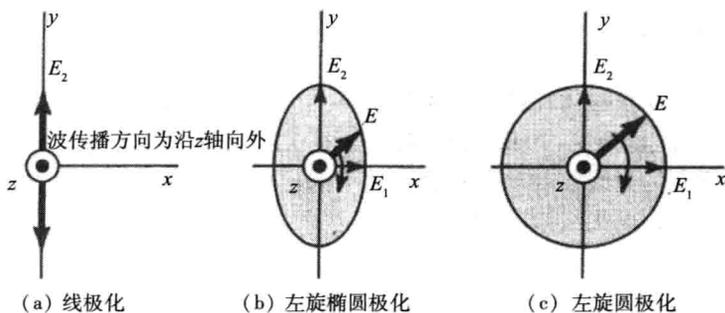


图 1.2.3 天线的极化

轴方向的电场分量分别为:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_1 \sin(\omega t - \beta z) \\ E_y &= E_2 \sin(\omega t - \beta z + \delta) \end{aligned} \right\} \quad (1-2-8)$$

式中, E_1 为沿 x 轴方向的线极化波幅度, E_2 为沿 y 轴方向的线极化波幅度, δ 为 E_y 滞后于 E_x 的相位角。

在 $z=0$ 处, 有:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_1 \sin \omega t \\ E_y &= E_2 \sin(\omega t + \delta) = E_2 (\sin \omega t \cos \delta + \cos \omega t \sin \delta) \end{aligned} \right\} \quad (1-2-9)$$

式 (1-2-9) 消去 ωt , 再经整理可得:

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} - \frac{2E_x E_y \cos \delta}{E_1 E_2} + \frac{E_y^2}{E_2^2} = \sin^2 \delta \quad (1-2-10)$$

式 (1-2-10) 描述了如图 1.2.4 所示的极化椭圆。

若 $E_1=0$, 则波是沿 y 轴方向极化的; 若 $E_2=0$, 则波是沿 x 轴方向极化的。若 $\delta=0$ 且 $E_1=E_2$, 则波是在如图 1.2.4 所示的 OA 轴方向上线极化的。

若 $E_1=E_2$ 且 $\delta=\pm 90^\circ$, 则波是圆极化的。当 $\delta=+90^\circ$ 时, 波是左旋圆极化的; 当 $\delta=-90^\circ$ 时, 波是右旋圆极化的。

轴比 (Axial Ratio) 是一个表征天线极化的参数, 其定义为极化椭圆的长轴和短轴的比值。对于线极化波, 轴比为无穷大; 对于圆极化波, 轴比等于 1。

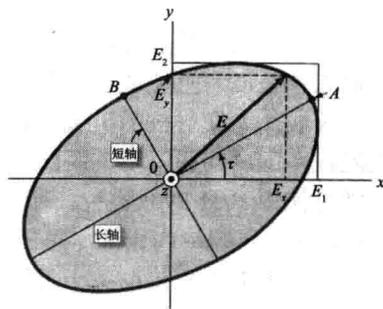


图 1.2.4 极化椭圆

1.3 本章小结

本章主要讲述天线的基础知识, 其中, 1.1 节分析了电基本振子的辐射场, 1.2 节详细说明了天线各项性能参数的定义。通过本章的学习, 读者可以更好地理解和掌握后续章节中的天线设计分析实践。

第 2 章

HFSS 天线设计流程

HFSS 是美国 Ansoft 公司（注：Ansoft 公司于 2008 年被 Ansys 公司收购）开发的全波三维电磁仿真软件。该软件采用有限元法，计算结果准确可靠，是业界公认的三维电磁场设计和分析的工业标准。

HFSS 采用标准的 Windows 图形用户界面，简洁直观；自动化的设计流程，易学易用；稳定成熟的自适应网格剖分技术，结果准确。使用 HFSS，用户只需要创建或导入设计模型，指定模型材料属性，正确分配模型的边界条件和激励，准确定义求解设置，软件便可以计算并输出用户需要的设计结果。

作为一款功能强大的三维电磁设计软件，HFSS 可以为天线设计提供全面的解决方案。使用 HFSS 可以仿真分析和优化设计各类天线，精确计算天线的各种性能，包括二维、三维远场和近场辐射方向图、天线的方向性系数、增益、轴比、半功率波瓣宽度、输入阻抗、电压驻波比、S 参数以及电流分布特性等。

本章首先就 HFSS 天线设计的流程做一个简要的概述，然后对 HFSS 天线设计过程中每个设计步骤的相关设置和具体操作进行详细的介绍。

2.1 HFSS 天线设计流程概述

使用 HFSS 软件进行天线设计的设计流程如图 2.1.1 所示，设计流程中各个步骤的功能分述如下。

① 设置求解类型。使用 HFSS 进行天线设计时，可以选择模式驱动（Driven Modal）求解类型或者终端驱动（Driven Terminal）求解类型。

② 创建天线的结构模型。根据天线的初始尺寸和结构，在 HFSS 模型窗口中创建出天线的 HFSS 参数化设计模型。另外，HFSS 也可以直接导入由 AutoCAD、Pro/E 等第三方软件创建的结构模型。

③ 设置边界条件。在 HFSS 中，与背景相接触的表面都被默认设置为理想导体边界（Perfect E）；为了模拟无限大的自由空间，在使用 HFSS 进行天线设计时，必须把与背景相接触的表面设置为辐射边界条件或者理想匹配层（PML）边界条件，这样 HFSS 才会计算天线的远区辐射场。

④ 设置激励方式。天线必须通过传输线或者波导传输信号，天线与传输线或者波导的连接处即为馈电面或者称为激励端口。天线设计中馈电面的激励方式主要有两种，分别是波端口激励（Wave Port）和集总端口激励（Lumped Port）。通常，与背景相接触的馈电面的激励方式使用波端口激励，在模型内部的馈电面的激励方式使用集总端口激励。

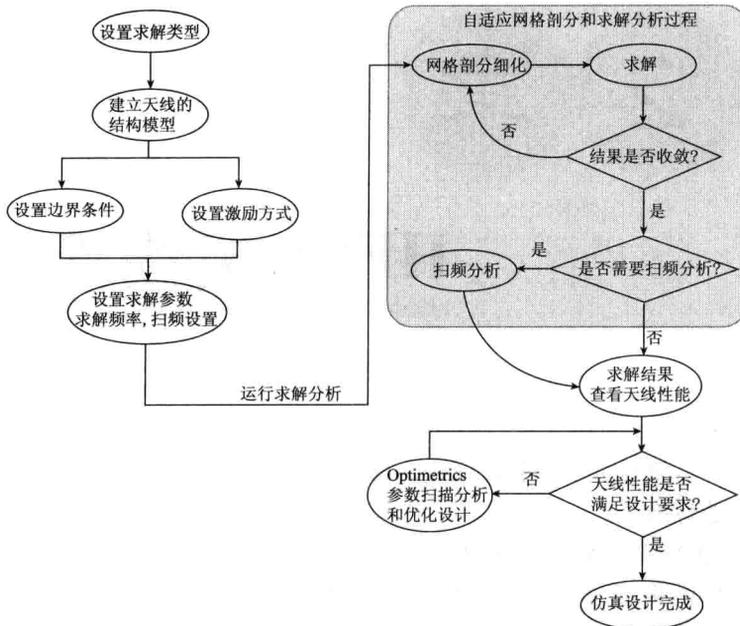


图 2.1.1 HFSS 天线设计流程

⑤ 设置求解参数，包括设定求解频率和扫频参数，其中，求解频率通常设定为天线的中心工作频率。

⑥ 运行求解分析。上述操作完成后，即创建好天线模型，正确设置了边界条件、激励方式和求解参数，即可执行求解分析操作命令来运行仿真计算。整个仿真计算由 HFSS 软件自动完成，不需要用户干预。分析完成后，如果结果不收敛，则需要重新设置求解参数；如果结果收敛，则说明计算结果达到了设定的精度要求。

⑦ 查看求解结果。求解分析完成后，在数据后处理部分可以查看 HFSS 分析出的天线的各项性能参数，如回波损耗 S_{11} 、电压驻波比 VSWR、输入阻抗、天线方向图、轴比和电流分布等。如果仿真计算的天线性能满足设计要求，那么就完成了天线的仿真设计工作，接下来可以着手天线的制作和调试工作。如果仿真计算的天线性能未能达到设计要求，那么还需要使用 HFSS 的参数扫描分析功能或者优化设计功能，进行参数扫描分析和优化设计。

⑧ Optimetrics 优化设计。如果前面的分析结果未达到设计要求，那么还需要使用 Optimetrics 模块的参数扫描分析功能和优化设计功能来优化天线的结构尺寸，以找到满足要求的天线设计。

2.2 HFSS 天线设计详细操作

2.2.1 求解类型

HFSS 中共有三种求解类型，分别是模式驱动求解 (Driven Modal)、终端驱动求解 (Driven Terminal) 和本征模求解 (Eigenmode)。在天线设计中，通常选择模式驱动或者终端驱动求解类型。其中，模式驱动求解类型是根据导波模式的人射和反射功率来计算 S 参数矩阵的解，终端驱动求解类型是根据传输线终端的电压和电流来计算 S 参数矩阵的解。

通过选择【HFSS】→【Solution Type】命令，可以打开如图 2.2.1 所示的对话框，设定设计的求解类型。

2.2.2 创建天线结构模型

HFSS 软件提供了一个简单易用的建模环境，从而可以准确、方便地创建出各种天线的结构模型，包括准确地设置天线模型的结构尺寸和正确地分配模型的材料。

在 HFSS 中也可以导入由第三方软件创建的结构模型。通过选择主菜单栏中的【Modeler】→【Import】命令，可以导入由 AutoCAD、Pro/E 等软件创建的天线结构模型。

另外，为了方便后续的参数扫描分析和优化设计，以及为了能够方便地更改设计模型的结构尺寸，在建模时可以定义一系列的变量来表示模型的物理尺寸。

2.2.3 设置边界条件

边界条件确定场，正确地设置边界条件是正确使用 HFSS、仿真计算出准确结果的前提。而且，灵活地使用边界条件还可以很好地降低模型的复杂度。

在 HFSS 设计中，设置边界条件的步骤为：首先选中物体表面，然后在三维模型窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】命令，即可弹出设置边界条件的级联菜单，如图 2.2.2 所示，单击级联菜单中的边界条件名称，即可打开相应边界条件的设置对话框，给选中的物体表面分配该边界条件。

HFSS 中定义了多种边界条件类型，分别为理想导体边界条件（Perfect E）、理想磁边界条件（Perfect H）、有限导体边界条件（Finite Conductivity）、辐射边界条件（Radiation）、对称边界条件（Symmetry）、阻抗边界条件（Impedance）、集总 RLC 边界条件（Lumped RLC）、无限地平面（Infinite Ground Plane）、主从边界条件（Master and Slave）、理想匹配层（PML）和分层阻抗边界条件（Layered Impedance）。天线设计中，最常用到的边界条件是理想导体边界条件（Perfect E）、有限导体边界条件（Finite Conductivity）、辐射边界条件（Radiation）和理想匹配层（PML）。

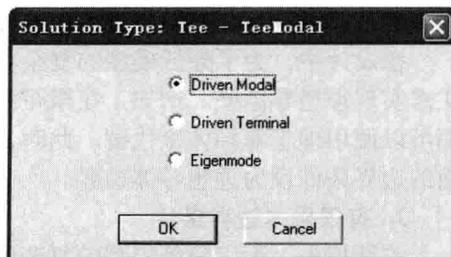


图 2.2.1 求解类型

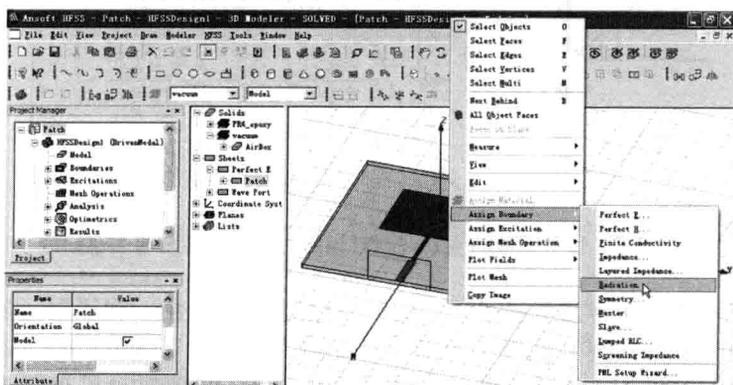


图 2.2.2 设置边界条件

1. 理想导体边界条件

在 HFSS 中，任何与背景相关联的物体表面以及材质为理想电导体（pec）的物体表面

都会被自动设置为理想导体边界。这种边界条件的电场矢量 (E-Field) 垂直于物体表面。

在设计中, 为了降低模型的复杂度, 经常通过给物体表面分配理想导体边界条件的方式来实现理想导体壁。例如, 在微带线和带状线的 HFSS 设计模型中, 信号线以及参考地都可以使用理想薄导体来代替。此时, 在设计中可以首先创建一个二维平面, 然后把该平面的边界条件设为理想导体边界。

2. 有限导体边界条件

前面提到, 为了降低模型的复杂度, 经常通过给物体表面分配理想导体边界条件的方式来实现理想导体壁。但是实际天线结构的导体部分通常都是使用良导体, 如金属铜。使用有限导体边界, 可以实现把一个平面的边界条件设置为金属铝、金属铜等良导体。

3. 辐射边界条件

辐射边界条件也称为吸收边界条件 (Absorbing Boundary Condition, ABC), 用于模拟开放的自由空间。系统在辐射边界处吸收了电磁波, 本质上可以把边界看成是延伸到空间无限远处。天线是一个辐射结构, 理论上其边界应该在无穷远处。而在有限元求解中, 把边界条件设置在无穷远处会严重影响求解效率, 这样不切合实际。为了兼顾准确度和求解效率, HFSS 引入了辐射边界条件和理想匹配层来代替无限大的自由空间。

在使用 HFSS 进行天线设计时, 必须定义辐射边界条件或者理想匹配层, 用以模拟开放的自由空间。在设计中只有定义了辐射边界条件或者理想匹配层, 软件才会自动分析计算天线的远区场。

使用辐射边界条件作为自由空间的近似, 这种近似的准确程度取决于波的传播方向与辐射边界表面之间的角度, 以及辐射体与边界表面之间的距离。若用 θ 表示波的传播方向与辐射边界表面之间的角度, 那么辐射边界的反射系数与 θ 之间的关系可以用图 2.2.3 来表示。从图中可以看出, 当波的传播方向与辐射边界表面正交, 即 $\theta = 0^\circ$ 时, 电磁能量几乎全部被边界吸收, 反射系数最小, 此时仿真计算结果最准确; 当波的传播方向与辐射边界表面平行, 即 $\theta = 90^\circ$ 时, 电磁能量几乎全部被辐射边界反射回去, 此时仿真计算结果的准确度最差。

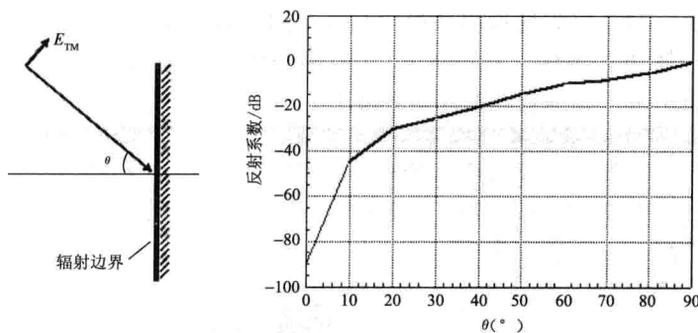


图 2.2.3 反射系数与入射波相对辐射边界表面夹角的关系曲线

图 2.2.4 所示为一个半波偶极子天线的回波损耗 (S_{11} 参数) 和辐射边界距离之间的关系图, 图中给出了辐射边界和偶极子天线距离分别为 $\lambda/16$ 、 $\lambda/8$ 、 $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、 $3\lambda/4$ 、 λ 和 $5\lambda/4$ 情况下的回波损耗 S_{11} 分析结果。从图中可以看出, 当辐射边界和偶极子天线之间的距离大于 $\lambda/4$ 时, 回波损耗 S_{11} 分析结果基本一致, 不再有大的波动。所以, 通常情况下, 为了保证计算结果的准确, 辐射边界距离辐射体应不小于 $1/4$ 个工作波长。

辐射边界条件的具体设置步骤如下: 首先选中物体表面, 然后在三维模型窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Radiation】命令, 打开如图

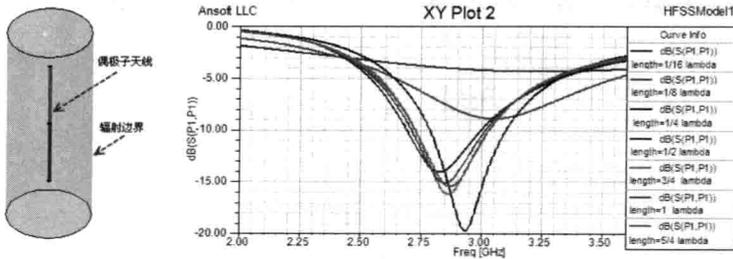


图 2.2.4 偶极子天线的 S_{11} 参数和辐射边界距离之间的关系

2.2.5 所示的辐射边界条件设置对话框。在天线设计中，通常只需选中对话框中的 Radiating Only 单选按钮（即保持默认设置即可）。最后单击 **OK** 按钮，即可设置选中的物体表面为辐射边界条件。

4. 理想匹配层 (PML)

在天线设计中，除了可以使用辐射边界条件来模拟开放的自由空间之外，也可以选择使用理想匹配层来模拟开放的自由空间。

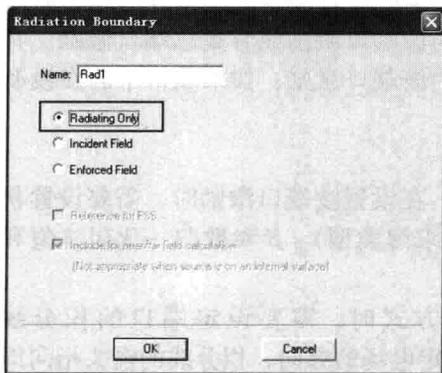


图 2.2.5 辐射边界条件设置对话框

理想匹配层 (Perfectly Matched Layers, PML) 是能够完全吸收入射电磁波的假想的各项异性材料边界，其有两种典型的应用，一是用于外场问题中的自由空间截断，二是用于导波问题中的吸收负载。对于自由空间截断的情况，PML 表面能够完全吸收入射来的电磁波，其作用类似于辐射边界条件。和辐射边界条件相比，理想匹配层由于能够完全吸收入射的电磁波，零反射，因此计算结果更精确。另外，理想匹配层表面可以距离辐射体更近，差不多 $1/10$ 个工作波长即可，而辐射边界表面和辐射体之间的距离一般需要大于 $1/4$ 个工作波长。

理想匹配层的具体设置步骤如下：首先选中物体表面，然后在三维模型窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【PML Setup Wizard】命令，打开如图 2.2.6 所示的理想匹配层设置向导，根据设置向导的提示，设置选中的物体表面为理想匹配层。其中，在设置向导的 Cover Objects 对话框中，Uniform Layer Thickness 一般设置为 $1/2$ 个工作波长，在天线设计时需要选中 Base Face Radiation Properties 选项组中的 Radiating Only 单选按钮，如图 2.2.6 (a) 所示。然后单击 **下一步(N) >** 按钮，打开 Material Parameters 对话框，在其中的 Min Frequency 文本框中输入最小工作频率，天线设计时通常输入天线的中心频率，Minimum Radiating Distance 一般设置为一个工作波长，如图 2.2.6 (b) 所示。然后再次单击 **下一步(N) >** 按钮，直至完成。

2.2.4 设置激励方式

在 HFSS 中，激励是一种定义在三维物体表面或者二维平面物体上的激励源，这种激励源可以是电磁场、电压源、电流源或者电荷源。HFSS 中定义了多种激励方式，主要有波端口激励 (Wave Port)、集总端口激励 (Lumped Port)、Floquet 端口激励 (Floquet

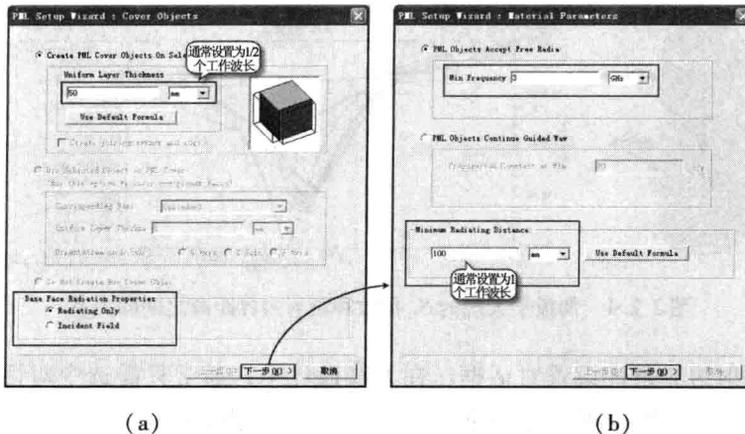


图 2.2.6 理想匹配层设置向导

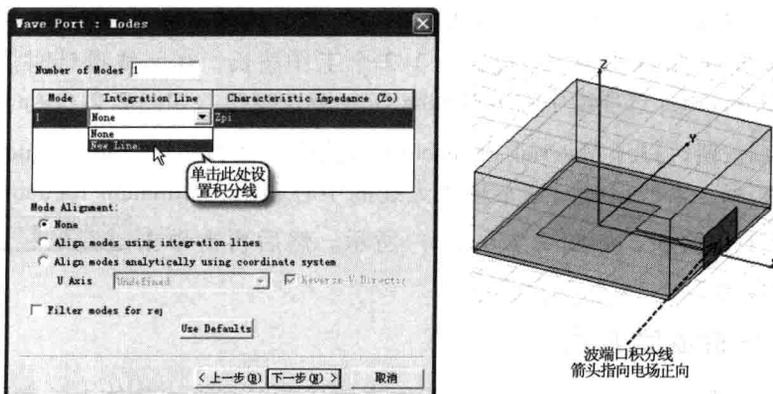
Port)、入射波激励 (Incident Wave)、电压源激励 (Voltage Source)、电流源激励 (Current Source) 和磁偏置激励 (Magnetic Bias)。

天线必须通过传输线或者波导传输信号, 天线与传输线或者波导的连接处可以看做是端口平面。天线设计中, 端口平面的激励方式多设置为波端口激励或者集总端口激励。其中, 如果端口平面与背景相接触, 激励方式需要设置为波端口激励; 如果端口平面在模型内部, 激励方式则需要设置为集总端口激励。

1. 波端口激励

与背景相接触的端口平面需要设置为波端口激励。在设置波端口激励时, 需要设置积分校准线 (模式驱动求解类型) 或终端线 (终端驱动求解类型)、 S 参数归一化阻抗值和端口平移距离等信息。

对于模式驱动求解类型, 在设置波端口激励方式时, 需要设定端口的积分线 (Integration Line)。设定积分线的目的有两个, 一是确定电场的方向, 积分线的箭头指向即为电场的正方向; 二是设定端口电压的积分路径, 用于计算端口电压等参数。在模式驱动求解类型下, 在波端口设置对话框的 Modes 界面中选择 Integration Line 列对应的 None, 再从下拉列表中选择 New Line 选项, 即可设置波端口的积分线, 如图 2.2.7 (a) 所示。设定好的波端口积分线如图 2.2.7 (b) 所示。

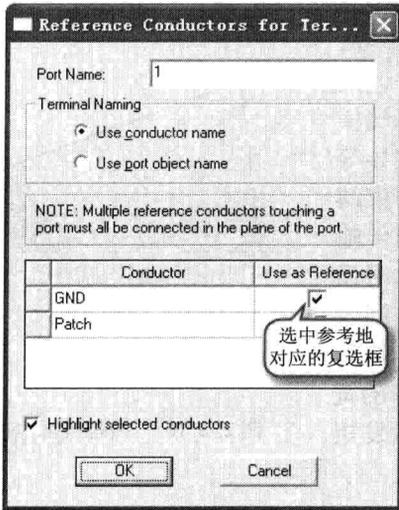


(a) 积分线设置命令

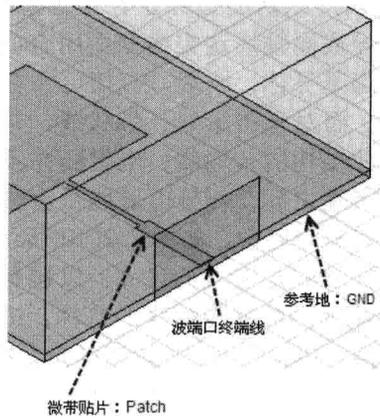
(b) 积分线

图 2.2.7 模式驱动求解类型下的波端口激励——端口积分线

对于终端驱动求解类型而言，在设置波端口激励方式时需要设定端口的终端线（Terminal Line），通过终端线上的节点电流和电压来计算端口的阻抗和 S 参数矩阵。对于 HFSS 11 以前的版本，用户需要手动设置终端线作为电压的积分路径，HFSS 根据设定的终端线计算端口的节点电压。很多时候确定端口的电压积分路径是比较困难的，手动设置这样的终端线是费时且费力的一件事。因此，HFSS 11 以及 HFSS 11 之后的版本对端口终端线的设置做了改进，由用户手动设置终端线作为电压积分路径来计算节点电压，改为系统自动设置终端线作为磁场的积分路径来计算节点电流。在终端驱动求解类型下，设置波端口时会打开如图 2.2.8 (a) 所示的对话框，要求用户指定终端线的参考导体，对于常用的微带线和带状线结构，通常是把参考地设定为终端线的参考导体，即选中对话框中参考地对应的 Use as Reference 复选框。然后，HFSS 软件会把其他金属层和端口平面相交的棱边自动设定为终端线。图 2.2.8 (b) 所示为一个微带线结构的设定好的波端口终端线。



(a) 指定参考导体



(b) 终端线

图 2.2.8 终端驱动求解类型下的波端口激励设置和终端线

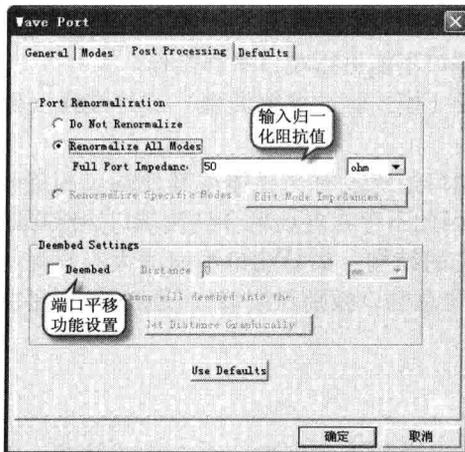


图 2.2.9 波端口设置对话框的 Post Processing 选项卡

无论是模式驱动求解类型还是终端驱动求解类型，在设置波端口激励时，都需要设置端口的 S 参数归一化阻抗值，归一化阻抗即端口的负载阻抗。在微波射频频段，端口负载阻抗一般都是 50Ω 。在波端口设置对话框的 Post Processing 选项卡中选中 Renormalize All Modes 单选按钮，即可在 Full Port Impedance 文本框中输入归一化阻抗的值，通常此处输入 50ohm ，如图 2.2.9 所示。如果此处选中的是 Do Not Renormalize 单选按钮，那么导波系统中每个模式在波端口处都是完全匹配的，此时计算分析的是广义 S 参数。

另外，在波端口设置对话框的 Post Processing 选项卡中还可以设置 Deembed 功能。HFSS 中的 Deembed 功能可以简单地理解为端口平移

功能,即平移端口到新的位置,然后计算出相应的 S 参数。假设有一个三端口器件,端口平移前 S 参数矩阵为 S , 端口平移后新的 S 参数矩阵为 S_{deembed} , 则有:

$$S_{\text{deembed}} = e^{\gamma l} S e^{\gamma l} \quad (2-2-1)$$

式中, $e^{\gamma l} = \begin{bmatrix} e^{\gamma l_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{\gamma l_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\gamma l_3} \end{bmatrix}$; γ 是复传播常数, $\gamma = \alpha + j\beta$, α 称为衰减常数, 单位是 Np/m , β 称为波的相位常数, 单位为 rad/m ; 各个端口的复传播常数 γ_i 由 HFSS 计算求解; l_i 是各个端口平移的距离。

端口平移只影响数据后处理的结果,使用端口平移功能将端口平移到新的位置后, HFSS 不需要重新运行仿真计算。在设置端口平移距离时,正数表示端口平面向模型内部移动的距离,负数表示端口平面向模型外延伸的距离。

波端口四周默认的边界条件是理想导体边界,因此对于波导或同轴线这类横截面闭合的器件,端口截面四周都是导体,波端口直接定义在其终端横截面上即可。而对于微带线、带状线、共面波导等开放或半开放结构的传输线,电磁场并不完全束缚在导体和参考地之间,部分电磁能量会辐射到传输线四周的空气和介质中,如图 2.2.10 所示。此时设置的波端口需要有足够大的尺寸,以避免电场耦合到波端口边缘上,影响传输线的特性,进而影响到计算的准确性。还有一点需要说明的是,波端口的宽度和高度都不能超过 $1/2$ 个工作波长,否则会激发矩形波导模式,影响结果的准确性。

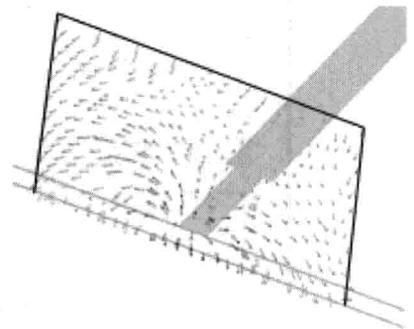


图 2.2.10 微带线的电磁场分布

2. 集总端口激励

集总端口激励 (Lumped Port) 类似于传统的波端口激励,与波端口激励不同的是集总端口激励需要设置在物体模型内部,且用户必须设定端口阻抗。集总端口直接在端口处计算 S 参数,设定的端口阻抗为集总端口上 S 参数的参考阻抗。另外,集总端口不计算端口处的传播常数 γ , 因此根据式 (2-2-1) 可知,集总端口不能进行端口平移操作。

集总端口的设置和波端口类似,需要设置积分线 (模式驱动求解类型) 或终端线 (终端驱动求解类型)

以及端口阻抗。与波端口激励不同的是,集总端口边缘没有与导体或其他端口相接触的部分,默认边界条件是理想磁边界 (Perfect H), 因此不存在电场耦合到波端口边缘影响传输线特性的问题。对于微带线、带状线等半开放类的结构,集总端口平面的大小只需与微带线或带状线的宽度相同即可。图 2.2.11 所示为集总端口激励和波端口激励的端口平面区别。

2.2.5 设置求解参数

HFSS 软件采用自适应网格剖分技术,根据用户设置的误差标准,自动生成精确、有效的网格来分析物体模型的电磁特性。HFSS 基本的求解参数包括求解频率、自适应网格剖分的最大迭代次数和收敛误差。如果需要扫频分析,还需要设置扫频类型和扫频范围。

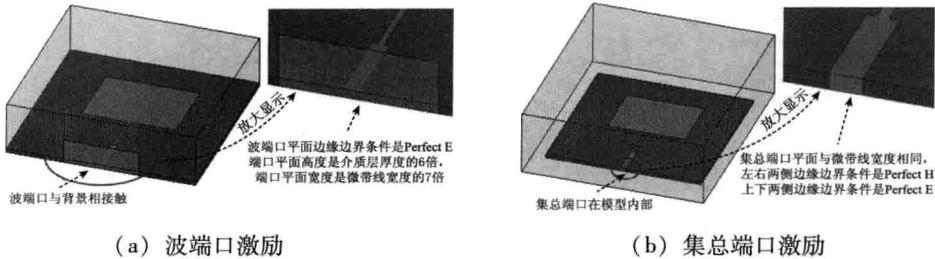


图 2.2.11 波端口激励和集总端口激励对比

1. 求解设置

在主菜单栏中选择【HFSS】→【Analysis Setup】→【Add Solution Setup】命令或者右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add Solution Setup】命令，即可打开如图 2.2.12 所示的求解设置对话框，然后设置求解参数。

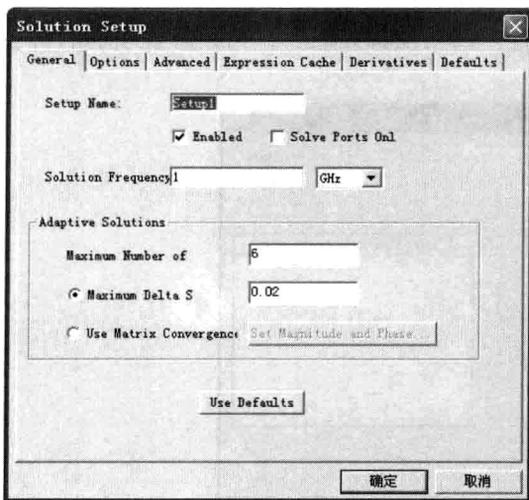


图 2.2.12 求解设置对话框

其中，Solution Frequency 文本框用于设置求解频率，对于窄带天线，求解频率可以选取天线的中心工作频率；对于宽频天线，求解频率可以选取天线的最高工作频率。Maximum Number of Passes 文本框用于设置自适应网格剖分的最大迭代次数，Maximum Delta S 文本框用于设置 S 参数收敛误差标准 ΔS 。在自适应网格剖分过程中，每次网格细化后，HFSS 会将基于当前网格计算出的 S 参数结果和上一次网格剖分的计算结果相比较，如果求出的误差 ΔS 小于 Maximum Delta S 文本框中设置的收敛标准，表示解已经收敛，自适应网格剖分计算完成。如果网格剖分的迭代次数达到了 Maximum Number of Passes 文本框中设置的最大值，此时即使解没有收敛，网格剖分也会终止。

最后单击 **确定** 按钮，完成设置。求解设置完成后，求解设置项的名称会自动添加到工程树下的 Analysis 节点下。

2. 扫频设置

在天线设计中通常还需要查看天线的频率特性，比如天线的驻波比随频率的变化。此时就需要添加扫频分析项，设置扫频类型和扫频范围。HFSS 中总共有三种扫频类型，分别是快速扫频（Fast）、离散扫频（Discrete）和插值扫频（Interpolating）。其中，天线设计多选择快速扫频或者插值扫频。

进行扫频设置的具体操作如下：首先确认设计中已经添加了求解设置项，然后在主菜单栏中选择【HFSS】→【Analysis Setup】→【Add Frequency Sweep】命令；或者展开工程树中的 Analysis 节点，右键单击添加的求解设置项，在弹出的快捷菜单中选择【Add Frequency Sweep】命令，如图 2.2.13 所示，此时即可打开如图 2.2.14 所示的扫频设置对话框，设置扫频参数。

该对话框中的 Sweep Type 下拉列表框用于设置扫频类型，天线设计多选择快速扫频

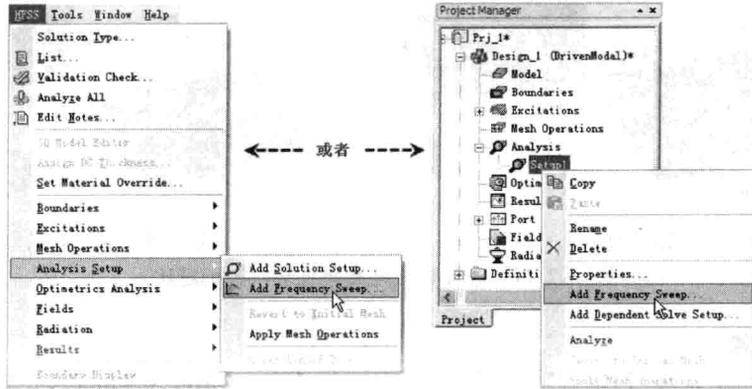


图 2.2.13 添加扫频设置的操作

(Fast) 或者插值扫频 (Interpolating)。Frequency Setup 选项组用于设置扫频范围, 其中的 Start、Stop 和 Step Size 文本框分别用于设置最低频率、最高频率和步进频率。其他选项都可以保留默认设置。单击 **OK** 按钮即可完成设置。扫频设置完成后, 扫频设置项的名称会自动添加到工程树中求解设置项的名称下。

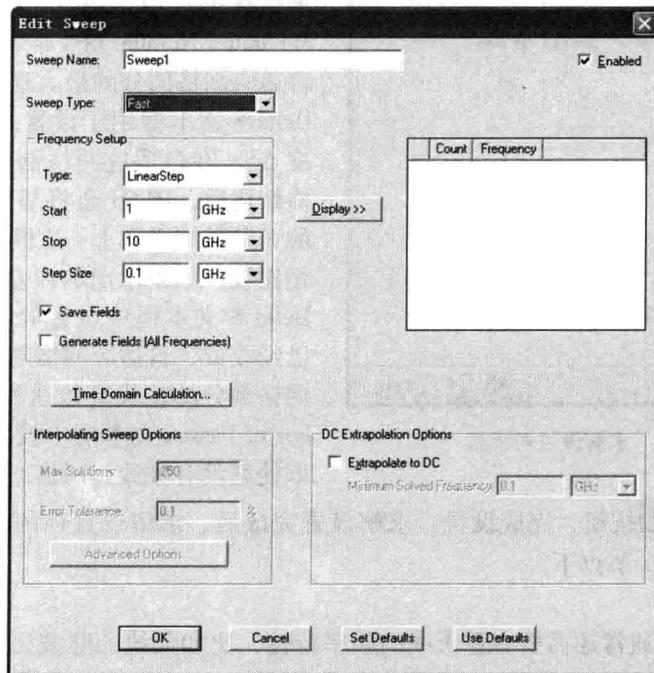


图 2.2.14 扫频设置对话框

2.2.6 设计检查和运行求解分析

在 HFSS 设计中, 完成了上述创建天线模型、分配边界条件和激励方式、设置求解参数等操作之后, 就完成了设计的准备工作。接下来需要运行设计检查, 检查设计的完整性和正确性。在主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令或者单击工具栏上的  按钮, 即可运行设计检查。此时, 会打开如图 2.2.15 所示的 Validation Check 对话框。

该对话框中的✔表示该步骤完整且正确，⚠表示该步骤有警告信息，✘表示该步骤不完整或者有错误。对于设计检查对话框中出现的警告或错误信息，用户需要仔细查看信息管理窗口的提示信息，根据提示信息找出出现警告或错误的原因，并在设计中做出正确的修改，直到对话框中的每一项前面显示的都是✔图标，此时，表示当前的 HFSS 设计是正确且完整的。

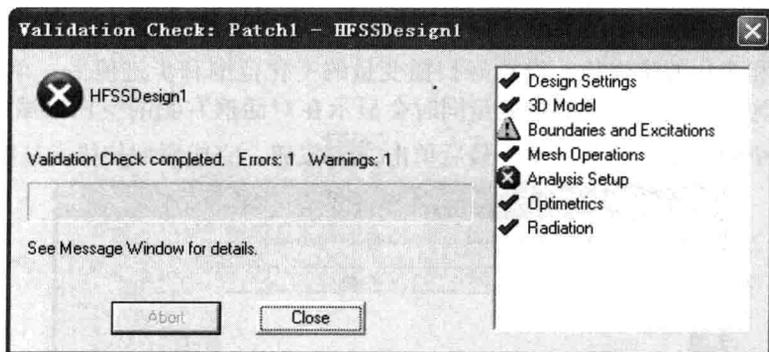


图 2.2.15 设计检查结果对话框

确认设计正确且完整之后，右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze All】命令，或者直接单击工具栏中的按钮，即可运行求解分析。整个求解分析由 HFSS 软件自动完成，不需要用户干预。分析完成后，如果结果不收敛，则需要重新设置求解参数；如果结果收敛，则说明计算结果达到了设定的精度要求。

2.2.7 天线问题的数据后处理

HFSS 拥有强大的数据后处理功能，能够查看天线的各项性能参数分析结果，包括回波损耗、驻波比、Smith 圆图、输入阻抗、表面电流分布、电场/增益方向图和轴比等。其中，如果要查看远区场结果，需要在 HFSS 中先定义远区场辐射表面。关于查看天线各项性能参数分析结果的具体操作，会在下一章的半波偶极子天线设计实例中进行详细的讲解。

2.2.8 Optimetrics 优化设计

Optimetrics 是集成在 HFSS 中的设计优化模块，该模块通过自动分析设计参数的变化对求解结果的影响，实现参数扫描分析 (Parametric)、优化设计 (Optimization)、调谐分析 (Tuning)、灵敏度分析 (Sensitivity) 和统计分析 (Statistical) 等功能。

如果前面的分析结果没有达到设计要求，那么可以使用 Optimetrics 模块的参数扫描分析功能和优化设计功能优化天线的结构尺寸，找到满足设计要求的天线设计。其中，参数扫描分析功能用来分析天线的性能随着指定变量的变化而变化的关系。在优化设计前一般使用参数扫描分析功能来确定被优化变量的合理变化区间。优化设计是 HFSS 根据特定的优化算法在所有可能的设计变化中寻找出一个满足设计要求的值。

1. 参数扫描分析

参数扫描分析功能用来分析天线的性能随着指定变量的变化而变化的关系，在优化设计前一般使用参数扫描分析功能来确定被优化变量的合理变化区间。使用参数扫描分析功能，首先需要添加一个或者多个扫描变量。假设当前设计中已经定义了一个设计变量 Var_1，参数扫描分析的设置步骤如下。

① 在主菜单栏中选择【HFSS】→【Optimetrics Analysis】→【Add Parametric】命令，或者右键单击工程树下的 Optimetrics 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令，打开如图 2.2.16 所示的参数扫描分析设置对话框。

② 单击该对话框中的 **Add...** 按钮，打开如图 2.2.17 所示的 Add/Edit Sweep 对话框，添加扫描变量。在该对话框中，Variable 项列出了当前设计中定义的所有变量，单击打开其下拉列表，从中选择一个变量作为扫描变量。Start、Stop 和 Step 文本框用于设置扫描变量的变化范围和变化的步进值。设置好扫描变量的变化范围和步进值后，单击 **Add >>** 按钮添加该变量为扫描变量，该扫描变量同时会显示在对话框右侧的空白区域处。设计中可以一次添加多个变量作为扫描变量。最后单击 **OK** 按钮，完成添加扫描变量的操作。

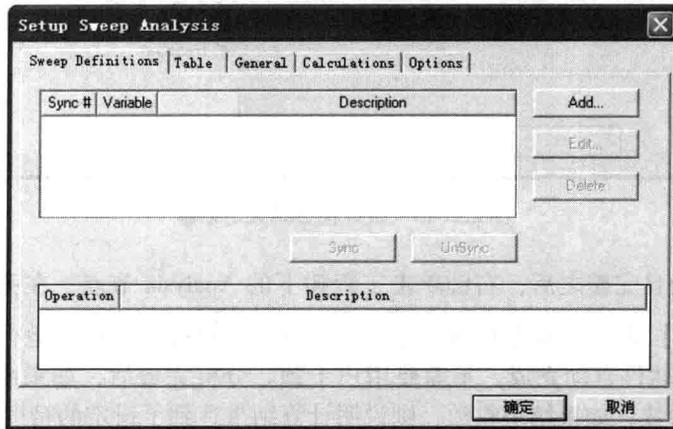


图 2.2.16 参数扫描分析设置对话框

③ 完成添加扫描变量的操作后，返回到如图 2.2.16 所示的对话框。此时，参数扫描分析设置对话框中会列出已经添加的扫描变量。然后单击 **确定** 按钮，完成参数扫描分析设置。设置完成后，参数扫描分析项会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认名称为 ParametricSetup1，如图 2.2.18 所示。

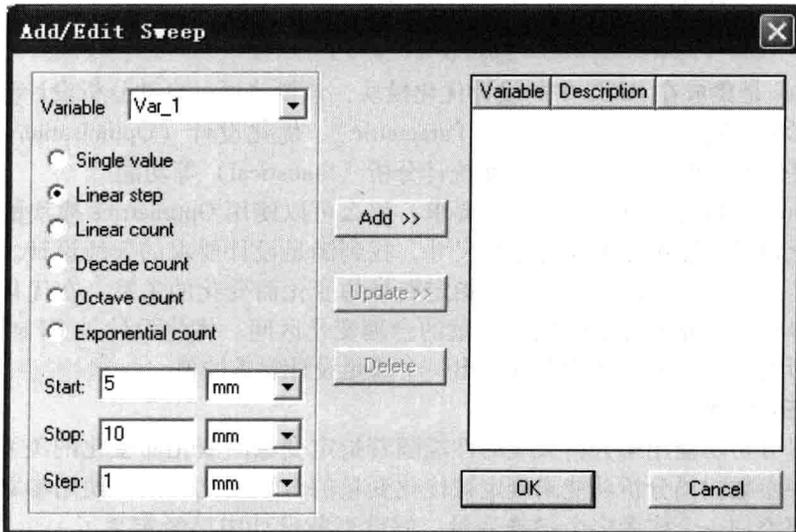


图 2.2.17 添加/编辑扫描变量对话框



图 2.2.18 添加的参数扫描分析项

④ 参数扫描分析设置完成后，右键单击工程树 Optimetrics 节点下的参数扫描分析项的名称，从弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令即可运行参数扫描分析。

2. 优化设计

优化设计是指 HFSS 在一定的约束条件下根据特定的优化算法对设计的某些参数进行调整，从所有可能的设计变化中寻找一个满足设计要求的值。在进行优化设计时，首先需要明确设计要求或设计目标，然后用户根据设计要求定义设计变量、创建参数化的初始结构模型 (Nominal Design)、构造目标函数，最后

指定优化算法进行优化。优化设计的流程如图 2.2.19 所示。

(1) 初始设计

初始设计或者初始结构模型在 HFSS 中被称为 Nominal Design。用户一般根据理论知识和实际经验给出初始设计，创建初始结构模型。初始设计应该尽量接近真实值，否则会导致优化时间过长，有时甚至得不到全局最优解。

(2) 添加优化变量

在进行优化设计时，用户需要添加优化变量。如果添加的优化变量是设计变量，则可以从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开如图 2.2.20 所示的设计属性对话框。首先选中该对话框中的 Optimization 单选按钮，此时对话框内会列出当前设计中所定义的全部设计变量，然后选中变量对应的 Include 复选框，这样，即可将该变量添加为优化变量。在 Nominal Value、

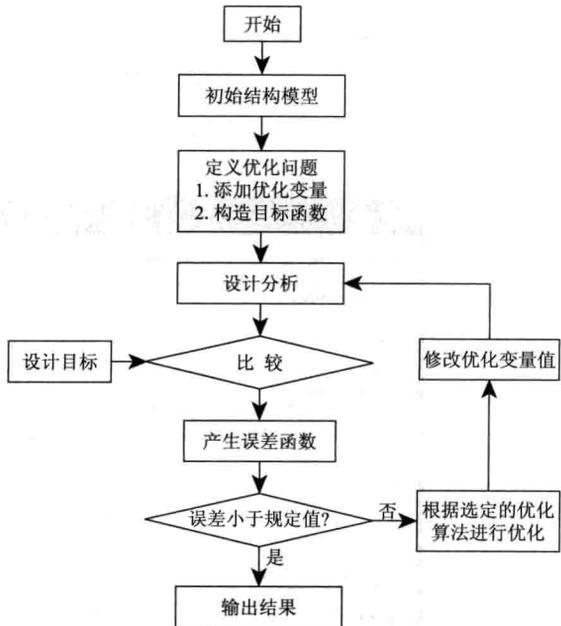


图 2.2.19 HFSS 优化设计流程

Min 和 Max 列下的文本框中可以分别设置优化变量的初始值、最小值和最大值。如果添加

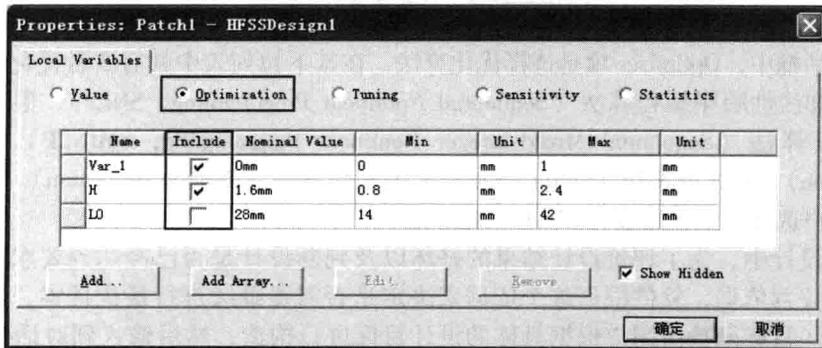


图 2.2.20 设置优化变量

的优化变量是工程变量, 则从主菜单栏中选择【Project】→【Project Variables】命令, 打开和图 2. 2. 20 相似的属性对话框, 并使用相同的操作方法添加优化变量。

(3) 添加优化设计项

添加了优化变量后, 从主菜单栏中选择【HFSS】→【Optimetrics Analysis】→【Add Optimization】命令, 或者右键单击工程树下的 Optimetrics 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Optimization】命令, 如图 2. 2. 21 所示。此时, 可以打开如图 2. 2. 22 所示的优化设置对话框, 进行优化分析设置, 添加优化分析项。

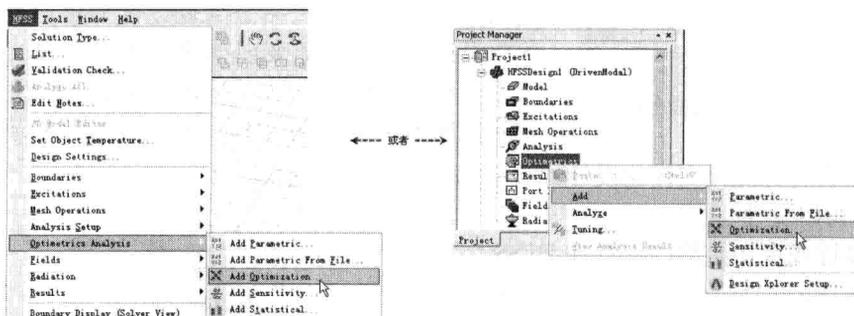


图 2. 2. 21 打开优化设置对话框的操作

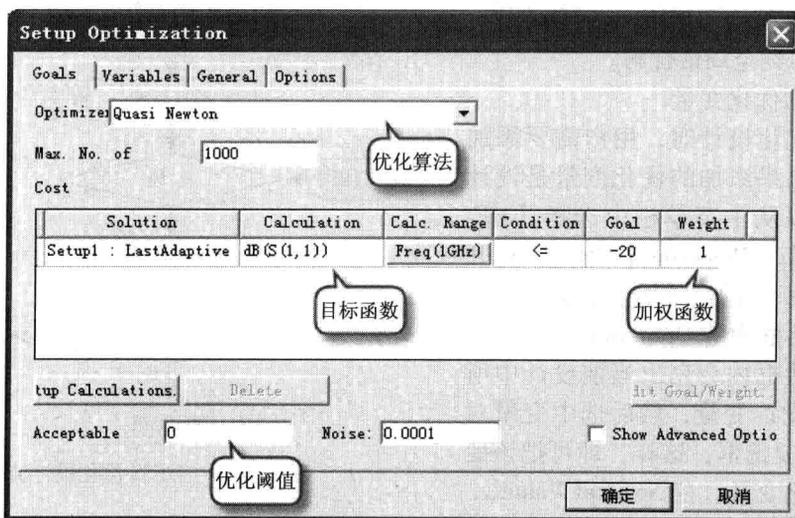


图 2. 2. 22 优化设置对话框

在该对话框中, Optimizer 项是选择优化算法, 在其下拉列表中共有 5 种优化算法可供选择, 分别是非线性顺序编程算法 (Sequential Nonlinear Programming, SNLP)、混合整数非线性顺序编程算法 (Sequential Mixed-Integer Nonlinear Programming, SMINLP)、拟牛顿法 (Quasi Newton)、模式搜索法 (Pattern Search) 和遗传算法 (Genetic Algorithm)。在多数情况下, 建议用户选择拟牛顿法或者 SNLP 优化算法。

在优化设计中, 为了评价设计结果的好坏以及判断设计是否已经达到要求的目标, 必须定义一个评判依据, 软件根据这个依据来决定是否需要继续进行最优搜索, 这个依据称为目标函数。目标函数由用户根据具体的设计目标进行构造, 然后输入到对话框的 Cost 选项组中。假如设计要求为 $S_{11} < -20\text{dB}$, 那么可以构造目标函数 $\text{dB}(S(1,1)) \leq -20$, 如图

2.2.22 所示，其中 Weight 选项是加权函数。

优化分析过程是否终止是根据对话框中的 Acceptable 文本框中设置的优化阈值来判别的，优化阈值可以是一个复数。在优化分析过程中，当目标函数的值小于或者等于优化阈值时，优化分析完成。

选择优化设置对话框上侧的 Variables 选项卡，可以打开如图 2.2.23 所示的界面，此

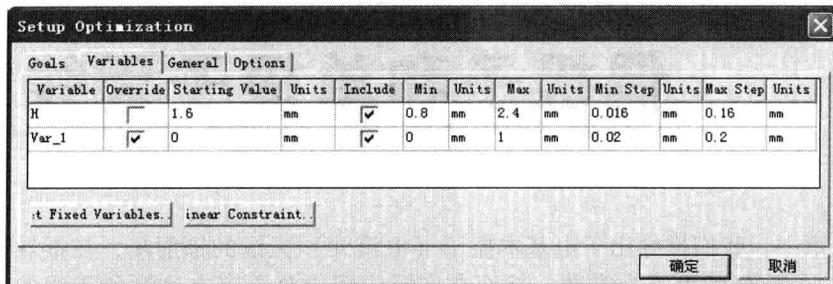


图 2.2.23 优化设置对话框的 Variables 选项卡

处可以设置优化变量的初始值、最小值和最大值等。

上述参数都设置好了之后，单击 **确定** 按钮，完成优化分析设置。设置完成后，优化分析项会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认名称为 OptimizationSetup1。

(4) 运行优化分析

设计中添加了优化分析项之后，右键单击工程树中的 Optimetrics 节点下的优化分析项的名称，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令，即可运行优化分析。运行优化分析的操作如图 2.2.24 所示。

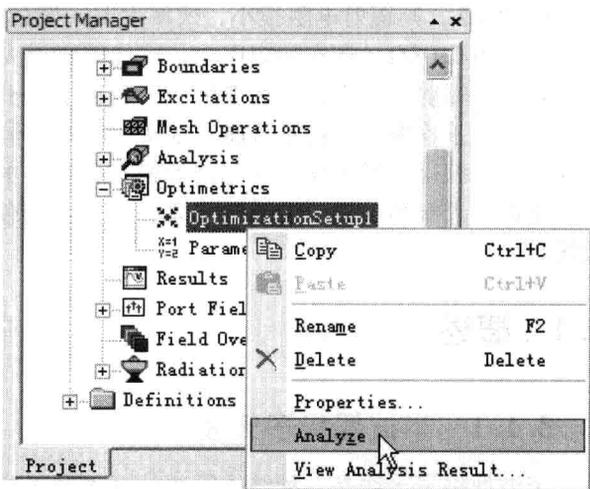


图 2.2.24 运行优化分析

2.3 本章小结

本章首先在 2.1 节中对 HFSS 天线设计的流程进行了简要的介绍，然后在 2.2 节中详细地说明了 HFSS 天线设计过程中每个设计步骤涉及的相关设置和具体操作，包括求解类型的选择、设计模型的创建、边界条件和激励方式的选择与设置、求解分析和扫频分析的设置、设计检查和运行仿真分析的操作以及优化设计的说明等。

第 3 章

偶极子和单极子天线设计

在第 1 章中,我们推导出了电基本振子(电流元)天线的辐射场,在推导过程中假设其长度 $dl \ll \lambda$,流经的电流为常数。然而在实际应用中是不存在这样的天线的,因为,其一,对实际的天线而言,若信号从中央馈入,则电流分布为中央最大、两端为零;其二,若长度 $dl \ll \lambda$,则辐射电阻很小,效率太差,例如,假设电基本振子长度为 0.01λ ,此时辐射电阻仅为 0.08Ω 。在实际应用中,天线需要增大到可以和波长相比拟的长度,这样才能形成较强的辐射。其中,半波偶极子天线和单极子天线是迄今为止应用较为广泛的天线。

虽然电基本振子天线不可能实现实际应用,但是由电基本振子天线场分布,辅以叠加原理,可以获得线形天线(如半波偶极子天线)的场分布等天线特性。本章我们就来讲解半波偶极子天线和单极子天线的原理,以及如何使用 HFSS 设计半波偶极子天线和单极子天线。

3.1 概述

3.1.1 半波偶极子天线

半波偶极子天线是一种结构简单的基本线天线,也是一种经典的、迄今为止使用最广泛的天线之一。半波偶极子天线由两根直径和长度都相等的直导线组成,每根导线的长度为 $1/4$ 个工作波长。导线的直径远小于工作波长,天线的激励是等幅反向的电压信号,加在天线中间的两个相邻端点上,且天线中间两个相邻端点间的距离远小于工作波长,可以忽略不计。

1. 电流分布

对于从中心馈电的偶极子天线,其两端为开路,故电流为零。工程上通常将其电流分布近似为正弦分布。假设将偶极子天线沿 z 轴方向放置,其中心位于坐标原点,如图 3.1.1 所

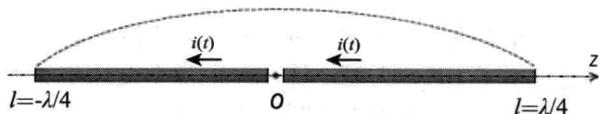


图 3.1.1 半波偶极子天线

示,则长度为 l 的偶极子天线的电流分布可以表示为

$$I(z) = I_0 \sin k(l - |z|) \quad -l \leq z \leq l \quad (3-1-1)$$

式中, I_0 是波腹电流; k 是波数,且 $k = 2\pi/\lambda$; l 是偶极子天线一个臂的长度。对于半波偶极子天线而言,其长度 $l = \lambda/4$ 。把上述参数代入到式(3-1-1)中,则半波偶极子天线的电流分布可以改写为:

$$I(z) = I_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - kz\right) = I_0 \cos(kz) \quad (3-1-2)$$

2. 辐射场和方向图

已知半波偶极子天线上的电流分布，可以利用叠加原理来计算半波偶极子天线的辐射场。半波偶极子天线可以看成是由长度为 dz 的电基本振子天线连接而成的， dz 这一小段天线上的电流等幅同相，但沿着 z 轴的电流幅度是按式 (3-1-2) 给出的正弦分布的。

对第1章中计算出的电基本振子的辐射场，即式 (1-1-10) 和式 (1-1-12)，进行积分运算后，可获得半波偶极子天线的辐射场，具体表示为：

$$E_\theta = j \frac{dl}{2\lambda r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sin\theta e^{-jkr} \left[\int_{-\lambda/4}^{\lambda/4} I_0 \cos(kz) dz \right] \quad (3-1-3)$$

式 (3-1-3) 经整理可得：

$$E_\theta = j \frac{60I_0}{r} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} e^{-jkr} = j \frac{60I_0}{r} f(\theta, \varphi) \quad (3-1-4)$$

加上方向特性，半波偶极子天线的远区辐射电场为：

$$\mathbf{E} = j \frac{60I_0}{r} e^{-jkr} f(\theta, \varphi) \mathbf{e}_\theta \quad (3-1-5)$$

式中，

$$f(\theta, \varphi) = f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \quad (3-1-6)$$

称为半波偶极子天线的方向性函数。

再根据远区场的性质，可以求得半波偶极子天线的磁场为：

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\eta_0} \mathbf{e}_r \times \mathbf{E} = j \frac{I_0}{2\pi r} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} e^{-jkr} \mathbf{e}_\varphi \quad (3-1-7)$$

根据式 (3-1-6) 可以绘出半波偶极子天线的归一化场强方向图，在 H 平面 ($\theta = 90^\circ$) 极坐标方向图是一个圆。在 E 平面 (φ 为常数) 中，辐射场强会随着角度 θ 的变化而变化， $\theta = \pm 90^\circ$ 方向上场强最大， $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 180^\circ$ 方向上场强为零。

3. 方向性系数

根据式 (1-2-3) 和式 (1-2-4) 给出的方向性系数的定义，并代入式 (3-1-6) 给出的半波偶极子天线的方向性函数，可以计算出半波偶极子天线的功率方向性系数为：

$$D = \frac{1}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{\cos^2\theta \left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin^2\theta} \sin\theta d\theta d\varphi} = 1.64 \quad (3-1-8)$$

若以分贝表示，则为：

$$D_{\text{dB}} = 10 \lg(1.64) = 2.15 \text{ dB} \quad (3-1-9)$$

说明：dB、dBi 和 dBd 的区别

dB、dBi 和 dBd 常用于表示天线的增益或方向性系数。其中 dB 是辐射功率和输入功率的比值，其计算公式为 $10 \times \lg(\text{辐射功率}/\text{输入功率})$ 。而 dBi 和 dBd 则分别是以全方向性天线和半波偶极子天线为基准来表示天线的增益或者方向性。由式 (3-1-9) 的计算结果可知，偶极子天线的方向性系数为 2.15dB，因此有 $1\text{dBd} = 2.15\text{dBi}$ 。

4. 辐射电阻

天线的平均功率密度可以用平均坡印廷矢量来表示, 即:

$$\mathbf{P}_{av} = \frac{1}{2}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \quad (3-1-10)$$

把半波偶极子天线的辐射电场和辐射磁场, 即式 (3-1-5) 和式 (3-1-7), 代入式 (3-1-10) 可得:

$$\mathbf{P}_{av} = \frac{15I_0^2}{\pi r^2} \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin^2\theta} \quad (3-1-11)$$

半波偶极子天线的辐射功率则为:

$$P_r = \int_s \mathbf{P}_{av} \cdot d\mathbf{S} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{15I_0^2}{\pi r^2} \frac{\cos^2\theta\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin^2\theta} r^2 \sin\theta d\theta d\varphi = 36.6I_0^2 \quad (3-1-12)$$

这里使用 R_r 来表示辐射电阻, 有:

$$P_r = 36.6I_0^2 = \frac{1}{2}I_0^2 R_r \quad (3-1-13)$$

由式 (3-1-12) 和式 (3-1-13) 可以计算出半波偶极子天线的辐射电阻为:

$$R_r = 73.2\Omega \quad (3-1-14)$$

5. 输入阻抗

根据基本的传输线理论, 输入阻抗一般同时包含实部和虚部两部分, 即为:

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (3-1-15)$$

其中, 实部电阻 R_{in} 包含辐射电阻 R_r 和导体损耗所产生的导体电阻 R_c 。对于良导体而言, 导体电阻可以忽略, 此时实部电阻仅包含辐射电阻, 即为:

$$R_{in} \approx R_r \quad (3-1-16)$$

由理论分析可知, 如图 3.1.1 所示的偶极子天线在天线长度 $2l$ 约为 $\lambda/2$ 时, 虚部电抗 $X_{in}=0$ 。若采用更精确的场论分析, 当 $2l=0.48\lambda$ 时, $X_{in}=0$ 。综合以上的分析, 对于半波偶极子天线而言, 输入阻抗可以近似为:

$$Z_{in} \approx R_r = 73.2\Omega \quad (3-1-17)$$

可见, 半波偶极子天线的输入阻抗是纯电阻, 易于和馈线匹配, 这也是它被较多采用的原因之一。

3.1.2 单极子天线

对于半波偶极子天线, 若是利用镜像法, 引入接地面, 可以技巧性地将半波偶极子天线的长度减少一半, 即 $1/4$ 波长单极子天线, 如图 3.1.2 所示。

对于如图 3.1.2 (a) 所示的 $1/4$ 波长单极子天线, 利用镜像法可以等效成如图 3.1.2 (b) 所示的半波偶极子天线。半波偶极子天线对整个空间区域均有辐射功率,

而 $1/4$ 波长单极子天线因为引入接地面, 电磁波只在接地面上方有辐射功率。因此, $1/4$

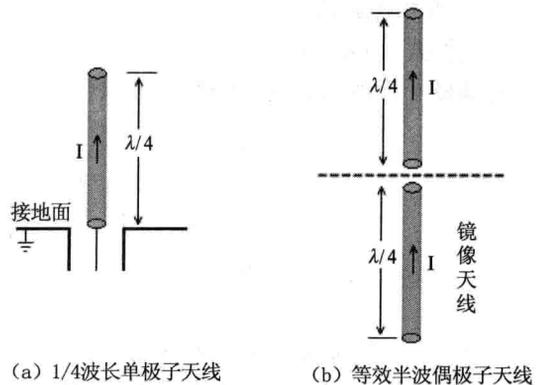


图 3.1.2 单极子天线及其等效

波长单极子天线的辐射功率只有半波偶极子天线的一半，从而 $1/4$ 波长单极子天线的辐射电阻也只有半波偶极子天线的一半，即 $1/4$ 波长单极子天线的辐射电阻约为 36.6Ω 。然而，对于方向性系数而言，由于其定义为方向图函数的最大值和平均值的比值，因此 $1/4$ 波长单极子天线和半波偶极子天线的方向性系数一致，都为 2.15dB 。

3.2 半波偶极子天线设计

上一节中讲解了半波偶极子天线的基本原理，并分析了其主要的性能参数。本节将以一个简单的半波偶极子天线设计分析为例，讲解使用 HFSS 分析设计半波偶极子天线的详细流程和具体操作，并重点讲述 HFSS 的天线后处理功能。

3.2.1 HFSS 设计概述

这里我们设计一个中心频率为 3GHz 的半波偶极子天线，其 HFSS 设计模型如图 3.2.1 所示。天线沿着 z 轴方向放置，中心位于坐标原点，天线材质使用理想导体，总长度为 0.48λ ，半径为 $\lambda/200$ 。天线馈电采用集总端口激励方式，端口距离为 0.24mm ，辐射边界和天线的距离为 $\lambda/4$ 。

在这个分析实例中，我们重点介绍 HFSS 的天线后处理功能，详细讲述在 HFSS 中如何查看天线的各种性能参数，如回波损耗、驻波比、Smith 圆图、输入阻抗和方向图等。

另外，为了方便建模，在设计中我们定义一系列变量来表示半波偶极子天线的结构尺寸。变量的名称、含义以及对应的天线结构尺寸总结如表 3.2.1 所示。

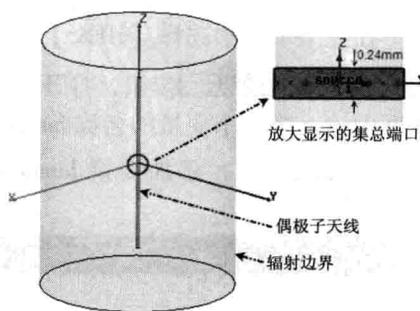


图 3.2.1 半波偶极子天线的 HFSS 分析模型

表 3.2.1 变量定义

变量意义	变量名	变量值 (单位: mm)
工作波长	lambda	100
天线总长度	length	$0.48 \times \text{lambda}$
端口距离	gap	0.24
单个极子长度	dip_length	$\text{length}/2 - \text{gap}/2$
天线半径	dip_radius	$\text{lambda}/200$
辐射边界圆柱体半径	rad_radius	$\text{dip_radius} + \text{lambda}/4$
辐射边界圆柱体高度/2	rad_height	$\text{dip_length} + \text{gap}/2 + \text{lambda}/10$

3.2.2 HFSS 仿真设计

1. 新建设计工程

(1) 运行 HFSS 并新建工程

双击桌面上的 HFSS 快捷方式图标，启动 HFSS 软件。HFSS 运行后会自动新建一个工程文件，选择主菜单栏中的【File】→【Save As】命令，把工程文件另存为 dipole.hfss 文件。

(2) 设置求解类型

将当前设计的求解类型设置为模式驱动求解类型。

在主菜单栏中选择【HFSS】→【Solution Type】命令，打开如图 3.2.2 所示的 Solution Type 对话框，选中 Driven Modal 单选按钮，然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

(3) 设置模型长度单位

设置当前设计在创建模型时所使用的默认长度单位为毫米。

在主菜单栏中选择【Modeler】→【Units】命令，打开如图 3.2.3 所示的 Set Model Units 对话框。在该对话框中，Select units 项选择毫米单位，即从 Select units 下拉列表中选择 mm，然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

2. 添加和定义设计变量

在 HFSS 中定义和添加如表 3.2.1 所示的所有设计变量。

在主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框。单击该对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add Property 对话框。在 Add Property 对话框中的 Name 文本框中输入第一个变量的名称 lambda，在 Value 文本框中输入该变量的初始值 100mm，然后单击 **OK** 按钮，添加变量 lambda 到设计属性对话框中。变量定义和添加的过程如图 3.2.4 所示。

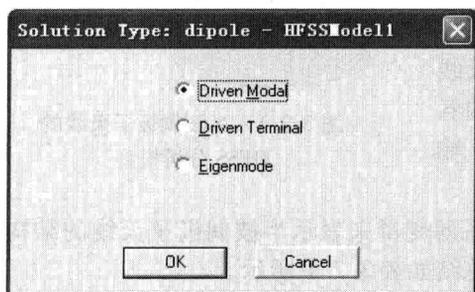


图 3.2.2 设置求解类型



图 3.2.3 设置长度单位

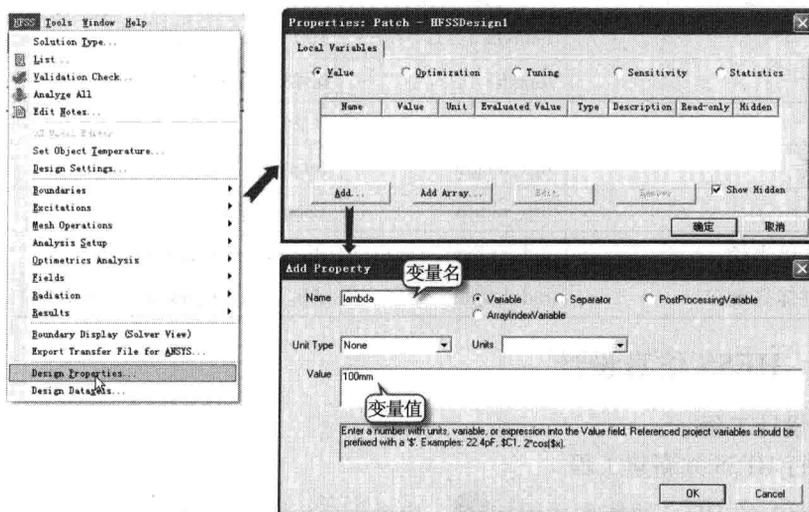


图 3.2.4 定义变量

使用相同的操作步骤定义变量 length，其初始值为 $0.48 \times \lambda$ ；定义变量 gap，其初始值为 0.24mm；定义变量 dip_length，其初始值为 $\text{length}/2 - \text{gap}/2$ ；定义变量 dip_radius，其初始值为 $\lambda/200$ ；定义变量 rad_radius，其初始值为 $\text{dip_radius} + \lambda/4$ ；定义变量 rad_height，其初始值为 $\text{dip_length} + \text{gap}/2 + \lambda/10$ 。

定义完成后，确认设计属性对话框如图 3.2.5 所示。最后单击设计属性对话框中的 **确定** 按钮，完成所有变量的定义和添加工作。

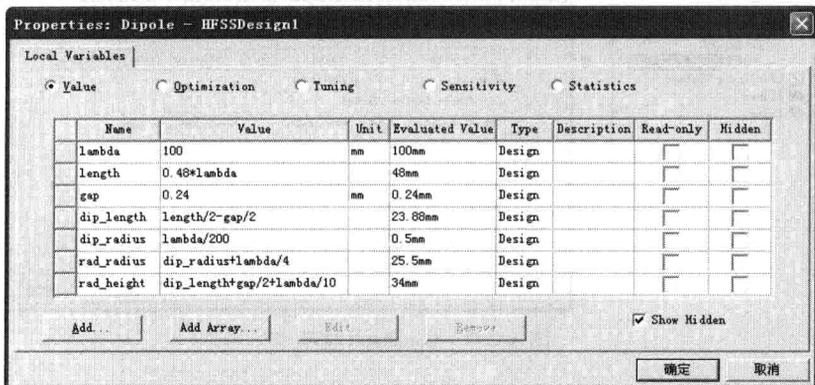


图 3.2.5 定义所有设计变量后的设计属性对话框

3. 设计建模

(1) 创建偶极子天线模型

首先，创建一个沿 z 轴方向放置的细圆柱体模型作为偶极子天线的的一个臂，其底面圆心坐标为 $(0,0,\text{gap}/2)$ ，半径为 dip_radius，长度为 dip_length，材质为理想导体，并将模型命名为 Dipole。然后，通过沿着坐标轴复制操作（Duplicate around axis）生成偶极子天线的另一个臂。

在主菜单栏中选择【Draw】→【Cylinder】命令或者单击工具栏上的  按钮，进入创建圆柱体的状态，然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆柱体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Cylinder1。

双击操作历史树中的 Solids 下的 Cylinder1 节点，打开新建圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡。把圆柱体的名称设置为 Dipole，设置其材质为 pec，如图 3.2.6 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

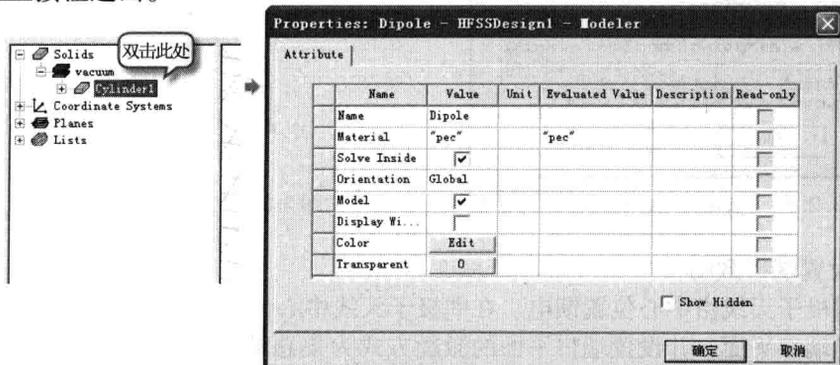


图 3.2.6 Attribute 选项卡

双击操作历史树中的 Dipole 下的 CreateCylinder 节点, 打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度。在对话框的 Center Position 文本框中输入底面圆心坐标为 $(0,0,gap/2)$, 在 Radius 文本框中输入半径值 dip_radius, 在 Height 文本框中输入长度值 dip_length, 如图 3.2.7 所示。然后单击 **确定** 按钮, 完成圆柱体 Dipole 的创建。

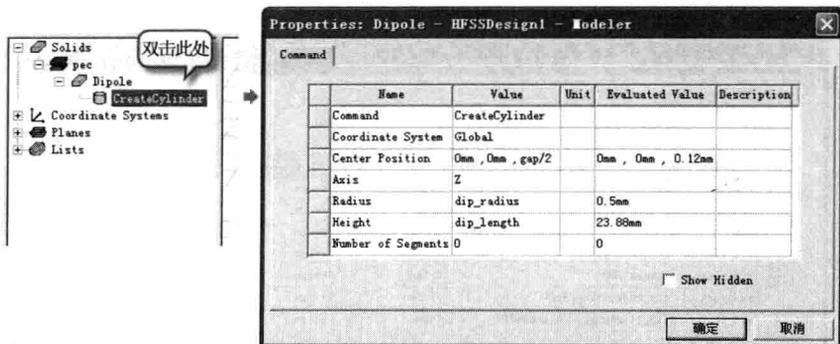


图 3.2.7 Command 选项卡

此时就创建好了名称为 Dipole 的理想导体细圆柱体模型。按快捷键 Ctrl + D 全屏显示所创建的模型。接下来通过沿着坐标轴复制操作, 生成偶极子天线的另一个臂。

选中新创建的圆柱体模型 Dipole, 然后从主菜单栏中选择 **【Edit】** → **【Duplicate】** → **【Around Axis】** 命令或者直接单击工具栏上的  按钮, 执行沿坐标轴复制的操作。此时, 会打开如图 3.2.8 所示的 Duplicate Around Axis 对话框。在该对话框中将 Axis 选项设置为 x 轴, 将 Angle 选项设置为 180deg, 并在 Total number 数值框中输入 2。最后单击 **OK** 按钮, 即可把细导体圆柱 Dipole 沿着 x 轴旋转 180° 复制生成偶极子天线的另一个臂, 同时复制生成的模型自动命名为 Dipole_1。

再次按快捷键 Ctrl + D 全屏显示所有已创建的模型, 如图 3.2.9 所示。

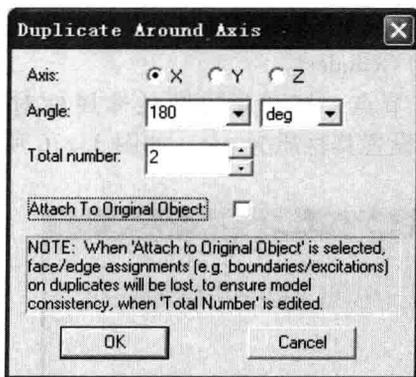


图 3.2.8 Duplicate Around Axis 对话框

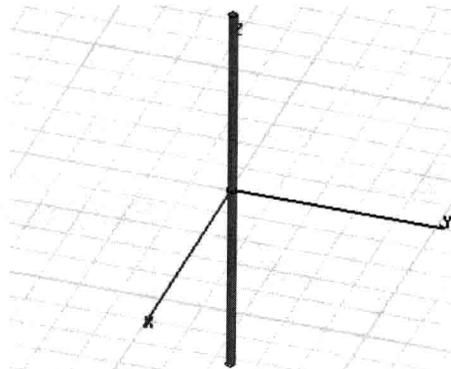


图 3.2.9 偶极子天线模型

(2) 设置端口激励

半波偶极子天线由中心位置馈电。在偶极子天线中心位置创建一个平行于 yz 面的矩形面作为激励端口平面, 并设置端口平面的激励方式为集总端口激励。该矩形面需要把偶极子天线的两个臂连接起来, 因此其顶点坐标为 $(0, -dip_radius, -gap/2)$, 长度和宽度分别为 $2 \times dip_radius$ 和 gap 。

首先,单击工具栏上的 XY 下拉列表框,从其下拉列表中选择 YZ 选项,把当前工作平面设置为 yz 平面。然后,从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令或者单击工具栏上的  按钮,进入创建矩形面的状态。接着在三维模型窗口的 yz 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下,其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树中的 Sheets 下的 Rectangle1 节点,打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡,把矩形面的名称设置为 Port,如图 3.2.10 所示。然后单击 **确定** 按钮退出。

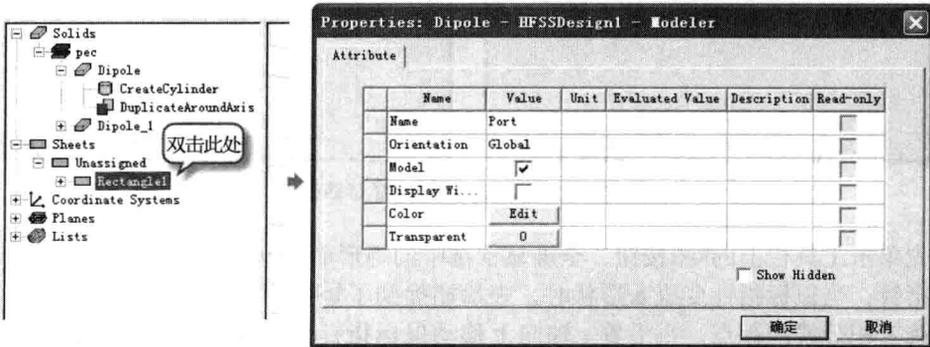


图 3.2.10 Attribute 选项卡

双击操作历史树中的 Port 下的 CreateRectangle 节点,打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡,在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入顶点坐标为 $(0, -dip_radius, -gap/2)$,在 YSize 和 ZSize 文本框中分别输入矩形面的长和宽为 $2 \times dip_radius$ 和 gap ,如图 3.2.11 所示。最后单击 **确定** 按钮退出。

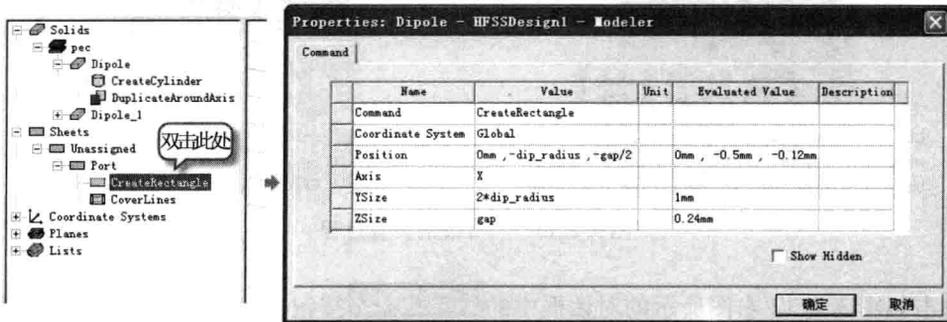


图 3.2.11 Command 选项卡

这样就在 yz 面上创建了一个上下边缘分别与偶极子天线两个臂相接的矩形面 Port,接下来,我们需要设置该矩形面的激励方式为集总端口激励,具体操作方法如下。

首先在操作历史树中的 Sheets 节点下选中该矩形面。然后在其上单击鼠标右键,在弹出的快捷菜单中选择【Assign Excitation】→【Lumped Port】命令,打开如图 3.2.12 所示的集总端口设置对话框。由前面的理论分析可知,半波偶极子天线的输入阻抗约为 73.2Ω 。为了达到良好的阻抗匹配,在 General 对话框中将 Resistance 选项设置为 73.2ohm ,将 Reactance 选项设置为 0ohm 。然后单击 **下一步(N) >** 按钮,打开 Modes 对话框。在该对话框中单击 Integration Line 列下的 None,从其下拉列表中选择 New Line 选项,此时会进入三维模型窗口进行端口积分线的设置。

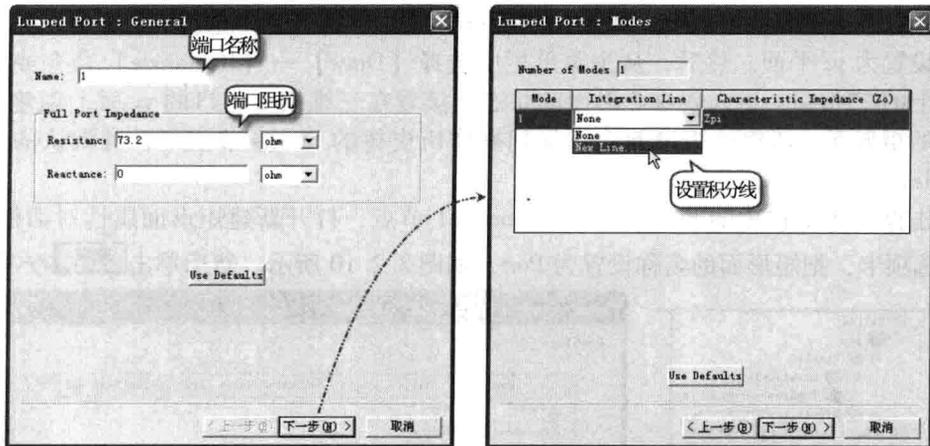


图 3.2.12 集总端口设置对话框

首先单击工具栏上的 按钮，全屏显示选中的矩形面 Port，然后在矩形面下边缘处移动鼠标指针，当鼠标指针变成 \blacktriangle 形状时，表示捕捉到了矩形面下边缘的中点位置。此时单击即可确定积分线的起点。再沿着 z 轴向上移动鼠标指针，当鼠标指针变成 \blacktriangle 形状时，表示捕捉到了矩形面上边缘的中点位置，再次单击以确定积分线的终点。此时积分线设置完成并自动返回到集总端口设置对话框。设置积分线的过程如图 3.2.13 所示。

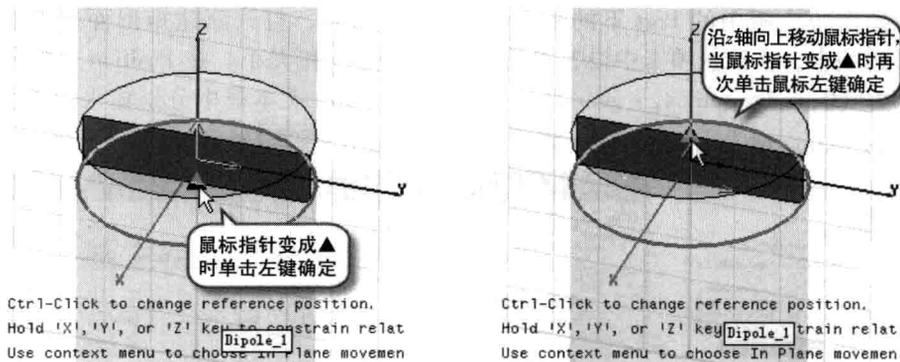


图 3.2.13 积分线的设置过程

单击如图 3.2.12 右图所示的对话框中的 **下一步(N) >** 按钮，打开 Post Processing 对话框，在该对话框中选中 Do Not Renormalize 单选按钮。最后单击 **完成** 按钮，完成集总端口激励的设置。

(3) 设置辐射边界条件

要在 HFSS 中计算分析天线的辐射场，则必须设置辐射边界条件或者 PML 边界条件。当前设计中我们使用辐射边界条件，辐射边界和天线之间的距离为 $1/4$ 个工作波长。这里，我们首先创建一个沿着 z 轴放置的圆柱体模型，其材质为空气 (air)，底面圆心坐标为 $(0,0,-rad_height)$ ，半径为 rad_radius ，高度为 $2 \times rad_height$ 。然后把该圆柱体的表面设置为辐射边界条件。

① 创建辐射边界的圆柱体。

首先，单击工具栏上的 **YZ** 下拉列表框，从其下拉列表中选择 XY 选项，把当前工作平面设置为 xy 平面。然后，从主菜单栏中选择 **【Draw】** \rightarrow **【Cylinder】** 命令或者单击工

具栏上的  按钮，进入创建圆柱体的状态，并在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆柱体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Cylinder1。

双击操作历史树中的 Solids 下的 Cylinder1 节点，打开新建圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡，把圆柱体的名称设置为 Rad_air，设置其材质为 air，设置其透明度为 0.8，如图 3.2.14 所示。最后单击  按钮退出。

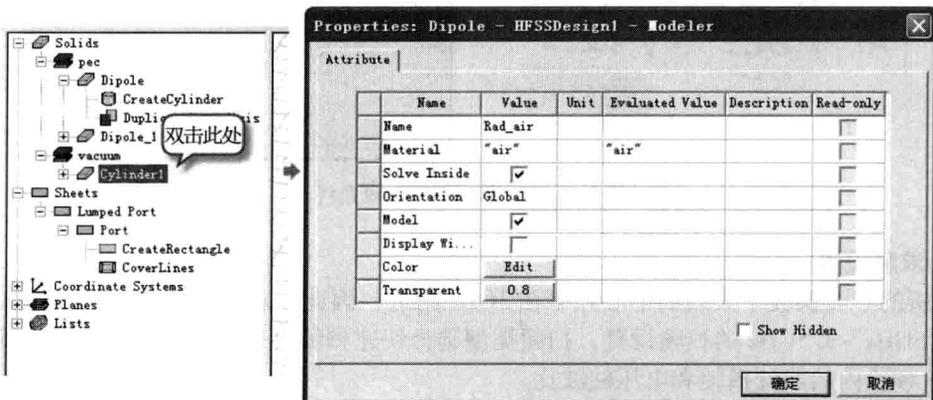


图 3.2.14 Attribute 选项卡

双击操作历史树中的 Rad_air 下的 CreateCylinder 节点，打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度。在 Center Position 文本框中输入底面圆心坐标为 $(0, 0, -\text{rad_height}/2)$ ，在 Radius 文本框中输入半径值 rad_radius，在 Height 文本框中输入长度值 $2 \times \text{rad_height}$ ，如图 3.2.15 所示。然后单击  按钮，完成圆柱体 Rad_air 的创建。

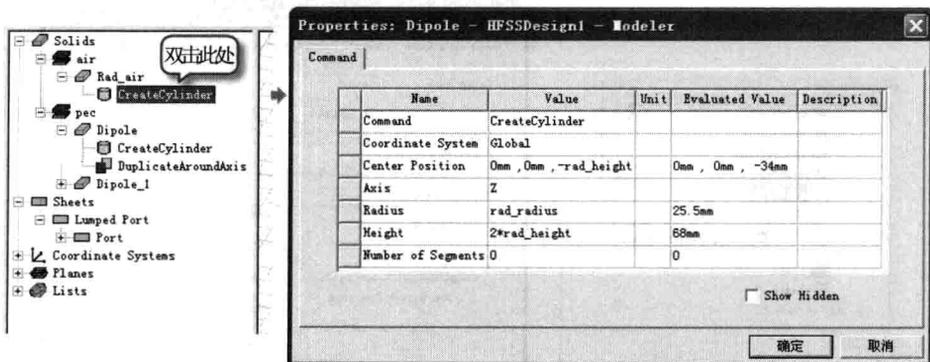


图 3.2.15 Command 选项卡

此时就创建好了名称为 Rad_air 的圆柱体模型。按快捷键 $\text{Ctrl} + \text{D}$ 全屏显示创建的所有模型。

② 设置辐射边界条件。

在操作历史树下单击 Rad_air 节点，以便选中该圆柱体模型。然后在其上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Radiation】命令，打开辐射边界条件设置对话框，如图 3.2.16 所示。在该对话框中保留默认设置，直接单击  按钮，把圆柱体模型 Rad_air 的表面设置为辐射边界条件。

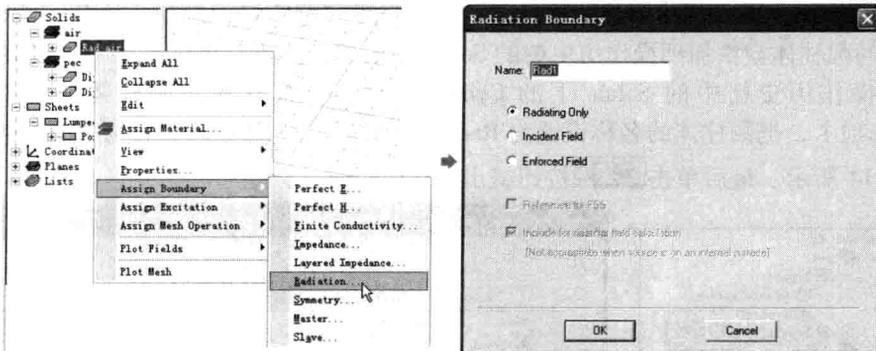


图 3.2.16 设置辐射边界条件

4. 求解设置

分析的半波偶极子天线的中心频率在 3GHz 附近, 因此, 求解频率设置为 3GHz。同时添加 2.5GHz ~ 3.5GHz 的扫频设置, 扫频类型选择快速扫频 (Fast), 分析天线在 2.5GHz ~ 3.5GHz 频段内的回波损耗和电压驻波比。

(1) 求解频率和网格剖分设置

设置求解频率为 3GHz, 自适应网格剖分的最大迭代次数为 20, 收敛误差为 0.02。

右键单击工程树下的 Analysis 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Add Solution Setup】命令, 打开 Solution Setup 对话框。在该对话框中的 Solution Frequency 文本框中输入求解频率 3GHz, 在 Maximum Number of Passes 文本框中输入最大迭代次数 20, 在 Maximum Delta S 文本框中输入收敛误差 0.02, 其他选项保持默认设置, 如图 3.2.17 所示。然后单击 **确定** 按钮, 完成求解设置。

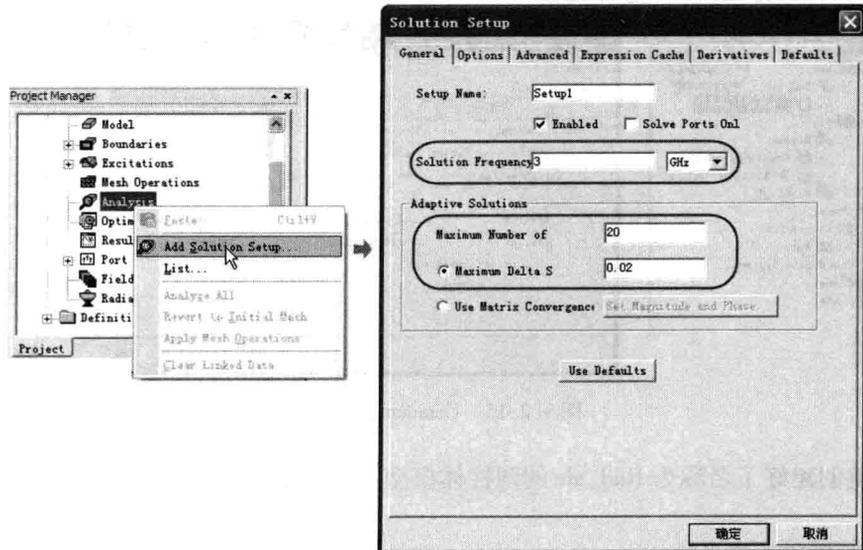


图 3.2.17 求解设置

设置完成后, 求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

(2) 扫频设置

扫频类型选择快速扫频, 扫频频率范围为 2.5GHz ~ 3.5GHz, 频率步进为 0.001GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点，右键单击前面添加的求解设置项 Setup1，在弹出的快捷菜单中选择【Add Frequency Sweep】命令，打开 Edit Sweep 对话框，如图 3.2.18 所示。在 Sweep Type 下拉列表框中设置扫频类型为 Fast。在 Frequency Setup 选项组中的 Type 下拉列表中选择 LinearStep 选项，并且设置 Start 为 2.5GHz，Stop 为 3.5GHz，Step Size 为 0.001GHz，其他选项都保留默认设置。最后单击对话框中的 **OK** 按钮，完成设置。

设置完成后，该扫频设置项的名称 Sweep1 会添加到工程树的求解设置项 Setup1 节点下。

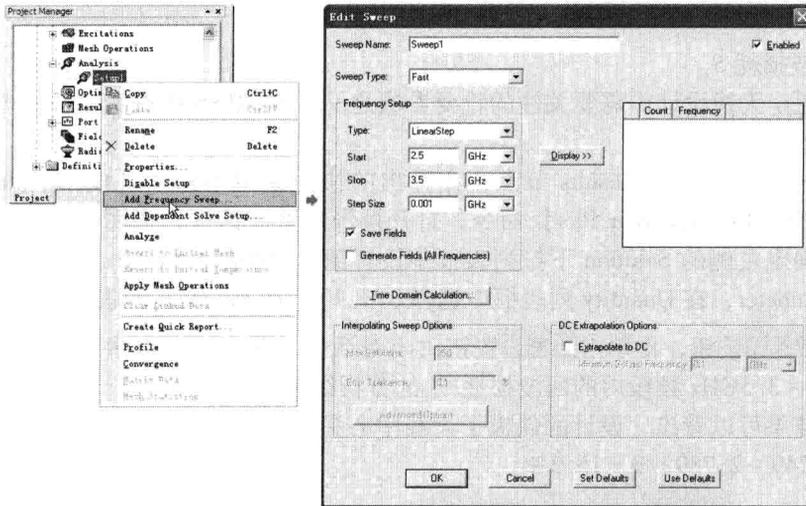


图 3.2.18 扫频设置

5. 设计检查和运行仿真计算

通过前面的操作，我们已经完成了偶极子天线模型的创建和求解设置等 HFSS 设计的前期工作，接下来就可以运行仿真计算并查看分析结果了。但在运行仿真计算之前，通常需要进行设计检查，检查设计的完整性和正确性。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令或者单击工具栏上的  按钮，进行设计检查。此时，会打开如图 3.2.19 所示的 Validation Check 对话框，该对话框中的每一项前面都显示  图标，表示当前的 HFSS 设计正确且完整。单击 **Close** 按钮，关闭对话框，接下来开始运行仿真计算。

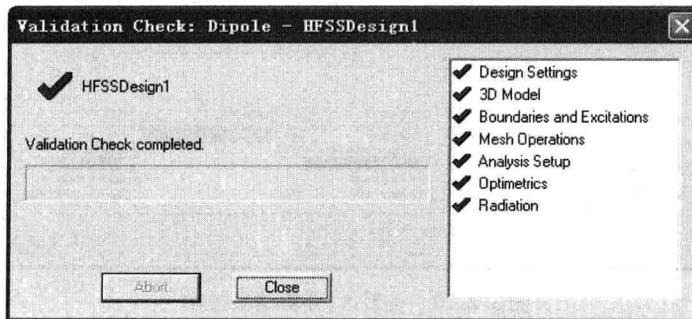


图 3.2.19 设计检查结果对话框

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze All】命令或

者单击工具栏上的  按钮, 开始运行仿真计算。

在仿真计算过程中, 工作界面右下方的进度条窗口会显示出求解进度, 信息管理窗口也会有相应的信息说明, 并会在仿真计算完成后给出完成提示信息。

6. HFSS 天线问题的数据后处理

HFSS 拥有强大的数据后处理功能, 仿真分析完成后, 在数据后处理部分能够给出天线的各项性能参数的仿真分析结果, 如回波损耗、驻波比、Smith 圆图、输入阻抗和方向图等。下面我们就借助半波偶极子天线设计实例来讲解 HFSS 中查看天线各项性能参数的具体操作。

(1) 回波损耗 S_{11}

回波损耗是天线设计中需要关注的重要参数之一, 在 HFSS 中查看回波损耗 S_{11} 的具体操作步骤如下。

右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令, 打开报告设置对话框, 如图 3.2.20 所示。在该对话框中, 确定左侧的 Solution 下拉列表框中设置的是 Setup1; Sweep1, 在 Category 列表框中选择 S Parameter, 在 Quantity 列表框中选择 S(1,1), 在 Function 列表框中选择 dB。然后单击 **New Report** 按钮, 再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时, 可以生成如图 3.2.21 所示的在 2.5GHz ~ 3.5GHz 频段内的回波损耗 S_{11} 的分析结果。

从分析结果可以看出, 设计的偶极子天线中心频率约为 3GHz, $S_{11} < -10\text{dB}$ 的相对带宽 $BW = (3.249 - 2.789)/3 = 15.3\%$ 。

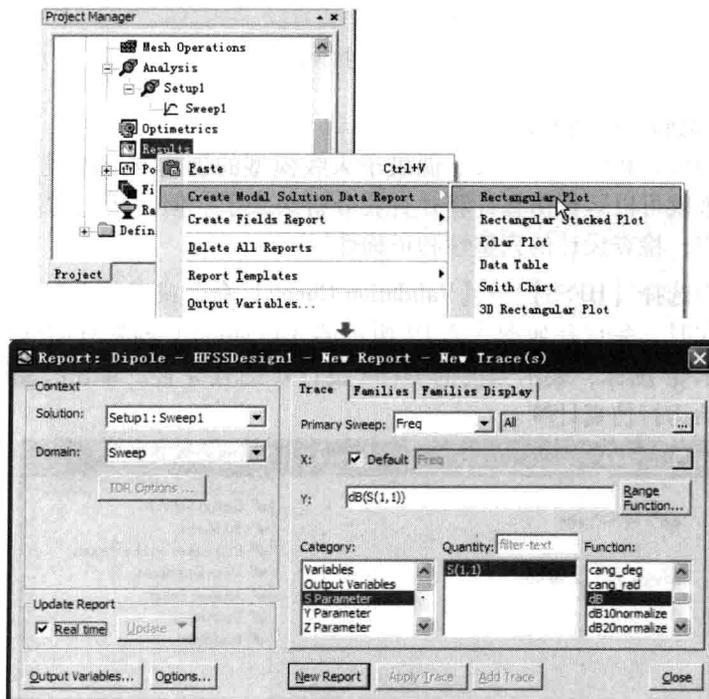
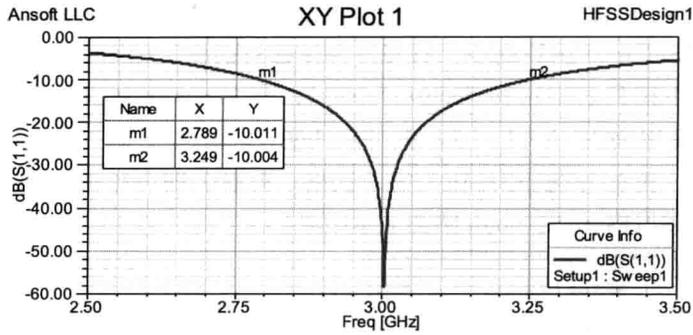


图 3.2.20 查看 S_{11} 分析结果操作

(2) 电压驻波比 VSWR

查看天线电压驻波比的操作和查看回波损耗 S_{11} 的操作相似。同样是右键单击工程树下

图 3.2.21 S_{11} 的扫频分析结果

的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。在该对话框左侧的 Solution 下拉列表中选择 Setup1:Sweep1，在 Category 列表框中选中 VSWR，在 Quantity 列表框中选中 VSWR(1)，在 Function 列表框中选中 < none >，如图 3.2.22 所示。然后单击 **New Report** 按钮，再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时生成天线的电压驻波比分析结果，如图 3.2.23 所示。

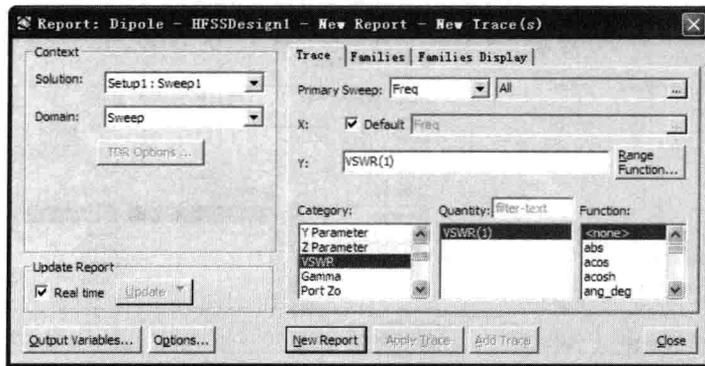


图 3.2.22 查看驻波比的设置

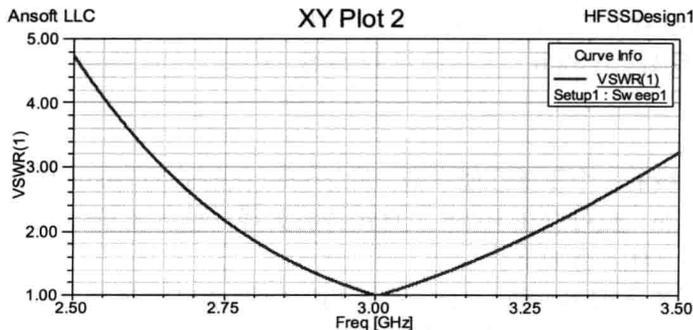


图 3.2.23 半波偶极子天线的驻波比分析结果

(3) Smith 圆图

在天线的设计中，Smith 圆图是一个很有用的工具。借助于 Smith 圆图，能够方便地进行阻抗匹配，给出驻波比，归一化输入阻抗等各种信息。进行 HFSS 天线设计时，通过 Smith 圆图查看归一化输入阻抗的具体操作如下。

右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Smith Chart】命令, 打开报告设置对话框, 如图 3.2.24 所示。在该对话框左侧的 Solution 下拉列表中选择 Setup1:Sweep1, 在 Category 列表框中选中 S Parameter, 在 Quantity 列表框中选中 S(1,1), 在 Function 列表框中选中 <none>。然后单击 **New Report** 按钮, 再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时, 即可生成如图 3.2.25 所示的在 2.5GHz~3.5GHz 频段内 S_{11} 的 Smith 圆图显示结果。

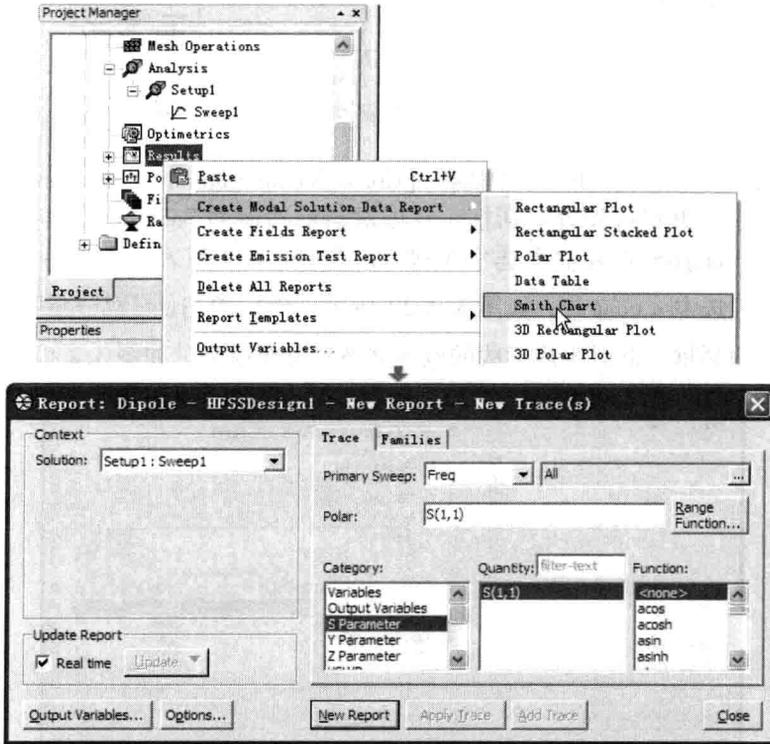


图 3.2.24 查看 Smith 圆图的操作

从 Smith 圆图结果中可以看出, 在中心频率为 3GHz 时的归一化阻抗约为 1, 说明天线的端口阻抗匹配良好。VSWR < 2 (即反射系数 $|\Gamma| < 1/3$) 的频率范围约为 2.78GHz~3.27GHz。

(4) 输入阻抗

输入阻抗是天线的一个重要性能参数, 除了可以在前面的 Smith 圆图结果中查看天线的归一化输入阻抗外, 也可以在 HFSS 中直接查看天线的输入阻抗值, 其操作和查看回波损耗的操作类似, 具体步骤如下。

右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令, 打开报告设置对话框。在该对话框左侧的 Solution 下拉列表中选择 Setup1:Sweep1, 在 Category 列表框中选中 Z Parameter, 在 Quantity 列表框中选中 Z(1,1), 在 Function 列表框中同时选中 im 和 re, 表示同时查看输入阻抗的虚部 (即电抗部分) 和实部 (即电阻部分), 如图 3.2.26 所示。然后单击 **New Report** 按钮, 再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时, 可以给出天线的输入阻抗结果报告, 如图 3.2.27 所示。

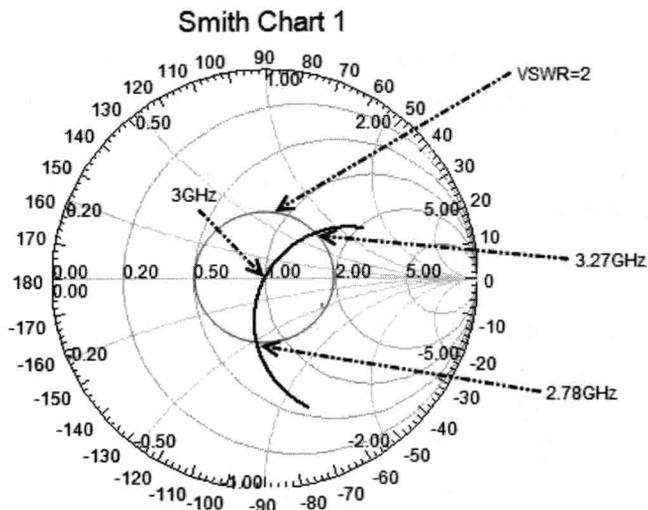


图 3.2.25 半波偶极子天线的 S_{11} 的 Smith 圆图分析结果

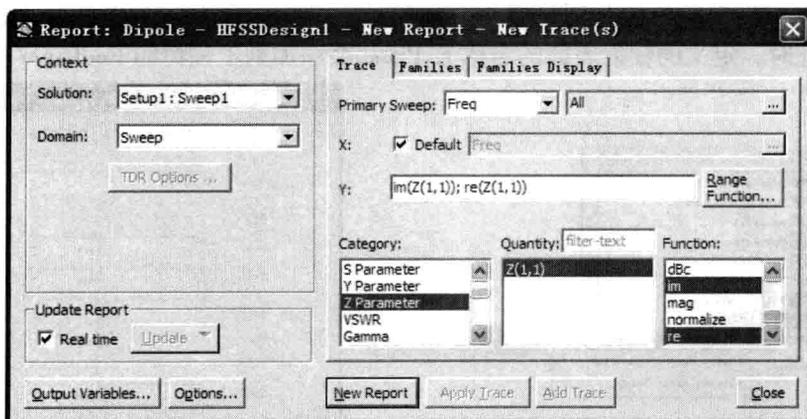


图 3.2.26 查看输入阻抗的设置

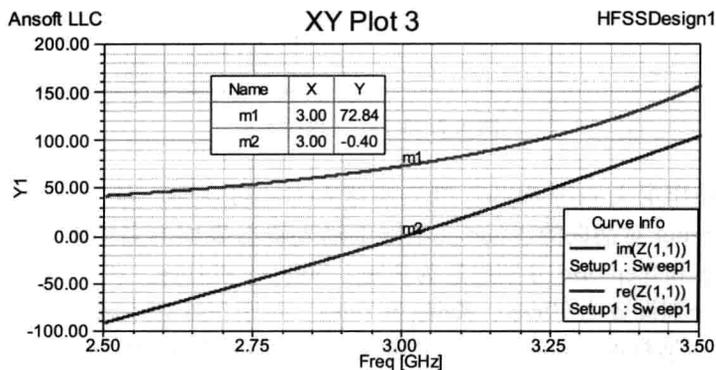


图 3.2.27 半波偶极子天线的输入阻抗结果报告

从结果报告中可以看出，设计的半波偶极子天线在中心频率 3GHz 上，输入阻抗为 $(72.8 - j0.4)\Omega$ ，和 3.1 节中的式 (3-1-17) 的理论分析结果十分接近。

(5) 方向图

天线方向图是方向性函数的图形表示, 它可以形象地描绘天线辐射特性随着空间方向坐标变化的关系, 是衡量天线性能的重要图形。在天线方向图中可以观察到天线的多项性能参数。在 HFSS 后处理部分可以方便地绘制出天线的平面方向图和三维立体方面图。天线方向图是在远场区确定的, 要查看天线的远区场的计算结果, 首先需要定义辐射表面。下面我们就来讲解查看半波偶极子天线在 xz 平面和 xy 平面的增益方向图, 以及查看半波偶极子天线三维立体增益方向图的具体操作。

① 定义辐射表面。

辐射表面是基于球坐标系定义的。 xz 平面即球坐标系下 $\varphi = 0^\circ$ 的平面, xy 平面即球坐标系下 $\theta = 90^\circ$ 的平面, 而三维立体球面在球坐标下则表示为 $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ 、 $0 \leq \varphi \leq 360^\circ$ 。下面依次定义 xz 平面、 xy 平面和三维立体球面为辐射表面。

定义 xz 平面为辐射表面的具体操作为: 右键单击工程树下的 Radiation 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Insert Far Field Setup】→【Infinite Sphere】命令, 打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框, 如图 3.2.28 所示。在该对话框中的 Name 文本框中输入辐射表面的名称 E_Plane, 将 Phi 选项组中的 Start、Stop 和 Step Size 均设置为 0deg, 将 Theta 选项组中的 Start、Stop 和 Step Size 分别设置为 -180deg 、 180deg 和 1deg 。然后单击 **确定** 按钮, 完成设置。此时, 定义的辐射表面的名称 E_Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

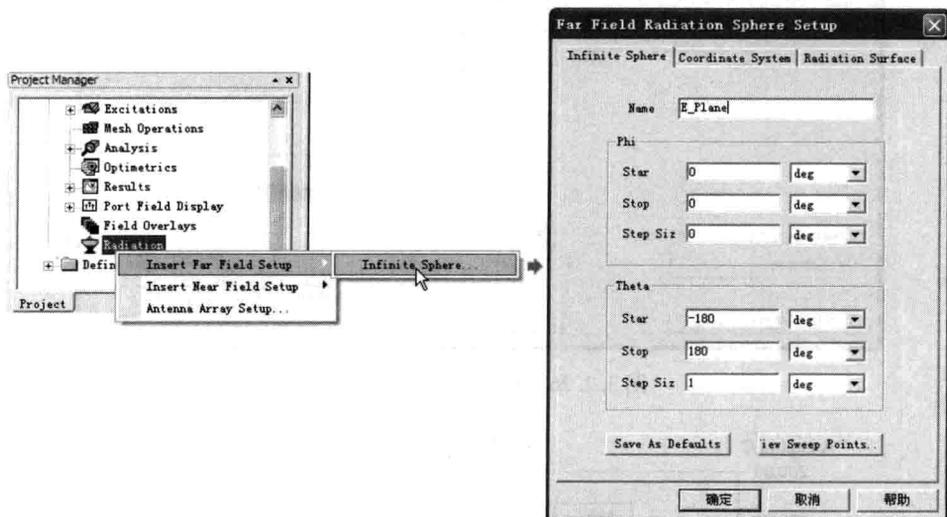


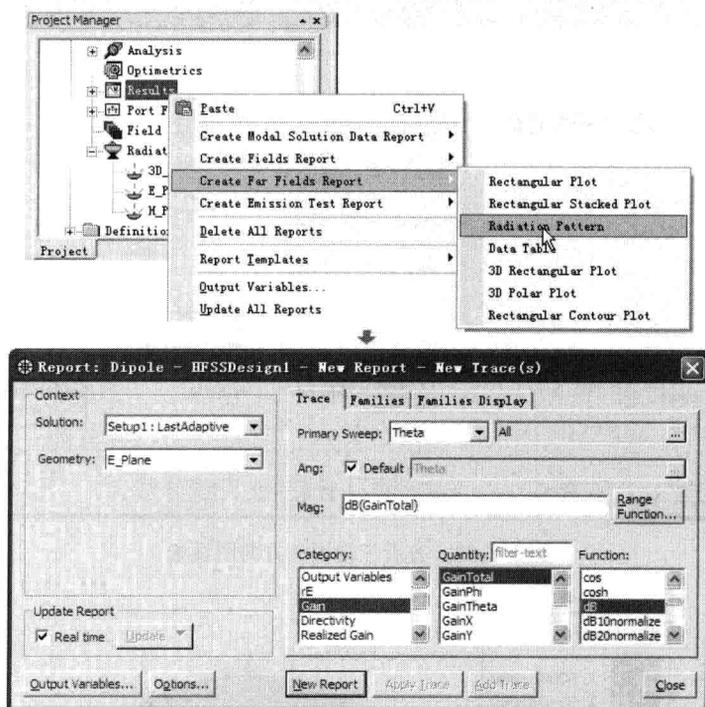
图 3.2.28 定义辐射表面

使用相同的操作定义 xy 平面和三维立体球面为辐射表面。对于 xy 平面, 在 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框的 Name 文本框中输入辐射表面的名称 H_Plane, 将 Phi 选项组中的 Start、Stop 和 Step Size 分别设置为 0deg 、 360deg 和 1deg , 将 Theta 选项组中的 Start、Stop 和 Step Size 分别设置为 90deg 、 90deg 和 0deg 。对于三维立体球面, 在 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框的 Name 文本框中输入辐射表面的名称 3D_Sphere, 将 Phi 选项组中的 Start、Stop 和 Step Size 分别设置为 0deg 、 360deg 和 1deg , 将 Theta 选项组中的 Start、Stop 和 Step Size 分别设置为 0deg 、 180deg 和 1deg 。

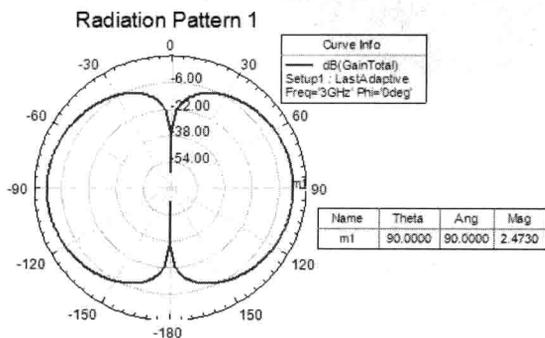
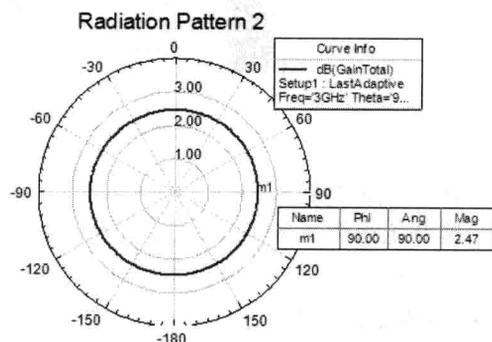
这样在工程树的 Radiation 节点下就添加了三个辐射表面, 名称分别为 E_Plane、H_Plane 和 3D_Sphere。

② 查看 xz 面的增益方向图。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Radiation Pattern】命令，打开报告设置对话框，如图 3.2.29 所示。在该对话框中的 Geometry 下拉列表中选择前面定义的辐射表面 E_Plane，在 Primary Sweep 下拉列表中选择 Theta 选项，在 Category 列表框中选择 Gain，在 Quantity 列表框中选择 GainTotal，在 Function 列表框中选择 dB，然后单击 **New Report** 按钮，生成极坐标系下天线的 xz 面增益方向图，如图 3.2.30 所示。

图 3.2.29 查看 xz 面增益方向图操作③ 查看 xy 面的增益方向图。

使用和前面相同的操作方法，只是在如图 3.2.29 所示对话框的 Geometry 下拉列表中选择辐射表面 H_Plane，在 Primary Sweep 下拉列表中选择 Phi 选项，这样即可生成如图 3.2.31 所示的 xy 面增益方向图。

图 3.2.30 半波偶极子天线 xz 面增益方向图图 3.2.31 半波偶极子天线 xy 面增益方向图

④ 查看三维增益方向图。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【3D Polar Plot】命令，打开如图 3.2.32 所示的报告设置对话框。在该对话框的 Geometry 下拉列表中选择前面定义的辐射面 3D_Sphere，在 Category 列表框中选择 Gain，在 Quantity 列表框中选择 GainTotal，在 Function 列表框中选择 dB。然后单击 **New Report** 按钮，即可生成半波偶极子天线的三维增益方向图，如图 3.2.33 所示。

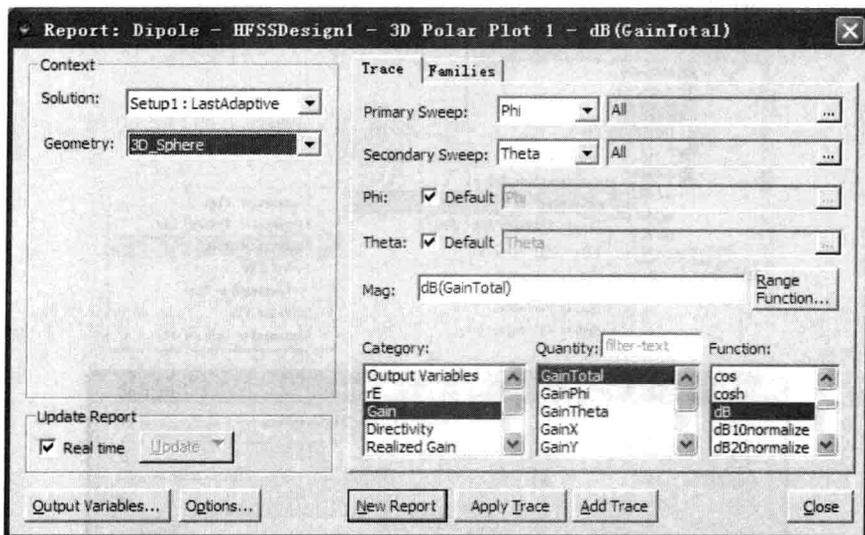


图 3.2.32 查看三维增益方向图设置

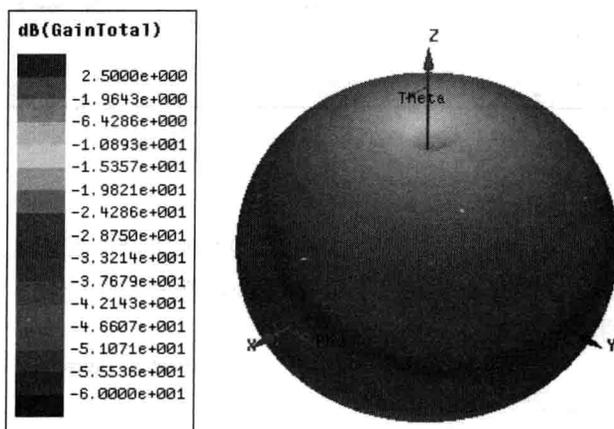


图 3.2.33 半波偶极子天线三维增益方向图

(6) 其他参数

展开工程树下的 Radiation 节点，右键单击相应辐射表面的名称，这里右键单击 3D_Sphere，在弹出的快捷菜单中选择【Compute Antenna Parameters】命令，打开 Antenna Parameters 对话框。然后直接单击该对话框中的 **确定** 按钮，此时可以给出天线在该辐射表面上的最大辐射强度、方向性系数、最大场强及其所在方向等参数。整个操作过程如图 3.2.34 所示。

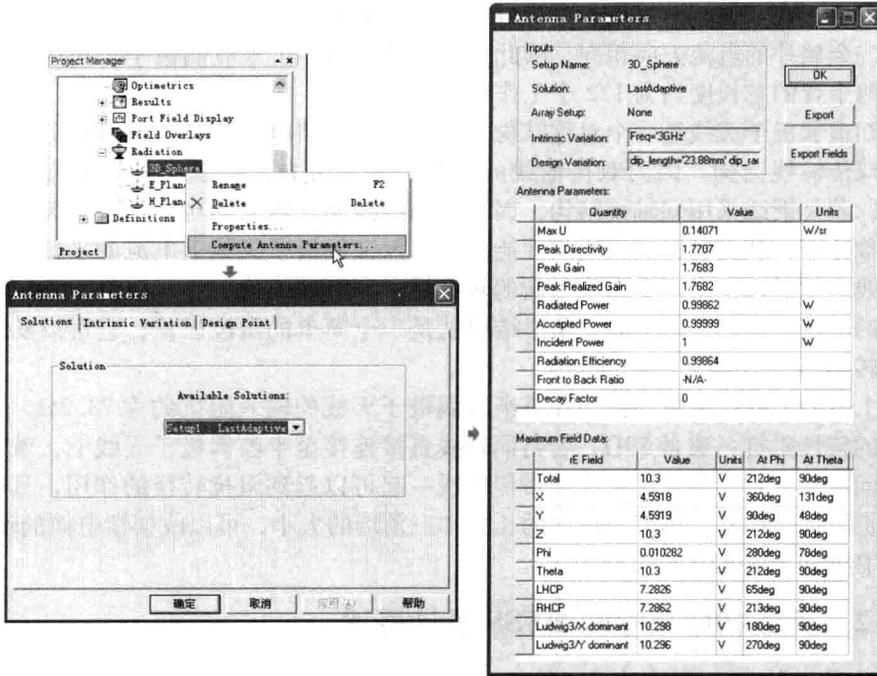


图 3.2.34 查看其他天线参数

7. 保存设计

至此，我们便完成了使用 HFSS 分析半波偶极子天线的操作，在设计中我们查看了半波偶极子天线的各项性能参数。最后，单击工具栏上的  按钮保存设计，再从主菜单栏中选择【File】→【Exit】命令退出 HFSS。

3.3 印刷偶极子天线设计

本节使用 HFSS 设计一个中心频率为 2.45GHz 的微带巴伦馈线的印刷偶极子天线，并通过 HFSS 软件 Optimetrics 模块的参数扫描分析功能对印刷偶极子天线的一些重要结构参数进行参数扫描分析，分析这些参数对天线性能的影响。

3.3.1 印刷偶极子天线的结构

图 3.3.1 所示为设计的微带巴伦馈线印刷偶极子天线的结构模型，该天线属于半波偶极子天线的变形。整个天线结构大致可以分为 5 部分，即介质层、偶极子天线臂、微带巴伦线、微带传输线和天线馈电面。

介质层的材质为环氧树脂玻璃纤维板 (FR4)，其相对介电常数 $\epsilon_r = 4.4$ 。在介质层的两面分别敷有良导体的金属传输线，构成偶极子天线的两个臂、微带传输线和微带巴伦线。激励信号从天线馈电点处馈入，经过微带巴伦结构和微带传输线传输到偶极子天

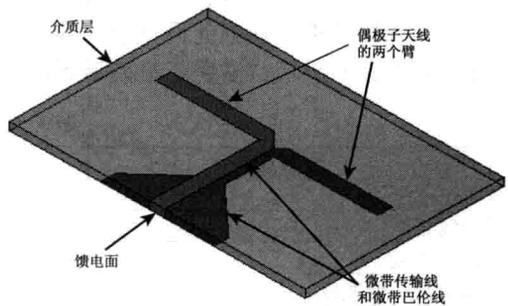


图 3.3.1 印刷偶极子天线的结构模型

线。激励信号从天线馈电点处馈入，经过微带巴伦结构和微带传输线传输到偶极子天

线的两个臂上。在微带传输线上, 电流方向相反, 因此不会辐射电磁波。在偶极子天线的两个臂上, 金属片的电流方向相同, 因此会辐射电磁波。由半波偶极子天线的理论分析可知, 天线两个臂的总长度约为 $1/2$ 个工作波长。

我们知道偶极子天线是一个对称结构, 传输线上的馈电电流必须是对称分布的。若是馈线采用双传输线结构, 因为双传输线的电流为对称分布, 所以天线的电流亦为对称分布。然而, 若是馈线采用同轴线结构, 因为同轴线内外导体并不对称, 所以天线上的电流也不会对称分布, 从而会影响天线的性能。为了保证偶极子天线上电流的平衡, 通常在天线和同轴线之间插入一个不平衡到平衡的转换器, 即微波巴伦, 它可以将不平衡的电流转换成平衡的电流。图 3.3.1 中的三角形结构就是一个简单的微波巴伦, 它可以实现不平衡到平衡的转换。

从 3.1 节的分析结果中, 我们知道半波偶极子天线的输入阻抗约为 73.2Ω , 而馈电端口同轴线的特性阻抗一般是 50Ω , 若将同轴线直接连接至半波偶极子天线上, 就会有阻抗不匹配的问题。三角形微带巴伦和微带传输线一起可以起到阻抗转换的作用, 其作用相当于 $1/4$ 波长阻抗转换器。调节传输线的长度和三角形的大小, 可以改变馈电面的输入阻抗, 达到 50Ω 阻抗匹配的目的。

3.3.2 天线初始尺寸和 HFSS 设计概述

所设计天线的中心频率为 2.45GHz , 若在自由空间中传播, 对应的工作波长约为 122mm 。若在全部填充以 FR4 材质的介质中传播, 其对应的工作波长约为 58mm 。若我们采用自由空间波长, 则半波偶极子天线两个臂的总长度约为 61mm 。若我们采用介质中的波长, 则半波长偶极子天线两个臂的总长度约为 29mm 。因为印刷偶极子天线同时包含介质与自由空间, 所以印刷偶极子天线臂的实际长度应该介于 29mm 和 61mm 之间, 我们取二者的平均值 45mm 作为印刷偶极子天线两个臂总长度的初始值, 然后再使用 HFSS 软件分析给出印刷偶极子天线长度的实际值。

在相对介电常数为 4.4、厚度为 1.6mm 的 FR4 介质板上, 微带线结构对应的导波波长约为 68mm , $1/4$ 波长约为 17mm 。对于设计中的微带传输线, 长度应该略大于 17mm , 设计中初始值取 22mm 。

对于三角形的微带巴伦结构, 两个直角边的长度初始值分别取 12mm 和 10mm 。设计中, 金属传输线的宽度初始值都取 3mm 。

为了便于后续的参数化分析, 即分析天线的各项结构参数 (如天线臂的长度、微带巴伦三角形的大小) 对天线性能的影响, 在 HFSS 设计建模时, 我们需要定义一系列的变量来表示天线的结构。在当前设计中, 我们定义的变量名称、代表的结构参数以及变量的初始值如表 3.3.1 所示。使用变量表示后的印刷偶极子天线参数化设计模型如图 3.3.2 所示。

表 3.3.1 变量定义

变量意义	变量名	变量值 (单位: mm)
介质层厚度	H	1.6
传输线宽度	W1	3
传输线长度	L1	22
偶极子天线臂宽度	W2	3
偶极子一个臂长度	L2	21
巴伦三角形侧边直角边长	L3	10
巴伦三角形底边直角边长	L4	12
微波巴伦长方形部分的宽度	W3	3

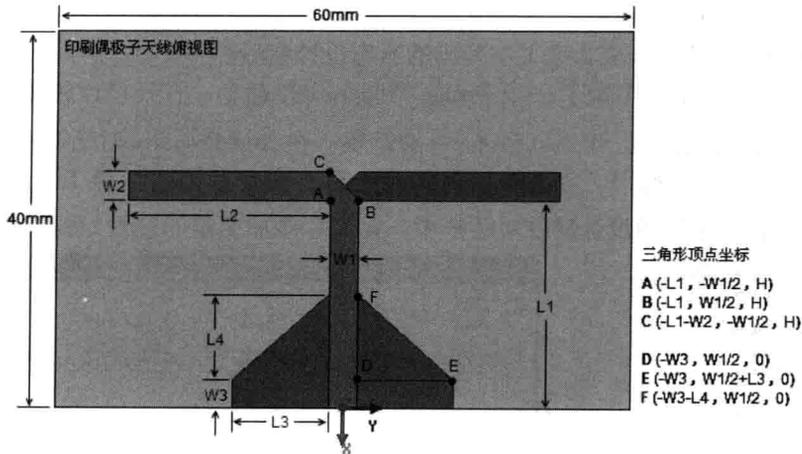


图 3.3.2 印刷偶极子天线参数化模型

设计中，我们首先在 HFSS 中创建如图 3.3.2 所示的印刷半波偶极子天线参数化模型，仿真分析出该天线模型的性能。然后再分别分析偶极子天线臂的长度、微带巴伦三角形的大小以及微带传输线的长度对天线性能的影响。

3.3.3 HFSS 仿真设计

1. 新建设计工程

(1) 运行 HFSS 并新建工程

双击桌面上的 HFSS 快捷方式图标，启动 HFSS 软件。HFSS 运行后会自动新建一个工程文件，选择主菜单栏中的【File】→【Save As】命令，把工程文件另存为 Dipole2.hfss 文件。

(2) 设置求解类型

将当前设计的求解类型设置为模式驱动求解类型。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Solution Type】命令，打开如图 3.3.3 所示的 Solution Type 对话框。选中 Driven Modal 单选按钮，然后单击  按钮，完成设置。

(3) 设置模型长度单位

设置当前设计在创建模型时所使用的默认长度单位为毫米。

从主菜单栏中选择【Modeler】→【Units】命令，打开如图 3.3.4 所示的 Set Model Units 对话框。在该对话框中的 Select units 下拉列表中选择毫米单位，即 mm。然后单击  按钮，退出对话框，完成设置。

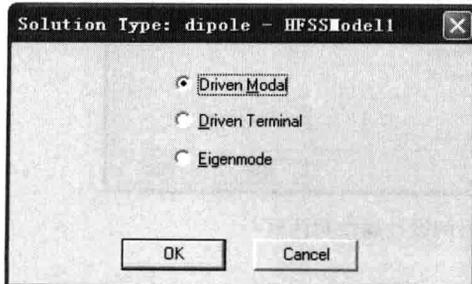


图 3.3.3 设置求解类型

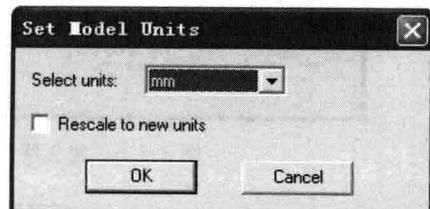


图 3.3.4 设置长度单位

2. 添加和定义设计变量

在 HFSS 中定义并添加表 3.3.1 中列出的所有设计变量。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框，单击对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add Property 对话框。在 Add Property 对话框中的 Name 文本框中输入第一个变量名称 H，在 Value 文本框中输入该变量的初始值 1.6mm，然后单击 **OK** 按钮，添加变量 H 到设计属性对话框中。定义和添加变量的过程如图 3.3.5 所示。

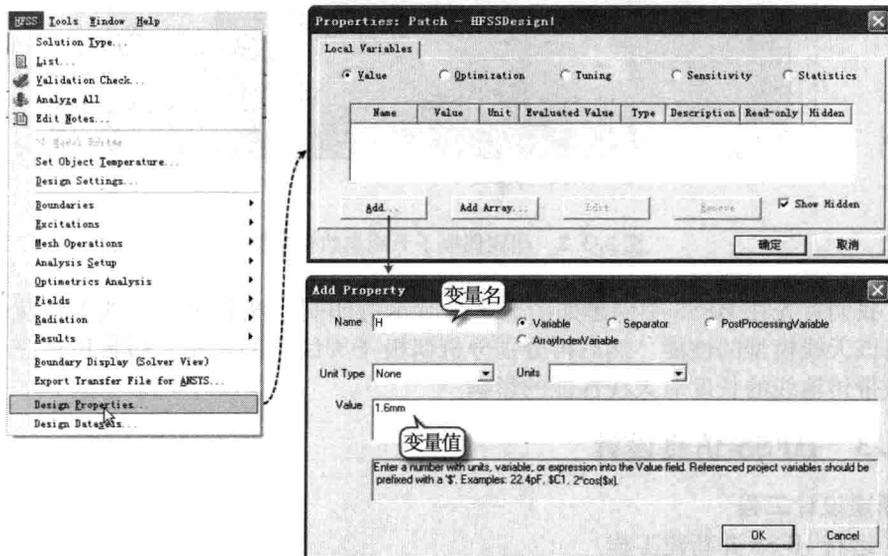


图 3.3.5 定义并添加变量

使用相同的操作步骤分别定义变量 W1、L1、W2、L2、L3、L4 和 W3，其初始值分别为 3 mm、22 mm、3 mm、21 mm、10 mm、12 mm 和 3 mm。定义完成后的设计属性对话框如图 3.3.6 所示。

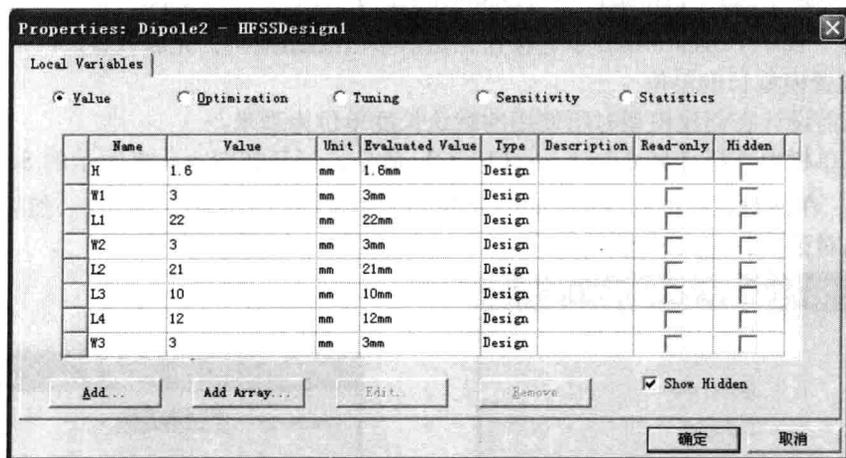


图 3.3.6 定义所有设计变量后的设计属性对话框

最后单击设计属性对话框中的 **确定** 按钮，完成所有变量的定义和添加工作，退出设计属性对话框。

3. 设计建模

(1) 创建介质层

创建一个长方体模型用以表示介质基片，模型的底面位于 xoy 平面，模型的材质为 FR4，并将该模型命名为 Substrate。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令或者单击工具栏上的  按钮，进入创建长方体的状态，然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树的 Solids 下的 Box1 节点，打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡。把长方体的名称设置为 Substrate，设置其材质为 FR4_epoxy，设置其颜色为深绿色，设置其透明度为 0.6，如图 3.3.7 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

