

第9章 功分器与定向耦合器设计

9.1 引言

功率分配器和定向耦合器都属于无源微波器件，主要应用于功率分配和功率合成。工程上常用的功率分配器件和定向耦合器有 T 型结功分器、威尔金森功分器、倍兹孔定向耦合器、分支线混合网络、Lange 耦合器、波导魔 T 和对称渐变耦合线耦合器等。

功率分配器通常采用三端口网络，常用 3dB 等分形式，但也有不等分的形式。而定向耦合器通常采用四端口网络，它可以设计为任意功分比。

本章分别介绍了功率分配器和定向耦合器的基本原理，然后以常用的威尔金森功分器和 Lange 耦合器为例，详细地介绍了如何利用 ADS2011 软件进行威尔金森功分器和 Lange 耦合器的原理图设计、仿真、优化及版图的生成与仿真。

9.2 功分器技术基础

功率分配器简称为功分器，在被用于功率分配时，一路输入信号被分成两路或多路较小的功率信号。功率合成器与功率分配器属于互易结构，利用功率分配器与功率合成器可以进行功率合成。功分器在相控阵雷达、大功率器件等微波射频电路中有着广泛的应用。

目前提供功分器产品的知名厂商包括美国安捷伦公司（Agilent）和德国 Narda 公司，常用的代表型号有 11667A/B/C（Agilent）、4315-2/4306-2/4311B-2（Narda）等。

相对大型微波立体器件，微带技术具有体积小、重量轻、成本低和频带宽等优点，本节以常见的微带型威尔金森功分器为例，在介绍其工作原理的基础上，利用 ADS 软件，对其具体的设计步骤和仿真流程进行了详细描述。

9.2.1 基本工作原理

威尔金森功率分配器的功能是将输入信号等分或不等分的分配到各个输出端口，并保持相同输出相位。环形器虽然有类似功能，但威尔金森功率分配器在应用上具有更宽的带宽。微带型功分器的电路结构如图 9-1 所示。其中，输入端口特性阻抗为 Z_0 ，两段分支微带线电长度为 $\lambda/4$ ，特性阻抗分别为 Z_{02} 和 Z_{03} ，终端分别接负载 R_2 和 R_3 。

功分器各个端口特性如下。

- (1) 端口 1 无反射。
- (2) 端口 2、端口 3 输出电压相等且同相。
- (3) 端口 2、端口 3 输出功率比值为任意指定值 $1/k^2$ 。

由此可知

$$\frac{1}{Z_{in2}} + \frac{1}{Z_{in3}} = \frac{1}{Z_0}$$

$$k^2 = \frac{P_3}{P_2}, P_2 = \frac{1}{2} \frac{U_2^2}{R_2}, P_3 = \frac{1}{2} \frac{U_3^2}{R_3}$$

$$U_2 = U_3$$

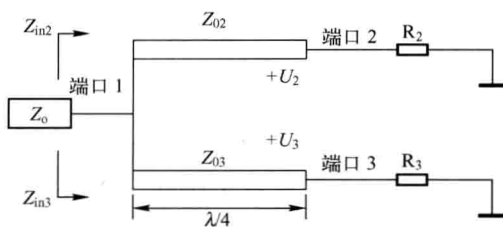


图 9-1 微带型功分器的电路结构

由四分之一波长传输线阻抗变换理论得

$$Z_{in2} \times R_2 = Z_{02}^2$$

$$Z_{in3} \times R_3 = Z_{03}^2$$

设 $R_2 = kZ_0$ ，则 Z_{02} 、 Z_{03} 、 R_3 为

$$Z_{02} = Z_0 \sqrt{k(1+k^2)}$$

$$Z_{03} = Z_0 \sqrt{\frac{(1+k^2)}{k^3}}$$

$$R_3 = \frac{Z_0}{k}$$

为了增加隔离度，在端口 2 和端口 3 之间贴加了一个电阻 R ，隔离电阻 R 的电阻值为

$$R = Z_0 \left(k + \frac{1}{k} \right)$$

可以看出，当 $k=1$ 时，上面的结果化简为功率等分情况。

9.2.2 功分器的基本指标

功分器的基本指标如下。

1. 输入端口的回波损耗

输入端口 1 的回波损耗根据输入端口 1 的反射功率 P_r 和输入功率 P_i 之比来计算：

$$C_{11} = -10 \log \left(\frac{P_r}{P_i} \right) = -20 \log |S_{11}|$$

2. 插入损耗

输出端口的插入损耗根据输出端口的输出功率与输入端口 1 的输入功率 P_i 之比来计算：

$$C_{12} = -10 \log \left(\frac{P_2}{P_i} \right) = -20 \log |S_{12}|$$



$$C_{13} = -10\log\left(\frac{P_3}{P_1}\right) = -20\log |S_{13}|$$

3. 输出端口间的隔离度

输出端口 2 和输出端口 3 间的隔离度根据输出端口 2 的输出功率 P_2 与输出端口 3 的输出功率 P_3 之比来计算:

$$C_{23} = -10\log\left(\frac{P_2}{P_3}\right) = -20\log \frac{|S_{12}|}{|S_{13}|}$$

4. 功分比

当其他端口无反射时, 功分比根据输出端口 3 的输出功率 P_3 与输出端口 2 的输出功率 P_2 之比来计算:

$$k^2 = \frac{P_3}{P_2}$$

5. 相位平衡度

在做功率合成应用时, 功分器输出端口的相位平衡度直接影响功率合成的效率。

9.3 功分器的原理图设计、仿真与优化

在了解功分器工作原理的基础上, 使用 ADS 软件设计一个等分威尔金森功分器, 并根据给定的指标对其性能参数进行优化仿真。

9.3.1 等分威尔金森功分器的设计指标

等分威尔金森功分器的设计指标如下。


- 频带范围: 0.9 ~ 1.1GHz。
- 频带内输入端口的回波损耗: $C_{11} > 20\text{dB}$ 。
- 频带内的插入损耗: $C_{12} < 3.3\text{dB}$, $C_{13} < 3.3\text{dB}$ 。
- 两个输出端口间的隔离度: $C_{23} > 25\text{dB}$ 。

9.3.2 建立工程与设计原理图

1. 建立工程

(1) 运行 ADS2011, 弹出 ADS2011 主窗口。

(2) 执行菜单命令【File】→【New】→【Workspace】, 弹出“New Workspace Wizard”对话框。单击【Next】按钮, “Workspace Name”栏中输入工程名为“equal_divider”, 工作路径默认。然后连续单击【Next】按钮, 在 Technology 一页中, 选择“Standard ADS Layers, 0.0001 millimeter layout resolution”, 单击【Finish】按钮, 完成新建工程, 如图 9-2 所示。

(3) 单击主窗口图标, 自动弹出“New Schematic”窗口, 将原理图名字“cell_1”改成“equal_divider_norminal”, 单击【OK】按钮关闭“New Schematic”窗口。自动弹出原理图设计窗口和原理图设计向导, 在原理图设计向导中选择“Cancel”, 完成原理图设计窗口的建立。



