

实验一、微波传输线负载特性矢量网络分析仪测量

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 1-1 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：

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

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

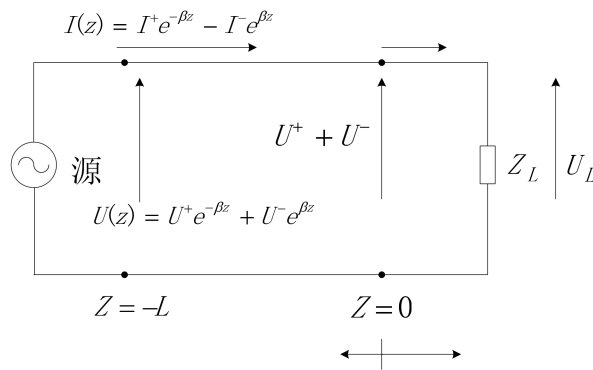


图 1-1

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

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

定义归一化负载阻抗为

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

其中定义 Γ_L 为负载端的电压反射系数

$$\Gamma_L = \frac{U^-}{U^+} = \frac{\bar{Z}_L - 1}{\bar{Z}_L + 1} = |\Gamma_L|e^{j\varphi_L}$$

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 和回波损耗 RL 为

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

$$\text{RL} = -20\lg|\Gamma_L|$$

2、输入端 ($z = -L$) 处情况

反射系数 $\Gamma(z)$ 应改成

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

输入阻抗为

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

由上式可知:

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

1.3. 实验设备

- 1、矢量网络分析仪 一台
- 2、微带电路 一套

1.4. 实验内容

实验内容 1. 查阅“附 2. 矢量网络分析仪操作说明.pdf”, 了解矢量网络分析仪的原理和使用方法。

实验内容 2. 用矢量网络分析仪分别测量如图 1-2 微带开路传输线模块的反射特性, 并引入电阻、电容和电感负载测量并分析在不同负载情况下的反射特性。

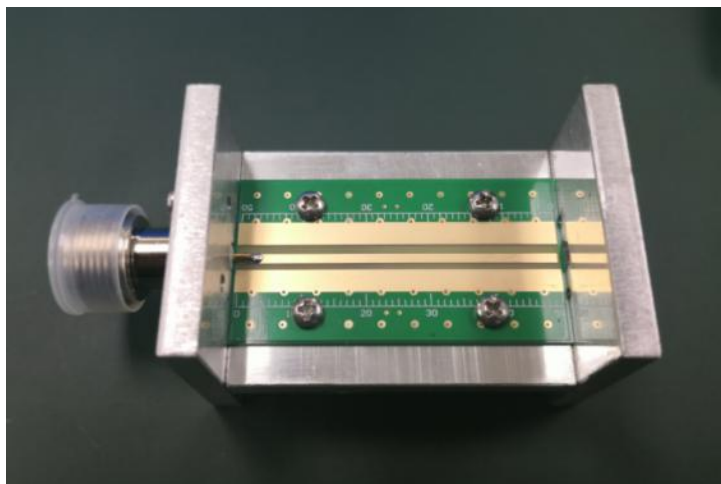


图 1-2

其中微带电路参数如下：

- (1) 工作频率 2.5GHz；(2) 特性阻抗 50 欧姆；(3) 传输线 $1/2$ 波长；
- (4) 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；

实验步骤：

1) 开机

打开网络分析仪电源，系统开机后需要先预热几分钟，等待仪器内器件稳定再开始测量。观察仪器面板和测量界面（参见附 2.矢量网络分析仪操作说明的第四章快速操作入门）。

2) 选择测量内容

仪器完成预热后先选择测量内容。一般先进行 S 参数测量。按【测量】键，根据测试的内容选择显示面板右侧的按键，如按下[S11]软按键即测量反射，[S21]软按键即测量传输。

3) 选择测量格式

按【格式】键，可选择测量结果显示的格式，如对数幅度，史密斯圆图等。（注意：只有在反射测量的情况下才能显示史密斯圆图）

4) 设置频率范围

矢量网络分析仪扫频工作，默认最大扫描频率范围工作，如 AV36580 是 300KHz 扫描到 3GHz。但是在具体测量的过程中，需要设置频率扫描的范围，以便观察和得到更高精度的数据。

