

# hfss\_半波偶极子 天线设计

王康 10231063@zju.edu.cn 行政楼224

2024-09-24



# Ansys Electronics Desktop Student Version2024R2

官方下载链接 <https://www.ansys.com/zh-cn/academic/students/ansys-student>

(Built-in license valid until 07/31/2025)

DOWNLOAD ANSYS ELECTRONICS DESKTOP STUDENT 2024 R2 ▶

HFSS天线设计参考书籍：

[1]李明洋, 刘敏. HFSS天线设计.第2版[M]. 电子工业出版社, 2014.

[2]李明洋. HFSS电磁仿真设计应用详解[M]. 人民邮电出版社, 2010.

- 引言
- 天线理论基础
- hfss软件介绍与操作指南
- 半波偶极子天线设计与仿真
- 性能评估与优化策略
- 实验验证与测试结果分析



PART  
01

引言

# 背景与目的



## 背景

半波偶极子天线作为一种经典的对称阵子天线，广泛应用于通信、雷达、导航等领域。随着无线通信技术的快速发展，对天线性能的要求也日益提高，因此，通过HFSS（High Frequency Structure Simulator）等仿真工具对天线进行精确设计和优化显得尤为重要。



## 目的

本设计旨在利用HFSS仿真软件，对半波偶极子天线进行详细的建模、仿真和分析，以了解其辐射特性、阻抗匹配、驻波比等关键参数，为实际工程应用提供理论依据和技术支持。同时，通过本设计实践，加深对HFSS软件使用方法的理解，掌握天线设计与仿真的基本流程和方法。

# 设计任务与要求

## 设计任务

设计一个中心频率为3GHz的半波偶极子天线，包括天线模型的建立、边界条件的设置、激励方式的选择、求解参数的设置等。

---

## 设计要求

天线应具有良好的辐射特性，如较宽的辐射带宽、稳定的辐射方向图等；同时，天线的阻抗匹配应良好，以确保信号的有效传输。此外，设计过程中需充分考虑天线的实际应用场景，如安装环境、馈电方式等因素对天线性能的影响。

---

# 设计流程与工具

## 设计流程

首先明确设计目标和要求，然后利用 HFSS 软件进行天线模型的建立；接着设置求解类型、边界条件、激励方式等仿真参数；最后运行仿真分析，查看求解结果并进行优化调整。

VS

## 设计工具

主要采用 HFSS 仿真软件进行天线的设计与仿真。HFSS 是一款强大的高频电磁仿真软件，可用于各种天线、微波电路、光学器件等的设计和仿真。在设计过程中，还需利用截图软件等辅助工具对仿真结果进行记录和分析。

PART  
02

# 天线理论基础



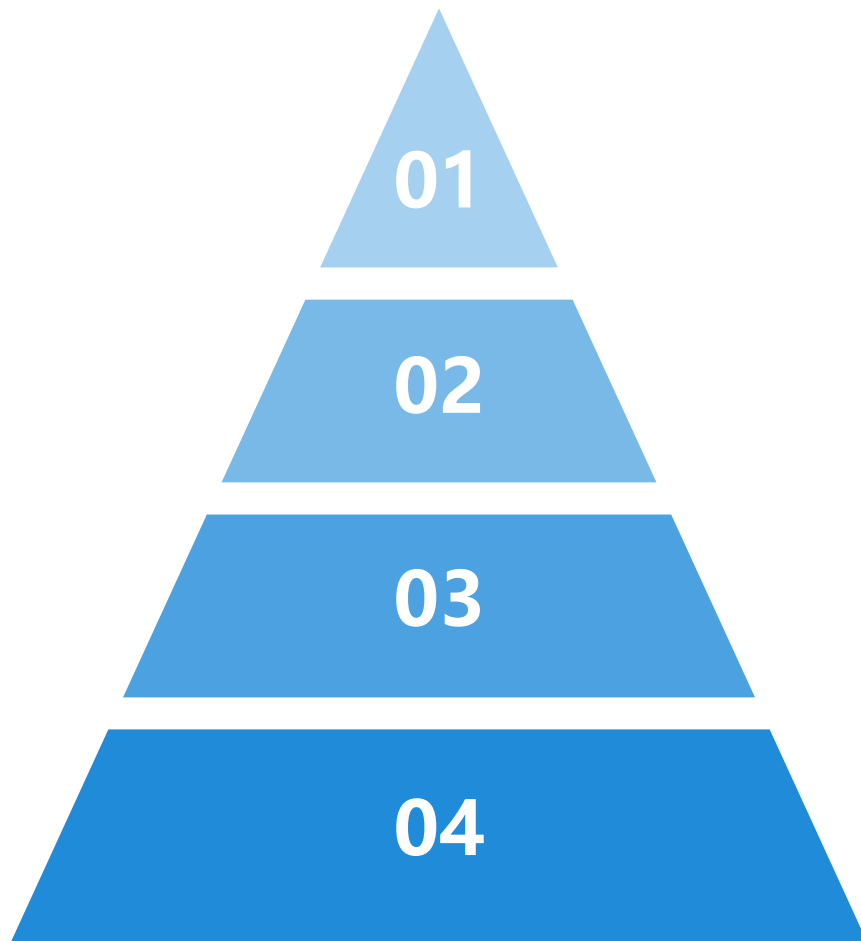
# 电磁波传播原理

## 电磁波定义

电磁波是由电场和磁场相互作用产生的一种波动现象，能够在真空中或介质中传播，传播速度为光速。

## 电磁波传播方式

电磁波可以通过自由空间传播、介质传播、谐振腔传播、波导传播和辐射传播等多种方式进行传播。



## 电磁波分类

电磁波根据频率的不同，可以分为无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X射线和伽马射线等多种类型。

## 电磁波特性

电磁波具有波粒二象性，即既表现出波动性质（如干涉、衍射），又表现出粒子性质（如光电效应）。

# 偶极子天线原理

## 偶极子天线定义

偶极子天线是一种基本的线性天线，由两个长度相等、直径很小的导体棒组成，中间馈电，两臂与馈电点等距，振子轴线与波的传播方向垂直。

## 偶极子天线类型

常见的偶极天线类型包括半波偶极天线、全波偶极天线、折叠偶极天线等。它们的结构可以在空间中产生振荡电流，并通过辐射场将电磁波发送或接收到外部。

## 偶极子天线工作原理

偶极子天线的工作原理基于偶极子理论，当偶极子天线受到变化的电场激励时，会辐射出电磁波。同时，偶极子天线也能够接收到入射的电磁波并将其转换为电流。

## 偶极子天线应用

偶极子天线广泛应用于通信、雷达、导航等领域，是无线传输系统中不可或缺的关键部件。

# 半波偶极子天线

## 1. 电流分布

- 对于从中心馈电的偶极子，其两端开路，故电流为零。工程上通常将其电流分布近似为正弦分布。
- 假设天线沿 $z$ 轴放置，其中心坐标位于坐标原点，如图所示，则长度为 $l$ 的偶极子天线的电流分布为：

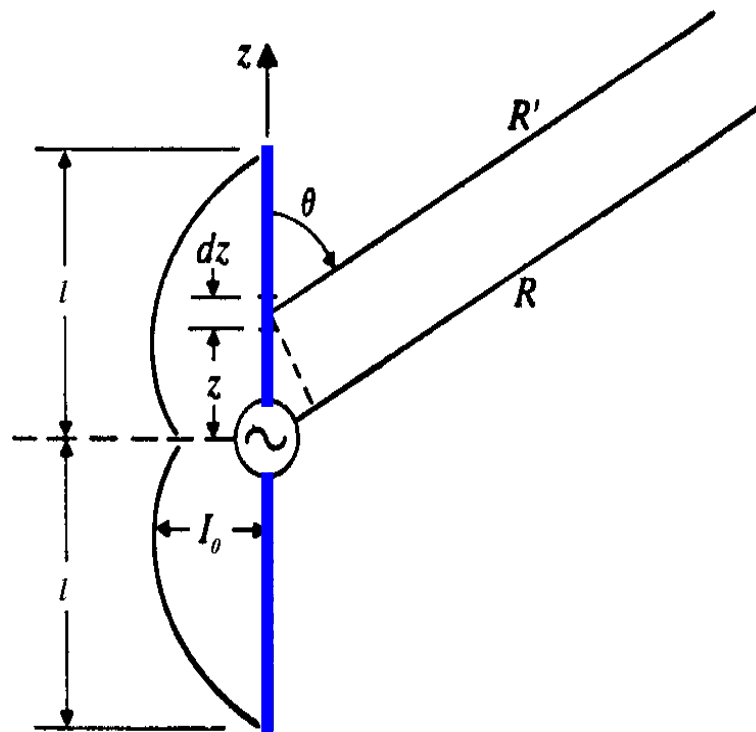
$$I(z) = I_m \sin k(l - |z|)$$

$I_m$ 是波腹电流， $k$ 波数。

对半波偶极子而言 $l = \lambda/4$ 。

则半波偶极子的电流分布可以写成：

$$I(z) = I_m \sin(\pi/2 - kz) = I_m \cos(kz)$$



## 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。上次课已经求解得：

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

加上方向特性，半波偶极子天线的远区辐射电场为：

$$E = j \frac{60I_m}{r} e^{-jkr} f(\theta, \varphi) \hat{e}_{\theta}$$

式中，

$$f(\theta, \varphi) = f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta}$$

称为半波偶极子天线的方向性函数。

### 3.方向性系数

- 根据公式可计算出半波偶极子天线的方向性系数为:

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

- 若以分贝表示为:

$$D_{\text{dB}} = 10 \lg(1.64) = 2.15 \text{ dB}$$

## 4.辐射电阻

- 天线的评价功率密度可以用平均坡印亭矢量来表示:

$$P_{av} = \frac{1}{2} (E \times H^*) = \frac{15I_m^2}{\pi r^2} \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin^2 \theta}$$

半波偶极子天线的辐射功率为:

$$P_r = \int P_{av} dS = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{15I_m^2}{\pi r^2} \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin^2 \theta} r^2 \sin \theta d\theta d\varphi = 36.6 I_m^2$$

这里使用 $R_r$ 来表示辐射电阻, 有:

$$P_r = 36.6 I_m^2 = \frac{1}{2} I_m^2 R_r$$

所以:  $R_r = 73.2\Omega$

## 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：

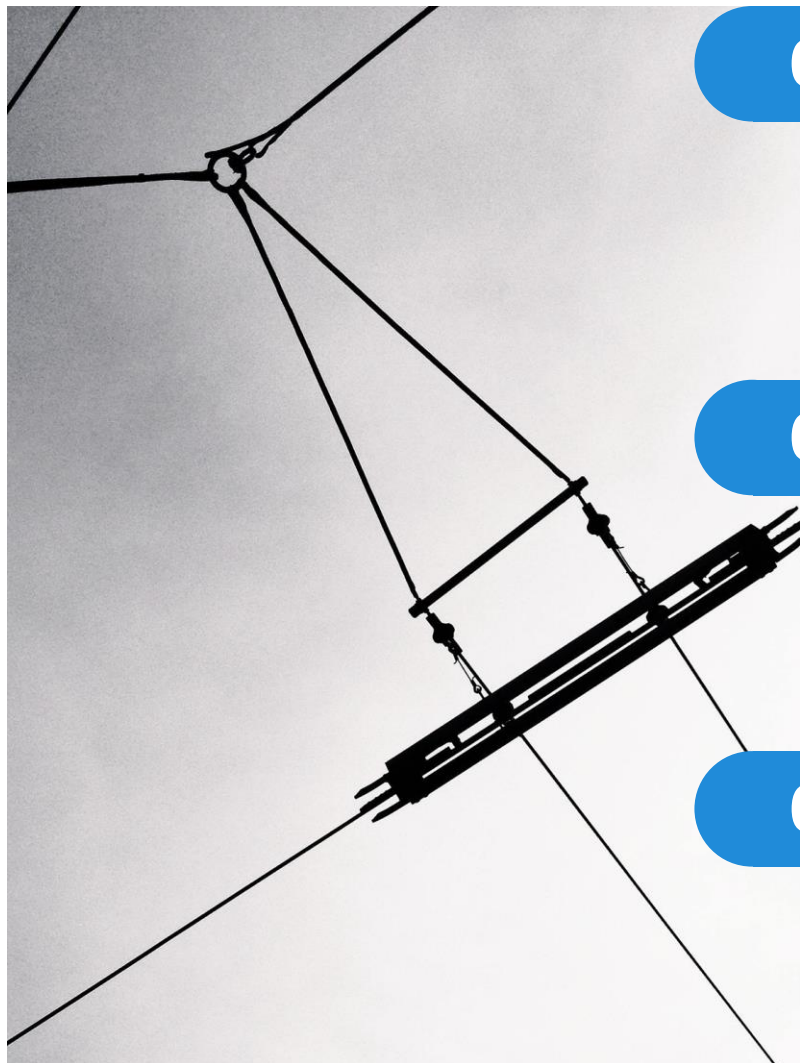
$$Z_{in}=R_{in}+jX_{in}$$

实部电阻包含辐射电阻和导体损耗所产生的导体电阻，对于良导体而言，导体电阻可以忽略，此时实部仅包含辐射电阻 $R_{in}=R_r$ 。

虚部电抗为零。

- 对于半波偶极子天线而言，输入阻抗近似看为辐射电阻73.2欧姆。
- 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。

# 半波偶极子天线特点



01

## 结构简单

半波偶极子天线由一个导体构成，其中中央的直线部分称为驻波馈电处，两端有一个弯曲部分形成互补的驻波端，这种简单的结构使得制造和安装相对容易。

02

## 宽频带特性

半波偶极子天线具有较宽的频带特性，在设定频段范围内能够提供较好的性能，适用于不同频率的无线通信系统。

03

## 高辐射效率

半波偶极子天线的辐射效率较高，能够将传输的能量有效地转化为电磁波，使得信号传播距离更远。



# 半波偶极子天线特点



## 01 方向性辐射特性

半波偶极子天线的辐射特性呈现出较为明显的方向性，其主矢量辐射方向与驻波馈电处的延伸线相一致，有利于在特定方向上实现更好的接收和发送性能。

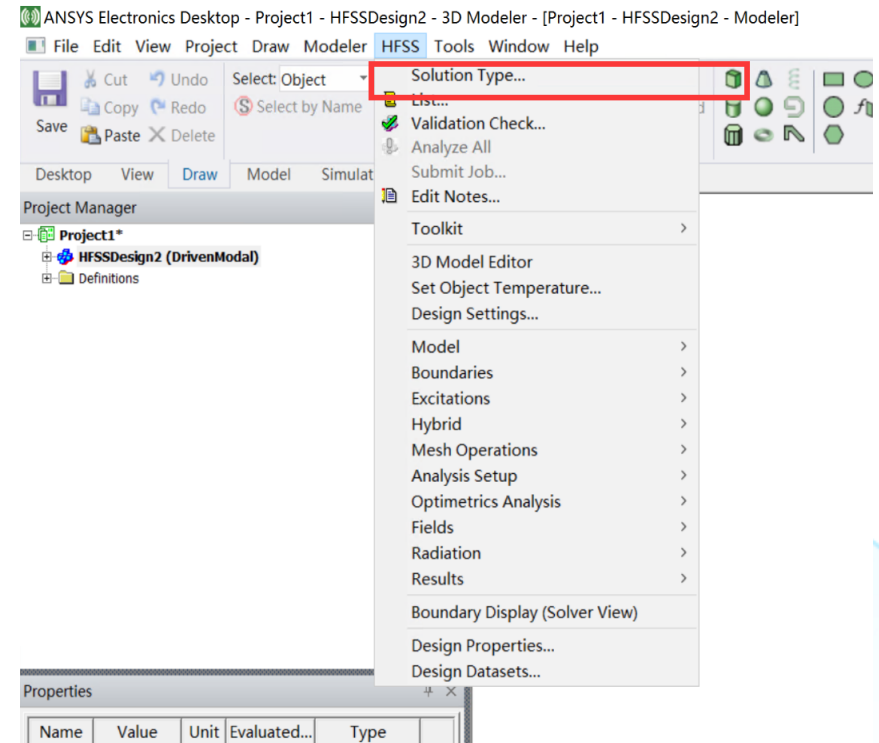
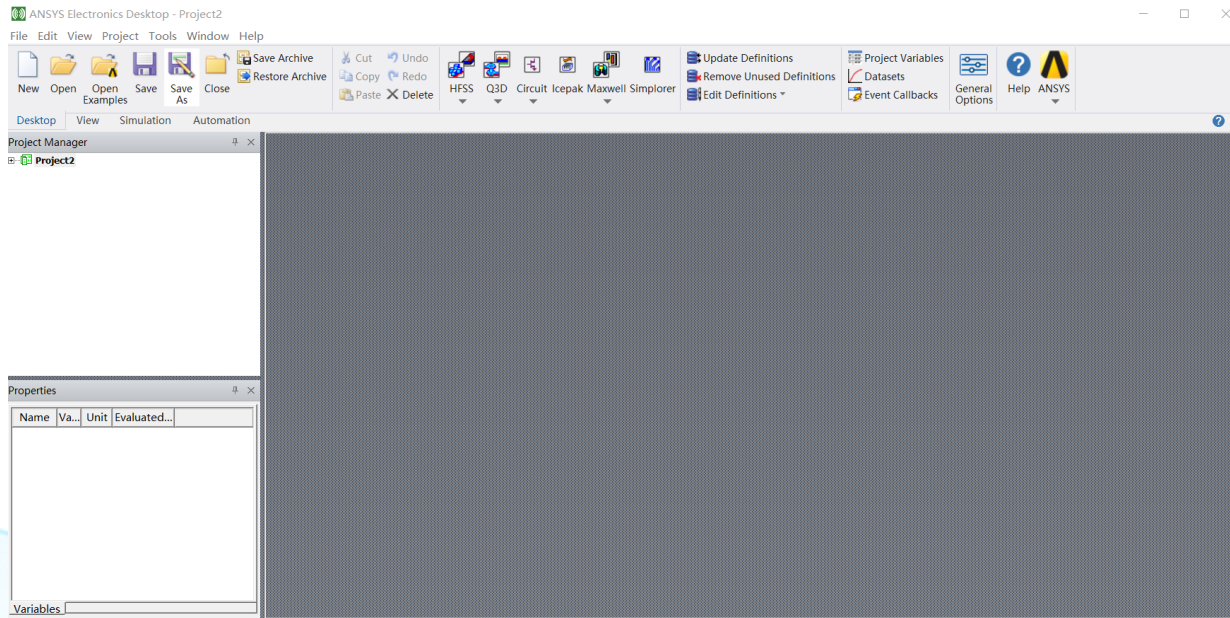


