

浙江大学实验报告

实验名称：微带传输线负载特性矢网测量

实验日期：2023/3/28

一、实验目的和要求

1.1 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。

1.2 实验要求

- (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。

二、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 2-1 所示。假设此传输线无耗，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：

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

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

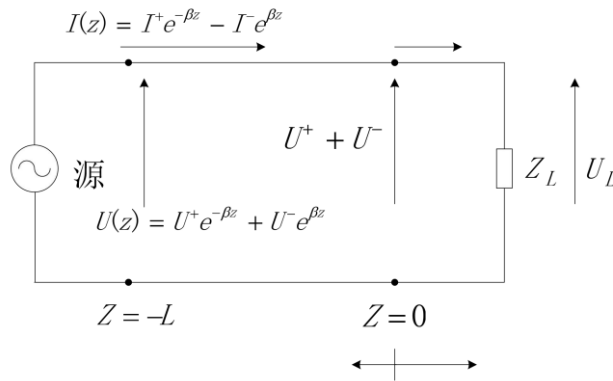


图 2-1

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 $Z_0 I^+ = U^+$ ， $Z_0 I^- = U^-$ ，公式可改写成

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

可得负载阻抗为

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

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

$$\Gamma_L = \frac{U^-}{U^+} = |\Gamma_L| e^{j\varphi_L}$$

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

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

定义驻波比 $VSWR$ 和回拨损耗 RL 为

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

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

2、输入端 ($z = -L$) 处情况

反射系数 $\Gamma(z)$ 应改成

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

输入阻抗为

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

由上式可知:

- (1) 当 $L \rightarrow \infty$ 时, $Z_{in} \rightarrow Z_0$ 。
- (2) 当 $L = \lambda/2$ 时, $Z_{in} = Z_L$ 。
- (3) 当 $L = \lambda/4$ 时, $Z_{in} = Z_0^2/Z_L$ 。

三、实验结果和分析

3.1 测量微带传输线的反射特性

(1) 微带开路传输线 (无负载)

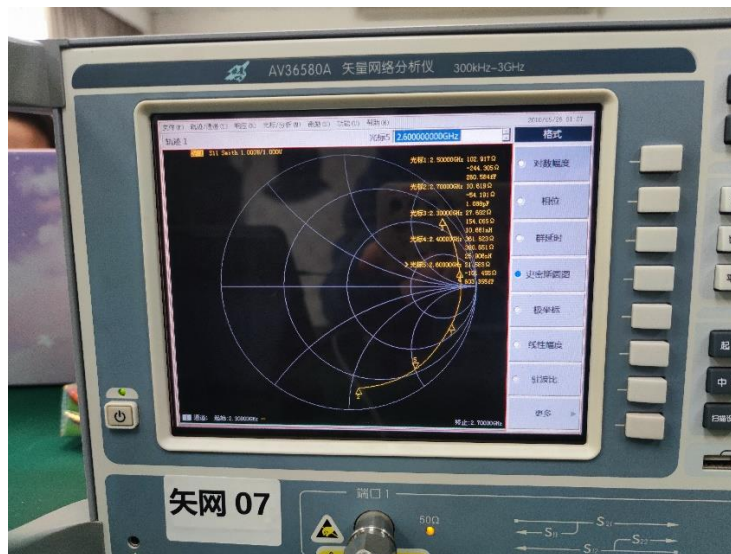


图 3-1

转接头较长导致偏移比较明显。圆图在容性区和感性区分布比较均匀，且靠近开路点。测得工作频率（2.5 GHz）下的反射系数 $\Gamma_{2.5 \text{ GHz}} = \frac{Z_L - 1}{Z_L + 1} = 0.82 - 0.29j = 0.87e^{j-10.8^\circ}$ ，接近开路点。而 2.3-2.7 GHz 光标中最接近开路点的为 2.4 GHz ($\Gamma_{2.4 \text{ GHz}} = 0.88e^{j3.8^\circ}$)，因此猜测实际工作频率可能在 2.4 - 2.5 GHz 之间。

