

# 微波技术基础实验指导书

郭伟 陈柯 编

华中科技大学电信系

# 前 言

与更早时期定位在波导与场论相比,现代微波工程中占支配地位的内容是分布电路分析。当今大多数微波工程师从事平面结构元件和集成电路设计,无需直接求助于电磁场分析。当今微波工程师所使用的基本工具是微波 CAD (计算机辅助设计) 软件和网络分析仪,而微波技术的教学必须对此给出回应,把重点转移到网络分析、平面电路和元器件以及有源电路设计方面。微波技术仍总离不开电磁学(许多较为复杂的 CAD 软件包要使用严格的电磁场理论求解),而学生仍将从揭示事物的本质中受益(诸如波导模式和通过小孔耦合),但是把重点改变到微波电路分析和设计上这一点是不容置疑的。

微波与射频(RF)技术已蔓延到了各个方面。在商业等领域,更是如此,其现代应用包括蜂窝电话、个人通信系统、无线局域数据网、车载毫米波防撞雷达、用于广播和电视的直播卫星、全球定位系统(GPS)、射频识别标识(identification tagging)、超宽频带无线通信和雷达系统以及微波环境遥感系统。防卫系统继续大量地依靠微波技术用于无源和有源测向、通信以及武器操控系统。这样的业务发展态势意味着,在可预见的将来,在射频和微波工程方面不存在缺少挑战性的课题;同时对于工程师们,显然需要领悟微波技术的基本原理,同样需要把这些知识应用于实际感兴趣问题的创造能力。

本微波技术基础教学实验的设置,就是为了使使学生通过实验更多地获得有关微波器件的基本构成、工作原理、模拟分析、测试仪器和测量技能方面的理性和感性认识,真正掌握时域和频域、传输线、微波电路等基本的概念,并学会使用重要的微波测试仪器。

# 实验一 矢量网络分析仪的使用及传输线的测量

## 一 实验目的

1. 学习矢量网络分析仪的基本工作原理；
2. 初步掌握 AV3620 矢量网络分析仪的操作使用方法；
3. 掌握使用矢量网络分析仪测量微带传输线不同工作状态下的 S 参数；
4. 通过测量认知 1/4 波长传输线阻抗变换特性。

## 二 实验原理

### 1. 矢量网络分析仪的工作原理

现代微波工程中占支配地位的是应用网络分析方法将微波电路看作是微波网络，用散射参数（S 参数）来描述微波电路的性能。S 参数表达的是功率波，是用入射功率波和反射功率波的方式定义微波网络的输入输出关系，因此两端口网络 S 参数的测量需要涉及功率波在两个端口的反射和传输。而现代微波工程中测量微波电路 S 参数最常用的设备就是矢量网络分析仪，它是一种可以测量微波信号幅度和相位的仪器。

通过测量 S 参数，矢量网络分析仪可测得微波电路和器件的反射特性和传输特性，其主要组成部分包括合成信号源、S 参数测试装置、幅相接收机和显示部分。

矢量网络分析仪的信号源产生一测试信号，当测试信号通过待测件时，一部分信号被反射，另一部分则被传输。图 1-1 说明了测试信号通过待测器件（DUT）后的响应。

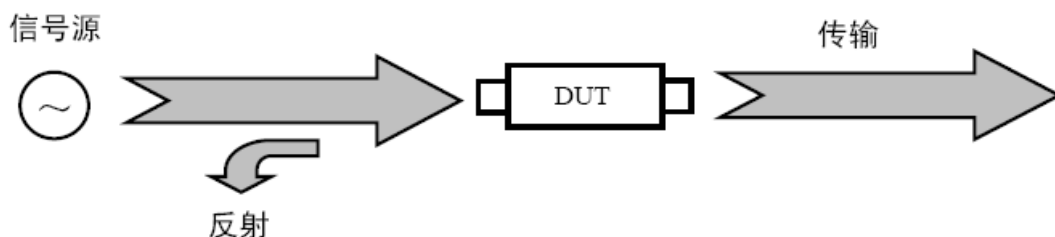


图 1-1 DUT 对信号的响应

以我们现在使用的 AV3620 矢量网络分析仪为例,其原理框图如图 1-2 所示:合成信号源产生 30k~3GHz 的信号,此信号与幅相接收机中心频率实现同步扫描;S 参数测试装置用于分离被测件的入射信号 R、反射信号 A 和传输信号 B;幅相接收机将射频信号转换成频率固定的中频信号,为了真实测量出被测网络的幅度特性、相位特性,要求在频率变换过程中,被测信号幅度信息和相位信息都不能丢失,因此必须采用系统锁相技术;显示部分将测量结果以各种形式显示出来。

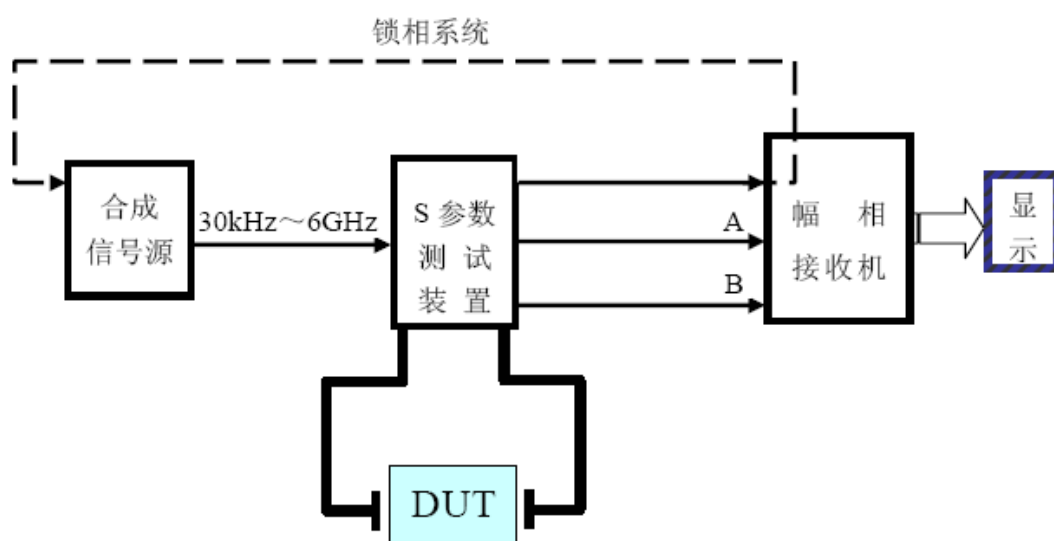


图 1-2 AV3620 型矢网整机原理框图

AV3620 矢网的工作原理如下,由内置合成信号源产生 30k~3GHz 的信号,经过 S 参数测试装置分成两路,一路作为参考信号 R,另一路作为激励信号,激励信号经过被测件后产生反射信号 A 和传输信号 B,由 S 参数测试装置进行分离,R、A、B 三路射频信号在幅相接收机中进行下变频,产生 4kHz 的中频信号,由于采用系统锁相技术,合成扫频信号源和锁相接收机同在一个锁相环路中,共用同一时基,因此被测网络的幅度信息和相位信息包含在 4kHz 的中频信号中,此中频信号经 A/D 变换器转换为数字信号,嵌入式计算机和数字信号处理器(DSP)从数字信号中提取被测网络的幅度信息和相位信息,通过比值运算求出被测网络的 S 参数,最后把测试结果以图形或数据的形式显示在液晶屏幕上。

