

天线理论与设计：仿真作业 1

—— HFSS 的安装与使用

3190102060

黄嘉欣

一、半波偶极子天线原理

① 电流分布

对于从中心馈电的偶极子，其两端开路，故此处电流为 0。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，则长度为 l 的偶极子天线的电流分布为：

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

其中， I_m 为波腹电流， k 为波数。对半波偶极子而言， $l = \frac{\lambda}{4}$ ，则其电流分布为：

$$I(z) = I_m \sin\left(\frac{\pi}{2} - kz\right) = I_m \cos(kz)$$

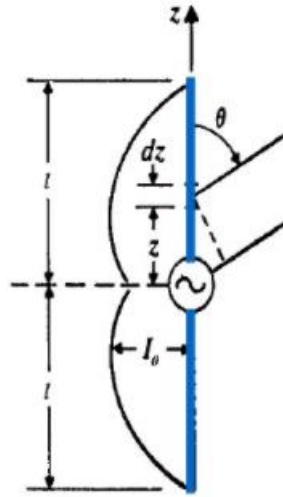


图 1.1 偶极子天线电流分布示意图

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，得：

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

加上方向特性，可得半波偶极子天线的远区辐射电场为：

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

其中，

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

称为半波偶极子天线的方向性函数。

由相关公式，可以计算出半波偶极子天线的方向性系数为：

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left[\frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos\theta)}{\sin\theta} \right]^2 \sin\theta \, d\theta d\varphi} = 1.64 = 2.15dB$$

③ 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：

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

半波偶极子天线的辐射功率为：

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

用 R_r 表示辐射电阻，有：

$$P_r = 36.6I_m^2 = 0.5I_m^2 R_r$$

求得：

$$R_r = 73.2\Omega$$

④ 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 0。对于半波偶极子天线而言，输入阻抗近似看为辐射电阻 $R_r = 73.2\Omega$ 。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。

二、半波偶极子天线的 HFSS 仿真设计

① 新建设计工程

1) 运行 HFSS 并新建工程，将工程文件另存为 dipole.aedt，如图所示：

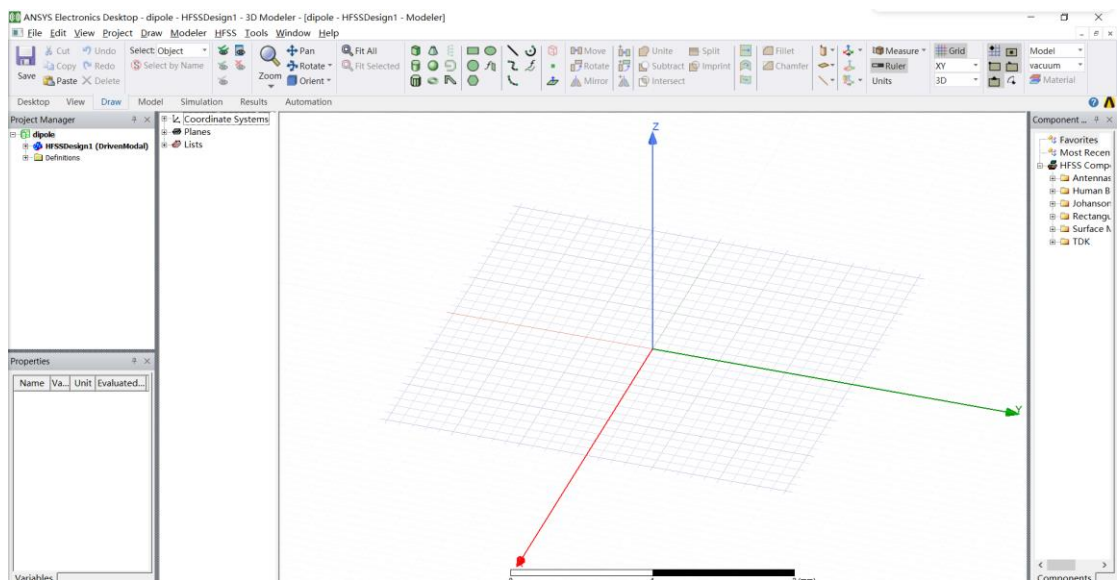


图 2.1.1 新建 HFSS 工程

- 2) 设置求解类型，在主菜单栏中选择 HFSS—Solution Type,在弹出窗口中选择 Modal，单击 OK，完成设置，如图：

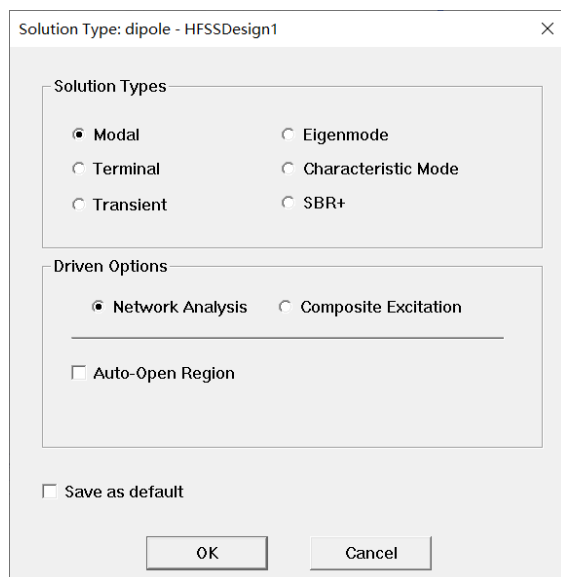


图 2.1.2 设置求解类型

- 3) 设置模型长度单位，在主菜单栏中选择 Modeler—Units，选择 mm，如图所示：

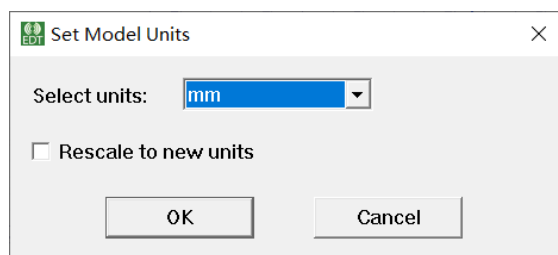


图 2.1.3 设置模型长度单位

② 添加和定义设计变量

- 1) 在主菜单栏中选择 HFSS—Design Properties，打开涉及属性对话框，单击 Add 按钮，打开 Add Property 对话框，在 name 一栏填写 lambda，初始值为 100mm，然后单击 ok，如图：

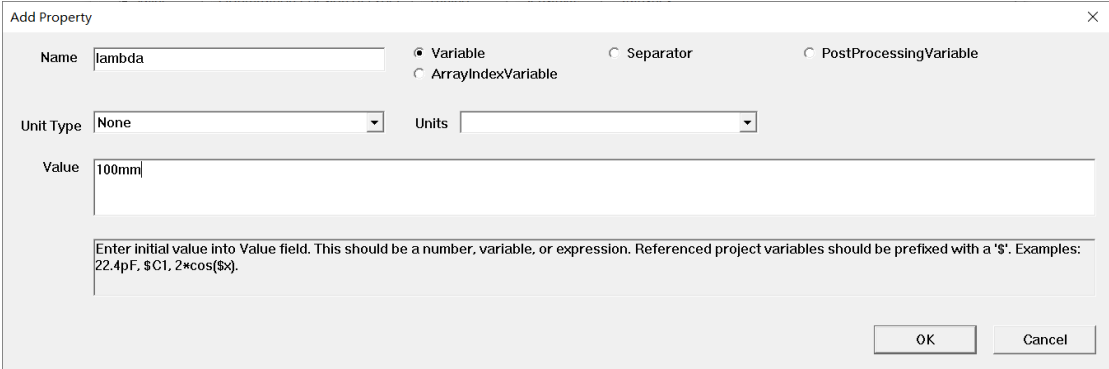


图 2.2.1 定义 lambda

- 2) 依次定义变量 length，初始值为 $0.48 \times \text{lambda}$ ；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 $\text{dip_length} + \text{gap}/2 + \text{lambda}/10$ ，点击确定，如下图所示：

