

浙江大學

本科生实验报告



课程 电磁场与电磁波实验

姓名

学号

专业 电子科学与技术

实验内容 微带传输线负载特性矢网测量

实验一 微波传输线负载特性矢量网络分析仪测量

1. 实验目的

了解基本传输线、微带线的特性，熟悉网络参量测量，掌握矢量网络分析仪的基本使用方法。

2. 实验原理

考虑一段特征阻抗为 Z_0 的传输线，一端接信号源，另一端接上负载，如图 1 所示。假设此传输线无损耗，且传输系数 $\gamma = j\beta$ ，则传输线上的电压和电流可用下列二式表示：

$$U(z) = U^+ e^{-\beta z} + U^- e^{\beta z}$$

$$I(z) = I^+ e^{-\beta z} + I^- e^{\beta z}$$

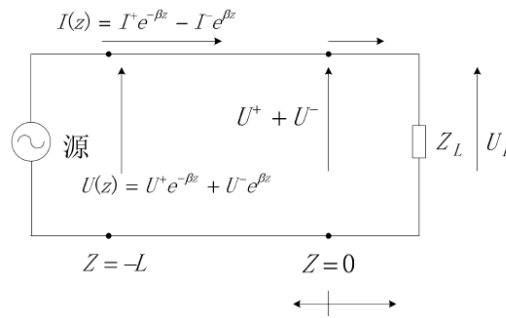


图 1

1、负载端 ($z = 0$) 处情况

电压及电流为

$$U = U_L = U^+ + U^-$$

$$I = I_L = I^+ + I^-$$

而 $Z_0 I^+ = U^+$ ， $Z_0 I^- = U^-$ ，上式可改写成：

$$I_L = \frac{1}{Z_0} (U^+ + U^-)$$

可得负载阻抗为：

$$Z_L = \frac{U_L}{I_L} = \frac{Z_0 (U^+ + U^-)}{U^+ - U^-}$$

定义归一化负载阻抗为：

$$z_L = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L}$$

其中定义 Γ_L 为负载端的电压反射系数：

$$\Gamma_L = \frac{U^-}{U^+} = \frac{z_L - 1}{z_L + 1} = |\Gamma_L| e^{j\phi_L}$$

当 $Z_L = Z_0$ 或为无限长传输线时， $\Gamma_L = 0$ ，无反射波，是行波状态或匹配状态。当 Z_L 为纯电抗元件或处于开路状态时， $|\Gamma_L| = 1$ ，全反射，为驻波状态。当 Z_L 为其他值时， $|\Gamma_L| \leq 1$ ，为行波驻波状态。

线上任意一点的反射系数为：

$$\Gamma_L = |\Gamma_L|e^{j\varphi_L - j2\beta z}$$

定义驻波比 VSWR 和回波损耗 RL 为:

$$VSWR = \rho = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|}$$

$$RL = -20\lg |\Gamma_L|$$

2、输入端($z = -L$)处情况

反射系数 $\Gamma(z)$ 应改成:

$$\Gamma(L) = \frac{U^- e^{-j\beta L}}{U^+ e^{j\varphi\beta L}} = \frac{U^-}{U^+} e^{-2j\beta L} = \Gamma_L e^{-2j\beta L}$$

输入阻抗为:

$$Z_{in} = \frac{Z_0(Z_L + jZ_0 \tan \beta L)}{Z_0 + jZ_L \tan \beta L}$$

由上式可知:

(1) 当 $L \rightarrow \infty$ 时, $Z_{in} \rightarrow Z_0$

(2) 当 $L = \frac{\lambda}{2}$ 时, $Z_{in} = Z_L$

(3) 当 $L = \frac{\lambda}{4}$ 时, $Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L}$

3. 实验设备

矢量网络分析仪一台、微带电路一套

4. 实验内容

- (1) 分析微带传输线在不同负载下的反射特性情况, 和理论计算的异同。
- (2) 分析天线的驻波比特性曲线。
- (3) 分析测量的微带耦合滤波器的滤波特性, 试说明设计优劣情况。