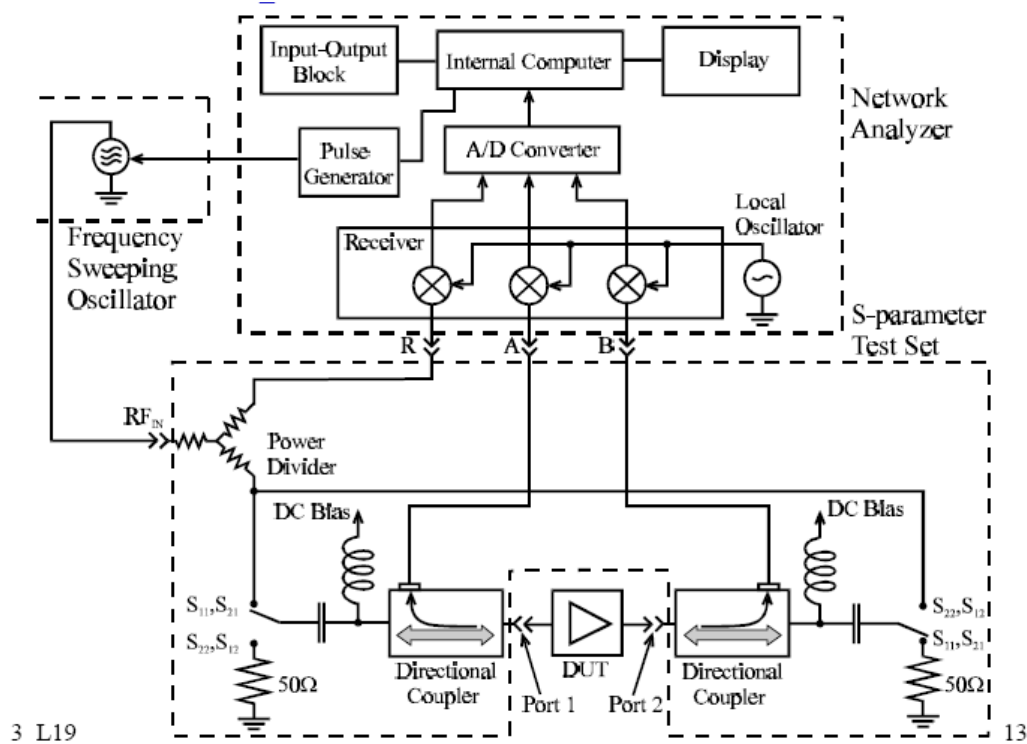


图 1-3 AV3620 型矢网整机内部结构框图

- ◆ 合成信号源：由 30k~3GHz YI-G 振荡器、3.8GHz 介质振荡器、源模块组件、时钟参考和小数环组成。
- ◆ 测试装置：由定向耦合器和开关构成，用于分离反射信号和入射信号。
- ◆ 接收机：由取样/混频器、中频处理和数字信号处理等部分组成，用于信号的下变频及中频数字信号处理。
- ◆ 显示：由图形处理器、高亮度 LCD 显示器、逆变器组成，用于字符和图形的高亮度、高速显示。

## 2. AV3620 矢量网络分析仪简介

### 2.1 结构特征

我们实验使用的是四十一所生产的一体化矢量网络分析仪 AV3620, 本节将介绍 AV3620 的前面板和后面板的基本按键与接口的设置说明。

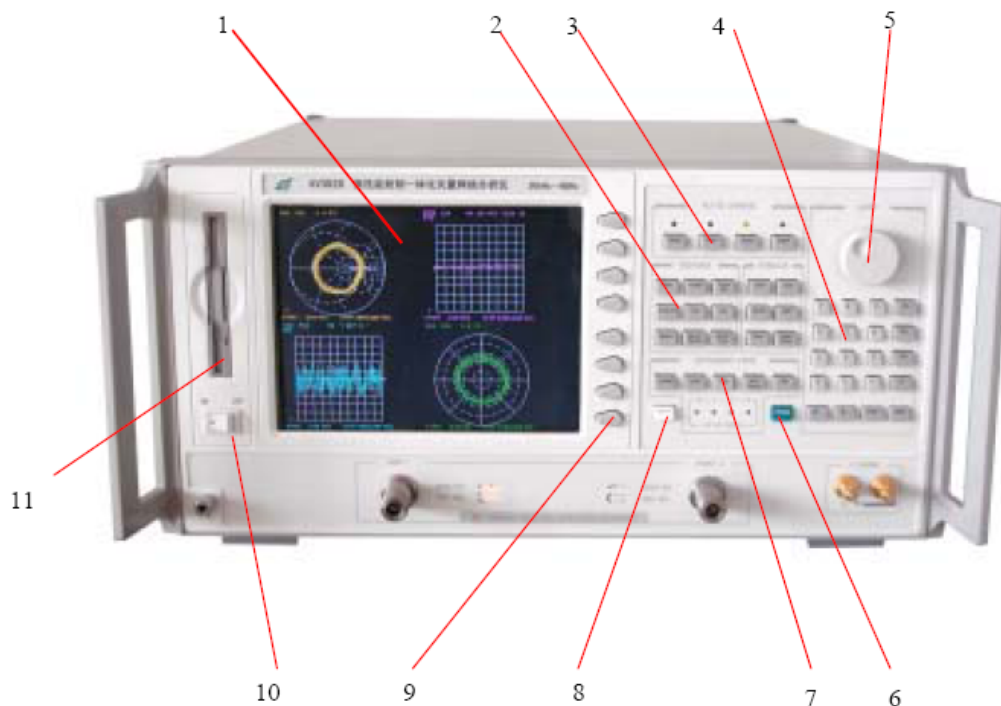


图 1-4 AV3620 矢网前面板图

## 1. 前面板

### a) LCD 液晶显示器 (1)

AV3620 采用高亮度、8.4 英寸 LCD 显示器，能迅速、清晰地显示测量曲线、数据、光标、极限线、软键菜单等。

### b) 硬键 (2)

硬键即前面板按键，在文本中这些键由键名加【 】来描述。如【Preset】

### c) 通道键 (3)

该键区共有四个显示通道按键，可以通过分别按下这四个键来选择显示通道。

### d) 数字小键盘 (4)

数字小键盘可以用来键入具体数值，在结束数字输入时可使用输入键或软键给数字选择适当的单位，同时也可使用前面板旋钮来调节参数值，或用“↑”“↓”步进键来逐步地改变参数值。

### e) 旋钮键 (5)

该旋钮为旋转脉冲发生器，通过旋转该旋钮可以改变设置的参数。

### f) 复位键 (6)

按下此键将使网络仪复位到工厂复位状态或已改动并存储过的用户复位状态。

#### g) 仪器状态键区 (7)

仪器状态键区共有五个按键，分别是 System、Local、Copy、Save/Recall、Seq，能设定整机系统功能，包括仪器功能预置、保存/调用、硬拷贝输出等等。

#### h) 返回键 (8)

按下该键将返回上一级命令菜单。

#### i) 软键 (9)

软键为 8 个空白键，列在网络仪相对应的屏幕边上。在本文中，这些键用键名加[ ]来描述。 如：[SWEEP TIME] 。

#### j) 电源开关 (10)

#### k) 软盘驱动器 (11)

## 2 后面板

图 1-4 提供了后面板的外形图，后面板主要提供外围接口功能。

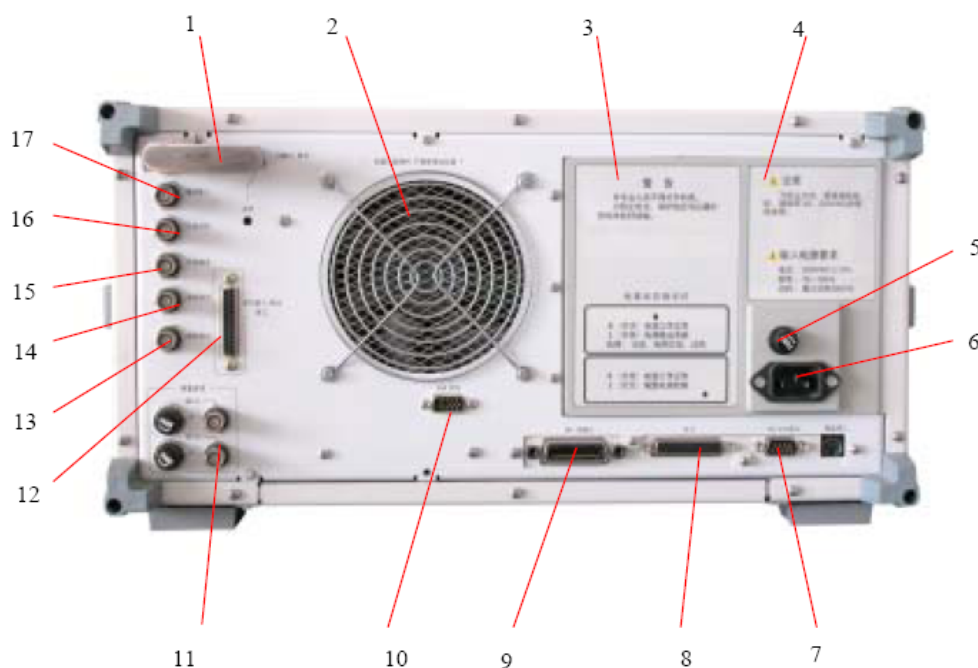


图 1-5 AV3620 矢网前后板图

## 2.2 性能指标

本节主要介绍 AV3620 的性能指标及技术参数。

### 1 频率特性

|     |  |             |
|-----|--|-------------|
| 范 围 | AV3620A  | 30 kHz~3GHz |
| 准确度 | $\pm 0.5\text{ppm}(25 \pm 5^{\circ} \text{C})$ |             |