(2) 电阻负载



图 3-2

测量中，圆图分布在感性区，圆图整体靠近圆心，说明阻抗离匹配点很近。

负载接近 50Ω ，因此理论上， $Z_{in} = 50\Omega$ 。

2.5 GHz 工作频率下， $Z_{in} = 49.97e^{-8.00^\circ}\Omega$ 。

观察圆图，2.6 GHz 频率最接近实轴，此时 $Z_{in} = 41.56e^{j-2.01^\circ}\Omega$ ，但阻抗的模已经发生了明显的衰减。

计算标准工作频率 2.5 GHz 下的反射系数， $\Gamma = 0.07e^{j-90.2^\circ}$ ，其模接近于 0，而相位接近 -90° 。

(3) 电容负载



图 3-3

圆图更靠近短路点，不同频率阻抗变化较大，与在高频情况下电容的阻抗变小的事实相近。

在标准工作频率 2.5 GHz 下，圆图最接近短路点， $Z_{in} = 5.54e^{j18.25^\circ}\Omega$ 。

计算标准工作频率 2.5 GHz 下的反射系数， $\Gamma = 0.84e^{j172.09^\circ}$ ，相位接近 180° 。

(4) 电感负载

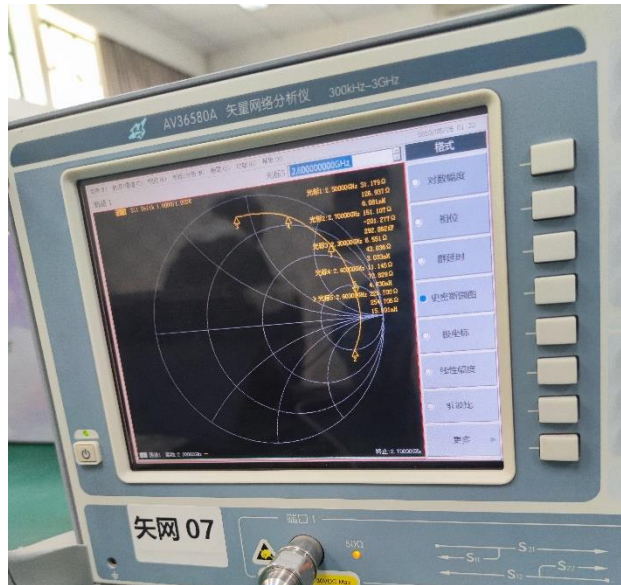


图 3-4

圆图更靠近开路点，不同频率阻抗变化较大，与在高频情况下电感的阻抗变大的事实相近。

在标准工作频率 2.5 GHz 下， $Z_{in} = 130.71e^{j76.20^\circ}\Omega$ 。

在 2.6 GHz 工作频率下，圆图最接近开路点， $Z_{in} = 340.91e^{j24.34^\circ}\Omega$ 。

计算标准工作频率 2.5 GHz 下的反射系数， $\Gamma = 0.85e^{j41.03^\circ}$ ，反射系数的模与电容的相近。

(5) 微带短路传输线

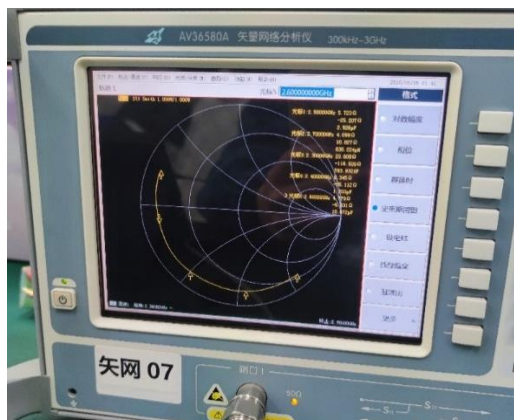


图 3-5

可见圆图整体接近短路点，而呈现更多的感性。测得工作频率（2.5 GHz）下的反射

系数 $\Gamma_{2.5\text{ GHz}} = \frac{Z_L - 1}{Z_L + 1} = 0.83e^{j-126.0^\circ}$ 。而 2.3-2.7 GHz 光标中最接近短路点的为 2.6 GHz ($\Gamma_{2.6\text{ GHz}} = 0.83e^{j-177.0^\circ}$)。