2. 设计原理图

(1) 在原理图设计窗口元器件面板列表中选择“TLines - Microstrip”，打开微带元器件面板，如图 9-3 所示。

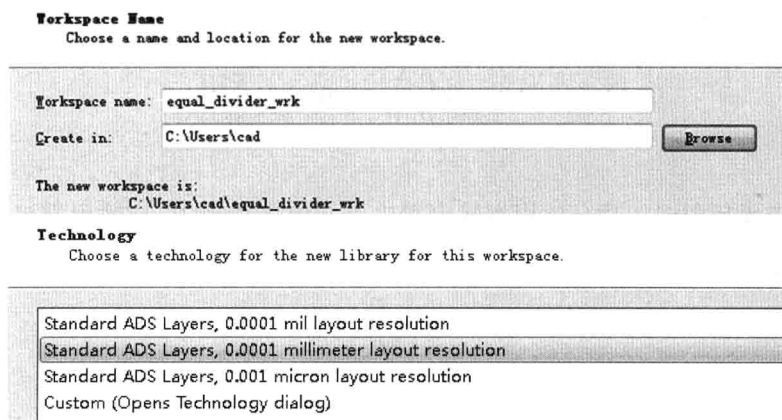


图 9-2 新工程窗口

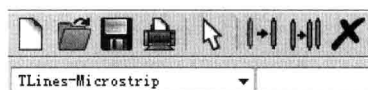


图 9-3 “TLines - Microstrip” 栏

(2) 原理图设计窗口左边的微带线元器件面板中有各种微带电路元器件，本节中用到的元器件如下所示。

- : MLIN，一般微带线。
- : Mcurve，弧形微带线。
- : MTEE，微带 T 型结。
- : MSUB，微带基片。
- : TFR，薄膜电阻。

(3) 设计输入端口电路，输入端口的电路连接如图 9-4 所示。

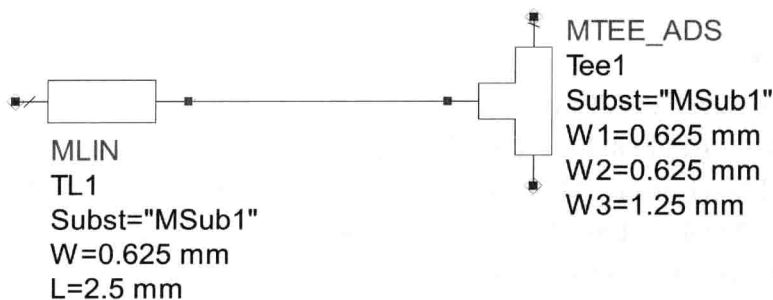


图 9-4 输入端口连接图

(4) 设计阻抗变换电路，四分之一波长阻抗变化线部分的连接如图 9-5 所示，其中薄膜电阻 TFR 为两路分支线之间的隔离电阻，用来增加两个输出端口之间的隔离度。

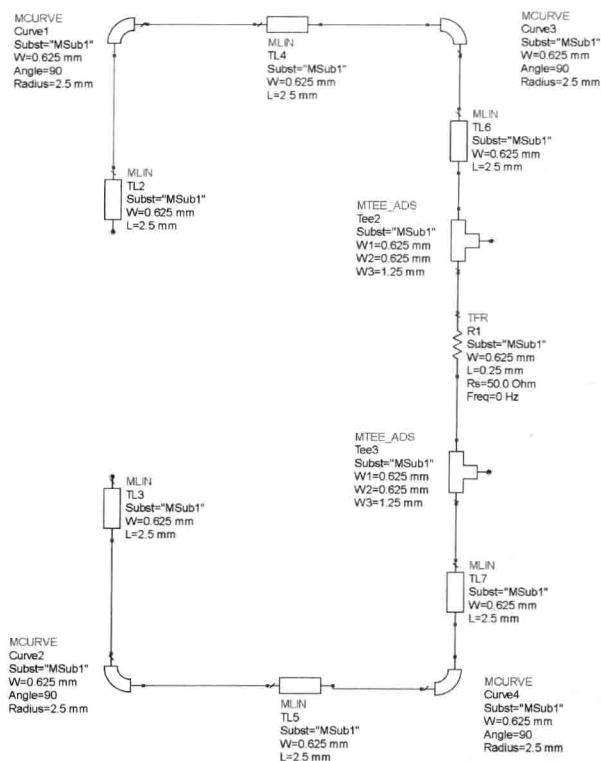


图 9-5 阻抗变化部分的连接图

(5) 设计输出端口电路，两输出端口的电路为对称结构，如图 9-6 和图 9-7 所示连接。

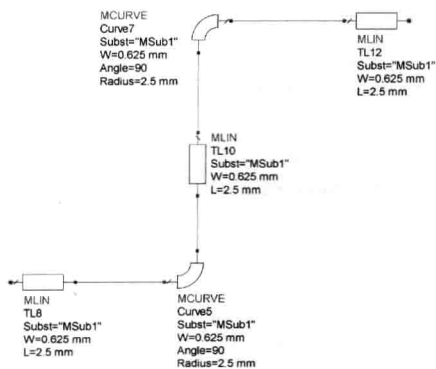


图 9-6 功分器的上支线

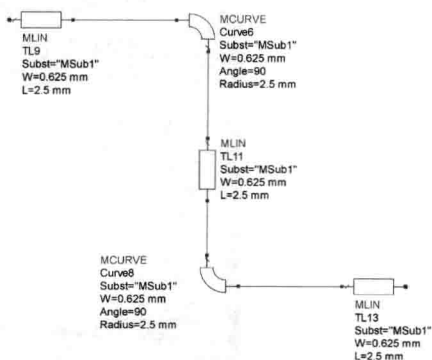


图 9-7 功分器的下支线

(6) 然后把输入端口电路、阻抗变换电路和输出端口电路用导线连接在一起，就构成了一个完整的微带型威尔金森功分器，如图 9-8 所示。

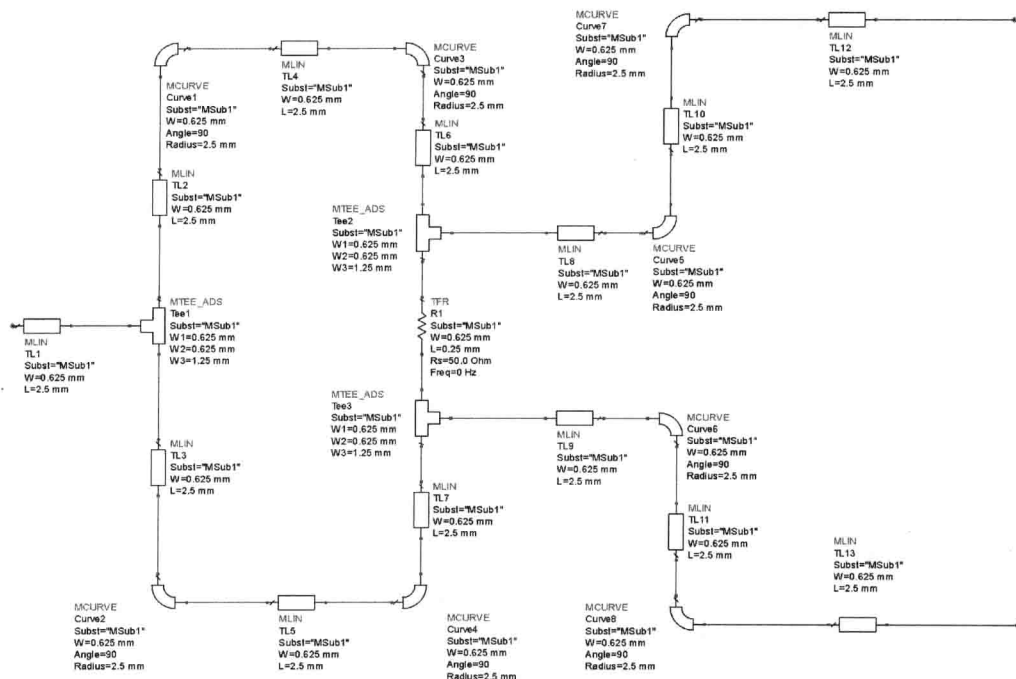


图 9-8 微带型威尔金森功分器的电路原理图

这样就完成了微带型威尔金森功分器电路原理图的整体构建。

9.3.3 基板参数设置

- (1) 在微带面板中选择微带线参数设置控件 MSub (微带基板), 插入电路原理图中。
- (2) 双击原理图中的“MSub”控件, 然后在弹出的对话框中设置参数, 如图 9-9 所示。