## 2 源功率

|        |                    |
|--------|--------------------|
| 功率范围   | -85~+8 dBm         |
| 功率扫描范围 | 23dB               |
| 功率准确度  | $\pm 1.0\text{dB}$ |

## 3 测试端口平均噪声电平

| 频率范围            | 中频带宽 | 平均噪声电平                |
|-----------------|------|-----------------------|
| 300kHz ~ 3.0GHz | 3kHz | $\leq -82\text{dBm}$  |
| 300kHz ~ 3.0GHz | 10Hz | $\leq -102\text{dBm}$ |
| 3.0GHz ~ 6.0GHz | 10Hz | $\leq -97\text{dBm}$  |
| 3.0GHz ~ 6.0GHz | 3kHz | $\leq -77\text{dBm}$  |

## 4 接收机损毁电平： 26dBm 或 30VDC

## 5 全二端口校准后动态范围

| 频率范围 | 30~16MHz | 16MHz~3GHz | 3GHz~6GHz |
|------|----------|------------|-----------|
| 动态范围 | 90dB     | 100dB      | 95dB      |

## 6 全二端口校准后系统指标

| 频率范围   | 30kHz~300kHz        | 300kHz~1.3GHz       | 1.3GHz~3GHz         | 3~6GHz              |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 有效方向性  | 50dB                | 50dB                | 47dB                | 40dB                |
| 有效源匹配  | 45dB                | 42dB                | 36dB                | 31dB                |
| 有效负载匹配 | 50dB                | 50dB                | 47dB                | 40dB                |
| 传输跟踪   | $\pm 0.03\text{dB}$ | $\pm 0.05\text{dB}$ | $\pm 0.07\text{dB}$ | $\pm 0.10\text{dB}$ |
| 反射跟踪   | $\pm 0.03\text{dB}$ | $\pm 0.05\text{dB}$ | $\pm 0.07\text{dB}$ | $\pm 0.10\text{dB}$ |



## 7 显示分辨率

|          |               |
|----------|---------------|
| 显示幅度分辨率  | 0.001dB / div |
| 显示相位分辨率  | 10m° / div    |
| 显示群延时分辨率 | 0.01ps / div  |

## 8 显示幅度范围和显示相位范围

|          |          |
|----------|----------|
| 最大显示幅度范围 | ± 500 dB |
| 最大显示相位范围 | ± 180 °  |

## 9 测量域

AV3620射频一体化矢量网络分析仪可在两种域内进行测量：频域和时域。

## 10 测量格式

AV3620射频一体化矢量网络分析仪有下列测量格式：

- a) 笛卡尔坐标：对数幅度、线性幅度、相位、群延迟、驻波比、复数参数实部和虚部。
- b) 史密斯圆图：对数幅度、线性幅度、阻抗  $R+jX$  或导纳  $G+jB$  。
- c) 极坐标： 对数幅度、线性幅度、相位、实部和虚部。

## 11 显示通道和参数

AV3620 射频一体化矢量网络分析仪有四个可供选择的通道：通道 1、通道 2、通道 3 和通道 4，四个通道可同时显示，既可叠加显示，也可分开显示。每一个通道可独立显示 S11、S21、S12 和 S22 四个基本 S 参数。

## 12 测量点数

AV3620 射频一体化矢量网络分析仪每次扫频的测量点数有 10 种选择：3、11、21、26、51、101、201、401、801 和 1601 个点。在频率列表方式下，测量点数在 1 到 1601 点内任意选择。

## 13 扫描模式

AV3620 射频一体化矢量网络分析仪有五种扫描模式:

- a) LIN FREQ 线性频率模式;
- b) LOG FREQ 对数频率模式;
- c) LIST FREQ 频率列表模式;
- d) POWER SWEEP 功率扫描模式;
- e) CW TIME 点频时间模式。

## 14 平均因子

平均因子范围: 1 ~ 999 。

## 15 平滑度

平滑度为测量曲线宽度的 0.05% 到 20% 。

## 2.3 常用操作说明

- 1) 当 AV3620 开机后, 显示屏默认以直角坐标的方式显示, 纵轴的参数为所测量的 S 参数, 横轴的参数为频率, 默认频率范围为最大频率量程 30k~3GHz。按下【start】键可以设置扫频的起始频率, 按下后, 显示屏左上方会显示当前起始频率, 要改变的话通过按数字键加上相应的单位键【G/n】、【M/n】、【k/n】来设置频率, 上面三个单位键分别对应 GHz、MHz、kHz。类似, 按【stop】键设置扫频的终止频率, 设置方法与起始频率相同。
- 2) 按【power】键设置矢网合成源的功率大小, 按下后, 显示屏右上方会显示当前功率大小, 如果要改变的话, 按数字键加上【×1】键设置功率大小, 单位是 dBm。注意, 由于功率一般设置为 0dBm 以下, 所有在数字键前记得按【-】键设置功率 dBm 数为负数。
- 3) 【measure】键选择测量参数, 按下后显示屏的软键菜单会显示[S<sub>11</sub>]、[S<sub>12</sub>]、[S<sub>21</sub>]、[S<sub>22</sub>]四个待选测试参数, 通过按下相应软键来选择要测量的S参数。
- 4) 【format】键选择参数显示格式, 按下后显示屏的软键菜单会显示[LOG MAG]、[PHASE]、[DELAY]、[SMITH CHART]、[POLAR]、[LIN MAG]、[SWR] , 分别表示以对数幅度、相位、群延迟、史密斯圆图、极坐标、线性

幅度、驻波比的形式显示测量参数，通过按下相应软键来选择要显示的测量格式。

- 5) 按下【marker】键就会在显示屏上的测试曲线上显示光标，对应显示屏的软键菜单处会显示光标编号[1]、[2]、[3]、[4]、[5]，按下相应软键会显示对应编号的光标，默认会显示 1 号光标。通过旋转旋钮键就会移动光标的位置，而在显示屏右上角会显示光标对应位置的频率和测量值。而通过数字键输入频率值也可以确定光标的位置。

### 3. 微带传输线的基本结构

微带传输线目前是混合微波集成电路和单片微波集成电路使用最多的一种微波平面型传输线。它可用作光刻程序制作，且容易与其它无源微波电路和有源微波电路器件集成，实现微波部件和系统的集成化。

微带线可以看作是由双导线传输线演变而成的，如图 2—1 所示。实际的微带线结构如图 2—2 所示。导体带（其宽度为  $w$ ，厚度为  $t$ ）和接地板均由导电良好的金属材料（如银，铜，金）构成，导体带与接地板之间填充以介质基片，导体带与接地板的间距为  $h$ 。

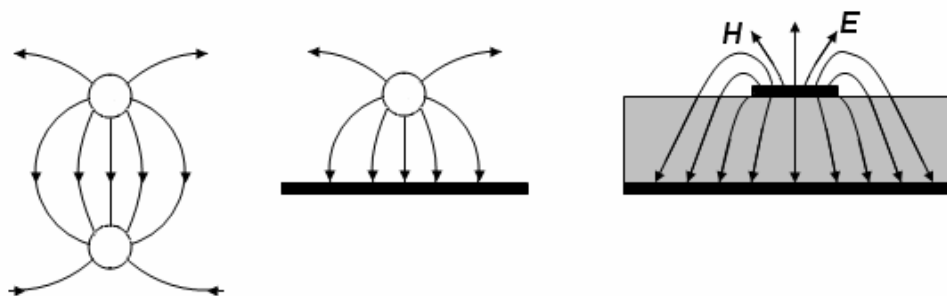


图 1-6 双导线演变成微带线

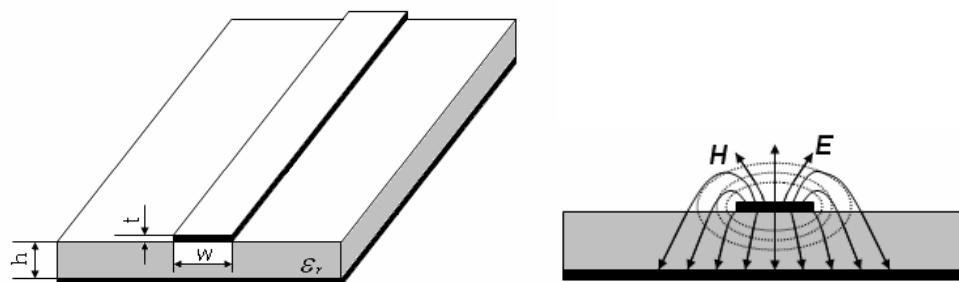


图 1-7 微带线的结构及其场分布

## 4. 微带传输线的参数

### 4.1 特性阻抗

若微带线是被一种相对介电常数为  $\epsilon_r$  的均匀介质所完全包围着，并把准 TEM 模当作纯 TEM 模看待，并设  $L$  和  $C$  分别为微带线单位长度上的电感和电容，则特性阻抗为