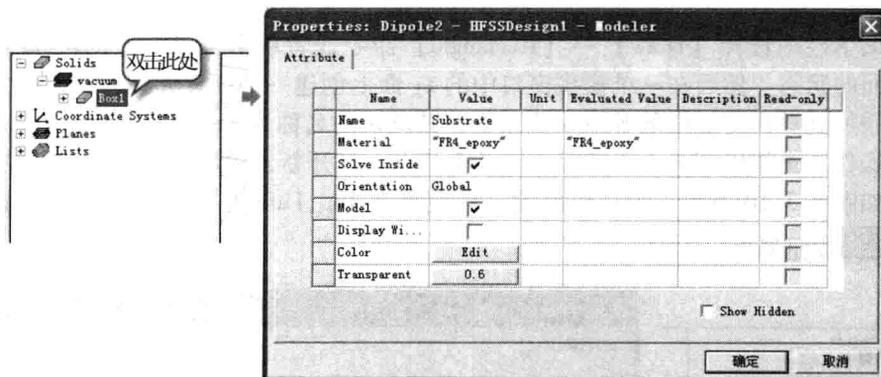


图 3.3.7 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Substrate 节点下的 CreateBox，打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和大小尺寸。在 Position 文本框中输入长方体顶点的坐标 $(-40, -30, 0)$ ，在 XSize、YSize 和 ZSize 文本框中设置长方体的长、宽和高分别为 40、60 和 H，如图 3.3.8 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

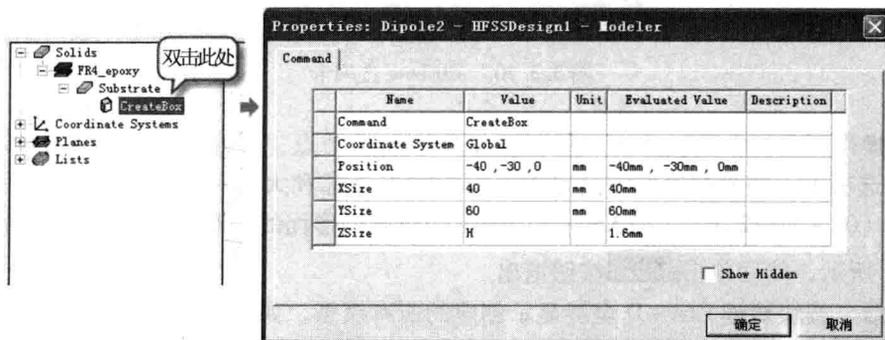


图 3.3.8 Command 选项卡

此时就创建好了名为 Substrate 的介质基片模型。然后按快捷键 $Ctrl + D$ 全屏显示创建的长方体模型。

(2) 创建上层金属片

创建位于介质层上表面的 L 形金属片，其形状如图 3.3.9 所示。其具体步骤为：创建一个矩形面用以表示上表面的传输线，并将其命名为 Top_Patch；再创建第二个矩形面用以

表示位于介质层上表面的偶极子天线的左侧臂,并将其命名为 Dip_Patch;创建一个三角形面用作连接 Top_Patch 和 Dip_Patch 的 45°斜切角,将其命名为 polyline1。最后使用合并操作将这三个平面合并成一个整体。

① 创建上表面传输线。

在介质层的上表面创建一个矩形面,用以表示上表面的传输线,其长、宽分别用变量 L1 和 W1 表示,并将矩形面命名为 Top_Patch。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令或者单击工具栏上的  按钮,进入创建矩形面的状态。然后在三维模型窗口中的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下,其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle1 节点,打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡,如图 3.3.10 所示。把矩形面的名称设置为 Top_Patch,设置其颜色为铜黄色。然后单击 **确定** 按钮退出。

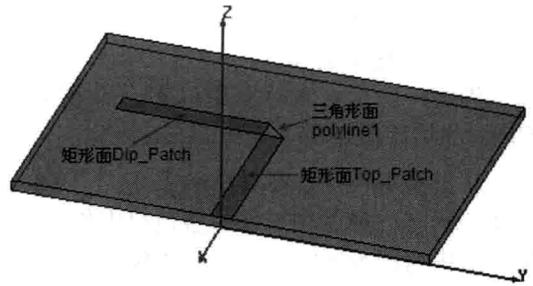


图 3.3.9 介质层上表面金属片模型

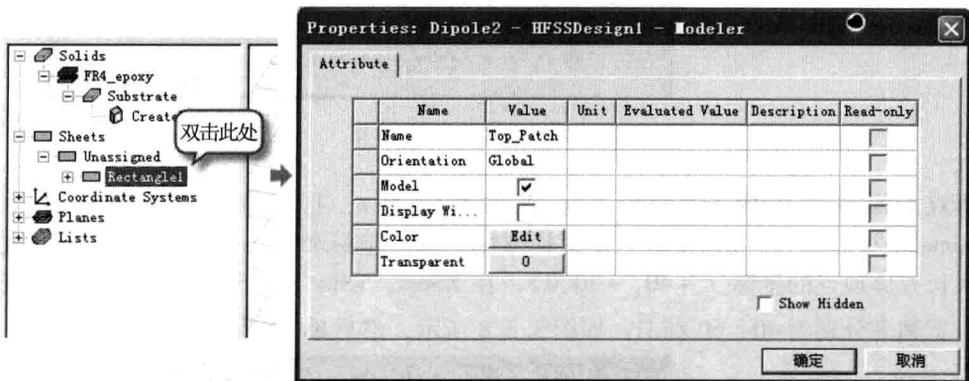


图 3.3.10 Attribute 选项卡

双击操作历史树中 Top_Patch 下的 CreateRectangle 节点,打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡,在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小尺寸。在 Position 中设置顶点坐标为 $(0, -W1/2, H)$,在 XSize 和 YSize 中设置矩形面的长和宽分别为 $-L1$ 和 $W1$,如图 3.3.11 所示,然后单击 **确定** 按钮退出。

完成后,按快捷键 Ctrl + D 全屏显示创建的所有模型,如图 3.3.12 所示。

② 创建偶极子位于介质层上表面的一个臂。

使用和前面相同的操作创建一个矩形面,用以表示偶极子位于介质层上表面的一个臂。该矩形的一个顶点和矩形面 Top_Patch 相接,矩形面的长宽分别用变量 L2 和 W2 表示,矩形的名称设为 Dip_Patch,完成后的形状如图 3.3.13 所示。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令或者单击工具栏上的  按钮,进入创建矩形面的状态,然后在三维模型窗口中的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下,其默认的名称为 Rectangle1。

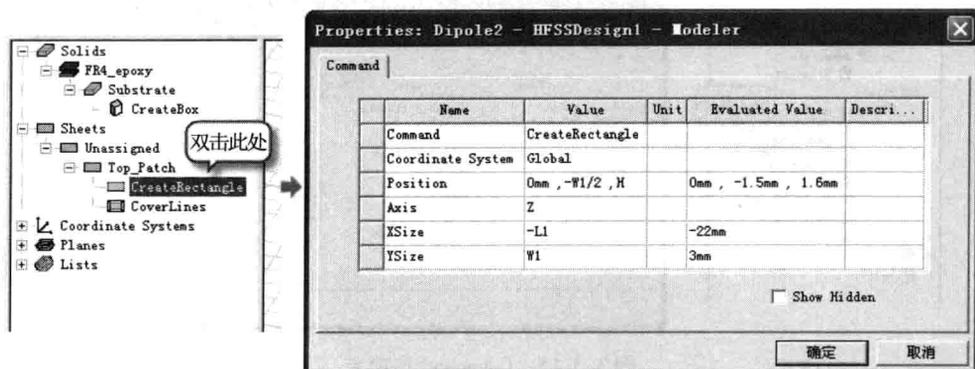


图 3.3.11 Command 选项卡

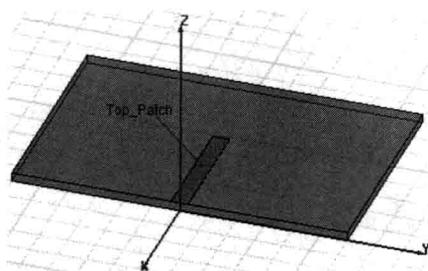


图 3.3.12 上层传输线

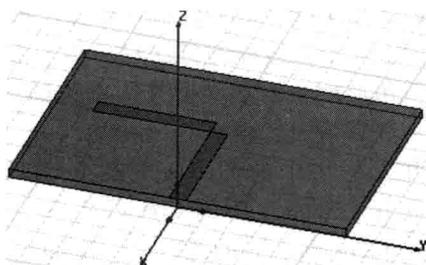


图 3.3.13 上层传输线和偶极子的一个臂

双击操作历史树中的 Sheets 下的 Rectangle1 节点，打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡，如图 3.3.14 所示。把矩形的名称设置为 Dip_Patch，并设置其颜色为铜黄色，然后单击 **确定** 按钮退出。

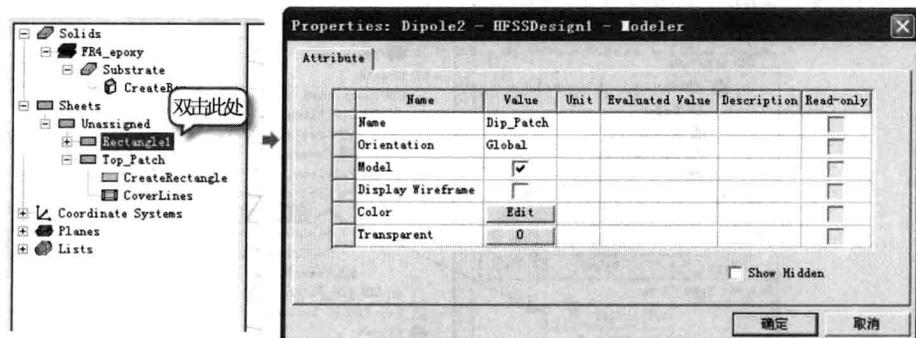


图 3.3.14 Attribute 选项卡

双击操作历史树中的 Top_Patch 下的 CreateRectangle 节点，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小尺寸。在 Position 中设置顶点坐标为 $(-L1, -W1/2, H)$ ，在 XSize 和 YSize 中设置矩形面的长和宽分别为 $-W2$ 和 $-L2$ ，如图 3.3.15 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

③ 创建三角形斜切角。

创建一个三角形面，把由矩形面 Top_Patch 和 Dip_Patch 组成的 90° 折线连接起来。从主菜单栏中选择 **Draw** → **Line** 命令或者单击工具栏上的  按钮，借助于捕捉功能

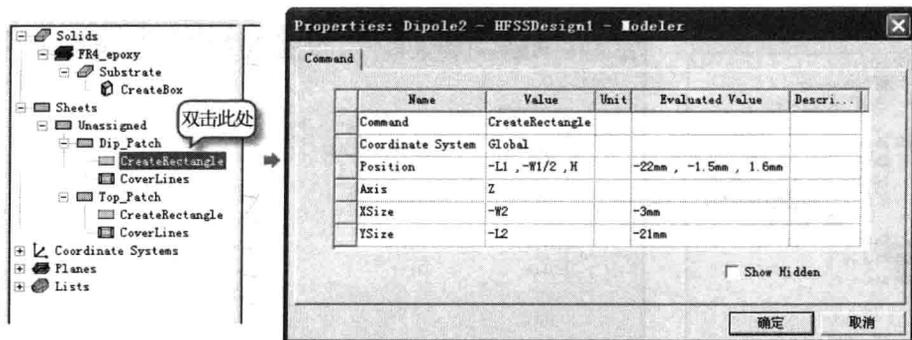


图 3.3.15 Command 选项卡

(Snap Mode), 在三维模型窗口中按顺序分别单击如图 3.3.16 所示的 A、B、C 点, 最后在 A 点位置上双击, 这样即可创建三角形面。新生成的三角形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Polyline1。

展开工程树中的 Sheets 下的 Polyline1 节点, 再展开 Polyline1 下的 CreatePolyline 节点, 选中 CreatePolyline 下的第一个 CreateLine 节点, 然后在属性窗口的 Point1 和 Point2 处分别输入三角形顶点 A 和 B 的坐标, 分别为 $(-L1, -W1/2, H)$ 和 $(-L1, W1/2, H)$, 如图

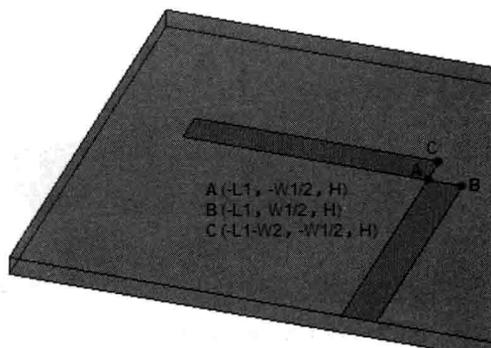


图 3.3.16 三角形面顶点坐标

3.3.17 所示。再使用和前面相同的方法选中 CreatePolyline 下的第二个 CreateLine 节点, 在属性窗口的 Point2 处输入三角形顶点 C 的坐标 $(-L1 - W2, -W1/2, H)$ 。

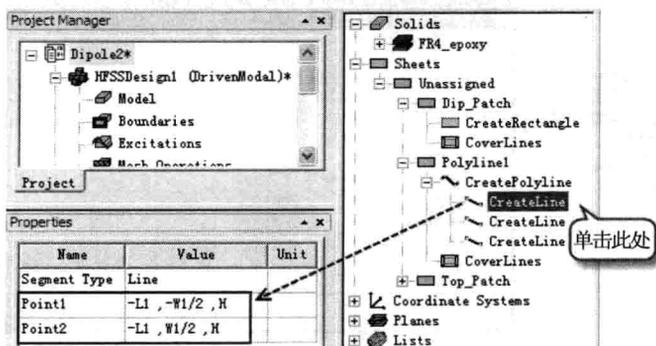


图 3.3.17 设置三角形的顶点坐标

这样, 即可用变量来表示创建的三角形面的位置和尺寸, 三角形面的位置和大小会随着矩形面 Top_Patch 和 Dip_Patch 尺寸的改变而改变。

④ 合并生成完整的金属片模型。

按住 Ctrl 键, 先后依次选择操作历史树中 Sheets 下的 Top_Patch、Dip_Patch 和 Polyline1 节点, 然后从主菜单栏中选择【Modeler】→【Boolean】→【Unite】命令或者单击工具栏上的  按钮, 执行合并操作。此时, 即可把选中的三个物体合并成一个整体, 生成的新物体的名称为 Top_Patch。

(3) 创建下表面金属片

创建位于介质层下表面的金属片，其形状如图 3.3.18 所示。具体可以通过以下几个步骤来完成。

① 创建下表面传输线 Top_patch_1。

使用镜像复制操作，以 xoz 面作为镜像面复制上表面金属片 Top_Patch，然后使用平移操作，移动复制生成的模型到介质层下表面。

单击操作历史树中的 Sheets 下的 Top_Patch 节点，选中上表面传输线，然后从主菜单栏中选择【Edit】→【Duplicate】→【Mirror】命令或者单击工具栏上的按钮，进入镜像复制操作状态。在 HFSS 工作界面右下角状态栏 X、Y、Z 对应的文本框中输入原点坐标 0、0 和 0，然后按 Enter 键确认。接着在状态栏 dX、dY、dZ 对应的文本框中分别输入 0、1 和 0，再次按 Enter 键确认。此时，即以 xoz 面为镜像面复制金属片 Top_Patch，生成新的模型，如图 3.3.19 所示，新模型的名称为 Top_Patch_1。

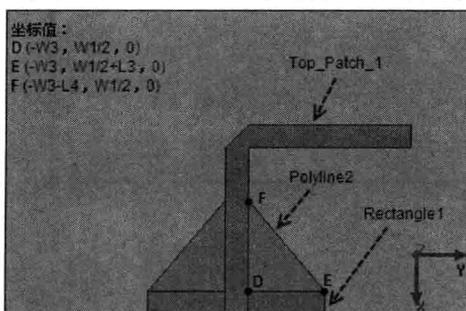


图 3.3.18 介质层下表面的金属片模型

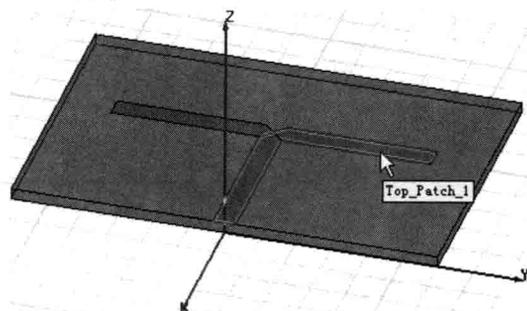


图 3.3.19 镜像复制操作后的模型

选中新生成的模型 Top_Patch_1，然后从主菜单栏中选择【Edit】→【Arrange】→【Move】命令或者单击工具栏上的按钮，进入物体平移操作。在状态栏 X、Y、Z 对应的文本框中输入移动的起始点坐标 0、0 和 1.6，按 Enter 键确认。接着在状态栏 dX、dY、dZ 对应的文本框中输入移动的距离 0、0 和 -1.6，按 Enter 键确认。此时，模型 Top_Patch_1 即沿着 z 轴负向移动 1.6mm 至介质层的下表面。

在设计中，为了方便改变介质层的厚度，我们定义了变量 H 用以表示介质层厚度。为了使在介质层厚度改变时 Top_Patch_1 始终位于介质层下表面，上述平移操作的移动距离需要使用变量 H 来表示。其具体操作为：展开操作历史树下的 Top_Patch_1 节点，然后单击 Move 节点，在左下方的属性窗口中把 Move Vector 的值由 $(0,0,-1.6)$ 改为 $(0,0,-H)$ ，如图 3.3.20 所示。

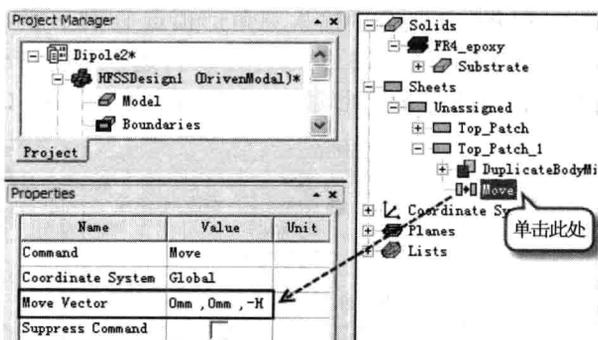


图 3.3.20 设置变量 H 表示模型移动距离

② 创建矩形面 Rectangle1。

在介质层的下表面上创建如图 3.3.18 所示的矩形面 Rectangle1，其长和宽分别用变量 $L3$ 和 $W3$ 表示。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令或者单击工具栏上的按钮，进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树中 Rectangle1 下的 CreateRectangle 节点，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 中设置矩形面的顶点坐标为 $(0, W1/2, 0)$ ，在 XSize 和 YSize 中设置矩形面的宽度和长度分别为 $-W3$ 和 $L3$ ，如图 3.3.21 所示，然后单击按钮退出。

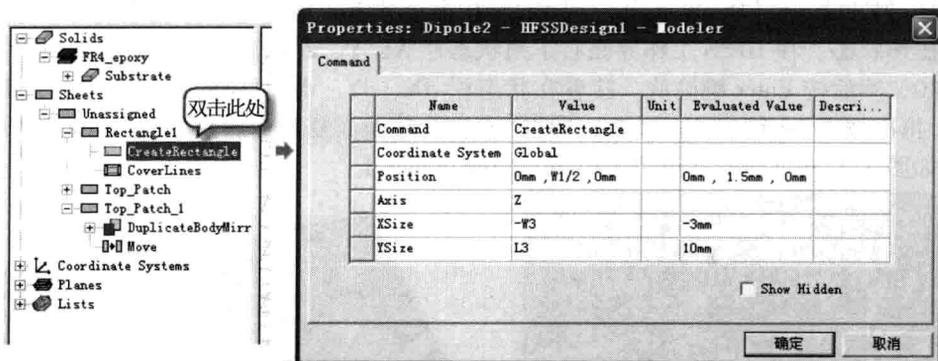


图 3.3.21 Command 选项卡

③ 创建三角形 Polyline2。

在介质层的下表面上创建如图 3.3.18 所示的三角形平面 Polyline2，三角形三个顶点的坐标分别为 $D(-W3, W1/2, 0)$ 、 $E(-W3, W1/2 + L3, 0)$ 和 $F(-W3 - L4, W1/2, 0)$ 。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Line】命令或者单击工具栏上的按钮，然后在三维模型窗口中分别单击如图 3.3.18 所示的 D、E、F 点，最后在 D 点位置上双击，这样即可创建生成一个三角形面。新生成的三角形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Polyline2。

展开工程树中的 Sheets 下的 Polyline2 节点，再展开 Polyline2 下的 CreatePolyline 节点，选中 CreatePolyline 下的第一个 CreateLine 节点，然后在工作界面左下侧的属性窗口的 Point1 和 Point2 处分别输入三角形顶点 D 和 E 的坐标，即 $(-W3, W1/2, 0)$ 和 $(-W3, W1/2 + L3, 0)$ ，如图 3.3.22 所示。再选中 CreatePolyline 下的第二个 CreateLine 节点，然后在属性窗口的 Point2 处输入三角形顶点 F 的坐标 $(-W3 - L4, W1/2, 0)$ 。

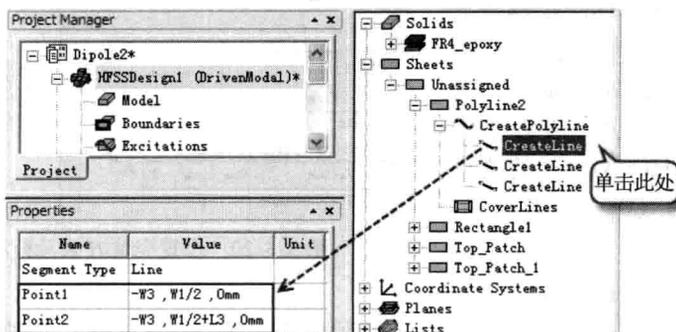


图 3.3.22 设置三角形的顶点坐标

完成后,按快捷键 $\text{Ctrl} + \text{D}$ 全屏显示创建的所有模型,如图 3.3.23 所示。

④ 镜像复制生成左侧的三角形和矩形面。

使用镜像复制操作,以 xoz 面作为镜像面复制矩形面 Rectangle1 和三角形面 Polyline2 ,生成左侧的矩形面和三角形面。

按住 Ctrl 键,同时先后依次单击选中操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle1 和 Polyline2 节点,然后从主菜单栏中选择【Edit】→【Duplicate】→【Mirror】命令或者单击工具栏上的按钮,进入镜像复制操作状态。在状态栏 X、Y、Z 对应的文本框中输入原点坐标 0、0 和 0,按 Enter 键确认。接着在状态栏 dX、dY、dZ 对应的文本框中分别输入 0、1 和 0,按 Enter 键确认。此时,即可以 xoz 面为镜像面复制 Rectangle1 和 Polyline2 ,从而生成左侧的矩形面和三角形面,如图 3.3.24 所示。复制生成的两个模型的名称分别为 Rectangle1_1 和 Polyline2_1 。

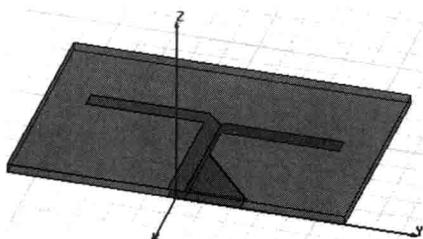


图 3.3.23 设计模型

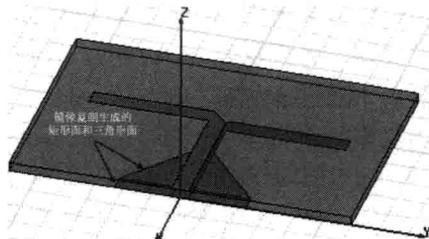


图 3.3.24 复制操作后的设计模型

⑤ 合并生成完整的金属片模型。

按住 Ctrl 键,同时先后依次单击选中操作历史树中 Sheets 下的 Top_Patch_1 、 Polyline2 、 Polyline2_1 、 Rectangle1 和 Rectangle1_1 节点,然后从主菜单栏中选择【Modeler】→【Boolean】→【Unite】命令或者单击工具栏上的按钮,执行合并操作。此时,选中的 5 个平面即可合并成一个整体,合并生成的新物体的名称为 Top_Patch_1 。

4. 设置边界条件

因为介质层上、下表面上的平面模型 Top_Patch 和 Top_Patch_1 都是金属片,所以这里需要为其分配理想导体边界条件。另外,对于天线分析,我们还需要设置辐射边界。

(1) 分配理想导体边界条件

按住 Ctrl 的同时选择操作历史树中 Sheets 下的 Top_Patch 和 Top_Patch_1 节点,然后在其上单击鼠标右键,在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令,打开理想导体边界条件设置对话框,如图 3.3.25 所示。在该对话框中保留默认设置不变,直接单击 按钮,即可设置平面 Top_Patch 和 Top_Patch_1 为理想导体边界条件。理想导体边界条件的名称 PerfE1 会添加到工程树的 Boundaries 节点下。此时,平面 Top_Patch 和 Top_Patch_1 等效为理想导体面。

(2) 设置辐射边界条件

使用 HFSS 分析天线问题时,必须设置辐射边界条件,且辐射表面和辐射体的距离需要不小于 $1/4$ 个工作波长。在这里我们首先创建一个长方体模型,长方体各个表面和介质层表面之间的距离都为 60mm ,然后设置该长方体的表面为辐射边界条件。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令或者单击工具栏上的按钮,进入创建长方体的状态,然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下,其默认的名称为 Box1 。

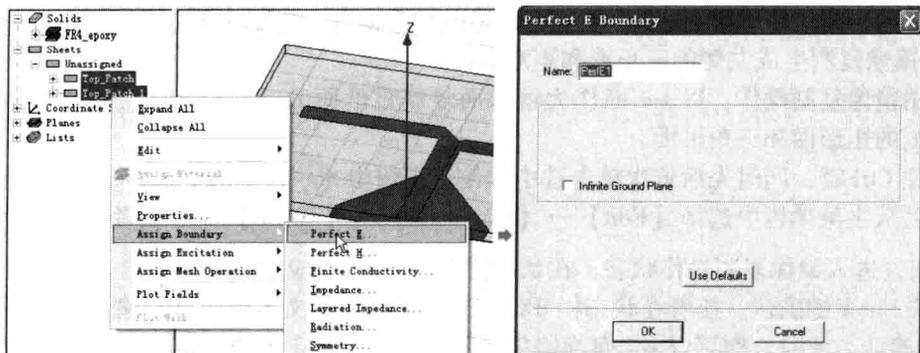


图 3.3.25 分配理想导体边界条件

双击操作历史树中 Solids 下的 Box1 节点，打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡。把长方体的名称设置为 AirBox，并设置其材质为 air、透明度为 0.8，如图 3.3.26 所示。然后单击 **确定** 按钮退出。

双击操作历史树中 AirBox 下的 CreateBox 节点，打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和尺寸。在 Position 中设置顶点坐标为 $(-100, -90, -60)$ ，在 XSize、YSize 和 ZSize 中设置矩形面的长、宽和高分别为 160、180 和 120，如图 3.3.27 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

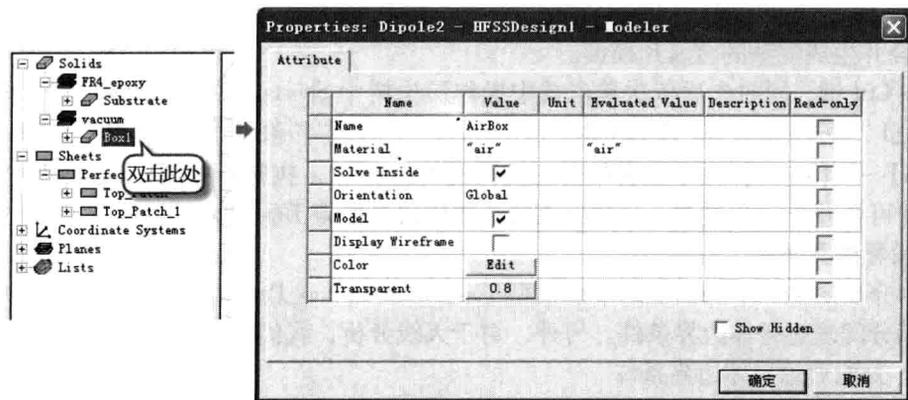


图 3.3.26 长方体属性对话框的 Attribute 选项卡

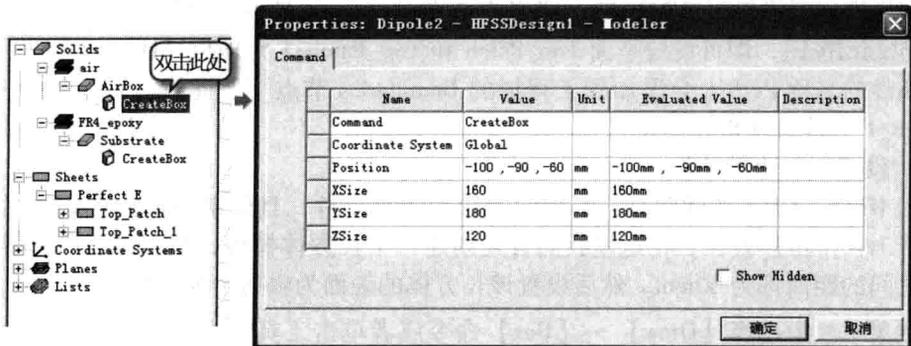


图 3.3.27 长方体属性对话框的 Command 选项卡

长方体模型 AirBox 创建好之后, 在操作历史树下单击 AirBox 节点以选中该模型。然后在三维模型窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Radiation】命令, 打开辐射边界条件设置对话框, 如图 3.3.28 所示。保留对话框的默认设置不变, 直接单击 **OK** 按钮, 把长方体模型 AirBox 的表面设置为辐射边界条件。辐射边界条件的名称 Rad1 同样会添加到工程树的 Boundaries 节点下。

5. 设置激励方式

因为天线的输入端口位于模型内部, 所以需要使用集总端口激励。首先在天线的输入端口创建一个矩形面作为馈电面, 然后设置该馈电面的激励方式为集总端口激励。

单击工具栏上的 **XY** 下拉列表框, 从其下拉列表中选择 YZ 选项, 把当前工作平面设置为 yz 平面。从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令或者单击工具栏上的 **□** 按钮, 进入创建矩形面的状态, 并在三维模型窗口的 yz 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle2。

双击操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle2 节点, 打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡, 如图 3.3.29 所示。把矩形面的名称设置为 Feed_Port, 然后单击 **确定** 按钮退出。

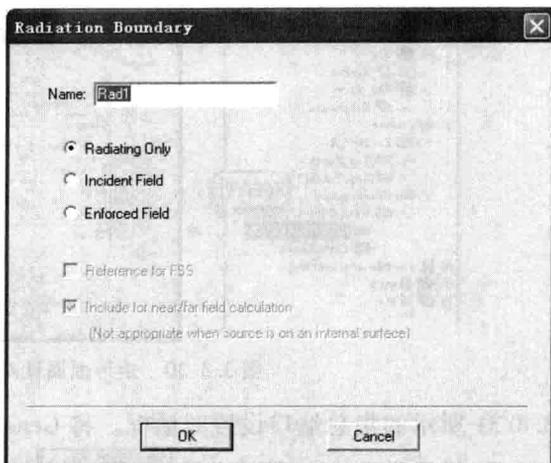


图 3.3.28 辐射边界条件设置对话框

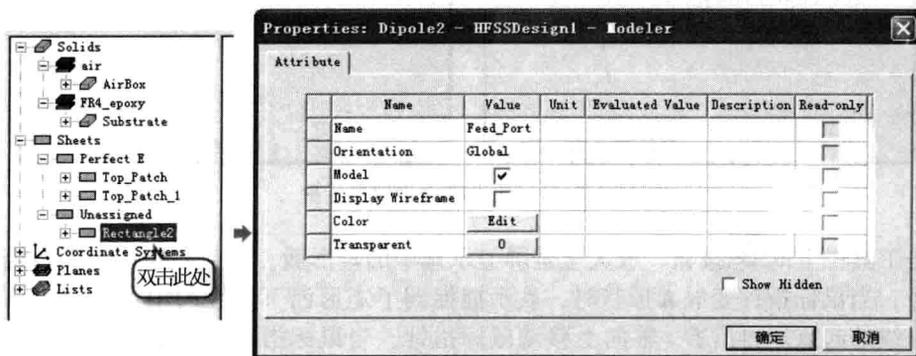


图 3.3.29 矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡

双击操作历史树中 Feed_Port 下的 CreateRectangle 节点, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺寸。在 Position 中设置顶点坐标为 $(0, -W1/2, H)$, 在 YSize 和 ZSize 中设置矩形面的长和宽分别为 W1 和 -H, 如图 3.3.30 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

这样就在 yz 面上创建了一个与金属片 Top_Patch 和 Top_Patch_1 相接的矩形面, 矩形面的宽度与金属片 Top_Patch 的宽度一致。接下来, 我们把该矩形面设置为集总端口激励, 具体操作如下。

单击操作历史树中 Sheets 下的 Feed_Port 节点以选中该矩形面。然后在其上单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Excitation】→【Lumped Port】命令, 打开如图

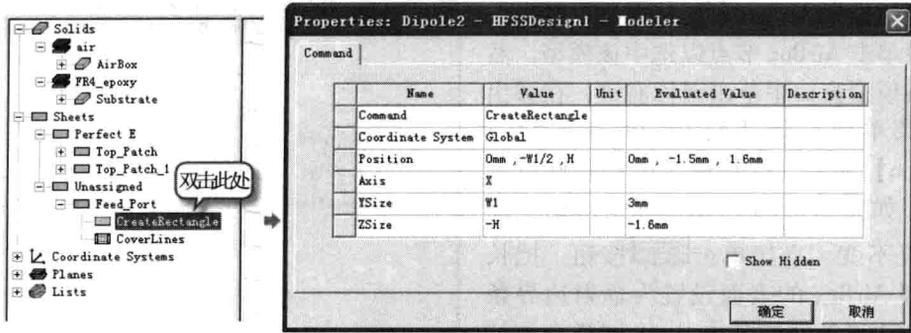


图 3.3.30 矩形面属性对话框的 Command 选项卡

3.3.31 所示的集总端口设置对话框。将 General 对话框中的 Resistance 设置为 50ohm, Reactance 设置为 0ohm, 然后单击 **下一步(N) >** 按钮, 打开 Modes 对话框。在该对话框中单击 Integration Line 项下的 None, 从其下拉列表中选择 New Line 选项, 此时会进入三维模型窗口以进行端口积分线的设置。

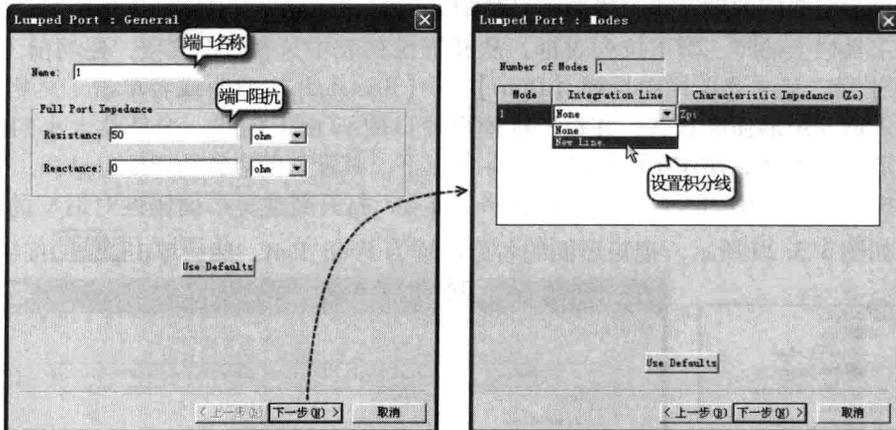


图 3.3.31 集总端口设置对话框

首先单击工具栏上的 按钮, 放大至全屏显示选中的矩形面, 然后在矩形面下边缘处移动鼠标指针, 当鼠标指针变成 ▲ 形状时, 表示捕捉到了矩形面下边缘的中点, 此时单击即可确定积分线的起点。再沿着 z 轴向上移动鼠标指针, 当鼠标指针变成 ▲ 形状时, 表示捕捉到了矩形面上边缘的中点位置, 再次单击即可确定积分线的终点。确定积分线的终点的同时会自动返回到集总端口设置对话框。积分线设置过程如图 3.3.32 所示。

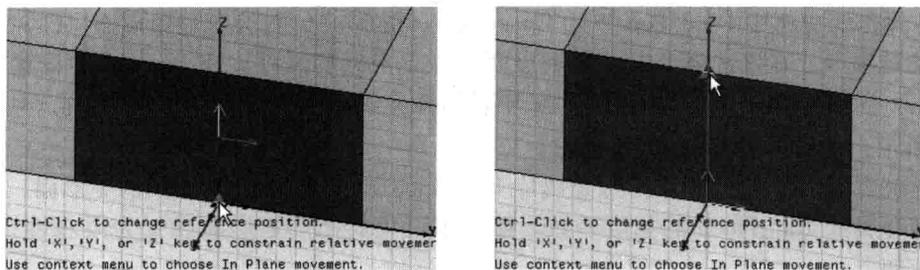


图 3.3.32 积分线的设置过程

继续单击对话框中的 **下一步(N) >** 按钮, 打开 Post Processing 对话框, 在该对话框中选中 Renormalize All Modes 单选按钮, 并设置 Full Port Impedance 为 50ohm, 如图 3.3.33 所示。最后单击 **完成** 按钮, 完成集总端口激励的设置。完成后, 设置的集总端口的名称 1 会添加到工程树的 Excitations 节点下。

6. 求解设置

分析的印刷偶极子天线的中心频率在 2.45GHz 左右, 因此求解频率设置为 2.45GHz。同时添加 2GHz ~ 3GHz 的扫

频设置, 选择快速 (Fast) 扫频类型, 分析天线在 2GHz ~ 3GHz 频段的回波损耗和电压驻波比。

(1) 求解频率和网格剖分设置

设置求解频率为 2.45GHz, 自适应网格剖分的最大迭代次数为 20, 收敛误差为 0.02。

右键单击工程树下的 Analysis 节点, 从弹出的快捷菜单中选择 **【Add Solution Setup】** 命令, 打开 Solution Setup 对话框。在 Solution Frequency 处设置求解频率为 2.45GHz, 在 Maximum Number of Passes 文本框中设置最大迭代次数为 20, 在 Maximum Delta S 文本框中设置收敛误差为 0.02, 其他选项保留默认设置, 如图 3.3.34 所示。然后单击 **确定** 按钮, 完成求解设置。

设置完成后, 求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

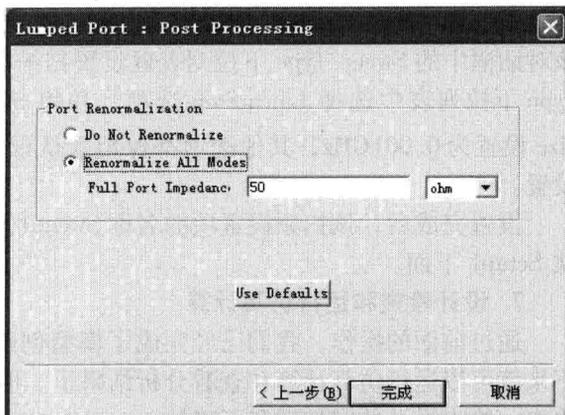


图 3.3.33 集总端口设置

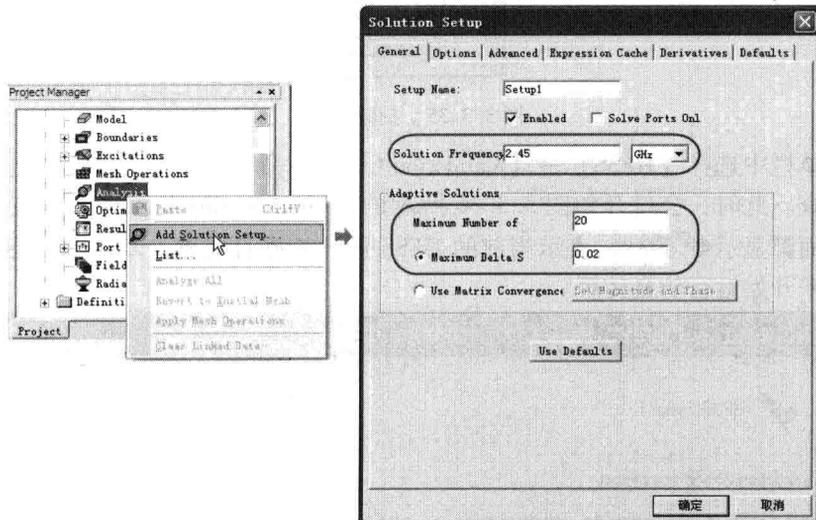


图 3.3.34 求解设置

(2) 扫频设置

扫频类型选择快速扫频, 扫频频率范围为 2GHz ~ 3GHz, 频率步进为 0.001GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点, 右键单击新添加的求解设置项 Setup1, 在弹出的快捷

菜单中选择【Add Frequency Sweep】命令，打开 Edit Sweep 对话框，如图 3.3.35 所示。在该对话框中的 Sweep Type 下拉列表框设置扫描类型为 Fast；在 Frequency Setup 选项组中的 Type 下拉列表中选择 LinearStep 选项，并将 Start 设置为 2GHz，Stop 设置为 3GHz，Step Size 设置为 0.001GHz，其他选项都保留默认设置。最后单击对话框中的 **OK** 按钮，完成设置。

设置完成后，该扫频设置项的名称 Sweep1 会添加到工程树中 Analysis 节点的求解设置项 Setup1 下面。

7. 设计检查和运行仿真计算

通过前面的操作，我们已经完成了模型创建和求解设置等 HFSS 设计的前期工作，接下来就可以运行仿真计算和查看分析结果了。但在运行仿真计算之前，通常需要进行设计检查，检查设计的完整性和正确性。

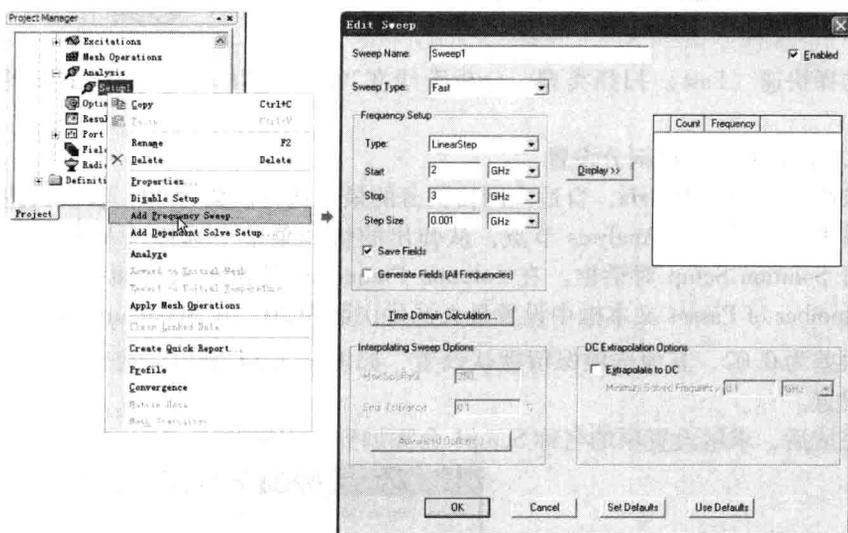


图 3.3.35 扫频设置

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令或者单击工具栏上的  按钮，进行设计检查。此时，会打开如图 3.3.36 所示的 Validation Check 对话框。该对话框中的每一项的前面都显示  图标，表示当前的 HFSS 设计正确且完整。单击 **Close** 按钮关闭对话框，接下来开始运行仿真计算。

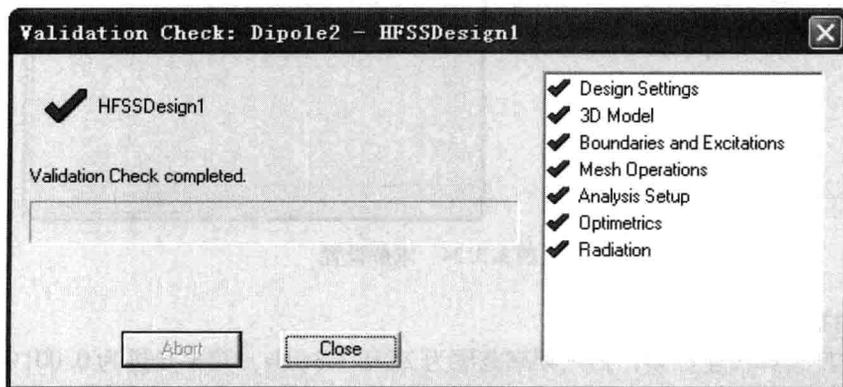


图 3.3.36 设计检查结果对话框

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze All】命令或者单击工具栏上的  按钮，开始运行仿真计算。

在仿真计算的过程中，工作界面右下方的进度条窗口会显示出求解进度，信息管理窗口也会有相应的信息说明，并会在仿真计算完成后给出完成提示信息。

8. 天线性能结果分析

仿真分析完成后，在数据后处理部分能够查看天线各项性能参数的仿真分析结果。这里我们主要来看一下所设计天线的回波损耗、输入阻抗和方向图。

(1) 天线回波损耗 S_{11} 的分析结果

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框，如图 3.3.37 所示。在该对话框左侧的 Solution 下拉列表中选择 Setup1:Sweep1，在 Category 列表框中选中 S Parameter，在 Quantity 列表框中选中 S(1,1)，在 Function 列表框中选中 dB。然后单击 **New Report** 按钮，再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时，即可生成如图 3.3.38 所示的扫描频率在 2GHz ~ 3GHz 的回波损耗 S_{11} 的分析结果。

从分析结果可以看出，设计的偶极子天线的中心频率约为 2.45GHz， $S_{11} < -10\text{dB}$ 的相对带宽 $\text{BW} = (2.729 - 2.256)/2.45 = 19.3\%$ 。

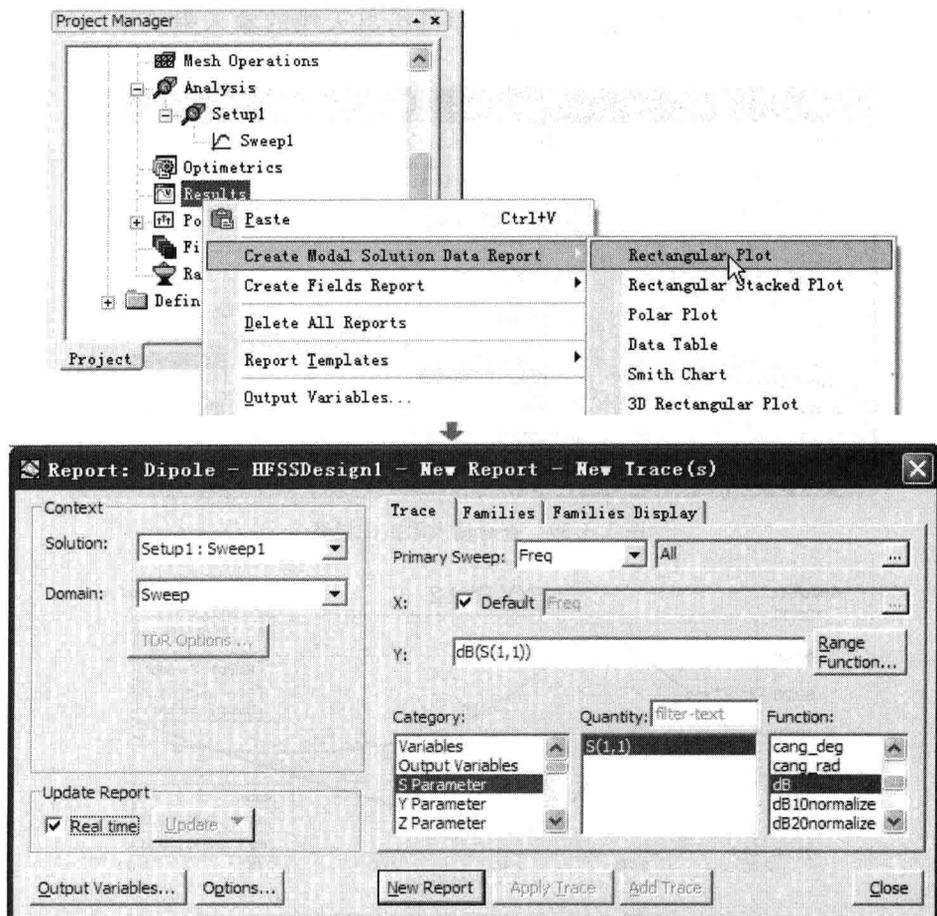
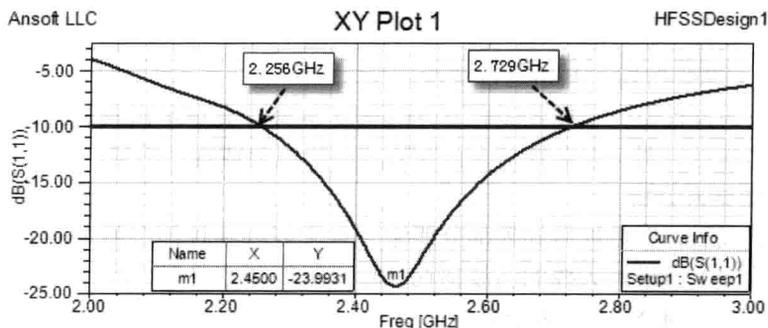


图 3.3.37 查看 S_{11} 分析结果操作

图 3.3.38 S_{11} 的扫频分析结果

(2) 天线的输入阻抗分析结果

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。在该对话框左侧的 Solution 下拉列表中同样选择 Setup1:Sweep1，在 Category 列表框中选中 Z Parameter，在 Quantity 列表框中选中 Z(1,1)，在 Function 列表框中同时选中 im 和 re，表示同时查看输入阻抗的虚部（即电抗部分）和实部（即电阻部分），如图 3.3.39 所示。然后单击 **New Report** 按钮，再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时，即可给出天线的输入阻抗结果报告，如图 3.3.40 所示。

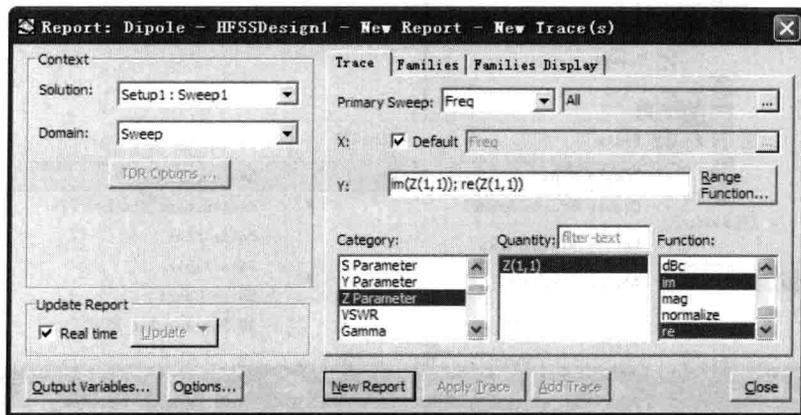


图 3.3.39 查看输入阻抗的设置



图 3.3.40 输入阻抗的结果报告

从结果报告中可以看出,在2.45GHz中心频率处,天线的输入阻抗为 $(49.8 - j6.3)\Omega$ 。可见初始天线结构已经达到了良好的阻抗匹配。

(3) 方向图

天线方向图是在远场区确定的,要查看天线远区场的计算结果,首先需要定义辐射表面。下面我们给出设计的印刷偶极子天线的三维立体增益方向图。

① 定义辐射表面。

右键单击工程树下的 Radiation 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Insert Far Field Setup】→【Infinite Sphere】命令,打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框,定义辐射表面,如图 3.3.41 所示。辐射表面是基于球坐标系定义的,对于三维立体空间,球坐标系下就相当于 $0^\circ < \varphi < 360^\circ$, $0^\circ < \theta < 180^\circ$ 。在该对话框中的 Name 文本框中输入辐射表面的名称 3D,并将 Phi 选项组中的 Start、Stop 和 Step Size 分别设置为 0deg、360deg 和 1deg,将 Theta 选项组中的 Start、Stop 和 Step Size 分别设置为 0deg、180deg 和 1deg,然后单击 **确定** 按钮,完成设置。此时,定义的辐射表面名称 3D 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

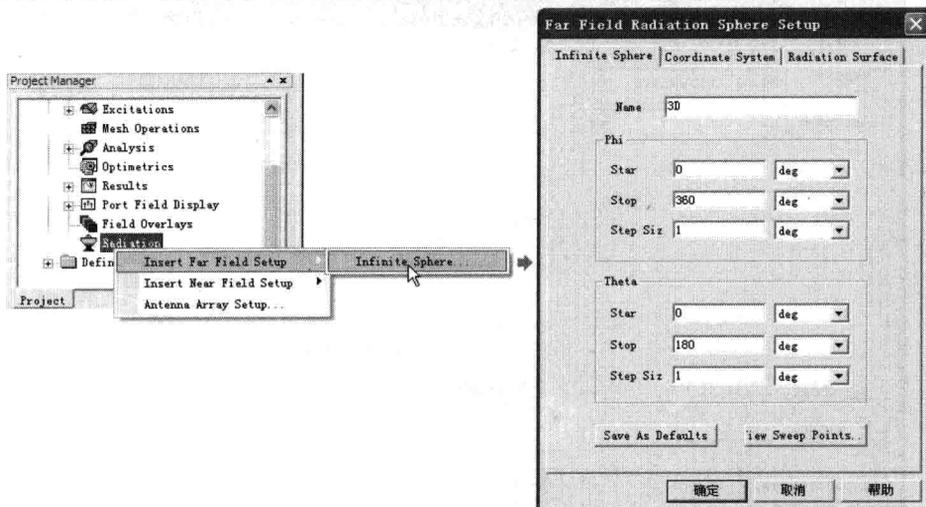


图 3.3.41 定义辐射表面

② 查看三维增益方向图。

右键单击工程树下的 Results 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【3D Polar Plot】命令,打开报告设置对话框,如图 3.3.42 所示。在该对话框中的 Geometry 下拉列表中选择前面定义的辐射表面 3D,并在 Category 列表框中选择 Gain,在 Quantity 列表框中选择 GainTotal,在 Function 列表框中选择 dB。然后单击 **New Report** 按钮,生成设计的印刷偶极子天线的三维增益方向图,如图 3.3.43 所示。

9. 天线臂的长度对中心频率的影响

虽然当前设计的天线的初始结构已经达到了性能要求,但多数时候天线设计是不可能一步到位的,这就需要我们根据所学的理论知识,调整天线的结构参数,然后再交由 HFSS 仿真分析出能够达到设计要求的结构参数值。这里我们首先调整天线臂的长度,借助于 HFSS 的参数扫描分析功能分析出其对天线中心频率的影响。

(1) 添加参数扫描分析项

右键单击工程树下的 Optimetrics 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Add】→

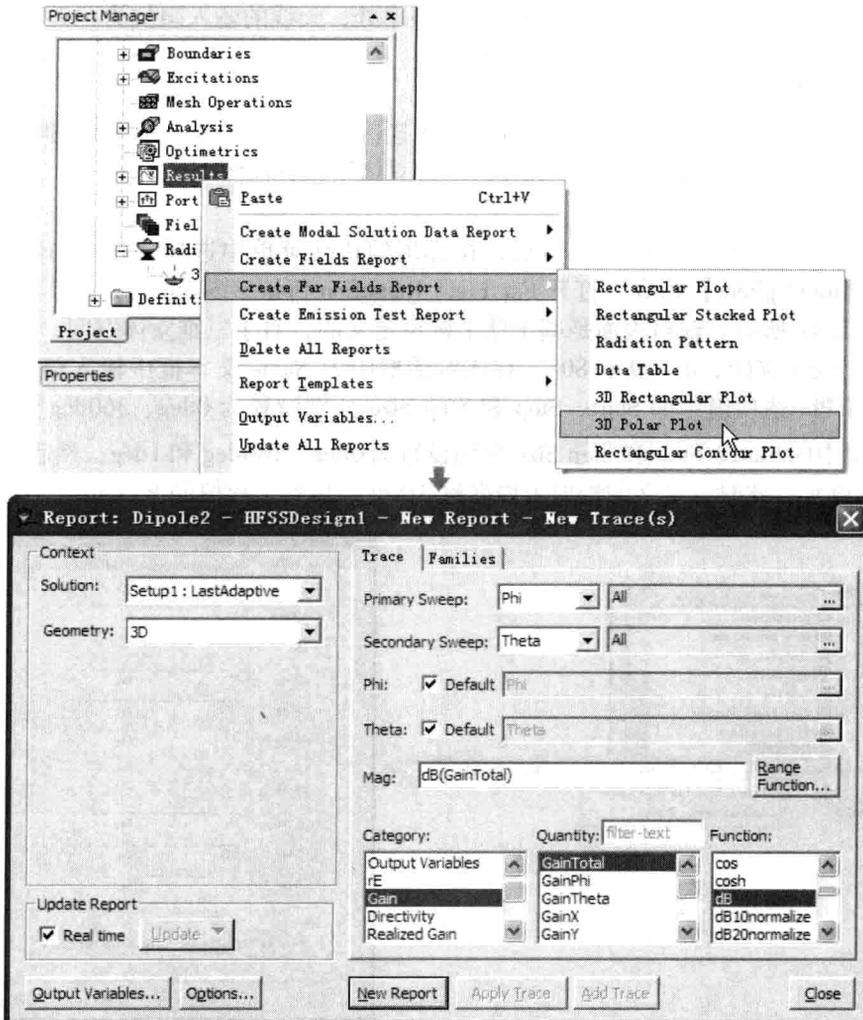
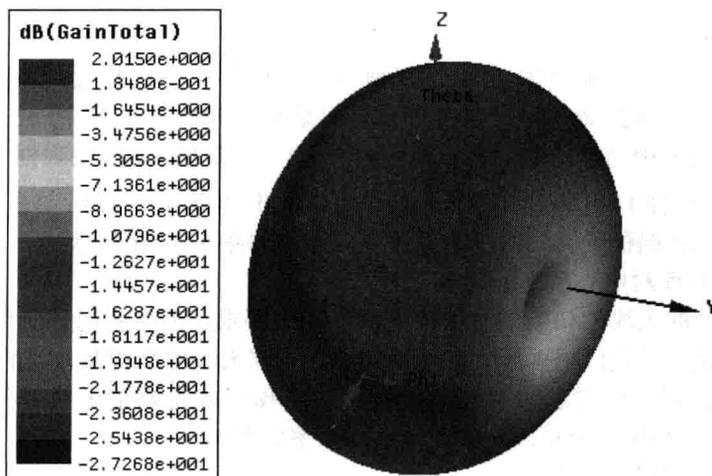
图 3.3.42 查看 E 面增益方向图

图 3.3.43 印刷偶极子天线的三维增益方向图

【Parametric】命令，打开 Setup Sweep Analysis 对话框。单击该对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add/Edit Sweep 对话框，如图 3.3.44 所示。在设计中，天线臂的长度是使用变量 L2 来表示的，因此这里添加 L2 为扫描变量，且设置 L2 的变化范围为 19mm ~ 23mm。在 Add/Edit Sweep 对话框中的 Variable 下拉列表中选择变量 L2，接着选中 Linear step 单选按钮，并将 Start、Stop 和 Step 分别设置为 19mm、23mm 和 1mm，然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后，单击 **OK** 按钮，关闭 Add/Edit Sweep 对话框。最后，单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮，完成添加参数扫描操作，添加 L2 为扫描变量。

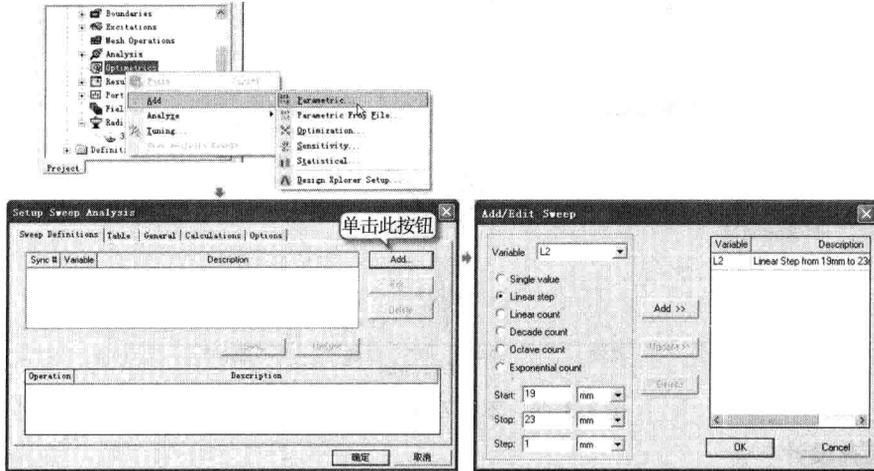


图 3.3.44 添加参数扫描分析

完成后，参数扫描分析项会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认的名称为 ParametricSetup1。

(2) 运行参数扫描分析

右键单击工程树中 Optimetrics 下的 ParametricSetup1 节点，在弹出的快捷菜单中选择 **【Analyze】** 命令，运行参数扫描分析。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后，右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择 **【Create Modal Solution Data Report】** → **【Rectangular Plot】** 命令，打开报告设置对话框，对话框采用和图 3.3.37 相同的设置，然后单击 **New Report** 按钮，生成如图 3.3.45 所示的一组 S_{11} 参数扫描分析结果报告。报告中每条 S_{11} 曲线对应不同的 L2 变量值。

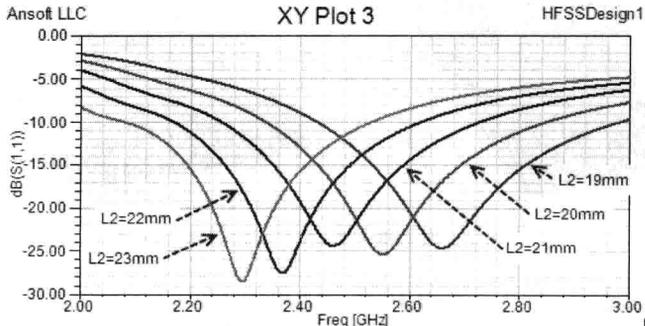


图 3.3.45 不同 L2 对应的 S_{11} 曲线

从参数扫描分析结果报告中可以看出,天线的谐振频率随着天线臂长度变量 L_2 的增大而降低。

10. 分析平衡三角形的大小对带宽的影响

下面我们调整平衡三角形的大小,借助于 HFSS 的参数扫描分析功能分析出其对天线带宽的影响。

使用和上部分内容相同的操作,添加平衡三角形直角边长度变量 L_3 为参数扫描变量,并且设置 L_3 的变化范围为 $6\text{mm} \sim 14\text{mm}$,变化步进值为 2mm ,然后运行参数扫描分析,分析完成后可以给出如图 3.3.46 所示的分析结果。从分析结果中可以看出,当平衡三角形直角边长 L_3 从 6mm 增加到 14mm 时,天线的带宽逐渐减小。

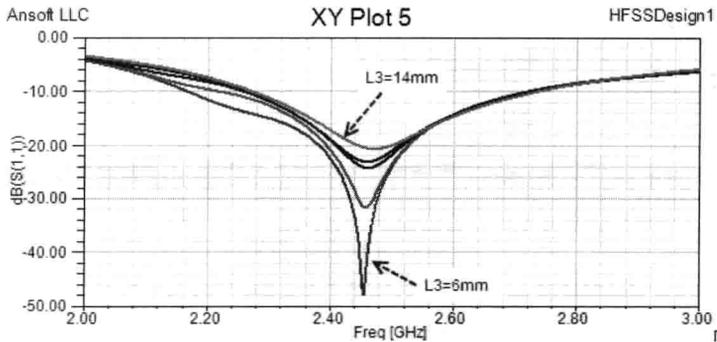


图 3.3.46 不同 L_3 对应的 S_{11} 曲线

11. 保存设计

至此,我们便完成了印刷偶极子天线的 HFSS 设计分析。在设计中我们给出了 2.45GHz 印刷偶极子天线的 HFSS 分析结果,同时也分析查看了天线臂的长度以及平衡三角形的大小对天线性能的影响。最后单击工具栏上的  按钮保存设计,再从主菜单栏中选择【File】→【Exit】命令,退出 HFSS。

3.4 WLAN 双频单极子天线设计

对于 3.1.2 节提及的 $1/4$ 波长单极子天线,我们可以使用如图 3.4.1 (a) 所示的微带线结构实现。为了进一步缩小天线的尺寸,还可以将天线折成如图 3.4.1 (b) 所示的 L 形。

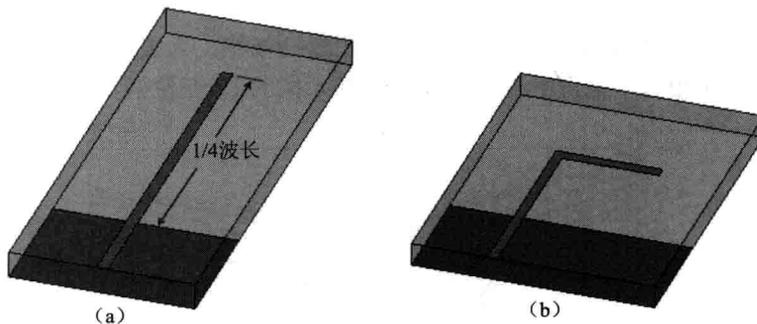


图 3.4.1 微带线结构 $1/4$ 波长单极子天线

在本节中,我们设计一个 L 形结构的微带线单极子天线,天线工作于 IEEE 802.11a 和 802.11b 两个工作频段。IEEE 802.11a 标准于 1999 年制定完成,该标准规定无线局域网工

作频段在 5.15GHz ~ 5.825GHz，中心频率约为 5.49GHz。IEEE 802.11b 标准是对 IEEE 802.11 的一个补充，于 1999 年 9 月被正式批准，该标准规定无线局域网工作频段在 2.4GHz ~ 2.4825GHz，中心频率约为 2.44GHz。

3.4.1 双频单极子天线的结构

图 3.4.2 所示为设计的微带双频单极子天线的结构模型，整个天线结构大致分为 5 个部分，即介质层、高频 (5GHz) 单极子天线、低频 (2.4GHz) 单极子天线、微带馈线和参考地。

介质层的材质使用 Rogers RO4003，其相对介电常数 $\epsilon_r = 3.38$ ，损耗正切 $\tan\delta = 0.0027$ ，介质层厚度为 1.52mm。介质层的下表面是单极子天线的参考地，

介质层的上表面是微带馈线和单极子天线。其中，左侧的 L 形结构是高频单极子天线，工作于 IEEE 802.11a 频段，即工作频率为 5.15GHz ~ 5.825GHz；右侧的 L 形结构是低频单极子天线，工作于 IEEE 802.11b 频段，即工作频率为 2.4GHz ~ 2.4825GHz。

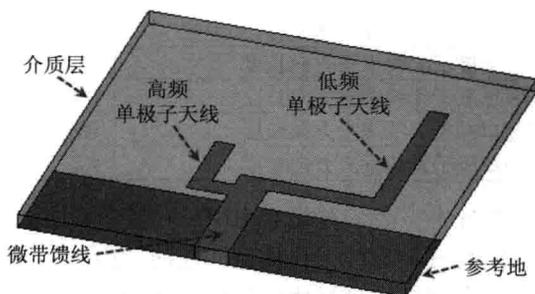


图 3.4.2 单极子天线的结构模型

3.4.2 天线初始尺寸和 HFSS 设计概述

所设计的天线工作于 2.45GHz 和 5.49GHz 两个频段，若在自由空间中传播，那么这两个频率对应的波长分别为 122mm 和 55mm。若在全填充介电常数为 3.38 的 Rogers RO4003 介质中传播，那么其对应的波长分别为 66.4mm 和 30mm。对于 2.45GHz 的中心频率，若采用自由空间波长，则 1/4 波长单极子天线的长度为 30.5mm；若采用介质中的波长，则 1/4 波长单极子天线的长度为 16.6mm。对于 5.49GHz 的中心频率，若采用自由空间波长，则 1/4 波长单极子天线的长度为 13.8mm；若采用介质中的波长，则 1/4 波长单极子天线的长度为 7.5mm。对于 PCB 板上的微带单极子天线，波的传输既要经过介质也要经过自由空间，因此实际波长应该介于介质的导波波长和自由空间的工作波长之间。也就是说，对于 2.45GHz 工作频段，1/4 波长介于 16.6mm ~ 30.5mm；对于 5.49GHz 工作频段，1/4 波长介于 7.5mm ~ 13.8mm。

为了便于后续的参数化分析，即分析天线的各项结构参数对天线性能的影响，在 HFSS 设计建模时需要定义一系列的变量来表示天线的结构，使用变量表示的单极子天线参数化设计模型如图 3.4.3 所示。其中，定义的变量名称、代表

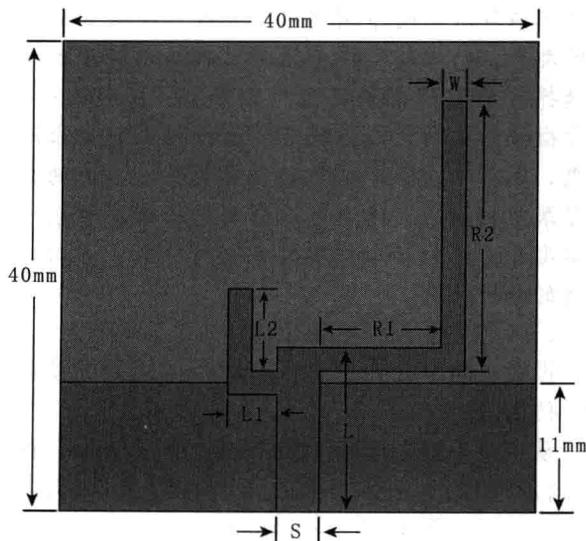


图 3.4.3 单极子天线参数化模型

的结构参数以及变量的初始值如表 3.4.1 所示。

表 3.4.1 变量定义

变量意义	变量名	变量值 (单位: mm)
介质层厚度	H	1.52
微带馈线宽度	S	3.5
微带馈线长度	L	14
单极子天线金属片的宽度	W	2
高频单极子天线水平方向长度	L1	4.25
高频单极子天线垂直方向长度	L2	7
低频单极子天线水平方向长度	R1	10.25
低频单极子天线垂直方向长度	R2	23

设计中,我们首先在 HFSS 中创建如图 3.4.2 所示的微带结构单极子天线的参数化模型,仿真分析出该天线模型的性能。因为初始设计在低频段时不满足设计要求,所以接下来使用参数扫描分析优化低频单极子天线的长度,找出满足设计要求的天线参数。

3.4.3 HFSS 仿真设计

1. 新建设计工程

(1) 运行 HFSS 并新建工程

双击桌面上的 HFSS 快捷方式图标,启动 HFSS 软件。HFSS 运行后会自动新建一个工程文件,选择主菜单栏中的【File】→【Save As】命令,把工程文件另存为 Monopole.hfss。

(2) 设置求解类型

将当前设计的求解类型设置为终端驱动求解类型。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Solution Type】命令,打开如图 3.4.4 所示的 Solution Type 对话框。选中 Driven Terminal 单选按钮,然后单击  按钮,完成设置。

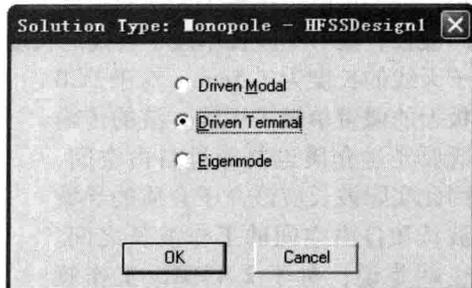


图 3.4.4 设置求解类型

说明:细心的读者可能会有疑问,为什么上一节中微带结构的印刷偶极子天线选择模式驱动求解类型,而此处同样是微带结构的单极子天线却选择终端驱动求解类型?实际上,在 HFSS 中对于微带结构的天线,既可以选择模式驱动求解类型,也可以选择终端驱动求解类型,二者的分析结果是相同的。读者可以分别选择模式驱动求解类型和终端驱动求解类型来进行分析,并对比二者的分析结果。

(3) 设置模型长度单位

设置当前设计在创建模型时所使用的默认长度单位为毫米。

从主菜单栏中选择【Modeler】→【Units】命令,打开如图 3.4.5 所示的 Set Model Units 对话框。在该对话框中的 Select units 下拉列表中选择 mm 选项,然后单击  按钮,完成设置。

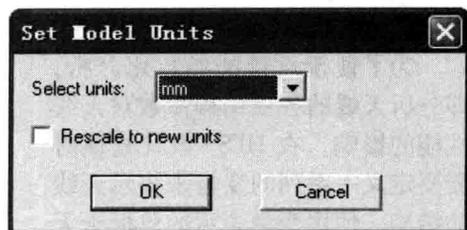


图 3.4.5 设置长度单位

2. 添加和定义设计变量

在 HFSS 中定义和添加如表 3.4.1 所示的所有设计变量。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框，然后单击该对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add Property 对话框。在 Add Property 对话框中的 Name 文本框中输入第一个变量名称 H，在 Value 文本框中输入该变量的初始值 1.52mm，然后单击 **OK** 按钮，添加变量 H 到设计属性对话框中。变量定义和添加的过程如图 3.4.6 所示。

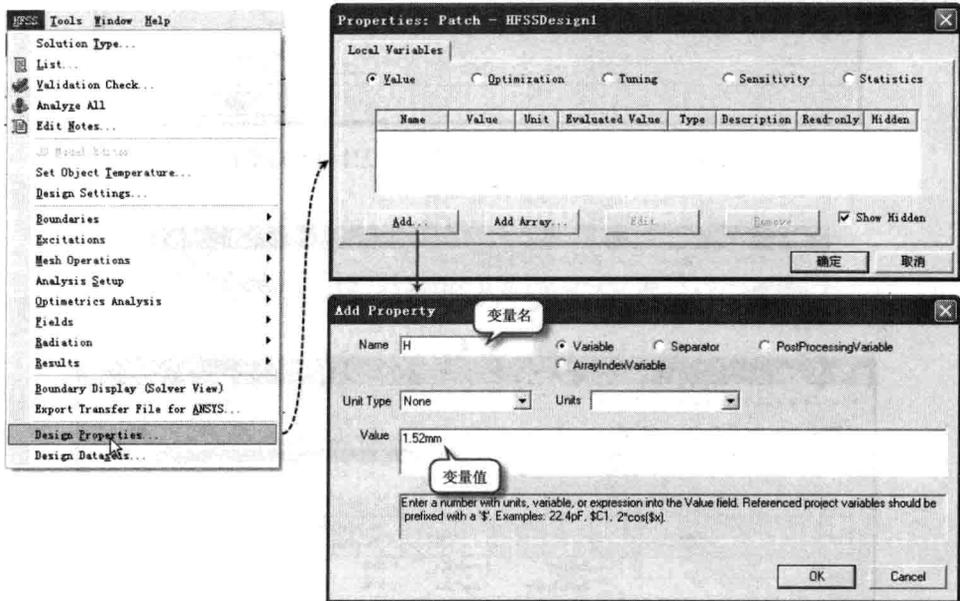


图 3.4.6 定义变量

使用相同的操作方法，分别定义变量 S、L、W、L1、L2、R1 和 R2，其初始值分别为 3.5 mm、14 mm、2 mm、4.25 mm、7 mm、10.25 mm 和 23 mm。定义完成后的设计属性对话框如图 3.4.7 所示。

最后，单击设计属性对话框中的 **确定** 按钮，完成所有变量的定义和添加工作，退出设计属性对话框。

3. 添加新的介质材料

向设计材料库中添加一个相对介电常数 $\epsilon_r = 3.38$ 、损耗正切 $\tan\delta = 0.0027$ 的介质材料，并将其命名为 My_RO4003。

从主菜单栏中选择【Tools】→【Edit Configured Libraries】→【Materials】命令，打开 Edit Libraries 对话框，如图 3.4.8 所示。然后单击该对话框中的 **Add Material...** 按钮，打开如图 3.4.9 所示的 View/Edit Material 对话框。在 View/Edit Material 对话框中的 Material Name 文本框中输入材质的名称 My_RO4003，并在 Relative Permittivity 处输入材质的相对介电常数 3.38，在 Dielectric Loss Tangent 处输入材质的损耗正切值 0.0027，其他选项保留默认设置不变。然后单击 **OK** 按钮，即向材料库中添加新的材质 My_RO4003。

最后，单击 Edit Libraries 对话框中的 **确定** 按钮，完成向材料库中添加介质材料的操作。

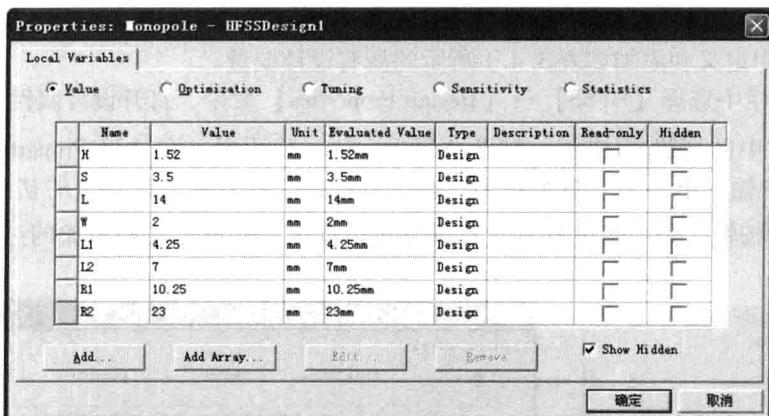


图 3.4.7 定义所有设计变量后的设计属性对话框

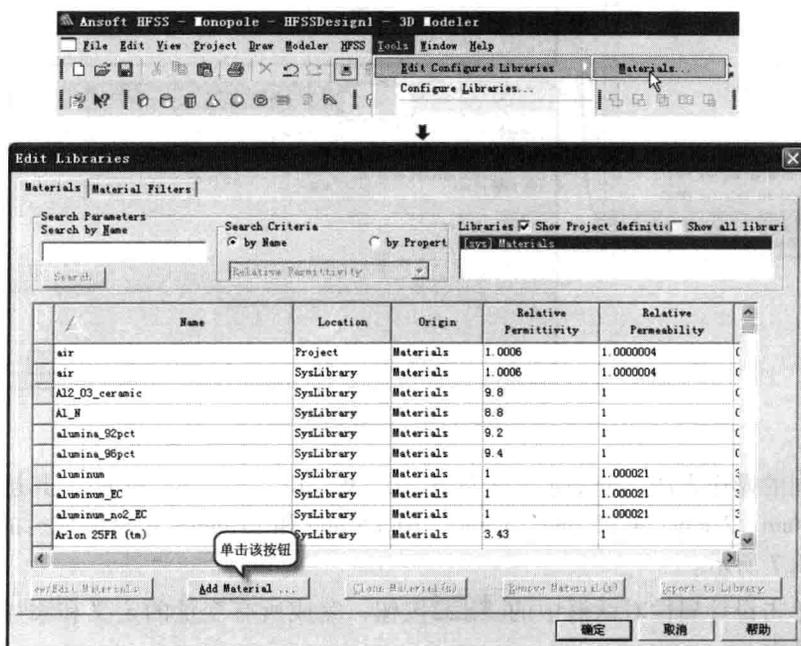


图 3.4.8 Edit Libraries 对话框

4. 设计建模

(1) 创建介质层

创建一个长方体模型,用以表示介质基片。模型的底面位于 xoy 平面,模型的材料使用新添加的介质材料 My_RO4003,并将该模型命名为 Substrate。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令或者单击工具栏上的  按钮,进入创建长方体的状态,然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下,其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树中 Solids 下的 Box1 节点,打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡,如图 3.4.10 所示。把长方体的名称设置为 Substrate,设置其材质为 My_RO4003,设置其颜色为深绿色,设置其透明度为 0.6,然后单击 **确定** 按钮退出。

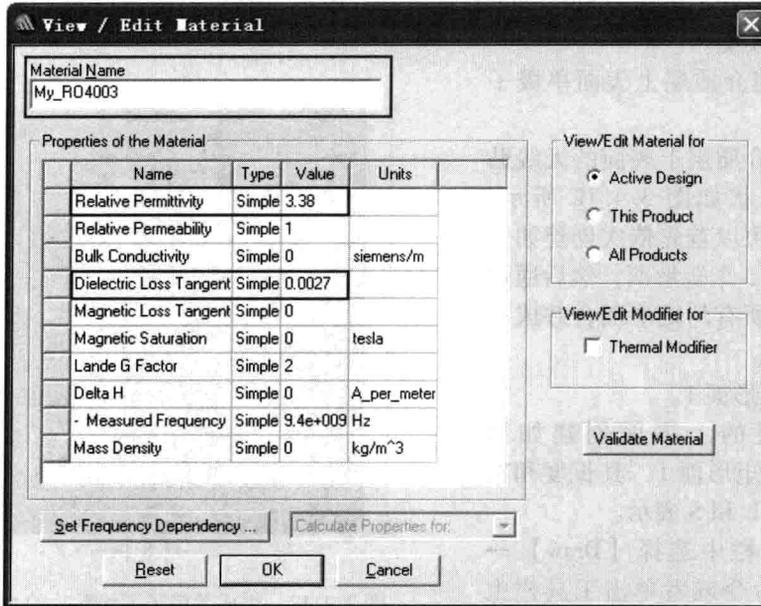


图 3.4.9 添加新的介质材料

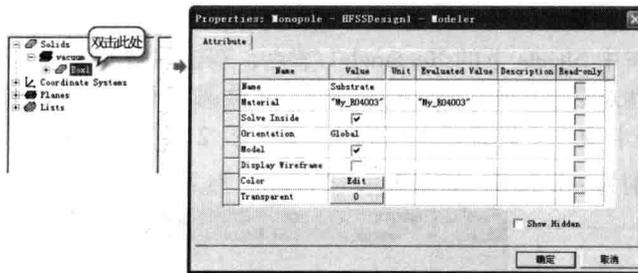


图 3.4.10 长方体属性对话框的 Attribute 选项卡

双击操作历史树中 Substrate 下的 CreateBox 节点，打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和尺寸。在 Position 中设置顶点坐标为 (-40, -20, 0)，在 XSize、YSize 和 ZSize 中设置长方体的长、宽和高分别为 40、40 和 H，如图 3.4.11 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

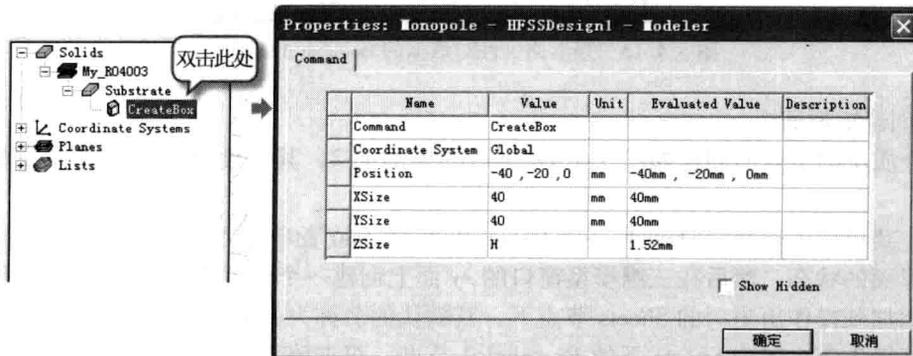


图 3.4.11 长方体属性对话框的 Command 选项卡

此时就创建好了名称为 Substrate 的介质基片模型。然后,按快捷键 Ctrl + D 全屏显示创建的长方体模型。

(2) 创建介质层上表面单极子天线贴片模型

创建位于介质层上表面的天线贴片模型,其形状如图 3.4.12 所示。建模时,我们可以首先依次创建如图 3.4.12 所示的 5 个矩形面,然后通过合并操作,把所有的矩形面合并成一个完整的模型。

① 创建矩形面 1。

在介质层的上表面创建如图 3.4.12 所示的矩形面 1,其长度和宽度分别用变量 L 和 S 表示。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令或者单击工具栏上的  按钮,进入创建矩形面的状态,

然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下,其默认的名称为 Rectangle1。

展开操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle1 节点,双击该节点下的 CreateRectangle 节点,打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡,在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺寸。在 Position 选项卡顶点中设置顶点坐标为 $(0, -S/2, H)$,在 XSize 和 YSize 中设置矩形面的长度和宽度分别为 $-L$ 和 S ,如图 3.4.13 所示,然后单击 **确定** 按钮退出。

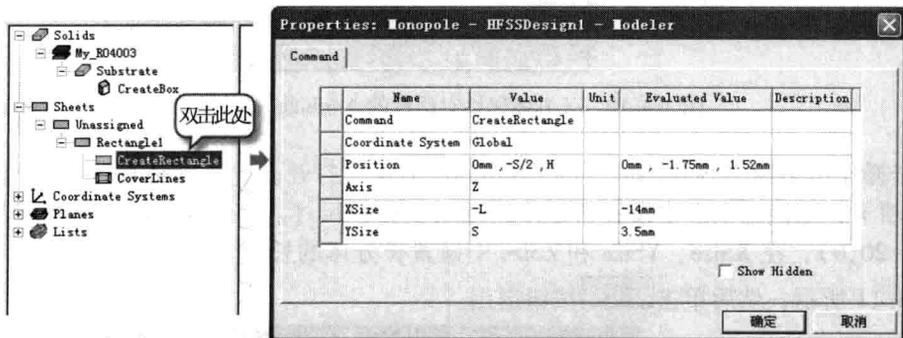


图 3.4.13 矩形面属性对话框的 Command 选项卡

② 创建矩形面 2。

在介质层的上表面创建如图 3.4.12 所示的矩形面 2,其长度和宽度分别用变量 $L1$ 和 W 表示。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令或者单击工具栏上的  按钮,进入创建矩形面的状态,然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下,其默认的名称为 Rectangle2。

展开操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle2 节点,双击该节点下的 CreateRectangle 节点,打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡,在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺

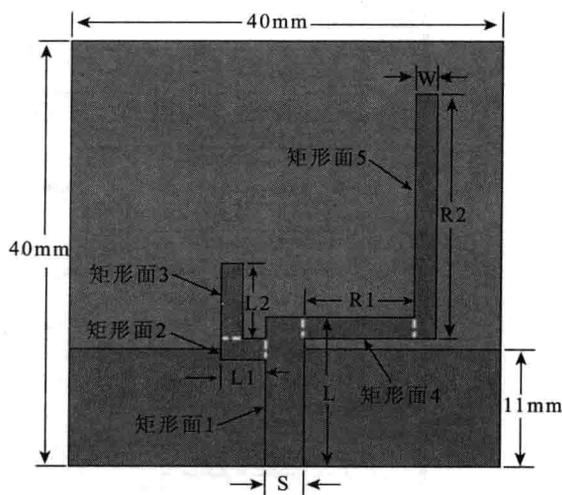


图 3.4.12 组成单极子天线贴片的 5 个矩形面

寸。在 Position 中设置顶点坐标为 $(-(L-2 \times W), -S/2, H)$ ，在 XSize 和 YSize 中设置矩形面的宽度和长度分别为 $-W$ 和 $-L1$ ，如图 3.4.14 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

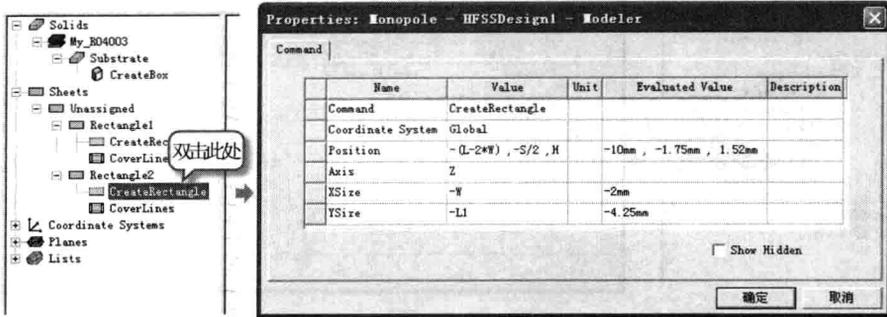


图 3.4.14 矩形面属性对话框的 Command 选项卡 1

③ 创建矩形面 3。

在介质层的上表面上创建如图 3.4.12 所示的矩形面 3，其长度和宽度分别用变量 $L2$ 和 W 表示。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令或者单击工具栏上的 按钮，进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle3。

展开操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle3 节点，双击该节点下的 CreateRectangle 节点，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺寸。在 Position 中设置顶点坐标为 $(-(L-W), -(L1+S/2), H)$ ，在 XSize 和 YSize 中设置矩形面的长度和宽度分别为 $-L2$ 和 W ，如图 3.4.15 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

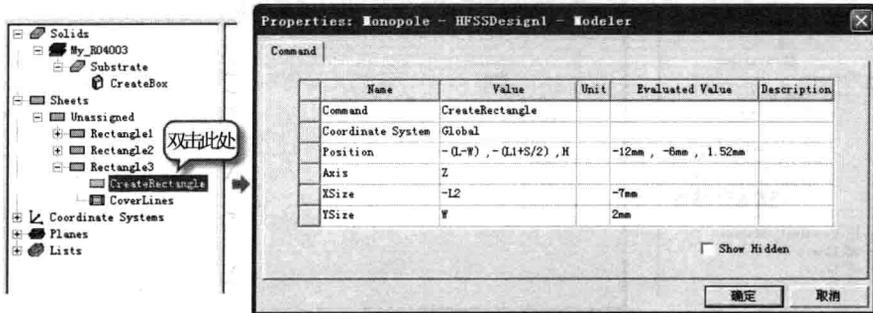


图 3.4.15 矩形面属性对话框的 Command 选项卡 2

④ 创建矩形面 4。

在介质层的上表面上创建如图 3.4.12 所示的矩形面 4，其长度和宽度分别用变量 $R1$ 和 W 表示。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令或者单击工具栏上的 按钮，进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle4。

展开操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle4 节点，双击该节点下的 CreateRectangle 节点，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺寸。在 Position 中设置顶点坐标为 $(-L, S/2, H)$ ，在 XSize 和 YSize 中设置矩形面的宽度和

长度分别为 W 和 $R1$, 如图 3.4.16 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

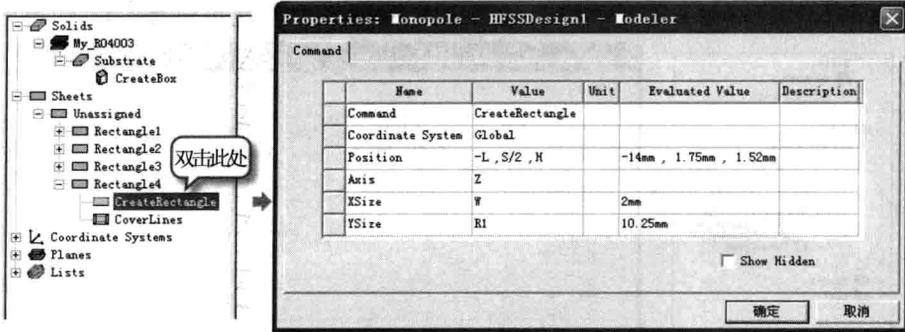


图 3.4.16 矩形面属性对话框的 Command 选项卡 1

⑤ 创建矩形面 5。

在介质层的上表面上创建如图 3.4.12 所示的矩形面 5, 其长度和宽度分别用变量 $R2$ 和 W 表示。

从主菜单栏中选择 **【Draw】** → **【Rectangle】** 命令或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建矩形面的状态, 然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle5。

展开操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle5 节点, 双击该节点下的 CreateRectangle 节点, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺寸。在 Position 中设置顶点坐标为 $(-(L-W), R1+S/2, H)$, 在 XSize 和 YSize 中设置矩形面的长度和宽度分别为 $-R2$ 和 W , 如图 3.4.17 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

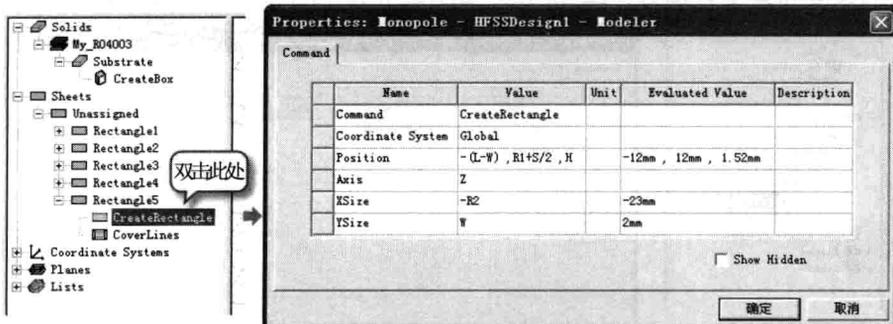


图 3.4.17 矩形面属性对话框的 Command 选项卡 2

⑥ 合并操作生成完整的贴片模型。

按住 **Ctrl** 键, 先后依次单击操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle1 ~ Rectangle5 节点, 以同时选中这 5 个矩形面。然后从主菜单栏中选择 **【Modeler】** → **【Boolean】** → **【Unite】** 命令或者单击工具栏上的  按钮, 执行合并操作。此时, 即可把选中的 5 个矩形面合并成一个整体, 合并生成的整体的名称为 Rectangle1。

(3) 创建介质层下表面的参考地模型

创建位于介质层下表面的参考地模型, 其形状是如图 3.4.12 所示的一个矩形面, 矩形面的长度和宽度分别为 40mm 和 11mm。

从主菜单栏中选择 **【Draw】** → **【Rectangle】** 命令或者单击工具栏上的  按钮, 进入

创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle6。

双击操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle6 节点，打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡，如图 3.4.18 所示。把矩形面的名称设置为 GND，设置其颜色为铜黄色，然后单击 **确定** 按钮退出。

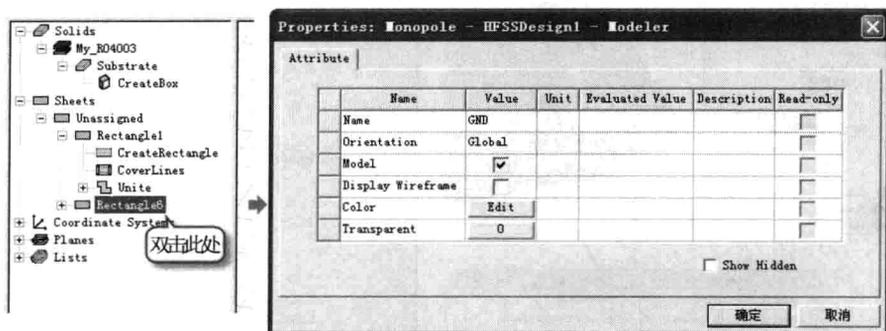


图 3.4.18 矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡

双击操作历史树中 GND 下的 CreateRectangle 节点，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺寸。在 Position 中设置顶点坐标为 $(0, -20, 0)$ ，在 XSize 和 YSize 中设置矩形面的宽度和长度分别为 -11 和 40 ，如图 3.4.19 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

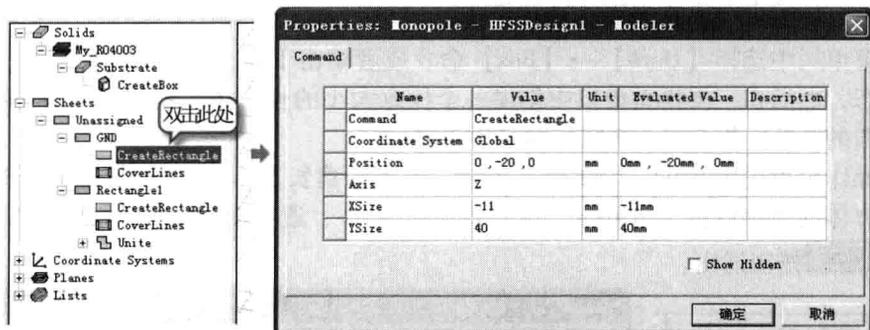


图 3.4.19 矩形面属性对话框的 Command 选项卡

最后，按快捷键 $\text{Ctrl} + \text{D}$ 全屏显示创建的所有物体的模型，如图 3.4.20 所示。

5. 设置边界条件

因为介质层的上、下表面的平面模型 Rectangle1 和 GND 都是金属片，所以为其分配理想导体边界条件。另外，对于天线分析，还需要设置辐射边界。

(1) 分配理想导体边界条件

按住 Ctrl 键，先后依次单击操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle1 和 GND 节点，以同时选中这两个物体，然后在其上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 **【Assign Boundary】** →

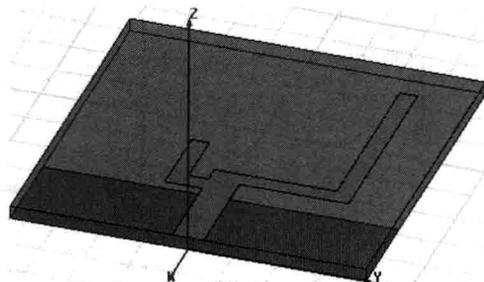


图 3.4.20 微带单极子天线模型

【Perfect E】命令，打开理想导体边界条件设置对话框，如图 3.4.21 所示。保留对话框中的默认设置不变，直接单击 **OK** 按钮，即可设置平面 Rectangle1 和 GND 为理想导体边界条件。理想导体边界条件的名称 PerfE1 会添加到工程树的 Boundaries 节点下。此时，平面 Rectangle1 和 GND 等效为理想导体面。

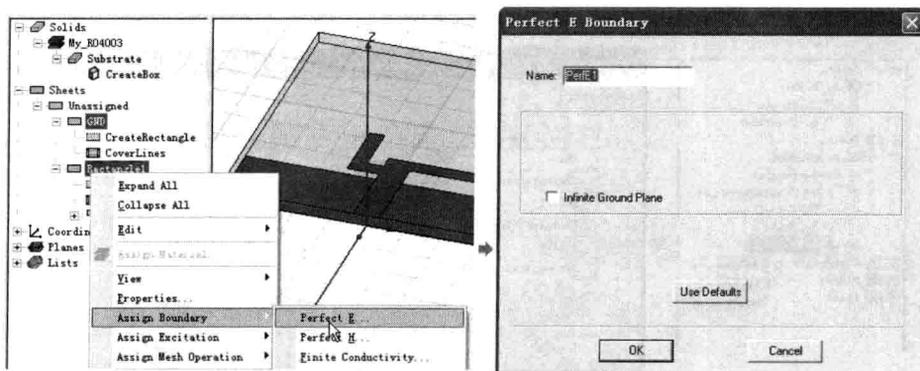


图 3.4.21 分配理想导体边界条件

(2) 设置辐射边界条件

使用 HFSS 分析天线问题时，必须设置辐射边界条件，且辐射表面和辐射体之间的距离需要不小于 $1/4$ 个工作波长。频率为 2.4GHz 时的 $1/4$ 个自由空间波长约为 31mm。我们在这里首先创建一个长方体模型，长方体的各个表面和介质层表面之间的距离都为 40mm，然后把该长方体的表面设置为辐射边界条件。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令或者单击工具栏上的 按钮，进入创建长方体的状态，然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树中 Solids 下的 Box1 节点，打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡。把长方体的名称设置为 AirBox，设置其材质为 air、透明度为 0.8，如图 3.4.22 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

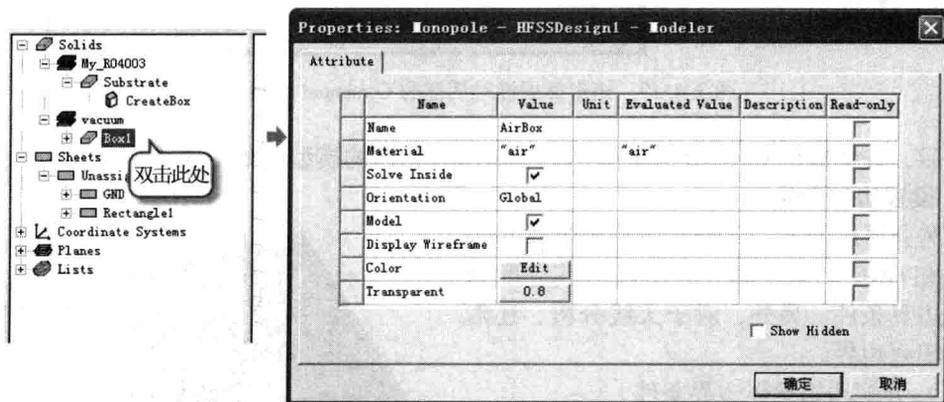


图 3.4.22 长方体属性对话框的 Attribute 选项卡

双击操作历史树中 AirBox 下的 CreateBox 节点，打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和尺寸。在 Position 中设置顶点坐标为

(-80, -60, -40), 在 XSize、YSize 和 ZSize 中设置长方体的长、宽和高分别为 120、120 和 80, 如图 3.4.23 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

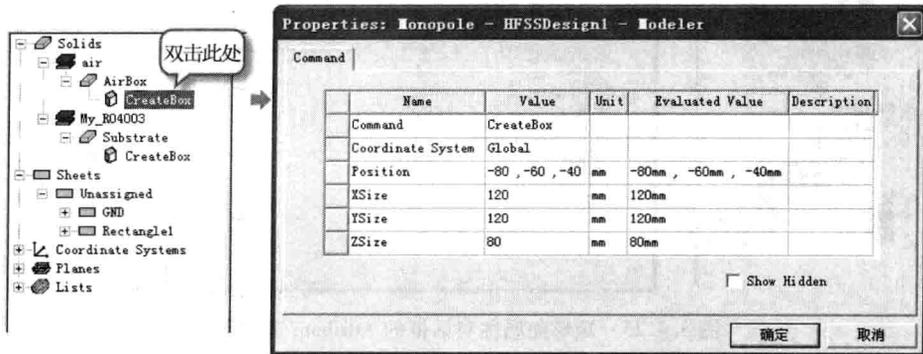


图 3.4.23 长方体属性对话框的 Command 选项卡

创建好长方体模型 AirBox 之后, 在操作历史树下单击 AirBox 节点以选中该模型。然后在三维模型窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Radiation】命令, 打开辐射边界条件设置对话框, 如图 3.4.24 所示。在该对话框中保留默认设置不变, 直接单击 **OK** 按钮, 把长方体模型 AirBox 的表面设置为辐射边界条件。

6. 设置激励方式

因为天线的输入端口位于模型内部, 所以需要使用集总端口激励。首先在天线的馈线端口处创建一个矩形面作为馈

电面, 然后设置该馈电面的激励方式为集总端口激励。

单击工具栏上的 xy 下拉列表框, 从其下拉列表中选择 YZ 选项, 把当前工作平面设置为 yz 平面。从主菜单栏选择【Draw】→【Rectangle】命令或者单击工具栏上的 按钮, 进入创建矩形面的状态, 并在三维模型窗口的 yz 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle6。

双击操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle6 节点, 打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡, 如图 3.4.25 所示。把矩形面的名称设置为 Feed_Port, 然后单击 **确定** 按钮退出。

双击操作历史树中 Feed_Port 下的 CreateRectangle 节点, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺寸。在 Position 中设置顶点位置坐标为 (0, -S/2, H), 在 YSize 和 ZSize 中设置矩形面的长和宽分别为 S 和 -H, 如图 3.4.26 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

这样就在 yz 面上创建了一个与金属片 Rectangle1 和 GND 相接的矩形面, 矩形面的宽度与金属片 Rectangle1 的宽度一致。接下来把该矩形面设置为集总端口激励。需要注意的是, 终端驱动求解类型下集总端口激励的设置操作和模式驱动求解类型下的设置操作是不一样的。

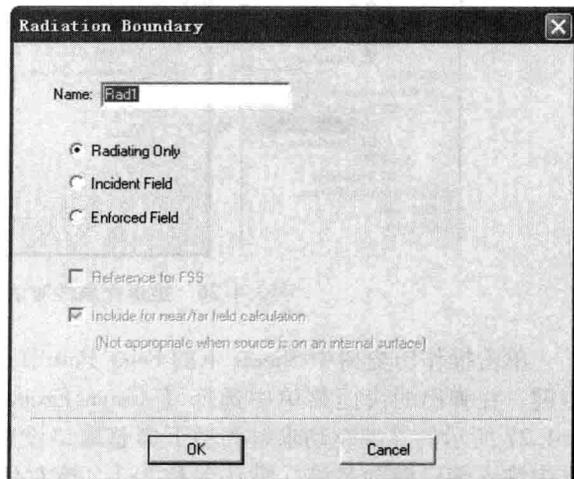


图 3.4.24 辐射边界条件设置对话框

的, 其具体操作如下。

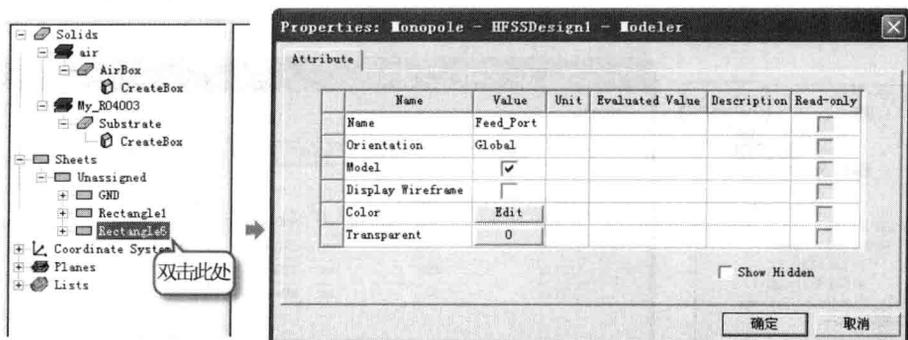


图 3.4.25 矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡

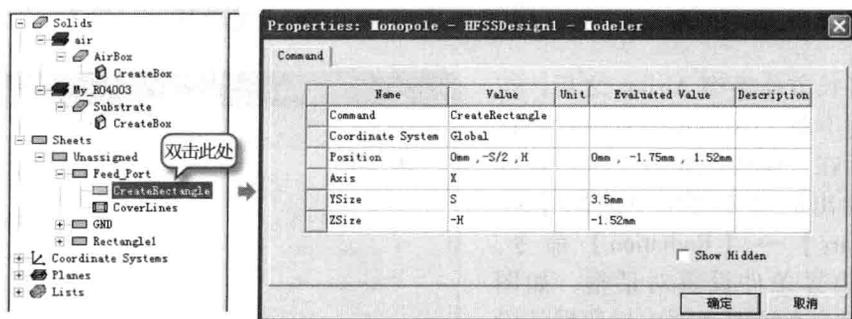


图 3.4.26 矩形面属性对话框的 Command 选项卡

单击操作历史树中 Sheets 下的 Feed_Port 节点, 以选中该矩形面。然后在其上单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Excitation】→【Lumped Port】命令, 打开如图 3.4.27 所示的终端驱动求解类型下集总端口设置对话框。在该对话框中的 Port Name 文本框中输入端口激励名称, 默认名称为 1。该对话框下方的 Conductor 项是设置端口的参考地, 当前设计中平面 GND 是参考地, 因此这里选中 GND 对应的复选框, 其他选项保留默认设置不变, 然后单击 **OK** 按钮, 即可完成集总端口激励的设置。完成后, 设置的集总端口的名称 1 会添加到工程树中 Excitations 节点下, 如图 3.4.28 所示。其中, 1 是集总端口激励名称, Rectangle1_T1 是终端线名称。

双击工程树中 Excitations 节点下的端口激励名称 1, 打开如图 3.4.29 所示的 Lumped Port 对话框, 确认其端口阻抗为 50Ω 。再双击终端线名称 Rectangle1_T1, 打开如图 3.4.30 所示的 Terminal 对话框, 将该对话框中的 Name 文本框中的终端线名称由默认的 Rectangle1_T1 修改为 T1, 再确认其归一化阻抗也为 50Ω 。

7. 求解设置

设计的微带单极子天线工作在 IEEE 802.11a (5.15GHz ~ 5.825GHz) 和 IEEE 802.11b (2.4GHz ~ 2.4825GHz) 两个频段。求解频率设置为天线的最高工作频率, 即 5.8GHz。同时添加频率范围为 1GHz ~ 8GHz 的扫频设置, 选择快速 (Fast) 扫频类型, 分析天线在 1GHz ~ 8GHz 频段的回波损耗或者电压驻波比。

(1) 求解频率和网格剖分设置

设置求解频率为 5.8GHz, 自适应网格剖分的最大迭代次数为 20, 收敛误差为 0.02。

右键单击工程树下的 Analysis 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Add Solution Setup】

命令，打开 Solution Setup 对话框。在该对话框中的 Solution Frequency 项中输入求解频率 5.8GHz，Maximum Number of Passes 文本框中输入最大迭代次数 20，Maximum Delta S 文本框中输入收敛误差 0.02，其他选项保留默认设置，如图 3.4.31 所示。然后单击 **确定** 按钮，完成求解设置。

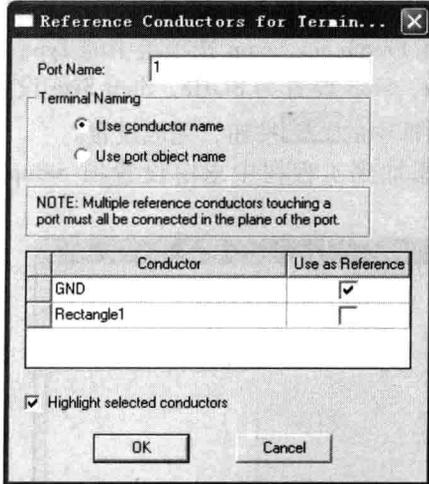


图 3.4.27 集总端口设置对话框



图 3.4.28 工程树下的激励名称

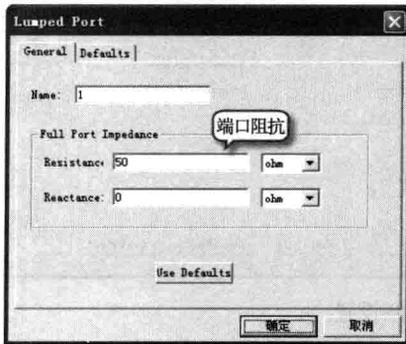


图 3.4.29 Lumped Port 对话框

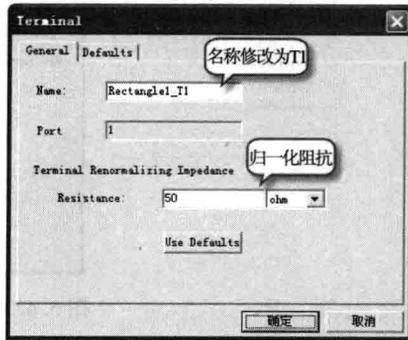


图 3.4.30 Terminal 对话框

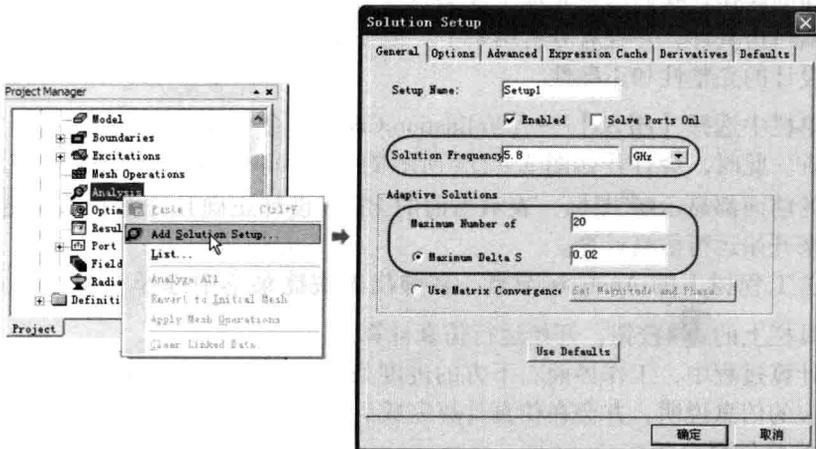


图 3.4.31 求解设置

设置完成后, 求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

(2) 扫频设置

扫频类型选择快速扫频, 扫频频率范围为 1GHz ~ 8GHz, 频率步进为 0.01GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点, 右键单击求解设置项 Setup1, 在弹出的快捷菜单中选择【Add Frequency Sweep】命令, 打开 Edit Sweep 对话框, 如图 3.4.32 所示。在该对话框中的 Sweep Type 下拉列表中选择扫描类型为 Fast, 在 Frequency Setup 选项组中的 Type 下拉列表中选择 LinearStep 选项, 并将 Start 设置为 1GHz, Stop 设置为 8GHz, Step Size 设置为 0.01GHz, 其他选项都保留默认设置。最后单击对话框中的 **OK** 按钮, 完成设置。

设置完成后, 该扫频设置项的名称 Sweep1 会添加到工程树中求解设置项 Setup1 的下面。

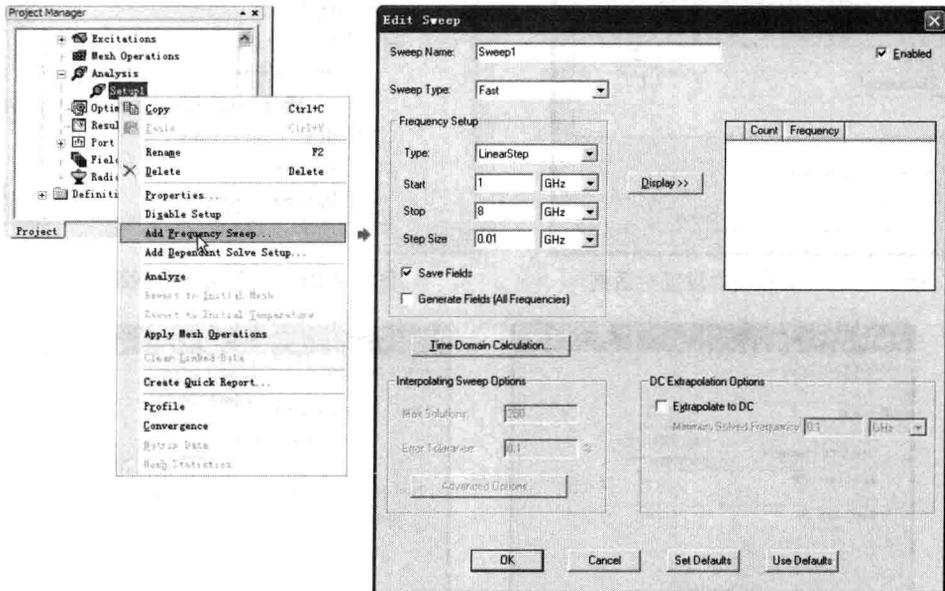


图 3.4.32 扫频设置

8. 设计检查和运行仿真计算

通过前面的操作, 我们已经完成了模型创建和求解设置等 HFSS 设计的前期工作, 接下来就可以运行仿真计算并查看分析结果了。但在运行仿真计算之前, 通常需要进行设计检查, 确认设计的完整性和正确性。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令或者单击工具栏上的  按钮, 进行设计检查。此时, 会打开如图 3.4.33 所示的 Validation Check 对话框。该对话框中的每一个选项的前面都显示  图标, 表示当前的 HFSS 设计正确且完整。单击 **Close** 关闭对话框, 接下来开始运行仿真计算。

右键单击工程树下的 Analysis 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Analyze All】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 开始运行仿真计算。

在仿真计算过程中, 工作界面右下方的进度条窗口中会显示求解进度, 信息管理窗口中也会有相应的信息说明, 并会在仿真计算完成后给出完成提示信息。

9. 天线性能结果分析

仿真分析完成后, 在数据后处理部分能够查看天线各项性能参数的分析结果。这里我

们首先来看一下天线回波损耗的分析结果。

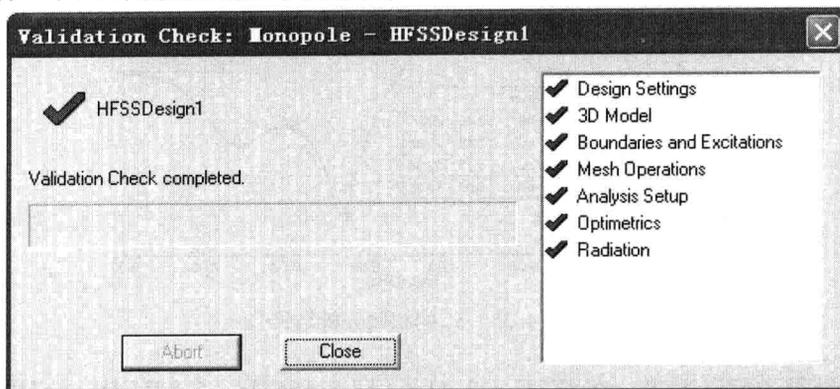


图 3.4.33 设计检查结果对话框

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Terminal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框，如图 3.4.34 所示。在该对话框中确定左侧的 Solution 下拉列表中选择的是 Setup1:Sweep1，在 Category 列表框中选中 Terminal S Parameter，在 Quantity 列表框中选中 St (T1,T1)，在 Function 列表框中选中 dB。然后单击 **New Report** 按钮，再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时，即可生成如图 3.4.35 所示的 1GHz ~ 8GHz 频率范围内的回波损耗 S_{11} 的分析结果。

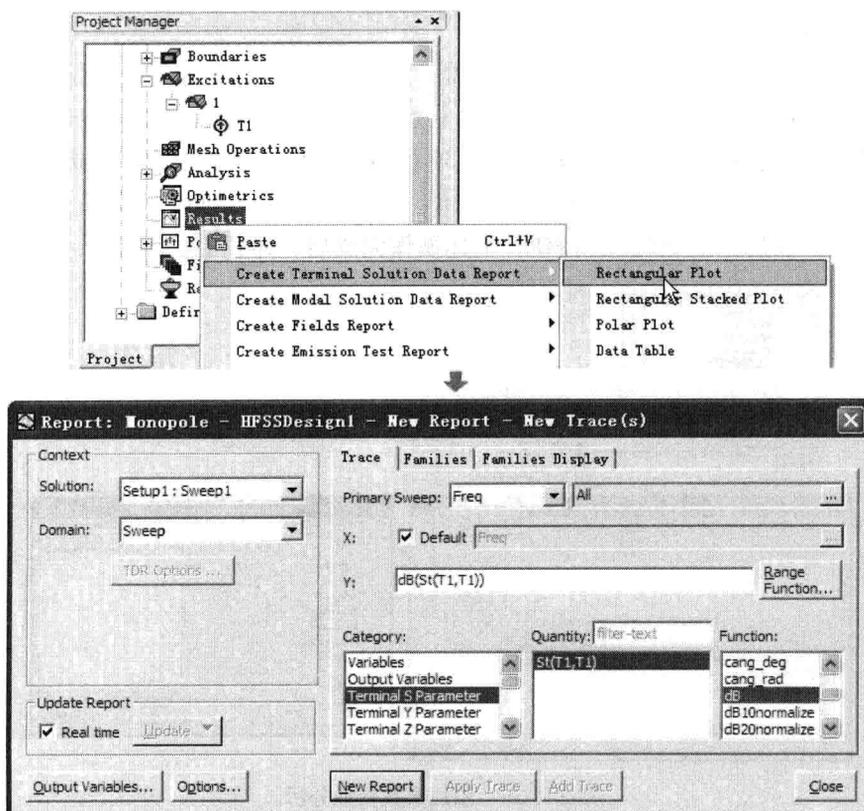
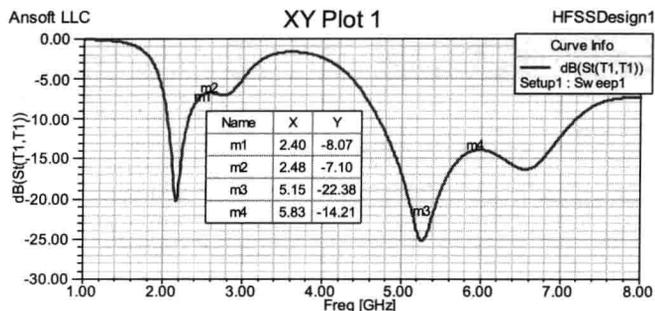


图 3.4.34 查看 S_{11} 分析结果操作

图 3.4.35 S_{11} 的扫频分析结果

从分析结果中可以看出, 在 IEEE 802.11a (即 5.15GHz ~ 5.825GHz) 频段内, S_{11} 小于 -14dB; 在 IEEE 802.11b (即 2.4GHz ~ 2.4825GHz) 频段内, S_{11} 大于 -10dB, 不满足性能要求。其原因是低频段单极子天线的长度偏长, 导致谐振频点偏低。因此我们可以调节天线的长度变量 $R2$, 使得天线的低频谐振频点落在 2.4GHz ~ 2.4825GHz 频段内。

10. 参数扫描分析长度 $R2$ 对低频段谐振频率的影响

从前面的分析结果中可以看出, 初始设计的双频天线在低频段的谐振频率偏低。对于单极子天线, 谐振频率和天线的长度成反比, 因此需要调整天线的长度变量 $R2$, 使得天线在低频段的谐振频点落在 2.4GHz ~ 2.4825GHz 频段内。这里, 我们借助于 HFSS 的参数扫描分析功能, 来分析长度变量 $R2$ 和天线谐振频率的关系, 找出合适的长度变量 $R2$ 的值, 使得天线在低频段的谐振频点落在 2.4GHz ~ 2.4825GHz 频段内。

(1) 添加参数扫描分析项

右键单击工程树下的 Optimetrics 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令, 打开 Setup Sweep Analysis 对话框。然后单击该对话框中的 **Add...** 按钮, 打开 Add/Edit Sweep 对话框, 如图 3.4.36 所示。在该对话框中的 Variable 下拉列表中选择变量 $R2$, 接着选中 Linear step 单选按钮, 并设置 Start、Stop 和 Step 分别为 18mm、23mm 和 1mm, 然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后, 单击 **OK** 按钮, 关闭 Add/Edit

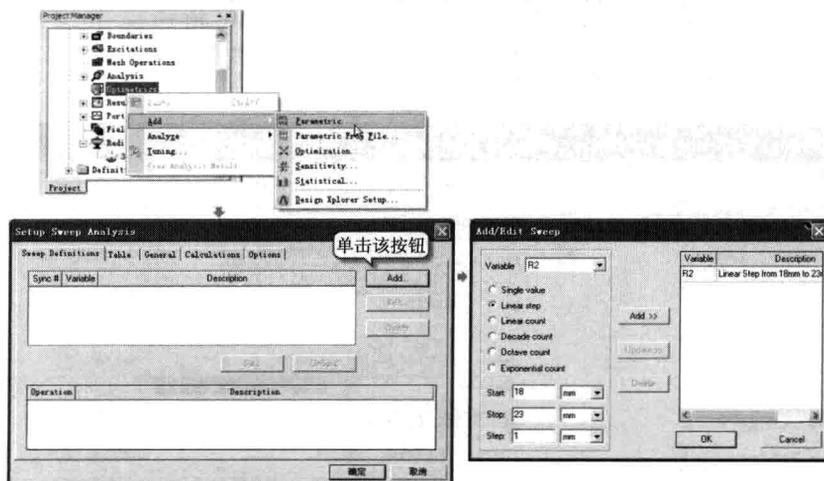


图 3.4.36 添加参数扫描分析

Sweep 对话框。最后，单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮，完成添加参数扫描的操作，添加 R2 为扫描变量。

完成后，参数扫描分析项会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认的名称为 ParametricSetup1。

(2) 运行参数扫描分析

右键单击工程树中 Optimetrics 下的 ParametricSetup1 节点，在弹出的快捷菜单中选择 **【Analyze】** 命令，运行参数扫描分析。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后，右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择 **【Create Terminal Solution Data Report】** → **【Rectangular Plot】** 命令，打开报告设置对话框，采用和图 3.4.34 相同的设置。然后单击 **New Report** 按钮，生成如图 3.4.37 所示的一组 S_{11} 分析结果报告，结果报告中每条 S_{11} 曲线对应不同的 R2 变量值。

从参数扫描分析结果中可以看出，谐振频率随着天线臂长度变量 R2 的变短而升高。当 R2 = 19mm 时，谐振频率约为 2.45GHz。因此 R2 的值可以取 19mm。

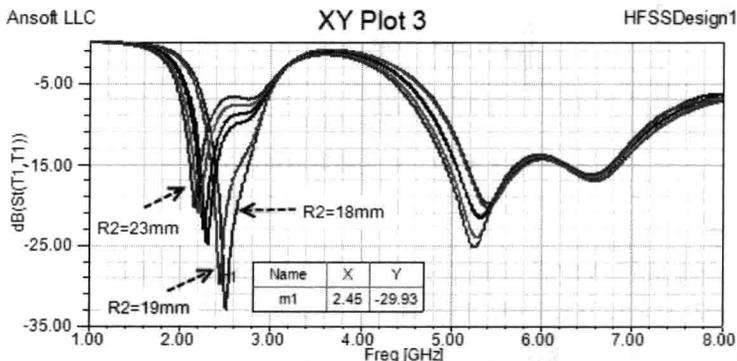


图 3.4.37 不同 R2 对应的 S_{11} 曲线

(4) 把变量 R2 的值设置为 19mm

从主菜单栏中选择 **【HFSS】** → **【Design Properties】** 命令，打开如图 3.4.38 所示的设计属性对话框，把 R2 对应的值由 23 修改为 19。

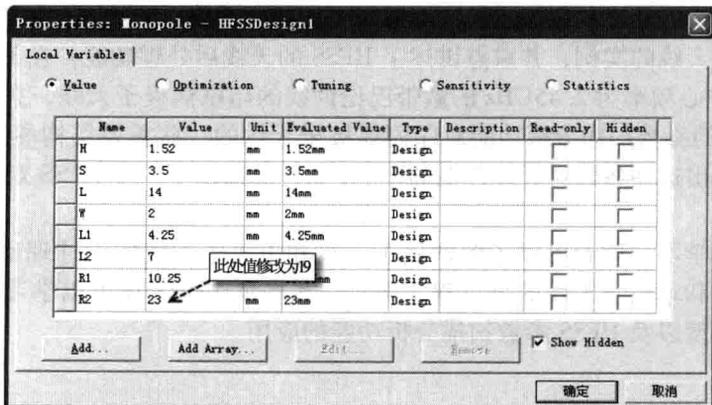


图 3.4.38 设计属性对话框

11. 查看最终设计结果

(1) 运行仿真分析

在上一节的分析中, 我们知道当 $R2 = 19\text{mm}$ 时, 低频段的谐振频率约为 2.45GHz 。上一节中同时也把 $R2$ 的值设置为 19mm 了。这里再次右键单击工程树下的 Analysis 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令, 运行仿真分析。

(2) 查看 S_{11} 结果

分析完成后, 双击工程树中 Results 下的 XY Plot 1 节点, 打开前面生成的 S_{11} 结果报告, 此时 S_{11} 会自动更新为最新的分析结果, 如图 3.4.39 所示。从分析结果中可以看出, 设计的双频单极子天线的高频和低频谐振频点分别落在 IEEE 802.11a ($5.15\text{GHz} \sim 5.825\text{GHz}$) 和 IEEE 802.11b ($2.4\text{GHz} \sim 2.4825\text{GHz}$) 工作频段上。

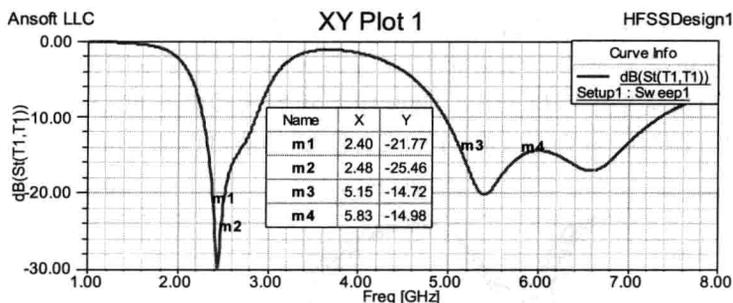


图 3.4.39 S_{11} 的最终分析结果

12. 保存设计

至此, 我们便完成了 WLAN 双频单极子天线的 HFSS 设计分析。在设计中, 我们给出了工作于 IEEE 802.11a 和 IEEE 802.11b 两个工作频段上的微带结构单极子天线的 HFSS 分析结果。最后单击工具栏中的  按钮保存设计, 再从主菜单栏中选择【File】→【Exit】命令, 退出 HFSS。

3.5 本章小结

本章讲述了半波偶极子天线和单极子天线的分析设计。其中, 3.1 节给出了半波偶极子天线的理论分析以及半波偶极子天线到单极子天线的演变; 3.2 节给出了使用 HFSS 分析设计半波偶极子天线的实例, 并重点讲述了 HFSS 的天线后处理功能; 在 3.3 节中使用 HFSS 设计了一个中心频率为 2.45GHz 的微带巴伦馈线的印刷偶极子天线, 并通过 HFSS 软件 Optimetrics 模块的参数扫描分析功能对印刷偶极子天线的一些重要结构参数进行了参数扫描分析, 从而给出这些参数对天线性能的影响; 3.4 节给出了一个 HFSS 双频单极子天线设计实例。

通过本章的学习, 读者可以了解偶极子天线和单极子天线的设计理论以及使用 HFSS 分析设计偶极子和单极子天线的全过程。同时, 在本章中读者还可以学习到在 HFSS 中如何创建参数化模型以及 HFSS 参数扫描分析功能的应用。

第 4 章

微带天线设计

微带天线的概念首先是由 Deschamps 于 1953 年提出来的，它是在一块厚度远小于工作波长的介质基片的一面敷以金属辐射片、一面全部敷以金属薄层作接地板而成；辐射片可以根据不同的要求设计成各种形状。微带天线具有质量轻、体积小和易于制造等优点，现今，它已经广泛应用于个人无线通信中。

本章中首先介绍了微带天线的理论基础和工作原理，然后以矩形微带天线为例，循序渐进地讲解了侧馈微带天线、背馈微带天线、双频微带天线和圆极化微带天线的工作原理、设计过程，以及在 HFSS 中的仿真实现。

4.1 微带天线概述

4.1.1 微带天线的辐射机理

微带天线的辐射机理可以用图 4.1.1 来进行简单的说明。对于如图 4.1.1 (a) 所示的矩形贴片微带天线，理论上可以采用传输线模型来分析其性能。假设辐射贴片的长度近似为半波长，宽度为 w ，介质基片的厚度为 h ，工作波长为 λ 。我们可以将辐射贴片、介质基片和接地板视为一段长度为 $\lambda/2$ 的低阻抗微带传输线，且传输线的两端断开形成开路。由于介质基片的厚度 $h \ll \lambda$ ，故电场沿着厚度 h 方向基本没有变化。在最简单的情况下，我们可以假设电场沿着宽度 w 方向也没有变化。那么，在只考虑主模激励 (TM_{10} 模) 的情况下，传输线的场结构如图 4.1.1 (b) 所示，辐射基本上可以认为是由辐射贴片开路边的边缘引起的。在两开路端的电场可以分解为相对于接地板的垂直分量和水平分量。由于辐射贴片长度约为半个波长，因此两开路端电场的垂直分量方向相反，水平分量方向相同。所以，两开路端的水平分量电场可以等效为无限大平面上同相激励的两个缝隙，缝隙的宽度

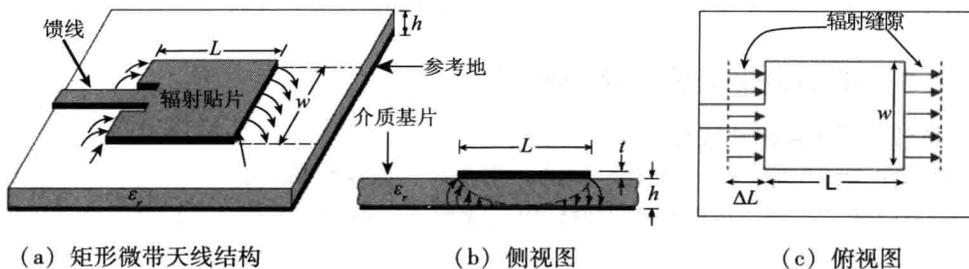


图 4.1.1 微带天线

为 ΔL (近似等于基片厚度 h), 长度为 w , 两缝隙相距为半波长, 缝隙的电场沿着 w 方向均匀分布, 电场方向垂直于 w 方向, 如图 4.1.1 (c) 所示。

如果介质基片中的场同时沿宽度和长度方向变化, 这时微带天线应该用辐射贴片周围的四个缝隙的辐射来等效。

4.1.2 微带天线的馈电

微带天线有多种馈电方式, 如微带线馈电、同轴线馈电、耦合馈电 (Coupled Feed) 和缝隙馈电 (Slot Feed) 等, 其中, 最常用的是微带线馈电和同轴线馈电两种馈电方式。

1. 微带线馈电

微带线馈电方式又称为侧馈, 它与微带辐射贴片集成在一起的微带传输线进行馈电。它可以中心馈电, 也可以偏心馈电, 如图 4.1.2 所示, 馈电点的位置取决于激励哪种模式。对于微带传输线的馈电方式, 当微带天线的尺寸确定以后, 可以用以下方法进行阻抗匹配: 先将中心馈电天线辐射贴片同 50Ω 馈线一起光刻, 测量输入阻抗并设计出阻抗匹配变换器, 然后在天线辐射贴片与馈线之间接入该阻抗匹配器, 重新做成天线。

如果矩形辐射贴片的场沿某边有变化, 那么输入阻抗也会随之变化。因此, 改动馈电点的位置是获得阻抗匹配的简单办法。

2. 同轴线馈电

同轴线馈电又称为背馈, 它是将同轴插座安装在接地板上, 同轴线内的导体穿过介质基片接在辐射贴片上, 如图 4.1.3 所示。若寻取正确的馈电点位置, 就可以获得良好的匹配。

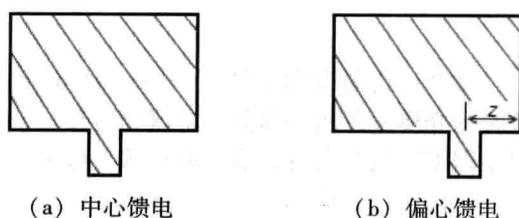


图 4.1.2 微带线馈电

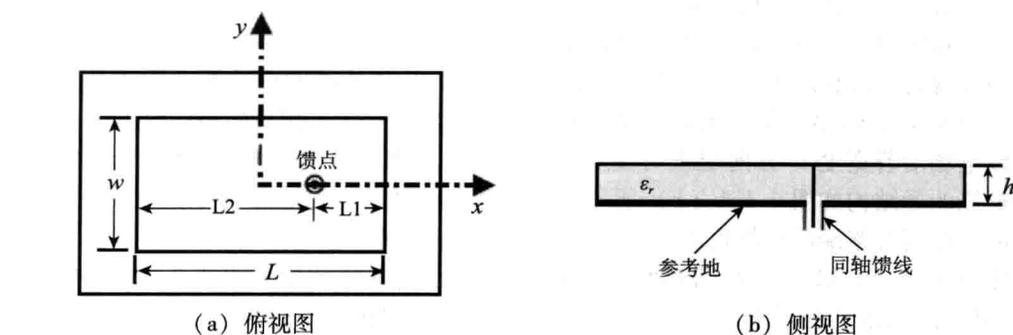


图 4.1.3 同轴线馈电

4.1.3 矩形微带天线的特性参数

1. 微带辐射贴片尺寸估算

设计微带天线的第一步是选择合适的介质基片, 假设介质的介电常数为 ϵ_r , 对于工作频率 f 的矩形微带天线, 可以用下式设计出高效率辐射贴片的宽度 w , 即为:

$$w = \frac{c}{2f} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4-1-1)$$

式中, c 是光速。

辐射贴片的长度一般取为 $\lambda_e/2$ ；这里 λ_e 是介质内的导波波长，即为：

$$\lambda_e = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_e}} \quad (4-1-2)$$

