

浙江大学



实验名称：	HFSS半波偶极子天线设计
姓 名：	卢泽熙
学 院：	信息与电子工程学院
专 业：	信息工程
学 号：	320102478
指导教师：	王浩刚

2024 年 10 月 7 日

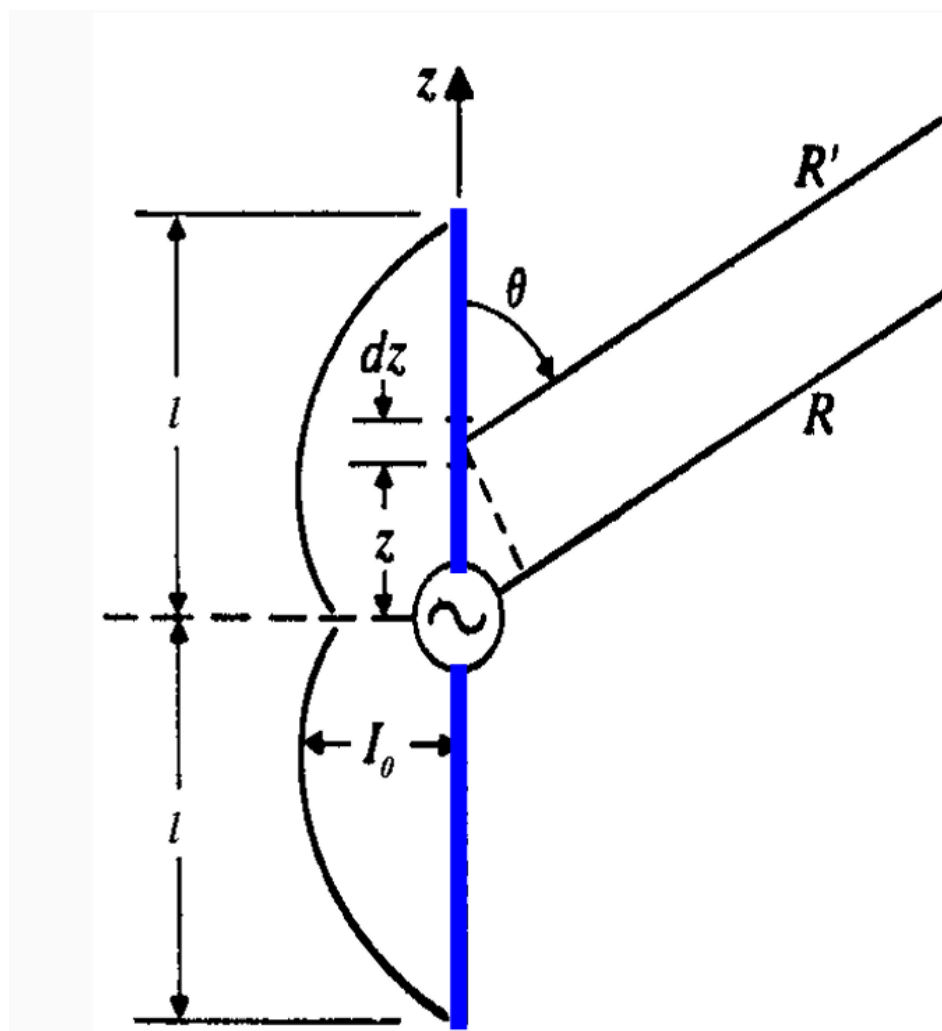
1 实验目的和任务

- **实验目的：**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：**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。

2 半波偶极子天线原理

2.1 电流分布

- 工程上通常将中心馈电的偶极子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 的半波偶极子天线的电流分布为：

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

2.2 辐射场与方向图

已知半波偶极子天线上的电流分布，可以利用叠加原理计算其辐射场，有：

$$E = j \frac{60 I_m}{r} \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} e^{-jkr} \hat{e}_\theta = j \frac{60 I_m}{r} f(\theta, \phi) \hat{e}_\theta$$

其中半波偶极子天线的方向性函数为：

$$f(\theta, \phi) = f(\theta) = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta}$$

2.3 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：

$$D = \frac{1}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{\cos^2 \theta (\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin^2 \theta} \sin \theta d\theta d\varphi} = 1.64 = 2.15 \text{dB}$$

2.4 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：

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

半波偶极子天线的辐射功率为：

$$P_r = \int P_{av} dS = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{15 I_m^2}{\pi r^2} \left[\frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \right]^2 r^2 \sin \theta d\theta d\varphi = 36.3 I_m^2$$

用 R_r 表示辐射电阻，有：

$$P_r = 36.3 I_m^2 = 0.5 I_m^2 R_r$$

求得：

$$R_r = 73.2 \Omega$$

2.5 输入阻抗

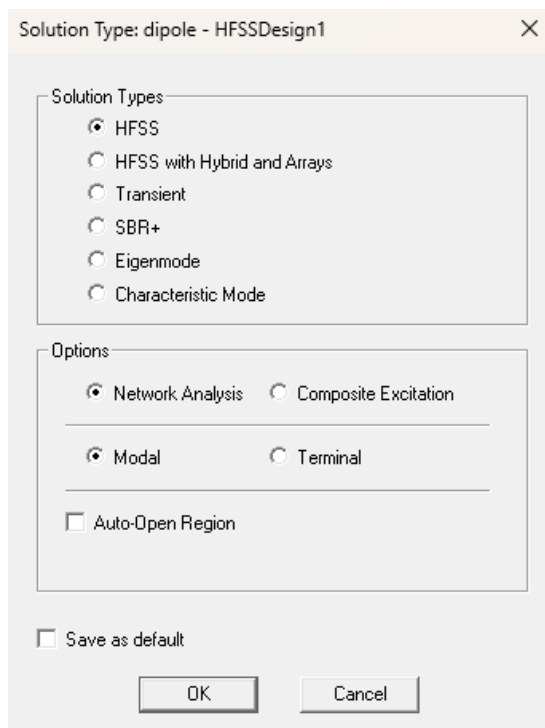
根据基本的传输线理论，输入阻抗一般同时包含实部和虚部两部分，实部电阻包含辐射电阻和导体损耗所产生的导体电阻。对于半波偶极子天线而言，输入阻抗近似看为辐射电阻 73.2Ω 。可见，半波偶极子天线的输入阻抗是纯电阻，易于和馈线匹配，这也是它被较多采用的原因之一。

3 实验步骤

3.1 新建设计工程

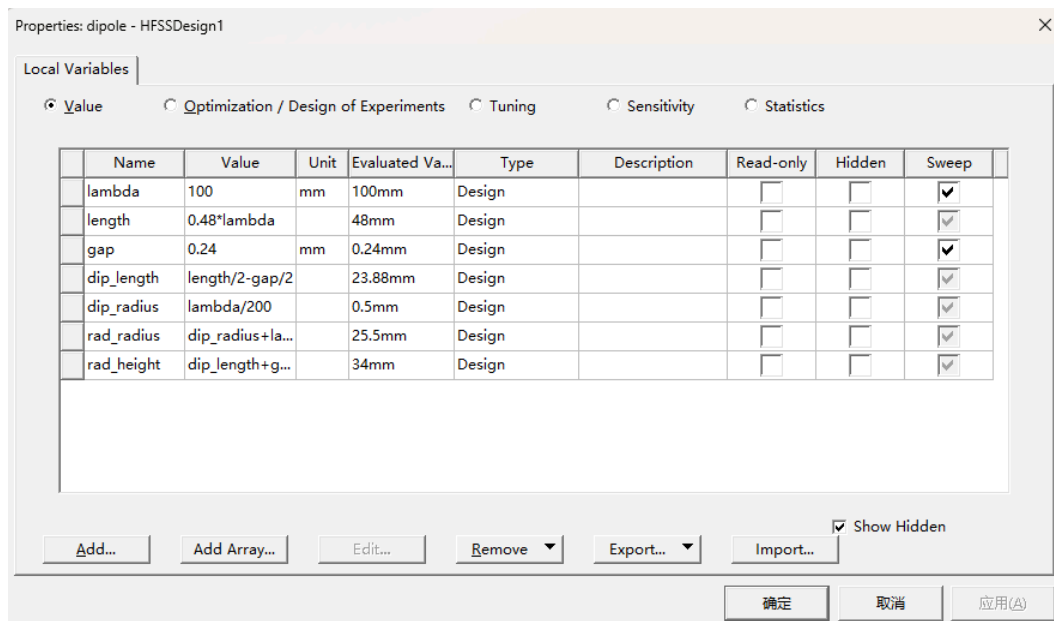
(1) 运行 **Ansys Electronics Desktop Student** 并新建 HFSS 工程，重命名为 dipole；