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{v_p C}$$

相速  $v_p$  为

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

但实际上的微带线是含有介质和空气的混合介质系统，因此不能直接套用上面的公式求特性阻抗。为了求出实际的微带线的特性阻抗  $Z_c$  和相速度  $v_p$ ，而引入了等效相对介电常数的概念。如果微带线的结构现状和尺寸不变，当它被单一的空气介质所包围着时，其分布电容为  $C_0$ 。实际微带线是由空气和相对介电常数为  $\epsilon_r$  的介质所填充，它的电容为  $C_1$ ，那么，等效相对介电常数  $\epsilon_{re}$  的定义为

$$\epsilon_{re} = \frac{C_1}{C_0}$$

这样，实际微带线的特性阻抗即可表示为

$$Z_c = \frac{Z_c^0}{\sqrt{\epsilon_{re}}}$$

$Z_c^0$  为在同样形状和结构尺寸的情况下，填充介质全部是空气时微带线的特性阻抗

$$Z_c^0 = \frac{1}{v_0 C_0}$$

我们假定已成形的导体的厚度  $t$  与基片厚度  $h$  相比可以忽略  $h$  ( $t/h < 0.005$ )。

这种情况下，我们能够利用只与线路尺寸（ $w$  和  $h$ ）和介电常数  $\epsilon_r$  有关的经验公式。对于窄带微带线当  $w/h < 1$  时，我们得到特性阻抗：

$$Z_c \approx \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left( \frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right)$$

对于宽线  $w/h > 1$  时，我们必须采用不同的特性阻抗表达式：

$$Z_c \approx \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}} \left[ \frac{w}{h} + 2.42 - 0.44 \frac{h}{w} + \left(1 - \frac{h}{w}\right)^6 \right]}$$

为了求出填充其他介质时微带线的特性阻抗  $Z_c$ ，还应知道等效相对介电常数  $\epsilon_{re}$ 。其表达式即：

$$\epsilon_{re} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{w}\right)^{-1/2}$$

## 4.2 电压反射系数

电压反射系数  $\Gamma_0$ ，它表示反射与入射电压波之比：

$$\Gamma_0 = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$Z_L$  为负载， $Z_0$  为传输线特性阻抗。

## 4.3 驻波比

为了量化失配度，一般习惯于引入驻波比（SWR），SWR 是最大电压（或电流）与最小电压（或电流）之比，其表达式为：

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

## 5. 微带传输线接不同类型负载时的工作状态

### 5.1 端接负载无耗传输线的输入阻抗

传输线输入阻抗的表达式为：

$$Z_{in}(d) = Z_0 \frac{Z_L + j Z_0 \tan(\beta d)}{Z_0 + j Z_L \tan(\beta d)}$$

我们可以利用上式分析负载阻抗  $Z_L$  沿着特性阻抗  $Z_0$ ，长度为  $d$  的传输线是如何变换的，它已通过波数  $\beta$  考虑到了工作频率的影响， $\beta$  能用频率和相速度或者波长表示，它们分别是  $\beta = (2\pi f)/v_p$  和  $\beta = 2\pi/\lambda$ 。

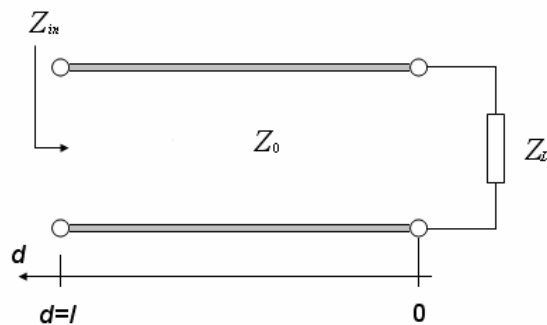


图 1-8 传输线示意图

### 5.2 短路传输线：

假如  $Z_L = 0$ （负载相当于短路线），输入阻抗表达式可表示为：

$$Z_{in}(d) = j Z_0 \tan(\beta d)$$

我们注意到阻抗随着负载的距离增加而周期性变化。 $d = 0$  阻抗等于负载阻抗，其值为零，随着距离  $d$  的增加，线路的阻抗为纯虚数，而数值随着增加。在此所在位置阻抗为正，表示线路呈现电感特性。当  $d$  达到  $1/4$  波长时，阻抗等于无穷大，这代表开路线情况。进一步增大距离，出现负的虚阻抗，它等效为电容特性。当  $d = \lambda/2$  时阻抗变为零，而当  $d > \lambda/2$  时则又重复一个新的周期。

### 5.3 开路传输线:

假如  $Z_L \rightarrow \infty$ ，输入阻抗简化为:

$$Z_{in}(d) = -j Z_0 \cot(\beta d)$$

可以看到，开路传输线的输入阻抗也是随着负载的距离增加而周期性变化的。类似于短路传输线，也可以对开路传输线进行周期性分析。

### 5.4 1/4 波长传输线:

假如传输线是匹配的， $Z_L = Z_0$ ，可以看出， $Z_{in}(d) = Z_0$  与线长无关。当  $d = \lambda/2$  [或者更普遍的  $d = \lambda/2 + m(\lambda/2)$ ， $m = 1, 2, \dots$ ] 时，即

$$Z_{in}(d = \lambda/2) = Z_0 \frac{Z_L + j Z_0 \tan(\frac{2\pi}{\lambda} * \frac{\lambda}{2})}{Z_0 + j Z_L \tan(\frac{2\pi}{\lambda} * \frac{\lambda}{2})} = Z_L$$

换句话说，假如传输线的长度正好等于半波长，则输入阻抗等于负载阻抗，而与特性阻抗  $Z_0$  无关。

我们将传输线的长度缩短到  $d = \lambda/4$  [或  $d = \lambda/4 + m(\lambda/4)$ ， $m = 1, 2, \dots$ ]，可得:

$$Z_{in}(d = \lambda/4) = Z_0 \frac{Z_L + j Z_0 \tan(\frac{2\pi}{\lambda} * \frac{\lambda}{4})}{Z_0 + j Z_L \tan(\frac{2\pi}{\lambda} * \frac{\lambda}{4})} = \frac{Z_0^2}{Z_L}$$

通过这一特性，可以通过选择线段，使一个实数负载阻抗与一个所希望的实数输入阻抗匹配，传输线的特性阻抗等于负载和输入阻抗的几何平均值。

$$Z_0 = \sqrt{Z_L Z_{in}}$$

由图 2-3 看出，此处  $Z_{in}$  和  $Z_L$  是已知阻抗，而  $Z_0$  是由上式决定的。

## 三 实验设备及装置图

本次实验主要有两个内容，一是通过使用矢量网络分析仪 AV3620 测试 RF

带通滤波器的散射参数 ( $S_{11}$ 、 $S_{12}$ 、 $S_{21}$ 、 $S_{22}$ ) 来熟悉矢量网络分析仪AV3620 的基本操作, 连接图如图 1-9 所示, 将网络分析仪的 1 端口接到**RF带通滤波器**的输入端口, 将**RF带通滤波器**的输出端口接到网络分析仪的 2 端口; 二是通过使用矢量网络分析仪AV3620 测量微带传输线的散射参数来了解微波传输线的工作特性。本实验所用的**微带传输线模块**板材  $\varepsilon_r=4.8$ , 板材厚度  $h=1mm$ , 传输线长度  $l=10.5mm$ , 线宽  $w=1.76mm$ , 铜箔厚度  $t=0.02mm$ 。连接图如图 1-10 所示, 将网络分析仪的 1 端口接到**微带传输线模块**的输入端口, 另一端口在实验时将接不同的负载。

