

天线理论与设计：仿真作业 3

—— 偶极子天线阵列的 HFSS 仿真

3190102060 黄嘉欣

一、天线阵参数计算

① The range of d for no grating lobes;

解：由题意，当 $\theta_0 = 60^\circ$ 时，阵列因子取得最大值，故：

$$\psi_0 = kdcos\theta_0 + \beta = \frac{2\pi}{\lambda} dcos60^\circ + \beta = 0$$

$$\text{解得：}\beta = -\frac{\pi}{\lambda} d$$

为避免栅瓣，须有： $-2\pi < \psi < 2\pi$ ，即：

$$\begin{cases} -kd + \beta > -2\pi \\ kd + \beta < 2\pi \end{cases}, \text{ 代入 } \beta = -\frac{\pi}{\lambda} d, \text{ 可得： } d \leq \frac{2}{3} \lambda$$

即当 d 满足 $d \leq \frac{2}{3} \lambda$ 时，不会出现栅瓣。

② The excitation of the elements (amplitude and phase);

解：由题意，天线阵为均匀线性阵，故其激励幅度为 I ，相位差为 $\beta = -\frac{\pi}{\lambda} d$

$$\text{令 } d = \frac{\lambda}{2} < \frac{2}{3} \lambda, \text{ 则天线单元间的步进相位为： } \beta = -\frac{\pi}{\lambda} d = -\frac{\pi}{2} \text{ rad} = -90^\circ$$

故天线阵的单元激励为 $I_m = Ie^{jm\beta} = Ie^{-jm\frac{\pi}{2}}$ ，其幅度为 I ，相位为 $-m\frac{\pi}{2} \text{ rad}$ 。

③ The number of array elements;

解：由题意，天线阵的半波带宽为 13° ，则：

$$\theta_h = \cos^{-1} \left[\cos\theta_0 - 0.443 \frac{\lambda}{(L+d)} \right] - \cos^{-1} \left[\cos\theta_0 + 0.443 \frac{\lambda}{(L+d)} \right] = 13^\circ$$

$$\text{解得：} \frac{\lambda}{(L+d)} = 0.2, \text{ 即 } L+d = 5\lambda$$

$$\therefore N = \frac{L+d}{d} = \frac{5\lambda}{d}$$

$$\text{令 } d = \frac{\lambda}{2} < \frac{2}{3} \lambda, \text{ 可得： } N = 5 \times 2 = 10$$

故阵列单元个数为 10 个。

④ MATLAB 验证

将上述求得的参数代入公式，得到阵列因子为：

$$|AF| = \left| \frac{\sin(5\pi\cos\theta - 2.5\pi)}{\sin(\pi\cos\theta - 0.5\pi)} \right| = \left| \frac{\cos(5\pi\cos\theta)}{\cos(\pi\cos\theta)} \right|$$

使用 MATLAB 编程(代码见 Array.m)，可得方向图为：

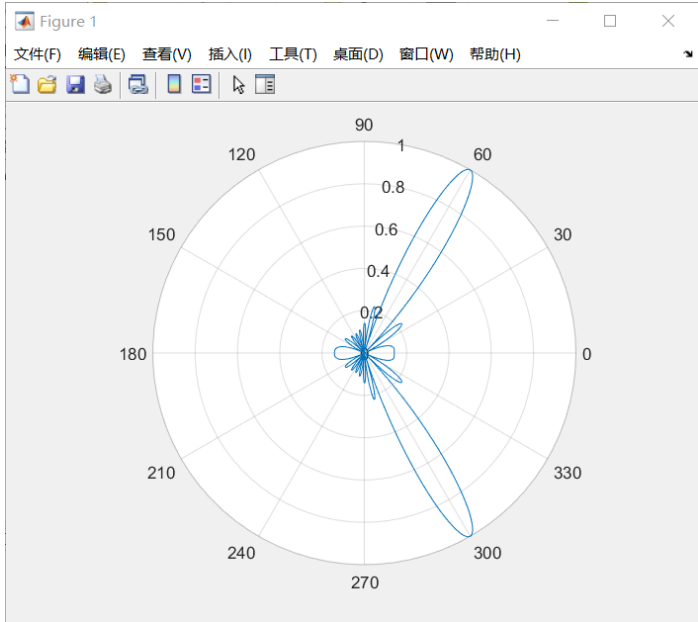


图 1.1 MATLAB 验证

可见，当 $\theta = \pm 60^\circ$ 时，方向系数最大。对 AF 向量进行分析，可以找到其值最接近 0.707 的点的索引为 95 和 116，如下图：

AF																							
1x629 double																							
94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117
0.6531	0.7024	0.7496	0.7940	0.8...	0.8...	0.9...	0.9...	0...	0...	0.9...	0...	1	0.9...	0.98...	0.96...	0.9439	0.9148	0.8...	0.84...	0.7950	0.7455	0.6920	0.6352

图 1.2 AF 向量

于是有 $\theta_h = \frac{(116-95)*0.01}{\pi} \times 180^\circ = 12.03^\circ$ ，与条件 $\theta_h = 13^\circ$ 接近，故所求参数及阵列因子是正确的。

二、偶极子天线阵列的 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 Array.aedt，如图所示：

