

天线理论与设计：期末大作业

3190102060, 黄嘉欣, 信工 1903 班

题目—Design a rectangular microstrip patch with dimensions W and L , over a single substrate, whose center frequency is 10 GHz. The dielectric constant of the substrate is 10.2 and the height of the substrate is 0.127 cm (0.050 in.). Determine the physical dimensions W and L (in cm) of the patch, taking into account field fringing. Use HFSS to simulate the input impedance of Prob. 14.9, where: (1) The patch antenna is fed by a 50 Ohm microstrip line (use Eq. 14.19 to calculate the width of the feeder line); (2) The ground plane should be larger than the patch (can be $5L \times 5W$); (3) Both patch and ground are PEC; (4) Lumped port is used for the excitation; (5) Frequency range: 8GHz-14GHz. Determine: (1) The difference between HFSS's resonant frequency and 10GHz, why is there difference? (2) Calculate the E-and H-plane radiation at the HFSS resonant frequency.

I. 天线参数计算

由题意, 天线的中心频率 $f_r = 10\text{GHz}$, 介质基片的相对介电常数 $\epsilon_r = 10.2$, 高度为 $h = 0.05\text{in} = 0.127\text{cm}$, 则可得辐射贴片的宽度为 $W = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{3 \times 10^{10}}{2 \times 10 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{10.2 + 1}} = 0.6339\text{cm} = 0.2496\text{in}$, 进而得 $\frac{h}{W} = 0.20$, 代入有效相对

介电常数公式: $\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} [1 + 12 \frac{h}{W}]^{-0.5} = 8.093$,

有 $\Delta L = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3)(\frac{W}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258)(\frac{W}{h} + 0.8)} h = 0.0509\text{cm}$, 故 $L =$

$\frac{\lambda}{2} - 2\Delta L = \frac{3}{2\sqrt{8.093}} - 2 \times \Delta L = 0.4255\text{cm}$ 。又该天线与特性

阻抗为 50Ω 的微带线相连, 由 Eq 14-19[1]:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \ln \left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right], & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases}$$

其中 $Z_c = 50\Omega$, 即可解得此微带线的宽度为 $W_0 = 0.76h = 0.0966\text{cm}$ 。

与此同时, 设辐射点和辐射贴片边缘的距离为 y_0 , 由于 $\lambda_0 = \frac{v_0}{f_r} = 3\text{cm} > W = 0.6339\text{cm}$, 有 $G_1 = \frac{1}{90} \left(\frac{W}{\lambda_0} \right)^2 = 4.96 \times 10^{-4}\text{Siemens}$, 又由 Eq 14-18a, 求得 $G_{12} = 4.079 \times 10^{-4}\text{Siemens}$, 故可得 $Z_{\text{in}} = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})} = 553.16\Omega$, 选择输

入阻抗为 50Ω 的馈点, 有: $50 = Z_{\text{in}} \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right)$, 即可解得:

TABLE I

变量与实际天线参数对应关系

变量	实际天线参数	取值
W	辐射贴片宽度 W	0.6339cm
L	辐射贴片长度 L	0.4255cm
h	介质基片高度 h	0.127cm
W0	阻抗转换器宽度 W_T , 50Ω微带线宽度 W_0	0.0966cm
y0	切缝宽度 W_c 馈线嵌入距离 y_0	0.1713cm
lambda	实际波长 λ_0	3.00cm

$y_0 = \frac{1.265}{\pi} L = 0.1713\text{cm}$, 即馈线嵌入距离 $y_0 = 0.1713\text{cm}$,

此时四分之一波长阻抗转换器的特性阻抗 $Z_T = \sqrt{Z_{\text{in}} Z_c} = 50\Omega$, 同理, 由 Eq 14-19 可得四分之一波长阻抗转换器的宽度为 $W_T = 0.0966\text{cm}$ 。通过查阅相关资料[2], 发现切缝的宽度应与四分之一波长阻抗转换器的宽度接近, 故取其为 $W_c = 0.0966\text{cm}$ 。