考虑到边缘缩短效应后，实际上的辐射单元长度 L 应为：

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon_e}} - 2\Delta L \quad (4-1-3)$$

式中， ε_e 是有效介电常数， ΔL 是等效辐射缝隙长度。它们可以分别用下式计算，即为：

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4-1-4)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_e + 0.3)(w/h + 0.264)}{(\varepsilon_e - 0.258)(w/h + 0.8)} \quad (4-1-5)$$

2. 辐射场

如前面所述，矩形微带天线可以视作一段长 L 等于 $\lambda/2$ 的低阻抗微带传输线，它的辐射场被认为是由传输线两端开路处的缝隙所形成的。因此，矩形微带天线可以等效为长 w 、宽 h 、间距为 L 的二元缝隙天线阵。

单个缝隙天线的方向性函数为：

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{kh}{2}\sin\theta\cos\varphi\right) \sin\left(\frac{kL}{2}\cos\theta\right)}{\frac{kh}{2}\sin\theta\cos\varphi \frac{kL}{2}\cos\theta} \sin\theta \quad (4-1-6)$$

因此，矩形微带天线的辐射场只需在单缝隙天线的表达式中乘以二元阵的阵因子就可以了。这样，矩形微带天线的方向性函数可以表示为：

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{kh}{2}\sin\theta\cos\varphi\right) \sin\left(\frac{kL}{2}\cos\theta\right)}{\frac{kh}{2}\sin\theta\cos\varphi \frac{kL}{2}\cos\theta} \sin\theta \cos\left(\frac{kL}{2}\cos\varphi\right) \quad (4-1-7)$$

工程设计中关心较多的是 E 面 ($\theta=90^\circ$) 和 H 面 ($\varphi=90^\circ$) 方向图，于是由式 (4-1-7) 可得 E 面的方向性函数为：

$$F_E(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{kh}{2}\cos\varphi\right)}{\frac{kh}{2}\cos\varphi} \cos\left(\frac{kL}{2}\cos\theta\right) \quad (4-1-8)$$

考虑到 $kh \ll 1$ ，则式 (4-1-8) 可以近似写为：

$$F_E(\theta, \varphi) = \cos\left(\frac{kL}{2}\cos\theta\right) \quad (4-1-9)$$

H 面的方向性函数为：

$$F_H(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{kL}{2}\cos\theta\right)}{\frac{kL}{2}\cos\theta} \sin\theta \quad (4-1-10)$$

3. 输入导纳

如果天线采用如图 4.1.2 所示的微带线馈电方式，假设馈电点到辐射贴片边缘拐角处的距离为 z ，则微带天线的输入导纳可以由下式计算：

$$Y_{in}(z) = 2G \left[\cos^2(\beta z) + \frac{G^2 + B^2}{Y_0^2} \sin^2(\beta z) - \frac{B}{Y_0} \sin(2\beta z) \right]^{-1} \quad (4-1-11)$$

式中, Y_0 是把天线视作传输线时的特性导纳, β 是介质中的相位常数, G 是辐射电导, B 是等效电纳, 且有:

$$G = \frac{I}{120\pi^2} \quad (4-1-12)$$

式中,

$$I = \int_0^\pi \sin^2\left(\frac{kw}{2}\cos\theta\right) \text{tg}^2\theta \sin\theta d\theta \quad (4-1-13)$$

$$B = \frac{k\Delta L \sqrt{\epsilon_e}}{Z_0} \quad (4-1-14)$$

式中, Z_0 是把天线视作传输线时的特性阻抗。

在一般情况下, $G/Y_0 \ll 1$, $B/Y_0 \ll 1$ 。这样, 式(4-1-11)可以简化为:

$$Y_{in}(z) = \frac{2G}{\cos^2(\beta z)} \quad (4-1-15)$$

上式中, 除 $\beta z = \pi/2$ 外, 该式均成立。可见, 选取不同的馈电点位置可以获得不同的输入阻抗。

如果天线采用如图 4.1.3 所示的同轴线馈电方式, 假设馈电点在长度 L 方向上离辐射贴片两端的距离分别为 L_1 和 L_2 , 则馈电点位置的输入导纳值为:

$$Y_1 = Y_0 \left[\frac{Z_0 \cos\beta L_1 + jZ_w \sin\beta L_1}{Z_w \cos\beta L_1 + jZ_0 \sin\beta L_1} + \frac{Z_0 \cos\beta L_2 + jZ_w \sin\beta L_2}{Z_w \cos\beta L_2 + jZ_0 \sin\beta L_2} \right] \quad (4-1-16)$$

式中, $Z_0 = 1/Y_0$ 是把天线视作传输线时的特性阻抗; $Y_w = 1/Z_w$ 是壁导纳, 其值为:

$$Y_w = 0.00836 \frac{w}{\lambda} + j0.01668 \frac{\Delta L}{h} \frac{w}{\lambda} \epsilon_e \quad (4-1-17)$$

在同轴线馈线端口处, 电抗可以表示为:

$$X_L = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{tg}(kh) \quad (4-1-18)$$

因此输入阻抗的公式为:

$$Z_{in} = \frac{1}{Y_{in}} = \frac{1}{Y_1} + jX_L \quad (4-1-19)$$

同样可见, 移动同轴线馈电点的位置, 即改变 L_1 和 L_2 , 可使输入阻抗改变, 从而获得阻抗匹配。

4. 方向性系数

根据方向性系数的定义, 可以给出微带天线的方向性系数为:

$$D = \frac{8}{I} \left(\frac{w\pi}{\lambda} \right)^2 \quad (4-1-20)$$

4.2 侧馈矩形微带天线设计

4.2.1 设计要求

使用 HFSS 设计中心频率为 2.45GHz 的矩形微带天线，并给出其天线参数。介质基片采用厚度为 1.6mm 的 FR4 环氧树脂 (FR4 Epoxy) 板，天线馈电方式为微带线馈电。矩形微带天线实物如图 4.2.1 所示。

4.2.2 设计步骤

1. 计算天线尺寸

微带天线的介质基片采用厚度为 1.6mm 的 FR4 环氧树脂板，所以厚度 $h = 1.6\text{mm}$ ，介质的介电常数 $\varepsilon_r = 4.4$ 。

由式 (4-1-1) 和 (4-1-3) ~ (4-1-5) 可以计算求得天线辐射贴片的宽度和长度，以及有效介电常数和等效缝隙宽度，分别如下。

辐射贴片宽度： $w = 37.26\text{mm}$

辐射贴片长度： $L = 30.21\text{mm}$

有效介电常数： $\varepsilon_e = 3.73$

等效缝隙宽度： $\Delta L = 0.75\text{mm}$

2. 馈电点位置和输入阻抗

设计中，微带线馈电点的位置选在辐射贴片的中点。此时馈电点和辐射贴片边缘距离为 $w/2 = 18.63\text{mm}$ ，由式 (4-1-15) 可以计算出此时天线的输入导纳，从而推算出天线的输入阻抗值。其输入阻抗 $Z_{in} \approx 130\Omega$ 。

3. 阻抗匹配

一般而言，微带天线的边缘阻抗为 $100\Omega \sim 400\Omega$ ，并不符合微波器件通用的 50Ω 系统，所以在设计微带线馈电的矩形微带天线时，可加上一段 $1/4$ 波长阻抗转换器，使得微带天线的边缘阻抗与 50Ω 阻抗达成匹配。图 4.2.2 所示为一个 $1/4$ 波长阻抗转换器，假设天线的边缘阻抗为 Z_L ，微带线特性阻抗为 Z_0 ， $1/4$ 波长阻抗转换器的特性阻抗为 Z_1 。阻抗匹配的条件为：

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 Z_L} \quad (4-2-1)$$

微带线特性阻抗为 $Z_0 = 50\Omega$ ，天线边缘阻抗上面计算为 $Z_L = Z_{in} \approx 130\Omega$ ，所以波长阻抗转换器的特性阻抗为 $Z_1 = 80.6\Omega$ 。

4. 微带线的尺寸

对于介质基片厚度为 1.6mm 的 FR4 环氧树脂板的微带线，我们可以计算出特性阻抗为 50Ω 时对应的微带线宽度为 2.98mm，特性阻抗为 80.6Ω 时对应的微带线宽度为 1.16mm，微带线在 2.45GHz 时 $1/4$ 波长对应的长度为 17.45mm。

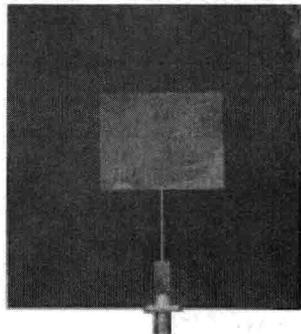


图 4.2.1 矩形微带天线

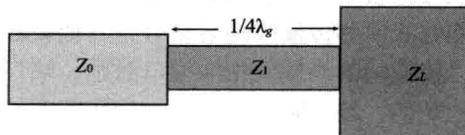


图 4.2.2 $1/4$ 波长阻抗转换器

4.2.3 HFSS 设计概述

计算出了上述的矩形微带天线的结构尺寸之后,就可以使用 HFSS 设计分析这样的—个微带天线。为了方便建模和后续的性能分析,在设计中我们定义—系列变量来表示矩形天线的结构尺寸。变量的定义以及天线的结构尺寸如表 4.2.1 所示。

表 4.2.1 变量定义

	结构名称	变量名	变量值 (单位: mm)
介质基片	厚度	H	1.6
辐射贴片	长度	L0	30.21
	宽度	W0	37.26
1/4 波长阻抗转换器	长度	L1	17.45
	宽度	W1	1.16
50Ω 微带线	长度	L2	15
	宽度	W2	2.98

矩形微带天线的 HFSS 设计模型如图 4.2.3 所示。模型的中心位于坐标原点,辐射贴片的长度方向是沿着 x 轴方向,宽度方向是沿着 y 轴方向。介质基片的宽度是辐射贴片宽度的 2 倍 (即 $2 \times W0$),介质基片的长度是两倍辐射贴片长度、1/4 波长阻抗转换器长度与 50Ω 微带线的长度之和 (即为 $2 \times L0 + L1 + L2$)。参考地和辐射贴片使用理想薄导体来代替,在 HFSS 中我们可以通过给—个二维平面模型分配理想导体边界条件的方式来模拟理想薄导体。

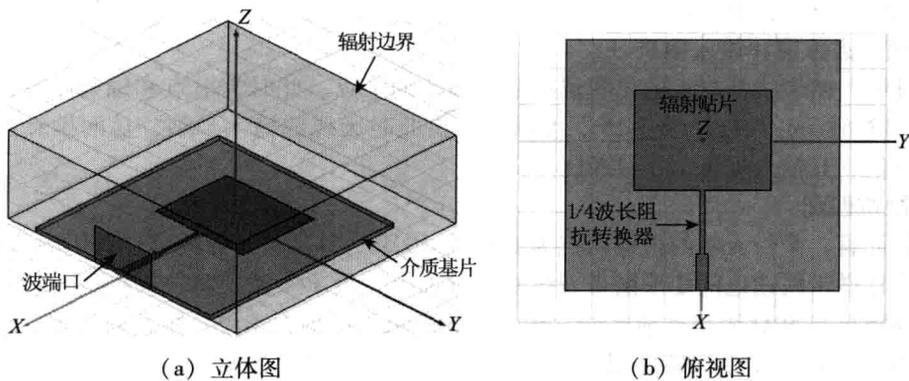


图 4.2.3 矩形微带天线的 HFSS 设计模型

使用 HFSS 分析设计天线时,我们必须设置辐射边界条件。辐射边界表面和辐射体的距离通常需要大于 1/4 个波长,2.45GHz 时自由空间中 1/4 个波长约为 30mm。这里创建一个长方体模型来设置辐射表面,长方体的底面和介质基片底面重合,长方体在传输线终端—侧的表面和传输线终端重合,其他表面和辐射贴片的距离设置为 30mm。

传输线的终端使用波端口激励,端口底面和参考地相接,端口高度设置为介质基片高度的 8 倍,端口宽度设置为微带线宽度的 8 倍。

求解频率,这里设置为天线的中心频率 2.45GHz,扫频范围设置为 1.5GHz ~ 3.5GHz,使用快速扫频。

在设计中,我们需要调整微带贴片的长度和阻抗转换器的宽度,以便达到良好的天线性能,并在最后使用 HFSS 分析给出微带天线各项性能参数的分析结果。

4.2.4 HFSS 仿真设计

1. 新建设计工程

(1) 运行 HFSS 并新建工程

双击桌面上的 HFSS 快捷方式图标，启动 HFSS 软件。HFSS 运行后，它会自动新建一个工程文件，选择【File】→【Save As】命令，把工程文件另存为 Patch.hfss 文件。

(2) 设置求解类型

设置当前设计为模式驱动求解类型。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Solution Type】命令，打开如图 4.2.4 所示的 Solution Type 对话框，选中 Driven Modal 单选按钮，然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

(3) 设置模型长度单位

设置当前设计在创建模型时所使用的默认长度单位为 mm。

从主菜单栏中选择【Modeler】→【Units】命令，打开如图 4.2.5 所示的 Set Model Units 对话框。在该对话框中将 Select units 选项设置为 mm。然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

2. 添加和定义设计变量

在 HFSS 中定义和添加如表 4.2.1 所示的设计变量。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框。在该对话框中单击 **Add...** 按钮，打开 Add Property 对话框。在 Name 文本框中输入第一个变量名称 H，在 Value 文本框中输入该变量的初始值 1.6mm，然后单击 **OK** 按钮，即可添加变量 H 到设计属性对话框中。变量定义和添加的过程如图 4.2.6 所示。

使用相同的操作方法，分别定义变量 L0，其初始值为 30.21mm；变量 W0，其初始值为 37.26mm；变量 L1，其初始值为 17.45mm；变量 W1，其初始值为 1.16mm；变量 L2，其初始值为 15mm；变量 W2，其初始值为 2.98mm。定义完成后，确认设计属性对话框如图 4.2.7 所示。

最后单击设计属性对话框中的 **确定** 按钮，完成所有变量的定义和添加工作。

3. 设计建模

(1) 创建介质基片

创建一个长方体模型用以表示介质基片，长方体模型的底面位于 xoy 平面，中心位于

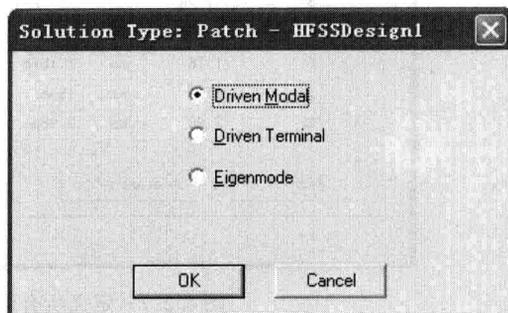


图 4.2.4 设置求解类型

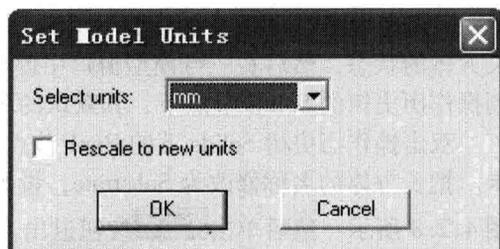


图 4.2.5 设置长度单位

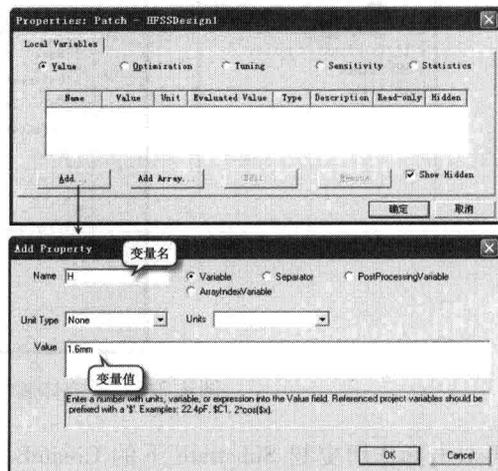


图 4.2.6 定义变量

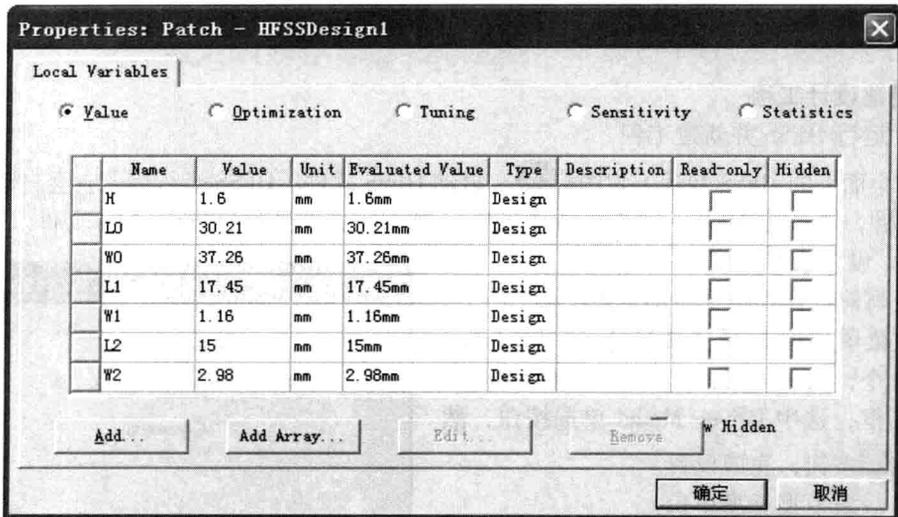


图 4.2.7 定义所有设计变量后的设计属性对话框

坐标原点；模型的材质为 FR4，并将该模型命名为 Substrate。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令，或者单击工具栏上的 按钮，进入创建长方体的状态，然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 下的 Box1 节点，打开新建长方体属性对话框中的 Attribute 选项卡。把长方体的名称修改为 Substrate，设置其材质为 FR4_epoxy，设置其透明度为 0.6，如图 4.2.8 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

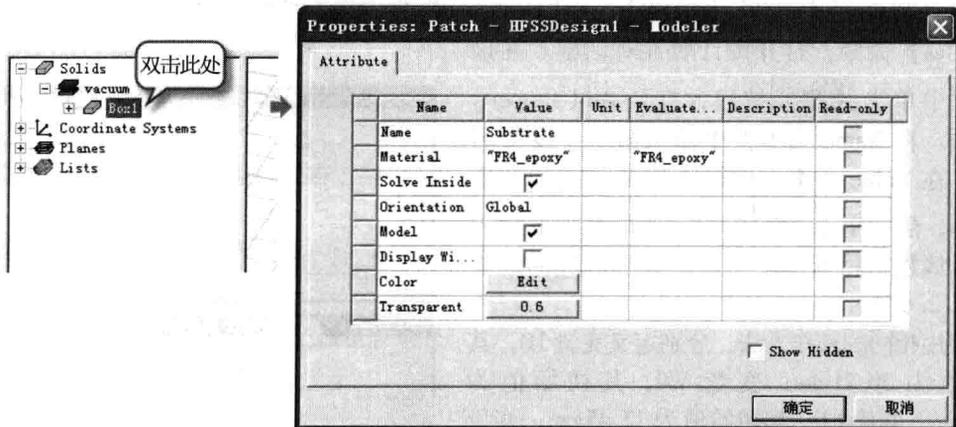


图 4.2.8 长方体属性对话框中的 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Substrate 下的 CreateBox 节点，打开新建长方体属性对话框中的 Command 选项卡，在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和尺寸。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 $(-L0, -W0, 0)$ ，在 XSize、YSize 和 ZSize 文本框中分别输入长方体的长、宽和高分别为 $1.5 \times L0 + L1 + L2$ 、 $2 \times W0$ 和 H，如图 4.2.9 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

此时就创建好了名为 Substrate 的介质基片模型。然后按快捷键 $\text{Ctrl} + \text{D}$ 全屏显示创建的物体模型。

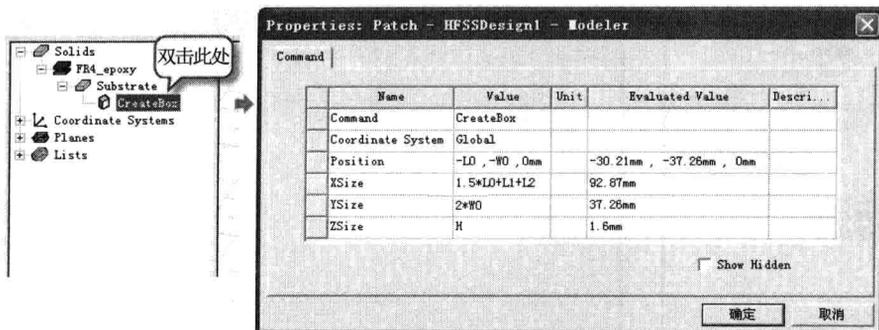


图 4.2.9 长方体属性对话框中的 Command 选项卡

(2) 创建辐射贴片

在介质基片的上表面创建一个中心位于坐标原点，长度和宽度分别用变量 $L0$ 和 $W0$ 表示的矩形面，并将其命名为 Patch。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1，打开新建矩形面属性对话框中的 Attribute 选项卡，如图 4.2.10 所示。把矩形面的名称修改为 Patch，设置其颜色为铜黄色。然后单击 **确定** 按钮退出。

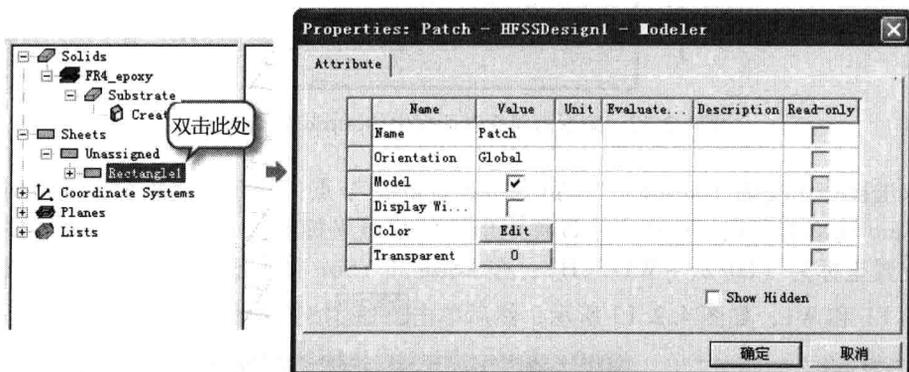


图 4.2.10 矩形面属性对话框中的 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Patch 下的 CreateRectangle 节点，打开新建矩形面属性对话框中的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺寸。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 $(-L0/2, -W0/2, H)$ ，在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的长度和宽度为 $L0$ 和 $W0$ ，如图 4.2.11 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

(3) 创建 $1/4$ 波长阻抗转换器

使用和前面相同的操作方法在介质基片的上表面创建一个矩形面，用以表示 $1/4$ 波长阻抗转换器。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle1。

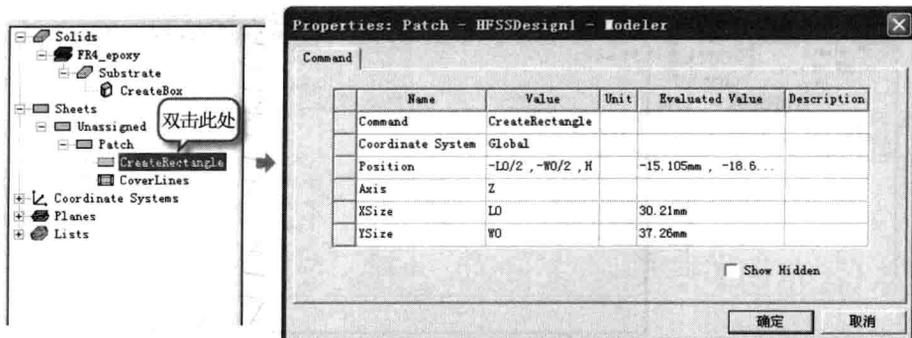


图 4.2.11 矩形面属性对话框中的 Command 选项卡

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1，打开新建矩形面属性对话框中的 Attribute 选项卡，如图 4.2.12 所示，把矩形面的名称修改为 Transition。然后单击 **确定** 按钮退出。

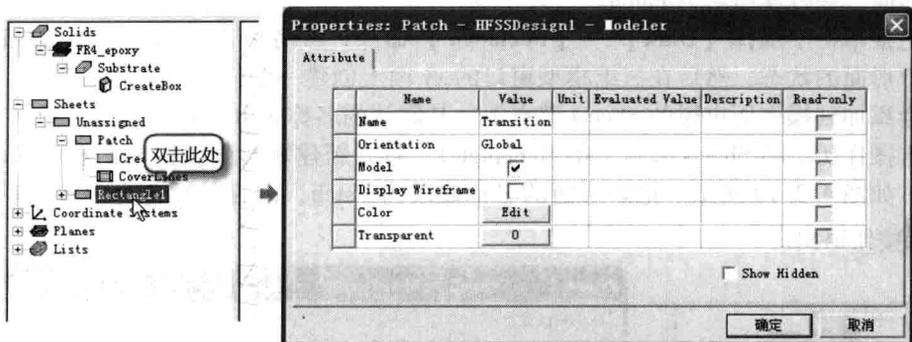


图 4.2.12 矩形面属性对话框中的 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Transition 下的 CreateRectangle 节点，打开新建矩形面属性对话框中的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺寸。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 $(L0/2, -W1/2, H)$ ，在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的长度和宽度为 $L1$ 和 $W1$ ，如图 4.2.13 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

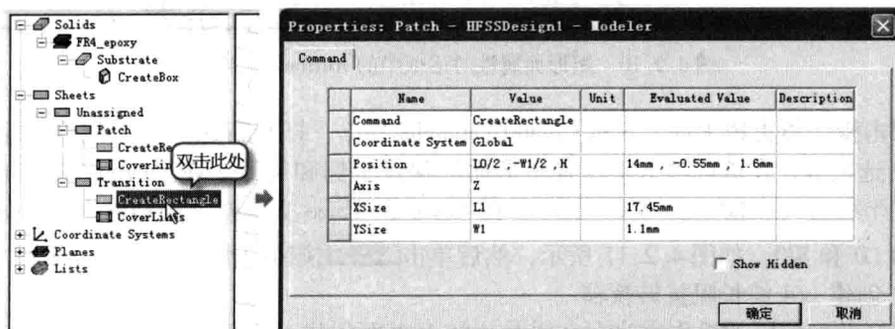


图 4.2.13 矩形面属性对话框中的 Command 选项卡

(4) 创建 50Ω 微带传输线

使用和前面相同的操作方法在介质基片的上表面创建一个矩形面，用以表示 50Ω 微带

传输线。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏上的按钮，进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的xy面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的Sheets节点下，其默认的名称为Rectangle1。

双击操作历史树Sheets节点下的Rectangle1，打开新建矩形面属性对话框中的Attribute选项卡，如图4.2.14所示。把矩形面的名称修改为Microstrip，然后单击按钮退出。

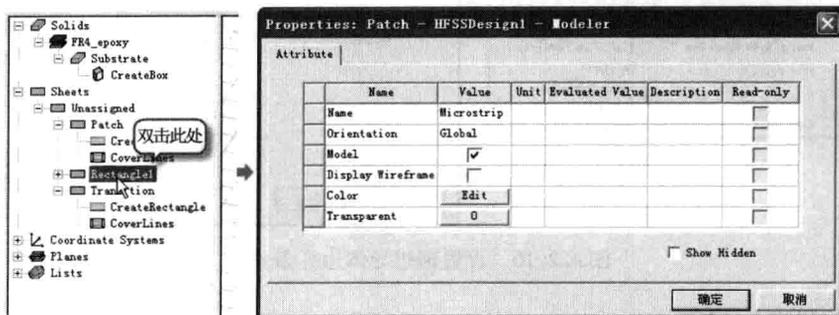


图 4.2.14 矩形面属性对话框中的 Attribute 选项卡

再双击操作历史树Microstrip节点下的CreateRectangle，打开新建矩形面属性对话框中的Command选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺寸。在Position文本框中输入顶点位置坐标为 $(L0/2 + L1, -W2/2, H)$ ，在XSize和YSize文本框中分别输入矩形面的长度和宽度为L2和W2，如图4.2.15所示，然后单击按钮退出。

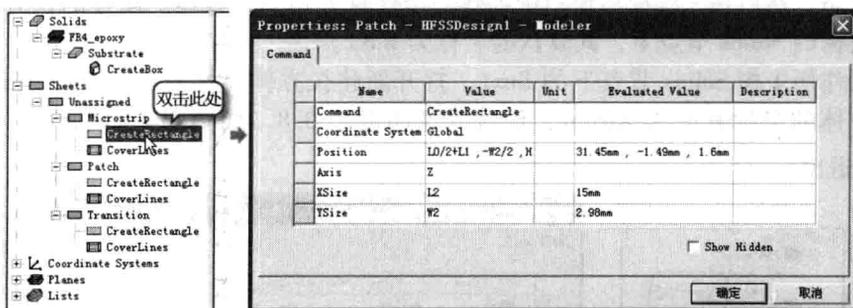


图 4.2.15 矩形面属性对话框中的 Command 选项卡

(5) 使用合并操作把3个矩形面合并成一个整体

按住Ctrl键，然后依次单击工程树Sheets节点下的Patch、Transition和Microstrip，同时选中这3个矩形面。再选择主菜单栏中的【Modeler】→【Boolean】→【Unite】命令，或者直接单击工具栏上的按钮，执行合并操作，把选中的3个矩形面合并成一个整体。合并生成的物体名称、颜色等属性与执行合并操作前最先选中的物体相同。这里，新生成的物体名称为Patch。

4. 设置边界条件

(1) 设置新生成平面模型Patch的边界条件为理想导体边界

选中平面模型Patch，然后在其上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令，打开理想导体边界条件设置对话框，如图4.2.16所示。保持默认设置不变，直接单击对话框中的按钮，设置平面Patch为理想导体边界条件。

此时,平面 Patch 等效于一个理想导体面。同时,理想导体边界条件的名称 PerfE1 会添加到工程树的 Boundaries 节点下。

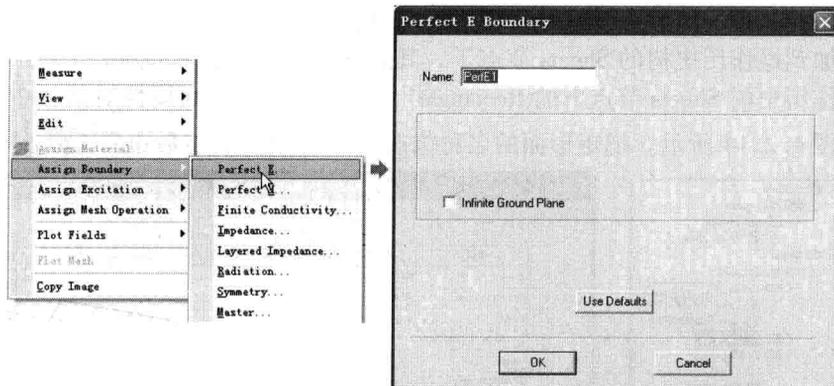


图 4.2.16 设置理想导体边界条件

(2) 设置辐射边界条件

使用 HFSS 分析天线问题时,辐射边界表面距离辐射体通常需要不小于 $1/4$ 个工作波长,在 2.45GHz 的工作频率下即为 30mm 。我们在这里首先创建一个长方体模型,长方体的底面和介质基片底面重合,长方体在传输线终端一侧的表面和传输线终端重合,其他表面和辐射贴片的距离为 30mm 。然后把该长方体的表面设置为辐射边界。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令,或者单击工具栏上的  按钮,进入创建长方体的状态,然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下,其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1,打开新建长方体属性对话框中的 Attribute 选项卡,把长方体的名称修改为 AirBox,设置其透明度为 0.8,如图 4.2.17 所示,然后单击 **确定** 按钮退出。

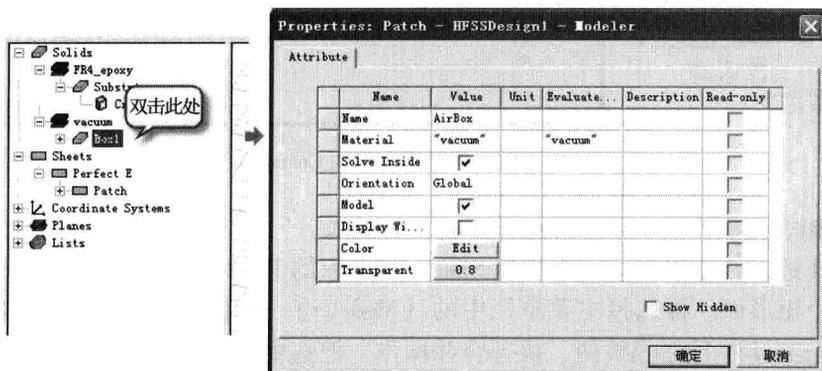


图 4.2.17 长方体属性对话框中的 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 AirBox 节点下的 CreateBox,打开新建长方体属性对话框中的 Command 选项卡,在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和尺寸。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 $(-L0/2 - 30\text{mm}, -W0/2 - 30\text{mm}, 0)$,在 XSize、YSize 和 ZSize 文本框中分别输入长方体的长、宽和高为 $L0 + L1 + L2 + 30\text{mm}$ 、 $W0 + 60\text{mm}$ 和 $H + 30\text{mm}$,如图 4.2.18 所示,然后单击 **确定** 按钮退出。

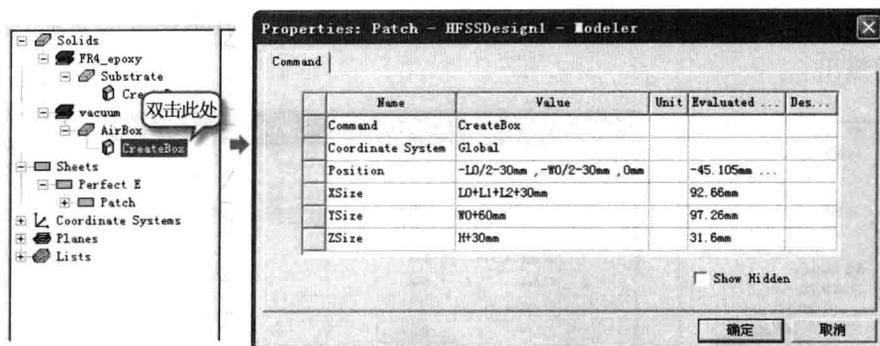


图 4.2.18 长方体属性对话框中的 Command 选项卡

长方体模型 AirBox 创建好了之后, 在操作历史树下单击 AirBox 节点以选中该模型。然后在三维模型窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Radiation】命令, 打开辐射边界条件设置对话框, 如图 4.2.19 所示。在该对话框中保持默认设置不变, 直接单击 **OK** 按钮, 即可把长方体模型 AirBox 的表面设置为辐射边界条件。

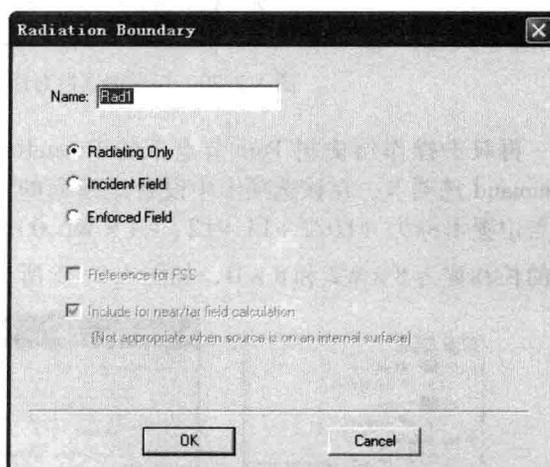


图 4.2.19 辐射边界条件设置对话框

(3) 把介质基片的底面设置为理想导体边界

按快捷键 F 切换到选择物体表面的状态。然后旋转物体模型, 选中介质基

片的底面。在三维模型窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令, 打开理想导体边界条件设置对话框。在该对话框中保持默认设置不变, 直接单击 **OK** 按钮, 即可设置选中的表面为理想导体边界条件。

完成后, 按快捷键 O 切换到选择物体的状态。

5. 设置端口激励

设置天线输入端口为波端口激励。波端口平面宽度设置为微带线宽度的 8 倍, 波端口平面高度设置为介质基片高度的 8 倍, 并设置端口负载为 50Ω 。

(1) 创建端口平面

在微带线终端截面上创建一个矩形面, 将其作为波端口平面, 端口平面底边和参考地相接, 宽度为 $8 \times W2$, 高度为 $8 \times H$, 并将其命名为 Port。

单击工具栏上的 **XY** 下拉列表框, 在其下拉列表中选择 YZ 选项, 把当前绘图平面设置为 yz 面。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令, 或者单击工具栏上的 **□** 按钮, 进入创建矩形面的状态, 然后在三维模型窗口的 yz 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1, 打开新建矩形面属性对话框中的 Attribute

选项卡, 如图 4.2.20 所示。把矩形面的名称修改为 Port, 设置其透明度为 0.4, 然后单击 **确定** 按钮退出。

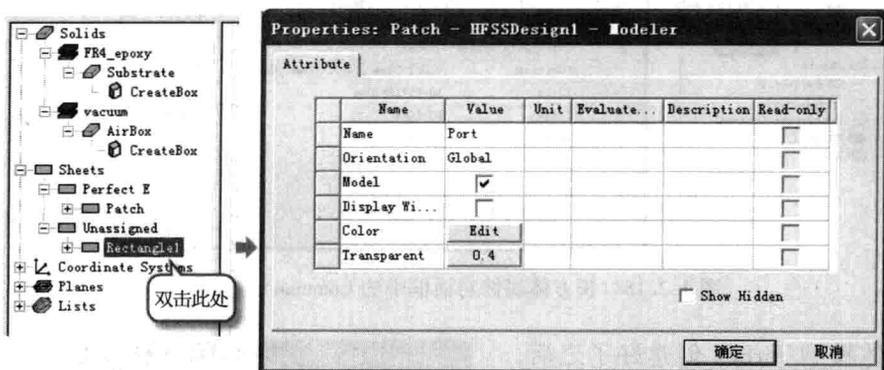


图 4.2.20 矩形面属性对话框中的 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Port 节点下的 CreateRectangle, 打开新建矩形面属性对话框中的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和尺寸。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 $(L0/2 + L1 + L2, -4 \times W2, 0)$, 在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的长和宽为 $8 \times W2$ 和 $8 \times H$, 如图 4.2.21 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

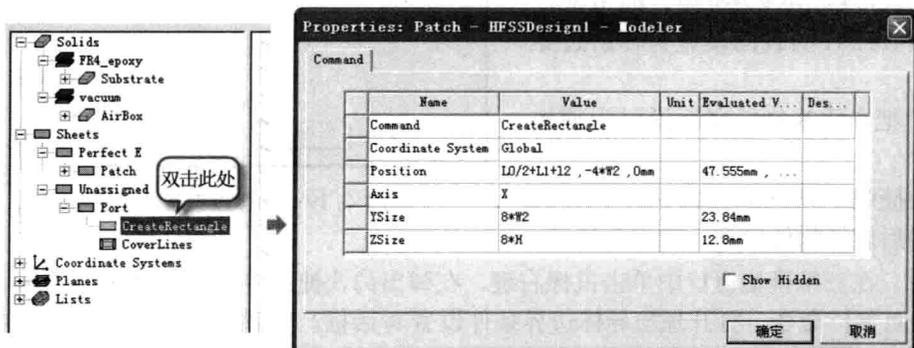


图 4.2.21 矩形面属性对话框中的 Command 选项卡

(2) 设置波端口激励

单击操作历史树 Sheets 节点下的 Port, 选中新建的端口平面。然后在其上单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Excitation】→【Wave Port】命令, 打开波端口设置对话框, 如图 4.2.22 所示。在 Name 文本框中输入端口名称 P1, 然后单击对话框中的 **下一步(N) >** 按钮, 打开 Modes 对话框。保持默认设置不变, 直接单击 **下一步(N) >** 按钮, 打开 Post Processing 对话框。在 Post Processing 对话框中选中 Renormalized All Modes 单选按钮, 并设置端口阻抗为 50Ω , 如图 4.2.23 所示, 然后单击 **完成** 按钮, 完成波端口激励方式的设置。

6. 求解设置

微带天线的工作频率为 2.45GHz, 所以求解频率设置为 2.45GHz。同时, 添加 1.5GHz ~ 3.5GHz 的扫频设置, 选择快速 (Fast) 扫频类型, 分析天线在 1.5GHz ~ 3.5GHz 频段的回波损耗或者电压驻波比。

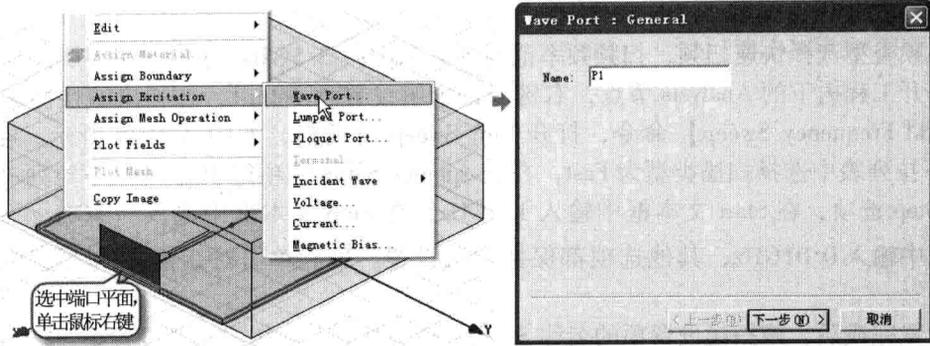


图 4.2.22 设置波端口激励

(1) 求解频率和网格剖分设置

设置求解频率为 2.45GHz，自适应网格剖分的最大迭代次数为 20，收敛误差为 0.02。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add Solution Setup】命令，打开 Solution Setup 对话框。在 Solution Frequency 文本框中输入求解频率 2.45GHz，Maximum Number of Passes 文本框中输入最大迭代次数 20，Maximum Delta S 文本框中输入收敛误差 0.02，其他选项保持默认设置，如图 4.2.24 所示。然后单击 **确定** 按钮，完成求解设置。

设置完成后，求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

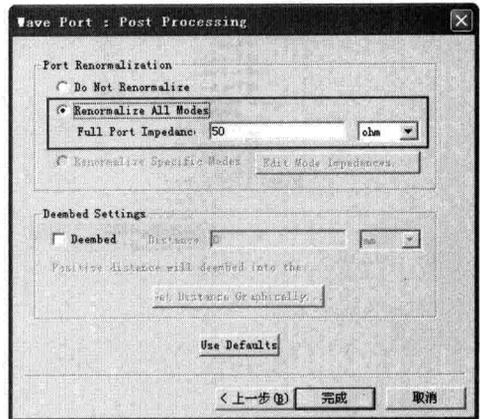


图 4.2.23 波端口 Post Processing 的设置

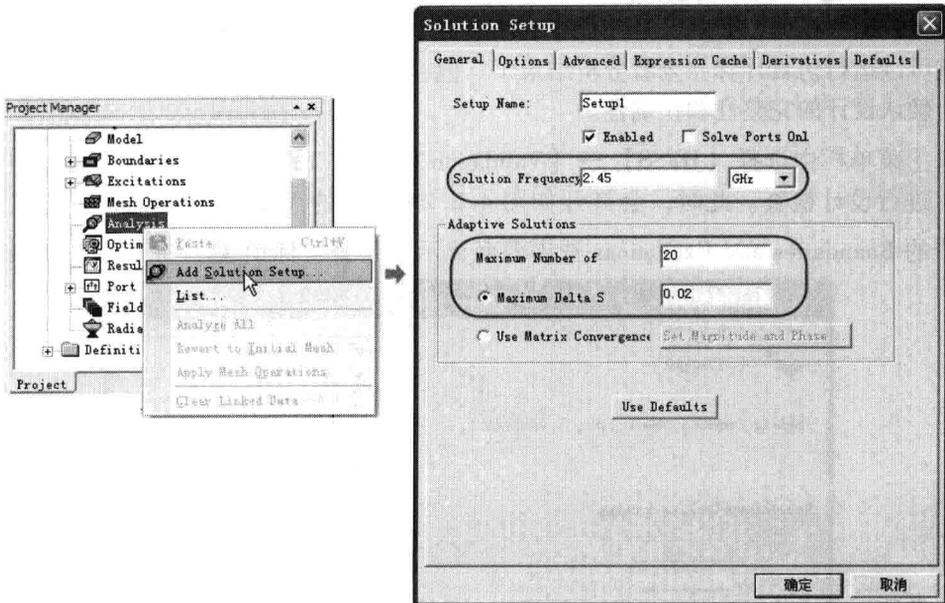


图 4.2.24 求解设置

(2) 扫频设置

扫频类型选择快速扫频, 扫频频率范围为 1.5GHz ~ 3.5GHz, 频率步进为 0.01GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点, 右键单击求解设置项 Setup1, 在弹出的快捷菜单中选择【Add Frequency Sweep】命令, 打开 Edit Sweep 对话框, 如图 4.2.25 所示。在 Sweep Type 下拉列表中选择扫描类型为 Fast, 在 Frequency Setup 选项组中的 Type 下拉列表中选择 LinearStep 选项, 在 Start 文本框中输入 1.5GHz, 在 Stop 文本框中输入 3.5GHz, Step Size 文本框中输入 0.01GHz, 其他选项都保持默认设置。最后单击对话框中的 **OK** 按钮完成设置。

设置完成后, 该扫频设置项的名称 Sweep1 会添加到工程树的求解设置项 Setup1 下。

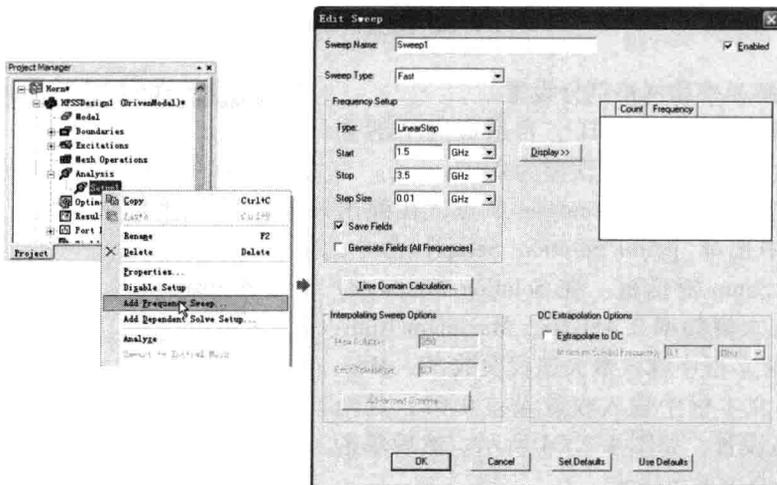


图 4.2.25 扫频设置

7. 设计检查和运行仿真计算

通过前面的操作, 我们已经完成了模型创建和求解设置等 HFSS 设计的前期工作, 接下来就可以运行仿真计算并查看分析结果了。但在运行仿真计算之前, 通常需要进行设计检查, 确认设计的完整性和正确性。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进行设计检查。此时, 会打开如图 4.2.26 所示的 Validation Check 对话框。该对话框中的 Boundaries and Excitations 选项前面显示的是警告标识 , 进一步查看 HFSS 工

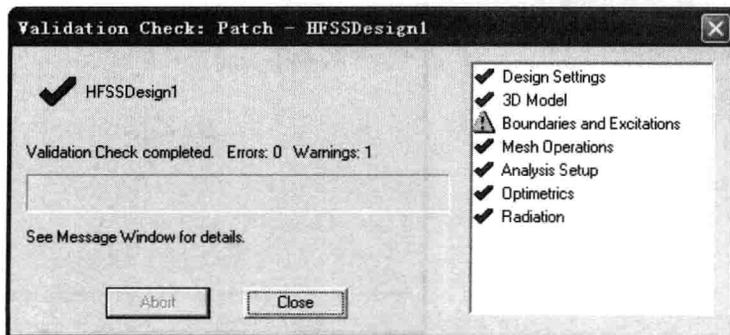


图 4.2.26 设计检查结果对话框

作界面左下侧的信息管理窗口，显示出警告的具体原因为：“Warning - Boundary 'Rad1' and Boundary 'PerfE2' overlap”。这是因为辐射边界的底面和介质基片的底片重合，所以在设置辐射边界表面时，介质基片的底面也会被设置为辐射边界条件，而后我们又给介质基片的底面分配理想导体边界条件，从而产生了这条警告信息。因为在 HFSS 中后分配的边界条件会覆盖先分配的边界条件，所以介质基片底面的边界条件最终表现为理想导体边界，符合设计要求。这样我们即可以忽略这条警告信息。确认 HFSS 设计完整无误后，单击 **Close** 按钮，关闭对话框，接下来开始运行仿真计算。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择 **【Analyze All】** 命令，或者单击工具栏上的  按钮，开始运行仿真计算。

在仿真计算过程中，工作界面右下方的进度条窗口会显示出求解进度，信息管理窗口也会有相应的信息说明，并会在仿真计算完成后给出完成的提示信息。

8. 查看天线的谐振频率

查看天线信号端口回波损耗（即 S_{11} ）的扫频分析结果，给出天线的谐振频率。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择 **【Create Modal Solution Data Report】** → **【Rectangular Plot】** 命令，打开报告设置对话框，如图 4.2.27 所示。在该对话框中确定左侧 Solution 选项选择的是 Setup1:Sweep1，在 Category 列表框中选中 S Parameter，在 Quantity 列表框中选中 $S(P1,P1)$ ，在 Function 列表框中选中 dB。然后单击 **New Report** 按钮，再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时，即可生成如图 4.2.28 所示的 S_{11} 在 1.5GHz ~ 3.5GHz 的扫频分析结果。

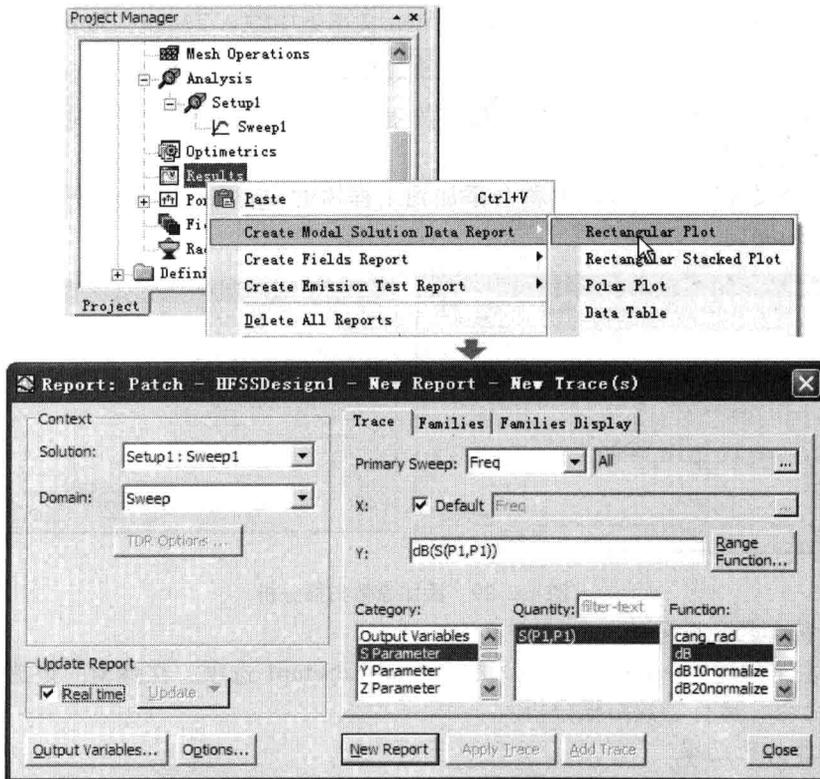
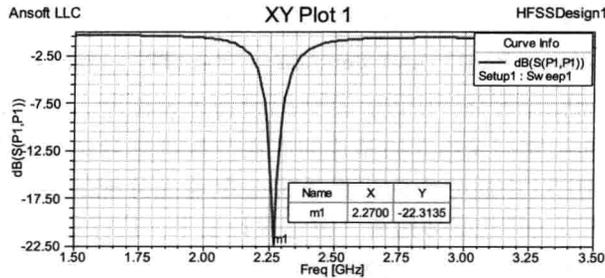


图 4.2.27 分析结果报告设置对话框

图 4.2.28 S_{11} 的扫频分析结果

从分析结果中可以看出,天线的谐振频率落在 2.27GHz 上。而我们设计要求的中心频率为 2.45GHz,所以接下来需要进行适当的设计优化,使天线的谐振频率落在 2.45GHz 上。

9. 参数扫描分析寻找谐振频率

根据理论分析可知,矩形微带天线的谐振频率主要由辐射贴片的长度决定,贴片的长度越短,则谐振频率越高。接下来,我们使用参数扫描分析功能分析谐振频率随着辐射贴片长度 L_0 的变化关系,从而找到谐振频率为 2.45GHz 时对应的 L_0 值。

(1) 添加参数扫描分析项

右键单击工程树下的 Optimetrics 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令,打开 Setup Sweep Analysis 对话框。单击该对话框中的 **Add...** 按钮,打开 Add/Edit Sweep 对话框。在 Add/Edit Sweep 对话框中将 Variable 选项设置为变量 L_0 ,选中 Linear step 单选按钮,分别在 Start、Stop 和 Step 文本框中输入 27mm、30mm 和 1mm,然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后,单击 **OK** 按钮,关闭 Add/Edit Sweep 对话框。最后,单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮,完成添加参数扫描项的操作,添加 L_0 为扫描变量。整个操作过程如图 4.2.29 所示。

完成后,参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下,其默认的名称为 ParametricSetup1。

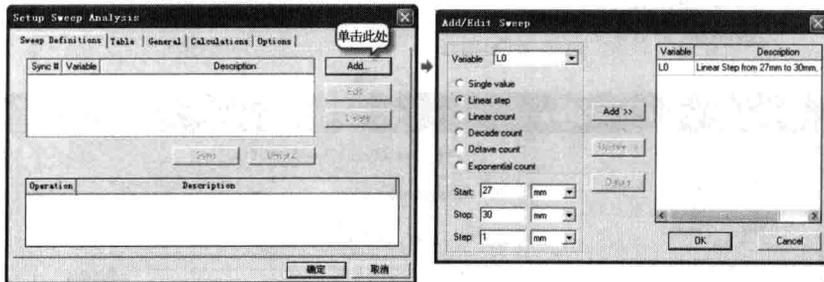


图 4.2.29 添加参数扫描分析

(2) 运行参数扫描分析

右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup1 选项,在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令,运行参数扫描分析。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后,右键单击工程树下的 Results 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令,打开报告设置对话框,对

话框的设置与如图 4.2.27 所示的设置相同。然后单击 **New Report** 按钮生成一组 S_{11} 分析结果报告，如图 4.2.30 所示。结果报告中，每条 S_{11} 曲线对应不同的 L_0 变量值。

从参数扫描分析结果中可以看出，谐振频率随着 L_0 的增加而降低，当 $L_0 = 28\text{mm}$ 时，谐振频率约为 2.45GHz 。

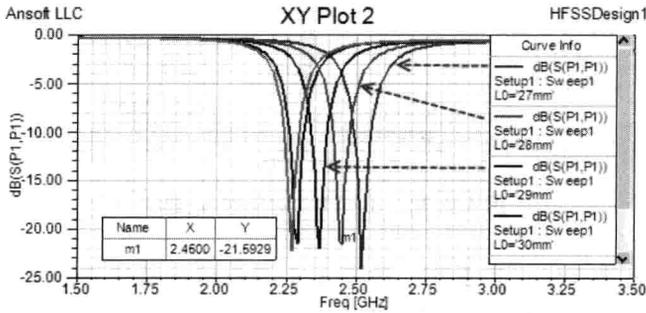


图 4.2.30 不同 L_0 对应的 S_{11} 曲线

10. 调节阻抗匹配获得最佳匹配性能

使用参数扫描分析功能分析 $1/4$ 波长阻抗转换器的阻抗变化对天线性能的影响，以获得天线的最佳匹配性能。当 $L_0 = 28\text{mm}$ 时，在 2.45GHz 时的 S_{11} 值为 -21.6dB ，已经达到了良好的匹配性能。此处目的在于分析 $1/4$ 波长阻抗转换器的阻抗变化对天线性能的影响。

首先从主菜单中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框，把设计变量 L_0 的值由 30.21mm 改为 28mm 。

(1) 添加参数扫描分析项

使用和上面相同的方法，添加 $1/4$ 波长阻抗转换器的宽度变量 W_1 为扫描变量，参数扫描范围为 $0.9\text{mm} \sim 1.4\text{mm}$ ，扫描步进值为 0.1mm 。完成后，参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认的名称为 ParametricSetup2。

(2) 运行参数扫描分析

右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup2 选项，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令，运行参数扫描分析。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后，右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。该对话框的 Trace 选项卡采用如图 4.2.27 所示的设置。然后选择 Families 选项卡，单击变量 L_0 右侧的 **...** 按钮，选中 28mm 选项，如图 4.2.31 所示。最后单击 **New Report** 按钮生成一组 S_{11} 分析结果报告，如图 4.2.32 所示。结果报告中每条 S_{11} 曲线对应不同的 W_1 变量值。

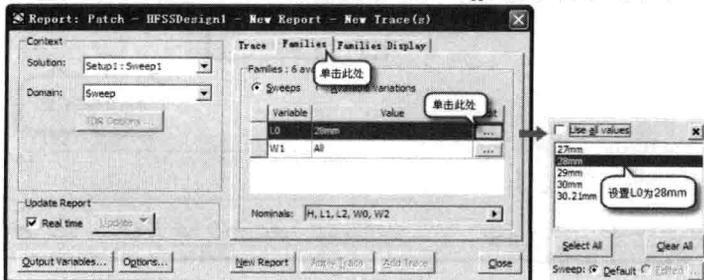
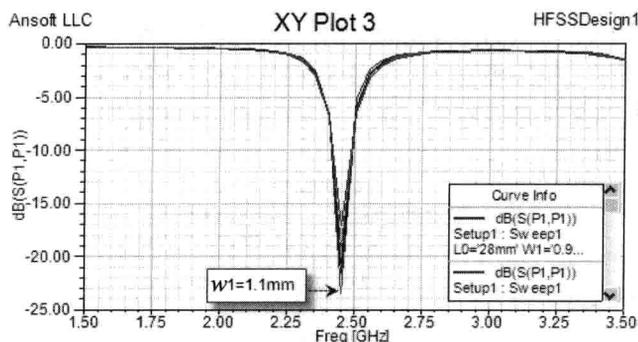


图 4.2.31 报告设置对话框

图 4.2.32 不同 $W1$ 对应的 S_{11} 曲线

从参数扫描分析结果中可以看出, 改变 $1/4$ 波长阻抗转换器的宽度 $W1$, 不会改变天线的谐振频率。当 $W1 = 1.1\text{mm}$ 时, 2.45GHz 频点的 S_{11} 值最小, 其约为 -23.5dB 。

11. 查看最终天线的性能

从前面的分析结果可以知道, 当 $L0 = 28\text{mm}$, $W1 = 1.1\text{mm}$ 时, 天线达到最佳性能。接下来, 我们把 $L0$ 和 $W1$ 的值分别修改为 28mm 和 1.1mm , 并再次运行仿真分析, 查看此时天线的各项性能参数, 包括 S_{11} 扫频分析结果、 S_{11} 的 Smith 圆图结果、 xz 截面和 yz 截面的增益方向图以及天线的三维增益方向图。

(1) 重新运行仿真分析

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令, 打开设计属性对话框, 确认设计变量 $L0$ 的值为 28mm , 再把变量 $W1$ 的值由 1.16mm 改为 1.1mm 。

右键单击工程树 Analysis 节点下的 Setup1 选项, 在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令, 重新运行仿真分析, 即可分析 $L0 = 28\text{mm}$ 、 $W1 = 1.1\text{mm}$ 时的天线性能。

(2) 查看 S_{11} 分析结果

分析完成后, 右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令, 打开报告设置对话框。该对话框的 Trace 选项卡设置和图 4.2.27 设置相同。然后选择 Families 选项卡, 设置变量 $L0$ 为 28mm , 变量 $W1$ 为 1.1mm , 如图 4.2.33 所示。最后单击 **New Report** 按钮生成 S_{11} 分析结果报告, 如图 4.2.34 所示。

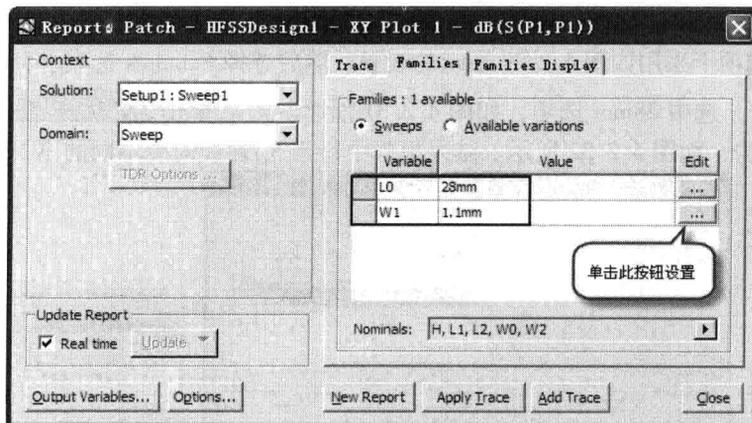


图 4.2.33 报告设置对话框中的 Families 选项卡

从结果报告中可以看出，此时谐振频率为 2.45GHz。且在谐振频率为 2.45GHz 处， S_{11} 值约为 -23.5dB。

(3) 查看 S_{11} 的 Smith 圆图结果

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Smith Chart】命令，打开如图 4.2.35 所示的报告设置对话框。该对话框的 Trace 选项卡设置和图 4.2.27 设置相同。然后选择 Families 选项卡，Families 选项卡与图 4.2.33 设置相同。

最后单击 **New Report** 按钮生成 S_{11} 的 Smith 圆图结果，如图 4.2.36 所示。

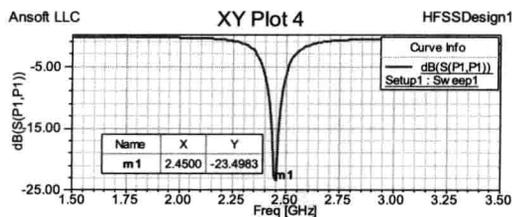


图 4.2.34 S_{11} 扫频分析结果

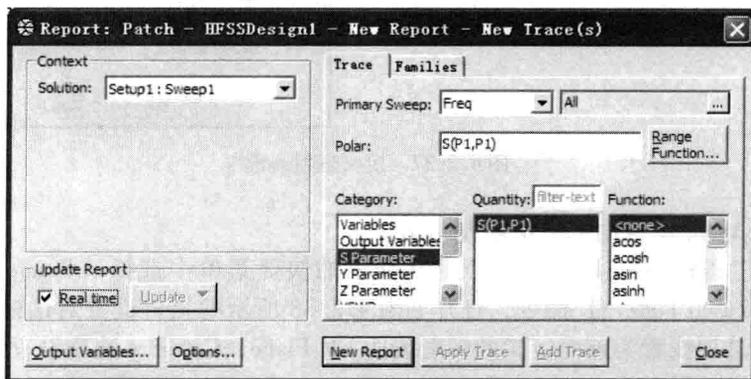


图 4.2.35 报告设置对话框

从结果报告中可以看出，2.45GHz 时的归一化阻抗为 $(1.08 - j0.12)\Omega$ ，达到了很好的匹配状态。

(4) xz 、 yz 截面上增益方向图

要查看天线的远区场计算结果，首先需要定义辐射表面。辐射表面是在球坐标系下定义的。在球坐标系下， xz 平面即相当于 $\varphi = 0^\circ$ 的平面， yz 平面即相当于 $\varphi = 90^\circ$ 的平面。

① 定义 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 的平面为辐射表面。

右键单击工程树下的 Radiation 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Insert Far Field Setup】→【Infinite Sphere】命令，打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框，定义辐射表面，如图 4.2.37 所示。在 Name 文本框中输入辐射表面的名称 EH Plane，在 Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、90deg 和 90deg，在 Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入

-180deg、180deg 和 1deg，然后单击 **确定** 按钮完成设置。

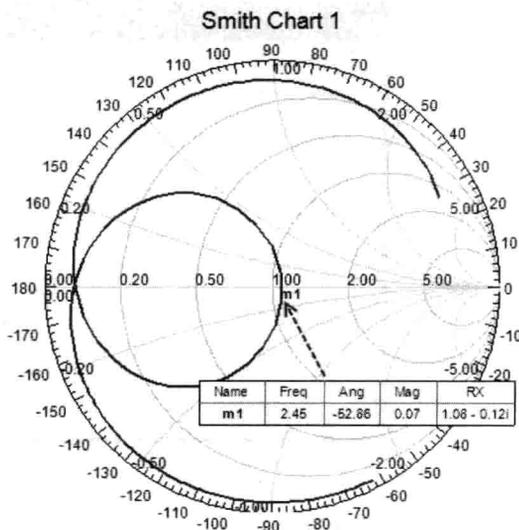


图 4.2.36 S_{11} 的 Smith 圆图结果

此时, 定义的辐射表面名称 EH Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

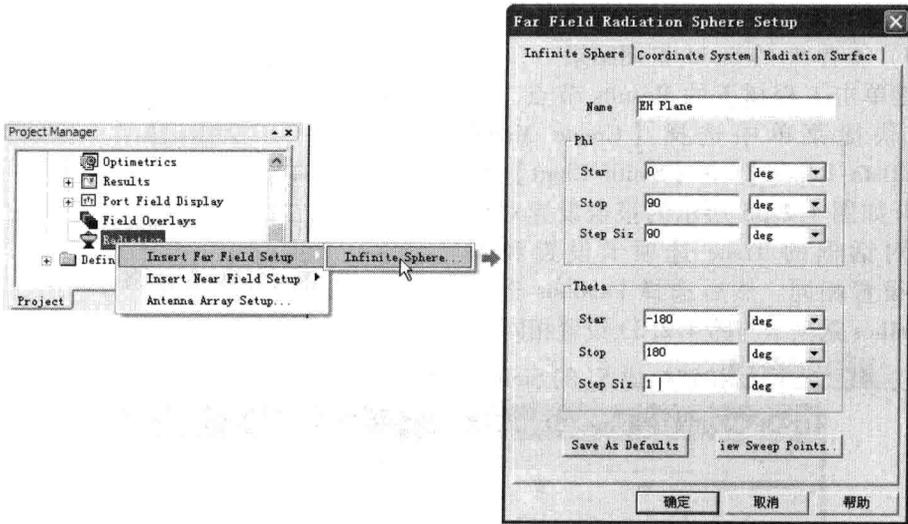


图 4.2.37 定义辐射表面

② 查看在 xz 和 yz 截面上的增益方向图。

右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Radiation Pattern】命令, 打开如图 4.2.38 所示的报告设置对话框。在该对话框中将 Geometry 选项设置为前面定义的辐射表面 EH Plane, Category 选项设置为 Gain, Quantity 选项设置为 GainTotal, Function 选项设置为 dB。然后单击 **New Report** 按钮, 生成天线在 xz 和 yz 截面上的增益方向图, 如图 4.2.39 所示。

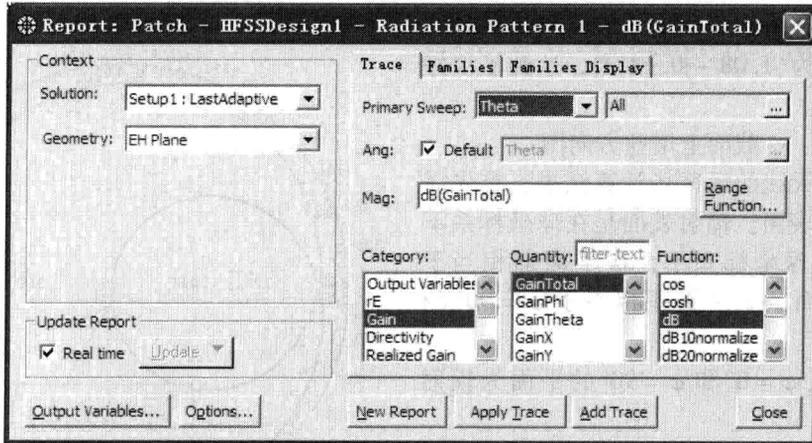


图 4.2.38 报告设置对话框

(5) 三维增益方向图

① 定义三维立体球面为辐射表面。

使用和前面相同的操作方法, 打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框。在 Name 文本框中输入辐射表面的名称 3D, 在 Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、360deg 和 2deg, 在 Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、180deg 和 2deg, 然后单击 **确定** 按钮完成设置。

此时,定义的辐射表面名称 3D 同样会添加到工程树的 Radiation 节点下。

② 查看三维增益方向图。

右键单击工程树下的 Results 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【3D Polar Plot】命令,打开如图 4.2.40 所示的报告设置对话框。在该对话框中将 Geometry 选项设置为前面定义的辐射面 3D, Category 选项设置为 Gain, Quantity 选项设置为 GainTotal, Function 选项设置为 dB。然后单击 **New Report** 按钮,生成如图 4.2.41 所示的三维增益方向图。

12. 保存设计

至此,我们完成了侧馈矩形微带天线的设计分析。最后,单击工具栏上的  按钮保存设计,再选择主菜单栏中的【File】→【Exit】命令退出 HFSS。

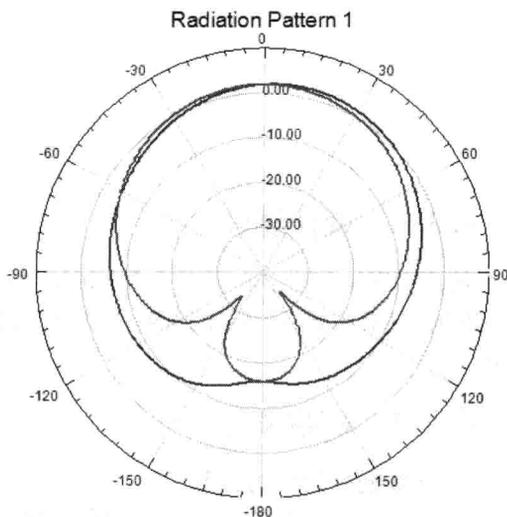


图 4.2.39 天线在 xz 和 yz 截面上的增益方向图

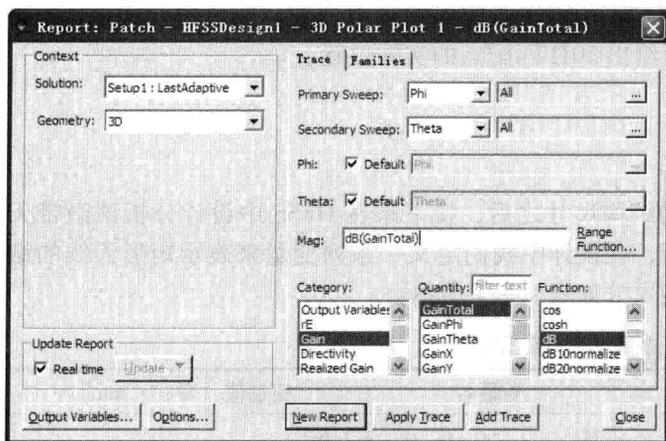


图 4.2.40 报告设置对话框

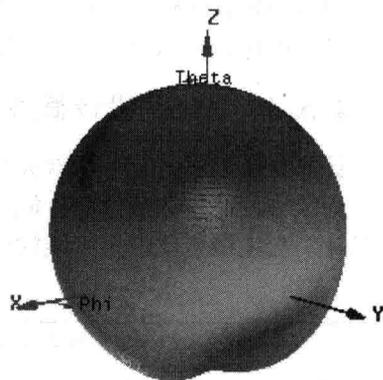


图 4.2.41 三维增益方向图

4.3 同轴馈电矩形微带天线设计

同轴线馈电的矩形微带天线结构如图 4.1.3 所示,其辐射贴片尺寸和微带线馈电的辐射贴片尺寸一致。在阻抗匹配方面,使用同轴线馈电时,在主模 TM_{10} 工作模式下,馈电点在矩形辐射贴片长度 L 方向边缘处 ($x = \pm L/2$) 的输入阻抗最高,约为 $100\Omega \sim 400\Omega$ 。馈电点在宽度 w 方向的位移对输入阻抗的影响很小,但在宽度方向上偏离中心位置时,会激发 TM_{1n} 模式,增加天线的交叉极化辐射,因此,宽度方向上馈电点的位置一般取在中心点 ($y=0$);而在辐射贴片的几何中心点 ($x=0, y=0$) 处的输入阻抗则为 0,亦即此时无法激发 TM_{10} 模式。在 $y=0$ 时, x 轴上的阻抗分布可以由式 (4-1-16) 给出,或者由下式也可以直接近似计算出输入阻抗为 50Ω 时的馈电点的位置。

$$L_1 = \frac{L}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\xi_{re}}} \right) \quad (4-3-1)$$

式中,

$$\xi_{re}(L) = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{L} \right)^{-1/2} \quad (4-3-2)$$

4.3.1 设计要求

使用 HFSS 设计中心频率为 2.45GHz 的矩形微带天线, 并给出其天线参数。介质基片采用厚度为 1.6mm 的 FR4 环氧树脂 (FR4 Epoxy) 板, 天线馈电方式选择 50Ω 同轴线馈电。

4.3.2 初始设计

1. 天线初始尺寸的计算

设计要求和 4.2 节中的要求一样, 所以辐射贴片的尺寸使用 4.2 节中的设计结果。

辐射贴片宽度: $w = 37.26\text{mm}$

辐射贴片长度: $L = 28\text{mm}$

2. 馈电点位置和输入阻抗

根据式 (4-3-1) 和式 (4-3-2) 计算出 50Ω 匹配点的近似位置, 然后再使用 HFSS 的参数扫描分析和优化设计功能, 分析给出 50Ω 匹配点的实际位置。

50Ω 匹配点初始位置: $L_1 = 7\text{mm}$

4.3.3 HFSS 设计概述

计算出了上述的矩形微带天线的结构尺寸之后, 接下来在 HFSS 中设计分析该微带天线。为了方便建模和后续的性能分析, 在设计中我们定义一系列变量来表示矩形天线的结构尺寸。变量的定义以及天线的结构尺寸如表 4.3.1 所示。

表 4.3.1 变量定义

	结构名称	变量名	变量值 (单位: mm)
介质基片	厚度	H	1.6
辐射贴片	长度	L0	28
	宽度	W0	37.26
同轴馈电点	离贴片中心距离	L1	7
	1/4 工作波长	length	30

矩形微带天线的 HFSS 设计模型如图 4.3.1 所示。模型的中心位于坐标原点, 辐射贴片的长度方向是沿着 x 轴方向, 宽度方向是沿着 y 轴方向。介质基片的大小是辐射贴片的 2 倍, 参考地和辐射贴片使用理想薄导体来代替, 在 HFSS 中通过给一个二维平面模型分配理想导体边界条件的方式来模拟理想薄导体。因为使用 50Ω 同轴线馈电, 所以这里使用半径为 0.6mm、材质为理想导体 (pec) 的圆柱体模型来模拟同轴馈线的内芯。圆柱体与 z 轴平行放置, 其底面圆心坐标为 $(L1, 0, 0)$ 。圆柱体顶部与辐射贴片相接, 底部与参考地相接, 即其高度为 H。在与圆柱体相接的参考地面上需要挖出一个半径为 1.5mm 的圆孔, 将其作为信号输入输出端口, 该端口的激励方式设置为集总端口激励, 端口阻抗为 50Ω。

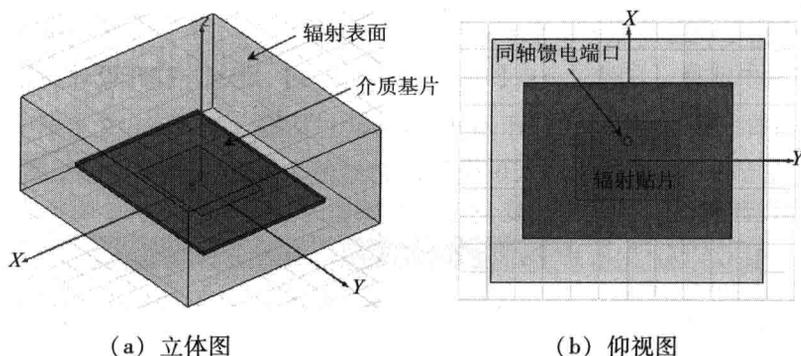


图 4.3.1 同轴馈电矩形微带天线的 HFSS 设计模型

求解频率，这里选择天线的中心频率 2.45GHz，扫频范围设置为 1.5GHz ~ 3.5GHz，使用快速扫频。

因为在 4.2 节的设计中已经分析出了 2.45GHz 时辐射贴片的实际长度和宽度，所以在当前设计中，我们只需要调节同轴馈电点的位置，以找到实际的 50Ω 输入阻抗匹配点。并在设计的最后使用 HFSS 分析给出设计的微带天线各项性能参数的分析结果。

4.3.4 HFSS 仿真设计

1. 新建设计工程

(1) 运行 HFSS 并新建工程

双击桌面上的 HFSS 快捷方式图标，启动 HFSS 软件。HFSS 运行后，它会自动新建一个工程文件，选择主菜单栏中的【File】→【Save As】命令，把工程文件另存为 Coax_Patch.hfss 文件。

(2) 设置求解类型

把当前设计的求解类型设置为模式驱动求解。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Solution Type】命令，打开如图 4.3.2 所示的 Solution Type 对话框，选中 Driven Modal 单选按钮，然后单击 按钮，完成设置。

(3) 设置模型长度单位

设置当前设计在创建模型时所使用的默认长度单位为 mm。

从主菜单栏中选择【Modeler】→【Units】命令，打开如图 4.3.3 所示的 Set Model Units 对话框。在该对话框中将 Select units 选项设置为 mm，然后单击 按钮，完成设置。

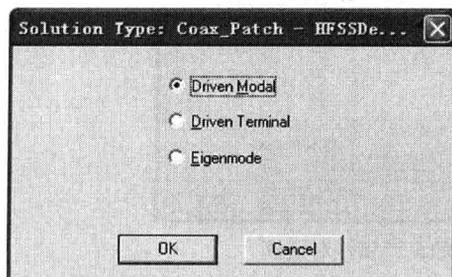


图 4.3.2 设置求解类型

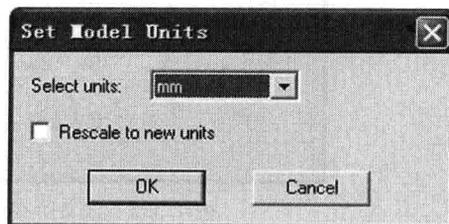


图 4.3.3 设置长度单位

2. 添加和定义设计变量

在 HFSS 中定义和添加如表 4.3.1 所示的设计变量。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框。然后单击对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add Property 对话框。在 Name 文本框中输入第一个变量名称 H，在 Value 文本框中输入该变量的初始值 1.6mm，然后单击 **OK** 按钮，即可添加变量 H 到设计属性对话框中。变量定义和添加的过程如图 4.3.4 所示。

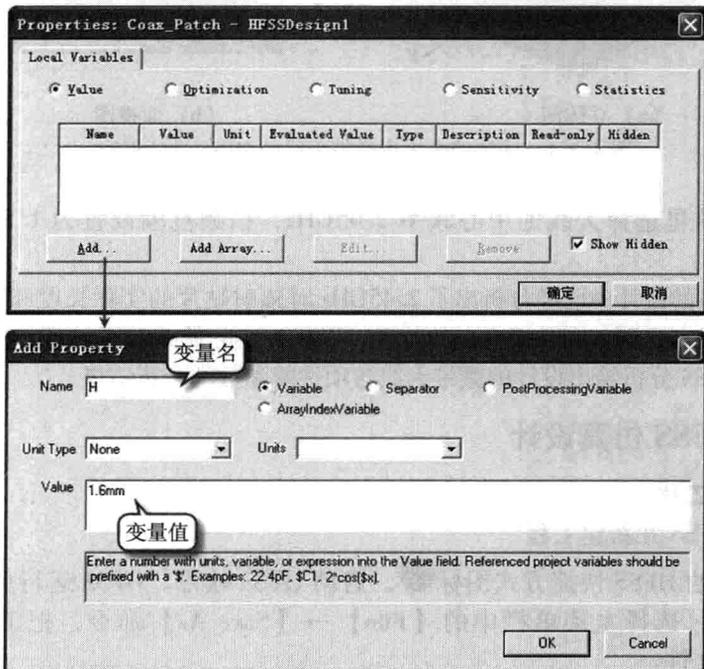


图 4.3.4 定义变量

使用相同的操作方法，分别定义变量 L0，其初始值为 28mm；变量 W0，其初始值为 37.26mm；变量 L1，其初始值为 7mm；变量 length，其初始值为 30mm。定义完成后，确认设计属性对话框如图 4.3.5 所示。

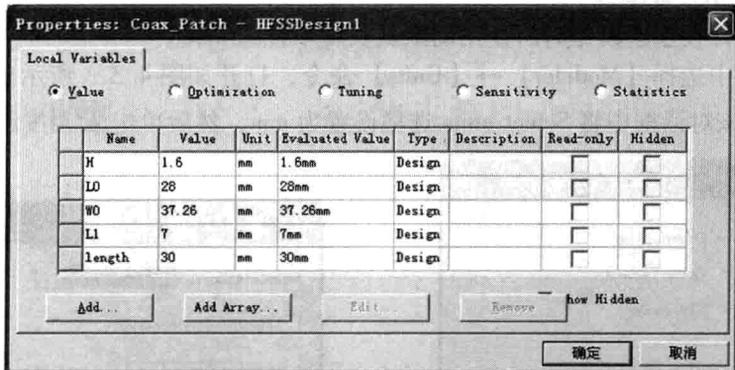


图 4.3.5 定义所有设计变量后的设计属性对话框

最后，单击设计属性对话框中的 **确定** 按钮，完成所有变量的定义和添加工作。

3. 设计建模

(1) 创建介质基片

创建一个长方体模型用以表示介质基片，模型的底面位于 xoy 平面，中心位于坐标原点。模型的材质为 FR4，并将该模型命名为 Substrate。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进入创建长方体的状态，然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1，打开新建长方体属性对话框中的 Attribute 选项卡，把长方体的名称修改为 Substrate，设置其材质为 FR4_epoxy，设置其透明度为 0.6，如图 4.3.6 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

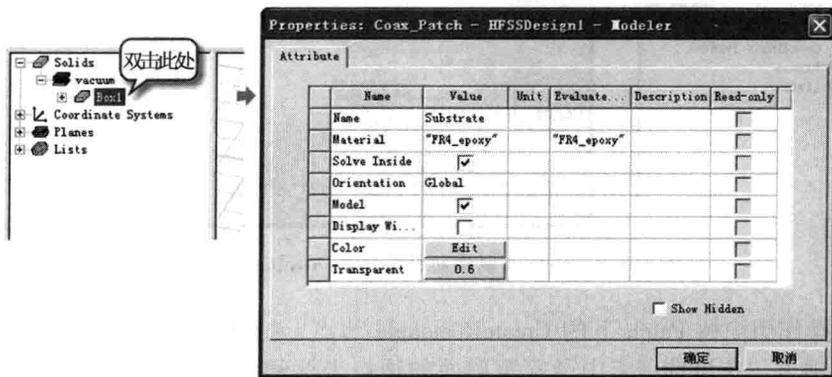


图 4.3.6 长方体属性对话框中的 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Substrate 节点下的 CreateBox，打开新建长方体属性对话框中的 Command 选项卡，在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和尺寸。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 $(-L0, -W0, 0)$ ，在 XSize、YSize 和 ZSize 文本框中分别输入长方体的长、宽和高为 $2 \times L0$ 、 $2 \times W0$ 和 H ，如图 4.3.7 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

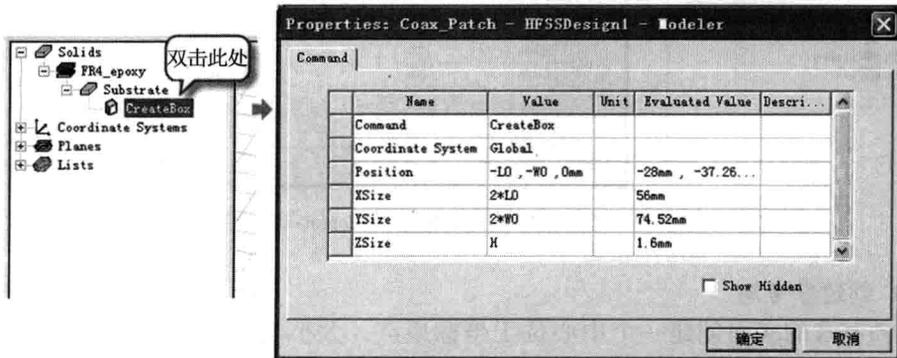


图 4.3.7 长方体属性对话框中的 Command 选项卡

此时就创建好了名称为 Substrate 的介质基片模型。然后按快捷键 $Ctrl + D$ 全屏显示创建的物体模型。

(2) 创建辐射贴片

在介质基片的上表面创建一个中心位于坐标原点，长、宽分别用变量 $L0$ 和 $W0$ 表示的

矩形面, 并将其命名为 Patch。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建矩形面的状态, 然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1, 打开新建矩形面属性对话框中的 Attribute 选项卡, 如图 4.3.8 所示。把矩形面的名称修改为 Patch, 设置其颜色为铜黄色, 透明度为 0.4, 然后单击 **确定** 按钮退出。

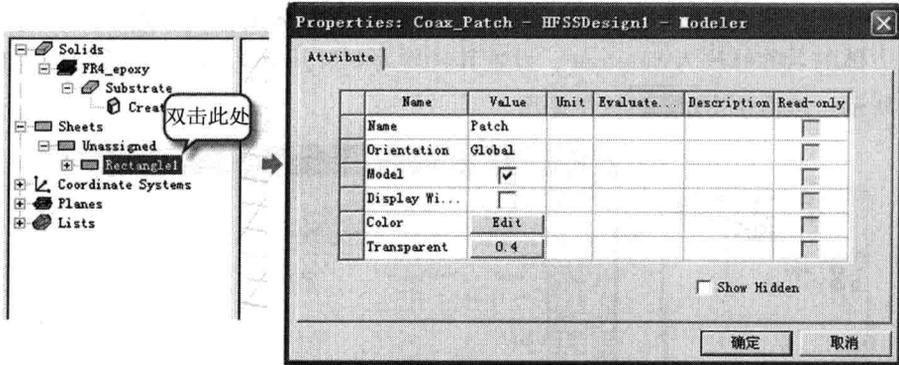


图 4.3.8 矩形面属性对话框中的 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Patch 下的 CreateRectangle 节点, 打开新建矩形面属性对话框中的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 $(-L0/2, -W0/2, H)$, 在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的长度和宽度为 $L0$ 和 $W0$, 如图 4.3.9 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

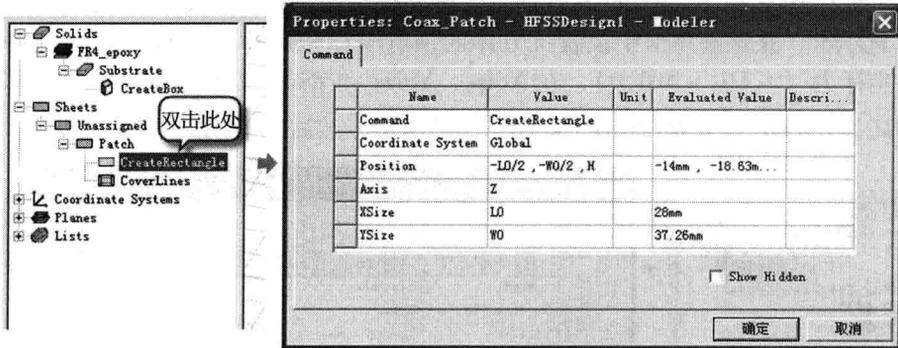


图 4.3.9 矩形面属性对话框中的 Command 选项卡

(3) 创建参考地

在介质基片的底面创建一个中心位于坐标原点, 大小与介质基片的底面相同的矩形面, 即该矩形面的长度和宽度分别为 $2 \times L0$ 和 $2 \times W0$, 并将其命名为 GND。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建矩形面的状态, 然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1, 打开新建矩形面属性对话框中的 Attribute 选项卡, 如图 4.3.10 所示。把矩形面的名称修改为 GND, 透明度设为 0.4, 然后单击

确定按钮退出。

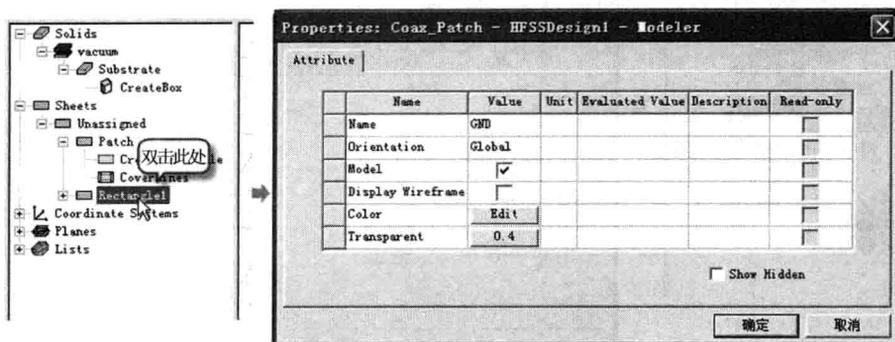


图 4.3.10 矩形面属性对话框中的 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 GND 节点下的 CreateRectangle, 打开新建矩形面属性对话框中的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 $(-L0, -W0, 0)$, 在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的长度和宽度为 $2 \times L0$ 和 $2 \times W0$, 如图 4.3.11 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

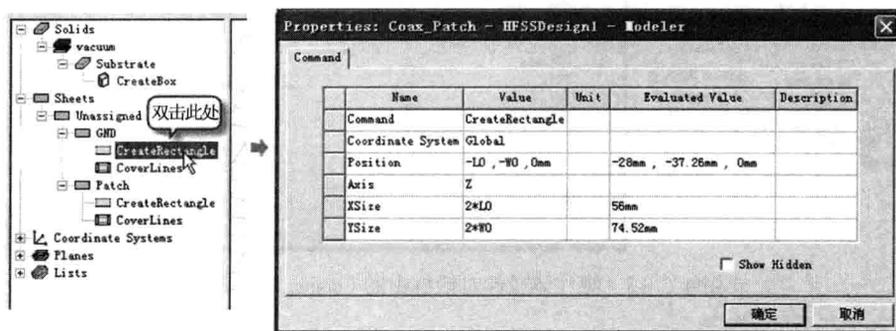


图 4.3.11 矩形面属性对话框中的 Command 选项卡

(4) 创建同轴馈线的内芯

创建一个圆柱体作为同轴馈线的内芯, 圆柱体的半径为 0.6mm, 长度为 H, 圆柱体底部圆心坐标为 $(L1, 0, 0)$, 材质为理想导体, 并将同轴馈线命名为 Feed。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Cylinder】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建圆柱体的状态, 在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆柱体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Cylinder1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Cylinder1, 打开新建圆柱体属性对话框中的 Attribute 选项卡。把圆柱体的名称修改为 Feed, 设置其材质为 pec, 如图 4.3.12 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

再双击操作历史树 Feed 节点下的 CreateCylinder, 打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度。在 Center Position 文本框中输入底面圆心坐标为 $(L1, 0, 0)$, 在 Radius 文本框中输入半径值 0.6, 在 Height 文本框中输入长度值 H, 如图 4.3.13 所示, 然后单击 **确定** 按钮, 完成圆柱体 Feed 的创建。

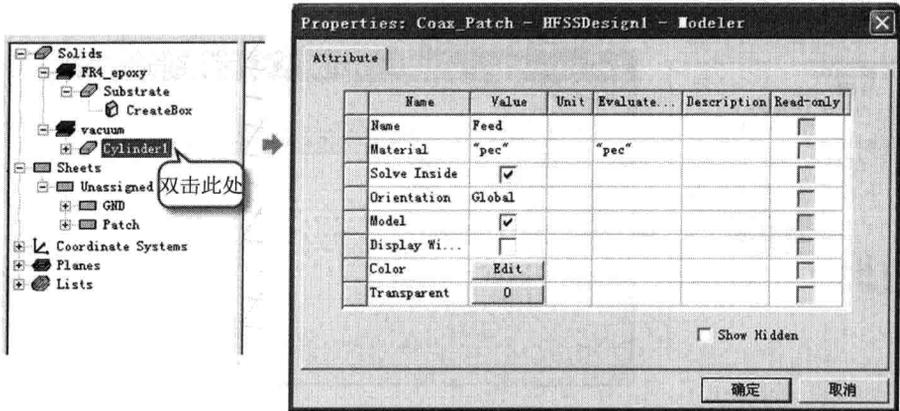


图 4.3.12 圆柱体属性对话框中的 Attribute 选项卡

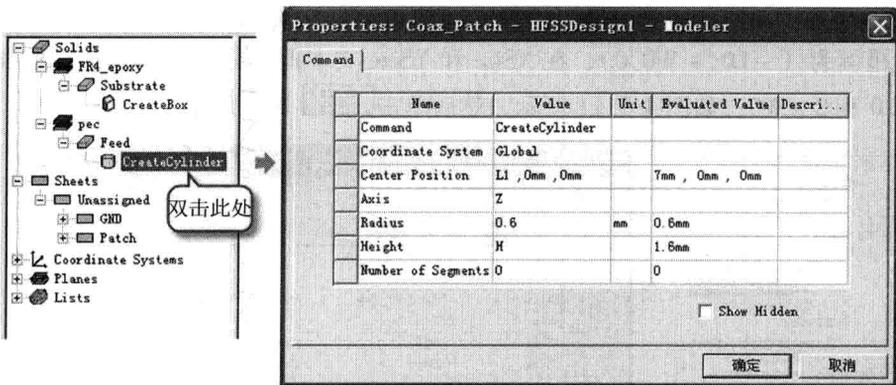


图 4.3.13 圆柱体属性对话框中的 Command 选项卡

(5) 创建信号传输端口面

同轴馈线需要穿过参考地面来传输信号能量。因此，需要在参考地面 GND 上开一个圆孔允许能量传输。首先在参考地面 GND 上创建一个半径为 1.5mm、圆心坐标为 (L1,0,0) 的圆面，并将其命名为 Port。然后再执行相减操作，使用参考地面 GND 减去圆面 Port，这样即可在参考地面 GND 上开出一个圆孔。

① 创建圆面 Port。

从主菜单中选择【Draw】→【Circle】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进入创建圆面的状态，在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆面。新建的圆面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Circle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Circle1，打开新建圆面属性对话框中的 Attribute 选项卡，把圆面的名称修改为 Port，如图 4.3.14 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

再双击操作历史树 Port 节点下的 CreateCircle，打开新建圆面属性对话框的 Command 选项卡，在该界面下设置圆面的底面圆心坐标和半径。在 Center Position 文本框中输入底面圆心坐标为 (L1,0,0)，在 Radius 文本框中输入半径值 1.5，如图 4.3.15 所示，然后单击 **确定** 按钮，完成圆面 Port 的创建。

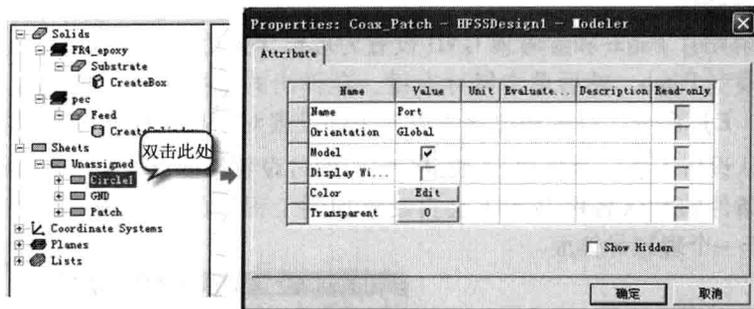


图 4.3.14 圆面属性对话框中的 Attribute 选项卡

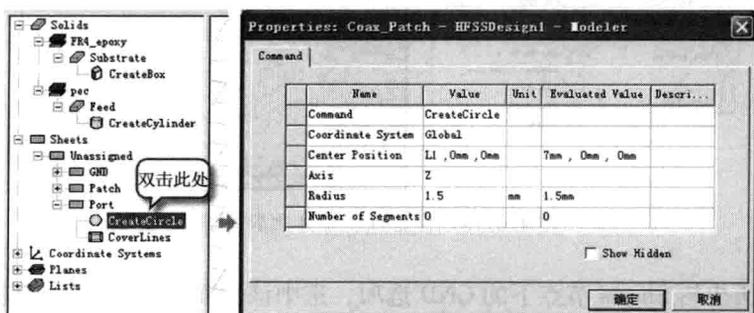


图 4.3.15 圆面属性对话框中的 Command 选项卡

② 使用相减操作在参考地面挖一个圆孔。

按住 Ctrl 键，先后依次单击操作历史树 Sheets 节点下的 GND 和 Port 选项，选中这两个平面。然后从主菜单栏中选择【Modeler】→【Boolean】→【Substrate】命令，或者单击工具栏上的  按钮，打开如图 4.3.16 所示的 Subtract 对话框。确认对话框中的 Blank Parts 列表框中显示的是 GND，Tool Parts 列表框中显示的是 Port，表明使用参考地模型 GND 减去圆面模型 Port。同时，为了保留圆面 Port，需要选中对话框中的 Clone tool objects before operation 复选框。最后单击 **OK** 按钮，执行相减操作，即可从 GND 模型中挖出了一块与圆面 Port 一样大小的圆孔，同时保留了圆面 Port。

至此，就创建好了同轴线馈电的矩形微带天线的设计模型，如图 4.3.17 所示。接下来开始设置边界条件和端口激励方式。

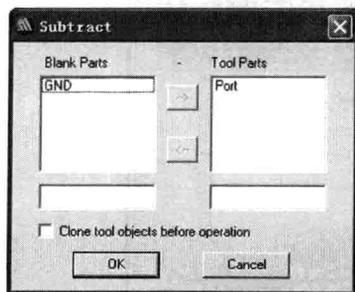


图 4.3.16 相减操作对话框

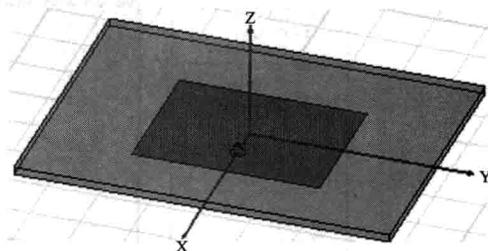


图 4.3.17 同轴线馈电的矩形微带天线的设计模型

4. 设置边界条件

(1) 把辐射贴片 Patch 和参考地 GND 设置为理想导体边界

选中平面模型 Patch, 然后单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令, 打开理想导体边界条件设置对话框, 如图 4.3.18 所示。在该对话框中保留默认设置不变, 直接单击 **OK** 按钮, 即可设置平面 Patch 为理想导体边界条件。理想导体边界条件的默认名称 PerfE1 会自动添加到工程树的 Boundaries 节点下。此时, 平面 Patch 等效于一个理想导体面。

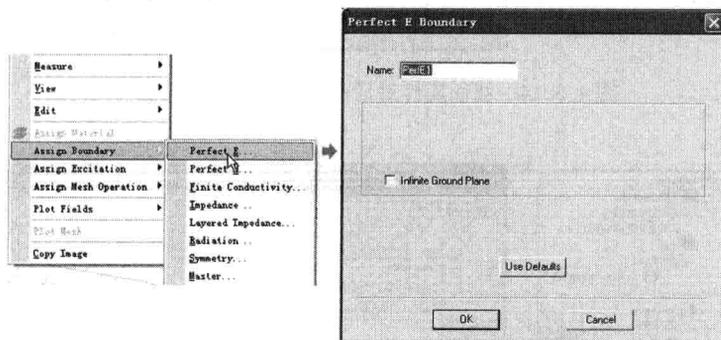


图 4.3.18 设置理想导体边界条件

单击操作历史树 Sheets 节点下的 GND 选项, 选中该平面模型, 使用和前面相同的操作方法, 设置平面 GND 为理想导体边界条件。

(2) 设置辐射边界条件

在 HFSS 中辐射边界表面距离辐射体通常需要不小于 $1/4$ 个工作波长, 在 2.45GHz 工作频率下的 $1/4$ 个工作波长为 30mm, 设计中我们定义了变量 length 来表示 $1/4$ 个工作波长。在这里首先创建一个长方体模型, 长方体的底面和介质基片底面距离 10mm, 其他表面和辐射贴片的距离为 $1/4$ 个工作波长, 然后再把该长方体的表面设置为辐射边界。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建长方体的状态, 然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1, 打开新建长方体属性对话框中的 Attribute 选项卡。把长方体的名称修改为 AirBox, 设置其透明度为 0.8, 如图 4.3.19 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

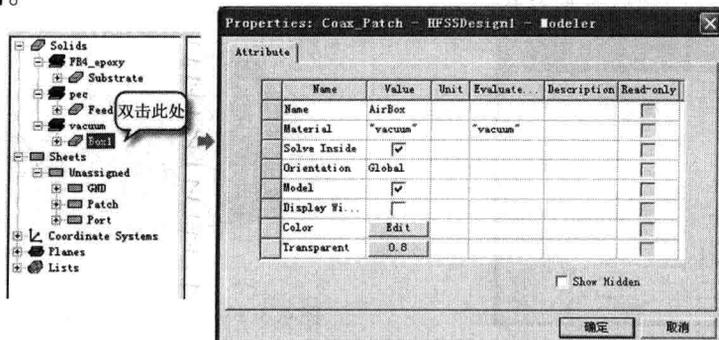


图 4.3.19 长方体属性对话框中的 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 AirBox 节点下的 CreateBox, 打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 $(-L0/2 - length, -W0/2 - length, -10)$, 在 XSize、YSize 和 ZSize 文本框中分别输入长方体的长、宽和高为 $L0 + 2 \times length$ 、 $W0 + 2 \times length$ 和 $10mm + H + length$, 如图 4.3.20 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

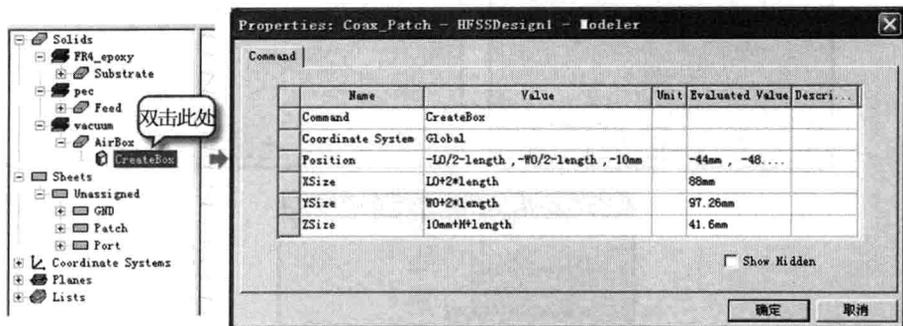


图 4.3.20 长方体属性对话框中的 Command 选项卡

长方体模型 AirBox 创建好了之后, 单击操作历史树 Solids 节点下的 AirBox, 选中该模型。然后在三维模型窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Radiation】命令, 打开如图 4.3.21 所示的辐射边界条件设置对话框。保留对话框的默认设置不变, 直接单击 **OK** 按钮, 把长方体模型 AirBox 的表面设置为辐射边界条件。

5. 设置端口激励

因为同轴线馈电端口在设计模型的内部, 所以需要集总端口激励。在设计中, 我们可以把端口平面 Port 设置集总端口激励, 端口阻抗设置为 50Ω 。

单击操作历史树 Sheets 节点下的 Port, 选中该端口平面。然后在其上单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Excitation】→【Lumped Port】命令, 打开如图 4.3.22 所示的集总端口设置对话框。在对话框的 Name 文本框中输入端口名称 1, 端口阻抗 (Full Port Impedance 选项) 保留默认的 50ohm 不变, 单击 **下一步(N) >** 按钮。在 Modes 对话框中, 单击 Integration Line 项的 None, 从下拉列表中选择 New Line 选项, 进入三维模型窗口设置积分线。此时, 在工作界面左下角状态栏的 X、Y、Z 文本框中输入积分线起始点坐标 $(7.6, 0, 0)$, 按 Enter 键确认; 然后在状态栏的 dX、dY、dZ 文本框中输入相对坐标 $(0.9, 0, 0)$, 并再次按 Enter 键确认。此时回到 Modes 对话框, Integration Line 项由 None 变成 Defined, 单击 **下一步(N) >** 按钮。在 Post Processing 对话框中选中 Renormalized All Modes 单选按钮, 并设置 Full Port Impedance 选项为 50ohm。最后单击 **完成** 按钮, 完成集总端口激励方式的设置。

设置完成后, 集总端口激励的名称“1”会添加到工程树的 Excitations 节点下。

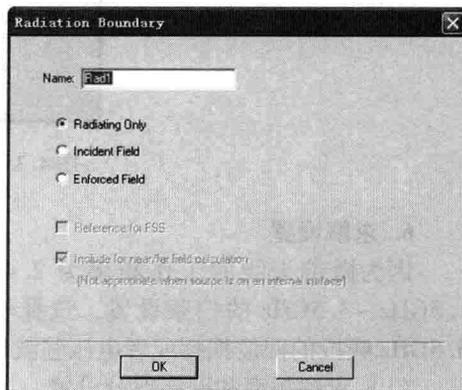


图 4.3.21 辐射边界条件设置对话框

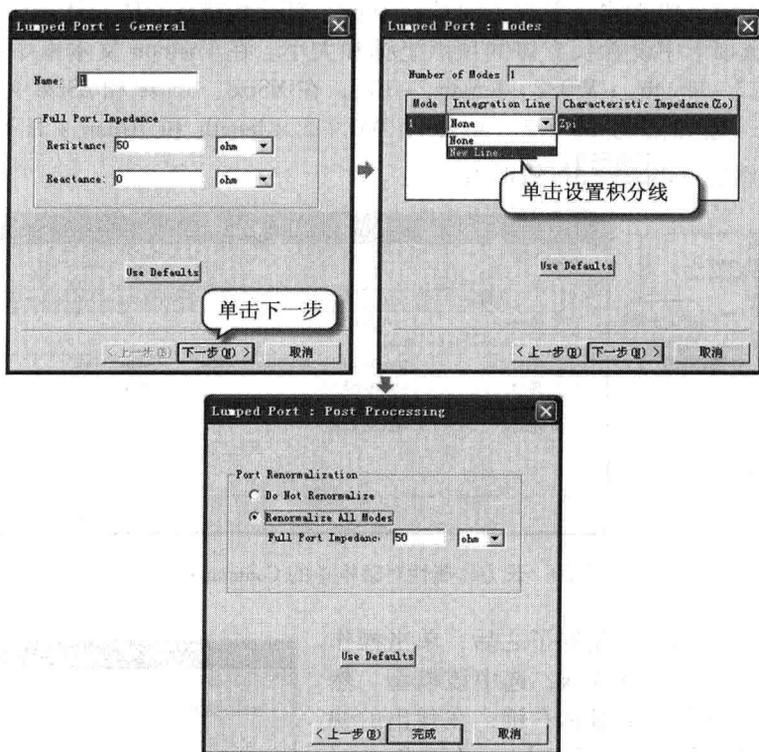


图 4.3.22 设置集总端口激励

6. 求解设置

因为微带天线的工作频率为 2.45GHz, 所以求解频率设置为 2.45GHz。同时添加 1.5GHz ~ 3.5GHz 的扫频设置, 选择快速 (Fast) 扫频类型, 然后分析天线在 1.5GHz ~ 3.5GHz 频段的回波损耗或者电压驻波比。

(1) 求解频率和网格剖分设置

设置求解频率为 2.45GHz, 自适应网格剖分的最大迭代次数为 20, 收敛误差为 0.02。

右键单击工程树下的 Analysis 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Add Solution Setup】命令, 打开 Solution Setup 对话框。在 Solution Frequency 文本框中输入求解频率 2.45GHz, 在 Maximum Number of Passes 文本框中输入最大迭代次数 20, 在 Maximum Delta S 文本框中输入收敛误差 0.02, 其他选项保留默认设置, 如图 4.3.23 所示。然后单击 **确定** 按钮, 完成求解设置。

设置完成后, 求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

(2) 扫频设置

扫频类型选择快速扫频, 扫频频率范围为 1.5GHz ~ 3.5GHz, 频率步进为 0.01GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点, 右键单击求解设置项 Setup1, 在弹出的快捷菜单中选择【Add Frequency Sweep】命令, 打开 Edit Sweep 对话框, 如图 4.3.24 所示。在 Sweep Type 下拉列表中选择扫描类型为 Fast, 在 Frequency Setup 选项组中将 Type 选项设置为 LinearStep, 在 Start 文本框中输入 1.5GHz, 在 Stop 文本框中输入 3.5GHz, 在 Step Size 文本框中输入 0.01GHz, 其他选项都保留默认设置。最后单击对话框中的 **OK** 按钮完成设置。

设置完成后, 该扫频设置项的名称 Sweep1 会添加到工程树的求解设置项 Setup1 下。

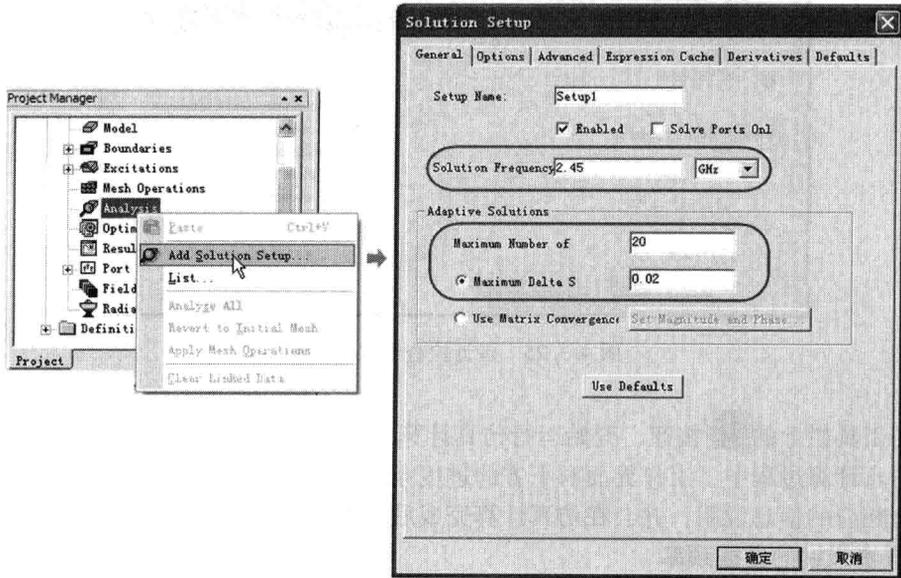


图 4.3.23 求解设置

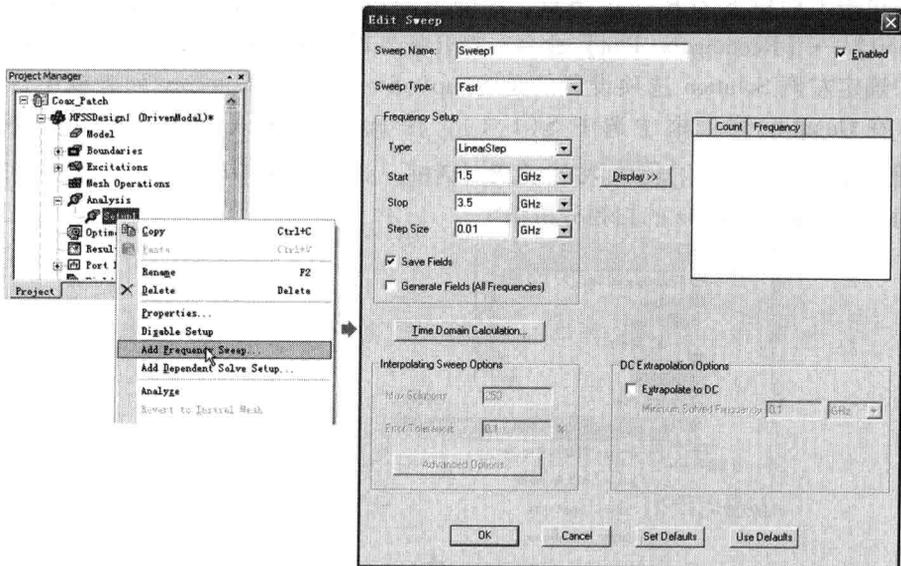


图 4.3.24 扫频设置

7. 设计检查和运行仿真计算

通过前面的操作，我们已经完成了模型创建和求解设置等 HFSS 设计的前期工作，接下来就可以运行仿真计算并查看分析结果了。但在运行仿真计算之前，通常需要进行设计检查，确认设计的完整性和正确性。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令，或者单击工具栏上的按钮，进行设计检查。此时，会打开如图 4.3.25 所示的 Validation Check 对话框，在该对话框中的每一个选项的前面都显示图标，表示当前的 HFSS 设计正确且完整，然后单击按钮关闭对话框。接下来，我们就可以开始运行仿真计算了。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze All】命令，

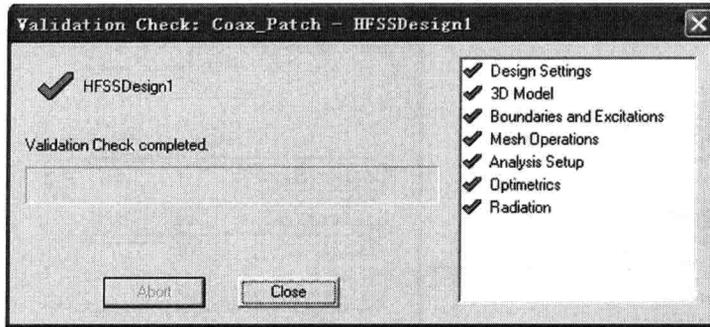


图 4.3.25 设计检查结果对话框

或者单击工具栏上的  按钮，开始运行仿真计算。

在仿真计算过程中，工作界面右下方的进度条窗口会显示出求解进度，信息管理窗口中也会有相应的信息说明，并会在仿真计算完成后给出完成提示信息。

8. 查看天线的谐振频率

查看天线信号端口回波损耗（即 S_{11} ）的扫频分析结果，并给出天线的谐振频率。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框，如图 4.3.26 所示。在该对话框中确定左侧 Solution 选项设置的是 Setup1:Sweep1，在 Category 列表框中选中 S Parameter，在 Quantity 列表框中选中 $S(1,1)$ ，在 Function 列表框中选中 dB。然后单击 **New Report** 按钮，再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时，即可生成如图 4.3.27 所示的 S_{11} 在范围为 1.5GHz ~ 3.5GHz 的扫频分析结果。

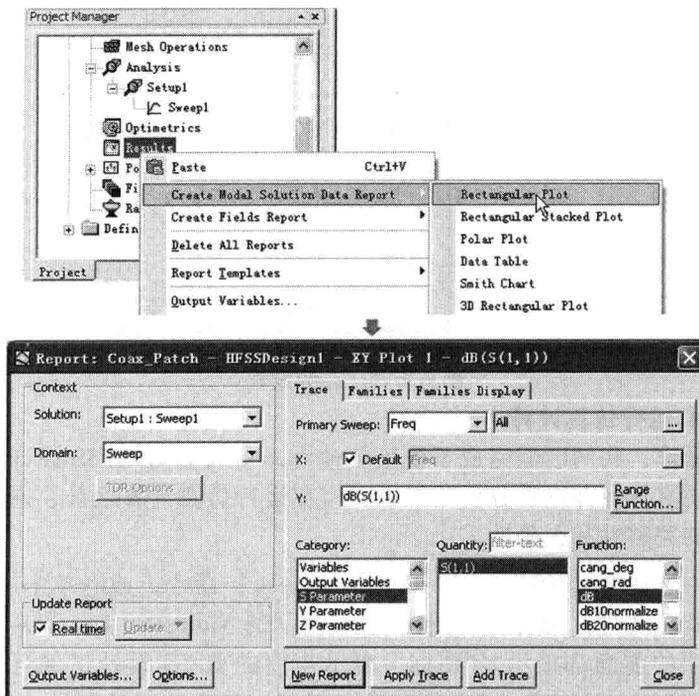
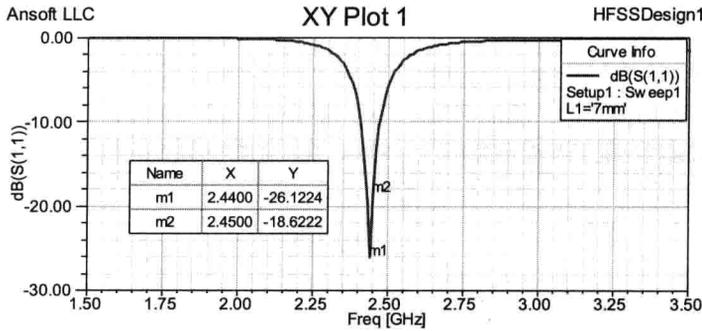
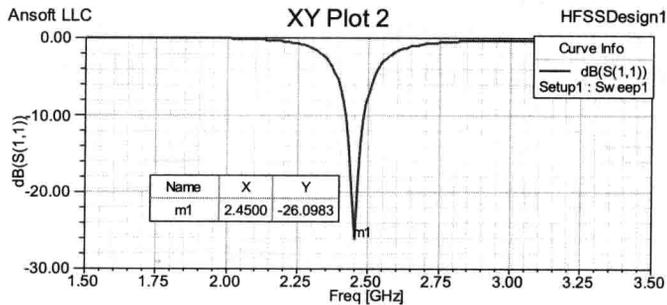


图 4.3.26 分析结果报告设置对话框

图 4.3.27 S_{11} 的扫频分析结果

初始设计中，微带天线辐射贴片尺寸使用的是 4.2 节中微带线馈电的设计分析结果。从结果报告中可以看出，采用同轴线馈电时，谐振频率在 2.44GHz 上。微调辐射贴片的长度，把长度变量 L_0 的值由 28mm 改为 27.9mm，即从主菜单栏选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框，在该对话框中把变量 L_0 的值由 28mm 改为 27.9mm。然后再次运行仿真分析，此时可以给出如图 4.3.28 所示的结果报告。

图 4.3.28 S_{11} 的扫频分析结果

从结果报告中可以看出，采用同轴线馈电，当辐射贴片的长度 $L_0 = 27.9\text{mm}$ 时，微带天线的谐振频率为 2.45GHz。此时， S_{11} 值约为 -26.1dB ，说明天线已经达到了良好的阻抗匹配状态，从而也验证了使用式 (4-3-1) 计算 50Ω 输入阻抗位置的准确性。

接下来，我们在辐射贴片的长度 L_0 为 27.9mm 的情况下，利用 HFSS 的参数扫描分析功能，分析同轴线馈电点的位置和天线输入阻抗之间的关系。

9. 分析同轴线馈电点位置和输入阻抗的关系

对于如图 4.1.3 所示的同轴线馈电的矩形微带天线，当馈电点沿着 x 轴移动，从辐射贴片的中心位置 ($x=0$) 移动到边缘位置 ($x=L/2$) 时，天线的输入阻抗逐渐变大，其中在中心位置的输入阻抗约为 0Ω ，在边缘位置的输入阻抗通常在 $100\Omega \sim 400\Omega$ 之间。接下来，我们使用 HFSS 的参数扫描分析功能来分析谐振频点 (2.45GHz) 处的回波损耗以及输入阻抗随同轴线馈电点位置 (即变量 L_1) 的变化关系。

(1) 添加参数扫描分析项

右键单击工程树下的 Optimetrics 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令，打开 Setup Sweep Analysis 对话框。单击该对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add/Edit Sweep 对话框，添加同轴线馈电点位置变量 L_1 为扫描变量。在 Add/Edit Sweep 对话框中，Variable 选项选择变量 L_1 ，扫描方式选择 Linear step 单选按钮，在 Start、Stop

和 Step 文本框中分别输入 0mm、12mm 和 1mm，然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后，单击 **OK** 按钮，关闭 Add/Edit Sweep 对话框。最后，单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮，完成添加参数扫描操作，添加变量 L1 为扫描变量。整个操作过程如图 4.3.29 所示。



图 4.3.29 添加参数扫描分析

完成后，参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认的名称为 ParametricSetup1。

(2) 运行参数扫描分析

右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup1 选项，在弹出的快捷菜单中选择 **Analyze** 命令，运行参数扫描分析，如图 4.3.30 所示。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后，我们分别查看在谐振频点 (2.45GHz) 处回波损耗随同轴线馈电点位置的变化关系，以及输入阻抗随馈电点位置的变化关系。

① 2.45GHz 谐振频点处回波损耗随同轴线馈电点位置的变化关系。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择 **Create Modal Solution Data Report** → **Rectangular Plot** 命令，打开报告设置对话框。在 Trace 选项卡的 Primary Sweep 下拉列表中选择 L1 选项，在 Category 列表框中选择 S Parameter 选项，在 Quantity 列表框中选择 S(1,1) 选项，在 Function 列表框中选择 dB 选项，如图 4.3.31 所示。选择 Families

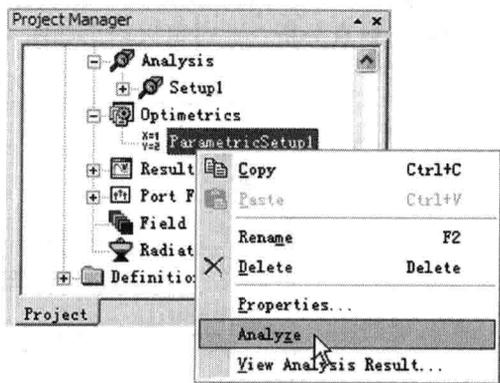


图 4.3.30 运行参数扫描分析

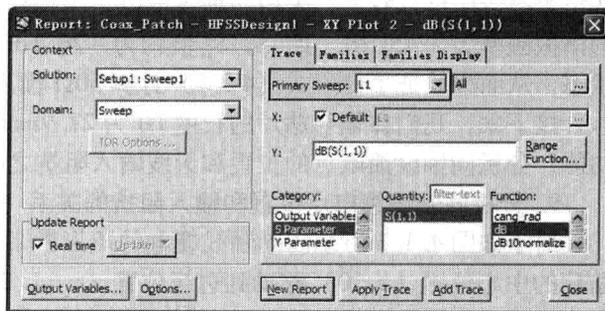


图 4.3.31 设置 Trace 选项卡

项卡，在该选项卡中单击 Freq 选项右侧的 **...** 按钮，设置 Freq 值为 2.45GHz，如图 4.3.32 所示。然后，单击 **New Report** 按钮，生成 2.45GHz 频点处的回波损耗 S_{11} 随同轴线馈电点位置变量 L1 的变化关系曲线，如图 4.3.33 所示。

从结果报告中可以看出，馈电点位置变量 L1 的值在 6mm ~ 8mm 之间时，回波损耗值最小，阻抗匹配最好。

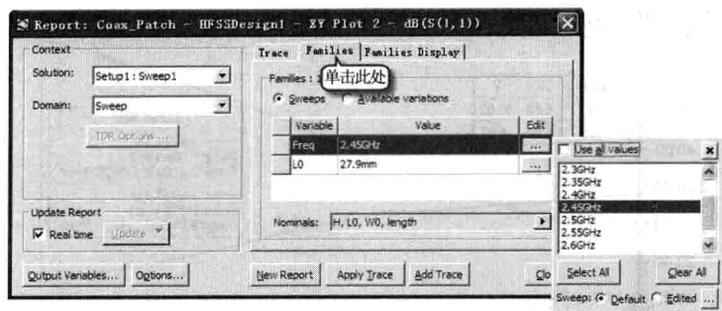
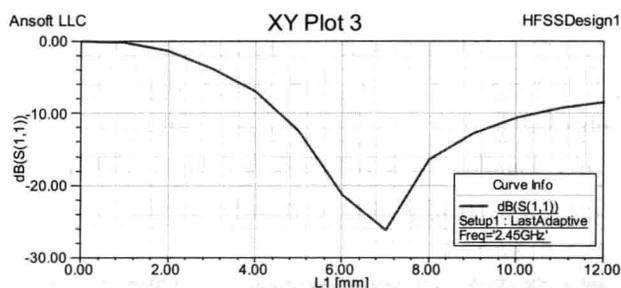


图 4.3.32 设置 Families 选项卡

图 4.3.33 2.45GHz 处的回波损耗 S_{11} 随馈电点位置变量 L_1 的变化关系曲线报告

② 2.45GHz 谐振频点处输入阻抗和同轴线馈电点位置的变化关系。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。在 Trace 选项卡的 Primary Sweep 下拉列表中选择 L_1 选项，在 Category 列表框中选择 Z Parameter 选项，在 Quantity 列表框中选择 $Z(1,1)$ 选项，在 Function 列表框中同时选中 im 和 re 选项，如图 4.3.34 所示。然后选择 Families 选项卡，在该选项卡中单击 Freq 选项右侧的“...”按钮，设置 Freq 值为 2.45GHz，如前面的图 4.3.32 所示。然后单击 **New Report** 按钮，生成 2.45GHz 频点处的输入阻抗实部和虚部与同轴线馈电点位置的变化关系曲线，如图 4.3.35 所示。

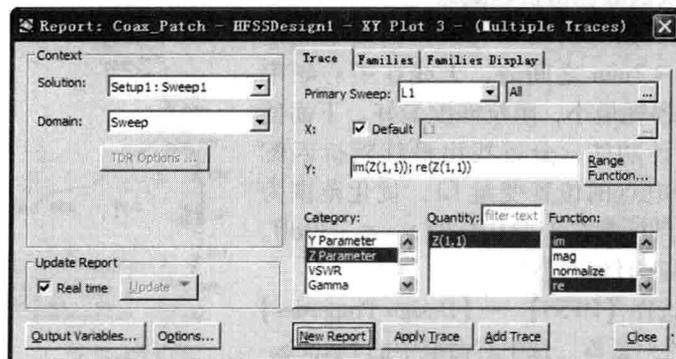


图 4.3.34 设置 Trace 选项卡

从结果报告中可以看出，同轴线馈电点从辐射贴片中心向边缘移动时，输入电阻由 0 逐渐变大到 100Ω 左右，输入电抗由 15Ω 逐渐减小到 -30Ω 左右。当 L_1 移动到 6.64mm 位置时，输入阻抗约为 $(50.0 - j1.4) \Omega$ 。

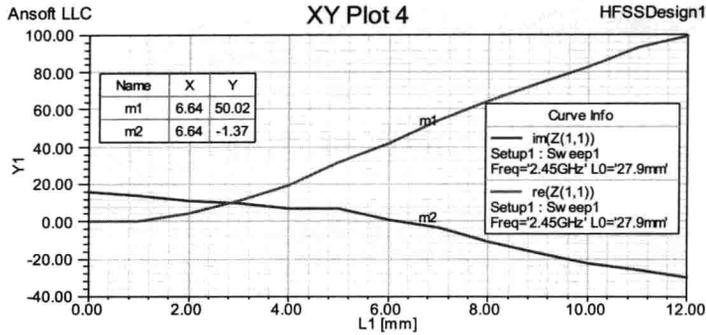


图 4.3.35 输入阻抗实部和虚部与同轴线馈电点位置的变化关系曲线

③ 在 Smith 圆图上查看 2.45GHz 频点的 S_{11} 和同轴线馈电点位置的变化关系。

右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Smith Chart】命令, 打开报告设置对话框。该对话框的 Trace 选项卡的参数设置如图 4.3.36 所示, Families 选项卡的参数设置如前面的图 4.3.32 所示, 然后单击 **New Report** 按钮, 生成 2.45GHz 频点处的 S_{11} 随同轴线馈电点位置的变化关系在 Smith 圆图上的显示结果, 如图 4.3.37 所示。

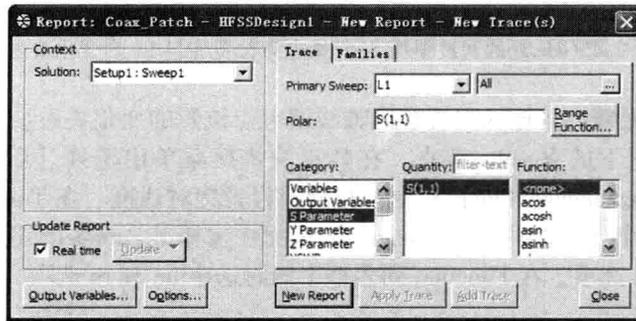


图 4.3.36 Trace 选项卡的设置

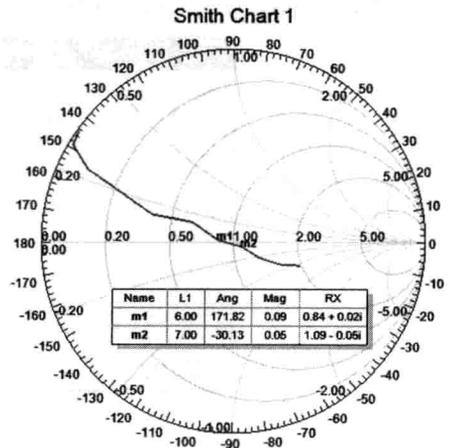
10. 优化设计找到最佳阻抗匹配点

从前面的参数扫描分析结果可知, 当馈电点位置变量 $L1$ 在 6mm ~ 7mm 之间时, 天线在中心频率 2.45GHz 处的回波损耗最小, 阻抗匹配最好。下面使用 HFSS 的优化设计功能, 分析找出最佳阻抗匹配点。优化变量为馈电点的位置变量 $L1$, 优化范围为 6mm ~ 7mm。优化目标是在 2.45GHz 时 $S_{11} < -30\text{dB}$ 。

(1) 把 $L1$ 设置为优化变量

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令, 打开设计属性对话框。选中对话框中的 Optimization 单选按钮, 然后在变量列表中选择中变量 $L1$ 对应的复选框, 如图 4.3.38 所示, 最后单击 **确定** 按钮, 即可把 $L1$ 设置为优化变量。

(2) 添加优化设计

图 4.3.37 S_{11} 随馈电点位置的变化在 Smith 圆图上的显示结果

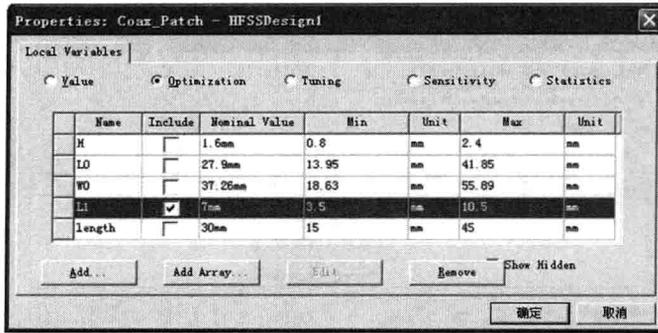


图 4.3.38 设置 L1 为优化变量

右键单击工程树下的 Optimetrics 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Optimization】命令，打开 Setup Optimization 对话框。在该对话框中将优化算法（Optimizer 选项）设置为 Sequential Nonlinear Programming，最大优化迭代次数（Max. No. of Iterations 选项）设为 20，然后单击 **Setup Calculations...** 按钮，打开 Add/Edit Calculation 对话框，设置优化目标函数。在 Add/Edit Calculation 对话框中，左侧的 Solution 项从下拉列表中选择 Setup1:LastAdaptive，右侧 Category 项选择 S Parameter，Quantity 项选择 S(1,1)，Function 栏选择 dB。然后单击 **Add Calculation** 按钮，添加 dB(S(1,1)) 为目标函数。设置过程如图 4.3.39 所示。最后单击 **Done** 按钮，关闭 Add/Edit Calculation 对话框，返回到 Setup Optimization 对话框。

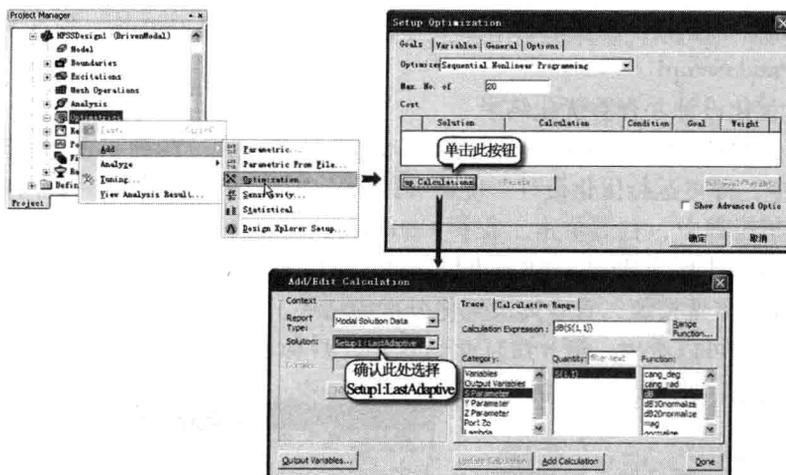


图 4.3.39 优化设置

此时，在 Setup Optimization 对话框的 Cost 列表框中会列出新添加的优化目标函数 dB(S(1,1))，单击目标函数对应的 Condition 栏，在弹出的列表中选择“<= ”选项，在 Goal 栏中输入 -30，在 Weight 栏中输入 1，如图 4.3.40 所示。

再选择 Setup Optimization 对话框中的 Variables 选项卡，在变量 L1 对应的 Starting Value 栏中输入 6.5mm；在 Min 和 Max 栏中分别输入 6mm 和 7mm，设置变量优化范围为 6mm ~ 7mm；在 Min Focus 和 Max Focus 栏中分别输入 6.3mm 和 6.9mm，如图 4.3.41 所示。最后单击 **确定** 按钮完成优化设置。

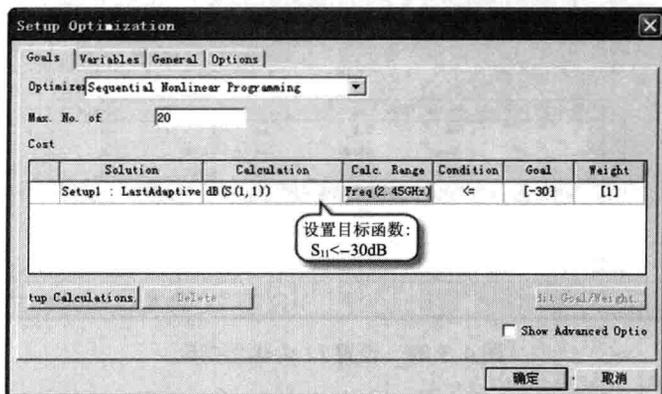


图 4.3.40 完成后的优化设置对话框

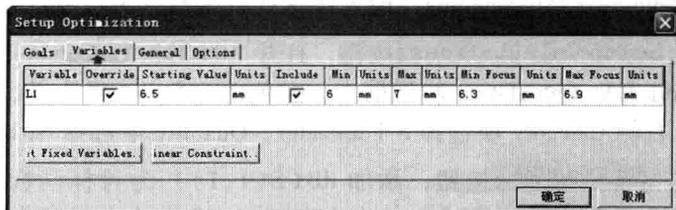


图 4.3.41 优化设置对话框中的 Variables 选项卡

设置完成后, 优化设计项的名称会自动添加到工程树的 Optimetrics 节点下, 其默认的名称为 OptimizationSetup1。

(3) 运行优化设计并查看优化结果

右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 OptimizationSetup1, 在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令, 即可运行优化设计。优化设计分析需要运行比较长的一段时间。