5. 实验过程及数据记录

5.1. 微带传输线测量

开启矢量网络分析仪, 预热后选择测量内容为 S_{11} , 设定频率范围为 2.3GHz~2.7GHz 并进行校准。校准后分析仪显示如图 2 所示图形, 即光标位于史密斯圆图的 0 点。

确认校准无误后接入微带传输模块, 测量不同负载情况下的反射特性情况。

(1) 负载开路

将微带线负载端开路, 测得的结果如图 3 所示, 数据记录如表 1 所示。

表格 1 负载开路数据记录

频率 $f(\text{GHz})$	实电阻 $R(\Omega)$	虚电抗 $X(\Omega)$	等效电容/电感
2.46	42.67	156.40	10.11nH
2.50	85.10	220.47	14.03nH
2.56	527.98	319.13	19.18nH
2.61	359.71	-364.67	166.93fF

理论上, 开路点对应了史密斯圆图的右实轴端点。本实验中微带线的工作频率为 2.5GHz, 但实际结果中 2.5GHz 对应的点并不是右实轴端点, 而是位于感性区域 (光标 1)。转接头造成的误差、测量时传输光缆的移动和微小形变、微带线本身的误差都有可能致此结果。



图 2 校准结果

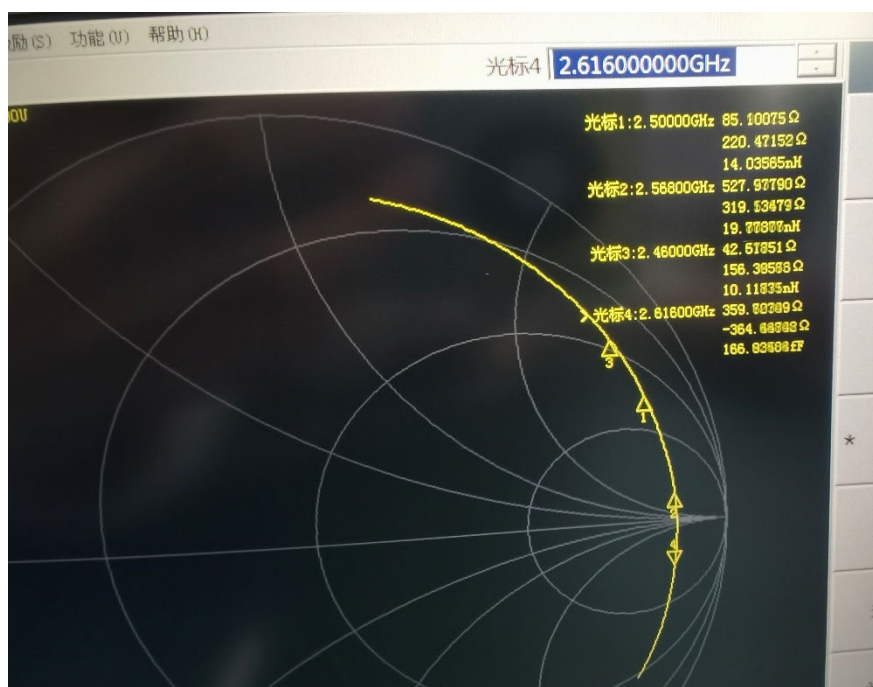


图 3 负载开路情况

计算反射系数 Γ ，并将实际值与理论值比较，如表 2 所示。

表格 2 负载开路时反射系数情况

频率 $f(\text{GHz})$	$ \Gamma $ 理论值	φ 理论值	$ \Gamma $ 实际值	相角 $\varphi(\text{rad})$	误差 (%)
2.46	1	0	0.861	0.581	13.87
2.50			0.863	0.392	13.66
2.56			0.870	0.084	12.95
2.61			0.872	-0.139	12.77

结果表明，反射系数的实际值在理论值附近，但误差均在 10%数量级。

(2) 负载短路

将微带线负载端接 0 欧姆的短路电阻，测得的结果如图 4 所示，数据记录如表 3 所示。



图 4 负载短路情况

表格 3 负载短路数据记录

频率 $f(GHz)$	实电阻 $R(\Omega)$	虚电抗 $X(\Omega)$	等效电容/电感
2.50	5.71	10.44	665.25pH
2.46	5.40	4.91	317.67pH
2.39	5.20	-3.78	17.56pF
2.37	5.19	-7.40	9.07pF