综上, 此微带天线的各项参数分别为 $W = 0.6339\text{cm}$, $L = 0.4255\text{cm}$, $h = 0.127\text{cm}$, $\epsilon_r = 10.2$, $f_r = 10\text{GHz}$, $W_0 = 0.0966\text{cm}$, 馈线嵌入距离 $y_0 = 0.1713\text{cm}$, 四分之一波长阻抗转换器线宽为 $W_T = 0.0966\text{cm}$, 切缝宽度为 $W_c = 0.0966\text{cm}$ 。

II. 天线的 HFSS 仿真设计

A. 新建设计工程

- 1) 运行 HFSS 软件并新建工程, 将工程文件另存为 Microstrip.aedt。
- 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。
- 3) 设置模型长度单位, 在主菜单栏中选择 Modeler—Units, 选择 cm。

B. 添加和定义设计变量

在主菜单栏中选择 HFSS—Design Properties, 打开设计属性对话框, 依次定义变量 W , 初始值为 0.6339cm; 定义变量 L , 初始值为 0.4255cm; 定义变量 h , 初始值为 0.127cm; 定义变量 W_0 , 初始值为 0.0966cm; 定义变量 y_0 , 初始值为 0.1714cm; 定义变量 x_0 , 初始值为 $W/2$; 定义变量 λ , 初始值为 3.00cm, 点击确定。各变量与实际天

线参数对应关系如 TABLE I 所示。

C. 生成微带天线

总的来说,微带天线一共包含有四个部分:介质基片、辐射贴片、四分之一波长阻抗转换器、 50Ω 微带传输线。其可以在 HFSS 中使用长方体或矩形面进行绘制。对于 PEC 材质的贴片和地面,我们可以通过给一个二维平面模型分配理想导体边界条件的方式进行模拟。为便于观察,我们以 x 轴作为 L 的方向,以 y 轴作为 W 的方向,各部分的设计建模流程如下:

1) 绘制介质基片

在 HFSS 中,我们需要绘制长方体作为介质基片。针对此次仿真的天线,其介质基片的相对介电常数为 10.2,尺寸为 $5L \times 5W \times h$,底面为地面、材质为 PEC,仿真步骤如下:

- 1) 在主菜单栏中选择 Draw—Box 或单击工具栏上的长方体按钮,进入创建长方体的状态。新建的长方体会添加到操作历史树的 Solids 节点下,默认名为 Box1。
- 2) 双击操作历史树中 Solids 下的 Box1 节点,将长方体名称设置为 Substrate,新增材质命名为 Sub,且在其 Relative Permittivity 一栏中填写 10.2,损耗角正切设为 0.003(更符合实际材料)。
- 3) 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,在选项卡中设置长方体的底面顶点坐标、长、宽、高。在 Position 文本框中输入底面顶点坐标 $(-5*L/2, -5*W/2, 0)$,在 XSize 文本框中输入长度值 $5*L$,在 YSize 文本框中输入宽度值 $5*W$,在 ZSize 文本框中输入高度值 h ,点击确定,完成介质基片 Substrate 的创建。
- 4) 选中 Substrate 的下表面,单击右键,在菜单中选择 Edit—Surface—Create Object From Face,从而新建地面。其会添加到操作历史树的 Sheets 节点下,默认名为 Substrate_ObjectFromFace1。
- 5) 双击 Substrate_ObjectFromFace1 节点,将矩形名称设置为 GND,点击确定。
- 6) 右键单击操作历史树中的 GND 节点,选择 Assign Boundary—Perfect E,将该平面设置为完美电导体,点击确定,完成地面的创建。

2) 绘制辐射贴片

在 HFSS 中,我们使用矩形面作为天线的辐射贴片。针对此次仿真的天线,其辐射贴片材质为 PEC,尺寸为 $L \times W$,仿真步骤如下:

- 1) 在主菜单栏中选择 Draw—Rectangle 或单击工具栏上的矩形按钮,进入创建矩形的状态。新建的矩形会添加到操作历史树的 Sheets 节点下,默认名为 Rectangle1。
- 2) 双击操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle1 节点,将矩

