

浙江大学



本科实验报告

实验名称 微带传输线负载特性矢网测量

姓 名 _____

学 号 _____

院 系 信息与工程学院

指导老师 王子立

实验日期 _____

浙江大学 实验报告

专业 电子科学与技术

姓名

学号

日期

地点 东 4

课程名称 电磁场与电磁波实验 指导老师 王子立 成绩

实验名称 微带传输线负载特性矢网测量 实验类型 应用测量型 同组学生

1 实验目的

1. 了解基本传输线、微带线的特性。
2. 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

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

$$U(z) = U^+ e^{-\beta z} + U^- e^{\beta z} \quad (1)$$

$$I(z) = I^+ e^{-\beta z} - I^- e^{\beta z} \quad (2)$$

1. 负载处 ($z=0$) 处的情况

电压及电流为：

$$U = U(L) = U^+ + U^- \quad (3)$$

$$I = I(L) = I^+ - I^- \quad (4)$$

而 $Z_0 I^+ = U^+$ ， $Z_0 I^- = U^-$ ，公式可改写为：

$$I_L = \frac{1}{Z_0} (U^+ - U^-) \quad (5)$$

可得负载为：

$$Z_L = \frac{U_L}{I_L} = Z_0 \left(\frac{U^+ + U^-}{U^+ - U^-} \right) \quad (6)$$

定义归一化负载阻抗为：

$$z_L = \bar{Z}_L = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} \quad (7)$$

其中，定义 Γ_L 为负载端的电压反射系数

$$\Gamma_L = \frac{U^-}{U^+} = \frac{\bar{Z}_L - 1}{\bar{Z}_L + 1} = |\Gamma_L| e^{j\phi_L} \quad (8)$$

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或者短路状态时， $|\Gamma_L| = 1$ ，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。

线上任意点的反射系数为：

$$\Gamma_L = |\Gamma_L| e^{j\phi_L - j1\beta z} \quad (9)$$

定义驻波比 VSWR 和回波损耗 RL 为：

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (10)$$

$$RL = -20 \lg |\Gamma_L| \quad (11)$$

2. 输入端 ($z = -L$) 处的情况

反射系数 $\Gamma(z)$ 应改写为：

$$\Gamma(L) = \frac{U^- e^{-j\beta L}}{U^+ e^{j\phi\beta L}} = \frac{U^-}{U^+} e^{-j2\beta L} = \Gamma_L e^{-j2\beta L} \quad (12)$$

输入阻抗为：

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta L)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta L)} \quad (13)$$

由上式可知：

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

当 $L = \lambda/2$ 时， $Z_{in} = Z_L$

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

3 实验设备

1. 矢量网络分析仪一台
2. 微带电路一套

4 实验内容和数据测量

4.1 微带线负载反射特性

4.1.1 传输线开路



频率 f/GHz	电阻 R/Ω	电抗 X/Ω	等效电容/电感	实验值	理论值
2.3	90.236	234.055	458.042nH	0.812+0.314i	1
2.4	318.521	-365.726	181.323fF	0.863-0.136i	1
2.5	28.936	-138.987	458.042fF	0.691-0.544i	1
2.6	10.360	-73.566	832.089fF	0.333-0.812i	1
2.7	5.821	-43.677	1.350pF	-0.111-0.869i	1

传输线长度为 $\lambda/2$ ，则我们可以认为 $Z_{in} = Z_L$ ，后续的其他负载也是如此，因此，反射系数为 $\Gamma_L = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$

当传输线开路时，理论上 $Z_{in} \rightarrow \infty$ ，反射系数为 1，但由于传输线使用时间过长等原因，导致线路老化，使得反射系数不理想。从实验值中可以看出，在频率为 2.4GHz 时，反射系数最接近理想值。

4.1.2 传输线短路



频率 f/GHz	电阻 R/Ω	电抗 X/Ω	等效电容/电感	实验值	理论值
2.3	3.624	6.129	424.115pH	-0.841+0.210i	-1
2.4	4.748	21.671	1.437nH	-0.580+0.625i	-1
2.5	7.535	42.058	2.677nH	-0.133+0.828i	-1
2.6	14.671	73.210	4.488nH	0.322+0.767i	-1
2.7	53.628	151.472	8.929nH	0.692+0.450i	-1

