

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. 理解传输线的基本特性，掌握微带传输线的结构与工作特点。
2. 熟悉微波网络参量的测量方法，掌握矢量网络分析仪的基本操作流程与使用技巧。

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，另一端接负载，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：

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

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

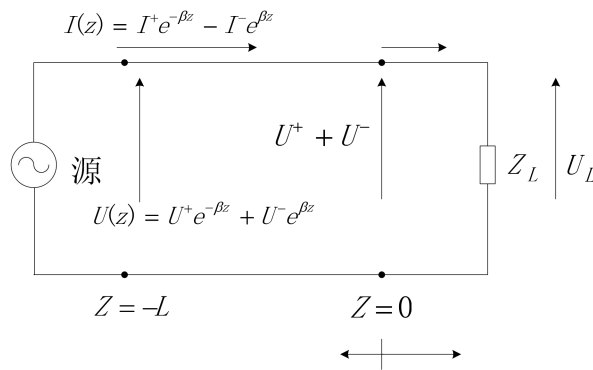


图 1-1

1、负载端（ $z = 0$ ）特性分析

负载端的电压、电流分别为

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

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

由传输线特性阻抗定义 $Z_0 I^+ = U^+$ ， $Z_0 I^- = U^-$ ，可得

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

因此负载阻抗为

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

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

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

根据反射系数的模值，传输线可分为三种工作状态：

- 匹配状态（行波）： $Z_L = Z_0$ 或传输线无限长时， $|\Gamma_L| = 0$ ，无反射波；
- 驻波状态（全反射）： Z_L 为纯电抗元件、开路或短路时， $|\Gamma_L| = 1$ ，入射波与反射波叠加形成驻波；
- 行驻波状态：其余负载情况下， $0 < |\Gamma_L| < 1$ ，传输线上同时存在行波与驻波。

线上任意点的反射系数为

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

为表征反射特性，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（ $z = -L$ ）特性分析

传输线输入端（距负载 L 处）的反射系数为：

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

输入阻抗表达式为

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

由输入阻抗公式可得三个重要结论：

- （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 1 台
2. 微带电路模块 1 套
3. 射频校准件（开路器、短路器、匹配负载） 1 套
4. 射频电缆线、N-SMA 转接头 若干
5. 贴片元器件（电阻、电容、电感） 若干
6. 防静电镊子 1 把

1.4. 实验内容与步骤

本实验以工作频率 2.5GHz、特性阻抗 $50\ \Omega$ 的半波长微带传输线、微带滤波器等为研究对象，测量其开路及接不同负载时的反射特性，同时完成天线驻波比测量和微带滤波器网络参量测量，并可通过 ADS 软件仿真对比实验结果。

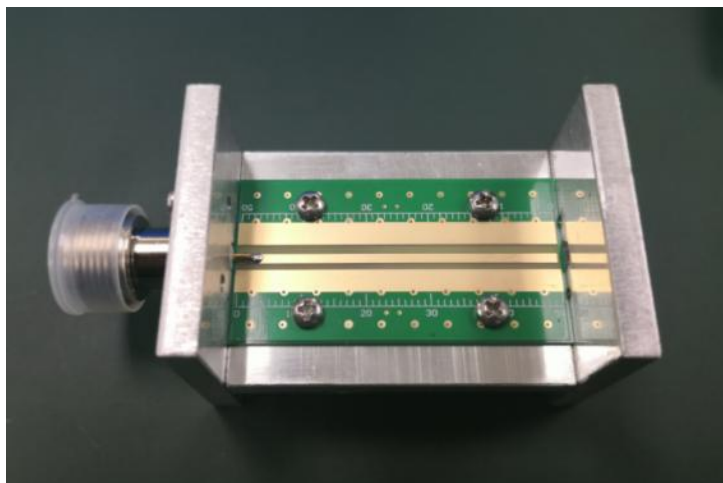


图 1-2

其中微带传输线电路参数如下：

- (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；

1) 矢量网络分析仪基础认知

查阅《矢量网络分析仪操作说明》，熟悉仪器的面板布局、按键功能、测量界面及基本工作原理。

2) 仪器开机预热

打开矢量网络分析仪电源，预热数分钟，待仪器内部器件工作稳定后，再进行后续测量操作，同时观察仪器面板及测量界面的显示状态。

3) 测量参数设置

- (1) 选择测量内容：按仪器前面板【测量】硬键，根据测试需求选择屏幕右侧软按键，[S11]为反射特性测量，[S21]为传输特性测量，本实验先选择[S11]。
- (2) 选择测量格式：按前面板【格式】硬键，可选择对数幅度、史密斯圆图等显示格式（仅反射测量可选择史密斯圆图）。
- (3) 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 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。

