

## 网络分析仪工作原理及使用要点

朱荣华

本文简要介绍 41 所生产的 AV3620 矢量网络分析的测量基本工作原理以及正确使用矢量网络分析测量电缆传输及反射性能的注意事项。

### 1. DUT 对射频信号的响应

矢量网络分析仪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 说明了测试信号通过被测器件 (DUT) 后的响应。

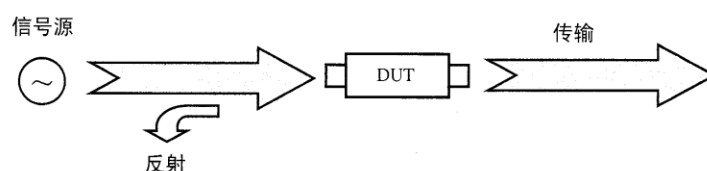


图 1 DUT 对信号的响应

### 2. 整机原理:

矢量网络分析仪用于测量器件和网络的反射特性和传输特性,主要包括合成信号源、S 参数测试装置、幅相接收机和显示部分。合成信号源产生 30k~6GHz 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。其原理框图如图 2 所示:

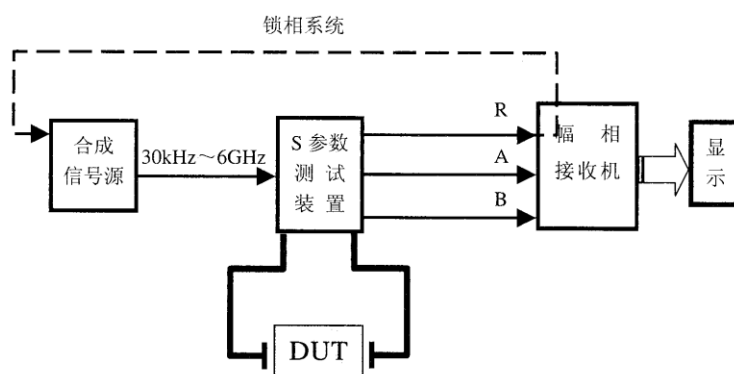


图 2 矢量网络分析仪整机原理框图

矢量网络分析内置合成信号源产生 30k~6GHz 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,合成扫频信号源和幅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，此中频信号经过 A/D 模拟数字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。

- ◆ 合成信号源：由 3~6GHz YIG 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。

### 3. 优化测量结果

#### 3.1 校准连接器件的精心选择

要获得正确的测量结果，校准件（负载、开路、短路）、适配器（双阳、双阴、阴样）、连接器及测量连接电缆等都必须保持其优良的性能，即上述校准连接器件的反射要比被测样品的反射小的多（即回波损耗大 10dB，至少也得大 6dB）。举例来说：如果被测样品的回波损耗要求大于 20dB，则校准连接器件的回波损耗则要大于 30dB，至少也要大于 26dB，即反射至少小一倍。

#### 3.2 如何精确测量较大电缆的衰减（损耗）

具有较大长度（电延迟）的电缆，它们在测量时需注意一些特别的问题。长电缆的测量要选择正确的扫描时间，否则会使测量结果产生误差。在较快的扫描速度下，矢量网络分析的幅度响应会下降或看起来失真，表现为电缆比它实际的损耗大得多，只有在较慢的、合适的扫描速度下，测量结果才会正确。本节描述了导致这种情况的原因及如何精确测量较长电缆的衰减。

当用矢量网络分析测量长电缆时，由于矢量网络分析扫描时频率随时间改变，因此，电缆的延迟在矢量网络分析的输入和输出信号之间将导致频率的漂移。频率漂移  $\Delta F$  等于扫描速度和时间延迟的乘积：

$$\Delta F = dF/dt \times \Delta T$$

在矢量网络分析接收机里，测试和输入信号参考因为  $\Delta F$  而在频率上不同。因为测试信号频率与接收机频率有不同，矢量网络分析将在测量幅度和相位时出现误差。矢量网络分析扫描速度越快， $\Delta F$  越大，测试通道产生的误差也越大。要减小这些误差，必须减小频率漂移  $\Delta F$ 。 $\Delta F$  可通过下列方法减小：

- 降低扫描速度

通过加大矢量网络分析扫描时间，能降低扫描速度；对于相同的频段，通过增加扫描点数，同样可以降低扫描速度。

- 减小时间延迟( $\Delta T$ )