3.2 天线测量

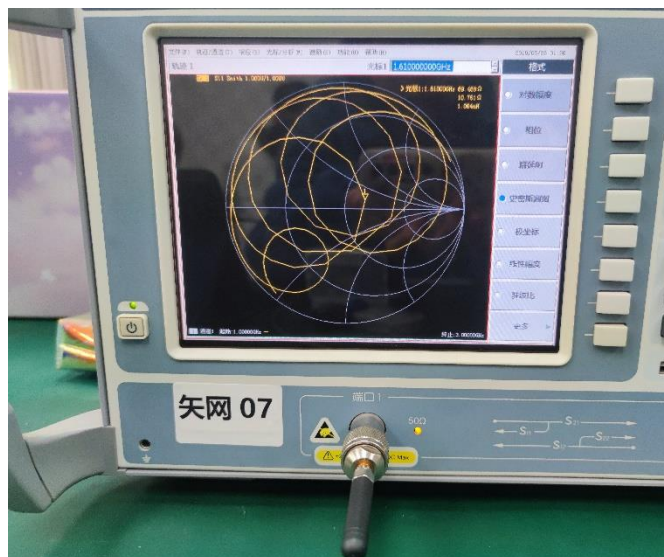


图 3-6

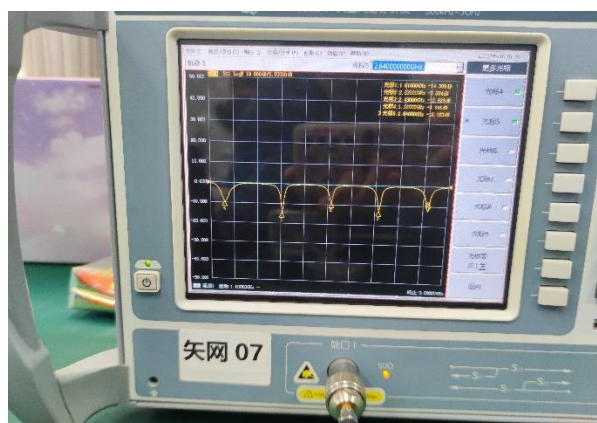


图 3-7

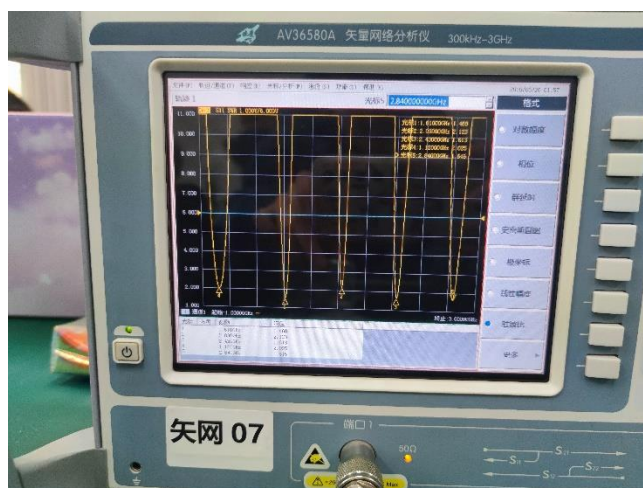


图 3-8

图 3-6 为天线附近没有阻挡时测得的反射系数圆图，曲线平滑，且由多个螺旋线组成。

图 3-7 为天线的对数幅度图，可以清楚见到，在 1 - 3 GHz 范围内，该天线存在 5 个吸收峰，平均每 0.4 GHz 出现一次吸收峰，峰值在 -9 - -14 dB 区间内。

图 3-8 为天线的驻波系数图，吸收峰所在频率和图 3-7 一一对应。由图可得，1.61 GHz 时驻波系数为 1.468，比较适合应用的；而其他频率驻波系数大于 1.5，不适合应用。

