



南京理工大学

NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY

The Design of Rat-race Ring

班级：	9201042201
学院：	电子工程与光电技术学院
专业：	通信工程
作者：	邓若雯
指导老师：	李兆龙

南京理工大学电子工程与光电技术学院

2023 年 03 月 26 日

摘要

本文介绍了微带环形耦合器的设计和仿真，包括加 T 型结前后的设计和仿真以及加 T 结后的参数优化。设计和仿真基于 Advanced Design System 2017 (ADS) 软件，通过模拟器件的回波损耗带宽、隔离度带宽、插入损耗以及中心频率等参数来评估其性能。

在未加 T 型结的设计中，原理图和版图均进行了设计和仿真，并通过仿真结果分析了其性能。

在加入 T 型结后，通过优化参数并重新进行设计和仿真，得到了更优秀的性能表现。具体来说，加 T 型结前后的设计和仿真结果如下：

	未加 T 结	加 T 结优化后
回波损耗带宽	27.27%	31.13%
隔离度带宽	32.0%	31.87%
插入损耗	0.3744dB	0.241dB
中心频率/GHz	1.85	1.775

通过本文的设计和仿真，我们得到加 T 型结后优化参数后的更为优秀的微带环形耦合器设计。此外，本文也介绍了设计过程中的原理图设计、版图生成以及仿真结果分析等关键步骤，为读者提供了微带环形耦合器设计和仿真参考。

关键字：微带环形耦合器，T 结，优化

Abstract

This paper presents the design and simulation of a microstrip ring coupler, including the design and simulation before and after the addition of a T-junction and the optimization of the parameters after the addition of a T-junction. The design and simulation are based on the Advanced Design System 2017 (ADS) software and the performance is evaluated by simulating the return loss bandwidth, isolation bandwidth, insertion loss and center frequency parameters of the device.

In the design without the T-junction, both the schematic and the layout were designed and simulated, and the performance was analyzed by the simulation results.

With the addition of the T-junction, the parameters were optimized and simulated to achieve better performance. Specifically, the design and simulation results before and after the addition of the T-junction are as follows:

	Without T-junction	With T-junction (optimized)
Return Loss Bandwidth	27.27%	31.13%
Isolation Bandwidth	32.0%	31.87%
Insertion Loss	0.3744dB	0.241dB
Center Frequency/GHz	1.85	1.775

Through the design and simulation in this paper, we obtain a better microstrip ring coupler design after adding T-junctions and optimizing the parameters. In addition, this paper also introduces the key steps in the design process such as schematic design, layout generation and analysis of simulation results, providing the reader with a reference for microstrip ring coupler design and simulation.

Key words: Rat-race Ring, T-junction, Optimization

目录

1	绪论.....	5
1.1	微带环形耦合器背景介绍	5
1.2	设计要求	5
2	微带环形耦合器基本原理.....	6
3	Rat-race Ring 参数计算	10
3.1	FR4 材料参数	10
3.2	微带线宽带计算	10
4	未加 T 型结前微带环形耦合器设计与仿真	12
4.1	原理图设计	12
4.2	版图设计	13
4.3	混合环版图仿真	14
4.3.1	仿真选项设置.....	14
4.3.2	仿真结果.....	15
4.3.3	仿真结果分析.....	16
5	改进后的微带环形耦合器设计与仿真.....	17
5.1	原理图设计	17
5.2	版图生成.....	17
5.3	仿真结果	19
5.4	优化参数设置和仿真结果	19
5.4.1	优化参数实现.....	19
5.4.2	仿真结果.....	21
5.4.3	仿真结果分析.....	22
6	结论.....	23
7	实验心得.....	23
	参考文献.....	25
	致 谢.....	25

1 绪论

1.1 微带环形耦合器背景介绍

微带环形耦合器(Rat-race Ring)是一种微波集成电路中常见的耦合器结构，由一个环形共振腔和四个耦合口组成。其主要原理是通过将微带线上的能量在环形共振腔中反复反射，从而实现信号的耦合和传输。四个耦合口分别与微带线相连，通过调节耦合口的位置和耦合口之间的相位差来控制信号的耦合程度和相位差，从而实现对信号的精确控制。

微带环形耦合器(Rat-race Ring)具有结构简单、耦合效率高、传输损耗小等优点，因此被广泛应用于微波电路设计中的功分器、滤波器、耦合器等领域。在无线通信、雷达、卫星导航等领域中，环形耦合器也发挥着重要的作用[1]。

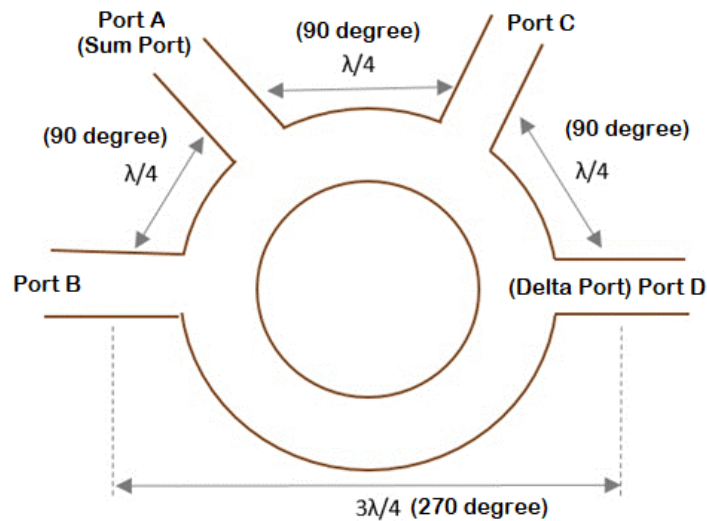


图 1 微带环形耦合器示意图

1.2 设计要求

Design such a component working at 1.8GHz, using substrate FR4, thickness to be determined at 1.5mm.

Requirements:

- 20dB return loss bandwidth >6%
- 20dB isolation bandwidth >6%
- Amplitude imbalance <1dB, Insertion Loss <1dB

2 微带环形耦合器基本原理

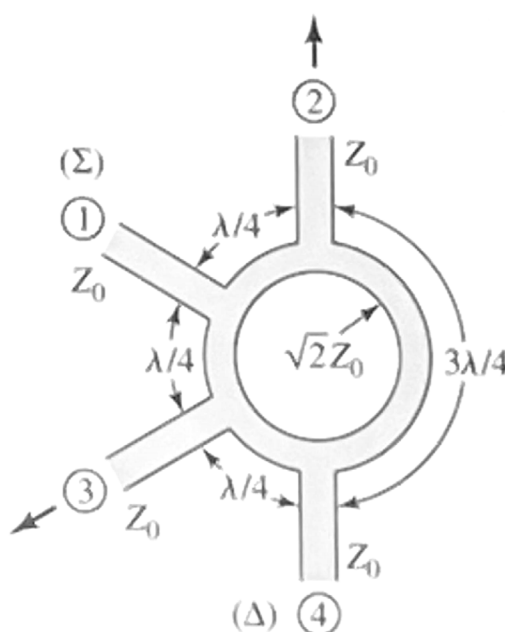


图 2 耦合器示意图

混合环具有两个端口互相隔离，另外两个端口平分输入功率的特性，可看作是一个 3dB 定向耦合器。环形定向耦合器是由周长为 $\frac{3}{2}$ 个导波波长的闭合圆环和 4 个输入输出传输线相连接而构成的，与圆环相连接的 4 根传输线的特征阻抗为 Z_0 ，圆环的特征阻抗为 $\sqrt{2}Z_0$ ，端口 1 到 2、1 到 4、3 到 4 之间的长度为 $\frac{1}{4}$ 个导波波长，端口 2 到 3 之间的长度为 $\frac{3}{4}$ 个导波波长。