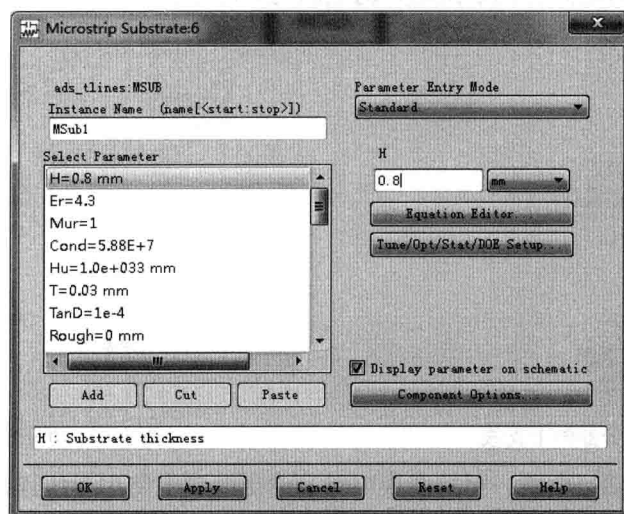


图 9-9 微带线参数设置控件对话框

- $H = 0.8\text{mm}$ ，表示微带线介质基片厚度为 0.8mm 。
- $\epsilon_r = 4.3$ ，表示微带线介质基片的相对介电常数为 4.3 。
- $\mu_r = 1$ ，表示微带线介质基片的相对磁导率为 1 。
- $\text{Cond} = 5.88\text{E}+7$ ，表示微带线金属片的电导率为 $5.88\text{E}+7$ 。
- $H_u = 1.0\text{e}+33\text{mm}$ ，表示微带电路的封装高度为 $1.0\text{e}+33\text{mm}$ 。
- $T = 0.03\text{mm}$ ，表示微带线金属片的厚度为 0.03mm 。
- $\text{TanD} = 1\text{e}-4$ ，表示微带线的损耗角正切为 $1\text{e}-4$ 。
- $\text{Rough} = 0\text{mm}$ ，表示微带线的表面粗糙度为 0mm 。

由功分器的理论分析可知，输入/输出端口微带线的特性阻抗为 50Ω ，四分之一波长微带线的特性阻抗为 70.7Ω 。

(3) 在原理图设计窗口的菜单栏中执行菜单命令【Tools】→【LineCalc】→【Start LineCalc】，弹出如图 9-10 所示的“LineCalc”窗口。在“Substrate Parameters”栏中填入如图 9-9 所示的 MSub 控件的基本参数。在“Componet Parameters”栏的“Freq”项中输入功分器的中心频率为 1GHz 。在“Electrical”栏的传输线特性阻抗“Z0”项中输入 50Ω ，单击  图标就可以在“Physical”栏的传输线宽度“W”项中得到 1.521330mm 的线宽，如图 9-10 所示。

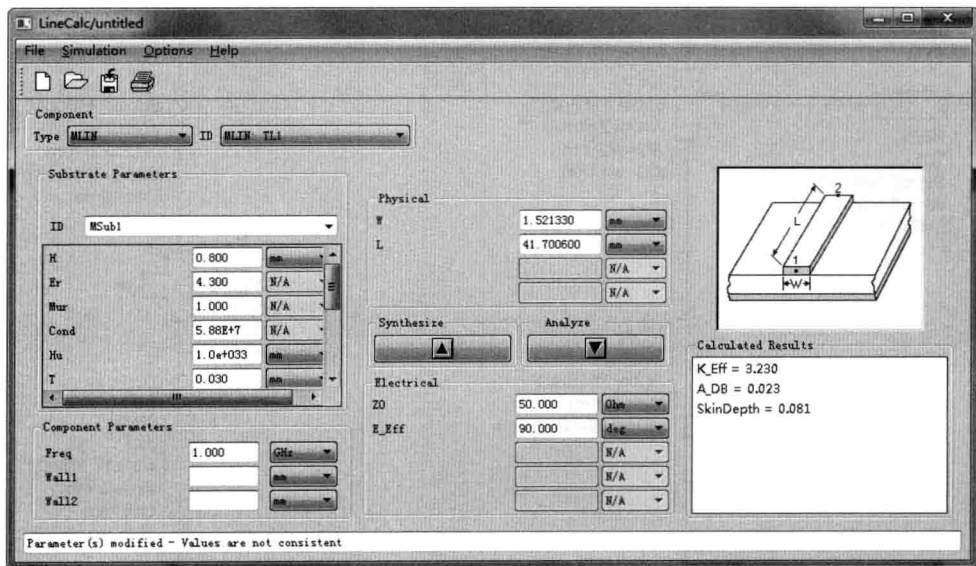




图 9-10 微带线计算工具“LineCalc”

(4) 在传输线特性阻抗“Z0”项中输入 70.7Ω ，并在“E_Eff”项中输入 90deg （四分之一波长），单击  图标得到“Physical”栏的“W”项为 0.788886mm ，“L”项为 42.897100mm （约为四分之一波长）。

(5) 计算出功分器各段微带线的理论尺寸后，为便于参数优化的需要，在原理图插入“VAR”控件。单击工具栏中的  图标，然后在原理图中单击插入的“VAR”控件。

(6) 双击“VAR”控件，弹出参数设置窗口，分别将“w1、w2、l”设置为变量，根据

前面“LineCalc”的计算结果，设置“ $w_1 = 1.52$ ”、“ $w_2 = 0.79$ ”、“ $l = 10$ ”（此处不设单位，在设置每段微带线时另行设定）。

(7) 完成“VAR”参量的输入后，依次双击原理图中功分器的各段微带线，并设置微带线的宽度 W 与长度 L ，单位为 mm 。具体的变量设置如图 9-11 和图 9-12 所示。