计算反射系数并同理论值比较，如表 4 所示：

表格 4 负载短路时反射系数情况

频率 $f(GHz)$	$ \Gamma $ 理论值	φ 理论值	$ \Gamma $ 实际值	相角 $\varphi(rad)$	误差 (%)
2.50	1	π	0.80	2.72	19.71
2.46			0.81	2.94	19.32
2.39			0.81	3.30	18.74
2.37			0.82	3.43	18.43

可见短路时相角的误差较小，基本位于史密斯圆图的实轴左端点附近，但模值的误差较大。结合测得的负载实际值，可知引入的转接头产生的阻抗、微带模块的误差、短路电阻放置位置不为半波长的位置产生的误差、短路电阻老化产生的误差等因素均产生了额外的阻抗，使得反射系数的实际值与理论值相差较大。

(3) 负载为 49.9Ω纯电阻

将 49.9Ω的电阻接入负载端，测得结果如图 5 所示，数据记录如表 5 所示。由于实验中采用的传输电缆的特征阻抗为 50Ω，故此时接近阻抗匹配情况。从史密斯圆图中可以看出，此时光标均位于靠近中心点的圆弧上，表明阻抗匹配情况较好。



图 5 负载为纯电阻的情况

表格 5 负载为纯电阻时数据记录

频率 $f(GHz)$	实电阻 $R(\Omega)$	虚电抗 $X(\Omega)$	等效电容/电感
2.50	52.79	14.00	891.60pH
2.46	50.19	13.08	846.96pH
2.39	46.72	10.78	716.23pH
2.37	45.64	9.77	657.23pH

表格 6 接纯电阻时反射系数情况

频率 $f(GHz)$	$ \Gamma $ 理论值	φ 理论值	$ \Gamma $ 实际值	相角 $\varphi(rad)$	误差 (%)
2.50	0.001		0.14	1.23	12.76
2.46			0.13	1.42	11.95
2.39			0.12	-1.38	10.57
2.37			0.11	-1.25	10.12

(4) 负载为纯电容

将1pF的电容接入负载端，测得结果如图 6 所示，数据记录如表 7 所示：

表格 7 负载为纯电容时的数据记录

频率 $f(GHz)$	实电阻 $R(\Omega)$	虚电抗 $X(\Omega)$	等效电容/电感
2.50	8.32	-61.02	1.04pF
2.46	10.96	-76.33	847.64fF
2.39	20.20	-113.47	585.37fF
2.37	28.81	-136.40	492.34fF

表格 8 负载为纯电容时反射系数情况

频率 $f(\text{GHz})$	$ \Gamma $ 理论值	φ 理论值	$ \Gamma $ 实际值	相角 $\varphi(\text{rad})$	误差 (%)
2.50	1	0.2487	0.88	-1.36	12.45
2.46			0.88	-1.15	12.23
2.39			0.88	-0.81	12.08
2.37			0.88	-0.68	12.38