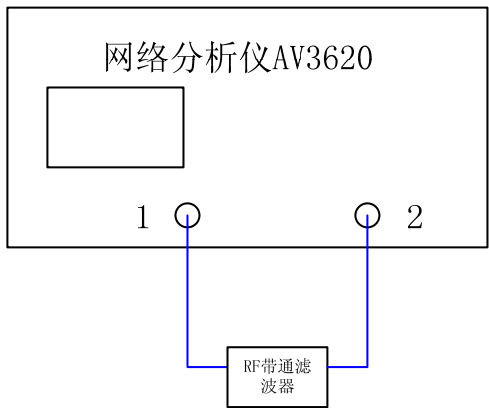


图 1 - 9

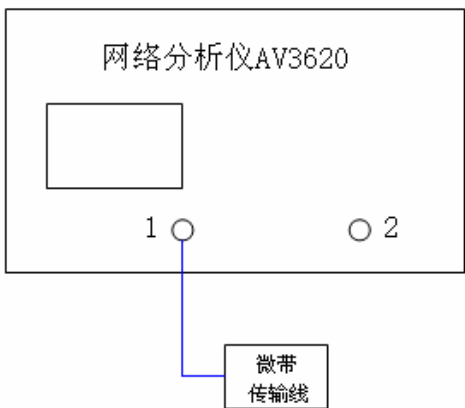


图 1 - 10

## 四 实验内容及步骤

### 1. 矢量网络分析仪操作实验

- 初步运用矢量网络分析仪 AV3620, 熟悉各按键功能和使用方法
- 以 RF 带通滤波器模块为例, 学会使用矢量网络分析仪 AV3620 测量微波电路的 S 参数。

#### 步骤一 调用误差校准后的系统状态

按【Save/Recall】, 光标会停留在第 1 条状态上, 然后按软键 [Recall status]

#### 步骤二 选择测量参数

设置频率范围:

按【Start】【1000】【M/μ】: 设置起始频率1000 MHz。

按【Stop】【1800】【M/μ】: 设置终止频率 1800 MHz。



设置源功率：

按【Power】【-10】【×1】：将功率电平设置为-10dBm

### 步骤三 连接待测件测量S参数

①按照装置图连接待测器件；

②测量待测器件的 S 参数：

按【Meas】[Tran: FWD S21(B/R)]：选择正向传输测量 S21。

按【Marker】：调出可移动光标，光标位置的读数位于屏幕右上角。

按【Format】[PHASE]：测量待测器件插入相位响应，即 S21 的相位。

按【Format】[LOG MAG]：选择对数 dB 形式测量 S21 的幅值。

按【Marker Search】[SEARCH:MIN]：测量待测器件的正向插入损耗，读出此时光标的读数，为待测器件的最小正向插入损耗。

按【Marker Search】[SEARCH:MAX]：测量待测器件的正向插入损耗，读出此时光标的读数，为待测器件的最大正向插入损耗。

按【Meas】[Tran: REV S12(B/R)]：选择反向传输测量。观察此时的曲线与 S21 曲线的关系。

按【Marker Search】[SEARCH:MIN]：测量待测器件的反向插入损耗，读出此时的读数，为待测器件的最小反向插入损耗。观察与最小正向插入损耗的关系

按【Marker Search】[SEARCH:MAX]：测量待测器件的反向插入损耗，读出此时读数，为待测器件的最大反向插入损耗。观察与最大正向插入损耗的关系

按【Meas】[Refl: FWD S11(A/R)]：选择正向反射测量 S11。

按【Format】[LOG MAG]：选择对数 dB 形式测量 S11 的幅值。

按【Format】[SWR]：选择以驻波比形式测量 S11 的幅值。

按【Format】[SMITH CHART]：选择以 SMITH 圆图的形式测量 S11。

按【Meas】[Refl: FWD S22(A/R)]：选择正向反射测量 S22。

按【Format】[LOG MAG]：选择对数 dB 形式测量 S22 的幅值。

按【Format】[SWR]：选择以驻波比形式测量 S22 的幅值。

按【Format】[SMITH CHART]：选择以 SMITH 圆图的形式测量 S22。

### 步骤四 设置显示方式

①在同一图形上同时观察两个通道：

按【Display】 [DUAL | QUAD SETUP]，设置 [DUAL CHAN on OFF]

按【Chan 1】选择控制1通道，这时可以设置1通道的测量参数。

按【Chan 2】选择控制 2 通道，这时可以设置 2 通道的测量参数。

②在两个图形上同时观察两个通道:

按【Display】 [DUAL | QUAD SETUP] [SPLIT DISP] 为 2×：屏幕上

按【Chan 1】选择控制1通道，这时可以设置1通道的测量参数。

按【Chan 2】选择控制 2 通道，这时可以设置 2 通道的测量参数。

③四个通道同时显示:

利用4参数显示软键 [4 PARAM DISPLAYS] 可以提供一个设置四参数显

按【Display】[DUAL | QUAD SETUP] [4 PARAM DISPLAYS] 会出现



### SETUP A

### SETUP B

### SETUP C

SE IUP U

### SETUP E

### SETUP F

## TUTORIAL

## RETURN

然后通过选择[SETUP A]~[SETUP F]中的一项，来得到所需的显示方式。

按【Display】 [DUAL | QUAD SETUP] [4 PARAM DISPLAYS] [SETUP

A]: 得到 A 显示方式。

按【Display】[DUAL | QUAD SETUP] [4 PARAM DISPLAYS] [SETUP

B]: 得到 B 显示方式。

按【Display】[DUAL | QUAD SETUP] [4 PARAM DISPLAYS] [SETUP

C]: 得到 C 显示方式。

按【Display】[DUAL | QUAD SETUP] [4 PARAM DISPLAYS] [SETUP

D]: 得到 D 显示方式。

按【Display】[DUAL | QUAD SETUP] [4 PARAM DISPLAYS] [SETUP

E]: 得到 E 显示方式。

按【Display】[DUAL | QUAD SETUP] [4 PARAM DISPLAYS] [SETUP

F]: 得到 F 显示方式。

#### 步骤五 设置光标的使用

【Marker】键在屏幕上显示了一个可动的激活的光标，它对每条通道的一系列菜单进行访问，对于一个通道最多可控制 5 个显示光标。用光标可获得测量值读数。

①按【Marker】[1]：显示光标 1，

再按[2]、[3]、[4]、[5]：显示光标 2、3、4、5，每个光标对应的读数位于图形右上方。

按[All Off]：关闭所有的光标。

②使用德尔塔（ $\Delta$ ）光标

这是一种关联模式，其光标值标出了激活光标的位置与参考的德尔塔光标的关系。可以通过定义五个光标中的一个为德尔塔参考，来打开德尔塔模式。

按【Maker】[ $\Delta$  MODE MENU] [ $\Delta$  REF=1]：使光标 1 成为参考光标。

移动光标 1 到希望参考的任意点：

按 [MARKER 2]：参考光标 1，将光标 2 移到要测量的任何位置，这时显示的读数为仪光标 1 的读数为参考值的相对读数。

按 [ $\Delta$  MODE MENU] [ $\Delta$  REF=2]：将光标 2 改为参考光标

## 2. 微带传输线测量实验

- 使用网络分析仪观察和测量微带传输线的特性参数。
- 测量 1/4 波长传输线在不同负载情况下的频率、输入阻抗、驻波比、反射系数。
- 观察 1/4 波长传输线的阻抗变换特性。

### 步骤一 调用误差校准后的系统状态

按【Save/Recall】，光标会停留在第 1 条状态上，然后按软键 [Recall status]

### 步骤二 选择测量参数

设置频率范围：设置起始频率为 100M；

设置终止频率为 400M。

设置源功率：将功率电平设置为 -25dB。

### 步骤三 连接待测件进行测量

- ① 按照装置图将微带传输线模块连接到网络分析仪上；
- ② 将传输线模块另一端接上转接头并空载，此时  $Z_L \rightarrow \infty$ ，传输线终端呈开路。选择测量  $S_{11}$ ，将显示格式设置为 SMITH CHART，调出光标，调节光标位置，使光标落在在圆图的短路点。
- ③ 记录此时的频率和输入阻抗。然后将显示格式设置为 SWR，记录下此时的驻波比值。将显示格式设置为 LOG MAG，记录下此时的  $S_{11}$ （反射系数）值。  
(记录数据时保持光标位置始终不变)
- ④ 将短路/匹配负载模块接在转接头上，将拨码开关的拨码 2 拨到“ON”端（拨码 1 不起控制作用，在任意一端都可以），此时，短路/匹配负载模块处于短路状态，因此传输线终端呈短路。将显示格式设置为 SMITH CHART，注意观察光标的位置（此时光标所示频率仍为②中的频率），此时光标应在圆图中开路点附近。
- ⑤ 调节光标至圆图中的开路点，按照③中所示方法和步骤记录数据。
- ⑥ 将传输线模块另一端接上匹配负载。将显示格式设置为 SMITH CHART，将光标调节至最靠近圆图圆心的位置。
- ⑦ 按照③中方法和步骤记录数据。