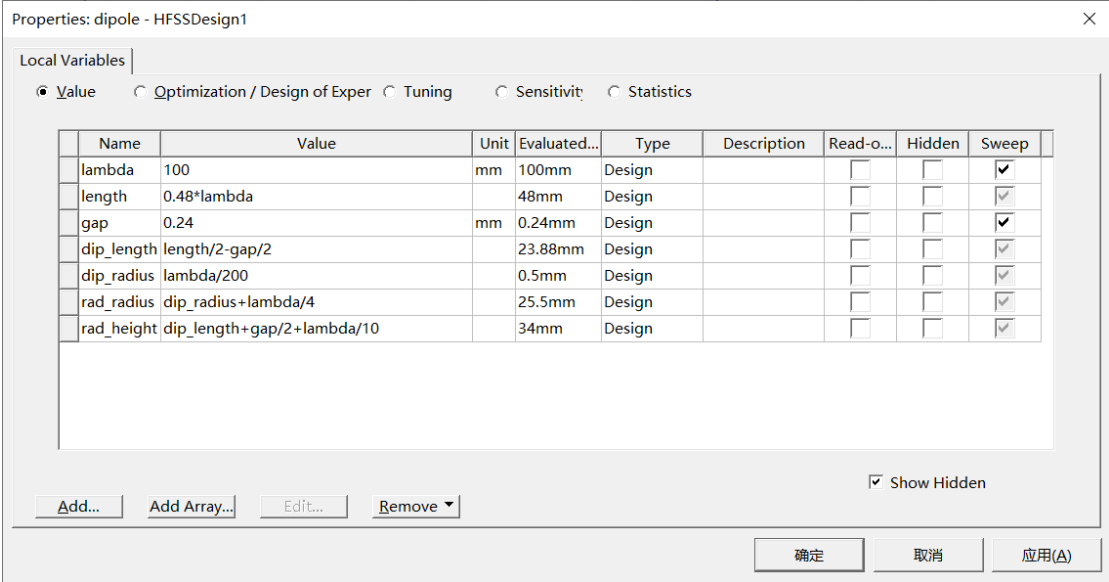


图 2.2.2 依次定义变量

③ 生成天线

- 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，

默认名为 Cylinder1，如图：

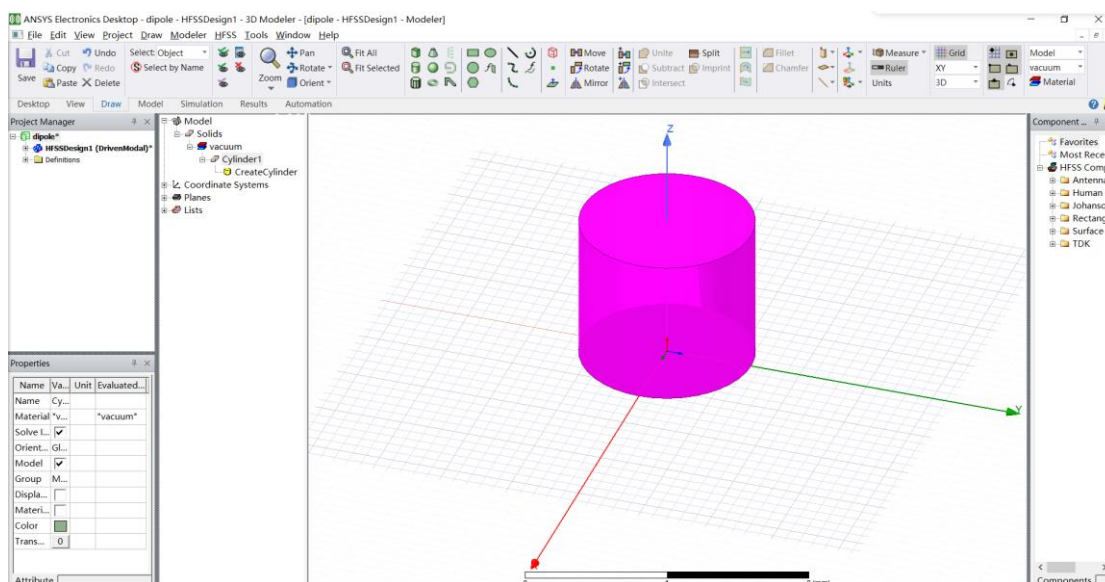


图 2.3.1 创建圆柱体

- 2) 双击操作历史树中 Solids 下的 Cylinder1 节点，将圆柱体名称设置为 Dipole，材质为 pec，如图：

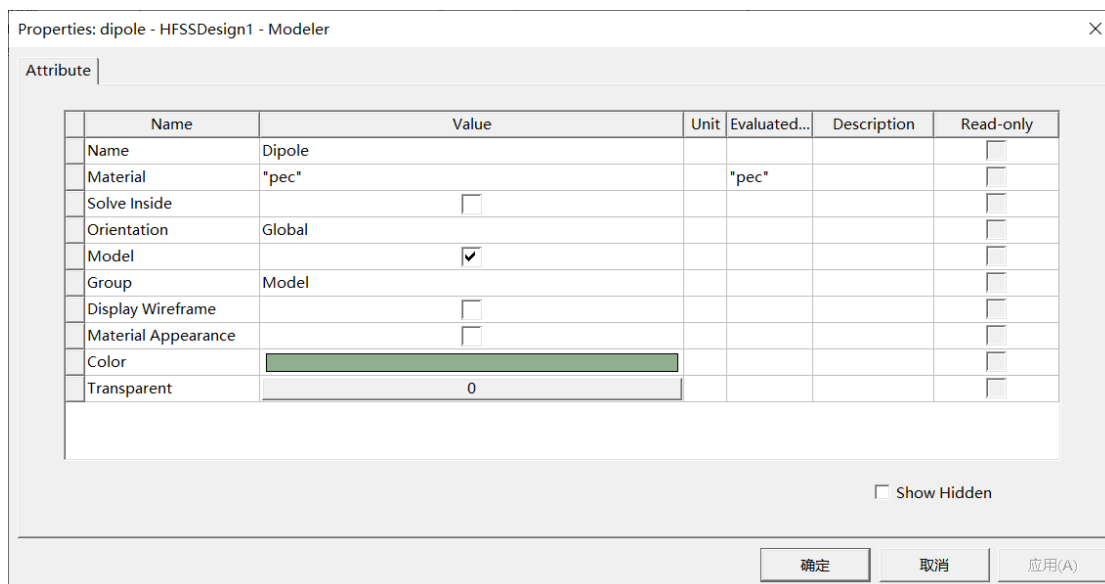


图 2.3.2 设置圆柱体材质

- 3) 双击操作历史树下 Dipole 下的 CreateCylinder 节点，打开新建圆柱体属性对话框的 Command 选项卡，在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，点击确定，完成圆柱体 Dipole 的创建，如图所示：

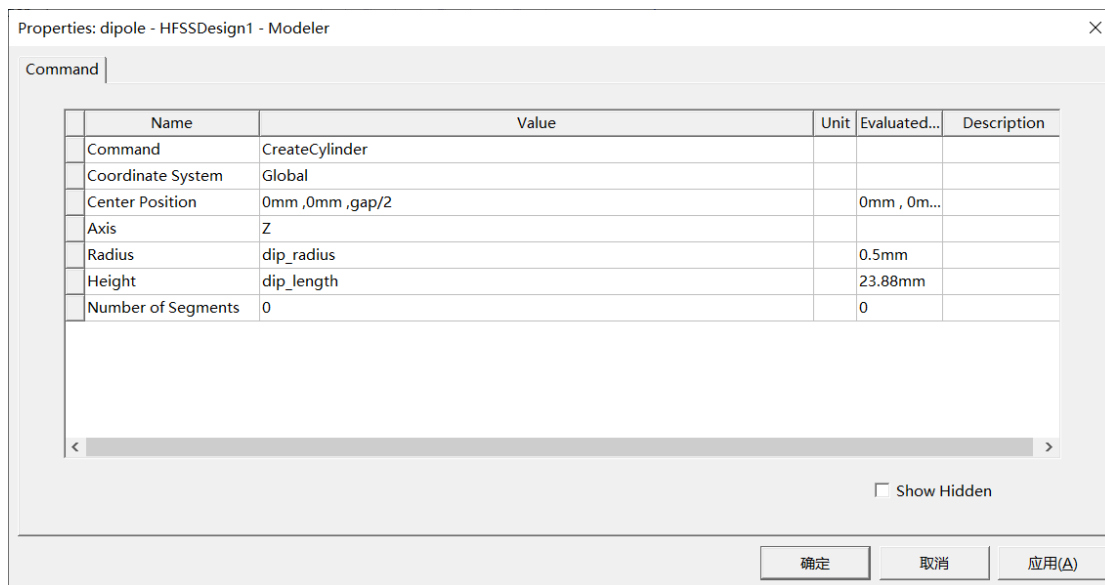


图 2.3.3 设置圆柱体属性

- 4) 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。在打开的对话框中将 **Axis** 设置为 **x** 轴，将 **Angle** 设置为 **180deg**，并在 **Total number** 数值框中输入 **2**，单击 **OK**，如图：

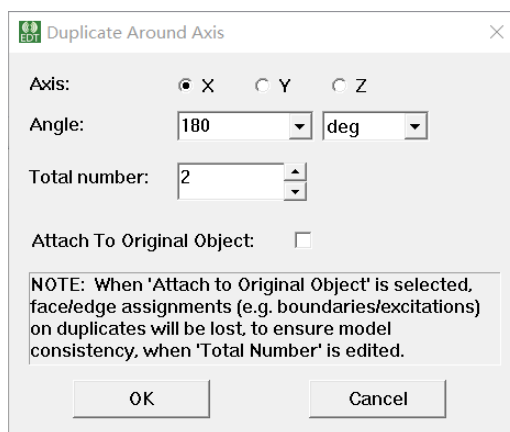


图 2.3.4.1 沿坐标轴复制圆柱体

此时生成的天线如图所示：

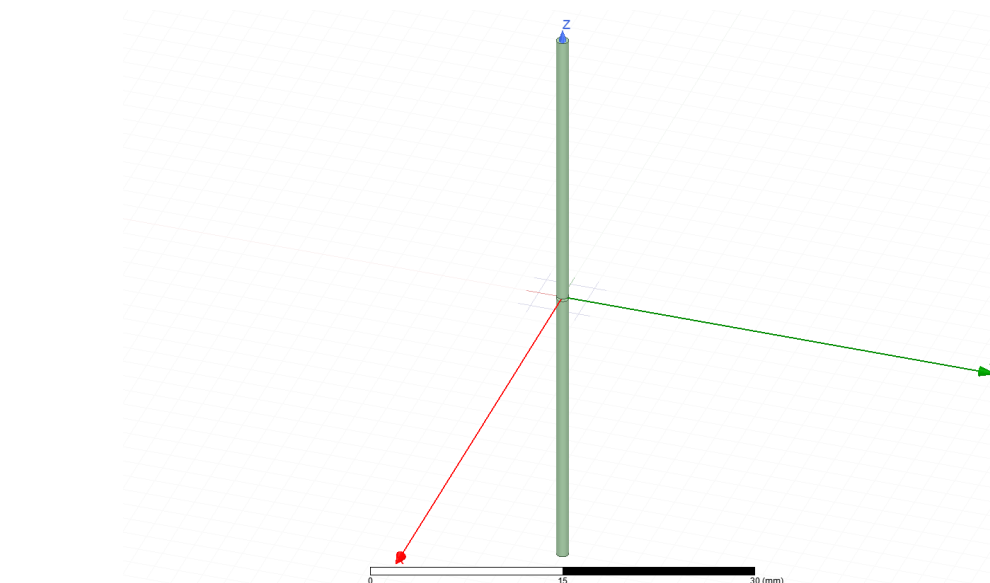


图 2.3.4.2 偶极子天线

④ 设置端口激励

为了在中心位置馈电，我们需要在偶极子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。矩形的顶点坐标应设为 $(0, -\text{dip_radius}, -\text{gap}/2)$ ，长度和宽度分别为 $2*\text{dip_radius}$ 和 gap 。