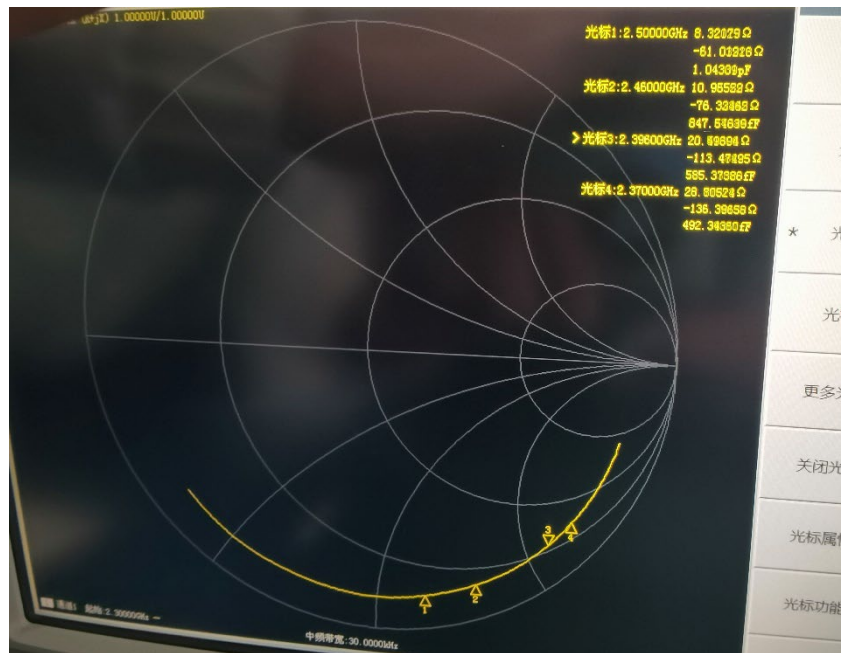


图 6 负载为纯电容时的情况

可以观察到此时模值的误差在 10%左右，但相角的误差较大，主要原因是上述提到的干扰因素中引入了实电阻，导致相角产生偏移。

(5) 负载为纯电感

将 3.3nH 的电感接入负载端，测得结果如图 7 所示，数据记录如表 8 所示：

表格 9 负载为纯电感时的数据记录

频率 $f(\text{GHz})$	实电阻 $R(\Omega)$	虚电抗 $X(\Omega)$	等效电容/电感
2.50	7.99	41.70	2.65nH
2.46	6.69	33.26	2.15nH
2.39	5.58	22.20	1.47nH
2.37	5.23	17.99	1.21nH

计算反射系数，

表格 10 负载为纯电感时的反射系数

频率 $f(\text{GHz})$	$ \Gamma $ 理论值	φ 理论值	$ \Gamma $ 实际值	相角 $\varphi(\text{rad})$	误差 (%)
2.50	1	-0.33	0.83	-1.41	17.13
2.46			0.83	-1.19	16.92
2.39			0.83	-0.84	17.03
2.37			0.83	-0.70	16.93

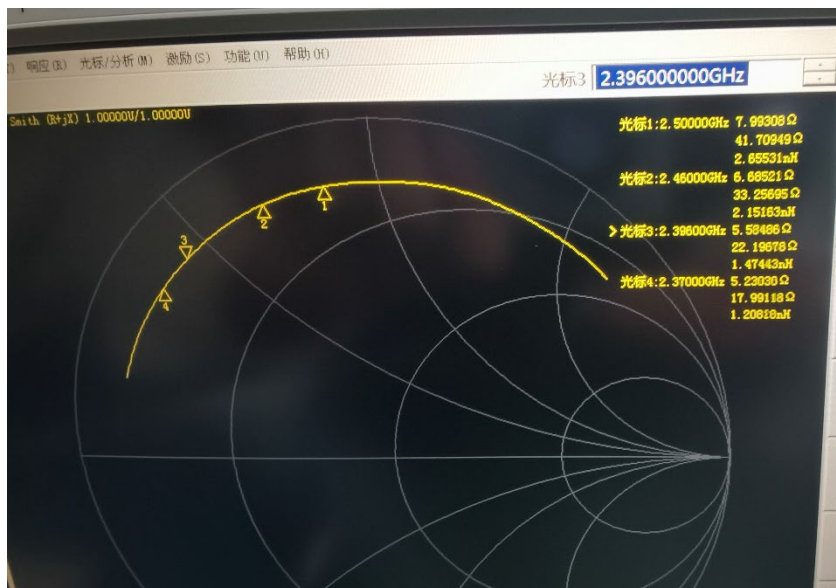


图 7 负载为纯电感时的情况

可以看到此时反射系数的相角误差较小，但模值误差较大。从数据上看出，中心频率附近接入的等效电感为 2.65nH ，与 3.3nH 相差较大，说明接入的实际位置与探头的距离不是半波长的整数倍，且引入的实电阻也加大了误差。