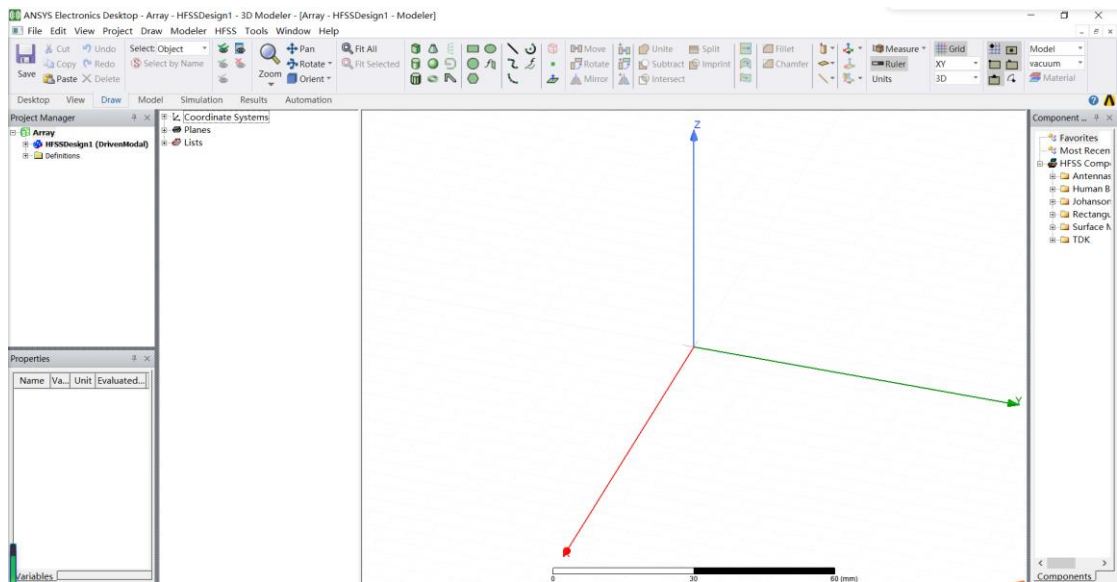


图 2.1.1 新建 HFSS 工程

- 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：

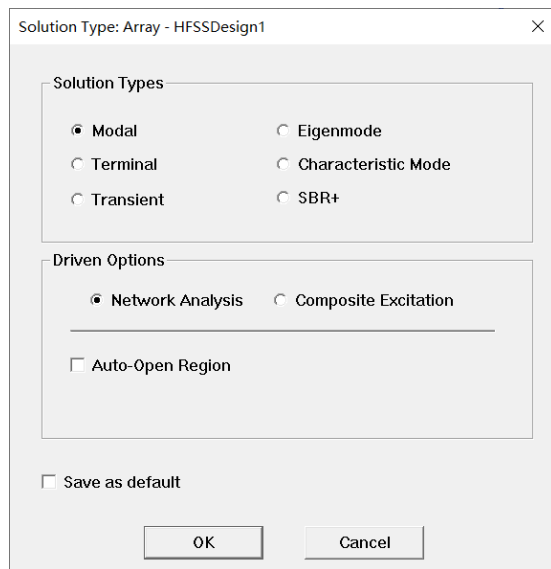


图 2.1.2 设置求解类型

- 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：

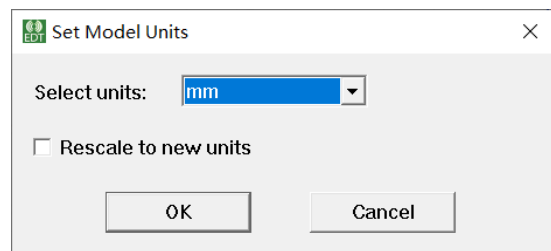


图 2.1.3 设置模型长度单位

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：

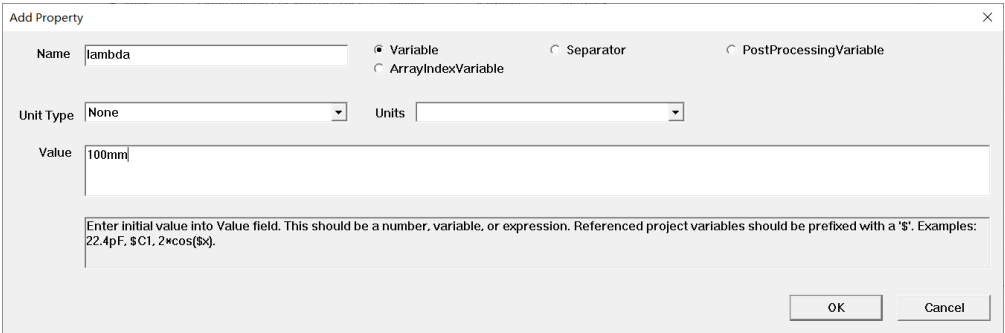


图 2.2.1 定义 lambda

- 2) 依次定义变量 length，初始值为 0.48*lambda；定义变量 gap，初始值 0.24mm；定义变量 dip_length，初始值 length/2-gap/2；定义变量 dip_radius，初始值 lambda/200，点击确定，如下图所示：

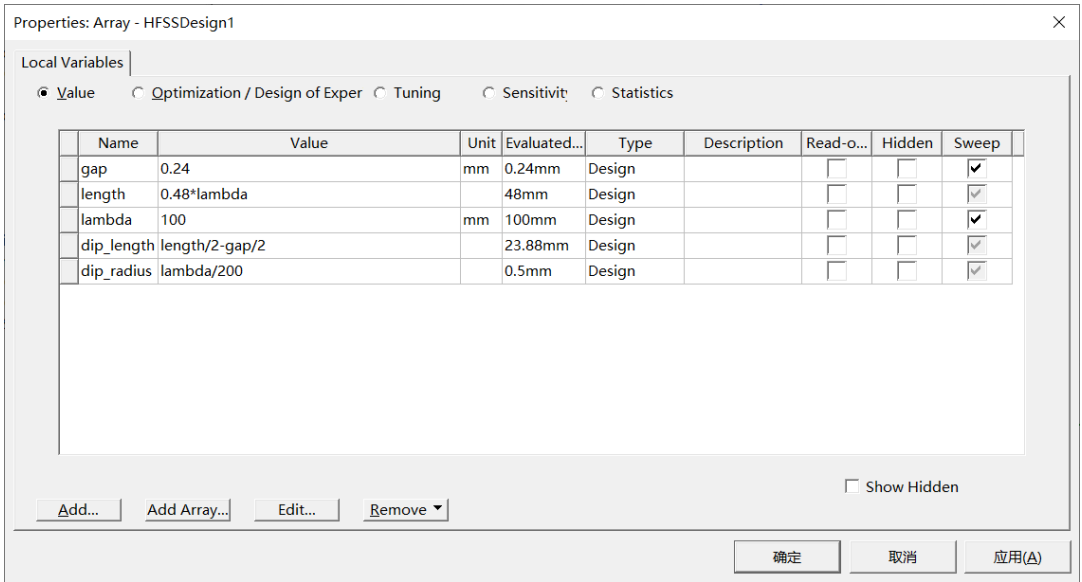


图 2.2.2 依次定义变量

③ 生成偶极子天线

- 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(圆柱沿 y 轴放置，工作面为 xz)：

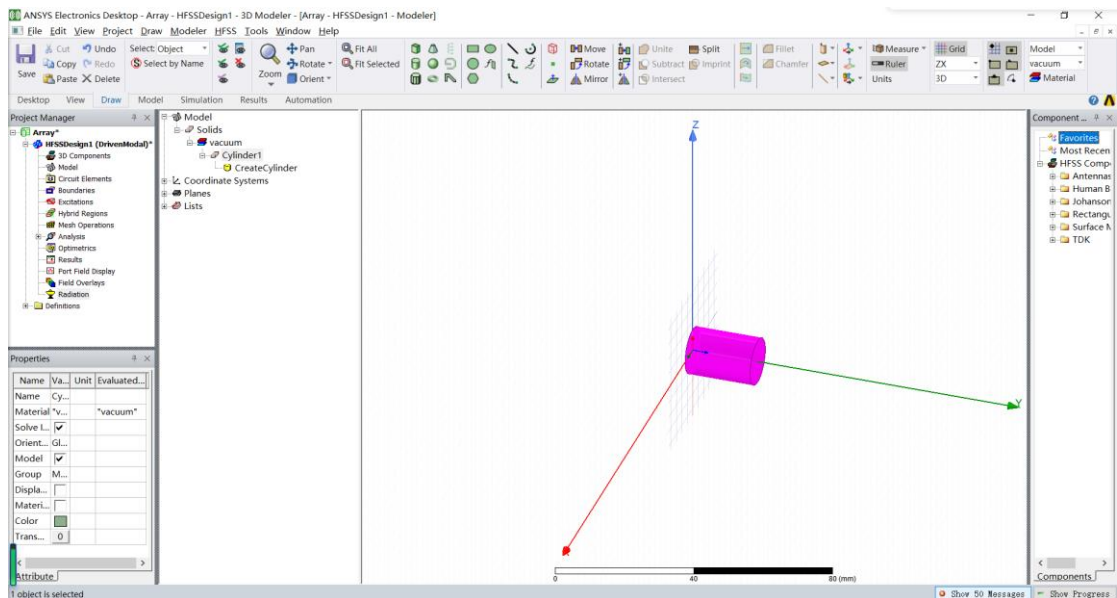


图 2.3.1 创建圆柱体

- 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：

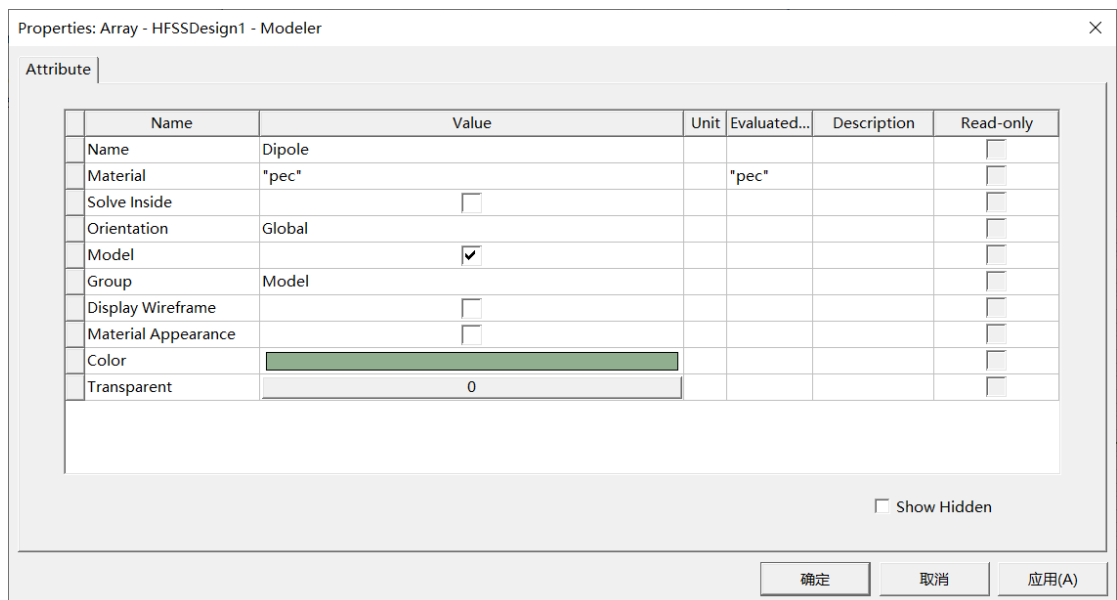


图 2.3.2 设置圆柱体材质

- 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, gap/2, 0)，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：