- 1) 单击工具栏上的 XY 下拉菜单列表框，选择 YZ 选项，将当前工作面设置为 yz 平面，如图：

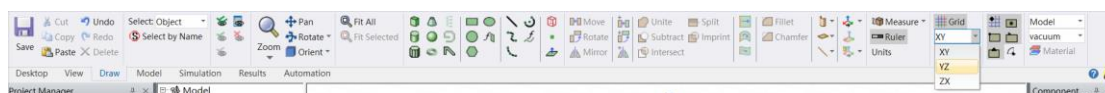


图 2.4.1 设置工作平面

- 2) 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，其默认名称为 **Rectangle1**，如图所示：

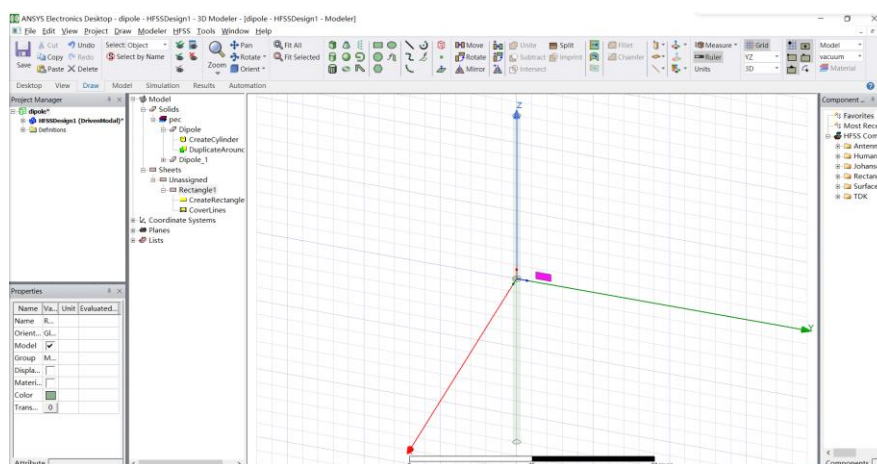


图 2.4.2 创建矩形

- 3) 双击操作历史树 **Sheets** 下的 **Rectangle1** 节点，打开新建矩形面属性对话框，将矩形面的名称设置为 **Port**，如图：

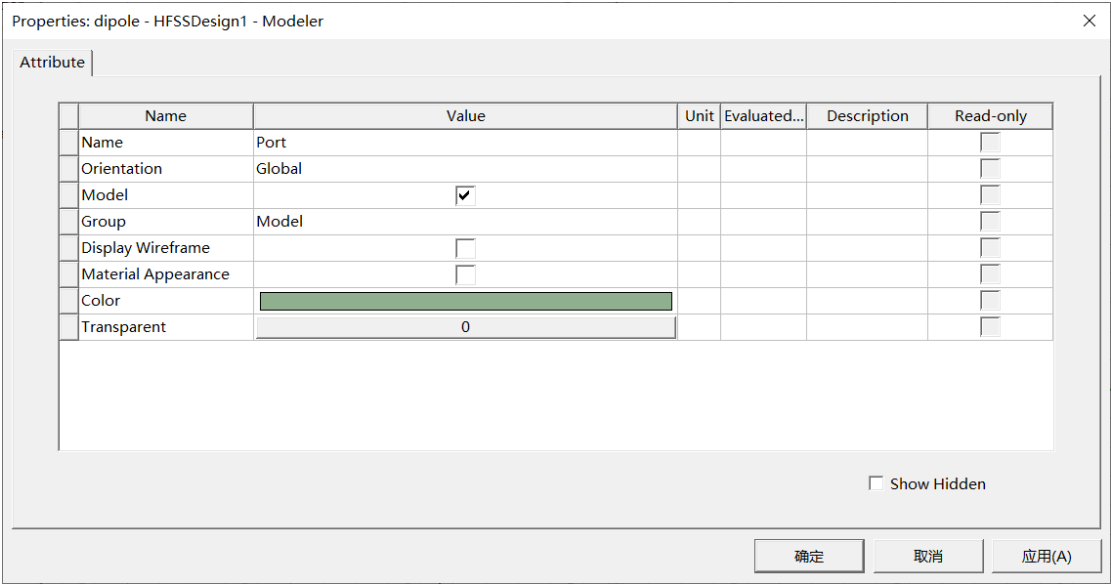


图 2.4.3 设置矩形名称

- 4) 双击操作历史树 **Port** 下的 **CreateRectangle** 节点，打开新建矩形面属性对话框的 **Command** 选项卡，在选项卡中设置举行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 $2 \times \text{dip_radius}$ 和 **gap**，点击确定，如图所示：

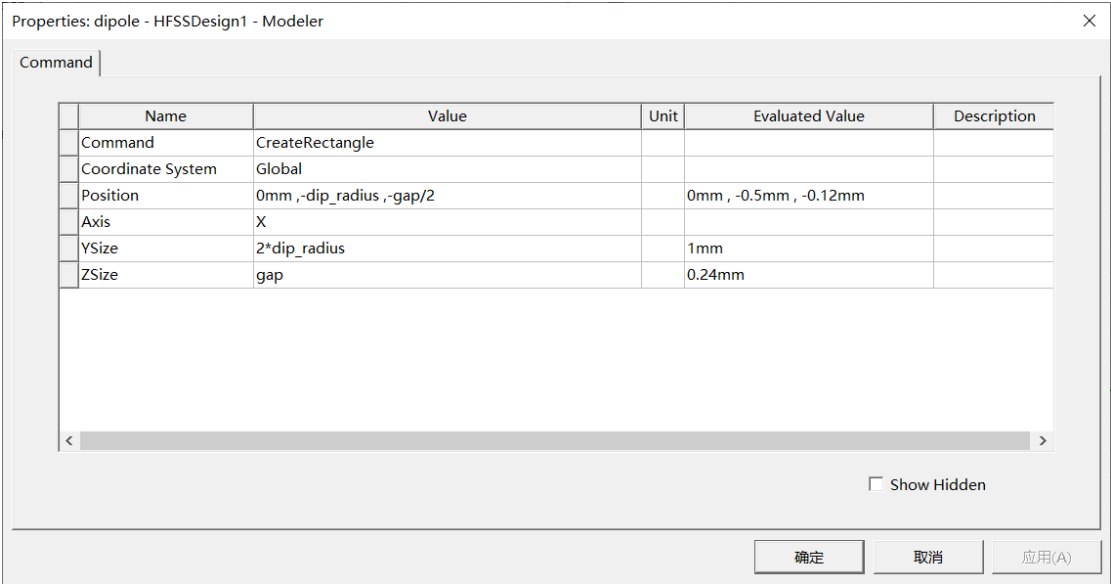


图 2.4.4 设置端口属性

- 5) 设置矩形面激励方式为集总端口激励，在操作历史树的 **Sheets** 节点下选中该矩形面，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选中 **Assign Excitaiton—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：

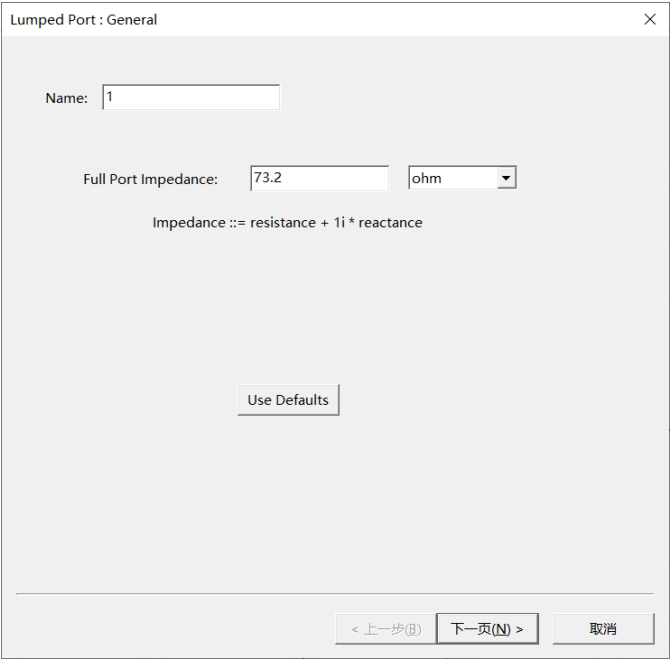


图 2.4.5.1 激励设置(1)

在 **Modes** 对话框中单击 **Integration Line** 列下的 **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** 对话框中选择 **Do Not Renormalize**，单击完成：

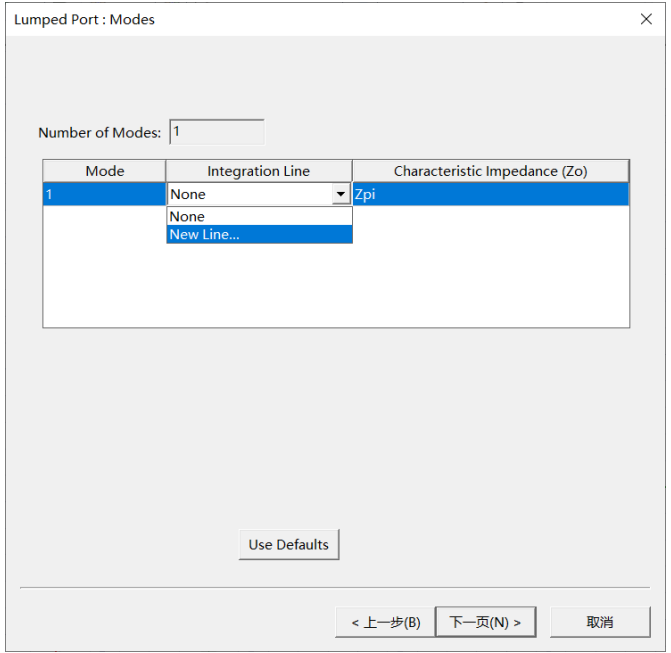


图 2.4.5.2 激励设置(2)