在优化分析过程中, 右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 OptimizationSetup1, 在弹出的快捷菜单中选择【View Analysis Result】命令, 可以打开 Post Analysis Display 窗口。在该窗口中选中 Table 单选按钮, 查看每次优化分析的结果, 如图 4.3.42 所示。

从优化结果中可以看出, 第 8 次优化迭代后, 目标函数值为 0, 达到优化设计目标要求, 优化分析结束。此时, L1 的优化结果约为 6.6mm。

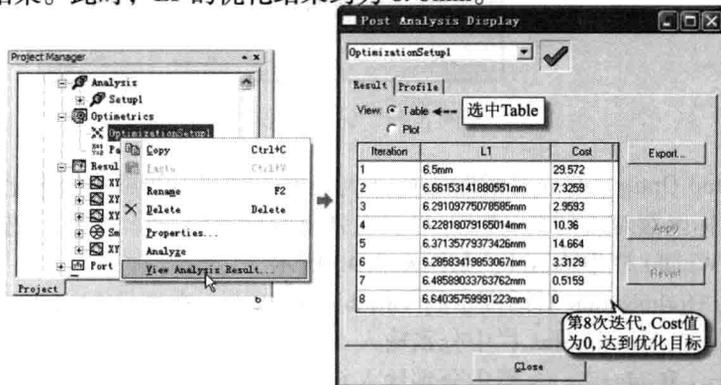


图 4.3.42 查看优化分析结果

11. 查看优化后的天线性能

从前面的优化分析结果中可知,当 $L1 = 6.6\text{mm}$ 时,在 2.45GHz 中心工作频率处 $S_{11} < -30\text{dB}$,天线达到最佳的阻抗匹配。接下来,我们把变量 $L1$ 的值设置为 6.6mm ,然后再次运行仿真分析,查看此时天线的各项性能参数,包括 S_{11} 扫频分析结果、 S_{11} 的 Smith 圆图结果以及 xz 和 yz 截面的增益方向图。

(1) 重新运行仿真分析

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令,打开设计属性对话框,把变量 $L1$ 的值由 7mm 改为 6.6mm 。

右键单击工程树 Analysis 节点下的 Setup1 选项,在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令,重新运行仿真分析,分析 $L1 = 6.6\text{mm}$ 时的天线性能。

(2) 查看 S_{11} 分析结果

分析完成后,右键单击工程树下的 Results 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令,打开报告设置对话框。该对话框的 Trace 选项卡的参数设置如图 4.3.43 所示,然后选择 Families 选项卡,设置变量 $L1$ 为 6.6mm ,如图 4.3.44 所示。最后单击 **New Report** 按钮,生成 S_{11} 分析结果报告,如图 4.3.45 所示。

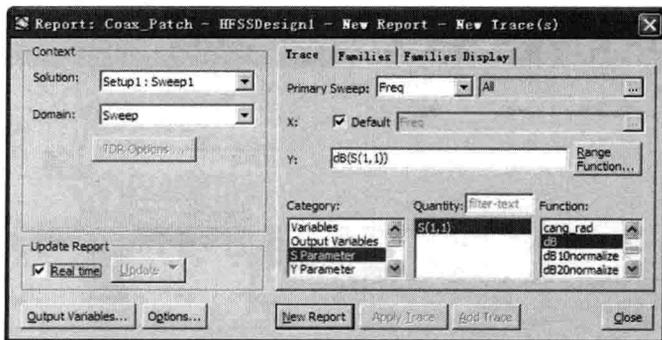


图 4.3.43 设置 Trace 选项卡

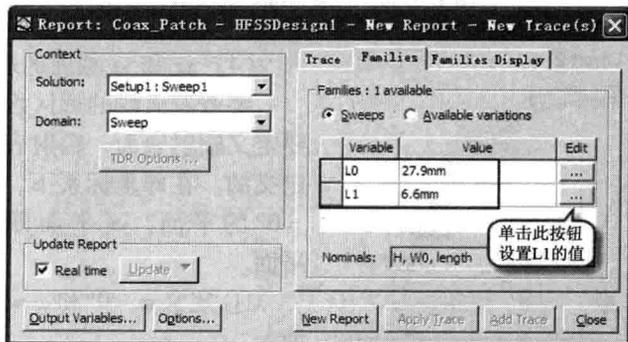
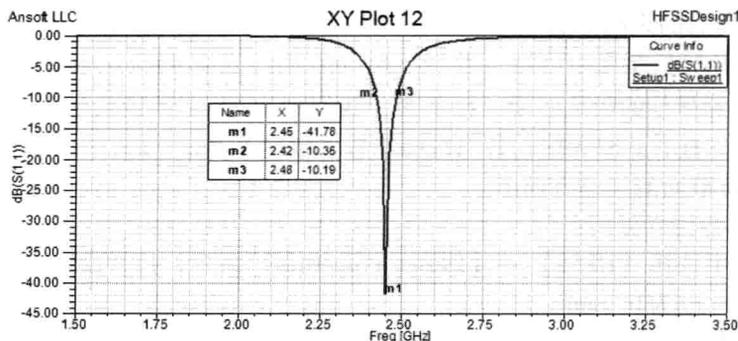


图 4.3.44 设置 Families 选项卡

从结果报告中可以看出,此时在 2.45GHz 处, S_{11} 值约为 -41.8dB ,天线的 10dB 带宽约为 $(2.48 - 2.42)/2.45 = 2.45\%$ 。

(3) 查看 S_{11} 的 Smith 圆图结果

右键单击工程树下的 Results 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution

图 4.3.45 S_{11} 扫频分析结果

【Data Report】→【Smith Chart】命令，打开报告设置对话框。该对话框的 Trace 选项卡的参数设置如图 4.3.46 所示，然后选择 Families 选项卡，Families 选项卡的参数设置如前面的图 4.3.44 所示。最后单击 **New Report** 按钮，生成 S_{11} 的 Smith 圆图结果，如图 4.3.47 所示。

从结果报告中可以看出，2.45GHz 时的归一化阻抗为 $0.99 - j0.02$ ，从而达到了很好的匹配状态。

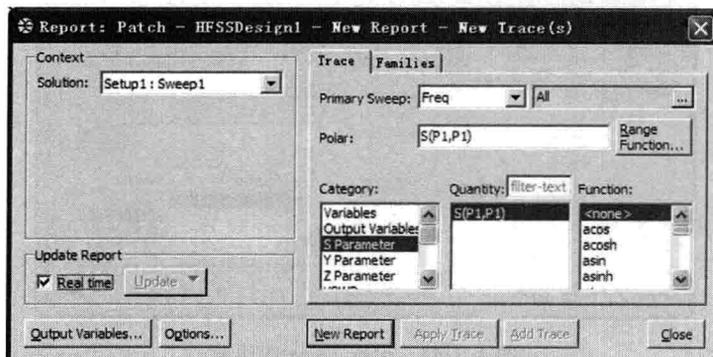
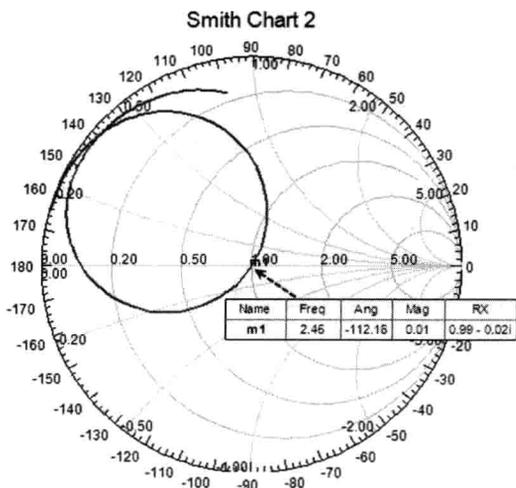


图 4.3.46 设置 Trace 选项卡

图 4.3.47 S_{11} 的 Smith 圆图结果

(4) xz 和 yz 截面的增益方向图

要查看天线的远区场计算结果，首先需要定义辐射表面，辐射表面是在球坐标系下定义的。在球坐标系下， xz 平面即相当于 $\varphi = 0^\circ$ 的平面， yz 平面即相当于 $\varphi = 90^\circ$ 的平面。

① 定义 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 的平面为辐射表面。

右键单击工程树下的 Radiation 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Insert Far Field Setup】→【Infinite Sphere】命令，打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框，如图 4.3.48 所示。在该对话框的 Name 文本框中

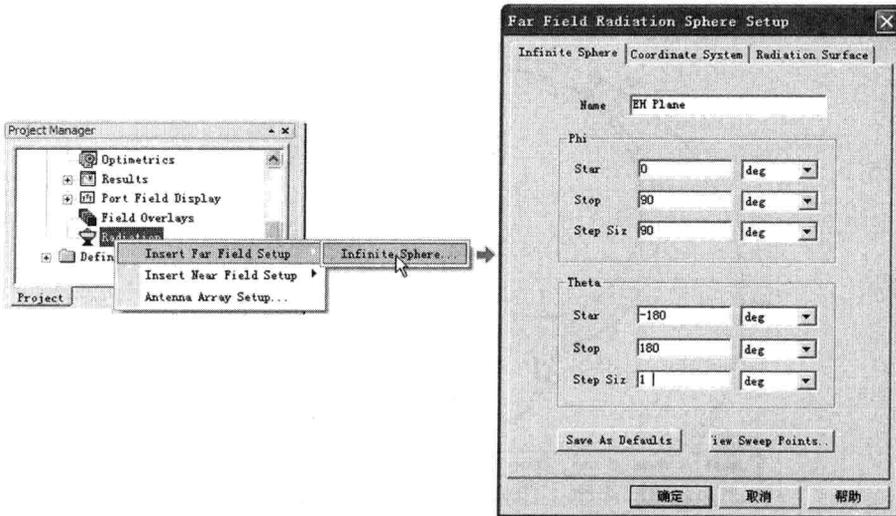


图 4.3.48 定义辐射表面

输入辐射表面的名称 EH Plane，在 Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、90deg 和 90deg，在 Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 -180deg、180deg 和 1deg。然后单击 **确定** 按钮完成设置。

此时，定义的辐射表面名称 EH Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

② 查看 xz 和 yz 截面上的增益方向图。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择 **【Create Far Fields Report】** → **【Radiation Pattern】** 命令，打开如图 4.3.49 所示的报告设置对话框。在该对话框中将 Geometry 选项设置为前面定义的辐射表面 EH Plane，在 Category 列表框中选择 Gain 选项，在 Quantity 列表框中选择 GainTotal 选项，在 Function 列表框中选择 dB 选项。然后选择 Families 选项卡，设置变量 L1 的值为 6.6mm，如图 4.3.50 所示。最后单击 **New Report** 按钮，生成极坐标系下天线在 xz 和 yz 截面上的增益方向图，如图 4.3.51 所示。

从结果报告中可以看出，最大辐射方向为 $\varphi = 0^\circ$ 、 $\theta = 90^\circ$ ，即辐射贴片的正上方，最大增益约为 3.8dB。

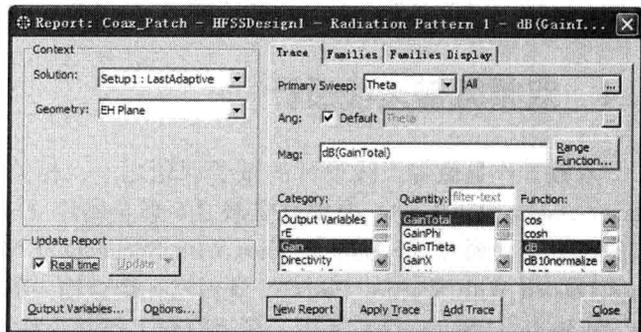


图 4.3.49 设置 Trace 选项卡

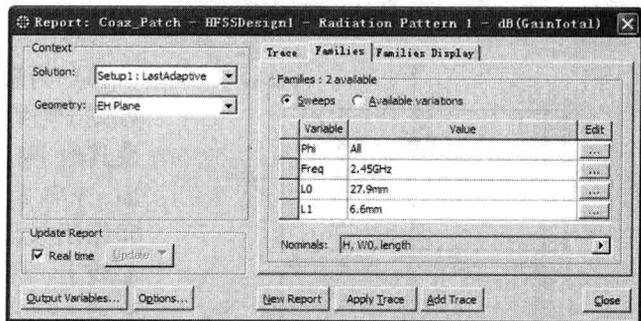
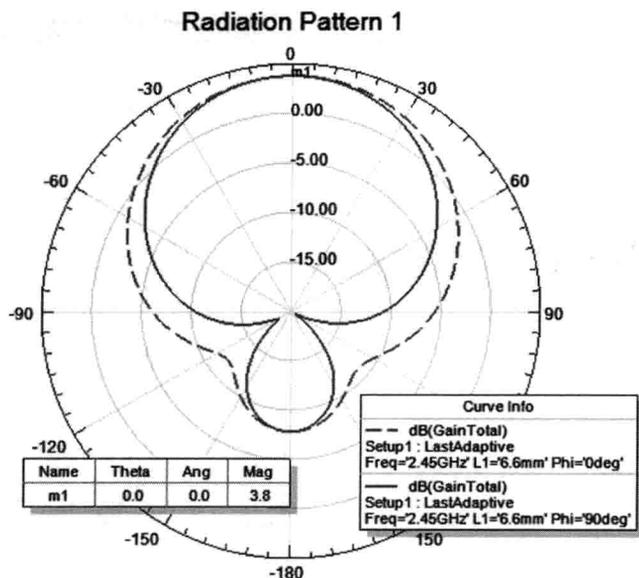


图 4.3.50 设置 Families 选项卡

图 4.3.51 xz 面和 yz 截面上的增益方向图

12. 保存设计

至此，我们完成了同轴线馈电的矩形微带天线的设计分析。最后单击工具栏上的  按钮保存设计，再选择主菜单栏中的【File】→【Exit】命令，退出 HFSS。

4.4 双频微带天线设计

双频工作是微带天线设计的重要课题之一，相关的设计包括使用多层金属片 (Multi-layer Stacked Patches)、具槽孔负载之矩形金属片 (Slotted Rectangular Patches)、具矩形缺口的正方形金属片 (Square Patches With Rectangular Notches)、具短路负载的金属片 (Patches Loaded With Shorting Posts)、倾斜槽孔耦合馈入的矩形金属片 (Rectangular Patches Fed By An Inclined Slot) 等。其中，获得双频工作的一种最简单的方法是辐射贴片的长度对应一个频率谐振，其宽度对应另一个频率谐振，然后从对角线的一角馈电，就能使同一个辐射贴片工作于两个频率上。其结构如图 4.4.1 所示。

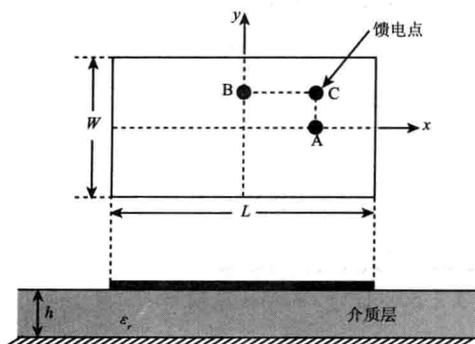


图 4.4.1 单馈电单层双频矩形微带天线

对于图 4.4.1 所示微带贴片， x 轴上的 A 点 $(x, 0)$ 为激发 TM_{10} 模式的 50Ω 馈电点，由于 A 点位于辐射贴片 y 方向的中心线上，因此不会激发其他 TM_{0n} 模式 ($n=1, 3, 5, \dots$)。另一方面， y 轴上的 B 点 $(0, y)$ 为激发 TM_{01} 模式的 50Ω 馈电点，B 点由于位于辐射贴片 x 方向的中心线上，因此不会激发其他 TM_{m0} 模式 ($m=1, 3, 5, \dots$)。然后，如果将馈电点放置于 (x, y) 位置的 C 点，则此时天线可以同时激发 TM_{01} 模式和 TM_{10} 模式，且在这两种模式下均能得到 50Ω 的输入阻抗。也就是说此时天线可以实现双频工作。

4.4.1 设计要求

使用 HFSS 设计中心频率为 1.9GHz 和 2.45GHz 的双频矩形微带天线，在中心频率处的 S_{11} 参数小于 -20dB ，并仿真分析给出天线的各项性能参数。介质基片采用厚度为 1.6mm 的 FR4 环氧树脂 (FR4 Epoxy) 板，天线馈电方式选择 50Ω 同轴线馈电。

4.4.2 HFSS 设计概述

这里直接使用 4.3 节中的矩形微带天线设计模型，在该模型的基础上设计出一个工作于 1.9GHz 和 2.45GHz 的同轴线馈电的双频微带天线。

在 4.3 节中，我们已经使用 HFSS 分析给出了中心频率为 2.45GHz 时的矩形微带天线的结构尺寸。其辐射贴片在 x 轴方向的长度为 27.9mm，同轴线馈电点（即 A 点）离辐射贴片中心的距离为 6.6mm。所以，在此处的双频设计中，只需使用 HFSS 仿真分析给出矩形微带天线的辐射贴片在 y 轴方向的长度和同轴线馈电点（B 点）的位置，从而使天线能够同时工作于 1.9GHz，且输入阻抗在 50Ω 左右。

首先，把微带天线的基本参数，即介质基片厚度 $h = 1.6\text{mm}$ ，介质的介电常数 $\epsilon_r = 4.4$ ，分别代入到式 (4-1-3) ~ 式 (4-1-5) 和式 (4-3-1)、(4-3-2) 中，计算出中心工作频率为 1.9GHz 时，天线辐射贴片在 y 轴方向的长度的初始值和 50Ω 馈电点（B 点）离辐射贴片中心距离的初始值，分别为 40mm 和 10mm。在设计中，我们新定义一个设计变量 L2，用以表示馈电点的 y 坐标，其初始值则为上面计算得出的 10mm。

然后，移动同轴线馈电点到 (L1, L2) 坐标位置，其中 L1 是在 4.3 节中定义的用以表示馈电点的 x 坐标的变量。再借助于 HFSS 的参数扫描分析或者优化设计功能，分析给出天线辐射贴片在 y 轴方向长度（使用 4.3 节中定义变量 W0 表示）和同轴线馈电点位置（即变量 L2）的实际值，从而使天线谐振频率为 1.9GHz，输入阻抗在 50Ω 左右。

最后，根据实际分析得出的辐射贴片的长度和宽度以及馈电点的位置，使用 HFSS 分析给出设计出的双频天线各项性能参数。

同轴线馈电的双频矩形微带天线 HFSS 设计模型如图 4.4.2 所示。

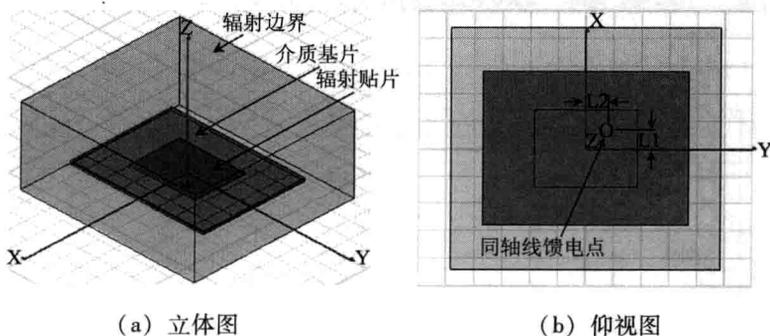


图 4.4.2 双频矩形微带天线 HFSS 设计模型

4.4.3 HFSS 仿真设计

1. 创建设计工程

这里使用 4.3 节中的 HFSS 设计文件。所以，首先双击打开 4.3 节中设计的文件 Coax_Patch.hfss。然后，从主菜单栏中选择【File】→【Save As】命令，把该工程文件另存为 Dual_Patch.hfss 文件。

删除工程树 Results 节点下的所有结果报告、Optimetrics 节点下的所有优化设计项和参数扫描分析项以及 Radiation 节点下定义的辐射表面名称。同时, 打开该设计文件所在的文件夹, 删除其中的 Dual_Patch_hfssresults 文件夹。

2. 添加设计变量

新添加一个设计变量 L2, 用以表示同轴线馈电点的 y 坐标, 其初始值为 10mm。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令, 打开设计属性对话框。单击该对话框中的 **Add...** 按钮, 打开 Add Property 对话框。在 Name 文本框中输入变量名称 L2, 在 Value 文本框中输入该变量的初始值 10mm, 如图 4.4.3 所示, 然后单击 **OK** 按钮, 添加变量 L2 到设计属性对话框中。

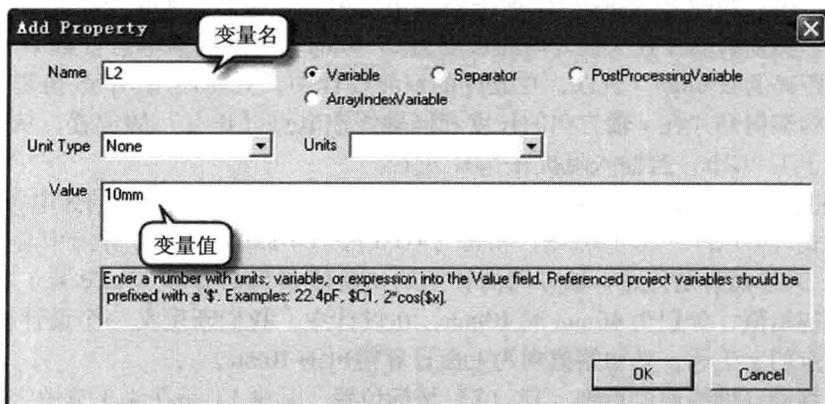


图 4.4.3 定义变量

最后, 确认设计属性对话框中变量和变量初始值如图 4.4.4 所示, 即 $H = 1.6\text{mm}$ 、 $L0 = 27.9\text{mm}$ 、 $W0 = 40\text{mm}$ 、 $L1 = 6.6\text{mm}$ 、 $\text{length} = 30\text{mm}$ 、 $L2 = 10\text{mm}$, 然后单击 **确定** 按钮退出。

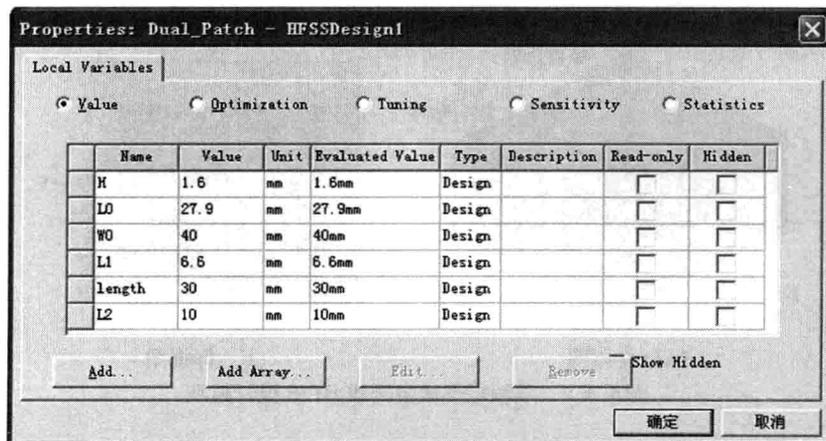


图 4.4.4 定义所有设计变量后的设计属性对话框

3. 修改设计模型

把同轴线的馈电点移动到如图 4.4.1 所示的 C 点位置, 即设置同轴线内芯模型 Feed 的底面圆心坐标和端口面模型 Port 的圆心坐标为 $(L1, L2, 0)$ 。

展开操作历史树下的 Solids > pec > Feed，双击 Feed 节点下的 Create Cylinder，打开圆柱体模型 Feed 属性对话框的 Command 选项卡，将 Center Position 选项由原先的 (L1,0,0) 修改为 (L1,L2,0)，如图 4.4.5 所示。然后单击 **确定** 按钮退出。

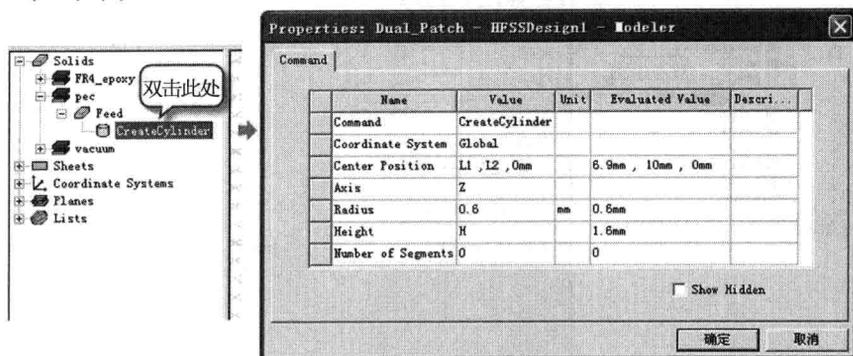


图 4.4.5 修改模型 Feed 的底面圆心坐标

再展开操作历史树下的 Sheets > Lumped Port > Port，双击 Port 节点下的 CreateCircle，打开圆面模型 Port 属性对话框的 Command 选项卡，将 Center Position 选项也由原先的 (L1,0,0) 修改为 (L1,L2,0)，如图 4.4.6 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

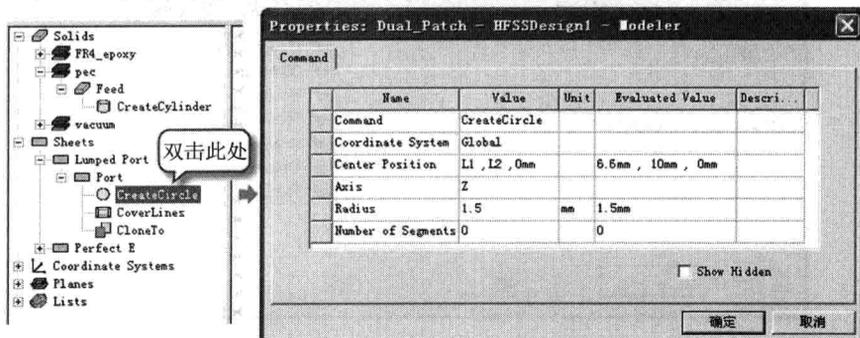


图 4.4.6 修改模型 Port 的圆心坐标

这样，就把同轴线的馈电点移动到如图 4.4.1 所示的 C 点位置了。

4. 修改扫频范围

把扫频范围由原先的 1.5GHz ~ 3.5GHz 更改为 1.5GHz ~ 3GHz。

展开工程树下的 Analysis > Setup1，双击 Setup1 节点下的 Sweep1，打开扫频设置对话框。在该对话框中将 Stop 选项由原先的 3.5GHz 修改为 3GHz，其他选项都保留原先设置不变，如图 4.4.7 所示。然后单击对话框中的 **OK** 按钮完成设置。

5. 设计检查和运行仿真计算

进行设计检查，检查设计的完整性和正确性，然后运行仿真分析。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进行设计检查。此时，会打开如图 4.4.8 所示的 Validation Check 对话框，该对话框中的每一个选项的前面都显示  图标，表示当前的 HFSS 设计正确且完整。单击 **Close** 关闭对话框，接下来开始运行仿真计算。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze All】命令，

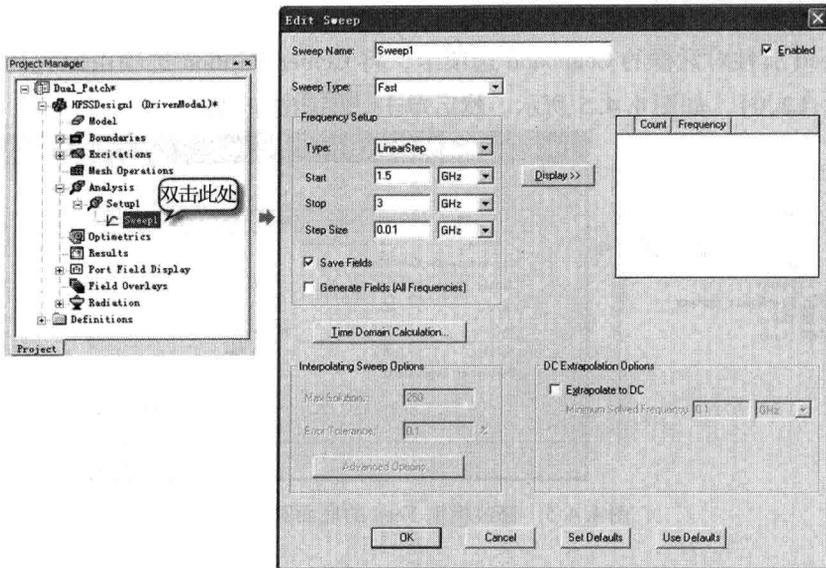


图 4.4.7 扫频设置

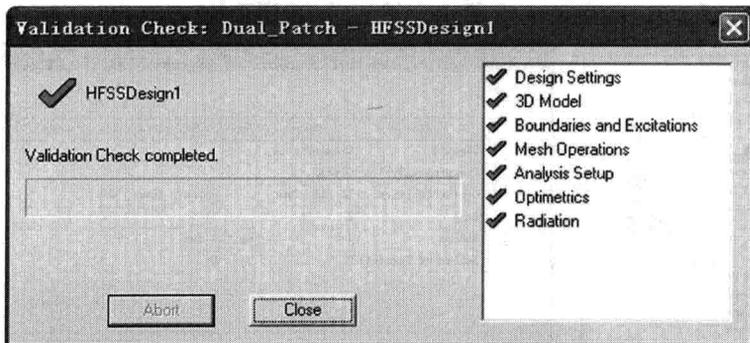


图 4.4.8 设计检查结果对话框

或者单击工具栏上的  按钮，开始运行仿真计算。

在仿真计算过程中，工作界面右下方的进度条窗口中会显示出求解进度，信息管理窗口中也会有相应的信息说明，并会在仿真计算完成后给出完成提示信息。

6. 查看天线的谐振频率

查看天线信号端口回波损耗（即 S_{11} ）的扫频分析结果，并给出天线的谐振频率。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框，如图 4.4.9 所示。在该对话框中确定左侧 Solution 选项选择的是 Setup1:Sweep1，在 Category 列表框中选中 S Parameter 选项，在 Quantity 列表框中选中 S(1,1) 选项，在 Function 列表框中选中 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮，再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时，即可生成如图 4.4.10 所示的 S_{11} 在 1.5GHz ~ 3GHz 的扫频分析结果。

从结果报告中可以看出，移动同轴线馈电点到辐射贴片的对角线位置后，矩形微带天线出现两个谐振点，一个谐振频率为 2.44GHz，另一个谐振频率为 1.77GHz。微带天线辐射贴片在 x 轴方向的长度以及馈电点在 x 轴方向的位置是在 4.3 节中优化分析后的结果，

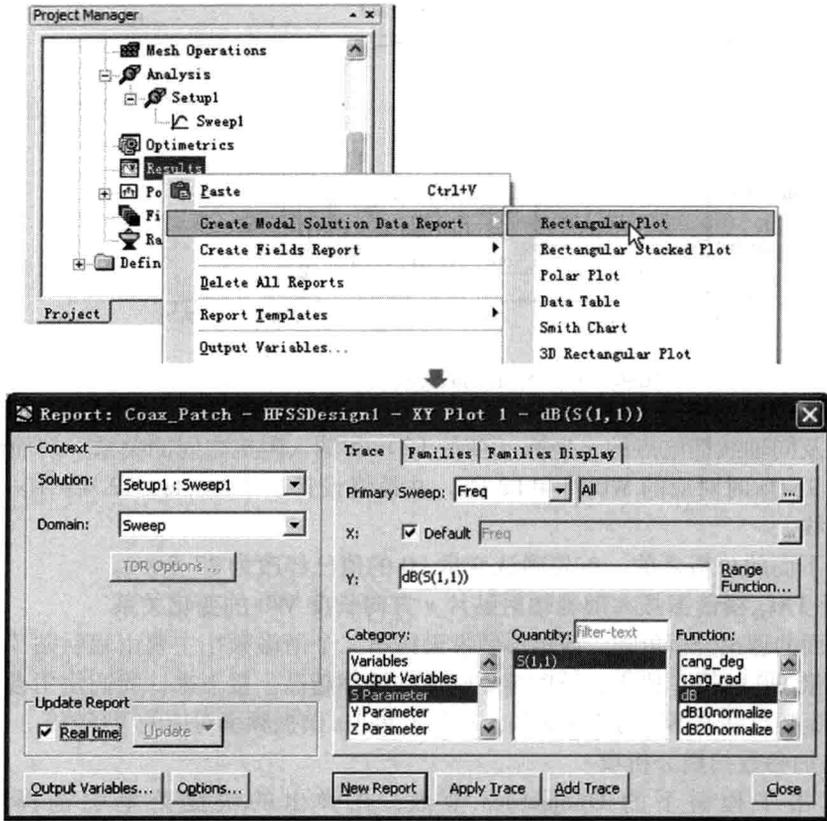


图 4.4.9 分析结果报告设置对话框

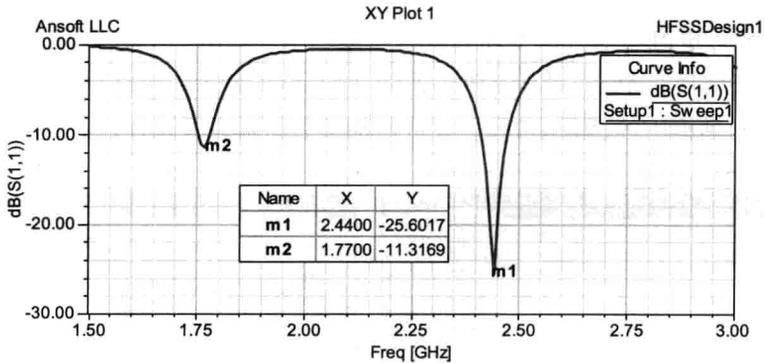


图 4.4.10 S_{11} 的扫频分析结果 ($L_0 = 27.9\text{mm}$)

把馈电点由辐射贴片的中心位置（如图 4.4.1 所示的 A 点）移动到对角线位置（如图 4.4.1 所示的 C 点）后，阻抗匹配良好，谐振频率稍微有所改变，由 2.45GHz 变成 2.44GHz。微调辐射贴片的长度，将长度变量 L_0 的值由 27.9mm 改为 27.8mm，再运行仿真分析，此时可以给出如图 4.4.11 所示的结果报告。

从如图 4.4.11 所示的结果报告中可以看出，移动同轴线馈电点到辐射贴片对角线位置后，当辐射贴片的长度 $L_0 = 27.8\text{mm}$ 时，微带天线的谐振频率为 2.45GHz，且此时 S_{11} 的值约为 -24dB。

下面来重点分析辐射贴片在 y 轴方向的长度（变量 W_0 ）和天线第二个谐振频率之间

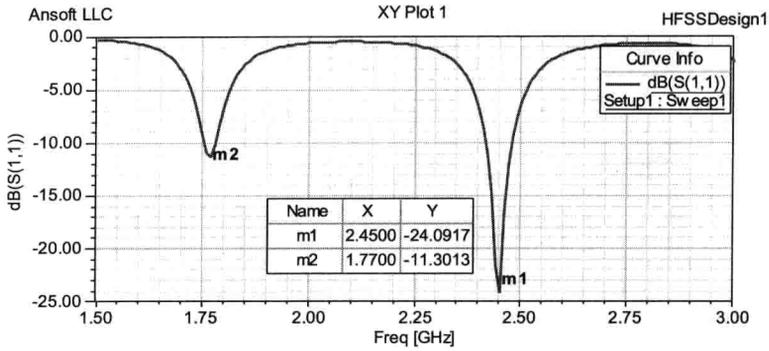


图 4.4.11 S_{11} 的扫频分析结果 ($L_0 = 27.8\text{mm}$)

的关系, 以及同轴线馈电点的 y 坐标 (变量 L_2) 和输入阻抗之间的关系, 从而给出中心工作频率为 1.9GHz 时对应的 W_0 值和 L_2 值, 并最终设计出 1.9GHz 和 2.45GHz 双频工作的矩形微带天线。

在开始下面的分析之前, 首先确认变量 L_0 的值已经改为 27.8mm 。

7. 分析 TM_{10} 模谐振频率随着辐射贴片 y 方向长度 W_0 的变化关系

根据前面的理论分析可知, 该矩形微带天线第二个谐振频率主要由辐射贴片在 y 方向的长度 (即变量 W_0 的值) 决定, 长度越短则谐振频率越高。接下来, 我们使用参数扫描分析功能分析谐振频点随着 W_0 的变化关系, 找到 1.9GHz 谐振频率对应的 W_0 值。

(1) 添加参数扫描分析项

右键单击工程树下的 **Optimetrics** 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【**Add**】→【**Parametric**】命令, 打开 **Setup Sweep Analysis** 对话框。单击该对话框中的 **Add...** 按钮, 打开 **Add/Edit Sweep** 对话框。在 **Variable** 下拉列表中选择变量 W_0 , 选中 **Linear step** 单选按钮, 在 **Start**、**Stop** 和 **Step** 文本框中分别输入 36mm 、 39mm 和 0.5mm , 然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后, 单击 **OK** 按钮, 关闭 **Add/Edit Sweep** 对话框。最后, 单击 **Setup Sweep Analysis** 对话框中的 **确定** 按钮, 完成添加参数扫描设置操作, 添加 W_0 为扫描变量, 如图 4.4.12 所示。

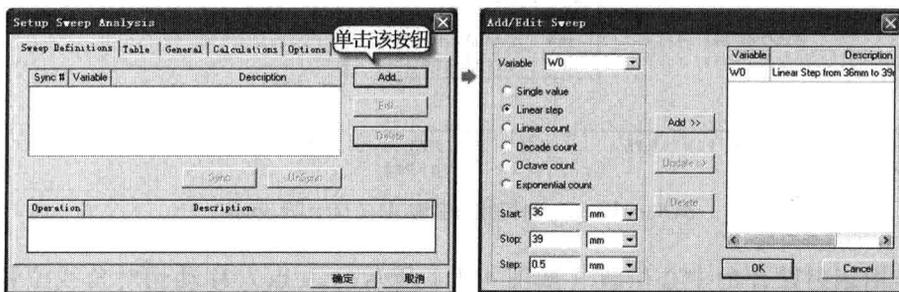


图 4.4.12 添加参数扫描分析

完成后, 参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 **Optimetrics** 节点下, 其默认的名称为 **ParametricSetup1**。

(2) 运行参数扫描分析

右键单击工程树 **Optimetrics** 节点下的 **ParametricSetup1**, 在弹出的快捷菜单中选择

【Analyze】命令，运行参数扫描分析，如图 4.4.13 所示。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后，右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。该对话框中的参数设置和图 4.4.9 所示设置相同。然后单击 **New Report** 按钮，生成一组 S_{11} 分析结果报告，如图 4.4.14 所示。结果报告中，每条 S_{11} 曲线对应不同的 W_0 变量值。

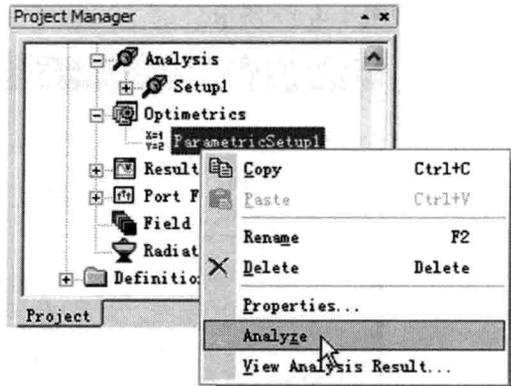


图 4.4.13 运行参数扫描分析

从参数扫描分析结果中可以看出， TM_{01} 模式的谐振频率 2.45GHz 不会随着 W_0 的改变而改变， TM_{10} 模式的谐振频率会随着 W_0 的变大而降低。当 $W_0 = 37\text{mm}$ 时，谐振频率约为 1.905GHz，当 $W_0 = 37.5\text{mm}$ 时，谐振频率约为 1.88GHz。这样，我们可以粗略估算当谐振频率为 1.9GHz 时， W_0 约为 37.1mm。

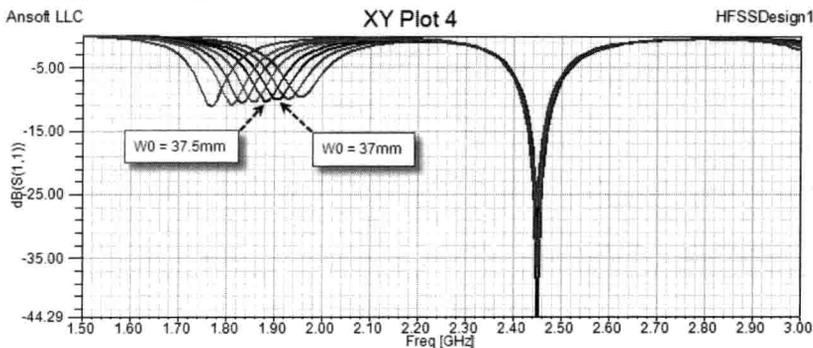


图 4.4.14 不同 W_0 对应的 S_{11} 曲线

8. 分析 TM_{10} 模输入阻抗和馈电点 y 坐标之间的关系

根据前面的分析结果可知， W_0 为 37.1mm 时， TM_{10} 模谐振频率为 1.9GHz。接下来，首先将变量 W_0 的值修改为 37.1mm，然后分析谐振频率为 1.9GHz 情况下， TM_{10} 模输入阻抗和馈电点 y 坐标（即变量 L_2 ）之间的关系。

(1) 修改变量 W_0 的值

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框，将变量 W_0 的值由 40mm 修改为 37.1mm。

(2) 查看输入阻抗的初始值

右键单击工程树 Analysis 节点下的求解设置项 Setup1，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令，运行仿真分析。仿真分析完成后，右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solutions Data Report】→【Data Table】命令，打开报告设置对话框。在 Trace 选项卡中的 Category 列表框中选择 Z Parameter 选项，在 Function 列表框中同时选中 im 和 re 选项，如图 4.4.15 所示。再选择对话框中的 Families 选项卡，其设置如图 4.4.16 所示。然后单击 **New Report** 按钮，生成天线的输入阻抗随频率的变化关

系报告, 如图 4.4.17 所示。

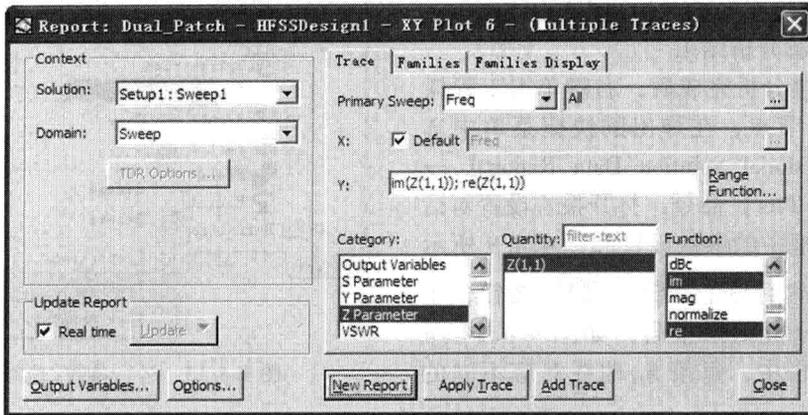


图 4.4.15 Trace 选项卡

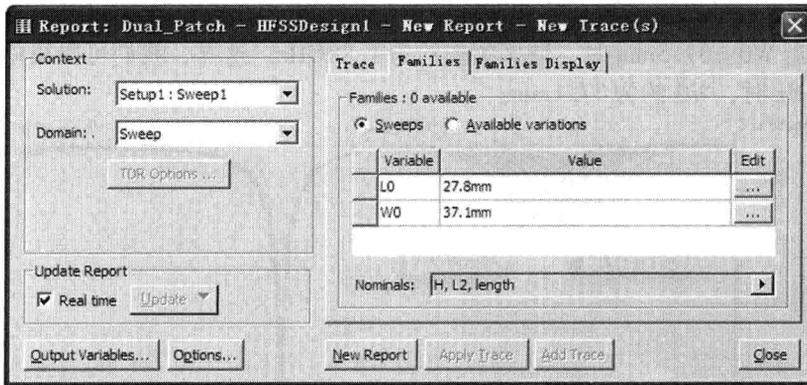


图 4.4.16 Families 选项卡

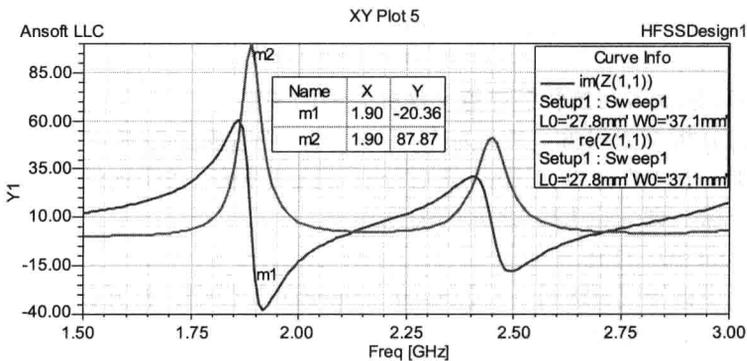


图 4.4.17 输入阻抗随频率的变化结果报告

从结果报告中可以看出, 在 1.9GHz 工作频点上, 输入阻抗为 $(87.9 - j20.4) \Omega$ 。根据之前的理论分析可知, 要想使输入阻抗在 50Ω 左右, 则 $L2$ 的值需要小于初始值 10mm。下面使用 HFSS 参数扫描分析功能来分析 TM_{10} 模在谐振频点 (1.9GHz) 处的输入阻抗与同轴线馈电点 y 坐标 (即变量 $L2$) 的变化关系, 从而找出 50Ω 输入阻抗点。这里, 添加 $L2$ 为参数扫描变量, 扫描范围设置为 5mm ~ 9mm, 扫描步进值设置为 0.5mm。

(3) 添加参数扫描分析项

右键单击工程树下的 Optimetrics 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令，打开 Setup Sweep Analysis 对话框。单击该对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add/Edit Sweep 对话框。在 Variable 下拉列表中选择变量 L2，选中 Linear step 单选按钮，在 Start、Stop 和 Step 文本框中分别输入 5mm、9mm 和 0.5mm，然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后，单击 **OK** 按钮，关闭 Add/Edit Sweep 对话框。最后单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮，完成添加参数扫描操作，添加变量 L2 为扫描变量，如图 4.4.18 所示。

设置完成后，参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认的名称为 ParametricSetup2。

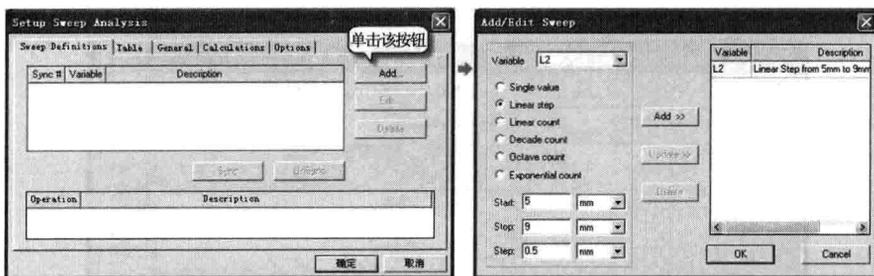


图 4.4.18 添加参数扫描分析

(4) 运行参数扫描分析

右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup2，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令，运行参数扫描分析。

(5) 查看分析结果

参数扫描分析完成后，查看 TM_{10} 模谐振频点 (1.9GHz) 处输入阻抗和馈电点 y 坐标之间的关系。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。在 Trace 选项卡的 Primary Sweep 下拉列表中选择 L2，在 Category 列表框中选择 Z Parameter 选项，在 Quantity 列表框中选择 Z(1,1) 选项，在 Function 列表框中同时选中 im 和 re 选项，如图 4.4.19 所示。选择 Families 选项卡，在该选项卡中分别单击 Freq、L0 和 W0 选项右侧的 **...** 按钮，设置 Freq 的值为 1.9GHz，L0 的值为 27.8mm，W0 的值为 37.1mm，如图 4.4.20 所示。然后单击 **New Report** 按钮，生成 1.9GHz 频点处的输入阻抗实部和虚部与同轴线馈电点位置的变化关系曲线，如图 4.4.21 所示。

从结果报告中可以看出，当 L2 移动到 7.2mm 位置时，输入阻抗约为 $(50.5 - j7.5)\Omega$ 。

9. 设计结果

我们根据前面的分析可以知道，当辐射贴片在 x 、 y 方向的长度 $L0 = 27.8\text{mm}$ 、 $W0 = 37.1\text{mm}$ 时，矩形微带贴片天线的 TM_{01} 模和 TM_{10} 模分别工作于 1.9GHz 和 2.45GHz。当同轴馈电点的位置坐标 $(L1, L2) = (6.6, 7.2)$ 时，1.9GHz 和 2.45GHz 时的输入阻抗都约为 50Ω 。这样，我们就设计出了 1.9GHz 和 2.45GHz 双频工作的矩形微带天线。

下面我们使用 HFSS 分析给出最终设计的双频天线性能。首先从主菜单栏中选择【HF-

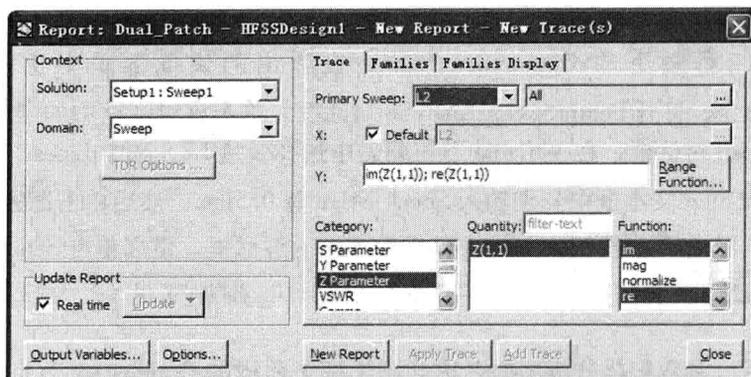


图 4.4.19 Trace 选项卡

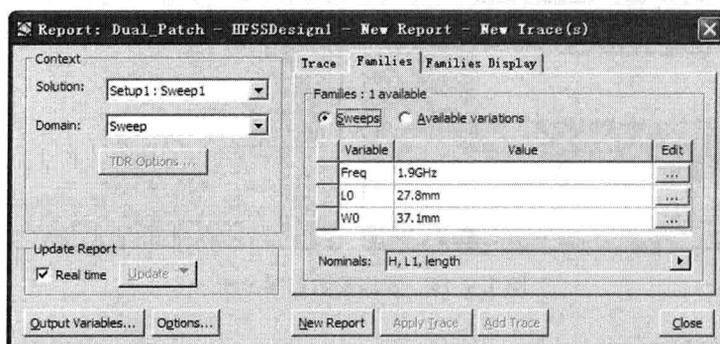


图 4.4.20 Families 选项卡

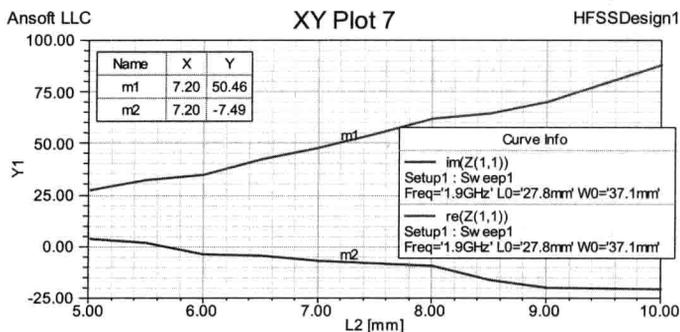


图 4.4.21 输入阻抗实部和虚部与同轴线馈电点位置的变化关系曲线

SS] → 【Design Properties】命令，打开设计属性对话框，确认变量 $L0 = 27.8\text{mm}$ 、 $W0 = 37.1\text{mm}$ 、 $L1 = 6.6\text{mm}$ 、 $L2 = 7.2\text{mm}$ ，如图 4.4.22 所示。

然后，右键单击工程 Analysis 节点下的 Setup1，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令，运行仿真分析，分析最终设计的天线性能。

10. 查看天线性能

分析完成后，查看此时天线的各项性能参数分析结果，包括 S_{11} 扫频分析结果、 S_{11} 的 Smith 圆图结果、 xz 和 yz 截面的增益方向图以及天线的三维增益方向图。

(1) 查看 S_{11} 扫频结果

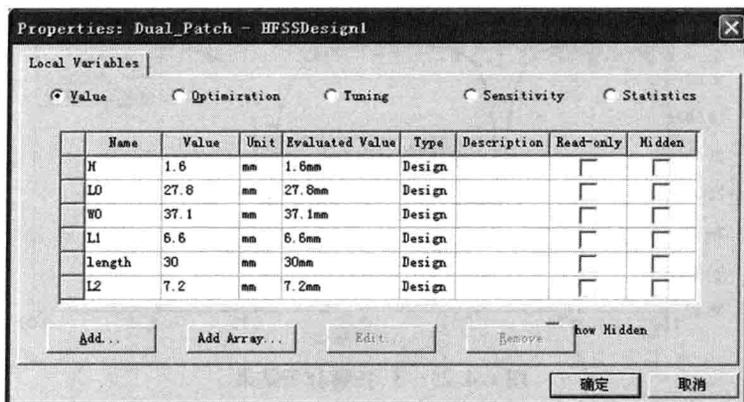


图 4.4.22 设计变量

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。该对话框的 Trace 选项卡中的参数设置如图 4.4.23 所示。然后选择 Families 选项卡，单击 Nominals 选项右侧的三角按钮，在弹出的下拉菜单中选择【Set All Variables to Nominal】命令，如图 4.4.24 所示。最后单击 **New Report** 按钮生成 S_{11} 分析结果报告，如图 4.4.25 所示。

从结果报告中可以看出，设计的矩形微带天线有 1.9GHz 和 2.45GHz 两个谐振频点。在 1.9GHz 处， S_{11} 的值约为 -22.0dB；在 2.45GHz 处， S_{11} 的值约为 -33.3 dB。

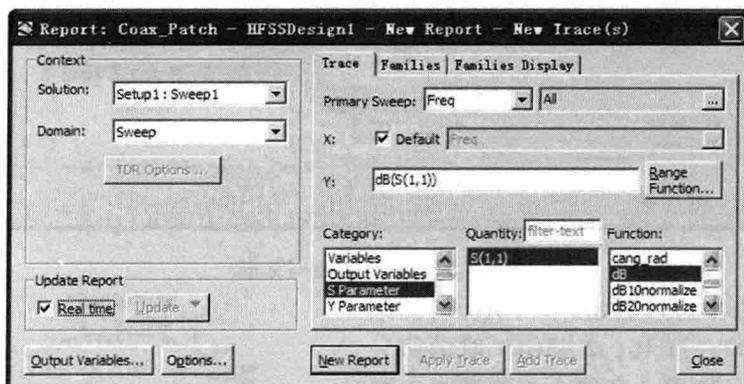


图 4.4.23 Trace 选项卡

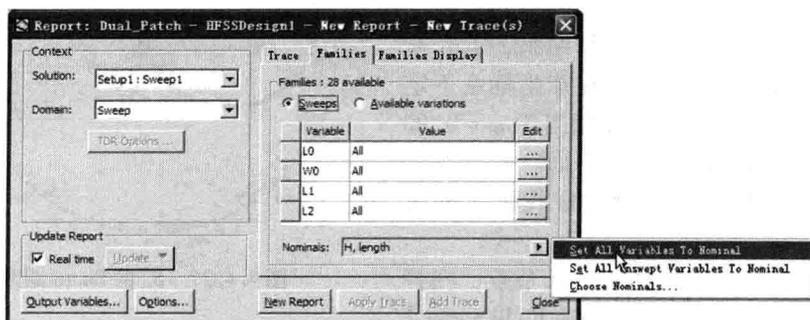
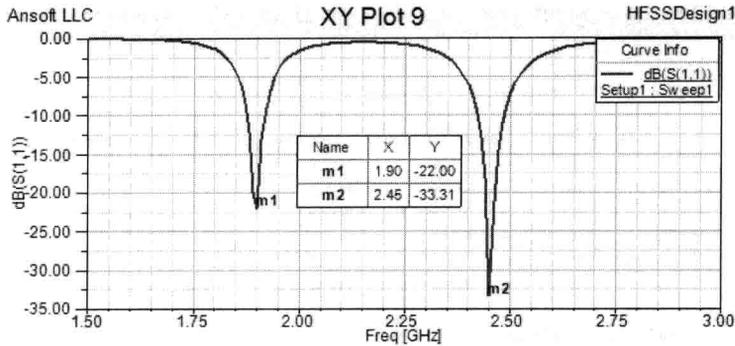


图 4.4.24 Families 选项卡

图 4.4.25 S_{11} 扫频分析结果(2) 查看 S_{11} 的 Smith 圆图结果

右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Smith Chart】命令, 打开报告设置对话框。该对话框的 Trace 选项卡中的参数设置如图 4.4.26 所示。然后单击 **New Report** 按钮, 生成 S_{11} 的 Smith 圆图结果, 如图 4.4.27 所示。

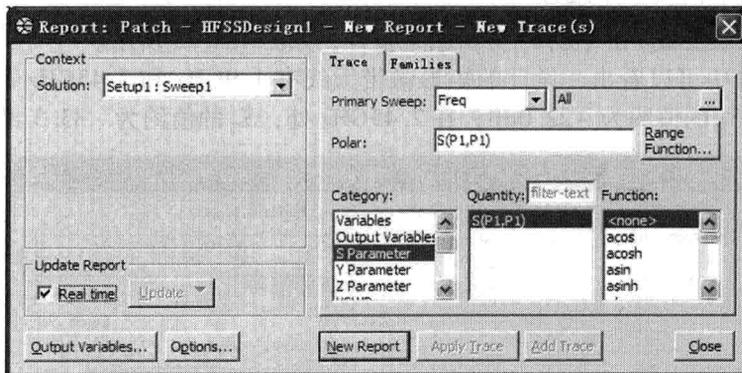


图 4.4.26 报告设置对话框

从结果报告中可以看出, 1.9GHz 时的归一化阻抗为 $1.00 - j0.16$, 2.45GHz 时的归一化阻抗为 $1.03 - j0.03$, 在两个工作频点上都达到了很好的阻抗匹配。

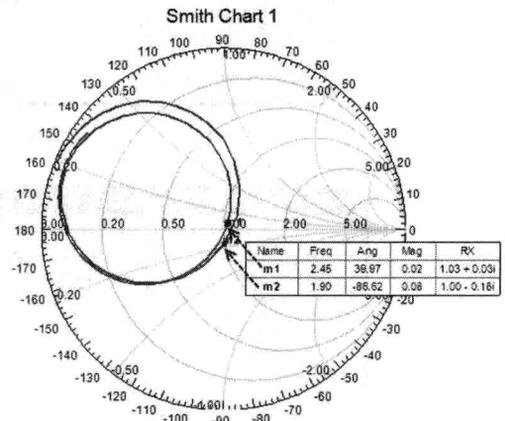
(3) 定义辐射表面

要想查看天线的远区场计算结果, 首先需要定义辐射表面, 辐射表面是在球坐标系下定义的。在球坐标系下, xz 平面相当于 $\varphi = 0^\circ$ 的平面, yz 平面相当于 $\varphi = 90^\circ$ 的平面。

① 定义 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 的平面为辐射表面。

右键单击工程树下的 Radiation 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Insert Far Field Setup】

→【Infinite Sphere】命令, 打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框, 定义辐射表面。在 Name 文本框中输入辐射表面的名称 EH Plane, 在 Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文

图 4.4.27 S_{11} 的 Smith 圆图结果

本框中分别输入 0deg、90deg 和 90deg，在 Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 -180deg、180deg 和 1deg，然后单击 **确定** 按钮完成设置。

此时，定义的辐射表面名称 EH Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

② 定义三维立体球面为辐射表面。

使用和前面相同的操作方法，再次打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框。在 Name 文本框中输入辐射表面的名称 3D，在 Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、360deg 和 2deg，在 Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、180deg 和 2deg，然后单击 **确定** 按钮完成设置。

此时，定义的辐射表面名称 3D 同样也会添加到工程树的 Radiation 节点下。

(4) 2.45GHz 时的增益方向图

① xz 和 yz 截面的增益方向图。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择 **【Create Far Fields Report】** → **【Radiation Pattern】** 命令，打开报告设置对话框，如图 4.4.28 所示。在 Geometry 下拉列表中选择前面定义的辐射表面 EH Plane，在 Category 列表框中选择 Gain，在 Quantity 列表框中

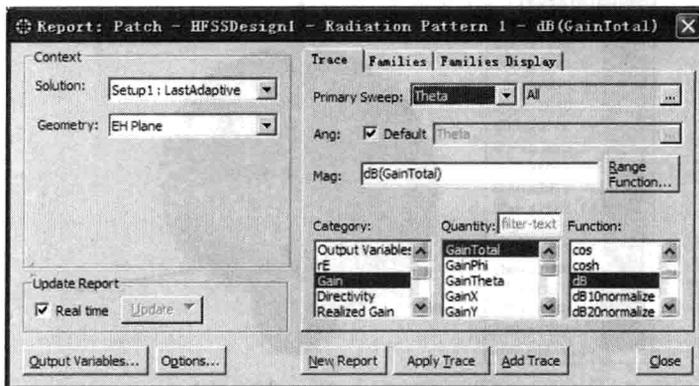


图 4.4.28 报告设置对话框

选择 GainTotal 选项，在 Function 列表框中选择 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮，生成极坐标系下天线在 xz 和 yz 截面上的增益方向图，如图 4.4.29 所示。

② 三维增益方向图。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择 **【Create Far Fields Report】** → **【3D Polar Plot】** 命令，打开如图 4.4.30 所示的报告设置对话框。在 Geometry 下拉列表中选择前面定义的辐射面 3D，在 Category 列表框中选择 Gain 选项，在 Quantity 列表框中选择 GainTotal 选项，在 Function 列表框中选择 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮，生成如图 4.4.31 所示的三维增益方向图。

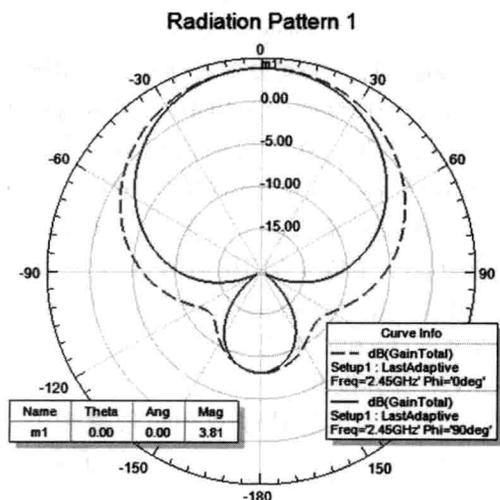


图 4.4.29 xz 和 yz 截面上的增益方向图

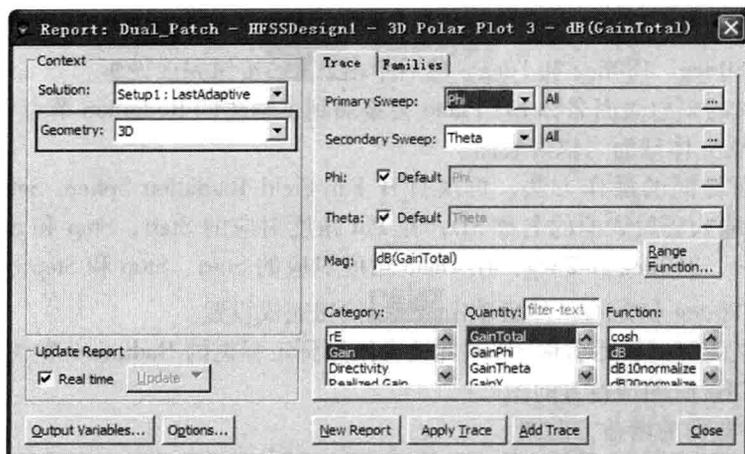


图 4.4.30 三维增益方向图结果报告设置对话框

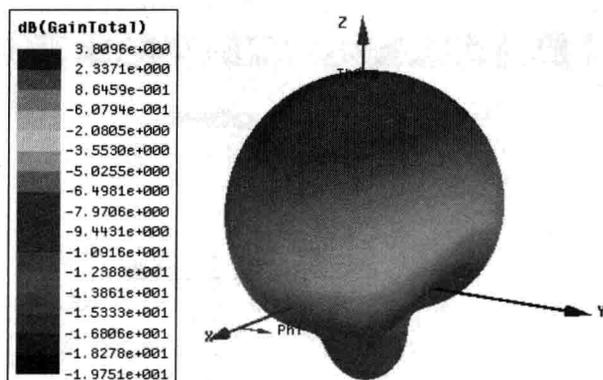


图 4.4.31 三维增益方向图

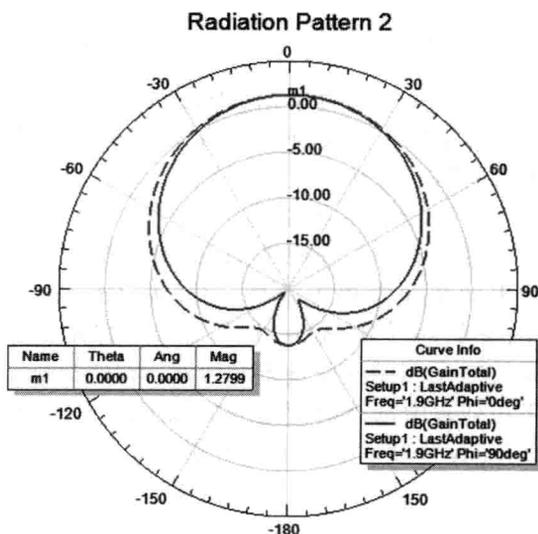
(5) 1.9GHz 时的增益方向图

双击工程树 Analysis 节点下的求解设置项 Setup1, 打开求解设置对话框, 将求解频率由 2.45GHz 修改为 1.9GHz。然后右键单击 Setup1 选项, 在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令, 重新运行仿真分析。

仿真分析完成后, 使用和上面相同的操作方法, 生成 1.9GHz 时天线在 xz 和 yz 截面上的增益方向图以及三维增益方向图, 如图 4.4.32 和图 4.4.33 所示。

11. 保存设计

至此, 我们完成了双频矩形微带天线的设计分析。最后单击工具栏上的  按钮保存设计, 再选择主菜单栏中的【File】→【Exit】命令, 退出 HFSS。

图 4.4.32 1.9GHz 时 xz 和 yz 截面上的增益方向图

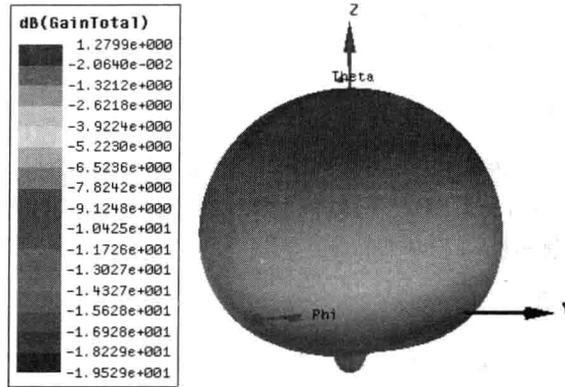


图 4.4.33 1.9GHz 时三维增益方向图

4.5 圆极化矩形微带天线设计

矩形贴片微带天线的极化方式通常是线极化，例如，前面设计的 3 个矩形微带天线，它们的极化方式都是线极化的。如果采用特殊的馈电方式，也可以获得圆极化的矩形贴片微带天线。圆极化的关键是激励起两个极化方式正交的线极化波，当这两个模式的线极化波幅度相等、相位相差 90° 时，就能得到圆极化波的辐射。矩形微带天线获得圆极化特性的馈电方式有两种，一种是单点馈电，另一种是正交双馈。

在本节中，我们主要讲述同轴线单点馈电的圆极化矩形微带天线的 HFSS 设计。

4.5.1 单点馈电圆极化微带天线实现原理

在 4.4 节的分析中，我们知道当同轴线的馈电点位于辐射贴片的对角线位置时，可以激发 TM_{01} 和 TM_{10} 两个模式，这两个模式的电场方向互相垂直。在设计中，我们让辐射贴片的长度 L 和宽度 W 相等，这样激发的 TM_{01} 和 TM_{10} 两个模式的频率相同、强度

相等，而且两个模式电场的相位差为零。若辐射贴片的谐振长度为 L_c ，我们微调谐振长度略偏离谐振，即一边长度为 $L_c + a$ ，另一边长度为 $L_c - a$ ，如图 4.5.1 所示。前者对应一个容抗 $Y_1 = G - jB$ ，后者对应一个感抗 $Y_1 = G + jB$ ，只要调整 a 的值，使得每一组的电抗分量等于阻抗的实数部分，即 $B = G$ ，则两阻抗大小相等，相位分别为 -45° 和 $+45^\circ$ ，这就满足了圆极化条件，从而构成了圆极化微带天线。其极化旋向取决于馈电点的接入位置，当馈电点在如图 4.5.1 所示的 A 点位置时，产生右旋圆极化波；当馈电点在如图 4.5.1 所示的 B 点位置时，产生左旋圆极化波。

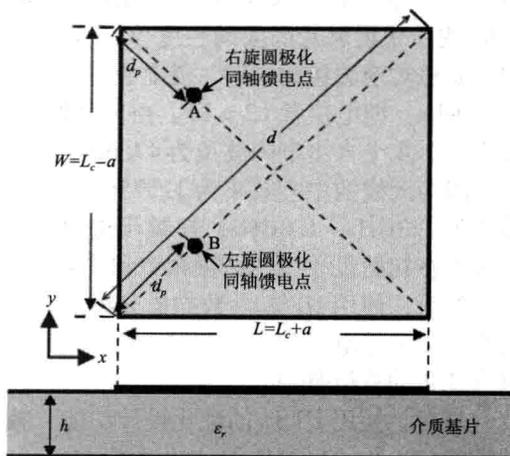


图 4.5.1 单点馈电圆极化微带天线结构

Kalio 和 Carver Coffey 研究证明，理论上当 $L/W = 1.029$ ，即 $a = 0.0143L_c$ 时， TM_{01} 和 TM_{10} 两个模式的相位差为 90° 。另外，由实际经验可以得到，此种结构的 50Ω 馈电点位于

辐射贴片对角线上,且馈电点和辐射贴片顶点的距离 d_p 在 $(0.35 \sim 0.39)d$ 之间。假设馈电点到辐射贴片的中心距离为 L_1 ,则 L_1 在 $(0.11 \sim 0.15)L_c$ 之间。

4.5.2 设计要求

设计一个右旋圆极化 GPS 接收天线,其中心频率为 1.575GHz,同时要求中心频率处圆极化波的轴比小于 2.0dB。采用单点同轴线馈电的矩形微带天线设计,介质基片采用厚度为 1.6mm 的 FR4 环氧树脂 (FR4 Epoxy) 板。

4.5.3 设计步骤

① 由介质基片参数,根据式 (4-1-1) 和式 (4-1-3) ~ 式 (4-1-5) 计算求得辐射贴片初始尺寸,使得谐振频率为 1.575GHz。计算得出初始尺寸为: $L = W = L_c = 46.1\text{mm}$,并设置微调长度值 $a = 0.0143L_c$ 以产生圆极化波。

② 由介质基片参数和辐射贴片的初始尺寸,估算输入阻抗为 50Ω 的同轴线馈电点位置。取 0.15 倍的 L_c ,计算得出馈电点在 x 、 y 方向离辐射贴片中心的距离都为 6.9mm。

③ 使用 HFSS 参数扫描分析或者优化设计功能给出当谐振频率为 1.575GHz 时辐射贴片的实际尺寸和 50Ω 馈电点的实际位置。

④ 使用 HFSS 优化设计功能,优化目标为 $S_{11} < -20\text{dB}$,轴比小于 1dB (轴比设置为小于 1.0dB,比要求的 2.0dB 严格,这样是为了能够达到更好的圆极化波),求得满足设计要求的辐射贴片尺寸和馈电点位置。

⑤ 给出设计结果和天线性能。

4.5.4 HFSS 设计概述

这里直接使用 4.4 节中的矩形微带天线设计模型,在该模型的基础上设计一个右旋圆极化 GPS 接收天线。

在该设计模型中,变量 L_0 和 W_0 分别表示辐射贴片的长度和宽度,变量 L_1 和 L_2 分别表示同轴线馈电点在 x 、 y 方向上离辐射贴片中心的距离。新定义两个变量 L_c 和 Δ ,其中 L_c 用于表示谐振频率为 1.575GHz 时所对应的辐射贴片长度值,其初始值为 46.1mm; Δ 表示辐射贴片的微调长度值,其初始值为 $0.0143 \times L_c$ 。我们根据前面的理论分析可知,要想实现圆极化辐射,需要设置辐射贴片的长度变量 $L_0 = L_c + \Delta$ 、宽度变量 $W_0 = L_c - \Delta$,馈电位置 $L_2 = L_1$ 。由前面的计算可知 L_1 的初始值为 6.9mm。另外,1.575GHz 对应的 $1/4$ 个自由空间波长为 47.6mm,所以需要把变量 length 的值改为 50mm。

因为天线的中心频率为 1.575GHz,所以首先将求解频率设置为 1.575GHz,扫频范围设置为 1.3GHz ~ 1.8GHz,扫频步进值设置为 0.01GHz,并运行仿真分析,查看设计的微带天线在初始尺寸下的谐振频率和输入阻抗。

然后,使用 HFSS 参数扫描分析功能,分别分析给出辐射天线尺寸和谐振频率之间的关系,以及馈电点的位置和输入阻抗之间的关系,确定满足设计要求的辐射贴片尺寸和馈电点位置的取值范围。

最后,使用 HFSS 的优化设计功能,找出满足设计要求的辐射贴片尺寸和馈电点位置的准确值,并给出最终设计的天线性能。

4.5.5 HFSS 仿真设计

1. 创建设计工程

这里使用 4.4 节的 HFSS 设计文件。首先,双击打开设计文件 Dual_Patch.hfss。然后,

从主菜单栏中选择【File】→【Save As】命令，将该工程文件另存为CP_Patch.hfss文件。

删除工程树 Results 节点下的所有结果报告，以及 Optimetrics 节点下的所有优化设计项和参数扫描分析项。同时，打开该设计文件所在的文件夹，删除其中的CP_Patch.hfssresults文件夹。

2. 添加和修改设计变量

新添加两个设计变量 Lc 和 Delta，分别用以表示谐振频率对应的辐射贴片长度值和辐射贴片的微调长度值。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框。单击对话框中的 **Add...** 按钮，打开如图 4.5.2 所示的 Add Property 对话框。在 Name 文本框中输入变量名称 Lc，在 Value 文本框中输入该变量的初始值 46.1mm，然后单击 **OK** 按钮，添加变量 Lc 到设计属性对话框中。

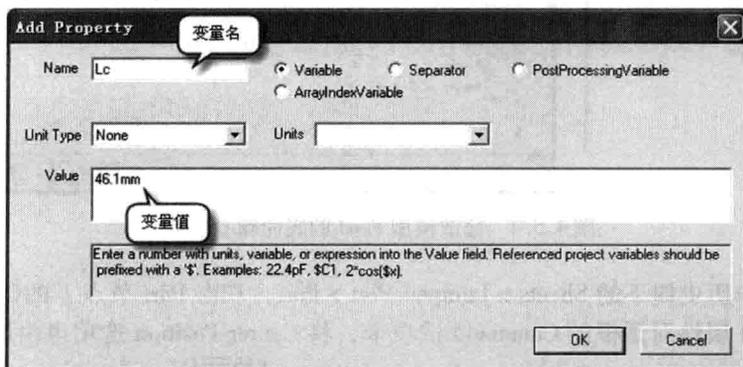


图 4.5.2 定义变量

使用相同的操作方法，添加变量 Delta，并设置其初始值为 $0.0143 \times Lc$ 。

添加了这两个设计变量之后，在设计属性对话框中将变量 L0 的初始值修改为 $Lc + Delta$ ，变量 W0 的初始值修改为 $Lc - Delta$ ，变量 L1 的初始值修改为 6.9mm，变量 L2 的初始值修改为 L1，变量 length 的初始值修改为 50mm。

最后，确认设计属性对话框中的变量和变量初始值如图 4.5.3 所示。确认无误后，单击对话框中的 **确定** 按钮退出。

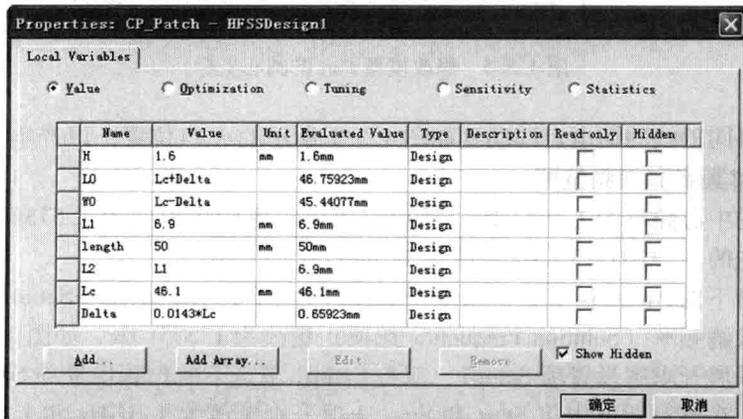


图 4.5.3 定义所有设计变量后的设计属性对话框

3. 修改设计模型

要想设计一个右旋圆极化微带天线, 需要将同轴线馈电点移动到如图 4.5.1 所示的 A 点位置, 即设置同轴线内芯模型 Feed 的底面圆心坐标和端口面模型 Port 的圆心坐标为 $(-L1, L2, 0)$ 。

展开操作历史树下的 Solids > pec > Feed, 双击 Feed 节点下的 CreateCylinder, 打开圆柱体模型 Feed 属性对话框的 Command 选项卡, 将 Center Position 选项由原先的 $(L1, 0, 0)$ 修改为 $(-L1, L2, 0)$, 如图 4.5.4 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

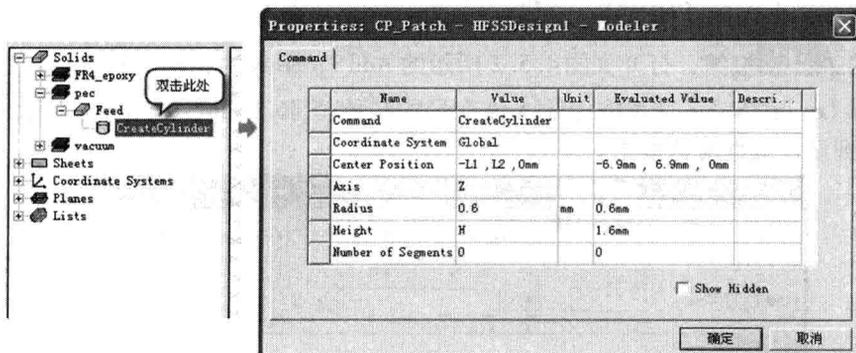


图 4.5.4 修改模型 Feed 的底面圆心坐标

再展开操作历史树下的 Sheets > Lumped Port > Port, 双击 Port 节点下的 CreateCircle, 打开圆面模型 Port 属性对话框的 Command 选项卡, 将 Center Position 选项也由原先的 $(L1, 0, 0)$ 修改为 $(-L1, L2, 0)$, 如图 4.5.5 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

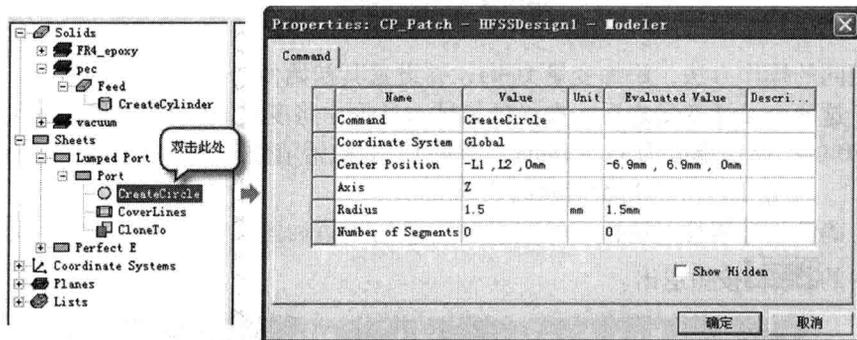


图 4.5.5 修改模型 Port 的圆心坐标

这样, 就将同轴线的馈电点移动到如图 4.5.1 所示的 A 点位置, 以产生右旋极化波。

4. 更改求解频率和扫频范围

因为天线的中心频率为 1.575GHz, 所以这里将求解频率设置为 1.575GHz。然后再将扫频范围由原先的 1.5GHz ~ 3 GHz 更改为 1.3GHz ~ 1.8GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点, 双击 Analysis 节点下的求解设置项 Setup1, 打开求解设置对话框, 将求解频率 (Solution Frequency 选项) 更改为 1.575GHz, 如图 4.5.6 所示。

在工程树下展开求解设置项 Setup1, 双击 Setup1 节点下的扫频设置项 Sweep1, 打开扫频设置对话框。在该对话框中将 Start 和 Stop 选项分别更改为 1.3GHz 和 1.8GHz, 其他选项都保留原先设置不变, 如图 4.5.7 所示。最后单击对话框中的 **OK** 按钮, 完成设置。

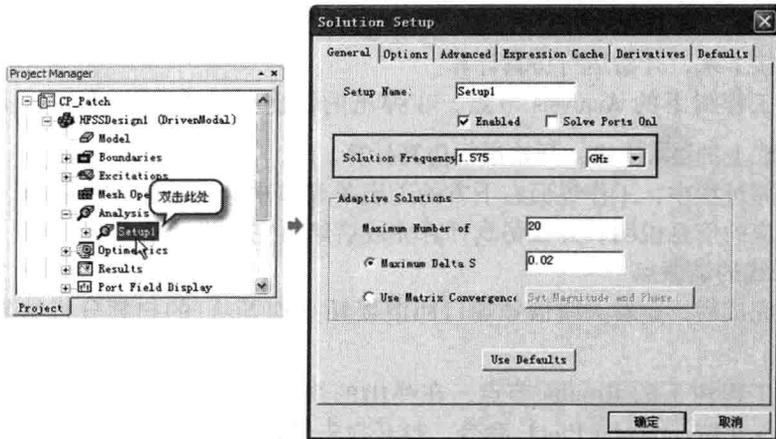


图 4.5.6 求解设置

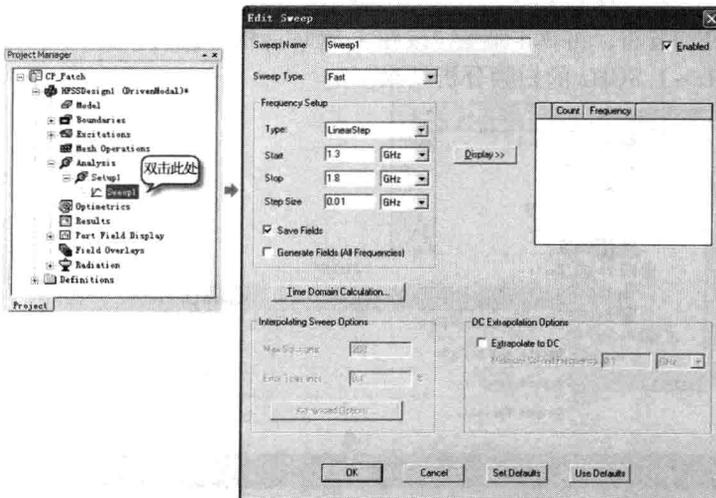


图 4.5.7 扫频设置

5. 设计检查和运行仿真计算

我们进行设计检查，确认设计的完整性和正确性，然后运行仿真分析。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令，或者单击工具栏上的按钮，进行设计检查。此时，会打开如图 4.5.8 所示的 Validation Check 对话框，该对话框中

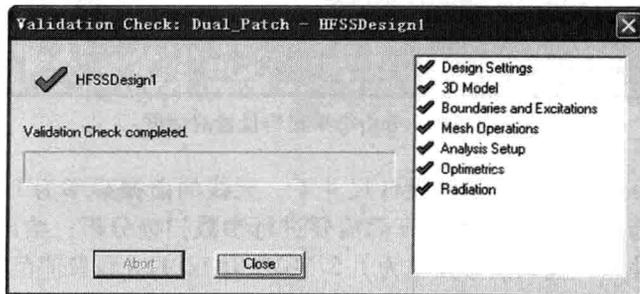


图 4.5.8 设计检查结果对话框

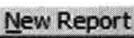
的每一个选项的前面都显示图标,表示当前的 HFSS 设计正确且完整,单击按钮,关闭对话框。接下来,开始运行仿真计算。

右键单击工程树下的 Analysis 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Analyze All】命令,或者单击工具栏上的按钮,开始运行仿真计算。

在仿真计算过程中,工作界面右下方的进度条窗口中会显示出求解进度,信息管理窗口中也会有相应的信息说明,并在仿真计算完成后给出完成提示信息。

6. 查看天线的谐振点

仿真分析完成后,查看天线信号端口回波损耗(即 S_{11}) 的扫频分析结果,并给出天线的谐振频率。

右键单击工程树下的 Results 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令,打开报告设置对话框,如图 4.5.9 所示。在该对话框中确定左侧 Solution 选项选择的是 Setup1: Sweep1,在 Category 列表框中选中 S Parameter 选项,在 Quantity 列表框中选中 $S(1,1)$ 选项,在 Function 列表框中选中 dB 选项。然后单击按钮,再单击按钮关闭对话框。此时,即可生成如图 4.5.10 所示的 S_{11} 在 1.3GHz ~ 1.8GHz 的扫频分析结果。

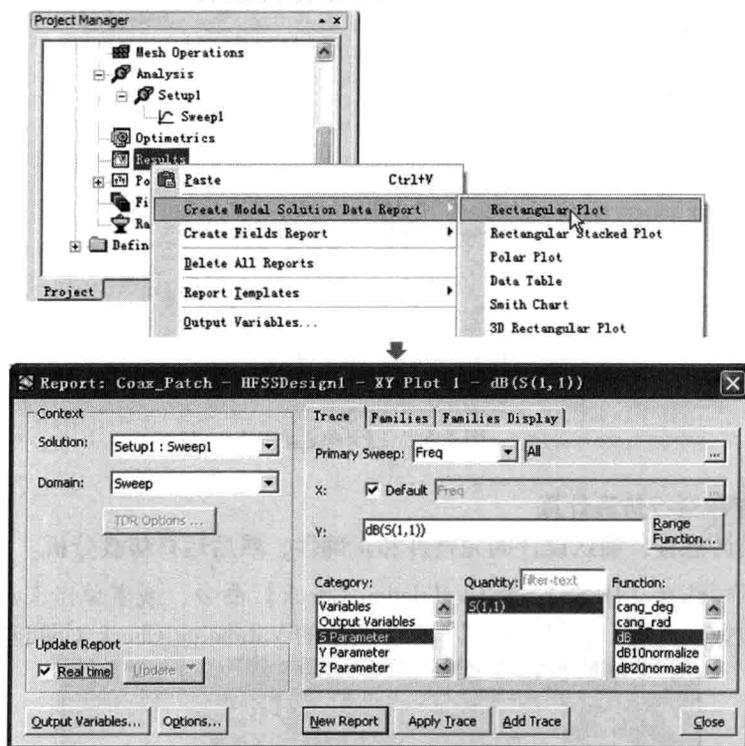
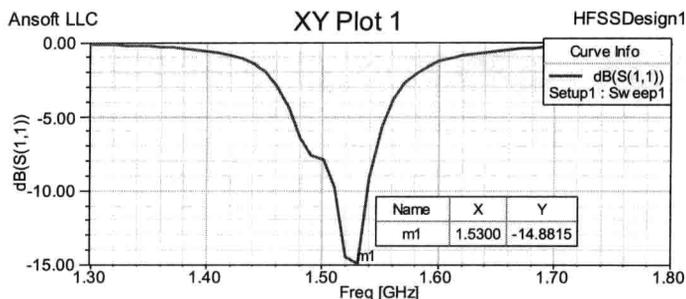


图 4.5.9 分析结果报告设置对话框

从结果报告中可以看出,在初始设计尺寸下,天线的谐振频率为 1.53GHz。而我们设计要求的中心频率为 1.575GHz,所以下面需要进行参数扫描分析,给出辐射长度 L_c 和谐振频率之间的变化关系,找到谐振频率为 1.575GHz 时 L_c 的大致取值范围。

7. 参数扫描分析查看谐振频率和贴片尺寸的关系

由理论分析可知,矩形微带天线的谐振频率主要由辐射贴片的长度决定,谐振频率随

图 4.5.10 S_{11} 的扫频分析结果

着贴片长度的缩短而变大。接下来，我们通过参数扫描分析功能来分析谐振频率随着辐射贴片长度 L_c 的变化关系，从而找到 L_c 的大致取值范围，使得谐振频率为 1.575GHz。

(1) 添加参数扫描分析项

右键单击工程树下的 Optimetrics 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令，打开 Setup Sweep Analysis 对话框。单击该对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add/Edit Sweep 对话框。在 Variable 下拉列表中选择变量 L_c ，选中 Linear step 单选按钮，在 Start、Stop 和 Step 文本框中分别输入 43.5mm、45.5mm 和 0.2mm，然后单击 **Add >>** 按钮，即可添加 L_c 为扫描变量。上述操作完成后，单击 **OK** 按钮关闭 Add/Edit Sweep 对话框。最后，单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮，完成添加参数扫描操作，添加 L_c 为扫描变量，整个操作过程如图 4.5.11 所示。

完成后，参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认的名称为 ParametricSetup1。

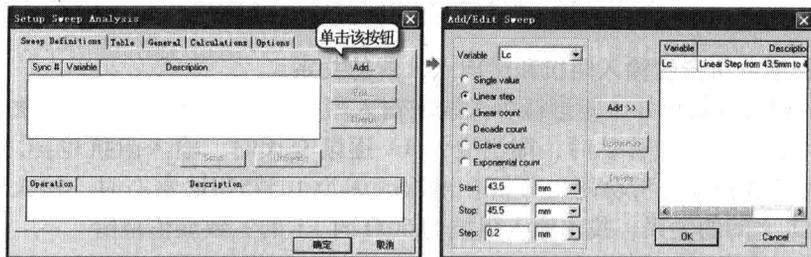


图 4.5.11 添加参数扫描分析

(2) 运行参数扫描分析

右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup1 选项，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令，运行参数扫描分析。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后，右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。该对话框中的 Trace 选项卡参数采用和上图 4.5.9 相同的设置，Families 选项卡的参数设置如图 4.5.12 所示，即变量 L_c 选择 All。然后单击 **New Report** 按钮，生成一组 S_{11} 分析结果报告，如图 4.5.13 所示。结果报告中，每条 S_{11} 曲线对应不同的 L_c 变量值。

从参数扫描分析结果中可以看出，谐振频率随着 L_c 的变大而降低。在馈电点位置 $L_1 = 6.9\text{mm}$ 不变的情况下，当 $L_c = 44.7\text{mm}$ 时，谐振频率为 1.58GHz；当 $L_c = 44.9\text{mm}$ 时，

谐振频率为 1.57GHz。

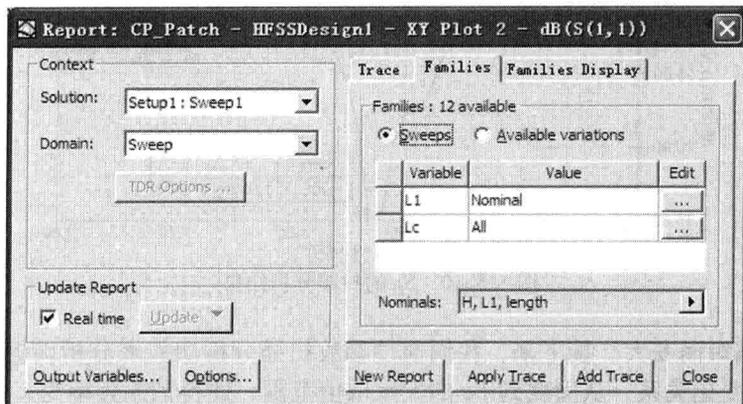


图 4.5.12 Families 选项卡

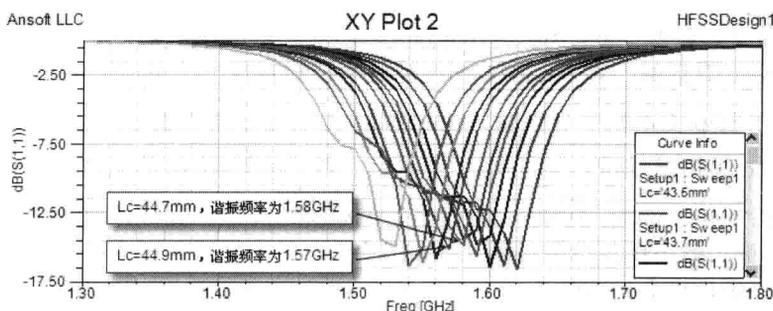


图 4.5.13 不同 Lc 对应的 S_{11} 的扫频分析结果

8. 参数扫描分析查看输入阻抗和馈电点位置的关系

由之前的理论分析可知，矩形微带天线的输入阻抗主要由馈电点的位置决定，当馈电点从辐射贴片中心往边缘移动时，即当变量 L1 逐渐变大时，输入阻抗也随之逐渐变大。下面我们通过参数扫描分析功能来分析在谐振频率为 1.575GHz 左右时，输入阻抗和馈电点位置变量 L1 之间的关系，找出输入阻抗为 50Ω 时 L1 的大致取值范围。

(1) 查看初始输入阻抗

根据前面的参数扫描分析结果可知，当 $L_c = 44.7\text{mm}$ 时，谐振频率在 1.575GHz 附近。我们首先查看此时天线的输入阻抗。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solutions Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。在 Trace 选项卡的 Category 列表框中选择 Z Parameter 选项，在 Function 列表框中同时选中 im 和 re 选项，如图 4.5.14 所示。再单击选择 Families 选项卡，设置变量 Lc 的值为 44.7mm，如图 4.5.15 所示。然后单击 **New Report** 按钮，生成天线的输入阻抗随频率的变化关系报告，如图 4.5.16 所示。

从结果报告中可以看出，工作频率为 1.575GHz 时，输入阻抗为 $(34.2 - j2.0)\Omega$ 。因此，要使输入阻抗为 50Ω 左右，则 L1 的值必须大于初始值 6.9mm。下面使用参数分析功能来分析天线的输入阻抗与同轴线馈电点位置变量 L1 之间的关系，找出输入阻抗为 50Ω 时 L1 的大致取值范围。扫描变量 L1 的扫描范围需要大于 6.9mm，这里设置为 7.4mm

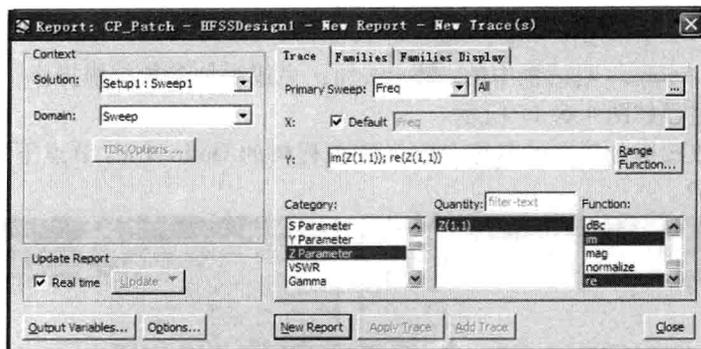


图 4.5.14 Trace 选项卡

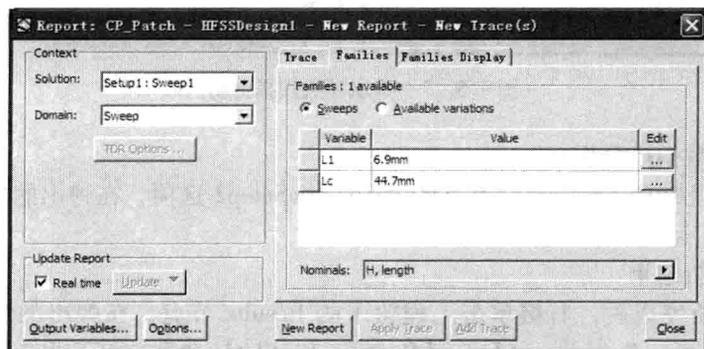


图 4.5.15 Families 选项卡

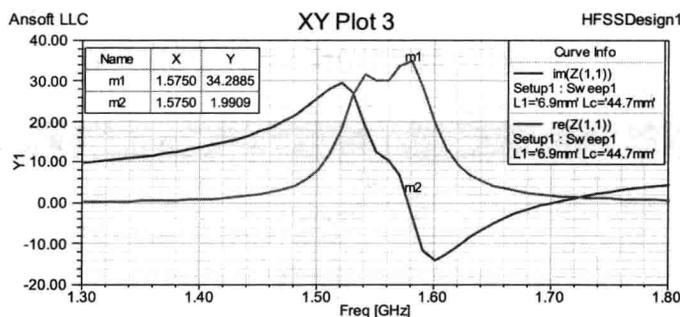


图 4.5.16 输入阻抗随频率的变化结果

~9mm。

(2) 添加参数扫描分析项

首先把变量 L_c 的值更改为 44.7mm，然后添加变量 L_1 为参数扫描变量，扫描范围设置为 7.4mm ~ 9mm，步进值设置为 0.2mm。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框。在该对话框中将变量 L_c 的值由 46.1mm 修改为 44.7mm，然后单击 **确定** 按钮退出。

再右键单击工程树下的 Optimetrics 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令，打开 Setup Sweep Analysis 对话框。单击该对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add/Edit Sweep 对话框。在 Variable 下拉列表中选择变量 L_1 ，选中 Linearstep 单选按钮，在 Start、Stop 和 Step 文本框中分别输入 7.4mm、9mm 和 0.2mm，然后单击 **Add >>** 按钮，添

加 L1 为扫描变量。上述操作完成后, 单击 **OK** 按钮, 关闭 Add/Edit Sweep 对话框。最后, 单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮, 完成添加参数扫描操作, 添加 L1 为扫描变量, 整个操作过程如图 4.5.17 所示。

完成后, 参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下, 其默认的名称为 ParametricSetup2。

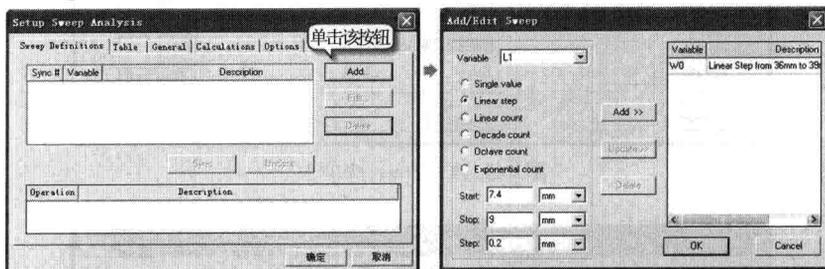


图 4.5.17 添加参数扫描分析

(3) 运行参数扫描分析

右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup2 选项, 在弹出的快捷菜单中选择 **【Analyze】** 命令, 运行参数扫描分析。

(4) 查看分析结果

参数扫描分析完成后, 右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择 **【Create Modal Solution Data Report】** → **【Rectangular Plot】** 命令, 打开报告设置对话框。该对话框的 Trace 选项卡参数采用和上图 4.5.14 相同的设置, Families 选项卡参数采用如图 4.5.18 所示的设置, 即变量 L1 选择为 All, 变量 Lc 选择为 44.7mm。然后单击 **New Report** 按钮, 生成一组不同 L1 取值下的输入阻抗的电阻分量和电抗分量的分析报告, 如图 4.5.19 所示。

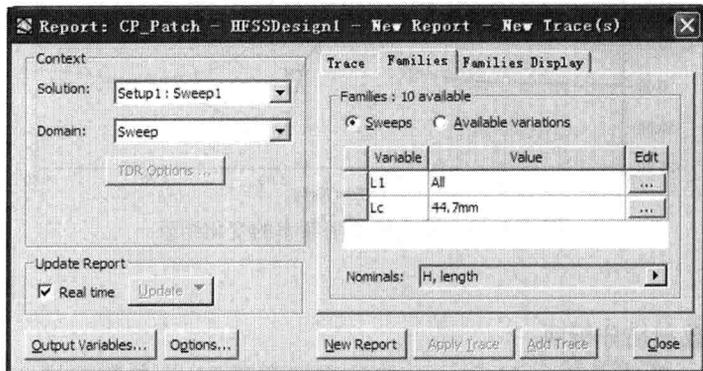


图 4.5.18 Families 选项卡

从参数扫描分析结果中可以看出, 输入阻抗随着 L1 的变大而变大, 当 L1 = 8.8mm 时, 输入阻抗约为 50Ω。

9. 优化分析

从前面的参数扫描分析结果可知, 当辐射贴片的长度 Lc = 44.7mm 时, 谐振频率在 1.575GHz 左右; 当馈电点位置 L1 = 8.8mm 时, 输入阻抗约为 50Ω。因此, 在优化分析时, 变量 Lc 和 L1 的优化范围可以分别取 44mm ~ 45mm 和 8mm ~ 9mm。下面我们使用 HFSS 的

优化设计功能，分析给出满足设计要求的最佳设计。

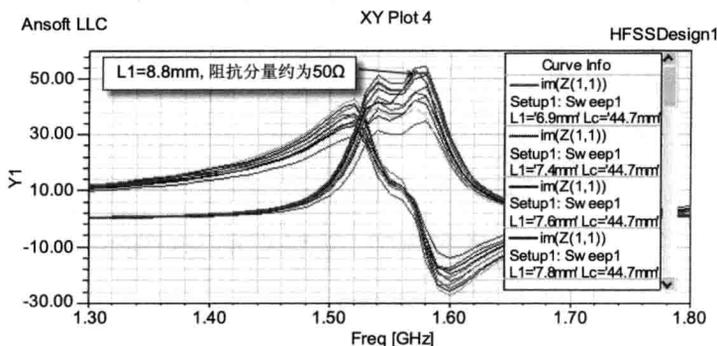


图 4.5.19 分析结果报告

为了满足设计要求且达到很好的圆极化波，在中心频率上设置优化目标函数为 $S_{11} < -20\text{dB}$ 且轴比小于 1dB，在 HFSS 中即表示为 $\text{dB}(S(1,1)) < -20$ ，且 $\text{dB}(\text{AxialRatioValue}) < 1$ 。

(1) 把 L1 和 Lc 设置为优化变量

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框。在该对话框中选中 Optimization 单选按钮，然后在变量列表中选中变量 L1 和 Lc 对应的复选框，如图 4.5.20 所示。最后单击 **确定** 按钮，即可将 L1 和 Lc 设置为优化变量。

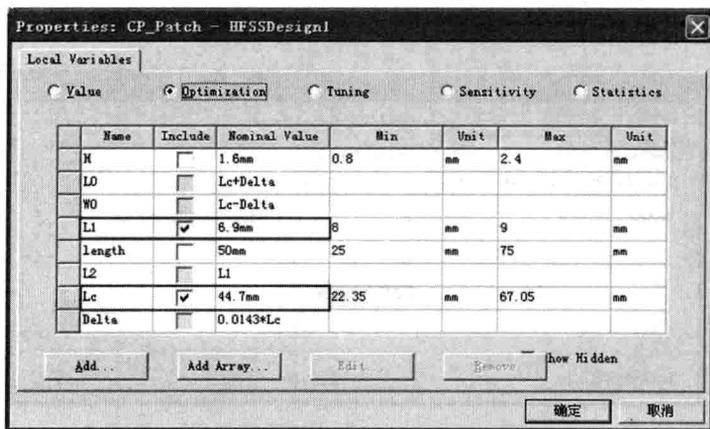


图 4.5.20 设置 L1 和 Lc 为优化变量

(2) 添加优化设计

右键单击工程树下的 Optimetrics 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Optimization】命令，打开 Setup Optimization 对话框。在该对话框的 Goals 选项卡中，优化算法 (Optimizer 选项) 选择拟牛顿法 (Quasi Newton)，最大优化迭代次数 (Max No. of Iterations 选项) 设为 30，优化阈值 (Acceptable 选项) 设为 0，Noise 选项设为 0.1。然后单击 **Setup Calculations** 按钮，打开 Add/Edit Calculation 对话框，设置优化目标函数。

在 Add/Edit Calculation 对话框中，从左侧的 Solution 下拉列表中选择 Setup1: LastAdaptive 选项，在右侧的 Category 列表框中选择 S Parameter 选项，在 Quantity 列表框中选择 S(1,1) 选项，在 Function 列表框中选择 dB 选项。然后单击 **Add Calculation** 按钮，添加 $\text{dB}(S(1,1))$ 为目标函数。设置的过程如图 4.5.21 所示。

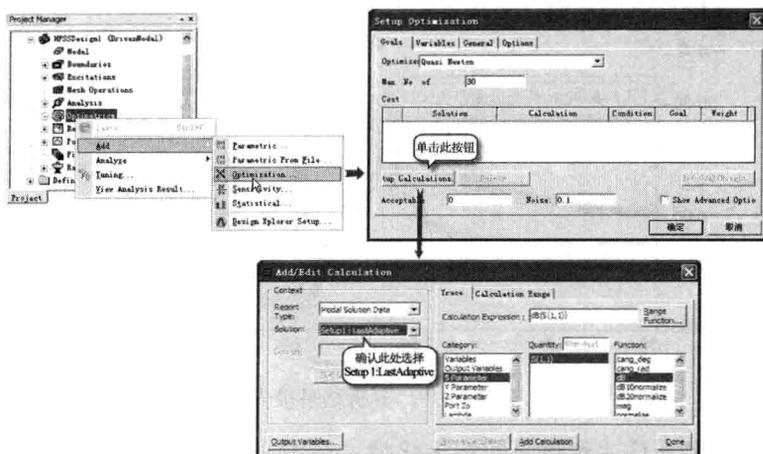


图 4.5.21 优化设置

在 Add/Edit Calculation 对话框中, 从左侧的 Report Type 下拉列表中选择 Far Fields 选项, 在 Solution 下拉列表中选择 Setup1: LastAdaptive 选项, 在 Geometry 下拉列表中选择 EH Plane 选项, 在右侧的 Category 列表框中选择 Axial Ratio 选项, 在 Quantity 列表框中选择 AxialRatioValue 选项, 在 Function 列表框中选择 dB 选项, 如图 4.5.22 所示。然后选择 Calculation Range 选项卡, 设置 Theta 和 Phi 的值为 0deg, 如图 4.5.23 所示。再单击 **Add Calculation** 按钮, 添加 dB(AxialRatioValue) 为目标函数。

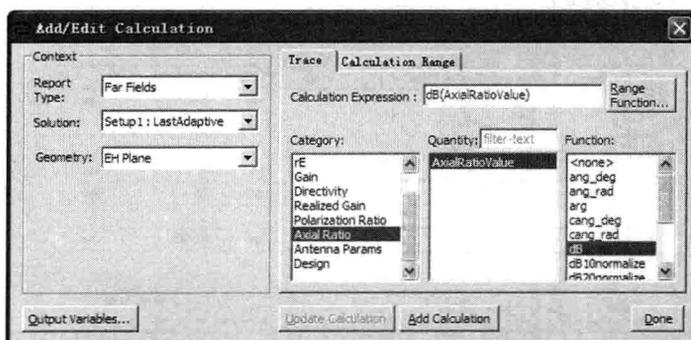


图 4.5.22 设置优化目标函数 1

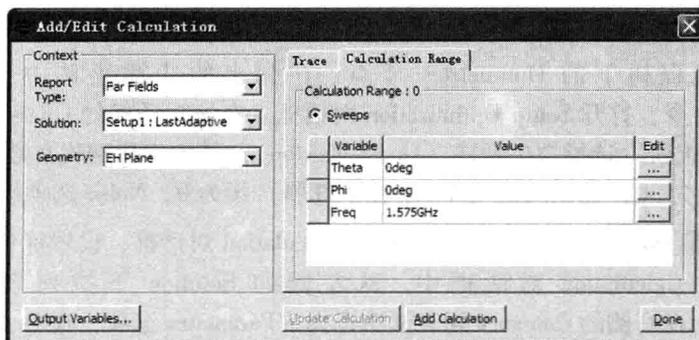


图 4.5.23 设置优化目标函数 2

最后单击 **Done** 按钮，关闭 Add/Edit Calculation 对话框，返回到 Setup Optimization 对话框。

此时，在 Setup Optimization 对话框的 Cost 列表框中会列出新添加的优化目标函数 dB(S(1,1)) 和 dB(AxialRatioValue)。单击目标函数 dB(S(1,1)) 对应的 Condition 栏，在弹出的列表中选择 “<=”，在 Goal 栏中输入 -20，在 Weight 栏中输入 5。单击目标函数 dB(AxialRatioValue) 对应的 Condition 栏，在弹出的列表中选择 “<=”，在 Goal 栏中输入 1，在 Weight 栏中输入 10，如图 4.5.24 所示。此时即设置了优化目标为 $S_{11} \leq -20\text{dB}$ 且轴比小于等于 1dB。

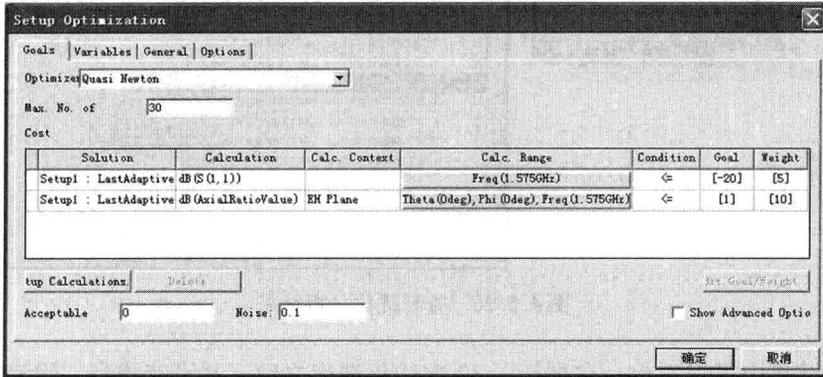


图 4.5.24 完成后的优化设置对话框

设置好了目标函数之后，再选择 Setup Optimization 对话框中的 Variables 选项卡。在该选项卡中，变量 L1 对应的 Starting Value 栏中输入 8.2mm，Min 和 Max 栏中分别输入 8mm 和 9mm，设置变量优化范围为 8mm~9mm，Min Step 和 Max Step 栏中分别输入 0.02mm 和 0.5mm；变量 Lc 对应的 Starting Value 栏中输入 44.2mm，Min 和 Max 栏中分别输入 44mm 和 45mm，设置变量优化范围为 44mm~45mm，Min Step 和 Max Step 栏中分别输入 0.02mm 和 0.5mm，如图 4.5.25 所示。最后单击 **确定** 按钮，完成优化设置。

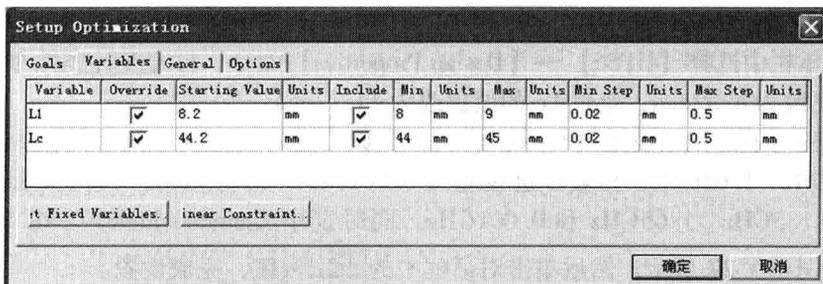


图 4.5.25 Variables 选项卡

完成后，优化设计项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认名称为 OptimizationSetup1。

(3) 运行优化设计查看优化结果

右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 OptimizationSetup1 选项，在弹出的快捷菜单中选择 **Analyze** 命令，运行优化设计。整个优化设计分析大概需要运行一个小时。

在优化分析过程中，右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 OptimizationSetup1 选项，在

弹出的快捷菜单中选择【View Analysis Result】命令，打开 Post Analysis Display 窗口。在该窗口中选中 Table 单选按钮，可以查看优化结果，如图 4.5.26 所示。

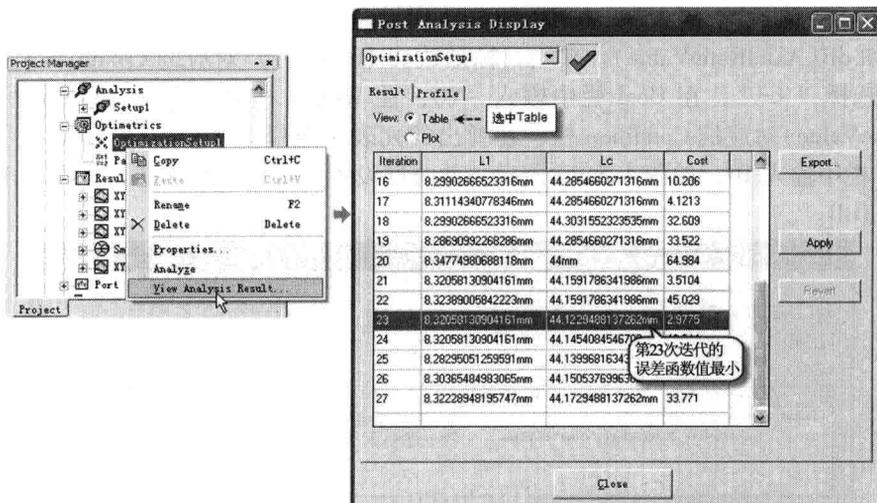


图 4.5.26 查看优化分析结果

从优化结果中可以看出，在进行了 30 次优化迭代之后，并没有找到一组满足优化目标要求（即 Cost = 0）的值。查看所有 30 次的优化分析结果，不难发现第 23 次优化迭代的误差函数值最小（Cost = 2.9775），此时变量 L1 = 8.32mm、Lc = 44.12mm。那么，我们可以取该组值为最终设计结果。

10. 查看优化后的天线性能

根据前面的优化结果可知，当变量 L1 = 8.32mm、Lc = 44.12mm 时，矩形微带天线的指标能满足我们的设计要求。接下来，我们将变量 L1 的值改为 8.32mm，变量 Lc 的值改为 44.12mm，并再次运行仿真分析，查看最终设计出的天线的各项性能参数，包括 S_{11} 扫频分析结果、 S_{11} 的 Smith 圆图结果和轴比以及圆极化增益方向图。

(1) 重新运行仿真分析

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框，将变量 L1 的值更改为 8.32mm，变量 Lc 的值更改为 44.12mm。

双击工程树下的扫频设置项 Sweep1，打开扫频设置对话框。在该对话框中将扫频范围设置为 1.5GHz ~ 1.65GHz，扫频步进设置为 0.001GHz，即将 Start、Stop 和 Step Size 选项分别修改为 1.5GHz、1.65GHz 和 0.001GHz，同时选中 Generate Fields (All Frequencies) 复选框，如图 4.5.27 所示。然后单击对话框中的 **OK** 按钮，完成设置。

最后，右键单击工程树 Analysis 节点下的 Setup1，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令，重新运行仿真分析，分析 L1 = 8.32mm、Lc = 44.12mm 时的天线性能。

(2) 查看 S_{11} 分析结果

分析完成后，双击工程树下 Results 节点下的 XY Plot 1，打开更新后的 S_{11} 扫频分析结果，如图 4.5.28 所示。从图 4.5.28 中可以看出，最后设计出的天线在中心频率上 S_{11} 的值为 -17.6dB， $S_{11} < -10$ dB 的带宽为 $(1.612 - 1.552) / 1.575 = 3.8\%$ 。

(3) 查看 S_{11} 的 Smith 圆图结果

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution

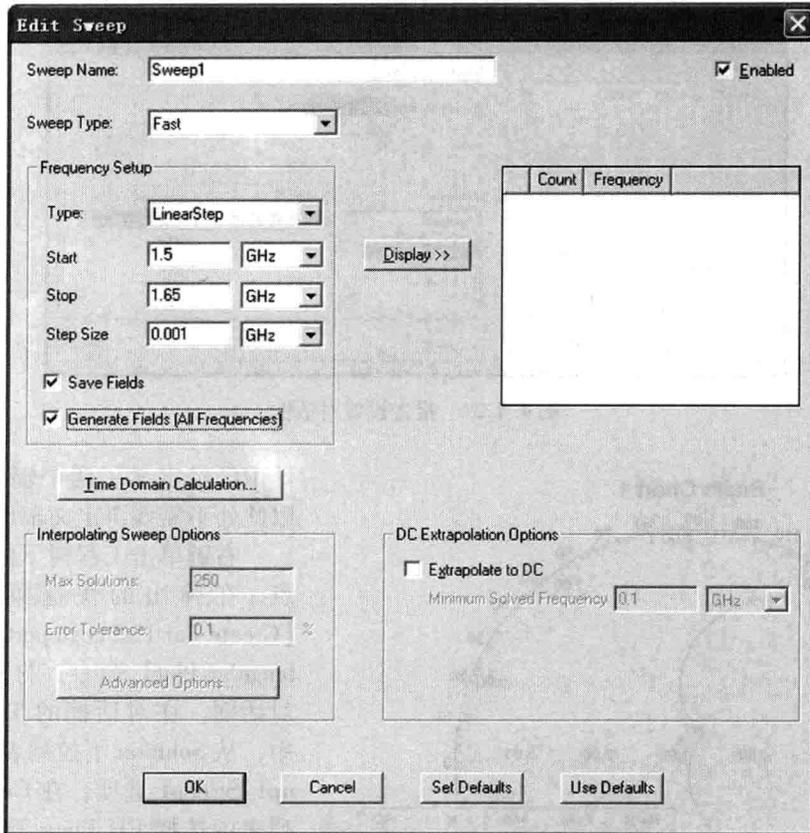
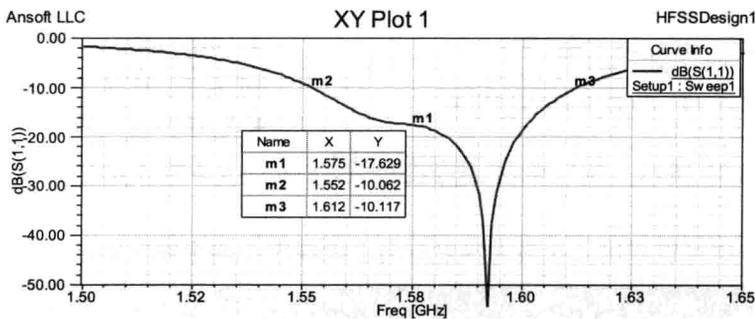


图 4.5.27 修改扫频设置

图 4.5.28 S_{11} 扫频分析结果

【Data Report】→【Smith Chart】命令，打开报告设置对话框。该对话框中的选项采用默认设置，如图 4.5.29 所示，直接单击 **New Report** 按钮，生成 S_{11} 的 Smith 圆图结果，如图 4.5.30 所示。

从结果报告中可以看出，1.575GHz 时天线的归一化输入阻抗为 $(0.87 - j0.21)\Omega$ 。

(4) 查看轴比随频率的变化关系

查看最大辐射方向 ($\varphi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$) 上轴比随频率的变化关系。因为轴比属于远区场参数，所以查看轴比前必须定义辐射表面。当前设计是直接使用前一节中的设计文件，设

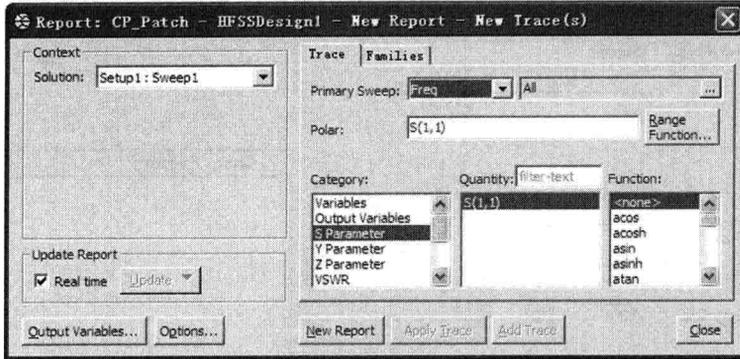
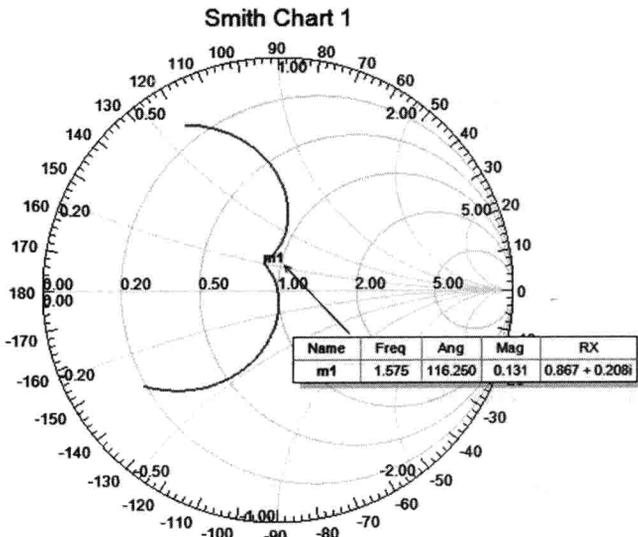


图 4.5.29 报告设置对话框

图 4.5.30 S_{11} 的 Smith 圆图结果

计中已经定义了两个辐射表面，所以此处不需要再定义辐射表面了。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。在对话框的 Trace 选项卡中，从 Solution 下拉列表中选择 Setup1:Sweep1 选项，在 Geometry 下拉列表中选择 EH Plane 选项，在 Primary Sweep 下拉列表中选择 Freq 选项，在 Category 列表框中选择 Axial Ratio 选项，在 Quantity 列表框中 AxialRatioValue 选项，在 Function 列表框中选择 dB 选项，如图 4.5.31 所示。Families 选项卡的参数设置如图 4.5.32 所示。然后单击 **New Report** 按钮，生成轴比的扫频分析结果，如图 4.5.33 所示。

从结果报告中可以看出，在最大辐射方向上天线中心频率处的轴比为 0.627dB。

从结果报告中可以看出，在最大辐射方向上天线中心频率处的轴比为 0.627dB。

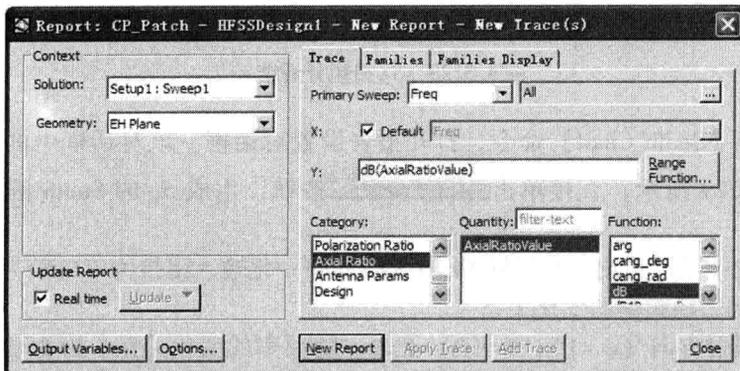


图 4.5.31 Trace 选项卡

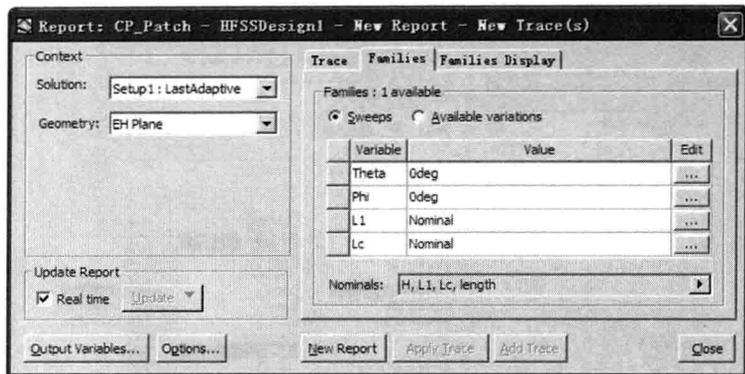


图 4.5.32 Families 选项卡

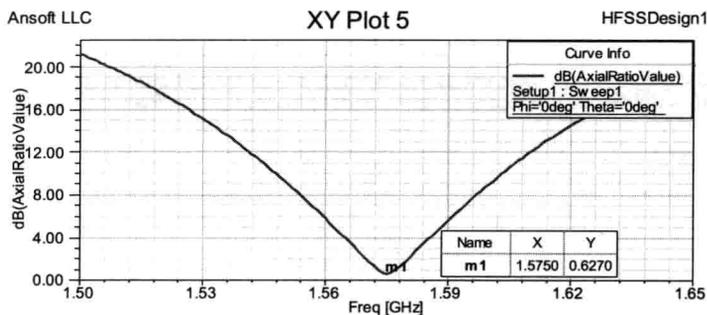


图 4.5.33 轴比扫频分析结果

(5) xz 面和 yz 面增益方向图

查看天线在 xz 面和 yz 面上的右旋圆极化波 (RHCP) 增益和天线总增益方向图。在球坐标系下, xz 面即 $\varphi = 0^\circ$ 的平面, yz 面即 $\varphi = 90^\circ$ 的平面。因为前面的设计中已经定义了 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 这两个辐射表面, 其名称为 EH Plane, 所以这里不需要重新定义辐射表面。

右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Rectangular Plot】命令, 打开报告设置对话框。在该对话框的 Trace 选项卡中, 在 Geometry 下拉列表中选择前面定义的辐射表面 EH Plane, 在 Category 列表框中选择 Gain 选项, 在 Quantity 列表框中同时选中 GainTotal 和 GainRHCP 选项, 在 Function 列表框中选择 dB 选项, 如图 4.5.34 所示。然后选择 Families 选项卡, Families 选项卡的参数设置如图 4.5.35 所示。最后单击 **New Report** 按钮, 生成直角坐标系下天线在 xz 面和 yz 面上的右旋圆极化波 (RHCP) 增益和天线总增益方向图, 如图 4.5.36 所示。

从结果报告中可以看出, θ 在 $-120^\circ \sim 120^\circ$ 范围内, 天线的总增益与右旋圆极化波增益近似相等, 这也表明了天线辐射的是右旋圆极化波。天线的最大辐射方向为 $\varphi = 0^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$, 最大增益为 1.4dB。

(6) 三维增益方向图

查看右旋圆极化波的三维增益方向图, 辐射表面使用上一节中定义的名称为 3D 的球面。

右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【3D Polar Plot】命令, 打开如图 4.5.37 所示的报告设置对话框。在 Geometry 下拉列表中选择前面定义的辐射面 3D, 在 Category 列表框中选择 Gain 选项, 在 Quantity 列表框

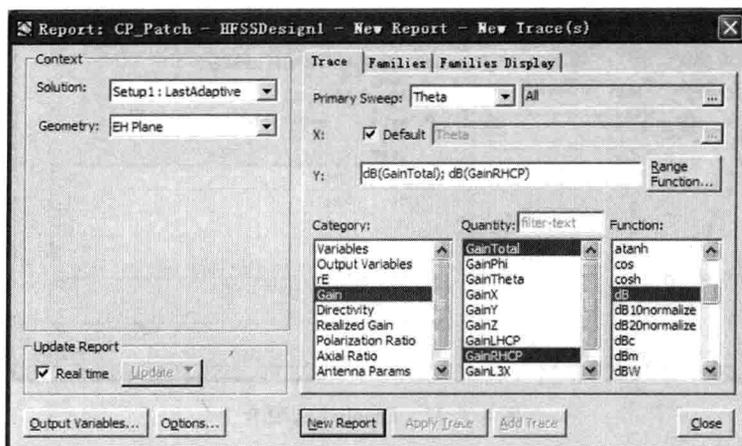


图 4.5.34 Trace 选项卡

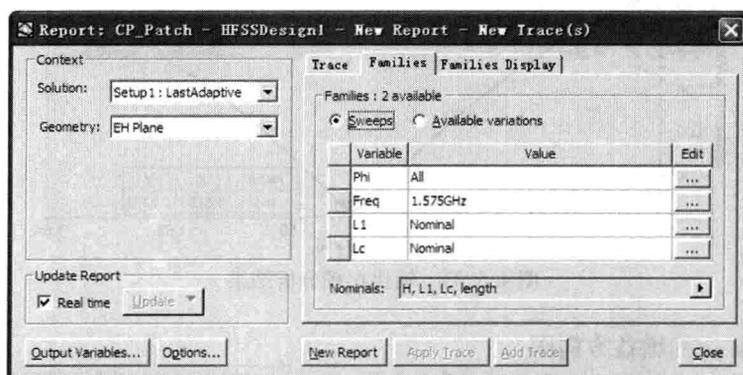


图 4.5.35 Families 选项卡

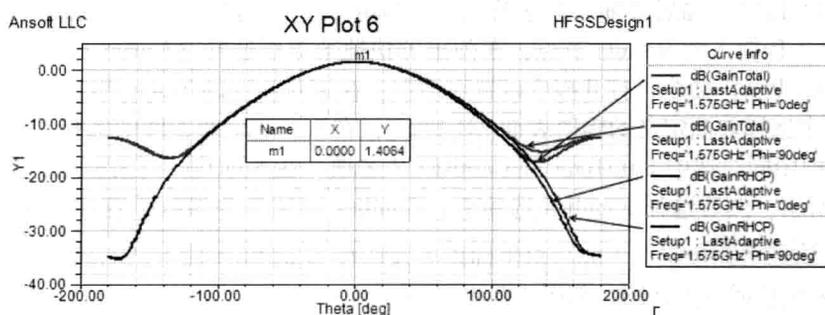


图 4.5.36 右旋圆极化增益和总增益方向图

中选择 GainRHCP 选项，在 Function 列表框中选择 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮，生成如图 4.5.38 所示的右旋圆极化波三维增益方向图。

11. 保存设计

至此，我们完成了右旋圆极化微带天线的设计分析。最后单击工具栏上的  按钮保存设计，再选择主菜单栏中的【File】→【Exit】命令，退出 HFSS。

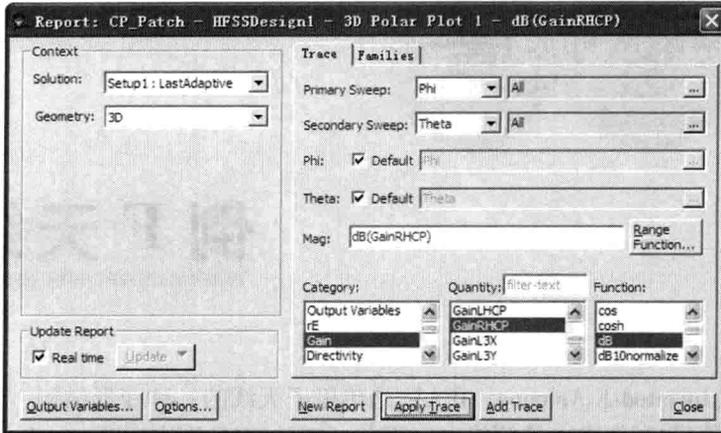


图 4.5.37 Trace 选项卡

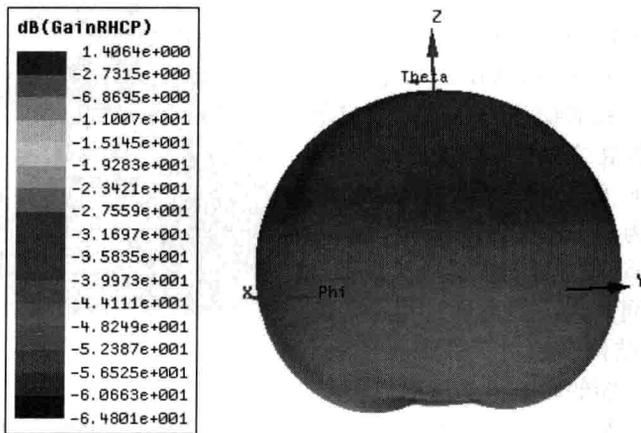


图 4.5.38 右旋圆极化波三维增益方向图

4.6 本章小结

本章以矩形微带天线分析设计为主线，循序渐进地讲解了微带天线的理论基础、工作原理以及 HFSS 设计分析过程，并同时讲解了微带天线的双频工作实现原理和圆极化工作实现原理。其中，4.1 节介绍了微带天线的辐射机理、辐射场以及微带贴片尺寸的估算和输入阻抗的计算；4.2 节给出了一个采用微带线馈电的矩形微带天线的 HFSS 设计实例，并讲解了微带馈电线的阻抗匹配的实现；4.3 节讲解了使用 HFSS 分析设计同轴线馈电的矩形微带天线的全过程；4.4 节讲解了矩形微带天线实现双频工作的原理，并在 4.3 节设计的微带天线的基础上更改馈点的位置，实现微带天线的双频工作；4.5 节讲解了矩形微带天线实现圆极化工作的原理，并给出了使用 HFSS 分析设计和优化圆极化微带天线的全过程。

在本章中读者除了能学习到微带天线的基本理论和 HFSS 设计实践之外，还能学习到微带天线的双频工作实现原理和圆极化工作实现原理，同时还能学习到如何使用 HFSS 设计分析双频天线和圆极化天线。另外，在本章中我们还详细讲解了 HFSS 优化设计功能的具体使用。

第 5 章

倒 F 天线设计

倒 F 天线 (Inverted-F Antenna, IFA) 是单极子天线的一种变形结构, 具有体积小、结构简单、易于匹配和制作成本低等优点, 因此, 它被广泛应用于 Bluetooth、EE 802. a/b/g、IEHiperLAN 和 HomeRF 等短距离无线通信领域。另外, 因为倒 F 天线的辐射既包含水平极化分量又包含垂直极化分量, 所以对于应用环境主要为室内的 Bluetooth 和 WLAN 等通信标准, 由于室内墙壁和装饰物等的散射会造成电场水平极化和垂直极化之间的相互转换, 即退极化现象, 使用倒 F 天线可以有效地增强接收效果。图 5.1 所示为一个制作在 PCB 上, 应用于 Bluetooth 通信的印制倒 F 天线实物。

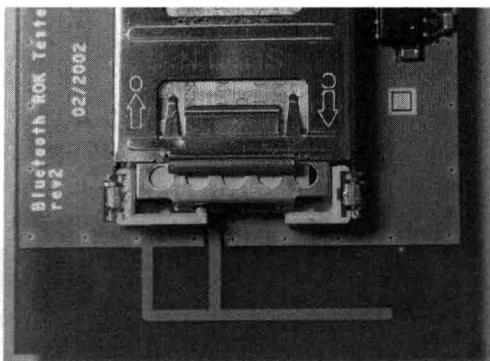


图 5.1 倒 F 天线实物

本章首先讲解倒 F 天线的发展过程, 并简要分析倒 F 天线的结构参数对天线谐振频率、输入阻抗和带宽等性能的影响, 然后通过一个设计实例来详细讲解使用 HFSS 分析设计一款印制倒 F 天线 (Printed Inverted-F Antenna) 的步骤。

5.1 倒 F 天线概述

倒 F 天线是单极子天线的一种变形结构, 其衍变发展可以看成是从 $1/4$ 波长单极子天线到倒 L 天线再到倒 F 天线的过程, 如图 5.1.1 所示。首先, 将单极子天线进行 90° 弯曲, 就能得到倒 L 天线, 其总长度仍然是约为 $1/4$ 个波长, 单极子天线做这一变形的目的是有效地减少天线的高度。然而对于倒 L 天线, 其上半部分平行于地面, 这样在减小高度的同时增加了天线的容性, 为了保持天线的谐振特性, 我们就需要增加天线的感性, 通常是在天线的拐角处增加一个倒 L 形贴片, 贴片的一端通过孔与地面相连, 这样就形成如图 5.1.1 (c) 所示的形状天线。由于其形状像一个面向地面的字母 F, 因此将此种类型的天线称为倒 F 天线。