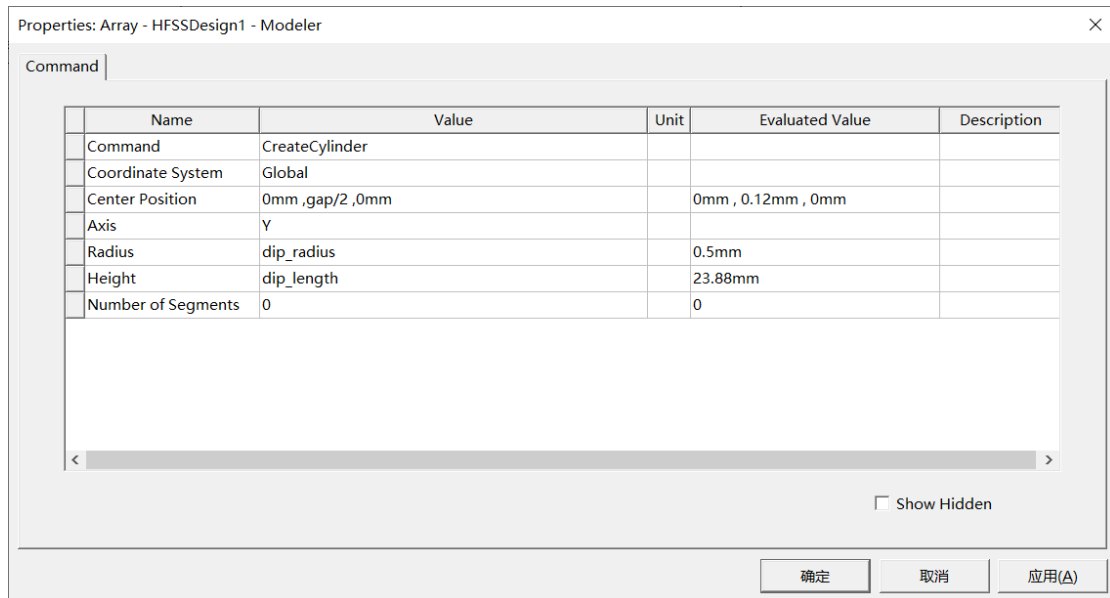


图 2.3.3 设置圆柱体属性

- 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：

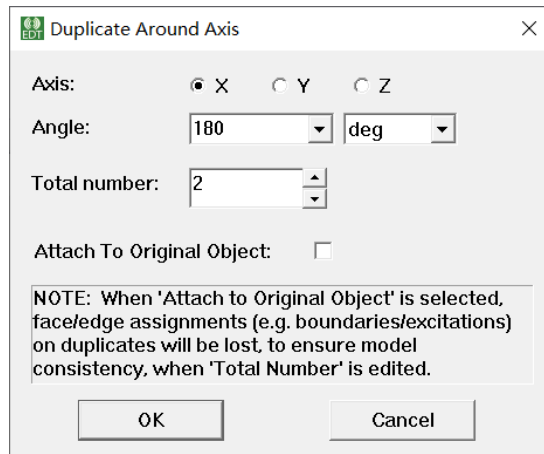


图 2.3.4.1 沿坐标轴复制圆柱体

此时生成的天线如图所示：

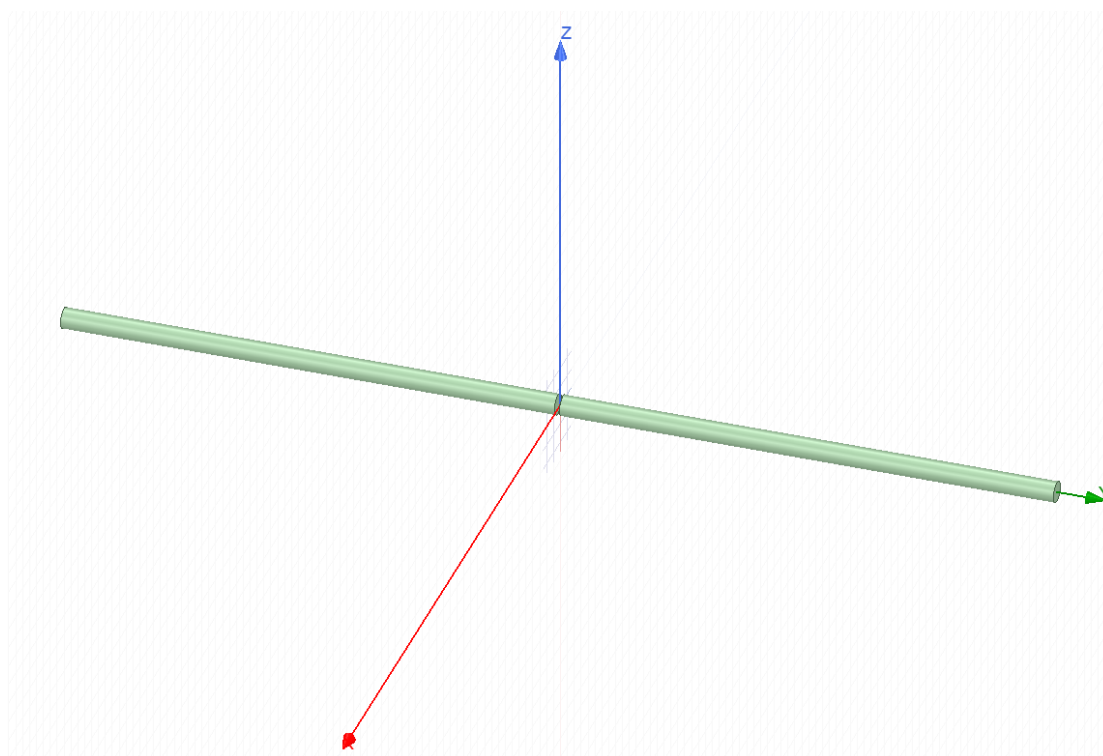


图 2.3.4.2 偶极子天线

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 xy 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 $(-dip_radius, -gap/2, 0)$ ，长度和宽度分别为 $2*dip_radius$ 和 gap 。