由于  $\Delta T$  是被测电缆自身特性，所以它不能像字面意义上那样被减小。可是，能被减小的是 R 通道和 B 通道之间时间延迟之差。这些时间可以通过加一条长电缆给 R 通道来补偿，

此电缆与待测电缆有着差不多相同的延迟。电缆的这个长度能被插入 R 通道输入和输出连接器之间，连接器位于矢量网络分析的前面板上。这条电缆延迟必须小于 5 微秒。

除了减少频率漂移提高测量精度外，减小系统的中频带宽（IF BW）可以减小系统噪声，从而达到提高测量精度和动态范围的目的。

### 3.3 如何精确测量较大电缆的回波损耗（驻波）

当测量大长度（如大于 100 米）电缆的回波损耗时，由于沿电缆长度方向上的反射随机地叠加（矢量叠加），回波损耗曲线表现为有很多尖锐的反射峰，反射峰的宽度很窄，如果测量取样点数不够多，反射峰被遗漏的概率很大，造成结果偏好的假象。增加测量点数可将回波损耗的峰值真正捕捉到，从而达到提高测量长电缆回波损耗（驻波）精度的目的。

设测量某一电缆的频率范围为 5MHz~3000MHz，回波损耗峰值宽度约为 2MHz，当用 201 测量点数时，频率间隔 $\Delta F \approx 15\text{MHz}$ ，很容易将最大回波损耗的峰遗漏掉，而当用 1601 测量点数时，频率间隔 $\Delta F \approx 1.87\text{MHz}$ ，回波损耗最小峰值就被捕捉到了。

### 3.4 测量中应注意的事项

a) 电缆连接器、阻抗转换器、驻波电桥和匹配负载等器件应严格区分 75Ω 和 50Ω 两种特性阻抗、因其外径及连接螺纹相同，容易混淆。应避免将 75Ω 阳头与 50Ω 阴头连接，这样会造成电路不连续无法测试；更应避免将 50Ω 阳头与 75Ω 阴头连接，因为这将彻底损坏 75Ω 阴头的插孔。

b) 阻抗转换器、匹配负载、驻波电桥及测量探头均应小心轻放，妥善保管，防止从高处跌落而影响其性能及最终测量结果。

c) 各器件连接时，应注意连接转动时的方法，只允许转动活动螺母保证插针与插孔作直线移动。否则插针和插孔会发生螺旋运动而加快磨损，以及很可能使内部插针插空松动而无法正常使用。

d) 电缆连接头装好后，应仔细检查插针是否位于正中，必要时应设法校正，使其对中，避免损坏待连接的连接器的插孔。

## 4. 时域测量简介

矢量网络分析能测量被测件的时域响应，被测件的时域反射或传输响应，显示是接近实时的。时域分析对于测量电缆结构（阻抗）的均匀性非常有用。

矢量网络分析先测量频率响应，然后通过内部计算机利用傅立叶反变换把频域信息转换成时域信息，X 轴为时间轴。矢量网络分析仪利用傅立叶变换技术对测量数据进行数学处理，可将频域数据和时域数据进行相互转换。

### 4.1 矢量网络分析有三种“频率——时间”转换模式：

- ★ 时域带通模式 (BAND PASS)
- ★ 时域低通阶跃模式 (LOW PASS, step response)
- ★ 时域低通脉冲模式 (LOW PASS, pulses response)

#### 4.1.1 时域带通模式

激励一个输入脉冲的时域响应来测量带限设备，虽然这种时域响应模式用起来很简单，但比低通模式的分辨率低。当在低频段使用门限时还可能会导致幅度测量误差。对于被测件不是带限的，建议使用低通模式测量。

这种模式之所以称为带通是因为该模式应用于频带受限的设备。传统的 TDR 要求待测件能够适应低端直到直流的频率，而用带通模式在测量频率范围上就没有限制。带通模式描述了待测件的脉冲响应。

在带通反射测量中，水平轴代表一个脉冲从一个测试端口发射到中断点并返回的时间。垂直轴的显示值取决于所选的格式。常用的格式如下表 1 所列。默认的格式是对数格式，它用 dB 单位显示回波损耗值。线性格式是一种反射系数  $\rho$  的响应格式。这可看作是中断点在测量全频段上的反射系数的平均值。实数格式只用在低通模式下。

表 1

| 格式  | 参 数                          |
|-----|------------------------------|
| 线性  | 反射系数（无单位）（ $0 < \rho < 1$ ）  |
| 实数  | 反射系数（无单位）（ $-1 < \rho < 1$ ） |
| 对数  | 回波损耗（dB）                     |
| SWR | 驻波比（无单位）                     |