形名称设置为 Patch, 点击确定。

- 3) 双击操作历史树中 Patch 下的 CreateRectangle 节点,打开新建矩形属性对话框的 Command 选项卡,在选项卡中设置矩形的顶点坐标、长和宽。在 Position 文本框中输入顶点坐标 $(-L/2, -W/2, h)$,在 XSize 文本框中输入长度值 L ,在 YSize 文本框中输入宽度值 W ,点击确定,完成辐射贴片 Patch 的创建。

3) 绘制四分之一波长阻抗转换器

同理,在 HFSS 中,我们使用矩形面作为 $1/4$ 波长阻抗转换器,其仿真步骤如下:

- 1) 在主菜单栏中选择 Draw—Rectangle 或单击工具栏上的矩形按钮,进入创建矩形的状态。新建的矩形会添加到操作历史树的 Sheets 节点下,默认名为 Rectangle1。
- 2) 双击操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle1 节点,将矩形名称设置为 Transition,点击确定。
- 3) 双击操作历史树中 Transition 下的 CreateRectangle 节点,打开新建矩形属性对话框的 Command 选项卡,在选项卡中设置矩形的顶点坐标、长和宽。在 Position 文本框中输入顶点坐标 $(L/2-y_0, -W_0/2, h)$,在 XSize 文本框中输入长度值 $\lambda/4$,在 YSize 文本框中输入宽度值 W_0 ,点击确定,完成四分之一波长阻抗转换器 Transition 的创建。

4) 绘制 50Ω 微带传输线

在 HFSS 中,我们使用矩形面作为 50Ω 微带传输线,其仿真步骤如下:

- 1) 在主菜单栏中选择 Draw—Rectangle 或单击工具栏上的矩形按钮,进入创建矩形的状态。新建的矩形会添加到操作历史树的 Sheets 节点下,默认名为 Rectangle1。
- 2) 双击操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle1 节点,将矩形名称设置为 Microstrip,点击确定。
- 3) 双击操作历史树中 Microstrip 下的 CreateRectangle 节点,打开新建矩形属性对话框的 Command 选项卡,在选项卡中设置矩形的顶点坐标、长和宽。在 Position 文本框中输入顶点坐标 $(L/2-y_0+\lambda/4, -W_0/2, h)$,在 XSize 文本框中输入长度值 $5*L/2-(L/2-y_0+\lambda/4)$,在 YSize 文本框中输入宽度值 W_0 ,点击确定,完成 50Ω 微带传输线的创建。

5) 矩形面合并与切缝生成

- 1) 按住 Ctrl 键,依次单击工程树 Sheets 节点下的 Patch、Transition、Microstrip 三个矩形面,再选择主菜单中的 Modeler—Boolean—Unite 命令,执行合并操作。此时合并生成的物体名称及属性与最先选中的矩形面即 Patch 相同。
- 2) 右键单击操作历史树中的 Patch 节点,选择 Assign Boundary—Perfect E,将该平面设置为完美电导体,点击确定。