5.2. 天线测量

对设备进行校准后，接入天线模块，获得史密斯圆图如图 9。



图 8 天线史密斯圆图

可以看到大约在 2.3GHz~2.6GHz 的频段内，该天线阻抗匹配结果较好，处于最佳工作状态。

根据幅频特性曲线（图 9），可以看到两个最佳的工作频段分别 2.19GHz 和 2.62GHz，对应的 S_{11} 衰减分别为-21.19dB 和-23.15dB。

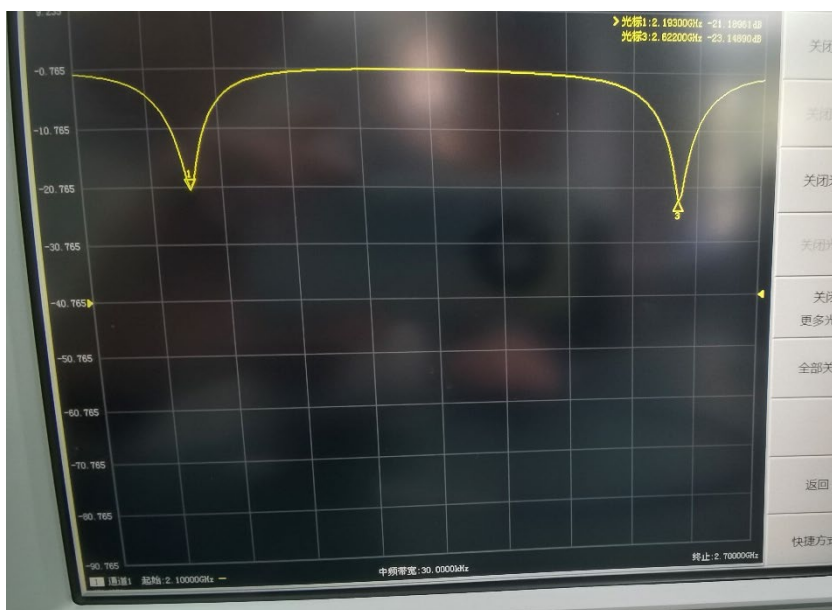


图 9 天线幅频特性

观察天线驻波比曲线，发现在工作频率为 2.35GHz、2.52GHz 左右时驻波系数接近于 1，约为 1.33（其他峰值处时对应的幅频衰减接近于 0dB，反射系数较大，不予考虑）。理论分析可知，天线的反射系数越小，即对反射波的衰减越大时，信号能够较好地通过天线进行发射和接收。此时驻波比接近于 1。理想情况下，反射系数为 0，驻波比为 1。