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

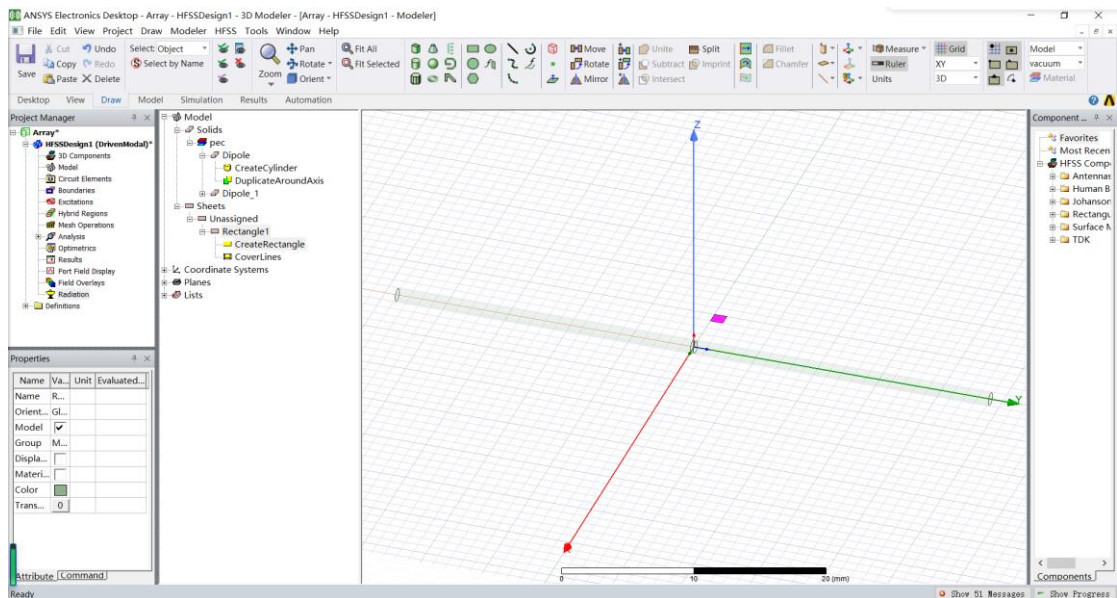


图 2.4.2 创建矩形

- 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：

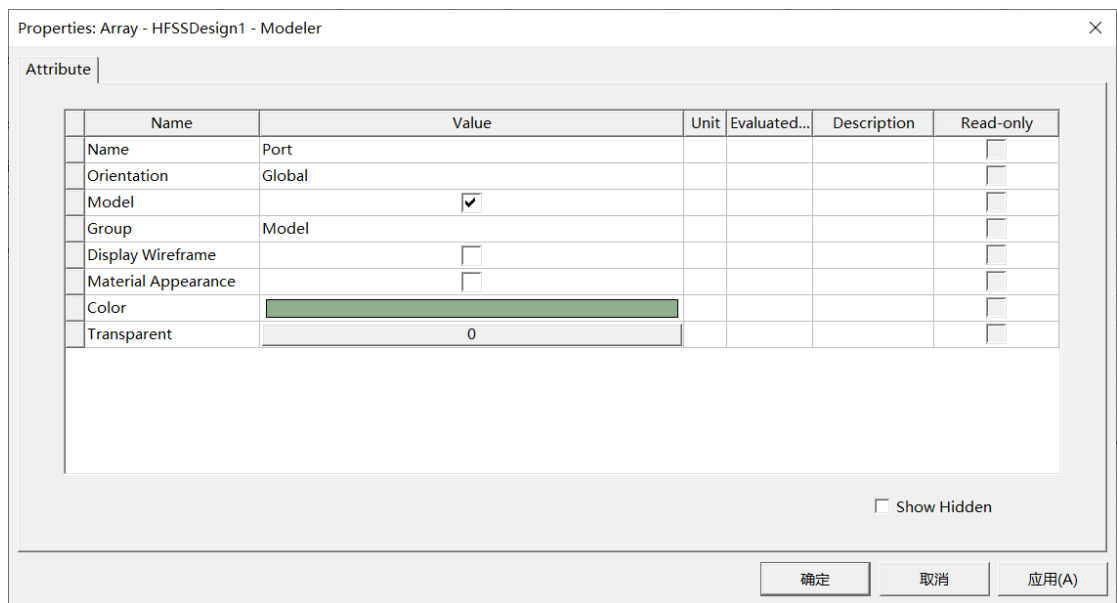


图 2.4.3 设置矩形名称

- 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(-dip_radius, -gap/2, 0)，在 **Xsize** 和 **Ysize** 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：

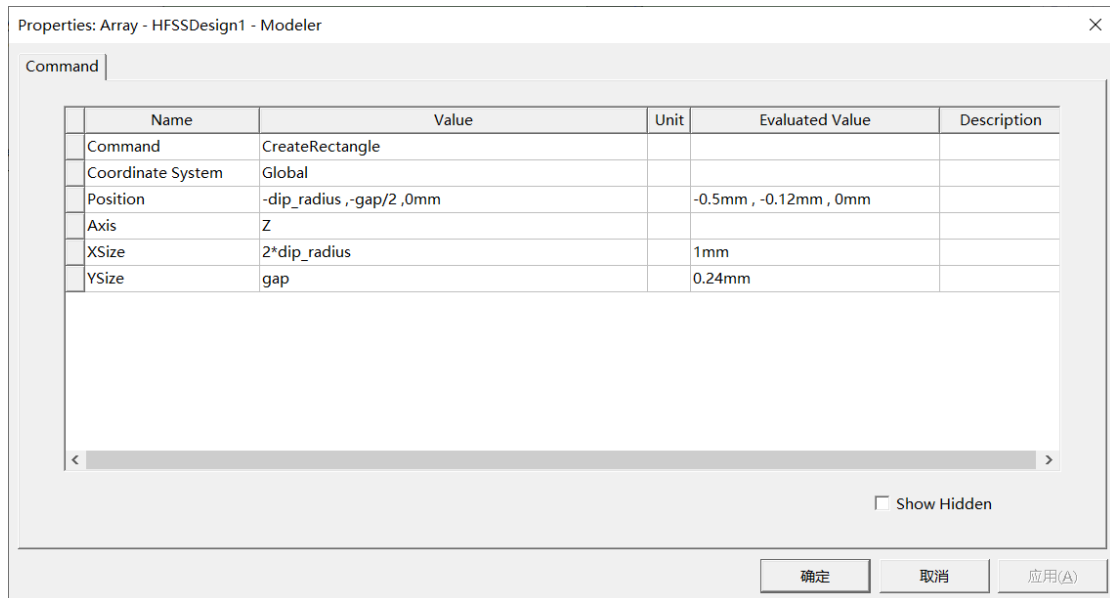


图 2.4.4 设置端口属性

- 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:

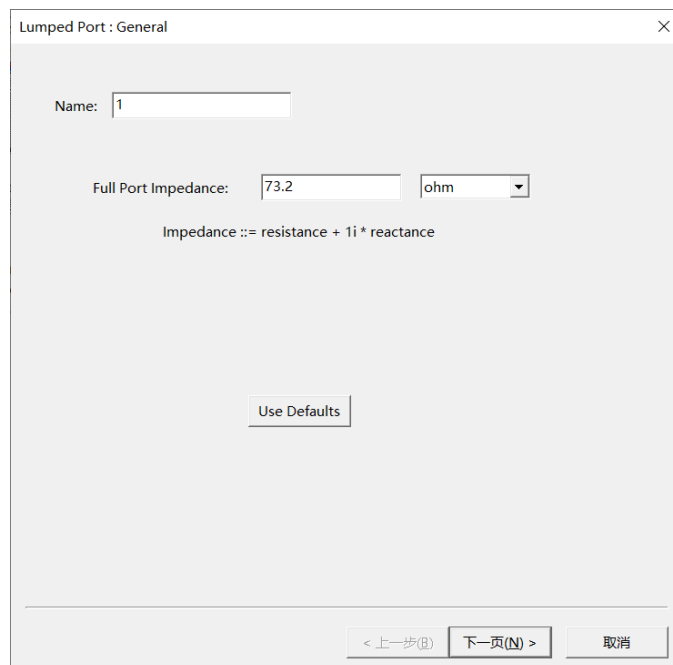


图 2.4.5.1 激励设置(1)

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左至右的端口积分线, 在 **Port Processing** 对话框中选择 **Do Not Renormalize**, 单击完成:

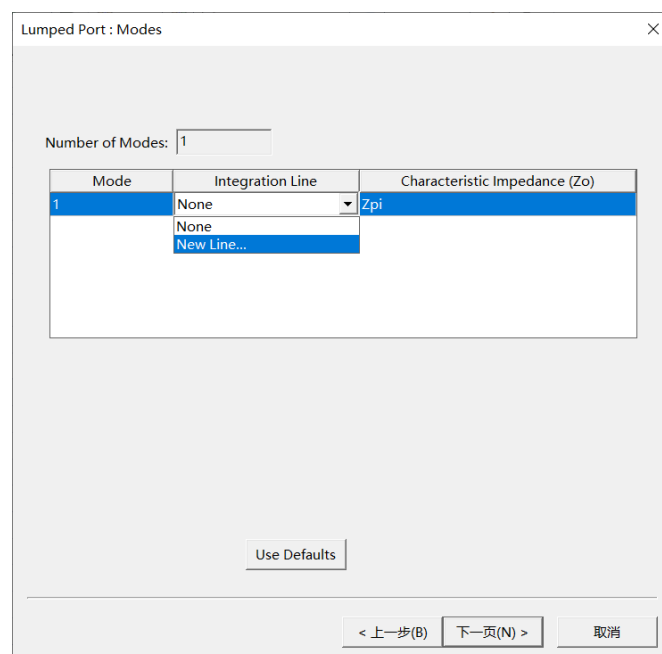


图 2.4.5.2 激励设置(2)