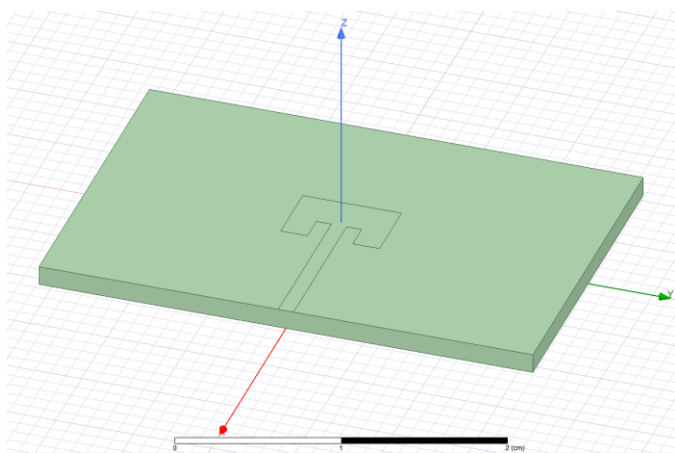


Fig. 1. HFSS 中绘制得到的微带天线模型。

- 3) 在主菜单栏中选择 Draw—Rectangle 或单击工具栏上的矩形按钮, 进入创建矩形的状态。新建的矩形会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 默认名为 Rectangle1。
- 4) 双击操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle1 节点, 将矩形名称设置为 Cut1, 点击确定。
- 5) 双击操作历史树中 Cut1 下的 CreateRectangle 节点, 打开新建矩形属性对话框的 Command 选项卡, 在选项卡中设置矩形的顶点坐标、长和宽。在 Position 文本框中输入顶点坐标($L/2 - y_0, -3*W_0/2, h$), 在 XSize 文本框中输入长度值 y_0 , 在 YSize 文本框中输入宽度值 W_0 , 点击确定。
- 6) 同理, 新建矩形 Cut2, 与 Cut1 分别位于 $1/4$ 波长阻抗转换器的两侧。其顶点坐标为($L/2 - y_0, W_0/2, h$), 长为 y_0 , 宽为 W_0 。
- 7) 依次选中 Sheets 节点下的 Patch、Cut1、Cut2, 再选择主菜单中的 Modeler—Boolean—Subtract 命令, 执行裁剪操作, 此时绘制得到的微带天线如图 Fig.1 所示。

D. 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 10GHz 的工作频率下即为 0.75cm 。在此次仿真中, 我们使用长方体的表面作为辐射边界, 其各个面与辐射贴片的距离均为 0.75cm , 仿真步骤如下:

- 1) 在菜单栏中选择 Create Region, 并在弹出的窗口中将 PaddingType 改为 Absolute Offset, Value 改为 $\lambda/4$, 点击 OK。
- 2) 双击操作历史树下 Solids 的 Region 节点, 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。
- 3) 右键单击操作历史树中的 Region 节点, 选择 Assign Boundary—Radiation, 在弹出的对话框中保留默认设置, 从而将长方体的表面设置为辐射边界。

E. 设置端口激励

在此次仿真中, 传输线终端使用集总端口激励。集总

端口平面宽度设置为微带线宽度, 高度设置为介质基片高度, 端口底面和参考地相接, 并使端口负载为 50Ω , 仿真步骤如下:

- 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。
- 2) 在主菜单栏中选择 Draw—Rectangle 或单击工具栏上的矩形按钮, 进入创建矩形的状态。新建的矩形会添加到操作历史树的 Sheets 节点下, 默认名为 Rectangle1。
- 3) 双击操作历史树中 Sheets 下的 Rectangle1 节点, 将矩形名称设置为 Port, 点击确定。
- 4) 双击操作历史树中 Port 下的 CreateRectangle 节点, 打开新建矩形属性对话框的 Command 选项卡, 在选项卡中设置矩形的顶点坐标、长和宽。在 Position 文本框中输入顶点坐标($5*L/2, -W_0/2, h$), 在 YSize 文本框中输入长度值 W_0 , 在 ZSize 文本框中输入宽度值 $-h$, 点击确定。
- 5) 右键单击操作历史树中的 Port 节点, 选择 Assign Excitation—Lumped Port, 在打开的集总参数设置对话框中, 将 Full Port Impedance 设为 50Ω , 单击下一页。
- 6) 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。

F. 求解设置

针对此次所仿真的微带天线, 其中心频率为 10GHz , 扫频范围为 $8\text{GHz} - 14\text{GHz}$, 选择快速扫频类型, 分析天线在 $8\text{GHz} - 14\text{GHz}$ 频段的输入阻抗与回波损耗。具体步骤如下:

- 1) 右键单击工程树下的 Analysis, 在弹出的对话框中选中 Add SolutionSetup, 将求解频率设为 10GHz , 自适应网格剖分的最大迭代次数设为 20, 收敛误差 0.02。
- 2) 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, 将扫频类型选择为快速扫频, 扫频范围为 $8\text{GHz} - 14\text{GHz}$, 点数为 6000, 点击确定。

