

是德科技

矢量网络分析的基本原理

应用指南

引言

网络分析是指设计制造人员和制造厂家对较复杂系统中所用元件和电路的电气性能进行测量的过程。当这些系统传送具有信息内容的信号时，我们最关心的是如何以最高效率和最小失真使信号从一处传递到另一处。矢量网络分析是通过测量元件对频率扫描和功率扫描测试信号的幅度与相位的影响，来精确表征元件特性的一种方法。

在本应用指南中，将回顾矢量网络分析的基本原理。讨论的内容包括可测量的通用参数，其中涉及散射参数(S参数)的概念。还对一些射频基本知识，如传输线和史密斯园图进行回顾。

是德科技公司能够提供各种各样用于在DC-110GHz范围内表征元件特性的标量网络分析仪和矢量网络分析仪。还可以为这些仪器提供各种选件，以简化实验室和生产环境中的测试。

通信系统中的测量要求

在任何通信系统中，都必须考虑信号失真的影响。尽管我们一般只考虑非线性效应引起的失真(例如，当所应用的载波信号引起互调失真时)，但纯粹的线性系统也可能引入信号失真。由于线性系统可能改变信号各个频谱分量的幅度或相位关系，所以有可能改变所通过信号的时间波形。

现在，我们来仔细的研究线性特性和非线性特性之间的差别。

线性器件使输入信号产生幅度和相位变化(图1)，在输入端出现的任何正弦曲线也将以相同频率出现在输出端，而不会形成新信号。无论是有源或是无源非线性器件，都可能使输入信号的频率偏离原来的位置，或增加其它频率分量，如谐波信号或寄生信号。过大的输入信号通常会迫使线性器件进入压缩或饱和状态，从而引起非线性工作。

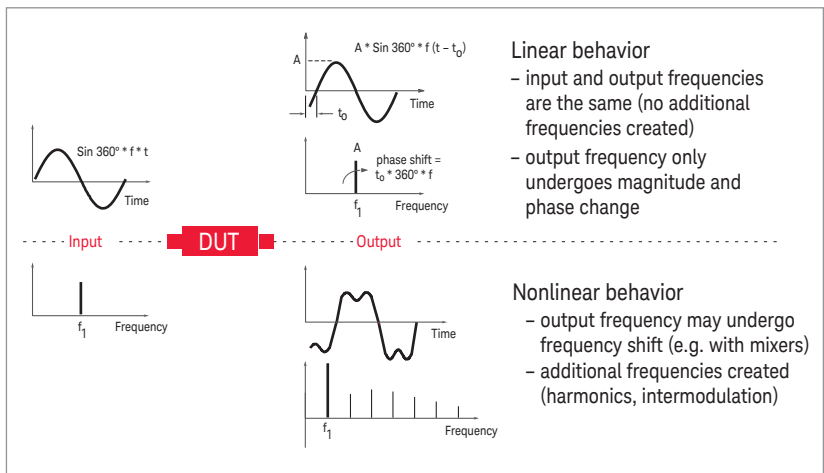


图1. 线性特征和非线性特征的比较

为了进行线性无失真的传输，被测器件(DUT)在所要求的整个带宽内，其幅度响应必须平坦，而相位响应必须呈线性。作为例子，我们来研究在经过带通滤波器时含有丰富高频分量的方波信号，该带通滤波器以很小的衰减让选定的频率通过，而通带之外的频率则有不同程度的衰减作用。

即使滤波器具有线性相位性能，方波的带外分量也将受到衰减。这使本例中的输出信号在本质上更具正弦属性(图2)。

如果在某一滤波器中通过相同的方波输入信号仅造成第3次谐波的相位倒置、而维持谐波幅度不变，则输出波形将更呈现出脉冲特征(图3)。一般来说，这种情况仅适用于本例中的滤波器，输出波形将依据幅度和相位的非线性情况呈现出任意形式的失真。