## 五 结果分析和实验报告

1. 实验目的、内容、系统简图；
2. 步骤简述，记录有关数据；
3. 数据处理，根据有关公式算出各测量值。

## 六 思考题

1. 从图 1-3 上分析，如果测量被测微波器件的 2 端口 S 参数，其内部开关将处于什么工作状态？
2. 对记录的数据进行分析，并思考为什么开路负载时在短路点的光标，在接上短路负载后会在开路点附近？

## 实验二 微波元件特性参数测量

### 一 实验目的

- 1、掌握利用矢量网络分析仪扫频测量微带谐振器 Q 值的方法。
- 2、学会使用矢量网络分析仪测量微波定向耦合器的特性参数。
- 3、掌握使用矢量网络分析仪测试微波功率分配器传输特性的方法。

### 二 实验原理

#### 1. 微波谐振腔 Q 值的测量

品质因数 Q 是表征微波谐振系统的一个重要的技术参量，品质因素 Q 描述了谐振系统频率选择性的优劣及电磁能量损耗程度。它定义为

$$Q_0 = 2\pi \frac{W}{W_T} = 2\pi \frac{W}{P_l T} = \omega_0 \frac{W}{P_l}$$

其中  $P_l$  为腔的平均损耗功率，W 为腔内的储能。

品质因素 Q 的测量方法很多，例如：功率传输法、功率反射法、阻抗法等等，通常可根据待测谐振腔 Q 值的大小、外界电路耦合的程度及要求的精度等，选用不同的测量方法。本实验主要运用扫频功率传输法来测量微带谐振器的 Q 值。

功率传输法是根据谐振腔的功率传输特性来确定它的 Q 值。图 2-1 表示测量谐振腔功率特性的方框图。



图 2-1 测量谐振腔功率传输特性的方框图

当微波振荡源的频率逐渐改变时，由于谐振腔的特性，传输到负载的功率将随着改变，它与频率的关系曲线如图 2-2 所示。

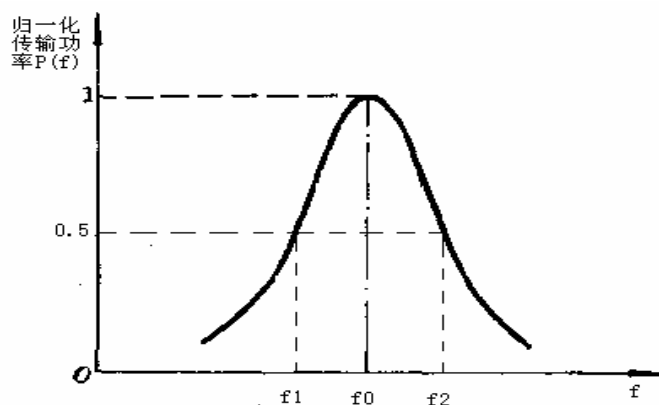


图 2-2 谐振腔传输功率与频率的关系曲线

根据功率传输法测量谐振腔的等效电路可推得，谐振腔两端同时接有匹配微波源和匹配负载时的有载品质因数为

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (2-1)$$

式 (2-1) 中  $f_0$  为谐振腔的谐振频率， $f_1$ 、 $f_2$  是传输功率  $P_2$  自最大值下降到一半时的“半功率点”的频率。 $f_2$  与  $f_1$  之间的差值  $\Delta f$  为谐振频率的通频带。

## 2. 微波定向耦合器

### 2.1 工作原理与特性参数

定向耦合器是一种有方向性的微波功率分配器件，通常有波导、同轴线、带状线及微带线等几种类型。理想的定向耦合器一般为互易无损四口网络，如图2-3所示。定向耦合器包含主线和副线两部分，在主线中传输的微波功率经过小孔或间隙等耦合机构，将一部分功率耦合到副线中去，由于波的干涉和叠加，使功率仅沿副线中的一个方向传输（称正方向），而在另一个方向几乎没有或极少功率传输（称反方向）。

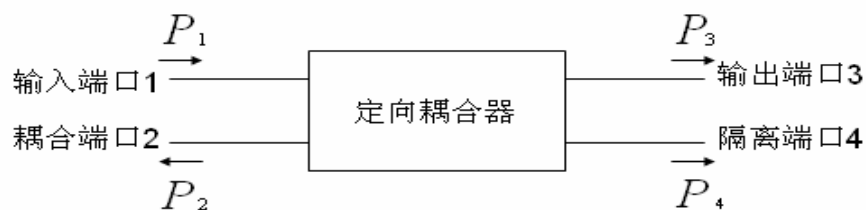


图2-3 定向耦合器方框图

定向耦合器有四个端口，其作用可由图2-3所示的四端口网络说明。设图中1、3为主线，2、4为副线。若波由端口1输入，则一部分直通端口3输出，另一部分经耦合到端口2输出，端口4无输出；或端口4输出，端口2无输出。端口3称为输出端口，端口2称为耦合端口，端口4称为隔离端口。在一定条件下，1、2两端口彼此隔离，3、4两端口也彼此隔离。

在各端口均接匹配负载的条件下，可以定义描述定向耦合器的特性参量，主要包括耦合度、方向性、输入驻波比和工作频带等。

### 耦合度

输入至主线的功率（端口1输入功率 $P_1$ ）与副线中正方向传输的功率（端口2输出功率 $P_2$ ）之比的对数称为定向耦合器的耦合度 $C$ ，即

$$C = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} (\text{dB})$$

显然，由于输入功率总是大于输出功率，故此分贝数必为负值，但习惯上只说它的绝对值（正值）而不提及符号。耦合度 $C$ 越大，表明耦合到副线的能量越少，耦合越弱。

### 方向性

在理想情况下，副线中一个端口有输出时，另一个相反端口应没有输出。但实际上由于设计或结构不佳，另一个端口常有一些输出。用副线中正方向传输的功率（端口2输出功率 $P_2$ ）与反方向传输的功率（端口4输出功率 $P_4$ ）之比的对数来表示定向传输的性能，称为耦合器的方向性，即

$$D = 10 \lg \frac{P_2}{P_4} (\text{dB})$$

$D$ 越大，说明方向性越好，或者说输入端口与隔离端口的隔离越好。理想情况下， $P_4 \rightarrow 0$ ， $D \rightarrow \infty$ ，实用中常对通带中的 $D$ 提出一个最低要求。

有时，反映定向程度的指标也可以用隔离度来表示。定义隔离度为输入至主线的功率（端口1输入功率 $P_1$ ）与副线中反方向传输的功率（端口4输出功率 $P_4$ ）之比的对数，即



$$D_l = 10 \lg \frac{P_1}{P_4} (\text{dB})$$

## 输入驻波比

当端口 2、3 和 4 均接匹配负载时，端口 1 的输入驻波比，用  $S$  表示。

## 工作频带

能满足  $C$ 、 $D$  和  $S$  等各项技术指标要求的工作频率范围。

## 2.1 微带线定向耦合器

微带线定向耦合器是由两条等宽的平行耦合微带线所构成，线长是奇模和偶模波长平均值的  $1/4$ ，线的各端口都接以匹配负载  $Z_c$ ，如图 2-4 所示。若信号从端口 1 输入，则端口 2 和端口 3 将有输出，端口 4 没有输出。由于耦合信号（端口 2 的输出）的传输方向与输入信号方向相反，故这种定向耦合器称为反向定向耦合器。