G. 设计检查和运行仿真

通过上述仿真设计, 我们已经完成了模型的创建和求解设置等前期工作。在运行仿真之前, 需要进行设计检查, 确认设计的完整性和正确性, 唯有 HFSS 设计完整无误后, 方才开始运行仿真计算。具体步骤如下:

- 1) 选择主菜单中的 HFSS—Validation Check, 进行设计检查。若弹出的对话框中无警告出现, 则表示设计正确, 可以进行下一步计算。
- 2) 右键单击工程树下的 Analysis—Setup1, 在弹出的菜单中选择 Analyze, 运行仿真计算。

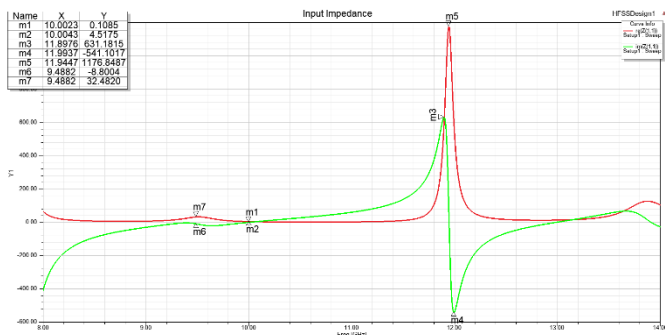


Fig. 2. 微带天线在8GHz – 14GHz频段内的输入阻抗。

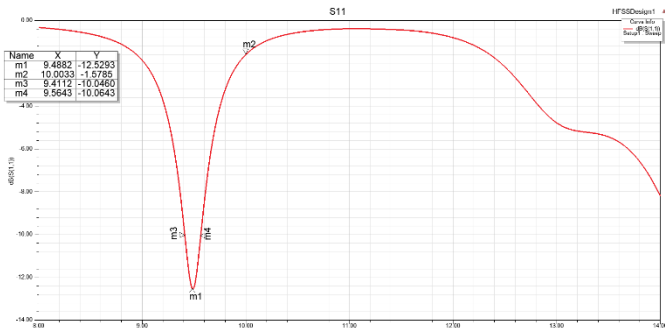
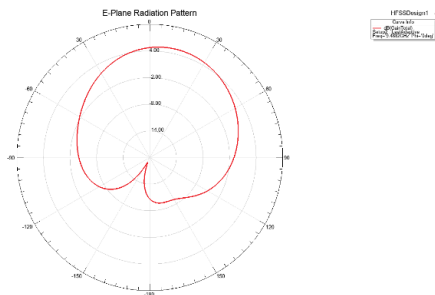
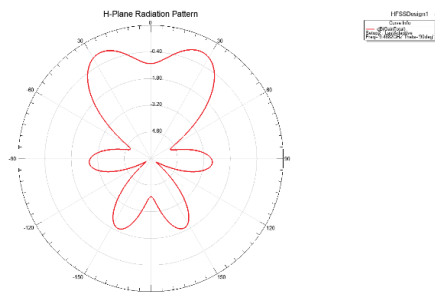