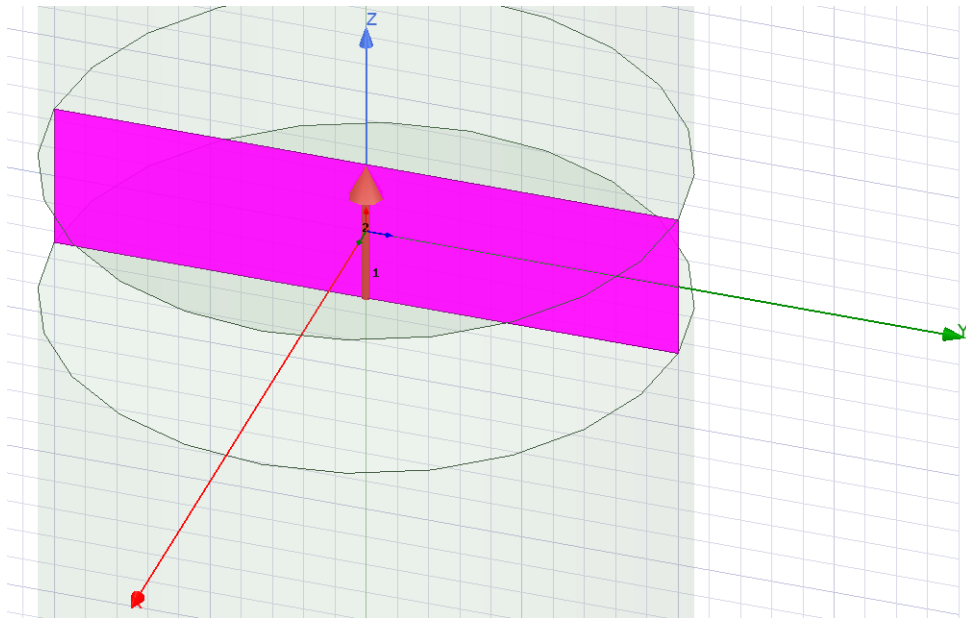


图 2.4.5.3 激励设置(3)

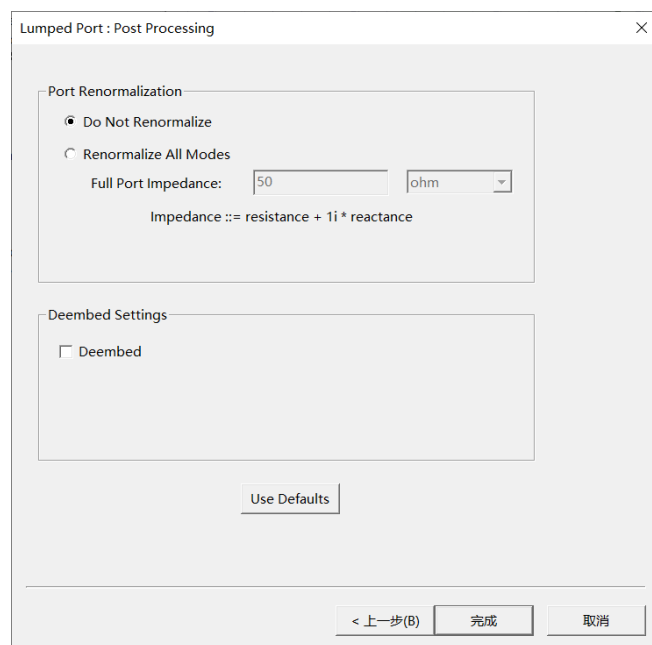


图 2.4.5.4 激励设置(4)

⑤ 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，双击操作历史树下 Cylinder1，打开属性对话框，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：

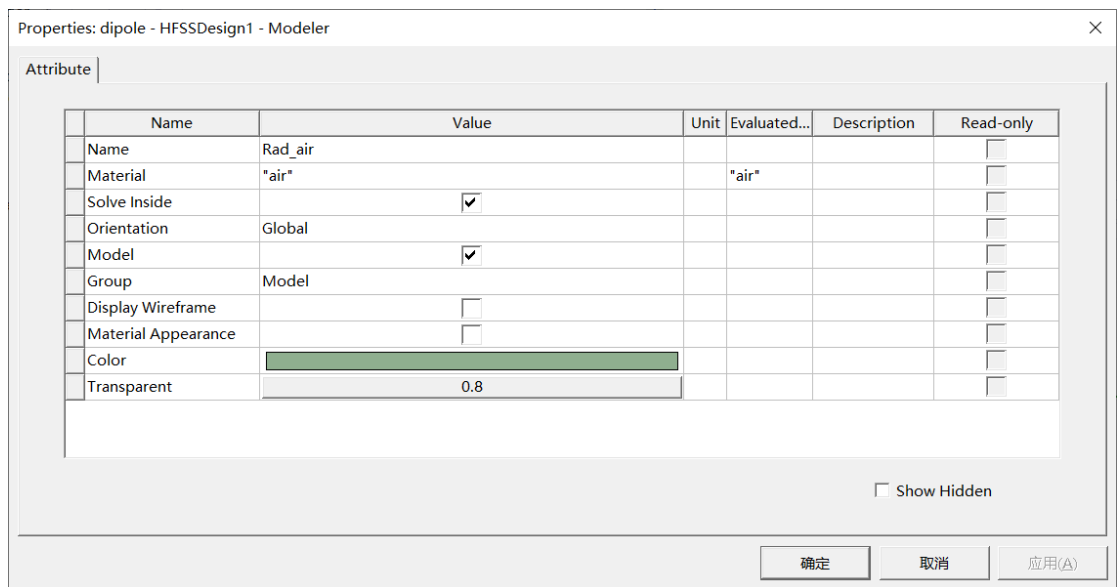


图 2.5.1 设置圆柱体材质

- 3) 双击操作历史树中 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，具体数值如下图所示：

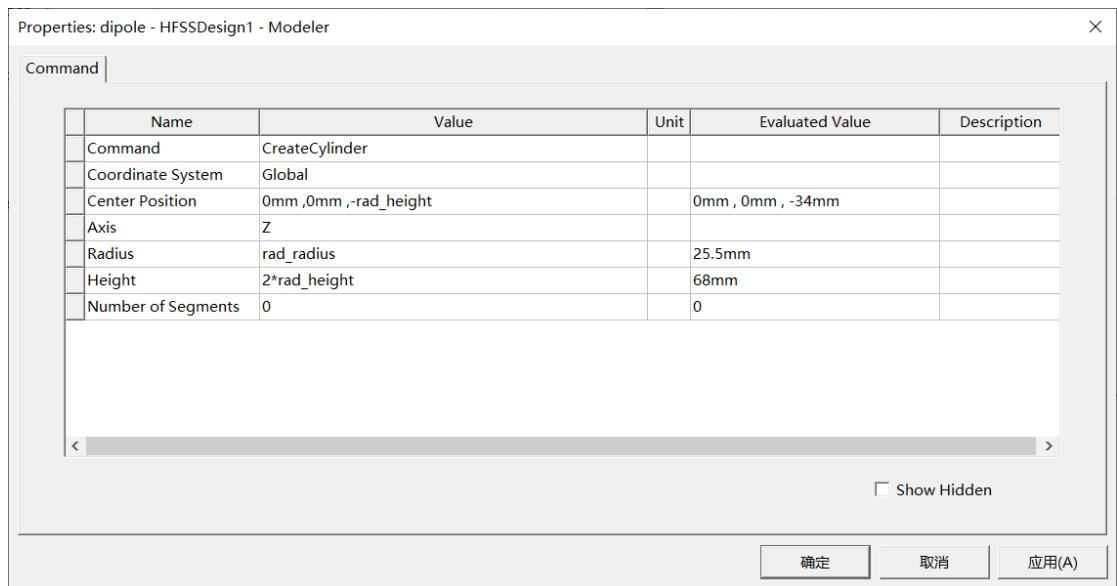


图 2.5.2 设置圆柱体属性

- 4) 在操作历史树下单击 Rad_air 节点，选中该圆柱体模型，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，保留默认设置，从而将 Rad_air 的表面设置为辐射边界条件，如图：

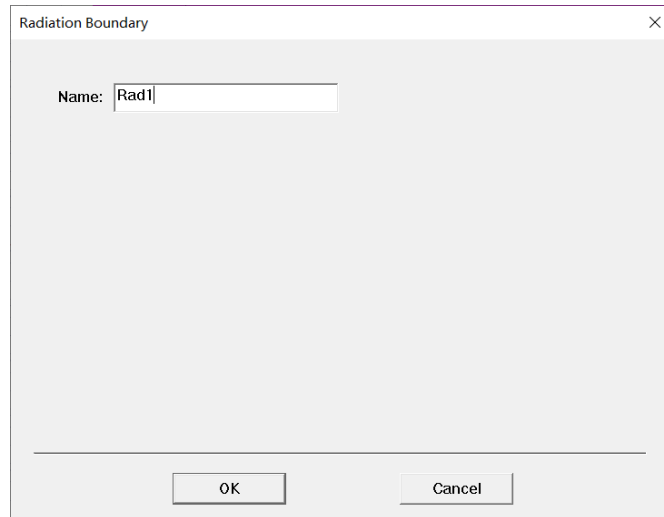


图 2.5.3 辐射边界条件设置

⑥ 求解设置

- 1) 求解频率和网格剖分设置，右键单击工程树下的 **Analysis**，在弹出的对话框中选中 **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：