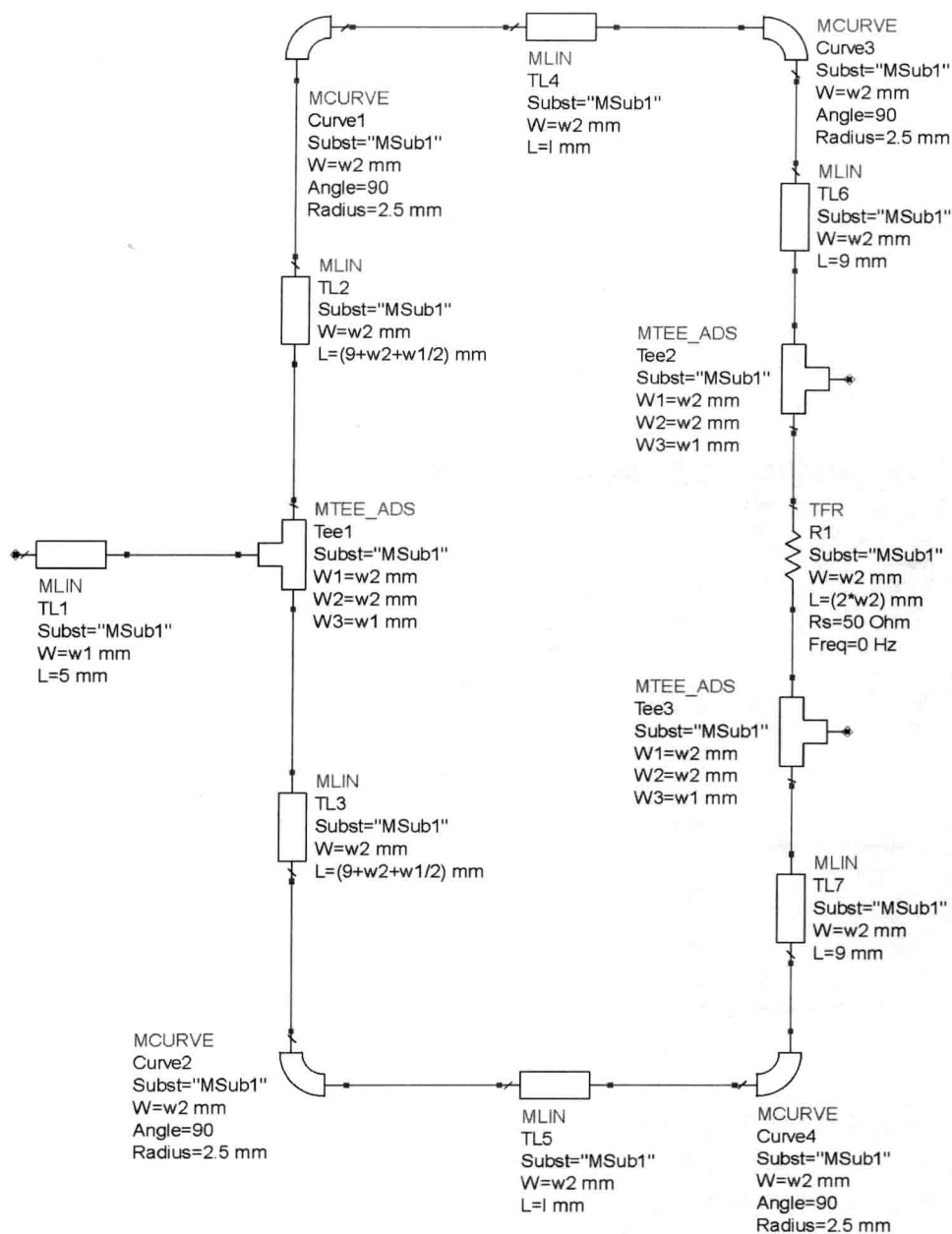


图 9-11 输入端口电路与四分之一波长电路处的微带参数设置

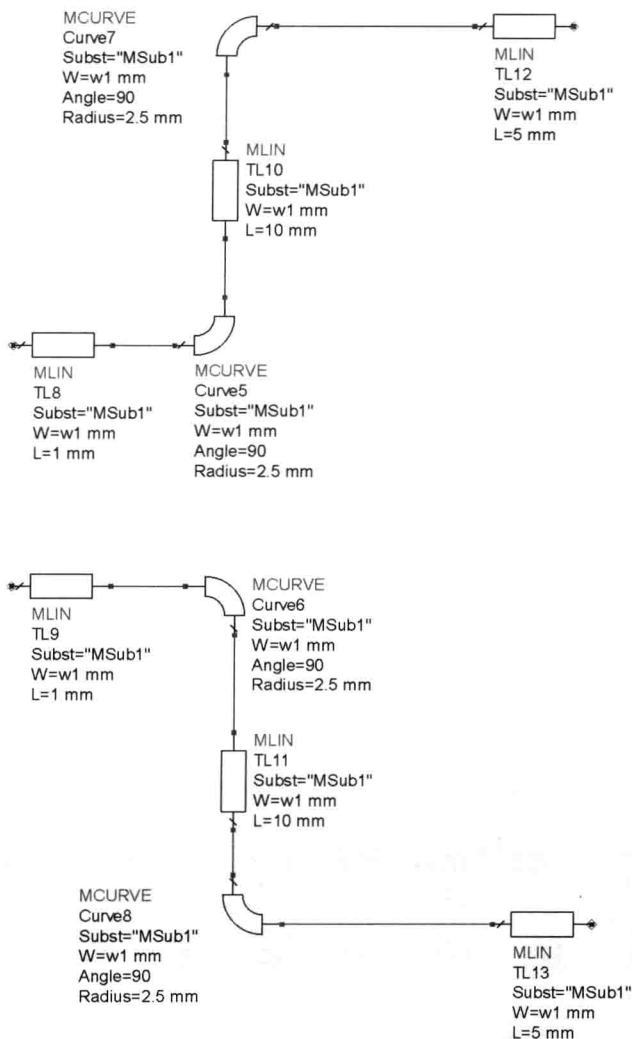






图 9-12 输出端口电路处的微带参数设置


9.3.4 功分器原理图仿真

完成原理图的设计后,就可以进行电路S参数的仿真了,具体步骤如下。

(1) 在原理图中添加并设置S参数扫描控件。选择S参数扫描控件插入原理图中,双击原理图中的控件“SP”,根据功分器的指标设置扫描的频率范围和步长,“Start”为0.9 GHz,“Stop”为1.1 GHz,“Step-size”为0.001GHz。

(2) 选择元器件“Term”放置在功分器的3个端口上,用来定义端口1、2和3,然后单击图标,放置3个“地”与“Term”相连接,完成的电路图如图9-13所示。

(3) 完成所有的连接和仿真参数设置以后,就可以对电路进行S参数的扫描了,单击工具栏中的图标进行电路仿真。

(4) 仿真完成后, 会自动弹出数据显示窗口, 再单击窗口左边的“Palette”工具栏中的矩形图图标放入数据显示窗口, 会自动弹出数据图的轨迹与属性窗口, 如图 9-14 所示。分别将 $S(1, 1)$ 、 $S(2, 1)$ 、 $S(2, 2)$ 、 $S(2, 3)$ 通过单击【Add】按钮添加到数据显示窗口, 最终的 S 参数仿真结果如图 9-15 所示。