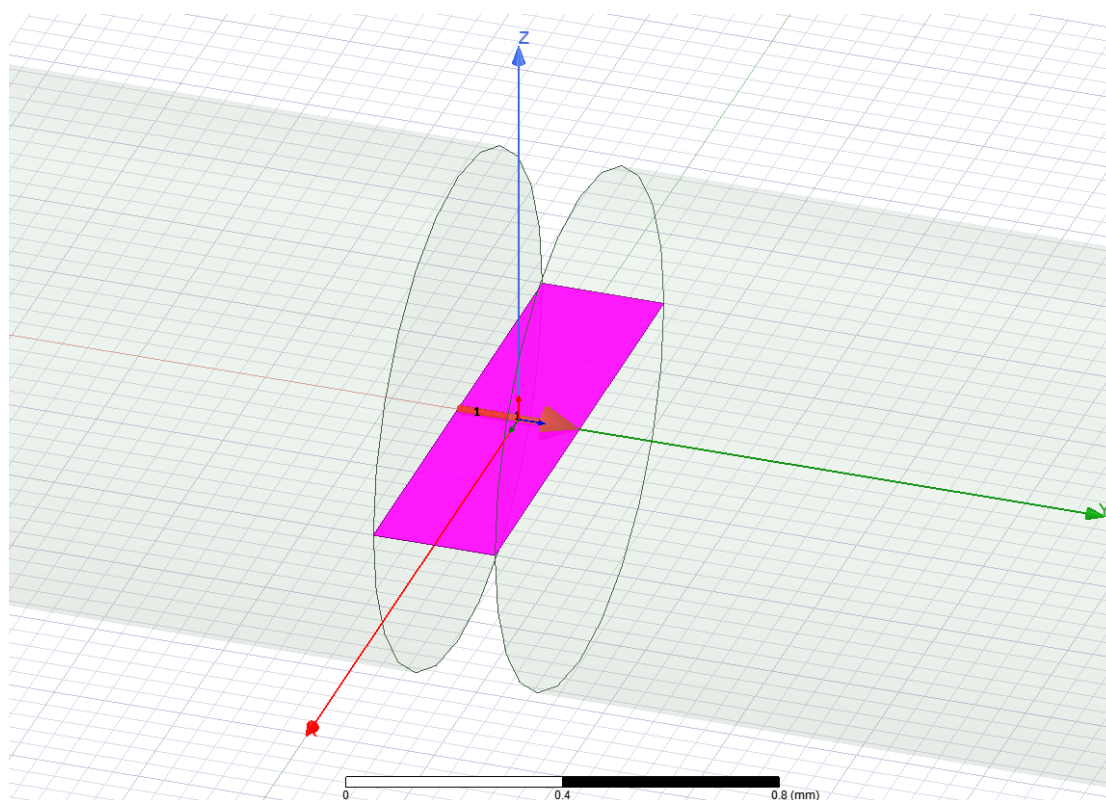


图 2.4.5.3 激励设置(3)

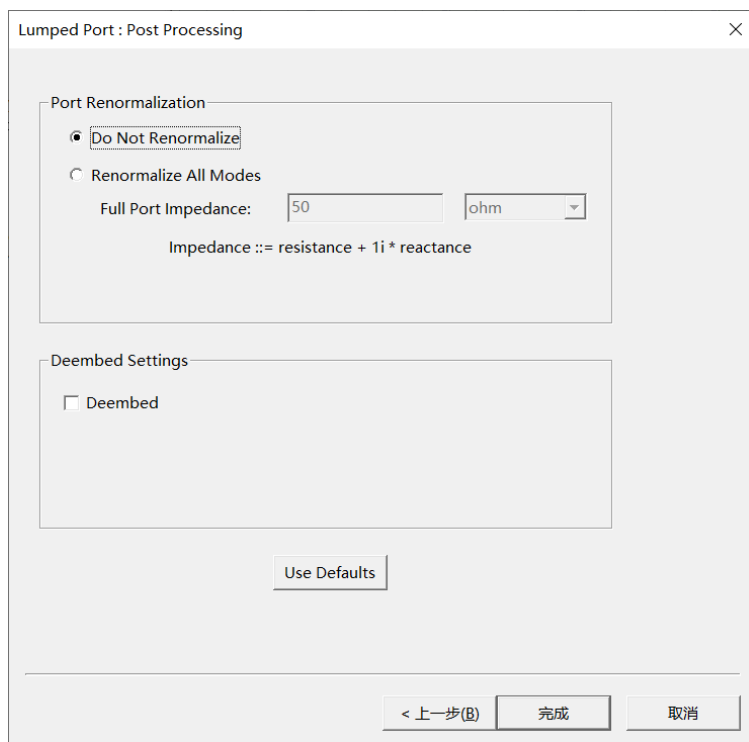


图 2.4.5.4 激励设置(4)

⑤ 设置辐射边界条件

- 1) 在菜单栏中选择 **Create Region**，并在弹出的窗口中将 **Padding Type** 改为 **Absolute Offset**，**Value** 改为 $\lambda/4$ ，点击 **OK**：

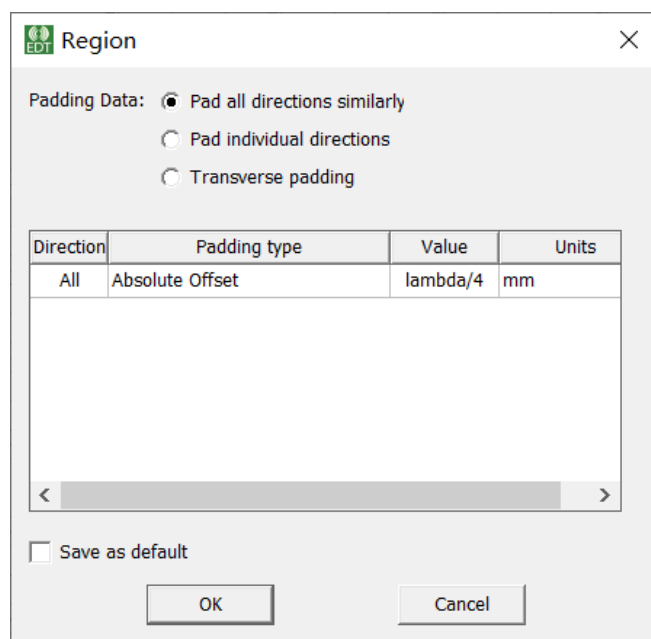


图 2.5.1 设置边界

- 2) 双击操作历史树下 **Region**，打开属性对话框，将区域材质改为 **air**，透明度为 **0.8**，

点击确定，如图：

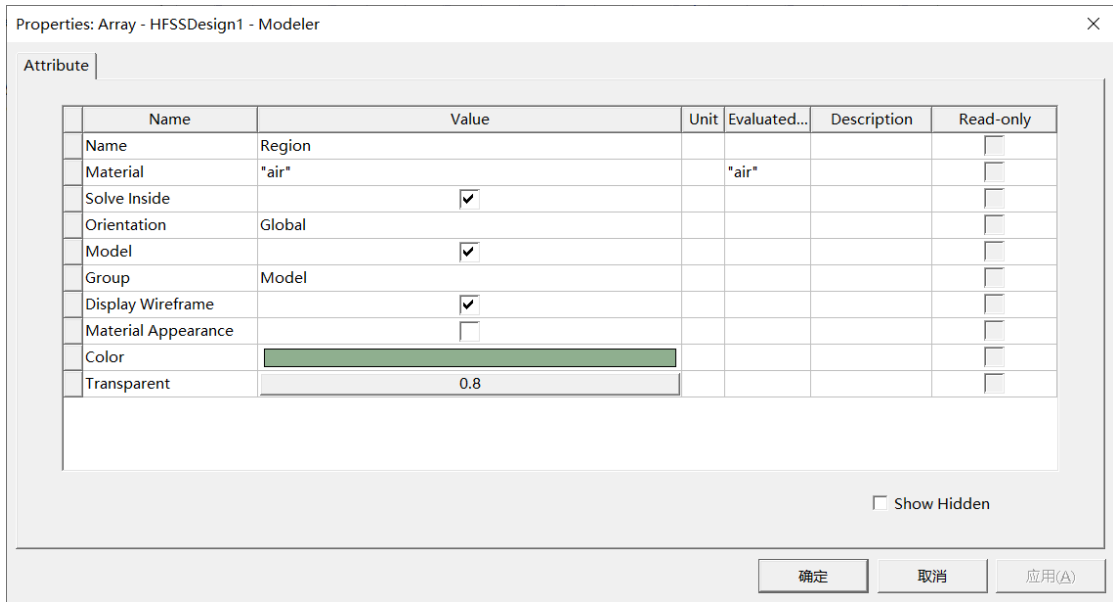


图 2.5.2 设置区域材质

- 3) 在操作历史树下单击 **Region** 节点，选中该区域，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 **Region** 的表面设置为辐射边界条件，如图：