微波信号由端口 1 输入，端口 2、3、4 皆接匹配负载。输入信号功率可以等分成两部分，分别由 2、4 两个端口输出，端口 3 无信号输出，1 和 3 两个端

口彼此隔离。

首先假设归一化激励振幅为 1 的波从端口 1 入射到环形网络中，被环形网络分解成两个分量，从端口 2 和端口 3 同相输出，而在端口 4 输出的相位相差 180° 。采用奇偶模分析法，将激励分解为偶模激励和奇模激励叠加的形式，叠加之后，环形耦合器的各端口散射波的振幅分别为：

$$B_1 = \frac{1}{2}\Gamma_e + \frac{1}{2}\Gamma_o$$

$$B_2 = \frac{1}{2}T_e + \frac{1}{2}T_o$$

$$B_3 = \frac{1}{2}\Gamma_e - \frac{1}{2}\Gamma_o$$

$$B_4 = \frac{1}{2}T_e - \frac{1}{2}T_o$$

由电路的结构计算出偶模和奇模 ABCD 参数矩阵如下：

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} 1 & j\sqrt{2} \\ j\sqrt{2} & -1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_o = \begin{bmatrix} -1 & j\sqrt{2} \\ j\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}$$

通过 ABCD 参数与 S_{11} 和 S_{21} 的转换可以得到：

$$\Gamma_e = S_{11} = \frac{A + B - C - D}{A + B + C + D} = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

$$T_e = S_{21} = \frac{2}{A + B + C + D} = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

$$\Gamma_o = \frac{j}{\sqrt{2}}$$

$$T_o = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

由此可得：

$$B_1 = 0$$

$$B_2 = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

$$B_3 = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

$$B_4 = 0$$

因为 $B_1 = 0$ ，所以输入端口 1 是匹配的，输入功率等分地从端口 2 和端口 3 同相输出，端口 4 是隔离端。

然后假设归一化单位振幅从端口 4 输入，经过环形耦合器之后分成两个同相的波从端口 2 和端口 3 输出，这两个波在端口 1 的相位差为 180° 。将此激励下的环形网络分解为偶模和奇模两个子网络，此时，散射波的振幅为：

$$B_1 = \frac{1}{2}T_e - \frac{1}{2}T_o$$

$$B_2 = \frac{1}{2}\Gamma_e - \frac{1}{2}\Gamma_o$$

$$B_3 = \frac{1}{2}T_e + \frac{1}{2}T_o$$

$$B_4 = \frac{1}{2}\Gamma_e + \frac{1}{2}\Gamma_o$$

由电路的结构计算出偶模和奇模 ABCD 参数矩阵如下：

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} -1 & j\sqrt{2} \\ j\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_o = \begin{bmatrix} 1 & j\sqrt{2} \\ j\sqrt{2} & -1 \end{bmatrix}$$

通过 ABCD 参数与 S_{11} 和 S_{21} 的转换可以得到：

$$\Gamma_e = \frac{j}{\sqrt{2}}$$

$$T_e = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

$$\Gamma_o = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

$$T_o = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

由此可得：

$$B_1 = 0$$

$$B_2 = \frac{j}{\sqrt{2}}$$

$$B_3 = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

$$B_4 = 0$$

因为 $B_4 = 0$ ，所以输入端口 4 是匹配的，输入功率等分地从端口 2 和端口 3 输出，但是相位差为 180° ，端口 1 是隔离端[2]。

由上面的分析可以得到混合环的散射矩阵为：

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & -j & -j & 0 \\ -j & 0 & 0 & -j \\ -j & 0 & 0 & j \\ 0 & -j & j & 0 \end{bmatrix}$$

3 Rat-race Ring 参数计算

3.1 FR4 材料参数

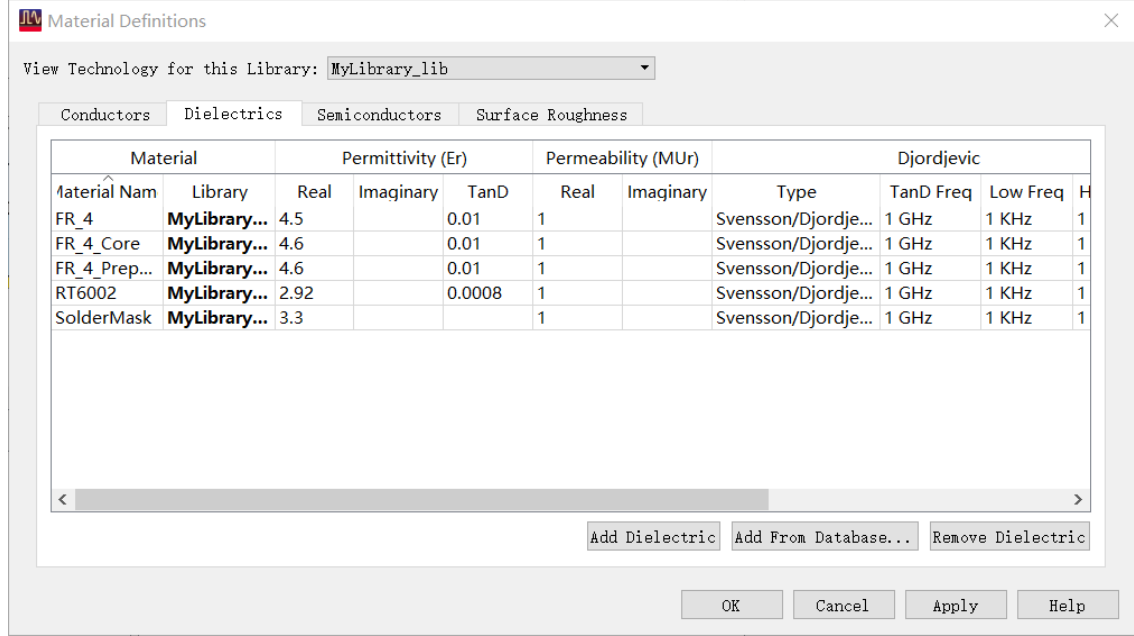


图 3 FR4 材料参数

在 ADS 软件的 Material Definitions 可轻松查到 FR_4 材料的具体参数，方便用于计算混合环的各项参数[3]。

3.2 微带线宽带计算

已知微带线的特性阻抗 $Z_0 = 50\Omega$ 和介电常数 $\epsilon_r = 4.5$ ，计算微带线的结构尺寸 W/d 采用如下公式：

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) \right] & W/d > 2 \end{cases}$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right), B = \frac{377\pi}{2Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