(2) 设置求解类型：在菜单栏中选择 **HFSS—Solution Type**，在弹出窗口中选择 **Modal**，完成设置；



3.2 添加设计变量

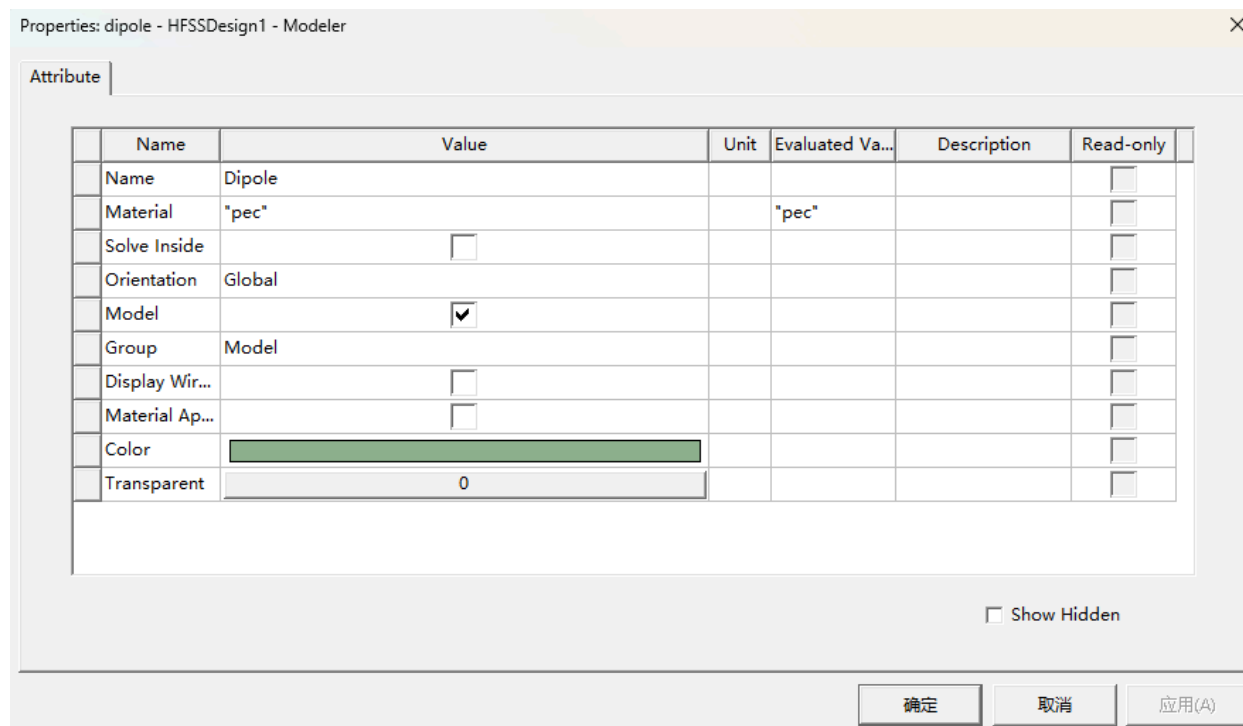
在主菜单栏中选择 **HFSS-Design Properties**，打开设计属性对话框，单击 **Add** 按钮，打开 **Add Property** 对话框，依次定义变量，如下图所示：



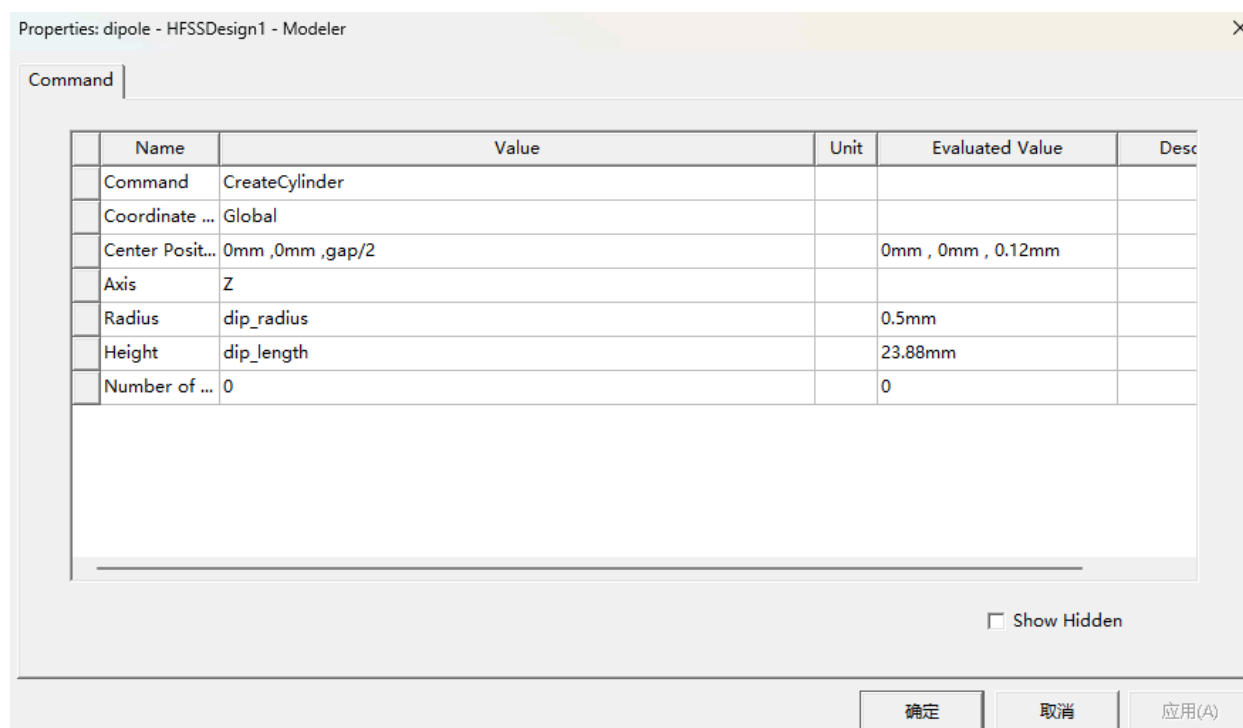
3.3 天线模型建立

3.3.1 创建偶极子天线模型

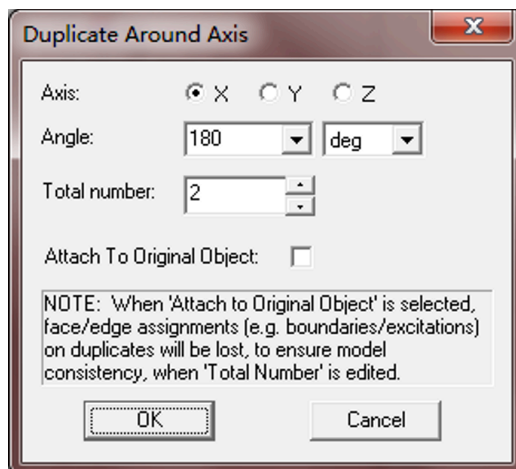
(1) 在主菜单栏中选择 **draw----cylinder** 创建圆柱体，圆柱体名称设置为 Dipole，其材质为 pec；



(2) 双击操作历史树中的 **Dipole----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，如下所示：



(3) 选中创建的圆柱体模型，然后从主菜单中选择 **Edit-Duplicate-Around-Axis**，执行沿坐标轴的复制。在打开的对话框中进行如下设置：

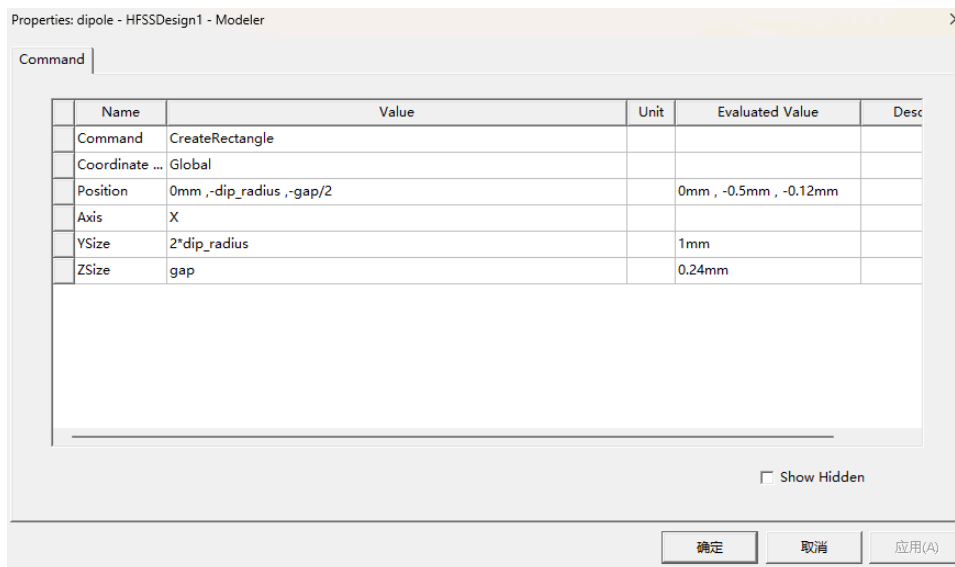


3.3.2 设置端口激励

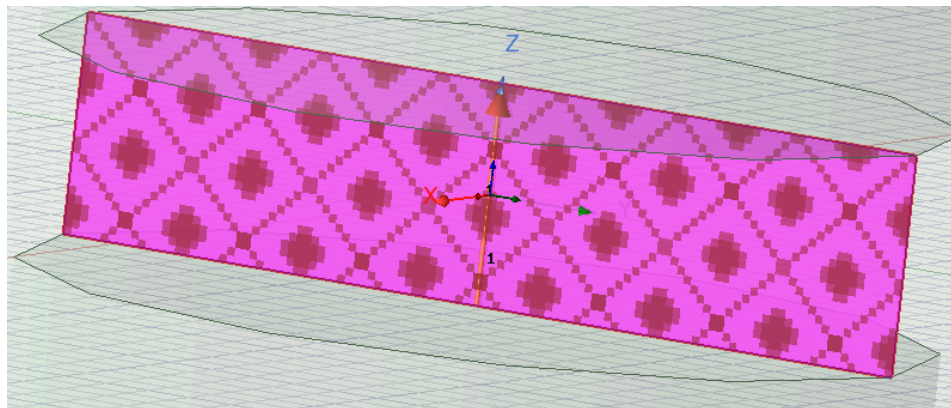
(1) 单击工具栏上的 xy 下拉菜单列表框，选择 yz 选项，把当前工作面设置为 yz 平面，然后从主菜单栏中选择 **draw----rectangle**；