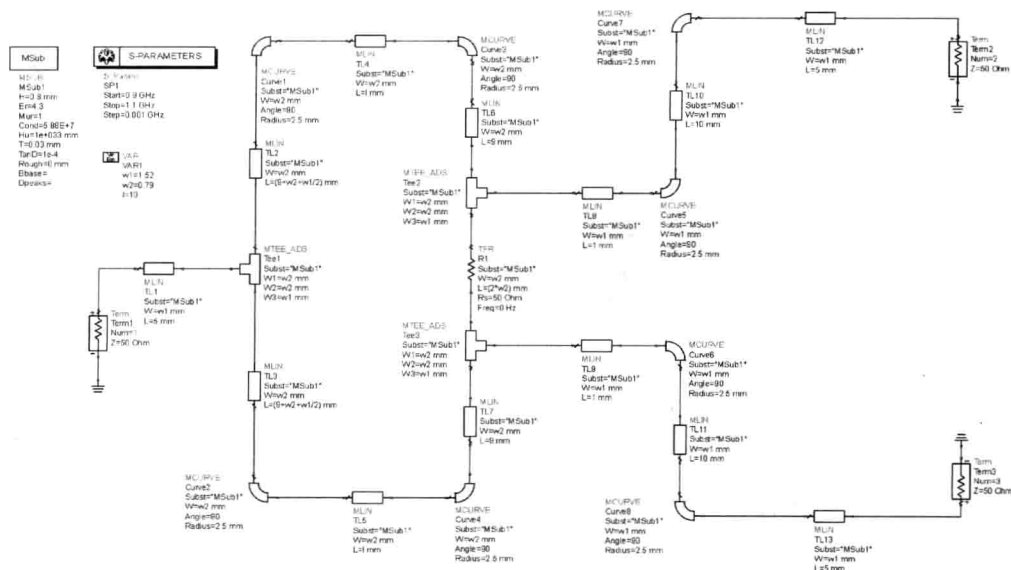


图 9-13 加入 S 参数元器件后的功分器整体原理图

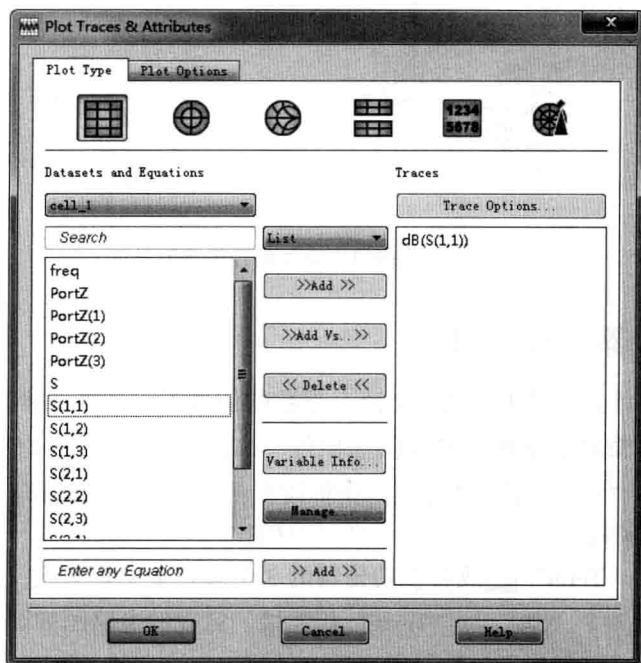


图 9-14 数据显示窗口

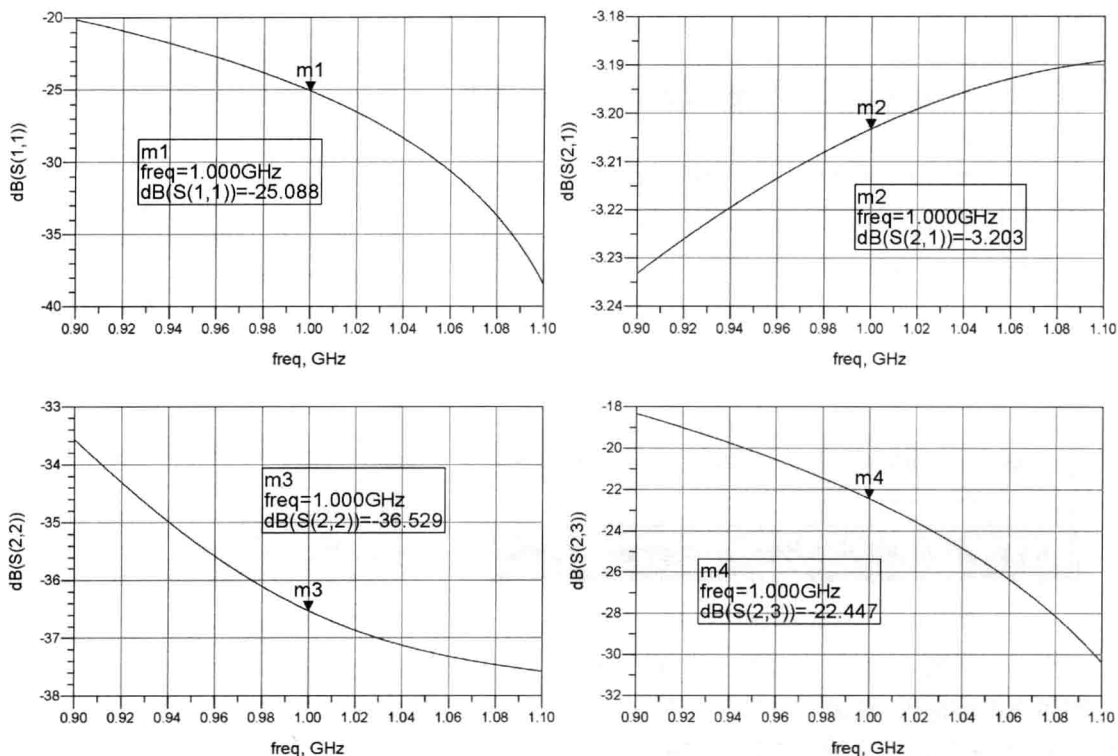


图 9-15 S 参数仿真结果图



从图 9-15 可知，两个输出端口间的隔离度（要求 $C_{23} > 25\text{dB}$ ）不满足设计要求，所以还需要对电路进行优化。

9.3.5 功分器电路参数的优化

打开“equal_divider_norminal”原理图窗口，执行菜单命令【File】→【Save As】，弹出“Save Design As”窗口，将原理图另存为“equal_divider_optimization”。在“equal_divider_optimization”的原理图里对电路进行优化。

(1) 双击“VAR”控件，弹出“Variables and Equations”窗口，如图 9-16 所示。在“Select Parameter”栏中选择 w2。单击“Tune/Opt/Stat/DOE Setup...”按钮，弹出“Setup”窗口，然后选择窗口中的“Optimization”标签页。在“Optimization Status”栏中选择“Enable”，在“Type”栏中选择“Continuous”，在“Format”栏中选择“min/max”，将“Minimum Value”和“Maximum Value”栏分别设置为 0.7 和 0.9，如图 9-17 所示。这样就完成了对参数 w2 的设置，单击【OK】按钮确定设置并关闭窗口。

(2) 再用同样的方法设置参数 l，l 的优化范围设置为 5 ~ 20。

(3) 设置完优化参数 w2 和 l，还需要选择优化方式和优化目标。从元器件面板列表中选择“Optim/Stat/Yield/DOE”元器件库。选择控件“Optim”（优化设置）和控件“Goal”（优化目标）插入原理图中。这里总共设置了 4 个优化目标，所以需要 4 个 Goal

控件, 分别优化 $S(1, 1)$ 、 $S(2, 2)$ 、 $S(2, 1)$ 和 $S(2, 3)$ 。

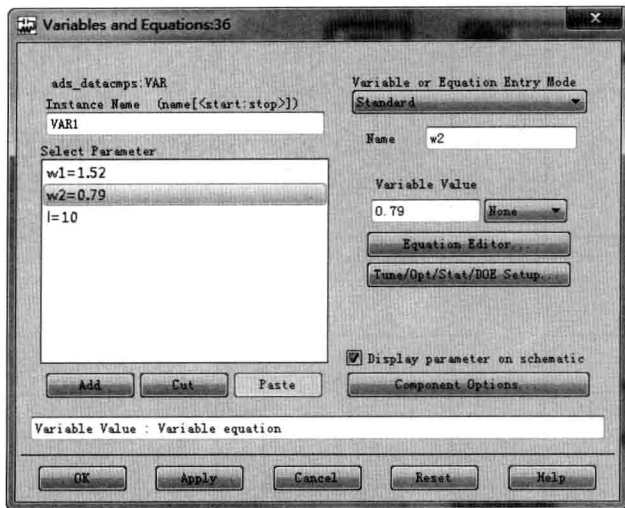


图 9-16 “Variables and Equations” 窗口

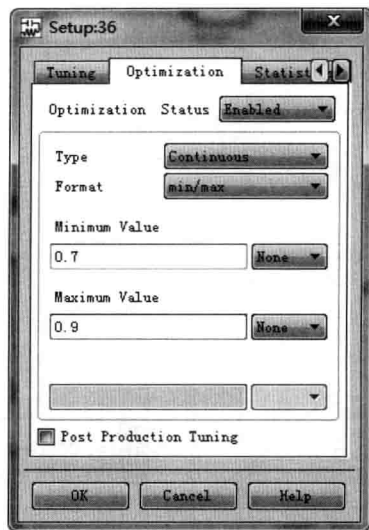


图 9-17 “Optimization” 窗口

由于电路的对称性, $S(3, 1)$ 和 $S(3, 3)$ 不用设置优化, $S(1, 1)$ 和 $S(2, 2)$ 分别用来设定输入/输出端口的反射系数, $S(2, 1)$ 用来设定功分器通带内的衰减情况, $S(2, 3)$ 用来设定两个输出端口的隔离度。