以微带传输线模块测量为例，考虑到微带线设计的工作频率为 2.5GHz，所以扫描频率可暂定为 2.3GHz - 2.7GHz，在测量过程中也可进一步调节频率范围。

按【起始】键，然后用数字键和旁边的单位键输入测量的起始频率。此时测量界面下方显示的起始频率变为设置值。

按【终止】键，然后用数字键和旁边的单位键输入测量的终止频率。此时测量界面下方显示的终止频率变为设置值。

5) 校准

测量校准是通过测量特性已知的标准来确定系统误差,然后在进行被测件测量时去除这些系统误差影响的过程,通过校准可减小测量误差,提高分析仪的测量精度。

一般情况下系统默认校准参数,为了测量更准确,每次测量之前需要连接好射频电缆线,然后校准。

以微带传输线反射测量为例来校准。

连接射频好电缆线之后,按【校准】键,出现多个校准选项,因为反射测量只需要用到矢网单个端口,为方便起见,可选择[机械校准]软按键,然后再选择[单端口(反射)]。

此时显示面板右侧出现[开路器]、[短路器]和[负载],需要用配套的校准件,依次接上开路器、短路器和匹配负载,每接完一个校准件,就按下显示面板上相应选项右侧的软按键,显示选项下会出现下划线,如[开路器],则表示按键有效。

最后按[完成单端口]软按键即完成校准,此时如果匹配负载校准件还未移除,可看到如图显示测试界面,表示此时为史密斯圆图的匹配状态。



图 1-3

6) 测量微带传输线电路模块

在射频电缆线端接入微带开路传输线模块。然后按【光标】键打开光标,可看到类似如图 1-4 的 Smith 曲线。旋转旋钮光标会沿着扫描曲线移动,同时可观察右上角的测试数据。



图 1-4

注意：由于校准件是 N 接头，而很多微带传电路或模块采用的是 SMA 接头，所以校准完成后需要接上 N 转 SMA 转接头才能连接电路，该转接头引起的误差无法消除，此时测量曲线参数会有所偏移。

7) 其他负载测量

参见图 1-5，以 51 欧姆电阻负载为例。用防静电镊子夹取一个 51 欧姆阻值 0805 或 1206 封装的贴片电阻，放置在测量模块的微带传输线末端，将电阻两端管脚分别架在传输线的开路端和覆铜接地端上，然后用镊子向下压紧使接触充分有效，观察此时网络分析仪测试窗口曲线的变化即为传输线负载端接入 51 欧姆电阻的情况。利用光标可观察各个频率上的反射情况。

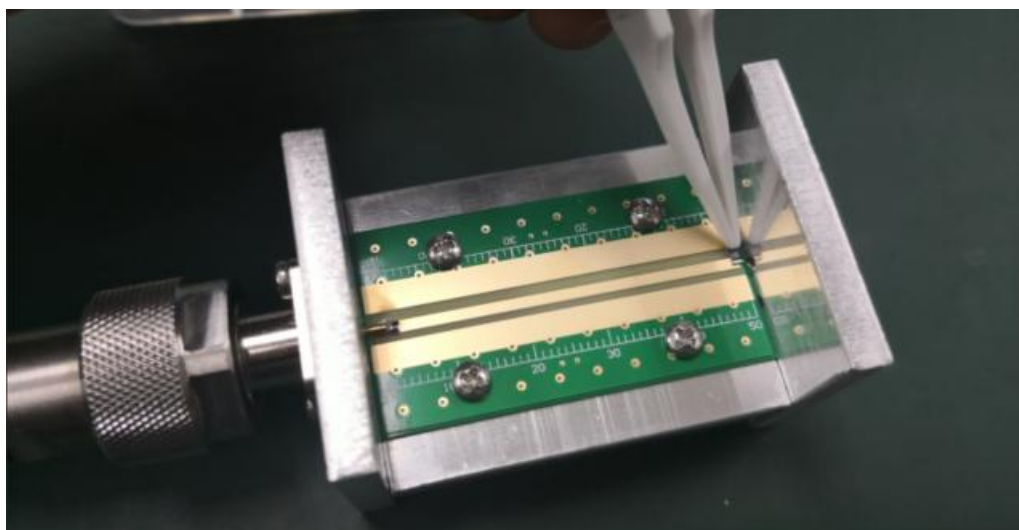


图 1-5

其他负载以此类推。

实验中可测量传输线开路或短路（0 欧）、匹配（49.9/51 欧）电阻、1PF 电容、3.3nH 电感等负载的反射特性曲线。

试计算微带线负载端接不同负载情况下，工作频率在 2.3GHz- 2.7GHz，步进 100MHz 时反射系数，与实验测试值对比。

8) 天线测量

天线通常用网络分析仪来测试驻波比、相位等特性，用以判断该天线在工作频段的匹配情况。本实验中，天线也可以看做一复阻抗负载，测量方法和上述负载类似。但由于实验中的短天线为 SMA 接口，测量需要在微带线上焊接转换头来连接，为方便起见将该天线直接转接在网络分析仪端口处测量，参见图 1-6。因为此时没有用射频电缆线，所以需要网络分析仪端口处重新进行校准操作。