Fig. 3. 微带天线在8GHz – 14GHz频段内的回波损耗。

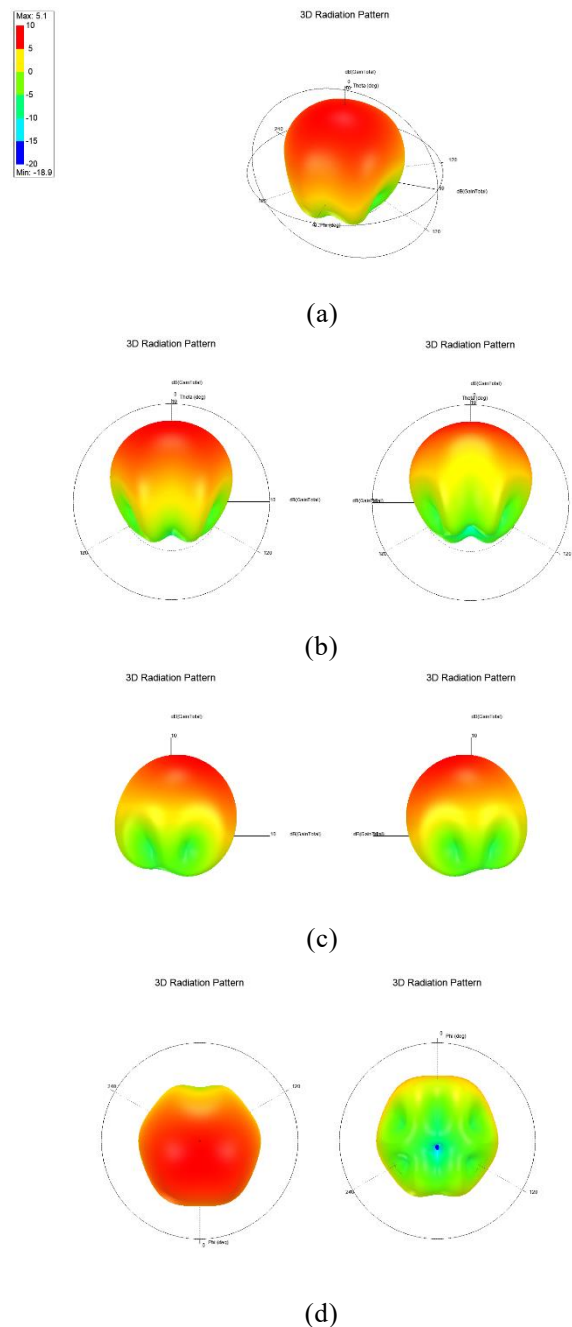
Fig. 4. 微带天线在 HFSS 谐振频率 $f_0 = 9.4882GHz$ 时的 E 平面方向图。Fig. 5. 微带天线在 HFSS 谐振频率 $f_0 = 9.4882GHz$ 时的 H 平面方向图。

- 3) 耐心等待 HFSS 计算完毕，即可在工程树下 Results 节点中查看各参数仿真结果报告。

III. 天线的 HFSS 数据后处理及其分析

A. 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。

Fig. 6. 微带天线在 HFSS 谐振频率 $f_0 = 9.4882GHz$ 时的 3D 方向图。(a) 斜视图；(b)正视图与后视图；(c)左视图与右视图；(d)俯视图与仰视图。

- 2) 依次在 Category、Function 中选择 Z Parameter、im 和 re，点击 New Report，再单击 Close，得到天线的输入阻抗结果报告如图 Fig. 2 所示。

根据仿真结果，当频率为10GHz时，微带天线的输入阻抗为 $(4.5175 + j0.1085) \Omega$ ，虚部与 0 较为接近，但实部与理论值 50Ω 相差较大。一方面，这是由于天线的谐振频率与中心频率存在差异；另一方面，通过读取谐振频率(由 Fig.3 可得 $f_0 = 9.4882GHz$)处的天线输入阻抗，可以发现其与理论值差异也比较大，即阻抗匹配存在一定的偏差。分析来看，这可能是由于在进行天线参数计算时采用了估计算法，得到的 Z_{in} 及 y_0 与准确值存在些许偏差，以及其他参数计算时存在的四舍五入等，作为一种比较精密的产

品,微带天线对这些参数的微小变化较为敏感。除此之外,辐射边界的不同、介质基片参数的不同以及切缝宽度的改变,都会对仿真结果产生影响。

观察 Fig. 2, 可以发现此微带天线在频率 $11.9\text{GHz} - 12.0\text{GHz}$ 之间存在高次模谐振, 此处的谐振电阻为 $R =$

$$1176.8487\Omega, \text{ 谐振电抗为 } X = \frac{631.1815 - 541.1017}{2} = 45.04\Omega.$$

在此谐振频率周围, 电阻和电抗都表现出了对称性, 与理论吻合很好。然而, 由于在计算天线的输入阻抗时, 我们

采用了公式 $Z_{in} = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})}$, 所得输入阻抗比分母中两者相

减的情况更小, 显然应取中心频率之前的一次模谐振频率 f_0 作为谐振频率, 其可通过回波损耗结果得出。

B. 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。

2) 依次在 Category、Function 中选择 S Parameter、dB, 点击 NewReport, 再单击 Close, 得到天线的回波损耗结果报告如图 Fig. 3 所示。