按前面板【起始】硬键，通过数字键 + 单位键输入起始频率；按【终止】硬键，以相同方式输入终止频率，观察界面下方频率参数的更新状态。

4) 单端口反射校准

校准的目的是消除系统误差，提高测量精度。一般情况下系统默认校准参数，为了测量更准确，每次测量之前都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，反射测量需完成单端口校准，步骤如下：

1、连接好射频电缆线，按前面板【校准】硬键，选择屏幕右侧[机械校准]软按键，再选择[单端口（反射）]；

2、依次将配套校准件（开路器、短路器、匹配负载）接至射频电缆末端，每接好一个校准件，按下屏幕对应[开路器][短路器][负载]软按键（按键出现下划线表示操作有效）；

3、全部校准件测量完成后，按[完成单端口]软按键，完成校准。若未移除匹配负载，仪器史密斯圆图界面应显示匹配状态。（如果图形界面上没有光标，可按前面板【光标】硬键）



图 1-3

5) 微带传输线反射特性测量

1、在射频电缆末端接入微带开路传输线模块；

2、按前面板【光标】硬键打开光标，观察史密斯圆图上的 S11 曲线（图 1-4），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；（仪器支持设置多个光标同时测量多个频率点的数据）

3、更换不同负载，重复上述测量步骤：用防静电镊子夹取贴片元器件（50 Ω 匹配电阻、0 Ω 短路电阻、1pF 电容、3.3nH 电感等），将元器件管脚分别搭接在微带线开路端和覆铜接地端，压紧保证接触良好，观察并记录不同负载下的反射特性曲线及关键频率点（2.3GHz、2.4GHz、2.5GHz、2.6GHz、2.7GHz）的测量数据。



图 1-4

注意：由于校准件是 N 接头，而很多微带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转。

参见图 1-5，以 $50\ \Omega$ 电阻负载为例。用防静电镊子夹取一个接近 $50\ \Omega$ 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 S11 曲线的变化，即为传输线负载端接入匹配电阻的情况。

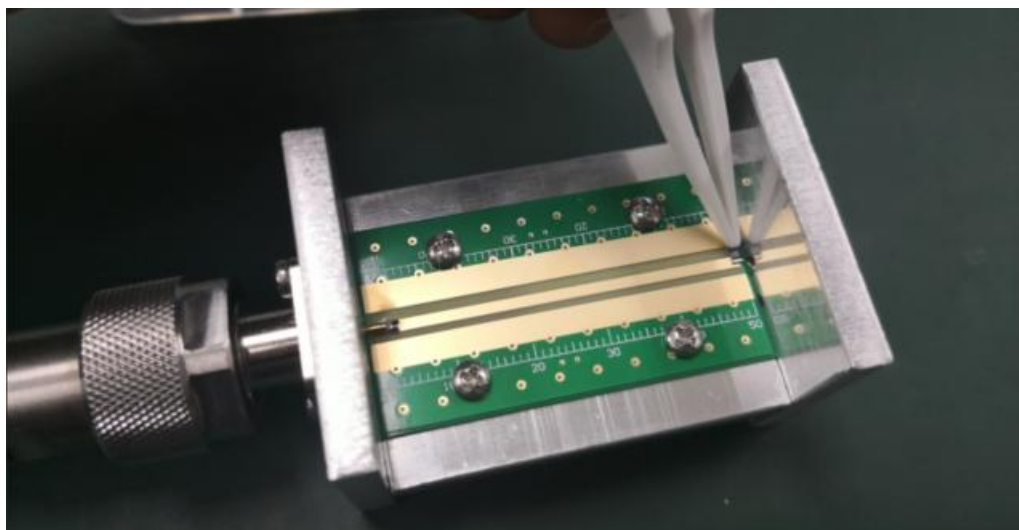


图 1-5

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（ $49.9/51\ \Omega$ ）电阻、1PF 电容、3.3nH 电感等负载的反射特性曲线。

试分析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 时的反射系数或阻抗变化，与实验测试值对比。

6) 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，将天线视为复阻抗负载，测量其驻波比特性，步骤如下：

1、由于天线是通过 SMA-N 转接头直接接在矢量网络分析仪端口测量，所以先移除原有射频电缆，对仪器端口重新进行单端口反射校准，此时的起始和终止频率可分别设置为 1GHz 和 3GHz；

2、将天线通过转接头接至仪器校准后的端口（图 1-6），选择 S11 线性格式或驻波比显示格式，观察并记录天线的反射特性曲线。移动光标找到反射系数最小的位置，观察该区间的天线特性。