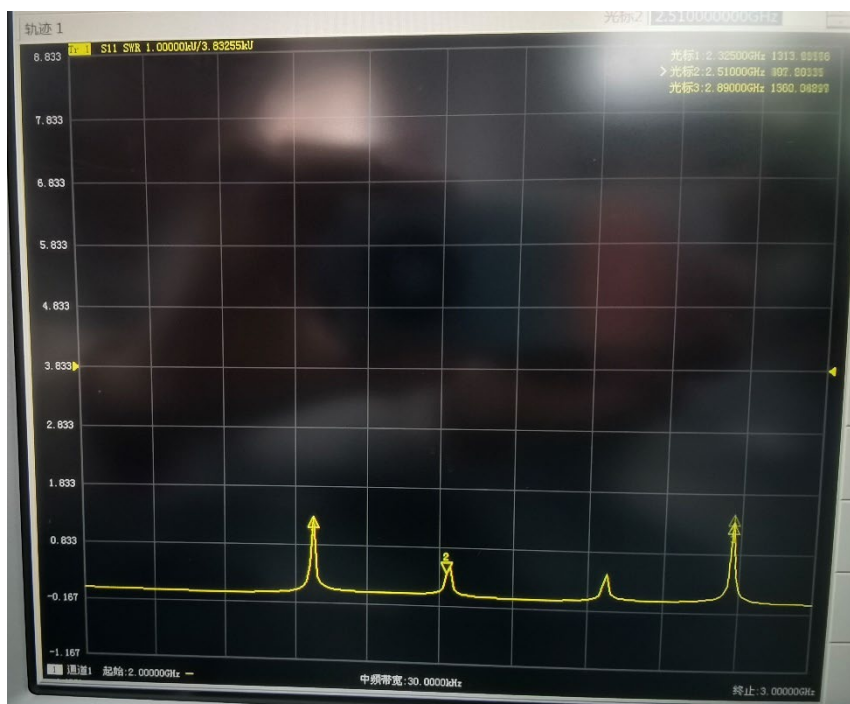


图 10 天线驻波比曲线（光标 2 的峰值会抖动，其真实值在 1.2 左右）

5.3.微带滤波器测量

选择 S_{21} 模式测量微带滤波器的频域特性。校准结果如图 11。

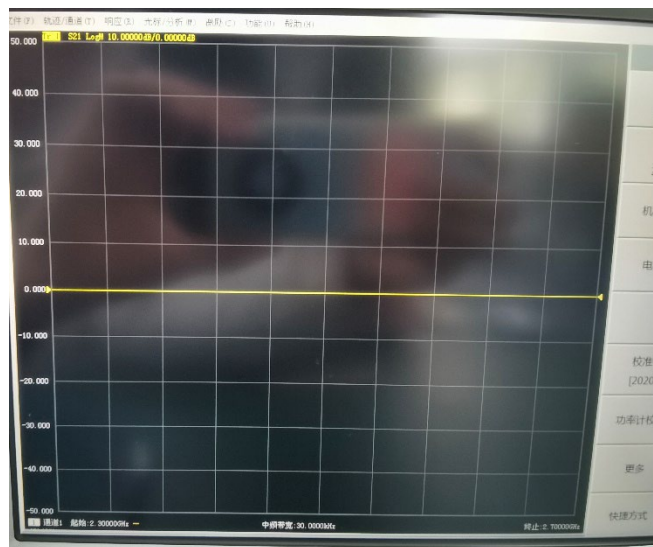


图 11 校准结果

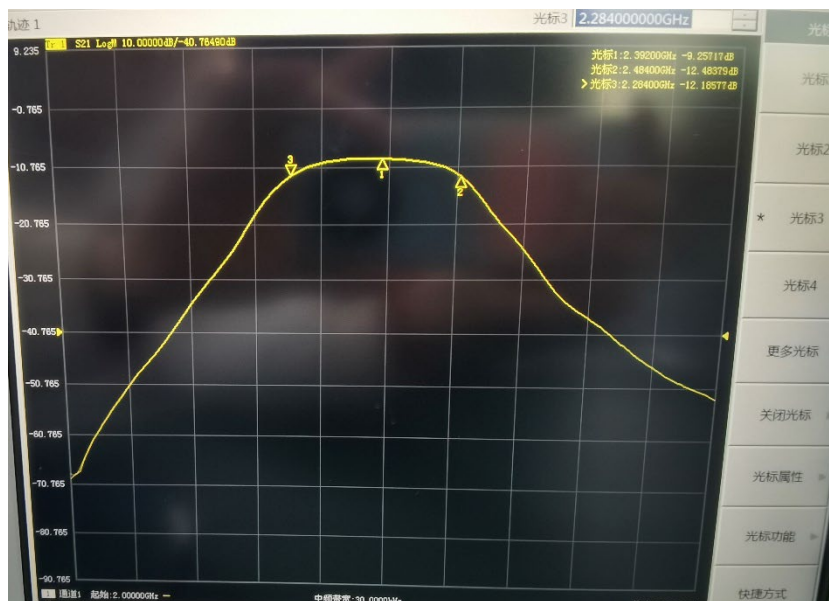


图 12 滤波器的频域响应特性曲线 $|S_{21}| \sim \omega$

根据获得的频域相应特性曲线（即 $|S_{21}| \sim \omega$ 曲线），得出滤波器的中心工作频率 $f_0 = 2.392\text{GHz}$ ，3dB 带宽为 $\Delta = 2.484 - 2.284 = 0.2\text{GHz}$ ，插入损耗 $L = -9.25\text{dB}$ 。