## 02 优良的阻抗匹配

半波偶极子天线通常与50欧姆的传输线匹配，这可以有效地减少反射和驻波现象，提高信号传输的质量。

# hfss软件介绍与 操作指南

## PART 03



# hfss软件简介

## 高频结构仿真器

HFSS (High Frequency Structure Simulator) 是由Ansoft公司开发后被ANSYS收购的三维电磁仿真软件，是业界公认的三维电磁场设计和分析的工业标准。

## 应用领域

HFSS广泛应用于无线和有线通信、雷达、卫星、航空航天、电子、半导体、计算机、网络等领域，帮助工程师们高效地设计各种高频结构和程序。

## 核心功能

HFSS提供精确的电磁场仿真能力，包括S参数计算、天线增益、方向性、远场方向图等性能分析，支持从系统到部件级的设计。

# hfss操作界面及功能

01

主菜单与工具栏：  
HFSS采用标准的Windows系统菜单栏，包含所有操作命令，工具栏列出常用操作命令，方便用户快速访问。

02

项目管理窗口：显示所有打开的HFSS工程设计文件名称，便于管理和切换项目。

03

属性窗口与信息管理窗口：属性窗口显示选中设计或物体的属性信息，信息管理窗口则显示设计过程中的详细信息及错误警告。

04

三维模型窗口：用于编辑和显示模型，支持直观的视窗操作和高级的分析控制。

05

进程窗口：显示当前设计的仿真运算过程，包括仿真进度和状态。

# 天线建模与仿真流程

01

创建几何模型：在HFSS中新建模型，根据设计要求创建天线的几何结构，包括形状、大小、材料等参数。

02

设置边界条件和激励源：根据天线的实际工作环境设置合适的边界条件，如完美电导体（PEC）、完美磁导体（PMC）等，并定义天线的输入端口和激励信号的频率、功率等参数。

03

网格剖分与求解设置：利用HFSS的自适应网格剖分技术，对模型进行网格剖分，并设置求解类型、频率范围、收敛标准等求解参数。

04

仿真计算与结果分析：运行仿真计算，得到天线的S参数、阻抗匹配、辐射特性等结果，并通过后处理器生成详细的报告和图表进行分析。

05

优化设计：根据仿真结果，对天线的结构和参数进行优化设计，以提高性能并满足设计要求。

PART  
04

# 半波偶极子天线设计与仿真

### 3.2 半波偶极子天线设计

- 这里要求设计一个中心频率为3GHz的半波偶极子天线，天线沿Z轴放置，中心位于坐标原点，天线材质使用理想导体，总长度为 $0.48\lambda$ ，半径为 $\lambda/200$ 。天线的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 $\lambda/4$ 。

变量定义	变量名	变量单位 (mm)
工作波长	lambda	100
天线总长度	length	$0.48*\lambda$
端口距离	gap	0.24
单个极子长度	dip_length	$Length/2-gap/2$
天线半径	dip_radius	$\lambda/200$
辐射边界圆柱体半径	rad_radius	$Dip\_radius+\lambda/4$
辐射边界圆柱体高度	rad_height	$Dip\_length+gap/2+\lambda/10$

## 3.3 HFSS 天线设计流程

- **设置求解类型**：模式驱动 (driven model)、  
终端驱动 (driven Terminal)
- **创建天线的结构模型**：根据天线的初始尺寸和结构，  
在HFSS窗口中创建出天线的HFSS参数化设计模型。
- **设置边界条件**：在HFSS中，与背景接触的表面都被  
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，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)，这样  
才能计算出远区辐射场。



- **设置激励方式**。天线必须通过传输线或波导传输信号，天线与传输线或者波导连接处即为馈电面或激励端口。有两种激励方式：**波端口激励** (*wave port*) 和 **集总端口激励** (*Lumped port*)。通常在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。
- **设置参数求解**，包括设定求解频率和扫频次数，求解频率通常设定为天线的工作频率。
- 运行求解分析。
- 查看求解结果。
- *Optimetrics* 优化设计。

# 3.4天线的HFSS仿真设计

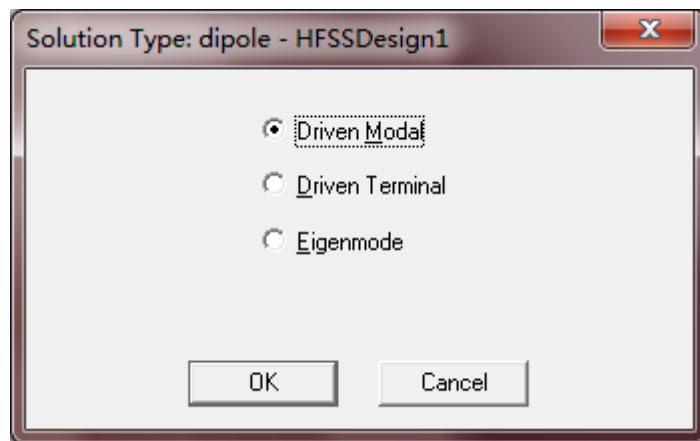
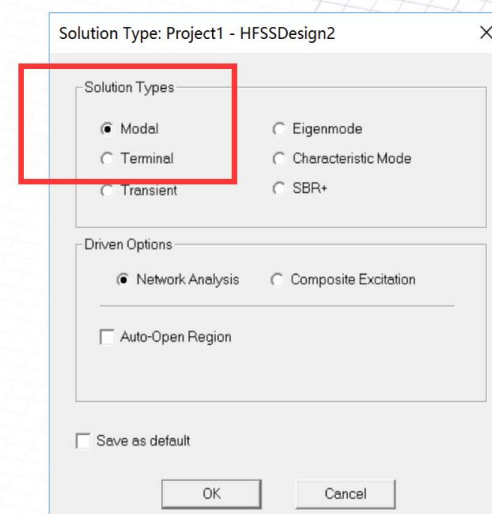
## 1.新建设计工程

### (1) 运行HFSS并新建工程

启动HFSS软件，新建一个工程文件，把工程文件另存为dipole.hfss。

### (2) 设置求解类型

在主菜单栏中选择HFSS----Solution Type，选中Driven Mode单选按钮，然后单击ok按钮，完成设置。



### (3) 设置模型长度单位

在主菜单栏中选择**Modeler----units**，选择**mm**。

### 2.添加和定义设计变量

在**HFSS**中定义和添加如图1所示的变量。

在**HFSS**主菜单栏中选择**HFSS----Design Properties**命令，打开设计属性对话框，单击**ADD**按钮，打开**add property**对话框，在**add property**对话框中的**name**输入**lambda**，初始值**100mm**，然后单击**ok**。

依次定义变量**length**，初始值 $0.48 \cdot \text{lambda}$ ；定义变量**gap**，初始值**0.24mm**；定义变量**dip\_length**，初始值 $\text{length}/2 - \text{gap}/2$ ；定义变量**dip\_radius**，初始值 $\text{lambda}/200$ ；定义变量**rad\_radius**，初始值 $\text{dip\_radius} + \text{lambda}/4$ ；定义变量**rad\_height**，初始值 $\text{dip\_length} + \text{gap}/2 + \text{lambda}/10$ 。

最后点确定按钮。

## 2.添加和定义设计变量

在HFSS中定义和添加如图1所示的变量。

在HFSS主菜单栏中选择HFSS----Design Properties命令，打开设计属性对话框，单击ADD按钮，打开add property对话框，在add property对话框中的name输入lambda，初始值100mm，然后单击ok。

依次定义变量length，初始值 $0.48 * \lambda$ ；定义变量gap，初始值0.24mm；定义变量dip\_length，初始值 $\text{length}/2 - \text{gap}/2$ ；定义变量dip\_radius，初始值 $\lambda/200$ ；定义变量rad\_radius，初始值 $\text{dip\_radius} + \lambda/4$ ；定义变量rad\_height，初始值 $\text{dip\_length} + \text{gap}/2 + \lambda/10$ 。

最后点确定按钮。

Properties: dipole - HFSSDesign1



Local Variables

☒ Value☐ Optimization☐ Tuning☐ Sensitivity☐ Statistics

	Name	Value	Unit	Evaluated Value	Type	Descr
	lambda	100	mm	100mm	Design	
	length	0.48*lambda		48mm	Design	
	gap	0.24	mm	0.24mm	Design	
	dip_length	length/2-gap/2		23.88mm	Design	
	dip_radius	lambda/200		0.5mm	Design	
	rad_radius	dip_radius+...		25.5mm	Design	
	rad_height	dip_length+...		34mm	Design	

Add...

Add Array...

Edit...

Remove

☒ Show Hidden

确定

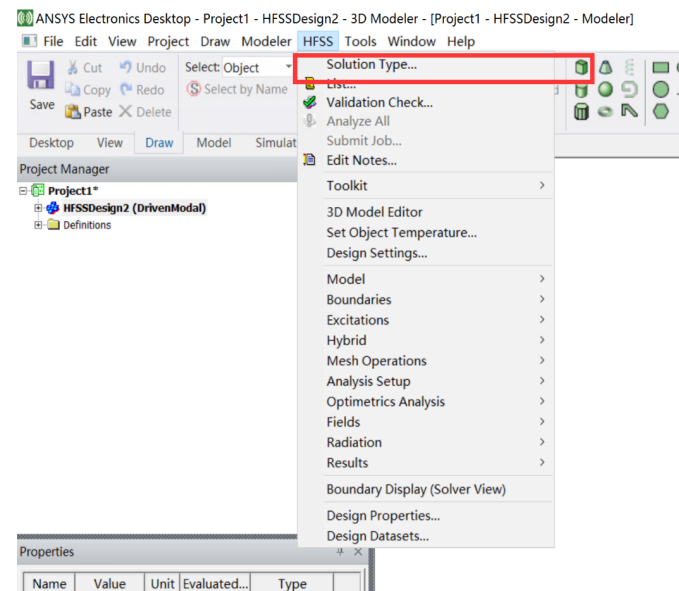
取消

# 3.设计建模

## (1) 创建偶极子天线模型

在主菜单栏中选择**draw----cylinder**或单击工具栏上的圆柱体按钮，进入创建圆柱体的状态。新建的圆柱体会添加到操作历史树的**solids**节点下，默认名**cylinder**。

双击操作历史树中的**solids**下的**cylinder**节点，打开如下对话框。把圆柱体名称设置为**Dipole**，其材质为**pec**。如图所示。



Properties: dipole - HFSSDesign1 - Modeler



Attribute

	Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description	Read-only	
	Name	Dipole				<input type="checkbox"/>	
	Material	"pec"		"pec"		<input type="checkbox"/>	
	Solve Inside	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	
	Orientation	Global				<input type="checkbox"/>	
	Model	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	
	Display Wi...	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	
	Color	Edit				<input type="checkbox"/>	
	Transparent	0				<input type="checkbox"/>	

☐ Show Hidden

确定

取消

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**center Position**文本框中输入底面圆心坐标（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**，如下图所示。然后单击确定按钮，完成圆柱体**Dipole**的创建。

到此为止创建好了名称为**Dipole**的理想导体细圆柱体模型，按快捷键**ctrl+D**全屏显示。



Properties: dipole - HFSSDesign1 - Modeler



Command

	Name	Value	Unit	Evaluated Value
	Command	CreateCylinder		
	Coordinate System	Global		
	Center Position	0mm , 0mm , gap/2		0mm , 0mm , 0.12mm
	Axis	Z		
	Radius	dip_radius		0.5mm
	Height	dip_length		23.88mm
	Number of Segments	0		0

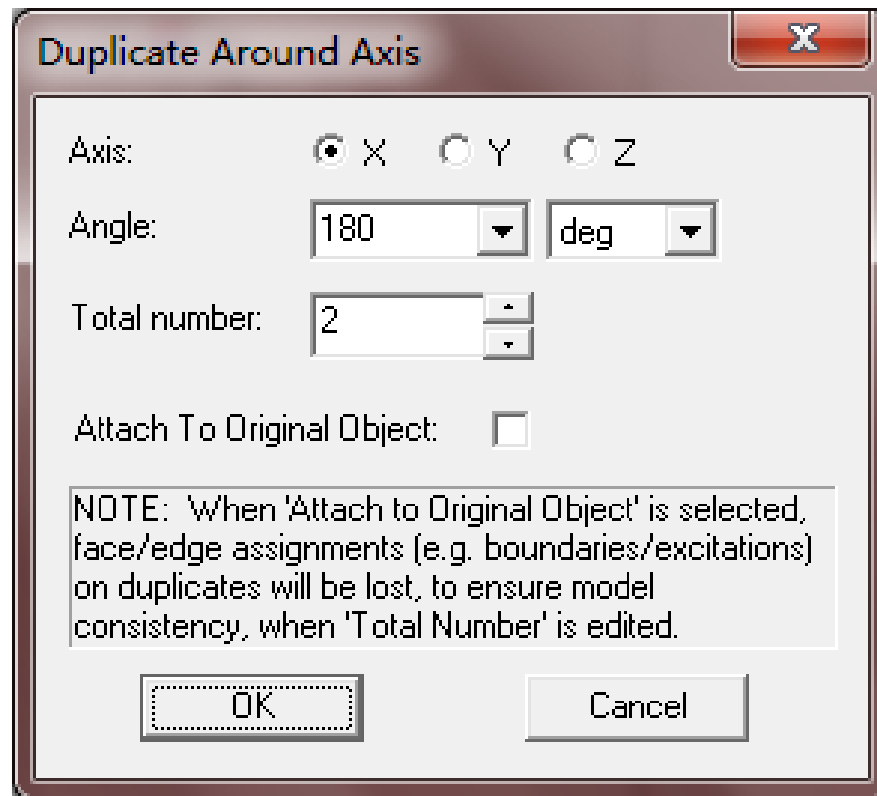
☐ Show Hidden

确定

取消

## 接下来生成偶极子天线的另一个臂。

- 选中创建的圆柱体模型**Dipole**，然后从主菜单栏中选择**edit----duplicate----around axis**，执行沿坐标轴的复制。会打开一个对话框。
- 在所打开的对话框中
- 将**Axis**设置为**x轴**，
- 将**Angle**选项设置为**180deg**，
- 并在**total number**数值框中输入**2**，
- 单击**ok**按钮。



## (2) 设置端口激励

半波偶极子天线由中心位置馈电。在偶极子中心位置创建一个平行于yz面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\*dip\_radius和gap。

- 单击工具栏上的xy下拉菜单列表框，选择yz选项，把当前工作面设置为yz平面；然后从主菜单栏中选择draw---rectangle。新建的矩形面会添加到操作历史树的sheets节点下，其默认的名称是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，把矩形面的名称设置为Port。

Properties: dipole - HFSSDesign1 - Modeler



Attribute

	Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description	Read-only	
	Name	Port				<input type="checkbox"/>	
	Orientation	Global				<input type="checkbox"/>	
	Model	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	
	Display Wi...	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	
	Color	Edit				<input type="checkbox"/>	
	Transparent	0				<input type="checkbox"/>	

☐ Show Hidden

确定

取消

- 双击操作历史树中port下的creatrectangle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（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\*dip\_radius和gap，如下图所示。
- 最后按ok按钮。
- 接下来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：