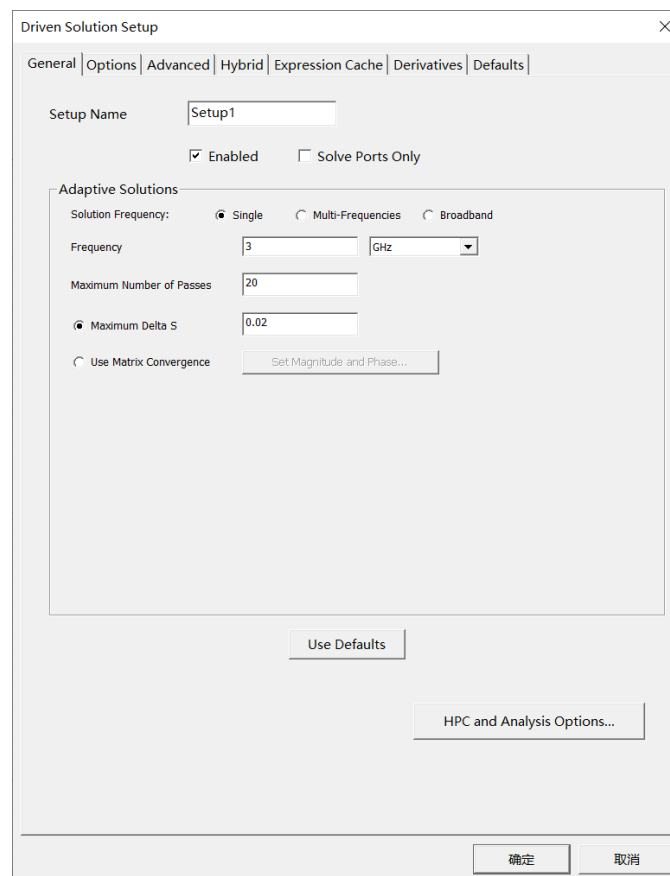


图 2.6.1 求解频率和网格剖分设置

2) 扫频设置，展开工程属下的 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，将扫频类型选择为快速扫频，扫频范围为 2.5GHz – 3.5GHz，点数为 1000，如图所示：

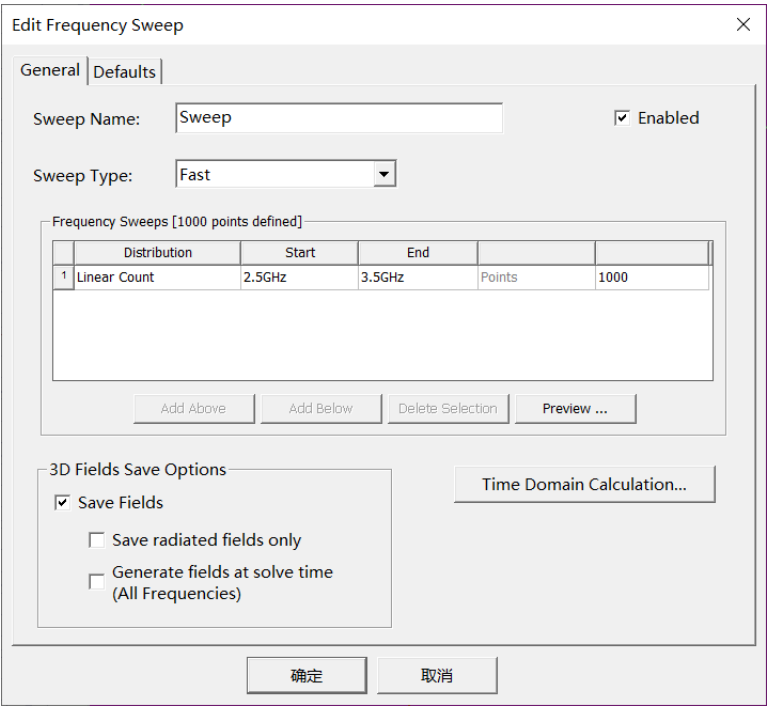


图 2.6.2 扫频设置

⑦ 设计检查

选择主菜单中 HFSS—Validation Check，得到如下对话框，表面设计正确：

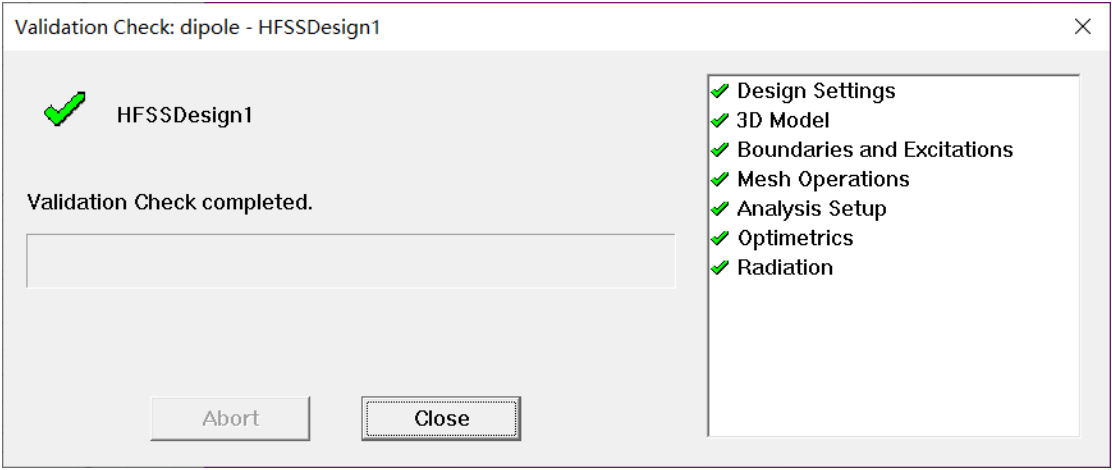


图 2.7.1 设计检查

三、HFSS 天线问题的数据后处理

在得到结果之前，需要先右键单击工程树下的 Analysis—Setup1，在弹出菜单中选择 Analyze，运行分析。

① 回波损耗

- 1) 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：

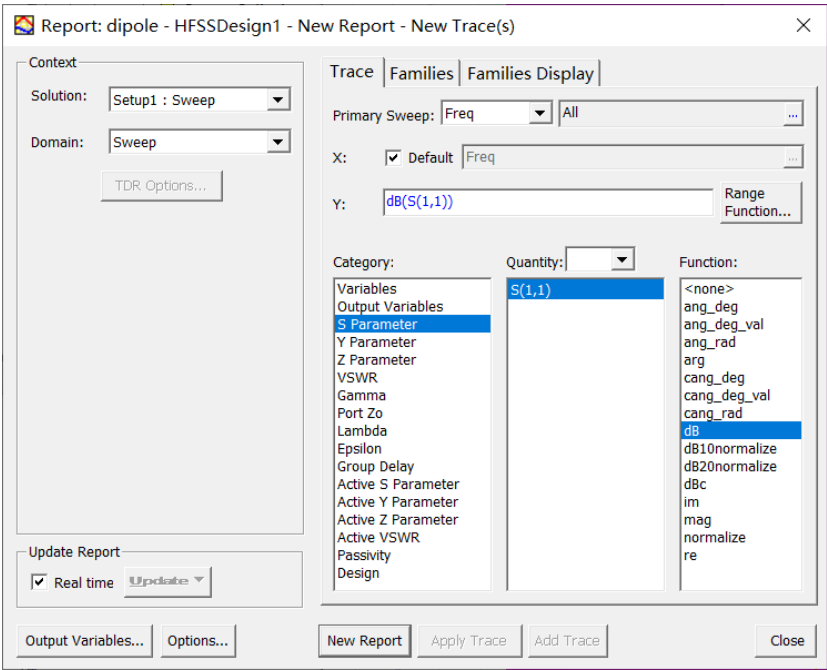


图 3.1.1 报告设置对话框

- 2) 单击 New Report 按钮，再单击 Close 按钮，此时可以生成2.5GHz – 3.5GHz频段内的回波损耗 S_{11} 分析结果，如图：

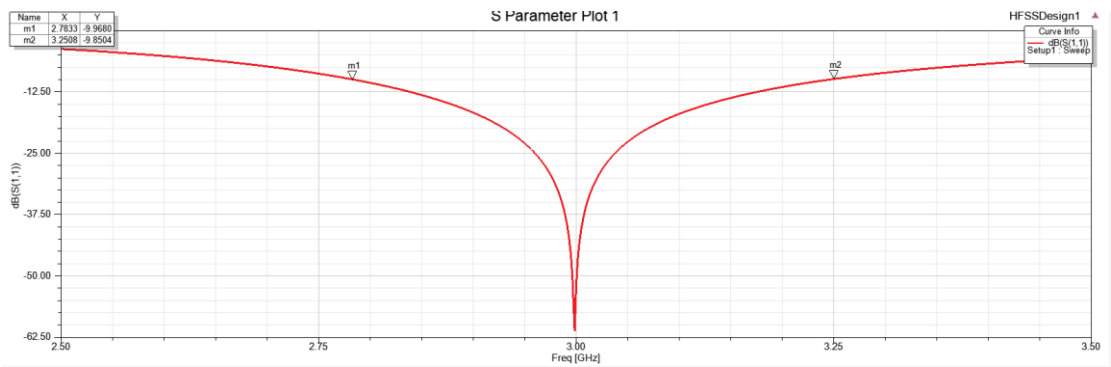


图 3.1.2 回波损耗 S_{11} 分析结果

- 3) 结果分析：由仿真结果可知，半波偶极子天线在2.78GHz – 3.25GHz之间的回波损耗 S_{11} 小于-10dB，此时天线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-61.25dB，此时其性能最佳。由此可知天线 $S_{11} < -10\text{dB}$ 的相对带宽 $BW = \frac{3.25-2.78}{3} = 15.6\%$ 。综上，对于此尺寸参

数的半波偶极子天线，应尽量使其工作在 3GHz 左右，以获得更高的效益。

② 电压驻波比

- 1) 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；
- 2) 按下图设置，单击 New Report，再单击 Close，得到天线的驻波比分析结果：