借助 ADS 中的 LineCal 工具，可算出圆环的半径和宽度。

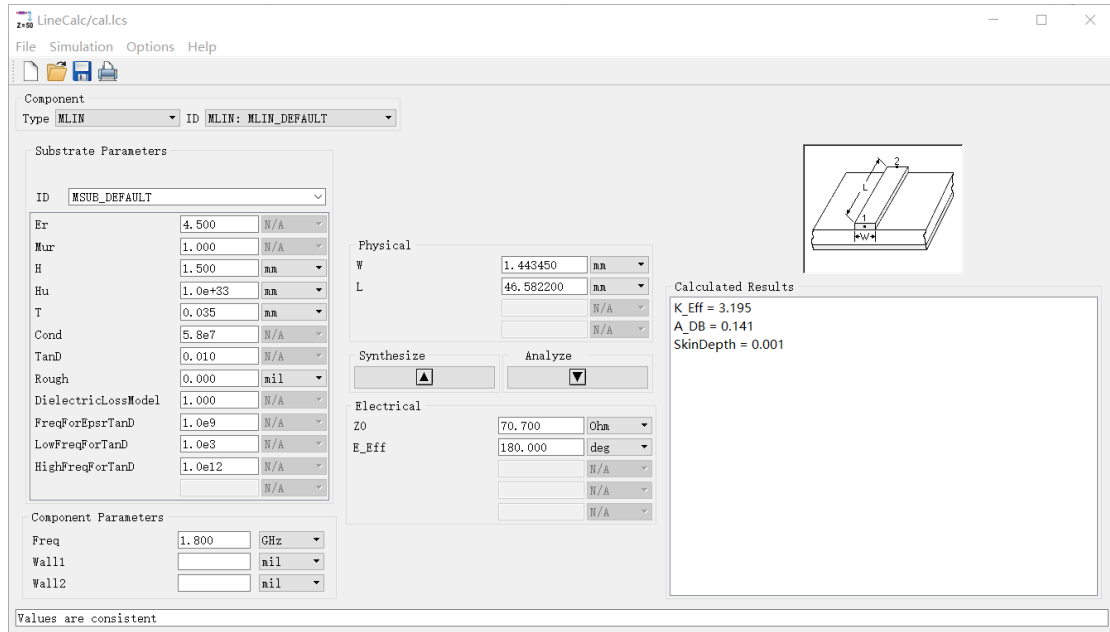


图 4 计算微带线圆环的宽度

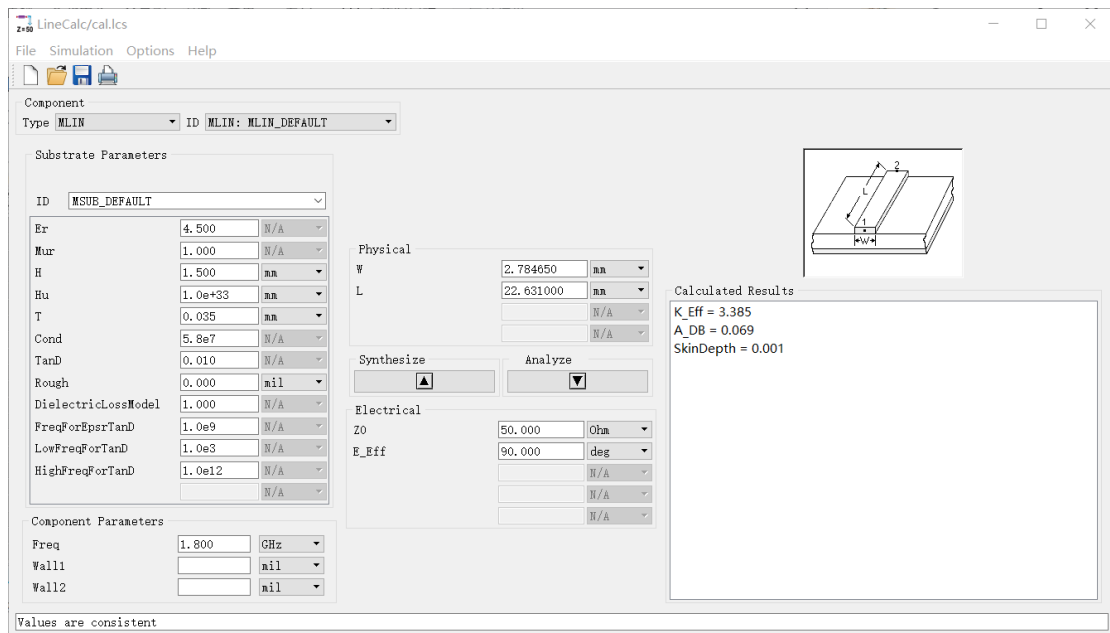


图 5 计算 MLIN 宽度

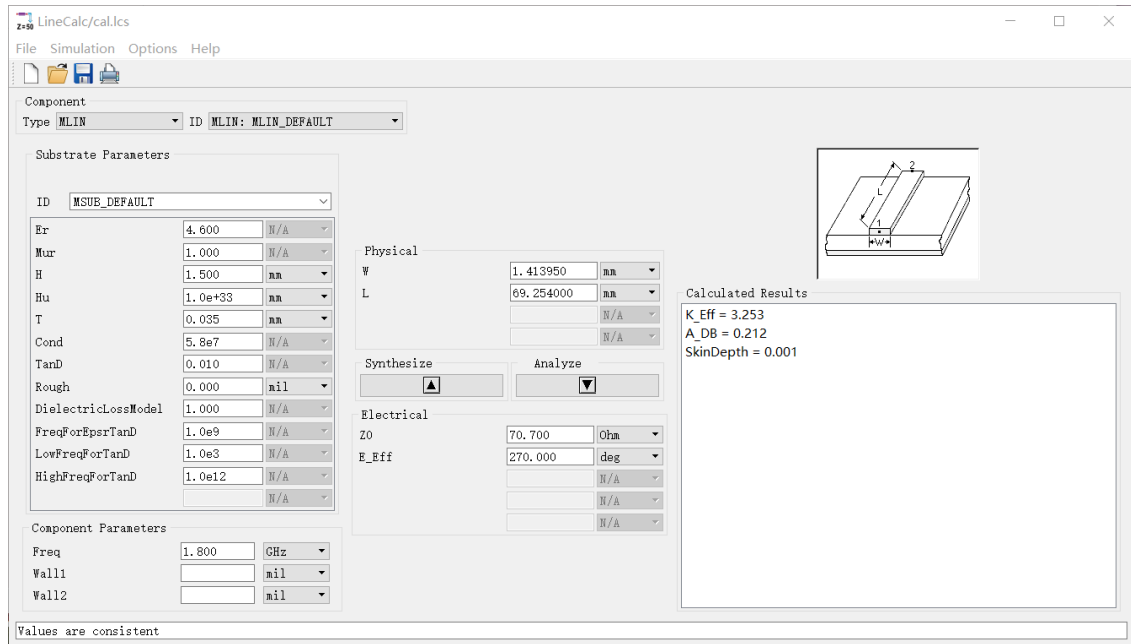


图 6 圆环半径

$$R = \frac{L}{\pi} = \frac{69.2540}{\pi} = 22.0442mm$$

4 未加 T 型结前微带环形耦合器设计与仿真

4.1 原理图设计

在原理图的元器件库里，首先选择微带线 TLines-Microstrip，插入 四段 Mcurve 弧形微带线，分别设置宽度和半径，角度分别为 60°、60°、60°、180°。再插入四段 MLIN 和 TemG[5]。