选择中心工作频率 $\pm 300\text{MHz}$ 的区域，如图 13，得出阻带衰减为 $-43.37 \sim -50.23\text{dB}$ ，移动光标至中心频率附近的位置，读出带内纹波为 1dB 。

切换显示模式，得出 $\arg(S_{21}) \sim \omega$ 的关系曲线如图 14 所示。可以看到当滤波器工作在频率为 2.3GHz 附近时，相角接近 0° 。且相角与频率的关系曲线在通频带可近似看作周期函数。



图 13 阻带衰减和带内纹波

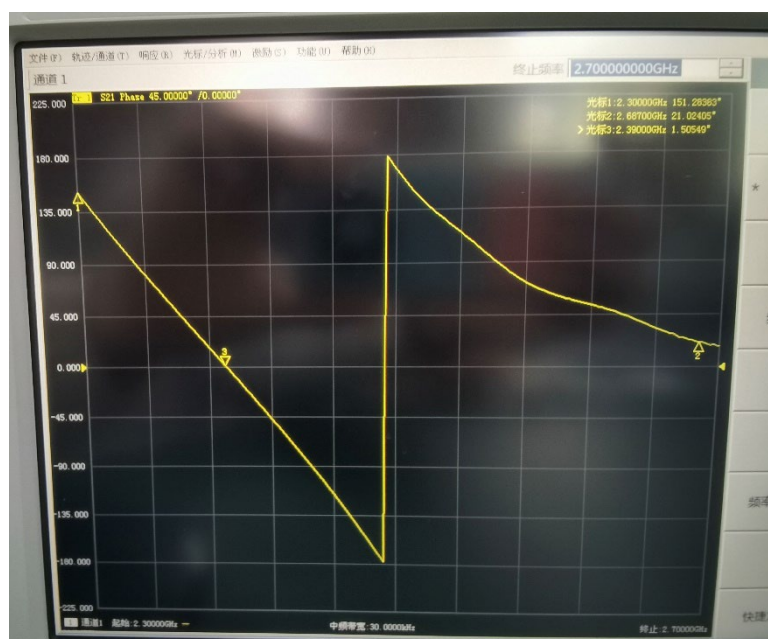


图 14 滤波器相位关系曲线

滤波器的史密斯圆图、驻波比特性曲线如图 15、16 所示。用手指作为干扰，得到新的幅频曲线、驻波比曲线和史密斯圆图如 17~19 所示。由于人体可看作大阻抗的干扰，故受干扰后滤波器不再正常工作。