(4) 双击控件 “Optim” 设置优化方法及优化次数, 在 “Optimization Type” 栏中选择 “Random” 项, 在 “Number of iterations” 栏中修改数字为 100。常用的优化方法有 Random (随机) 和 Gradient (梯度) 等。其中, 随机法通常用于大范围搜索; 梯度法则用于局部收敛。

(5) 控件 “Optim” 设置完成后, 再分别设置 4 个 Goal 控件。双击控件 “Goal”, 弹出参数设置窗口, 根据等分威尔金森功分器的设计指标, 对它的各个参数进行设置。

- 在 “Expression” 项中输入表达式 “dB (S (1, 1))”, 表示优化的目标是端口 1 反射系数的 dB 值。
- 在 “Analysis” 项中输入 “SP1”, 表示针对 S 参数仿真 SP1 进行的优化。
- Weight 值采用默认, 表示优化的几个目标没有主次之分。
- 单击 “Indep. Vars” 右边的 【Edit】 按钮, 弹出 “Edit Independent Variable” 窗口。单击 【Add Variable】 按钮。
- 在左边的 “IndepVar1” 处, 输入 “freq”, 将 “IndepVar1” 换成 “freq”, 用来限制优化目标的频率范围。
- 在 “limit lines” 下面的列表中, “Type” 选择 “<”, Max = -20, 表示优化的目标是 dB (S (1, 1)) 不超过 -20dB。
- Weight 值采用默认。
- “freq min = 0.9GHz” 表示频率优化范围的最小值为 0.9GHz; “freq max = 1.1GHz” 表示频率优化范围的最大值为 1.1GHz。

其余 3 个 Goal 控件的参数如图 9-18 所示, 具体不再一一赘述。

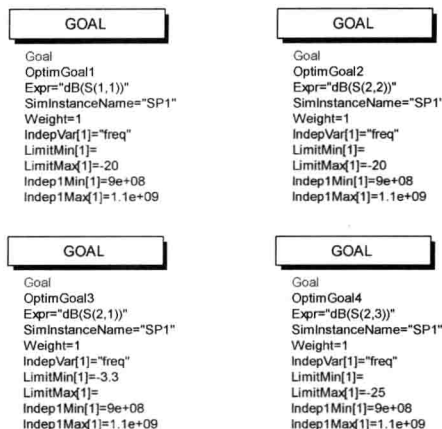



图 9-18 设置完成的“Goal”控件电路参数图

(6) 加入优化元器件后的功分器原理图如图 9-19 所示，设置完优化目标后先单击保存按钮保存原理图，然后单击工具栏中的  图标，弹出“Optimization Cockpit”窗口，开始进行优化。

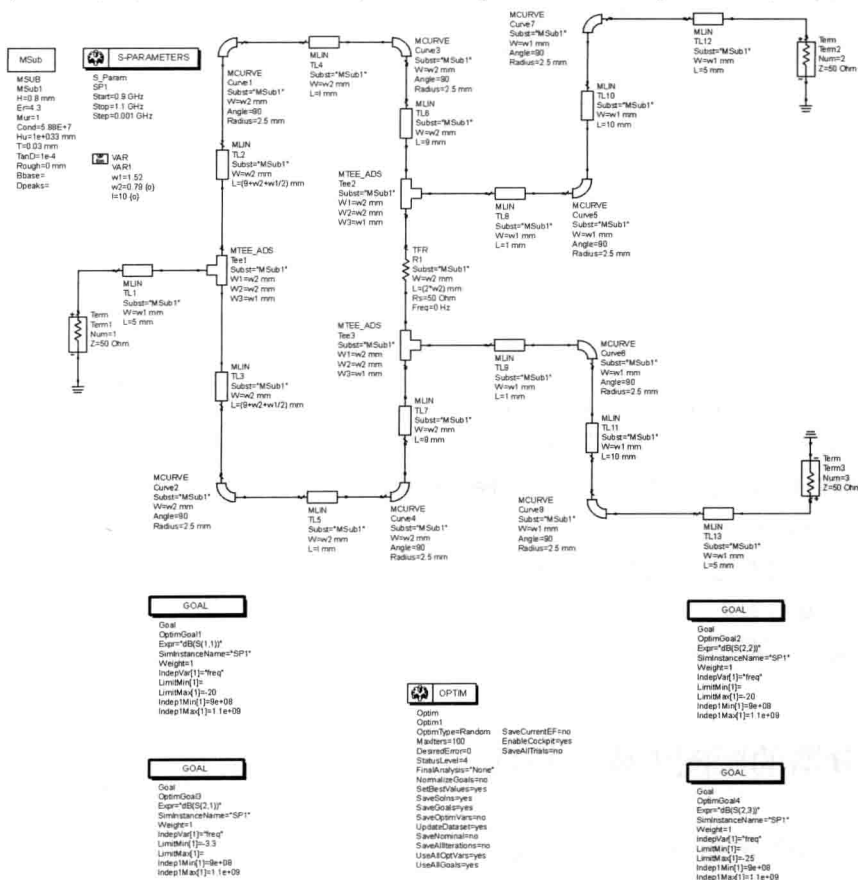


图 9-19 加入优化元器件后的功分器原理图

在优化过程中同时会打开另外一个状态窗口显示优化的结果。其中,“CurrentEF”表示与优化目标的偏差,数值越小,表示越接近优化目标,0表示达到了优化目标。下面还列出了各优化变量的值。

当优化结束后,数据显示窗口会自动打开,最终的优化结果如图9-20所示。可见各项指标都满足了设计要求,并且指标在通带内相对比较平坦。

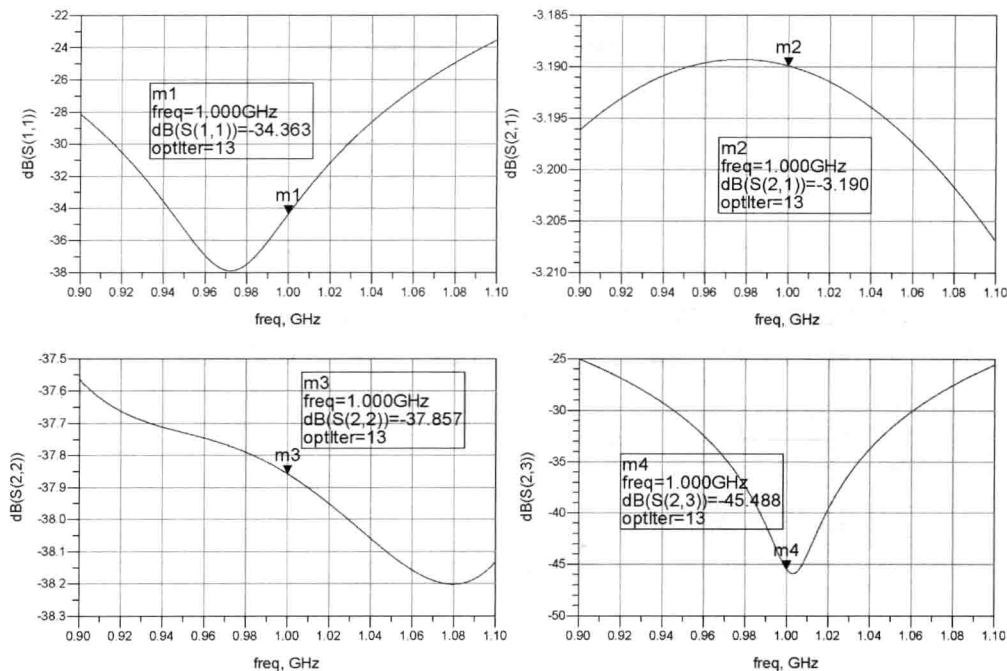


图9-20 优化后的S参数仿真结果图

在优化完成后,需要单击“Optimization Cockpit”窗口菜单中的“Update Design...”按钮,弹出“Update Design”窗口,单击【OK】按钮关闭以保存优化后的变量值(在“VAR”控件上可以看到变量的当前值)。否则,优化后的值将不保存到原理图中。单击左下角的“Close”按钮,关闭“Optimization Cockpit”窗口。