连线，构成下图所示的原理图。

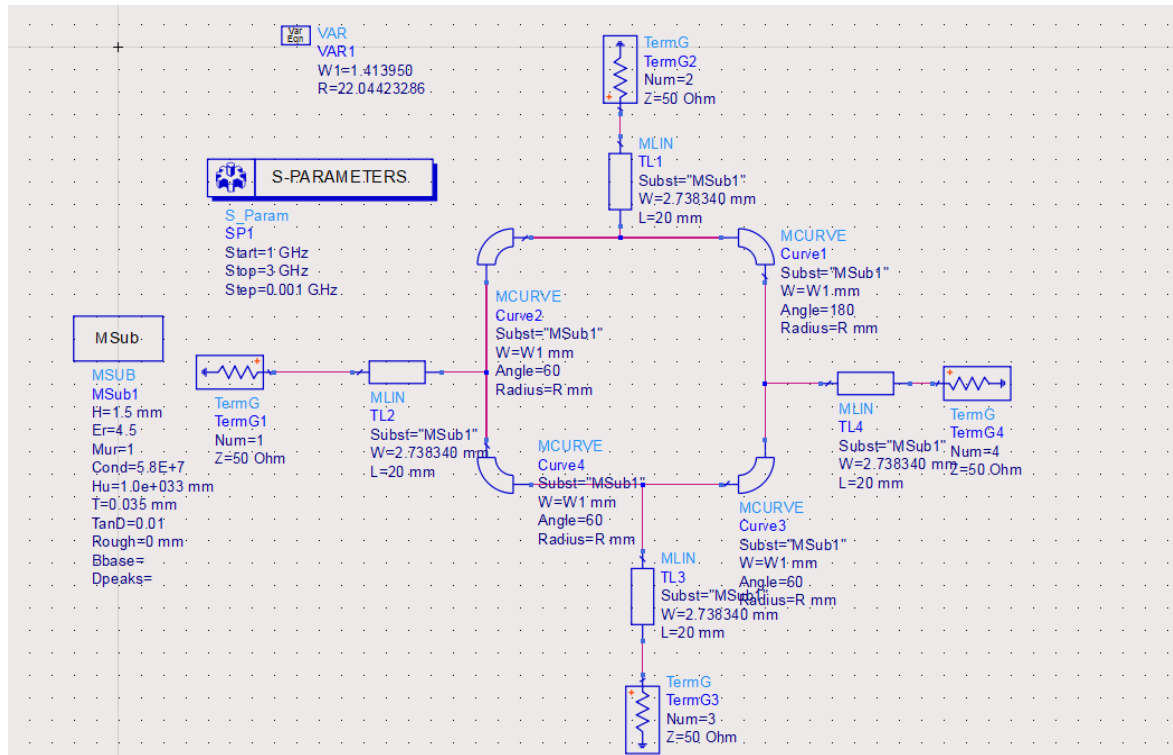


图 7 未加 T 型结原理图设计

4.2 版图设计

本次版图生成我采用了自动生成的方式，由于参数设计比较合适，所以所展现的版图形状十分理想。

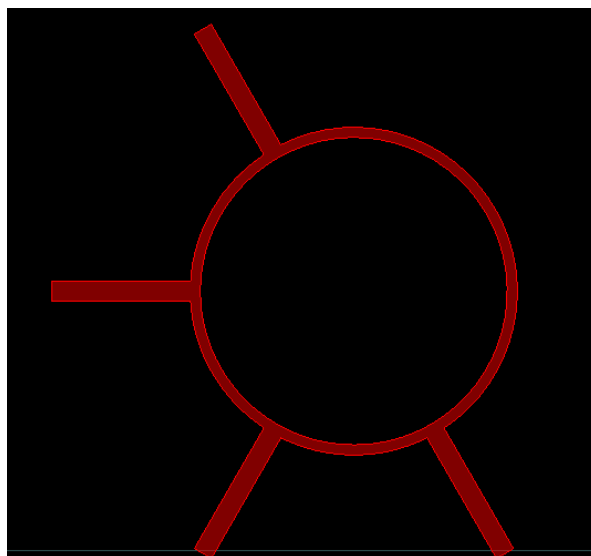


图 8 未加 T 结版图结果

4.3 混合环版图仿真

4.3.1 仿真选项设置

下面对版图进行仿真，并显示仿真数据。

根据图 2 设置好馈电端口：

Number	Gnd Layer	Name	Feed Type	Ref Impedance [Ohm]	Ref Offset [mil]	Term Type
2	<Implicit>	P2	Auto	50 + 0i	N/A	inputOutput
3	<Implicit>	P3	Auto	50 + 0i	N/A	inputOutput
4	<Implicit>	P4	Auto	50 + 0i	N/A	inputOutput