图 15 滤波器史密斯圆图

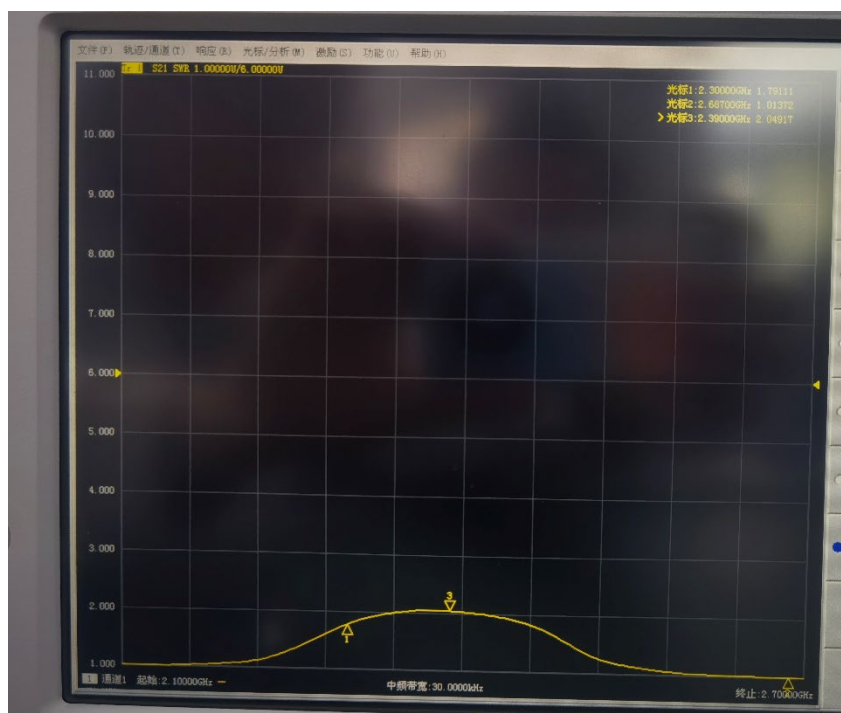


图 16 滤波器驻波比曲线



图 17 引入干扰后滤波器的幅频曲线

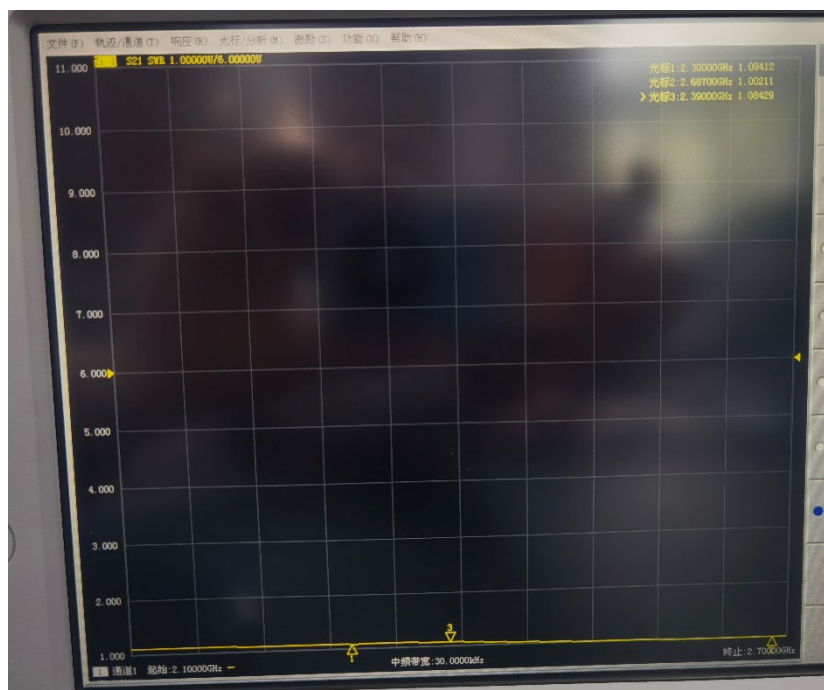


图 18 引入干扰后滤波器的驻波比曲线



图 19 引入干扰后滤波器的史密斯圆图

6. 思考题

6.1. 什么是 S 参数？

S 参数，也就是散射参数，是微波传输中的一个重要参数。以二端口网络为例， S_{12} 为反向传输系数，也就是隔离； S_{21} 为正向传输系数，也就是增益； S_{11} 为输入反射系数，也就是输入回波损耗； S_{22} 为输出反射系数，也就是输出回波损耗。

6.2. 如果不校准，直接接入射频电缆和电路模块测量会对结果有什么影响？

电缆本身、转接头等部分存在阻抗干扰，如果不校准会对测量结果造成影响，使史密斯圆图及其他测量结果不准确。

6.3. 如何测量转接头对测试曲线的影响？

校准矢量网络分析仪，选择完全阻抗匹配的微带模块进行测试，在史密斯圆图上显示的测量点即为转接头对测试曲线产生的影响。

6.4. 利用实验内容 2 中已知的设计参数，计算 50 欧半波长微带线的长度和宽度。

长度：6cm；宽度：2.768mm

7. 实验收获与体会

通过本次实验，我了解了矢网分析仪的用法，体会到了理论课上学习的传输线理论在实际工程应用时的作用，特别是反射系数、驻波比、阻抗匹配等概念在微带传输线、天线、滤波器等实际模块中的具体体现。在实际操作的过程中，我对电磁场和电磁波的相关理论有了更深的理解。

8. 建议与意见

无