Properties: dipole - HFSSDesign1 - Modeler

Command

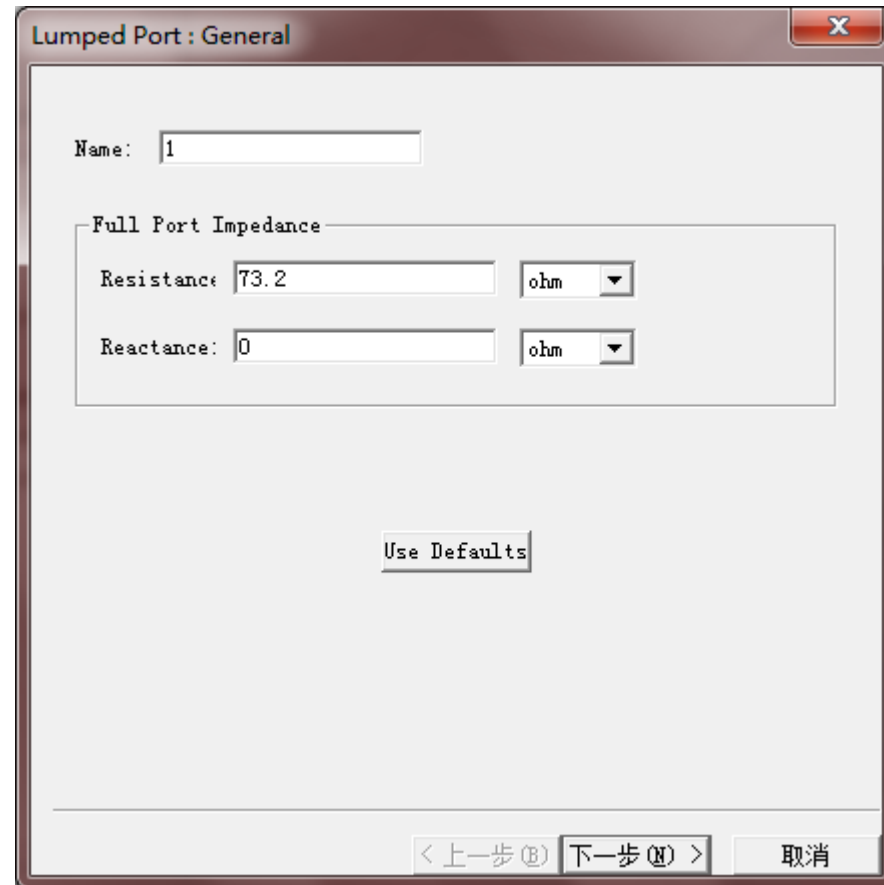
	Name	Value	Unit	Evaluated Value
	Command	CreateRectangle		
	Coordinate System	Global		
	Position	0mm , -dip_radius , -gap/2		0mm , -0.5mm , -0.12mm
	Axis	X		
	YSize	2*dip_radius		1mm
	ZSize	gap		0.24mm

☐ Show Hidden

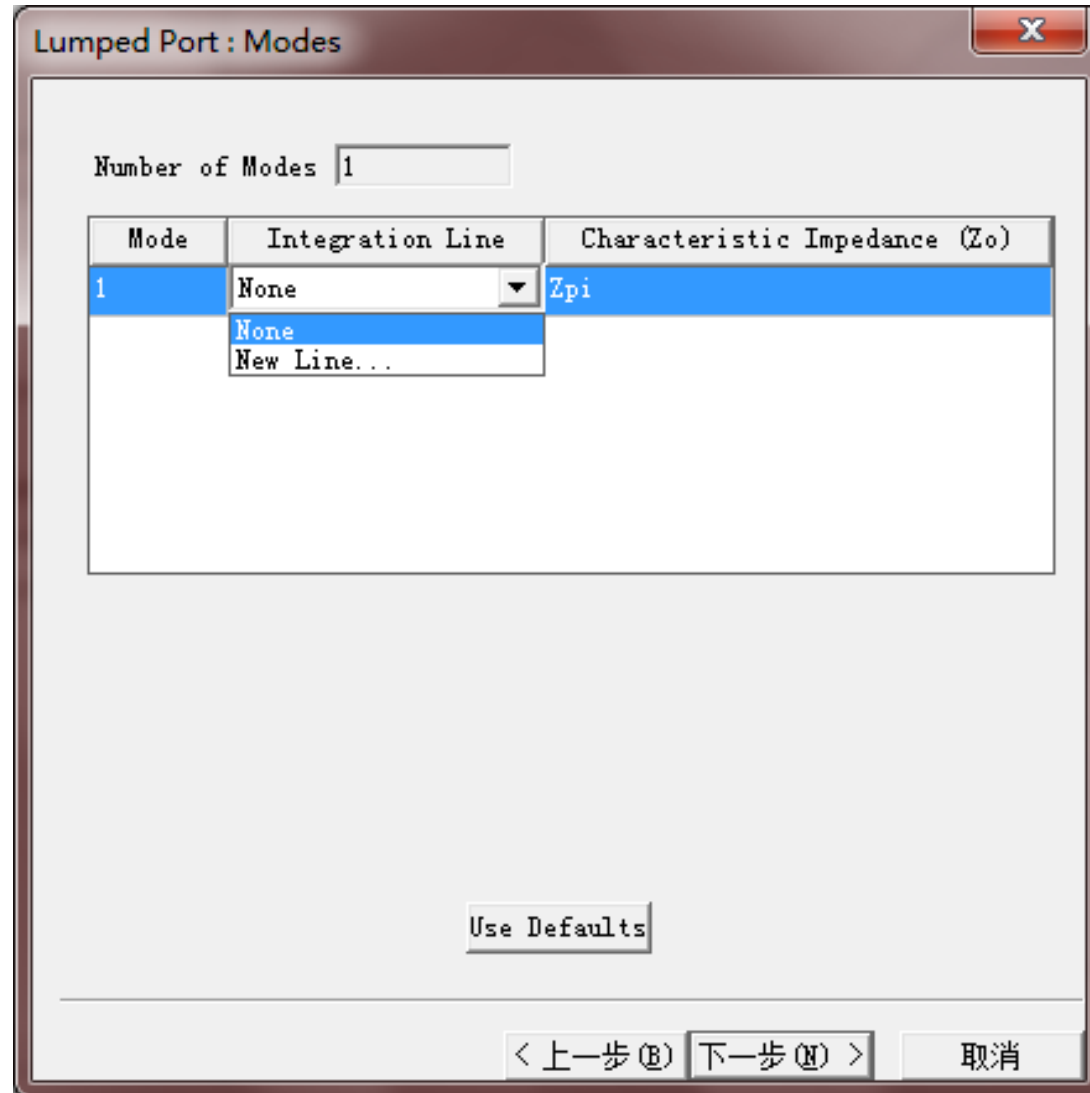
确定

取消

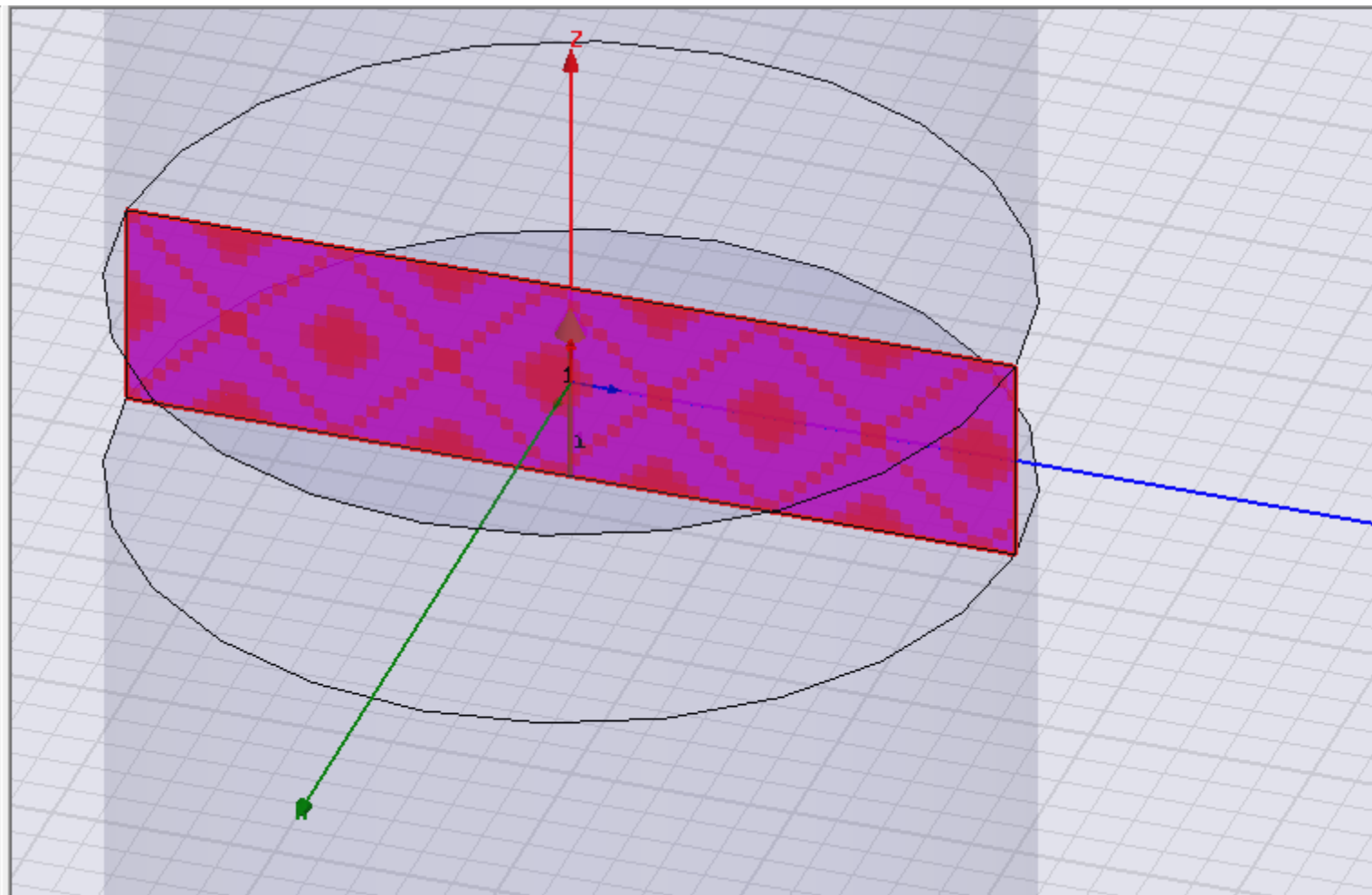
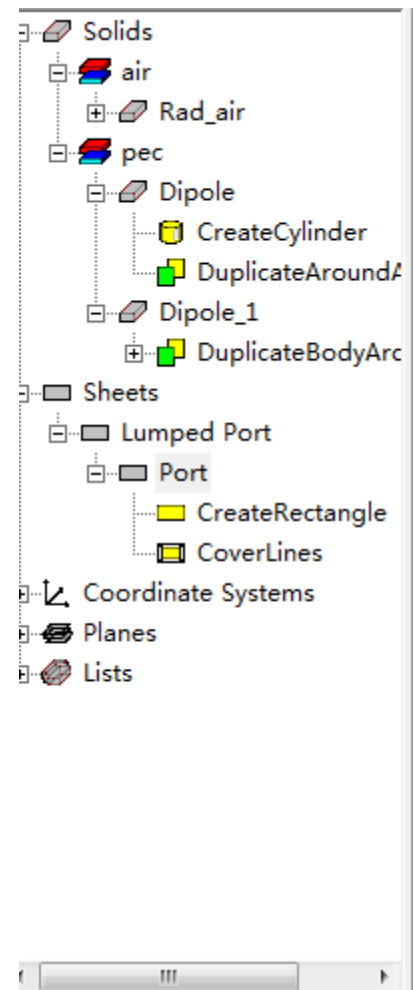
- 在操作历史树中的sheets节点下选中该矩形面。然后在其上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择assign excitation---lumped port，在打开的集总参数设置对话框中，将resistance设为73.2欧姆，将reactance设为0ohm，然后单击下一步；



- 打开**modes**对话框，在对话框中单击**Integration Line**列下的**none**，从下拉菜单中选择**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。







### (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**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，我们要先创建一个沿着**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\*rad\_height**，然后把该圆柱体的表面设置为辐射边界条件。

## A。创建辐射边界的圆柱体

- 单击工具栏上的**YZ**下拉列表框，从其下拉列表中选择**XY**项，把当前工作平面设置为**xy**平面；
- **Draw----cylinder**创建圆柱体，新建的圆柱体添加在操作历史树的**solids**节点下，默认为**cylinder1**；
- 双击操作历史树下**cylinder1**，打开属性对话框，把圆柱体名称改为**Rad\_air**，设置材质为**air**，其透明度为**0.8**。如下图所示。
- 最后单击确定按钮。

Properties: dipole - HFSSDesign1 - Modeler



Attribute

	Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description	Read-only	
	Name	Rad_air				<input type="checkbox"/>	
	Material	"air"		"air"		<input type="checkbox"/>	
	Solve Inside	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	
	Orientation	Global				<input type="checkbox"/>	
	Model	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	
	Display Wi...	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	
	Color	<input type="text" value="Edit"/>				<input type="checkbox"/>	
	Transparent	<input type="text" value="0.8"/>				<input type="checkbox"/>	

☐ Show Hidden

确定

取消

- 双击操作历史树中的**rad\_air**下的**createcylinder**节点，打开属性对话框，在该选项卡中设置圆柱体的底面圆心坐标、半径和长度。
- **Center position**设为  $(0, 0, -\text{rad\_height})$
- **Radius**输入半径值**rad\_radius**;
- **Height**文本框中输入长度值 **$2 * \text{rad\_height}$** 。
- 最后单击确定按钮。
- 完成圆柱体**rad\_air**的创建。如下如所示。

Properties: dipole - HFSSDesign1 - Modeler



Command

	Name	Value	Unit	Evaluated Value
	Command	CreateCylinder		
	Coordinate System	Global		
	Center Position	0mm , 0mm , -rad_height		0mm , 0mm , -34mm
	Axis	Z		
	Radius	rad_radius		25.5mm
	Height	2*rad_height		68mm
	Number of Segments	0		0

☐ Show Hidden

确定

取消

## B。设置辐射边界条件

- 在操作历史树下单击rad\_air节点，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**，打开辐射边界条件设置对话框，如下图所示。
- 在改对话框中保留默认设置，直接单击**ok**按钮，把圆柱体模型rad\_air的表面设置为辐射边界条件。

## Radiation Boundary



Name: Rad1

☒ Radiating Only

☐ Incident Field

☐ Enforced Field

☐ Reference for FSS

☒ Include for near/far field calculation

(Not appropriate when source is on an internal surface)

OK

Cancel



## 4.求解设置

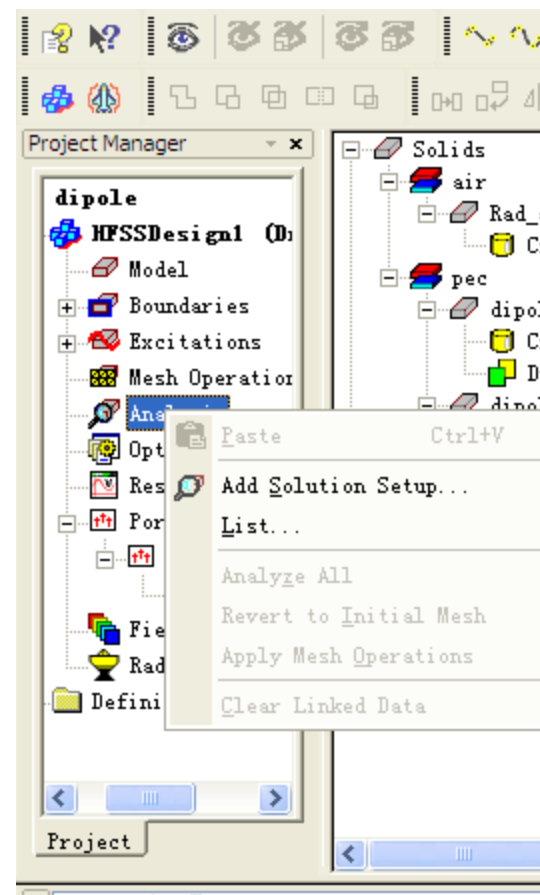
分析的半波偶极子天线的中心频率在**3GHz**附近，因此求解频率设置为**3GHz**。同时添加**2.5GHz~3.5GHz**的扫频设置，扫频类型选择快速扫频（**Fast**），分析天线在**2.5~3.5GHz**频段内的回波损耗和电压驻波比。

### （1）求解频率和网格剖分设置

设置求解频率**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**，在弹出的对话框中选中**add solution Setup**，完成设置。



## Solution Setup



General Options Advanced Expression Cache Derivatives Defaults

Setup Name:

Setup1

☒ Enabled

☐ Solve Ports Onl

Solution Frequency

3

GHz



Adaptive Solutions

Maximum Number of

20

☒ Maximum Delta S

0.02

☐ Use Matrix Convergence

Set Magnitude and Phase...