图 9 馈电端口设置

在仿真前设置好 Substrate，如图 9 所示：

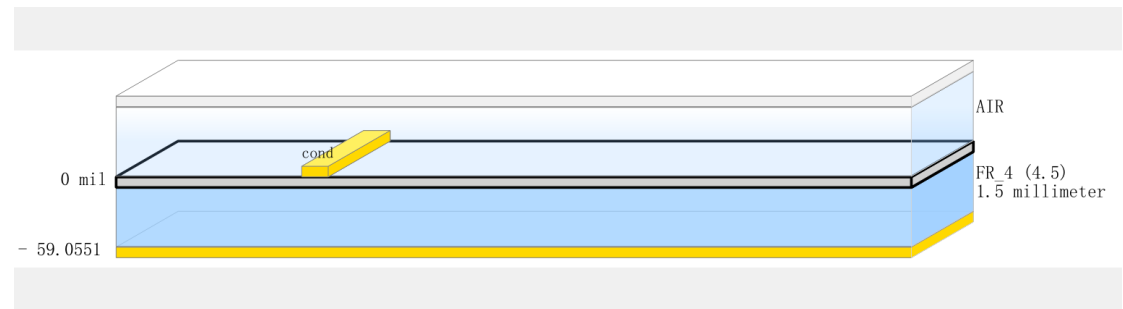


图 10 Substrate 设置

由于本次设计要求中心频率在 1.8GHz，所以我将仿真频率范围设置在 1-3GHz 之间。

Type	Fstart	Fstop	Npts	Step
1 Adaptive	1 GHz	3 GHz	50 (max)	-

图 11 仿真频率范围设置

4.3.2 仿真结果

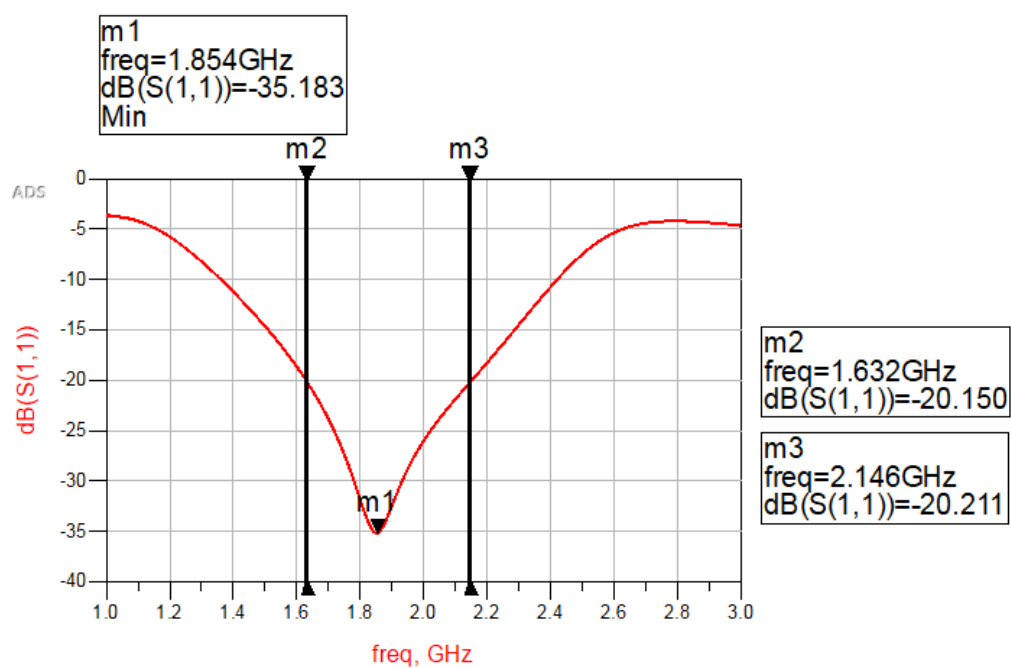


图 12 混合环的回波损失

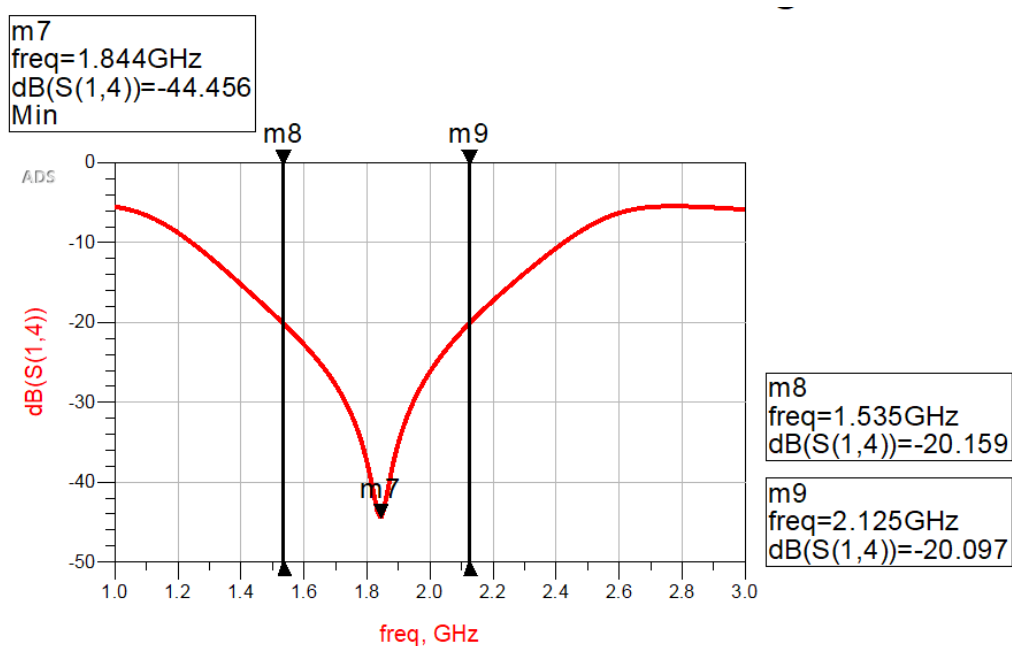


图 13 混合环的隔离度

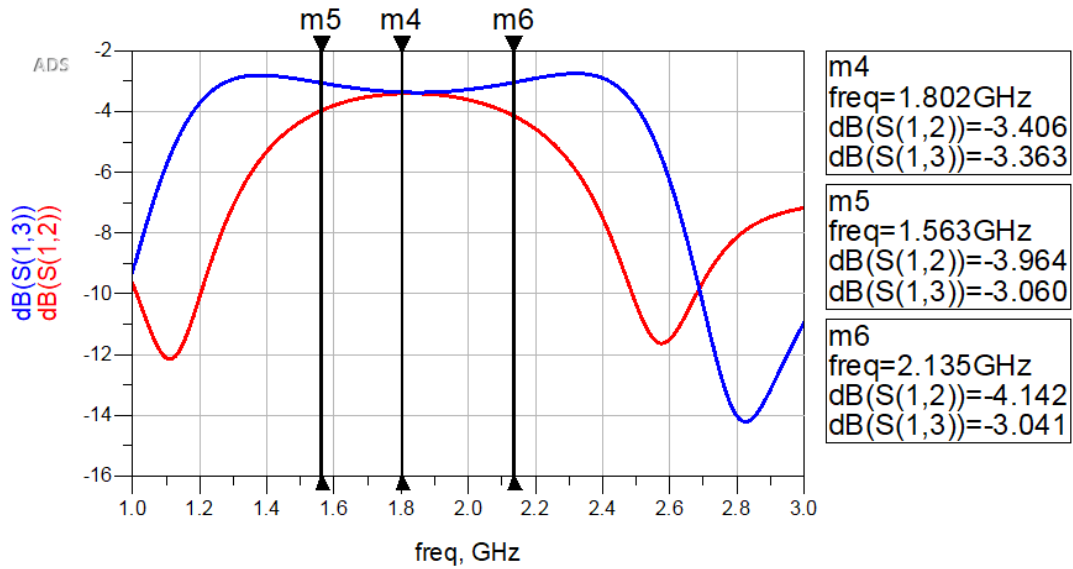


图 14 幅度不平衡和插入损耗

4.3.3 仿真结果分析

根据 4.3.2 的图示，

$$\text{RetrunLoss Bandwidth} = \frac{2.146 - 1.632}{1.854} = 27.72\% > 6\%$$

$$\text{Isolation Bandwidth} = \frac{2.125 - 1.535}{1.844} = 32.0\% > 6\%$$

在 20dB 回波损失带宽和隔离度带宽内，S(1,2)，S(1,3)的幅度变化均小于 1dB。

$$\text{InsertionLoss} = (-3.406\text{dB}) + (-3.363\text{dB}) = -0.3744\text{dB}$$

而且，可见设计的环形耦合器的中心频率大概在 1.85GHz 附近。

虽然结果相对理想，但是考虑到老师在课上提到的 T 型结效应，我查阅了相关资料。发现实际电路中，不加 T 型结是不合理的，毕竟我们无法直接从圆环中获得微波。进而，我又做了一种有 T 型结的环形耦合器。