当传输线短路时， $Z_{in} = 0$ ，此时，反射系数理论值为-1。而将 0Ω 的电阻压在传输线最远端，由于接触不良会有接触电阻和等效的电容、电感，导致反射系数偏离理论值。在 2.3GHz 时，实验值最接近理论值。

4.1.3 传输线负载 49.9Ω



频率 f/GHz	电阻 R/Ω	电抗 X/Ω	等效电容/电感	实验值	理论值
2.3	51.705	11.475	794.040pH	0.029+0.110i	0
2.4	59.570	9.982	661.939pH	0.095+0.082i	0
2.5	66.588	3.434	218.621pH	0.143+0.025i	0
2.6	67.467	-6.745	9.090pF	0.151-0.049i	0
2.7	60.754	-15.863	3.716pF	0.115-0.127i	0

当传输线负载为 49.9Ω 时，传输线理论上处于几乎匹配的状态，所以此时反射系数的理论值为 0，而由于同之前差不多的原因，导致实际电阻值不为 49.9Ω ，所以反射系数有偏差，在 2.3GHz 时，实验值最接近理论值。

4.1.4 传输线负载 1pF



频率 f/GHz	电阻 R/Ω	电抗 X/Ω	等效电容/电感	实验值	理论值
2.3	4.621	-40.843	1.694pF	-0.174-0.878i	0.314-0.949i
2.4	3.431	-20.109	3.298pF	-0.639-0.617i	0.275-0.961i
2.5	3.400	-3.663	17.380pF	-0.864-0.128i	0.237-0.971i
2.6	3.947	11.500	711.178pH	-0.773+0.378i	0.199-0.979i
2.7	5.712	30.957	1.825nH	-0.371+0.762i	0.163-0.987i

当传输线负载为 1pF 电容时，相当于有一个值为 $\frac{1}{j\omega C}$ 的阻抗，可以算出其反射系数理论值。而实际测量时，受其余因素影响，实际值有偏差，在 2.3GHz 时，实验值最接近理论值。