Use Defaults

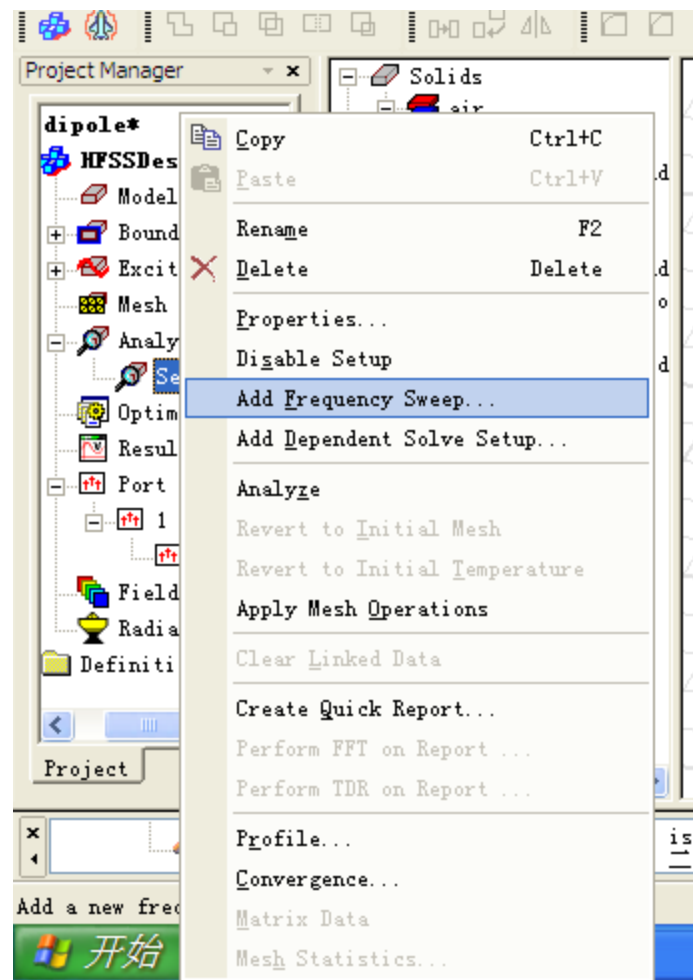
确定

取消

## (2) 扫频设置

扫频类型选择快速扫频，扫频范围为  
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；
- 在弹出的对话框中选择  
**Add frequency sweep**；
- 打开edit sweep对话框
- 完成设置。



Edit Sweep



Sweep Name: Sweep1

☒ Enabled

Sweep Type: Fast

## Frequency Setup

Type: LinearStep

Start 2.5 GHz

Stop 3.5 GHz

Step Size 0.001 GHz

☒ Save Fields☐ Generate Fields (All Frequencies)

Display &gt;&gt;

Count	Frequency

Time Domain Calculation...

## Interpolating Sweep Options

Max Solutions: 250

Error Tolerance: 0.1 %

Advanced Options...

## DC Extrapolation Options

☐ Extrapolate to DC

Minimum Solved Frequency 0.1 GHz

OK

Cancel

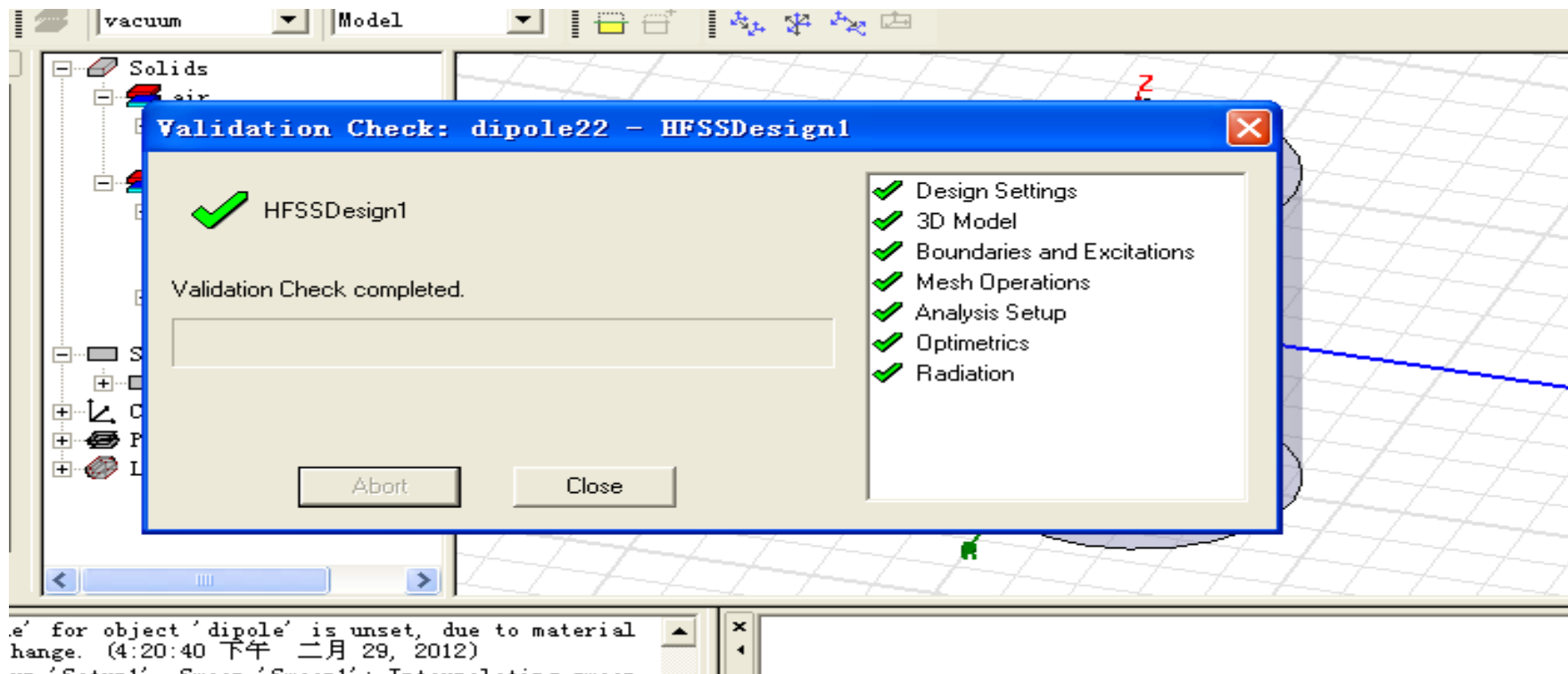
Set Defaults

Use Defaults

## 5.设计检查和运行仿真运算

前面已经完成了偶极子天线模型的创建和求解设置；接下来就运行仿真计算并查看分析结果。但在计算前要进行设计检查。

从主菜单HFSS---Validation check，得到如下对话框。



## 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。

### (1) 回波损耗

- 右键单击工程树下的**results**节点，在弹出的菜单中选择**create model solution data report---rectangle plot**命令，打开报告设置对话框，如下图所示。
- 然后单击**new report**按钮，再单击**close**按钮关闭对话框，此时可以生成在**2.5~3.5GHz**频段内的回波损耗**S<sub>11</sub>**分析结果。

Report: dipole - HFSSDesign1 - New Report - New Trace(s)

Context

Solution: Setup1 : Sweep1

Domain: Sweep

TDR Options ...

☒ Real time
Update

Output Variables...
Options...

Trace
Families
Families Display

Primary Sweep: Freq All

X: ☒ Default Freq

Y: dB(S(1,1))

Range
Function...

Category:

Variables
Output Variables
S Parameter
Y Parameter
Z Parameter
VSWR
Gamma
Port Zo
Lambda
Epsilon
Group Delay
Active S Parameter
Active Y Parameter
Active Z Parameter
Active VSWR
Passivity
Design

Quantity: filter-text

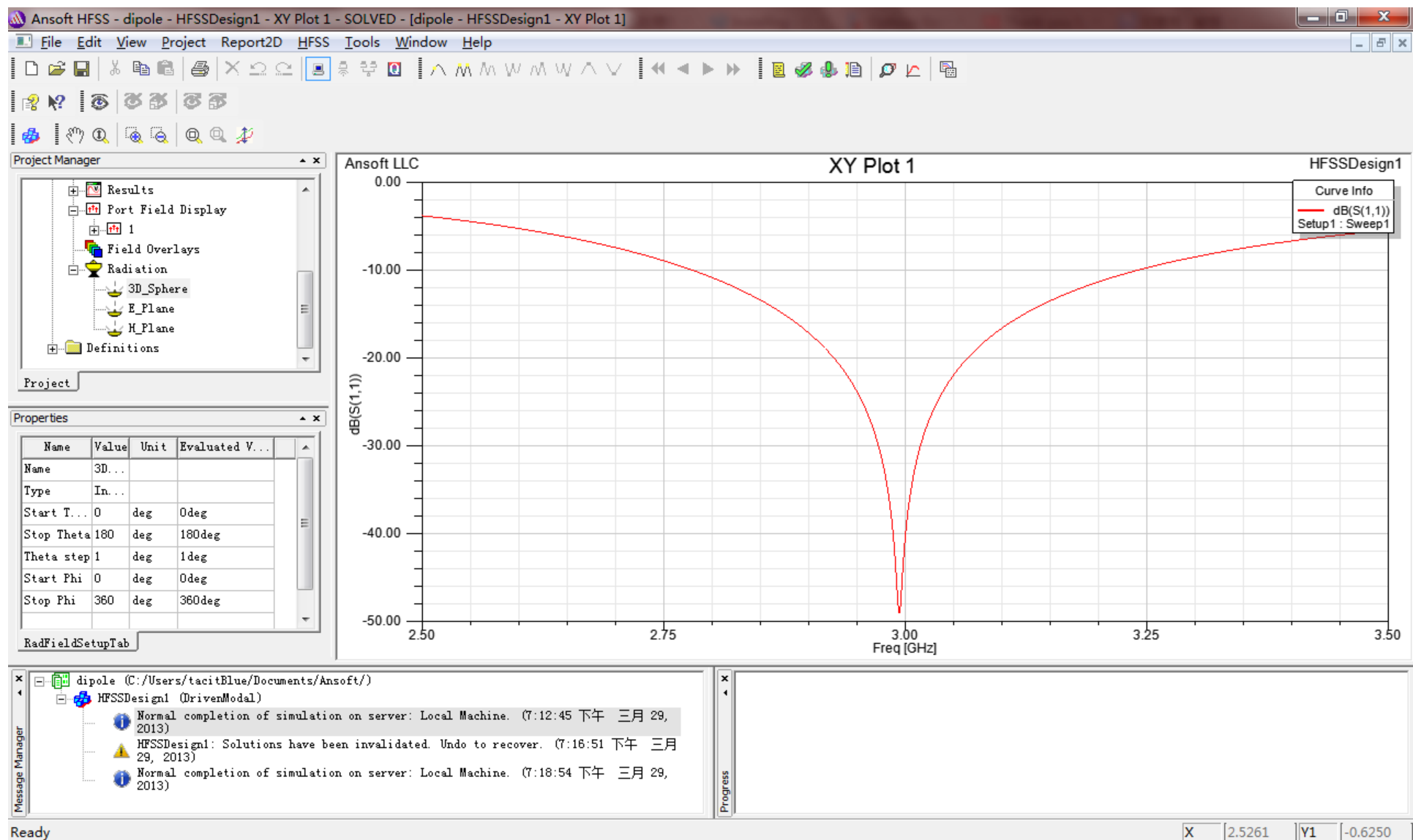
S(1,1)

Function:

<none>
ang\_deg
ang\_rad
arg
cang\_deg
cang\_rad
dB
dB10normalize
dB20normalize
dBc
im
mag
normalize
re