(2) 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**；

(3) 双击操作历史树下 **Port** 下的 **CreateRectangle** 节点，在选项卡中设置矩形面的顶点坐标和大小；

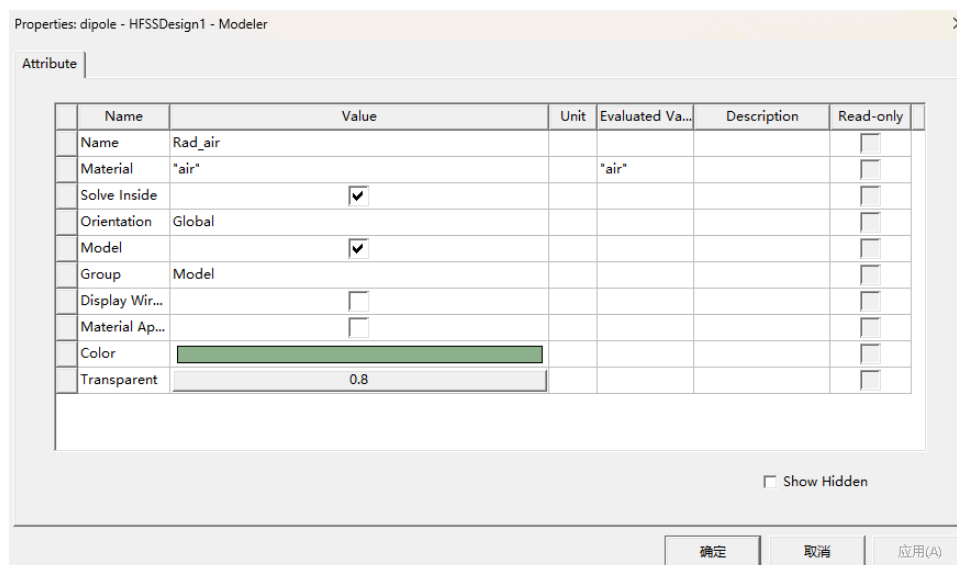


(4) 在操作历史树的 **Sheets** 节点下选中 **Port**，在菜单中选中 **Assign Excitation--Port-Lumped Port**，在打开的集总参数设置对话框中，将 **Full Port Impedance** 设为 73.2Ω ，单击下一页；在 Modes 对话框中单击 **Integration Line--None**，从下拉菜单中选择 **New Line**，在进入的三维模型窗口中画出一条由下至上的端口积分线，在 Port Processing 对话框中中选择 **Do Not Renormalize**，单击完成。

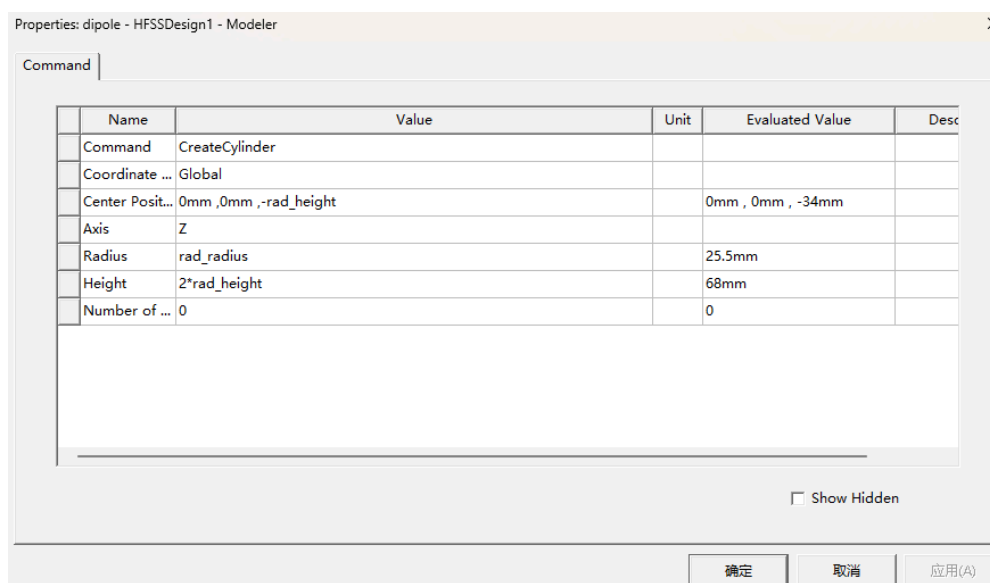


3.3.3 设置辐射边界条件

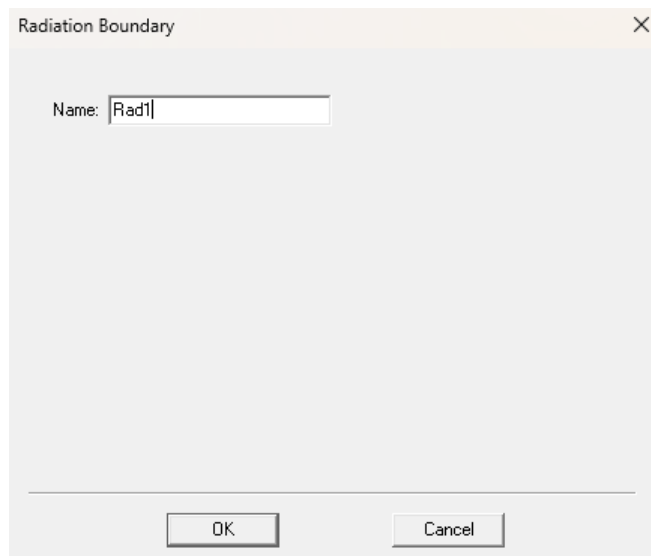
- (1) 创建辐射边界的圆柱体：单击工具栏上的 YZ 下拉列表框，从其下拉列表中选择 XY 项，将当前工作平面设置为 XY 平面；
- (2) 选择菜单栏 **Draw-Cylinder** 创建圆柱体，将圆柱体名称改为 **Rad_air**，设置材质为 **air**，透明度为**0.8**，点击确定，如图：



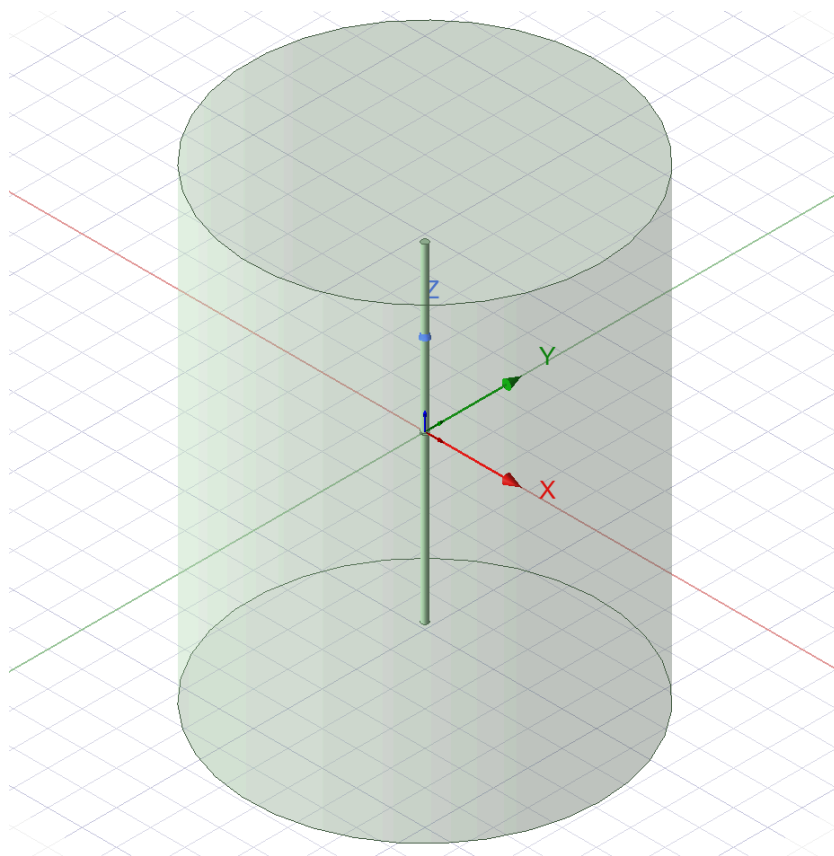
- (3) 双击操作历史树中的 **Rad_air** 下的 **CreateCylinder** 节点，在选项卡中设置尺寸：



(4) 在操作历史树下单击 **Rad_air** 节点，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，保留默认设置，从而将Rad_air表面设置为辐射边界条件。