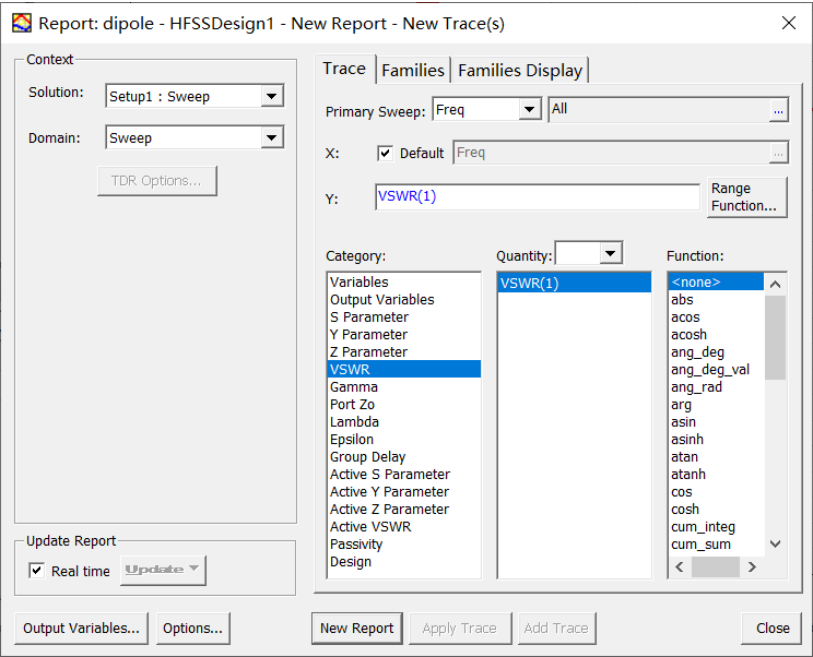


图 3.2.1 报告设置对话框

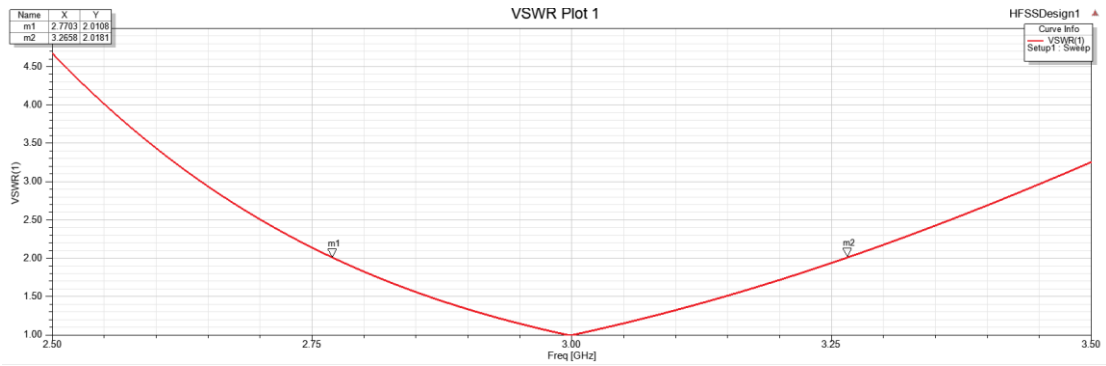


图 3.2.2 电压驻波比分析结果

- 3) 结果分析：由仿真结果可知，半波偶极子天线在 $2.77\text{GHz} - 3.26\text{GHz}$ 之间的电压驻波比 VSWR 小于 2，此时天线反射较小，有较好的工作性能；当工作频率为 3.00GHz 左右时，天线的驻波比为 1，此时反射波波幅与入射波波幅相等，阻抗完全匹配，天线性能最好，此与回波损耗的分析结果是相一致的。因此，对于此尺寸参数的偶极子

天线，应尽量使其工作在 3GHz 左右。

③ Smith 圆图

- 1) 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：

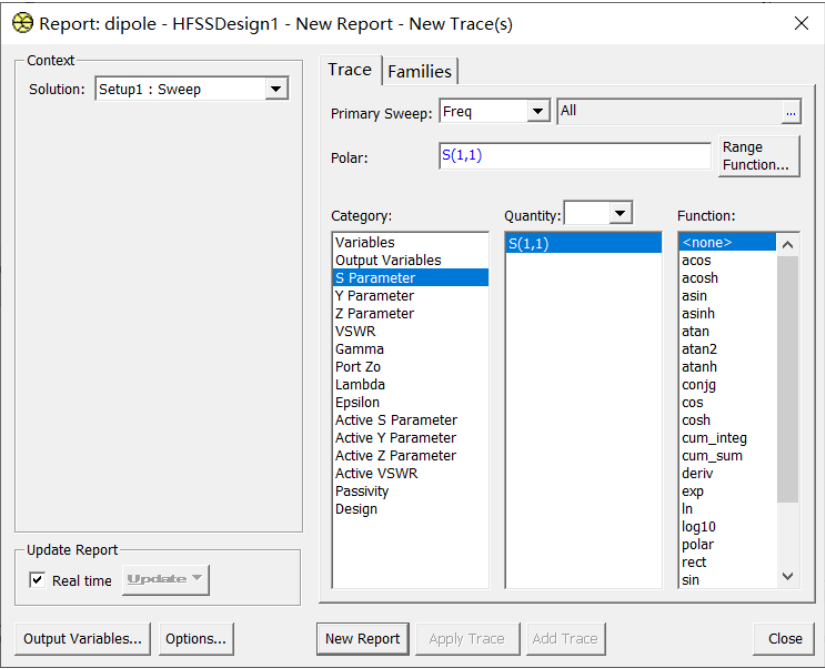


图 3.3.1 报告设置对话框

- 2) 单击 New Report，再单击 Close，得到天线的 Smith 圆图分析结果：

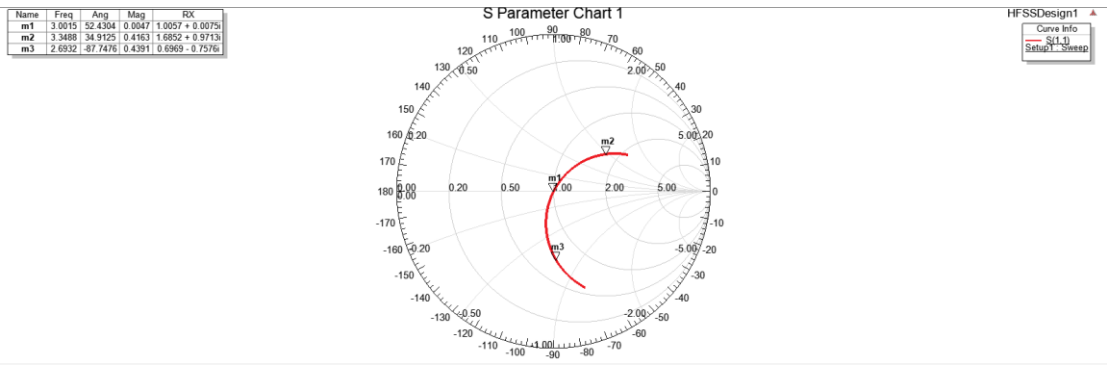


图 3.3.2 天线 Smith 圆图分析结果

- 3) 结果分析：由仿真结果可知，当中心频率为 3GHz 左右时，天线的反射系数为 0，归一化阻抗约为 1，表明其端口阻抗匹配良好。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。

④ 输入阻抗

- 1) 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；
- 2) 按下图设置，单击 New Report，再单击 Close，得到天线的输入阻抗结果报告：

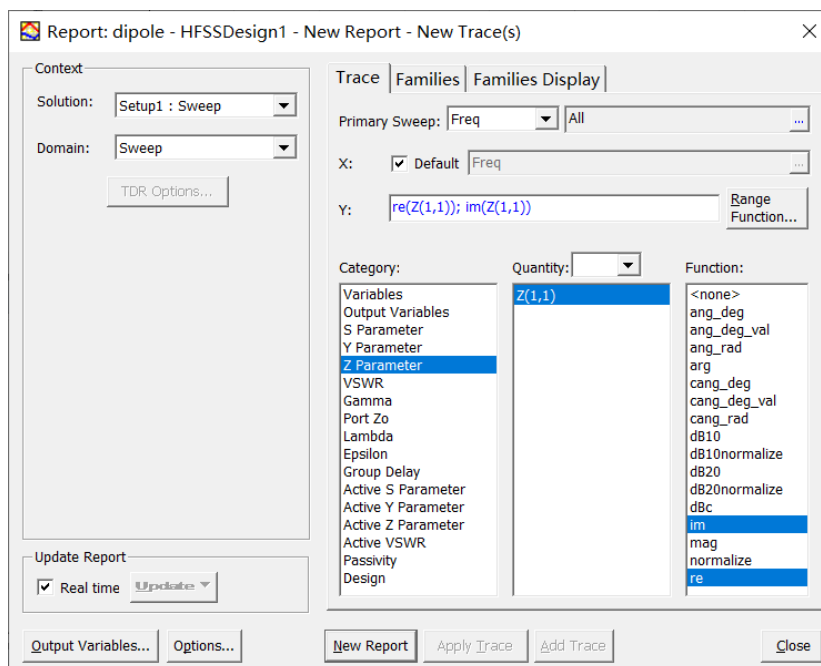


图 3.4.1 报告设置对话框

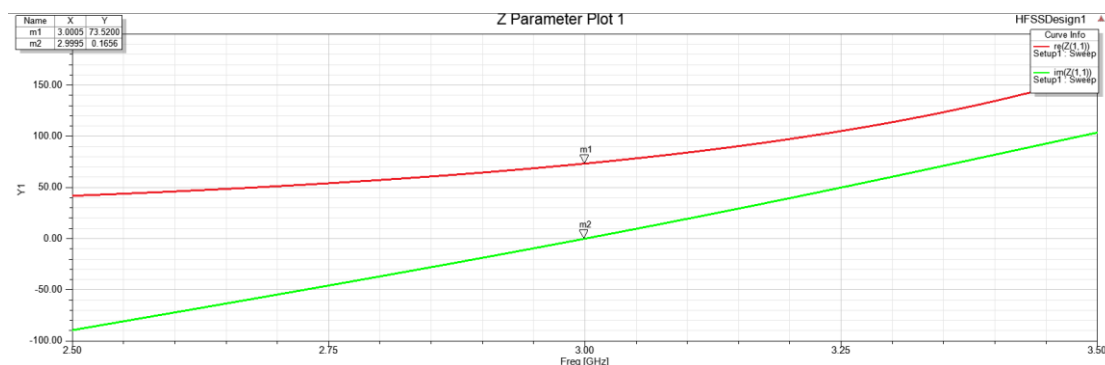


图 3.4.2 天线输入阻抗分析结果

- 3) 结果分析：由仿真结果可知，当工作频率为 $3.00GHz$ 左右时，天线的阻抗为 $(73.5 + j0.17)\Omega$ ，与计算所得理论值较为接近。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也不断增加，与理论分析相一致。