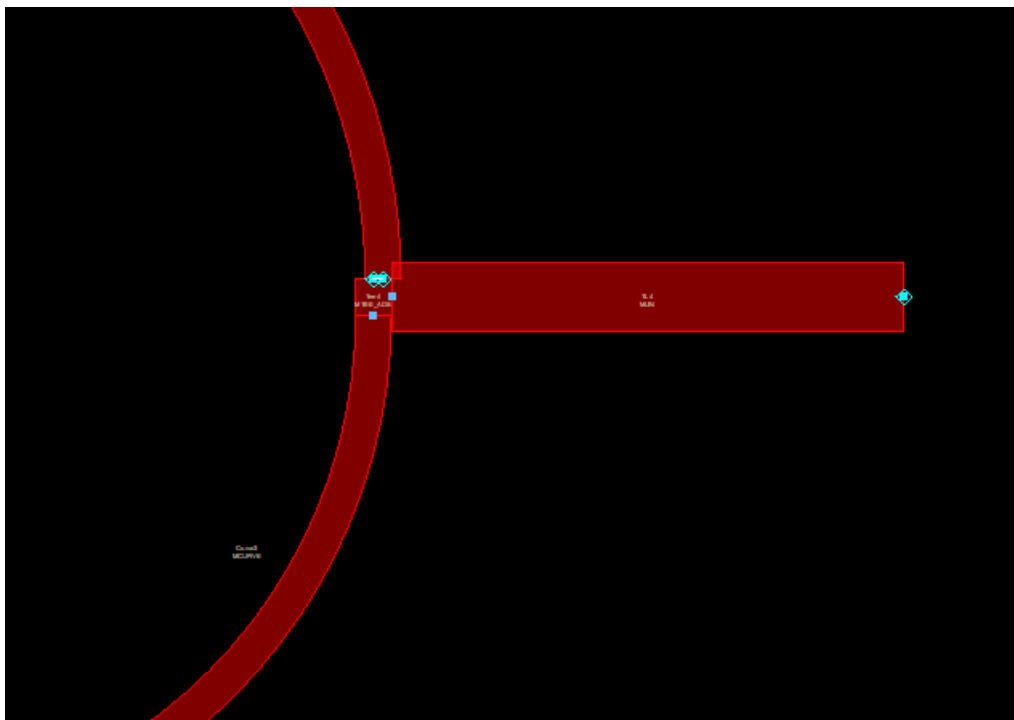


图 16 半径偏差示意图

通过坐标计算，我将圆环的半径做了些许修正。

```
Subst="M Sub1"
W=W.1 mm
Angle=180
Radius=(R+W.1-0.28+0.0448945+0.0456565)
```

图 17 半径修正

修正后的版图如下：

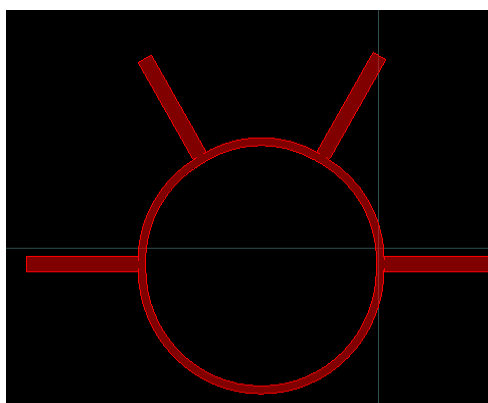


图 18 未加定位角的版图

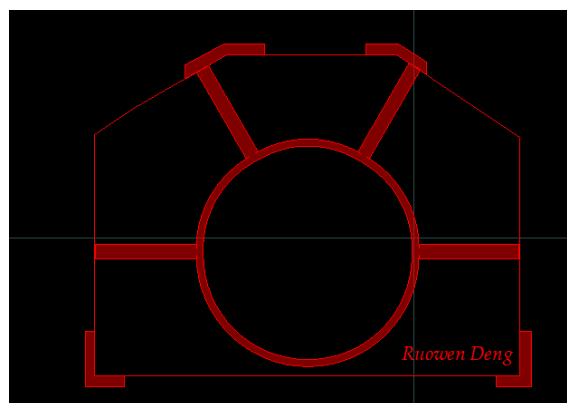


图 19 加定位角的版图

5.3 仿真结果

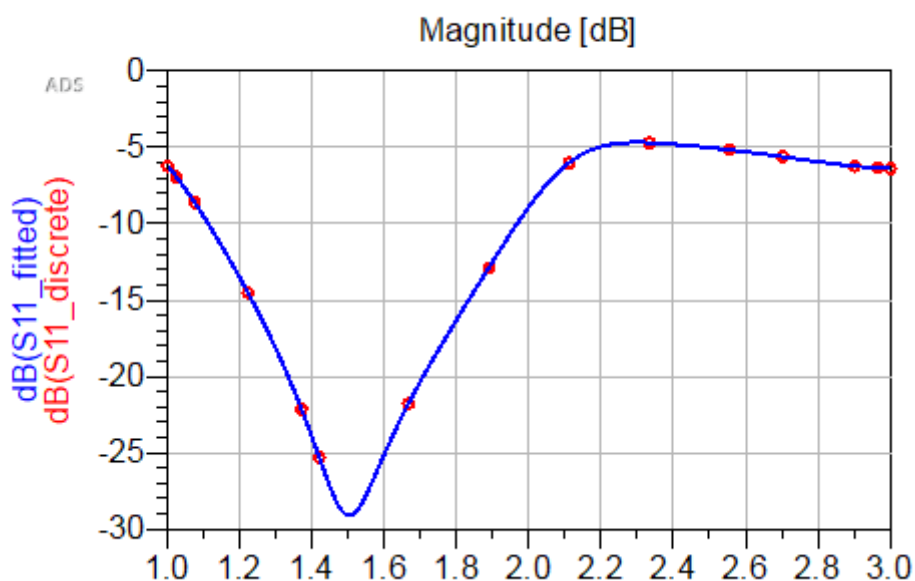


图 20 加 T 型结后的 S(1,1)

在参数不变的前提下，我们可以明显地看到与未加 T 结的图 12 相比，中心频率发生巨大漂移。说明考虑 T 型结效应，现有参数无法满足当前的设计要求。

5.4 优化参数设置和仿真结果

5.4.1 优化参数实现

从上图看出，仿真结果不是特别好，所以我考虑设当调整矩形微带线的 W、L 或者环形微带线的 W、R。但是经过手动的调整，结果仍然不尽人意。于是我查阅资料,发现并使用了 ADS 中的 GOAL 和 OPTIM。