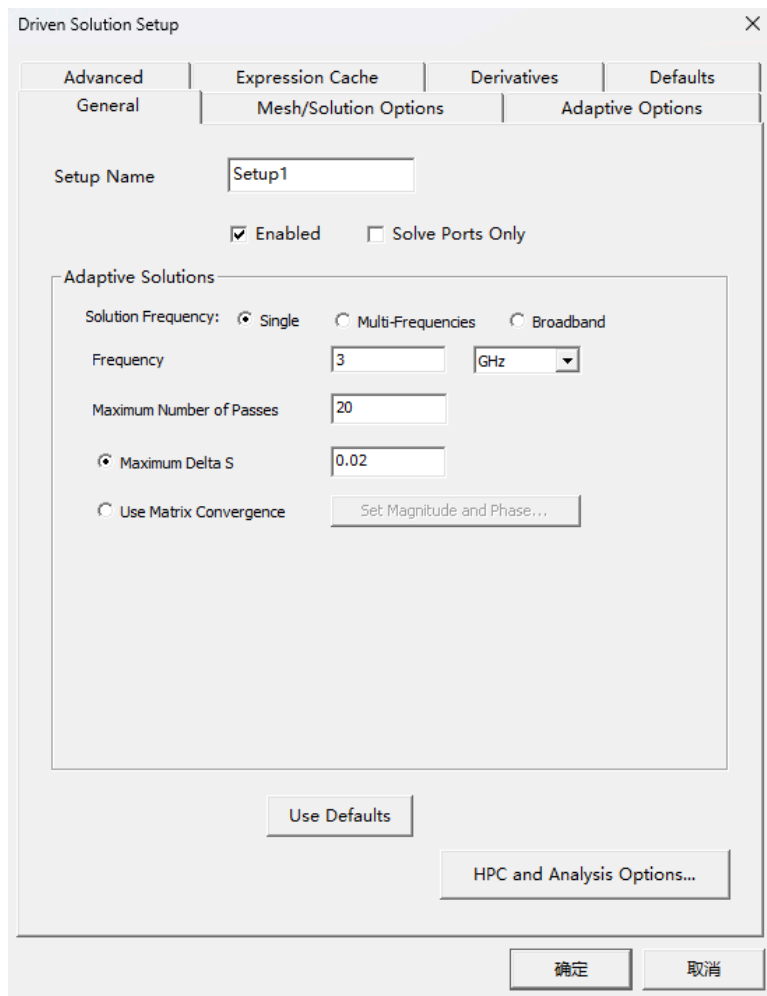


至此，半波偶极子天线模型建立完毕，完整模型图如下所示：

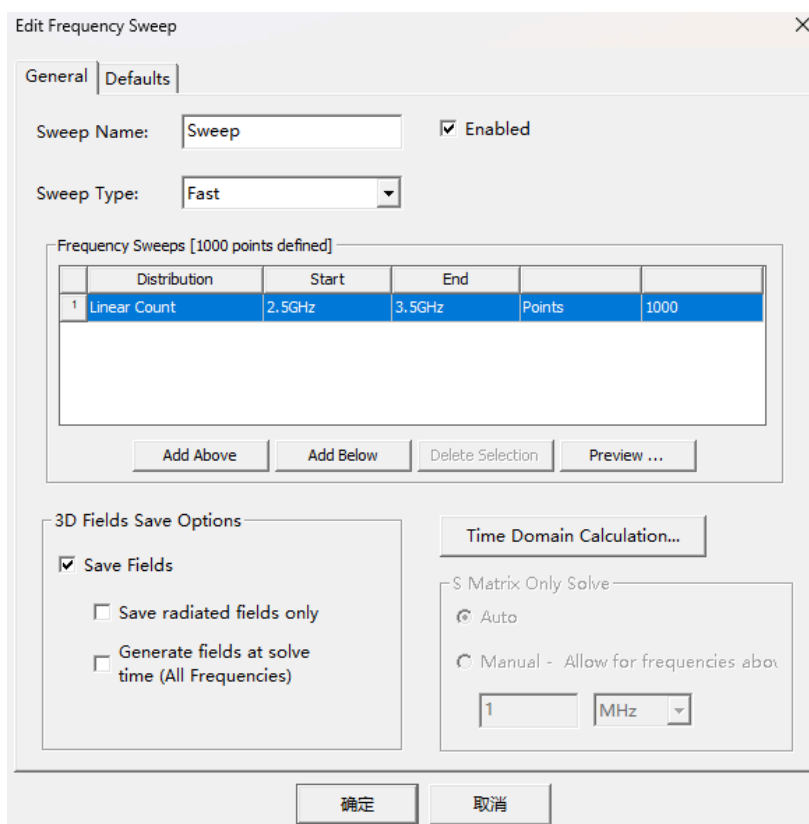


3.4 求解设置

(1) 求解频率和网格剖分设置：右键工程树下的 **Analysis**，弹出对话框中选中 **Add Solution Setup**，将求解频率设为 3GHz ，自适应网格剖分的最大迭代次数设为 20，收敛误差 0.02，如图所示：

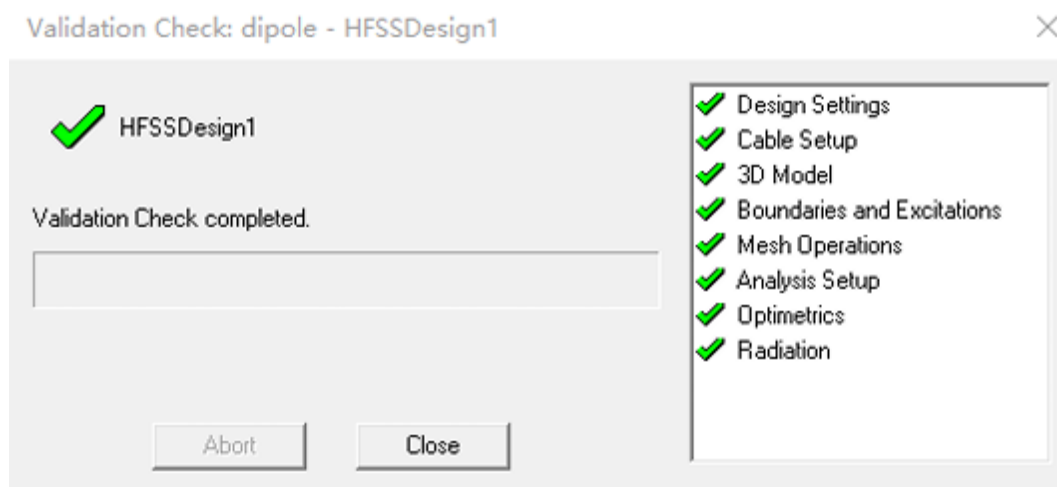


(2) 扫频设置：展开工程树下的 **Analysis** 节点，右键单击求解设置项 **Setup1**，在弹出的对话框中选择 **Add Frequency Sweep**，扫频类型为快速扫频，扫频范围 $2.5GHz - 3.5GHz$ ，点数为 **1000**：



3.5 设计检查及运行

(1) 选择主菜单中 **HFSS-Validation Check**，得到如下对话框，表明设计正确：



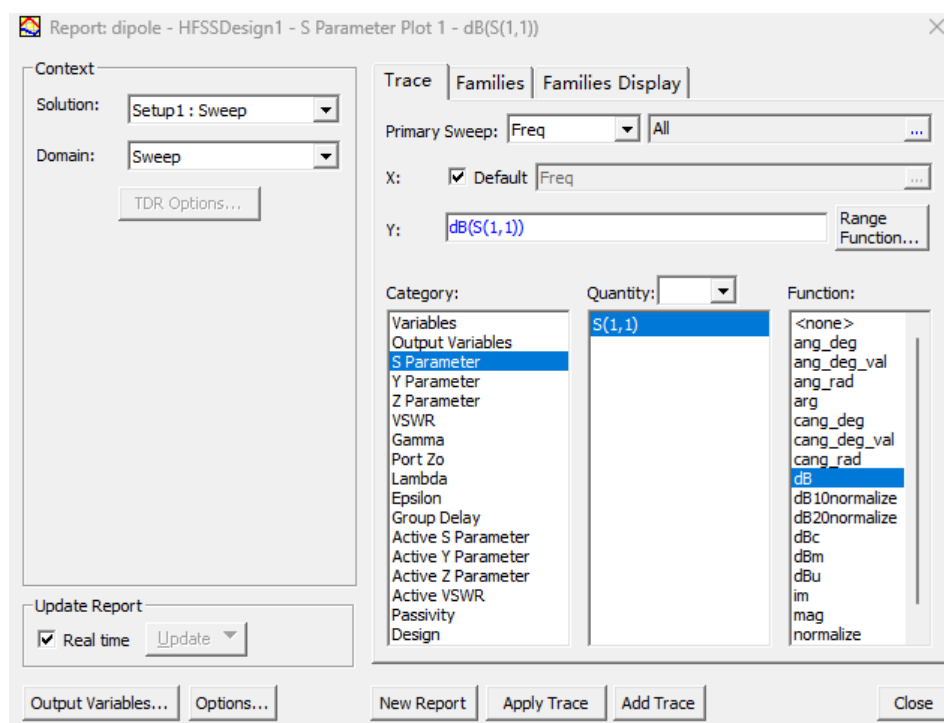
(2) 右键单击工程树下的 **Analysis—Setup1**，在弹出菜单中选择 **Analyze**，运行分析。