3.3 微带滤波器测量

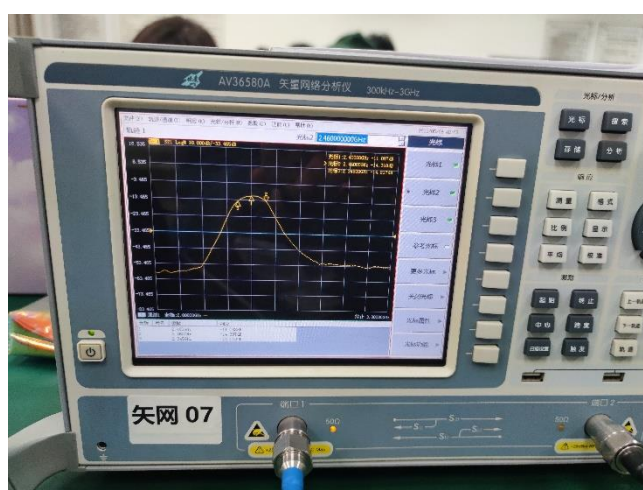


图 3-9

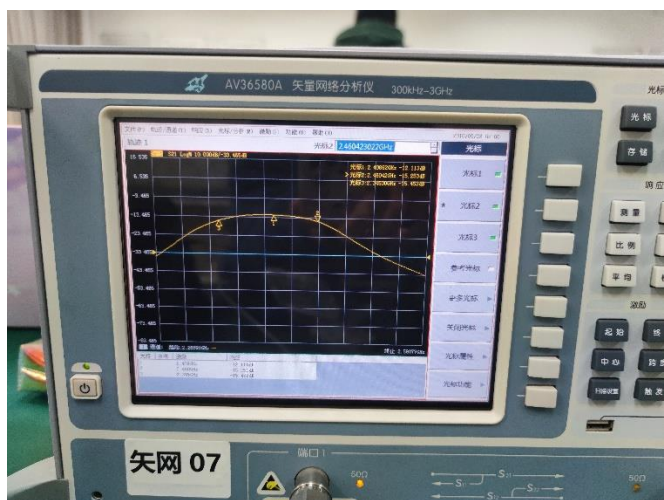


图 3-10

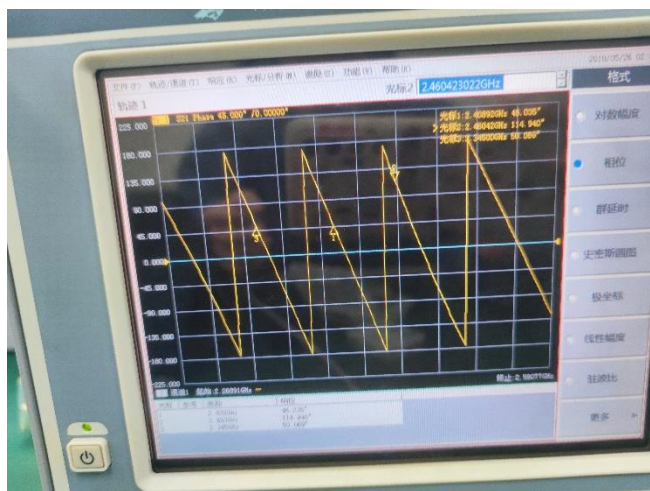


图 3-11

图 3-9 和 3-10 为微带滤波器的滤波特性曲线，由图可见，其峰值对应频率（即中心频率）在光标 1 的 2.4 GHz 左右，对应的插入损耗为 -11.087 dB。3 dB 带宽为光标 2、3 对于的频率差，即 0.115 GHz。其阻带衰减在 1.0 dB 左右。

图 3-11 显示了滤波器相位与频率的关系，每个周期具有一段线性度较好的直线。

四、思考题

(1) 什么是 S 参数？

在仿真和测试中经常会用的 S 参数，S 参数的全称为 Scatter 参数，即散射参数，是在传输线两端有终端的条件下定义出来的，一般为 50Ω 。如果把传输通道作为一个黑盒子看待，S 参数描述的是这个黑盒子本身的频域特性。通过 S 参数，我们能看到传输通道的几乎全部特性，例如信号的反射，串扰，损耗，都可以从 S 参数中找到有用的信息。S 参数把多种仪器及其测量结果统一起来，可让用户仅使用一种仪表（矢量网络分

析仪)通过单次连接测量增益、隔离度和匹配等参数。

尽管 S 参数用途广泛且功能非常强大,但它们确有其局限性—只能用于小信号线性系统。随着通信技术革命性的进步和发展,工程师经常会把功率放大器(PA)等有源器件推动到其工作的非线性区域。因此,他们现在又需要利用新的解决方案来精确测量器件的非线性特性。他们基本的做法是采用 S 参数并施加一些非线性品质因数(例如 ACPR 和增益压缩)进行线性假设。尽管工程师能够容忍这种不精确性,但他们不得不执行成本高且完全依赖经验的重复设计,从而使设计流程的时间和成本显著增加。为了在高频领域更加快速、精确和确定性地设计出非线性器件,工程师需要对器件的非线性特性恰当地进行测量,并使用统一模型(类似于 S 参数的适用于非线性器件的模型)将完整的器件信息应用到仿真和设计中。

(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?

电缆的阻抗会对最终结果造成影响,导致圆图不准确。

(3) 如何测量转接头对测试曲线的影响?

可以用完全匹配的阻抗进行测试,校准后矢量网络分析仪上距离圆心的距离就是转接头产生的误差。

(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。

微带电路参数如下:

- (i) 工作频率 2.5GHz;
- (ii) 特性阻抗 50 欧姆;
- (iii) 传输线 1/2 波长;
- (iv) 微波介质基板特性:相对介电常数 4.6,介质层厚度 0.765mm,铜箔厚度

0.035mm(1OZ),损耗正切 0.015;

计算得到,微带线的宽度应该为 1.408mm,微带线长度为 32.32mm。

五、实验的收获与体会、建议与意见

此次实验,我学会了矢量网络分析仪的原理和初步使用方法,学会了如何使用矢量网络分析仪,包括校准、选择频率范围、测量等一系列操作步骤。我还通过实验,在实际中接触了传输线、天线和微带滤波器,增强了我的实验动手能力和对电磁场、电磁波的理解。

建议:希望在理论学习之后再再进行实验,比如天线、微带滤波器,不要为了实验而实验,需要把理论和实验充分的结合。

扣分

负载:多点测试? -2

滤波器:纹波、阻带? -4

思考题(1) -1

思考题(3) -4

思考题(4) 过程 -2