图 1-6

9) 鼓励实验

根据前面提供的微带设计参数，用 ADS 软件仿真传输线在相应负载下的反射曲线，并和实验值对比分析（参见附 1. 微带传输线负载特性 ADS 仿真）。

10) 微带滤波器测量

微带滤波器原理：

滤波器是体现网络特性的最好部件。本实验中以测量平行耦合线带通滤波器网络特性为例来熟悉网络参量测量。

平行耦合线带通滤波器在微带结构中得到极为广泛的应用，其结构紧凑，适合用平面工艺制作，寄生通带的中心频率比较高，并且在按照综合设计得到所要求的原型滤波器参量时，有较大的结构灵活性。其结构如图 1-7。

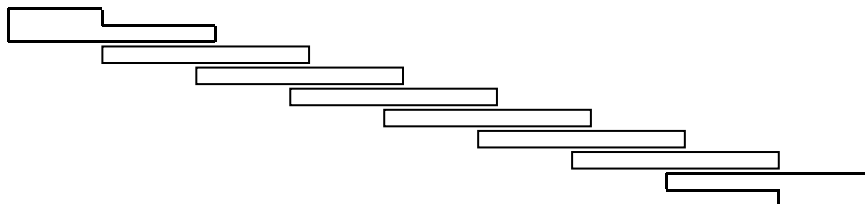


图 1-7

两端开路的半波长微带线构成的谐振器相当于一 LC 回路，平行耦合线带通滤波器谐振器之间的耦合是通过微带线的边缘场进行，它可用多级耦合谐振器等效。耦合的多个 LC 回路具有带通特性。

由于滤波器元件的损耗对滤波性能影响较大，而作为滤波元件的耦合线段，实际上相当于一半波偶极子天线附加反射板（即接地板），故除了导体与介质损耗外，其辐射损耗对元件 Q 值下降影响也较大。在实际应用中为了改善性能，往往需要对滤波器外加屏蔽盒。

滤波器设计已有成熟理论，平行耦合线带通滤波器设计方法可参阅《射频电路与系统设计》。滤波器的最终性能可用网络分析仪进行测量，见图 1-8。

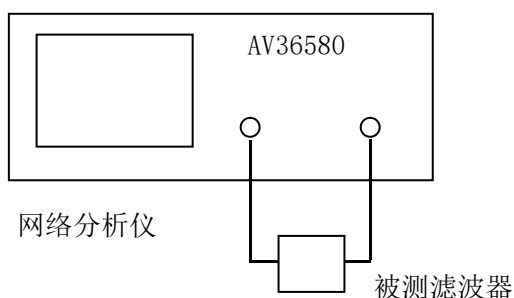


图 1-8

微带滤波器测量实验步骤：

平行耦合线带通滤波器通常需要观察传输（ S_{21} 曲线）和反射（ S_{11} 曲线）特性，其中测试反射特性步骤基本和前相同。

在测量传输特性时，需要先按【测量】键，选择[S21]软按键测量传输特性。然后将网络分析仪两个端口都接上射频电缆和 N 型-SMA 转接头，并用一个直通接头将两条电缆线联通起来，然后按【校准】，选择【机械校准】->【直通响应】->【前向直通】进行直通的校准，校准成功之后，观察 S_{21} 曲线应该是 0dB 的一条直线。此时可换上滤波器测试参数。

记录测量的结果

中心频率： $f_0 =$

3dB 带宽： $\Delta = f_2 - f_1 =$

插入损耗：通带中心衰减，以 dB 计

带内纹波：在通带内（曲线平顶部分）的幅度波动，以 dB 计

阻带衰减：在中心频率 $\pm 300\text{MHz}$ ，以 dB 计

记录 S 参数与 ω 功率与相位关系曲线：

$$\begin{cases} |S_{11}| \sim \omega \\ (\arg S_{11}) \sim \omega \end{cases} \quad \begin{cases} |S_{21}| \sim \omega \\ (\arg S_{21}) \sim \omega \end{cases}$$

用手指或金属片作为外界干扰，观察滤波器特性曲线、驻波比特性和史密斯圆图上的输入阻抗的变化。

在反射测量下，分别观察滤波器驻波比特性和史密斯圆图上的输入阻抗、反射系数的映象。

1.5 实验报告内容要求

1. 记录测试数值，测试曲线可拍照贴图。
 - 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。
2. 思考题：
 - 1) 什么是 S 参数？
 - 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？
 - 3) 如何测量转接头对测试曲线的影响。
 - 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。
3. 实验的收获与体会。
4. 实验的建议与意见。

注：实验报告需每位同学独立完成，不能雷同。

说明：在文中网络分析仪前面板输入的硬键和软键的描述形式为：硬键即前面板按键，由键名加【】来描述，如【校准】；软按键为 8 个空白键，列在矢量网络分析仪对应的屏幕边上，文中用这些键的键名加[]来描述，如[机械校准]。