4 数据处理

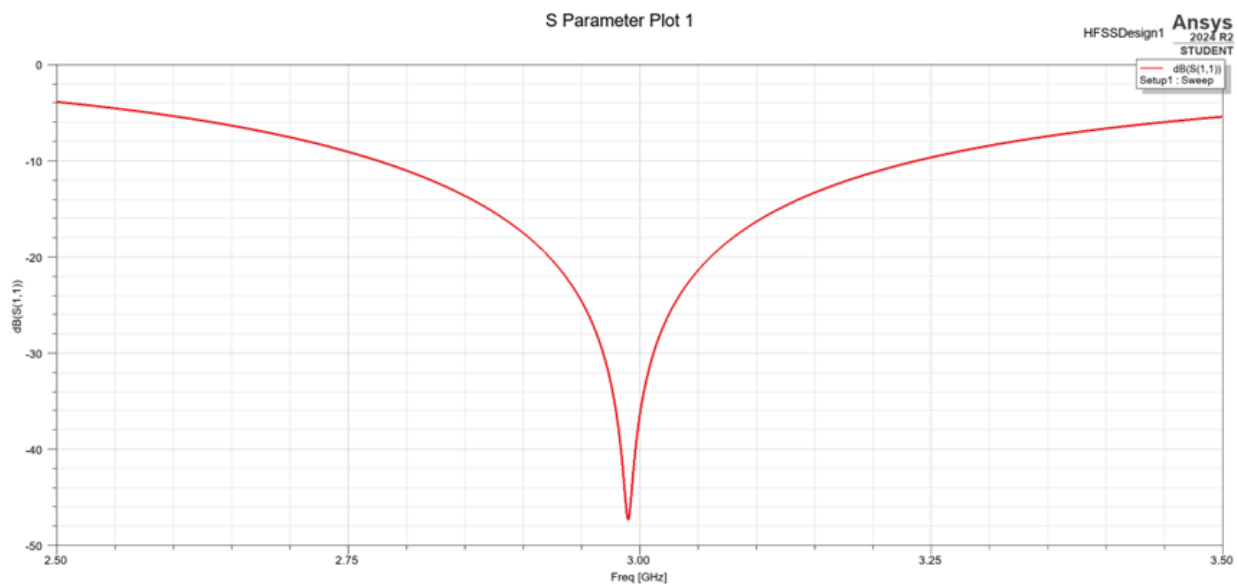
仿真分析完成后，在数据后处理部分能够给出天线的各项性能参数的仿真分析结果，如回波损耗、驻波比、Smith圆图、输入阻抗和方向图等。

4.1 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，如图所示：



单击 **New Report** 按钮，此时可以生成 $2.5GHz - 3.5GHz$ 频段内回波损耗 S_{11} 分析结果：



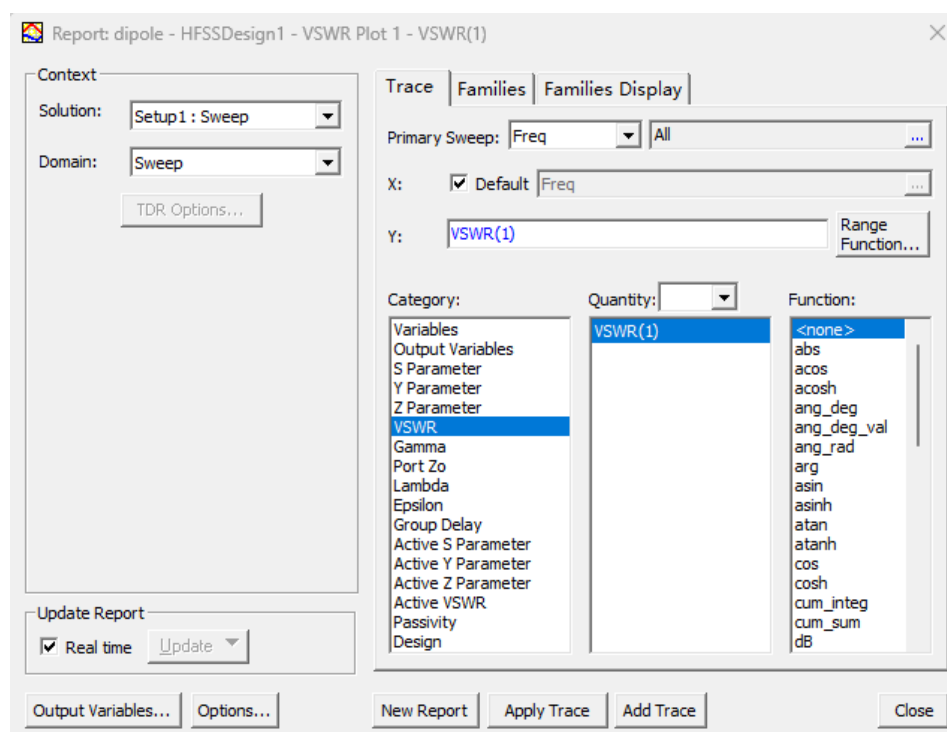
由仿真结果可知，半波偶极子天线在 $2.78\text{GHz} \sim 3.25\text{GHz}$ 之间的回波损耗 S_{11} 小于 -10dB ，此时天线处于较理想匹配状态，能够将大部分能量辐射出去，有优良的辐射特性；当工作频率为 3.00GHz 左右时，天线的回波损耗最小，为 -50.3dB ，计算可得天线 $S_{11} < 10\text{dB}$ 相对带宽：

$$BW = \frac{3.25 - 2.78}{3} = 15.6\%$$

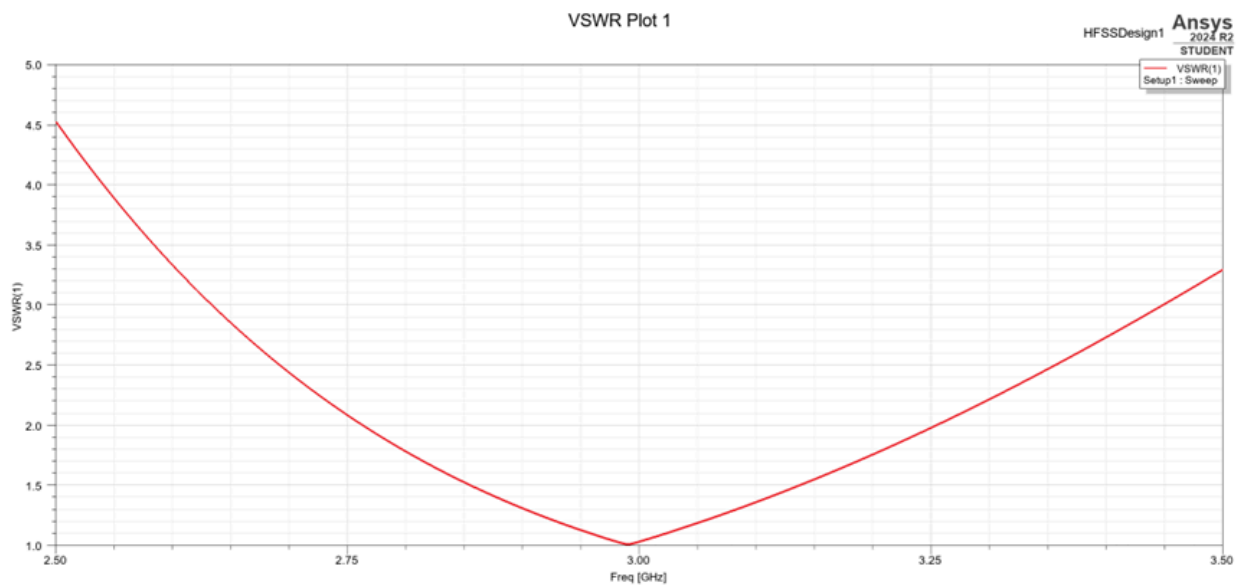
因此，该半波偶极子天线工作时，应尽量使其工作频率在 3GHz 左右，使其性能最佳。

4.2 电压驻波比

右键单击工程树下的 **Results** 节点，在菜单中选择 **Create Model Solution Data Report—Rectangle Plot** 命令，打开报告设置对话框，按下图设置：