New Report
Apply Trace
Add Trace

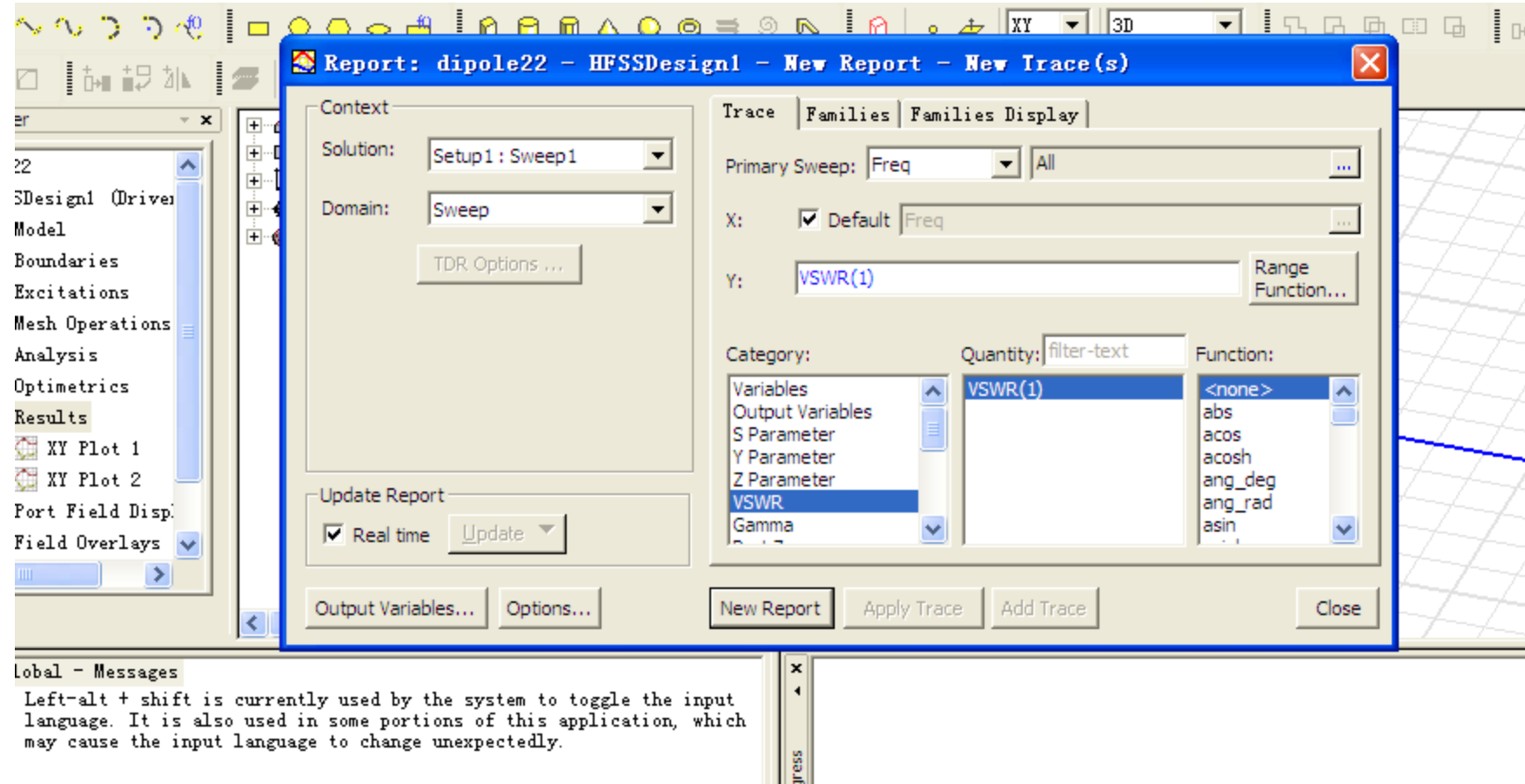
Close

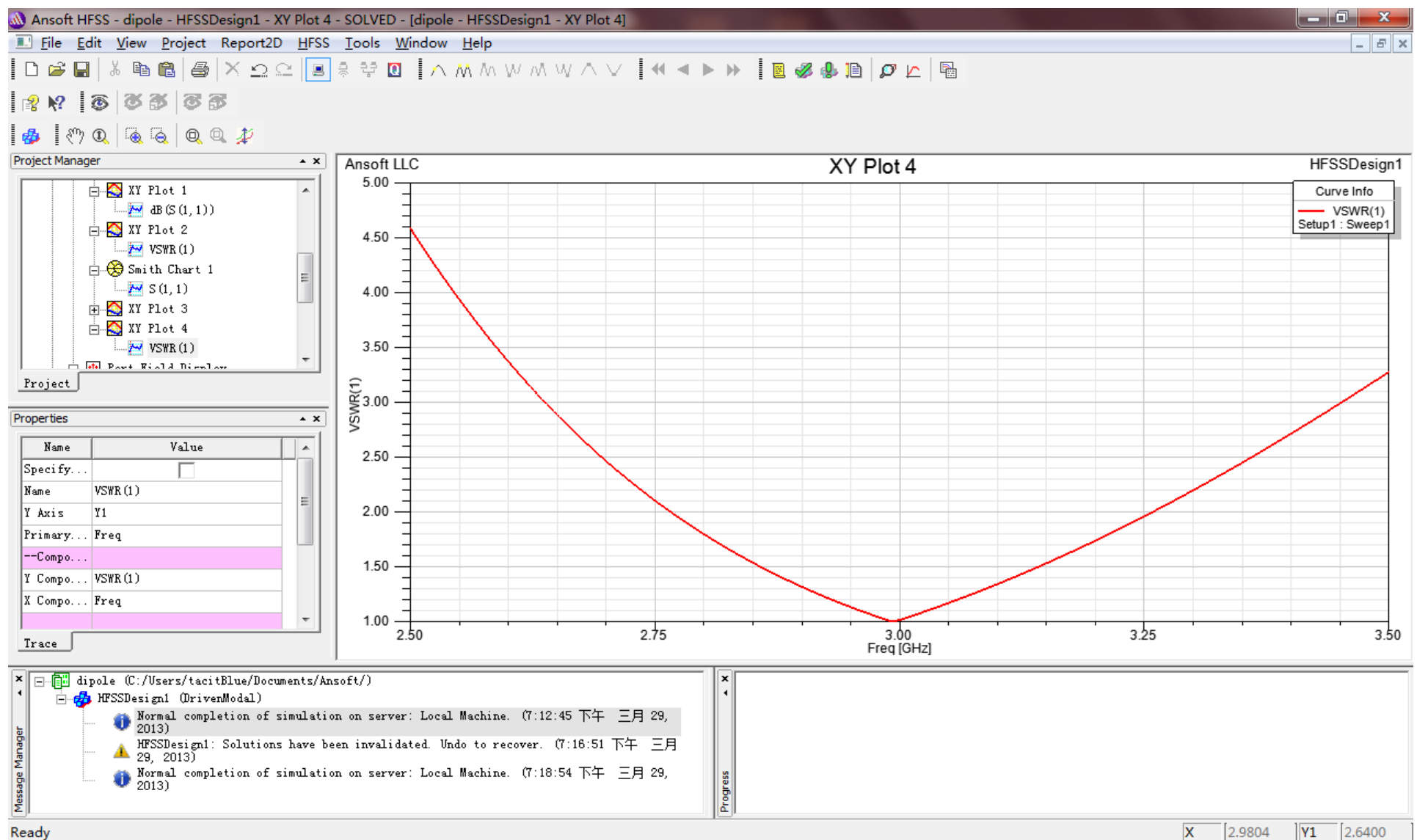




## (2) 电压驻波比

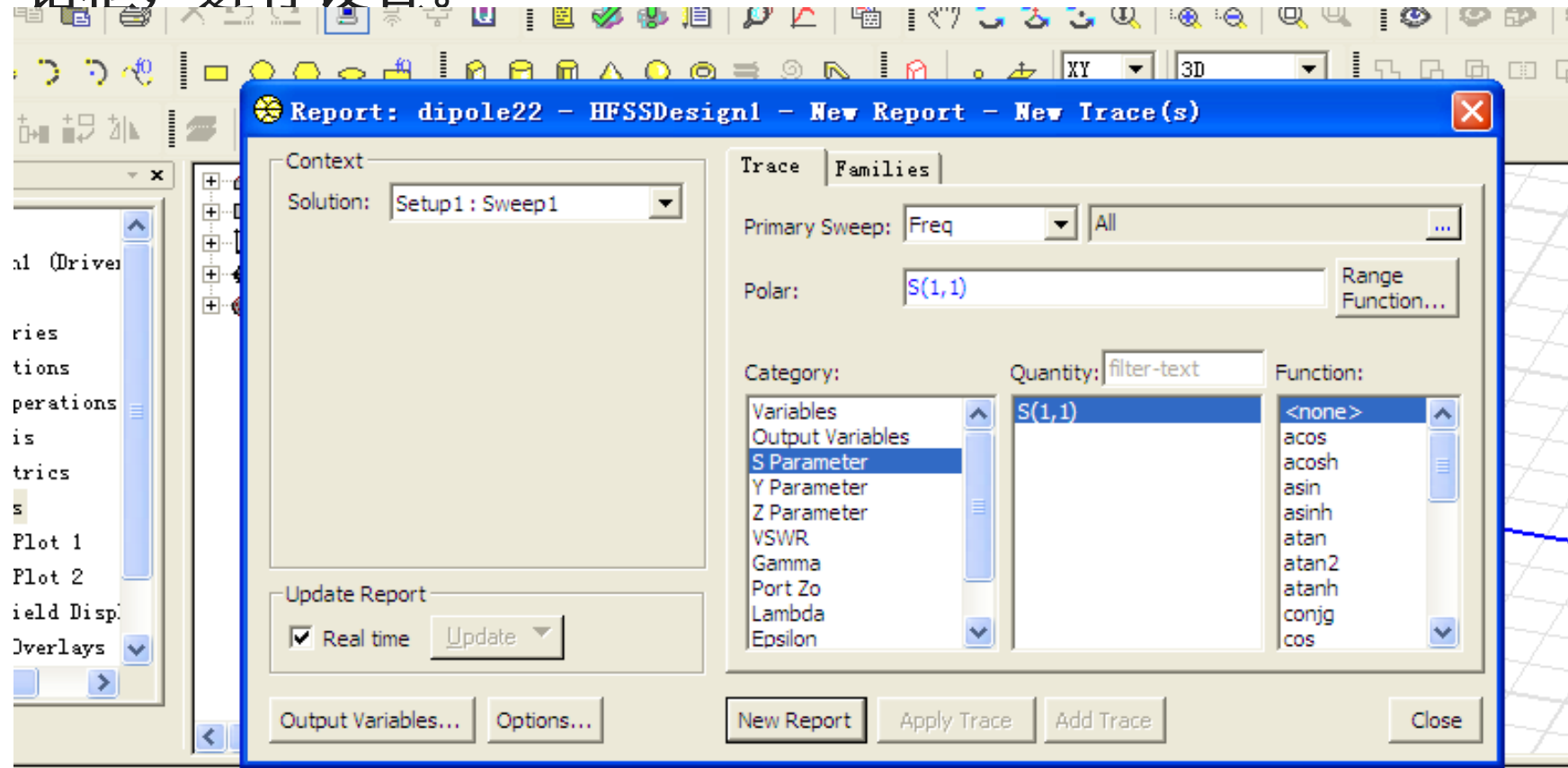
- 查看天线驻波比的操作和查看回波损耗S11类似，同样右键单击工程树下的results节点，在弹出的快捷菜单中选择create modal solution data report---rectangle plot;
- 再按照如下图表进行设置，最后单击new report，单击close，得到天线的驻波比分析结果。

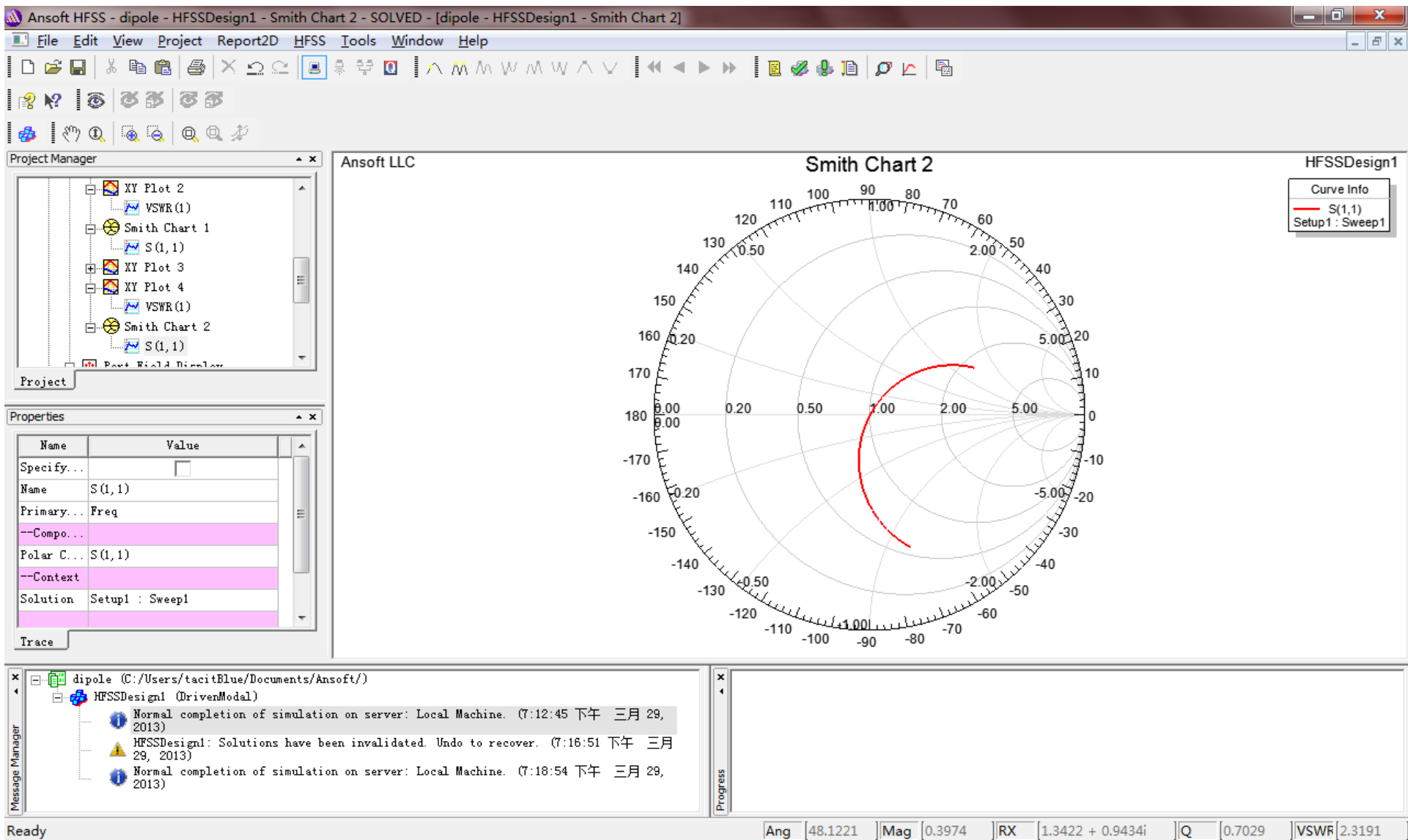




### (3) Smith圆图

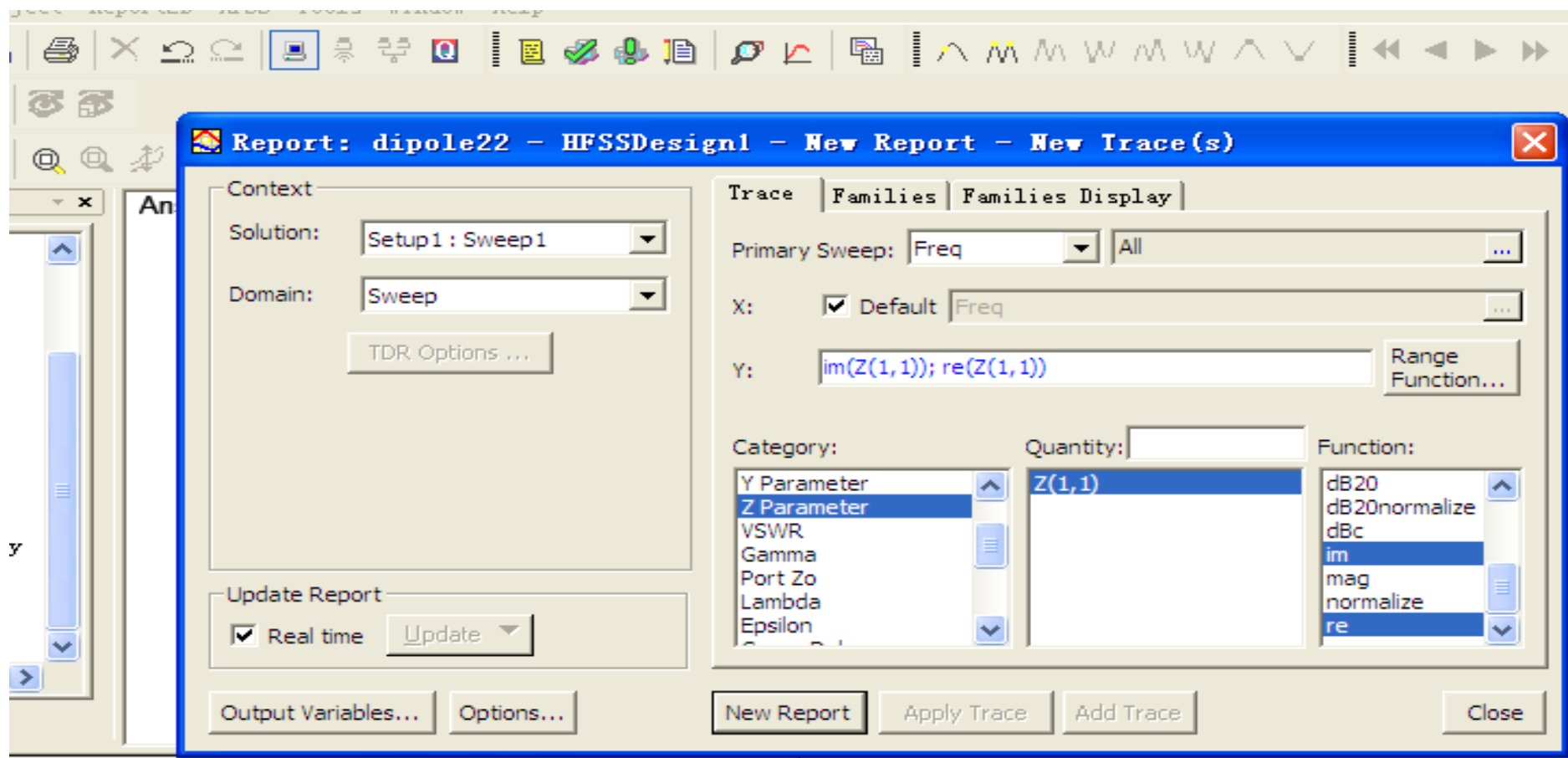
- 在天线的设计中，smith圆图是一个很有用的工具，借助圆图可以方便地分析阻抗匹配、驻波比、归一化输入阻抗。
- 右键单击工程树下的results节点，在弹出的快捷菜单中选择create modal solution data report---Smith chart，打开如下对话框，进行设置。



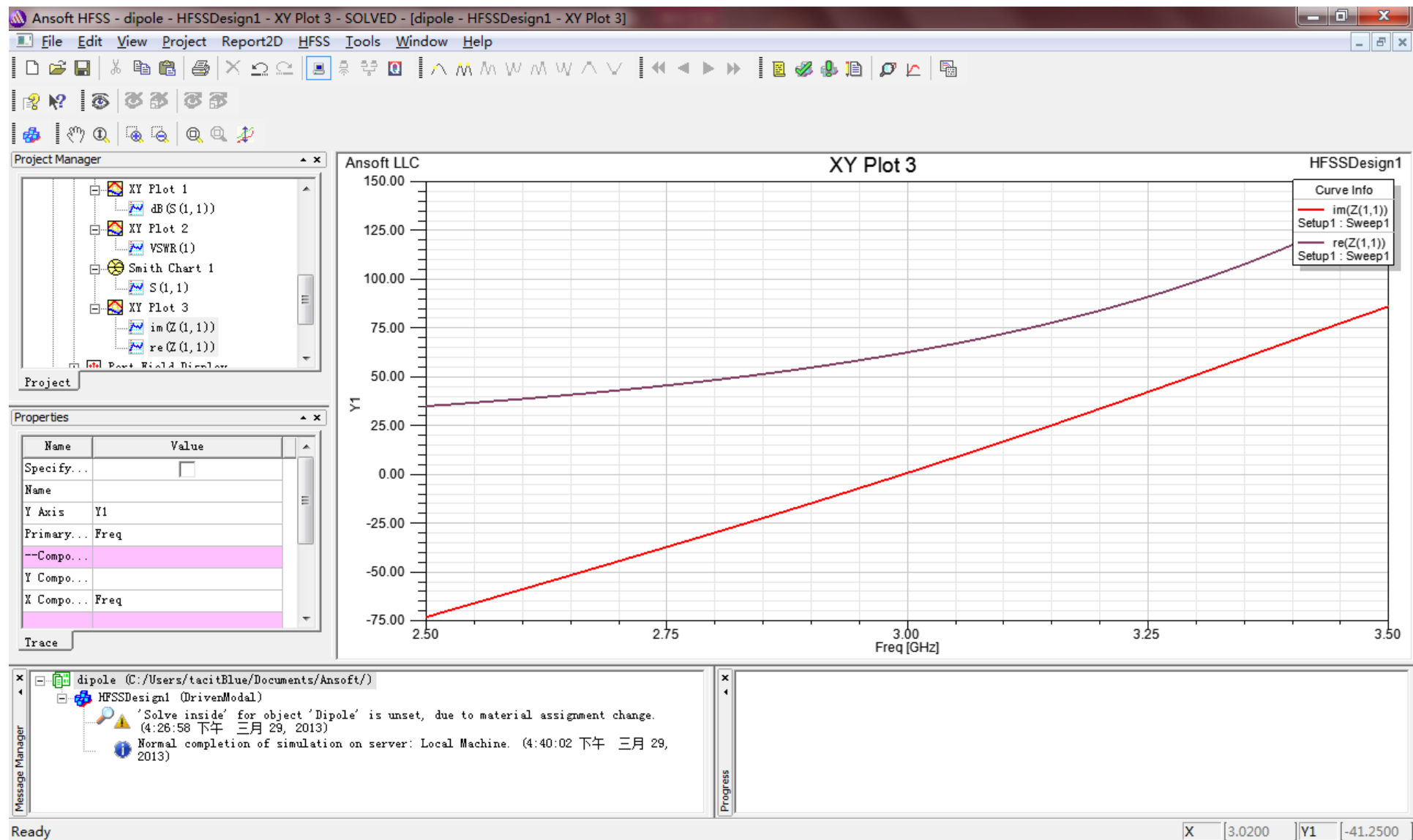


## (4)输入阻抗

- 输入阻抗是天线的一个重要性能参数。
- 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---rectangle plot，打开报告对话框，进行如下图设置。



- 点击new report按钮，再单击close按钮关闭对话框，此时得到天线的输入阻抗结果报告。



## (5) 方向图

- 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**HFSS**后处理部分可以方便绘制出天线的平面方向图和立体方向图。
- 方向图是在远区场确定的，要查看天线的远区场辐射结果。首先要设立辐射表面。
- 接下来分析半波偶极子天线在**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。

## A. 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 $\phi=0^\circ$ 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 $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ ， $0 \leq \phi \leq 360^\circ$ 。

- 定义**xz**平面

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，打开far radiation sphere setup完成如下设置。

- 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。



Far Field Radiation Sphere Setup



Infinite Sphere | Coordinate System | Radiation Surface |

Name E\_Plane

Phi

Start 0 deg

Stop 0 deg

Step Size 0 deg

Theta

Start -180 deg

Stop 180 deg

Step Size 1 deg

Save As Defaults

View Sweep Points...