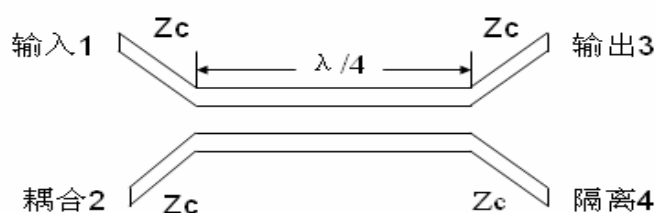


图 2-4 耦合微带线定向耦合器

定向耦合器为什么会有方向性呢？要具有方向性必须要有两种以上的耦合因素起作用，使耦合到副线某一端口的能量能够互相抵消。我们来看一段如图 2-5 所示的平行耦合传输线。当导线 1-3 中有交变电流  $i_1$  流过时，由于 2-4 线和 1-3 线互相靠近，故 2-4 线中便耦合有能量，此能量是既通过电场（以耦合电容表示）又通过磁场（以耦合电感表示）耦合过来的。通过  $C_m$  的耦合，在传输线 2-4 中引起的电流为  $i_{c2}$  及  $i_{c4}$ ；同时由于的交变磁场的作用，在 2-4 线上感应有电流  $i_L$ 。根据电磁感应定律，感应电流  $i_L$  的方向与  $i_1$  的方向相反，如图上所示。因此，若能量由端口 1 输入，则耦合端口是 2 端口。而在 4 端口因为电耦合电流  $i_{c4}$

与磁耦合电流 $i_L$ 的作用相反而能量互相抵消，故4端口是隔离端口。这样，我们就定性地了解了耦合微带线定向耦合器具有方向性的原理。

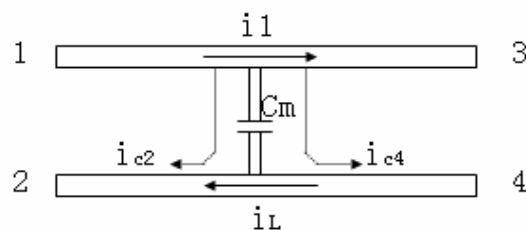


图 2-5 耦合线方向性的解释

## 4. 微波功率分配器

### 4.1 工作原理

在实际应用中，有时需要将信号源的功率分别馈送给若干个分支电路（负载），就是说，进行功率分配，实现这种功能的射频器件就称为功率分配器。由于功率分配器一般为满足互易定理的无源网络，所以功率分配器与合成器是等价的。

根据输出功率的比例，微波功率分配器有等分功率与不等分功率两类。当一个微波功率平均分成 $n$ 路时，称为 $n$ 路等分功率分配器，反之，称为 $n$ 路不等分功率分配器。微波功率分配器在微波天线的馈线中和微波仪表中都得到了应用。大功率微波功率分配器采用同轴线结构，中小功率微波功率分配器采用带状线或微带线结构。

功率分配器的具体结构型式很多，最常用的是采用 $\lambda_g/4$ 阻抗变换段的功率分配器，一般来说功率分配器都是相等的，图 2-6 所示的是两路微带功率分配器的结构。两个分支臂长都为 $\lambda_g/4$ ，是完全对称的结构，对称性保证输入功率将平均分配于两个输出端，得到同相同模的输出。

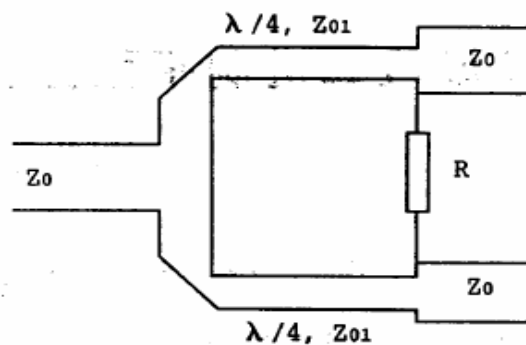


图 2-6 两路微带功率分配器的结构原理图

两分支臂之间接有隔离电阻  $R$ ，是为了保证两个输出端口的隔离。当两个输出端口均为良好匹配时，对称性保证各个传输支路是同电位的，故无电流通过隔离电阻，隔离电阻上无功率损耗。但当其中一输出端失配，致使有反射波折回，则此反射功率将分拆开：一部分经过隔离电阻到达另一输出端；另一部分沿自己支路反射回输入端，然后又反射回来，沿另一支路到达另一输出端。如果隔离电阻尺寸很小而可视为集总元件时，则它的电长度可近似地认为是零。由于各支路的长度为  $\lambda_g/4$ ，电长度在中心频率时为  $\pi/2$ ，因而往返二次的电长度是  $\pi$ 。因此到达另一输出端的两部分信号是反相的。可以证明，只要适当选择隔离电阻和支线的特征阻抗值，就可以使这两部分信号幅度相等，因而彼此相消。这就是利用隔离电阻  $R$  达到各分支端口之间的隔离的原理。

经过对电路的分析计算，可以得到隔离电阻  $R$  和支线特征阻抗  $Z_{01}$  分别应该为

$$Z_{01} = \sqrt{2}Z_0 \quad \text{和} \quad R = 2Z_0$$

其中  $Z_0$  为输入端微带传输线的特征阻抗，一般都为  $50\Omega$ 。

#### 4.1 技术参数

**工作频带：**工作频带就是功率分配器能够正常工作的频率范围。

**插入损耗：**在理想情况下，功率分配器不应该引入任何功率损耗。然而实际中功率分配器都会有某种程度的功率损耗，插入损耗定量的描述了工作频带内功率损耗的大小。如果是两路功率分配器，设输入功率为  $P_{in}$ ，每一端口输出功率

假设都相等为  $P_{out}$ ，则插入损耗  $IL = 10 \log \frac{P_{in}/2}{P_{out}}$ 。在实际测量中，常常用  $S$  参数

来表征功率分配器的技术参数。插入损耗  $IL = -20 \log |S_{21}|$ 。

**各端口幅度偏差：**理想情况下，两端口输出幅度应该完全相同，但实际中两端口输出幅度都会存在某种程度的差异，就用幅度偏差来定量描述。设端口一输出功率幅度为  $P_1$ ，端口二输出功率幅度为  $P_2$ ，则幅度偏差  $\Delta L = \left| 10 \log \frac{P_1}{P_2} \right|$ 。

**各端口隔离度：**理想情况下，两端口应该是完全隔离的，即一端口的功率不会进入到二端口，实际情况下总会存在某种程度的功率泄漏。隔离度就是描述端口隔离程度的参量。测量时，使输入端口接匹配负载，从一端口输入一信号  $P_1$ ，测量此时二端口的输出功率  $P_2$ ，隔离度  $= 10 \log \frac{P_1}{P_2}$ 。用 S 参量来表征，隔离度  $= -20 \log |S_{23}|$ 。

### 三 实验设备及装置图

本次实验主要包括三个内容：

一是通过使用矢量网络分析仪 AV3620 扫频测试微带谐振器的散射参数  $S_{21}$  来得到其 Q 值，实验装置连接图如图 2-7 所示，将网络分析仪的 1 端口接到微带谐振器模块的输入端口 1，将微带谐振器模块的输出端口 2 接到网络分析仪的 2 端口；

二是通过使用矢量网络分析仪 AV3620 测量微波定向耦合器的 S 参数来熟悉定向耦合器的特性。连接图如图 2-8、图 2-9 所示：（a）测量传输特性时，将网络分析仪的 1 端口接到微波定向耦合器的输入端口，将耦合器的输出端口接到网络分析仪的 2 端口，耦合端口接 50 欧姆匹配负载；（b）测量耦合特性时，将耦合器的耦合端口接到网络分析仪的 2 端口，输出端口接 50 欧姆匹配负载。

三是通过使用矢量网络分析仪 AV3620 测试功率分配器的 S 参数来得到其传输频率响应特性和插入损耗、各端口幅度偏差、端口隔离度等技术参数。实验装置连接图如图 2-10 所示，功率分配器的输入端口 1 接网络分析仪的 1 端口，功率分配器的一个输出端口 2 接网络分析仪的 2 端口，功率分配器的另一个输出端口 3 接匹配负载。