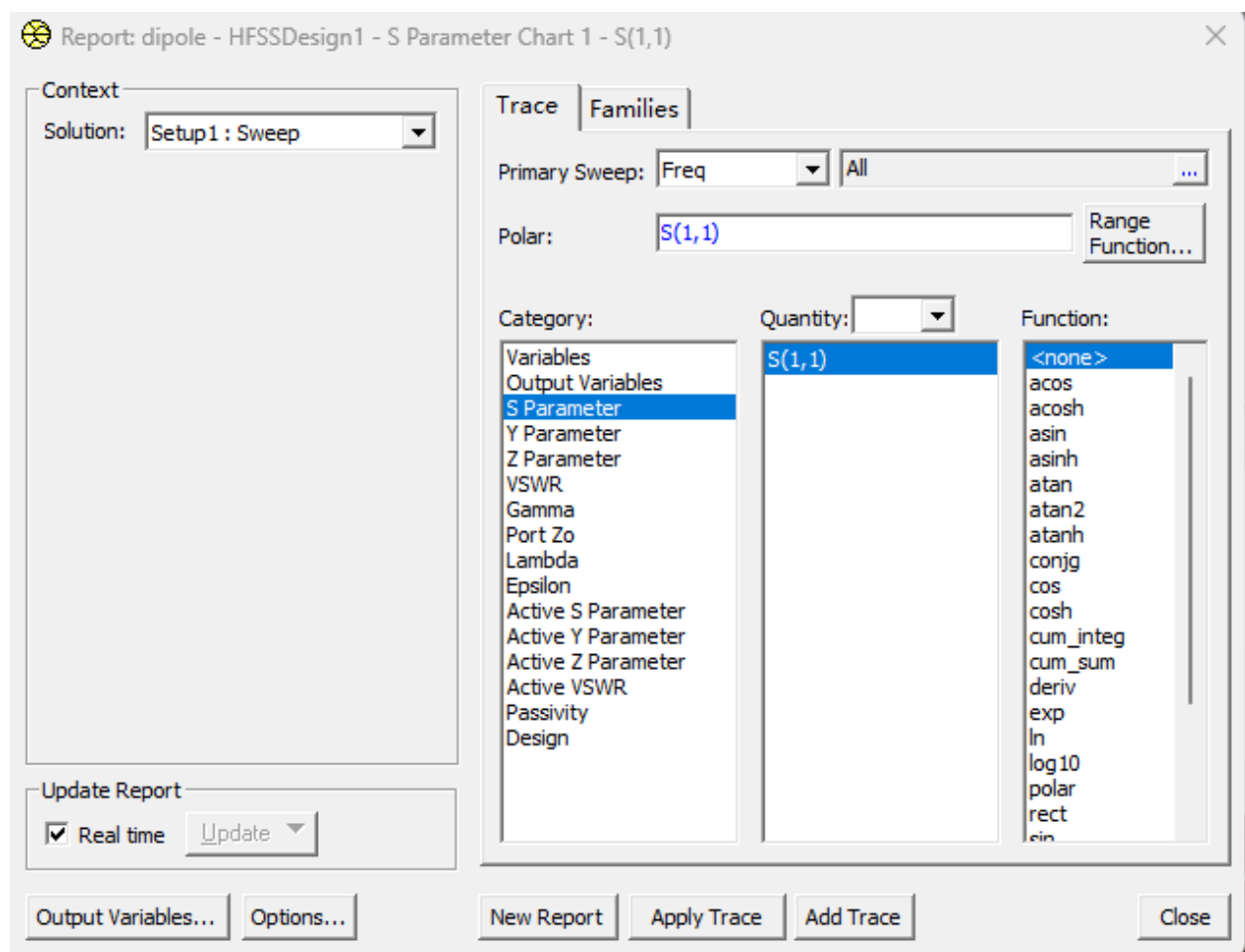
单击 **New Report**，得到天线的驻波比分析结果：



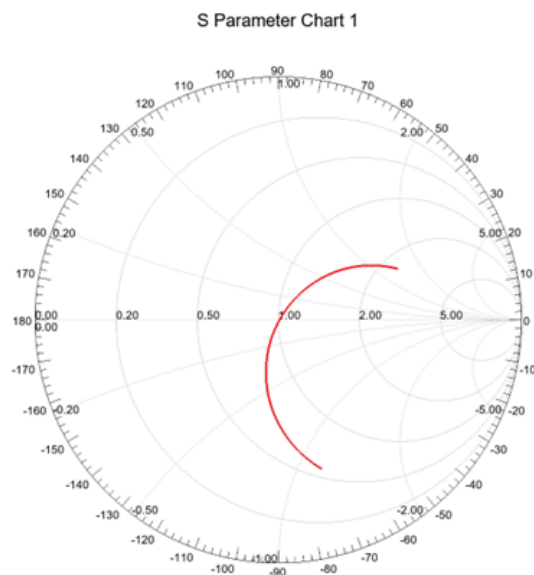
当理想情况下阻抗完全匹配时，驻波比的值是 1；由于反射的存在，工程中驻波比是大于 1 的，反射越大时驻波比也越大。通过仿真结果，我们可以看出，当该天线工作频率 $3GHz$ 附近，其驻波比近乎为 1，说明其充分满足指标。

4.3 Smith圆图

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—Smith Chart**，打开如下对话框，进行设置：



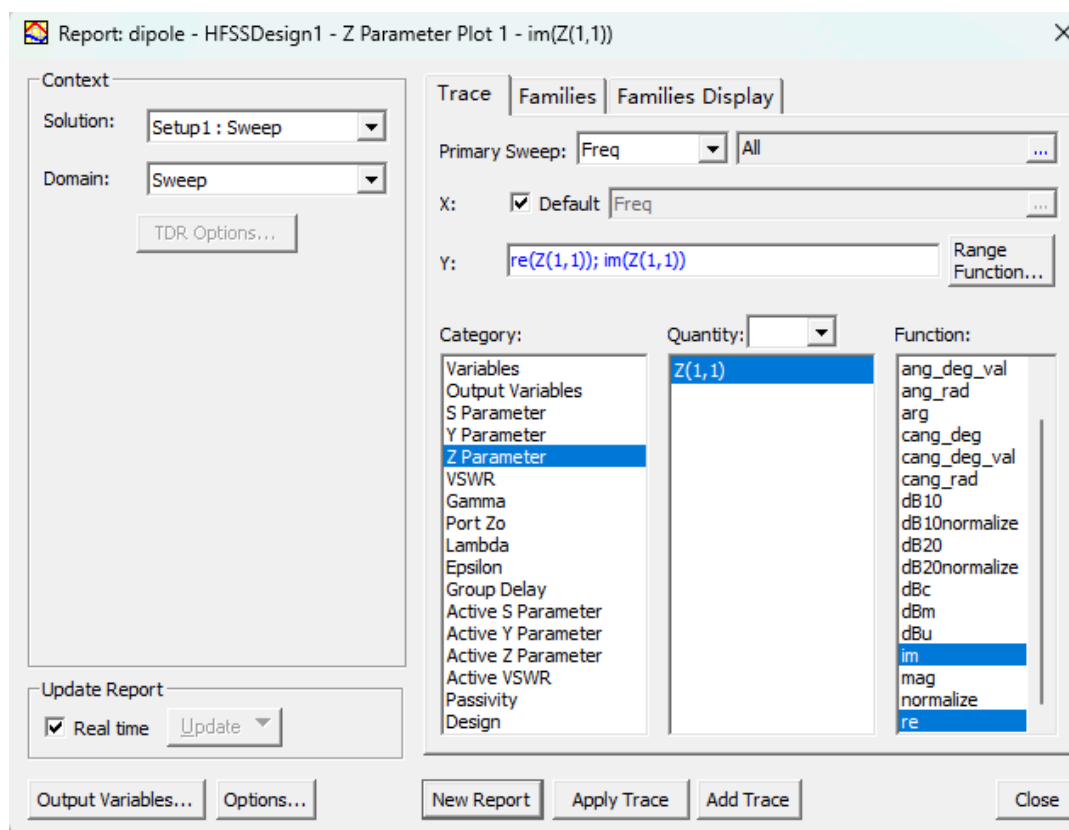
单击 **New Report**，得到天线的Smith圆图分析结果：



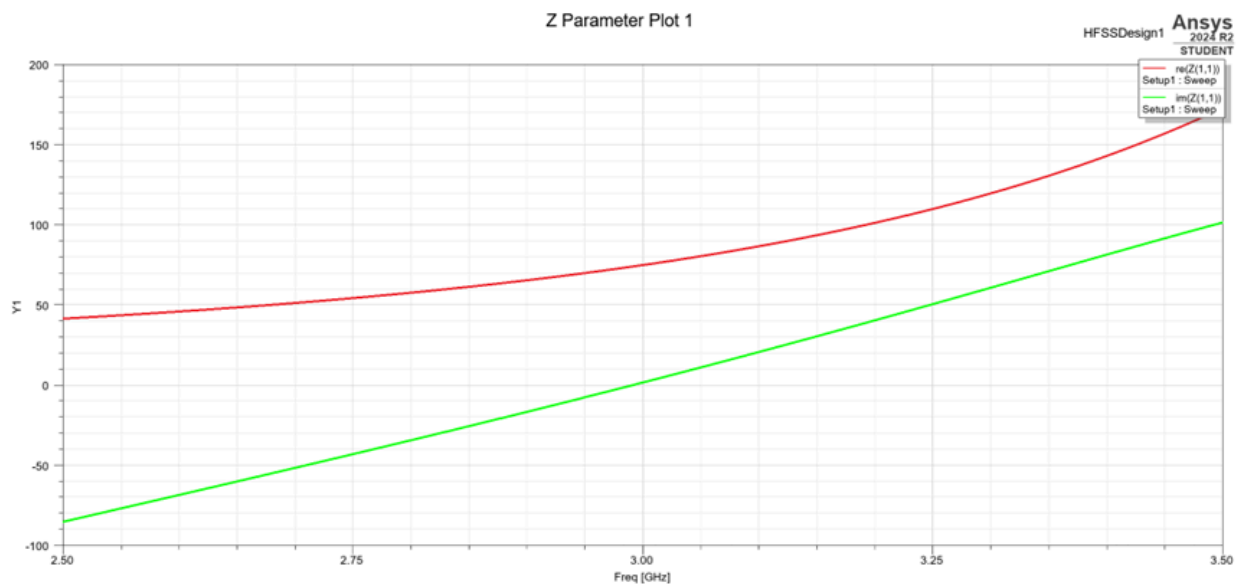
当中心频率为 $3GHz$ 时，天线的反射系数约为 0，归一化阻抗约为 1，此时处于阻抗匹配状态；当频率小于 $3GHz$ 时，Smith 圆图位于下半圆区，天线呈容性；当频率大于 $3GHz$ 时，Smith 圆图位于上半圆区，天线呈感性。仿真结果与理论预期相符合。