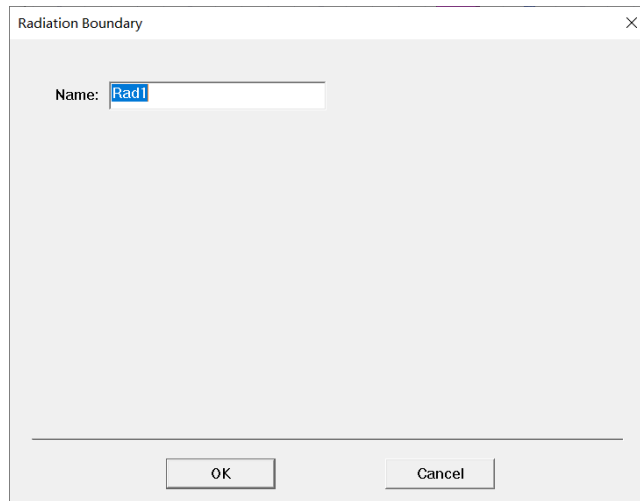


图 2.5.3 辐射边界条件设置

⑥ 设置天线阵列

- 1) 右键单击工程树下的 **Radiation**，选择 **Antenna Array Setup**，在弹出的对话框中选择 **Regular Array Setup**；
- 2) 设置参数，在 **Regular Array** 子窗口中将天线单元的间隔设置为 $50\text{mm}(\lambda/2)$ ，由于天线阵列将沿 z 轴正方向放置，所以将 V 向量修改为 $(0, 0, 1)$ ，并将 **In V Direction**