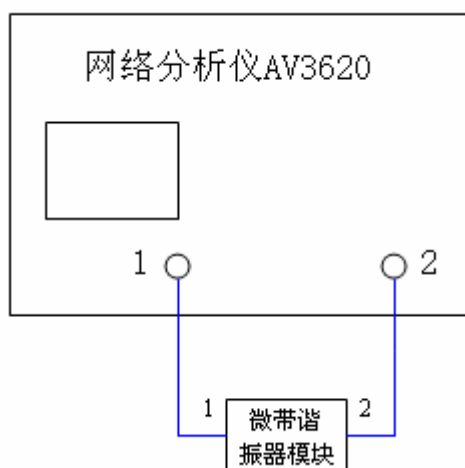
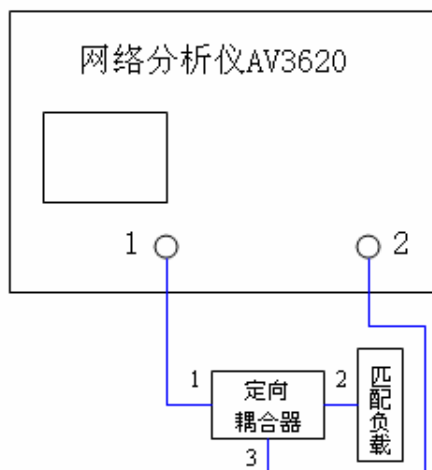
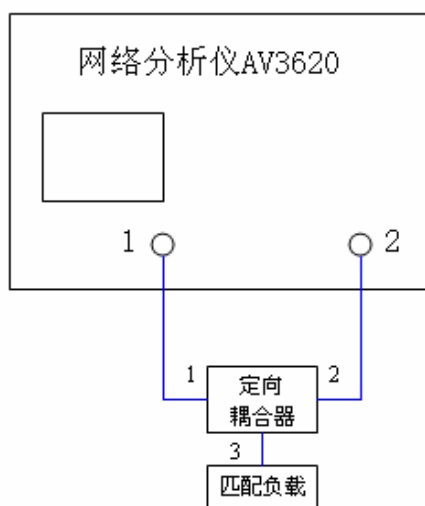


图 2-7



(a)

图 2-8



(b)

图 2-9

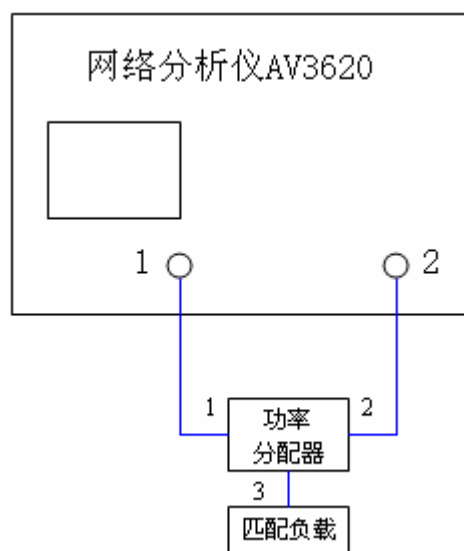


图 2-10

## 四 实验内容及步骤

### 1. 微带谐振器品质因数的扫频测量实验

- 利用网络分析仪 AV3620 扫频测量微带谐振器的 Q 值

步骤一 调用误差校准后的系统状态

步骤二 选择测量参数

设置网络分析仪的扫描频率范围为 1GHz-2GHz, 将功率电平设置为 -20dBm。

### 步骤三 连接待测件进行测量

按照实验装置连接图 2-7 将微带谐振器模块与网络分析仪连接好。测量设置选择为测量介电常数测量模块的参数  $S_{21}$  的幅度的对数值, 记下  $S_{21}$  幅度的对数值最大的那个点的频率, 这个点的频率即为微带谐振器的谐振频率  $f_0$ 。还要记下在该谐振频率点上的幅度的对数值, 这个值即为微带谐振器在谐振频率上的衰减量  $\alpha_0$ 。然后将光标从谐振频率  $f_0$  开始向两边移动, 记下衰减量比  $\alpha_0$  小 3dB 点处的频率分别为  $f_1$  和  $f_2$ 。

### 步骤四 进行计算

将测得的频率  $f_0$ 、 $f_1$  和  $f_2$  代入到式 (2-1) 中, 就可以计算出被测的微带谐振器的品质因素 Q 的值。

### 步骤五 Q 值的自动测量

网络分析仪能自动计算显示带宽、中心频率、质量因子(定义为电路谐振频率与其带宽的比例), 和被测件在中心频率下的损耗。这些值在光标数据读出区中显示。

1)按【Marker Search】和[SEARCH:MAX]将光标放在微带谐振器谐振曲线中心的旁边。

2)如果希望带宽相对最大, 按[MARKER: ZERO]

3)按【Marker Search】将访问光标搜索菜单。

4)按【WIDTHS ON】将计算中心激励值、带宽和测量轨迹上的质量因子 Q。记录下此时的品质因素 Q 值。

## 2. 微波定向耦合器实验

■ 使用矢量网络分析仪 AV3620 测量微带线定向耦合器的 S 参数。

步骤一 调用误差校准后的系统状态

步骤二 选择测量参数

设置频率范围: 起始频率为 700 MHz, 终止频率为 1000 MHz

设置源功率：将功率电平设置为-20dBm

### 步骤三 连接待测器件测量耦合特性

按照耦合特性测量装置图 2-8 连接待测器件；

选择正向传输测量，采用对数幅度模式，观察数据 $S_{21}$ 的轨迹，找出其在设置频率范围内的最大值，即为耦合器的耦合度，此时的频率值为耦合器的中心频率；选择 $S_{12}$ 测量，观察数据 $S_{12}$ 的轨迹及与 $S_{21}$ 的关系；

选择 $S_{11}$ 和 $S_{22}$ 测量，采用SWR模式，其值分别为耦合器相应端口的反射系数。

### 步骤四 连接待测器件测量传输特性

按照传输特性测量装置图 2-9 连接待测器件；

选择正向传输测量，采用LOG MAG模式，观察数据 $S_{21}$ 的轨迹，读出其在中心频率处的数值，即为耦合器的最大插入损耗；选择 $S_{12}$ 测量，观察数据 $S_{12}$ 的轨迹及与 $S_{21}$ 的关系；

选择 $S_{11}$ 和 $S_{22}$ 测量，采用SWR模式，其值分别为耦合器相应端口的反射系数。

## 3. 微波定向耦合器实验

- 利用网络分析仪 AV3620 测量功率分配器的传输频率响应特性。
- 根据测量所得的数据计算出功率分配器的插入损耗、各端口幅度偏差、各端口隔离度等技术参数。

### 步骤一 调用误差校准后的系统状态

### 步骤二 选择测量参数

设置网络分析仪的扫描频率范围为 800MHz-1GHz，将功率电平设置为-20dBm。

### 步骤三 连接待测件进行测量

①按照实验装置连接图 2-10 将功率分配器模块与网络分析仪连接好，功率分配器的输入端口 1 接网络分析仪的 1 端口，功率分配器的一个输出端口 2 接网络分析仪的 2 端口，功率分配器的另一个输出端口 3 接匹配负载。测量设置选择为测量功率分配器模块的参数  $S_{21}$  的幅度的对数值和相位值，记下其曲线。在 935MHz 上记下  $S_{21}$  幅值和相位，则插入损耗  $IL = -20 \log |S_{21}|$ 。

②将功率分配器的另输出一端口 2 接匹配负载, 输出端口 3 接网络分析仪的端口 2。测量另一支路的  $S_{21}$  参数, 记下其曲线。同样在 935MHz 上记下  $S_{21}$  幅度的对数值和相位值, 则另一支路的插入损耗  $IL = -20\log |S_{21}|$ 。比较两次记录的  $S_{21}$  的幅度值和相位值, 并将两者作差就可得出两端口的幅度偏差和相位偏差。

③将功率分配器的端口 1 接匹配负载, 功率分配器的端口 2 和端口 3 分别接网络分析仪的端口 1 和端口 2。测量此时的  $S_{21}$  参数, 记下其曲线。同样在 935MHz 上记下  $S_{21}$  幅值, 则隔离度  $= -20\log |S_{21}|$ 。

#### 步骤四 进行参数计算

通过测量所得的数据计算出各端口之间的插入损耗、幅度偏差、隔离度等技术参数, 计算公式在上面的步骤中已经介绍过。

## 五 结果分析和实验报告

- 1、实验目的、内容、系统简图;
- 2、步骤简述, 记录有关数据;
- 3、数据处理, 根据有关公式算出各测量值。

## 六 思考题

1. 根据测量所得的数据计算出微带谐振器的 Q 值, 并与网络分析仪自动测量得到结果进行对比, 分析两者之间产生误差的原因。
2. 以图 2-3 为例, 如果要用网络分析仪测量图中定向耦合器的方向性与隔离度, 应该怎么测量?
3. 比较功率分配器两个支路的传输特性, 说明不一致性产生的原因。