4.4 输入阻抗

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，如下设置：



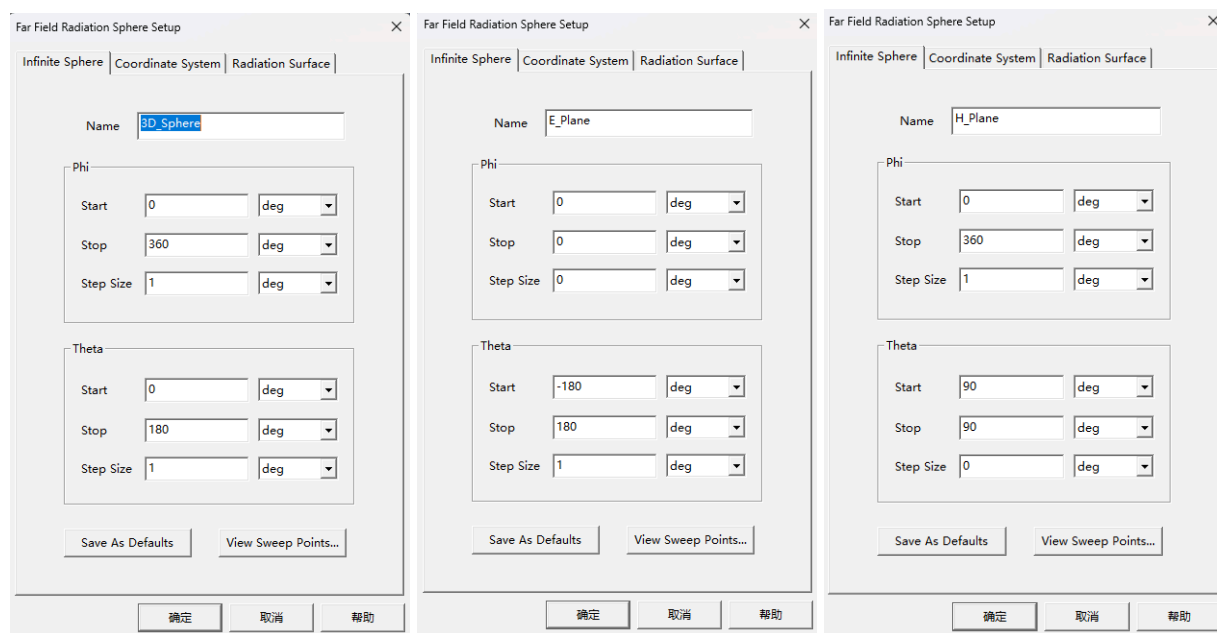
单击 **New Report**，得到天线的输入阻抗结果报告：



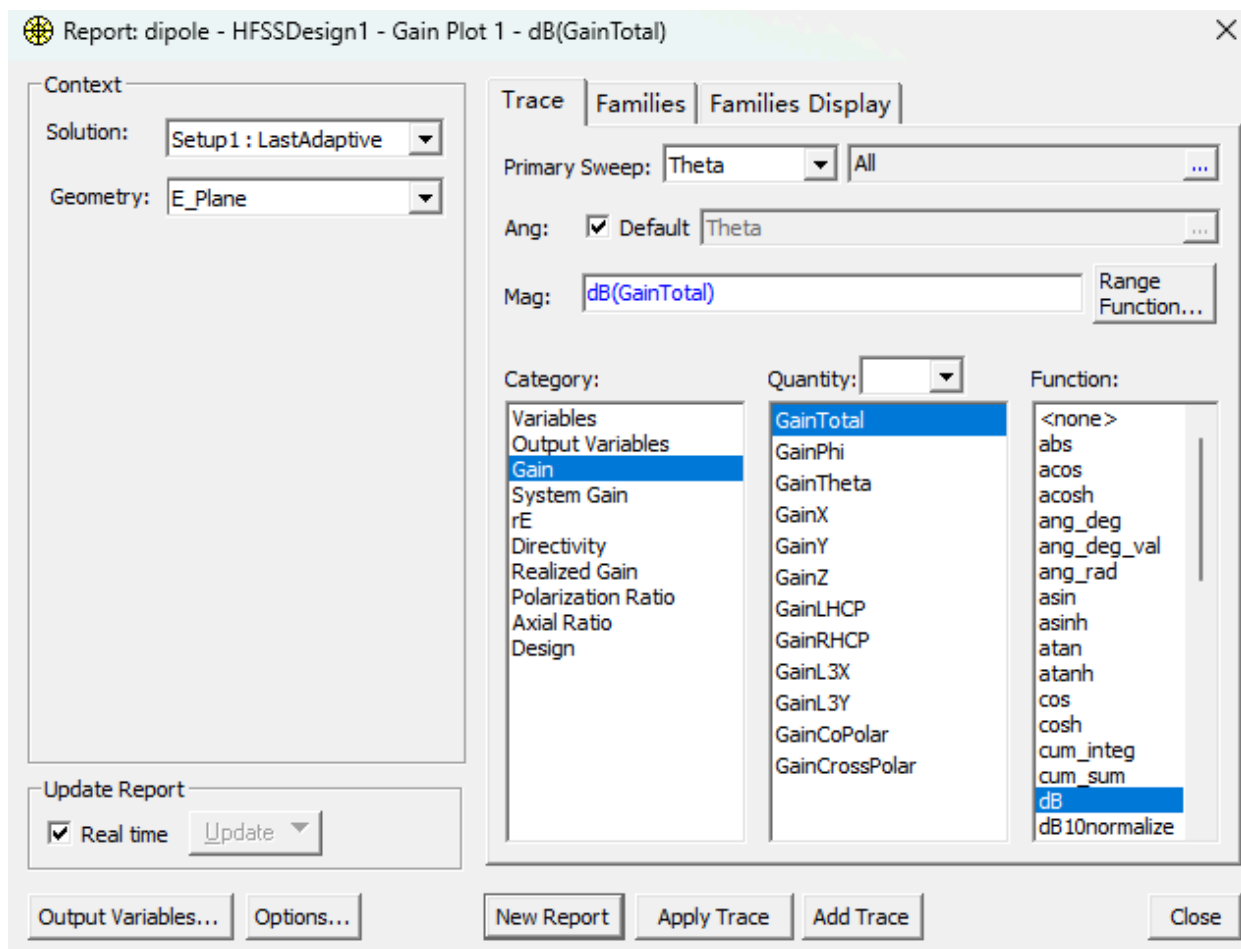
由仿真结果可知，当工作频率为 3GHz 左右时，天线的阻抗实部接近 73.2Ω ，虚部近似为零；当频率小于 3GHz 时，天线电抗为负，呈容性；当频率大于 3GHz 时，天线电抗为正，呈感性。随着工作频率的增加，半波偶极子天线的阻抗实部也不断增加。仿真结果与理论分析相一致。

4.5 辐射特性

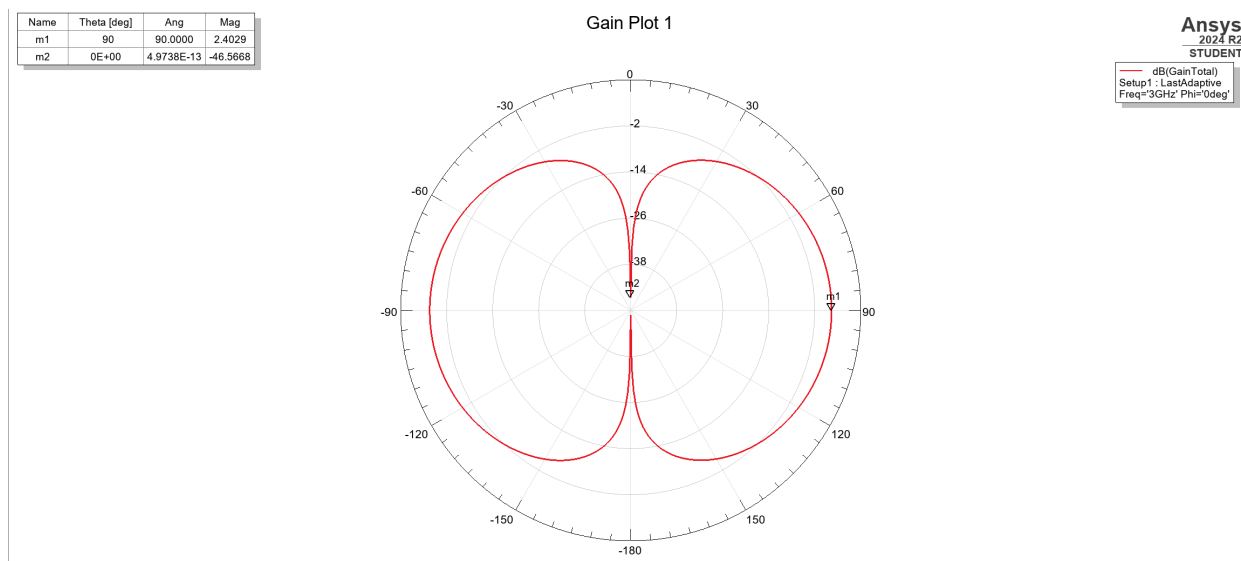
(1) 定义辐射表面：右键单击工程树下的 **Radiation** 节点，在弹出的快捷菜单中选择 **Insert Far Field Setup—Infinite Sphere**，打开 **Far Radiation Sphere Setup**，依次完成以下设置；



(2) 右键单击工程树下的 **Results** 节点，在弹出的菜单中选择 **Create Far Fields Report—Radiation Pattern** 命令，如下设置对话框：