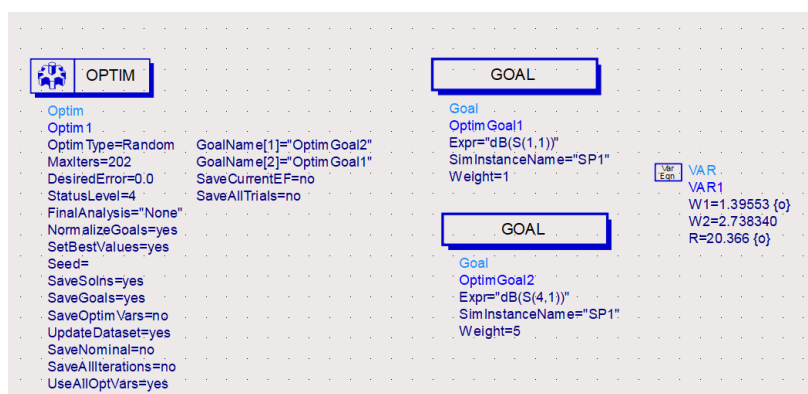


图 21 OPTIM,GOAL 示意

点击 Simulation 里面的 Optimization，打开 Optimization Cockpit 窗口，设置迭代次数和迭代方法。

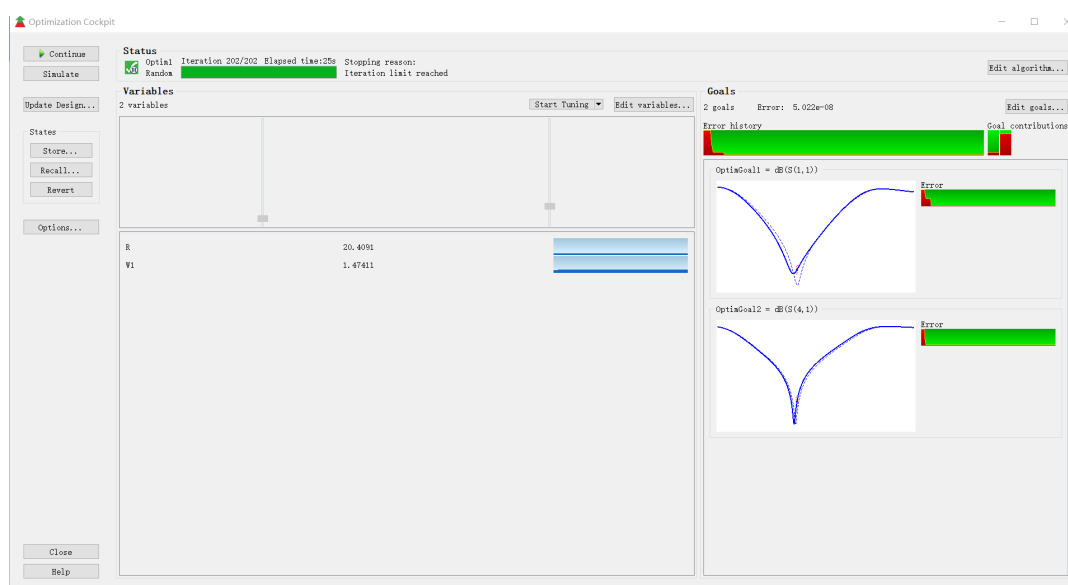


图 22 Optimization 功能示意

选择 Update the Design，得到优化后的参数。

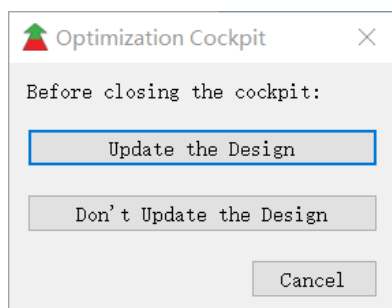


图 23 Update the Design

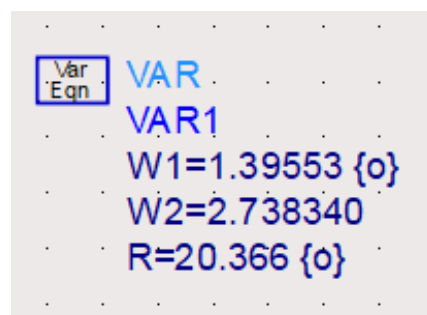


图 24 优化后的参数

5.4.2 仿真结果

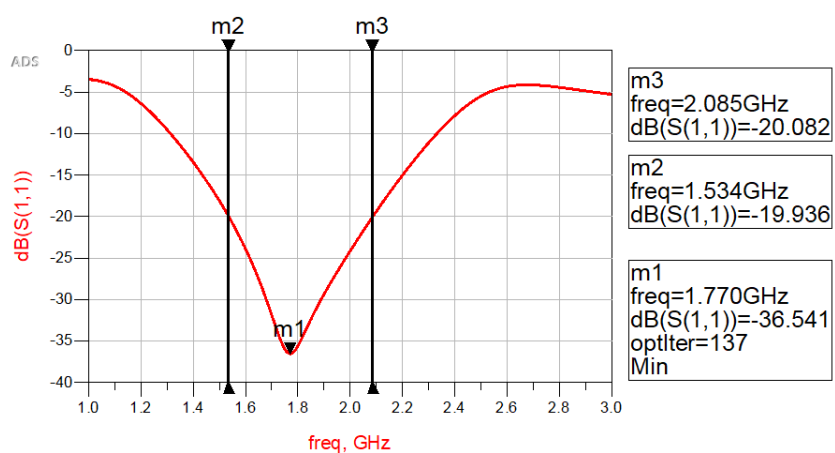


图 25 优化后回波损耗示意

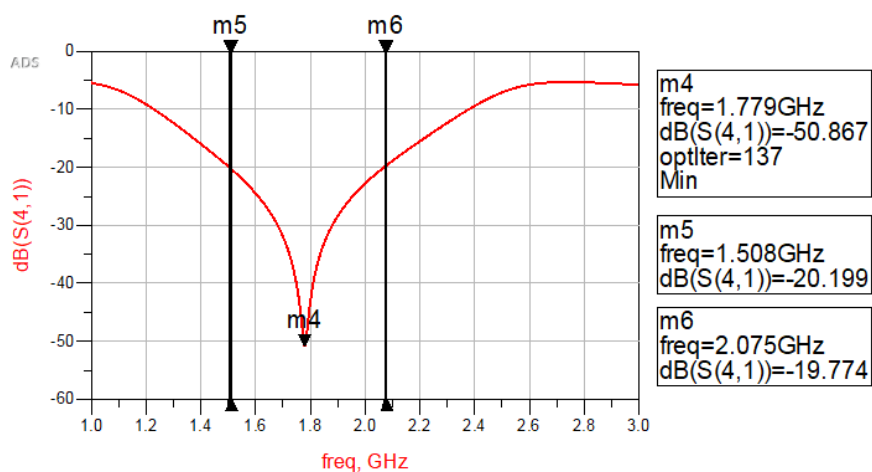


图 26 优化后隔离度示意

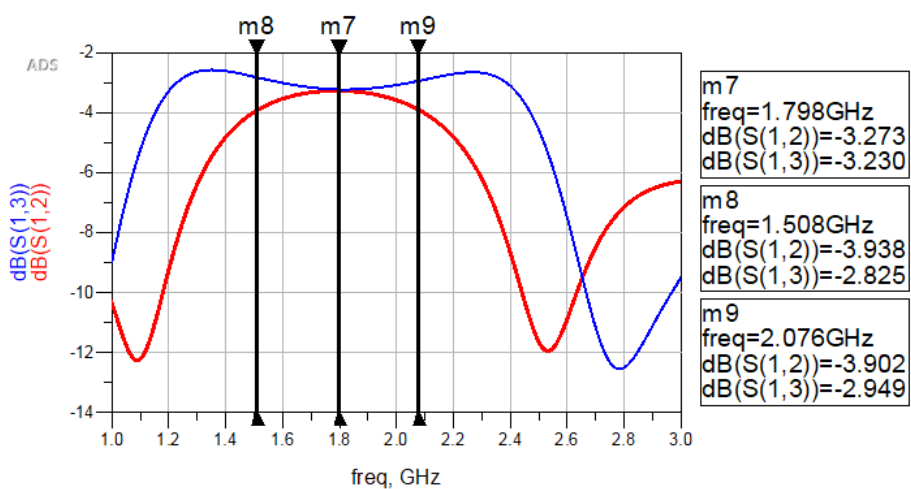


图 27 优化后幅度不平衡和插入损耗示意

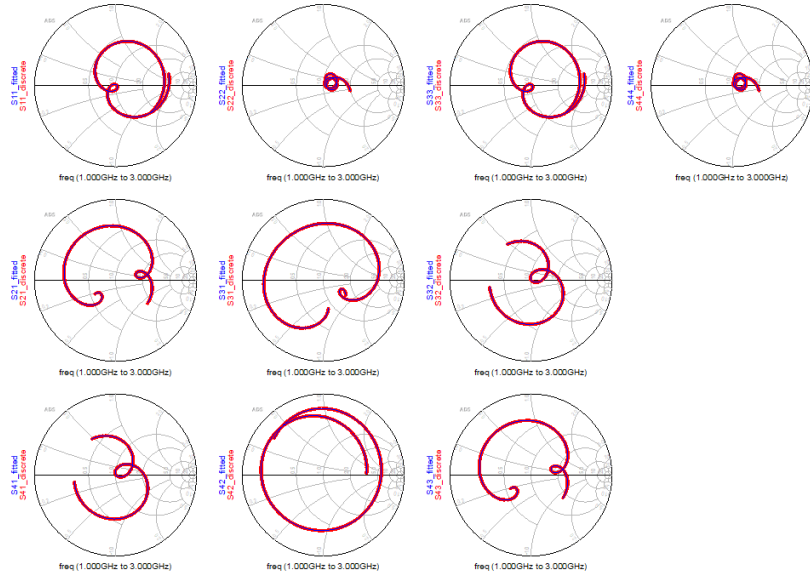


图 28 Smith Chart

5.4.3 仿真结果分析

根据 5.4.2 的图示，

$$RetrunLoss\ Bandwidth = \frac{2.085 - 1.534}{1.770} = 31.13\% > 6\%$$

$$Isolation\ Bandwidth = \frac{2.075 - 1.508}{1.779} = 31.87\% > 6\%$$

在 20dB 回波损失带宽和隔离度带宽内，S(1,2)，S(1,3)的幅度变化均小于 1dB。

$$InsertionLoss = (-3.273dB) + (-3.230dB) = -0.241dB$$

而且，可见设计的环形耦合器的中心频率大概在 1.775GHz 附近。

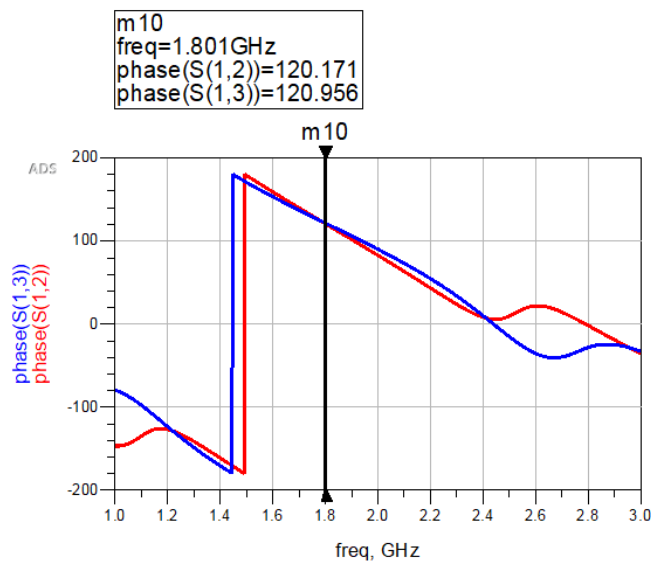


图 29 S(1,2),S(1,3)相位示意

根据图 29，端口 2 和端口 3 同相位，且在中心频率处大概有 90 度的相位滞后。

综上所述，此次仿真参数均符合要求指标。

6 结论

	未加 T 结	加 T 结优化后
回波损耗带宽	27.27%	31.13%
隔离度带宽	32.0%	31.87%
插入损耗	0.3744dB	0.241dB
中心频率/GHz	1.85	1.775

注：此次 dB 均取绝对值

综合各项参数，本次优化后的加 T 结环形耦合器性能得到部分提升，不仅符合设计要求，还更加符合实际工程应用。