5.1.1 倒 F 天线的结构参数分析

倒 F 天线的结构如图 5.1.2 所示, 由长为 L 的终端开路传输线和长为 S 的终端短路传输线并联而成。其中, 开路端到馈点可以等效成电阻和电容的并联 (相当于负载, 谐振时开路), 短路端到馈点可以等效成电阻和电感的串联 (谐振时短路)。当天线谐振时, 电流

主要分布在天线的水平部分和对地短路部分，而馈电支路基本无电流分布。

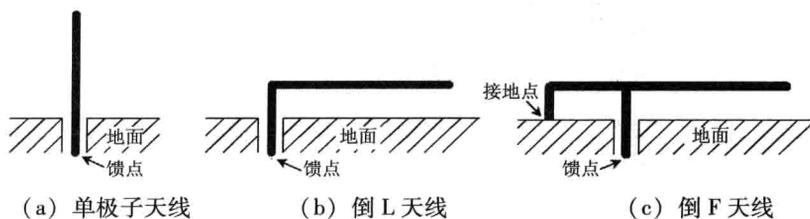


图 5.1.1 倒 F 天线的衍变过程

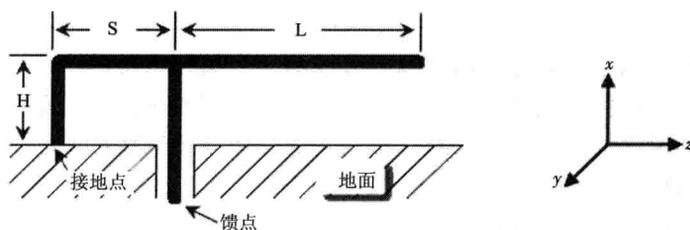


图 5.1.2 倒 F 天线结构

在进行倒 F 天线设计时，主要有 3 个结构参数决定着天线的输入阻抗、谐振频率和天线带宽等性能。这 3 个结构参数分别是天线的谐振长度 L 、天线的高度 H 以及两条竖直臂之间的距离 S 。

作为天线的谐振部分，天线水平支路长度 L 对天线的谐振频率和输入阻抗的影响最为直接。当长度 L 增加时，天线的谐振频率降低，输入阻抗减小，天线呈感性；反之，当长度 L 减小时，天线的谐振频率升高，输入阻抗变大，天线呈容性。通常， L 和 H 的长度之和约为 $1/4$ 个工作波长。而对于印制倒 F 天线，因为天线的辐射贴片是蚀刻在 PCB 介质层上的，所以 L 和 H 的长度之和一般介于 $1/4$ 个自由空间工作波长和 $1/4$ 个介质层导波波长之间。在设计过程中，通常可以由下面的经验公式给出其初始值，即：

$$L + H \approx \frac{\lambda_0}{4\sqrt{(1 + \epsilon_r)/2}} \quad (5-1-1)$$

其中， ϵ_r 是介质板材的介电常数， λ_0 是自由空间波长。

对于天线的高度参数 H 以及接地点和馈电点之间的距离参数 S ，其对天线性能的影响比较复杂，我们难以通过理论分析推导出比较直观的规律。通过仿真分析可以给出，在保持 L 、 H 和 S 这 3 个结构参数中任意两个结构参数不变的情况下，另一个结构参数变化对天线性能的影响。仿真分析结果表明，当 H 增加（减小）时，天线的谐振频率会随之降低（升高），输入阻抗的电阻分量会随之增加（减小），而电抗部分也会随之增加（减小），即电抗部分逐渐呈现电感（电容）性质，其中电抗的变化是由于天线的水平部分与地面之间距离增加（减小）后，所产生的分布电容减小（增加）所造成的。当 S 增加（减小）时，天线的谐振频率会随之升高（降低），输入阻抗的电阻分量会随之减小（增加），而电抗部分也会随之减小（增加），即电抗部分逐渐呈现电容（电感）性质，其中输入电阻的变化是由于电流分布不同而造成的。假设馈电点处输入电压幅度不变，因为接地短路点处的电流幅度最大，所以随着距离 S 的增加，接地点逐渐远离馈电点，馈电点处的输入电流幅度随之逐渐变小，从而使输入电阻变大，反之亦然。表 5.1.1 总结了倒 F 天线的结构参数 L 、 H 和 S 对天线的谐振频率和输入阻抗性能的影响。

表 5.1.1 结构参数对天线性能的影响

结构参数	变化趋势	谐振频率	输入电阻	输入电抗
L	增加	降低	减小	感性
	减小	升高	增加	容性
H	增加	降低	增加	感性
	减小	升高	减小	容性
S	增加	升高	减小	容性
	减小	降低	增加	感性

从前面的分析可知, 只要适当选取倒 F 天线的 3 个结构参数的大小, 即可使天线谐振在任意的频率上, 并且使天线的输入阻抗非常接近 50Ω 的纯电阻。也就是说, 倒 F 天线可以不需要使用任何额外的阻抗匹配电路, 就能实现与微波传输线的阻抗匹配, 这为天线设计提供了极大的自由。

5.1.2 倒 F 天线的辐射特性

倒 F 形天线不仅具有交叉极化特性, 而且具有等向辐射特性。当天线谐振时, 电流主要分布在天线的水平部分和对地短路部分, 馈电部分则基本无电流分布。当取如图 5.1.2 所示的坐标系时, 由水平部分电流所产生的相对电场强度为:

$$E_{\text{Horizontal}} = e_{\theta} \cos\varphi [\cos\theta + j e^{j\frac{\pi}{2}\cos\theta}] \quad (5-1-2)$$

由对地短路部分电流所产生的相对电场强度为:

$$E_{\text{Vertical}} = -e_{\theta} \cos\theta \cos\varphi + e_{\varphi} \sin\varphi \quad (5-1-3)$$

故总的电场强度为:

$$\begin{aligned} E_{\text{total}} &= E_{\text{Horizontal}} + E_{\text{Vertical}} \\ &= e_{\theta} \cos\varphi \cdot \left[-\sin\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right) + j\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right) \right] + e_{\varphi} \sin\varphi \end{aligned} \quad (5-1-4)$$

因此天线辐射的功率流密度为:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{E_{\text{total}} E_{\text{total}}^*}{2\eta_0} \\ &= \frac{1}{2\eta_0} \left\{ \cos^2\varphi \left[\cos^2\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right) + \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right) \right] + \sin^2\varphi \right\} \\ &= \frac{1}{2\eta_0} \end{aligned} \quad (5-1-5)$$

式中, $\eta_0 = 120\pi$ 表示真空的特性阻抗。

由式 (5-1-5) 可见, 功率流密度与方向 θ 、 φ 无关, 因此天线在各个方向上辐射的功率密度都相同, 具有等向辐射特性。由式 (5-1-4) 可知, 电场的极化方向既包含 θ 方向的分量, 也包含 φ 方向的分量, 因此, 倒 F 天线在空间辐射的电场方式具有交叉极化的特点。

5.2 倒 F 天线的设计和分折

在上一节中简要介绍了倒 F 天线的衍变过程, 分析了倒 F 天线的结构参数对天线谐振频率和输入阻抗的影响以及倒 F 天线的辐射特性。这一节将重点讲述印制倒 F 天线的 HFSS

设计过程,并讨论倒F天线的谐振长度 L 、高度 H 以及两条竖直臂之间的距离 S 对天线性能的实际影响。

5.2.1 倒F天线的模型结构

本节设计的倒F天线制作在PCB上,工作于2.4GHz ISM频段,其中心工作频率为2.45GHz,并要求10dB带宽大于100MHz。

所设计的倒F天线结构模型如图5.2.1所示,整个天线结构大致可以分为3个部分,分别是倒F形状天线、介质层和接地板。介质层的材质使用的是PCB中最常用的玻璃纤维环氧树脂(FR4),其相对介电常数 $\epsilon_r = 4.4$,损耗正切 $\tan\delta = 0.02$ 。介质层的厚度为0.8mm,长度和宽度分别为110mm和50mm。接地板位于介质层的下表面,其长度和宽度分别为90mm和50mm。倒F形状天线位于介质层的上表面,其谐振长度 L 为16.2mm,天线高度 H 为3.8mm,接地点和馈电点的距离 S 为5mm,微带线的宽度为1mm。天线的接地点通过过孔与接地板连接,在实际建模时,我们对接地的过孔做了简化处理,用一个矩形理想导体平面来代替。

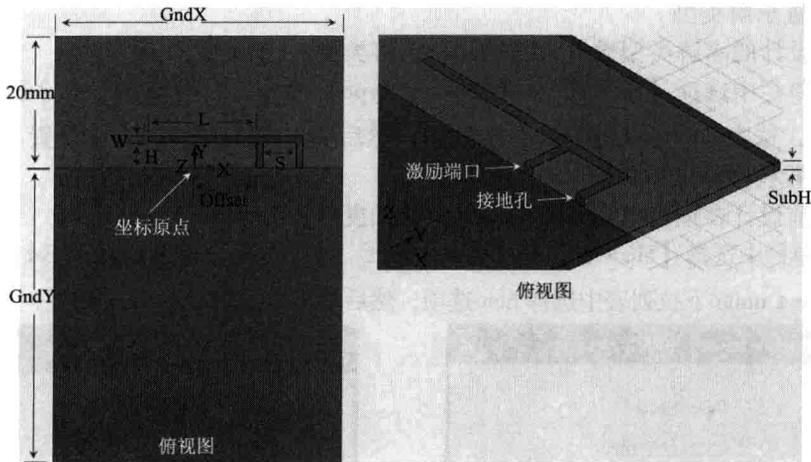


图 5.2.1 印制倒F天线的HFSS模型

为了便于更改模型的大小以及后续的参数化分析,即分析天线的结构参数对天线性能的影响,在HFSS设计建模时,我们需要定义一系列的变量来表示天线的结构。其中,天线的谐振长度用变量 L 表示,天线高度用变量 H 表示,馈电点和接地点之间的距离用变量 S 表示,天线微带贴片的宽度用变量 W 表示,接地板的长度和宽度分别用变量 $GndY$ 和 $GndX$ 表示,介质层的厚度用变量 $SubH$ 表示,在图5.2.1中也标示出了各个变量所表示的含义。表5.2.1所示为当前设计中所定义的所有变量名称、变量所代表的结构参数以及变量的初始值。

表 5.2.1 变量定义

变量意义	变量名	变量初始值
天线的谐振长度	L	16.2mm
天线的高度	H	3.8mm
天线馈电点和接地点间的距离	S	5mm
天线的微带线宽度	W	1mm

续表

变量意义	变量名	变量初始值
介质层的厚度	SubH	0.8mm
接地板的长度	GndY	90mm
接地板的宽度	GndX	50mm
馈电点到坐标原点的横向距离	Offset	12mm
自由空间波长	Lambda	122.4mm

5.2.2 HFSS 仿真设计过程

1. 新建设计工程

(1) 运行 HFSS 并新建工程

双击桌面上的 HFSS 快捷方式图标，启动 HFSS 软件。HFSS 运行后，它会自动新建一个工程文件，选择主菜单栏中的【File】→【Save As】命令，把工程文件另存为 IFA.hfss 文件。

(2) 设置求解类型

将当前设计的求解类型设置为终端驱动求解类型。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Solution Type】命令，打开如图 5.2.2 所示的 Solution Type 对话框，选中 Driven Terminal 单选按钮，然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

(3) 设置模型长度单位

设置当前设计在创建模型时所使用的默认长度单位为 mm。

从主菜单栏中选择【Modeler】→【Units】命令，打开如图 5.2.3 所示的 Set Model Units 对话框。在 Select units 下拉列表中选择 mm 选项，然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

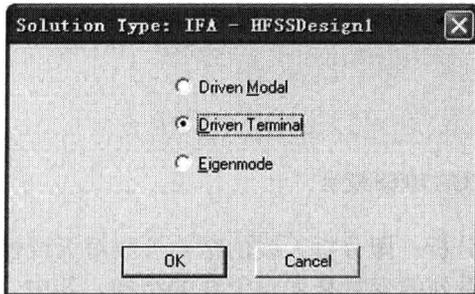


图 5.2.2 设置求解类型

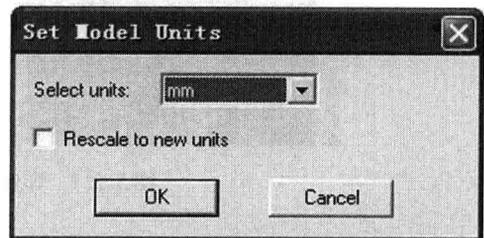


图 5.2.3 设置长度单位

2. 添加和定义设计变量

在 HFSS 中定义和添加如表 5.2.1 所示的设计变量。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框。在该对话框中单击 **Add...** 按钮，打开 Add Property 对话框。在 Name 文本框中输入第一个变量名称 L ，在 Value 文本框中输入该变量的初始值 16.2mm，然后单击 **OK** 按钮，即可添加变量 L 到设计属性对话框中。变量定义和添加的过程如图 5.2.4 所示。

使用相同的操作步骤方法，分别定义变量 H 、 S 、 W 、 $SubH$ 、 $GndX$ 、 $GndY$ 、 $Offset$ 和 $Lambda$ ，其初始值分别为 3.8mm、5 mm、1 mm、0.8 mm、50 mm、90 mm、12 mm 和 122.4mm。定义完成后，确认设计属性对话框如图 5.2.5 所示。

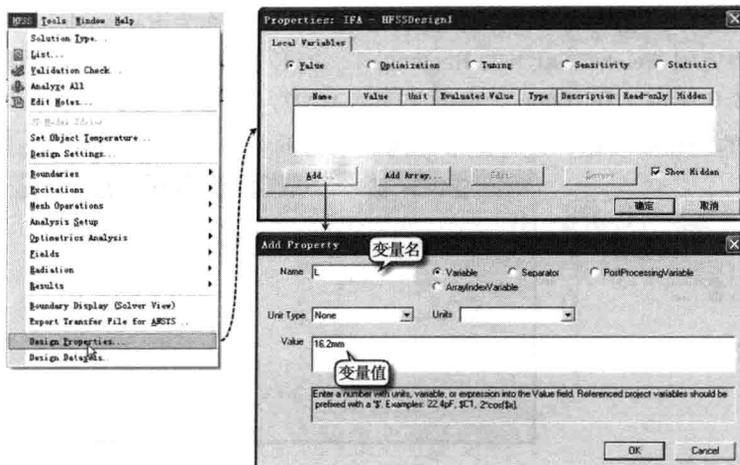


图 5.2.4 定义变量

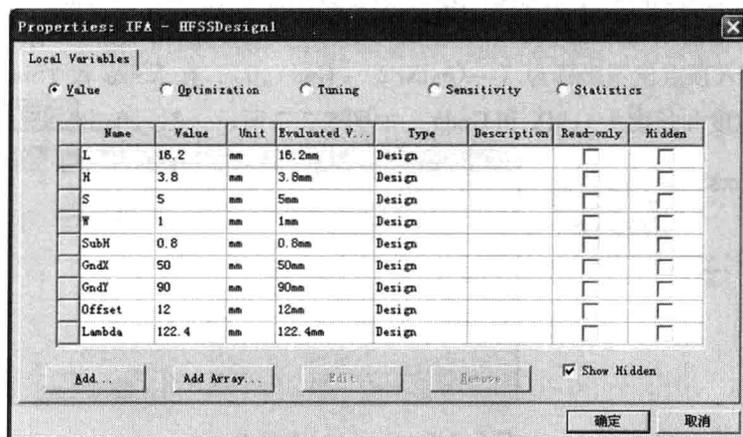


图 5.2.5 完成所有设计变量定义后的设计属性对话框

最后单击设计属性对话框中的 **确定** 按钮，完成所有变量的定义和添加工作，退出设计属性对话框。

3. IFA 天线设计建模

设置系统的坐标原点位于接地板顶端的中心位置，如图 5.2.1 所示。接地板和天线辐射体都设置为不考虑厚度的理想薄导体。首先在 xoy 平面上创建长度和宽度分别为变量 GndY 和 GndX 的接地板，并设置其边界条件为理想导体边界，用以模拟理想导体特性。然后在接地板的正上方创建材质为 FR4，厚度为 SubH 的介质层。最后在介质层的上表面（即 z 等于变量 SubH 的平面）创建倒 F 天线。

(1) 创建接地板

在 xoy 平面上创建一个矩形面，其一个顶点坐标为 $(-GndX/2, -GndY, 0)$ ，长度和宽度分别用变量 GndY 和 GndX 表示。矩形面模型建好后，设置其边界条件为理想导体边界。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的

矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1, 打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡, 如图 5.2.6 所示。在 Name 文本框中输入 GND, 把矩形面的名称修改为 GND, 单击 Color 选项对应的 **Edit** 按钮, 设置矩形面的颜色为铜黄色, 然后单击 **确定** 按钮退出。

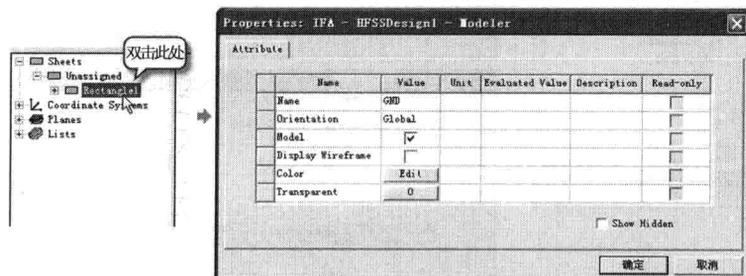


图 5.2.6 Attribute 选项卡

展开操作历史树 Sheets 下的 GND 节点, 双击该节点下的 CreateRectangle 选项, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡。在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 $(-GndX/2, -GndY, 0)$, 在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的宽度和长度为 GndX 和 GndY, 如图 5.2.7 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

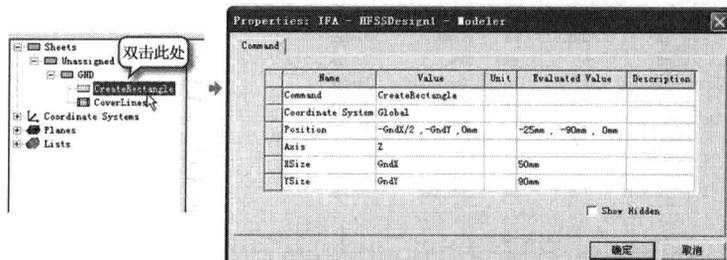


图 5.2.7 Command 选项卡

最后按快捷键 Ctrl + D 全屏显示创建的物体模型, 如图 5.2.8 所示。

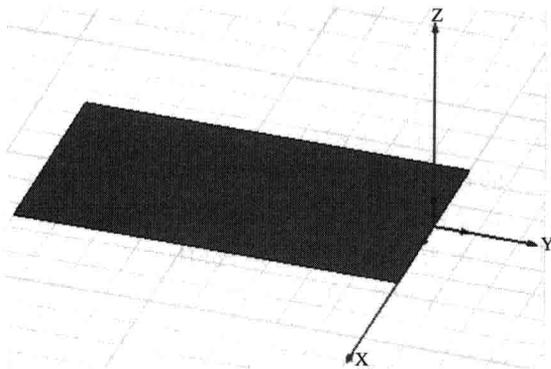


图 5.2.8 接地板 GND 模型

在三维模型窗口中选中参考地模型, 然后单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择 **【Assign Boundary】** → **【Perfect E】** 命令, 打开如图 5.2.9 所示的理想导体边界设置对话框。然后将对话框中的 Name 选项由默认的 PerE1 修改为 PerE_GND, 然后单击 **OK** 按钮

完成设置。此时，即可把矩形面 GND 的边界条件设置为理想导体边界，矩形面 GND 就相当于一块理想导体平面。同时，理想导体边界的名称 PerfE_GND 也会自动添加到工程树的 Boundaries 节点下。

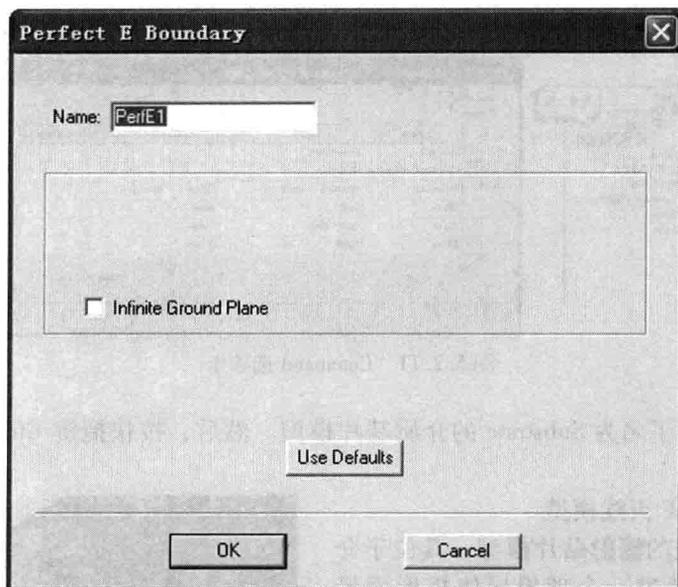


图 5.2.9 理想导体边界设置对话框

(2) 创建介质层

创建一个长方体模型用以表示介质层。模型位于接地板的正上方，即模型的底面位于 xoy 平面，模型的材质为 FR4，并将模型命名为 Substrate。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进入创建长方体的状态，然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1 选项，打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡，把长方体的名称修改为 Substrate；单击 Material 项对应的 Value 值，在弹出对话框中选择 FR4_epoxy，设置其材质为 FR4_epoxy，然后单击 Color 项对应的 **Edit** 按钮，设置其颜色为深绿色，再单击 Transparent 项，设置其透明度值为 0.6。设置好的属性对话框如图 5.2.10 所示。最后单击 **确定** 按钮退出。

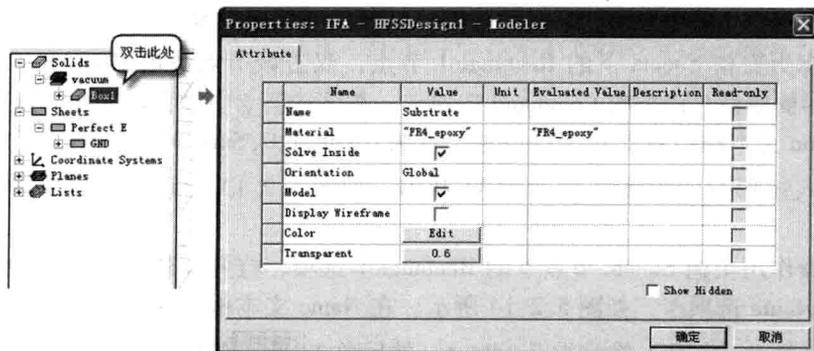


图 5.2.10 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Substrate 节点下的 CreateBox, 打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 $(-GndX/2, -GndY, 0)$, 在 XSize、YSize 和 ZSize 文本框中分别输入长方体的长、宽和高为 GndX、 $(GndY + 20mm)$ 和 SubH, 如图 5.2.11 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

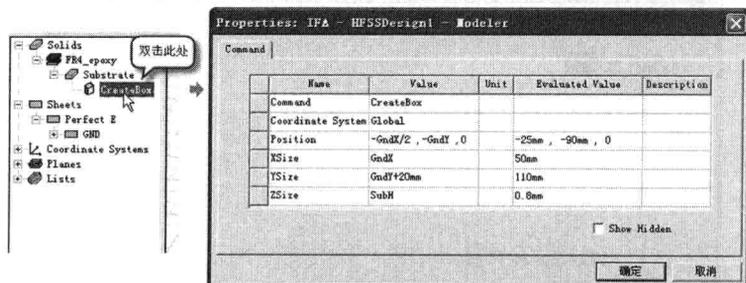


图 5.2.11 Command 选项卡

此时就创建好了名为 Substrate 的介质基片模型。然后, 按快捷键 $Ctrl + D$ 全屏显示创建的长方体模型。

(3) 创建倒 F 天线模型

创建倒 F 天线的辐射贴片模型, 其位于介质层的上表面, 通过一个理想导体矩形面接地, 天线辐射贴片的形状如图 5.2.12 所示。整个倒 F 天线的辐射贴片模型可以看做由如图 5.2.12 所示的 5 个矩形面组成, 其中矩形面 1、矩形面 2、矩形面 3 和矩形面 4 位于介质层的上表面, 矩形面 5 平行于 xoz 平面, 把天线和接地板连接起来。建模时, 我们可以首先分别创建如图 5.2.12 所示的 5 个矩形面, 然后通过合并操作, 将所有的矩形面合并成一个完整的模型。

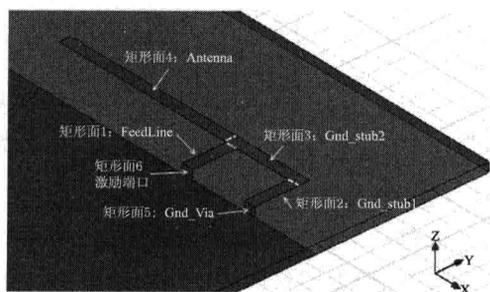


图 5.2.12 倒 F 天线的辐射贴片模型

① 创建矩形面 1。

在介质层的上表面创建如图 5.2.12 所示的矩形面 1, 即天线的馈线部分, 并将其命名为 FeedLine, 其长宽分别用变量 H 和 W 表示。

从主菜单栏中选择 **【Draw】** → **【Rectangle】** 命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建矩形面的状态, 然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle1。

展开操作历史树 Sheets 下的 Rectangle1 节点, 双击该节点下的 CreateRectangle 选项, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(Offset, 0, SubH)$, 在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的宽度和长度为 W 和 H, 如图 5.2.13 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

再双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项, 打开新建矩形面 Rectangle1 属性对话框的 Attribute 选项卡, 如图 5.2.14 所示。在 Name 文本框中输入 FeedLine, 将矩形面的名称由默认的 Rectangle1 修改为 FeedLine, 然后单击 **确定** 按钮退出。此时, 操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 也随之更改为 FeedLine。

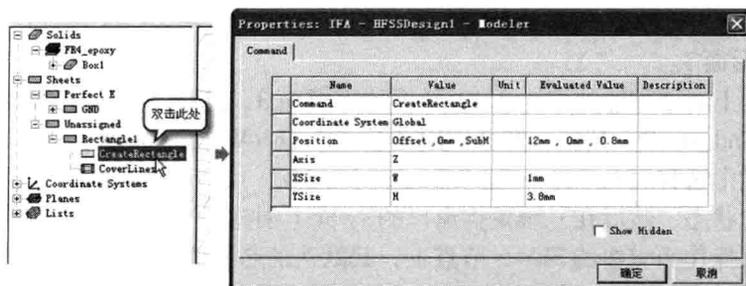


图 5.2.13 Command 选项卡

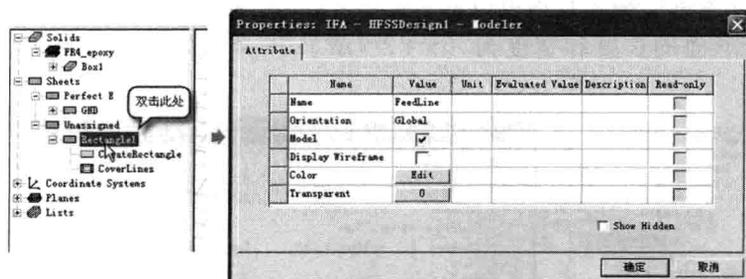


图 5.2.14 Attribute 选项卡

② 创建矩形面 2。

在介质层的上表面创建如图 5.2.12 所示的矩形面 2，即倒 F 天线短路线的折线部分，并将其命名为 Gnd_stub1，其长度和宽度分别是变量 H 和 W。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称依然为 Rectangle1。

展开操作历史树 Sheets 下的 Rectangle1 节点，双击该节点下的 CreateRectangle 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 (Offset + W + S, 0, SubH)，在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的宽度和长度为 W 和 H，如图 5.2.15 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

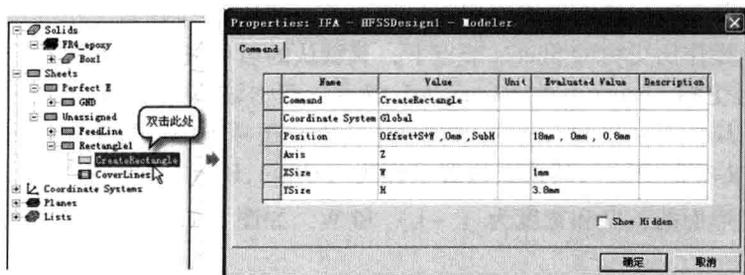


图 5.2.15 Command 选项卡

再双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项，打开新建矩形面 Rectangle1 属性对话框的 Attribute 选项卡。在 Name 文本框中输入 Gnd_stub1，将矩形面的名称由默认的 Rectangle1 修改为 Gnd_stub1，然后单击 **确定** 按钮退出。此时，操作历史树 Sheets 节点下

的 Rectangle1 也随之更改为 Gnd_stub1。

③ 创建矩形面 3。

在介质层的上表面创建如图 5.2.12 所示的矩形面 3, 即倒 F 天线短路线的平行部分, 并将其命名为 Gnd_stub2, 其长、宽分别用变量 $(S+2 \times W)$ 和 W 表示。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建矩形面的状态, 然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称依然为 Rectangle1。

展开操作历史树 Sheets 下的 Rectangle1 节点, 双击该节点下的 CreateRectangle 选项, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(\text{Offset}, H, \text{SubH})$, 在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的长度和宽度为 $(S+2 \times W)$ 和 W , 如图 5.2.16 所示。然后单击 **确定** 按钮退出。

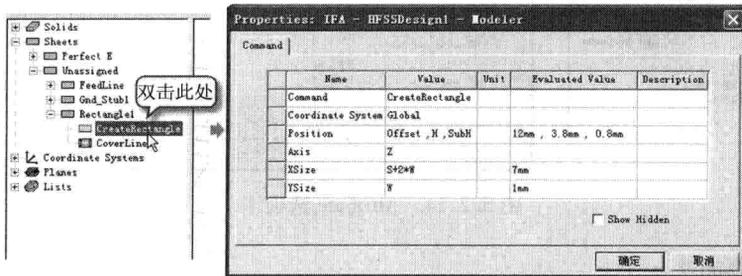


图 5.2.16 Command 选项卡

再双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项, 打开新建矩形面 Rectangle1 属性对话框的 Attribute 选项卡。在 Name 文本框中输入 Gnd_stub2, 将矩形面的名称由默认的 Rectangle1 修改为 Gnd_stub2, 然后单击 **确定** 按钮退出。此时, 操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 也随之更改为 Gnd_stub2。

④ 创建矩形面 4。

在介质层的上表面创建如图 5.2.12 所示的矩形面 4, 即天线的谐振部分, 并将其命名为 Antenna, 其长、宽分别用变量 L 和 W 表示。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建矩形面的状态, 然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称依然为 Rectangle1。

展开操作历史树 Sheets 下的 Rectangle1 节点, 双击该节点下的 CreateRectangle 选项, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(\text{Offset}, H, \text{SubH})$, 在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的长度和宽度为 $(-L)$ 和 W , 如图 5.2.17 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

再双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项, 打开新建矩形面 Rectangle1 属性对话框的 Attribute 选项卡。在 Name 文本框中输入 Antenna, 将矩形面的名称由默认的 Rectangle1 修改为 Antenna, 然后单击 **确定** 按钮退出。此时, 操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 也随之更改为 Antenna。

⑤ 创建矩形面 5。

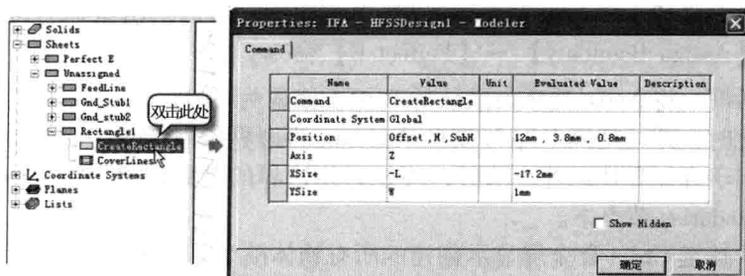


图 5.2.17 Command 选项卡 1

在矩形面 Gnd_Stub2 的底端创建一个平行于 xz 平面的矩形面，用以模拟天线的接地孔，将天线和接地板连接起来，如图 5.2.12 所示的矩形面 5。并将其命名为 Gnd_Via，其长、宽分别用变量 SubH 和 W 表示。

因为该矩形面平行于 xz 平面，所以首先需要把当前工作平面设置为 xz 面。单击工具栏上的 \overline{XY} 下拉列表框，从其下拉列表中选择 ZX 选项，把 xz 平面设置为当前工作平面。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏上的 \square 按钮，进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xz 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称依然为 Rectangle1。

展开操作历史树 Sheets 下的 Rectangle1 节点，双击该节点下的 CreateRectangle 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 (Offset + W + S, 0, SubH)，在 XSize 和 ZSize 文本框中分别输入矩形面的长度和宽度为 W 和 (-SubH)，如图 5.2.18 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

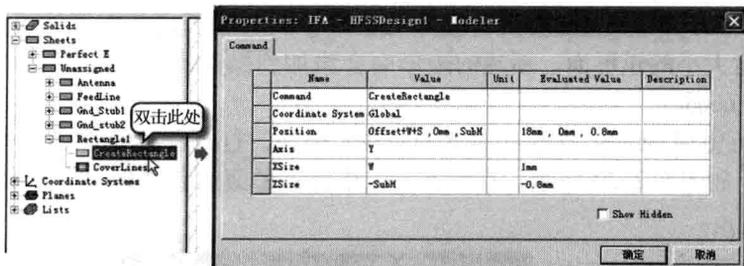


图 5.2.18 Command 选项卡 2

再双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项，打开新建矩形面 Rectangle1 属性对话框的 Attribute 选项卡。在 Name 文本框中输入 Gnd_Via，把矩形面的名称由默认的 Rectangle1 修改为 Gnd_Via，然后单击 **确定** 按钮退出。此时，操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 也随之更改为 Gnd_Via。

⑥ 合并操作生成完整倒 F 天线模型。

按住 Ctrl 键，先后依次单击操作历史树 Sheets 节点下的 Antenna、FeedLine、Gnd_stub1、Gnd_stub2 和 Gnd_Via，同时选中这 5 个矩形面。然后从主菜单栏中选择【Modeler】→【Boolean】→【Unite】命令，或者单击工具栏上的 \cup 按钮，执行合并操作。此时，即可把选中的 5 个矩形面合并成一个整体，合并生成的新物体的名称为 Antenna。

⑦ 设置倒 F 天线模型的边界条件。

选中操作历史树 Sheets 下的 Antenna 以选中该模型, 然后单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令, 打开与上图 5.2.9 相同的理想导体边界设置对话框, 将 Name 选项由默认的 PerfE1 修改为 PerfE_Antenna, 然后单击 **OK** 按钮完成设置。此时, 即可把倒 F 贴片模型 Antenna 的边界条件设置为理想导体边界, 倒 F 贴片模型就相当于理想导体贴片。同时, 理想导体边界的名称 PerfE_Antenna 也会自动添加到工程树的 Boundaries 节点下。

最后, 按快捷键 Ctrl + D 全屏显示创建的所有物体模型, 如图 5.2.19 所示。

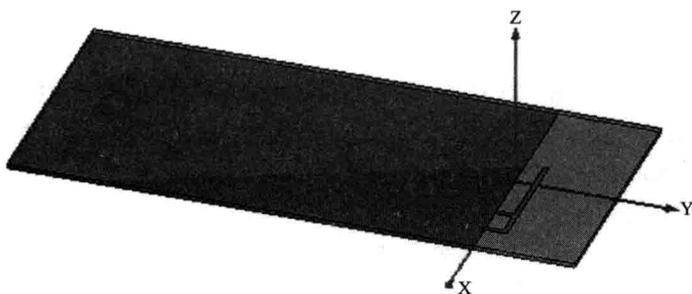


图 5.2.19 倒 F 天线模型

4. 设置激励端口

因为天线的输入端口位于模型内部, 所以需要使用集总端口激励。在天线的馈线 (即矩形面 FeedLine) 底端和地板之间创建一个平行于 xz 平面的矩形面, 将其作为天线的激励端口面, 如图 5.2.12 所示的矩形面 6, 然后设置该激励端口面的激励方式为集总端口激励。

确认当前工作平面设置在 xz 平面。然后, 从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建矩形面的状态, 并在三维模型窗口的 xz 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项, 打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡, 如图 5.2.20 所示。在该选项卡中将矩形面的名称修改为 Feed_Port, 然后单击 **确定** 按钮退出。

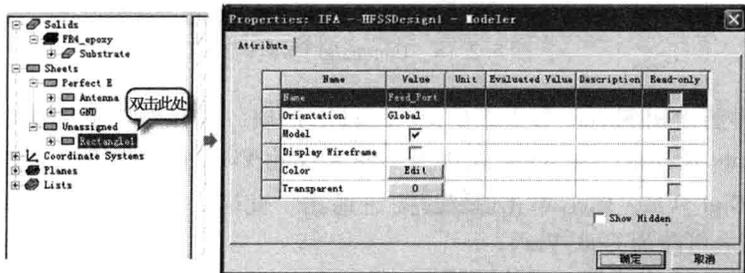


图 5.2.20 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Feed_Port 节点下的 CreateRectangle 选项, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入顶点位置坐标为 (Offset, 0, SubH), 在 XSize 和 ZSize 文本框中分别输入矩形面的长、

宽为 W 和 $-SubH$ ，如图 5.2.21 所示。然后单击 **确定** 按钮退出。

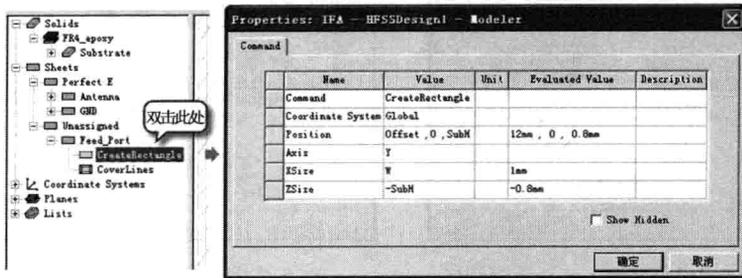


图 5.2.21 Command 选项卡

这样就在 xz 面上创建了一个与天线的馈线和接地板相接的矩形面 Feed_Port，该矩形的宽度与馈线的宽度一样。接下来，我们把该矩形面设置为集总端口激励。需要注意的是，在终端驱动求解类型下和在模式驱动求解类型下，集总端口激励的设置操作是不一样的。终端驱动求解类型下，集总端口激励的具体设置操作如下。

单击操作历史树 Sheets 节点下 Feed_Port，选中该矩形面，然后单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Excitation】→【Lumped Port】命令，打开如图 5.2.22 所示的终端驱动求解类型下集总端口设置对话框。在该对话框中，Port Name 选项用于设置端口激励名称，默认名称为 1，下面的 Conductor 选项是设置端口的参考地，设计中参考地是 GND，所以这里选中 GND 对应的复选框，其他选项保留默认设置不变，单击 **OK** 按钮，完成集总端口激励的设置。

完成后，设置的集总端口名称 1 会添加到工程树 Excitations 节点下，如图 5.2.23 所示。其中，1 是集总端口激励名称，Antenna_T1 是终端线名称。

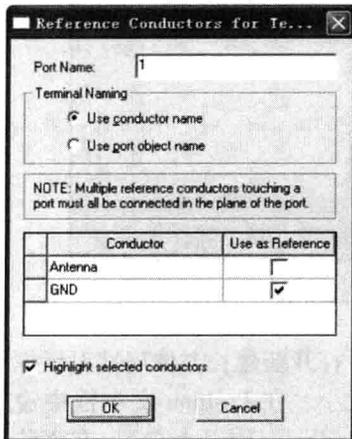


图 5.2.22 集总端口设置对话框

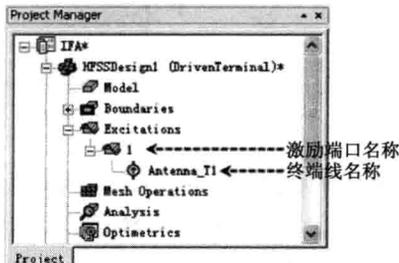


图 5.2.23 工程树下的激励名称

双击工程树 Excitations 节点下的端口激励名称 1，打开如图 5.2.24 所示的 Lumped Port 对话框，确认其端口阻抗为 50Ω 。再双击终端线名称 Antenna_T1，打开如图 5.2.25 所示的 Terminal 对话框，将终端线名称 Name 由默认的 Antenna_T1 修改为 T1，再确认其归一化阻抗也为 50Ω 。

5. 创建和设置辐射边界

使用 HFSS 分析天线问题时，必须设置辐射边界条件，且辐射表面和天线之间的距离

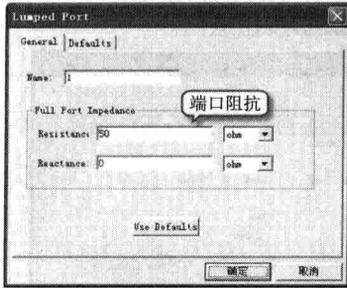


图 5.2.24 Lumped Port 对话框

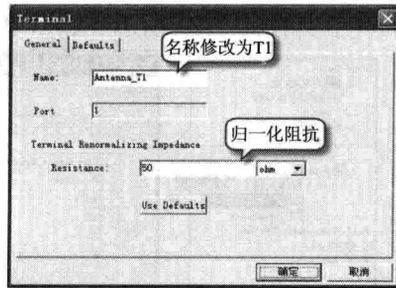


图 5.2.25 Terminal 对话框

需要不小于 $1/4$ 个工作波长。在本设计中, 设置一个长方体模型的表面为辐射表面, 辐射表面和倒 F 天线模型的距离为 $1/2$ 个工作波长。在设计中, 首先创建一个长方体模型 Air-Box, 该长方体模型的各个表面和介质层 Substrate 表面之间的距离都为 $1/2$ 个工作波长, 然后把该长方体模型的全部表面都设置为辐射边界条件。

首先, 单击工具栏上的 ZX 下拉列表框, 从其下拉列表中选择 XY 选项, 设置当前工作平面为 xy 平面。然后从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建长方体的状态, 并在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1, 打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡, 将长方体的名称修改为 AirBox, 设置其透明度为 0.8, 如图 5.2.26 所示, 然后单击  按钮退出。

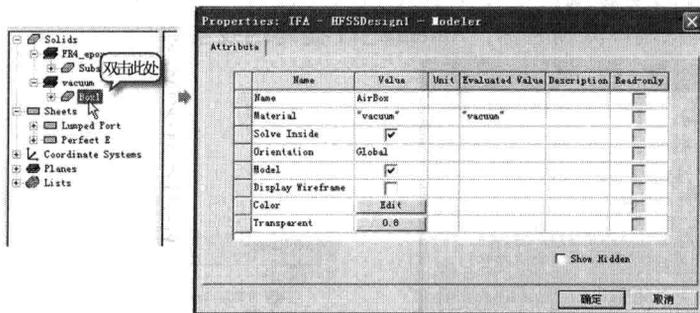


图 5.2.26 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 AirBox 节点下的 CreateBox, 打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(- \text{Lambda}/2 - \text{GndX}/2, - \text{Lambda}/2 - \text{GndY}, - \text{Lambda}/2)$, 在 XSize、YSize 和 ZSize 文本框中分别输入长方体的长度、宽度和高度为 $\text{Lambda} + \text{GndX}$ 、 $\text{Lambda} + \text{GndY} + 20\text{mm}$ 和 $\text{Lambda} + \text{SubH}$, 如图 5.2.27 所示, 然后单击  按钮退出。

长方体模型 AirBox 创建好了之后, 右键单击操作历史树 Solids 节点下 AirBox, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Radiation】命令, 打开辐射边界条件设置对话框, 如图 5.2.28 所示。保留对话框中的默认设置不变, 直接单击  按钮, 即可把长方体模型 AirBox 的表面设置为辐射边界条件。设置完成后, 辐射边界条件的默认名称 Rad1 会自动添加到工程树的 Boundaries 节点下。

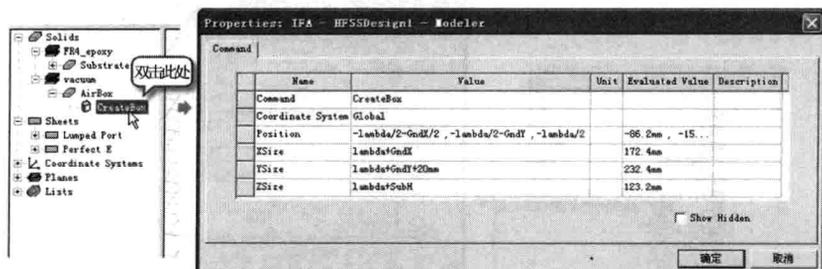


图 5.2.27 Command 选项卡

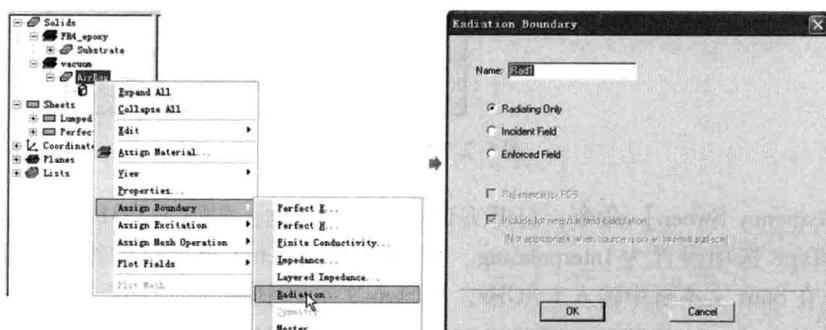


图 5.2.28 辐射边界条件设置对话框

最后，按快捷键 $\text{Ctrl} + \text{D}$ 全屏显示创建的所有物体模型，如图 5.2.29 所示。

6. 求解设置

所设计的印制倒 F 天线工作于 2.4GHz ISM 频段，其中心工作频率为 2.45GHz，所以求解频率可以设置为 2.45GHz。同时添加频率范围为 1.8GHz ~ 3.2GHz 的扫频设置，选择插值（Interpolating）扫频类型，分析天线在 1.8GHz ~ 3.2GHz 频段内的回波损耗和输入阻抗等性能。

(1) 求解频率和网格剖分设置

设置求解频率为 2.45GHz，自适应网格剖分的最大迭代次数为 20，收敛误差为 0.02。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add Solution Setup】命令，打开 Solution Setup 对话框。在该对话框的 Solution Frequency 文本框中输入求解频率 2.45GHz，在 Maximum Number of Passes 文本框中输入最大迭代次数 20，在 Maximum Delta S 文本框中输入收敛误差 0.02，其他选项保留默认设置，如图 5.2.30 所示。然后单击 **确定** 按钮，完成求解设置。

设置完成后，求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

(2) 扫频设置

扫频类型选择插值扫频，扫频频率范围为 1.8GHz ~ 3.2 GHz，频率步进为 0.05GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点，右键单击求解设置项 Setup1，在弹出的快捷菜单中选

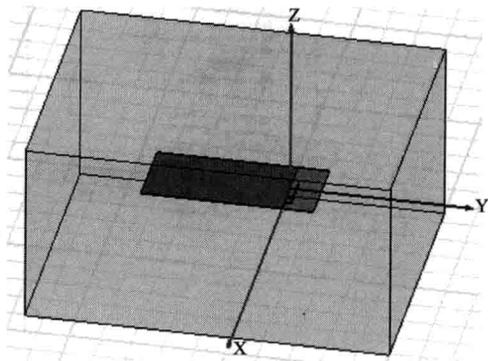


图 5.2.29 倒 F 天线模型

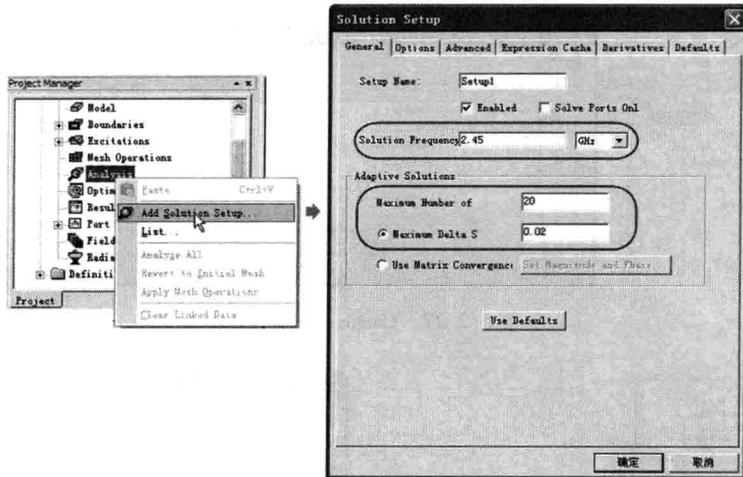


图 5.2.30 求解设置

择【Add Frequency Sweep】命令，打开 Edit Sweep 对话框，如图 5.2.31 所示。在该对话框中将 Sweep Type 选项设置为 Interpolating。在 Frequency Setup 选项组中将 Type 选项设置为 LinearStep，在 Start 文本框中输入 1.8GHz，在 Stop 文本框中输入 3.2GHz，在 Step Size 文本框中输入 0.05GHz，其他选项都保留默认设置。最后单击对话框中的 **OK** 按钮，完成设置。

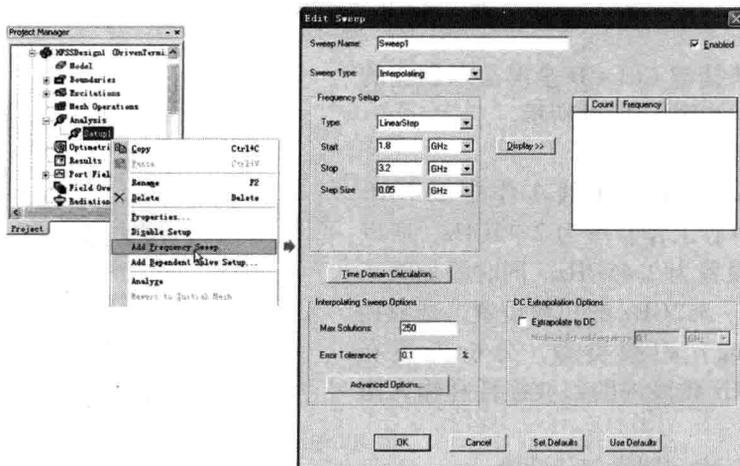


图 5.2.31 扫频设置

设置完成后，该扫频设置项的名称 Sweep1 会添加到工程树的求解设置项 Setup1 下。

7. 设计检查和运行仿真计算

通过前面的操作，我们已经完成了模型创建和求解设置等 HFSS 设计的前期工作，接下来就可以运行仿真计算并查看分析结果了。但在运行仿真计算之前，通常需要进行设计检查，确认设计的完整性和正确性。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进行设计检查。此时，会打出如图 5.2.32 所示的 Validation Check 对话框，该对话框中的每一个选项的前面都显示  图标，表示当前的 HFSS 设计正确且完整。单击 **Close** 按钮，关闭对话框，接下来开始运行仿真计算。

右键单击工程树下的 Analysis 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Analyze All】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 开始运行仿真计算。

在仿真计算过程中, 工作界面右下方的进度条窗口中会显示出求解进度, 信息管理窗口中也会有相应的信息说明, 并会在仿真计算完成后给出完成提示信息。

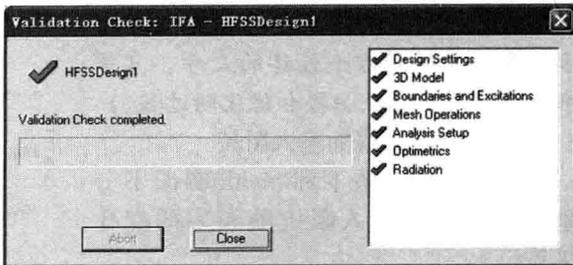


图 5.2.32 设计检查结果对话框

8. 查看天线性能参数

仿真分析完成后, 在数据后处理部分能够查看天线的各项性能参数。这里我们重点查看所设计的天线的谐振频率和输入阻抗。

(1) 查看天线谐振频率

通过查看天线的回波损耗 (即 S_{11} 参数), 即可看出天线的谐振频率。右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Terminal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令, 打开报告设置对话框, 如图 5.2.33 所示。在该对话框中确定左侧 Solution 选项选择的是 Setup1:Sweep1, 在 Category 列表框中选中 Terminal S Parameter 选项, 在 Quantity 列表框中选中 $S_{11}(T1, T1)$ 选项, 在 Function 列表框中选中 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮, 再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时, 即可生成如图 5.2.34 所示的天线在 1.8GHz ~ 3.2GHz 的回波损耗 S_{11} 分析结果。

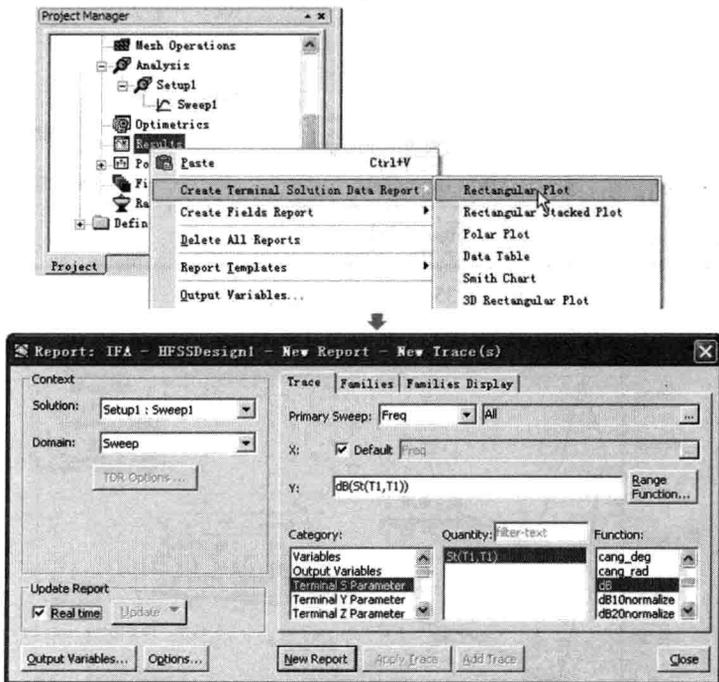


图 5.2.33 查看 S_{11} 分析结果的操作

从结果报告中可以看出, 天线谐振频率为 2.45GHz, 10dB 带宽约为 400MHz。在 2.45GHz 时, $S_{11} = -34.81\text{dB}$ 。(注: 读者可能会有疑问, 天线的尺寸是怎么确定的, 不需要调试就使谐振频率刚好落在 2.45GHz 上? 其实, 为了使天线谐振频率为 2.45GHz, 在设

计前我们已经做过多次的参数扫描分析和优化,才得到这个最终的尺寸,只是书中没有写出参数扫描和优化的过程。)

(2) 查看天线的输入阻抗

在直角坐标系下和 Smith 圆图下分别查看天线的输入阻抗随频率的变化关系。

右键单击工程树下的 Results 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Create Terminal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令,打开如图 5.2.35 所示的报告设置对话框。该对话框中左侧的 Solution 选项同样选择 Setup1:Sweep1,在 Category 列表框中选中 Terminal Z Parameter 选项,在 Quantity 列表框中选中 Zt(T1,T1) 选项,在 Function 列表框中同时选中 im 和 re 选项,表示同时查看输入阻抗的虚部(即电抗部分)和实部(即电阻部分)。然后单击 **New Report** 按钮,再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时,即可生成如图 5.2.36 所示的天线输入阻抗结果报告。

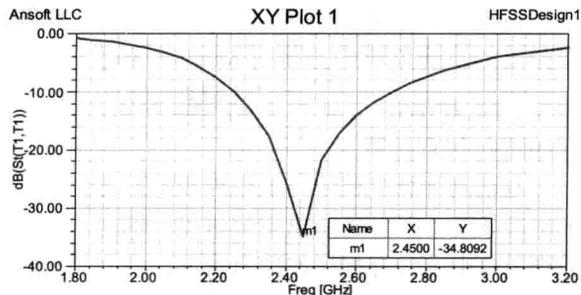


图 5.2.34 S_{11} 的扫频分析结果

右键单击工程树下的 Results 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Create Terminal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令,打开如图 5.2.35 所示的报告设置对话框。该对话框中左侧的 Solution 选项同样选择 Setup1:Sweep1,在 Category 列表框中选中 Terminal Z Parameter 选项,在 Quantity 列表框中选中 Zt(T1,T1) 选项,在 Function 列表框中同时选中 im 和 re 选项,表示同时查看输入阻抗的虚部(即电抗部分)和实部(即电阻部分)。然后单击 **New Report** 按钮,再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时,即可生成如图 5.2.36 所示的天线输入阻抗结果报告。

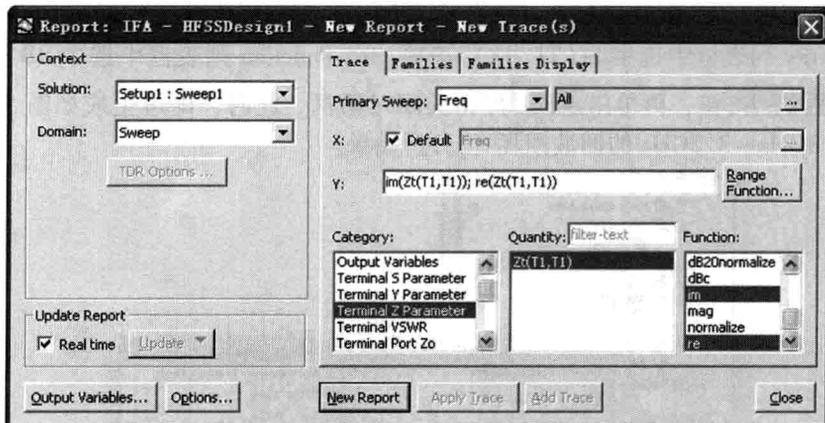


图 5.2.35 查看输入阻抗的设置

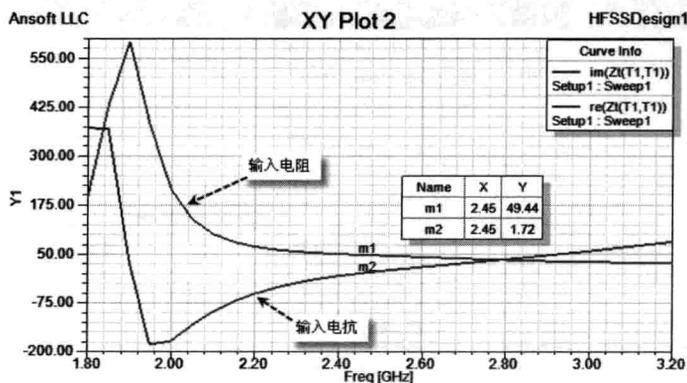


图 5.2.36 输入阻抗结果报告

从结果报告中可以看出,在 2.45GHz 中心频率上,天线的输入阻抗为 $(49.44 + j1.7) \Omega$,可见此时天线的输入阻抗已经和 50Ω 匹配良好。

再右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Terminal Solution Data Report】→【Smith Chart】命令，打开如图 5.2.37 所示的报告设置对话框。该对话框中左侧的 Solution 选项同样选择 Setup1:Sweep1，在 Category 列表框中选中 Terminal S Parameter 选项，在 Quantity 列表框中选中 St(T1,T1) 选项，在 Function 列表框中选择 < none > 选项。然后单击 **New Report** 按钮，再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时，给出如图 5.2.38 所示的 Smith 圆图显示的天线输入阻抗结果报告。从结果报告中同样可以看出，在 2.45GHz 中心频率上，天线的归一化输入阻抗为 $(0.99 + j0.03)\Omega$ 。

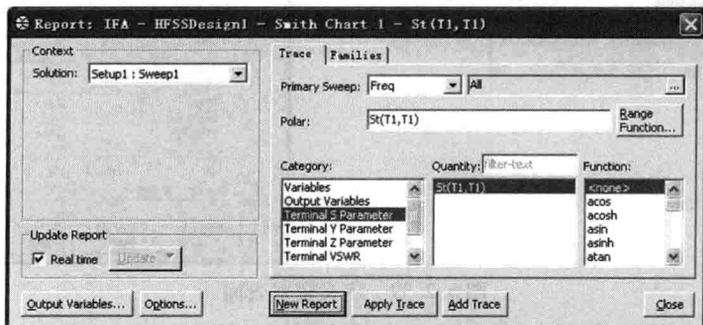


图 5.2.37 查看输入阻抗的设置

(3) 查看天线的方向图

这里只查看天线的三维增益方向图。天线方向图是在远场区确定的，当查看天线的远区场分析结果时，首先需要定义辐射表面。

① 定义辐射表面。

右键单击工程树下的 Radiation 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Insert Far Field Setup】→【Infinite Sphere】命令，打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框，定义辐射表面，如图 5.2.39 所示。辐射表面是基于球坐标系定义的，三维立体空间在球坐标系下就相当于 $0^\circ < \varphi < 360^\circ$ ， $0^\circ < \theta < 180^\circ$ 。在如图 5.2.39 所示的对话框中，Name 选项用于定义辐射表面的名称，这里输入 3D，在 Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、360deg 和 1deg，在 Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、180deg 和 1deg，然后单击 **确定** 按钮完成设置。此时，定义的辐射表面名称 3D 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

② 查看三维增益方向图。

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【3D Polar Plot】命令，打开报告设置对话框，如图 5.2.40 所示。将该对话框中的 Geometry 选项选择为前面定义的辐射表面 3D，在 Category 列表框中选择 Gain 选项，在 Quantity 列表框中选择 GainTotal 选项，在 Function 列表框中选择 dB 选项。然后单击 **New Report**

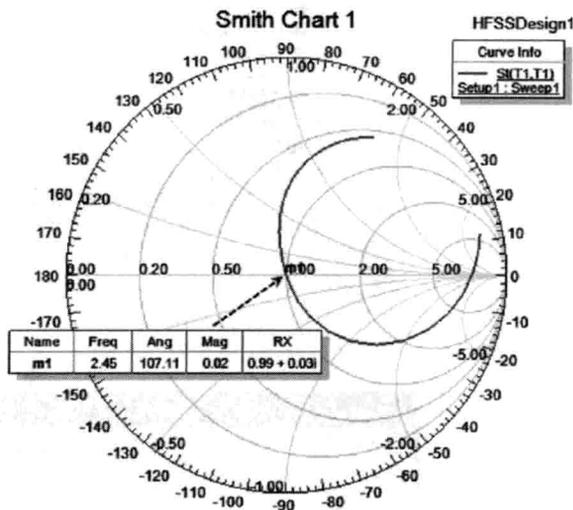


图 5.2.38 Smith 圆图显示的输入阻抗结果报告

按钮, 生成所设计的倒 F 天线的三维增益方向图, 如图 5.2.41 所示。

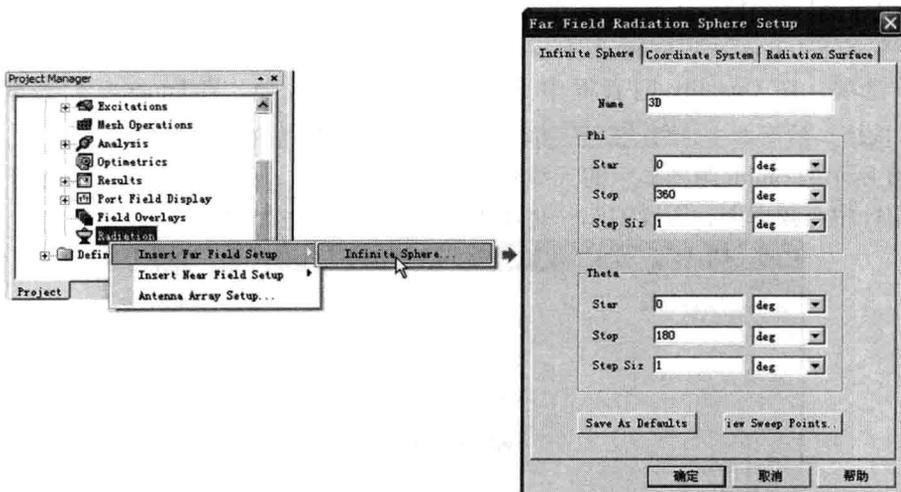


图 5.2.39 定义辐射表面

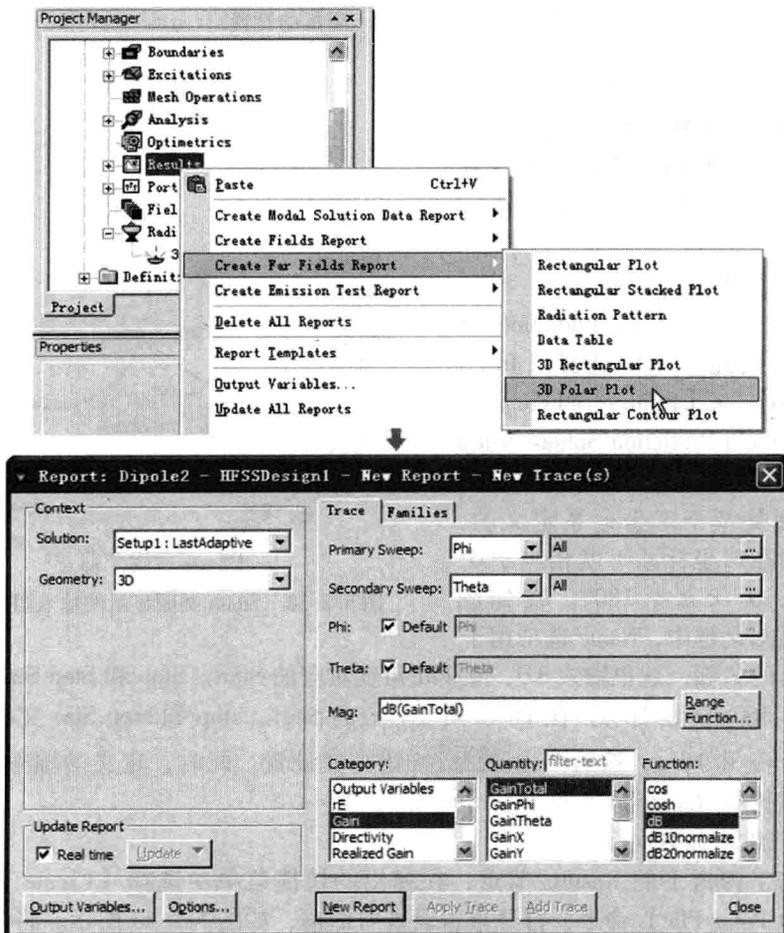


图 5.2.40 查看三维增益方向图

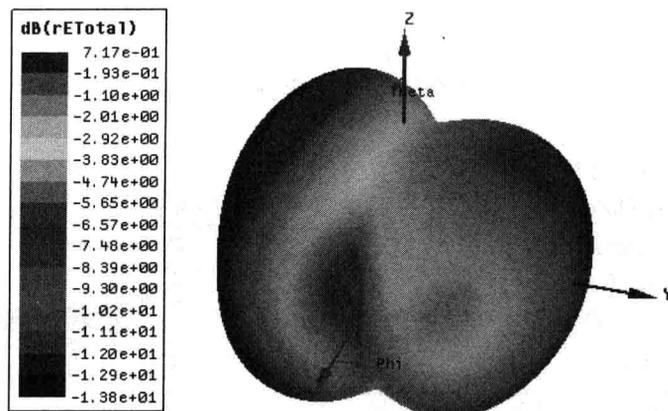


图 5.2.41 天线三维增益方向图

5.2.3 分析倒F天线的结构参数对天线性能的影响

前面 5.1.1 节简单介绍了倒 F 天线的谐振长度 L 、馈线高度 H 以及两条竖直臂之间的距离 S 对天线性能的影响。下面使用 HFSS 的参数扫描分析功能来具体分析倒 F 天线的上述 3 个结构参数对天线的谐振频率和输入阻抗的实际影响。

1. 谐振长度 L 和天线谐振频率、输入阻抗的关系

添加倒 F 天线的谐振长度变量 L 为扫描变量，使用参数扫描分析功能仿真分析给出当变量 L 在 15.2mm ~ 17.2mm 变化时，天线谐振频率和输入阻抗的变化。

(1) 添加扫描变量

右键单击工程树下的 Optimetrics 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令，打开 Setup Sweep Analysis 对话框。单击该对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add/Edit Sweep 对话框，如图 5.2.42 所示。在 Add/Edit Sweep 对话框中，Variable 项选择变量 L ，扫描方式选中 LinearStep 单选按钮，Start、Stop 和 Step 文本框中分别输入 15.2mm、17.2mm 和 1mm，然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后，单击 **OK** 按钮，关

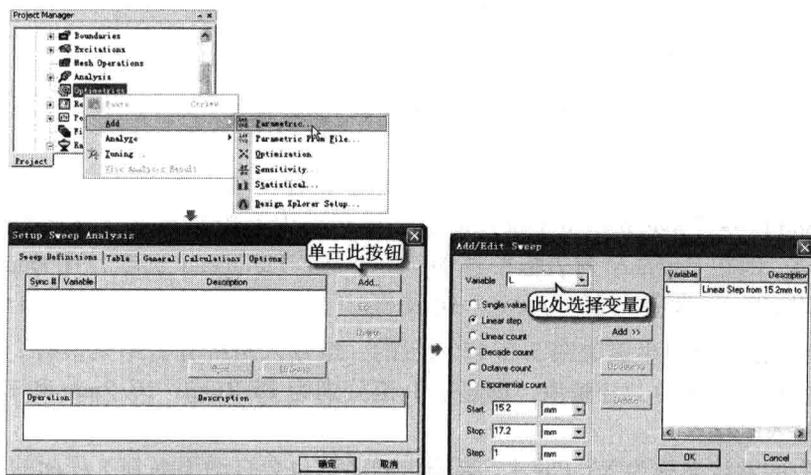


图 5.2.42 添加参数扫描分析

闭 Add/Edit Sweep 对话框。最后,单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮,完成添加参数扫描操作,添加变量 L 为扫描变量。

完成后,参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下,其默认的名称为 ParametricSetup1。

(2) 运行参数扫描分析

展开工程树下的 Optimetrics 节点,右键单击 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup1 选项,在弹出的快捷菜单中选择 **【Analyze】** 命令,运行参数扫描分析,如图 5.2.43 所示。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后,右键单击工程树下的 Results 节点,在弹出的快捷菜单中选择 **【Create Terminal Solution Data Report】** → **【Rectangular Plot】** 命令,打开报告设置对话框,其设置和图 5.2.33 所示设置相同,即在 Category 列表框中选中 Terminal S Parameter 选项,在 Quantity 列表框中选中 St (T1, T1) 选项,在 Function 列表框中

选中 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮,可以生成如图 5.2.44 所示的 L 值分别为 15.2mm、16.2mm 和 17.2mm 时的 S_{11} 随频率变化关系曲线结果报告。结果报告的默认名称为 XY Plot 3,该报告的名称会自动添加到工程树的 Results 节点下。从参数扫描分析结果中可以看出,倒 F 天线的谐振频率随着天线谐振长度变量 L 的变大而降低。

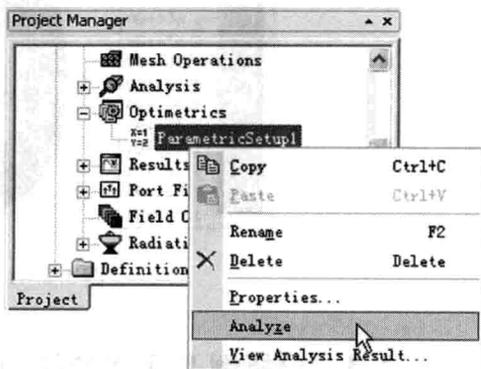


图 5.2.43 运行参数扫描分析

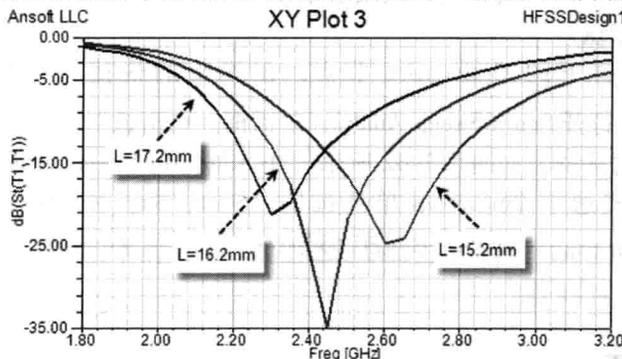


图 5.2.44 不同 L 值对应的 S_{11} 曲线

再右键单击工程树下的 Results 节点,在弹出的快捷菜单中选择 **【Create Terminal Solution Data Report】** → **【Rectangular Plot】** 命令,打开报告设置对话框,其设置和图 5.2.35 所示设置相同,即在 Category 列表框中选中 Terminal Z Parameter 选项,在 Quantity 列表框中选中 Zt (T1, T1) 选项,在 Function 列表框中同时选中 im 和 re 选项。然后单击 **New Report** 按钮,可以生成如图 5.2.45 所示的一组输入阻抗分析结果报告。在结果报告中,每根曲线对应不同的 L 变量值,即显示 L 值分别为 15.2mm、16.2mm 和 17.2mm 时的输入电阻和输入电抗。

结果报告的默认名称为 XY Plot 4,该报告的名称也会自动添加到工程树的 Results 节点下。从参数扫描分析结果中可以看出,在工作频率 2.45GHz 附近,倒 F 天线输入阻抗的电

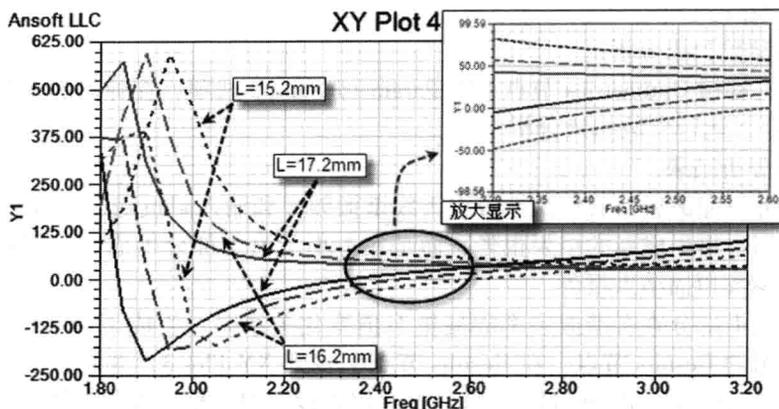


图 5.2.45 不同 L 对应的输入阻抗曲线

阻值随着谐振长度 L 的增加而降低，电抗值随着谐振长度 L 的增加而增加，即电抗值随着谐振长度 L 的增加逐渐由容性变为感性。

再次右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Terminal Solution Data Report】→【Smith Chart】命令，打开报告设置对话框，其设置和图 5.2.37 所示设置相同，即在 Category 列表框中选中 Terminal S Parameter 选项，在 Quantity 列表框中选中 $S_{11}(T1, T1)$ 选项，在 Function 列表框中选择 <none> 选项。然后单击 **New Report** 按钮，可以生成如图 5.2.46 所示的使用 Smith 圆图显示的一组输入阻抗分析结果报告。结果报告的默认名称为 Smith Chart 2，该报告的名称同样会自动添加到工程树的 Results 节点下。

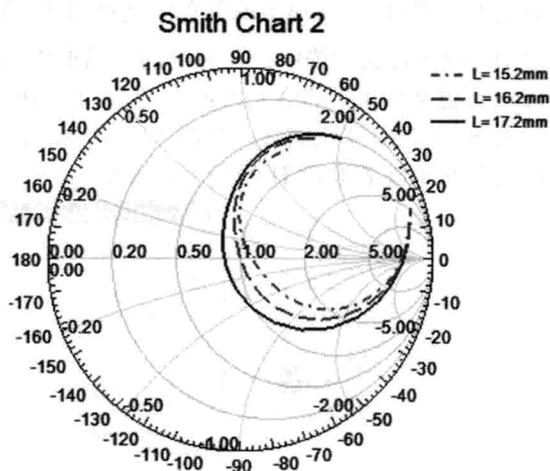


图 5.2.46 Smith 圆图显示的不同 L 对应的输入阻抗

2. 高度 H 和天线谐振频率、输入阻抗的关系

添加倒 F 天线的馈线高度变量 H 为扫描变量，使用参数扫描分析功能仿真分析给出变量 H 在 2.8mm ~ 4.8mm 变化时，天线谐振频率和输入阻抗的变化。

(1) 添加扫描变量

右键单击工程树下的 Optimetrics 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令，打开 Setup Sweep Analysis 对话框。再单击该对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add/Edit Sweep 对话框，整个操作过程与上图 5.2.42 一致。在 Add/Edit Sweep 对话框中，Variable 项选择变量 H ，扫描方式选中 LinearStep 单选按钮，在 Start、Stop 和 Step 文本框中分别输入 2.8mm、4.8mm 和 1mm，然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后，单击 **OK** 按钮，关闭 Add/Edit Sweep 对话框。最后单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮，完成添加参数扫描操作，添加变量 H 为扫描变量。

完成后，参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认的名称

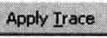
为 ParametricSetup2。

(2) 运行参数扫描分析

右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup2 选项，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令，运行参数扫描分析。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后，我们继续查看天线谐振频率和输入阻抗随高度变量 H 的变化关系。在此，我们不再生成新的结果报告，而是在本小节第 1 部分生成的结果报告的基础上更新生成此次参数扫描结果报告。

在本小节第 1 部分查看谐振频率随变量 L 值变化关系时，生成了结果报告 XY Plot 3。这里展开工程树的 Results 节点，在 Results 节点下找到 XY Plot 3，并展开该节点，然后再双击 XY Plot 3 节点下的 dB(S(T1, T1))，打开报告设置对话框。在报告设置对话框中选择 Families 选项卡，如图 5.2.47 所示。在 Families 选项卡中，首先单击右下方 Nominals 选项对应的  按钮，在弹出的菜单中选择【Set All Variables to Nominal】命令。然后再单击变量 H 右侧的  按钮，在弹出的对话框中选中 Use all values 复选框。最后单击  按钮，更新结果报告 XY Plot 3，生成 L = 16.2mm，H 值分别为 2.8mm、3.8mm 和 4.8mm 时的 S_{11} 随频率变化曲线，如图 5.2.48 所示。从参数扫描分析结果中可以看出，倒 F 天线的谐振频率随着高度 H 的变大而降低。

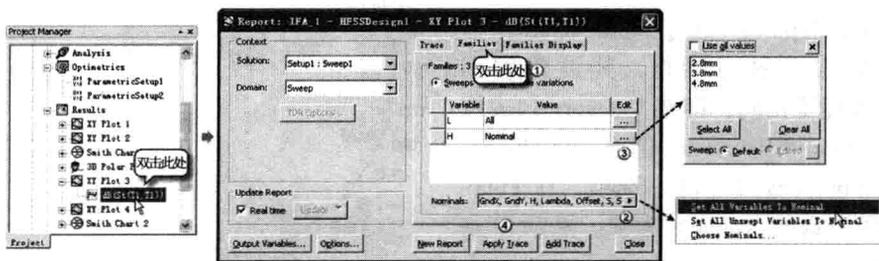


图 5.2.47 报告设置对话框

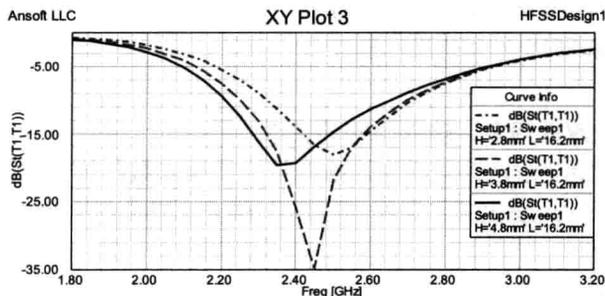


图 5.2.48 不同 H 值对应的 S_{11} 曲线

再展开工程树 Results 下的 XY Plot 4 节点，然后双击 XY Plot 4 节点下的 $\text{im}(Z_t(T1, T1))$ 选项，打开报告设置对话框。使用和前面相同的操作方法，更新结果报告 XY Plot 4，生成 L = 16.2mm，H 值分别为 2.8mm、3.8mm 和 4.8mm 时的输入电抗。然后，再双击 XY Plot 4 节点下的 $\text{re}(Z_t(T1, T1))$ 选项，打开报告设置对话框。使用和前面相同的操作方法，更新结果报告 XY Plot 4，生成 L = 16.2mm，H 值分别为 2.8mm、3.8mm 和 4.8mm 时的输入电阻。更新后的结果报告如图 5.2.49 所示。从参数扫描分析结果中可以看出，在工作频

率 2.45GHz 附近, 倒 F 天线输入阻抗的电阻值随着高度 H 的增加而增加, 电抗值也是随着高度 H 的增加而增加, 即随着高度 H 的增加, 电抗部分逐渐由容性变为感性。

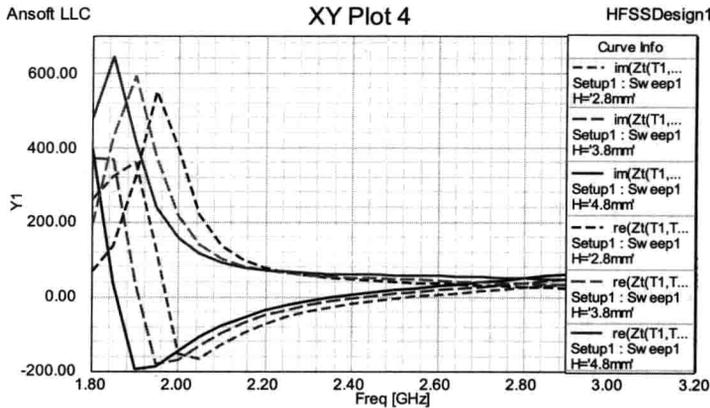


图 5.2.49 不同 H 值对应的输入阻抗曲线

最后, 展开工程树 Results 下的 Smith Chart 2 节点, 然后双击 Smith Chart 2 节点下的 $S_1(T1, T1)$, 打开报告设置对话框。使用和前面相同的操作方法, 更新结果报告 Smith Chart 2, 生成 $L = 16.2\text{mm}$, H 值分别为 2.8mm 、 3.8mm 和 4.8mm 时 S_{11} 的 Smith 圆图。更新后的结果报告如图 5.2.50 所示。

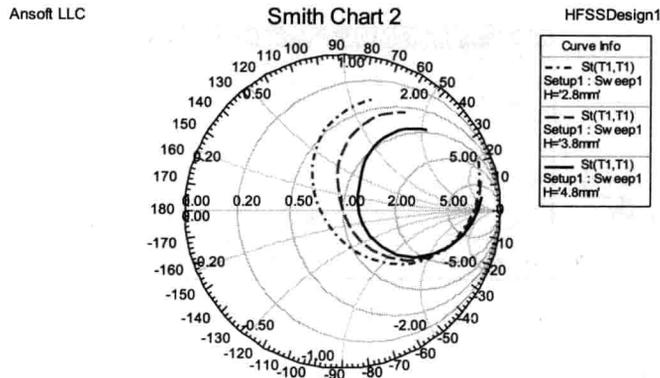


图 5.2.50 不同 H 值对应 S_{11} 的 Smith 圆图

3. 间距 S 和天线谐振频率、输入阻抗的关系

添加倒 F 天线两条竖直臂之间的距离 S 为扫描变量, 使用参数扫描分析功能仿真分析给出当变量 S 在 $3\text{mm} \sim 7\text{mm}$ 范围内变化时, 天线谐振频率和输入阻抗的变化。

(1) 添加扫描变量

右键单击工程树下的 Optimetrics 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令, 打开 Setup Sweep Analysis 对话框。再单击该对话框中的 **Add...** 按钮, 打开 Add/Edit Sweep 对话框, 整个过程与上图 5.2.42 一致。在 Add/Edit Sweep 对话框中, Variable 项选择变量 S , 扫描方式选中 Linear step 单选按钮, 在 Start、Stop 和 Step 文本框中分别输入 3mm 、 7mm 和 2mm , 然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后, 单击 **OK** 按钮, 关闭 Add/Edit Sweep 对话框。最后, 单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮, 完成添加参数扫描操作, 添加变量 S 为扫描变量。

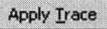
完成后, 参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下, 其默认的名称为 ParametricSetup3。

(2) 运行参数扫描分析

右键单击工程树 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup3, 在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令, 运行参数扫描分析。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后, 我们需要查看天线谐振频率、输入阻抗和间距变量 S 之间的关系。在此, 我们还是在本小节第 1 部分生成的结果报告的基础上更新生成此次参数扫描分析结果。

展开工程树 Results 下的 XY Plot 3 节点, 再双击 XY Plot 3 节点下的 $\text{dB}(S_{11}(T1, T1))$ 选项, 打开报告设置对话框。在报告设置对话框中选择 Families 选项卡, 如图 5.2.51 所示。在 Families 选项卡中首先单击右下方 Nominals 选项对应的  按钮, 在弹出的菜单中选择【Set All Variables to Nominal】命令。然后再单击变量 S 右侧的  按钮, 在弹出的对话框中选中 Use all values 复选框。最后单击  按钮, 更新结果报告 XY Plot 3, 生成 $L=16.2\text{mm}$ 、 $H=3.8\text{mm}$, 以及 S 值分别为 3mm 、 5mm 和 7mm 时的 S_{11} 随频率变化曲线, 如图 5.2.52 所示。从参数扫描分析结果中可以看出, 对于倒 F 天线来说, 两条竖直臂之间的距离 S 对谐振频率影响很小。但是, 间距 S 的变化会影响天线的带宽, 随着间距 S 的增大, 天线的带宽也逐渐增大。

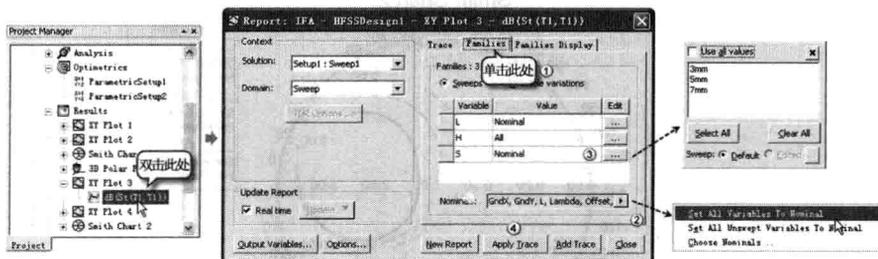


图 5.2.51 更改报告设置

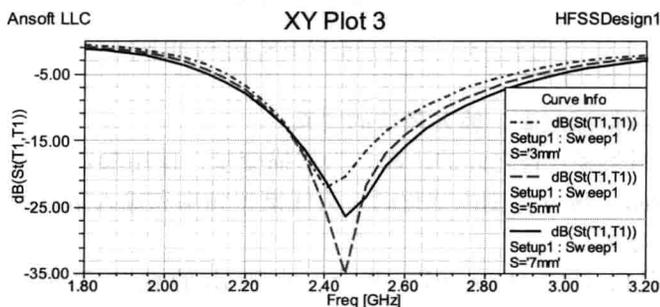


图 5.2.52 不同 S 值对应的 S_{11} 曲线 1

再展开工程树 Results 下的 XY Plot 4 节点, 然后双击 XY Plot 4 节点下的 $\text{im}(Z_{\text{in}}(T1, T1))$ 选项, 打开报告设置对话框。使用和前面相同的操作方法, 更新结果报告 XY Plot 4, 生成 $L=16.2\text{mm}$ 、 $H=3.8\text{mm}$, 以及 S 值分别为 3mm 、 5mm 和 7mm 时的输入电抗结果。再双击 XY Plot 4 节点下的 $\text{re}(Z_{\text{in}}(T1, T1))$ 选项, 打开报告设置对话框。使用和前面相同的

操作方法，更新结果报告 XY Plot 4，生成 $L = 16.2\text{mm}$ 、 $H = 3.8\text{mm}$ ，以及 S 值分别为 3mm 、 5mm 和 7mm 时的输入电阻结果。更新后的结果报告如图 5.2.53 所示。从参数扫描分析结果中可以看出，在工作频率 2.45GHz 附近，倒 F 天线输入阻抗的电阻和电抗部分都是随着间距 S 的增大而减小。

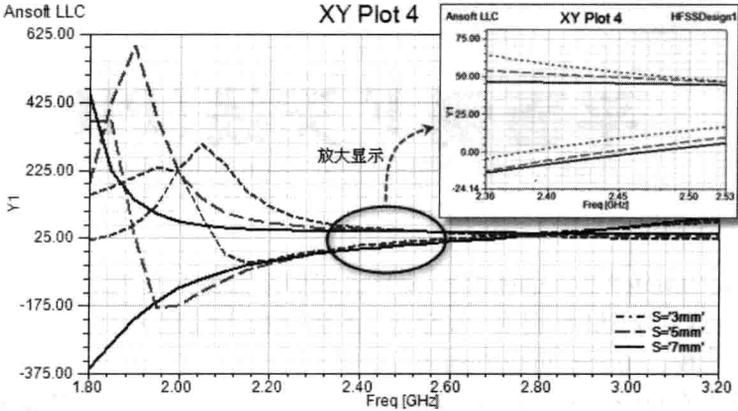


图 5.2.53 不同 S 值对应的 S_{11} 曲线 2

最后，展开工程树 Results 下的 Smith Chart 2 节点，双击 Smith Chart 2 节点下的 St(T1, T1) 选项，打开报告设置对话框。使用和前面相同的操作方法，更新结果报告 Smith Chart 2，生成 $L = 16.2\text{mm}$ 、 $H = 3.8\text{mm}$ ，以及 S 值分别为 3mm 、 5mm 和 7mm 时的 S_{11} Smith 圆图。更新后的结果报告如图 5.2.54 所示。

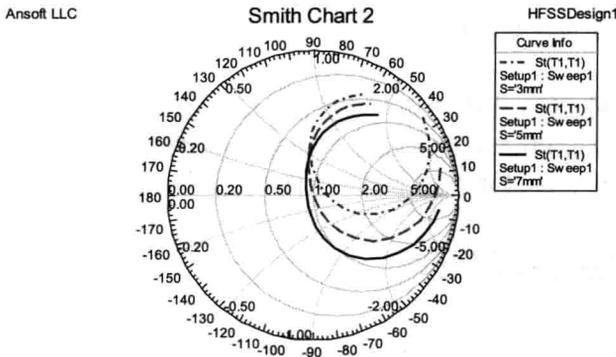


图 5.2.54 不同 S 值对应的 S_{11} Smith 圆图

上述仿真分析结果验证了倒 F 天线的 3 个结构参数变量 L 、 H 和 S 的变化会影响天线的谐振频率和输入阻抗。因此，对于倒 F 天线来说，在设计中只要选取合适的结构参数，即可使其工作在任意的频率上，同时使其输入阻抗接近 50Ω 负载匹配。

5.3 本章小结

本章主要讲述了倒 F 天线的原理和设计。首先简要介绍了倒 F 天线的发展衍变过程，倒 F 天线的辐射特性以及倒 F 天线的结构参数对天线性能的影响。然后详细讲述了使用 HFSS 分析设计一个印刷倒 F 天线的完整设计流程和操作步骤。最后借助于 HFSS 的参数扫描分析功能，仿真分析给出了倒 F 天线的结构参数对天线谐振频率和输入阻抗的影响。

第 6 章

平面倒 F 天线 (PIFA) 设计

PIFA (Planar Inverted F-shaped Antenna) 天线即平面倒 F 形天线, 因为整个天线的形状像一个倒写的英文字母 F 而得名。多年来, 多数手机天线都一直沿用这种传统的 PIFA 天线设计方案。目前, 市面上可以看到的手機内置天线, 其中有 60% ~ 80% 都是采用这种天线设计的。PIFA 天线的基本结构是采用一个平面辐射单元作为辐射体, 并以一个大的地面作为反射面, 辐射体上有两个互相靠近的引脚, 分别用于接地和馈电。图 6.1 所示为一个工作于 GSM 900 和 DCS 1800 频段的双频 PIFA 天线实物。当实际工作时, 天线安装在手机上, 手机主板的地面作为天线的参考地。

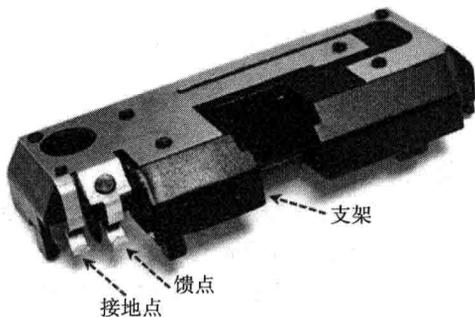


图 6.1 双频手机 PIFA 天线实物

本章主要介绍这种 PIFA 天线的基本原理、PIFA 天线双频工作和多频工作的具体实现, 以及使用 HFSS 仿真分析 PIFA 天线的设计流程和操作步骤。同时, 本章在讲解使用 HFSS 进行天线设计的过程中, 还简单介绍了对于 HFSS 设计中出现的错误信息的诊断和解决。

6.1 PIFA 天线的基本原理

6.1.1 PIFA 天线的基本结构和由来

PIFA 天线的基本结构包括四个部分: 接地平面、辐射单元、短路金属片和同轴馈线, 其典型的结构如图 6.1.1 所示。其中, 接地平面可以作为反射面, 辐射单元是与接地平面平行的金属片, 短路金属片用于连接辐射单元和接地平面, 同轴馈线用于信号传输。

一方面, 可以将 PIFA 天线看作是由线性倒 F 天线 (即 IFA 天线) 衍变而来的。对于 IFA 天线, 其辐射单元、接地线都是细导线, 这样等效的射频分布电感较大, 而分布电容较小, 这就意味着天线具有较高的 Q 值和较窄的频带。根据电小天线的 Q 值和带宽的关系, 增大带宽的途径就是降低 Q 值, 因此

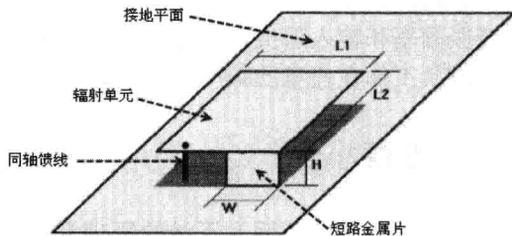


图 6.1.1 PIFA 天线结构

将 IFA 天线的细导线用具有一定宽度的金属片取代, 即可以增大分布电容和减小分布电感, 从而增大天线带宽。这样就形成了 PIFA 天线。

另一方面, 也可以将 PIFA 天线视为一个具有短路连接的矩形微带天线, 这种具有短路连接的矩形微带天线的实际共振模式与普通矩形微带天线的共振模式是一样的, 它们都是共振在 TM_{10} 模式。将短路金属片置于矩形辐射金属片和接地平面时, 其可将矩形辐射金属片的长度减半, 达到缩小天线尺寸的目的, 而在短路金属片的位置 TM_{10} 模式的电场是等于零的。当短路金属片宽度比辐射金属片窄时, 天线的有效电感会增加且共振频率会低于传统的短路矩形微带天线, 因此缩小短路金属片的宽度还可以进一步缩小 PIFA 天线的尺寸。

6.1.2 PIFA 天线的谐振频率

K. Hirasawa 和 M. Haeishi 在 *Analysis, Design, and Measurement of Small and Low-Profile Antennas* 一书中详细分析了如图 6.1.1 所示的 PIFA 天线模型, 所分析模型的辐射金属片长度 $L_1 = L_2 = 16\Delta d$, 辐射金属片距离接地平面的高度 $H = 4\Delta d$, 其中 $\Delta d = 4\text{mm}$ 是在分析时天线模型长度和高度的变化单位。

短路金属片宽度 W 对谐振频率有着显著的影响, 图 6.1.2 给出了谐振频率随着短路金属片的宽度 W 的变化曲线。从图 6.1.2 中可以看出, 谐振频率会随着短路金属片宽度的增大而增大。也就是说, 对于相同的谐振频率来说, 短路金属片越窄, 辐射金属片的面积也就越小, 从而通过减小短路金属片的宽度可以进一步缩小天线的尺寸。

另外, 改变辐射金属片的长宽比也可以改变谐振频率, 图 6.1.3 给出了辐射金属片的长宽比 (L_1/L_2) 对谐振频率的影响, 从结果中可以看出, 当其他宽度都固定, 只改变 L_1 的宽度, 天线的谐振频率会随着 L_1/L_2 比值的增加而显著下降。

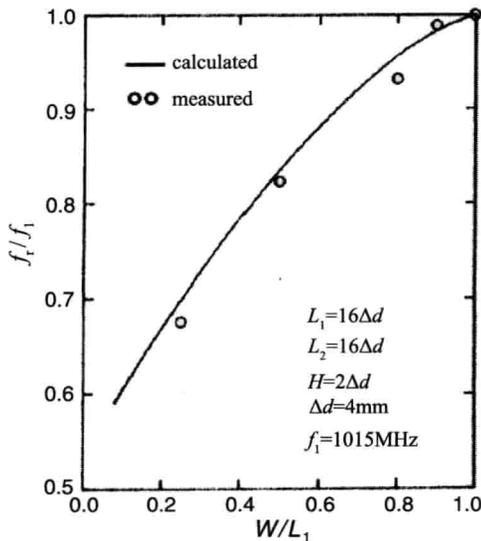


图 6.1.2 谐振频率和短路金属片宽度的关系

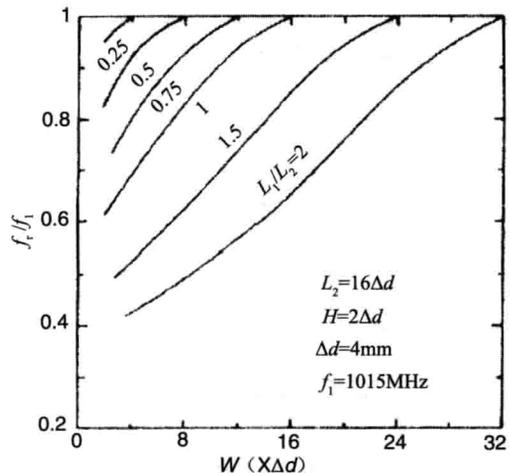


图 6.1.3 谐振频率和辐射金属片长宽比的关系

具体来说, 图 6.1.1 所示为 PIFA 天线的谐振频率和辐射金属片的宽度 L_1 、长度 L_2 , 短路金属片的宽度 W 以及辐射金属片的高度 H 密切相关。当短路金属片的宽度 W 和辐射金属片的宽度 L_1 相等, 即 $W/L_1 = 1$ 时, 有:

$$\frac{\lambda}{4} = H + L_2 \quad \text{即} \quad f_r = \frac{c}{4(H + L_2)} \quad (6-1-1)$$

当短路金属片的宽度 $W=0$ 时, 有:

$$\frac{\lambda}{4} = H + L_1 + L_2 \quad \text{即} \quad f_r = \frac{c}{4(H + L_1 + L_2)} \quad (6-1-2)$$

式中, λ 表示谐振波长, f_r 表示谐振频率, c 表示光速。

对于任意宽度 W 的短路金属片, 谐振频率可以由下式计算:

$$f_r = r f_1 + (1 - r) f_2 \quad L_1 \leq L_2 \quad (6-1-3)$$

或者

$$f_r = r^k f_1 + (1 - r^k) f_2 \quad L_1 > L_2 \quad (6-1-4)$$

式中, $r = \frac{W}{L_1}$, $k = \frac{L_1}{L_2}$, $f_1 = \frac{c}{4(H + L_2)}$, $f_2 = \frac{c}{4(H + L_1 + L_2 - W)}$ 。

6.1.3 PIFA 天线的带宽

PIFA 天线中对带宽起决定作用的结构参数是辐射金属片的高度 H , PIFA 天线的带宽会随着辐射金属片高度 H 的增加而增加。图 6.1.4 给出了一个工作于 900MHz 的 PIFA 天线在电压驻波比小于 2 ($VSWR < 2$) 时的相对带宽和高度 H 之间的关系。从该图中可以看出, 随着高度 H 的增加, 天线的相对带宽也会显著增加。但是增加 H 无疑会增大天线的体积, 尤其对于像手机一样的手持终端设备, 其对于整机的厚度有严格的限制, 因此在天线设计时必须兼顾带宽和高度的要求。

短路金属片的宽度 W 除了会影响天线的谐振频率外, 也会影响天线的带宽, K. Hirasawa 在 *Analysis, Design, and Measurement of Small and Low-Profile Antennas* 一书中基于图 6.1.1 所示的 PIFA 天线模型分析给出了短路金属片宽度 W 和天线相对带宽之间的关系, 如图 6.1.5 所示。从该图的结果中可以看出, 短路金属片宽度越窄, 天线的相对带宽也会越小。

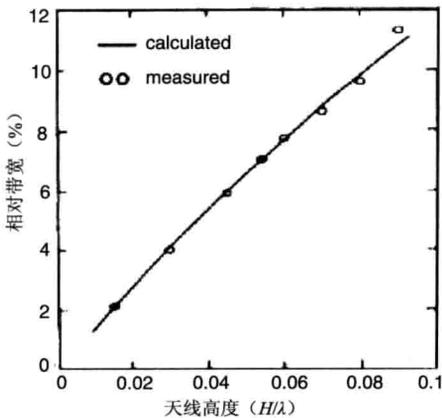


图 6.1.4 PIFA 天线相对带宽和高度 H 之间的关系

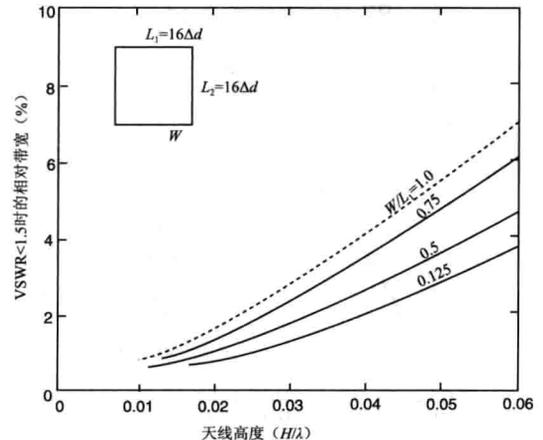


图 6.1.5 PIFA 天线相对带宽和高度 H 之间的关系

另外, PIFA 天线接地平面的大小也会影响天线的带宽。例如, 减小接地平面的面积通常能够加大天线的带宽。

6.1.4 PIFA 天线的电场分布和电流分布

在 *Analysis, Design, and Measurement of Small and Low-Profile Antennas* 一书中, K. Hirasawa 和 M. Haeishi 使用 SNM (Spatial Network Method) 法分析给出了基于图 6.1.1 所示的 PIFA 天线模型的电场分布和电流分布。在分析时, 首先确定 PIFA 天线的馈点位置和谐振频率, 然后通过同轴馈点引入工作频率等于天线谐振频率的正弦波激励, 这样就可以观察到在 PIFA 天线谐振频率处的电流分布和电场分布, 如图 6.1.6 和图 6.1.7 所示。

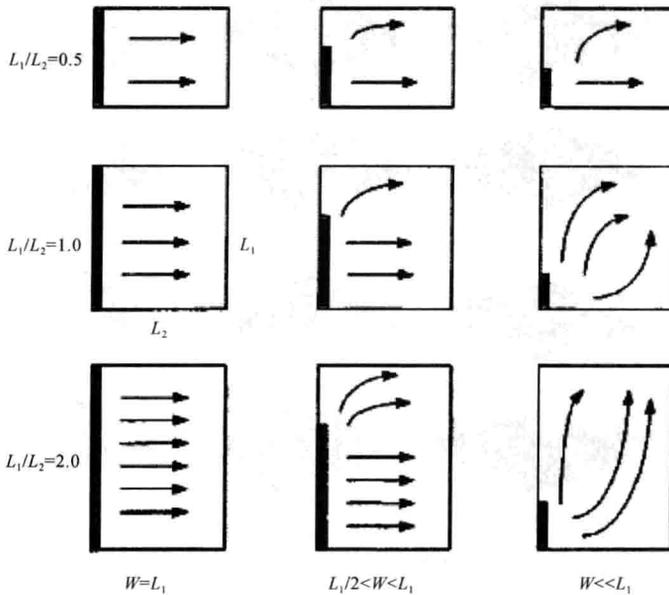


图 6.1.6 不同辐射金属片和短路金属片尺寸 PIFA 天线对应的电流分布

从图 6.1.6 所示的 PIFA 天线电流分布中可以看出, 当 $L_1 - W < L_2$ 时, 辐射金属片的主要电流都流往辐射金属片短边 L_2 的开路处; 当 $L_1 - W > L_2$ 时, 辐射金属片的主要电流都流往辐射金属片长边 L_1 的开路处。总之, 随着短路金属片宽度 W 的逐渐减小, 辐射金属片表面电流有效路径会逐渐增长, 从而导致天线的谐振频率随之降低。也就是在 6.1.2 节中所说的, 通过减小短路金属片的宽度可以进一步缩小天线的尺寸。

图 6.1.7 所示的 PIFA 天线电场分布说明了辐射金属片上的电场方向是沿着 z 向的, 即 x 向、 y 向的电场分量 $E_x = E_y = 0$ 。在短路金属片位置时, z 向的电场分量 $E_z = 0$ 。在辐射金属片的边缘时, z 向的电场分量最大, x 向、 y 向的电场分量 E_x 、 E_y 也只存在于辐射片的开路边缘位置, 辐射片的开路边缘的场形成了 PIFA 天线的辐射。PIFA 天线的这一辐射机理和矩形微带天线比较相似。另外, 在 E_x 、 E_y 电场分布图中都会有一个冒尖的部分, 冒尖的位置就是同轴馈源所在的位置。

6.1.5 PIFA 天线多频工作的实现

为了适应无线通信多频段工作, 就需要天线实现多频段工作。对于 PIFA 天线实现多频段工作, 我们可以通过使用双馈点或者在 PIFA 天线辐射金属片上采用开槽的技术来实现。使用双馈点时, 调谐频率和调谐范围往往受到一定的限制, 因此, 在 PIFA 天线的实际设计中, 多采用开槽的方式来实现多频工作。图 6.1.8 列出了多种开槽方案来实现双频

或者多频工作, 其中 L 形开槽和 U 形开槽是最常使用也是最简单的两种开槽方案。此处, 我们就对这两种开槽方案实现双频工作进行简要说明。

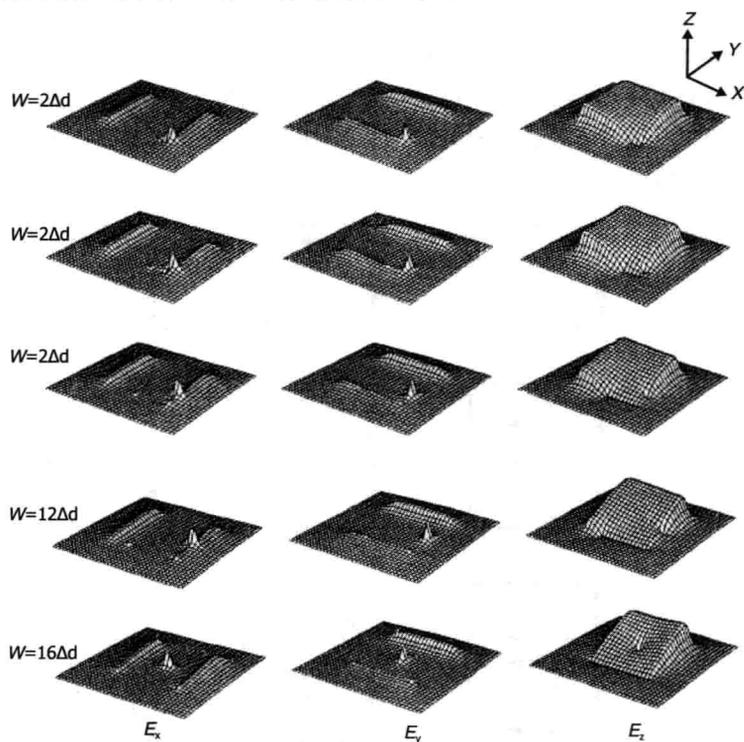


图 6.1.7 PIFA 天线的电场分布

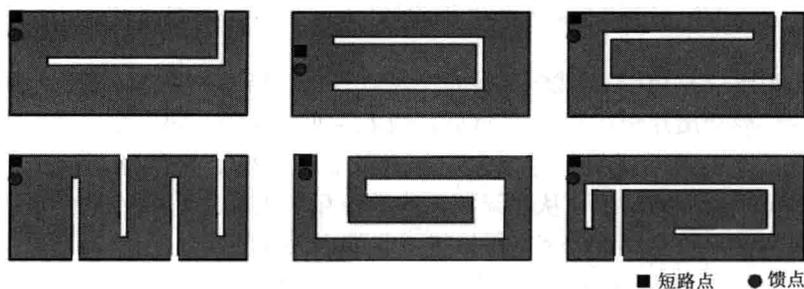


图 6.1.8 PIFA 天线的多种开槽方案实现双频/多频工作

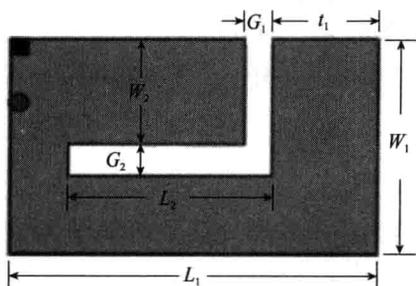


图 6.1.9 L 形开槽 PIFA 天线

L 形开槽的 PIFA 天线辐射金属片如图 6.1.9 所示, 通过开槽, 改变了原先的电流路径, 形成两个相对独立的电流回路, 从而实现 PIFA 天线的双频工作。在 L 形开槽下, 长度为 L_1 、宽度为 W_1 的矩形金属片作为辐射元 1, 产生低频谐振频率 f_1 ; 长度为 L_2 、宽度为 W_2 的矩形金属片作为辐射元 2, 产生高频谐振频率 f_2 。根据式 (6-1-2), 低频谐振频率 f_1 和高频谐振频率 f_2 可以分别估算为:

$$f_1 = \frac{c}{4(H + L_1 + W_1)} \tag{6-1-5}$$

$$f_2 = \frac{c}{4(H + L_2 + W_2)} \tag{6-1-6}$$

上述公式只具有近似的指导意义，不具有严格的意义。在实际设计时，天线的谐振频率会受到如图 6.1.9 所示的 L_1 、 W_1 、 L_2 、 W_2 、 G_1 、 G_2 和 t_1 等多个参数的影响，我们需要通过多次调试，才能得到理想的性能。

U 形开槽的 PIFA 天线辐射金属片如图 6.1.10 所示，通过开槽，同样改变了原先的电流路径，形成两个相对独立的电流回路，从而实现 PIFA 天线的双频工作。在 U 形开槽下，长度为 L_1 、宽度为 W_1 的矩形金属片作为辐射元 1，产生低频谐振频率 f_1 ；长度为 L_2 、宽度为 W_2 的矩形金属片作为辐射元 2，产生高频谐振频率 f_2 。根据式(6-1-2)，低频谐振频率 f_1 和高频谐振频率 f_2 可以分别估算为：

$$f_1 = \frac{c}{4(H + L_1 + W_1)} \tag{6-1-7}$$

$$f_2 = \frac{c}{4(H + L_2 + W_2)} \tag{6-1-8}$$

和 L 形开槽类似，上述公式也是只具有近似的指导意义，不具有严格的意义。在实际设计时，天线的谐振频率会受到如图 6.1.10 所示的 L_1 、 W_1 、 L_2 、 W_2 、 G_1 、 G_2 和 t_1 等多个参数的影响，我们需要通过多次调试，才能得到理想的性能。

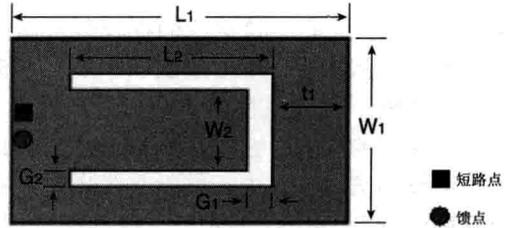


图 6.1.10 U 形开槽 PIFA 天线

6.2 GSM 900 单频 PIFA 天线的设计和分析

在 6.1 节中我们介绍了 PIFA 天线的基本结构、谐振频率的估算、电场和电流的分布以及多频工作的实现。本节将重点讲述如何使用 HFSS 仿真设计 PIFA 天线，所设计的 PIFA 工作于 GSM 900 频段。

6.2.1 倒 F 天线的模型结构

所设计的 PIFA 天线工作于 GSM 900 频段，对于 GSM 900 工作频段来说，信号上行频率范围为 880MHz ~ 915MHz，下行频率范围为 925MHz ~ 960MHz。这里要求天线的中心工作频率为 920MHz，回波损耗小于 10dB 的带宽大于 80MHz。

使用 HFSS 设计的 PIFA 天线结构模型如图 6.2.1 所示，整个天线结构大致可以分为接

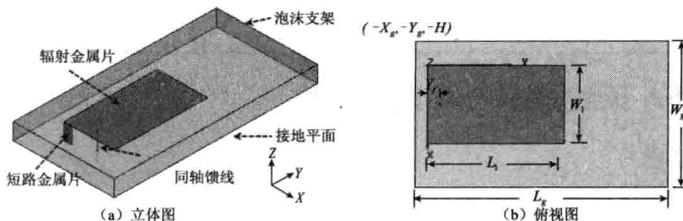


图 6.2.1 PIFA 天线的 HFSS 设计模型

地平面、辐射金属片、短路金属片、同轴馈线和泡沫支架五部分。接地平面、辐射金属片和短路金属片的材质都为金属铜。接地平面位于最下方,其长度和宽度分别为 60mm 和 120mm。辐射金属片位于最上方,根据 6.1 节的理论可知,辐射金属片的长度和宽度之和约为 $1/4$ 个工作波长,这里辐射金属片的长度和宽度分别取 55mm 和 32mm。通过前面的介绍,我们知道天线高度是决定 PIFA 天线带宽的一个重要因素,为了让 PIFA 天线有足够的带宽,天线的高度在这里取 10mm。而短路金属片的宽度在这里取 6mm。天线使用同轴线馈电,同轴线的内径为 0.25mm,外径为 0.59mm。为了固定辐射金属片,让辐射金属片和接地平面保持平行,这里我们在辐射金属片和接地平面之间填充介电常数较低的 Rohacell 射频泡沫。其相对介电常数 $\epsilon_r = 1.06$,损耗正切 $\tan\delta = 0.005$ 。

为了便于更改模型的大小以及后续的参数化分析,即分析 PIFA 天线结构参数的变化对天线性能的影响,在创建 PIFA 天线的 HFSS 设计模型时,我们需要定义一系列的变量来表示天线的结构。其中,辐射金属片位于 xy 平面,其一个顶点位于坐标原点,长度和宽度分别用变量 $L1$ 和 $W1$ 表示,天线的高度用变量 H 表示。接地平面位于辐射金属片的正下方,其顶点坐标用变量表示为 $(-X_g, -Y_g, -H)$,其长度和宽度分别用变量 L_g 和 W_g 表示。射频泡沫支架的厚度为 H ,其长度和宽度与接地平面保持一致。短路金属片位于辐射金属片的左侧,其和辐射金属片左上角顶点距离用变量 X_s 表示。短路金属片宽度用变量 SW 表示,其长度即为天线的高度 H 。同轴馈线在 x 轴方向位于辐射金属片的中央,其和辐射金属片上侧边缘、左侧边缘的距离分别用变量 X_f 、 Y_f 表示,也就是在 xy 平面同轴馈线的圆心坐标为 (X_f, Y_f) ,且 $X_f = W1/2$ 。另外,分别用变量 $r1$ 和 $r2$ 表示同轴馈线的内径和外径。图 6.2.1 上标示出了部分变量所表示的含义。表 6.2.1 所示为在当前设计中所定义的变量名称、变量所代表的结构参数以及变量的初始值。

表 6.2.1 变量定义

变量意义	变量名	变量初始值
天线高度	H	10mm
辐射金属片长度	L1	55mm
辐射金属片宽度	W1	32mm
接地平面顶点 x 坐标	X_g	10mm
接地平面顶点 y 坐标	Y_g	5mm
接地平面长度	L_g	120mm
接地平面宽度	W_g	60mm
同轴馈线的 x 轴圆心坐标	X_f	$W1/2$
同轴馈线的 y 轴圆心坐标	Y_f	5mm
短路金属片到辐射金属片上边缘的距离	X_s	0
短路金属片的宽度	SW	6mm
同轴馈线内芯半径	$r1$	0.25mm
同轴馈线外径	$r2$	0.59mm

6.2.2 PIFA 天线的 HFSS 设计过程

1. 新建设计工程

(1) 运行 HFSS 并新建工程

双击桌面上的 HFSS 快捷方式图标,启动 HFSS 软件。HFSS 运行后,它会自动新建一个 HFSS 工程,选择主菜单栏中的【File】→【Save As】命令,把工程文件另存为

PIFA. hfss文件。

(2) 设置求解类型

设置当前设计为模式驱动求解类型。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Solution Type】命令，打开如图6.2.2所示的Solution Type对话框，选中 Driven Modal 单选按钮，然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

(3) 设置模型长度单位

设置当前设计在创建模型时所使用的默认长度单位为 mm。

从主菜单栏中选择【Modeler】→【Units】命令，打开如图6.2.3所示的Set Model Units对话框。在 Select units 下拉列表中选择 mm，然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

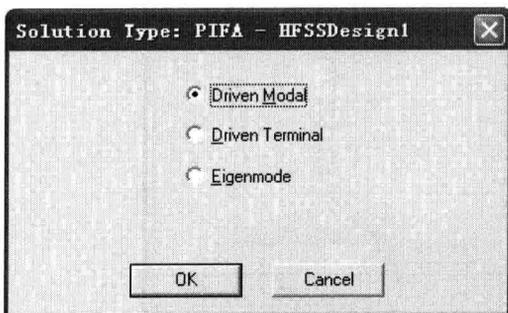


图 6.2.2 设置求解类型

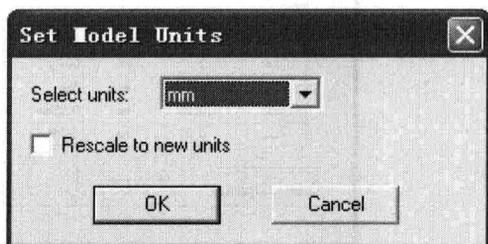


图 6.2.3 设置长度单位

2. 添加和定义设计变量

在 HFSS 中定义和添加如表 6.2.1 所示的设计变量。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框。单击对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add Property 对话框。在 Add Property 对话框的 Name 文本框中输入第一个变量名称 H，在 Value 文本框中输入该变量的初始值 10mm，然后单击 **OK** 按钮，添加变量 H 到设计属性对话框中。变量定义和添加的过程如图 6.2.4 所示。

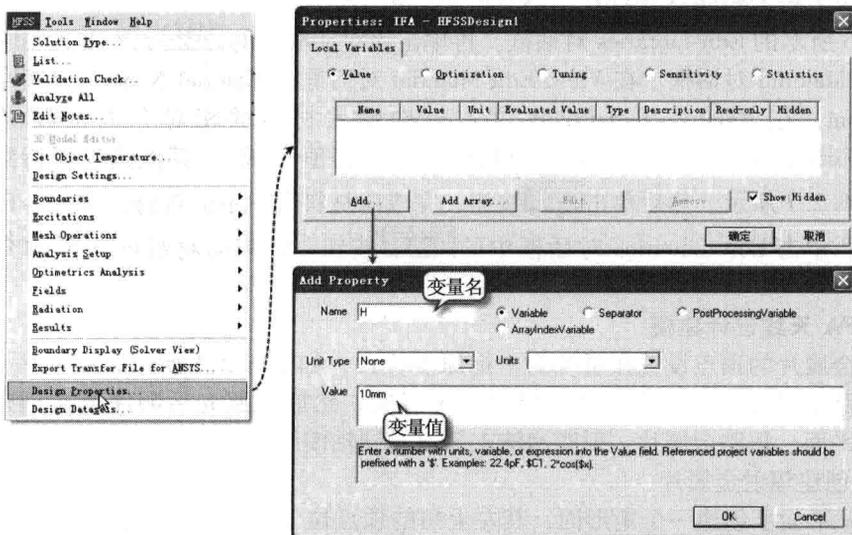


图 6.2.4 定义变量

使用相同的操作方法, 分别定义变量 L1、W1、Xg、Yg、Lg、Wg、Xf、Yf、Xs、SW、r1 和 r2, 其初始值分别为 55 mm、32 mm、10mm、5mm、120mm、60mm、W1/2、5mm、0mm、6mm、0.25mm 和 0.59mm。定义完成后, 确认设计属性对话框如图 6.2.5 所示。

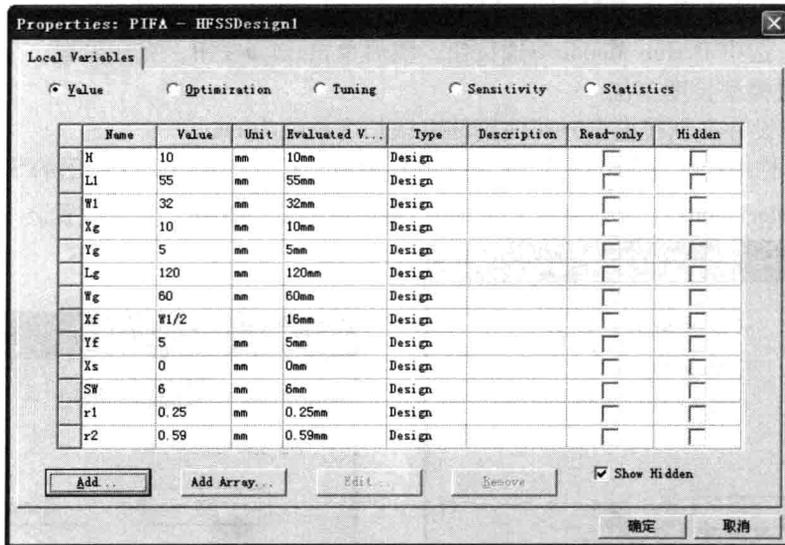


图 6.2.5 完成所有设计变量定义后的设计属性对话框

最后, 单击设计属性对话框中的 **确定** 按钮, 完成所有变量的定义和添加工作, 退出设计属性对话框。

3. 添加新的介质材料

在设计中, 辐射金属片的支架使用的是介电常数较低的 Rohacell 射频泡沫, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 1.06$, 损耗正切 $\tan\delta = 0.005$ 。因为 HFSS 默认材料库中没有这样的介质材料, 所以我们首先需要在设计材料库中添加该介质材料, 然后将其命名为 foam。

从主菜单栏中选择 **【Tools】** → **【Edit Configured Libraries】** → **【Materials】** 命令, 打开如图 6.2.6 所示的 Edit Libraries 对话框。再单击该对话框中的 **Add Material ...** 按钮, 打开 View/Edit Material 对话框。在 View/Edit Material 对话框的 Material Name 文本框中输入材料的名称 foam, 在 Relative Permittivity 文本框中输入材质的相对介电常数值 1.06, 在 Dielectric Loss Tangent 文本框中输入材质的损耗正切值 0.005, 其他选项保持默认设置不变, 如图 6.2.7 所示。然后单击 **OK** 按钮, 完成向材料库中添加新的介质材料 foam。

最后, 单击 Edit Libraries 对话框中的 **确定** 按钮, 结束向材料库中添加介质材料的操作。

4. PIFA 天线设计建模

辐射金属片的顶点设置在系统的坐标原点位置, 如图 6.2.1 所示。接地平面、辐射金属片和短路金属片都设置为不考虑厚度的金属铜, 然后按照先后顺序依次创建辐射金属片、接地平面、短路金属片、射频泡沫支架以及同轴馈线。

(1) 创建辐射金属片

在 xoy 平面上创建一个矩形面, 其左上角的顶点位于坐标原点, 长和宽分别用变量 L1 和 W1 表示。矩形面模型建好后, 设置其边界条件为有限导体边界。

从主菜单栏中选择 **【Draw】** → **【Rectangle】** 命令, 或者单击工具栏上的  按钮,

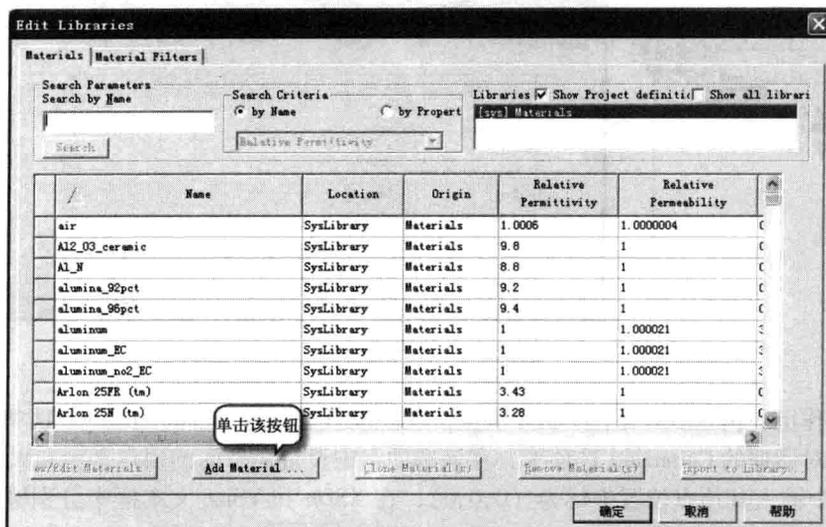


图 6.2.6 Edit Libraries 对话框

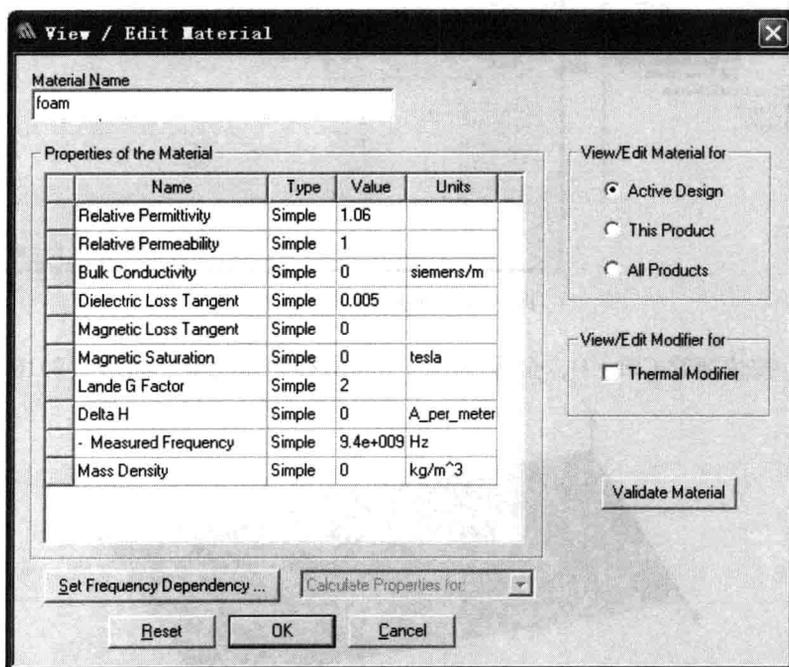


图 6.2.7 添加新的介质材料

进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡，如图 6.2.8 所示。在 Name 文本框中输入 Patch，即可把矩形面的名称修改为 Patch。单击 Color 选项对应的 **Edit** 按钮，设置矩形面的颜色为铜黄色。然后单击 **确定** 按钮退出。

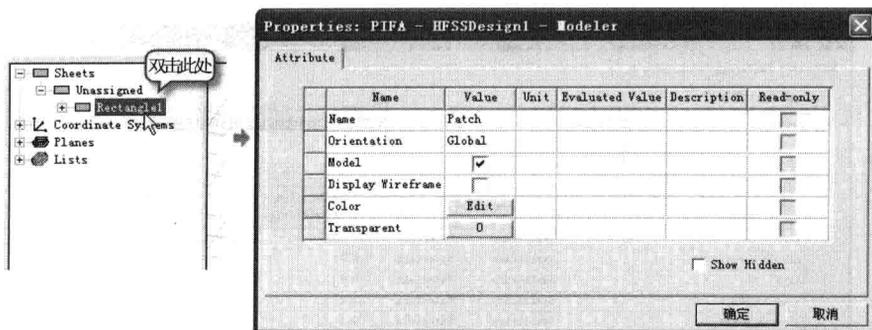


图 6.2.8 Attribute 选项卡

展开操作历史树 Sheets 下的 Patch 节点，双击该节点下的 CreateRectangle 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 (0,0,0)，在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的宽度和长度为 W1 和 L1，如图 6.2.9 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

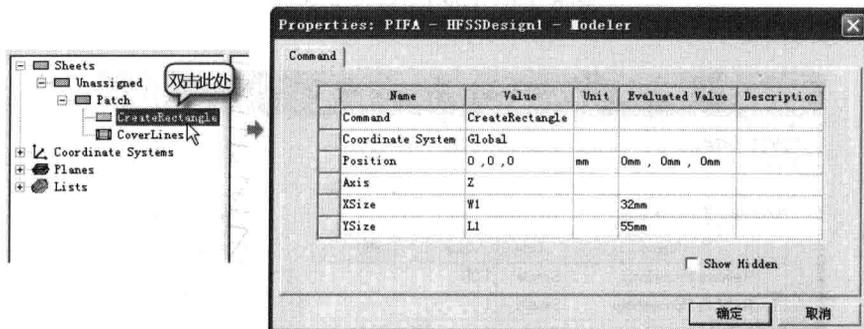


图 6.2.9 Command 选项卡

完成后，按快捷键 Ctrl + D，全屏显示创建的所有物体模型，如图 6.2.10 所示。

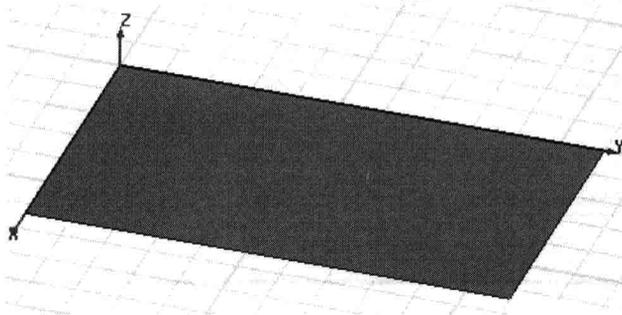


图 6.2.10 辐射金属片模型

最后设置辐射金属片的边界条件为有限导体边界。在三维模型窗口中选中刚创建的辐射金属片模型 Patch，然后单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Finite Conductivity】命令，打开有限导体边界设置对话框。首先将该对话框中的 Name 文本框内容由默认的 FiniteCond1 修改为 FiniteCond_Patch，然后选中该对话框中的 Use Material 复选框，并单击 Use Material 复选框右侧的 **vacuum** 按钮，打开 Select Definition 对话框。在 Select Definition 对话框的 Search By Name 文本框中输入 copper，则在其下方的材质

列表中会高亮显示, 表示选中了 copper, 此时单击对话框中的 **确定** 按钮, 确认选中 copper (即金属铜)。整个操作过程如图 6.2.11 所示。最后, 单击有限导体边界设置对话框中的 **OK** 按钮完成设置。此时, 即可把辐射金属片 Patch 的边界条件设置为有限导体边界, 且有限导体属性为金属铜。设置完成后, 有限导体边界的名称 FiniteCond_Patch 会自动添加到工程树的 Boundaries 节点下。

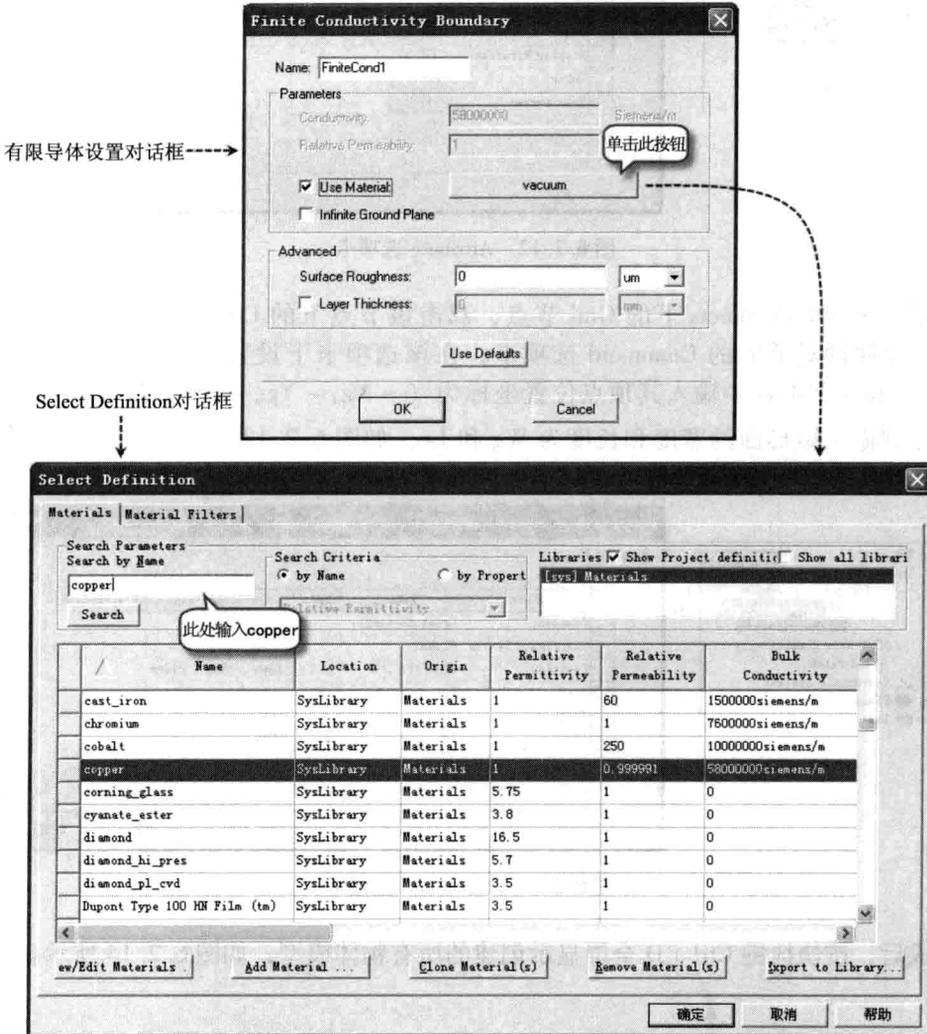


图 6.2.11 设置有限导体边界

(2) 创建接地平面

创建一个平行于辐射金属片的矩形面, 其顶点坐标为 $(-X_g, -Y_g, -H)$, 长和宽分别用变量 L_g 和 W_g 表示。矩形面模型建好后, 设置其边界条件为有限导体边界。

从主菜单栏中选择 **【Draw】** → **【Rectangle】** 命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建矩形面的状态, 然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称仍为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项, 打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡, 如图 6.2.12 所示。在 Name 文本框中输入 Gnd, 即可把矩形面的名称修改