后的数值调整为 50mm，将 V 方向的天线数量设为 10，U 方向设为 1，天线的步进相位为 -90° ，如图所示：

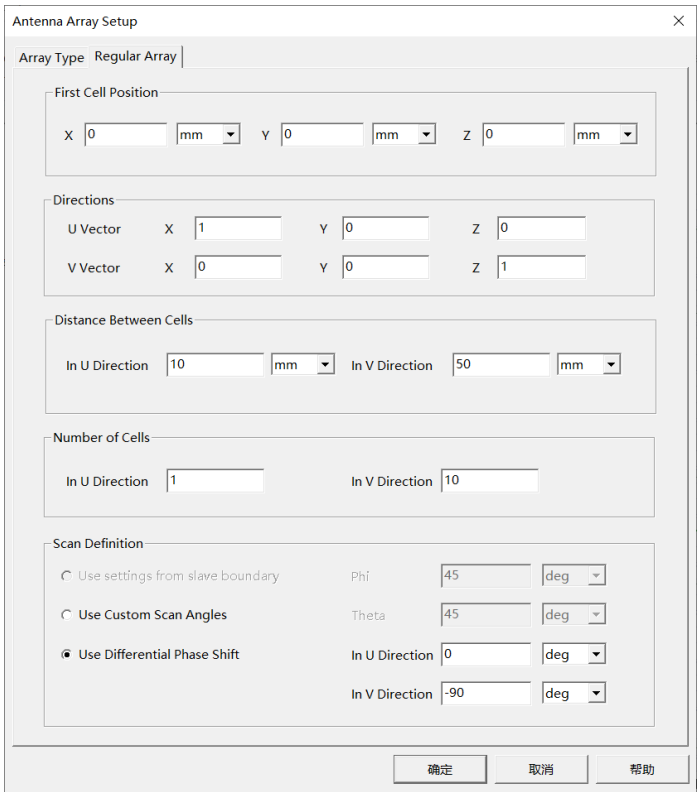


图 2.6 天线阵列参数设置

⑦ 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：

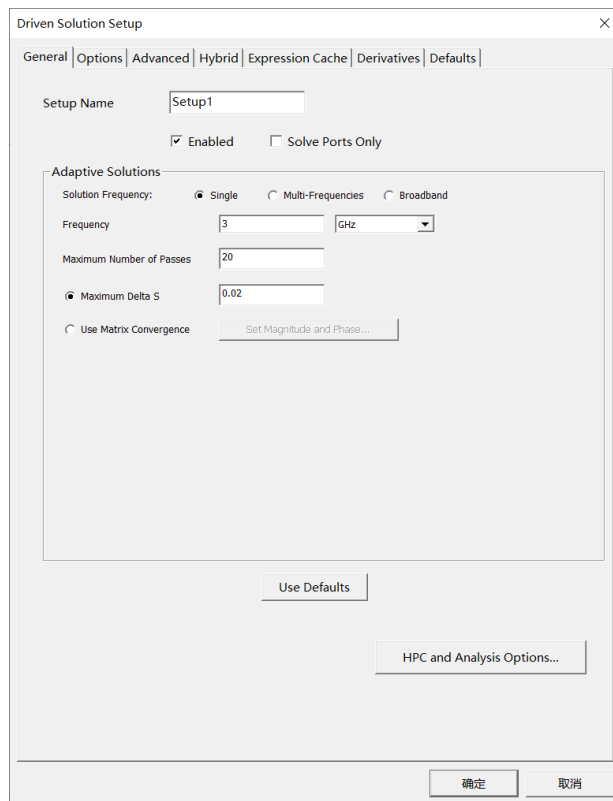


图 2.7.1 求解频率和网格剖分设置

- 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：

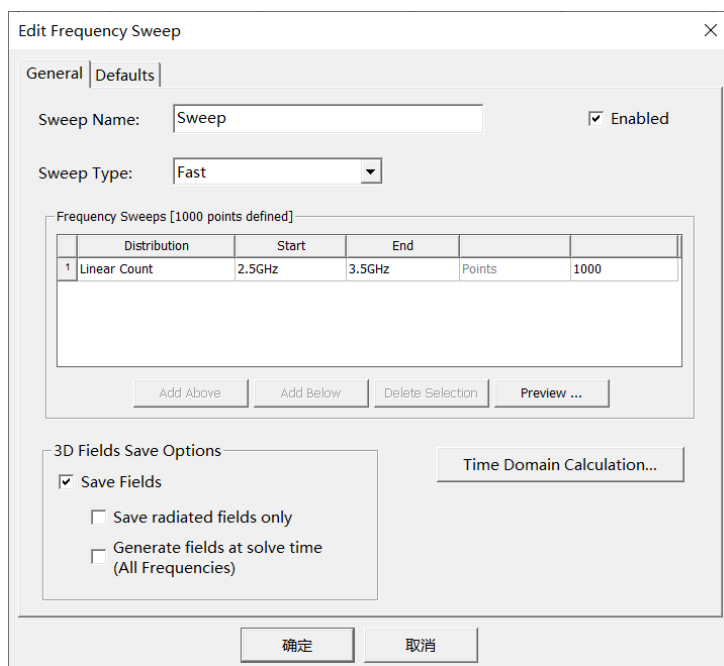


图 2.7.2 扫频设置

⑧ 设计检查

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

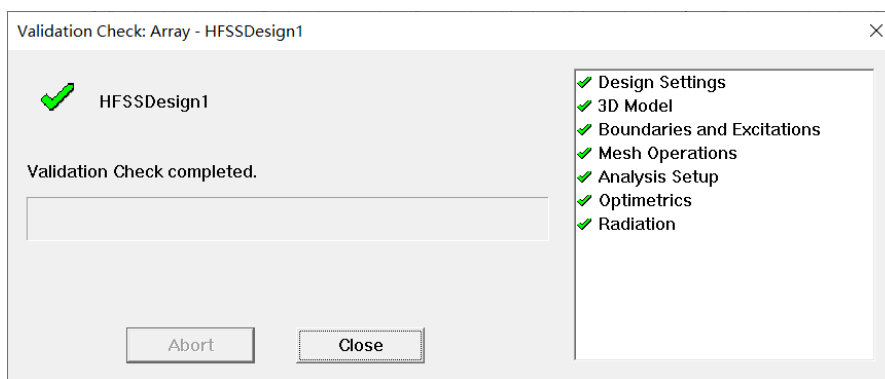


图 2.8 设计检查

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。方向图数据处理过程如下：

- 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 3.1.1 完成设置：

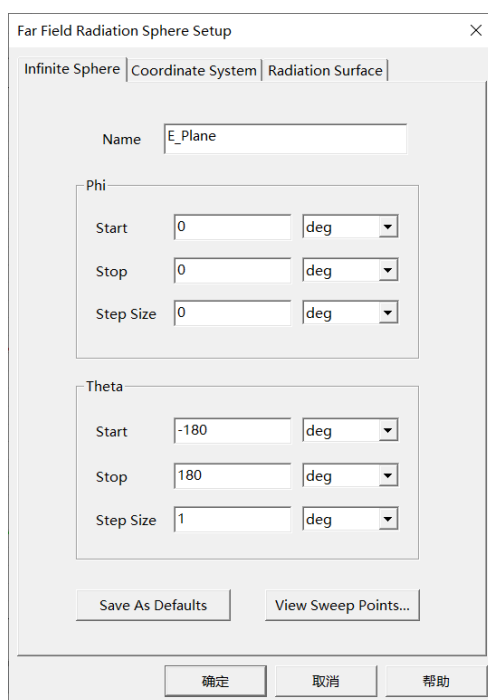
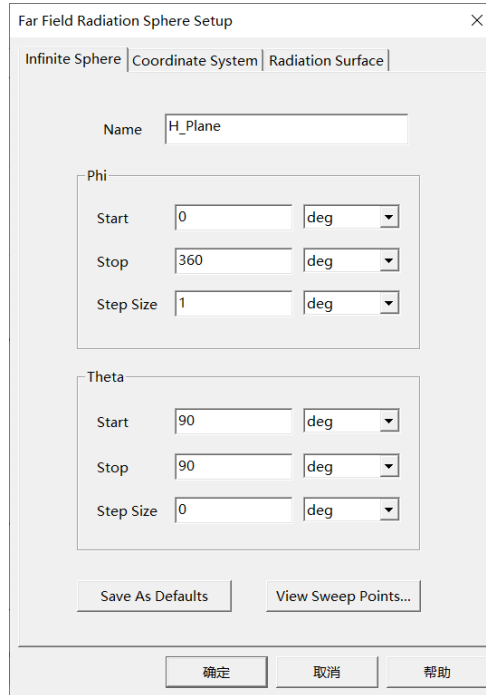


图 3.1 辐射表面设置(E)

- 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 3.1.2 完成设置：



The image shows the 'Far Field Radiation Sphere Setup' dialog box with the 'Radiation Surface' tab selected. The 'Name' field is set to 'H_Plane'. Under the 'Phi' section, 'Start' is 0, 'Stop' is 360, and 'Step Size' is 1, all in degrees. Under the 'Theta' section, 'Start' is 90, 'Stop' is 90, and 'Step Size' is 0, all in degrees. At the bottom, there are buttons for 'Save As Defaults', 'View Sweep Points...', '确定' (OK), '取消' (Cancel), and '帮助' (Help).

图 3.2 辐射表面设置(H)

4) 单击确定按钮，完成设置，此时定义的辐射表面 H_Plane 会添加到工程树中；

5) 打开 Far Radiation Sphere Setup，按图 3.1.3 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 会添加到工程树下；



The image shows the 'Far Field Radiation Sphere Setup' dialog box with the 'Radiation Surface' tab selected. The 'Name' field is set to '3D_Sphere'. Under the 'Phi' section, 'Start' is 0, 'Stop' is 360, and 'Step Size' is 1, all in degrees. Under the 'Theta' section, 'Start' is 0, 'Stop' is 180, and 'Step Size' is 1, all in degrees. At the bottom, there are buttons for 'Save As Defaults', 'View Sweep Points...', '确定' (OK), '取消' (Cancel), and '帮助' (Help).