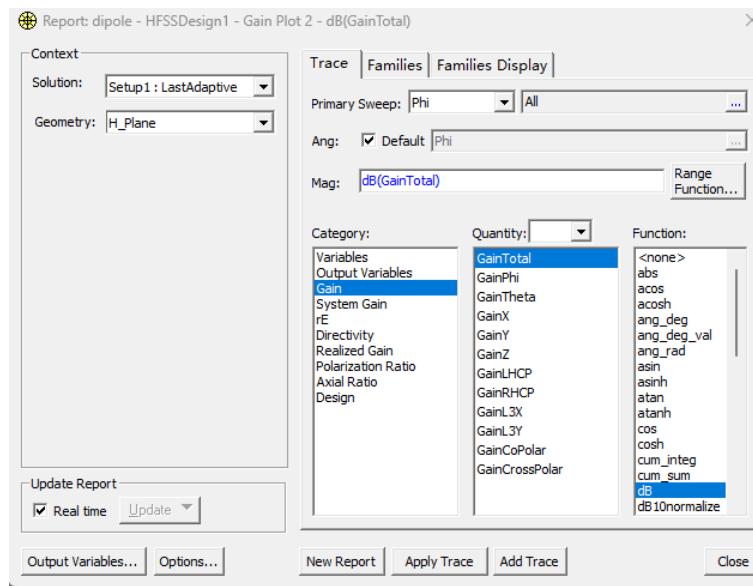


点击 **New Report** 按钮，生成极坐标系下天线的 xz 面增益方向图，如图所示：

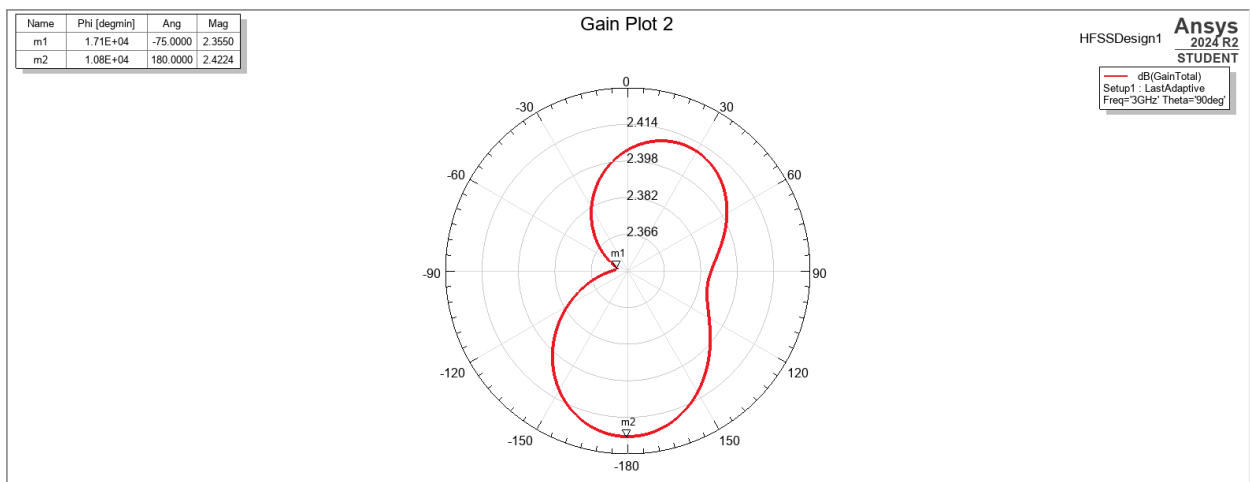


从图中可以看出，在 $\phi = 90^\circ$ 时，偶极子天线并没有明显的方向性，同时，最大增益为 2.2029dB ，最小增益为 -46.5668dB 。

(3) 右键单击工程树下的 **Results** 节点，在弹出的菜单中选择 **Create Far Fields Report—Radiation Pattern** 命令，如下设置对话框：

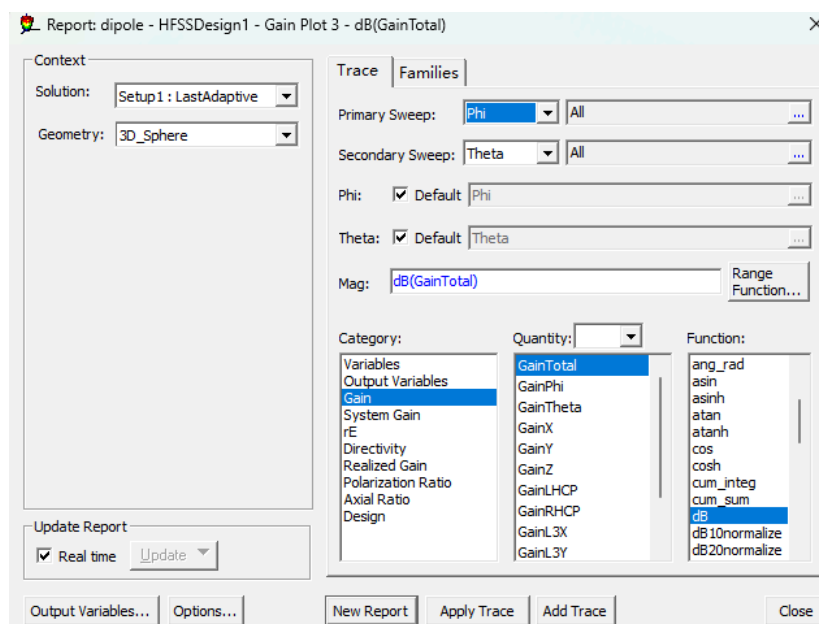


点击 **New Report** 按钮，生成天线的 xy 面增益方向图，如图所示：

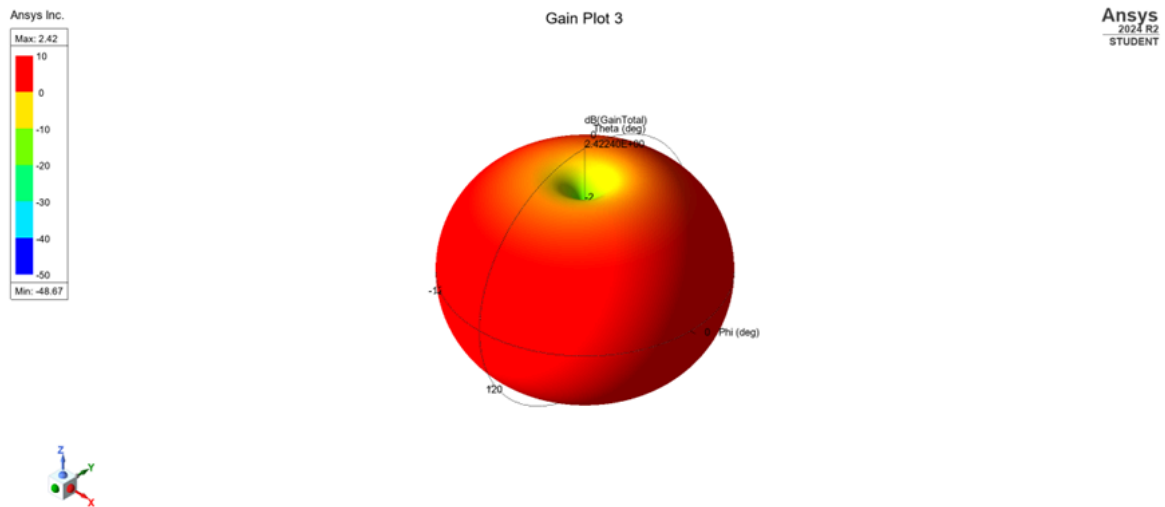


增益在 $2.355 - 2.422\text{dB}$ 之间。

(4) 右键单击工程树下的 **Results** 节点，在弹出的菜单中选择 **Create Far Fields Report —3D Polar Plot** 命令，如下设置对话框：



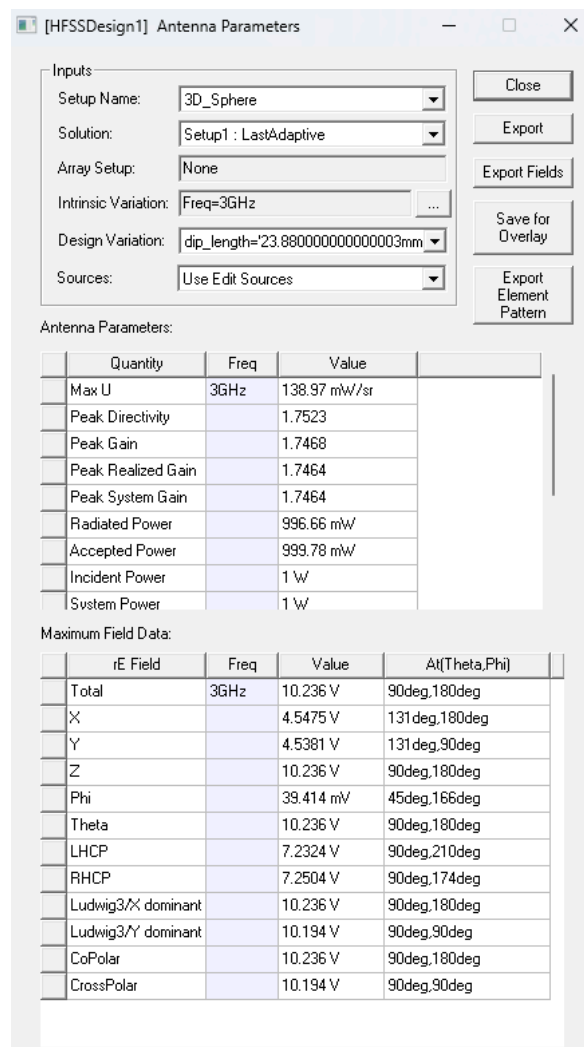
点击 **New Report** 按钮，生成如下结果：



综合仿真结果，天线增益在 $\phi = \pi$ $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时取到最大值，仿真结果与理论分析一致。

4.6 其他参数

展开工程树下的 **Radiation** 节点，右键单击 **3D_Sphere**，在弹出的菜单中选择 **Compute Antenna Parameters** 命令，可以得到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，如图所示：



由图可知，半波偶极子天线在工作频率 $3GHz$ 时的方向性系数为 1.7623，增益为 1.7468，辐射功率为 $0.9966W$ ，辐射效率为 99.67%。

5 实验心得体会

在本次 HFSS 仿真作业中，我对半波偶极子天线的设计和分析有了深入的了解，尤其是在回波损耗、电压驻波比、Smith 圆图和辐射方向图等天线性能指标的分析中受益匪浅。通过设置端口激励和辐射边界条件，我逐步掌握了 HFSS 的操作流程。然而，在初期仿真中，由于对天线长度和端口类型的设定出现错误，回波损耗曲线出现异常，阻抗匹配效果不理想。经过对比 PPT 中天线的几何尺寸和端口设置，最终优化了天线的阻抗匹配和辐射性能。这次仿真我不仅熟悉了 HFSS 软件的功能，还提高了天线设计和优化的能力。