由仿真结果可以发现, 此微带天线的回波损耗在频率 $f_0 = 9.4882\text{GHz}$ 取得最小值 -12.5293dB , 性能最佳, 故可得其谐振频率为 9.4882GHz , 其与中心频率 f_r 之间的差异为 $\Delta f = f_r - f_0 = 0.5118\text{GHz}$ 。

对于谐振频率与中心频率之间偏差产生的原因, 其主要可能有以下三个方面: 首先, 由于仿真时设置的参数与实际参数存在微小偏差, 如贴片的宽度与长度存在四舍五入, 对谐振频率影响较大; 其次, 由于插入馈电引起的物理缺口, 馈线与切片之间存在不连续性, 导致谐振频率可能会因结引入的电容发生变化, 且易受到馈点位置和切缝宽度的影响; 最后, 不同介质和外部辐射条件的设置, 可能会使天线的谐振性质产生差异。经过仿真发现, 调节切缝的宽度可以有效调整天线的谐振频率, 这与微带天线的性质相一致。

除此之外, 此天线在 $9.41\text{GHz} - 9.56\text{GHz}$ 之间的回波损耗 S_{11} 小于 -10dB , 此时其能够将大部分能量辐射出去, 辐射特性更好; 天线 $S_{11} < -10\text{dB}$ 的绝对带宽为 $\text{BW} = 9.56 - 9.41 = 0.15\text{GHz}$, 频带相对较窄^[3]。

C. 方向图

为得到天线在 HFSS 谐振频率 ($f_0 = 9.4882\text{GHz}$) 下的方向图, 需重新创建一个新的求解设置 Setup2, 其求解频率为 9.4882GHz , 其余设置值与 Setup1 一致, 运行仿真计算, 并按如下步骤处理, 即可得到结果报告:

1) 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, 在此处定义辐射表面

E_Plane, 其中, Phi 的起始角度都为 0, 步长为 0; Theta 的起始角度为 -180deg 和 180deg , 步长为 1deg 。

2) 同理, 定义辐射表面 H_Plane, 其中, Phi 的起始角度为 0 和 360deg , 步长为 1deg ; Theta 的起始角度都为 90deg , 步长为 0。

3) 进一步定义辐射表面 3D_Sphere, 其中, Phi 的起始角度为 0 和 360deg , 步长为 1deg ; Theta 的起始角度为 0 和 180deg , 步长为 1deg 。

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—Radiation Pattern 命令, 打开报告设置对话框。

5) 在对话框左侧 Solution 中选择 Setup2: LastAdaptive, Geometry 中选择 E_Plane, 右侧 Primary Sweep 中选择 Theta, 下方 Category、Quantity、Function 中依次选择 Gain、GainTotal、dB, 点击 NewReport, 再单击 Close, 得到天线 E 平面的方向图如图 Fig. 4 所示。

6) 同理, 打开报告设置对话框, 在 Solution 中选择 Setup2: LastAdaptive, Geometry 中选择 H_Plane, Primary Sweep 中选择 Phi, 在 Category、Quantity、Function 中依次选择 Gain、GainTotal、dB, 得到天线 H 平面的方向图如图 Fig. 5 所示。

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—3D Polar Plot 命令, 打开报告设置对话框。

8) 在对话框左侧 Solution 中选择 Setup2: LastAdaptive, Geometry 中选择 3D_Sphere, 在右侧 Primary Sweep 中选择 Phi, Secondary Sweep 中选择 Theta, 下方 Category、Quantity、Function 依次选择 Gain、GainTotal、dB, 点击 NewReport, 再单击 Close, 得到天线的三维方向图如图 Fig. 6 所示。

由仿真结果可以发现, 在谐振频率下, 微带天线的最大增益为 5.1dB , 最小增益为 -18.9dB 。在 E 平面(Fig. 4), $\varphi = 0^\circ$, 辐射场非对称分布, 但其在上半空间的辐射较为均匀, 总体呈圆形, 贴片的侧射方向辐射更强, 与理论一致; 在 H 平面(Fig. 5), $\theta = 90^\circ$, 此时由于辐射场的强度变化, 其方向图存在两个主瓣、四个旁瓣, 与三维方向图和理论吻合很好。