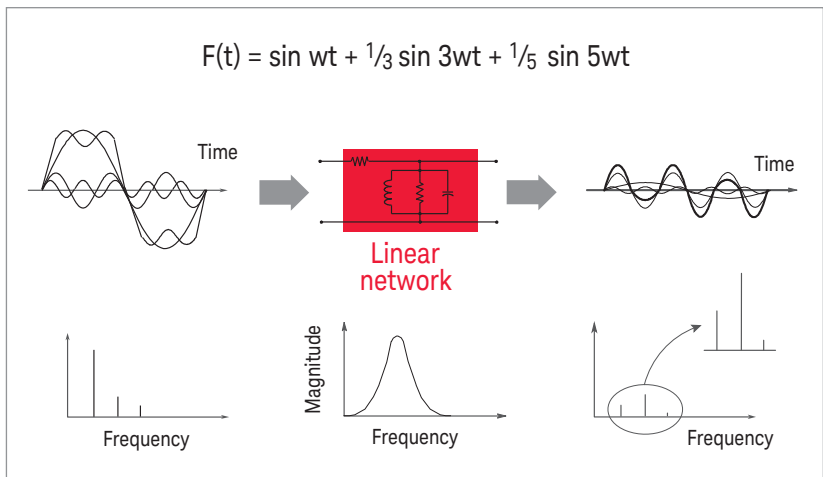


图2. 幅度随频率的变化

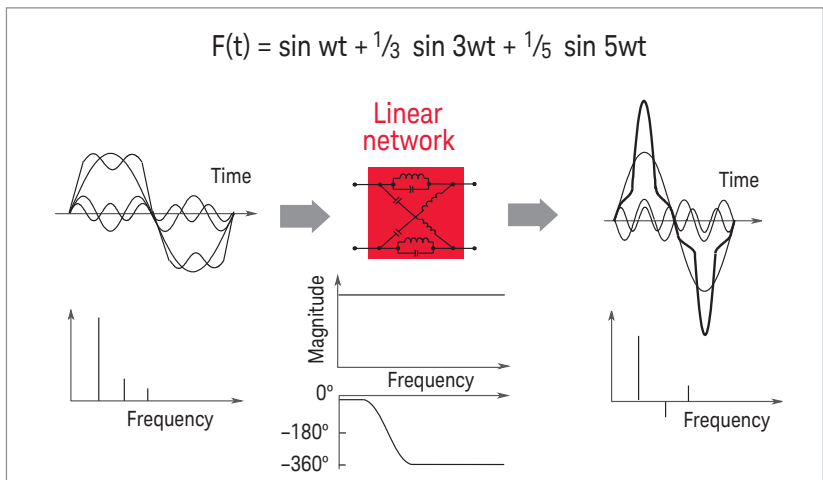


图3. 相位随频率的变化

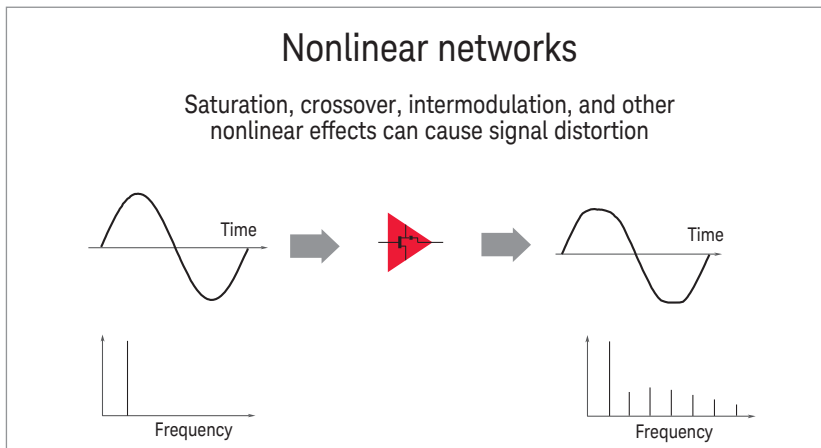


图4. 非线性感生失真

非线性器件也会引入失真(图4)。例如，当放大器被过激励时，由于放大器饱和而使输出信号限幅。输出信号不再是一个纯正的正弦信号，再输入频率的各个倍频程位置处存在谐波。无源器件在高功率电平上也可能呈现非线性特征。有关这方面的一个最佳例子是利用具有磁芯电感器的LC滤波器。磁性材料常常呈现出高度非线性的滞磁效应。