为 Gnd。单击 Color 选项对应的 **Edit** 按钮，设置矩形面的颜色为黄色。然后单击 **确定** 按钮退出。

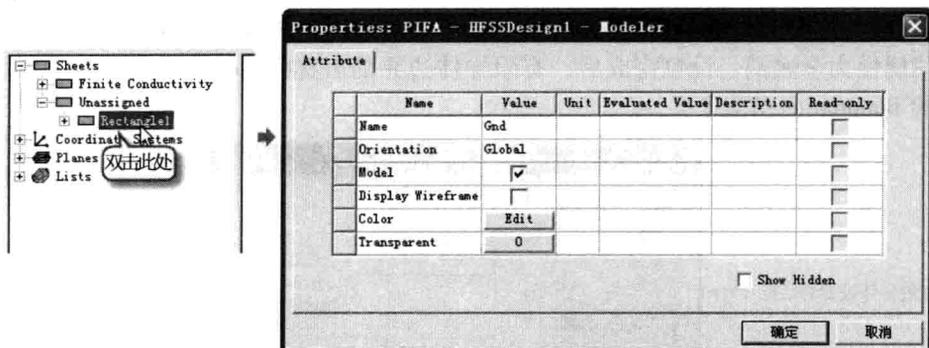


图 6.2.12 Attribute 选项卡

展开操作历史树 Sheets 下的 Gnd 节点，双击该节点下的 CreateRectangle 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡下设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(-X_g, -Y_g, -H)$ ，在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的宽度和长度为 W_g 和 L_g ，如图 6.2.13 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

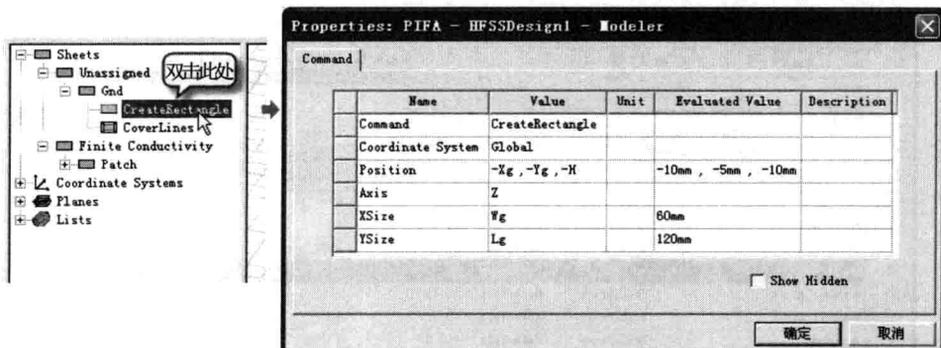


图 6.2.13 Command 选项卡

完成后，按快捷键 Ctrl + D 全屏显示创建的所有物体模型，如图 6.2.14 所示。

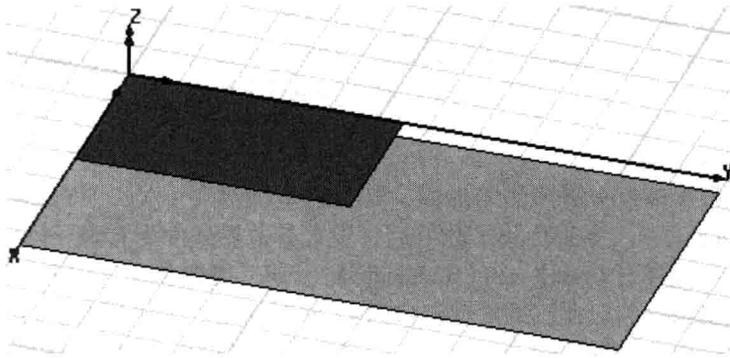


图 6.2.14 辐射金属片模型

最后设置接地平面的边界条件为有限导体边界。在三维模型窗口中选中接地平面模型，然后单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Finite Conductivity】命令，打开有限导体边界设置对话框。设置操作过程与图 6.2.11 所示的过程相似，首先将该对话框的 Name 选项由默认的 FiniteCond1 修改为 FiniteCond_Gnd，然后选中该对话框中的 Use Material 复选框，并单击 Use Material 复选框右侧的 **vacuum** 按钮，打开 Select Definition 对话框。在 Select Definition 对话框的 Search By Name 文本框中输入 copper，则在其下方的材质列表中会高亮显示，表示选中了 copper，此时单击对话框中的 **确定** 按钮确认选中 copper（即金属铜）。最后，单击有限导体边界设置对话框中的 **OK** 按钮完成设置。此时，即可把接地平面 Gnd 的边界条件设置为有限导体边界，且有限导体为金属铜。设置完成后，有限导体边界的名称 FiniteCond_Gnd 会自动添加到工程树的 Boundaries 节点下。

(3) 创建辐射金属片和接地平面之间的接地金属片

在辐射金属片 Patch 左上角的位置上创建一个位于 xz 平面的矩形面，用作接地金属片，把辐射金属片和接地平面连接起来，并将其命名为 Short，其顶点坐标为 $(X_s, 0, 0)$ ，长和宽分别用变量 H 和 SW 表示。

因为该矩形面位于 xz 平面，所以首先需要把当前工作平面设置为 xz 面。单击工具栏上的 **XY** 下拉列表框，在其下拉列表中选择 ZX 选项，即可把 xz 平面设置为当前工作平面。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏上的 **□** 按钮，进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xz 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称依然为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡，如图 6.2.15 所示。在 Name 文本框中输入 Short，即可把矩形面的名称修改为 Short。单击 Color 选项对应的 **Edit** 按钮，设置矩形面的颜色为铜黄色。然后单击 **确定** 按钮退出。

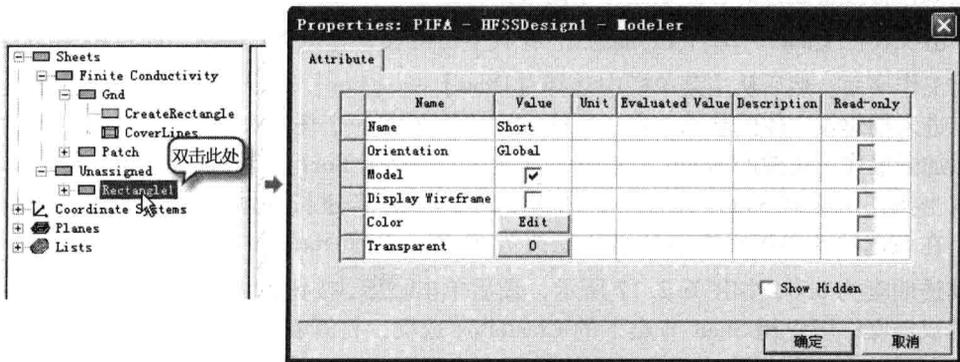


图 6.2.15 Attribute 选项卡

展开操作历史树 Sheets 下的 Short 节点，双击该节点下的 CreateRectangle 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(X_s, 0, 0)$ ，在 XSize 和 ZSize 文本框中分别输入矩形面的宽度和长度为 SW 和 $-H$ ，如图 6.2.16 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

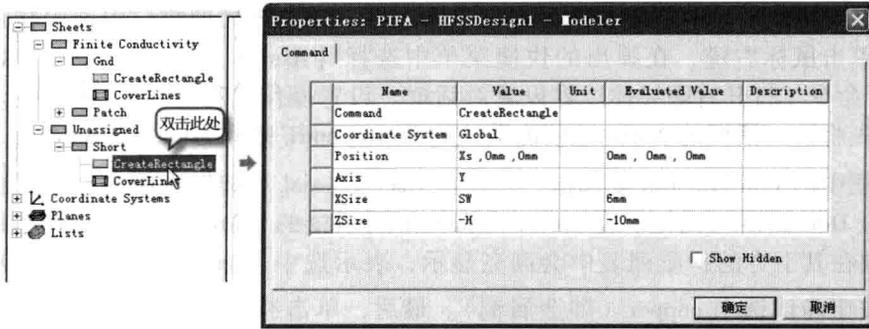


图 6.2.16 Command 选项卡

最后设置短路金属片的边界条件为有限导体边界。单击操作历史树 Sheets 节点下的 Short, 选中该矩形面模型。然后在其上单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Finite Conductivity】命令, 打开有限导体边界设置对话框。设置操作过程与图 6.2.11 所示的过程相似, 首先把该对话框中的 Name 选项由默认的 FiniteCond1 修改为 FiniteCond_Short, 然后选中该对话框中的 Use Material 复选框, 并单击 Use Material 复选框右侧的 **vacuum** 按钮, 打开 Select Definition 对话框。在 Select Definition 对话框的 Search By Name 文本框中输入 copper, 则在其下方的材质列表中会高亮显示, 表示选中了 copper, 此时单击对话框中的 **确定** 按钮确认选中 copper (即金属铜)。最后, 单击有限导体边界设置对话框中的 **OK** 按钮完成设置。此时, 即可把短路金属片 Short 的边界条件设置为有限导体边界, 且有限导体为金属铜。设置完成后, 有限导体边界的名称 FiniteCond_Short 会自动添加到工程树的 Boundaries 节点下。

(4) 创建泡沫支架

创建一个长方体模型用以表示泡沫支架。该模型位于接地平面的正上方, 其大小和接地平面相同。模型的材质使用前面定义的 foam, 并将该模型命名为 Shelf。

在创建接地金属片时, 默认工作平面被设置为 xz 面, 此处需要把工作平面重新设置为 xy 面。单击工具栏上的 **ZX** 下拉列表框, 在其下拉列表中选择 XY 选项, 即可将 xy 平面设置为当前工作平面。然后从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令, 或者单击工具栏上的 **Box** 按钮, 进入创建长方体的状态, 在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1 选项, 打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡。在该选项卡中将长方体的名称修改为 Shelf, 设置 Material 选项对应的材质为 foam, 设置其透明度为 0.6, 如图 6.2.17 所示, 最后单击 **确定** 按钮退出。

再双击操作历史树 Shelf 节点下的 CreateBox 选项, 打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(-X_g, -Y_g, -H)$, 在 XSize、YSize 和 ZSize 文本框中分别输入长方体的长、宽和高为 W_g 、 L_g 和 H , 如图 6.2.18 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

此时就创建好了名为 Shelf 的射频泡沫支架模型。最后, 按快捷键 $Ctrl + D$ 全屏显示创建的所有模型。

(5) 创建同轴馈线

创建 PIFA 天线的同轴馈线, 用于传输信号能量。同轴线的圆心坐标为 $(X_f, Y_f, 0)$,

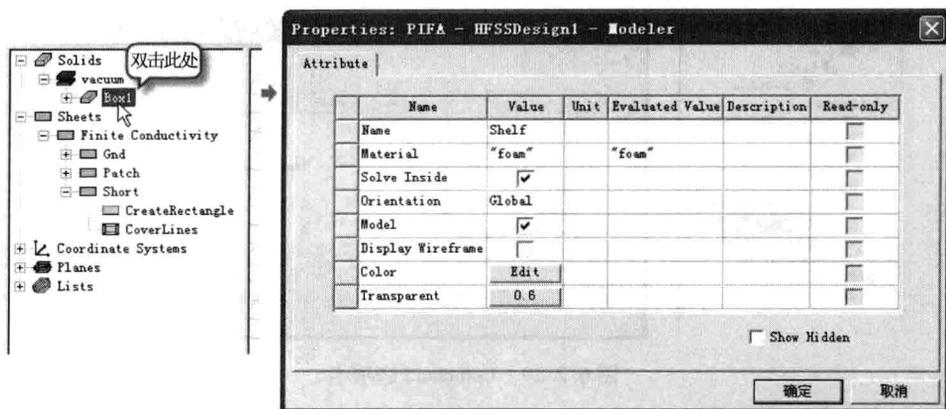


图 6.2.17 Attribute 选项卡

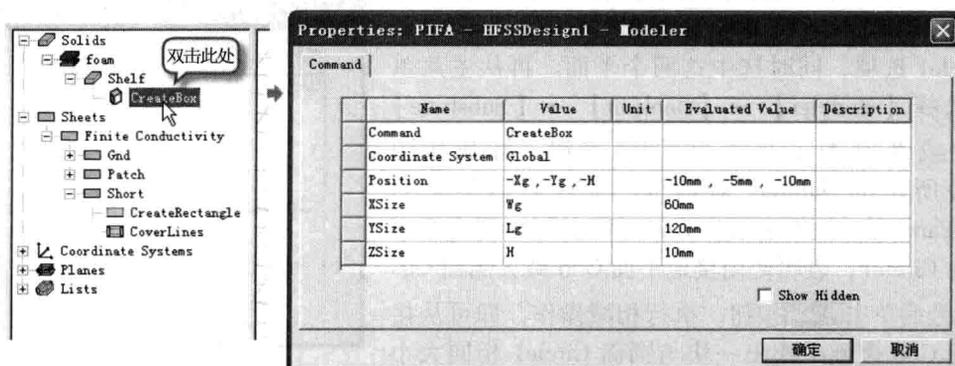


图 6.2.18 Command 选项卡

内径用变量 r_1 表示, 外径用变量 r_2 表示。同轴线的内芯穿过接地平面和辐射贴片相接, 同轴线的外圈和接地平面相接, 内芯总长度为 $(H + H_1)$, 外圈只位于接地平面下方, 其长度为 H_1 。因为同轴线需要穿过接地平面, 所以首先需要在接地平面上开一个半径为 r_2 的圆孔, 然后分别创建半径为 r_1 和 r_2 的圆柱体模型, 用以表示同轴线的内芯和外圈。

① 在接地平面 Gnd 上开半径为 r_2 的圆孔。

要想在接地平面 Gnd 上开一个半径为 r_2 的圆孔, 圆孔圆心坐标为 $(X_f, Y_f, -H)$, 首先需要在接地平面 Gnd 上创建一个圆心坐标为 $(X_f, Y_f, -H)$ 、半径为 r_2 的圆面。然后依次选中接地平面和新建的圆面, 执行相减操作, 这样即可在接地平面 Gnd 上挖出一个与圆面相同大小的圆孔。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Circle】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建圆面的状态, 在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆面。新建的圆面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Circle1。

展开操作历史树 Sheets 下的 Circle1 节点, 再双击 Circle1 节点下的 CreateCircle 选项, 打开新建圆面属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置圆面的圆心坐标和半径。在 Center Position 文本框中输入其圆心坐标为 $(X_f, Y_f, -H)$, 在 Radius 文本框中输入其半径值 r_2 , 如图 6.2.19 所示, 然后单击  按钮, 完成圆面的创建。

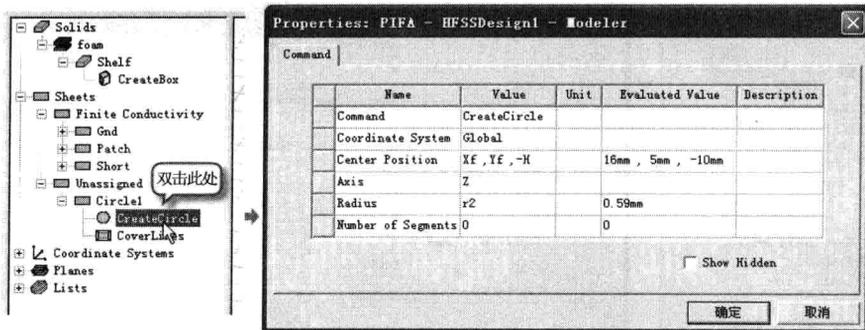


图 6.2.19 Command 选项卡

确认操作历史树 Sheets 节点下的 Finite Conductivity 节点和 Unassigned 节点都是展开的。然后按住 Ctrl 键，先后依次单击操作历史树 Finite Conductivity 节点下的 Gnd 选项和 Unassigned 节点下的 Circle1 选项，同时选中这两个平面。再从主菜单栏中选择【Modeler】→【Boolean】→【Substrate】命令，或者单击工具栏上的  按钮，打开如图 6.2.20 所示的 Subtract 对话框。确认对话框中的 Blank Parts 列表框中显示为 Gnd，Tool Parts 列表框中显示为 Circle1，表明使用接地平面 Gnd 减去圆面 Circle1。最后单击  按钮，执行相减操作，即可从接地平面 Gnd 模型中挖出一块与圆面 Circle1 相同大小的圆孔。

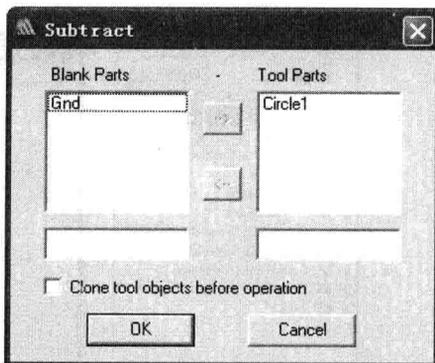


图 6.2.20 相减操作对话框

② 创建同轴馈线的内芯。

创建一个圆柱体，将其作为同轴馈线的内芯，圆柱体的半径为 r_1 ，长度为 $(H + H_1)$ ，圆柱体的顶部与辐射金属片相接，其顶部圆心坐标为 $(X_f, Y_f, 0)$ ，圆柱体的材质为金属铜 (copper)，并将该圆柱体模型命名为 inner。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Cylinder】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进入创建圆柱体的状态，在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆柱体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Cylinder1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Cylinder1 选项，打开新建圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡。在该选项卡中将圆柱体的名称修改为 inner，设置 Material 选项对应的材质为 copper，如图 6.2.21 所示，然后单击  按钮退出。

再双击操作历史树 inner 节点下的 CreateCylinder 选项，打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度。在 Center Position 文本框中输入底面圆心坐标为 $(X_f, Y_f, 0)$ ，在 Radius 文本框中输入半径值 r_1 ，在 Height 文本框中输入长度值 $-(H + H_1)$ ，如图 6.2.22 所示。在输入长度值 $-(H + H_1)$ 并确认后，因为 H_1 是未定义的变量，所以此时会自动弹出如图 6.2.23 所示的变量 H_1 的定义对话框。在该对话框的 Value 文本框中输入 5mm，然后单击  按钮，完成新变量 H_1 的定义，并设置其初始值为 5mm。最后，单击属性对话框 Command 选项卡中的  按钮，完成圆柱体 inner 的创建。

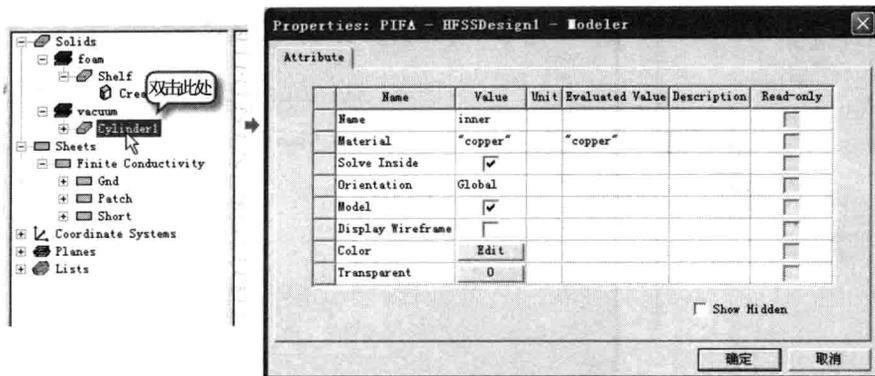


图 6.2.21 Attribute 选项卡

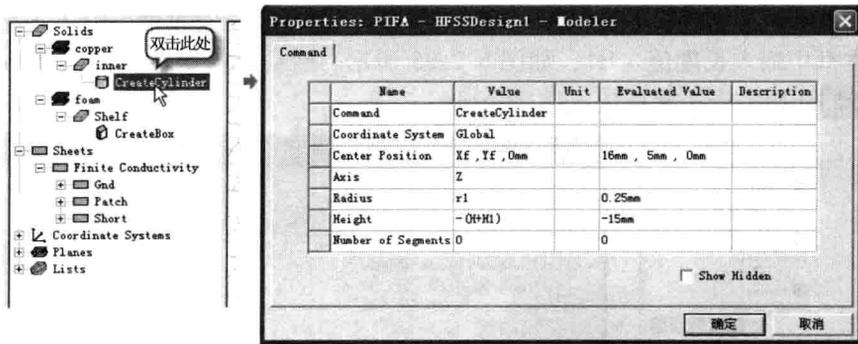


图 6.2.22 Command 选项卡

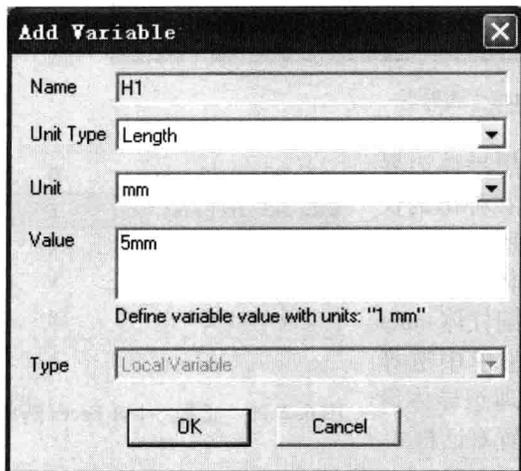


图 6.2.23 变量定义对话框

③ 创建同轴馈线的外圈模型。

创建一个圆柱体，将其作为同轴馈线的外圈。圆柱体的半径为 r_2 ，长度为 H_1 ，圆柱体的顶部与接地平面相接，其顶部圆心坐标为 $(X_f, Y_f, -H)$ ，圆柱体的材质为默认的真空 (vacuum)。然后将该圆柱体模型命名为 *outer*，并设置该圆柱体的侧表面边界条件为理想导体边界。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Cylinder】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进入创建圆柱体的状态，在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆柱体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 *Cylinder1*。

双击操作历史树 Solids 节点下的 *Cylinder1* 选项，打开新建圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡。在该选项卡中将圆柱体的名称修改为 *outer*，设置 Material 选项对应的材质为 vacuum，并设置其透明度为 0.2，如图 6.2.24 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

再双击操作历史树 *outer* 节点下的 *CreateCylinder* 选项，打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度。在 Center Posi-

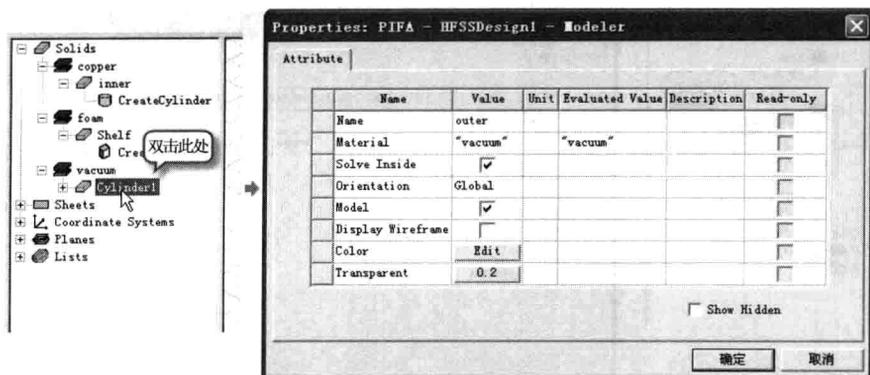


图 6.2.24 Attribute 选项卡

tion 文本框中输入其底面圆心坐标为 $(X_f, Y_f, -H)$, 在 Radius 文本框中输入半径值 r_2 , 在 Height 文本框中输入长度值 $-H_1$, 如图 6.2.25 所示。然后单击属性对话框 Command 选项卡中的 **确定** 按钮, 完成圆柱体 outer 的创建。

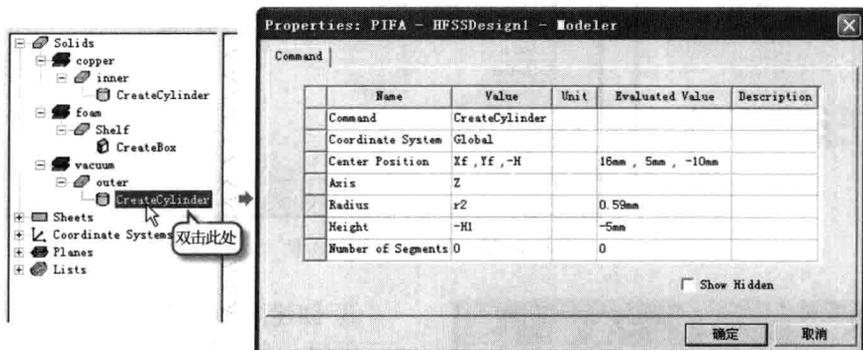


图 6.2.25 Command 选项卡

最后设置该圆柱体侧表面的边界条件为理想导体边界 (pec)。首先在三维模型窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择 Select Faces 选项, 如图 6.2.26 所示, 切换到选择物体表面操作状态。然后旋转和移动物体模型, 使圆柱体 outer 不被其他物体模型遮挡, 单击选中圆柱体 outer 的侧表面, 再单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令, 打开理想导体设置对话框, 如图 6.2.27 所示。保留理想导体设置对话框中的默认设置不变, 直接单击 **OK** 按钮完成设置。此时, 即设置圆柱体 outer 侧表面的边界条件为有理想导体边界。设置完成后, 理想导体边界的名称 PerfE1 也会自动添加到工程树的 Boundaries 节点下。

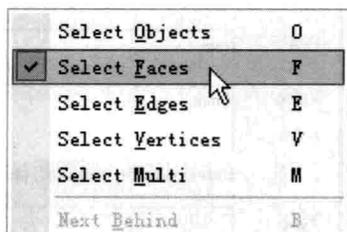


图 6.2.26 选择 Select Faces 选项

至此, 就创建好了 PIFA 天线的设计模型, 如图 6.2.28 所示。接下来, 我们还需要设置端口激励方式和辐射边界条件。

5. 设置激励端口

当前设计的 PIFA 天线是通过同轴线馈电的, 这里使用波端口激励方式, 设置同轴线的底端圆面为波端口激励。

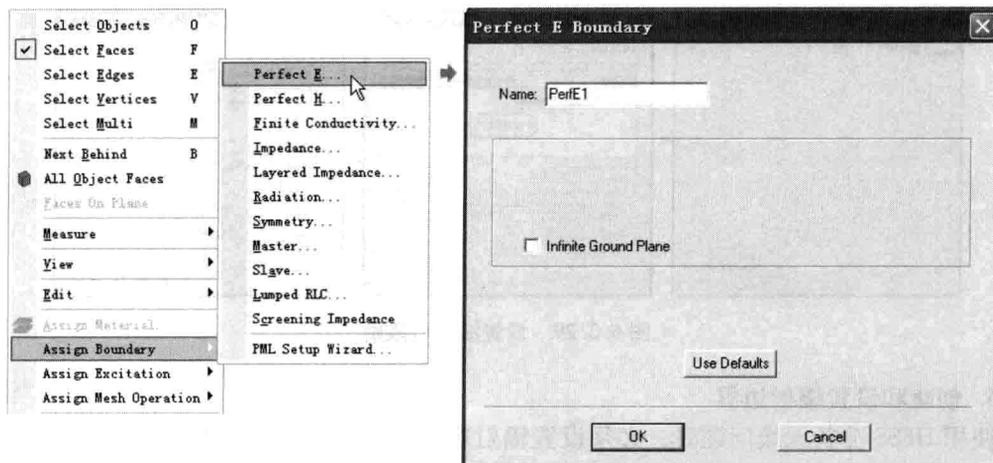


图 6.2.27 设置理想导体边界操作

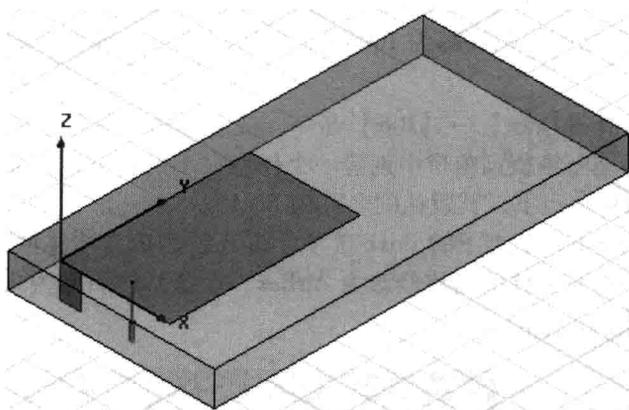


图 6.2.28 同轴线馈电矩形微带天线的设计模型

在三维模型窗口中单击鼠标右键，确认当前处于选择物体表面的操作状态，即确认在弹出的快捷菜单中选中的是 Select Faces 选项。执行旋转、移动和放大等操作，使圆柱体 outer 底面不被其他物体模型遮挡，并放大圆柱体 outer 底面，再单击选中圆柱体 outer 的底面。然后在三维模型窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Excitation】→【Wave Port】命令，打开波端口设置对话框。在该对话框的 Name 文本框中输入端口名称 P1，单击 **下一步(N) >** 按钮。在 Modes 对话框中单击 Integration Line 下面的 None，在其下拉列表中选择 New Line 选项，进入三维模型窗口中设置端口的积分线。在三维模型窗口右下侧状态栏的 X、Y、Z 文本框中输入积分线起始点坐标 (16.25, 5, -15)，按 Enter 键确认。紧接着在状态栏的 dX、dY、dZ 文本框中输入相对坐标 (0.34, 0, 0)，并再次按 Enter 键确认，完成积分线的设置，返回到 Modes 对话框。此时，Modes 对话框中的 Integration Line 选项由 None 变成 Defined，再次单击 **下一步(N) >** 按钮。在打开的 Post Processing 对话框中选中 Renormalized All Modes 单选按钮，并设置 Full Port Impedance 选项为 50ohm。最后单击 **完成** 按钮，完成波端口激励方式的设置，如图 6.2.29 所示。设置完成后，波端口激励的名称 P1 会自动添加到工程树的 Excitations 节点下。

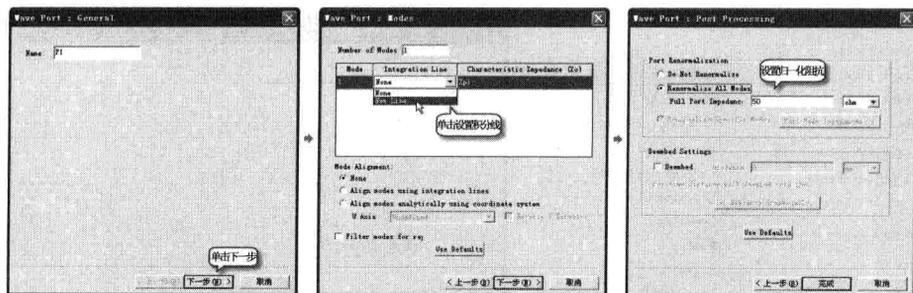


图 6.2.29 设置波端口激励

6. 创建和设置辐射边界

使用 HFSS 分析天线问题时, 必须设置辐射边界条件, 且辐射表面和天线的距离需要不小于 $1/4$ 个工作波长。对于 920MHz 的中心频率, 其自由空间的 $1/4$ 个工作波长约为 81.5mm。本设计中, 设置一个长方体模型的表面为辐射表面, 且辐射表面和 PIFA 天线模型的距离为 100mm。在设计中, 首先创建一个长方体模型 AirBox, 并且使该长方体的各个表面和 PIFA 天线模型之间的距离都为 100mm, 然后将该长方体模型的全部表面都设置为辐射边界条件。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建长方体的状态, 然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1 选项, 打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡。在该选项卡中将长方体的名称修改为 AirBox, 设置其透明度为 0.8, 如图 6.2.30 所示, 然后单击  按钮退出。

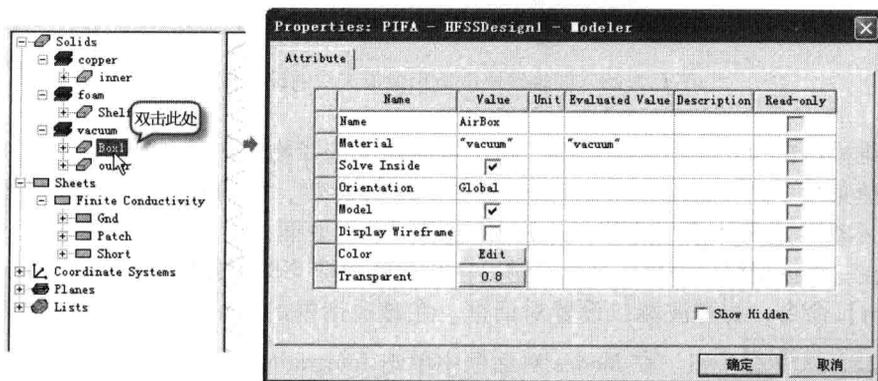


图 6.2.30 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 AirBox 节点下的 CreateBox 选项, 打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(-X_g - 100\text{mm}, -Y_g - 100\text{mm}, -H - 100\text{mm})$, 在 XSize、YSize 和 ZSize 文本框中分别输入长方体的宽度、长度和高度为 $W_g + 200\text{mm}$ 、 $L_g + 200\text{mm}$ 和 $H + 200\text{mm}$, 如图 6.2.31 所示, 然后单击  按钮退出。

长方体模型 AirBox 创建好之后, 鼠标右键单击操作历史树下的 AirBox 选项, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Radiation】命令, 打开辐射边界条件设置对话框,

如图 6.2.32 所示。保留辐射边界条件设置对话框中的默认设置不变，直接单击对话框中的 **OK** 按钮，即可把长方体模型 AirBox 的所有表面都设置为辐射边界条件。

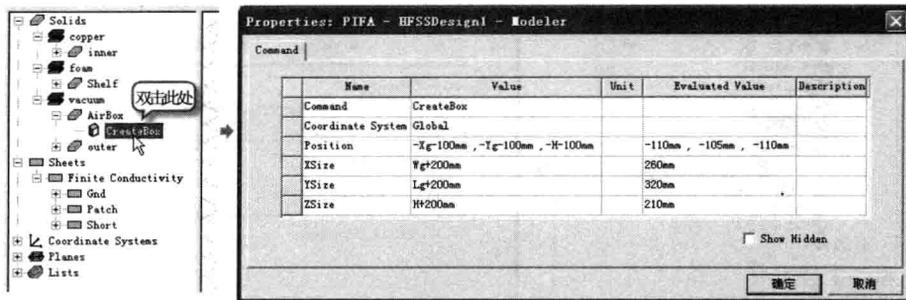


图 6.2.31 Command 选项卡

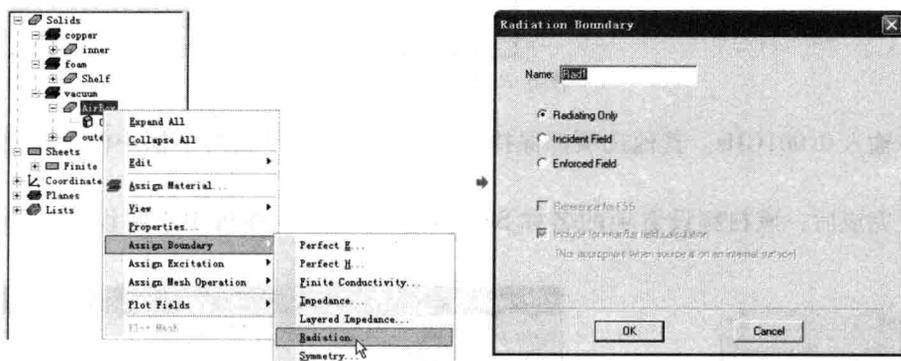


图 6.2.32 辐射边界条件设置对话框

最后，按快捷键 Ctrl + D 全屏显示已创建的所有物体模型。

7. 求解设置

本节中所设计的 PIFA 天线工作于 GSM 900 频段，工作频率范围为 880MHz ~ 960MHz，其中心频率为 920MHz，所以求解频率可以设置为 920MHz。同时，添加频率范围为 500MHz ~ 1500MHz 的扫频设置，选择插值（Interpolating）扫频类型。

(1) 求解频率和网格剖分设置

设置求解频率为 0.92GHz，自适应网格剖分的最大迭代次数为 15，收敛误差为 0.02。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add Solution Setup】命令，打开 Solution Setup 对话框。在 Solution Frequency 文本框中输入求解频率 0.92GHz，在 Maximum Number of Passes 文本框中输入最大迭代次数 15，在 Maximum Delta S 文本框中输入收敛误差 0.02，其他选项保持默认设置，如图 6.2.33 所示。然后单击 **确定** 按钮，完成设置。

设置完成后，求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

(2) 扫频设置

扫频类型选择为插值扫频，扫频频率范围为 0.5GHz ~ 1.5 GHz，频率步进为 0.001GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点，鼠标右键单击求解设置项 Setup1，在弹出的快捷菜单中选择【Add Frequency Sweep】命令，打开 Edit Sweep 对话框，如图 6.2.34 所示。在 Sweep Type 下拉列表中选择扫描类型为 Interpolating。在 Frequency Setup 的 Type 下拉列表中选择 LinearStep，在 Start 文本框中输入 0.5GHz，在 Stop 文本框中输入 1.5GHz，在 Step Size

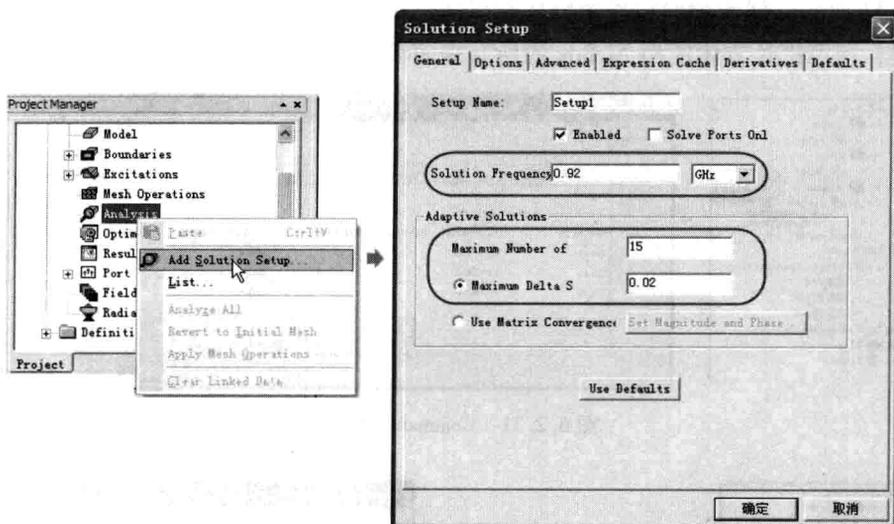


图 6.2.33 求解设置

文本框中输入 0.001GHz。其他选项都保持默认设置不变，单击对话框中的 **OK** 按钮，完成设置。

设置完成后，该扫频设置项的名称 Sweep1 会添加到工程树中求解设置项 Setup1 节点下。

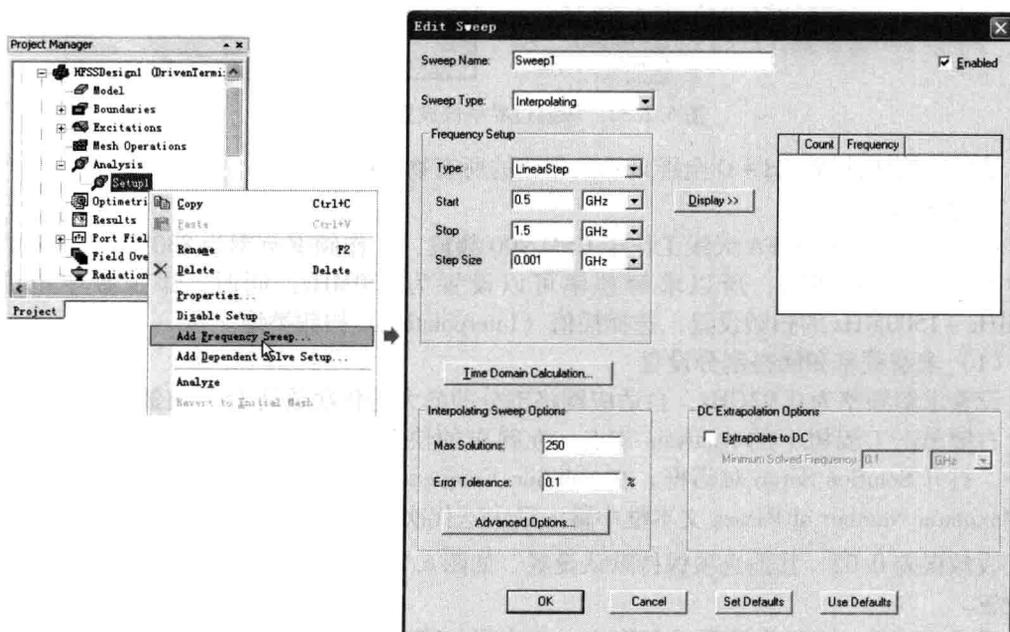


图 6.2.34 扫频设置对话框

8. 设计检查

通过前面的操作，我们已经完成了模型创建和求解设置等 HFSS 设计的前期工作，接下来就可以运行仿真计算并查看分析结果了。但在运行仿真计算之前，通常需要进行设计检查，确认设计的完整性和正确性。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令，或者单击工具栏上的按钮，进行设计检查。此时，会打开如图 6.2.35 所示的 Validation Check 对话框，该对话框中的每一个选项的前面都显示图标，表示当前的 HFSS 设计正确且完整。然后单击按钮，关闭对话框。接下来，我们就可以开始运行仿真计算。

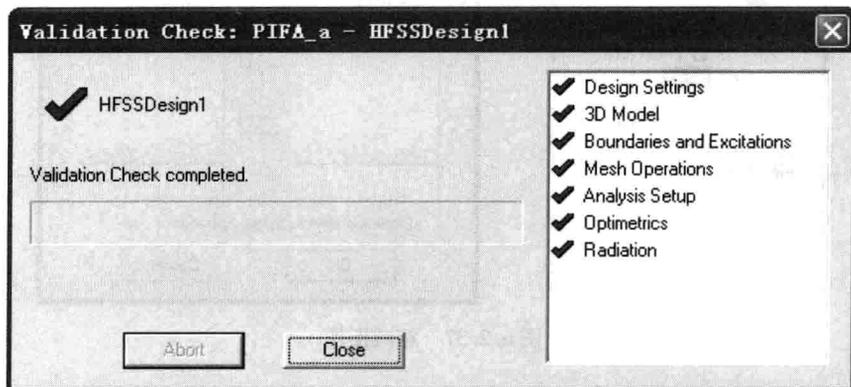


图 6.2.35 设计检查结果对话框

9. 运行仿真分析并解决错误信息

鼠标右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze All】命令，或者单击工具栏上的按钮，开始运行仿真计算。

(1) 解决模型重叠的错误

虽然设计检查没有错误和警告信息，但运行仿真时会在信息管理窗口中弹出如图 6.2.36 所示的错误提示信息，同时自动终止仿真计算。根据错误提示信息可以知道，错误的原因在于同轴线内芯模型 inner 分别与模型 Shelf、模型 outer 重叠了。对于此类错误，我们可以使用相减操作，分别把模型 Shelf、模型 outer 与模型 inner 的重叠部分挖去。

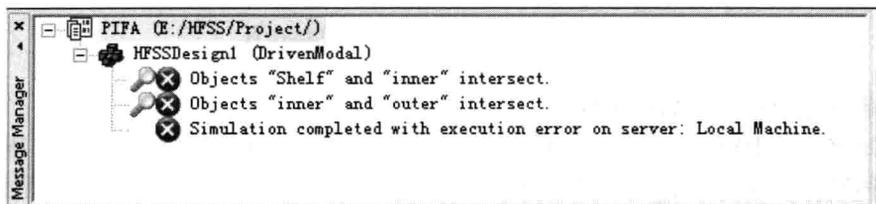


图 6.2.36 信息管理窗口中的错误信息

按住 Ctrl 键，按先后顺序依次选中 Solids 节点下的 Shelf、outer 和 inner 三个模型，然后从主菜单栏中选择【Modeler】→【Boolean】→【Substrate】命令，或者单击工具栏上的按钮，打开相减操作 (Substrat) 对话框，如图 6.2.37 所示。在 Subtract 对话框中选中 Tool Parts 列表框中的 outer 选项，然后单击按钮，将 outer 从 Tool Parts 列表框中移动到 Blank Parts 列表框中。确认 Blank Parts 列表框中显示的是 Shelf 和 outer，Tool Parts 列表框中显示的是 inner，表示分别挖去模型 Shelf 和模型 outer 与同轴线内芯模型 inner 重叠的部分。同时，为了保留模型 inner 本身，还需要选中该对话框下方的 Clone tool objects before operation 复选框。设置完成后，单击对话框中的按钮，完成相减操作。

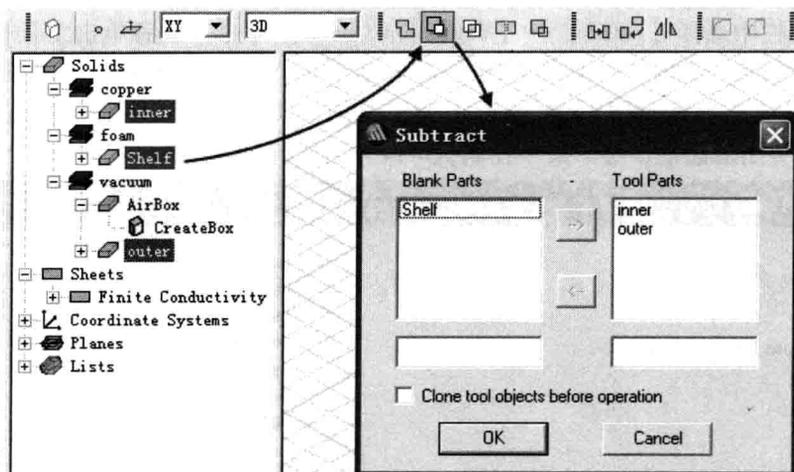


图 6.2.37 相减操作

然后在信息管理窗口的错误信息处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Clear Messages from HFSSDesign1】命令，清除信息管理窗口中的错误信息。完成后，再次单击工具栏上的按钮，运行仿真分析。此时，前面的模型 Shelf、模型 outer 和模型 inner 重叠的错误信息已经解决，但是在信息管理窗口中又出现了如图 6.2.38 所示的错误信息，即“Port refinement, process hf3d error: Port P1 is assigned to an internal face. Only allowed with lumped ports.”。该错误信息是指前面定义的激励端口 P1 不正确。

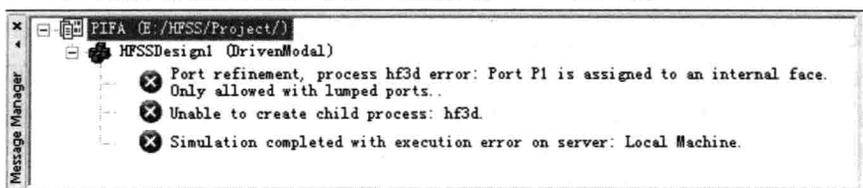


图 6.2.38 信息管理窗口中的错误信息

(2) 解决激励端口设置的错误

我们知道，在 HFSS 中波端口激励 (Wave Port) 和集总端口激励 (Lumped Port) 是最常用的两种激励方式。两者的最主要区别是波端口激励的端口面通常位于模型的背景面上，而集总端口激励的端口面通常位于模型的内部。如果在模型内部使用波端口激励，则需要波端口平面上信号进出的一侧添加一段理想导体，这样 HFSS 就可以知道激励信号的方向了。在当前设计中，激励端口位于模型内部，而我们设置的又是波端口激励方式，所以出现了如图 6.2.38 所示的错误信息。对于这一错误，我们有两个解决办法，一是删除先前的波端口设置，重新设置其为集总端口激励；二是保留先前的波端口设置，在波端口面不同于同轴线的一侧添加一段理想导体，添加的理想导体截面和波端口面大小一致。这里，我们采用第二种方式来解决错误问题，即在同轴线底端波端口面下方添加一段理想导体圆柱。

接下来，我们就来创建一个理想导体圆柱体，圆柱体的半径为 r_2 ，长度为 2mm，圆柱体的顶部与波端口面相接，其顶部圆心坐标为 $(X_f, Y_f, -(H + H_1))$ ，材质为理想导体 (pec)，并将该圆柱体模型命名为 CapLoad。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Cylinder】命令，或者单击工具栏上的按钮，进入创建圆柱体的状态，在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆柱体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Cylinder1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Cylinder1 选项，打开新建圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡。在该选项卡中将圆柱体的名称修改为 CapLoad，设置 Material 选项对应的材质为 pec，如图 6.2.39 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

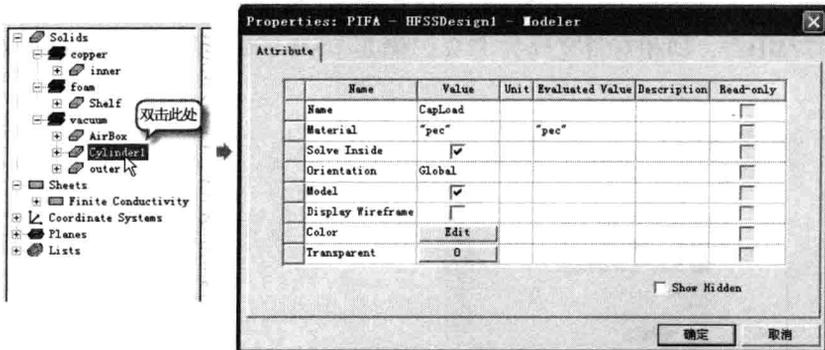


图 6.2.39 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 CapLoad 节点下的 CreateCylinder 选项，打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度。在 Center Position 文本框中输入其底面圆心坐标为 $(Xf, Yf, -(H + H1))$ ，在 Radius 文本框中输入半径值 $r2$ ，在 Height 文本框中输入长度值 -2mm ，如图 6.2.40 所示。最后单击属性对话框的 Command 选项卡中的 **确定** 按钮，完成圆柱体 CapLoad 的创建。

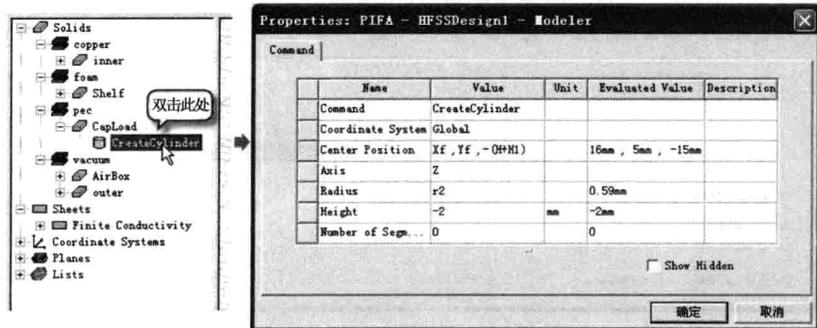


图 6.2.40 Command 选项卡

完成在波端口面下方添加一段理想导体圆柱后，再次单击工具栏上的按钮，运行仿真分析。此时，信息管理窗口中没有出现错误提示信息，HFSS 仿真计算正常运行。

10. 查看 PIFA 天线仿真结果

仿真计算完成后，在数据后处理部分能够查看 PIFA 天线各项性能参数的仿真分析结果。这里我们重点查看设计的 PIFA 天线的谐振频率、带宽、输入阻抗、增益方向图和辐射贴片的电流分布。

(1) 查看天线的谐振频率

通过查看天线的回波损耗（即 S_{11} 参数），可以看出天线的谐振频率和带宽。鼠标右键

单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令, 打开报告设置对话框, 如图 6.2.41 所示。在该对话框中确定左侧的 Solution 选项选择的是 Setup1:Sweep1 选项, 在 Category 列表框中选中 S Parameter 选项, 在 Quantity 列表框中选中 S(P1,P1) 选项, 在 Function 列表框中选中 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮, 再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时, 即可生成如图 6.2.42 所示的在 0.5GHz ~ 1.5GHz 的回波损耗 S_{11} 分析结果。

从结果报告中可以看出, 天线谐振频率约为 0.92GHz, 10dB 带宽约为 101MHz (876MHz ~ 977MHz), 即相对带宽约为 11%。满足 GSM 900 频段 (880MHz ~ 960MHz) 的工作要求。

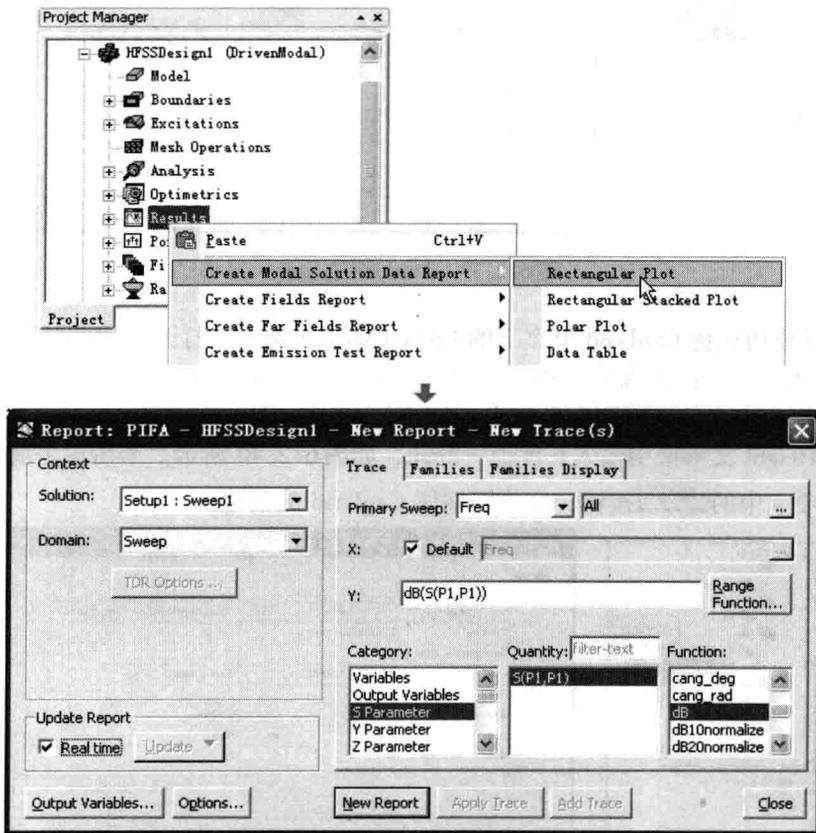


图 6.2.41 查看 S_{11} 分析结果的设置

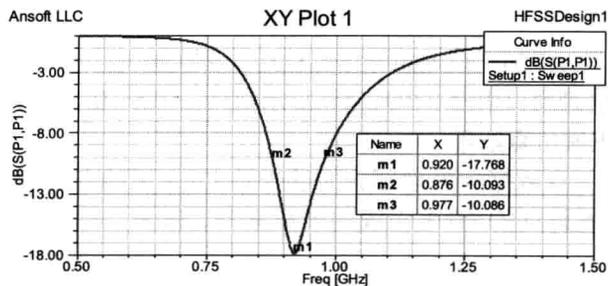


图 6.2.42 回波损耗 S_{11} 的扫频分析结果

(2) 查看天线的输入阻抗

在直角坐标系下和 Smith 圆图下分别查看天线的输入阻抗随频率的变化关系。

鼠标右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令, 打开报告设置对话框。在该对话框中, Solution 选项同样选择 Setup1:Sweep1 选项, 在 Category 列表框中选中 Z Parameter 选项, 在 Quantity 列表框中选中 Z(P1,P1) 选项, 在 Function 列表框中同时选中 im 和 re 选项, 表示同时查看输入阻抗的实部 (即电阻部分) 和虚部 (即电抗部分), 如图 6.2.43 所示。然后单击 **New Report** 按钮, 再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时, 给出如图 6.2.44 所示的天线输入阻抗结果报告。从结果报告中可以看出, 在 0.92GHz 中心频率时, 天线的输入阻抗为 $(40 + j6)\Omega$ 。

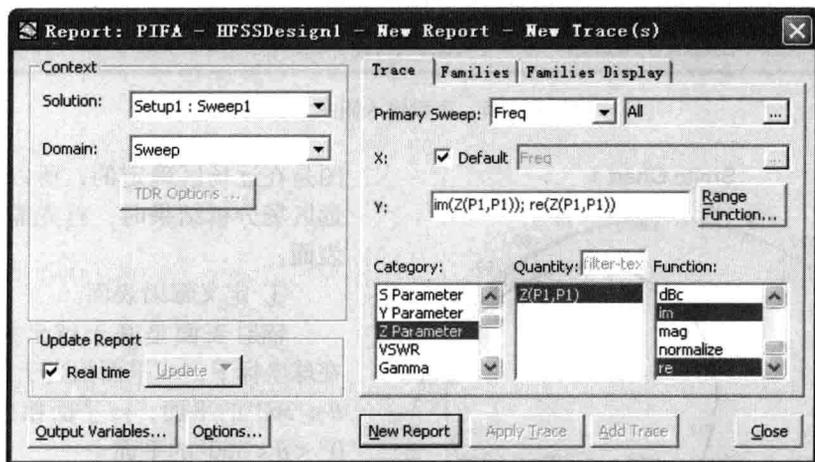


图 6.2.43 查看输入阻抗的设置

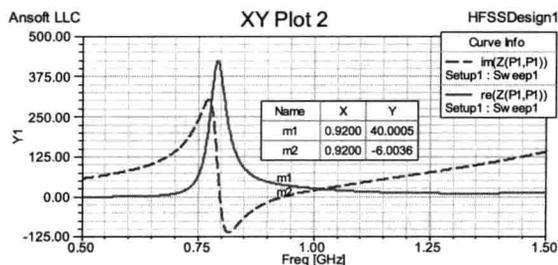


图 6.2.44 输入阻抗结果报告

再用鼠标右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中依次选择【Create Modal Solution Data Report】→【Smith Chart】命令, 打开如图 6.2.45 所示的报告设置对话框。在该对话框中, Solution 选项同样选择 Setup1:Sweep1, 在 Category 列表框中选中 S Parameter 选项, 在 Quantity 列表框中选中 S(P1,P1), 在 Function 列表框中选择 < none > 选项。然后单击 **New Report** 按钮, 再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时, 给出如图 6.2.46 所示的使用 Smith 圆图显示的天线归一化输入阻抗结果报告。

(3) 查看天线的方向图

这里, 我们分别查看设计的 PIFA 天线在 xz 和 yz 截面的总增益方向图。因为天线方向

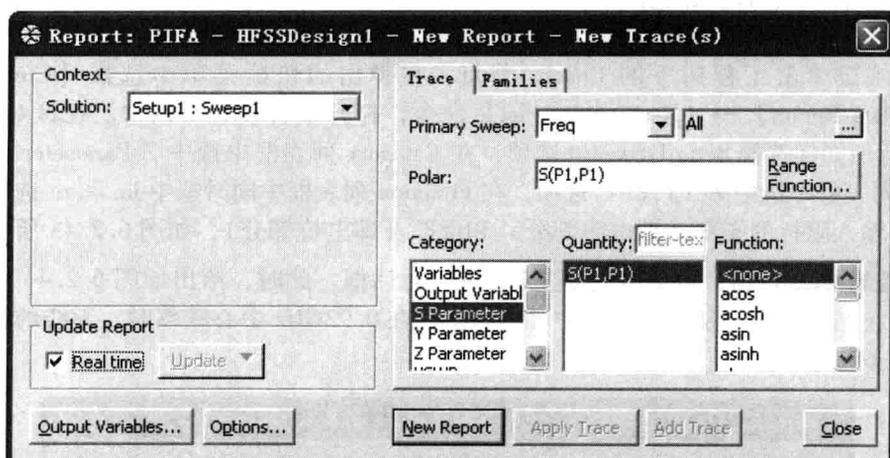


图 6.2.45 查看输入阻抗的设置

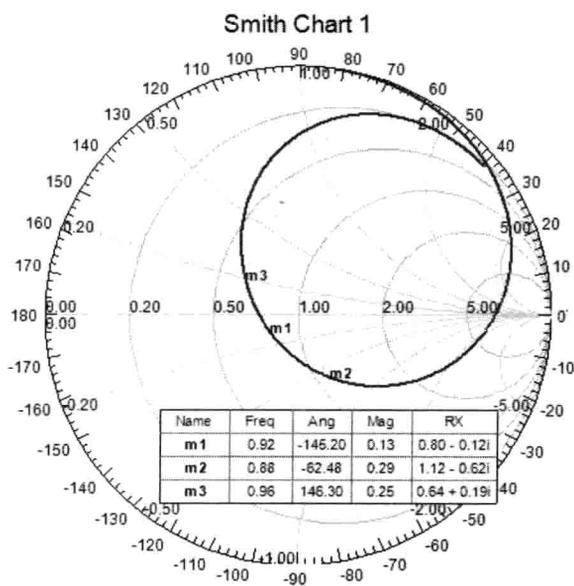


图 6.2.46 Smith 圆图显示的归一化输入阻抗结果报告

图是在远场区确定的，所以查看天线的远区场分析结果时，首先需要定义辐射表面。

① 定义辐射表面。

辐射表面是基于球坐标系定义的，在球坐标下， xz 平面相当于 $\varphi = 0^\circ$ ， $0^\circ < \theta < 360^\circ$ 的平面， yz 平面相当于 $\varphi = 90^\circ$ ， $0^\circ < \theta < 360^\circ$ 的平面。

定义辐射表面为 xz 平面和 yz 平面的具体操作如下。

用鼠标右键单击工程树下的 Radiation 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Insert Far Field Setup】→【Infinite Sphere】命令，打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框，定义辐射表面，如图 6.2.47 所示。在 Name 文本框中输入辐射表面 Plane，在 Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入

0deg、90deg 和 90deg，在 Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、360deg 和 1deg，然后单击 **确定** 按钮完成设置。此时，定义的辐射表面名称 Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

② 查看 xz 、 yz 截面的增益方向图。

用鼠标右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Radiation Pattern】命令，打开报告设置对话框，如图 6.2.48 所示。在 Geometry 下拉列表中选择前面定义的辐射表面 Plane，在 Category 列表框中选择 Gain 选项，在 Quantity 列表框中选择 GainTotal 选项，在 Function 列表框中选择 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮，生成 PIFA 天线的增益方向图分析结果，如图 6.2.49 所示。

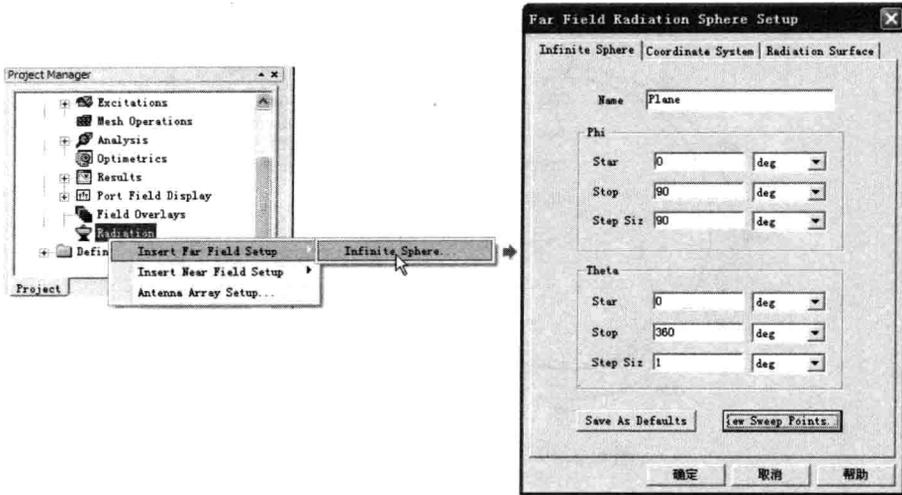


图 6.2.47 定义辐射表面

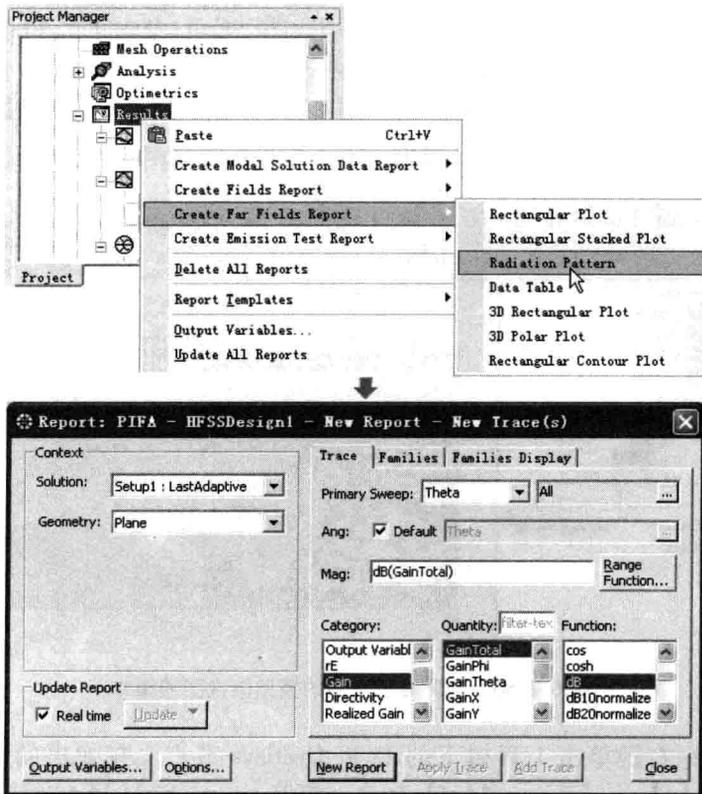


图 6.2.48 查看 E 面增益方向图的设置

从图 6.2.49 所示的分析结果中可以看出，设计的 PIFA 天线在辐射金属片的正上方增益最大，最大增益约为 3.45dB。而在辐射金属片的背面，天线增益远小于辐射金属片正面方向的增益，这里辐射金属片正上方的增益约为 3.45dB，而正下方的增益只有 0.45dB。因此，采用 PIFA 天线可以有效地降低 SAR 值。对于 SAR 值有较为严格要求的手机来说，适合采用 PIFA 天线。

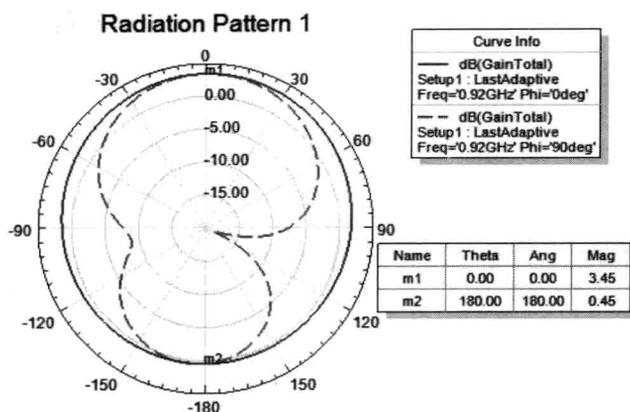


图 6.2.49 PIFA 天线的增益方向图

(4) 辐射金属片表面电流分布

最后, 我们来查看辐射金属片表面电流的分布。要想查看辐射金属片表面电流的分布, 首先需要选中辐射金属片 Patch。展开操作历史树 Sheets 节点下的 Finite Conductivity 节点, 单击该节点下的 Patch 选项, 即可选中辐射金属片 Patch。选中 Patch 后, 按住 Alt 键, 同时在三维模型窗口的上方中央位置处双击鼠标左键, 显示模型的俯视图。然后单击工具栏上的  按钮, 全屏显示选中的物体模型。整个操作过程如图 6.2.50 所示。

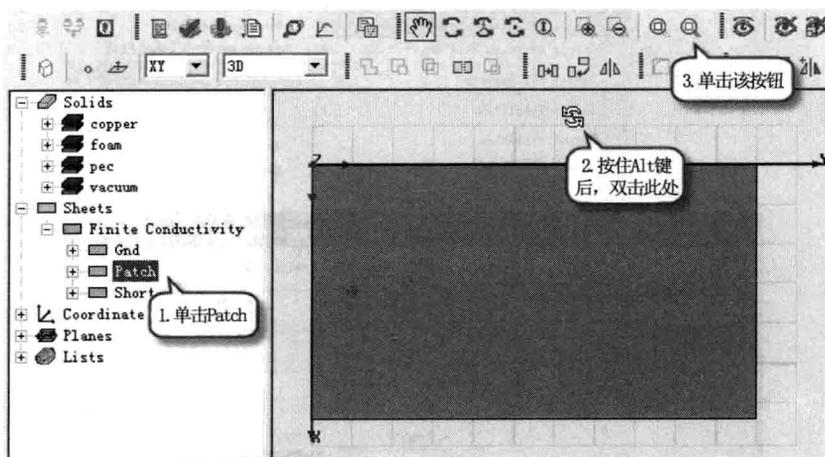


图 6.2.50 全屏显示选中的模型俯视图的操作

然后, 用鼠标右键单击工程树下的 Field Overlays 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Plot Fields】→【J】→【Vector Js surf】命令, 打开 Create Field Plot 对话框, 如图 6.2.51 所示。单击该对话框中的 **Done** 按钮, 即可在选中的辐射金属片上显示出其表面电流分布, 电流分布结果如图 6.2.52 所示。

仔细观察图 6.2.51 所示的 Create Field Plot 对话框的参数设置, 我们可以发现 Intrinsic Variables 选项组中的 Phase 选项默认设置为 0deg, 表示我们所查看的电流分布是基于激励信号相位为 0deg 时的电流分布结果, 而实际上激励信号是一个时变信号, 其相位在 0deg ~ 360deg 之间随时间周期性地变化着, 所以实际上辐射金属片的表面电流也会是随时间周期

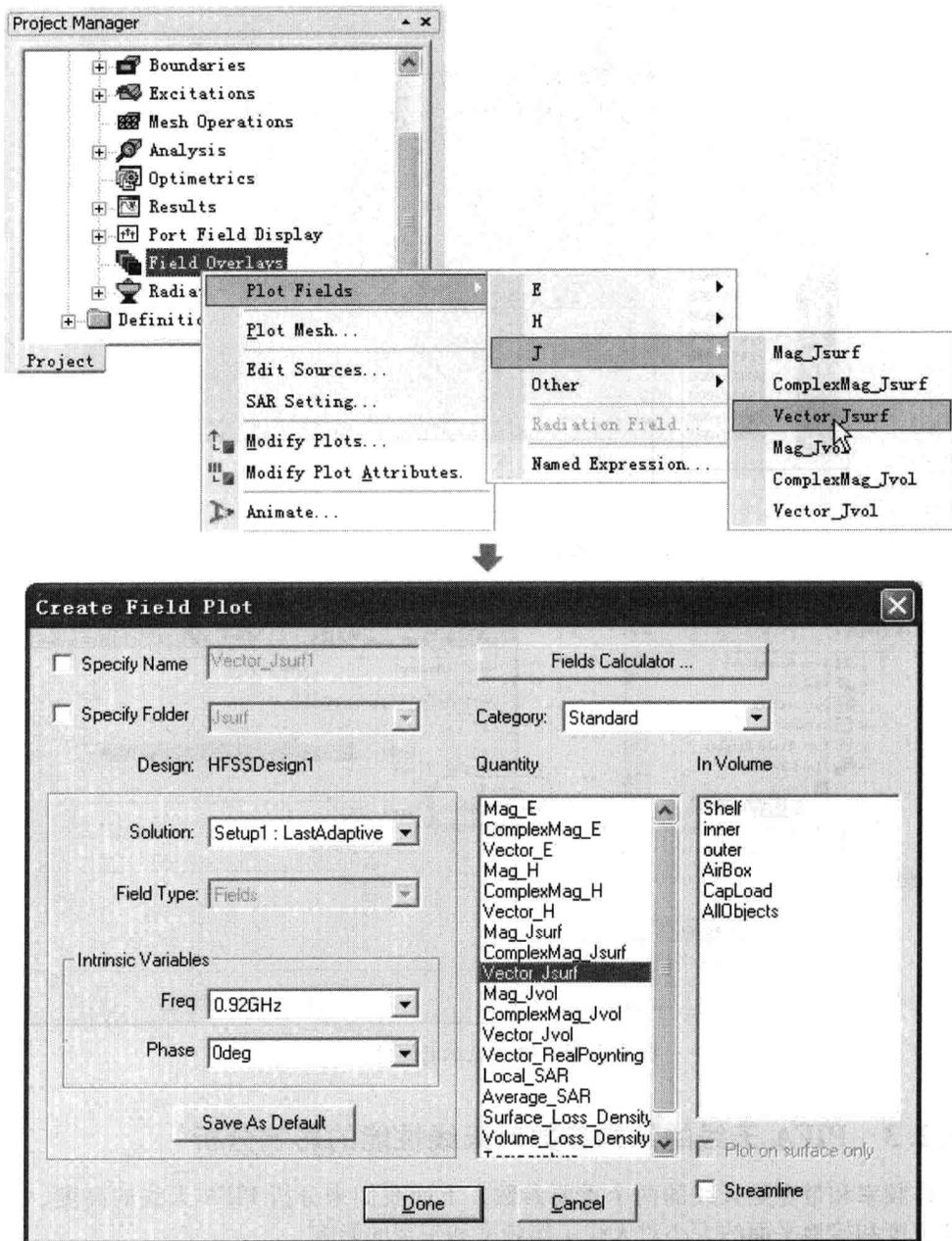


图 6.2.51 Create Field Plot 对话框

性变化着的。在 HFSS 中可以显示出随着激励信号动态变化的电流分布。具体操作方法是，首先双击工程树 Field Overlays 节点下的 Jsrf，确认在三维模型窗口中显示出辐射金属片的表面电流分布。再用鼠标右键单击 Jsrf 节点下的 Vevtor_Jsurf1 选项，在弹出的快捷菜单中选择【Animate】命令，打开动态显示设置（Setup Animation）对话框，如图 6.2.53 所示。确认该对话框中的 Swept Variables 选择的是 Phase 选项，其他选项保持默认设置，然后单击 **OK** 按钮，完成动态显示操作。此时在三维模型窗口中，辐射金属片表面会显示出电流分布随着激励信号相位变化的动态图形。

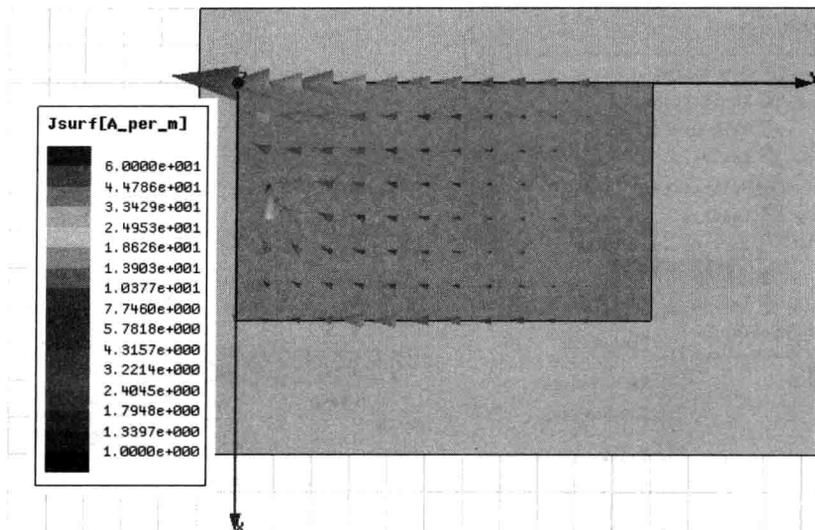


图 6.2.52 电流分布结果

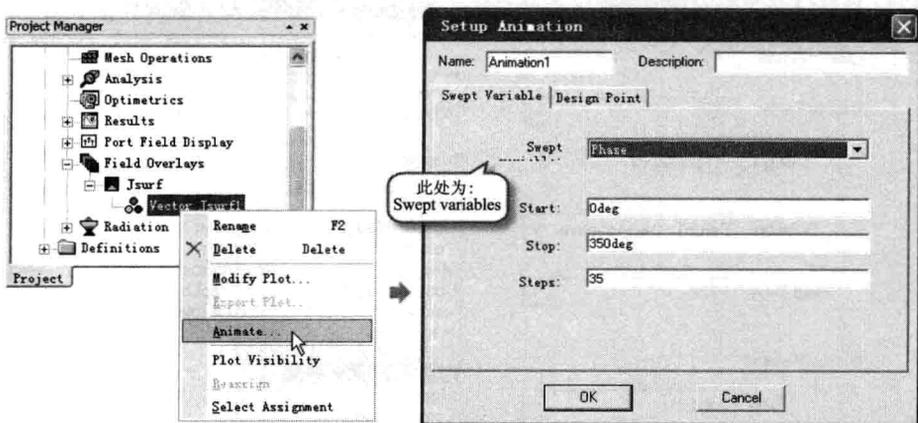


图 6.2.53 动态显示电流分布设置

6.2.3 PIFA 天线的结构参数对天线性能的影响分析

工作频率和带宽是天线的两个重要参数，下面我们来分析 PIFA 天线的高度、短路金属片的宽度和接地平面的大小对天线工作频率和带宽的影响。

1. 高度 H 对 PIFA 天线工作频率和带宽的影响

添加 PIFA 天线的高度变量 H 为扫描变量，使用参数扫描分析功能仿真分析给出当变量 H 在 8mm ~ 12mm 范围内变化时，天线谐振频率和带宽的变化。

(1) 添加扫描变量

用鼠标右键单击工程树下的 Optimetrics 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令，打开 Setup Sweep Analysis 对话框。单击该对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add/Edit Sweep 对话框，如图 6.2.54 所示。在 Add/Edit Sweep 对话框的 Variable 下拉列表中选择变量 H，接着选中 Linear step 单选按钮，在 Start、Stop 和 Step 文本框中分别输入 8mm、12mm 和 2mm，然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后，单击 **OK** 按钮，关闭

Add/Edit Sweep 对话框。最后，单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮，完成添加参数扫描操作，添加变量 H 为扫描变量。

完成后，参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认的名称为 ParametricSetup1。

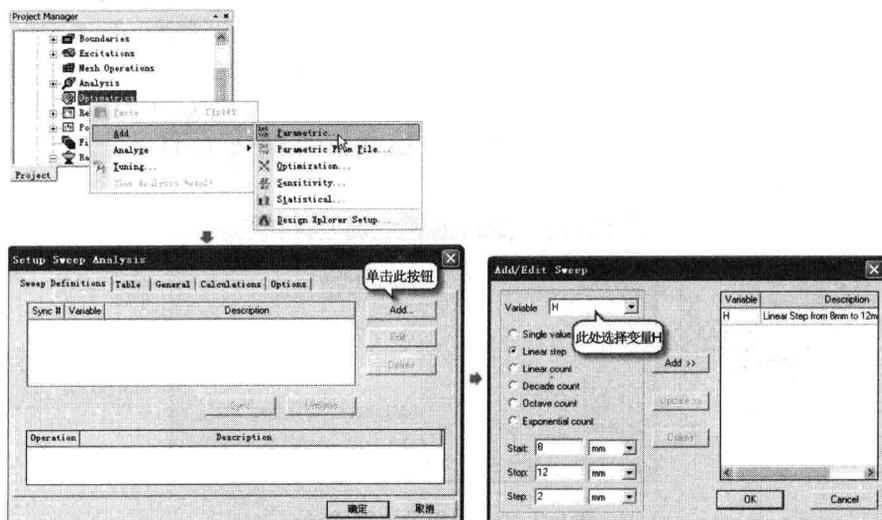


图 6.2.54 添加参数扫描分析

(2) 运行参数扫描分析

展开工程树下的 Optimetrics 节点，用鼠标右键单击 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup1 选项，在弹出的快捷菜单中选择 **【Analyze】** 命令，运行参数扫描分析，如图 6.2.55 所示。

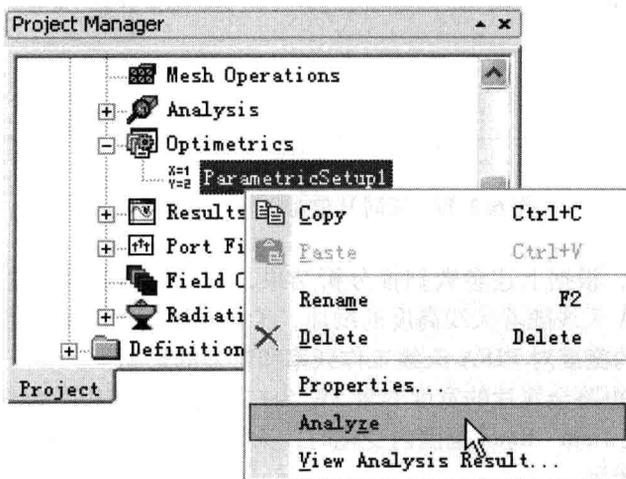


图 6.2.55 运行参数扫描分析

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后，我们可以通过查看回波损耗 S_{11} 的扫频曲线来给出 PIFA 天线在不同的高度 H 下的工作频率和带宽。在此，不重新生成新的 S_{11} 扫频结果报告，而是在 6.2.2 节“10. 查看 PIFA 天线仿真结果”部分生成的 S_{11} 扫频结果报告 XY Plot 1 的基础上更新生成此次参数扫描结果。

展开工程树下的 Results 节点, 在 Results 节点下找到 XY Plot 1 并展开, 然后双击 XY Plot 1 节点下的 $\text{dB}(S(P1, P1))$ 选项, 打开报告设置对话框。再单击报告设置对话框中的 Families 选项卡。在 Families 选项卡中单击变量 H 右侧的 \dots 按钮, 如图 6.2.56 所示, 在弹出的对话框中选中 Use all values 复选框。最后单击 **Apply Trace** 按钮, 更新结果报告 XY Plot 1, 生成 H 值分别为 8mm、10mm 和 12mm 时的 S_{11} 随频率变化曲线, 如图 6.2.57 所示。从参数扫描分析结果中可以看出, H 值分别为 8mm、10mm 和 12mm 时, 对应的谐振频率分别约为 0.95GHz、0.92GHz 和 0.89GHz; 对应的 10dB 带宽分别为 917MHz ~ 978MHz (即相对带宽约为 6.4%)、876MHz ~ 977MHz (即相对带宽约为 11.0%) 和 846MHz ~ 951MHz (即相对带宽约为 11.8%)。

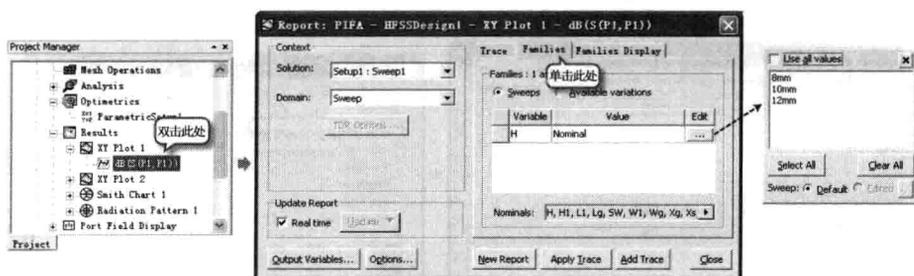


图 6.2.56 报告设置对话框

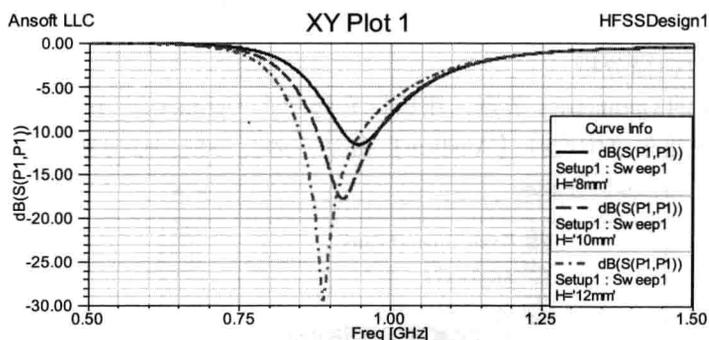


图 6.2.57 不同 H 值对应的 S_{11} 扫频曲线

对于 PIFA 天线, 根据上述参数扫描分析结果, 可以得出的结论是, 在其他参数保持不变的情况下, PIFA 天线随着天线高度的增加, 工作频率逐渐降低, 带宽逐渐增大。

2. 短路金属片的宽度对 PIFA 天线工作频率和带宽的影响

添加 PIFA 天线短路金属片的宽度变量 SW 为扫描变量, 使用参数扫描分析功能仿真分析给出当变量 SW 在 4mm ~ 8mm 范围内变化时, 天线谐振频率和带宽的变化。

(1) 添加扫描变量

使用和前面相同的操作方法, 添加变量 SW 为扫描变量。即用鼠标右键单击工程树下的 Optimetrics 节点, 在弹出的快捷菜单中选择 **【Add】** → **【Parametric】** 命令, 打开 Setup Sweep Analysis 对话框。再单击该对话框中的 **Add...** 按钮, 打开 Add/Edit Sweep 对话框, 整个过程与图 6.2.54 所示的过程一致。在 Add/Edit Sweep 对话框的 Variable 下拉列表中选择变量 SW, 选中 Linear step 单选按钮, 在 Start、Stop 和 Step 文本框中分别输入 4mm、8mm 和 2mm, 然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后, 单击 **OK** 按钮, 关闭 Add/Edit

Sweep 对话框。最后，单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮，完成添加参数扫描操作，添加 SW 为扫描变量。

完成后，参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下，其默认的名称为 ParametricSetup2。

(2) 运行参数扫描分析

用鼠标右键单击工程树中 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup2 选项，在弹出的快捷菜单中选择 **【Analyze】** 命令，运行参数扫描分析。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后，继续通过查看回波损耗 S_{11} 的扫频曲线，给出 PIFA 天线在变量 SW 为不同取值下的谐振频率和带宽。在此，还是在前面生成的 S_{11} 扫频结果报告 XY Plot 1 的基础上更新生成此次参数扫描结果。

双击工程树 XY Plot 1 节点下的 dB(S(P1,P1)) 选项，打开报告设置对话框，再单击报告设置对话框中的 Families 选项卡。在 Families 选项卡界面，首先单击变量 H 右侧的 **...** 按钮，在弹出的对话框中选中 10mm 选项。然后单击变量 SW 右侧的 **...** 按钮，在弹出的对话框中选中 Use all values 复选框，如图 6.2.58 所示。最后单击 **Apply Trace** 按钮，更新结果报告 XY Plot 1，生成变量 SW 值分别为 4mm、6mm 和 8mm 时的 S_{11} 随频率变化曲线，如图 6.2.59 所示。从参数扫描分析结果中可以看出，接地金属片的宽度也会影响 PIFA 天线的工作频率和带宽。SW 越小，即接地金属片越窄，PIFA 天线的工作频率越低，带宽越窄。

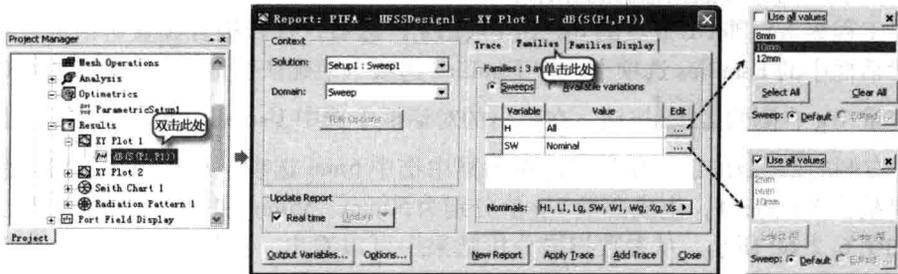


图 6.2.58 更改报告设置

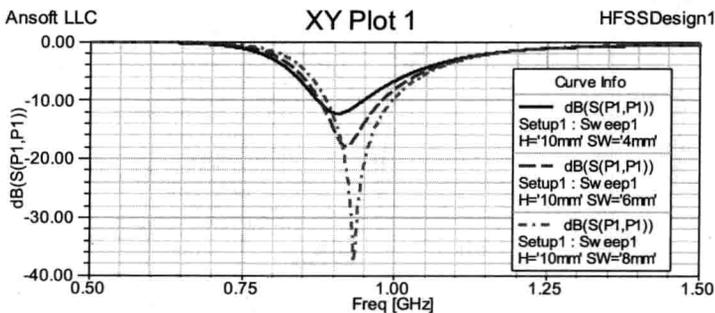


图 6.2.59 不同接地金属片宽度 (SW) 值对应的 S_{11} 曲线

3. 接地平面大小对 PIFA 天线工作频率和带宽的影响

此处只查看接地平面宽度对 PIFA 天线工作频率和带宽的影响。添加 PIFA 天线接地平面的宽度变量 W_g 为扫描变量，使用参数扫描分析功能仿真分析给出当变量 W_g 在 50mm ~

60mm 范围内变化时, 天线谐振频率和带宽的变化。

(1) 添加扫描变量

使用和前面相同的操作方法, 添加变量 W_g 为扫描变量。即用鼠标右键单击工程树下的 Optimetrics 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Add】→【Parametric】命令, 打开 Setup Sweep Analysis 对话框。再单击该对话框中的 **Add...** 按钮, 打开 Add/Edit Sweep 对话框, 整个过程与图 6.2.54 所示的过程一致。在 Add/Edit Sweep 对话框的 Variable 下拉列表中选择变量 W_g , 选中 Linear step 单选按钮, 在 Start、Stop 和 Step 文本框中分别输入 50mm、60mm 和 5mm, 然后单击 **Add >>** 按钮。上述操作完成后, 单击 **OK** 按钮, 关闭 Add/Edit Sweep 对话框。最后, 单击 Setup Sweep Analysis 对话框中的 **确定** 按钮, 完成添加参数扫描操作, 添加 W_g 为扫描变量。

完成后, 参数扫描分析项的名称会添加到工程树的 Optimetrics 节点下, 其默认的名称为 ParametricSetup3。

(2) 运行参数扫描分析

右键单击工程树中 Optimetrics 节点下的 ParametricSetup3 选项, 在弹出的快捷菜单中选择【Analyze】命令, 运行参数扫描分析。

(3) 查看分析结果

参数扫描分析完成后, 继续通过查看回波损耗 S_{11} 的扫频曲线, 给出 PIFA 天线在变量 W_g 为不同取值下的工作频率和带宽。在此, 还是在前面生成的 S_{11} 扫频结果报告 XY Plot 1 基础上更新生成此次参数扫描分析结果。

双击工程树 XY Plot 1 节点的 dB(S(P1,P1)) 选项, 打开报告设置对话框, 再单击报告设置对话框中的 Families 选项卡。在 Families 选项卡中确认变量 H 对应的值为 10mm。然后单击变量 W_g 右侧的 **...** 按钮, 在弹出的对话框中选中 Use all values 复选框。接着单击变量 SW 右侧的 **...** 按钮, 在弹出的对话框中选中 6mm 选项。最后单击 **Apply Trace** 按钮, 更新结果报告 XY Plot 1, 生成变量 W_g 值分别为 50mm、55mm 和 60mm 时的 S_{11} 随频率变化曲线, 如图 6.2.60 所示。从参数扫描分析结果中可以看出, 接地平面宽度的改变对 PIFA 天线谐振频率几乎没有影响, 但是会较为显著地影响到 PIFA 天线的带宽。当接地平面宽度从 50mm 变化到 60mm 时, 天线的带宽逐渐变小。

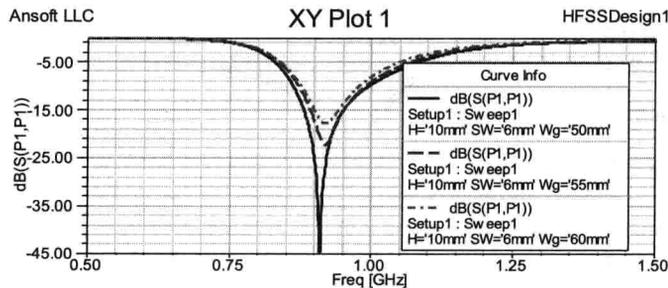


图 6.2.60 不同接地平面宽度 (W_g) 值对应的 S_{11} 曲线图

6.2.4 保存设计

至此, 我们完成了工作于 GSM 900 频段 PIFA 天线的设计分析。最后单击工具栏上的 **保存** 按钮保存设计, 再选择主菜单栏中的【File】→【Exit】命令, 退出 HFSS。

6.3 GSM 900 和 DCS 1800 双频 PIFA 天线的设计

在 6.1 节中, 我们提到 PIFA 天线可以采用在辐射金属片上开槽的技术来实现双频和多频段工作。本节将采用 6.1 节中图 6.1.10 所示的 U 形开槽方案来实现 PIFA 天线在 GSM 900 和 DCS 1800 两个频段上的工作。其中, 在 GSM 900 频段, 信号上行频率范围为 880MHz ~ 915MHz, 下行频率范围为 925MHz ~ 960MHz, 中心工作频率约为 920MHz; 在 DCS 1800 频段, 信号上行频率范围为 1 710MHz ~ 1 785MHz, 下行频率范围为 1 805MHz ~ 1 880MHz, 中心工作频率约为 1 800MHz。

本节设计的双频 PIFA 天线是在 6.2 节中设计的 GSM 900 单频 PIFA 天线基础上, 在其辐射金属片上开出宽度为 2mm 的 U 形槽来实现双频工作的, 如图 6.3.1 所示。U 形槽的缝隙宽度用变量 W_{slot} 表示, U 形槽的长度和宽度分别用变量 $L2_{\text{slot}}$ 和 $L1_{\text{slot}}$ 表示, 图 6.3.1 中 A 点位置坐标用变量表示为 $(X_{\text{slot}}, Y_{\text{slot}}, H)$ 。这样可以通过改变变量 $L1_{\text{slot}}$ 、 $L2_{\text{slot}}$ 和 W_{slot} 来改变 U 形槽的大小, 通过改变变量 X_{slot} 和 Y_{slot} 来改变 U 形槽的位置, 从而方便天线的仿真调试, 以及分析 U 形槽的大小和位置对天线性能的影响。

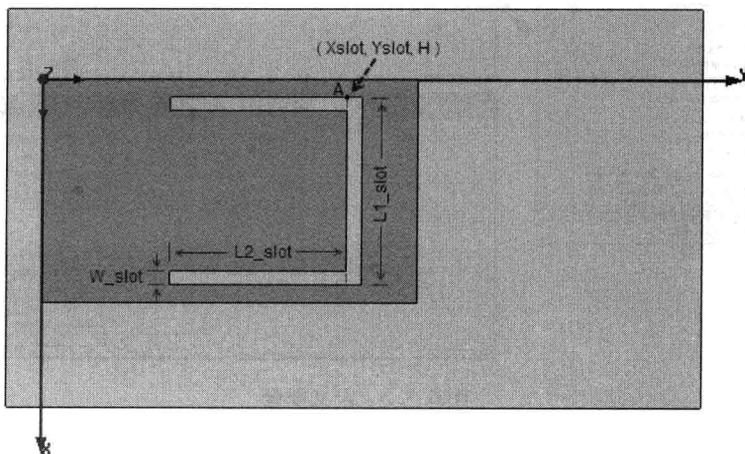


图 6.3.1 双频 PIFA 天线模型的俯视图

在设计中, U 形槽主要改变电流回路路径, 实现天线在 DCS 1800 频段的工作。从理论上讲, U 形槽长度 $L2_{\text{slot}}$ 和宽度 $L1_{\text{slot}}$ 之和约为 $1/4$ 个工作波长, 然而在实际设计时, 谐振频率会受到天线高度、短路金属片的宽度、U 形槽的位置等多种因素的影响, 没有一组准确的理论值, 需要不断地调试才能得到最终的结果。在这里, W_{slot} 的初始值取 2mm, $L1_{\text{slot}}$ 和 $L2_{\text{slot}}$ 的初始值分别取 27mm 和 23mm, Y_{slot} 初始值取 43mm, U 形槽位于辐射贴片的中央, 所以 X_{slot} 的值用变量表达式 $(W1 - L1_{\text{slot}})/2$ 表示。设计时, 我们首先添加和定义上述变量, 接下来在 6.2 节设计的天线模型上创建如图 6.3.1 所示的 U 形槽, 最后分析查看开 U 形槽后的 PIFA 天线性能。

双频 PIFA 天线的 HFSS 仿真设计实现如下。

1. 创建设计工程

这里使用 6.2 节中的 HFSS 设计文件。所以, 首先双击打开 6.2 节中的设计文件 PIFA.hfss。然后, 从主菜单栏中选择【File】→【Save As】命令, 将该工程文件另存为 Dual_PIFA.hfss 文件。

删除工程树中 Results 节点下的所有结果报告, Optimetrics 节点下的所有优化设计项和参数扫描分析项, 以及 Radiation 节点下定义的辐射表面名称。同时, 打开该设计文件所在的文件夹, 删除其中的 Dual_PIFA_hfssresults 文件夹。

2. 添加设计变量

定义和添加设计变量 W_slot 、 $L1_slot$ 、 $L2_slot$ 、 $Xslot$ 和 $Yslot$ 。

首先, 定义设计变量 W_slot , 其初始值为 2mm。从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令, 打开设计属性对话框。再单击对话框中的 **Add...** 按钮, 打开 Add Property 对话框。在 Add Property 对话框的 Name 文本框中输入变量名称 W_slot , 在 Value 文本框中输入该变量的初始值 2mm, 整个操作过程如图 6.3.2 所示。最后单击 **OK** 按钮, 添加变量 W_slot 到设计属性对话框中。

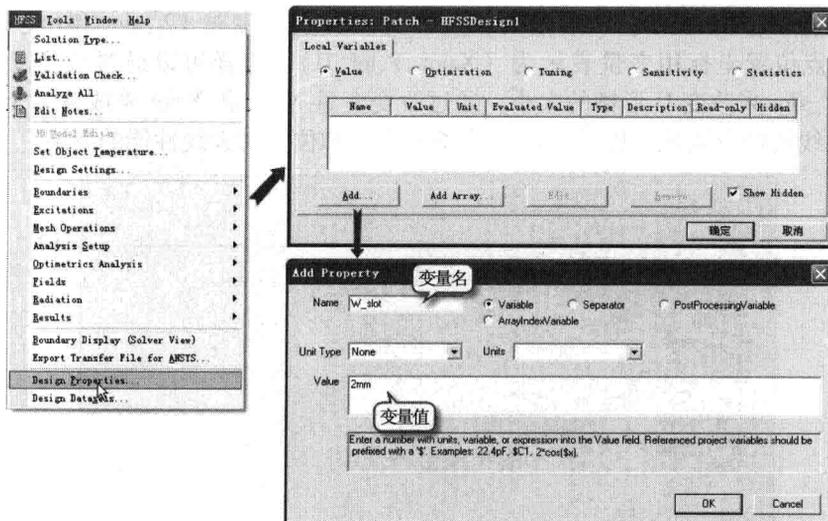


图 6.3.2 定义变量

然后, 使用相同的操作方法, 分别定义变量 $L1_slot$ 、 $L2_slot$ 、 $Xslot$ 和 $Yslot$, 其初始值分别为 27mm、23mm、 $(W1 - L1_slot) / 2$ 和 43mm。变量定义完成后, 确认设计属性对话框如图 6.3.3 所示。最后, 单击设计属性对话框中的 **确定** 按钮, 完成所有变量的定义和添加工作。

3. 设计建模

在原 PIFA 天线的辐射贴片上开出如图 6.3.1 所示的 U 形槽。这里, 我们可以先在辐射贴片上创建 3 个矩形面组成 U 形槽的形状, 然后执行合并操作, 将 3 个矩形面合并成一个整体, 最后执行相减操作生成 U 形槽。

(1) 创建矩形面 1

在辐射贴片上创建一个与 x 轴平行的矩形面, 如图 6.3.1 所示, 其顶点位置的坐标为 $(Xslot, Yslot, 0)$, 长度以及宽度分别为 $L1_slot$ 和 W_slot , 并将其命名为 U_Xslot 。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建矩形面的状态, 然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项, 打开新建矩形面属性对话框中的

Attribute 选项卡, 如图 6.3.4 所示。在 Name 文本框中输入 U_Xslot, 即可将矩形面的名称修改为 U_Xslot。其他各选项保持默认的设置不变, 然后单击 **确定** 按钮退出。

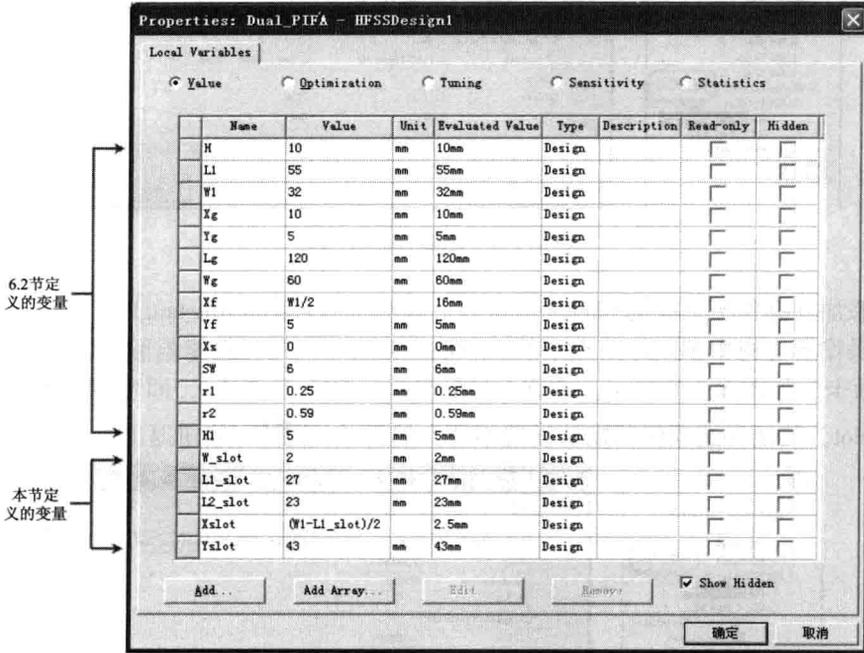


图 6.3.3 完成变量定义后的设计属性对话框

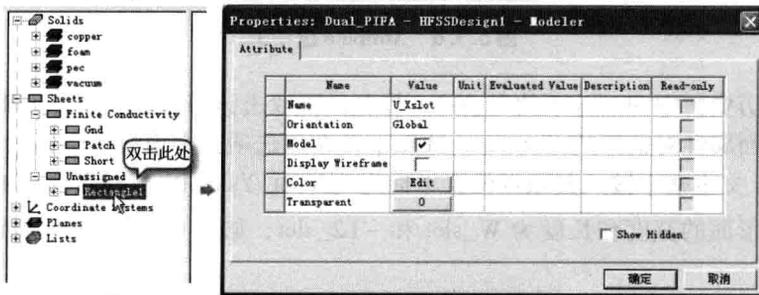


图 6.3.4 Attribute 选项卡

展开操作历史树中 Sheets 下的 U_Xslot 节点, 再双击该节点下的 CreateRectangle 选项, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡下设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 (Xslot, Yslot, 0), 在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的长度和宽度为 L1_slot 和 W_slot, 如图 6.3.5 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

(2) 创建矩形面 2

在辐射贴片上创建一个与 y 轴平行的矩形面, 如图 6.3.1 所示, 其顶点位置坐标为 (Xslot, Yslot, 0), 长度和宽度分别为 L2_slot 和 W_slot, 并将其命名为 U_Yslot。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建矩形面的状态, 然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的



图 6.3.5 Command 选项卡

矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树中 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡，如图 6.3.6 所示。在 Name 文本框中输入 U_Yslot，即可将矩形面的名称修改为 U_Yslot。其他各选项保留默认设置不变，然后单击 **确定** 按钮退出。

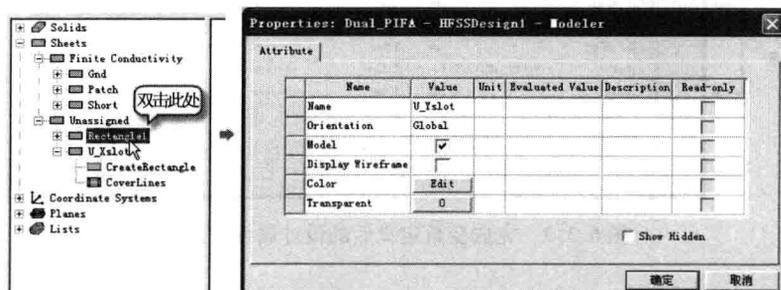


图 6.3.6 Attribute 选项卡

展开操作历史树中 Sheets 下的 U_Yslot 节点，再双击该节点下的 CreateRectangle 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 (Xslot, Yslot, 0)，在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的宽度和长度为 W_slot 和 -L2_slot，如图 6.3.7 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

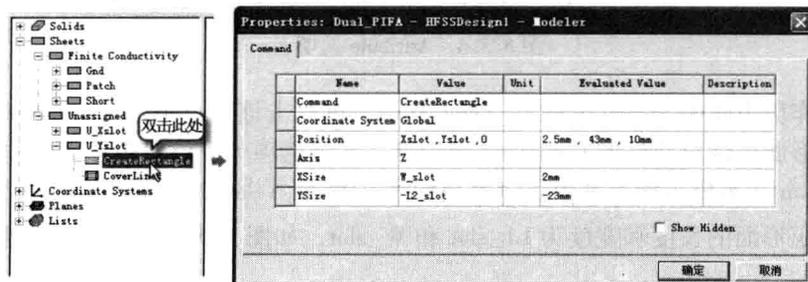


图 6.3.7 Command 选项卡

(3) 创建矩形面 3

执行平移和复制操作，把矩形面 U_Yslot 沿 x 轴正向移动 $(L1_slot - W_slot)$ 的距离并复制出一个新的矩形面。

单击操作历史树下 Sheets 节点下的 U_Yslot 选项，选中该矩形面。从主菜单栏中选择【Edit】→【Duplicate】→【Along Line】命令，或者单击工具栏上的按钮，然后在三维模型窗口的坐标原点位置单击鼠标，接着沿 x 轴正向移动鼠标指针到新的位置并单击鼠标左键确认。此时，在工作界面左上角的位置会弹出如图 6.3.8 所示的 Duplicate along line 对话框，确认对话框中的 Total number 选项对应的数值是 2，然后单击 **OK** 按钮确认。此时，即可通过平移复制操作创建一个新的矩形面，该矩形面的默认名称为 U_Yslot_1。

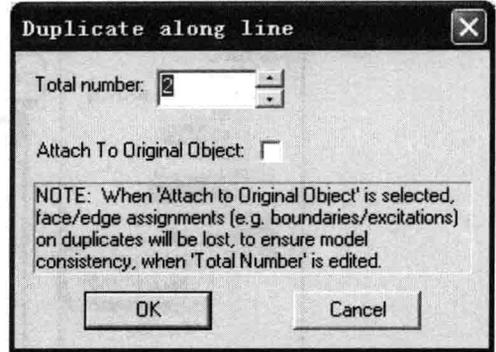


图 6.3.8 Duplicate along line 对话框

展开操作历史树中 Sheets 下的 U_Yslot_1 节点，接着展开 U_Yslot_1 节点下的 DuplicateBodyAlongLine 节点，再展开 DuplicateBodyAlongLine 节点下的 U_Yslot 节点，双击 U_Yslot 节点下的 DuplicateAlongLine 选项，打开属性对话框，将属性对话框中 Vector 选项对应的值修改为 (L1_slot - W_slot, 0, 0)，如图 6.3.9 所示。此时，即设置矩形面 U_Yslot_1 是由矩形面 U_Yslot 沿 x 轴平移 (L1_slot - W_slot) 的距离而生成的。

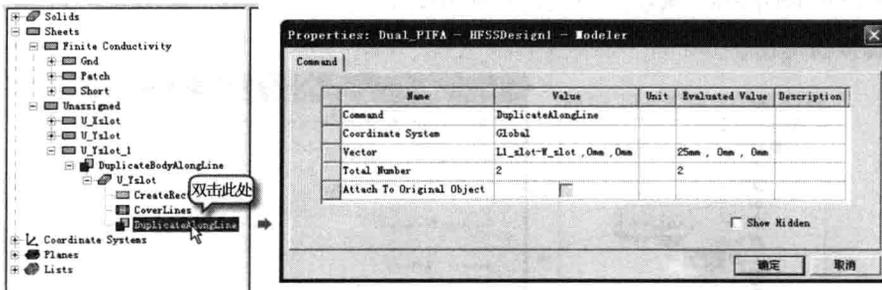


图 6.3.9 属性对话框

(4) 合并 3 个矩形面

执行合并操作，将上述 3 个矩形面合并成一个整体。

按住 Ctrl 键，同时依次单击操作历史树 Sheets 节点下的 U_Xslot、U_Yslot 和 U_Yslot_1，同时选中这 3 个矩形面。然后从主菜单栏中选择【Modeler】→【Boolean】→【Unite】命令，或者单击工具栏上的按钮，执行合并操作。此时，矩形面 U_Xslot、U_Yslot 和 U_Yslot_1 会合并成一个整体，合并生成的整体的名称为 U_Xslot。

(5) 开 U 形槽

执行相减操作，在辐射金属片上开 U 形槽。

按住 Ctrl 键，同时在操作历史树下按先后顺序依次单击 Sheets 节点下的 Patch 和 U_Xslot，同时选中这两个平面。然后从主菜单栏中选择【Modeler】→【Boolean】→【Substrate】命令，或者单击工具栏上的按钮，打开相减操作对话框，如图 6.3.10 所示。在该对话框中确认 Blank Parts 列表框中显示的是 Patch 选项，在 Tool Parts 列表框中显示的是 U_Xslot 选项，表示在模型 Patch 上挖去与模型 U_Xslot 重叠的部分。最后单击对话框中的 **OK** 按钮，完成相减操作。此时，即可在辐射金属片 Patch 上开出一个如图 6.3.1 所示的 U 形槽。

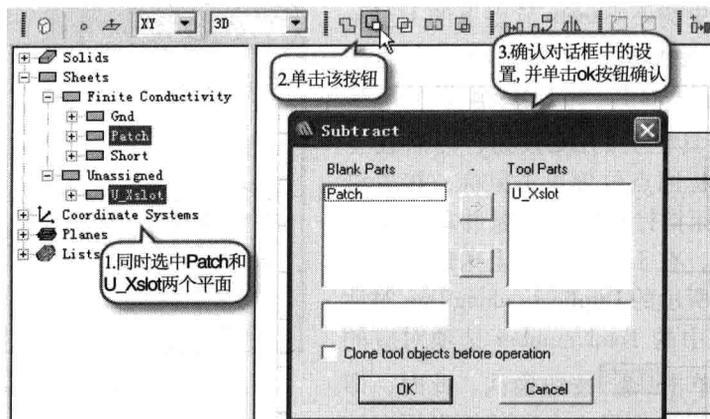


图 6.3.10 相减操作

4. 修改求解设置

设计的天线工作于 GSM 900 和 DCS 1800 两个工作频段, 所以需要修改之前设置的求解分析项和扫频分析项, 将求解频率设置为 1.8GHz, 把扫频范围设置为 0.5GHz ~ 2.3GHz。

双击工程树中 Analysis 节点下的求解设置项 Setup1, 打开求解设置对话框。在该对话框中将 Solution Frequency 选项由原先的 0.92GHz 修改为 1.8GHz, 如图 6.3.11 所示。最后单击 **确定** 按钮退出。

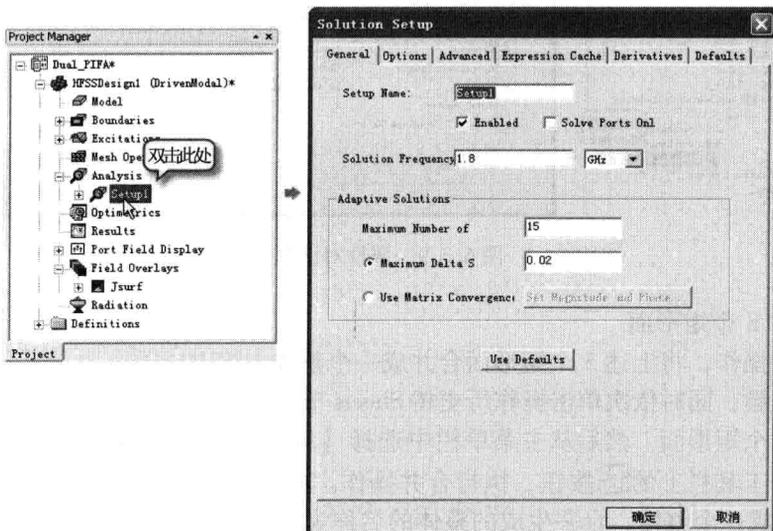


图 6.3.11 修改求解频率

再展开工程树下的求解设置项 Setup1 节点, 双击 Setup1 节点下的扫频设置项 Sweep1, 打开扫频设置对话框。在该对话框中将 Stop 选项由原先的 1.5GHz 修改为 2.3GHz, 如图 6.3.12 所示。最后单击 **OK** 按钮退出。

5. 运行仿真分析

右键单击工程树下的 Analysis 节点, 在弹出的快捷菜单中选择 **【Analyze All】** 命令, 或者单击工具栏上的 **运行** 按钮, 开始运行仿真计算。

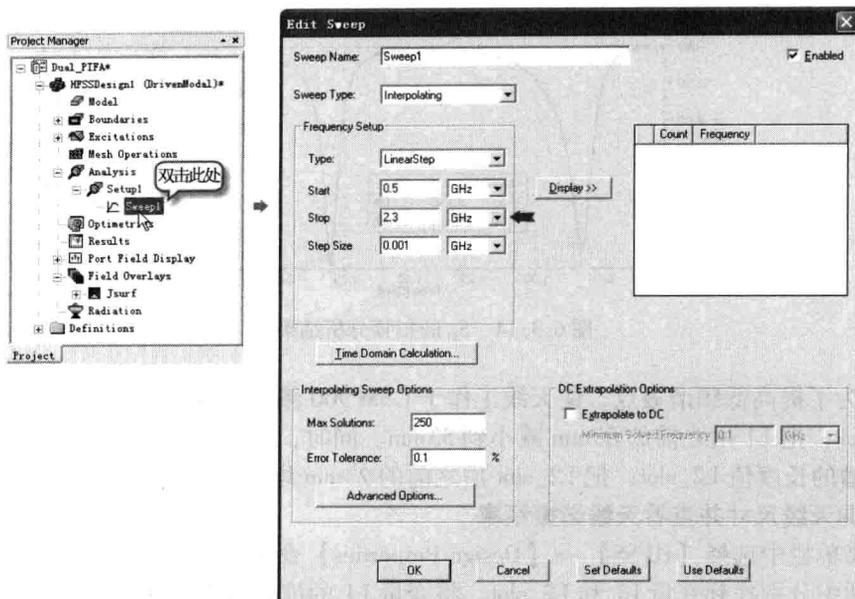


图 6.3.12 修改扫频设置

6. 查看分析结果

分析完成后，我们可以利用 HFSS 的数据后处理模块来查看天线的谐振频率。右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。在该对话框中确定左侧的 Solution 选项选择的是 Setup1:Sweep1 选项，在 Category 列表框中选中 S Parameter 选项，在 Quantity 列表框中选中 S(P1,P1) 选项，Function 列表框中选中 dB 选项，如图 6.3.13 所示。然后单击 **New Report** 按钮，再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时，即可生成如图 6.3.14 所示的 S_{11} 在 0.5GHz ~ 2.3GHz 的扫频分析结果。

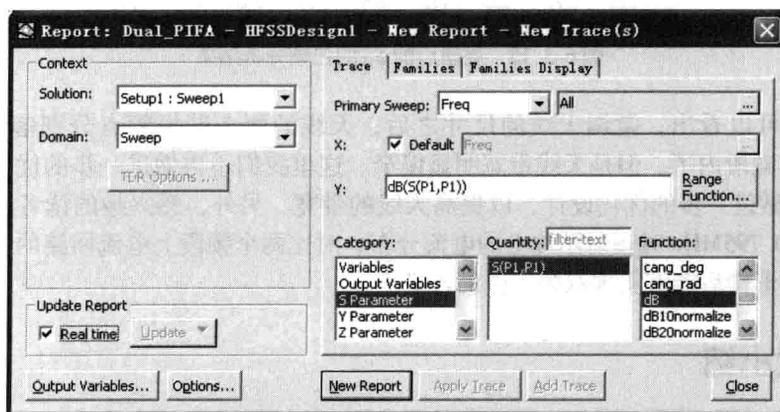
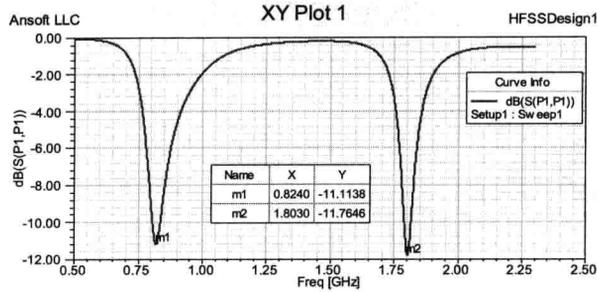


图 6.3.13 分析结果报告设置对话框

从结果报告中可以看出，设计的 PIFA 天线有两个谐振频率，分别为 824MHz 和 1 803MHz。与 6.2 节中的设计结果相比，在辐射金属片上开槽后，可以成功引入 1.8GHz 左右的高频谐振点，但是开槽也影响了天线的低频谐振点，由最初的 920MHz 变成现在的

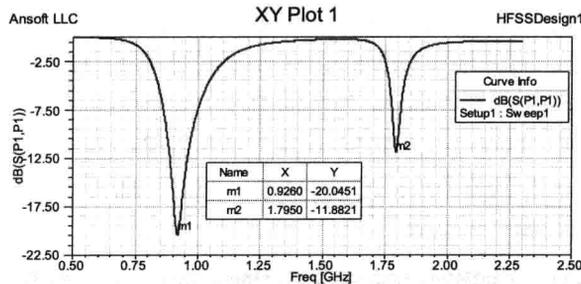
图 6.3.14 S_{11} 的扫频分析结果

824MHz。为了提高低频谐振点，使天线工作于 GSM 900 频段，我们需要适当减少辐射贴片片的长度值 L_1 ，把 L_1 由之前的 60mm 减小到 53mm。同时，为了降低高频谐振点，需要适当增加 U 形槽的长度值 L_2_slot ，把 L_2_slot 由之前的 23mm 增加到 25mm。

7. 微调天线尺寸并查看天线谐振频率

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框。在设计属性对话框中分别找到变量 L_1 和 L_2_slot ，将变量 L_1 的值修改为 53mm，将变量 L_2_slot 的值修改为 25mm。然后单击 **确定** 按钮，退出设计属性对话框。

再次单击工具栏上的  按钮，运行仿真计算。在仿真计算完成后，双击工程树 Results 节点下的 XY Plot 1 选项，可以打开更新后的 S_{11} 参数扫频分析结果，如图 6.3.15 所示。

图 6.3.15 更新后的 S_{11} 的扫频分析结果

从结果中可以看出，微调天线的尺寸之后，天线的两个谐振频点分别落在 GSM 900 和 DCS 1800 工作频段内了，但是天线带宽明显偏窄。这里我们不再做进一步的优化设计，感兴趣的读者可以做进一步的优化设计，以提高天线的带宽。另外，感兴趣的读者还可以分别查看 925MHz 和 1795MHz 时辐射贴片上的电流分布，对比两个频段上电流回路的不同，理解辐射贴片上开 U 形槽后能够实现双频工作的含义。

6.4 本章小结

本章主要讲解了平面倒 F (PIFA) 天线的原理和 HFSS 的设计分析过程。首先，在 6.1 节中讲解了 PIFA 的结构和由来、PIFA 天线结构对性能的影响以及天线的电流分布和场分布。接下来，在 6.2 节中重点讲述了 PIFA 天线的 HFSS 设计步骤和设计过程，并使用 HFSS 仿真分析给出 PIFA 天线的高度、辐射贴片的大小以及参考地面的大小等对天线谐振频点和带宽的影响。最后，在 6.3 节中给出了双频 PIFA 的 HFSS 设计分析过程。

第 7 章

喇叭天线设计

喇叭天线是一种应用广泛的微波天线，其优点是结构简单，频带宽，功率容量大，调整与使用方便。合理地选择喇叭尺寸可以获得良好的辐射特性、相当尖锐的主瓣、较小副瓣和较高的增益。因此，喇叭天线应用非常广泛，它是一种常见的天线增益测试用标准天线。

本章将讲解如何使用 HFSS 来设计喇叭天线。在这里，我们讲解两种最基本的喇叭天线的设计，分别是矩形口径喇叭天线和圆形口径喇叭天线。

7.1 矩形口径喇叭天线设计

7.1.1 矩形口径喇叭天线的理论

矩形口径喇叭天线通常称为角锥喇叭天线，它是由矩形波导 E 面和 H 面的两壁张开而成的，其辐射特性基本上是 E 面和 H 面扇形喇叭的结合，其结构如图 7.1.1 所示。这里分别用 a 和 b 表示矩形波导的宽和高，用 a_1 和 b_1 表示喇叭口径在 E 面和 H 面的边长，用 ρ_e 和 ρ_h 表示喇叭口径在 E 面和 H 面的斜径，用 ρ_1 和 ρ_2 表示喇叭口径在 E 面和 H 面的半径，用 R_e 和 R_h 表示喇叭上、下两个口径面之间的距离。

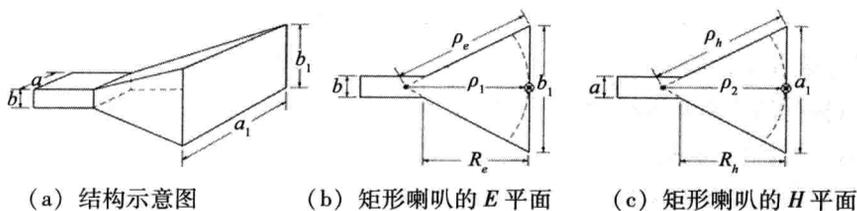


图 7.1.1 矩形口径喇叭天线

假设波导中只是单模传播，即只有 TE_{10} 波，则矩形喇叭的远区场可以表示为：

$$E_{\theta} = j \frac{kE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} [\sin\varphi (1 + \cos\theta) I_1 I_2] \quad (7-1-1)$$

$$E_{\varphi} = j \frac{kE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} [\cos\varphi (1 + \cos\theta) I_1 I_2] \quad (7-1-2)$$

$$E_r = 0 \quad (7-1-3)$$

式中，

$$I_1 = \int_{-a_1/2}^{a_1/2} \cos\left(\frac{\pi}{a} x'\right) e^{-jk[x'^2/2\rho_1 - x' \sin\theta \cos\varphi]} dx' \quad (7-1-4)$$

$$I_2 = \int_{-b_1/2}^{b_1/2} e^{-jk[y'^2/2\rho_1 - y' \sin\theta \cos\varphi]} dy' \quad (7-1-5)$$

矩形喇叭的增益可以表示为:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \varepsilon_{ap} a_1 b_1 \quad (7-1-6)$$

其中, ε_{ap} 表示矩形喇叭的口径效率, 在最佳增益设计时, 该值约为 0.5。

根据理论可以给出 E 面和 H 面扇形喇叭最佳方向性系数对应的 a_1 和 b_1 值, 其中:

$$a_1 \approx \sqrt{3\lambda\rho_1} \quad (7-1-7)$$

$$b_1 \approx \sqrt{2\lambda\rho_2} \quad (7-1-8)$$

根据相似三角形关系, 可以给出:

$$\frac{\rho_1}{R_e} = \frac{b_1}{b_1 - b} \quad (7-1-9)$$

$$\frac{\rho_2}{R_h} = \frac{a_1}{a_1 - a} \quad (7-1-10)$$

对于实际可以制成的喇叭, 必须有:

$$R_e = R_h \quad (7-1-11)$$

由上面 5 个式子可以推导出:

$$R_e = R_h = \frac{a_1 - a}{3\lambda} a_1 \quad (7-1-12)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} (b + \sqrt{b^2 + 8\lambda R_e}) \quad (7-1-13)$$

把式 (7-1-12) 和式 (7-1-13) 代入式 (7-1-6), 有:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \varepsilon_{ap} a_1 b_1 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \varepsilon_{ap} a_1 \frac{1}{2} (b + \sqrt{b^2 + \frac{8a_1(a_1 - a)}{3}}) \quad (7-1-14)$$

式 (7-1-14) 稍做整理后, 可得

$$a_1^4 - aa_1^3 + \frac{3bG\lambda^2}{8\pi\varepsilon_{ap}} a_1 = \frac{3G^2\lambda^4}{32\pi^2\varepsilon_{ap}^2} \quad (7-1-15)$$

在设计最佳增益的矩形口径喇叭天线时, 一般已知天线增益 G 和矩形馈电波导尺寸 a 、 b , 设计目标是确定喇叭天线的其余尺寸 a_1 、 b_1 和 R_e , 从而获得最佳的增益。

在初始设计时, 我们可以根据前面推导给出的式 (7-1-15)、式 (7-1-12) 和式 (7-1-13), 分别计算出矩形喇叭的 a_1 、 R_e 和 b_1 的值。

7.1.2 设计要求和初始设计

设计一个 S 频段 (1.55GHz ~ 3.4GHz) 最佳增益矩形喇叭天线, 其在 2.4GHz 时的增益需要大于 19dB, 喇叭用 WR430 矩形波导来馈电, 其尺寸为 $a = 4.30$ 英寸 (英寸的英文缩写为 in, 1in = 0.0254m)、 $b = 2.15$ 英寸, 激励信号由特性阻抗为 50Ω 的同轴线导入。

先将增益由分贝值转换成无量纲值, 19dB 的增益转换成无量纲值约为 79.4。2.4GHz 工作频率对应的波长 $\lambda = 4.92$ 英寸。然后将增益和波长值代入到式 (7-1-15)、式 (7-1-12) 和式 (7-1-13), 可以计算出矩形喇叭的尺寸如下。

$$a_1 = 20.50 \text{ 英寸} \quad b_1 = 15.18 \text{ 英寸} \quad R_e = 22.47 \text{ 英寸}$$

在设计中,波导长度取 $5/4$ 个波长。同轴线馈电点位于波导宽边中心,馈电点和波导底侧短路板之间的距离为 $1/4$ 个波长,同轴线的外导体与波导的侧壁相连接,内导体从波导宽边中心处插入到波导内部场强最大处,形成电场激励方式。同轴线的外导体圆半径为0.06英寸,外导体长度为0.3英寸;同轴线内导体圆半径为0.025英寸,内导体在波导内的长度是波导窄边长度的一半,即 $b/2$ 。

为了方便调节喇叭天线模型的物理尺寸,在设计中需要定义一系列变量来表示天线的尺寸。变量定义以及设计的喇叭天线的初始尺寸如表7.1.1所示。

表 7.1.1 喇叭天线尺寸和变量定义

	结构名称	变量名	变量值 (单位:英寸)
	1/4 波长	length	1.23
喇叭结构参数	波导宽度	a	4.30
	波导高度	b	2.15
	波导长度	wlength	$5 \times \text{length}$
	喇叭口径宽度	a1	20.50
	喇叭口径高度	b1	15.18
	喇叭长度	plength	22.47
同轴线结构参数	外导体半径	-	0.06
	内导体半径	-	0.025
	外导体长度	-	0.3
	内导体长度	-	$0.3\text{in} + b/2$

设计的矩形喇叭天线的最终实物如图7.1.2所示。

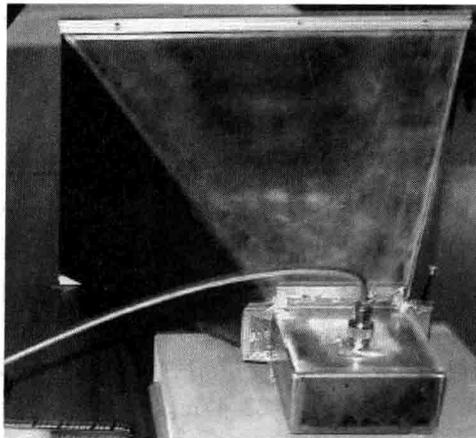


图 7.1.2 矩形喇叭天线实物

7.1.3 HFSS 仿真设计

1. 新建设计工程

(1) 运行 HFSS 并新建工程

双击桌面上的 HFSS 快捷方式图标, 启动 HFSS 软件。HFSS 运行后, 它会自动新建一个工程文件, 选择主菜单栏中的【File】→【Save As】命令, 把工程文件另存为 Horn.hfss 文件。

(2) 设置求解类型

设置当前设计为模式驱动求解类型。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Solution Type】命令，打开如图 7.1.3 所示的 Solution Type 对话框，选中 Driven Modal 单选按钮，然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

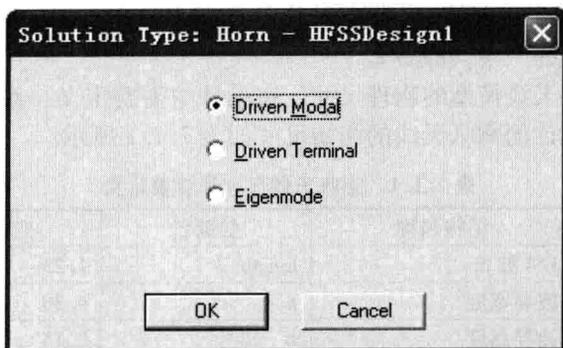


图 7.1.3 设置求解类型

(3) 设置模型长度单位

设置当前设计在创建模型时所使用的默认长度单位为英寸。

从主菜单栏中选择【Modeler】→【Units】命令，打开如图 7.1.4 所示的 Set Model Units 对话框。在 Select units 下拉列表中选择 in 选项，然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

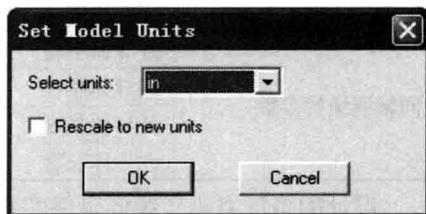


图 7.1.4 设置长度单位

2. 添加和定义设计变量

在 HFSS 中定义和添加如表 7.1.1 所示的设计变量。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框。再单击对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add Property 对话框。在 Add Property 对话框的 Name 文本框中输入第一个变量名称 length，在 Value 文本框中输入该变量的初始值 1.23in，然后单击 **OK** 按钮，添加变量 length 到设计属性对话框中，如图 7.1.5 所示。

使用相同的操作方法，分别定义变量 a，其初始值为 4.3in；变量 b，其初始值为 2.15in；变量 wlength，其初始值为 $5 \times \text{length}$ ；变量 a1，其初始值为 20.5in；变量 b1，其初始值为 15.18in；变量 plength，其初始值为 22.47in。定义完成后，确认属性对话框如图 7.1.6 所示。

最后，单击设计属性对话框中的 **确定** 按钮，完成所有变量的定义和添加工作。

3. 设计建模

(1) 创建喇叭模型

分别在 $z=0$ 和 $z=\text{plength}$ 的平面上创建大小为 $a \times b$ 和 $a1 \times b1$ 的平面，平面的中心都位于 z 轴上。然后选中这两个平面，执行【Modeler】→【Surface】→【Connect】命令，生成喇叭模型。

① 在 $z=0$ 的平面上创建一个中心位于坐标原点，长度和宽度分别用变量 a 和 b 表示的矩形面，并将其命名为 Horn。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进

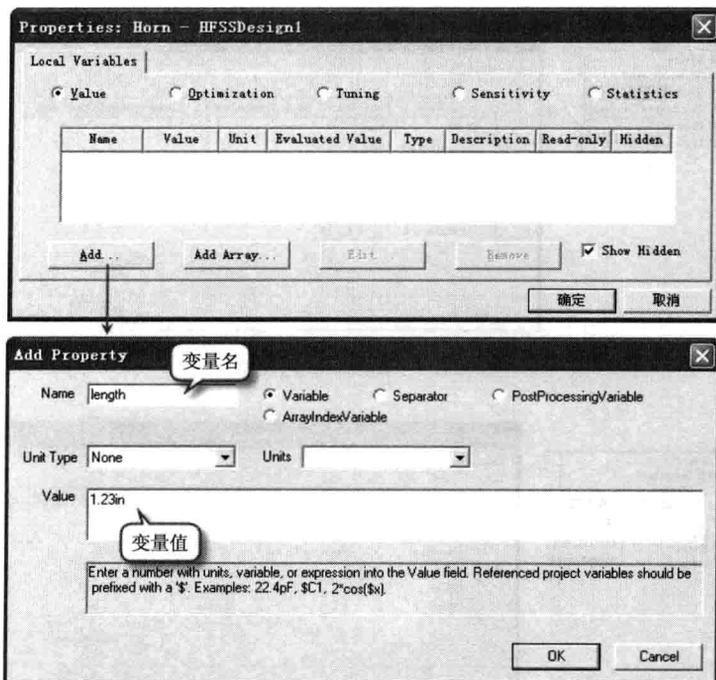


图 7.1.5 定义变量

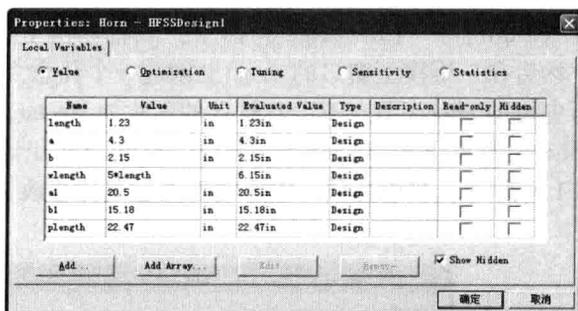


图 7.1.6 定义所有设计变量后的设计属性对话框

入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡，如图 7.1.7 所示。在该选项卡中将矩形面的名称修改为 Horn，设置其透明度为 0.4，然后单击 **确定** 按钮退出。

再双击操作历史树中 Horn 节点下的 CreateRectangle 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(-a/2, -b/2, 0)$ ，在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的长度和宽度为 a 和 b ，如图 7.1.8 所示，其中 a 、 b 分别是前面定义的设计变量。然后单击 **确定** 按钮退出。

② 在 $z = \text{plength}$ 的平面上创建一个中心位于 z 轴，长度和宽度分别用变量 $a1$ 和 $b1$ 表示的矩形面，并将其命名为 Aperture。

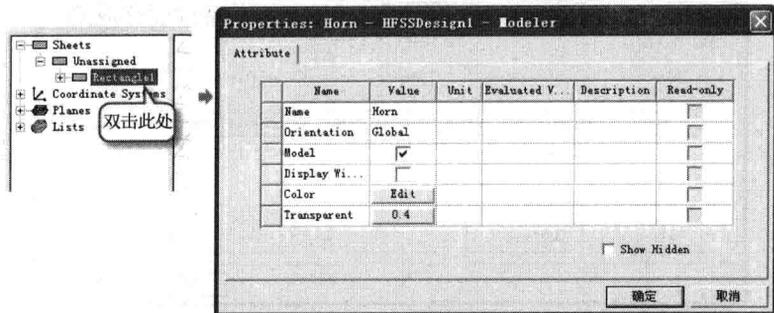


图 7.1.7 Attribute 选项卡

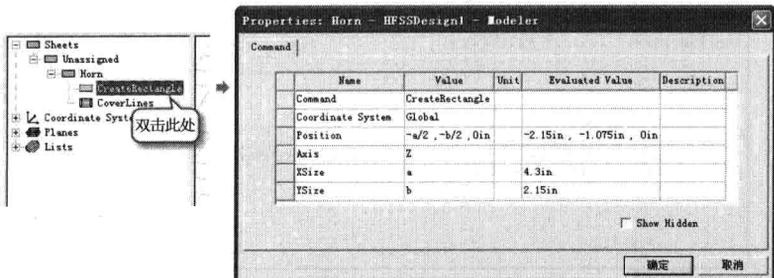


图 7.1.8 Command 选项卡

从主菜单栏中选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏上的按钮，进入创建矩形面的状态，然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡，如图 7.1.9 所示。在该选项卡中将矩形面的名称修改为 Aperture，然后单击 **确定** 按钮退出。

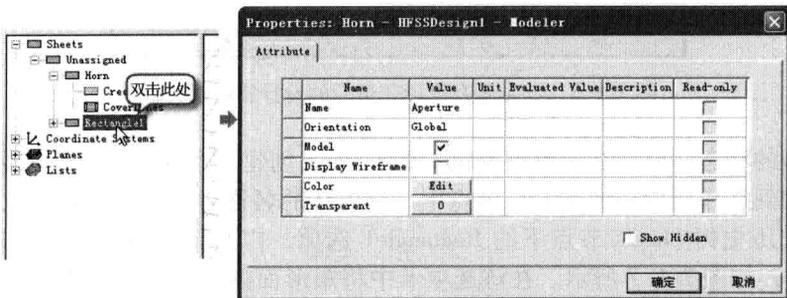


图 7.1.9 Attribute 选项卡

再双击操作历史树中 Aperture 节点下的 CreateRectangle 选项，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(-a/2, -b/2, \text{length})$ ，在 XSize 和 YSize 文本框中分别输入矩形面的长度和宽度为 a 和 b ，如图 7.1.10 所示。然后单击 **确定** 按钮退出。