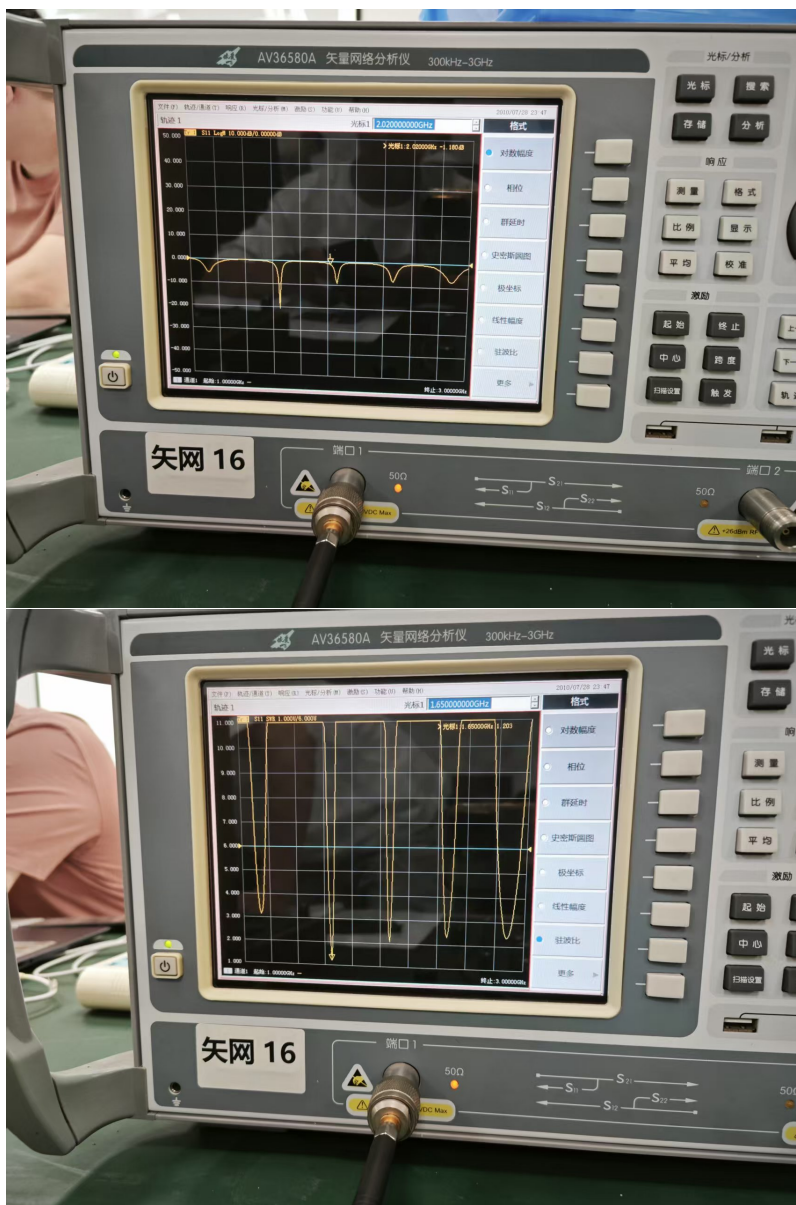
4.1.5 传输线负载 3.3nH



频率 f/GHz	电阻 R/Ω	电抗 X/Ω	等效电容/电感	实验值	理论值
2.3	9.278	39.946	2.764nH	-0.160+0.782i	-0.047+0.999i
2.4	18.090	71.773	4.780nH	0.394+0.733i	-0.005+1.000i
2.5	58.880	141.757	9.025nH	0.659+0.444i	0.036+0.999i
2.6	420.539	80.298	4.923nH	0.793+0.035i	0.075+0.997i
2.7	69.196	-152.105	387.537fF	0.681-0.407i	0.112+0.994i

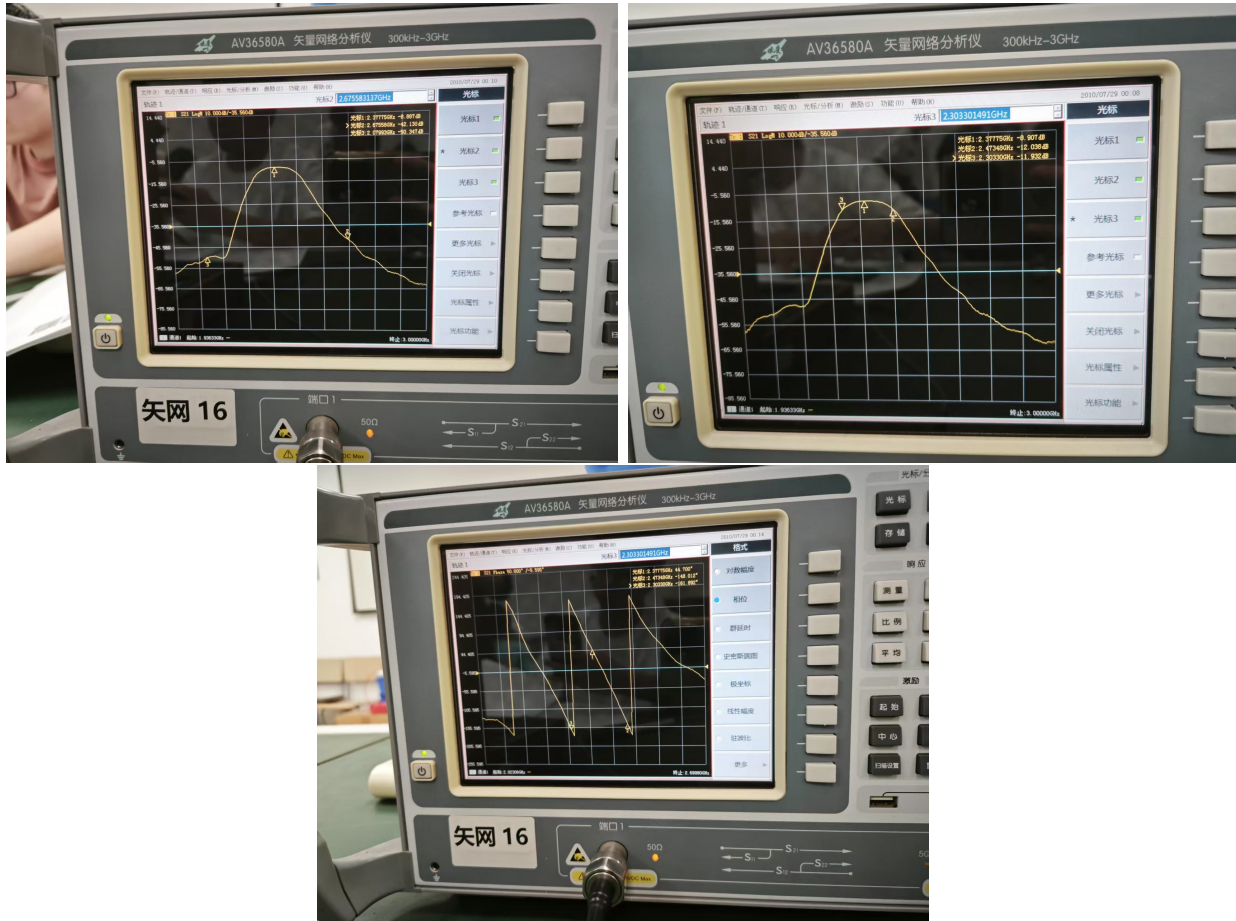
当传输线负载为 3.3nH 电感时，相当于有一个值为 $j\omega L$ 的阻抗，可以算出其反射系数理论值。而实际测量时，受其余因素影响，实际值有偏差，在 2.3GHz 时，实验值最接近理论值。