7 实验心得

微带环形耦合器是常用于实现微波信号在不同传输线之间的能量传递。其

设计需要考虑多个因素，通过多次仿真优化，才能得出合乎心意的元件参数。

首先我根据所需元件物理性能确定电路结构，借助 LineCal 工具确定所需工作频率下微带环形耦合器的参数，通过仿真得到所设计的元件的性能模拟。确定了初步的设计之后，我又考虑了 T 型结的应用，通过 Optimization 微调参数，从而得到相对理想的优质设计。

微带环形耦合器的设计需要考虑多个因素，需要在理论分析和实践操作中进行多次优化。在完成此次 Project 中，我遇到了很多困难，遇到问题我选择和小伙伴们沟通交流，一步一步地迈过一个又一个障碍，终于完整地完成了 Dr.Li 布置的任务。我体验了一番射频工程师设计电路的流程，在 Dr.Li 的引导下深刻感悟到射频与微波电路的精妙之处。

通过本次课程设计，我搭建了一个简易设计射频电路的知识框架，这自当对未来学术研究产生积极的影响。Dr.Li 的 Project 驱动式教学富含国际视野，让我们有机会在南京理工大学体验国外的教学方式。

参考文献

- [1] <https://openai.com/blog/chatgpt/>
- [2] 李兆龙, 王贵.射频与微波电路[M].北京:电子工业出版社, 2022. 4.
- [3] Bhardwaj D, Bhatnagar D, Sancheti S, et al. Design of Square Patch Antenna with a Notch on FR4 Substrate[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2009, 2(8):880-885.
- [4] Wang J, Wang B Z, Guo Y X, et al. Compact slow-wave microstrip rat-race ring coupler[J]. Electronics Letters, 2007, 43(2):111-113
- [5] 冬冬甜甜枪 . 02 环形耦合器 [EB/OL].<http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>, 2022-07-06.

致 谢

本次 Project 的顺利完成首先需要感谢 Dr.Li, 老师总是能一语中的, 帮助我很快找到问题的关键所在。

然后需要感谢的是耿淳同学, 他对于射频与微波电路的理解非常深刻。在我不理解设计要求时, 他细心地向我逐字解释每一条设计要求所对应的参数指标及计算方法, 极大地帮助我完成这项 Project。其次需要感谢张慧杰同学的帮助和支持。

再次感谢 Dr.Li 在课程设计中的精心指导。