⑤ 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, 打开 Far Radiation Sphere Setup, 按图 3.5.1 完成设置;
- 2) 单击确定按钮,完成设置,此时定义的辐射表面 E_Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下;
- 3) 同理, 打开 Far Radiation Sphere Setup, 按图 3.5.2 完成设置;
- 4) 单击确定按钮,完成设置,此时定义的辐射表面 H_Plane 会添加到工程树的 Radiation 节点下;
- 5) 打开 Far Radiation Sphere Setup, 按图 3.5.3 完成设置;
- 6) 单击确定按钮,完成设置,此时定义的辐射表面 3D_Sphere 会添加到工程树的 Radiation 节点下;

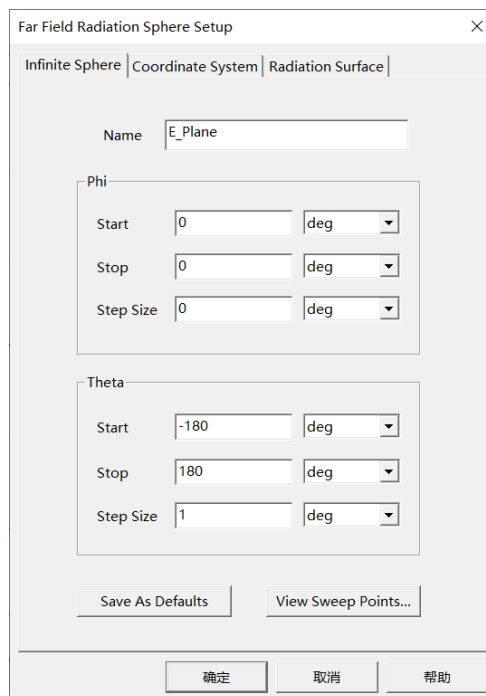


图 3.5.1 辐射表面设置(E)

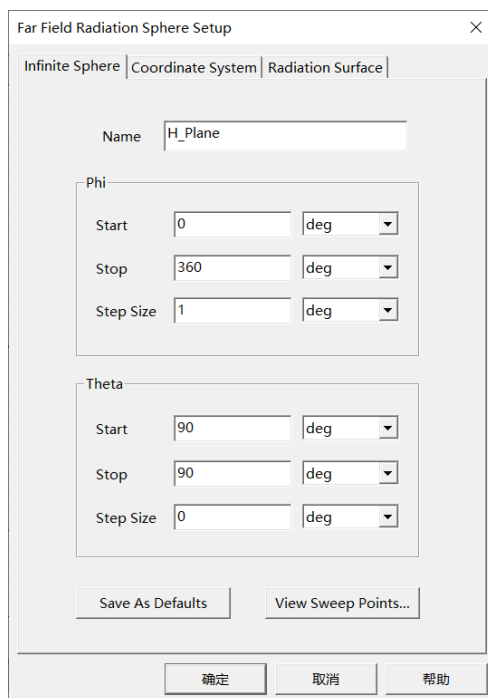


图 3.5.2 辐射表面设置(H)

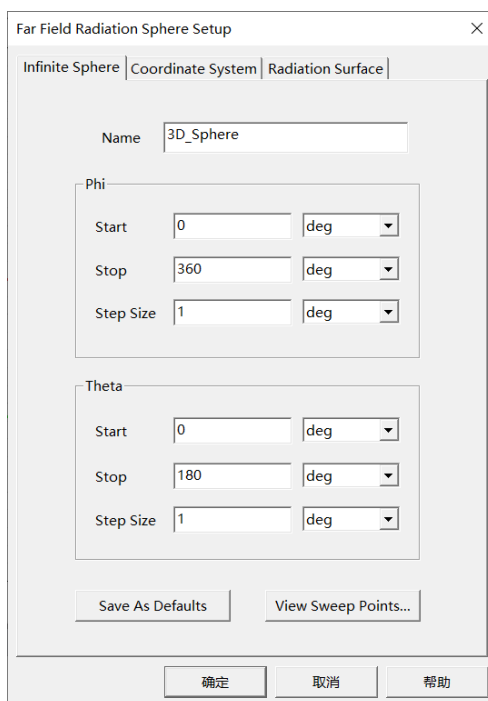


图 3.5.3 辐射表面设置(3D)