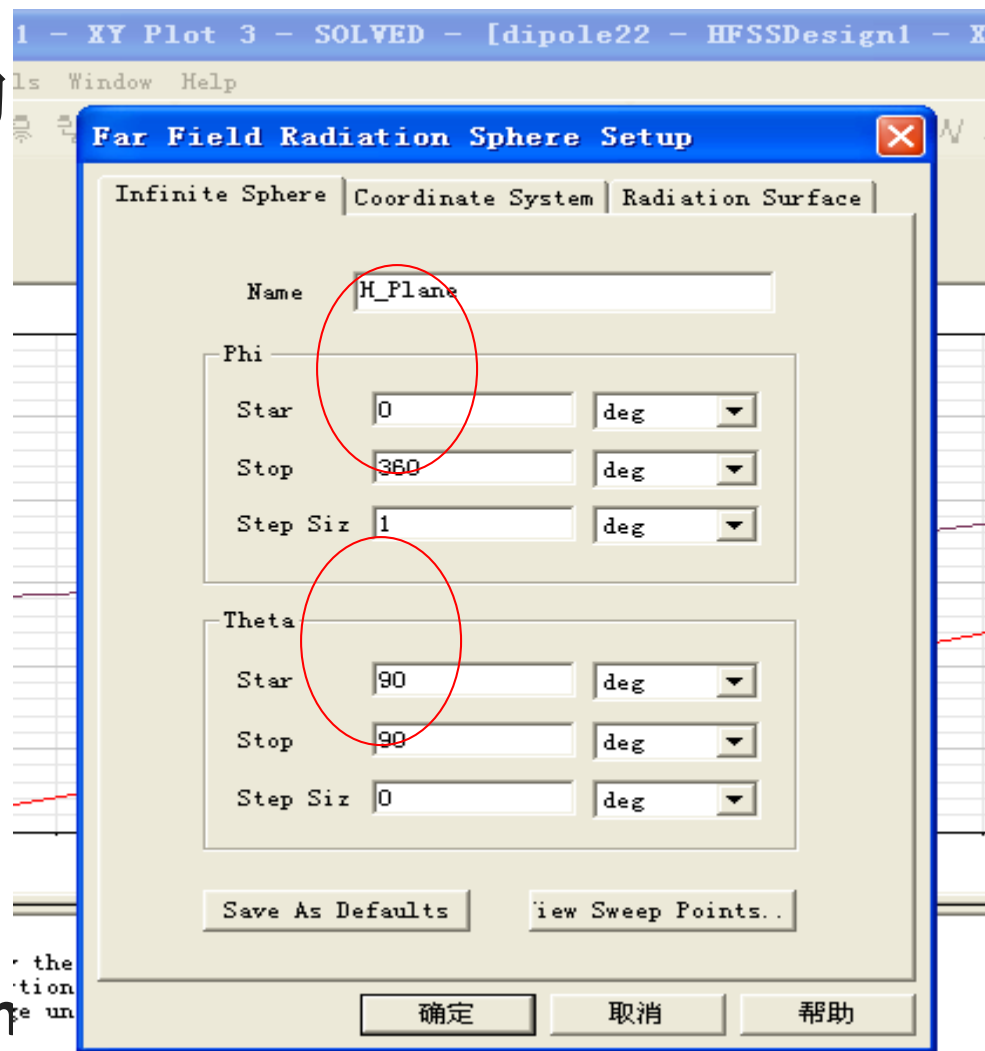
确定

取消

帮助

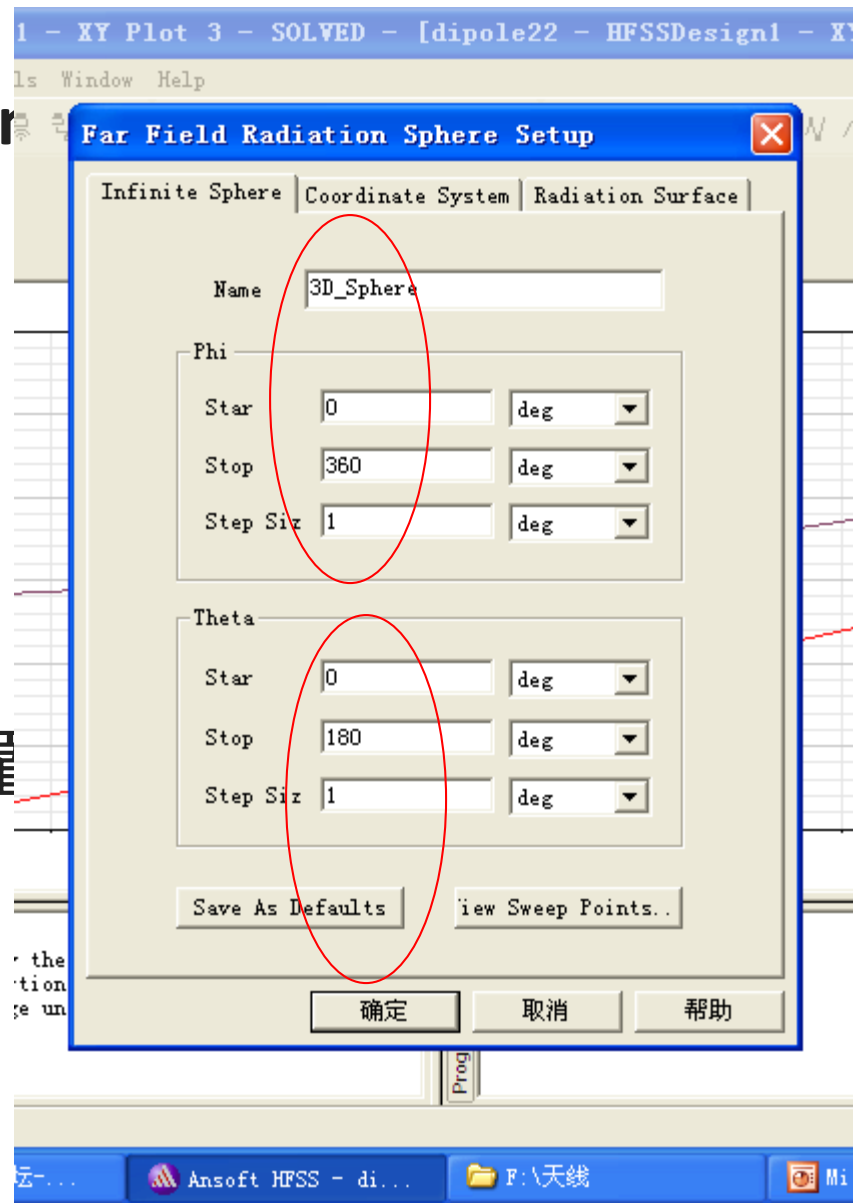
## 定义xy平面

- 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，打开far radiation sphere setup完成如下设置。
- 然后单击确定按钮，完成设置。
- 此时定义的辐射表面的名称H\_\_Plan点下。



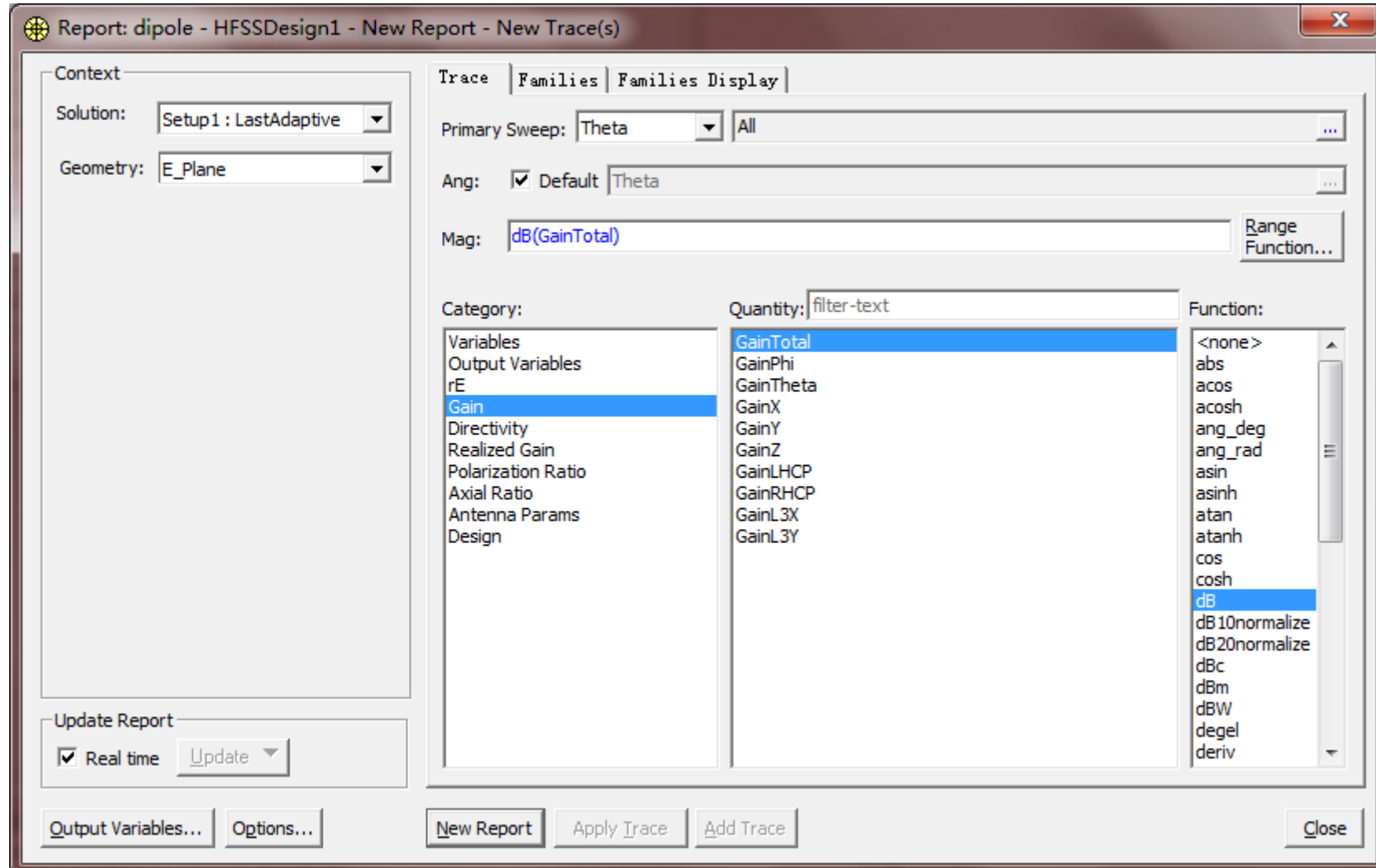
# 定义三维立体球面

- 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，打开far field radiation sphere setup完成如下设置。
- 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会添加到工程树的Radiation节点下。