图 3.3 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：

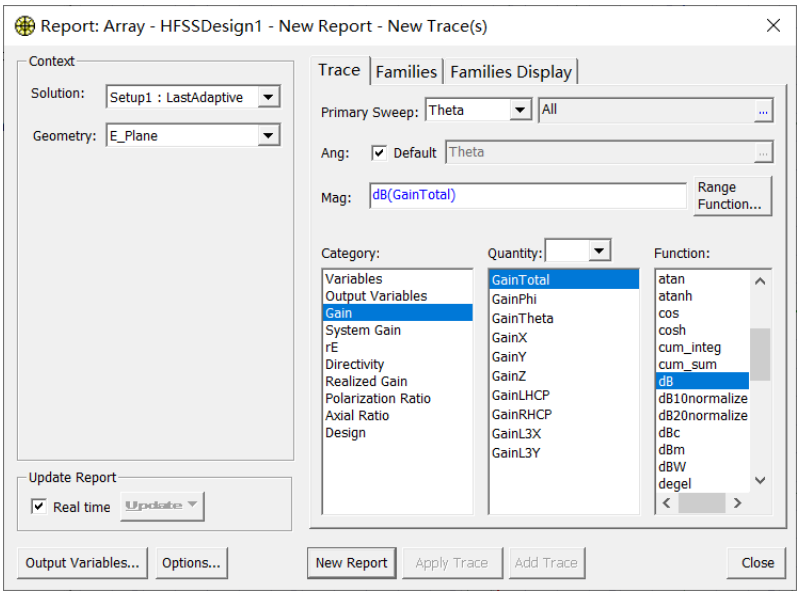


图 3.4 报告设置对话框

- 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：

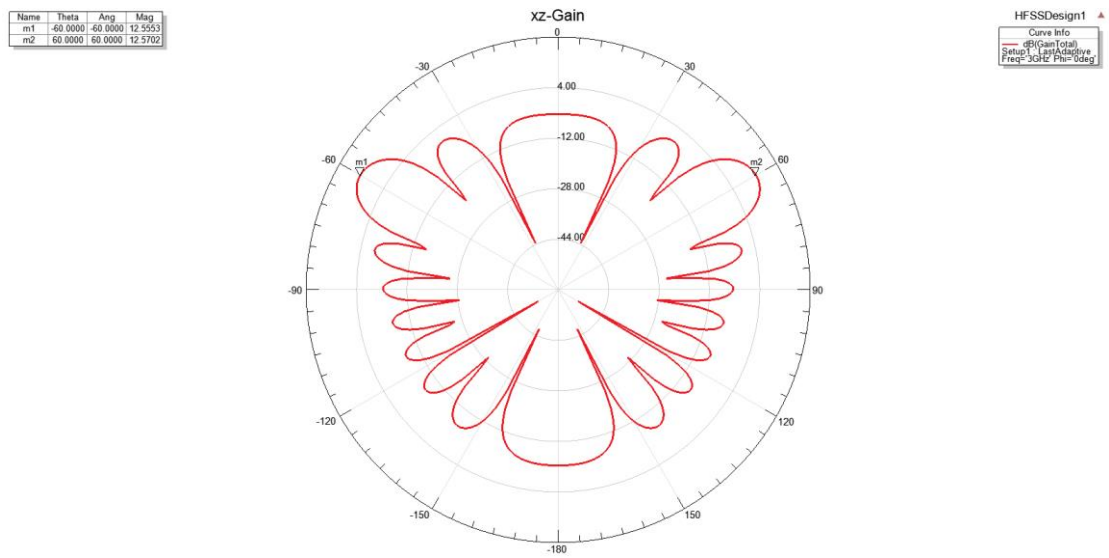


图 3.5 天线 xz 面增益方向图

- 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：

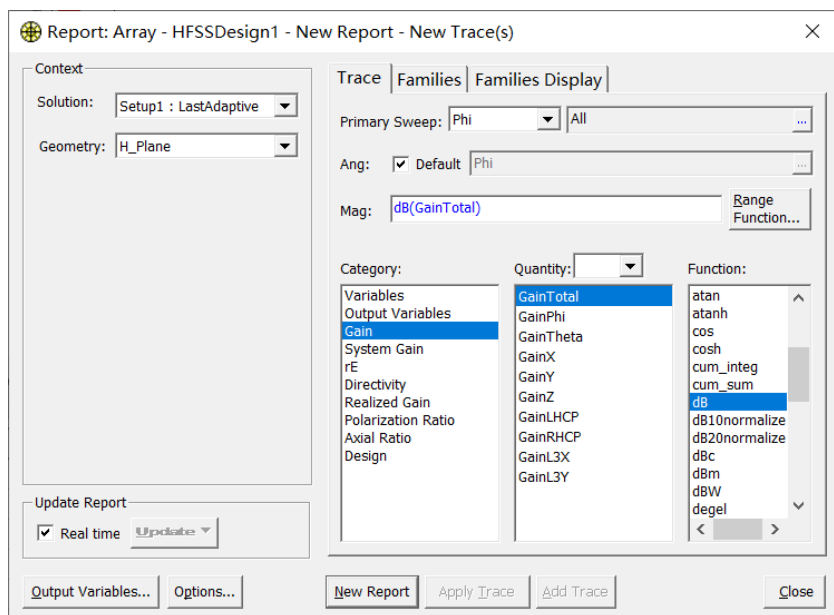


图 3.6 报告设置对话框

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：

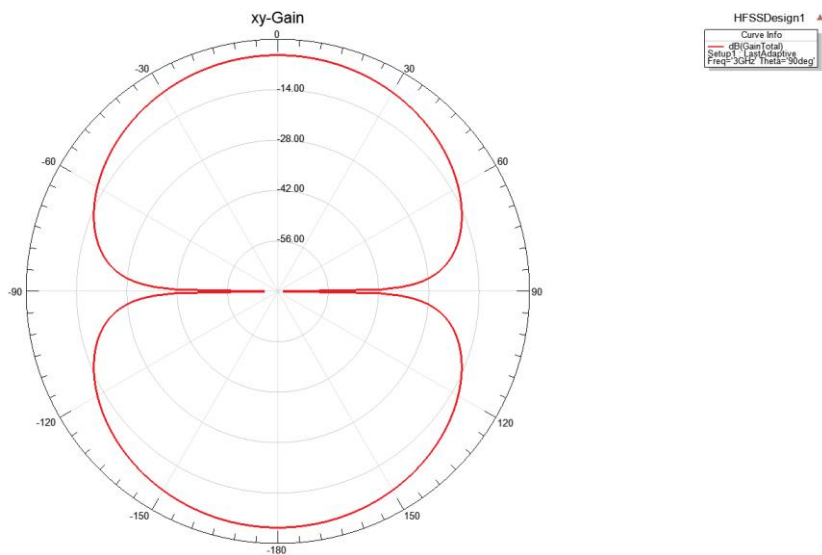


图 3.7 天线 **xy** 面增益方向图

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：

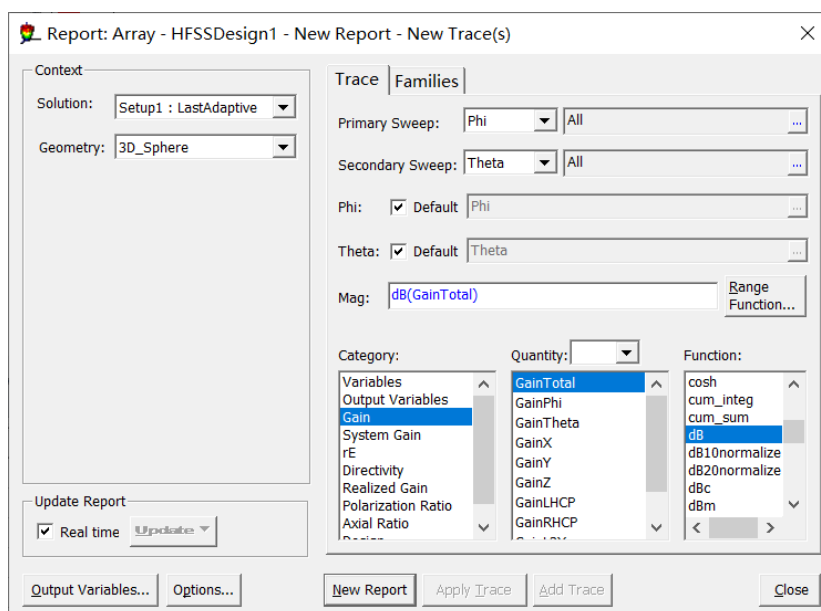


图 3.8 报告设置对话框

12) 点击 New Report 按钮，单击 Close，生成如下结果：

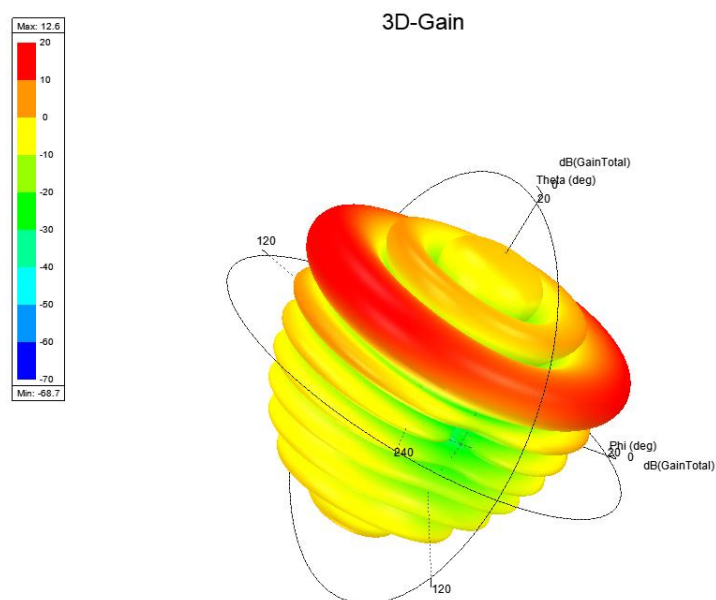


图 3.9 天线三维增益方向图

13) 结果分析：由仿真结果可知，在 xy 平面，天线方向性在 $\theta = \pm 60^\circ$ 时取得最大，且最大值为 $D_0 = 12.6 \text{ dB}$ ，与理论相一致；在 xy 平面，天线阵列的方向图呈 8 字形，与单个偶极子天线情况类似，体现了偶极子天线的方向性。

四、心得与体会

此次仿真作业，我们对天线阵列的参数进行了计算，并使用 HFSS 软件对偶极子天

线阵进行了仿真，很好地回顾了课堂所学，加深了我们对知识的理解和掌握。

在初次进行仿真时，我按照第一次仿真作业的天线设置进行实验，即将天线沿 z 轴摆放，并使天线阵列沿 y 轴排布。尽管仿真得到了结果，但在对其方向图进行分析的过程中，我发现其取得最大方向系数时的角度与题目要求存在差异 ($\varphi = 90^\circ \pm 60^\circ$)，遂重新对系统进行了分析。考虑到天线的辐射性质，我将偶极子天线沿 y 轴摆放，将天线阵列沿 z 轴排布，使其辐射方向发生转变，得到的最大方向系数角度恰为 $\theta = \pm 60^\circ$ ，与题目要求一致。虽然分析、重新仿真的过程花费了我较多的时间，但总的来说，我进一步理解了天线的特性，懂得灵活运用知识、解决问题，不失为一次很好的学习体验。