- 7) 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，打开报告设置对话框，如图：

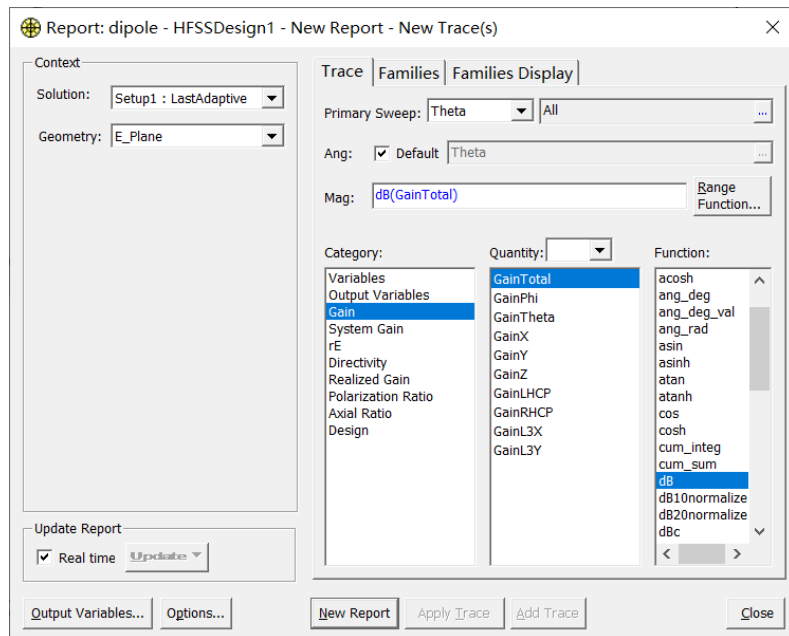


图 3.5.4 报告设置对话框

- 8) 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：

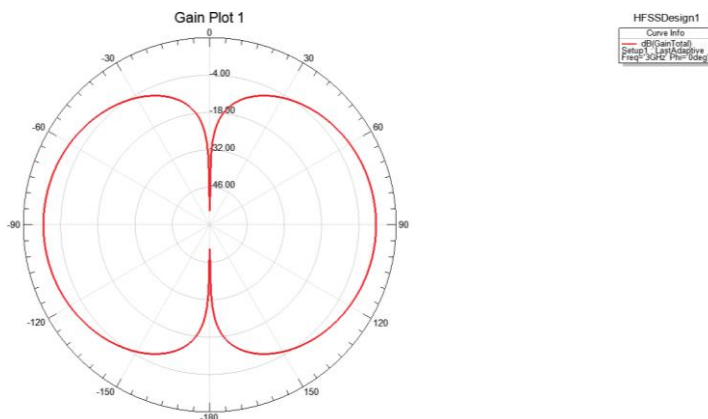


图 3.5.5 天线 xz 面增益方向图

- 9) 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，如下图设置对话框：

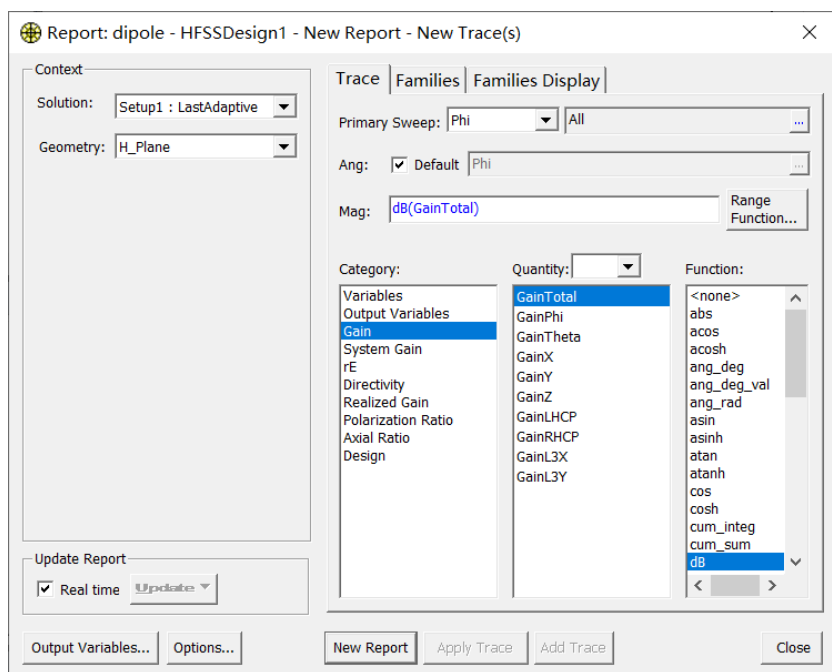


图 3.5.6 报告设置对话框

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

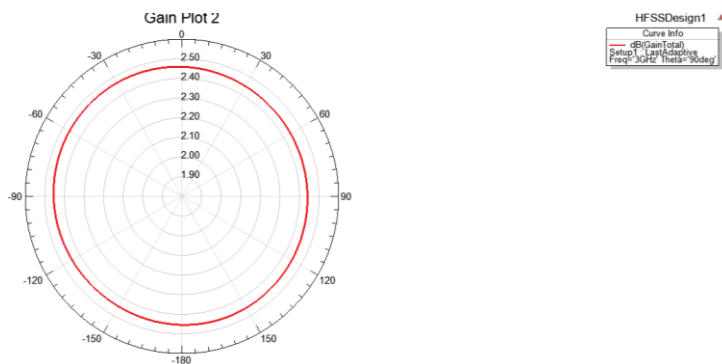


图 3.5.7 天线 xy 面增益方向图

注意此处需将刻度设为如下所示，否则所得方向图将会出现错误：

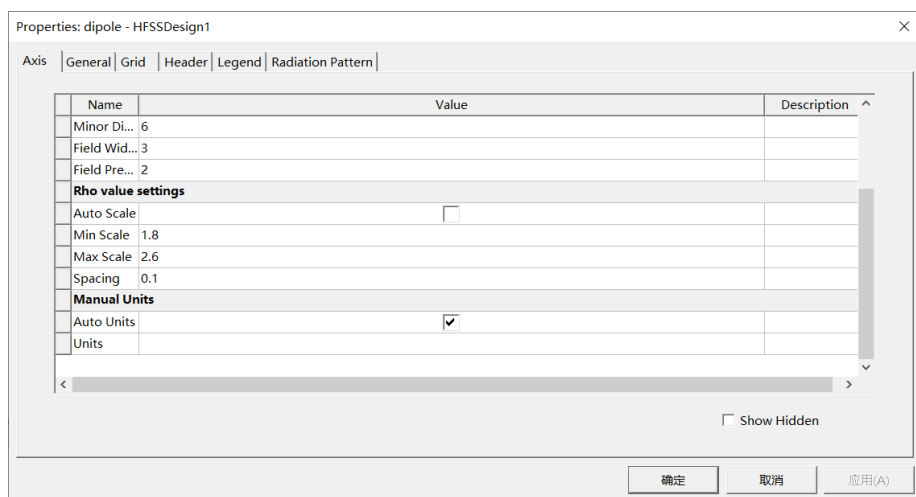


图 3.5.8 天线 xy 面增益方向图刻度设置

- 11) 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，如下图设置对话框：

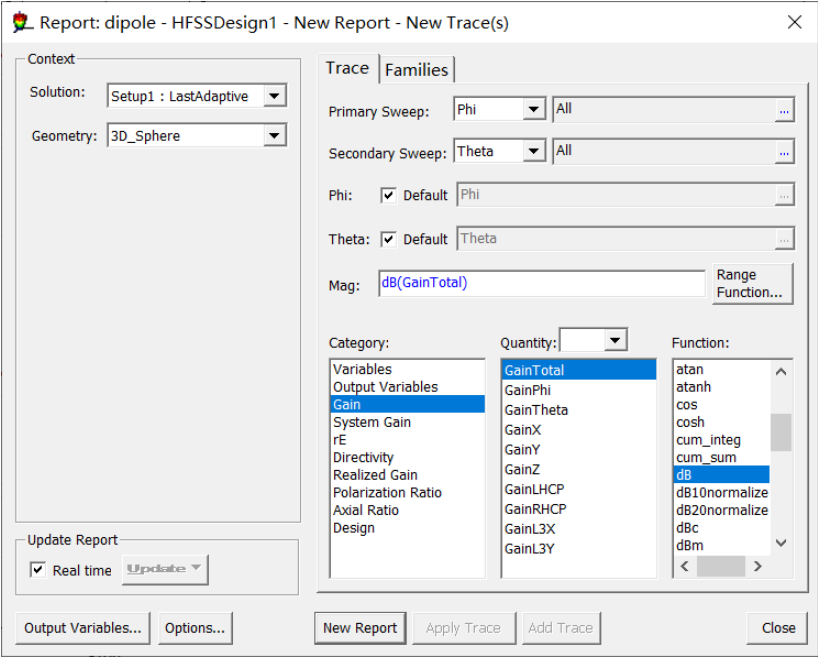


图 3.5.9 报告设置对话框

- 12) 点击 **New Report** 按钮，单击 **Close**，生成如下结果：

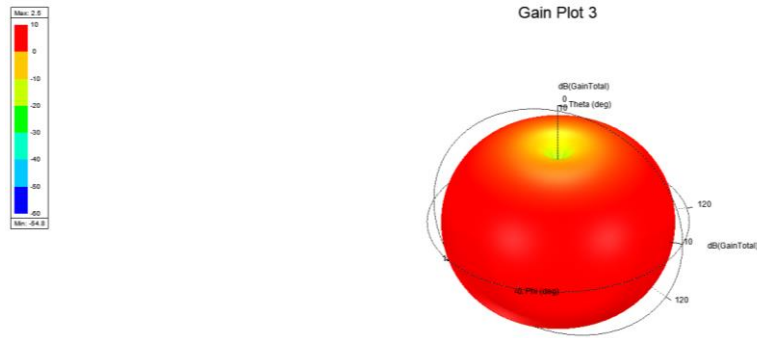


图 3.5.10 天线三维增益方向图

- 13) 结果分析：由仿真结果可知，天线的最大增益为2.5dB，最小增益为-54.8dB，所得方向图与理论分析结果一致。

⑥ 其他参数

- 1) 展开工程树下的 **Radiation** 节点，右键单击辐射表面名称，如 **3D_Sphere**，在弹出的菜单中选择 **Compute Antenna Parameters** 命令，打开 **Antenna Parameters** 对话框，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：

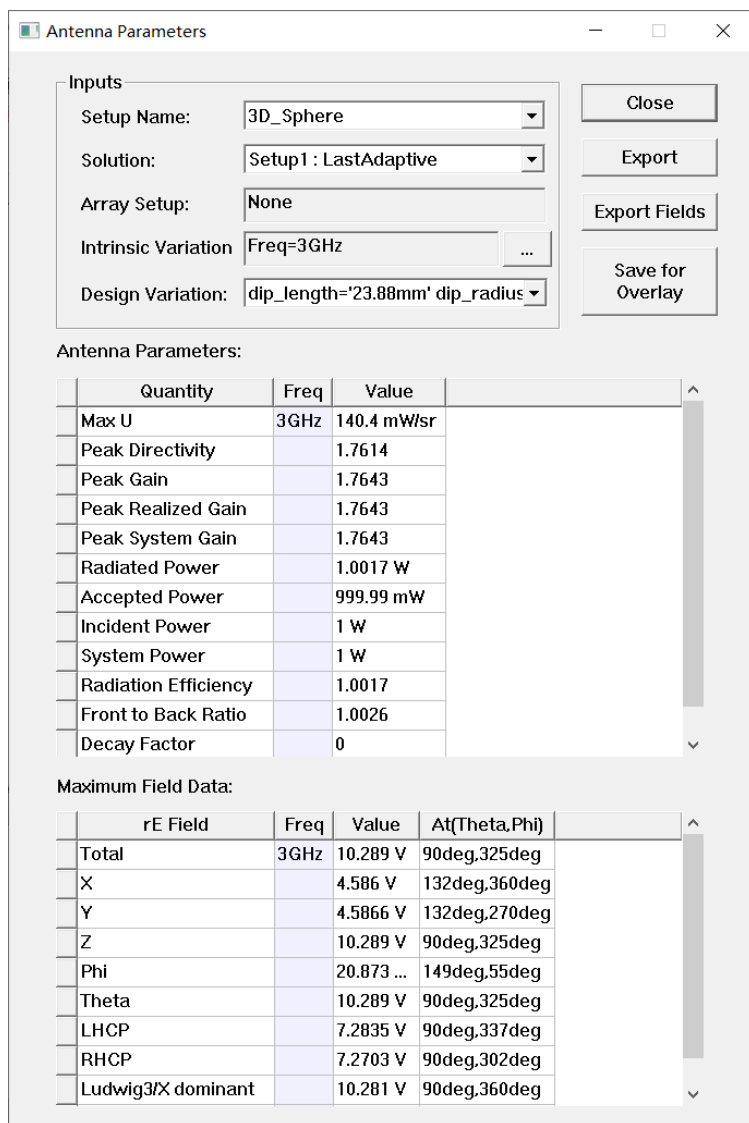


图 3.6 天线其他参数

- 2) 结果分析: 如图, 半波偶极子天线在工作频率 $3GHz$ 时的方向性系数为 1.7614 , 与理论值较为接近; 增益为 1.7643 , 辐射功率为 $1.0017W$, 辐射效率为 1.0017 , 其余数据如图中所示。

四、心得与体会

此次仿真作业, 我们使用 HFSS 软件对半波偶极子天线进行了仿真, 并对其回波损耗、电压驻波比、Smith 圆图、方向图等天线常见指标进行了分析, 不仅熟悉了 HFSS 软件的使用, 也对天线的设计、分析方法有了比较全面的认知, 受益匪浅。

在仿真的过程当中, 最令我印象深刻的, 是对天线 xy 面增益方向图的仿真。在最初仿真得到结果(形如花生)时, 我对结果并没有产生异议, 直到得到了三维增益方向图, 我发现其在 xy 面上的截面显然应当为圆形。意识到问题之后, 我查阅了 HFSS 的相关设

计教程及前人的教学博客，发现是由于极坐标图的刻度并未设置正确。修正之后，得到的仿真结果与三维结果吻合较好。虽然只是一个小小的插曲，但在查阅资料的过程当中，我加深了对天线方向图的理解，也锻炼了自己的自学能力，不失为一次良好的学习体验。