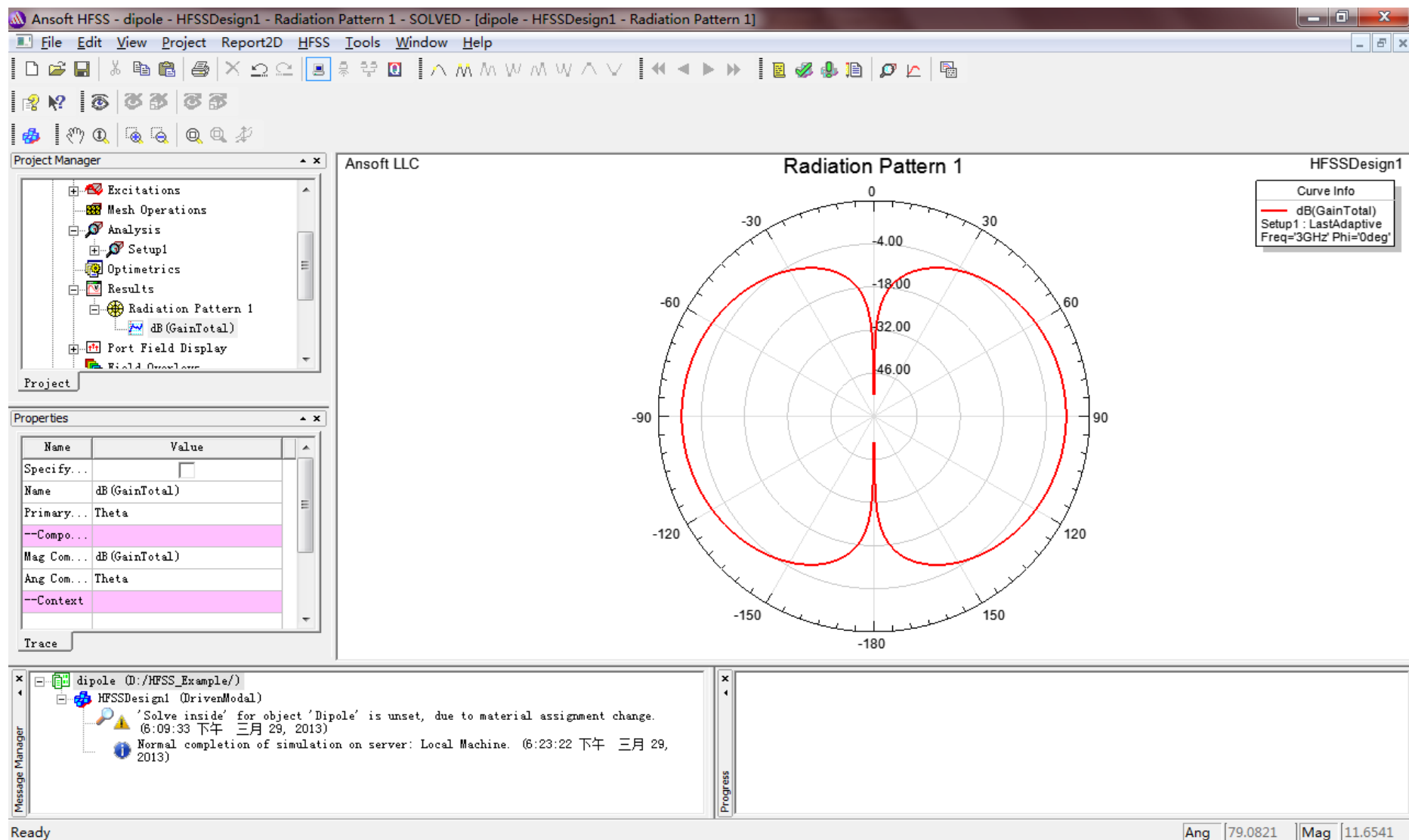


## B.查看xz面的增益方向图

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，如下图所示。

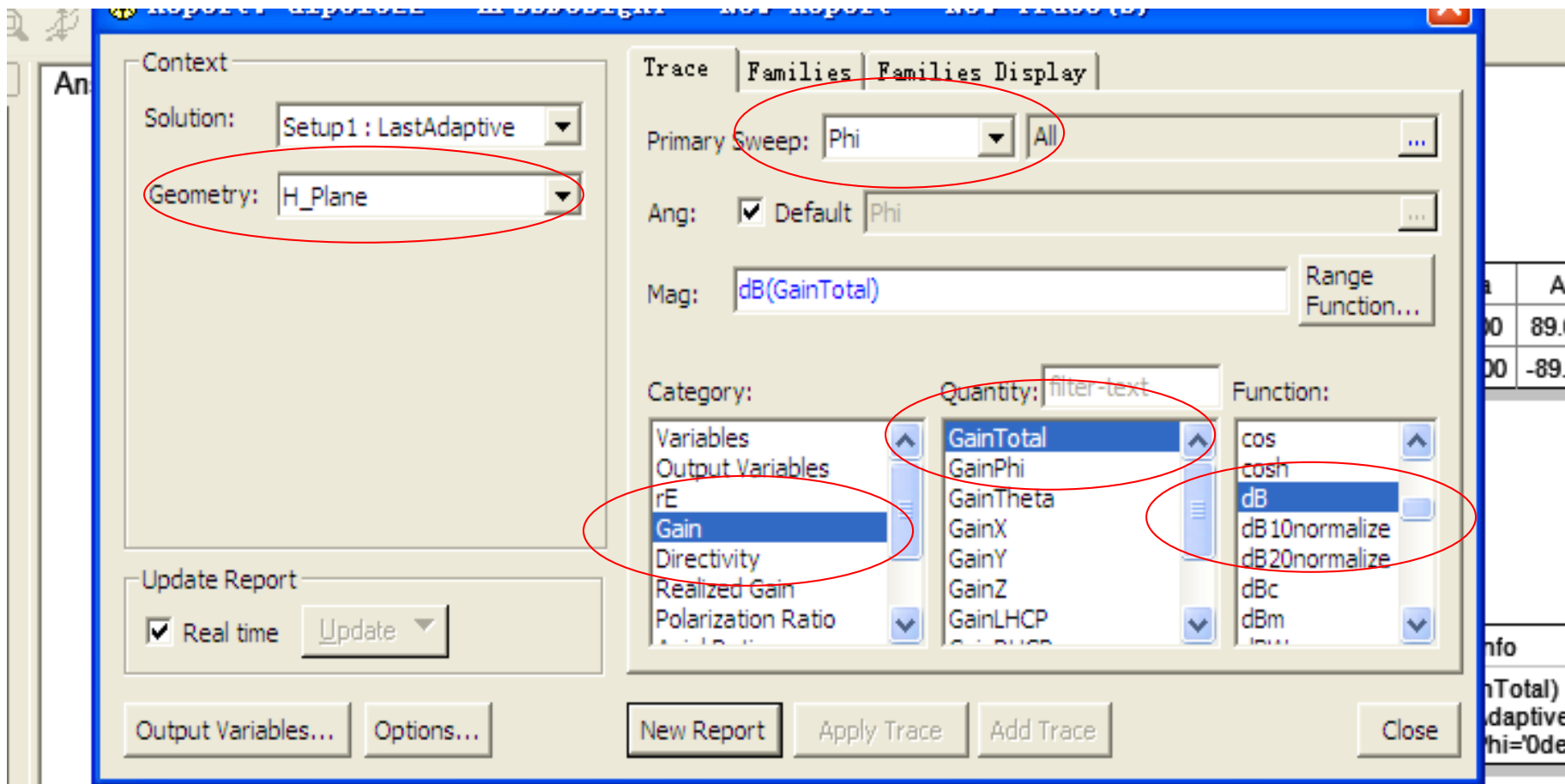


- 点击new report按钮，生成极坐标系下天线的xz面增益方向图。如下图所示。

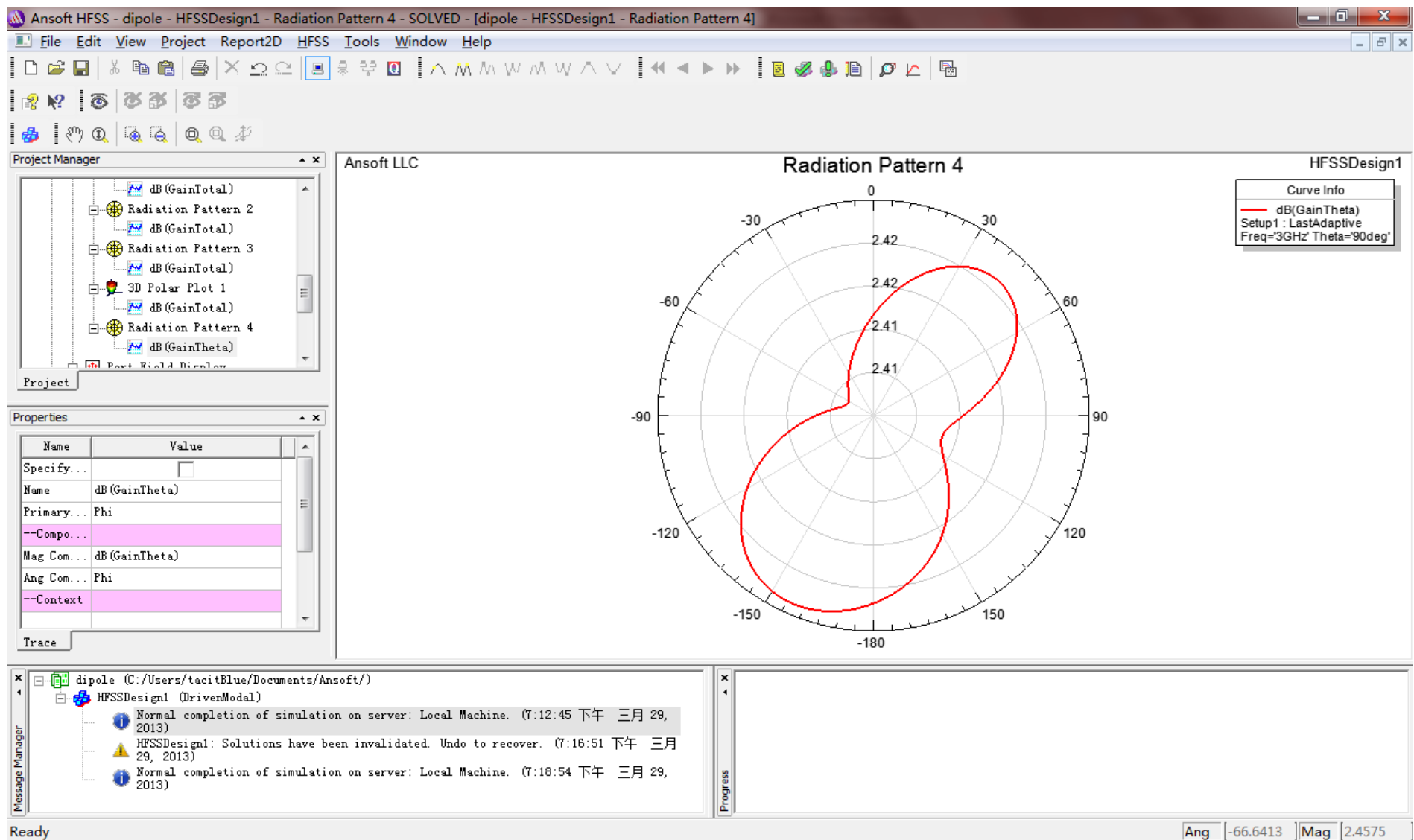


## C.查看xy面的增益方向图

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，如下图所示。

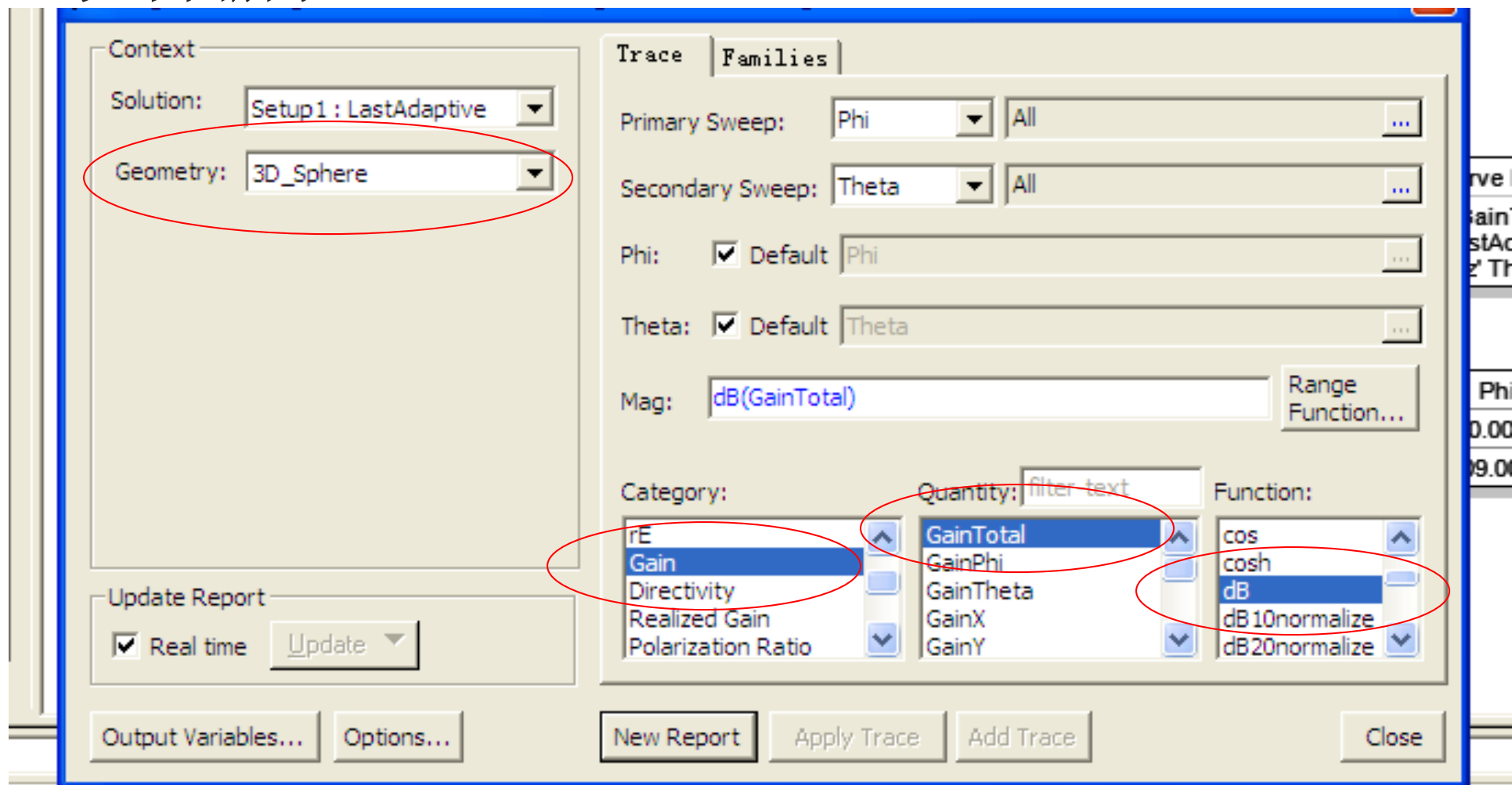


点击new report按钮，单击close，生成如下结果。



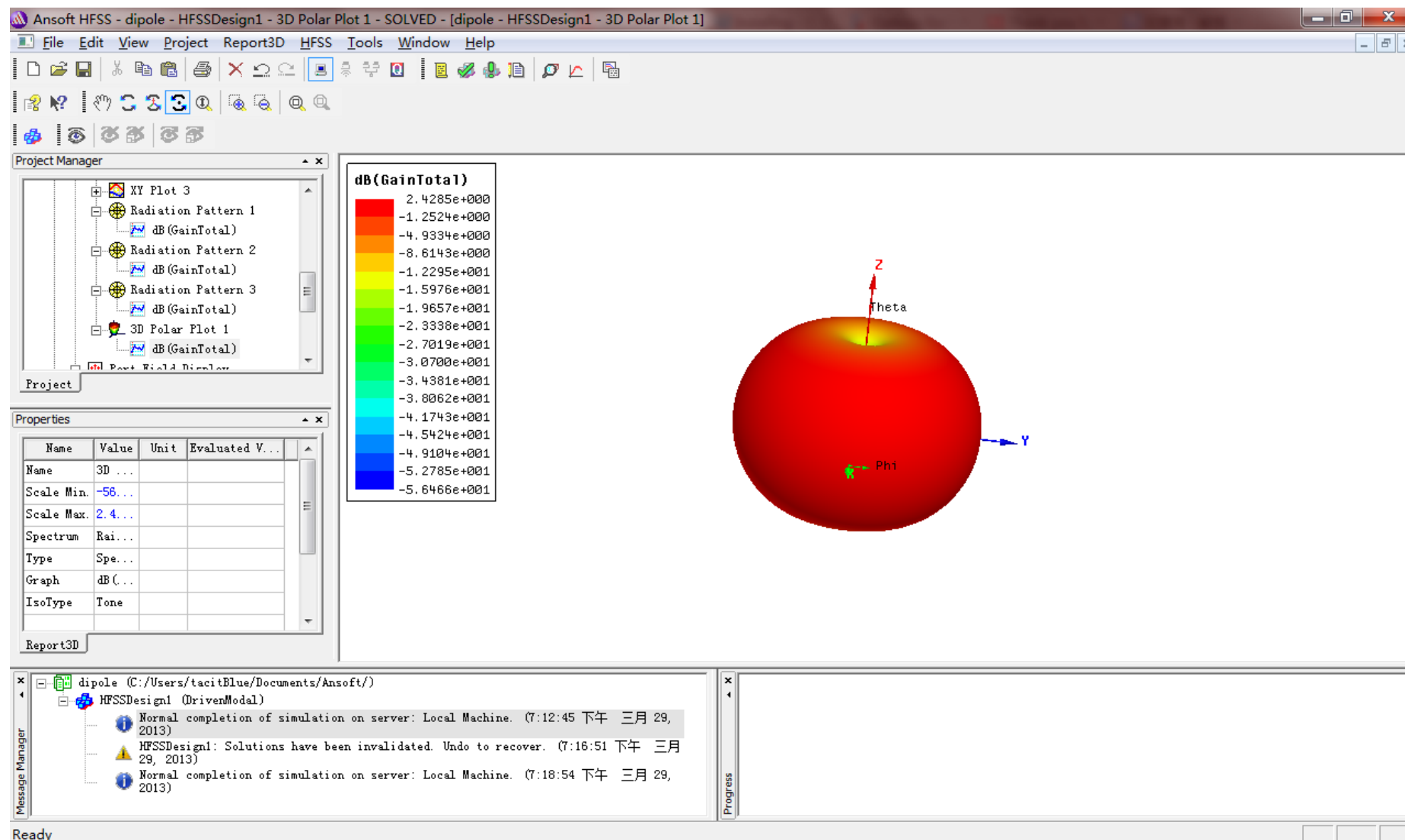
## D。查看三维增益方向图

- 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，如下图所示。





点击new report按钮，单击close，生成如下结果。



## (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**，在弹出的菜单中选择**compute antenna parameters**命令，打开**antenna parameters**对话框，然后单击对话框中的**ok**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。

Inputs

Setup Name: 3D\_Sphere

Solution: LastAdaptive

Array Setup: None

Intrinsic Variation: Freq='3GHz'

Design Variation: dip\_length='23.88mm' dip\_ra

OK

Export

Export Fields

Antenna Parameters:

	Quantity	Value	Units
	Max U	0.13918	W/sr
	Peak Directivity	1.7499	
	Peak Gain	1.7492	
	Peak Realized Gain	1.7491	
	Radiated Power	0.99953	W
	Accepted Power	0.99991	W
	Incident Power	1	W
	Radiation Efficiency	0.99962	
	Front to Back Ratio	-N/A-	
	Decay Factor	0	

Maximum Field Data:

	rE Field	Value	Units	At Phi	At Theta
	Total	10.244	V	203deg	90deg
	X	4.5617	V	180deg	131deg
	Y	4.566	V	90deg	132deg
	Z	10.244	V	203deg	90deg

# 设计参数确定

## 长度与波长关系

确定天线的总长度 $L$ ，使其等于半个波长 $\lambda/2$ ，这是半波偶极子天线的基本定义，直接影响天线的工作频率和辐射效率。

## 导线半径

选择适当的导线半径 $a$ ，以平衡天线的结构强度、导电性能及辐射特性。半径过小可能导致电阻增大，过大则可能影响辐射场分布。

## 馈电点位置

确定馈电点的具体位置，通常位于天线中心，以保证两臂电流分布均匀，提高天线的匹配性能和辐射方向性。

## 介质材料

考虑天线周围介质的电磁特性，如介电常数、磁导率等，这些参数会影响天线的辐射场分布和传播特性。

# 建模过程展示

01

## 创建基础模型

在HFSS软件中新建项目，设置求解类型为DrivenModel，并设置适当的长度单位（如毫米）。根据设计参数，创建半波偶极子天线的基础几何模型，包括两臂的圆柱形结构。