如果一次优化不能满足设计指标的要求,则需要改变变量的取值范围,重新进行优化,直到满足设计要求为止。

这样就完成了等分威尔金森功分器的原理图设计、仿真及优化,并且达到了设计指标的要求。

9.4 功分器的版图生成与仿真

9.4.1 功分器版图的生成

在进行功分器版图的仿真之前,首先需要生成功分器的版图,具体的步骤如下。

(1) 单击工具栏中的失效工具“Deactivate or Activate Components”,然后单击原理图

中的用于S参数仿真的“SP”控件、3个“Term”元件和3个“地”，再单击原理图中用于优化的“Optim”控件和4个“Goal”元件。这些元件和控件被失效后，在进行版图生成时，它们就不会再出现在所生成的版图中了。

(2) 确定所有无关的元件失效后，在菜单栏中执行菜单命令【Layout】→【Generate/Update Layout】，自动弹出一个设置窗口，这里应用它的默认设置，直接单击【OK】按钮。程序会自动弹出“Status of Layout Generation”窗口，窗口中显示了所生成版图中有有效的元件数目等信息，如图9-21所示。将窗口中的内容与原理图比较，确认无误后单击【OK】按钮完成版图的生成。

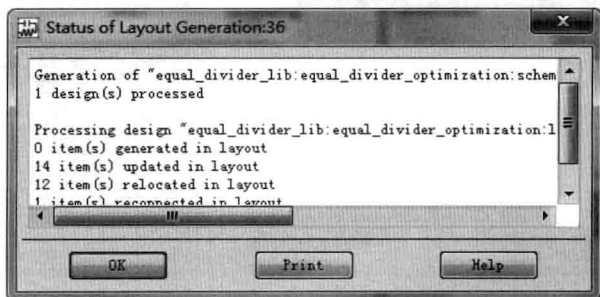


图9-21 “Status of Layout Generation”窗口

完成版图生成的过程后，程序会自动打开版图设计窗口，里面显示了刚刚生成的功分器版图，如图9-22所示。从图中可以看出，原理图中的各种传输线模型已经转化为版图中的实际微带线。

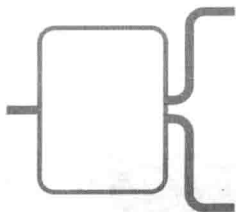


图9-22 由原理图转换生成的功分器版图

微带线介质基片和金属片的基本参数对微带型威尔金森功分器的性能影响很大，在此必须设置版图中的微带线的基本参数。为了利用原理图的仿真结果，设置版图中的微带线参数与原理图中的“MUSB”控件里的参数一样。

(3) 执行版图窗口中的菜单命令【EM】→【Substrate】，全部单击【OK】命令，弹出“Substrate”设置窗口。执行菜单命令【File】→【Import】→【Substrate From Schematic...】，弹出“Add Substrate From Schematic”窗口，在窗口中选择相对应的原理图就可以更新这些参数，这里选择“equal_divider_optimization”，单击【OK】按钮，然后弹出“equal_divider_optimization”的“Substrate”设置窗口，可以在此窗口里进行叠层的设置（如图9-23-a所示）。鼠标左键单击选中不需要的导体，再单击右键，弹出Unmap，右键单击Unmap，单击【OK】按钮，去掉该层导体，最后叠层如图9-23-b所示。

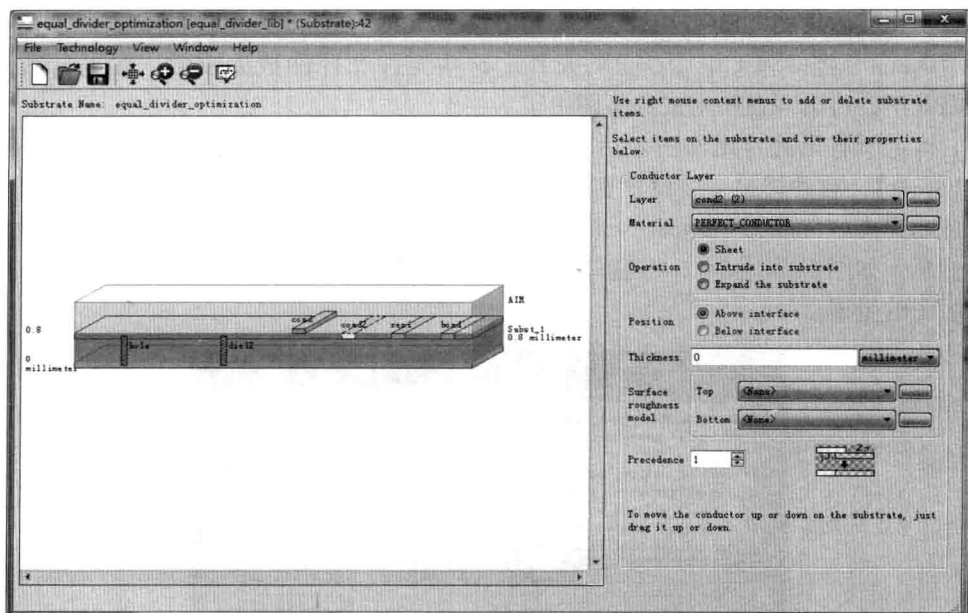


图 9-23-a 基片参数设置窗口

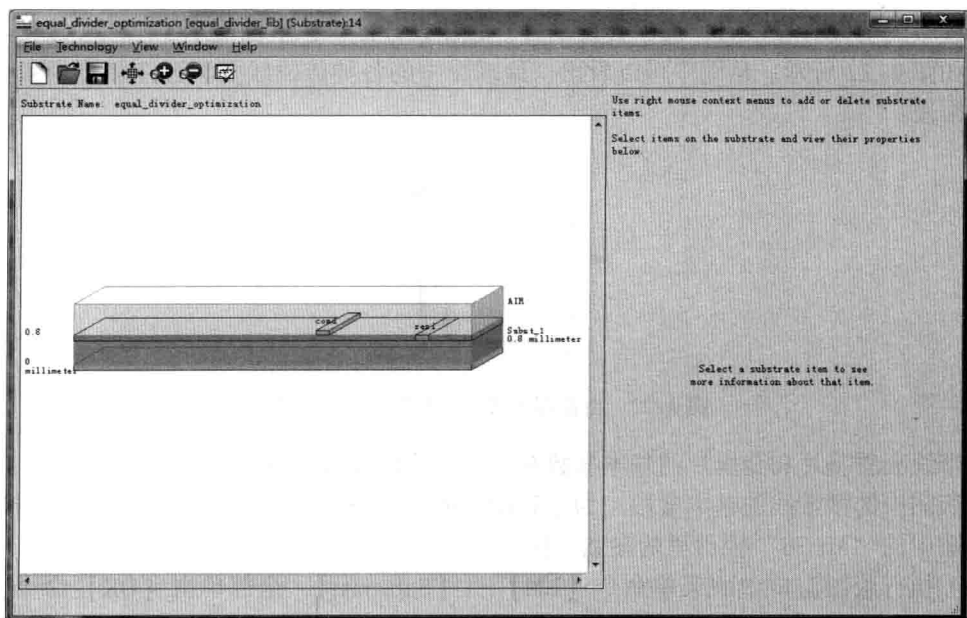



图 9-23-b 基片设置结果



(4) 单击工具栏里的  图标保存设置。

设置完微带线的基本参数后，一个完整的微带型威尔金森功分器版图就形成了，接下来就对其进行 S 参数的仿真。

9.4.2 功分器版图的仿真

功分器的版图生成后,为观察功分器的性能,并能更好接近实际,需要在版图里再次进行S参数的仿真,具体的步骤如下。

(1) 在版图设计窗口菜单栏中执行菜单命令【Insert】→【Pin】,在功分器版图中插入3个“Pin”,调整“Pin”位置分别与端口1、2和3相连接,快捷键【Ctrl+r】可以旋转“Pin”方向。