图 1-6

7) 鼓励实验：ADS 软件仿真对比

根据实验提供的微带线设计参数，利用 ADS 软件建立微带传输线仿真模型，仿真开路及接不同负载时的反射特性曲线，将仿真结果与实验测量结果对比，分析误差来源。（参见附 1. 微带传输线负载特性 ADS 仿真）。

8) 微带滤波器网络参量测量

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。

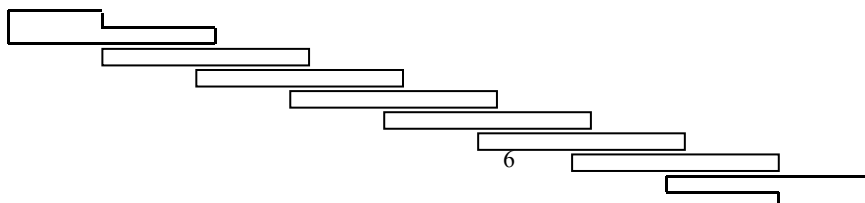


图 1-7

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。

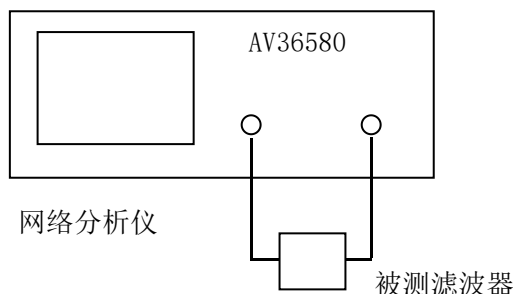


图 1-8

本实验以平行耦合线带通滤波器为研究对象，测量其反射(S11)和传输(S21)特性，理解滤波器的带通工作原理，步骤如下：

1、传输特性测量校准：按【测量】硬键选择[S21]传输测量；将射频电缆分别接仪器两个端口，各接 N-SMA 转接头后用直通接头联通，按【校准】硬键→[机械校准]→[直通响应]→[前向直通]完成校准，校准后 S21 曲线应为 0dB 直线；

2、滤波器特性测量：移除直通接头，将滤波器接至两个端口的转接头之间，观察并记录 S21（传输）特性曲线，提取关键参数。

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：通带中心频率处的衰减值（dB）

带内纹波：通带内幅度的最大波动值（dB）

阻带衰减：中心频率偏移 300MHz 处的衰减值（dB）

记录 S 参数、相位的频率关系曲线：

$$\begin{cases} |S_{21}| \sim f \\ (\arg S_{21}) \sim f \end{cases}$$

3、外界干扰影响测试：用手指或金属片靠近滤波器，观察其 S11、S21 曲线，

以及驻波比、史密斯圆图中输入阻抗的变化规律；

4、反射特性分析：切换至[S11]反射测量，取下滤波器，先进行单端口校准，再接回滤波器，观察滤波器端口的反射特性，以及史密斯圆图中输入阻抗、反射系数的映射关系。

1.5 实验报告内容要求

实验报告需**独立完成，严禁雷同**，内容包含以下部分：

1. 实验数据与曲线记录

如实记录各测量环节的关键数据（不同负载、天线、滤波器的频率-反射系数/驻波比/插入损耗等），将测量曲线拍照后贴入报告，标注清晰测试条件。

2. 实验结果分析

（1）对比微带传输线接不同负载（开路、短路、电阻、电容、电感）时的反射特性曲线，分析各负载下传输线的工作状态，结合理论公式计算关键频率点的阻抗、反射系数，对比理论值与实验值的异同并分析误差来源；

（2）分析天线在 2.3GHz~2.7GHz 频段的驻波比特性，判断天线在该频段的匹配效果；

（3）根据微带滤波器的测量参数（中心频率、3dB 带宽、插入损耗等），分析其滤波性能，评价滤波器的设计优劣。

3. 思考题解答

（1）简述 S 参数的定义及物理意义，说明 S11、S21 的含义；

（2）若不进行校准，直接接入射频电缆和电路模块测量，会对结果产生什么影响？请分析原因；

（3）设计实验方案，测量 N-SMA 转接头对测试曲线的影响；

（4）根据实验给出的微带线设计参数，计算 50Ω 半波长微带线的宽度和长度。

4. 实验收获与体会

总结实验过程中掌握的知识点、仪器操作技巧，阐述对传输线特性、微波网络测量的理解，反思实验中遇到的问题及解决方法。

5. 实验建议与意见

对实验设备、实验步骤、实验内容设计等方面提出合理的改进建议或意见。

说明：

本文中矢量网络分析仪的操作按键描述规则：

硬键：仪器前面板实体按键，以【键名】表示，如【校准】【测量】；

软按键：仪器屏幕右侧的功能按键，以[键名]表示，如[机械校准][单端口（反射）]。