02

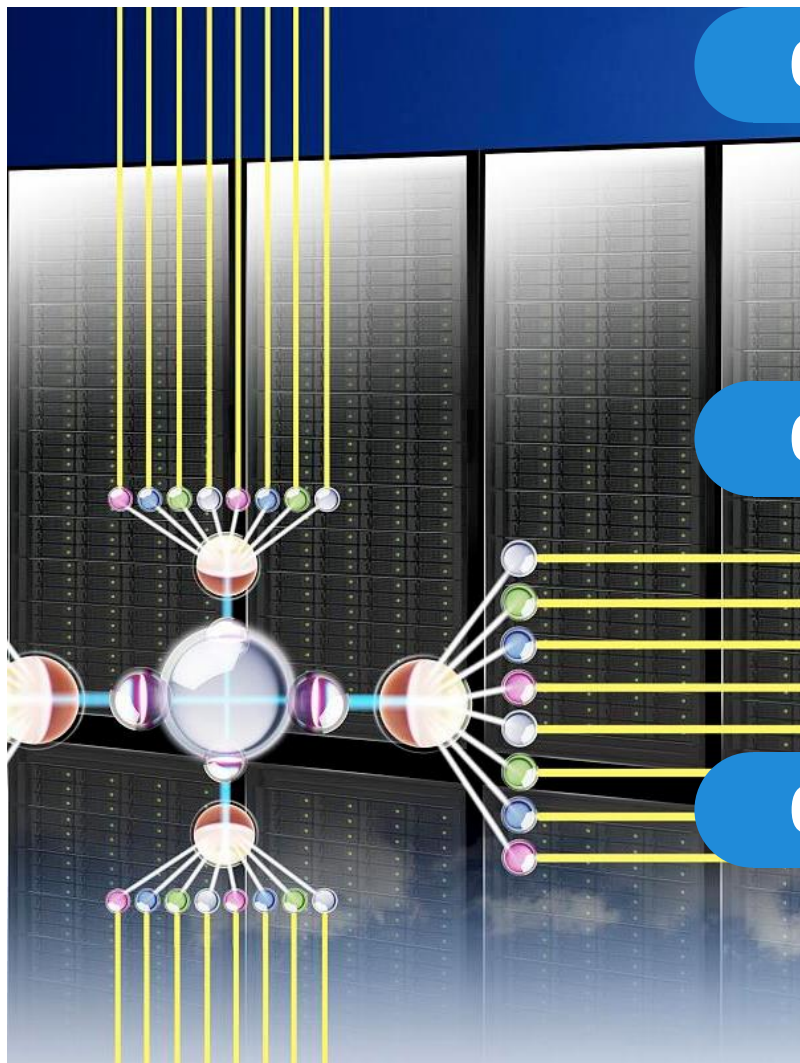
## 复制与对称

利用HFSS的坐标轴复制功能，快速生成天线的另一个臂，确保两臂关于中心点对称。

03

## 设置激励端口

在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，用于模拟实际馈电情况。



# 建模过程展示

## 设定辐射边界条件

创建一个沿Z轴放置的圆柱模型作为辐射边界条件，材质设定为空气，以模拟无限大自由空间中的辐射场分布。

VS

## 材料与属性赋值

为天线模型分配适当的材料属性，如金属导体的电导率等，并设置求解频率范围及扫频类型（如快速扫频）。

# 仿真结果分析

## 回波损耗分析

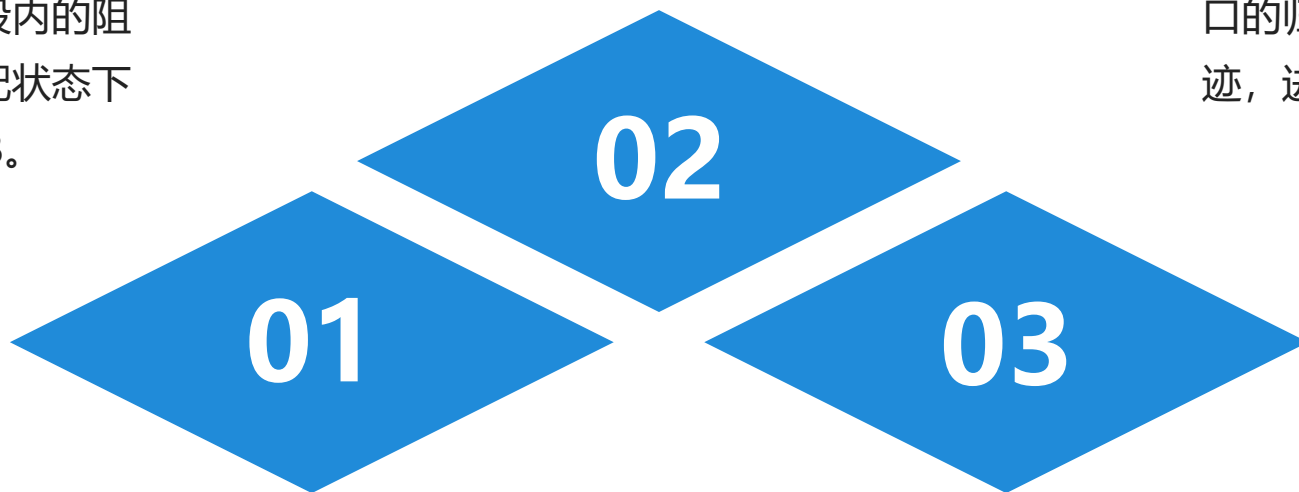
观察并分析S11参数（回波损耗），评估天线在设定频段内的阻抗匹配性能。理想的匹配状态下，S11应小于-10dB。

## 电压驻波比分析

计算并绘制电压驻波比（VSWR）曲线，了解天线在不同频率点的传输特性。VSWR越接近于1，表示传输特性越接近行波状态，性能越理想。

## 史密斯圆图分析

利用史密斯圆图直观展示天线端口的归一化阻抗随频率变化的轨迹，进一步分析阻抗匹配情况。



# 仿真结果分析

## 辐射特性分析

分析天线的辐射方向图（包括二维和三维增益图）、极化特性等，评估天线的辐射效率和方向性。重点关注电场和磁场在XOY平面上的辐射均匀性及沿Z轴方向的衰减情况。

---

## 敏感性分析

调整天线的设计参数（如长度、宽度、高度等），观察并分析这些变化对天线性能的影响，以确定最优设计方案。

---



PART  
05

# 性能评估与优化策略

# 辐射性能评估指标



## ● 辐射方向图

评估天线在不同方向上的辐射强度分布，包括主瓣宽度、副瓣电平、前后比等参数，以了解天线的辐射特性。

## ● 增益

衡量天线在特定方向上收发信号的能力，增益越高，表示天线在该方向上的辐射或接收效率越高。

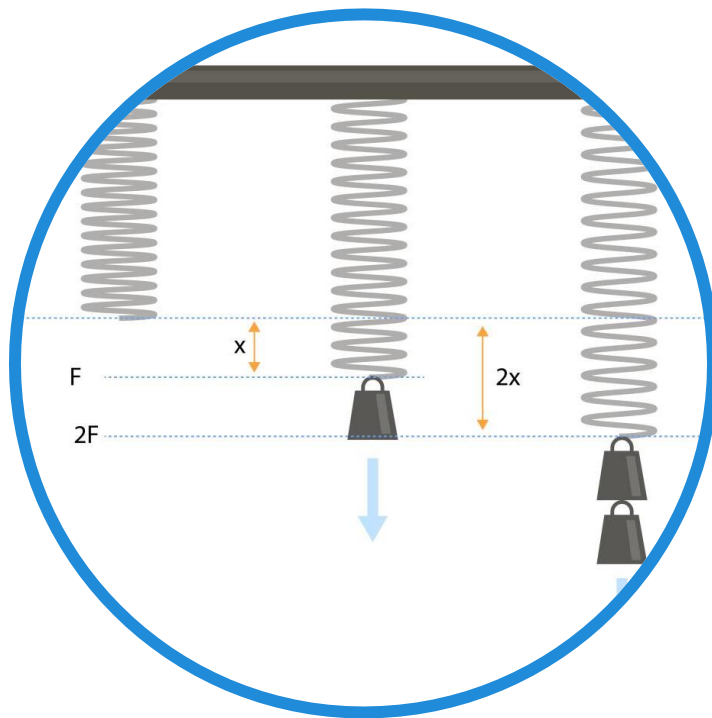
## ● 极化特性

评估天线辐射电场的极化方式，包括线极化、圆极化等，以及极化纯度和交叉极化比等参数，以了解天线的极化特性对通信质量的影响。

# 阻抗匹配优化方法

## 调整馈电点位置

通过改变馈电点在天线上的位置，可以优化天线的输入阻抗，使其与馈线特性阻抗更好地匹配，减少反射损耗。



## 添加匹配网络

在天线与馈线之间添加匹配网络，如L型、T型、 $\pi$ 型等匹配电路，以补偿天线输入阻抗与馈线特性阻抗之间的差异，实现阻抗匹配。

## 优化天线结构参数

通过调整天线的长度、宽度、高度等结构参数，可以改变天线的电流分布和辐射特性，从而优化天线的输入阻抗和匹配性能。

# 结构调整对性能影响

## 长度调整

改变天线的长度会直接影响其工作频率和辐射特性。一般来说，天线长度增加会使工作频率降低，但也会增加辐射阻抗和增益。

## 宽度调整

调整天线的宽度可以改变其辐射方向图的形状和副瓣电平。较宽的天线往往具有较宽的主瓣宽度和较低的副瓣电平。

## 馈电方式优化

不同的馈电方式会影响天线的电流分布和辐射特性。例如，采用平衡馈电方式可以减少馈线上的共模电流，降低交叉极化比和反射损耗。同时，优化馈电点的位置和馈电网络的结构也可以进一步提高天线的性能。

PART  
06

# 实验验证与测试结果分析

# 实验装置及测试方法

## 实验装置

采用高精度信号发生器、矢量网络分析仪、远场天线测试系统等设备，确保测试数据的准确性和可靠性。

## 测试环境

在无遮挡、无电磁干扰的开阔场地进行测试，确保测试环境的一致性和可重复性。

## 测试方法

通过矢量网络分析仪测量天线的回波损耗、驻波比等参数，利用远场天线测试系统测量天线的辐射方向图、增益等辐射特性。同时，与仿真结果进行对比分析，验证设计的准确性和可靠性。

# 测试结果与仿真对比

## 回波损耗对比

实测回波损耗曲线与仿真结果基本一致，验证了天线设计在阻抗匹配方面的有效性。

## 辐射方向图对比

实测辐射方向图与仿真结果基本一致，验证了天线在辐射特性方面的设计准确性。同时，通过对比不同频率下的辐射方向图，可以评估天线的频带宽度和辐射稳定性。



## 驻波比对比

实测驻波比与仿真结果吻合良好，表明天线在传输过程中的能量损耗较小，传输特性稳定。

## 增益对比

实测增益与仿真结果相近，表明天线在辐射强度方面达到了预期目标。

# 问题诊断及改进方向

## 问题诊断

针对实测结果与仿真结果之间的差异，进行问题诊断。可能的原因包括加工误差、装配误差、测试环境干扰等。通过逐一排查和验证，确定问题的具体原因。

---

## 改进方向

针对发现的问题，提出相应的改进措施。例如，优化加工工艺和装配流程，提高天线的加工精度和装配质量；改进测试方法，减少测试环境的干扰；调整天线设计参数，进一步优化天线的性能。同时，总结实验经验，为后续的天线设计提供参考和借鉴。

---



# 项目成果总结

01

## 天线模型构建

成功利用HFSS软件构建了半波偶极子天线的精确模型，包括天线长度、宽度、高度等关键参数的精确设定，确保了模型与实际情况的高度一致。

02

## 电磁仿真分析

通过HFSS软件对天线模型进行了详细的电磁仿真分析，包括辐射方向图、驻波比、输入阻抗等关键参数的仿真，验证了天线设计的有效性和可行性。

03

## 参数优化

针对天线性能进行了多轮参数优化，包括天线长度、宽度、高度等参数的调整，以及辐射单元布局的优化，显著提升了天线的辐射效率和频带宽度。

04

## 实际应用验证

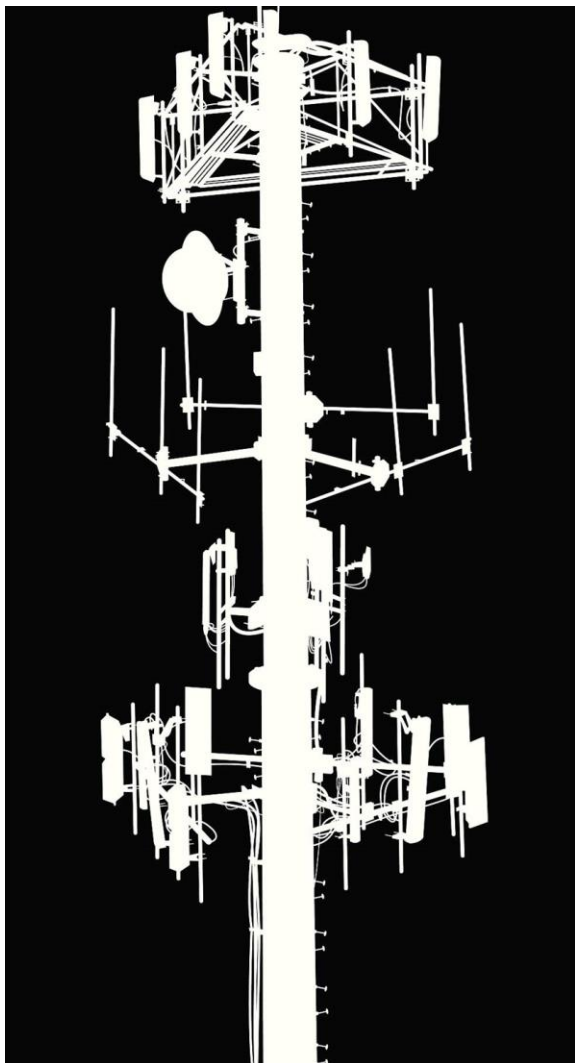
将优化后的天线模型应用于实际通信系统中，验证了天线在实际工作环境中的稳定性和可靠性，满足了系统对天线性能的需求。

作业提交注意事项：

1， 完整的作业一次性提交在《学在浙大》系统上；

2， 评分标准： 解答的完整过程，书写的清晰度， 答案的正确性

# 存在问题及解决方案



01

## 电磁干扰问题

在仿真过程中发现天线在特定频段内存在电磁干扰问题，通过调整天线的布局 and 增加屏蔽措施，有效降低了电磁干扰对天线性能的影响。

02

## 参数设置误差

在仿真过程中发现参数设置存在微小误差，导致仿真结果与实际情况存在一定偏差。通过多次仿真验证和参数微调，最终确保了仿真结果的准确性和可靠性。

03

## 加工精度问题

在天线加工过程中发现加工精度对天线性能有一定影响。通过与加工厂家沟通协商，制定了严格的加工精度标准，并加强了加工过程中的质量控制，确保了天线加工精度的稳定性和可靠性。

# 未来研究方向

## 多频带天线设计

针对未来通信系统的需求，研究多频带半波偶极子天线的设计方法，实现天线在不同频段内的良好匹配和高效辐射。

01

02

## 宽带天线设计

研究宽带半波偶极子天线的设计方法，提高天线的工作带宽和频率适应性，满足未来宽带通信系统的需求。

03

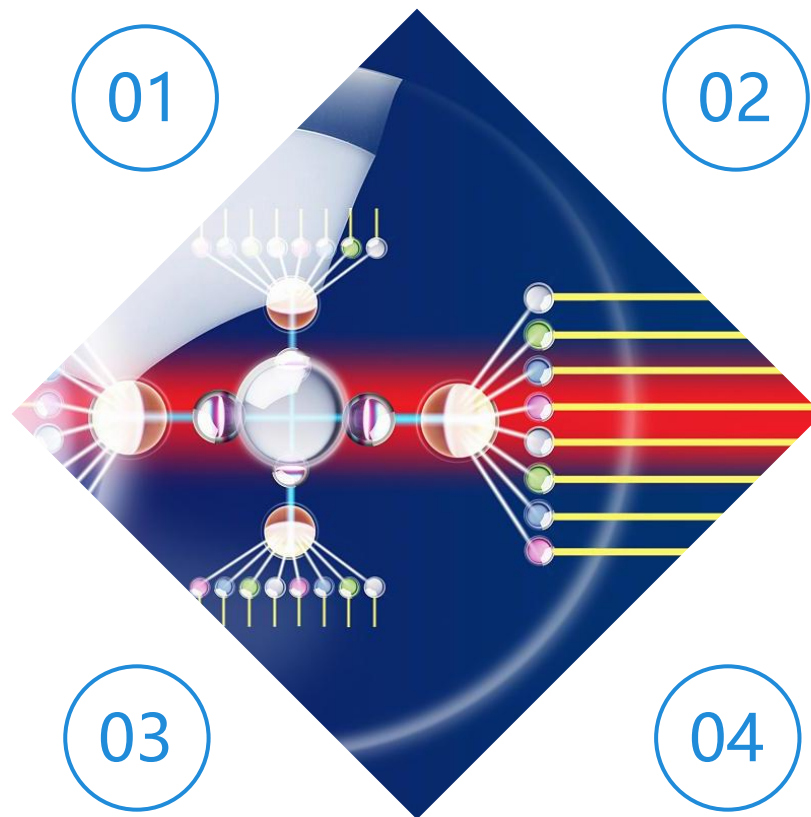
04

## 智能化天线设计

结合人工智能和机器学习技术，研究智能化半波偶极子天线的设计方法，实现天线性能的自适应优化和智能调节。

## 小型化天线设计

针对现代通信设备对天线体积和重量的要求，研究小型化半波偶极子天线的设计方法，实现天线体积和重量的显著减小。



# THANKS

感谢观看