(2) 单击工具栏中的图标,打开仿真控制窗口,选择 Frequency plan,如图9-24所示。在“Type”栏中选择“Adaptive”,设置的起止频率与原理图中的相同,“Fstart”为0.9GHz,“Fstop”为1.1GHz。

(3) 单击【Simulate】按钮进行仿真。仿真过程中会弹出状态窗口显示仿真的进程,整个仿真过程一般比较慢,需要数分钟,仿真结束后将会自动出现数据显示窗口,按【Ctrl+A】组合键全选中,按【Delete】键删除其自带模板,重新添加仿真结果,如图9-25所示,从图中可以看出,S参数曲线都有不同程度的恶化。

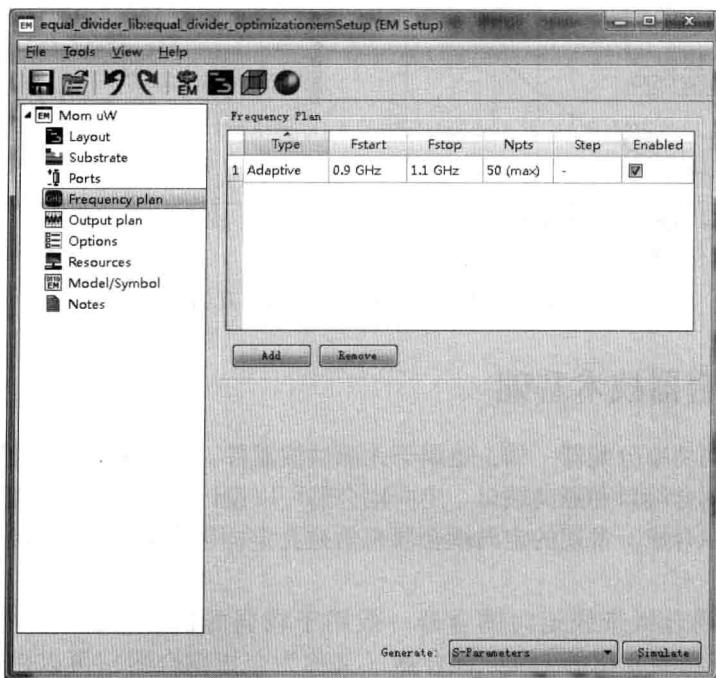


图9-24 版图仿真控制窗口

如果所生成的功分器版图的S参数结果不能满足设计指标的要求,则需要返回原理图中重新进行变量参数的优化,然后再按照上述步骤进行版图的生成与仿真,直到满足设计要求为止。

本章节例举了等分威尔金森功分器的设计与其ADS的仿真。非等分的威尔金森功分器



的设计流程也类似本章节所述, 只要通过 9.2.1 节的计算公式确定功分器各段特性阻抗, 就能采用本章的设计步骤完成非等分威尔金森功分器的设计与仿真了。

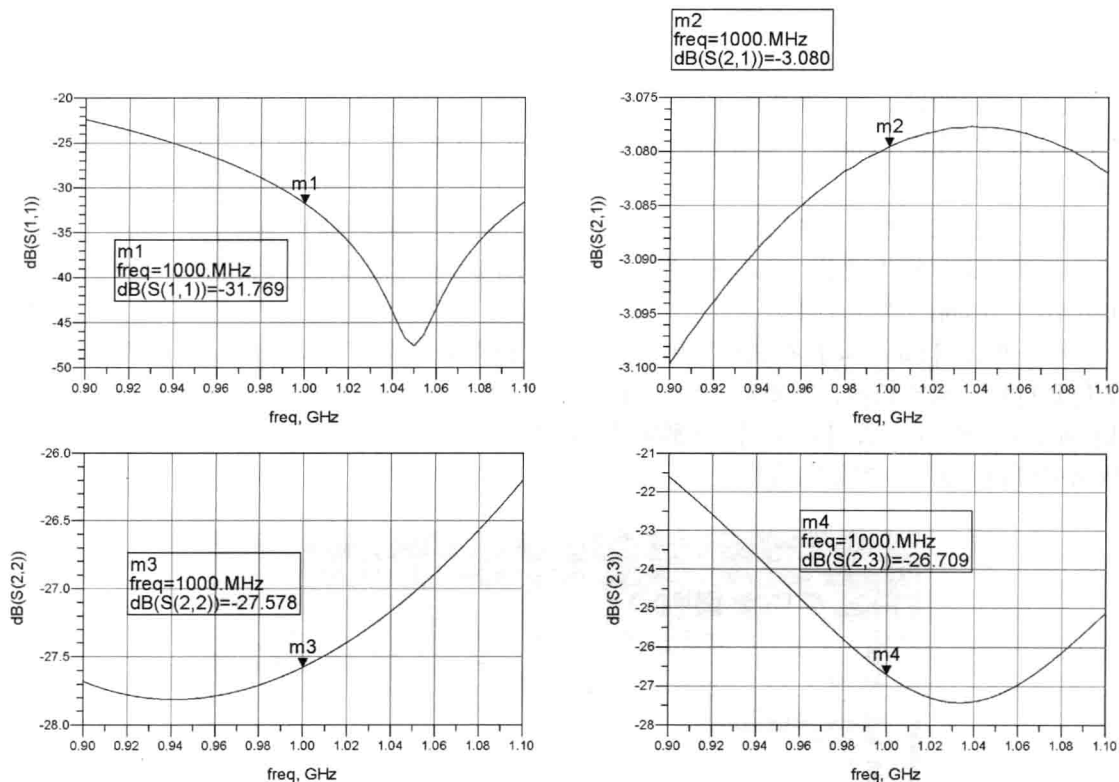


图 9-25 版图仿真后的 S 参数仿真结果图

9.5 定向耦合器技术基础

定向耦合器同功率分配器一样, 也属于无源微波器件, 通常为四端口器件, 分为输入端口、直通端口、耦合端口和隔离端口。定向耦合器可以设计为任意功率分配比, 被广泛应用于功率分配和功率合成。常用的定向耦合器有倍兹孔定向耦合器、分支线混合网络和 Lange 耦合器等。

普通的平行耦合微带线定向耦合器一般用于较弱的耦合情况 (一般耦合系数小于 -10dB) , 本章节将要介绍的 Lange 耦合器 (又称为交指耦合器) 可以用于耦合较强的情况, 通常设计为 3dB 耦合。Lange 耦合器不仅能有效地克服普通耦合线耦合器耦合时过于松散的缺点, 而且具有一个倍频程或更宽的带宽。因此, Lange 耦合器在平衡放大器、功率分配器和平衡混频器中得到了广泛的应用。

本章节以常见的微带型 Lange 耦合器为例, 在介绍其工作原理的基础上, 利用 ADS 软件, 对其具体的设计步骤和仿真流程进行详细描述。