创建了 Horn 和 Aperture 这两个矩形面之后，按快捷键 $\text{Ctrl} + \text{D}$ 全屏显示已创建的所有物体模型。

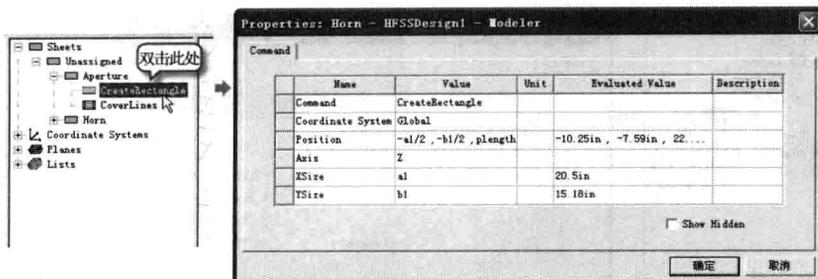


图 7.1.10 Command 选项卡

③ 通过 Connect 命令生成喇叭模型。

按住 Ctrl 键，先后依次单击矩形面 Horn 和 Aperture，同时选中这两个矩形面。然后从主菜单栏中选择【Modeler】→【Surface】→【Connect】命令，此时即可生成如图 7.1.11 所示的喇叭模型，该模型的名称为 Horn，其透明度为 0.4，材质为 vacuum。

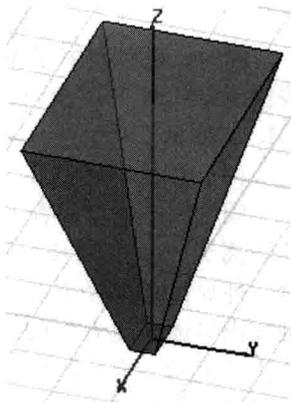


图 7.1.11 喇叭模型

(2) 创建 WR430 波导模型

创建一个长方体模型用以表示 WR430 波导。该模型与喇叭的底部相接，其长、宽、高分别用前面定义的变量 a、b 和 wlength 表示，并将其命名为 WR430。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Box】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进入创建长方体的状态，然后在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树中 Solids 节点下的 Box1 选项，打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡。将长方体的名称修改为 WR430，设置其透明度为 0.4，如图 7.1.12 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

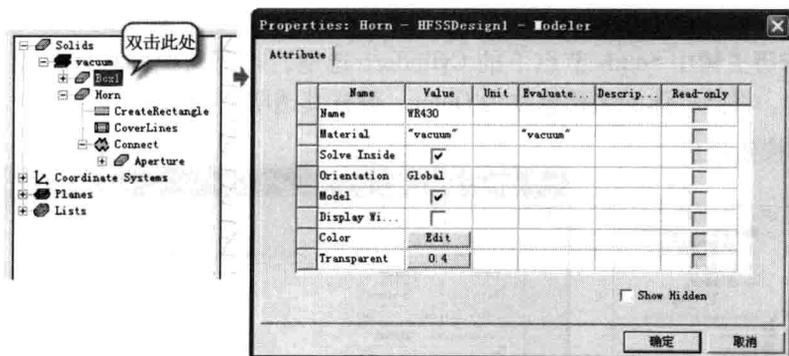


图 7.1.12 Attribute 选项卡

再双击操作历史树中 WR430 节点下的 CreateBox 选项，打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(-a/2, -b/2, 0)$ ，在 XSize、YSize 和 ZSize 文本框中分别输入长方体的长、宽和高为 a、b 和 $-wlength$ ，如图 7.1.13 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

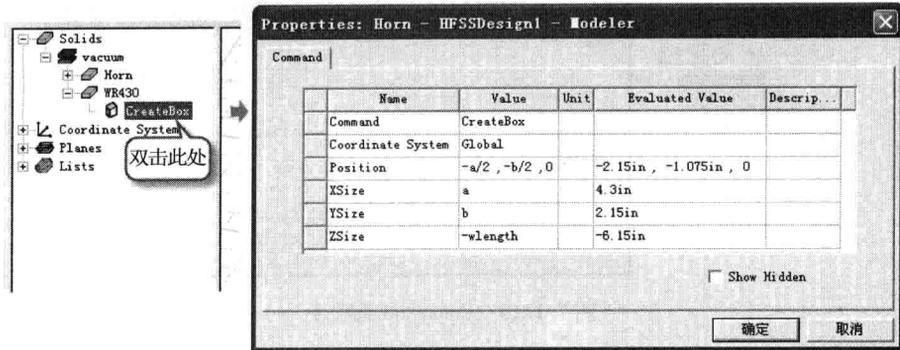


图 7.1.13 Command 选项卡

此时, 就创建好了 WR430 波导模型。创建好波导模型后, 按快捷键 $\text{Ctrl} + \text{D}$ 全屏显示已创建的所有物体模型, 如图 7.1.14 所示。

(3) 创建同轴馈线

同轴线馈电点放置于波导宽边中心线上, 其与底侧短路板的距离为 $1/4$ 个波长, 同轴线的导体与波导的外侧壁相接触。外导体圆半径为 0.06 英寸, 外导体长度为 0.3 英寸; 同轴线内导体半径为 0.025 英寸, 内导体在波导内的长度为波导窄边长度的一半, 即 $b/2$ 。这里创建两个圆柱体模型, 用来表示同轴线的导体。

① 创建同轴线的导体。

因为同轴线垂直于波导表面, 所以创建的圆柱体底面是平行于 xz 面的。首先, 单击工具栏的 XY 下拉列表框, 在其下拉列表中选择 ZX 选项, 将当前绘图平面设置为 xz 面。然后, 从主菜单栏中选择【Draw】→【Cylinder】命令, 或者单击工具栏上的 按钮, 进入创建圆柱体的状态, 在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆柱体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Cylinder1。

双击操作历史树中 Solids 节点下的 Cylinder1 选项, 打开新建圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡。将圆柱体的名称修改为 Outer, 设置其透明度为 0.4, 如图 7.1.15 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

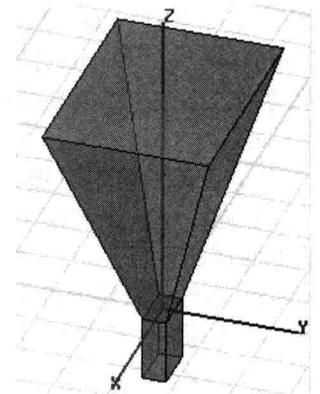


图 7.1.14 矩形喇叭波导锥形

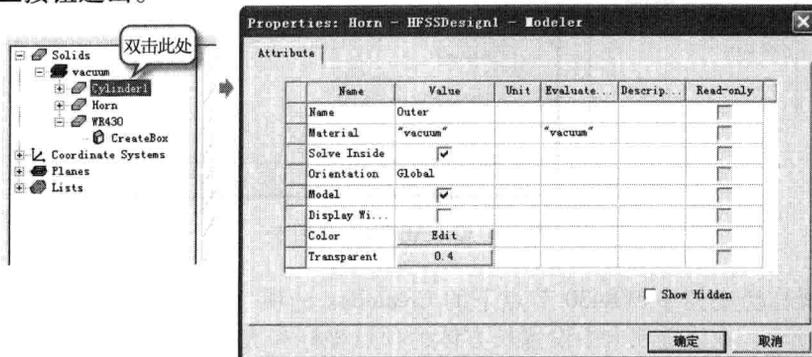


图 7.1.15 Attribute 选项卡

再双击操作历史树中 Outer 节点下的 CreateCylinder 选项卡，打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度。在 Center Position 文本框中输入其底面圆心坐标为 $(0, b/2, -4 * length)$ ，在 Radius 文本框中输入半径值 0.06，在 Height 文本框中输入长度值 0.3，如图 7.1.16 所示，然后单击 **确定** 按钮，完成圆柱体 Outer 的创建。

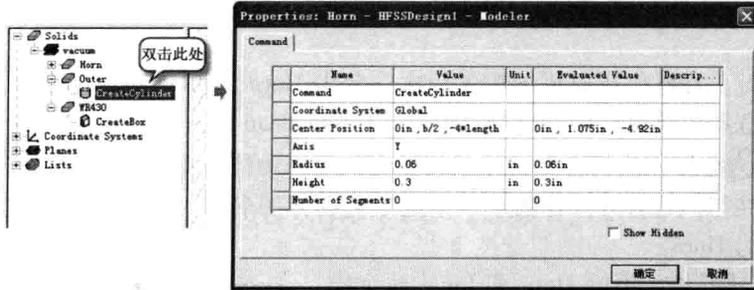


图 7.1.16 Command 选项卡

② 创建同轴线的内导体。

使用和前面相同的操作方法，创建一个圆柱体。打开该圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡，将矩形面的名称修改为 Inner，设置该圆柱体的材质为理想导体 (pec)，如图 7.1.17 所示。打开属性对话框的 Command 选项卡，在 Center Position 文本框中输入其底面圆心坐标为 $(0,0, -4 * length)$ ，在 Radius 文本框中输入半径值 0.025，在 Height 文本框中输入其长度值 $0.3in + b/2$ ，如图 7.1.18 所示。

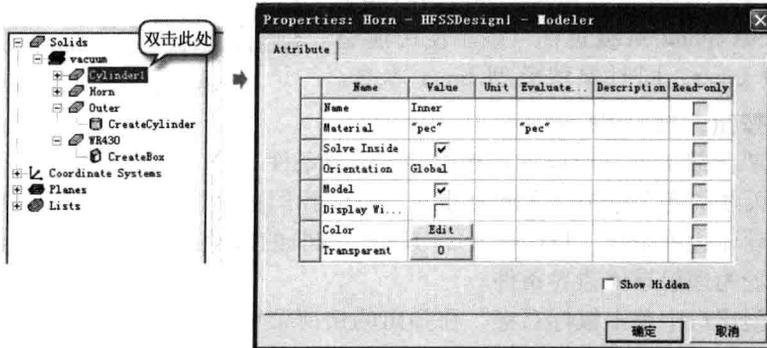


图 7.1.17 Attribute 选项卡

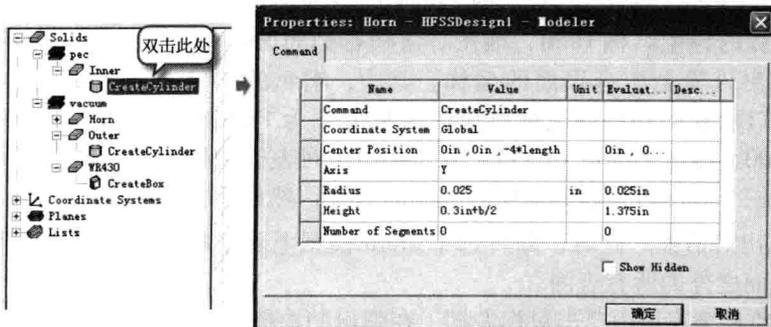


图 7.1.18 Command 选项卡

注意: 在 HFSS 中使用既有变量也有数值的表达式时, 表达式中的数值必须附上单位, 否则使用默认 SI 单位。例如, 这里的圆柱体长度设置为 $0.3\text{in} + b/2$, 如果 0.3 后面不加英寸单位, 而错误写成 $0.3 + b/2$, 则实际值就变成 0.3 米加上变量 $b/2$ 了。

(4) 布尔操作

上述模型都创建好了之后, 使用布尔操作生成最终的矩形口径喇叭天线模型。

① 执行合并操作, 将 Horn、WR430 和 Outer 三个物体模型合并成一个完整的物体模型。

按住 Ctrl 键, 在操作历史树下按先后次序单击 Horn、Outer 和 WR430, 同时选中这三个物体。然后选择主菜单栏中的【Modeler】→【Boolean】→【Unite】命令, 或者直接单击工具栏上的  按钮, 执行合并操作, 将选中的三个物体合并成一个整体。合并生成的物体的名称、属性与执行合并操作前第一个选中的物体的名称、属性相同。这里, 新生成的物体的名称即为 Horn。

② 执行相减操作, 消除 Horn 和 Inner 两个模型的重叠部分。

按住 Ctrl 键, 在操作历史树下按先后次序单击 Horn 和 Inner, 同时选中这两个物体。然后选择主菜单栏中的【Modeler】→【Boolean】→【Subtract】命令, 或者直接单击工具栏上的  按钮, 打开如图 7.1.19 所示的 Subtract 对话框。确认对话框中 Blank Parts 列表框中显示的是 Horn, Tool Parts 列表框中显示的是 Inner, 并选中 Clone tool objects before operation 复选框, 表示使用模型 Horn 减去模型 Inner, 同时保留模型 Inner 本身。然后单击  按钮, 执行相减操作。

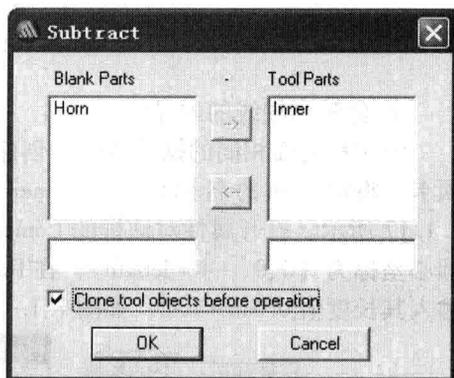


图 7.1.19 Subtract 对话框

(5) 把喇叭天线的外表面设置为理想导体边界条件

因为喇叭天线的各个壁都是金属材质的, 所以我们这里需要把喇叭天线模型外侧表面都设置为理想导体边界条件 (Perfect E)。其中, 喇叭的口径面、同轴线端口面和同轴线内表面不需要设置为理想导体边界条件。

在三维模型窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Select Faces】选项, 如图 7.1.20 所示, 进入选择物体表面状态。然后, 从主菜单栏中选择【Edit】→【Select】→【By Name】命令, 打开如图 7.1.21 所示的 Select Face 对话框, 选中该对话框左侧的模型名称 Horn, 则在对话框右侧的 Face ID 列表框中会列出该模型所有表面的名称。其中, 喇叭的口径面、同轴线端口面和同轴线内表面对应的名称分别为 Face28、Face116、Face90。接下来按住 Ctrl 键, 在 Face ID 列表框中同时选中除去这三个表面名称后其他所有表面的名称, 然后单击  按钮, 退出对话框。此时, 即可选中 Horn 模型上除去喇叭的口径面、同轴线端口面和同轴线内表面之外的所有表面。

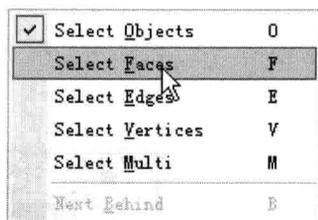


图 7.1.20 选择表面

再次在三维模型窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令, 打开如图 7.1.22 所示的 Perfect E Boundary 设置对话框, 直接单击该对

对话框的 **OK** 按钮，将前面选中的表面的边界条件设置为理想导体边界。

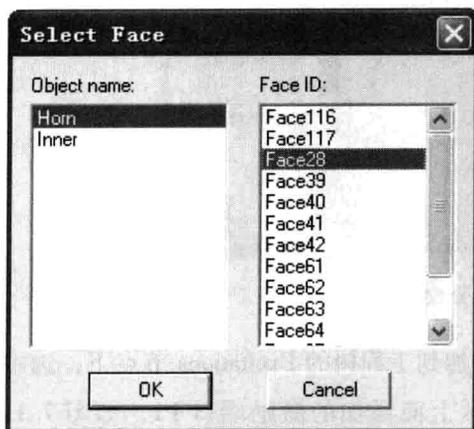


图 7.1.21 Select Face 对话框

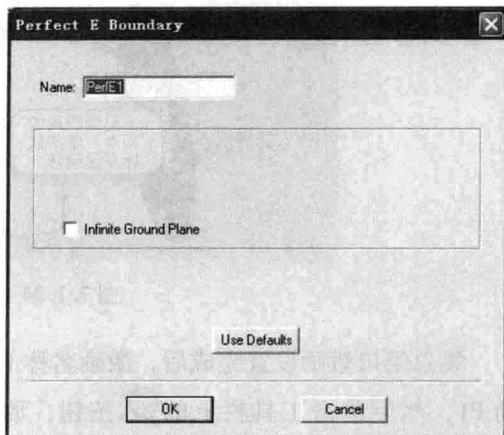


图 7.1.22 理想导体边界条件设置对话框

(6) 设置端口激励

把同轴线的端口面设置为负载阻抗为 50Ω 的集总端口激励。

单击工具栏上的 按钮，放大显示同轴线端口面，然后单击选中该端口面。再单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Excitation】→【Lumped Port】命令，打开如图 7.1.23 所示的集总端口设置对话框。在对话框的 Name 文本框中输入端口名称 P1，并确认其端口阻抗为 50Ω ，然后单击 **下一步(N) >** 按钮。在打开的对话框中单击 Integration Line 项下边的 None，在其下拉列表中选择 New Line 选项，设置集总端口的积分校准线。积分校准线的起始点在同轴线的内导体边界上，终止点在同轴线的外导体边界上。这里，我们借助于鼠标捕捉功能，在同轴线内导体边界附近移动鼠标指针，当鼠标指针变成一个大的正方形时，表示捕捉到了内导体边界棱边的最上侧顶点，单击鼠标左键确认。然后移动鼠标指针到外导体边界附近，当鼠标指针再次变成一个大的正方形时，表示捕捉到了外导体边界棱边的最上侧顶点，再次单击鼠标左键确认。此时，即可完成积分校准线的设置，积分校准线的设置过程如图 7.1.24 所示。积分校准线设置完成后，会自动返回到集总端口设置对话框，然后继续单击该对话框中的 **下一步(N) >** 按钮直到结束，完成集总端口激励方式的设置。

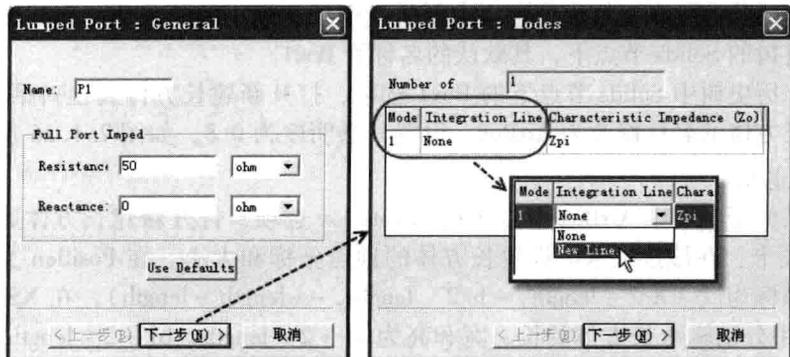


图 7.1.23 集总端口设置对话框

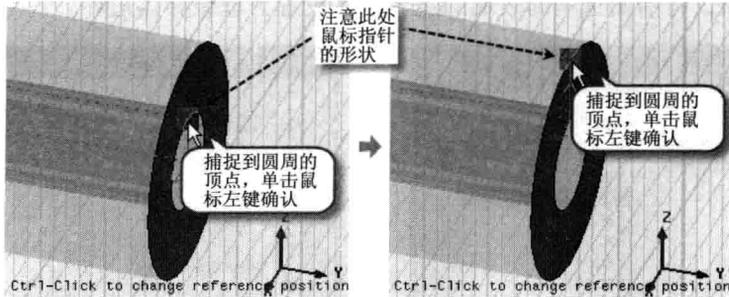


图 7.1.24 设置积分校准线

集总端口激励设置完成后, 激励名称 P1 会添加到工程树的 Excitations 节点下, 选中激励 P1, 然后单击工具栏上的  按钮, 放大显示上面添加的激励端口 P1, 如图 7.1.25 所示。

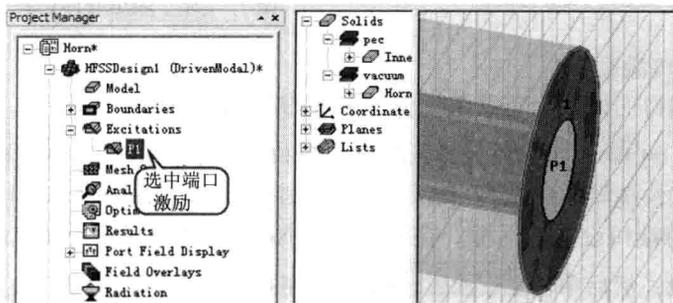


图 7.1.25 查看集总端口激励

(7) 设置辐射边界条件

使用 HFSS 分析天线问题时, 需要设置辐射边界, 且辐射边界表面距离辐射体需要不小于 $1/4$ 个工作波长。我们在这里创建一个长方体模型, 该模型的各个表面与喇叭天线的距离都为 $1/4$ 个工作波长, 然后将该模型的所有表面都设置为辐射边界条件。

首先, 单击工具栏上的  下拉列表框, 在其下拉列表中选择 XY 选项, 将当前绘图平面设置为 xy 面。

然后, 从主菜单栏中选择 **【Draw】** → **【Box】** 命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建长方体的状态, 在三维模型窗口中创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树中 Solids 节点下的 Box1 选项, 打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡。将长方体的名称修改为 AirBox, 设置其透明度为 0.8, 如图 7.1.26 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

再双击操作历史树中 AirBox 节点下的 CreateBox 选项, 打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置长方体的顶点坐标和大小。在 Position 文本框中输入其顶点位置坐标为 $(-a/2 - \text{length}, -b/2 - \text{length}, -\text{wlength} - \text{length})$, 在 XSize、YSize 和 ZSize 文本框中分别输入长方体的长、宽和高为 $a1 + 2 \times \text{length}$ 、 $b1 + 2 \times \text{length}$ 和 $\text{wlength} + \text{plength} + 2 \times \text{length}$, 如图 7.1.27 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

长方体模型 AirBox 创建好了之后, 在操作历史树下单击 AirBox 选项, 选中该模型。然后

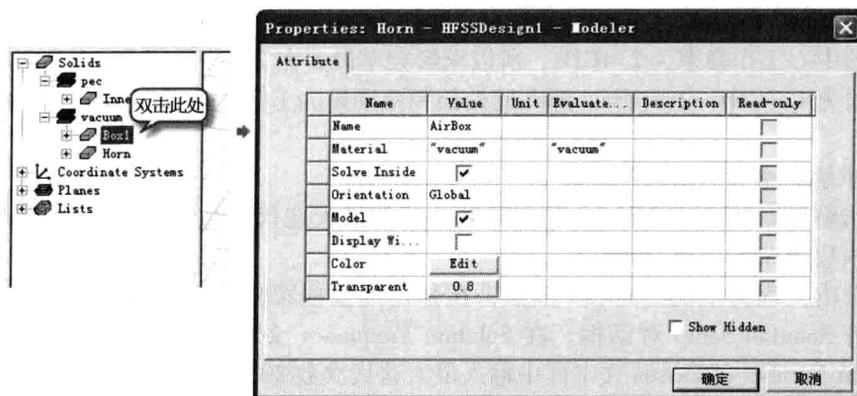


图 7.1.26 Attribute 选项卡

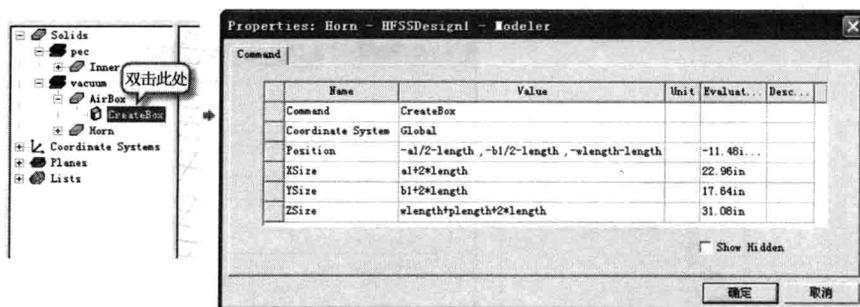


图 7.1.27 Command 选项卡

在三维模型窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Radiation】命令，打开如图 7.1.28 所示的辐射边界条件设置对话框，保留该对话框中的默认设置不变，直接单击 **OK** 按钮，将长方体模型 AirBox 的表面设置为辐射边界条件。

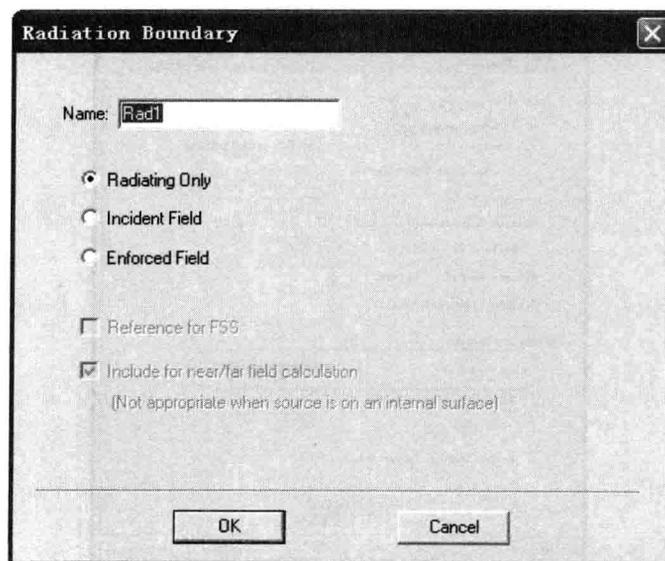


图 7.1.28 辐射边界条件设置对话框

4. 求解设置

天线的中心工作频率为 2.4GHz，所以求解频率设置在 2.4GHz 频点。WR430 矩形波导的工作频段为 1.7GHz~2.6GHz。那么此处扫频范围设为 1.7GHz~2.6GHz，扫频类型设为快速扫频。

(1) 求解频率和网格剖分设置

设置求解频率为 2.4GHz，自适应网格剖分的最大迭代次数为 20，收敛误差为 0.02，有限元基函数选择 Second Order。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add Solution Setup】命令，打开 Solution Setup 对话框。在 Solution Frequency 文本框中输入求解频率 2.4GHz，在 Maximum Number of Passes 文本框中输入最大迭代次数 20，在 Maximum Delta S 文本框中输入收敛误差 0.02，其他选项保留默认设置，如图 7.1.29 所示。然后单击 Options 选项卡，在 Order of Basis 下拉列表中选择 Second Order 选项，如图 7.1.30 所示。最后单击 **确定** 按钮，完成求解设置。

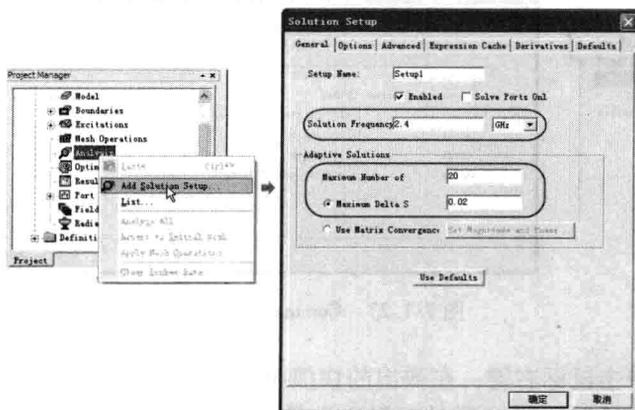


图 7.1.29 求解设置

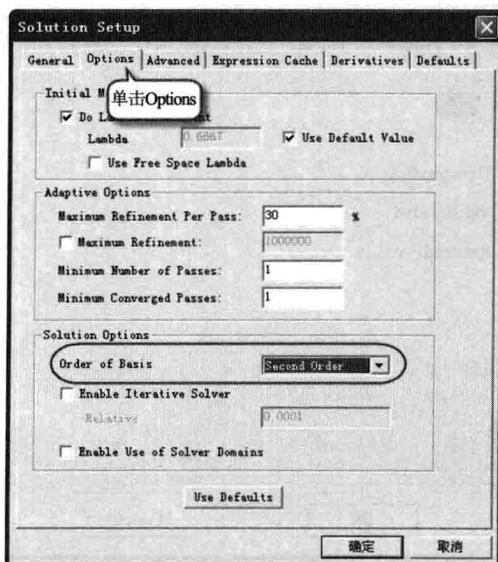


图 7.1.30 求解设置对话框中的 Options 选项卡

设置完成后，求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

说明：在 HFSS 中，有限元基函数默认为 First Order，但是对于结构较为简单的电大尺寸器件，选择高阶基函数可以在较少的剖分单元下获得较好的精度。具体到当前这个设计，喇叭天线模型的长度约为 6 个工作波长，属于电大尺寸器件，对于普通配置的个人计算机来说，如果使用默认的基函数 First Order，有可能会出现网格剖分数目过多，从而导致内存不够用的情况出现，所以在此处需要选择 Second Order。

(2) 扫频设置

扫频类型选择快速扫频，扫频频率范围为 1.7GHz ~ 2.6GHz，频率步进为 0.1GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点，右键单击求解设置项 Setup1，在弹出的快捷菜单中选择【Add Frequency Sweep】命令，打开 Edit Sweep 对话框，如图 7.1.31 所示。在 Sweep Type 下拉列表中选择扫描类型为 Fast，在 Frequency Setup 选项组中的 Type 下拉列表中选择 LinearStep 选项，在 Start 文本框中输入 1.7GHz，在 Stop 文本框中输入 2.6GHz，在 Step Size 文本框中输入 0.1GHz，其他选项都保留默认设置。最后单击对话框中的 **OK** 按钮，完成设置。

设置完成后，该扫频设置项的名称 Sweep1 会添加到工程树中求解设置项 Setup1 节点下。

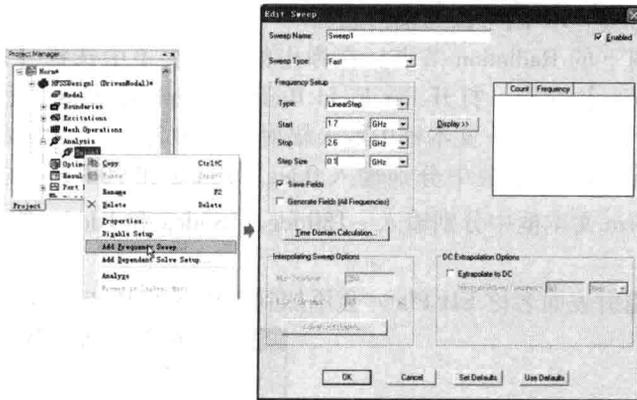


图 7.1.31 扫频设置

5. 设计检查

通过前面的操作，我们已经完成了模型创建和求解设置等 HFSS 设计的前期工作，接下来就可以运行仿真计算并查看分析结果了。但在运行仿真计算之前，通常需要进行设计检查，确认设计的完整性和正确性。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进行设计检查。此时，会打开如图 7.1.32 所示的 Validation Check 对话框，该对话框中每一个选项的前面都显示  图标，表示当前的 HFSS 设计正确且完整。然后单击 **Close** 按钮，关闭对话框。接下来，我们可以开始运行仿真计算。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze All】命令，或者单击工具栏上的  按钮，开始运行仿真计算。

在仿真计算的过程中，工作界面右下方的进度条窗口中会显示出求解的进度，在信息管理窗口中也会有相应的信息说明，并且会在仿真计算完成后给出完成提示信息。

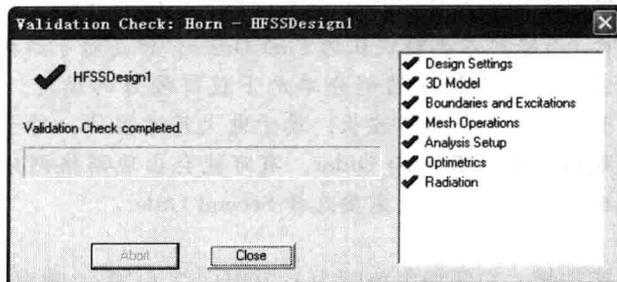


图 7.1.32 设计检查结果对话框

6. 查看分析结果

在仿真计算完成后，利用 HFSS 的数据后处理功能分别查看喇叭天线的以下分析结果：在工作频率为 2.4GHz 时， E 面和 H 面上的增益方向图以及三维增益方向图，回波损耗 S_{11} 的扫频分析结果。

(1) 定义辐射表面

要想查看天线的远区场计算结果，首先需要定义辐射表面。在当前的设计中， E 面位于 xz 平面，即球坐标系下 $\varphi = 0^\circ$ 的平面； H 面位于 yz 平面，即球坐标系下 $\varphi = 90^\circ$ 的平面。

① 定义 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 的平面为辐射表面。

右键单击工程树下的 Radiation 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Insert Far Field Setup】→【Infinite Sphere】命令，打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框，定义辐射表面，如图 7.1.33 所示。在 Name 文本框中输入辐射表面的名称 EH Plane，在 Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、90deg 和 90deg，在 Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 -180deg、180deg 和 1deg。然后单击 **确定** 按钮，完成设置。

此时，定义的辐射表面名称 EH Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

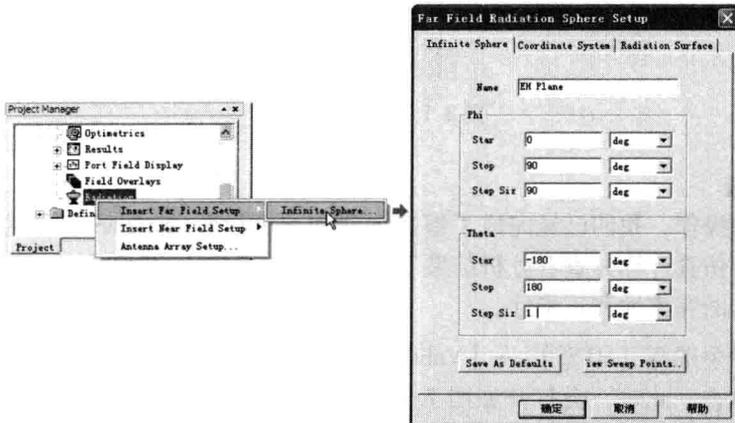


图 7.1.33 定义辐射表面

② 定义三维立体球面为辐射表面。

使用和前面相同的操作方法，再次打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框。在 Name 文本框中输入辐射表面的名称 3D Sphere，在 Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、360deg 和 2deg，在 Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本

框中分别输入 0deg、180deg 和 2deg。然后单击 **确定** 按钮，完成设置。

此时，定义的辐射表面的名称 3D Sphere 同样会添加到工程树的 Radiation 节点下。

(2) 查看 E 面和 H 面上的增益方向图

右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框，如图 7.1.34 所示。在 Geometry 文本框中选择前面定义的辐射表面 EH Plane，在 Category 列表框中选择 Gain 选项，在 Quantity 列表框中选择 GainTotal 选项，在 Function 文本框中选择 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮，生成如图 7.1.35 所示的直角坐标系下 E 面和 H 面的增益方向图。从分析结果中可以看出，天线的最大增益约为 19.6dB，与我们的设计要求较为吻合。

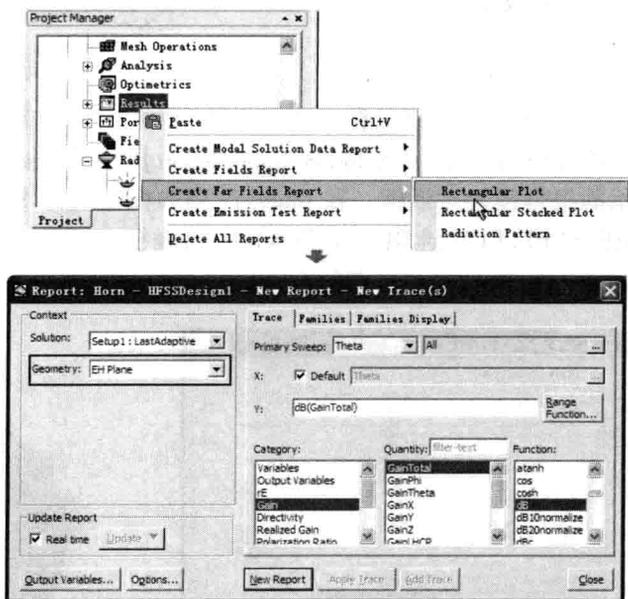


图 7.1.34 结果报告设置对话框

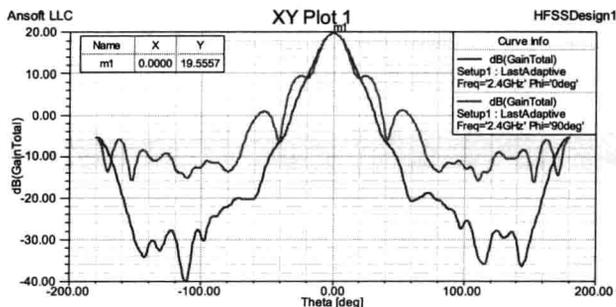


图 7.1.35 E 面和 H 面增益方向图

另外，在 HFSS 中也可以查看极坐标系下表示的 E 面和 H 面的增益方向图分析结果。具体操作为：右键单击工程树下的 Results 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Radiation Pattern】命令，打开报告设置对话框，对话框的设置与图 7.1.34 所示设置相同，然后单击 New Report 按钮，即可生成如图 7.1.36 所示的极坐标系下 E 面和 H 面的增益方向图。

(3) 查看三维增益方向图

右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【3D Polar Plot】命令, 打开如图 7.1.37 所示的报告设置对话框。在 Geometry 下拉列表中选择前面定义的辐射面 3D Sphere, 在 Category 文本框中选择 Gain 选项, 在 Quantity 列表框中选择 GainTotal 选项, 在 Function 选项选择 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮, 生成如图 7.1.38 所示的三维增益方向图。

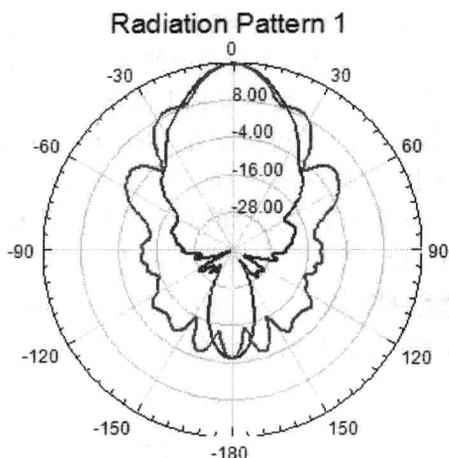


图 7.1.36 极坐标系下 E 面和 H 面的增益方向图

(4) 查看回波损耗 S_{11} 扫频结果

右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令, 打开如图 7.1.39 所示的报告设置对话框。在 Category 列表框中选中 S Parameter 选项, 在 Quantity 列表框中选择 S(P1,P1) 选项, 在 Function 列表框中选中 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮生成结果报告, 再单击 **Close** 按钮关闭对话框。

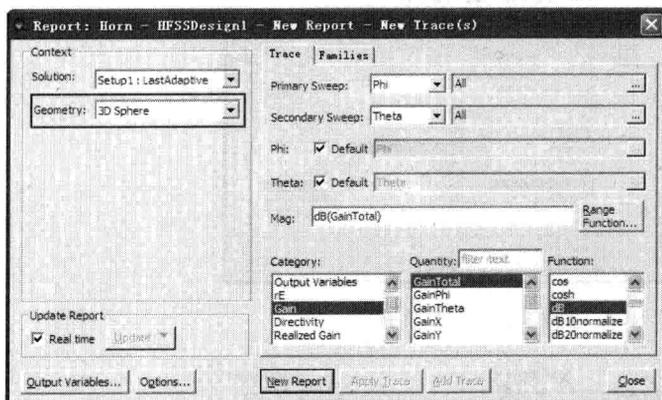


图 7.1.37 三维增益方向图结果报告设置

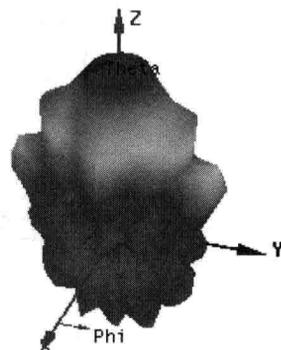


图 7.1.38 三维增益方向图

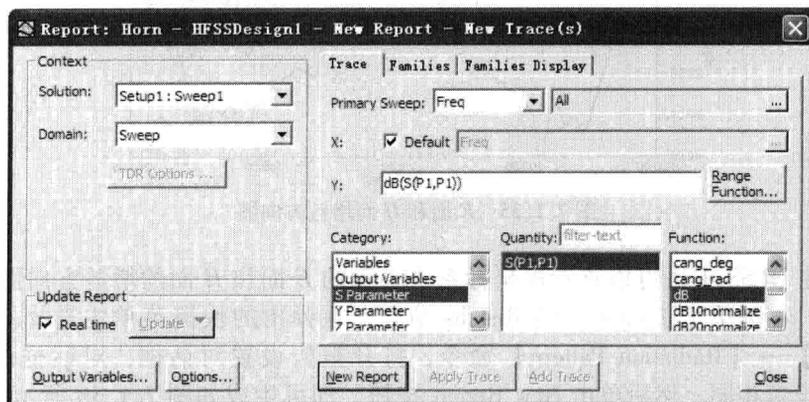


图 7.1.39 结果报告设置对话框

此时，生成的 S_{11} 随频率的变化曲线报告如图 7.1.40 所示。从分析结果中可以看出，2.4GHz 时， S_{11} 的值约为 -15dB。

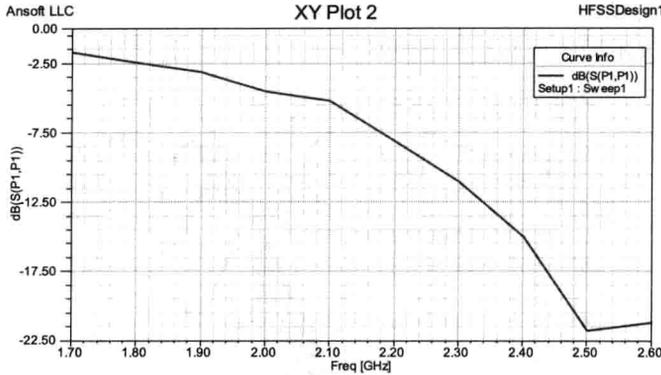


图 7.1.40 S_{11} 扫频结果

7. 保存设计

至此，我们完成了矩形口径喇叭天线的设计分析，设计的喇叭天线最大增益约为 19.6dB，与设计要求的 19dB 接近。最后，单击工具栏上的  按钮保存设计，再选择主菜单栏中的【File】→【Exit】命令，退出 HFSS。

7.2 圆形口径双模喇叭天线设计

7.2.1 圆形口径喇叭天线原理

圆形口径喇叭天线通常称为圆锥喇叭天线，其结构如图 7.2.1 所示。角锥喇叭通常使用矩形波导馈电，而圆锥喇叭一般使用圆形波导馈电。矩形波导内传输的主模是 TE_{10} 模，而圆形波导内传输的主模是 TE_{11} 模。

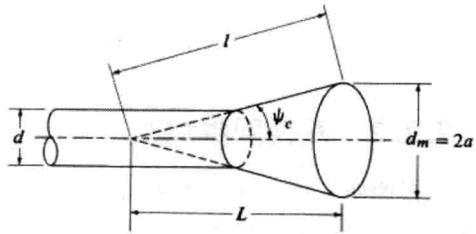


图 7.2.1 圆锥喇叭天线

这里分别用 d_m 表示喇叭的口径， L 表示圆锥喇叭的长度，则圆锥喇叭的方向性系数（以 dB 为单位）可以用下式计算。

$$D(\text{dB}) = 10\lg\left[\varepsilon_{\text{ap}} \frac{4\pi}{\lambda^2} (\pi a^2)\right] = 10\lg\left(\frac{C}{\lambda}\right)^2 - L(s) \tag{7-2-1}$$

式中， ε_{ap} 为圆形喇叭的口径效率， a 为口径半径， C 为口径周长。 $L(s)$ 定义为：

$$L(s) = -10\lg(\varepsilon_{\text{ap}}) \tag{7-2-2}$$

式 (7-2-1) 中，第一项代表均匀圆口径的方向性系数，第二项 $L(s)$ 表示口径效率所引起的方向性系数损失的修正因子。 $L(s)$ 称为损失因子，可以由下式估算给出（以 dB 为单位）。

$$L(s) \approx 0.8 - 1.71s + 26.25s^2 - 17.79s^3 \tag{7-2-3}$$

式中， s 是以波长表示的口径上的相位变化。

$$s = \frac{d_m^2}{8\lambda l} \tag{7-2-4}$$

当

$$d_m = \sqrt{3l\lambda} \quad (7-2-5)$$

时, 圆锥喇叭天线的方向性系数最佳。此时, $s = 3\lambda/8$, $\epsilon_{ap} = 0.51$ 。

图 7.2.2 所示为不同轴向长度圆锥喇叭天线的方向性系数与圆锥口径直径之间的关系。

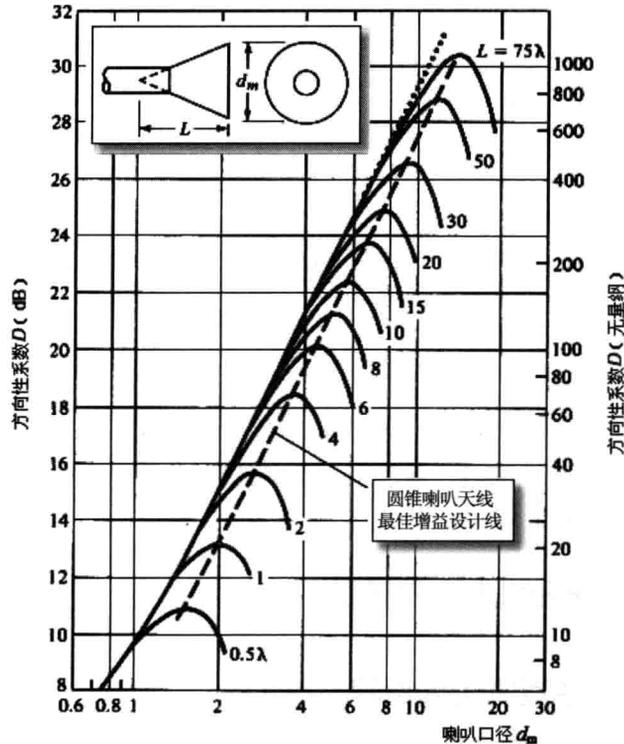


图 7.2.2 不同轴向长度圆锥喇叭天线的方向性系数与口径直径的关系

7.2.2 双模圆锥喇叭

单模喇叭, 无论是圆锥喇叭 (TE_{11} 模) 还是角锥喇叭 (TE_{10} 模), 它们在 E 面和 H 面内的方向图都有较大的差别。这是因为在喇叭口径上电场在 H 面内的变化大 (因为在理想导电壁上电场切向分量必须等于零), 而在 E 面内的变化很小 (圆锥喇叭) 或几乎不变 (角锥喇叭)。因此, 一般说来, E 面和 H 面内不存在对称波束。

通过把适当的附加模引入到喇叭中, 让它和主模一起到达口径面, 以改变口径面上的场分布, 使得场在两个正交平面内的分布规律近似相同, 从而可以得到在两个正交平面内相等或近似相等的方向图。在实际应用中, 这种方法仅需一个附加模, 这种喇叭称为双模喇叭。

在双模圆锥喇叭中, 附加的高阶模是 TM_{11} 模, 它与主模迭加能产生具有良好轴对称性的方向图和低的副瓣电平。当它们在喇叭口径面上有适当的相位时, 在口径边界处, TM_{11} 模将抵消由 TE_{11} 模产生的电磁场的 φ 分量, 使 E_φ 和 H_φ 都等于零, 这是导致方向图具有轴对称性和低交叉极化的条件。

一种变张角双模喇叭天线的示意图如图 7.2.3 所示, 圆波导半径 a 经过一段圆锥后变化为半径 b , 激发 TM_{11} 模。波导半径 a 必须使 TE_{11} 模能够传播, 而 TM_{11} 模截止, 即需要

满足

$$1.84 < ka < 3.83 \tag{7-2-6}$$

其中, k 为波长数, $k = 2\pi/\lambda$ 。

激发的 TM_{11} 模的大小随 b/a 值的增加而增加, b 的选择应使 TM_{11} 模能够传播, 而 TE_{12} 模截止, 即需要满足

$$3.83 < kb < 5.33 \tag{7-2-7}$$

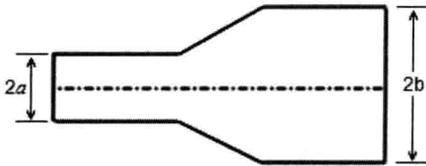


图 7.2.3 变张角双模圆锥波导

由于结构的轴对称性, 因此不可能产生 $m > 1$ 的 TE_{mn} 和 TM_{mn} 模, 图 7.2.4 定性地给出了双模圆锥喇叭天线口径面 TE_{11} 和 TM_{11} 两个模合成的电场分布。在口径面中心, TE_{11} 模的电场和 TM_{11} 模的电场相加; 在靠近口径边缘, 两个模的电场相互抵消。

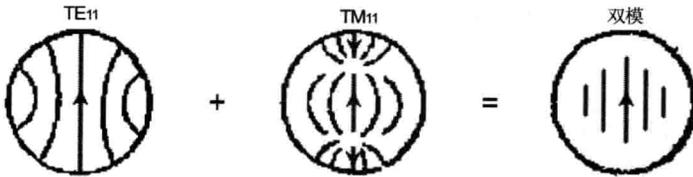


图 7.2.4 双模圆锥喇叭天线近似口径场分布

7.2.3 设计实例分析

这里设计一个双模工作的圆锥喇叭天线, 天线的中心频率为 5GHz, 采用的是圆波导馈电, 并使用 TE_{11} 和 TM_{11} 两个激励模式, 两个模式的初始误差为 90° , 构成圆极化。

5GHz 电磁波的波长为 6cm, 根据式 (7-2-6) 和式 (7-2-7) 可以算出如图 7.2.3 所示的圆锥喇叭天线的左侧圆波导的半径需要满足 $1.76\text{cm} < a < 3.66\text{cm}$, 右侧圆波导的半径需要满足 $3.66\text{cm} < b < 5.09\text{cm}$ 。在设计过程中, 左侧圆波导的半径取 2.13cm, 即直径为 4.26cm; 右侧圆波导半径取 3.93cm, 即直径为 7.86cm。所设计的双模工作的圆锥喇叭天线完整结构的尺寸如图 7.2.5 所示。

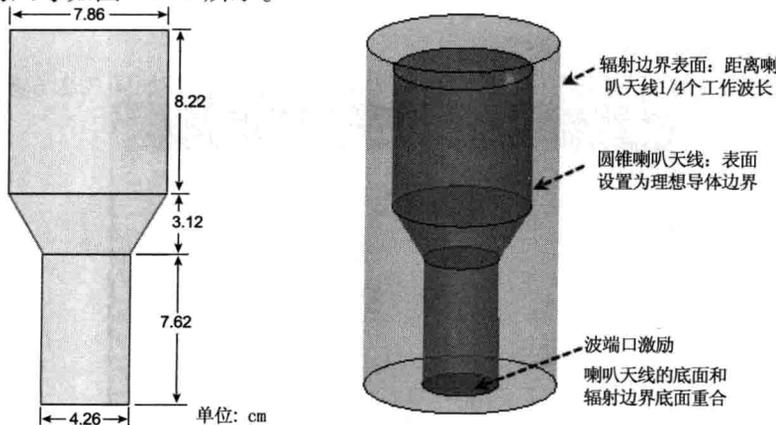


图 7.2.5 双模圆锥喇叭天线模型

使用 HFSS 设计时, 我们首先创建一个这样的圆锥喇叭模型, 圆锥喇叭壁的材质使用理想导体, 这里通过把圆锥喇叭的表面设置为理想导体边界条件 (Perfect E) 来实现。因为圆锥喇叭底面是激励端口, 上侧表面是辐射口径, 所以这两个面不需要设置为理想导体边界条件。另外, 因为我们分析的是一个辐射结构, 所以需要设置 PML 边界条件或者辐射边界条件来模拟自由空间, 本例中我们选择使用辐射边界条件。辐射边界表面和辐射体的距离设置为 $1/4$ 个工作波长。建模时, 让辐射边界的底面和圆锥喇叭的底面重合, 这样圆锥喇叭的底面就与背景相接触, 所以激励方式选择波端口激励。因为设计分析的是一个双模喇叭天线, 所以在设置激励端口时, 激励端口的模式数需要设为 2。最后, 在仿真分析完成之后, 在 HFSS 数据后处理部分, 设置两个激励模式的幅度和相位以构成圆极化, 并生成二维增益方向图和圆极化轴比的仿真结果。

设计中, 为了便于更改圆锥喇叭天线模型的物理尺寸, 我们需要创建参数化模型, 这就需要定义一系列变量来表示天线的物理尺寸。在当前设计中, 变量定义以及设计的喇叭天线的初始尺寸如表 7.2.1 所示。

表 7.2.1 喇叭天线尺寸和变量定义

结构名称	变量名	变量值 (单位: cm)
5GHz 工作波长	length	6
如图 7.2.5 所示的下侧圆波导半径	a	2.13
如图 7.2.5 所示的上侧圆波导半径	b	3.93
如图 7.2.5 所示的下侧圆波导长度	h1	7.62
如图 7.2.5 所示的上、下侧圆波导间距	h2	3.12
如图 7.2.5 所示的上侧圆波导长度	h3	8.22

7.2.4 HFSS 仿真设计

1. 新建工程

(1) 运行 HFSS 并新建工程

双击桌面上的 HFSS 快捷方式图标 , 启动 HFSS 软件。HFSS 运行后, 它会自动新建一个工程文件, 选择主菜单栏中的【File】→【Save As】命令, 把工程文件另存为 Conical_Horn.hfss 文件。

(2) 设置求解类型

设置当前设计为模式驱动求解类型。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Solution Type】命令, 打开如图 7.2.6 所示的 Solution

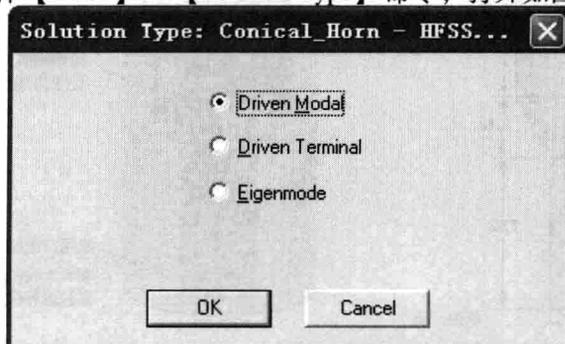


图 7.2.6 设置求解类型

Type 对话框，选中 Driven Modal 单选按钮，然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

(3) 设置模型长度单位

设置当前设计在创建模型时所使用的默认长度单位为厘米。

从主菜单栏中选择【Modeler】→【Units】命令，打开如图 7.2.7 所示的 Set Model Units 对话框。在 Select units 下拉列表中选择 cm，然后单击 **OK** 按钮，完成设置。

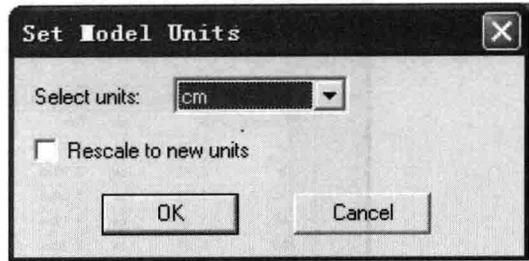


图 7.2.7 设置长度单位

2. 添加和定义设计变量

在 HFSS 中定义和添加如表 7.2.1 所示的所有设计变量。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框。再单击对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add Property 对话框。在 Add Property 对话框的 Name 文本框中输入第一个变量名称 length，在 Value 文本框中输入该变量的初始值 6cm，然后单击 **OK** 按钮，即可添加变量 length 到设计属性对话框，如图 7.2.8 所示。

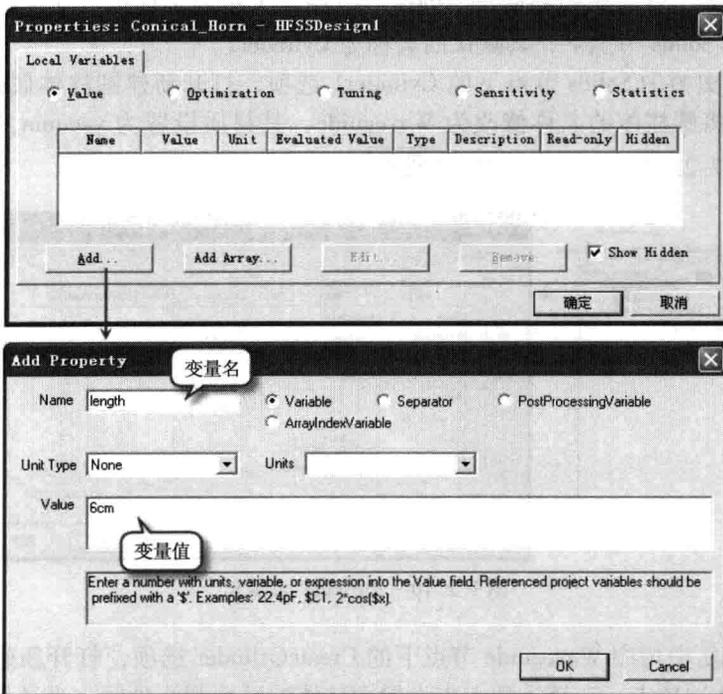


图 7.2.8 定义变量

使用相同的操作方法，分别定义变量 a，其初始值为 2.13cm；变量 b，其初始值为 3.93cm；变量 h1，其初始值为 7.62cm；变量 h2，其初始值为 3.12cm；变量 h3，其初始值为 8.22cm。变量定义完成后，确认属性对话框如图 7.2.9 所示。

最后，单击设计属性对话框中的 **确定** 按钮，完成所有变量的定义和添加工作。

3. 设计建模

(1) 创建底侧圆波导

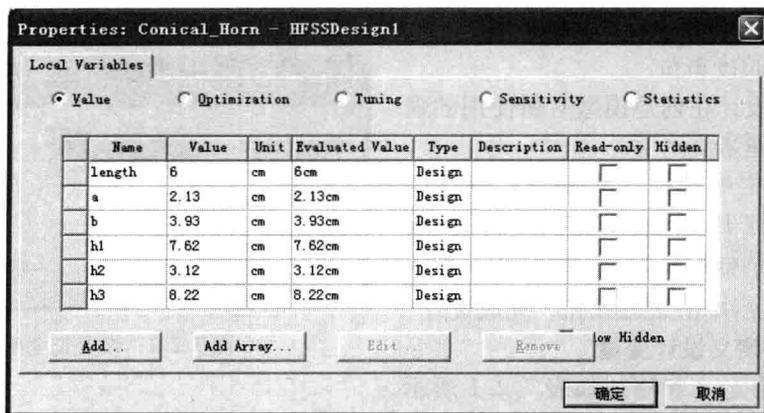


图 7.2.9 定义所有设计变量后的设计属性对话框

创建一个放置于 xy 平面上的圆柱体, 其截面半径和高度分别用变量 a 和 $h1$ 表示, 其底面圆心位于坐标原点, 并将其命名为 Waveguide。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Cylinder】命令, 或者单击工具栏上的  按钮, 进入创建圆柱体的状态, 在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆柱体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Cylinder1。

双击操作历史树中 Solids 节点下的 Cylinder1 选项, 打开新建圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡。将圆柱体的名称修改为 Waveguide, 其材质设置为 vacuum, 并设置其透明度为 0.4, 如图 7.2.10 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

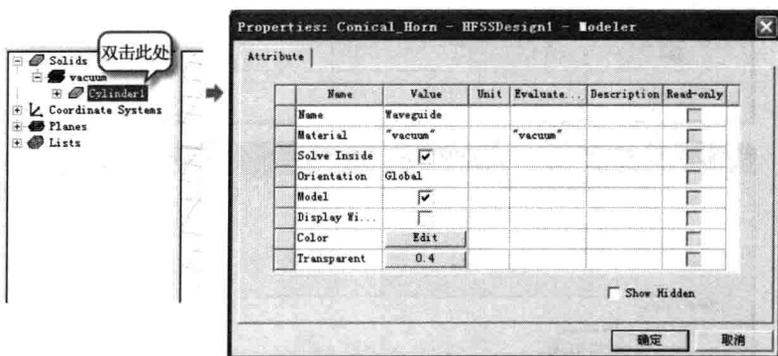


图 7.2.10 Attribute 选项卡

再双击操作历史树中 Waveguide 节点下的 CreateCylinder 选项, 打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡中设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度。在 Center Position 文本框中输入底面圆心坐标为 $(0,0,0)$, 在 Radius 文本框中输入半径值 a , 在 Height 文本框中输入长度值 $h1$, 如图 7.2.11 所示。然后单击 **确定** 按钮, 完成圆柱体 Waveguide 的创建。

创建好了圆波导 Waveguide 之后, 按快捷键 $Ctrl + D$ 全屏显示已创建的模型。

(2) 创建两个圆波导中间的圆锥体

创建一个位于圆波导 Waveguide 上表面的圆锥体, 并将其命名为 Taper。圆锥体的底面半径为 a , 上表面半径为 b , 高度为 $h2$ 。因为圆锥体的底面和圆波导 Waveguide 上表面重

合，所以其底面圆心坐标为 $(0,0,h_1)$ 。

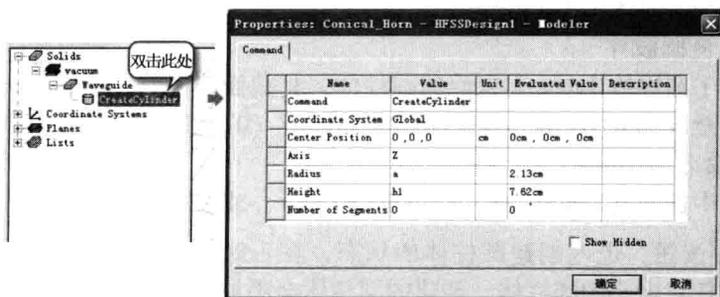


图 7.2.11 Command 选项卡

从主菜单栏中选择【Draw】→【Cone】命令，或者单击工具栏上的按钮，进入创建圆锥体的状态，在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆锥体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Cone1。

双击操作历史树中 Solids 节点下的 Cone1 选项，打开新建圆锥体属性对话框的 Attribute 选项卡。将圆锥体的名称修改为 Taper，其材质为 vacuum，并设置其透明度为 0.4，如图 7.2.12 所示，然后单击按钮退出。

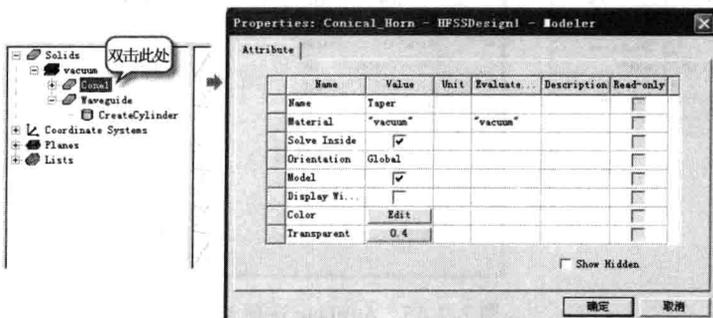


图 7.2.12 Attribute 选项卡

再双击操作历史树中 Taper 节点下的 CreateCone 选项，打开新建圆锥体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置圆锥体的底面圆心坐标、上/下表面半径和圆锥体的高度。在 Center Position 文本框中输入其底面圆心坐标为 $(0,0,h_1)$ ，在 Upper Radius 文本框中输入其上表面半径值 b ，在 Lower Radius 文本框中输入其底面半径值 a ，在 Height 文本框中输入其高度值 h_2 ，如图 7.2.13 所示。然后单击按钮，完成圆锥体 Taper 的创建。

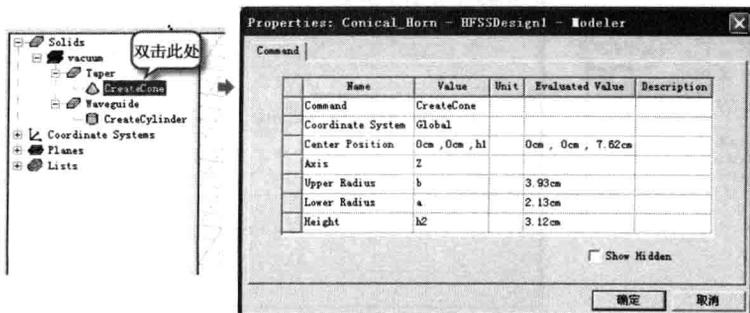


图 7.2.13 Command 选项卡

创建好了圆锥体 Taper 之后,再次按快捷键 Ctrl + D 全屏显示所有已创建的模型,如图 7.2.14 所示。

(3) 创建上侧圆波导

创建一个位于圆锥体 Taper 上表面的圆柱体,其截面半径和高度分别用变量 b 和 h_3 表示,其底面圆心坐标为 $(0,0,h_1 + h_2)$,并将其命名为 Throat。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Cylinder】命令,或者单击工具栏上的按钮,进入创建圆柱体的状态,在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆柱体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下,其默认的名称为 Cylinder1。

双击操作历史树中 Solids 节点下的 Cylinder1 选项,打开新建圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡。将圆柱体的名称修改为 Throat,其材质设置为 vacuum,并设置其透明度为 0.4,如图 7.2.15 所示,然后单击 **确定** 按钮退出。

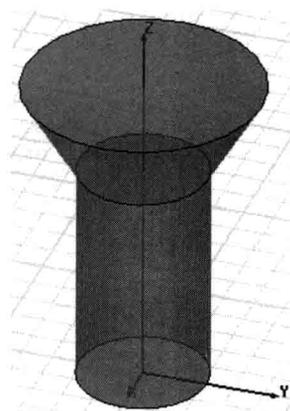


图 7.2.14 物体模型

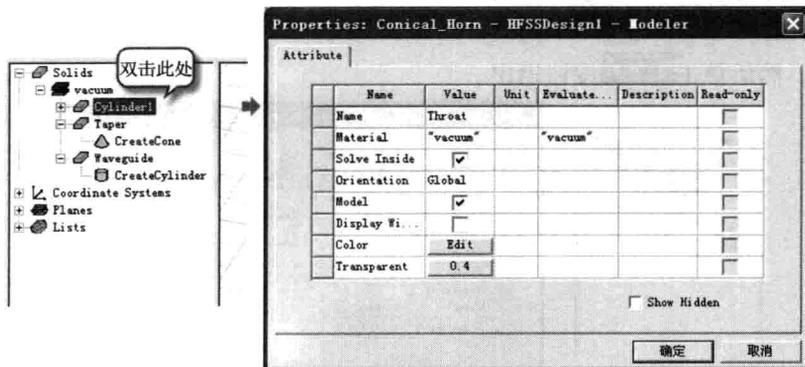


图 7.2.15 Attribute 选项卡

再双击操作历史树中 Throat 节点下的 CreateCylinder 选项,打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡,在该选项卡中设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度。在 Center Position 文本框中输入其底面圆心坐标为 $(0,0,h_1 + h_2)$,在 Radius 文本框中输入其半径值 b ,在 Height 文本框中输入其长度值 h_3 ,如图 7.2.16 所示。然后单击 **确定** 按钮,完成圆柱体 Throat 的创建。

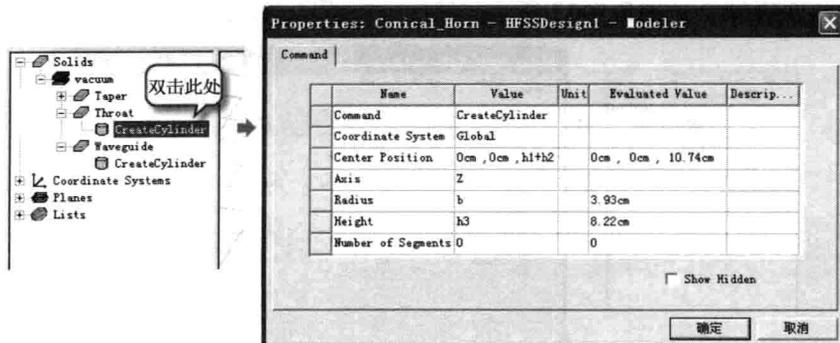


图 7.2.16 Command 选项卡

创建好圆柱体 Throat 之后，按快捷键 Ctrl + D 全屏显示所有已创建的物体，如图 7.2.17 所示。

(4) 布尔操作

创建好了上述的 3 个物体模型之后，执行布尔运算的合并操作，将 3 个独立的物体模型合并成一个整体。

按住 Ctrl 键的同时在操作历史下按先后顺序单击 Waveguide、Taper 和 Throat 选项，同时选中这 3 个物体。然后从主菜单栏中选择【Modeler】→【Boolean】→【Unite】命令，或者直接单击工具栏上的按钮，执行合并操作，将选中的 3 个物体合并成一个整体。合并生成的物体名称、属性与执行合并操作前第一个选中的物体名称、属性相同。这里，新生成的物体名称为 Waveguide。

(5) 把圆锥喇叭的外表面设置为理想导体边界条件

因为圆锥喇叭的各个壁都是金属材质的，所以这里需要将圆锥喇叭天线模型的外侧表面都设置为理想导体边界条件。其中，圆锥喇叭的底面是激励端口，上侧表面是辐射口径面，这两个面不能设置为理想导体边界条件。

在三维模型窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Select Faces 选项，进入选择物体表面状态。然后，按住 Ctrl 键的同时依次单击该模型除去底部和顶部两个端口面之外的 3 个表面，即可同时选中这 3 个表面。

再次在三维模型窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令，打开如图 7.2.18 所示的 Perfect E Boundary 设置对话框。然后直接单击对话框中的按钮，即可将选中表面的边界条件设置为理想导体边界。此时，理想导体边界的名称 PerfE1 会添加到工程树的 Boundaries 节点下。

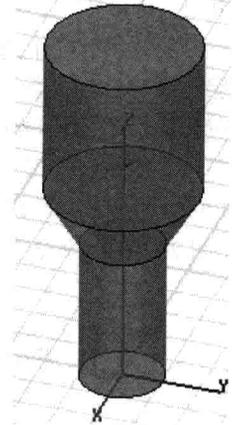


图 7.2.17 物体模型

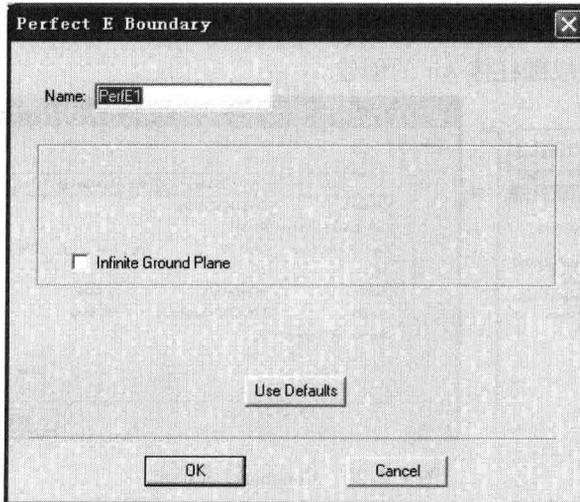


图 7.2.18 理想导体边界条件设置对话框

(6) 设置辐射边界条件

使用 HFSS 设计分析天线类问题时，我们需要设置 PML 边界条件或者辐射边界条件来模拟自由空间。本例中我们使用辐射边界条件，辐射边界表面和辐射体的距离通常需要不小于 $1/4$ 个工作波长。在这里，我们首先创建一个圆柱体模型，圆柱体模型的底面和圆锥喇叭的底面重合，其他表面与圆锥喇叭表面的距离都为 $1/4$ 个工作波长，然后将圆柱体模

型的所有表面都设置为辐射边界条件。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Cylinder】命令，或者单击工具栏上的按钮，进入创建圆柱体的状态，在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆柱体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Cylinder1。

双击操作历史树中 Solids 节点下的 Cylinder1 选项，打开新建圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡，将圆柱体的名称修改为 Air，其材质设为 vacuum，并设置其透明度为 0.8，如图 7.2.19 所示。然后单击 **确定** 按钮退出。

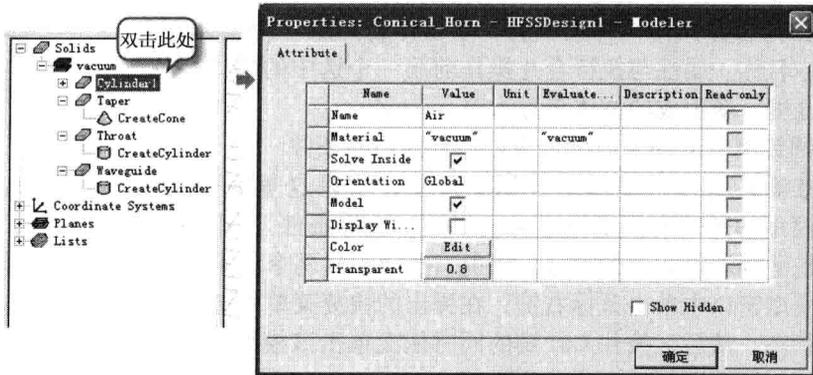


图 7.2.19 Attribute 选项卡

再双击操作历史树中 Air 节点下的 CreateCylinder 选项，打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度。在 Center Position 文本框中输入其底面圆心坐标为 (0,0,0)，在 Radius 文本框中输入其半径值 $b + \text{length}/4$ ，在 Height 文本框中输入其长度值 $h1 + h2 + h3 + \text{length}/4$ ，如图 7.2.20 所示。然后单击 **确定** 按钮，完成圆柱体 Air 的创建。

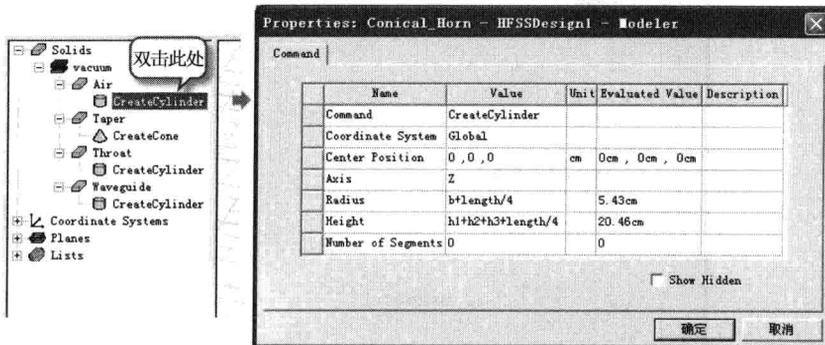


图 7.2.20 Command 选项卡

圆柱体模型 Air 创建好之后，单击在操作历史树下的 Air 节点，选中该模型。然后在三维模型窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】→【Radiation】命令，打开如图 7.2.21 所示的辐射边界条件设置对话框。保留对话框中的默认设置不变，直接单击 **OK** 按钮，即可把圆柱体模型 Air 的表面设置为辐射边界条件。同时，设置的辐射边界条件的名称 Rad1 会添加到工程树的 Boundaries 节点下。

(7) 设置端口激励

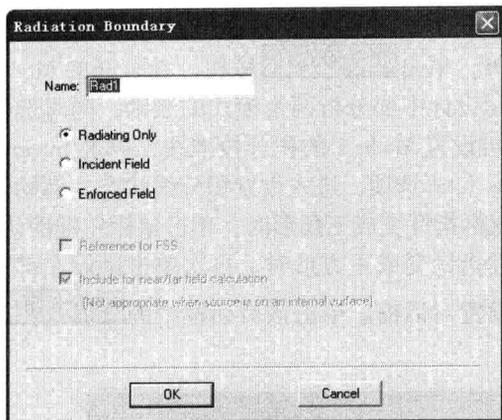


图 7.2.21 辐射边界条件设置对话框

双击操作历史树中 Sheets 节点下的 Circle1 选项，打开新建圆面属性对话框的 Attribute 选项卡，将圆面的名称修改为 Port，如图 7.2.22 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

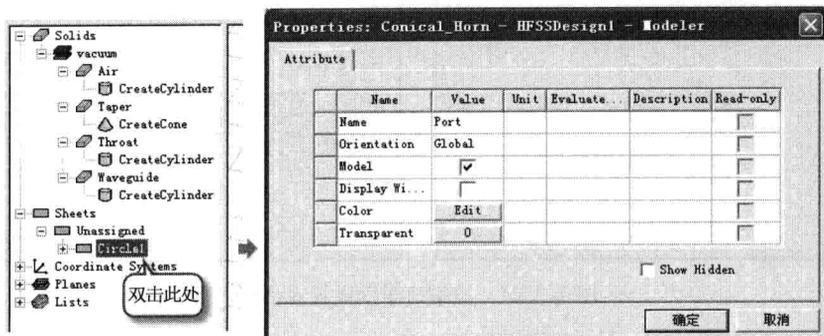


图 7.2.22 Attribute 选项卡

再双击操作历史树中 Port 节点下的 CreateCircle 选项，打开新建圆面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡中设置圆面的底面圆心坐标和半径。在 Center Position 文本框中输入其底面圆心坐标为 (0,0,0)，在 Radius 文本框中输入其半径值 a，如图 7.2.23 所示。然后单击 **确定** 按钮，完成圆面 Port 的创作。

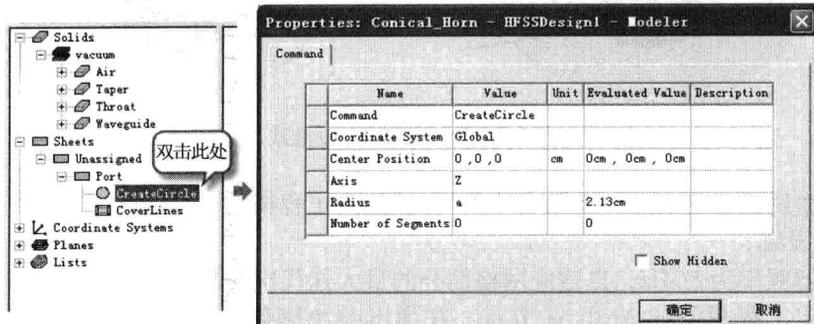


图 7.2.23 Command 选项卡

② 设置波端口激励。

单击工程树 Sheets 节点下的 Port 选项，选中该圆面。然后在其上单击鼠标右键，在弹出

在圆锥喇叭的底面创建一个圆面，使圆面与圆锥喇叭的底面重合，然后将该圆面设置为波端口激励。因为我们这里分析的是一个双模圆锥喇叭，所以波端口需要设置双模激励。

① 在圆锥喇叭的底面上创建一个圆面。

从主菜单栏中选择【Draw】→【Circle】命令，或者单击工具栏上的  按钮，进入创建圆面的状态，在三维模型窗口中创建一个任意大小的圆面。新建的圆面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Circle1。

的快捷菜单中选择【Assign Excitation】→【Wave Port】命令，打开如图 7.2.24 所示的波端口设置对话框。在 Name 文本框中输入端口名称 P1，单击 **下一步(N) >** 按钮。在打开的 Modes 对话框中的 Number of Modes 文本框中输入 2；表示设计中要分析两个模式的激励，同时选中 Align modes using integrations line 单选按钮。然后再设置 Mode 1 的积分校准线，单击 Integration Line 项下边的 None，在其下拉列表中选择 New Line 选项，进入设置积分线状态。借助于鼠标捕捉功能，在 Port 面边缘移动鼠标指针，当鼠标指针变成三角形时，单击鼠标左键确认。再沿着 x 轴移动鼠标指针到 Port 面边缘处，当鼠标指针变成正方形时，再次单击鼠标左键确认。此时即可完成积分线的设置，返回到波端口设置对话框。单击该对话框中的 **下一步(N) >** 按钮直到结束，完成波端口激励方式的设置。

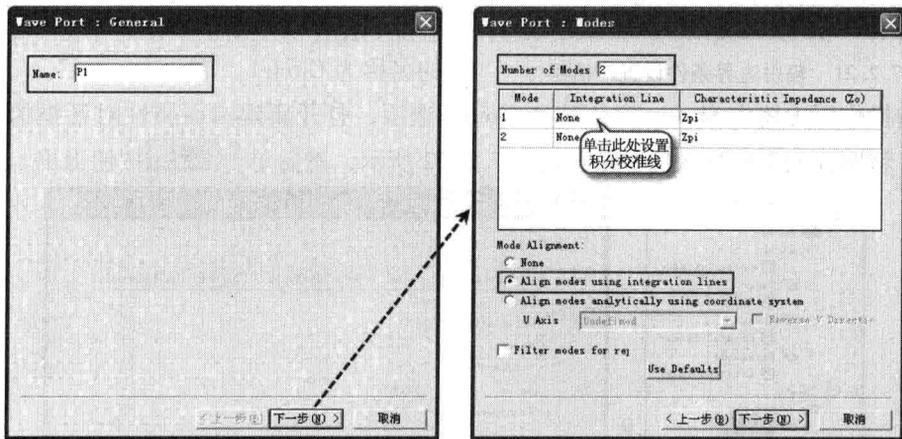


图 7.2.24 波端口激励设置对话框

上述积分校准线的设置过程如图 7.2.25 所示。

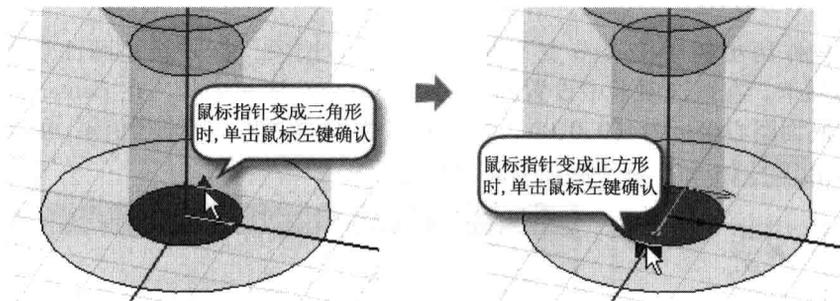


图 7.2.25 设置积分校准线

波端口激励设置完成后，激励名称 P1 会添加到工程树的 Excitations 节点下。

4. 求解设置

设置求解频率为 5GHz，自适应网格剖分的最大迭代次数为 10，收敛误差为 0.02。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Add Solution Setup】命令，打开 Solution Setup 对话框。在 Solution Frequency 文本框中输入求解频率 5GHz，在 Maximum Number of Passes 文本框中输入最大迭代次数 10，在 Maximum Delta S 文本框中输入收敛误差 0.02，其他选项保留默认设置，如图 7.2.26 所示。然后单击 **确定** 按钮，完成求解设置。

设置完成后，求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

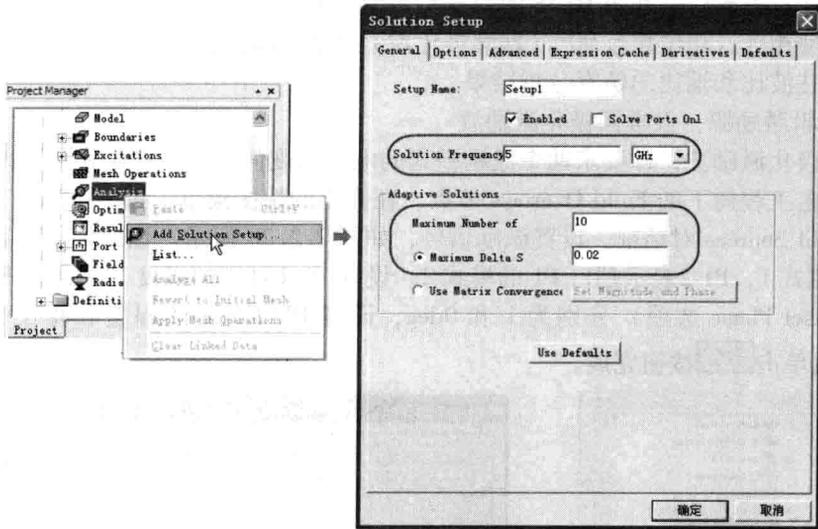


图 7.2.26 求解设置

5. 设计检查

通过前面的操作，我们已经完成了模型创建和求解设置等 HFSS 设计的前期工作，接下来就可以运行仿真计算并查看分析结果了。但在运行仿真计算之前，通常需要进行设计检查，确认设计的完整性和正确性。

从主菜单栏中选择【HFSS】→【Validation Check】命令，或者单击工具栏上的按钮，进行设计检查。此时，会打开如图 7.2.27 所示的 Validation Check 对话框，该对话框中的每一个选项的前面都显示图标，表示当前的 HFSS 设计正确且完整。单击按钮，关闭对话框。接下来，我们就可以开始运行仿真计算。

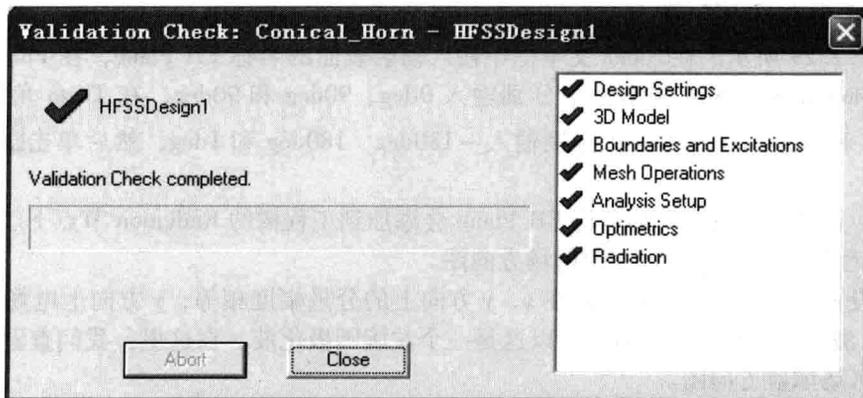


图 7.2.27 设计检查结果对话框

右键单击工程树下的 Analysis 节点，在弹出的快捷菜单中选择【Analyze All】命令，或者单击工具栏上的按钮，开始运行仿真计算。

在仿真计算过程中，工作界面右下方的进度条窗口中会显示出求解进度，信息管理窗口中也会有相应的信息说明，并在仿真计算完成后给出完成提示信息。

6. 数据后处理

在仿真计算完成后,利用 HFSS 的数据后处理功能,我们可以设置和查看当激励端口输入两个幅度相等、相位相差 90° (即圆极化波) 的激励模式时,天线在工作频点上的二维辐射场、驻波比和轴比的仿真分析结果。

(1) 编辑激励源,设置圆极化激励波

设置圆极化激励波,即要求两个激励模式的电场幅度值相等,初始相位相差 90° 。

右键单击工程树下的 Field Overlays 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Edit Sources】命令,打开 Edit Sources 对话框,设置激励信号,如图 7.2.28 所示。该对话框中的 P1:1 表示端口 P1 的模式 1, P1:2 表示端口 P1 的模式 2。设置 P1:1 对应的幅度 (Scaling Factor 选项) 和相位 (Offset Phase 选项) 分别为 1 和 0deg, 设置 P1:2 对应的幅度和相位分别为 1 和 90deg, 然后单击 **OK** 按钮完成。

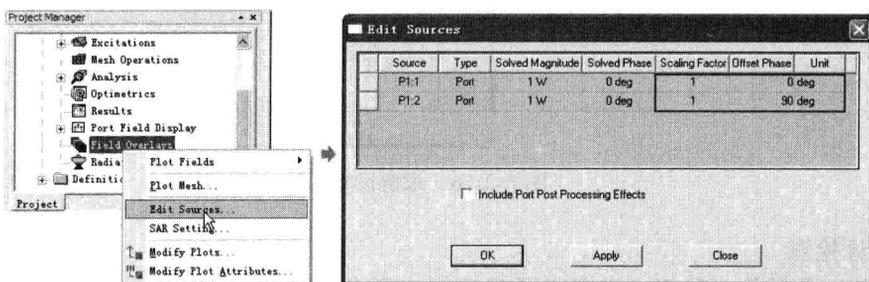


图 7.2.28 设置激励源

(2) 查看 E 面和 H 面的远区辐射场方向图

① 定义辐射表面。

根据定义的电场方向可知, E 面在 $\varphi = 0^\circ$ 的平面上, H 面在 $\varphi = 90^\circ$ 的平面上。然后将这两个平面定义为辐射表面。

右键单击工程树下的 Radiation 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Insert Far Field Setup】→【Infinite Sphere】命令,打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框,定义辐射表面,如图 7.2.29 所示。在 Name 文本框中输入辐射表面的名称 EH Plane, 在 Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 0deg、90deg 和 90deg, 在 Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 文本框中分别输入 -180deg 、 180deg 和 1deg, 然后单击 **确定** 按钮完成设置。

此时,定义的辐射表面的名称 EH Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

② 查看 E 面和 H 面的远区辐射场方向图。

因为设置的激励源电场初始值在 x 、 y 方向上的分量幅度相等, y 方向上电场分量相位滞后 90° , 波沿着 z 轴正向传播, 所以这是一个左旋圆极化波。在这里, 我们查看左旋圆极化波的远区场增益方向图。

右键单击工程树下的 Results 节点,在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Rectangular Plot】命令,打开报告设置对话框,如图 7.2.30 所示。在 Geometry 下拉列表中选择前面定义的辐射表面 EH Plane, 在 Category 列表框中选择 Gain 选项, 在 Quantity 列表框中选择 GainLHCP (表示左旋圆极化场的增益), 在 Function 列表框中选择 dB 选项。然后单击 **New Report** 按钮,生成如图 7.2.31 所示的直角坐标系下 E 面和 H 面的增益方向图。

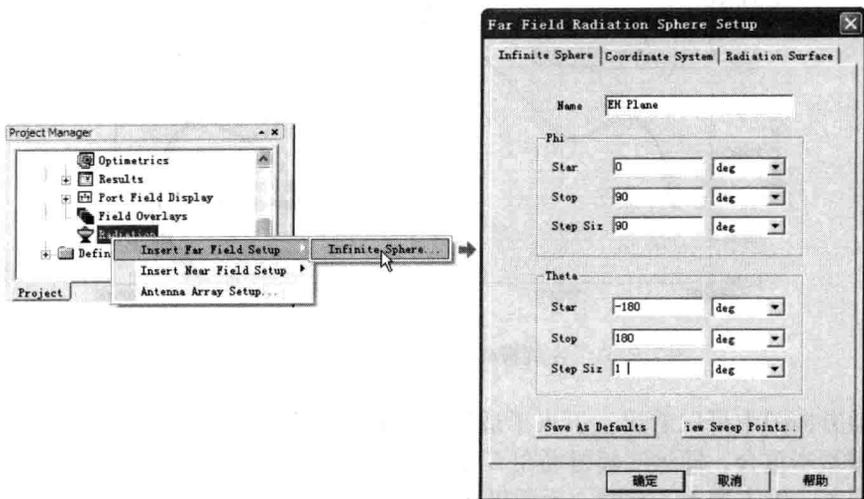


图 7.2.29 定义辐射表面

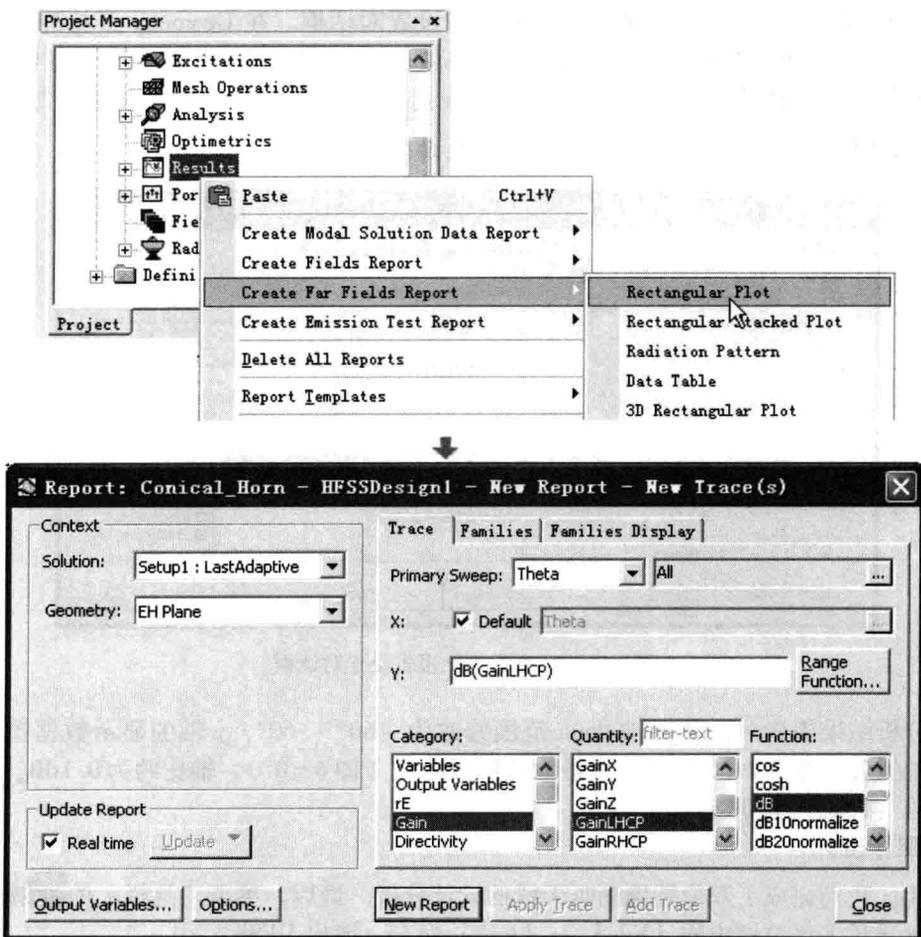
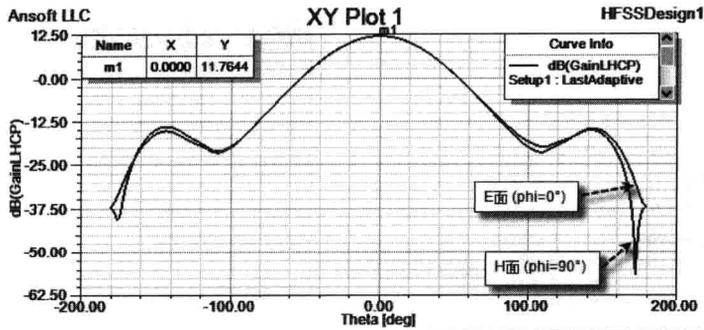


图 7.2.30 结果报告设置操作

图 7.2.31 左旋极化波的 E 面和 H 面增益方向图

从增益方向图中可以看出, 引入了适当的高次模 (即模式 2, TM_{11} 模) 后, E 面和 H 面上的波瓣基本重合, 即远区辐射场在 E 面和 H 面上的分布规律近似相等。最大增益辐射方向出现在 $\theta = 0^\circ$ 方向上, 此时左手圆极化增益约为 11.76dB。

(3) 查看轴比

右键单击工程树下的 Results 节点, 在弹出的快捷菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Rectangular Plot】命令, 打开报告设置对话框。在 Geometry 下拉列表中选择前面定义的辐射表面 EH Plane, 在 Category 下拉列表中选择 Axial Ratio 选项, 在 Quantity 下拉列表中选择 AxialRatioValue 选项, 在 Function 列表框中选择 dB 选项, 如图 7.2.32 所示。然后单击 **New Report** 按钮, 生成天线轴比分析结果。

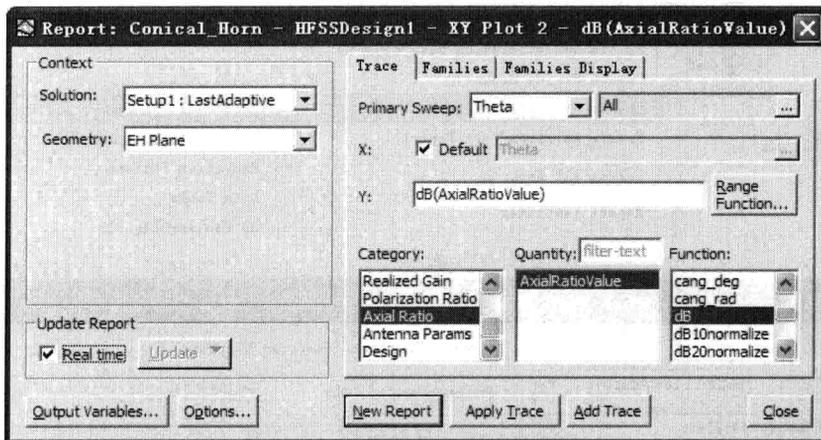


图 7.2.32 查看轴比报告设置对话框

在分析结果报告中, 将 x 轴 theta 范围修改为 $-60^\circ \sim 60^\circ$, y 轴的显示数据范围修改 $0 \sim 2$ 后的报告如图 7.2.33 所示。在最大辐射方向上 (即 $\theta = 0^\circ$), 轴比约为 0.1dB, 接近理想圆极化 (即轴比为 0dB)。

7. 保存设计

至此, 我们完成了双模圆锥喇叭天线的设计分析。最后, 单击工具栏上的  按钮保存设计, 再选择主菜单栏中的【File】→【Exit】命令, 退出 HFSS。

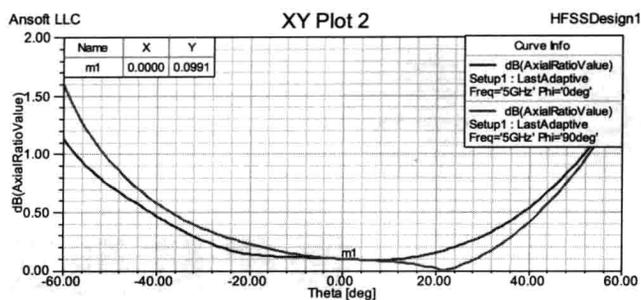


图 7.2.33 轴比分析结果

7.3 本章小结

本章讲解了喇叭天线的原理以及矩形口径喇叭天线和圆形口径喇叭天线这两种基本的喇叭天线的 HFSS 设计过程。另外，在本章中还会学到双模天线的设计以及在 HFSS 中如何设置双模激励。

第 8 章

微带阵列天线设计

为了增强天线的方向性，提高天线的增益，或者为了得到所需要的辐射方向图，可以把若干个相同的天线按一定的规律排列起来，并给与适当的激励，这样组成的天线系统称为天线阵，组成天线阵的独立单元称为天线单元或者阵元。依据阵元在控件的排列方式，天线阵可以分为线阵和面阵。天线阵的辐射特性取决于阵元的类型、数目、排列方式、阵元间距，以及阵元上激励电流的振幅和相位等。

本章主要介绍如何使用 HFSS 来设计分析一个 1×4 的微带阵列天线，天线工作在 16GHz 的 Ku 频段。对于阵列天线的设计，首先需要设计出天线单元，然后再选取合适的馈电网络组成天线阵，最后分析给出天线阵的性能。本章就以这一微带线结构的均匀直线阵列天线设计为例，依次介绍了均匀直线阵列天线的基本原理、阵元的设计和性能分析、馈电网络的设计，以及最后组成的 1×4 天线阵列的性能分析等内容。

8.1 均匀直线阵列天线理论分析

当各阵元取向一致地排列在一条直线上就构成直线阵列天线。直线阵列天线中，如果阵元激励电流幅度、相邻阵元之间的相位差和阵元间距都相等则称为均匀直线阵列天线。

如图 8.1.1 所示为 N 个等间距阵元排列在 z 轴上组成的直线阵列天线，其中 θ 为入射波与 z 轴的夹角， d 为阵元间距。选取坐标原点为相位参考点，不计阵元间的互耦作用。假设坐标原点处的天线单元 0 的相位为零，由图 8.1.1 可知天线单元 1 和天线单元 0 之间的相差应为 $\beta d \cos \theta$ ，依此类推第 n 个阵元和第 0 个阵元之间的相位差为 $\beta n d \cos \theta$ 。因此，天线阵的阵因子可以写成：

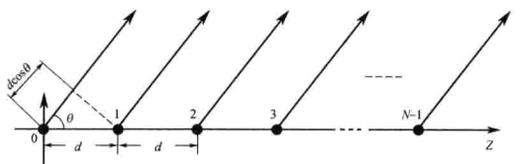


图 8.1.1 N 单元均匀直线阵列天线

$$AF = I_0 + I_1 e^{j\beta d \cos \theta} + I_2 e^{j2\beta d \cos \theta} + \dots + I_{N-1} e^{j(N-1)\beta d \cos \theta} \quad (8-1)$$

对于均匀直线阵列天线，各阵元的激励电流幅度和相邻阵元之间的相位差都相等，假设电流幅度为 A_0 ，相邻阵元之间的相位差为 α ，则激励电流 I_n 可以表示为：

$$I_n = A_0 e^{jn\alpha} \quad (8-2)$$

将式 (8-2) 代入式 (8-1) 可得：

$$AF = A_0 [1 + e^{j(\beta d \cos \theta + \alpha)} + e^{j2(\beta d \cos \theta + \alpha)} + \dots + e^{j(N-1)(\beta d \cos \theta + \alpha)}] \quad (8-3)$$

定义：

$$\psi = \beta d \cos \theta + \alpha \quad (8-4)$$

则式(8-3)可以写为:

$$AF = A_0 [1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi}] \quad (8-5)$$

式(8-5)两边同乘以 $e^{j\psi}$ 后减去式(8-5),可得:

$$AF(e^{j\psi} - 1) = A_0(e^{jN\psi} - 1) \quad (8-6)$$

则:

$$AF = A_0 \frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} = A_0 \frac{e^{j\frac{N}{2}\psi} (e^{j\frac{N}{2}\psi} - e^{-j\frac{N}{2}\psi})}{e^{j\frac{1}{2}\psi} (e^{j\frac{1}{2}\psi} - e^{-j\frac{1}{2}\psi})} = A_0 e^{j\frac{N-1}{2}\psi} \frac{\sin \frac{N\psi}{2}}{\sin \frac{\psi}{2}} \quad (8-7)$$

如果把相位参考点选在天线阵的几何中心,则上式阵因子简化为:

$$AF = A_0 \frac{\sin \frac{N\psi}{2}}{\sin \frac{\psi}{2}} \quad (8-8)$$

式(8-8)在 $\psi = 0$ 时可取得最大值,且其最大值为 $A_0 N$,因此归一化后阵因子为

$$F(\psi) = \frac{\sin \frac{N\psi}{2}}{N \sin \frac{\psi}{2}} \quad (8-9)$$

归一化阵因子 $|F(\psi)|$ 是 ψ 的周期函数,周期为 2π 。每个周期内有一个函数值为1的最大值和 $N-2$ 个函数值小于1的极大值。前者相当于方向图的主瓣或栅瓣(场强和主辐射方向一样大的波瓣),后者相当于副瓣。

由图8.1.1可见, θ 的取值范围为 $0^\circ < \theta < 180^\circ$,代入式(8-4)可知 ψ 的变化范围为 $-\beta d \cos \theta + \alpha < \psi < \beta d \cos \theta + \alpha$, ψ 的这个范围称为可见区域。只有在可见区域中, ψ 对应的 $F(\psi)$ 才是天线阵的阵因子。 ψ 的变化和阵元间距 d 及相邻阵元之间的相位差 α 有关,只有合适的 d 和 α 取值才能获得良好的阵方向图。

8.2 微带阵列天线设计概述

本章所设计的微带阵列天线需要工作在16GHz的Ku频段,是一个 1×4 阵元的均匀直线天线阵列,如图8.2.1所示。其中,辐射天线单元采用是本章末参考文献[1]中设计的微带天线单元。设计中,为了保持每个天线单元的激励电流幅度和相位始终相同,馈电网络采用图8.2.1中所示的微带线馈电网络结构。在组阵时,各天线单元之间存在互耦效应,它的存在将导致天线单元在天线阵中的方向图与孤立阵元的方向图不同,以及导致二者的输入阻抗也不

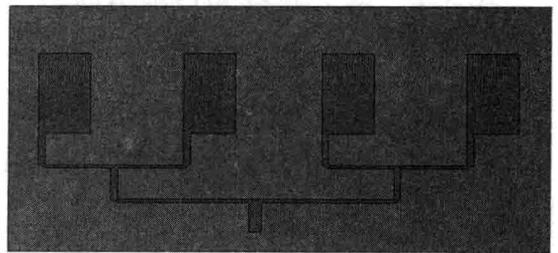


图 8.2.1 1×4 单元的微带阵列天线

相同。所以,互耦效应将直接影响天线阵的性能,而互耦效应的强弱取决于单元间距的大小,最佳的阵元间距可使互耦大大减弱;一般认为,阵元间距为 $0.6 \sim 0.8$ 个工作波长最佳。因此设计中,阵元间距设置为 0.75 个自由空间工作波长。

接下来,我们按设计先后顺序依次讲解阵元设计分析、馈电网络设计和天线阵的设计分析这三大设计分析步骤。

8.3 阵元设计

8.3.1 设计概述

设计的天线单元工作于 16GHz, 天线单元结构采用章末参考文献[1]中设计的矩形微带天线, 如图 8.3.1 所示。

文件[1]的设计中, 介质基片和辐射单元相关参数如表 8.3.1 所示。

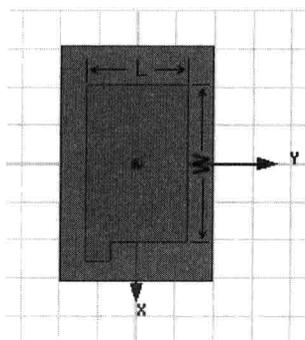


表 8.3.1 天线单元结构参数

工作频率	16GHz
介质材料	Arlon AD270
介质基片厚度	0.5mm
介质的介电常数	2.7
介质的损耗正切	0.0023
敷铜厚度	35 μ m
辐射贴片宽度 W	8.15mm
辐射贴片长度 L	5.41mm

图 8.3.1 天线单元结构

设计中, 有意地将 W/L 设置在 1.5 左右是为了降低矩形微带天线的交叉极化电平。另外, 天线的馈电方式采用从微带线边缘馈电, 馈线为 50Ω 的微带线。根据参考文献[2]所给的微带线计算工具, 可以计算出在表 8.3.1 所示的介质基片参数下, 50Ω 微带线的线宽约为 1.26mm。因为馈电位置和参考文献[1]稍有不同, 所以为了满足天线工作于 16GHz 的要求, 原天线辐射贴片的尺寸需要稍作修改和优化, 优化后的尺寸为辐射贴片宽度 $W = 8.2\text{mm}$, 辐射贴片长度 $L = 5.25\text{mm}$ 。

下面我们就在 HFSS 中创建这样一个矩形微带天线的模型, 并仿真分析其性能。本章中, 所使用的 HFSS 软件版本为 14.0。

8.3.2 阵元建模和性能分析

8.3.2.1 新建设计工程

1. 运行 HFSS 并新建工程

双击桌面上的 HFSS 快捷方式 , 启动 HFSS 软件。HFSS 运行后, 会自动新建一个工程文件, 选择主菜单【File】→【Save As】命令, 把工程文件另存为 Array.hfss。然后, 单击工具栏左侧的  按钮, 新建一个 HFSS 设计。最后, 右键单击工程树下的设计名称 HFSSDesign1, 从右键弹出菜单中选择【Rename】命令, 把设计文件重新命名为 Antenna_Cell。

2. 设置求解类型

设置当前设计为模式驱动求解类型。

从主菜单栏选择【HFSS】→【Solution Type】命令, 打开如图 8.3.2 所示的 Solution Type 对话框, 选中 Driven Modal 单选按钮, 然后单击  按钮, 退出对话框, 完成设置。

3. 设置模型长度单位

设置当前设计在创建模型时所使用的默认长度单位为毫米。

从主菜单栏选择【Modeler】→【Units】命令，打开如图 8.3.3 所示的 Set Modal Units 对话框。在该对话框中，Select units 项选择毫米为单位，即 mm，然后单击 **OK** 按钮，退出对话框，完成设置。

4. 建模相关选项设置

从主菜单栏选择【Tools】→【Options】→【Modeler Options】命令，打开 Modeler Options 对话框，单击对话框 Drawing 选项卡，确认 Drawing 选项卡界面的 Edit properties of new primitive 复选框未选中，如图 8.3.4 所示。然后单击 **确定** 按钮，退出对话框，完成设置。

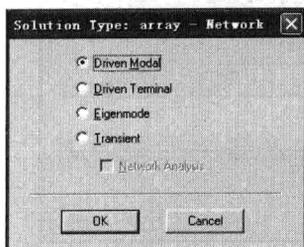


图 8.3.2 设置求解类型

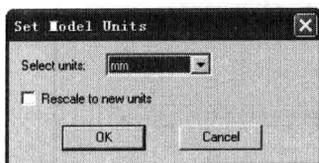


图 8.3.3 设置长度单位

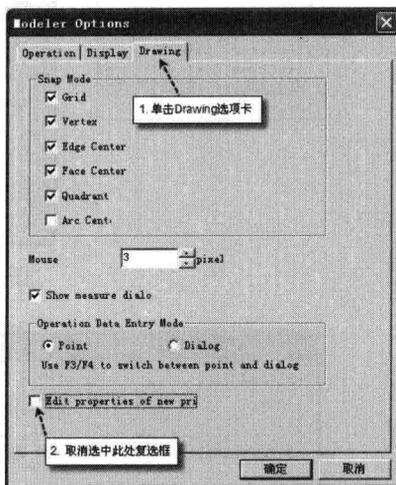


图 8.3.4 Modeler Options 对话框

8.3.2.2 添加和定义设计变量

为了方面在后续仿真分析中更改模型的尺寸，在建模前我们在 HFSS 中首先定义一系列设计变量来表示矩形天线单元的结构尺寸。设计中需要定义的变量名称、所表示的参数以及变量的初始值如表 8.3.2 所示。

表 8.3.2 设计中定义的变量

变量名称	表示的参数	初始值
W	辐射贴片的宽度	8.2mm
L	辐射贴片的长度	5.25mm
H	介质基片的厚度	0.5mm
W_50	50Ω 传输线宽度	1.26mm
L_feed	馈线长度	0.5mm

从主菜单栏选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框，单击对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add Property 对话框。在 Add Property 对话框中，Name 项输入第一个变量名称 W，Value 项输入该变量的初始值 8.2mm，然后单击 **OK** 按钮，添加变量 W 到设计属性对话框。变量定义和添加的过程如图 8.3.5 所示。

使用相同的操作步骤，定义变量 L，输入其初始值为 5.25mm；定义变量 H，输入其初始值为 0.5mm；定义变量 W_50，输入其初始值为 1.26mm；定义变量 L_feed，输入其初始值为 0.5mm。定义完成后，确认设计属性对话框如图 8.3.6 所示。确认无误后，单击设计属性对话框的 **确定** 按钮，完成所有变量的定义和添加工作，退出对话框。

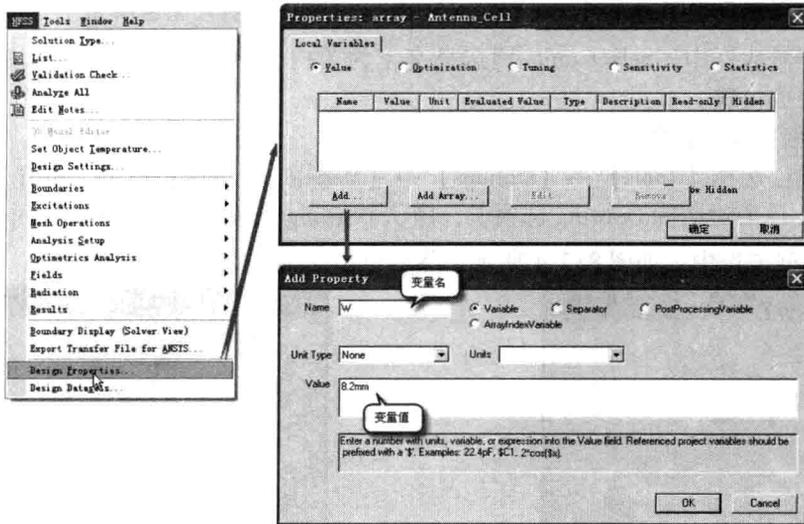


图 8.3.5 定义变量

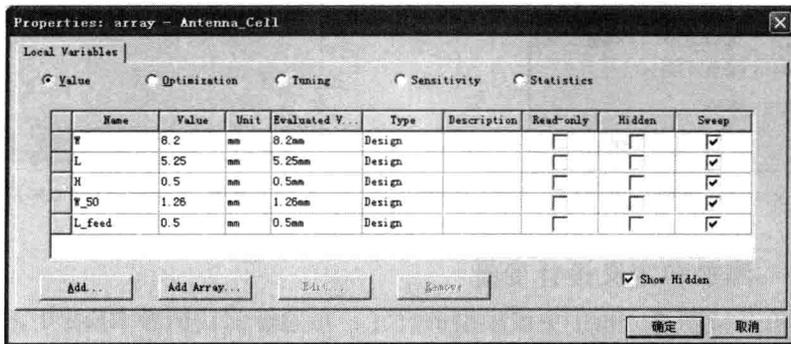


图 8.3.6 定义所有设计变量后的设计属性对话框

8.3.2.3 设计建模

1. 创建介质基片

创建一长方体模型用以表示介质基片，长方体模型的底面位于 xoy 平面，中心位于坐标原点；模型的材质为 Arlon AD270，其长、宽分别为辐射贴片的 1.5 倍，高度为 H ；并将模型命名为 Substrate。

从主菜单栏选择【Draw】→【box】命令，或者单击工具栏的 按钮，进入创建长方体的状态，然后在三维模型窗口创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1，打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡，把长方体的名称修改为 Substrate，设置其材质为 Arlon AD270，设置其透明度为 0.6，如图 8.3.7 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

再双击操作历史树 Substrate 节点下的 CreateBox，打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡下设置长方体的顶点坐标和大小尺寸。在 Position 项输入顶点位置坐标为 $(-0.75 * W, -0.75 * L, 0)$ ，在 XSize、YSize 和 ZSize 项分别输入长方体的长、宽和高为 $1.5 * W$ 、 $1.5 * L$ 和 H ，如图 8.3.8 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

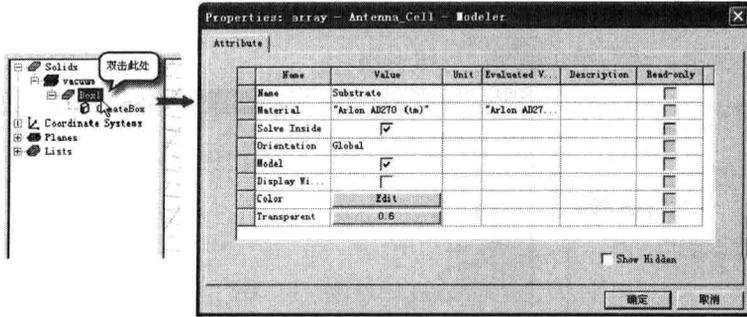


图 8.3.7 长方体属性对话框 Attribute 选项卡

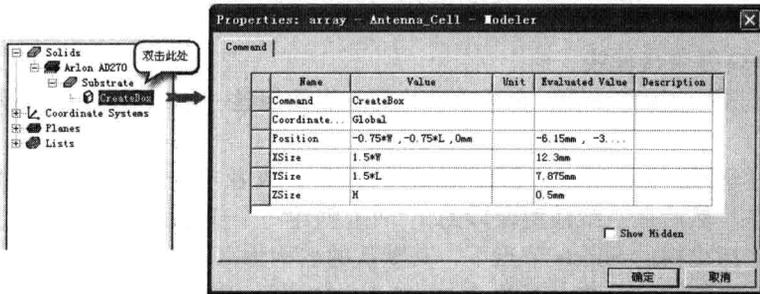


图 8.3.8 长方体属性对话框 Command 选项卡

此时就创建好了名为 Substrate 的介质基片模型。然后按下快捷键 Ctrl + D，全屏显示创建的物体模型。

2. 创建辐射贴片

在介质基片的上表面创建一个中心位于坐标原点，长度和宽度分别用变量 L 和 W 表示的矩形面，并将其命名为 Cell。

从主菜单栏选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏的 按钮，进入创建矩形面的状态；然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1，打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡，如图 8.3.9 所示。把矩形面的名称修改为 Cell，然后单击 **确定** 按钮退出。

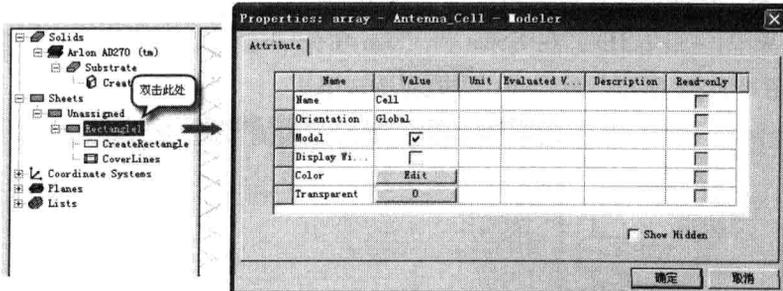


图 8.3.9 矩形面属性对话框 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Cell 节点下的 CreateRectangle，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡下设置矩形面的顶点坐标和大小尺寸；在 Position 项输入顶点位

置坐标为 $(-W/2, -L/2, H)$, 在 XSize 和 YSize 项分别输入矩形面的宽度、长度为 W 和 L , 如图 8.3.10 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

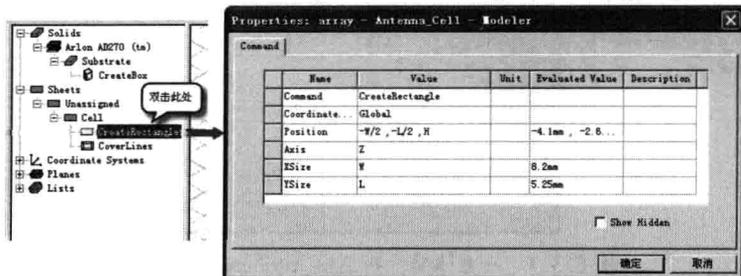


图 8.3.10 矩形面属性对话框 Command 选项卡

3. 创建 50Ω 微带传输线

使用和前面相同的操作步骤, 在介质基片的上表面创建一矩形面, 用以表示 50Ω 微带传输线。

从主菜单栏选择【Draw】→【Rectangle】命令, 或者单击工具栏的  按钮, 进入创建矩形面的状态。然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1, 打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡, 如图 8.3.11 所示。把矩形面的名称修改为 Feed_Line, 然后单击 **确定** 按钮退出。

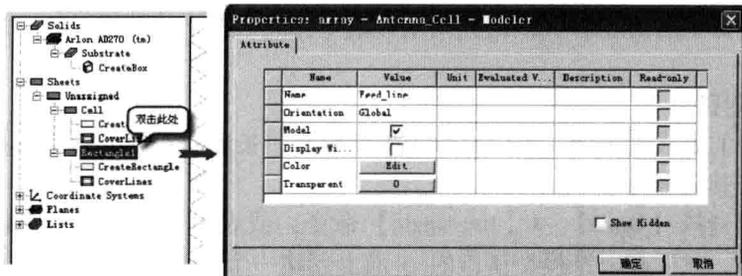


图 8.3.11 矩形面属性对话框 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Feed_Line 节点下的 CreateRectangle, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡, 在该界面下设置矩形面的顶点坐标和大小尺寸。在 Position 项输入顶点位置坐标为 $(W/2, -L/2, H)$, 在 XSize 和 YSize 项分别输入矩形面的长度和宽度为 L_{feed} 和 W_{50} , 如图 8.3.12 所示。然后单击 **确定** 按钮退出。

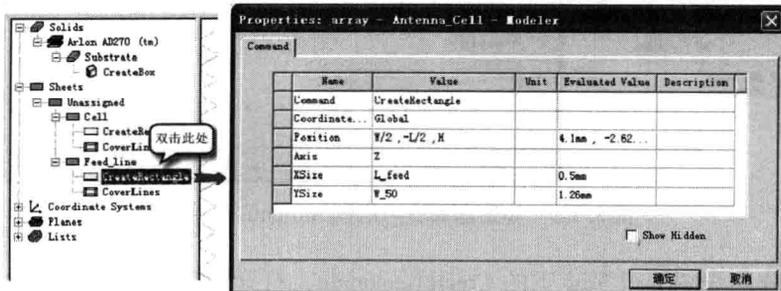


图 8.3.12 矩形面属性对话框 Command 选项卡

4. 设置辐射贴片 Cell 和馈线 Feed_Line 的边界条件为理想导体边界

按住 Ctrl 键, 依次单击平面模型 Cell 和 Feed_line, 同时选择这两个模型。然后单击右键, 从右键弹出菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令, 打开理想导体边界条件设置对话框, 如图 8.3.13 所示。保留对话框的默认设置不变, 直接单击对话框的 **OK** 按钮, 设置这两个平面的边界条件为理想导体边界条件。此时, 平面 Cell 和 Feed_line 就等效于理想导体面。同时, 理想导体边界条件的默认名称 PerfE1 会添加到工程树的 Boundaries 节点下。

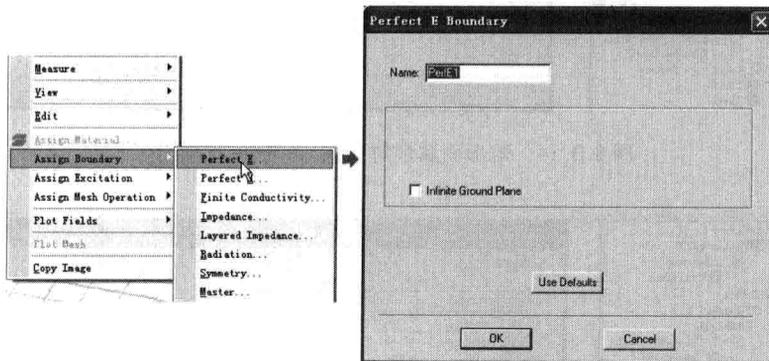


图 8.3.13 设置理想导体边界条件

5. 设置介质基片 Substrate 的底面边界条件为理想导体边界

在三维模型窗口任意位置单击鼠标右键, 从右键弹出菜单中选择【Select Face】命令, 或者直接按下快捷键 F, 切换到选择物体表面的状态。然后旋转物体模型, 选中介质基片的底面。接着, 在三维模型窗口单击右键, 从右键弹出菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】操作命令, 打开理想导体边界条件设置对话框, 保留对话框默认设置不变, 直接单击 **OK** 按钮, 设置选中的表面为理想导体边界条件。其默认名称 PerfE2 也会添加到工程树的 Boundaries 节点下。完成后按快捷键 O, 切换到选择物体的状态。

此时, 介质基片的底面等效于一层理想导体, 用作天线的参考地。

8.3.2.4 设置端口激励

在微带馈线 Feed_Line 的终端创建一矩形面用于设置天线的激励, 激励类型为集总端口激励, 端口负载阻抗和归一化阻抗设置为 50Ω 。

1. 创建端口平面

在微带线终端截面上创建一个矩形面用作集总端口平面, 端口平面上边缘与微带馈线 Feed_Line 相接, 底边与参考地相接, 端口平面宽度与微带馈线 Feed_Line 一致。

单击工具栏的 **XY** 下拉按钮, 从其下拉列表中选择 YZ, 把当前绘图平面设置为 yz 面。

从主菜单栏选择【Draw】→【Rectangle】命令, 或者单击工具栏的 **□** 按钮, 进入创建矩形面的状态。然后在三维模型窗口的 yz 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1, 打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡, 如图 8.3.14 所示。把矩形面的名称修改为 Port, 然后单击 **确定** 按钮退出。

再双击操作历史树 Port 节点下的 CreateRectangle, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡下设置矩形面的顶点坐标和大小尺寸; 在 Position 项输入顶点位

置坐标为 $(W/2 + L_{\text{feed}}, -L/2, H)$, 在 YSize 和 ZSize 项分别输入矩形面的长和宽为 W_{50} 和 $-H$, 如图 8.3.15 所示。然后单击 **确定** 按钮退出。

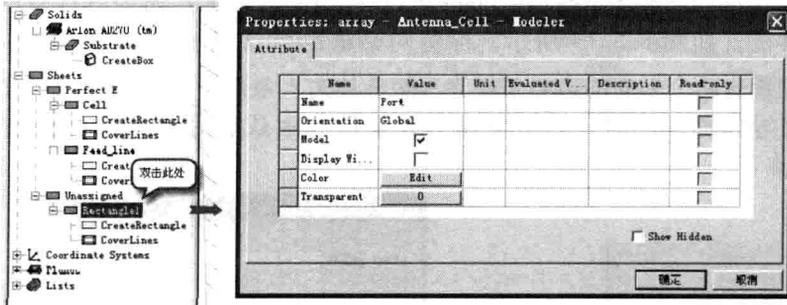


图 8.3.14 矩形面属性对话框 Attribute 选项卡

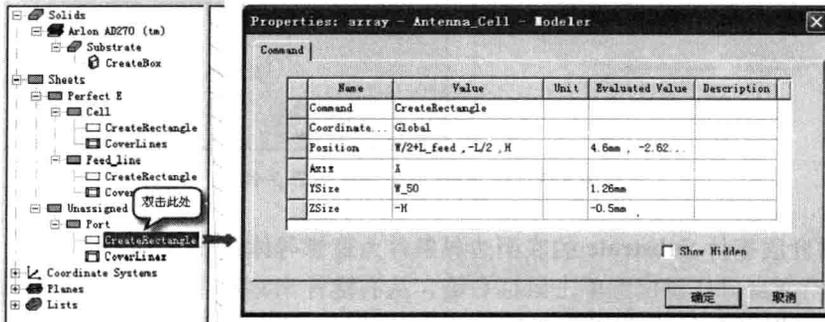


图 8.3.15 矩形面属性对话框 Command 选项卡

2. 设置集总端口激励

单击操作历史树 Sheets 节点下的 Port, 选中新建的端口平面。然后单击右键, 从右键弹出菜单中选择【Assign Excitation】→【Lumped Port】操作命令, 打开集总端口设置对话框, 如图 8.3.16 所示。在该对话框中, 端口名称和端口阻抗都保留默认设置, 然后单击对话框的 **下一步(N) >** 按钮, 打开对话框的 Modes 界面。在该界面, 从积分线对应的下拉列表中选择 New Line..., 如图 8.3.17 所示。

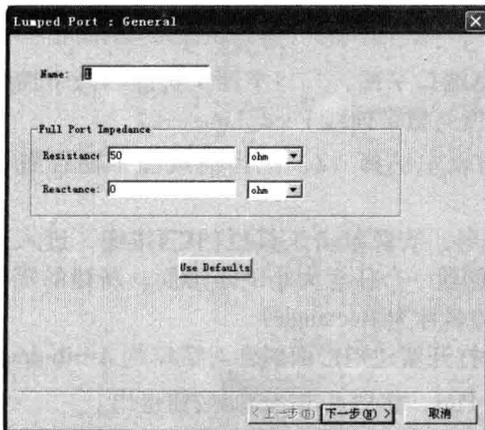


图 8.3.16 集总端口设置对话框

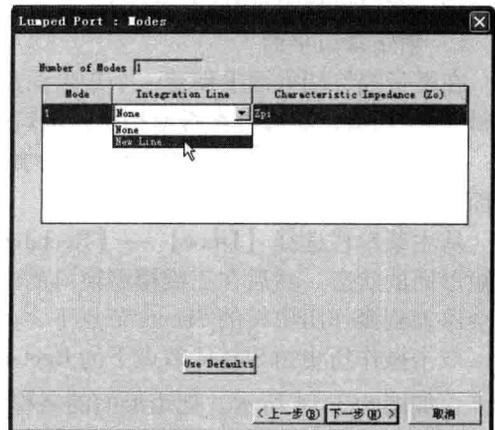


图 8.3.17 集总端口设置——Modes 界面

选择 New Line... 操作执行后, 即进入三维模型窗口。单击工具栏  按钮, 放大显示选中的端口面 Port。然后, 移动光标到端口面的下边缘中点处, 当光标形状变为 ▲ 时, 表示光标捕捉到下边缘中点位置, 如图 8.3.18 (a) 所示, 此时单击鼠标左键确认; 再移动光标到端口面的上边缘中点处, 当光标形状变为 ▲ 时, 表示光标捕捉到上边缘中点位置, 如图 8.3.18 (b) 所示, 此时再次单击鼠标左键确认。这样即可设置好端口的积分线, 回到端口设置对话框。

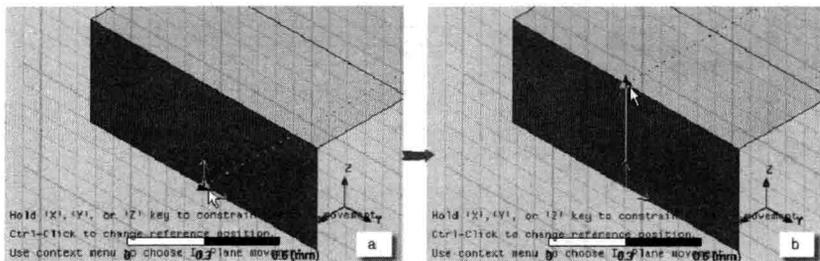


图 8.3.18 设置端口积分线

继续单击对话框的  按钮, 打开对话框的 Post Processing 界面; 在 Post Processing 界面, 选中 Renormalized All Modes 单选按钮, 并设置端口阻抗为 50Ω , 最后单击  按钮, 完成集总端口激励方式的设置。

设置完成后, 集总端口的名称会添加到工程树的 Excitations 节点下。

8.3.2.5 设置辐射边界条件

在 HFSS 中辐射边界表面距离辐射体通常需要不小于 $1/4$ 个工作波长, 对应 16GHz 工作频率, 即距离不小于为 4.7mm , 在这里我们设置辐射边界表面到天线的距离为 10mm 。

首先, 我们创建一个长方体模型, 长方体各个表面分别和介质基片各个表面相距 10mm 。然后, 再把新建长方体的表面设置为辐射边界。

从主菜单栏选择【Draw】→【Box】命令, 或者单击工具栏的  按钮, 进入创建长方体的状态, 然后在三维模型窗口创建一个任意大小的长方体; 新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1, 打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡, 把长方体的名称修改为 AirBox, 设置其透明度为 0.8 , 并确认其材质为 vacuum, 如图 8.3.19 所示, 然后单击  按钮退出。

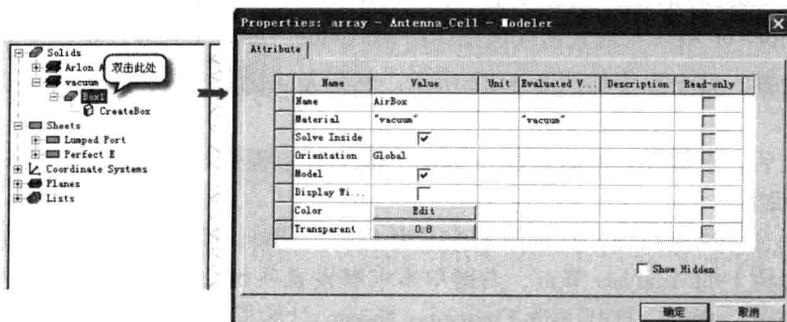


图 8.3.19 长方体属性对话框 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 AirBox 节点下的 CreateBox, 打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡下设置长方体的顶点坐标和大小尺寸。在 Position 项输入顶点位置坐标为 $(-0.75 * W - 10\text{mm}, -0.75 * L - 10\text{mm}, -10\text{mm})$, 在 XSize、YSize 和 ZSize 项分别输入长方体的长、宽和高为 $1.5 * W + 20\text{mm}$ 、 $1.5 * L + 20\text{mm}$ 和 20mm , 如图 8.3.20 所示。然后单击 **确定** 按钮退出。

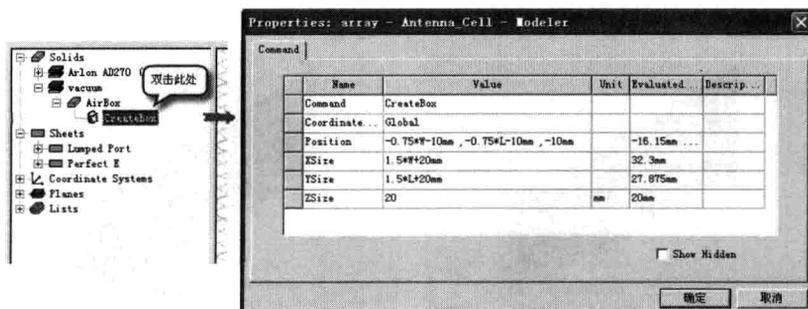


图 8.3.20 长方体属性对话框 Command 选项卡

长方体模型 AirBox 创建好了之后, 在操作历史树下单击 AirBox, 选中该模型。然后在三维模型窗口单击右键, 从右键弹出菜单中, 选择【Assign Boundary】→【Radiation】操作命令, 打开辐射边界条件设置对话框, 如图 8.3.21 所示; 对话框保留默认设置不变, 直接单击 **OK** 按钮, 把长方体模型 AirBox 的表面设置为辐射边界条件。

设置完成后, 辐射边界条件的名称 Rad1 也会添加到工程树的 Boundaries 节点下。

8.3.2.6 求解设置

设计的天线单元工作于 16GHz 的 Ku 频段上, 所以分析频率设置为 16GHz; 同时添加 15~17GHz 的扫频设置, 选择快速 (Fast) 扫频类型。

1. 分析频率设置

设置分析频率为 2.45GHz, 自适应网格剖分的最大迭代次数为 20, 收敛误差为 0.02。

右键单击工程树下的 Analysis 节点, 从弹出菜单中选择【Add Solution Setup】命令, 打开 Solution Setup 对话框。在该对话框中, Solution Frequency 项输入分析频率 16GHz, Maximum Number of 项输入最大迭代次数 20, Maximum Delta S 项输入收敛误差 0.02, 其他项保留默认设置, 整个操作如图 8.3.22 所示。然后单击 **确定** 按钮, 退出对话框, 完成求解设置。

设置完成后, 求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

2. 扫频设置

扫频类型选择快速扫频, 扫频频率范围为 15~17GHz, 频率步进为 0.1GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点, 右键单击求解设置项 Setup1, 从弹出菜单中选择【Add Frequency Sweep】命令, 打开 Edit Frequency Sweep 对话框, 如图 8.3.23 所示。在该对话框中, Sweep Type 项选择扫描类型为 Fast; 在 Frequency Setup 栏, Type 项选择 LinearStep, Start 项输入 15GHz, Stop 项输入 17GHz, Step 项输入 0.1GHz; 其他项都保留默认设置; 最