4.2 天线驻波比特性曲线



从图中可以得到该天线的匹配点和驻波系数。可以看到，在 1.65GHz 处，天线的反射系数为-20.130dB，所以以这一点作为天线的工作频率是最好的；而对于其驻波系数，在 1.65GHz，驻波系数为 1.203，相比于 1.5，我们可以得出，该天线的性能是不错的。但是，我们也发现该点的宽度较小，所以实际使用时，还需要根据具体情况来看。

4.3 微带耦合滤波器的滤波特性



中心频率	2.378GHz
3dB 带宽	170.18MHz
插入损耗	-8.907dB
带内纹波	0
带阻衰减	-50.347dB、-42.138dB

图中所表示的特性参数已被列入到表中。从图中可以看出该滤波器是带通滤波器，其 3dB 带宽有 170MHz，中心频率为 2.378GHz，对比中心频率前后 300MHz，衰减较强。而从相位图中可以看出，在我们需要的 2.3GHz 2.7GHz 范围内，线性度是比较好的。所以，该滤波器基本上可以实现带通滤波的功能，但是带宽等参数需要进行调整以满足要求。

5 思考题

5.1 什么是 S 参数

S 参数也就是我们所说的散射参数，它是建立在入射波、反射波关系基础上的网络参数，适于微波电路分析，以器件端口的反射信号以及从该端口传向另一端口的信号来描述电路网络。而针对实验中的 S11、S22、S12、S21 各有其含义：

S11：端口 2 匹配时，端口 1 的反射系数，也叫做输入反射系数或输入回波损耗；

S22：端口 1 匹配时，端口 2 的反射系数，也叫输出反射系数或输出回波损耗；

S12：端口 1 匹配时，端口 2 到端口 1 的反向传输系数，也就是隔离；

S21：端口 2 匹配时，端口 1 到端口 2 的正向传输系数，也就是增益；

5.2 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

由于环境对被测器件的阻抗影响很大，加上适量分析仪本身是一类非常精密的仪器，假如矢量分析仪不进行校准就直接进行实验，则会导致实验数据受仪器本身和环境状的影响，而况存在巨大的偏差。

5.3 如何测量转接头对测试曲线的影响

设置对照实验，分别对有转接头和无转接头的设备进行测量，观察史密斯图曲线、驻波比特性、滤波特性的变化就可得到转接头对测试曲线的影响。

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

$$\epsilon_r = 4.6 \quad (14)$$

$$h = 0.765mm \quad (15)$$

$$d = 0.035mm \quad (16)$$

$$\tan \delta = 0.015 \quad (17)$$

$$\frac{W}{L} = 0.424 \quad (18)$$

$$W = 1.38mm, L = 32.56mm \quad (19)$$

6 实验收获与体会

在这次矢量网络分析实验中，我学会了矢网分析仪的基础使用方法，这让我能够对传输线、微带线和滤波器等元器件进行基本性能测试。通过实验操作，我对这些电子元器件的特性有了更深入的认识，特别是关于反射系数的理解，很好地补充了课堂理论知识的不足。

7 实验建议与意见

被测元件老化，对实验的误差影响很大。