通过 Fig. 6, 可以更加清晰地看到此微带天线的辐射特征。显然, 由于天线结构上的特点, 其辐射图关于平面 $\varphi = 90^\circ$ 并不对称, 但却比较相似。总的来说, 在上半空间, 天线辐射较为均匀, 总体成球状, 且最大辐射方向向前倾斜, 侧射方向辐射更强, 与 Fig. 4 相呼应; 在下半空间, 天线辐射强度变化较大, 存在多处衰减, 整体辐射强度比上半空间小很多, 与 Fig. 5 一致。综上, 仿真得到的三维方向图与理论预测吻合很好。

IV. 总结与心得

此次实验，我们在计算得到微带天线参数的基础上，利用 HFSS 对微带天线进行了仿真，不仅熟悉、掌握了微带天线的设计方法及步骤，也对其结构、性质有了更好的认识，不失为一次良好的学习体验。

从实验得到的结果来看，仿真值与理论值整体上较为一致。一方面，天线的输入阻抗在 $8\text{GHz} - 14\text{GHz}$ 的频带范围内随频率不断变化，出现了一次模谐振与高次模谐振，且在后者的谐振频率 $11.9\text{GHz} - 12.0\text{GHz}$ 的周围频带内呈现出电阻偶对称、电抗奇对称的现象。另一方面，谐振频率与中心频率之间的差异如预料般出现(具体分析可见 III. (B))，既让我们对微带天线的实际性质及其特点有了更深刻的认识，也很好地锻炼了我们分析问题的能力。最后，从天线的方向图来看，微带天线在贴片的侧射方向存在有最大的辐射，与理论所学一致。通过分析其在 E 平面和 H 平面的方向图，我们更好地了解了其辐射特性，对以后的设计及应用打下了十分重要的基础。

当然，在实验的过程当中，我也遇到过一些困难。首先，在对辐射边界条件进行设计时，由于设置不当，我错将辐射表面与介质基片的底面重合，导致仿真得到的输入阻抗和回波损耗与理论严重不符。在了解了 HFSS 的辐射边界要求后，我重新对相关设置进行了调整，得到了比较理想的计算结果。除此之外，在对天线的输入阻抗进行分析的过程中，我发现了其在谐振频率处的输入阻抗与理论值之间的偏差。为了减小差异，我对理论知识进行了回顾，并多次提高了最初计算所得参数的精确度，也对切缝宽度等进行了优化修改、重新仿真，最终意识到各个参数上的细微变化都有可能对仿真结果产生影响。虽然整个过程较为繁琐，但在不断调试的过程中，我加深了对知识的掌握，也对微带天线的性质有了更加深刻的认识，对我们以后的专业生活有着很大的启发意义。

总的来说，经过半学期的学习，我们了解了天线的工作原理和工程参数，认识了许多目前工程中常用的天线如线天线、环形天线、天线阵、微带天线等及其设计方法，学习了与电磁辐射相关的电磁理论和算法，练习了电磁仿真软件 HFSS 的使用，也从这个过程当中领悟到了工程师所必须具备的品质：细致、耐心与思考，干货满满。在此，我想感谢老师和助教这段时间以来的细心指导与耐心讲解。俗话说，“师傅领进门，修行靠个人”，在以后的学习生活中，我会继续努力用实践去验证理论所学、用工具辅助自身学习，掌握必备的技能、培养必须的思维方式，在将理论与实践结合的过程中掌握更多专业要领，为成为新型的高素质人才而不断前进。

- [2] “嵌入馈电微带天线,” 百度文库. [Online]. Available: <https://wenku.baidu.com/view/9f78d023482fb4daa58d4b27.html>
- [3] “天线理论与设计笔记 4—(缝隙天线、微带贴片天线),” 知乎专栏. [Online]. Available: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/269157318>

REFERENCES

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. New York: Wiley, 2016.