#### 4.1.2 时域低通模式

##### ▲时域低通阶跃模式

在时域上施加一个阶跃激励信号。作为一种传统时域反射测量，可以测定空间不连续距离及间断点类型（电阻性、电容性、电感性）。

##### ▲时域低通脉冲模式

在时域上施加一个脉冲激励信号（如带通模式）。在频宽一定时，低通模式比带通模式能更好的进行时域处理，另外，使用低通模式还可测定间断点类型。

时域低通阶跃模式和时域低通脉冲模式两种时域低通模式被用来模拟传统时域反射计测量，提供的信息可断定当前的中断的类型（电阻，电容，电感）。低通模式提供了在频域上一定带宽下的最好的分辨率，它还可用来给出待测件的阶跃或脉冲响应。

低通模式的通用性比带通模式差，因为它在测量频率范围上有一些严格限制。低通模式要求频域数据在从直流到截止频率内是协调的，即：截止频率 =  $n \times$  起始频率，其中  $n$  是测量点数。

例如，起始频率为 30kHz，测量点数为 101 个，则截止频率为 3.03MHz。既然矢量网络分析频率范围从 30 kHz 开始，则直流频率响应就可从较低的频率数值上外推。

低通测量水平轴是双向传输时间的间断点（与带通模式一样）。光标显示双向时间和沿着轨迹的电长度。测定实际的物理长度，输入适当的速度因子。

垂直轴的显示依赖于所选的格式。低通模式下，频域的数据按相关的频率提取，并外推至直流。因为在傅立叶反变换中结果只有实数部分（虚部为零），该应用下的最有用的低通阶跃格式是实数格式，该模式类似于传统的 TDR 响应，即它显示了实数格式的反射信号（电压），水平轴为时间（长度）。

实数格式也能用在低通脉冲模式中，但如果要观察在最好的动态范围下观察大的和小的中断，请使用对数格式。

低通模式可模拟被测件的 TDR 响应，而这个响应包含断定中断类型的有用信息。下图 3 举例说明了已知中断类型的低通响应。所模拟的每个电路部分都表示了相应的低通时域模式下 S11 的响应波形。理论上，低通脉冲是由阶跃激励的导数。

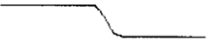
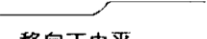
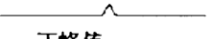
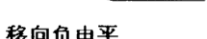
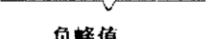
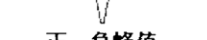
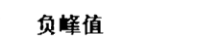
| 元件              | 阶跃 响应                                                                                           | 脉冲响应                                                                                             |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 开路器             | <br>一致反射       | <br>一致反射       |
| 短路器             | <br>一致反射, 180° | <br>一致反射, 180° |
| 阻抗<br>$R > Z_0$ | <br>移向正电平      | <br>正峰值        |
| 阻抗<br>$R < Z_0$ | <br>移向负电平      | <br>负峰值        |
| 电感              | <br>正峰值        | <br>正、负峰值      |
| 电容              | <br>负峰值      | <br>负、正峰值    |

图 3 低通时域模式下 S11 的响应波形

4.2 时域测量的长度（电长度）范围

在时域，范围定义为在没有突发副响应的测量中时间的长度。因为频域数据是在离散的频率点而不是频率带宽的连续点取得的，所以一个时域响应重复一个规则的时间间隔。

范围 =  $1/\Delta F$  = (测量点数-1)/频宽(Hz)

$\Delta F$  是两个相近频域数据点的间隔。

【例】：测量点数=201 点、频宽=1MHz 到 2.001GHz、频率间隔( $\Delta F$ )=10MHz，则：

范围 =  $1/\Delta F$  或 (测量点数-1)/频宽  
=  $1/(10 \times 10^6)$  或  $(201-1)/(2 \times 10^9)$   
=  $100 \times 10^{-9}$  秒  
电长度 = 范围  $\times$  光速 ( $3 \times 10^8$ )  
=  $100 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^8$   
= 30(米)

在本例中，范围是 100nS，或 30 米电长度。即传输测量中的被测件的电长度必须小于或等于 30 米（反射测量为 15 米）。

为增加时域测量范围，必须增加测量点数，但是增加测量点数会降低扫描速度。减小频宽也可增加范围，但会降低分辨率。