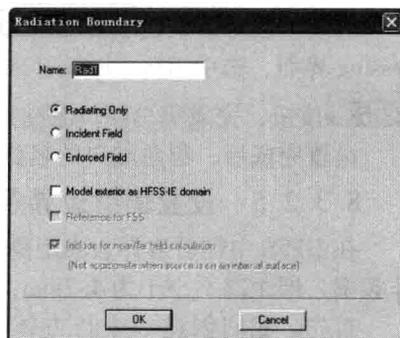


图 8.3.21 辐射边界条件设置对话框

后单击对话框 **确定** 按钮，完成设置，退出对话框。

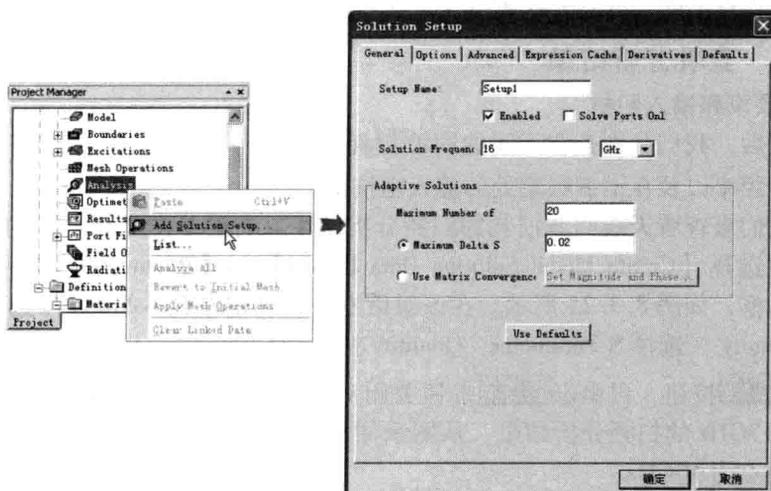


图 8.3.22 分析频率设置

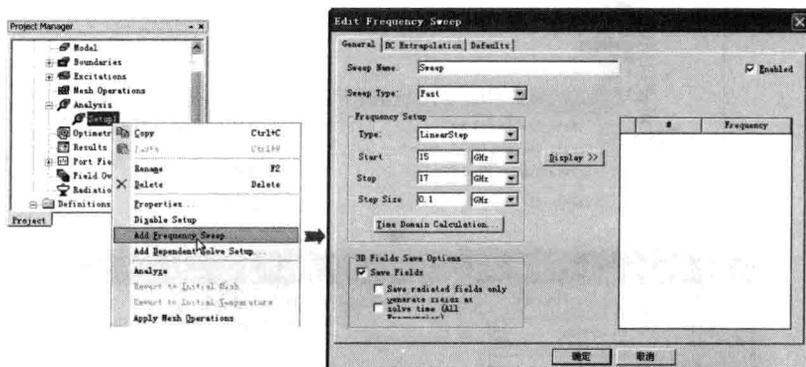


图 8.3.23 扫频设置

设置完成后，该扫频设置项的名称 Sweep1 会添加到工程树的求解设置项 Setup1 下。

8.3.2.7 设计检查和运行仿真计算

通过前面的操作，我们已经完成了模型创建和求解设置等 HFSS 设计的前期工作，接下来就可以运行仿真计算并查看分析结果了。但在运行仿真计算之前，通常需要进行设计检查，检查设计的完整性和正确性。

从主菜单栏选择【HFSS】→【Validation Check】命令，或者单击工具栏的  按钮，进行设计检查。此时，会弹出如图 8.3.24 所示的 Validation Check 对话框，确认 HFSS 设计检查无误。再单击 **Close** 关闭对话框，接下来开始运行仿真分析。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，从弹出菜单中选择【Analyze All】命令，运行仿真分析。

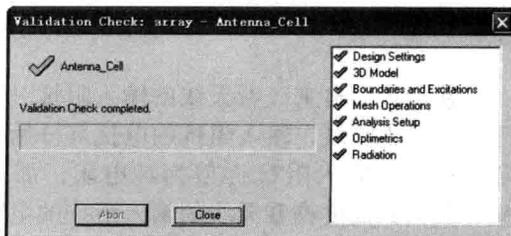


图 8.3.24 设计检查结果对话框

在仿真分析过程中,工作界面右下方的进度条窗格会显示出求解进度,信息管理窗格也会有相应的信息说明,并会在仿真计算完成后给出完成提示信息。

8.3.2.8 查看分析结果

1. 谐振频率和输入阻抗

分析完成后,我们分别查看天线的回波损耗(即 S_{11})和输入阻抗扫频分析结果,给出天线的谐振频率以及在谐振频率处的输入阻抗值。

首先,我们来查看天线回波损耗的扫频分析结果。右键单击工程树下的 Results 节点,从弹出菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令,打开报告设置对话框,如图 8.3.25 所示。在该对话框中,确定左侧 Solution 项选择的是 Setup1: Sweep,在 Category 栏选择 S Parameter, Quantity 栏选择 $S(1,1)$, Function 栏选择 dB; 然后单击 **New Report** 按钮,再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时,即可生成如图 8.3.26 所示的 S_{11} 在 15~17GHz 的扫频分析结果。从图示回波损耗分析结果中,我们可以看出所设计的天线谐振频点为 16GHz。

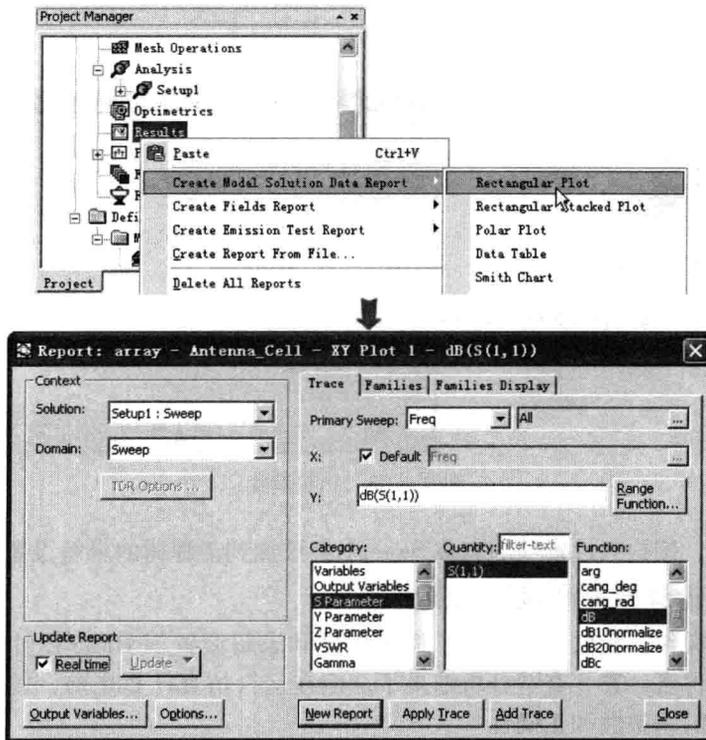


图 8.3.25 分析结果报告设置对话框

接着我们再来查看天线的输入阻抗。因为对于矩形微带天线,输入阻抗的电抗部分始终约为零,所以其输入阻抗近似为纯电阻,那么在这里,我们只需要查看天线的输入阻抗的电阻分量即可。

还是右键单击工程树下的 Results 节点,从弹出菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】

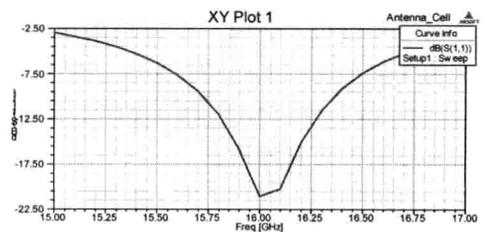


图 8.3.26 回波损耗分析结果

→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框。在该对话框中，确定左侧 Solution 项选择的是 Setup1:Sweep，在 Category 栏选择 Z Parameter，Quantity 栏选择 Z(1,1)，Function 栏选择 re，如图 8.3.27 所示；然后单击 **New Report** 按钮，再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时，即可生成如图 8.3.28 所示输入阻抗的电阻分量在 15~17GHz 的扫频分析结果。从图示分析结果中，我们可以看出在 16GHz 的工作频点处，输入阻抗约为 50.9Ω。

2. 增益方向图

接下来，我们再分别查看天线在 xz 、 yz 截面上的增益方向图和天线的三维增益方向图。

要查看天线方向图等远区场分析结果，首先需要定义辐射表面。辐射表面是在球坐标系下定义的。球坐标系下， xz 平面即相当于 $\varphi = 0^\circ$ 的平面， yz 平面即相当于 $\varphi = 90^\circ$ 的平面，三维立体空间即相当于 $0^\circ < \varphi < 360^\circ$ 、 $0^\circ < \theta < 180^\circ$ 。

(1) 定义 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 的平面为辐射表面

右键单击工程树下的 Radiation 节点，从弹出菜单中选择【Insert Far Field Setup】→【Infinite Sphere】命令，打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框，定义辐射表面，如图 8.3.29 所示。在该对话框中，Name 项输入辐射表面的名称 EH Plane；Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 项分别输入 0deg、90deg 和 90deg；Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Size 项分别输入 -180deg、180deg 和 1deg；然后单击 **确定** 按钮，完成设置。

此时，定义的辐射表面名称 EH Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

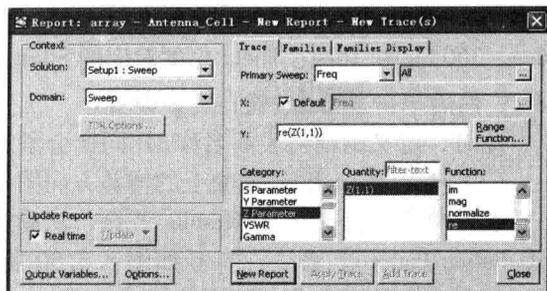


图 8.3.27 分析结果报告设置对话框

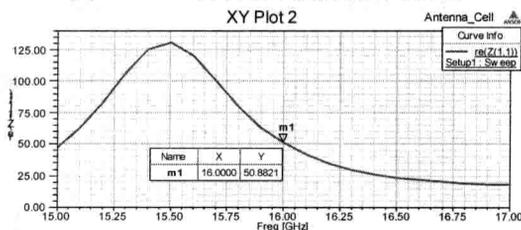


图 8.3.28 输入阻抗分析结果

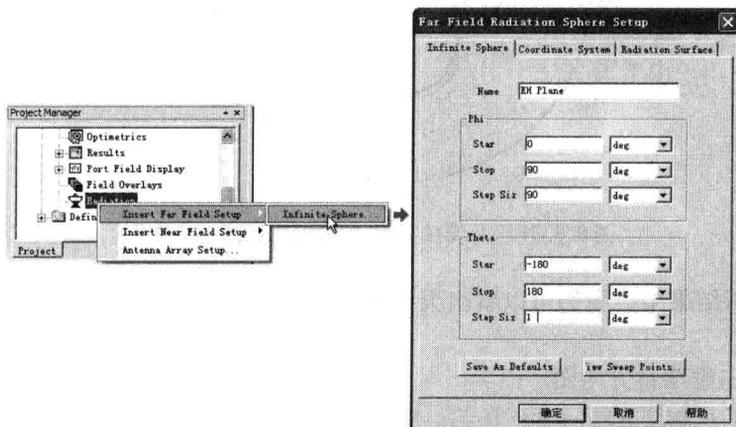


图 8.3.29 定义辐射表面

(2) 定义三维立体球面为辐射表面

使用和前面相同的操作，再次打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框。在该对话

框中, Name 项输入辐射表面的名称 3D; Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Si2 项分别输入 0deg、360deg 和 2deg; Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Si2 项分别输入 0deg、180deg 和 2deg; 然后单击 **确定** 按钮, 完成设置。

此时, 定义的辐射表面名称 3D 同样会添加到工程树的 Radiation 节点下。

(3) 查看在 xz 和 yz 截面上的增益方向图

右键单击工程树下的 Results 节点, 从弹出菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Radiation Pattern】命令, 打开如图 8.3.30 所示的报告设置对话框。在该对话框中, Geometry 项选择前面定义的辐射表面 EH Plane, Category 项选择 Gain, Quantity 项选择 GainTotal, Function 项选择 dB; 然后单击 **New Report** 按钮, 生成天线在 xz 和 yz 截面上的增益方向图, 如图 8.3.31 所示。

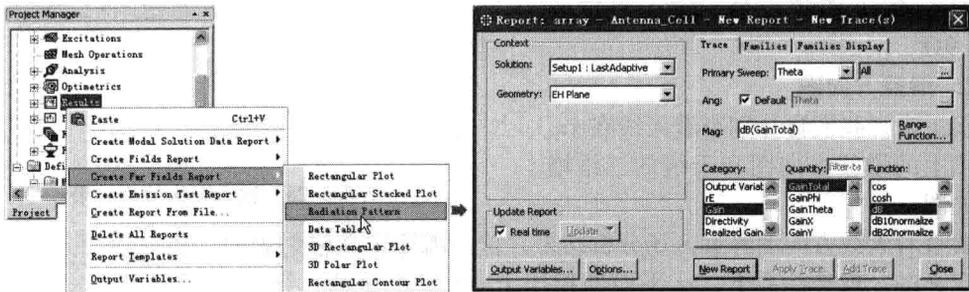


图 8.3.30 报告设置对话框

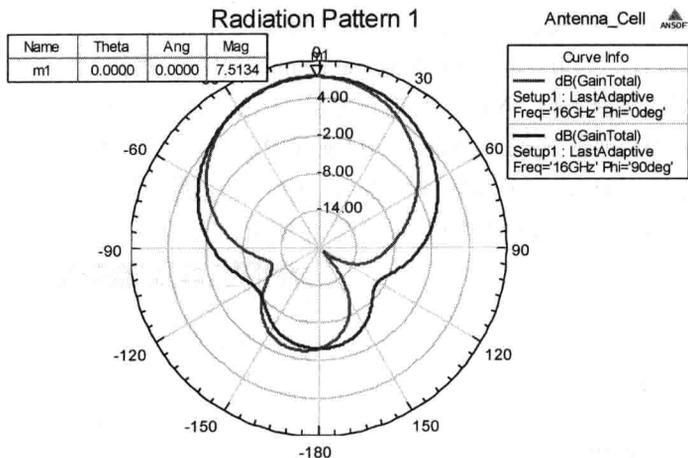


图 8.3.31 天线在 xz 和 yz 截面上的增益方向图

从图示分析结果中, 我们可以看出天线的最大辐射方向在辐射贴片的正上方, 最大增益值约为 7.5dB。

(4) 查看三维增益方向图

右键单击工程树下的 Results 节点, 从弹出菜单中选择【Create Far Fields Report】→【3D Polar Plot】命令, 打开如图 8.3.32 所示的报告设置对话框。在该对话框中, Geometry 项选择前面定义的辐射面 3D, Category 项选择 Gain, Quantity 项选择 GainTotal, Function 项选择 dB; 然后单击 **New Report** 按钮, 生成如图 8.3.33 所示三维增益方向图。

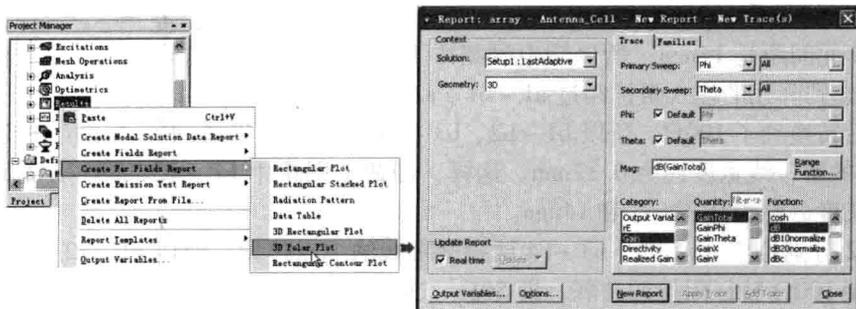


图 8.3.32 报告设置对话框

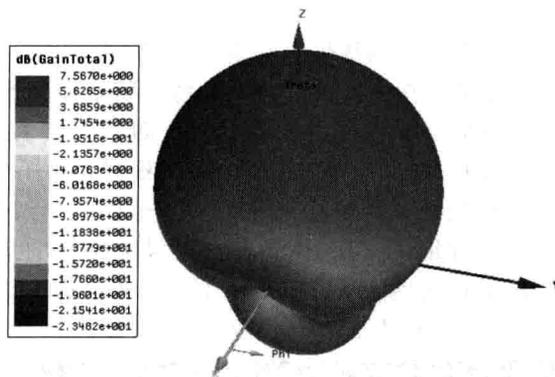


图 8.3.33 三维增益方向图

8.4 馈电网络设计

要设计的是一个 1×4 的均匀直线阵列天线，并且每个阵元的激励电流幅度和相位始终相同。所以设计采用如图 8.4.1 所示结构的微带线馈电网络结构。图示馈电网络结构中，从输入端到各个阵元间的微带线长度和微带线结构都完全相同，从而保证了信号从输入端经过馈电网络后到各个阵元端的幅度和相位保持相同。为了最大限度地降低阵元间的互耦效应，设计中阵元间距设置为 0.75 个自由空间工作波长，即阵元间距约为 14mm。

前面我们分析得出阵元的输入阻抗约为 50Ω ，那么在馈电网络中， $a_1 - b_1$ 、 $a_2 - b_2$ 、 $a_3 - b_3$ 和 $a_4 - b_4$ 这四段微带线就是 50Ω 到 100Ω 的 $1/4$ 波长阻抗转换器，把 50Ω 的输入阻抗转换到 100Ω 。所以该段微带线的特征阻抗就为 $\sqrt{50 \times 100} \approx 71\Omega$ 。把表 8-1 所给定的介质基片结构参数代入参考文献 [2] 所列

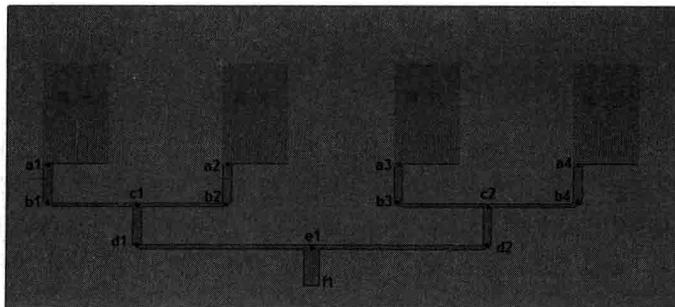


图 8.4.1 馈电网络结构

网址的微带线计算工具中，可以计算出 71Ω 微带线的宽度约为 0.69mm， $1/4$ 波长的物理长度约为 3.2mm。即馈电网络中， $a_1 - b_1$ 、 $a_2 - b_2$ 、 $a_3 - b_3$ 和 $a_4 - b_4$ 这四段微带线的线宽

是 0.69mm, 线长是 3.2mm。

因为阵元间距是 14mm, 所以馈电网络中 b1 - b2、b3 - b4 这两段微带线的长度应为 14mm, 考虑到阵元的输入阻抗经过 a1 - b1、a2 - b2、a3 - b3 和 a4 - b4 这四段 1/4 波长阻抗转换器后转换到了 100Ω, 所以 b1 - b2、b3 - b4 这两段微带线的特征阻抗需要为 100Ω, 100Ω 对应的微带线宽度约为 0.32mm。这样, 即馈电网络中 b1 - b2、b3 - b4 两段微带线的线宽和长度分别为 0.32mm 和 14mm。

c1、c2 分别位于 b1 - b2、b3 - b4 两段微带线的中点位置, 所以 c1、c2 点处的特征阻抗应为两端 100Ω 特征阻抗的并联, 即 50Ω。这样, c1 - d1 和 c2 - d2 两段微带线也是 1/4 波长阻抗转换器, 把 c1、c2 点处的 50Ω 阻抗转到 100Ω, 所以 c1 - d1、c2 - d2 两段微带线的宽度、长度与前面 a1 - b1 段微带线相同, 即宽度和长度分别为 0.69mm 和 3.2mm。

同样, 因为阵元间距是 14mm, 所以 d1 - d2 段微带线长度应为 2 倍阵元间距, 即 28mm, 其特征阻抗为 100Ω, 即对应的微带线宽度为 0.32mm。

e1 位于 d1 - d2 段微带线的中心位置, 该点处的特征阻抗应为 50Ω, 然后从该点处引出一段 50 欧姆的微带线作为整个阵列天线的馈电点。即 e1 - f1 段微带线的特征阻抗为 50Ω, 其对应的微带线宽度为 1.26mm, 其长度用户可以根据需要任意设定。

根据上述馈电网络中微带线的宽度和长度参数, 用户便可以设计这样的微带线馈电网络模型, 书中不再一步一步地详细讲解在 HFSS 中创建馈电网络的具体步骤, 读者可以根据上述尺寸自行创建相应的结构模型。或者打开本章的工程文件, 找到 Feed_Network 设计文件, 如图 8.3.34 所示, 直接使用已经建好的馈电网络模型。

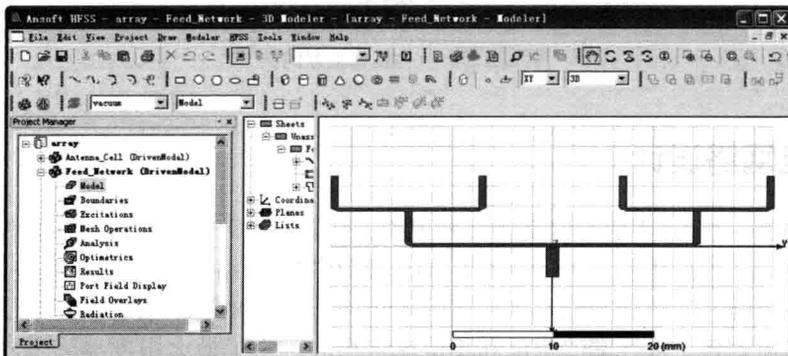


图 8.4.2 设计中馈电网络模型位置

8.5 天线阵列设计

在 8.3 节中设计了天线单元, 在 8.4 节中设计了馈电网络, 接下来我们使用 HFSS 来分析由上述天线单元和馈电网络组成的 1 × 4 线性天线阵的性能。这里, 打开随书附带的 HFSS 工程文件 CH08/Array.hfss (本书相关设计文件, 读者可登录微波 EDA 网下载, 网址: www.mweda.com), 直接复制调用该工程下 Feed_Network 设计中的馈电网络模型。

8.5.1 天线阵列设计建模

打开随书附带的 HFSS 工程文件 CH09/Array.hfss, 双击工程树下的设计文件名 Feed_Network, 打开馈电网络设计。按下键盘上的快捷键 Ctrl + A, 选中该设计下的所有模型参数。然后, 按下快捷键 Ctrl + C, 复制选中的模型。

单击工具栏的  按钮，再次新建一个 HFSS 设计，新建的设计名称为 HFSSDesign1。在工程树下，右键单击新建的设计 HFSSDesign1，从弹出菜单中选择【Rename】命令，把设计 HFSSDesign1 重新命名为 Array。然后，使用鼠标单击一下三维模型窗口，接着按下键盘上的快捷键 Ctrl + V，把前面复制的馈电网络模型复制到当前设计中。该馈电网络模型是位于 $z=0$ 的 xoy 平面上。

1. 创建介质基片

创建一长方体模型用以表示介质基片，因为馈电网络位于介质基片的上表面，所以长方体的上表面应位于 $z=0$ 的 xoy 平面；模型的材质为 Arlon AD270，其长、宽分别为 55mm 和 25mm，厚度为 0.5mm；并将模型命名为 Substrate。

从主菜单栏选择【Draw】→【box】命令，或者单击工具栏的  按钮，进入创建长方体的状态，然后在三维模型窗口创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下，其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1，打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡，把长方体的名称修改为 Substrate，设置其材质为 Arlon AD270，设置其透明度为 0.6，如图 8.5.1 所示。然后单击  按钮退出。

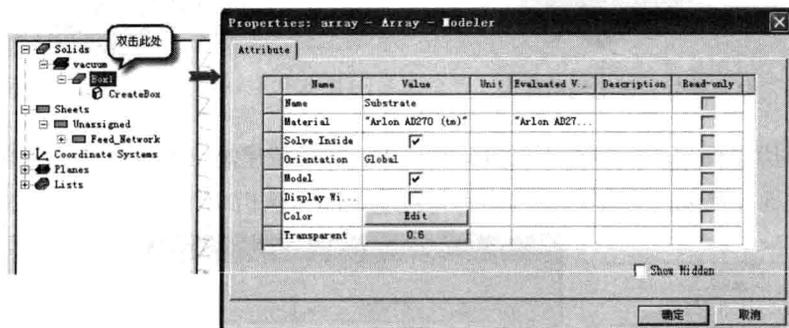


图 8.5.1 长方体属性对话框 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Substrate 节点下的 CreateBox，打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡下设置长方体的顶点坐标和大小尺寸。在 Position 项输入顶点位置坐标为 $(-20, -25, 0)$ ，在 XSize、YSize 和 ZSize 项分别输入长方体的长、宽和高为 25、55 和 -0.5 ，并确认输出数值的单位都是 mm，如图 8.5.2 所示。然后单击  按钮退出。

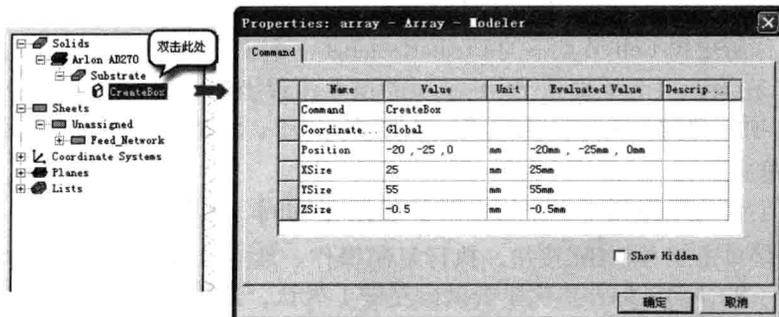


图 8.5.2 长方体属性对话框 Command 选项卡

此时就创建好了名为 Substrate 的介质基片模型。然后按下快捷键 Ctrl + D，全屏显示创

建的物体模型,如图 8.5.3 所示。

2. 创建阵元和天线阵

在介质基片的上表面创建 4 个并列放置的阵元,根据前面的分析结果,阵元长度和宽度分别是 5.25mm 和 8.2mm,阵元间距为 14.69mm。

从主菜单栏选择【Draw】→【Rectangle】命令,或者单击工具栏的按钮,进入创建矩形面的状态;然后在三维模型窗口移动鼠标光标到馈电网络最左侧的顶点位置,在最左侧的顶点位置附近缓慢移动鼠标,当光标形状变为时,表示捕捉到了馈电网络最左侧的顶点位置,如图 8.5.4 所示,此时单击鼠标,再移动鼠标创建一个矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下,其默认的名称为 Rectangle1。

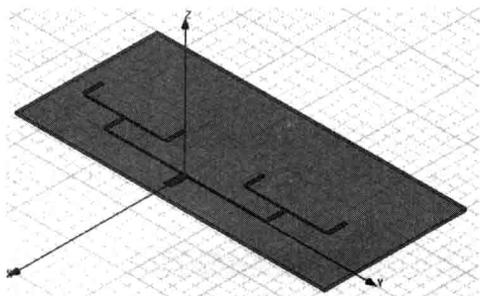


图 8.5.3 介质基片和馈电网络模型

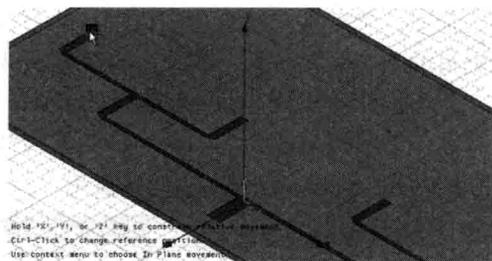


图 8.5.4 移动鼠标捕捉馈电网络左侧顶点

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1,打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡,如图 8.5.5 所示,把矩形面的名称修改为 Cell。然后单击按钮退出。

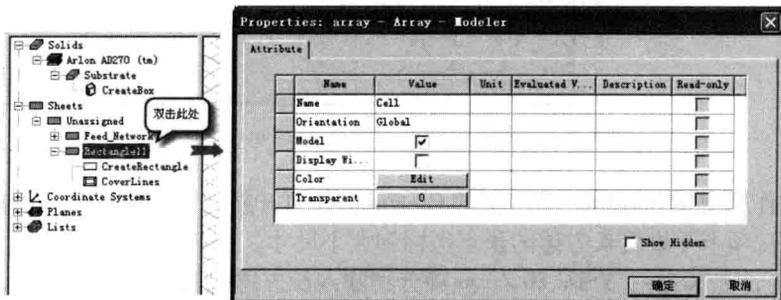


图 8.5.5 矩形面属性对话框 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Cell 节点下的 CreateRectangle,打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡,在该选项卡下确认 Position 项的顶点位置坐标为 $(-7.04, -21.69, 0)$,在 XSize 和 YSize 项分别输入矩形面的宽度、长度为 -8.2 、 5.25 ,如图 8.5.6 所示,然后单击按钮退出。

选中刚刚创建的矩形面 Cell,从主菜单选择【Edit】→【Duplicate】→【Along line】命令,或者直接单击工具栏的按钮,执行复制操作。然后,在三维模型窗口单击鼠标左键,接着沿着 y 轴移动鼠标并再次单击鼠标左键 1 确认,这样即设置沿着上述两点确定方向和距离复制矩形面 Cell。

在三维模型窗口第二次单击鼠标左键确认后,会弹出如图 8.5.7 所示对话框,在该对话框的 Total number 处输入 4,表示复制操作新生成 3 个模型(加上原模型,总计为 4),然后单击按钮完成复制操作。

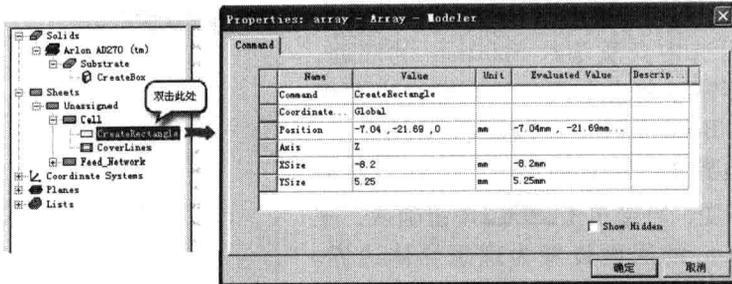


图 8.5.6 矩形面属性对话框 Command 选项卡

此时，即通过复制操作生成了另外 3 个阵元模型，新生成的 3 个阵元模型名称分别为 Cell_1、Cell_2 和 Cell_3。在操作历史树下展开 Cell，然后双击 DuplicateAlongLine，打开属性对话框，在对话框的 Vector 项中输入 0, 14, 0，如图 8.5.8 所示。此处是设置在前面执行复制操作时，复制生成的模型位置是原模型沿着 y 轴正向移动 14mm。设置好后，单击 **确定** 按钮退出。

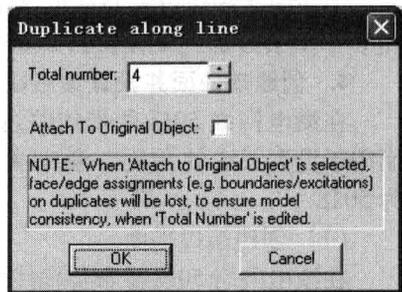


图 8.5.7 Duplicate along line 对话框

完成后，按下键盘上的快捷键 Ctrl + D，全屏显示创建的所有物体模型，如图 8.5.9 所示。

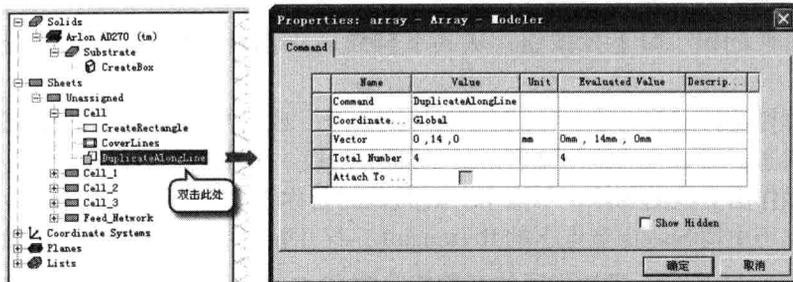


图 8.5.8 设置复制操作时新模型相对于原模型的位置

最后，按住 Ctrl 键，在操作历史树下，按先后次序依次单击 Cell、Cell_1、Cell_2、Cell_3 和 Feed_Network，同时选中这 5 个平面模型，然后从主菜单选择【Modeler】→【Boolean】→【Unite】命令，或者直接单击工具栏 按钮，执行合并操作，把选中的 5 个平面模型合并成一个整体。合并后的模型名称为 Cell。

3. 设置 pec 边界条件

把阵列天线模型（即合并后的平面模型 Cell）和介质基片底面的边界条件设置为理想导体边界（pec），用以模拟理想导体。

选中平面模型 Cell，然后在三维模型窗口单击右键，从右键弹出菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令，打开如图 8.5.10 所示的对话框。对话框保留默认设置不变，直接单击 **确定** 按钮确认。这样即把平面模型 Cell 设置为理想导体边界。

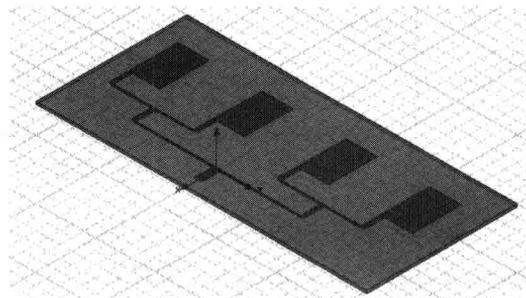


图 8.5.9 1×4 天线阵列模型

再单击键盘上的快捷键 F，切换到选择物体表面的状态。然后选中介质基片 Substrate 的底面，再次在三维模型窗口单击右键，从右键弹出菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令，打开理想导体边界条件设置对话框，并保留对话框的默认设置不变，直接单击**确定**按钮确认，把介质基片 Substrate 的底面设置为理想导体边界。这样，介质基片的底面即可以看作是天线的参考地。

上述两次操作设置的理想导体边界名称 PerfE1 和 PerfE2 会添加到工程树的 Boundaries 节点下。

4. 创建端口面并设置集总端口激励

在馈电网络 50Ω 微带传输线终端创建一矩形面用于设置天线的激励，激励类型为集总端口激励，端口负载阻抗和归一化阻抗设置为 50Ω 。

(1) 创建端口平面

在馈电网络 50Ω 微带传输线终端截面上创建一个平行于 yz 平面的矩形面用作集总端口平面，端口平面上边缘与微带传输线相接，底边与参考地相接，端口平面宽度与微带传输线宽度一致。

单击工具栏的 **XY** 下拉按钮，从其下拉列表中选择 YZ，把当前绘图平面设置为 yz 面。

从主菜单栏选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏的 **□** 按钮，进入创建矩形面的状态；然后在三维模型窗口的 yz 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1，打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡，如图 8.5.11 所示。把矩形面的名称修改为 Port，然后单击**确定**按钮退出。

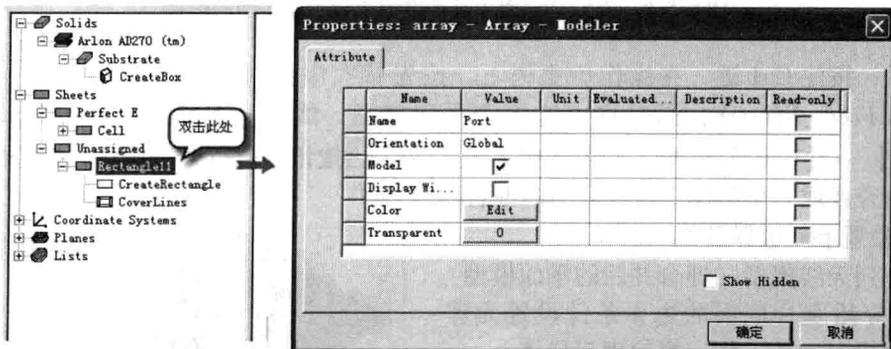


图 8.5.11 矩形面属性对话框 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Port 节点下的 CreateRectangle，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡下设置矩形面的顶点坐标和大小尺寸；在 Position 项输入顶点位置坐标为 (3, -0.63, 0)，在 YSize 和 ZSize 项分别输入矩形面的长和宽为 1.26 和 -0.5，如图 8.5.12 所示，然后单击**确定**按钮退出。

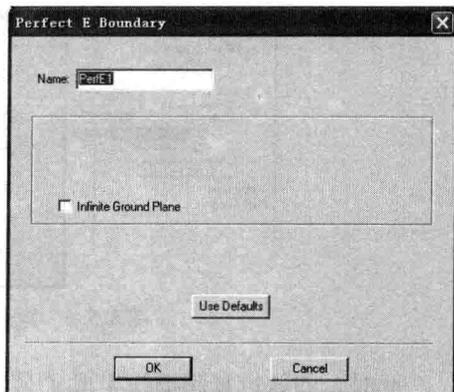


图 8.5.10 理想导体边界条件设置对话框

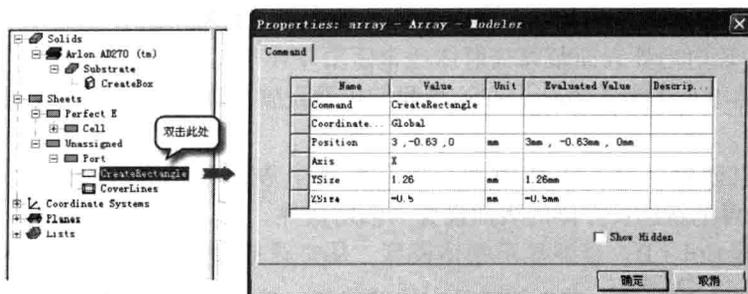


图 8.5.12 矩形面属性对话框 Command 选项卡

(2) 设置集总端口激励

单击操作历史树 Sheets 节点下的 Port，选中新建的端口平面；再单击工具栏 按钮，放大显示选中的端口面 Port。

然后单击右键，从右键弹出菜单中选择【Assign Excitation】→【Lumped Port】操作命令，打开集总端口设置对话框。在该对话框中，端口名称和端口阻抗都保留默认设置，然后单击对话框的 **下一步(N) >** 按钮，打开对话框的 Modes 界面。在该界面中，从积分线对应的下拉列表中选择 New Line...，如图 8.5.13 所示。

单击 New Line... 操作后，会进入三维模型窗口。在三维模型窗口，移动鼠标光标到端口面的下边缘中点处，当光标形状变为 ▲ 时，表示光标捕捉到下边缘中点位置，此时单击鼠标左键确认；再移动光标到端口面的上边缘中点处，当光标形状变为 ▲ 时，表示光标捕捉到上边缘中点位置，此时再次单击鼠标左键确认。操作过程如图 8.5.14 所示，这样即可设置好端口的积分线，回到端口设置对话框。

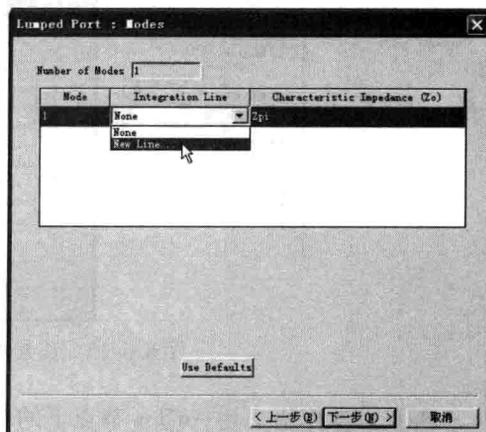


图 8.5.13 集总端口设置——Modes 界面

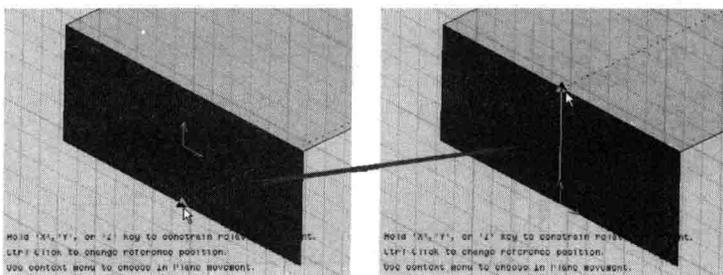


图 8.5.14 设置端口积分线操作

继续单击对话框的 **下一步(N) >** 按钮，打开对话框的 Post Processing 界面。在 Post Processing 界面，选中 Renormalized All Modes 单选按钮，并设置端口阻抗为 50Ω ，最后单击 **完成** 按钮，完成集总端口激励方式的设置。

设置完成后，集总端口的名称 1 会添加到工程树的 Excitations 节点下。

5. 创建一足够大的长方体空气盒并设置其各个表面为辐射边界

在 HFSS 中辐射边界表面距离辐射体通常需要不小于 $1/4$ 个工作波长, 对应 16GHz 工作频率, 即距离不小于为 4.7mm, 在这里我们仍然设置辐射边界表面到天线介质基片的距离为 10mm。

首先, 我们创建一个长方体模型, 长方体各个表面分别和介质基片各个表面相距 10mm。然后, 再把新建长方体的表面设置为辐射边界。

按下快捷键 $Ctrl + D$, 全屏显示物体模型。从主菜单栏选择【Draw】→【Box】命令, 或者单击工具栏的  按钮, 进入创建长方体的状态, 然后在三维模型窗口创建一个任意大小的长方体; 新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Box1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1, 打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡, 把长方体的名称修改为 Airbox, 设置其透明度为 0.8, 并确认其材质为 vacuum, 如图 8.5.15 所示, 然后单击  按钮退出。

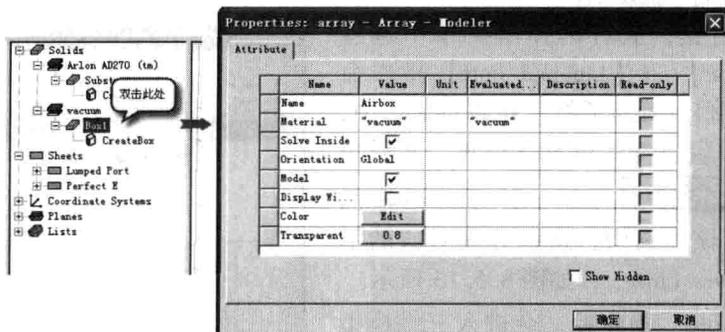


图 8.5.15 长方体属性对话框 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 AirBox 节点下的 CreateBox, 打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡下设置长方体的顶点坐标和大小尺寸; 在 Position 项输入顶点位置坐标为 (-30, -35, -10), 在 XSize、YSize 和 ZSize 项分别输入长方体的长、宽和高为 45、75 和 20, 如图 8.5.16 所示, 然后单击  按钮退出。

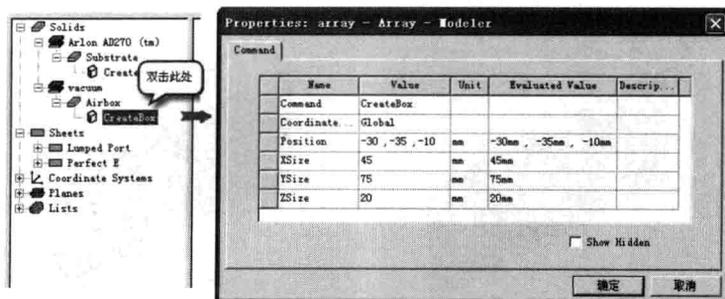


图 8.5.16 长方体属性对话框 Command 选项卡

长方体模型 AirBox 创建好了之后, 在操作历史树下单击 Airbox, 选中该模型。然后在三维模型窗口单击右键, 从右键弹出菜单中, 选择【Assign Boundary】→【Radiation】操作命令, 打开辐射边界条件设置对话框。保留对话框的默认设置不变, 直接单击  按钮, 即把长方体模型 Airbox 的所有表面都设置为辐射边界条件。

设置完成后, 辐射边界条件的默认名称 Rad1 也会添加到工程树的 Boundaries 节点下。

8.5.2 求解设置

该阵列天线是工作于 16GHz 的 Ku 频段上，所以分析频率需要设置为 16GHz；同时添加 15 ~ 17GHz 的扫频设置，选择快速（Fast）扫频类型。

1. 分析频率设置

设置分析频率为 2.45GHz，自适应网格剖分的最大迭代次数为 20，收敛误差为 0.02。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，从弹出菜单中选择【Add Solution Setup】命令，打开 Solution Setup 对话框。在该对话框中，Solution Frequency 项输入分析频率 16GHz，Maximum Number of Passes 项输入最大迭代次数 20，Maximum Delta S 项输入收敛误差 0.02，其他项保留默认设置，整个操作如图 8.5.17 所示。为了减少分析时的运算量和占用的内存空间，用户可以单击对话框的 Options 选项卡，选择基函数（Order of Basis）的阶数为 Second Order（默认设置是 First Order），如图 8.5.18 所示。

然后单击 **确定** 按钮，退出对话框，完成求解设置。设置完成后，求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

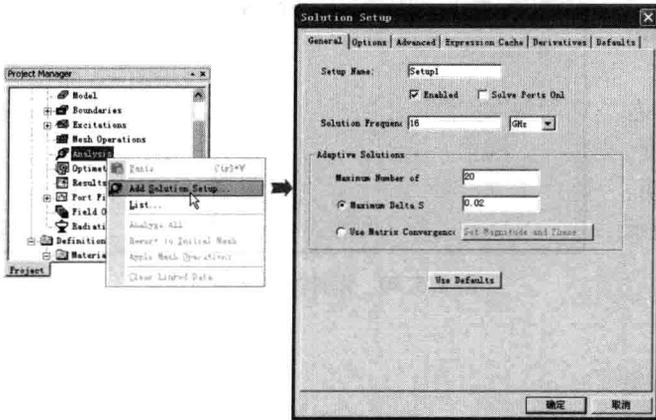


图 8.5.17 求解设置

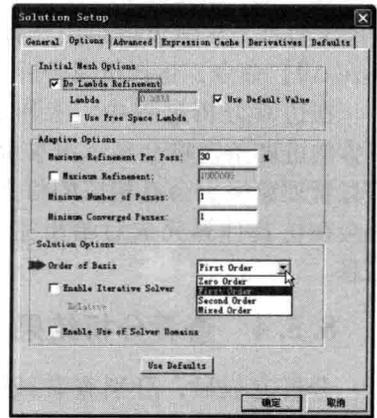


图 8.5.18 求解设置对话框——Options 选项卡

2. 扫频设置

扫频类型选择快速扫频，扫频频率范围为 15 ~ 17GHz，频率步进为 0.1GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点，右键单击求解设置项 Setup1，从弹出菜单中选择【Add Frequency Sweep】命令，打开 Edit Frequency Sweep 对话框，如图 8.5.19 所示。在该对话框中，Sweep Type 项选择扫描类型为 Fast；在 Frequency Setup 栏，Type 项选择 LinearStep，Start 项输入 15GHz，Stop 项输入 17GHz，Step 项输入 0.1GHz；其他项都保留默认设置；最后单击对话框 **确定** 按钮，完成设置，退出对话框。

设置完成后，该扫频设置项的名称 Sweep 会添加到工程树的求解设置项 Setup1 下。

8.5.3 设计检查和运行仿真计算

到这里，我们就完成了所设计的阵列天线的模型创建和求解设置，接下来进行设计检查并运行仿真分析。

从主菜单栏选择【HFSS】→【Validation Check】命令，或者单击工具栏的  按钮，

进行设计检查。此时,会弹出如图 8.5.20 所示的 Validation Check 对话框,确认 HFSS 设计检查结果无误,单击 **Close** 关闭对话框。

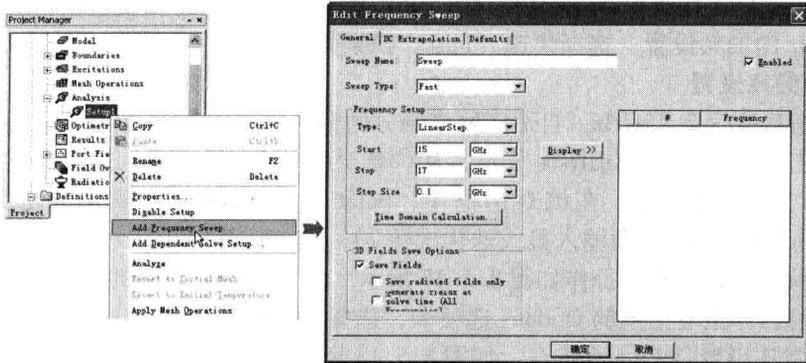


图 8.5.19 扫频设置

接下来,右键单击工程树下的 Analysis 节点,从弹出菜单中选择【Analyze All】命令,运行仿真分析。

在仿真分析过程中,工作界面右下方的进度条窗格会显示出求解进度,信息管理窗格也会有相应的信息说明,并会在仿真计算完成后给出完成提示信息。

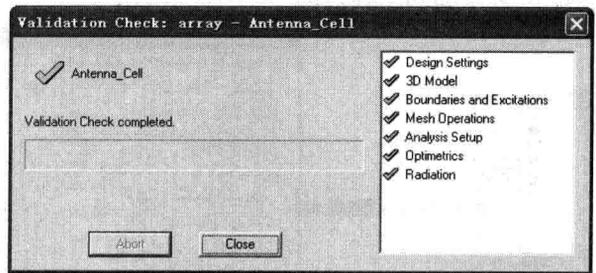


图 8.5.20 设计检查结果对话框

8.5.4 查看分析结果

分析完成后,分别查看该阵列天线的回波损耗和增益方向图的分析结果,并与前面 8.3 节阵元的分析结果做个简单的对比。

1. 回波损耗分析结果

右键单击工程树下的 Results 节点,从弹出菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令,打开报告设置对话框,如图 8.5.21 所示。在该对话框中,确定左侧 Solution 项选择的是 Setup1:Sweep,在 Category 栏选中 S Parameter, Quantity 栏选中 S(1, 1), Function 栏选中 dB;然后单击 **New Report** 按钮,再单击 **Close** 按钮关闭对话框。此时,即可生成如图 8.5.22 所示的 S_{11} 在 15 ~ 17GHz 的扫频分析结果。

2. 增益方向图

这里,我们分别查看天线在 xz 、 yz 截面上的增益方向图和天线的三维增益方向图。

要查看天线方向图等远区场分析结果,首先需要定义辐射表面。辐射表面是在球坐标系下定义的。球坐标系下, xz 平面即相当于 $\varphi = 0^\circ$ 的平面, yz 平面即相当于 $\varphi = 90^\circ$ 的平面,三维立体空间即相当于 $0^\circ < \varphi < 360^\circ$ 、 $0^\circ < \theta < 180^\circ$ 。

(1) 定义 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 的平面为辐射表面

右键单击工程树下的 Radiation 节点,从弹出菜单中选择【Insert Far Field Setup】→【Infinite Sphere】命令,打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框,定义辐射表面,如图 8.5.23 所示。在该对话框中, Name 项输入辐射表面的名称 EH Plane; Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Siz 项分别输入 0deg、90deg 和 90deg; Theta 角度对应的 Start、Stop 和

Step Siz 项分别输入 -180deg 、 180deg 和 1deg ；然后单击 **确定** 按钮，完成设置。此时，定义的辐射表面名称 EH Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

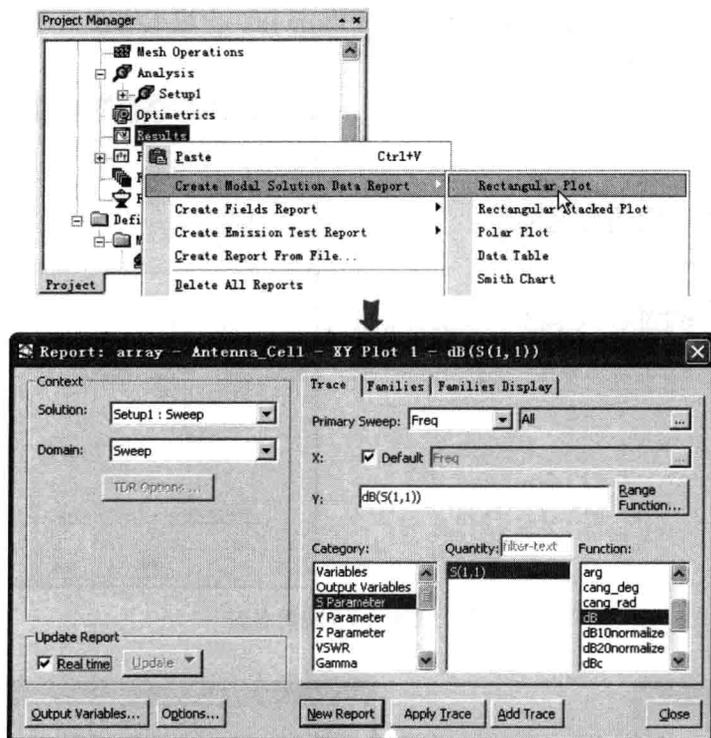


图 8.5.21 分析结果报告设置对话框

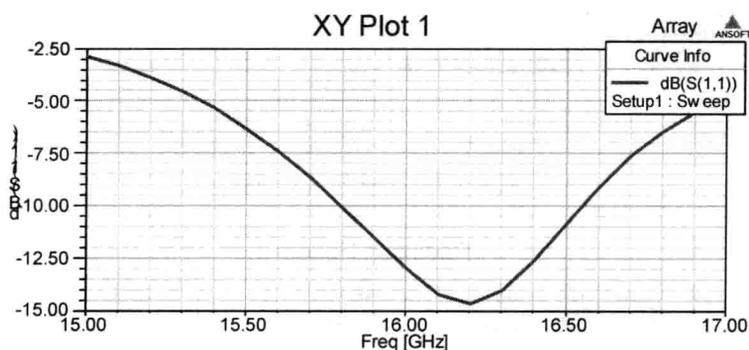


图 8.5.22 回波损耗分析结果

(2) 定义三维立体球面为辐射表面

使用和前面相同的操作，再次打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框。在该对话框中，Name 项输入辐射表面的名称 3D；Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Siz 项分别输入 0deg 、 360deg 和 2deg ；Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Siz 项分别输入 0deg 、 180deg 和 2deg ；然后单击 **确定** 按钮，完成设置。

此时，定义的辐射表面名称 3D 同样会添加到工程树的 Radiation 节点下。

(3) 查看在 xz 和 yz 截面上的增益方向图

右键单击工程树下的 Results 节点，从弹出菜单中选择 **【Create Far Fields Report】** →

【Radiation Pattern】命令，打开如图 8.5.24 所示的报告设置对话框。在该对话框中，Geometry 项选择前面定义的辐射表面 EH Plane，Category 项选择 Gain，Quantity 项选择 Gain Total，Function 项选择 dB；然后单击 **New Report** 按钮，生成天线在 xz 和 yz 截面上的增益方向图，如图 8.5.25 所示。

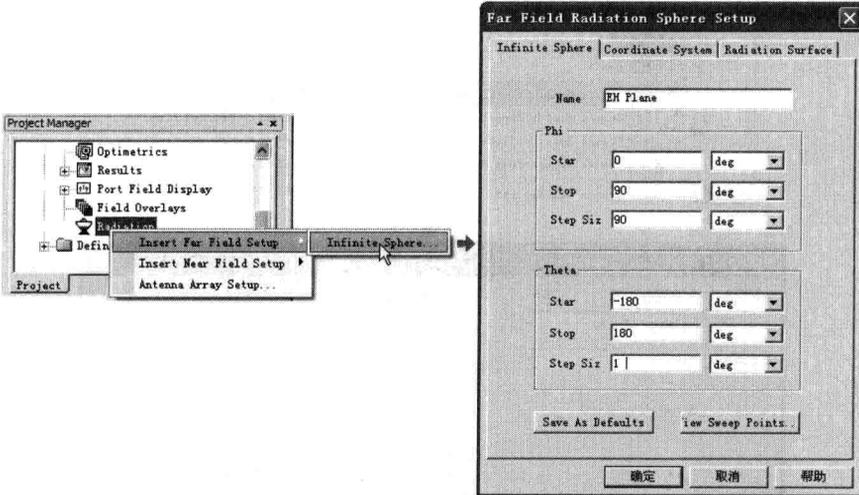


图 8.5.23 定义辐射表面

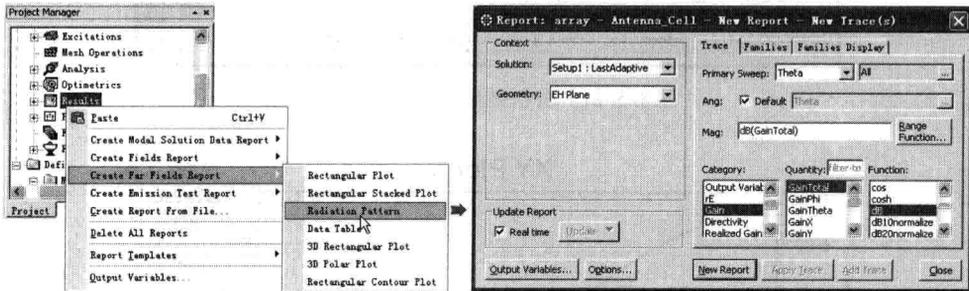


图 8.5.24 报告设置对话框

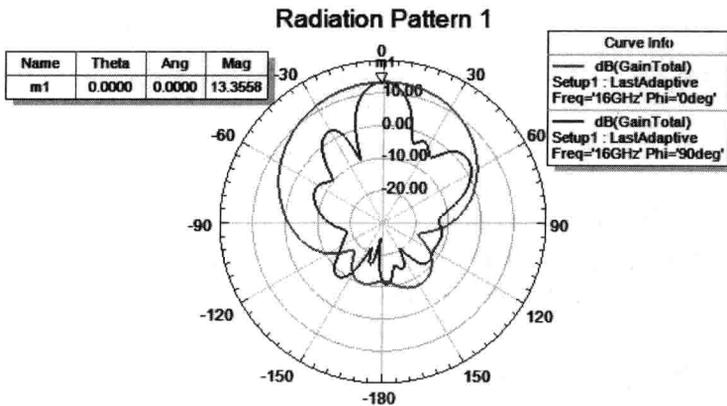


图 8.5.25 天线在 xz 和 yz 截面上的增益方向图

从图示分析结果中，我们可以看出天线的最大辐射方向仍是在天线的正上方，最大增益值约为 13.4dB。

(4) 查看三维增益方向图

右键单击工程树下的 Results 节点，从弹出菜单中选择【Create Far Fields Report】→【3D Polar Plot】命令，打开如图 8.5.26 所示的报告设置对话框。在该对话框中，Geometry

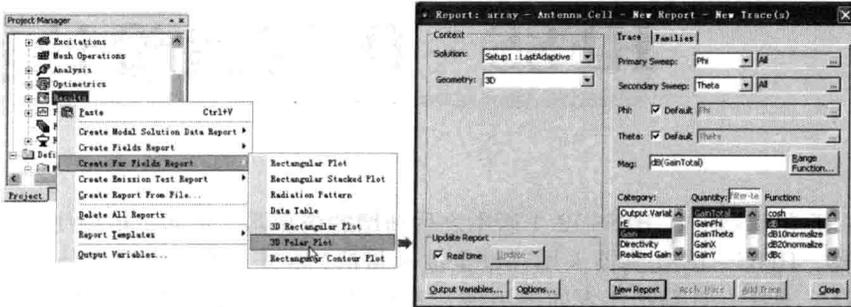


图 8.5.26 报告设置对话框

项选择前面定义的辐射面 3D，Category 项选择 Gain，Quantity 项选择 GainTotal，Function 项选择 dB；然后单击 **New Report** 按钮，生成如图 8.5.27 所示三维增益方向图。

对比天线阵列的分析结果（图 8.5.22、图 8.5.25、图 8.5.27）和阵元的分析结果（图 8.3.26、图 8.3.31 和图 8.3.33），我们可以出：（1）因为阵元间的互耦效应以及馈电网络的影响，天线阵列的回波损耗比单个阵元的回波损耗稍差；（2）天线阵列的辐射增益明显高于单个阵元，天线阵列的最大增益比单个阵元的最大增益增大了约 6dB，即增大了约 4 倍；（3）天线阵列的确比单个阵元具有更好的指向性。

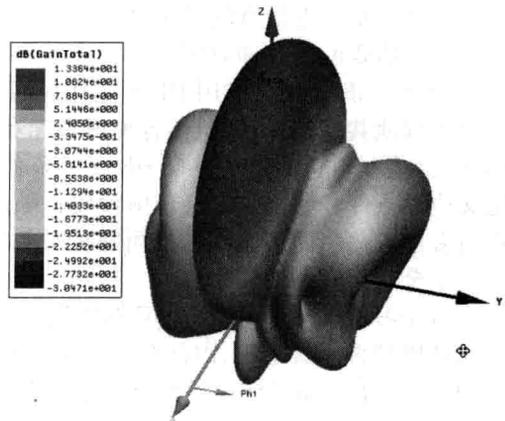


图 8.5.27 三维增益方向图

8.6 本章小结

本章主要介绍了如何使用 HFSS 仿真设计分析微带天线阵列，其中不仅从理论上计算分析了均匀直线阵列天线的阵因子，还根据阵列天线的实际设计流程，依次介绍了阵列天线设计过程中，阵元的设计分析、馈电网络的设计分析和整个天线阵列的设计分析。

参考文献

- [1] Zhang, R. Fang, D. G. Sun, Y. X. Sheng, W. X., *Computer - Aided Design of Microstrip Antenna array*, Asia - Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, CEEM 2000. Proceedings.
- [2] 微带线阻抗和电长度在线计算工具，网址 http://www.mweda.com/tools/tools_107.html。

第 9 章

HFSS - IE 天线设计实例

HFSS - IE 仿真器是在 HFSS 12.1 版本之后新增的仿真器。不同于传统使用有限元法的 HFSS 仿真器, HFSS - IE 仿真器采用三维全波矩量法(MoM)的电磁场积分方程(Integral Equation, IE)算法, 计算物体表面的电流, 并根据这些电流精确地计算物体的辐射场或者散射场, 适合电大尺寸模型的辐射及散射问题仿真计算。

对于电大尺寸的模型, 使用传统的 HFSS 求解器需要较多的计算资源。HFSS - IE 仿真器采取自动划分和物体共形的网格来保证计算精度, 此时使用 IE 仿真器会自动应用基于矩阵的自适应交叉近似算法(ACA)来提高求解效率, 这种加速算法(ACA)可以最小化仿真计算所需要的内存和时间。

HFSS - IE 仿真器沿用 HFSS 工作界面, 基于 HFSS - IE 仿真器的设计和原有 HFSS 环境之间无缝地共享模型库, 包括各种材料库和几何模型库。HFSS - IE 仿真分析的设计流程和 HFSS 也基本相同, 建立一个 HFSS - IE 仿真计算仅仅需要以下几个步骤: 创建设计模型、定义边界条件和激励, 定义求解设置; 随后的仿真计算过程完全自动进行, 基本不需要用户再多输入信息即可得到精准可靠的计算结果。因此, 对于以往的 HFSS 用户可以轻松掌握这个全新仿真器的使用。

对于习惯了使用 HFSS 仿真器的用户需要注意的是, 在使用 HFSS - IE 仿真器时系统默认设计模型置于真空中, 因此在使用 HFSS - IE 仿真器分析辐射和散射问题时, 不需要像传统的 HFSS 仿真器那样设置辐射边界条件或者 PML 边界条件。

本章将通过使用 HFSS - IE 仿真器设计分析 7.1 节中的喇叭天线实例, 来介绍 HFSS - IE 仿真器在天线设计方面的使用操作。

需要说明的是, 本书其他章节使用的软件版本为 12.0。因为 HFSS - IE 仿真器是在 HFSS 12.1 及之后版本中才新增的仿真器, 所以本章使用 14.0 的软件版本。

9.1 设计要求

本章使用 HFSS - IE 仿真器来设计分析前面 7.1 节中的喇叭天线, 相关设计要求、喇叭天线的设计原理以及初始设计可以参见第 7.1.1 节和第 7.1.2 节, 此处不再赘述。

9.2 HFSS - IE 仿真设计步骤

9.2.1 新建设计工程

1. 运行 HFSS 并新建工程

双击桌面上的 HFSS 快捷方式, 启动 HFSS 软件。HFSS 运行后, 会自动新建一个工

程文件,选择主菜单【File】→【Save As】命令,把工程文件另存为 Antenna_IE. hfss。

和原先的 HFSS 版本相比,新版的 HFSS 软件由于增加了 HFSS - IE 仿真器,所以在软件启动后,不会自动新建一个设计文件。我们单击工具栏上的  按钮,新建一个 HFSS - IE 设计,新建 IE 设计的默认名称 IEDesign1,添加在工程树下,如图 9.2.1 所示。

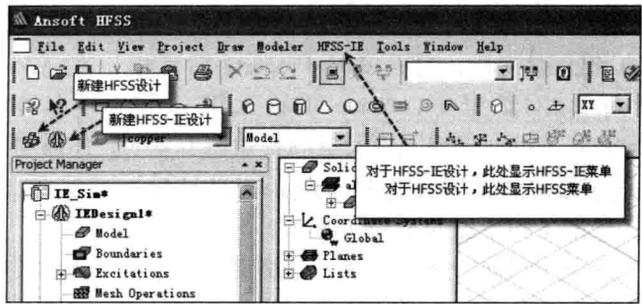


图 9.2.1 HFSS - IE 工作界面

在图 9.2.1 的 HFSS - IE 工作界面中,通过单击工具栏左侧的  按钮可以新建 HFSS 设计,通过单击  按钮可以新建 HFSS - IE 设计。创建了 HFSS IE 设计后,主菜单栏显示 HFSS 菜单的位置会相应变化为显示 HFSS - IE 菜单。

最后,右键单击工程树下的 HFSS - IE 设计名称 IEDesign1,从弹出的菜单中选择【Rename】命令,把设计文件重新命名为 Horn。

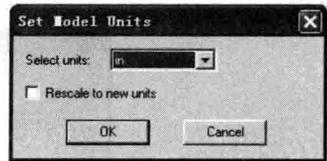


图 9.2.2 长度单位设置对话框

2. 设置默认的长度单位

设置当前设计在创建模型时使用的默认长度单位为英寸。

从主菜单栏选择【Modeler】→【Units】命令,打开如图 9.2.2 所示的模型长度单位设置对话框。在该对话框中,Select units 项选择长度单位为英寸 (in),然后单击  按钮,退出对话框,完成设置。

3. 建模相关选项设置

从主菜单栏选择【Tools】→【Options】→【Modeler Options】命令,打开 Modeler Options 对话框,单击对话框的 Drawing 选项卡,确认 Drawing 选项卡中的 Edit properties of new primitive 复选框未选中,如图 9.2.3 所示。然后单击  按钮,退出对话框,完成设置。

9.2.2 设计建模

本章设计的喇叭天线与第 7.1 节所设计的喇叭天线完全相同,所以用户可以直接使用复制操作通过复制第 7.1 节设计的喇叭天线模型用于此处的 HFSS - IE 仿真器分析。通过复制操作生成此处 HFSS - IE 分析模型时,需要注意不要复制原先模型中用于设计辐射边界条件的空气盒。

为了保持 HFSS - IE 设计实例的完整性,使得读者能够更好地熟悉理解 HFSS - IE 仿真器的使用,我们在这里还是重新创建喇叭天线模型。

在进行建模操作之前,首先确认默认的建模时使用的默认材质是 vacuum,如图 9.2.4 所示。

9.2.2.1 添加和定义设计变量

在 HFSS 中定义和添加前面第 7 章中表 7.1 列出的所有设计变量。

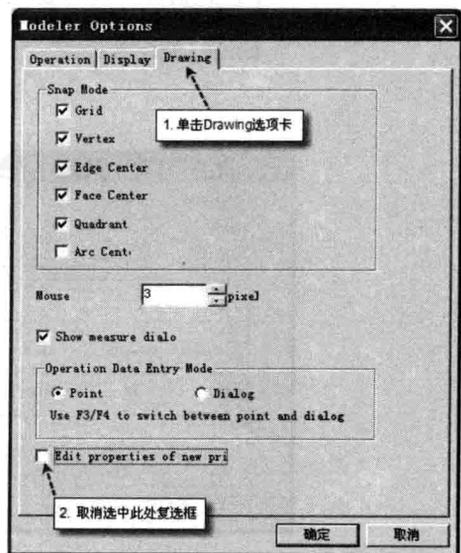


图 9.2.3 Modeler Options 对话框

从主菜单栏选择【HFSS - IE】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框，单击对话框中的 **Add...** 按钮，打开 Add Property 对话框，在 Add Property 对话框中，Name 项输入第一个变量名称 length，Value 项输入该变量的初始值 1.23in，然后单击 **OK** 按钮，添加变量 length 到设计属性对话框。变量定义和添加的过程如图 9.2.5 所示。

使用相同的操作步骤，分别定义变量 a，输入其初始值为 4.3in；定义变量 b，输入其初始值为 2.15in；定义变量 wlength，输入其初始值为 5 * length；定义变量 a1，输入其初始值为 20.5in；定义变量 b1，输入其初始值为 15.18in；定义变量 plength，输入其初始值为 22.47in。定义完成后，确认属性对话框如图 9.2.6 所示。

最后单击设计属性对话框的 **确定** 按钮，完成所有变量的定义和添加工作，退出对话框。

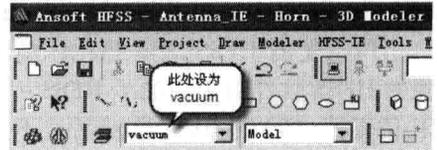


图 9.2.4 默认材质设置

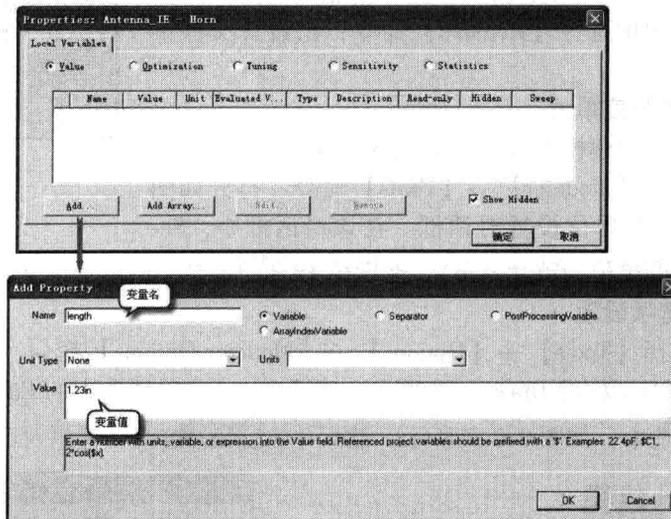


图 9.2.5 定义变量

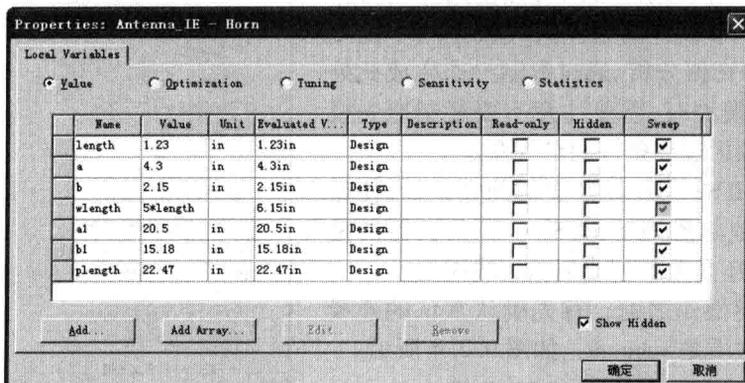


图 9.2.6 定义所有设计变量后的设计属性对话框

9.2.2.2 创建喇叭模型

分别在 $z=0$ 和 $z=length$ 的平面上创建大小为 $a \times b$ 和 $a1 \times b1$ 的平面，平面的中心都位于 z 坐标轴上。然后选中这两个平面，通过【Modeler】→【Surface】→【Connect】操作命令生成喇叭模型。

1. 创建一矩形面

在 $z=0$ 的平面上创建一个中心位于坐标原点，长度和宽度分别用变量 a 和 b 表示的矩形面，并将其命名为 Horn。

从主菜单栏选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏的  按钮，进入创建矩形面的状态；然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1，打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡，如图 9.2.7 所示。把矩形面的名称修改为 Horn，设置其透明度为 0.4，然后单击  按钮退出。

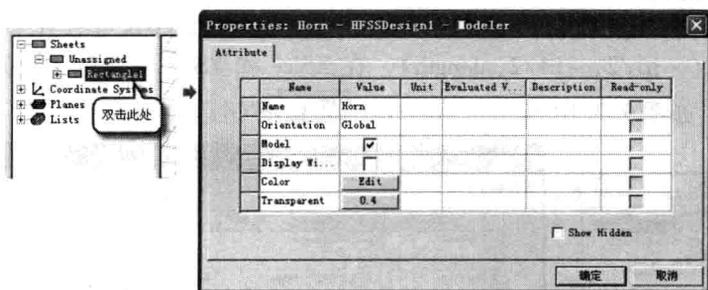


图 9.2.7 矩形面属性对话框 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Horn 节点下的 CreateRectangle，打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡下设置矩形面的顶点坐标和大小尺寸；在 Position 项输入其顶点位置坐标为 $(-a/2, -b/2, 0)$ ，在 XSize 和 YSize 项分别输入矩形面的长度和宽度为 a 和 b ，如图 9.2.8 所示；其中 a 、 b 分别是前面定义的设计变量。然后单击  按钮退出。

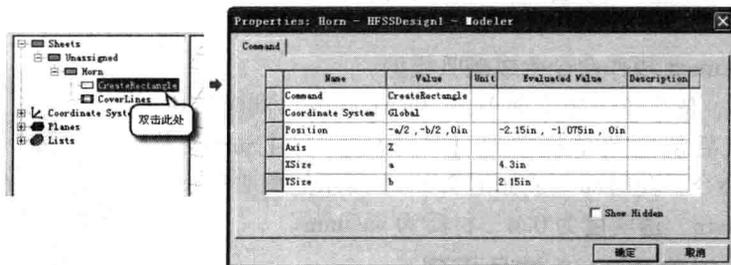


图 9.2.8 矩形面属性对话框 Command 选项卡

2. 创建第二个矩形面

在 $z=length$ 的平面上创建一个中心位于 z 坐标轴，长度和宽度分别用变量 $a1$ 和 $b1$ 表示的矩形面，并命名为 Aperture。

从主菜单栏选择【Draw】→【Rectangle】命令，或者单击工具栏的  按钮，进入创建矩形面的状态。然后在三维模型窗口的 xy 面上创建一个任意大小的矩形面。新建的矩形面会添加到操作历史树的 Sheets 节点下，其默认的名称为 Rectangle1。

双击操作历史树 Sheets 节点下的 Rectangle1, 打开新建矩形面属性对话框的 Attribute 选项卡, 如图 9.2.9 所示, 把矩形面的名称修改为 Aperture, 然后单击 **确定** 按钮退出。

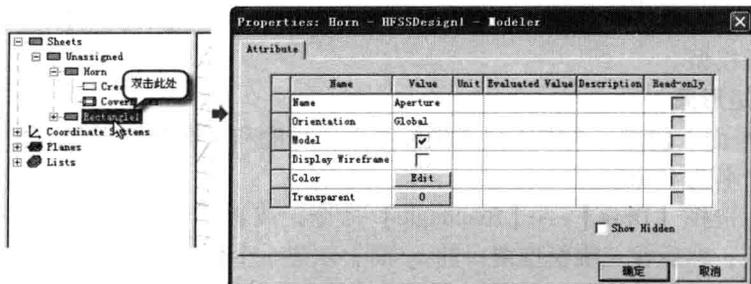


图 9.2.9 矩形面属性对话框 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Aperture 节点下的 CreateRectangle, 打开新建矩形面属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡下设置矩形面的顶点坐标和大小尺寸; 在 Position 项输入其顶点位置坐标为 $(-a1/2, -b1/2, plength)$, 在 XSize 和 YSize 项分别输入矩形面的长度和宽度为 $a1$ 和 $b1$, 如图 9.2.10 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

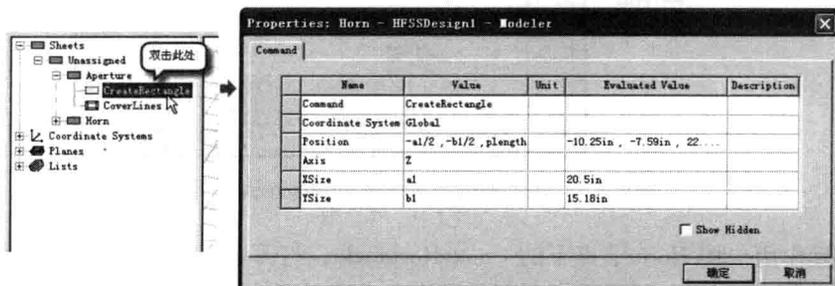


图 9.2.10 矩形面属性对话框 Command 选项卡

创建了 Horn 和 Aperture 这两个矩形面之后, 按下快捷键 $Ctrl + D$, 全屏显示已创建的所有物体模型。

1. 通过 Connect 操作命令生成喇叭模型

按住 $Ctrl$ 键, 依次单击矩形面 Horn 和 Aperture, 同时选中这两个物体。然后从主菜单栏单击 **【Modeler】** → **【Surface】** → **【Connect】** 命令, 此时即生成如图 9.2.11 所示的喇叭模型, 该模型名称为 Horn, 透明度为 0.4, 材质为 vacuum。

9.2.2.3 创建 WR430 波导模型

创建一个长方体模型用以表示 WR430 波导, 该模型与喇叭底部相接, 其长宽高分别用前面定义的变量 a 、 b 和 $wlength$ 表示, 并将其命名为 WR430。

从主菜单栏选择 **【Draw】** → **【Box】** 命令, 或者单击工具栏的  按钮, 进入创建长方体的状态, 然后在三维模型窗口创建一个任意大小的长方体。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Box1。

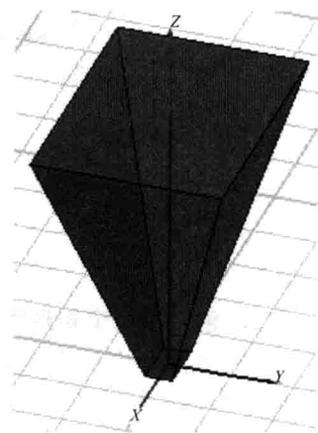


图 9.2.11 喇叭模型

双击操作历史树 Solids 节点下的 Box1，打开新建长方体属性对话框的 Attribute 选项卡，把长方体的名称修改为 WR430，设置其透明度为 0.4，如图 9.2.12 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

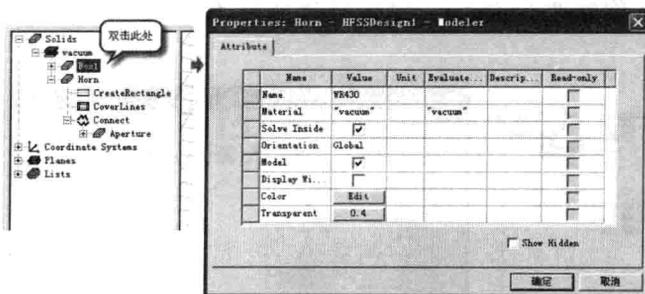


图 9.2.12 长方体属性对话框 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 WR430 节点下的 CreateBox，打开新建长方体属性对话框的 Command 选项卡，在该选项卡下设置长方体的顶点坐标和大小尺寸。在 Position 项输入其顶点位置坐标为 $(-a/2, -b/2, 0)$ ，在 XSize、YSize 和 ZSize 项分别输入矩形面的长、宽和高为 a 、 b 和 $-wlength$ ，如图 9.2.13 所示，然后单击 **确定** 按钮退出。

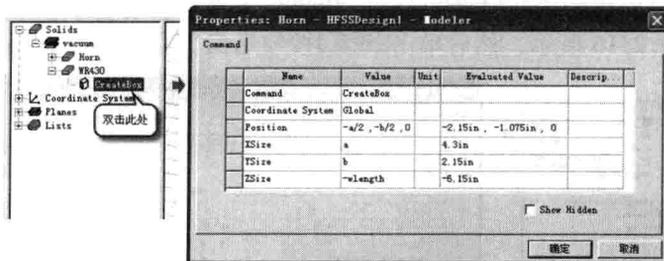


图 9.2.13 长方体属性对话框 Command 选项卡

此时就创建好了 WR430 波导模型。创建好了波导模型后，按下快捷键 $Ctrl + D$ ，全屏显示已创建的所有物体模型，如图 9.2.14 所示。

9.2.2.4 创建同轴馈线

同轴线馈电点放置于波导宽边中心线上，其与底侧短路板的距离为四分之一波长，同轴线的外导体与波导的外侧壁相接触。同轴线的外导体圆半径为 0.06in ，外导体长度为 0.3in ；同轴线内导体半径为 0.025in ，内导体在波导内的长度为波导窄边长度的一半，即 $b/2$ 。这里创建两个圆柱体模型用来表示同轴线的外导体和内导体。

1. 创建同轴线的外导体

因为同轴线垂直于波导表面，所以创建的圆柱体底面是平行于 xz 面的，首先单击工具栏的 **XY** 下拉按钮，从其下拉列表中选择 ZX ，把当前绘图平面设置为 xz 面。

然后，从主菜单栏选择 **【Draw】** → **【Cylinder】** 命令，或者单击工具栏的 **Cylinder** 按钮，进

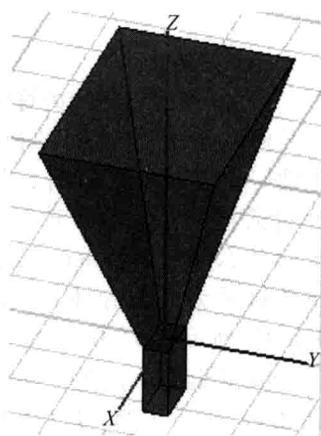


图 9.2.14 矩形喇叭波导锥形

入创建圆柱体的状态, 在三维模型窗口创建一个任意大小的圆柱体。新建的圆柱体会添加到操作历史树的 Solids 节点下, 其默认的名称为 Cylinder 1。

双击操作历史树 Solids 节点下的 Cylinder1, 打开新建圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡, 把圆柱体的名称修改为 Outer, 设置其透明度为 0.4, 如图 9.15 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出。

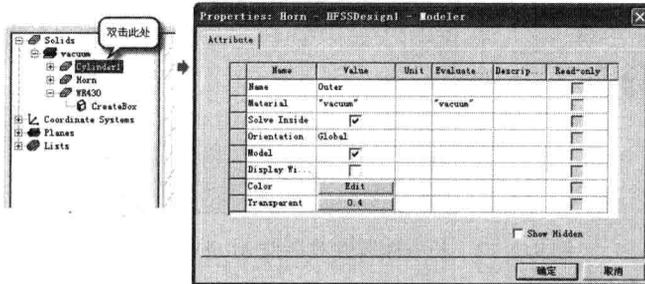


图 9.2.15 圆柱体属性对话框 Attribute 选项卡

再双击操作历史树 Outer 节点下的 CreateCylinder, 打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡, 在该选项卡下设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度; 在 Position 项输入其底面圆心坐标为 $(0, b/2, -4 * length)$, 在 Radius 项输入半径值 0.06, 在 Height 项输入长度值 0.3, 如图 9.2.16 所示, 然后单击 **确定** 按钮退出, 完成圆柱体 Outer 的创建。

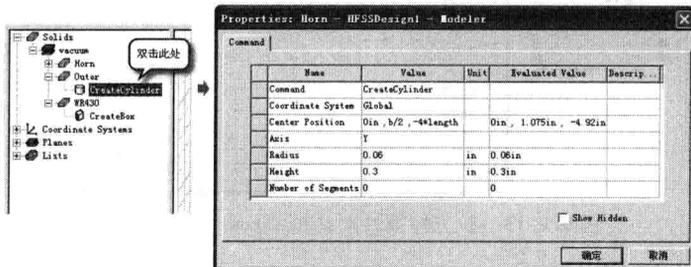


图 9.2.16 圆柱体属性对话框 Command 选项卡

2. 创建同轴线的内导体

使用和前面相同的操作步骤, 创建一个圆柱体。打开该圆柱体属性对话框的 Attribute 选项卡, 把矩形面名称修改为 Inner, 设置该圆柱体的材质为理想导体 (pec), 如图 9.2.17 所示。打开属性对话框的 Command 选项卡, 在 Position 项输入其底面圆心坐标为 $(0, 0, -4 * length)$, 在 Radius 项输入半径值 0.025, 在 Height 项输入其长度值 $0.3in + b/2$, 如图 9.2.18 所示。

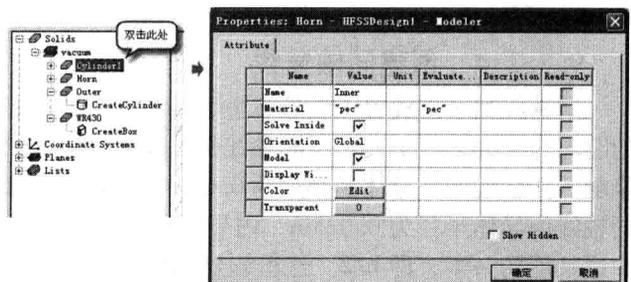


图 9.2.17 圆柱体属性对话框 Attribute 选项卡

注意: 在 HFSS 中, 使用既有变量也有数值的表达式时, 表达式中的数值必须附上单位, 否则使用默认 SI 单位。例如, 这里的圆柱体长度我们设置为 $0.3in + b/2$, 如果 0.3 后面不加英寸单位, 错误写成 $0.3 + b/2$, 则实际值就变成 0.3m 加上变量 $b/2$ 了。

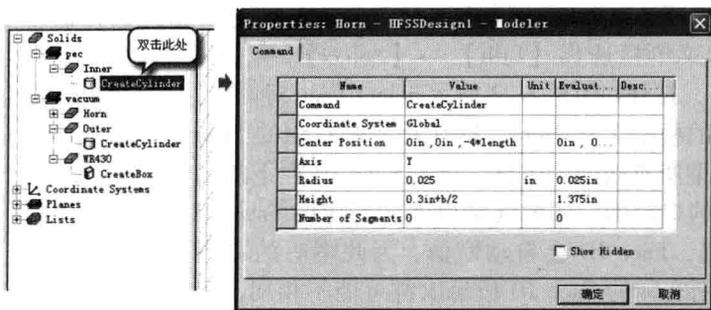


图 9.2.18 圆柱体属性对话框 Command 选项卡

9.2.2.5 布尔操作

上述模型都创建好了之后，使用布尔操作，生成最终的矩形口径喇叭天线模型。

1. 执行合并操作，把 Horn、WR430 和 Outer 三个模型合并成一个完整的物体模型

按住 Ctrl 键，在操作历史树下按先后次序依次单击 Horn、Outer 和 WR430，同时选中这 3 个物体。然后单击主菜单栏的【Modeler】→【Boolean】→【Unite】操作命令，或者直接单击工具栏的 按钮，执行合并操作，把选中的 3 个物体合并成一个整体。合并生成的物体名称、属性与执行合并操作前第一个选中的物体名称、属性相同，这里，新生成的物体名称即为 Horn。

2. 执行相减操作，消除 Horn 和 Inner 两个模型的重叠部分

按住 Ctrl 键，在操作历史树下按先后次序依次单击 Horn 和 Inner，同时选中这两个物体。然后单击主菜单栏的【Modeler】→【Boolean】→【Subtract】操作命令，或者直接单击工具栏的 按钮，打开如图 9.2.19 所示的 Subtract 对话框。确认对话框中 Horn 在 blank Parts 栏，Inner 在 Tool Parts 栏，并选中 Clone tool objects before operation 复选框，表示使用模型 Horn 减去模型 Inner，同时保留模型 Inner。然后单击 按钮执行相减操作。

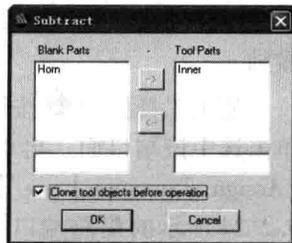


图 9.2.19 Subtract 对话框

那么，此时就生成了最终的喇叭天线模型和同轴馈电线。

9.2.2.6 把喇叭天线的外表面设置为理想导体边界条件

前面在建模时，我们创建的喇叭模型 Horn、波导模型 WR430 和通过同轴线外导体模型 Outer 使用的材质都是 vacuum，即真空。而喇叭天线的各个壁都应该是金属材质的，所以我们这里需要把喇叭天线模型外侧表面都设置为理想导体边界条件（Perfect E），设置为理想导体边界条件的表面即可看作是金属表面。其中，如图 9.2.20 所示的喇叭的口径面、同轴线端口面不需要设置为理想导体边界条件。

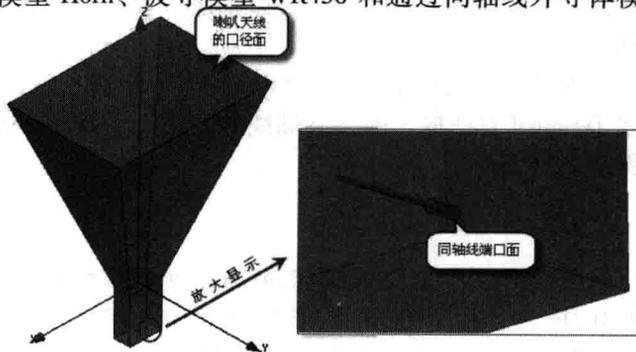


图 9.2.20 喇叭天线口径面和同轴线端口面位置。

在三维模型窗口单击右键，从

右键弹出菜单中选择 Select Faces 命令, 如图 9.2.21 所示, 进入选择物体表面状态。

然后, 从主菜单栏选择【Edit】→【Select】→【By Name】操作命令, 打开如图 9.2.22 所示 Select Face 对话框, 单击对话框左侧的模型名称 Horn, 则在对话框右侧的 Face ID 栏会列出该模型所有表面的名称。单击 Face ID 栏下的名称可以找到喇叭的口径面、同轴线端口面所对应的 Face ID (注意: 每次建模, Face ID 会自动赋值, 因此喇叭的口径面、同轴线端口面实际的 Face ID 值每次都不同, 用户需要自己在 Select Face 对话框中一个一个地查看 Face ID 寻找确定)。接下来按住 Ctrl 键, 在 Face ID 栏同时选中除去这三个表面名称后余下的所有表面名称, 然后单击 **OK** 按钮, 退出对话框。此时即选中了 Horn 模型上除去喇叭的口径面、同轴线端口面和同轴线内表面之外的所有表面。

再次在三维模型窗口单击右键, 从右键弹出菜单中选择【Assign Boundary】→【Perfect E】命令, 打开如图 9.2.23 所示的 Perfect E Boundary 设置对话框, 直接单击 **OK** 按钮, 把前面选中的表面的边界条件设置为理想导体边界。

9.2.2.7 设置端口激励

把同轴线的端口面设置为负载阻抗为 50Ω 的集总端口激励。

使用工具栏的  按钮, 放大显示同轴线端口面, 然后单击选中该端口面。再单击右键, 从右键弹出菜单中选择【Assign Excitation】→【Lumped Port】命令, 打开如图 9.2.24 所示的集总端口设置对话框。在该对话框中, Port Name 项输入端口名称 LP1, 并勾选对话框下方 Horn 对应的复选框; 其他项保留默认设置不变, 最后单击 **OK** 按钮完成设置, 关闭对话框。

设置完成后, 端口激励名称 LP1 会添加到工程树的 Excitations 节点下。单击选中激励 LP1, 然后单击工具栏的  按钮, 放大显示上面添加的激励端口 LP1, 如图 9.2.25 所示。

再双击工程树端口激励 LP1 下的 Inner_T1, 打开终端线 Terminal 对话框, 确认终端线的归一化阻抗为 50Ω , 如图 9.2.26 所示。

9.2.3 求解设置

天线的中心工作频率为 2.4GHz, 所以求解频率设置在 2.4GHz 频点; WR430 矩形波导的工作频段为 1.7 ~ 2.6GHz, 那么此处扫频范围我们设为 1.7 ~ 2.6GHz, 扫频类型选择快速扫频。

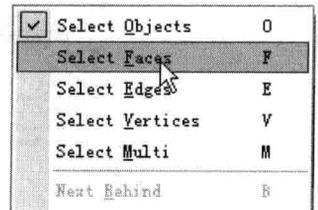


图 9.2.21 选择表面

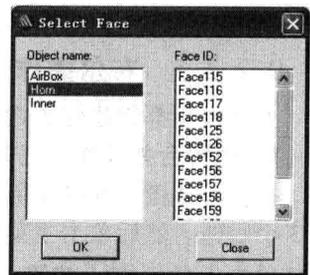


图 9.2.22 Select Face 对话框

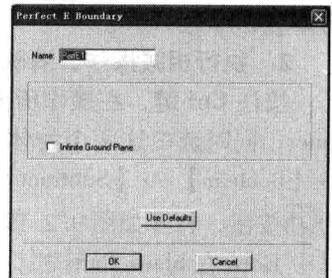


图 9.2.23 理想导体边界条件设置对话框

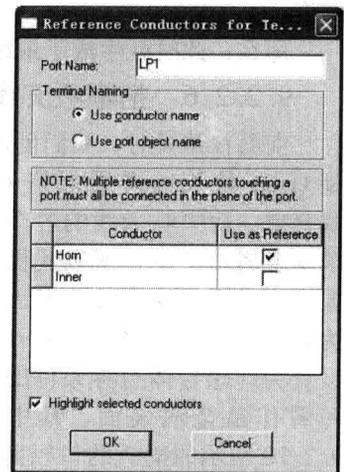


图 9.2.24 集总端口设置对话框

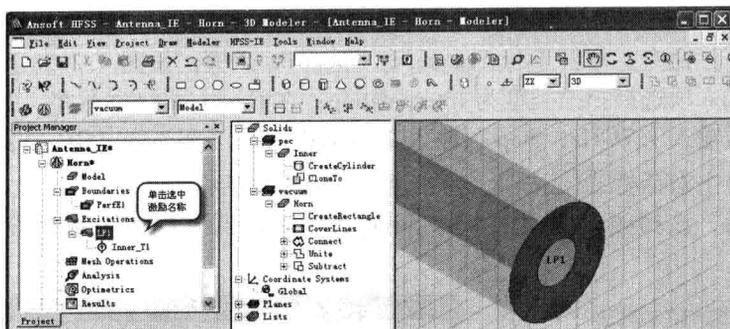


图 9.2.25 查看集总端口激励

1. 求解频率和网格剖分设置

设置求解频率为 2.4GHz，自适应网格剖分的最大迭代次数为 20，收敛误差为 0.02；有限元基函数选择 Second Order。

右键单击工程树下的 Analysis 节点，从弹出菜单中选择【Add Solution Setup】命令，打开 Solution Setup 对话框；在该对话框中，Solution Frequency 项输入求解频率 2.4GHz，Maximum Number of Passes 项输入最大迭代次数 20，Maximum Delta S 项输入收敛误差 0.02，其他项保留默认设置，如图 9.2.27 所示。然后，单击 **确定** 按钮，退出对话框，完成求解设置。

设置完成后，求解设置项的名称 Setup1 会添加到工程树的 Analysis 节点下。

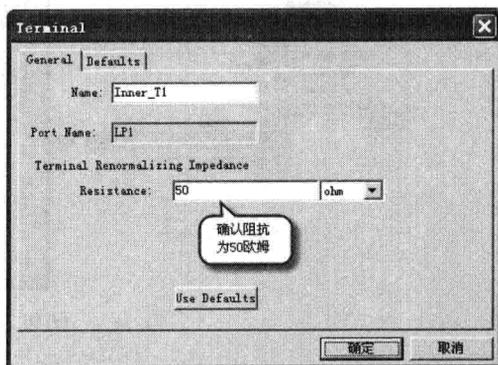


图 9.2.26 Terminal 对话框

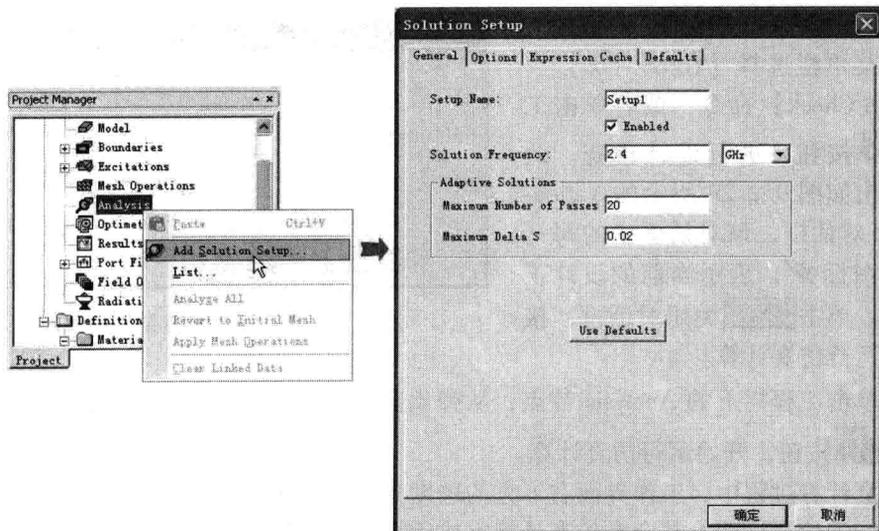


图 9.2.27 求解设置

2. 扫频设置

扫频类型选择快速扫频，扫频频率范围为 1.7 ~ 2.6GHz，频率步进为 0.1GHz。

展开工程树下的 Analysis 节点, 右键单击求解设置项 Setup1, 从弹出菜单中选择【Add Frequency Sweep】命令, 打开 Edit Frequency Sweep 对话框, 如图 9.2.28 所示。在该对话框中, Sweep Type 项选择扫描类型为 Interpolating; 在 Frequency Setup 栏, Type 项选择 LinearStep, Start 项输入 1.7GHz, Stop 项输入 2.6GHz, Step 项输入 0.1GHz; 其他项都保留默认设置; 最后单击对话框 **OK** 按钮, 完成设置, 退出对话框。

设置完成后, 该扫频设置项的名称 Sweep1 会添加到工程树中求解设置项 Setup1 节点下。

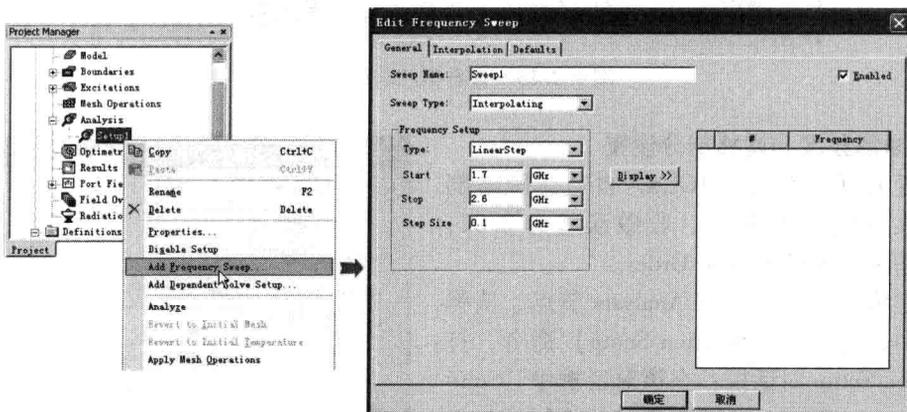


图 9.2.28 扫频设置

9.2.4 设计检查

通过前面的操作, 我们已经完成了模型创建和求解设置等设计的前期工作, 接下来就可以运行仿真计算并查看分析结果了。但在运行仿真计算之前, 通常需要进行设计检查, 检查设计的完整性和正确性。

从主菜单栏选择【HFSS - IE】→【Validation Check】命令, 或者单击工具栏的  按钮, 进行设计检查。此时, 会弹出如图 9.2.29 所示的 Validation Check 对话框, 该对话框中的每一项都显示图标 , 表示当前的设计正确且完整。单击 **Close** 关闭对话框, 接下来开始运行仿真计算。

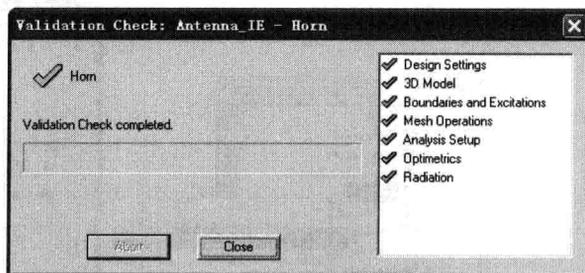


图 9.2.29 设计检查结果对话框

右键单击工程树下的 Analysis 节点, 从弹出菜单中选择【Analyze All】命令, 或者单击工具栏的  按钮, 开始运行仿真计算。

在仿真计算过程中, 工作界面右下方的进度条窗格会显示出求解进度, 信息管理窗格也会有相应的信息说明, 并会在仿真计算完成后给出完成提示信息。

9.2.5 查看分析结果

在仿真计算完成后, 利用 HFSS 的数据后处理功能分别查看喇叭天线的以下分析结果: 在工作频率为 2.4GHz 时 *E* 面和 *H* 面上的增益方向图以及三维增益方向图, 回波损耗 S_{11} 的

扫频分析结果。

9.2.5.1 定义辐射表面

要查看天线的远区场计算结果，首先需要定义辐射表面。当前设计中， E 面位于 xz 平面，即球坐标系下 $\varphi = 0^\circ$ 的平面； H 面位于 yz 平面，即球坐标系下 $\varphi = 90^\circ$ 的平面。

1. 定义 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 的平面为辐射表面

右键单击工程树下的 Radiation 节点，从弹出菜单中选择【Insert Far Field Setup】→【Infinite Sphere】命令，打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框，定义辐射表面，如图 9.2.30 所示。在该对话框中，Name 项输入辐射表面的名称 EH Plane；Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Siz 项分别输入 0deg、90deg 和 90deg；Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Siz 项分别输入 -180deg、180deg 和 1deg；然后单击 **确定** 按钮，完成设置。

此时，定义的辐射表面名称 EH Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下。

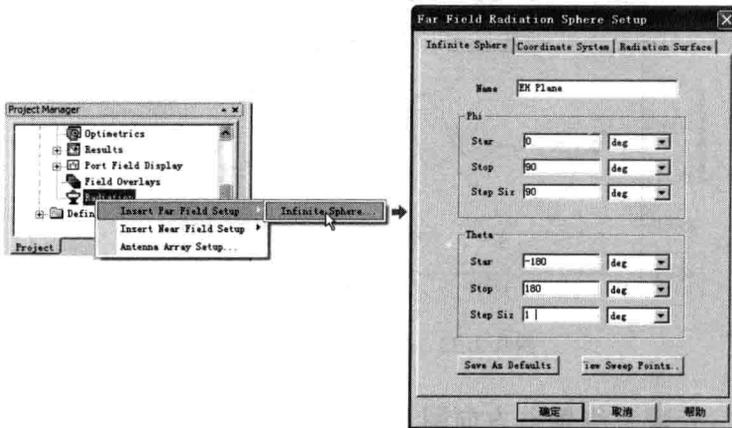


图 9.2.30 定义辐射表面

2. 定义三维立体球面为辐射表面

使用和前面相同的操作，再次打开 Far Field Radiation Sphere Setup 对话框。在该对话框中，Name 项输入辐射表面的名称 3D Sphere；Phi 角度对应的 Start、Stop 和 Step Siz 项分别输入 0deg、360deg 和 2deg；Theta 角度对应的 Start、Stop 和 Step Siz 项分别输入 0deg、180deg 和 2deg；然后单击 **确定** 按钮，完成设置。

此时，定义的辐射表面名称 3D Sphere 同样会添加到工程树的 Radiation 节点下。

9.2.5.2 查看 E 面和 H 面上的增益方向图

右键单击工程树下的 Results 节点，从弹出菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Rectangular Plot】命令，打开报告设置对话框，如图 9.2.31 所示。在该对话框中，Geometry 项选择前面定义的辐射表面 EH Plane，Category 项选择 Gain，Quantity 项选择 Gain Total，Function 项选择 dB，然后单击 **New Report** 按钮，生成如图 9.2.32 所示的笛卡儿坐标系下 E 面和 H 面的增益方向图。从分析结果中可以看出，使用 HFSS IE 仿真器分析出的该天线最大增益约为 21.4dB。

接着，我们来查看在极坐标系表示的 E 面和 H 面的增益方向图分析结果。右键单击工程树下的 Results 节点，从弹出菜单中选择【Create Far Fields Report】→【Radiation Pattern】命令，打开报告设置对话框，采用与图 9.2.31 相同的设置，即可以生成如图 9.2.33 所示的极坐标系下 E 面和 H 面的增益方向图。

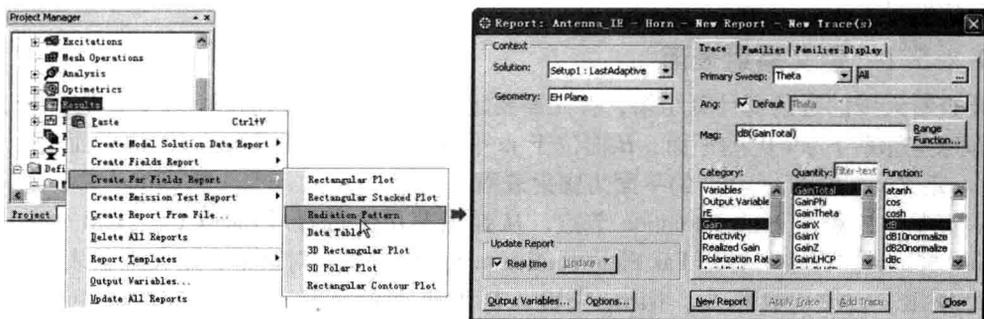


图 9.2.31 结果报告设置操作

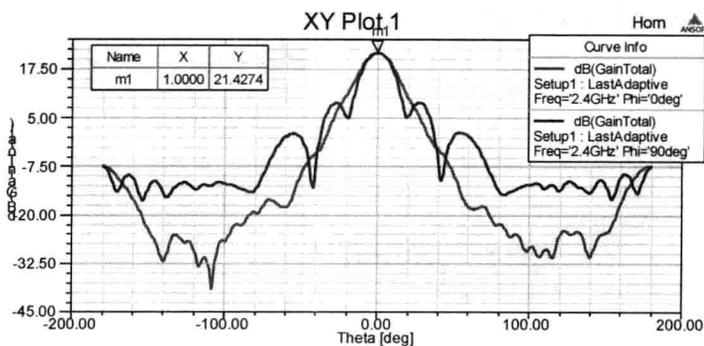


图 9.2.32 E 面和 H 面增益方向图

9.2.5.3 查看三维增益方向图

右键单击工程树下的 Results 节点，从弹出菜单中选择【Create Far Fields Report】→【3D Polar Plot】命令，打开如图 9.2.34 所示的报告设置对话框。在该对话框中，Geometry 项选择前面定义的辐射面 3D Sphere，Category 项选择 Gain，Quantity 项选择 GainTotal，Function 项选择 dB；然后单击 **New Report** 按钮，生成如图 9.2.35 所示的三维增益方向图。

9.2.5.4 查看回波损耗 S_{11} 扫频结果

右键单击工程树下的 Results 节点，从弹出菜单中选择【Create Modal Solution Data Report】→【Rectangular Plot】命令，打开如图 9.2.36 所示的报告设置对话框。在该对话框中，Category 项选中 S Parameter，Quantity 选择 S (Inner_T1, Inner_T1)，在 Function 栏选中 dB。然后单击 **New Report** 按钮，生成结果报告，再单击 **Close** 按钮关闭对话框。

此时，生成的 S_{11} 随频率的变化曲线报告如图 9.2.37 所示。从分析结果可以看出 2.4GHz 时， S_{11} 约为 -21dB。

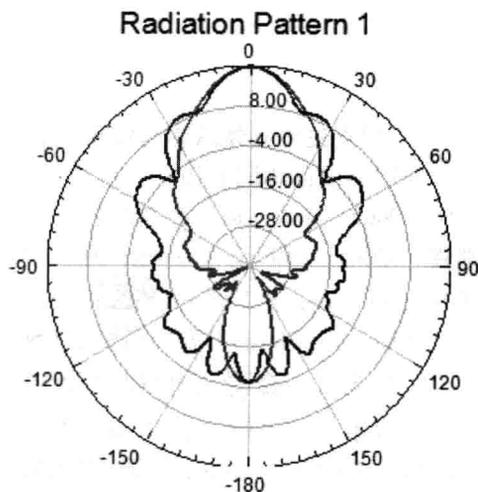


图 9.2.33 极坐标系下 E 面和 H 面增益方向图

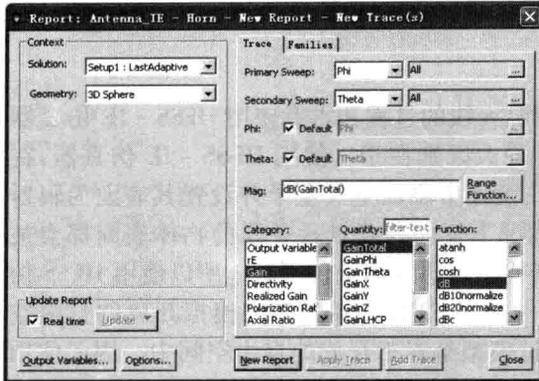


图 9.2.34 三维增益方向图结果报告设置

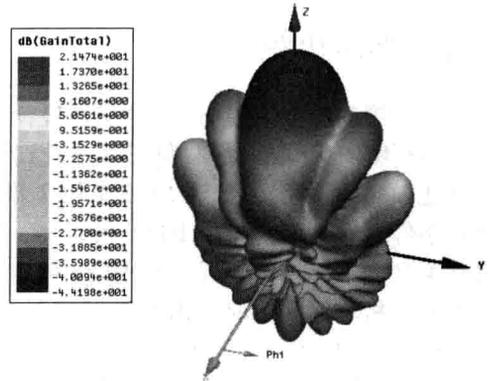


图 9.2.35 三维增益方向图

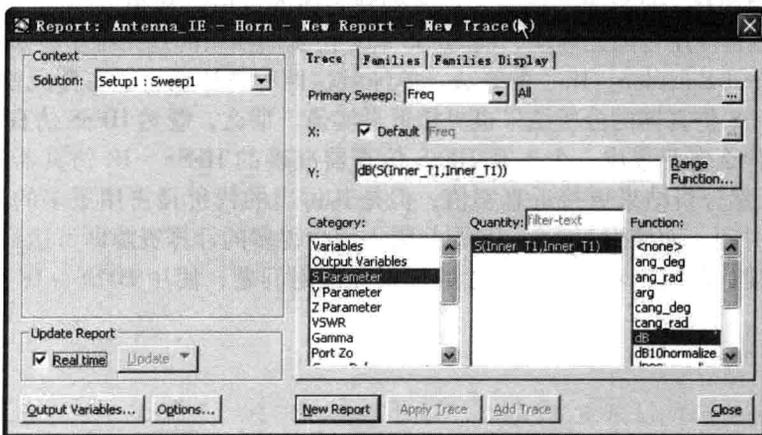


图 9.2.36 结果报告设置对话框

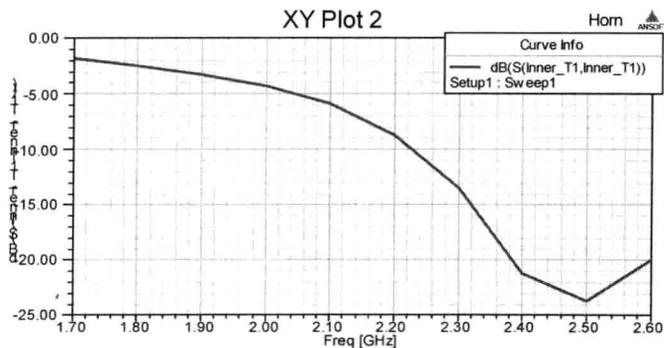


图 9.2.37 S_{11} 扫频结果

9.2.6 保存设计

至此，我们完成了使用 HFSS - IE 仿真器对矩形口径喇叭天线的设计分析。最后，单击工具栏的  按钮保存设计，再单击主菜单栏【File】→【Exit】命令，退出 HFSS。

9.3 本章小结

对比第 7.1 节使用 HFSS 仿真器设计分析喇叭天线的过程和本章使用 HFSS - IE 仿真器设计分析喇叭天线的过程,我们可以看到二者的最大区别在于,使用 HFSS - IE 仿真器,在设计建模时,不需要像 7.1.3.3 节第 7 步那样在设计中添加空气盒子并设置其表面为辐射边界条件。这是因为使用 HFSS 仿真器,默认情况下任何与背景相关联的物体表面都会被自动定义为理想导体边界,即 HFSS 假定整个结构被理想导体壁包围着,所以使用 HFSS 仿真器来分析辐射问题时,需要设置辐射边界条件或者 PML 边界条件来模拟开放的自由空间。而对于 HFSS - IE 仿真器,默认情况下,设计模型是置于开放的自由空间中,因此使用 HFSS - IE 仿真器分析辐射及散射问题时,不需要再像传统的 HFSS 仿真器那样设置辐射边界条件或者 PML 边界条件来模拟开放的自由空间。

对比第 7.1 节使用 HFSS 仿真器的分析结果和本章使用 HFSS - IE 仿真器的分析结果,可以看出二者分析结果曲线基本吻合,但精确到具体的数值时却稍有不同。前面我们介绍了 HFSS 仿真器是使用有限元算法,而 HFSS - IE 仿真器使用的是三维全波矩量法的电磁场积分方程(Integral Equation, IE)的算法。单纯就这两种算法而言,有限元法更加准确些。因此,使用 HFSS 仿真器的分析结果也更接近真实值。那么,既然 HFSS 仿真器的分析结果更加准确,为什么还要集成一个不及 HFSS 仿真器准确的 HFSS - IE 仿真器呢?这是因为 HFSS 仿真器虽然分析结果更接近真实值,但是其付出的代价是占用更多的计算资源和耗费更长的计算时间。而使用 HFSS - IE 则只需占用少得多的计算资源即可达到与 HFSS 仿真器接近的准确度。所以,对于电大尺寸的辐射和散射问题,使用 HFSS - IE 仿真器更具性价比。

第 10 章

HFSS Antenna Design Kit

HFSS Antenna Design Kit (简称 ADK) 是 Ansoft 公司新推出的基于 HFSS 仿真引擎的天线辅助设计工具, 其拥有独立的图形化用户界面, 能够自动实现创建参数化模型、求解设置、生成后处理报告等各项功能, 为复杂天线的设计和建模带来较大的方便。Antenna Design Kit 能够完全集成到 HFSS 工作界面当中, 利用该工具生成的所有天线模型都可以直接在 HFSS 中进行仿真计算, 从而显著地提高了设计人员使用 HFSS 进行天线设计的效率。

2.1 版本的 ADK 定义了 17 类 (50 多种) 常用的天线形式, 用户只需简单地选择天线类型、输入工作频点, 即可得到相应天线的参数化模型和初始结构尺寸, 自动生成 HFSS 工程并完成如边界条件、求解频率等所有 HFSS 天线仿真的设置。而且用户还可以自行修改已生成的参数化模型, 以便进行参数扫描分析和优化设计。

Antenna Design Kit 从根本上解决了天线设计中复杂的建模与前处理的问题, 用户无需再使用其他特定绘图工具进行辅助建模, 同时能够帮助用户快速了解 HFSS 在天线设计中的使用, 从很大程度上简化了设计流程、提高了设计效率、大大缩短天线设计的周期。

接下来, 我们将简要介绍 HFSS Antenna Design Kit 的安装和使用操作。

10.1 安装和启动

Antenna Design Kit 是由 Ansoft 公司向维护期内的 HFSS 用户免费提供的, 对应的 HFSS 版本为 v11.1 或以上的用户可以到 Ansoft 公司的官方网站中免费下载该工具。现在新版本是 ADK2.1。

10.1.1 Antenna Design Kit 的安装

下载了 Antenna Design Kit 安装程序之后, 直接双击该程序, 即可打开安装程序界面, 所有的参数都保留默认设置, 完成安装。

10.1.2 Antenna Design Kit 的启动

Antenna Design Kit 安装完成后, 用户可以从 Windows 开始菜单中选择【程序】→【Ansoft】→【HFSS Antenna Design Kit】→【HFSS_Antenna_DesignKit】命令, 启动 Antenna Design Kit 工具。

10.1.3 在 HFSS 中集成 Antenna Design Kit

Antenna Design Kit 可以作为一个外部工具添加到 HFSS 工作界面的 Tools 子菜单栏中,

这样我们可以很方便地从 HFSS 用户界面中直接打开 Antenna Design Kit 工具。将 Antenna Design Kit 命令添加到 HFSS 工作界面的 Tools 子菜单栏中的具体操作如下。

① 从 HFSS 主菜单栏中选择【Tools】→【External Tools】命令，打开 Customize User Tools Menu 对话框。

② 单击该对话框中的 **Add** 按钮，然后在该对话框中的 Menu Text 文本框中输入命令名称 Antenna Design Kit。再单击该对话框中 Command 选项右侧对应的 **...** 按钮，打开 Select Program 对话框。在该对话框中选中 Antenna Design Kit 安装目录下的 HFSS_ADK 可执行文件。

③ 返回到 Customize User Tools Menu 对话框，单击该对话框中的 **OK** 按钮，完成设置操作。

整个操作设置过程如图 10.1.1 所示。设置完成后，在 HFSS 主菜单栏中的 Tools 子菜单栏的最下方会增加一个新的 Antenna Design Kit 命令。通过该命令用户可以在 HFSS 中很方便地打开 Antenna Design Kit 工具。

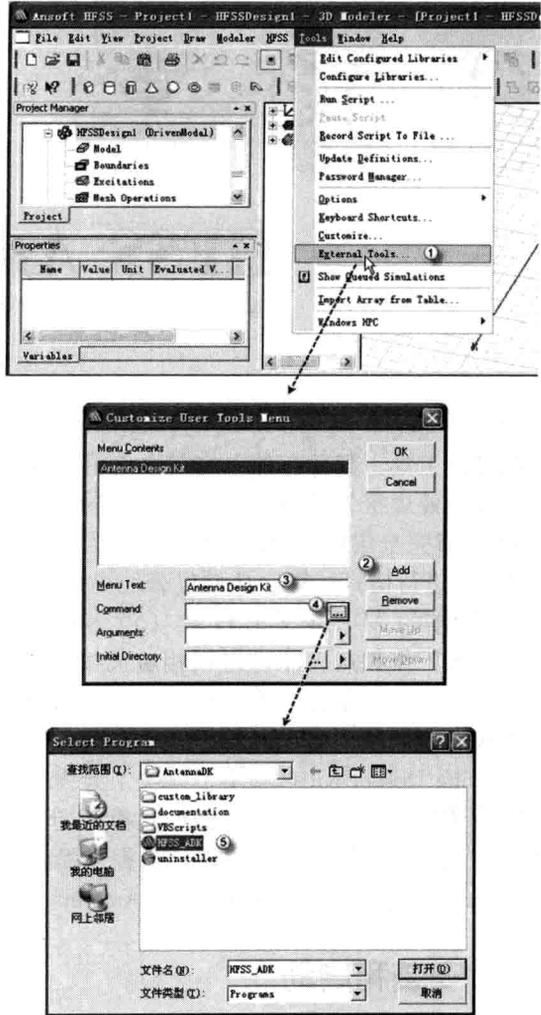


图 10.1.1 添加 Antenna Design Kit 到 Tools 菜单栏

10.2 Antenna Design Kit 用户界面

HFSS Antenna Design Kit 的工作界面采用标准 Windows 的菜单与风格。打开 Antenna Design Kit 后，用户可以看到其典型的工作界面，如图 10.2.1 所示。整个工作界面由菜单栏、天线类型列表和天线模型显示与参数设置区域三部分组成。

10.2.1 菜单栏

菜单栏位于工作界面的最上方，包含 File、Materials 和 Help 三个菜单项。其中，File 菜单中包含 Import Custom Antenna 和 Exit 两个命令，分别用于导入用户自定义的天线模型和退出程序，如图 10.2.2 所示。Materials 菜单中只有 Substrate 一个命令。选择该命令，可以打开如图 10.2.3 所示的设置天线模型介质基板材料的属性对话框，在该对话框中可以设置介质材料的名称、厚度、相对介电常数和损耗正切。Help 菜单中主要包含显示版权信息和打开帮助文档的命令。

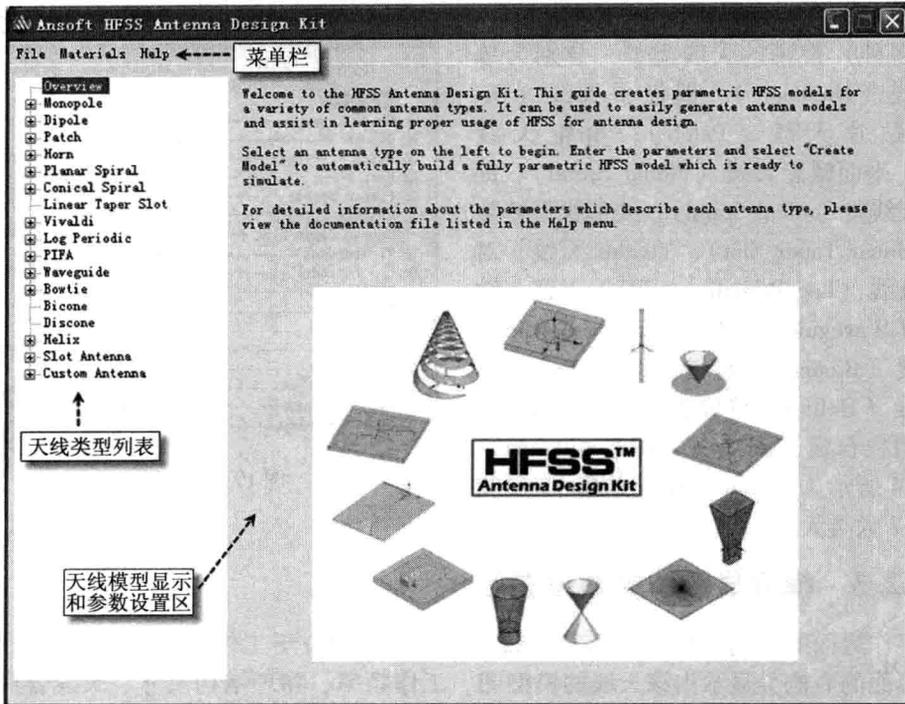


图 10.2.1 HFSS Antenna Design Kit 的工作界面

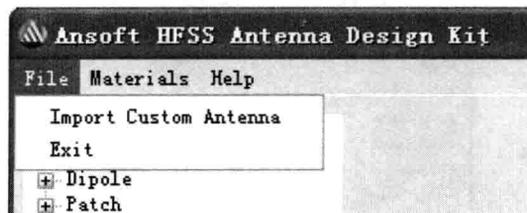


图 10.2.2 File 菜单

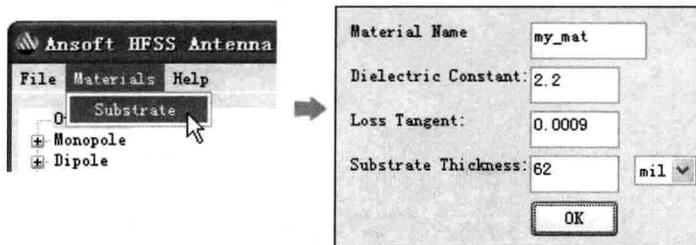


图 10.2.3 Materials 菜单的基本属性设置对话框

10.2.2 天线类型

在工作界面的左侧是 Antenna Design Kit 所支持的所有天线类型列表。选择列表中的天线名称，即可在工作界面的右侧显示出该天线的模型图、天线的物理尺寸、合成按钮和创建天线模型按钮。

2.1 版本的 Antenna Design Kit 支持 17 类 (50 多种) 常用的天线类型, 分别为单极子天线 (Monopole)、偶极子天线 (Dipole)、贴片天线 (Patch)、角锥天线 (Horn)、平面螺旋天线 (Planar Spiral)、锥形螺旋天线 (Conical Spiral)、线形锥形缝隙天线 (Linear Taper Slot)、Vivaldi 天线、对数周期天线 (Log Periodic)、PIFA 天线、波导天线 (Waveguide)、蝶形天线 (Bowtie)、双锥天线 (Bicone)、盘锥天线 (Discone)、螺旋天线 (Helix)、缝隙天线 (Slot Antenna) 和用户自定义天线 (Custom Antenna)。图 10.2.4 所示为 Antenna Design Kit 中所支持的 17 大类天线。

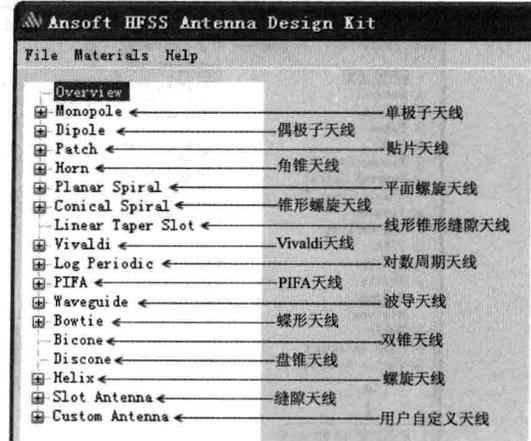


图 10.2.4 天线类型

10.2.3 模型显示和参数设置区

在工作界面的右侧是模型显示和参数设置区。选中位于工作界面左侧的天线类型后, 在工作界面的右侧会显示出该天线的模型图、工作频率、物理结构尺寸、天线合成按钮和创建天线模型按钮, 如图 10.2.5 所示。

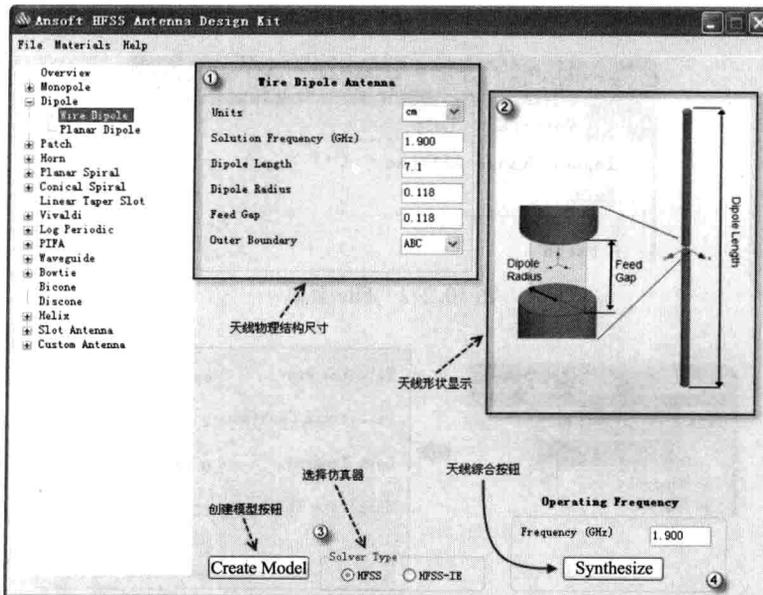


图 10.2.5 模型显示和参数设置区

图示中区域②显示的是与选中的左侧天线类型相对应的天线形状。图示中区域④是天线综合按钮, 在此输入天线的工作频率后, 单击 **Synthesize** 按钮, 该工具就能够快速地综合出天线相应的物理尺寸参数, 这些参数显示在图示中区域①的位置。综合给出的天线物理尺寸参数可以作为天线设计的初始值, 用于 HFSS 的仿真优化设计。图示中区域③是选择仿真器类型和创建天线模型按钮。对于仿真器, 有两种类型可供选择, 分别是 HFSS 和

HFSS-IE, 其中 HFSS 就是常用的使用有限元法的电磁仿真器, HFSS-IE 是在 HFSS 13.0 版本上新增的使用矩量法的电磁仿真器。最后单击 **Create Model** 按钮, 即可自动启动 HFSS 软件, 并在 HFSS 中生成相应的天线模型。

10.3 Antenna Design Kit 应用实例

在前面已经介绍了 Antenna Design Kit 的用户界面和基本功能, 本节将通过使用 Antenna Design Kit 设计一个工作频率为 2.45GHz 的 IFA 天线实例来介绍 Antenna Design Kit 的具体设计流程和操作步骤。这里, 假设 IFA 天线的印制电路板 (PCB) 板材使用玻璃纤维环氧树脂 (FR4), 电路板的厚度为 1mm。对于 FR4 板材, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 4.4$, 损耗正切 $\tan\delta = 0.02$ 。下面就介绍 Antenna Design Kit 的完整设计过程。

10.3.1 启动 Antenna Design Kit

从 Windows 的【开始】菜单中选择【程序】→【Ansoft】→【HFSS Antenna Design Kit】→【HFSS_Antenna_DesignKit】命令, 启动 Antenna Design Kit 工具。

10.3.2 设置介质基板

从主菜单栏中选择【Materials】→【Substrate】命令, 打开基板属性设置对话框。在 Material Name 文本框中输入使用的介质材料名称 my_FR4, 在 Dielectric Constant 文本框中输入介质的相对介电常数 4.4, 在 Loss Tangent 文本框中输入介质的损耗正切值 0.02, 在 Substrate Thickness 文本框中输入电路板的厚度 1mm, 如图 10.3.1 所示。最后单击 **OK** 按钮, 完成设置。

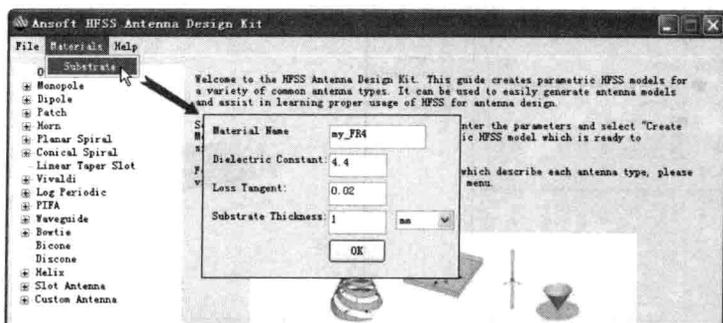


图 10.3.1 设置基板属性

10.3.3 选择天线类型并自动创建设计模型

在 Antenna Design Kit 中, IFA 天线归于 PIFA 大类中。在 Antenna Design Kit 工作界面左侧的天线类型列表中展开 PIFA, 然后选择 PIFA 子类下的 Planar 选项, 此时选中的选项即为 IFA 天线类型。再单击用户界面中的 Units 下拉列表框, 在其下拉列表中选择 mm, 设置天线模型的长度单位为毫米。在 Operating Frequency 选项组的文本框中输入天线的工作频率 2.45GHz, 并单击 **Synthesize** 按钮, 此时即可快速地给出天线相应的物理尺寸参数, 如图 10.3.2 所示。在工作界面右侧的模型显示区域中会标注出每个物理尺寸参数代表的实际意义。

这里 Outer Boundary 就使用默认的 ABC, 即辐射边界条件 (注: 辐射边界条件又称吸

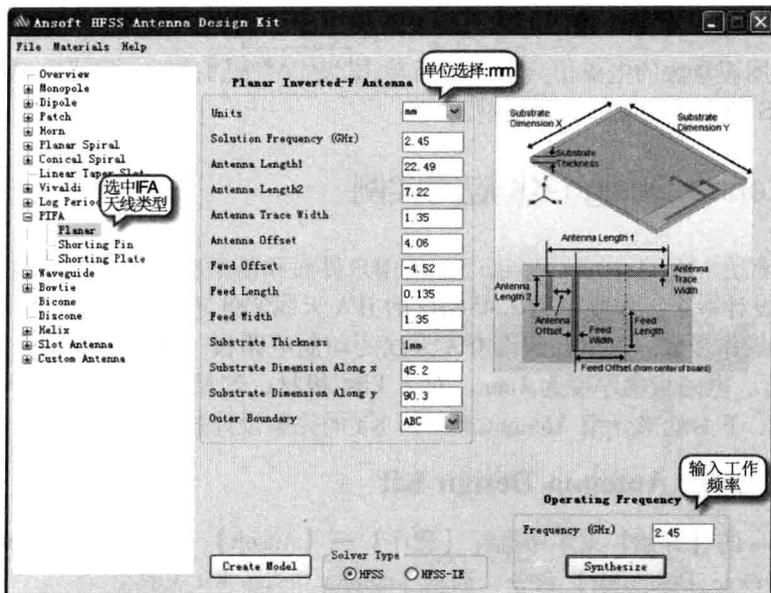


图 10.3.2 设计 2.45GHz IFA 天线

收边界条件，即 Absorbing Boundary Condition，简称 ABC)。仿真器类型 (Solver Type) 选择 HFSS，最后单击 **Create Model** 按钮，即可打开 HFSS 软件，并在 HFSS 中自动生成 IFA 天线的设计工程，如图 10.3.3 所示。

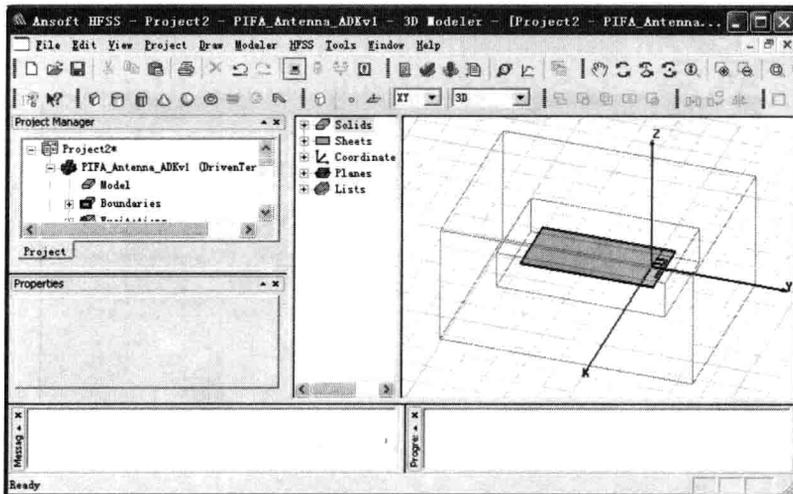


图 10.3.3 自动创建的 IFA 天线 HFSS 设计工程

检查生成的 IFA 天线设计工程，我们可以发现工程中设计模型、边界条件、端口激励、求解和扫频设置、生成数据后处理报告等每一个设计步骤都已经自动设置完成，用户只需要单击运行仿真分析按钮，就可以运行仿真计算，并给出分析结果报告。Antenna Design Kit 工具所创建的是参数化设计模型，使用一系列的变量来表示天线模型的物理尺寸。例如，对于当前的设计，从主菜单栏中选择【HFSS】→【Design Properties】命令，打开设计属性对话框，可以看到设计中所定义和使用的全部设计变量，如图 10.3.4 所示。图

10.3.5 所示为每个变量所表示的 IFA 天线的实际物理参数。

Properties: Project1 - PIFA Antenna_ADKv1

Local Variables

Value Optimization Tuning Sensitivity Statistics

Name	Value	Unit	Evaluated V...	Type	Description	Read-only	Hidden
---Antenna Dimensions							
Length1	22.49	mm	22.49mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Length2	7.22	mm	7.22mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Antenna_Trace_Width	1.35	mm	1.35mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Antenna_Offset	4.06	mm	4.06mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
---Feed							
Feed_Offset	-4.52	mm	-4.52mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Feed_Length	0.135	mm	0.135mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Feed_Width	1.35	mm	1.35mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
---Substrate Dimensions							
subX	1	mm	1mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
subY	45.2	mm	45.2mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
subZ	90.3	mm	90.3mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
---Air Box							
Airbox_dist	40.7881	mm	40.7881mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
---Virtual Object Radiation Surface							
VirtualObject_dist	12.2364	mm	12.2364mm	Design		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Add... Add Array... Edit... Run... Show Hidden

确定 取消

图 10.3.4 定义的设计变量

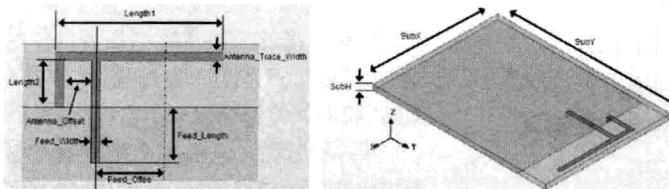


图 10.3.5 变量对应实际物理参数

这样，如果设计结果不满足要求，利用设计中定义的变量，用户就可以方便地改变天线的物理尺寸，使用 HFSS 的参数扫描分析或者优化设计功能找出满足设计要求的天线尺寸。

10.4 本章小结

HFSS Antenna Design Kit 可以帮助天线设计工程师从烦琐的建模和参数设置工作中解脱出来，它简化了设计流程、提高了设计效率、缩短了天线设计的周期。本章简要介绍了 Antenna Design Kit 的安装、启动以及其工作界面的组成。同时，通过一个 2.45GHz IFA 设计实例讲述了 Antenna Design Kit 的操作步骤。