高效率传送功率是通信系统的另一个基本问题。为了高效率地传送、发射或接收射频功率，诸如传输线、天线和放大器这样一些器件都须对信号源呈现出良好的阻抗匹配。当两个连接器件之间的的输入与输出阻抗的实部和虚部都达不到理想状态时，便出现阻抗失配。

矢量测量的重要性

对各个分量的幅度和相位进行测量的重要性源于以下几个因素。首先，为了全面表征线性网络，确保无失真传输，的确需要进行这两种测量。其次，为了设计高效率匹配网络，必须测量复阻抗。最后，开发计算机辅助工程(CAE)电路仿真程序模型的工程师需要幅度和相位数据来进行精确模拟。

为了执行傅氏逆变换，时域表征亦需要幅度和相位信息。通过消除固有测量系统误差的影响来提高测量精度的矢量误差修正，也需要幅度和相位数据来建立有效误差模型。即使对一些标量测量(如回波损耗)，为了获得高精度，相位测量能力也十分重要。

入射功率和反射功率的基本概念

在网络分析的基本形式中，包含测量沿传输线行进的入射波、反射波和传输波。利用光波长作为类比，当光投射到一个透明的透镜上时(入射能量)，一部分光从透镜表面反射，但大部分光继续通过透镜(传输能量)(图5)。若透镜具有镜面，则大部分光将被反射，少量或没有通过透镜。

虽然射频信号和微波信号的波长不相同，但原理是一样的。网路分析仪能精确测量入射能量、反射能量和传输能量。例如，在传输线上发送的能量，沿传输线反射回发射源的能量(由于阻抗失配)以及顺利地传送至终端装置(如天线)的能量。

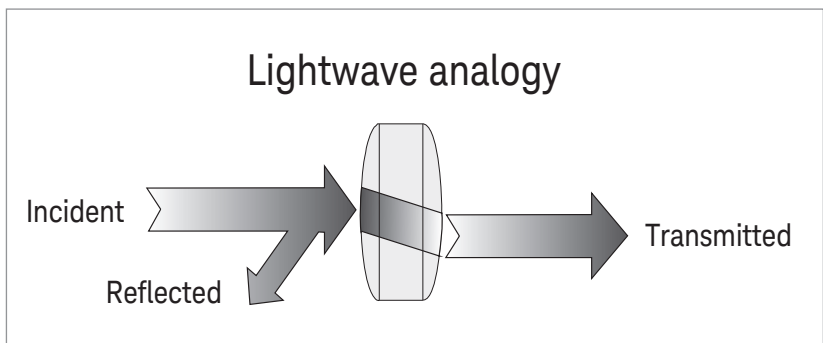


图5. 光波与高频器件特征的类比

史密斯圆图

对一个器件进行表征时所发生的反射大小取决于入射信号“看到的”阻抗。由于任何阻抗都能用实部和虚部($R+jX$ 或 $G+jB$)表示，故可以将它们绘制在所谓复阻抗平面的直线网络上，遗憾的是，开路(一种常见的射频阻抗)在实轴上表现为无限大，因而无法表示出来。

极坐标图由于包括了整个阻抗平面因而具有重要使用价值，然而，它并不直接绘出阻抗曲线，而是以矢量形式显示出复反射系数，适量的大小对应于距显示器中心的距离，而相位则显示为矢量相对于从中心到右边沿水平直线的角度。极坐标图的缺点是不能直接从显示读取阻抗值。

由于复阻抗与反射系数两者之间有一一对应的关系，故复阻抗平面的正实半部分可以映射到极坐标显示上。结果便形成了史密斯圆图。所有电抗值和从0到无限大的所有正电阻值均落在史密斯圆图内(图6)。

在史密斯圆图上，恒定电阻的轨迹表现为圆，而恒定电抗的轨迹表现为圆弧。史密斯圆图上的阻抗总是指对所考察的元件或系统的特性阻抗进行归一化后的阻抗，通常对射频和微波系统来说特性阻抗是 50Ω ，而对广播和有线电视系统特性阻抗则为 75Ω 。理想的终端位于史密斯圆图的中心。

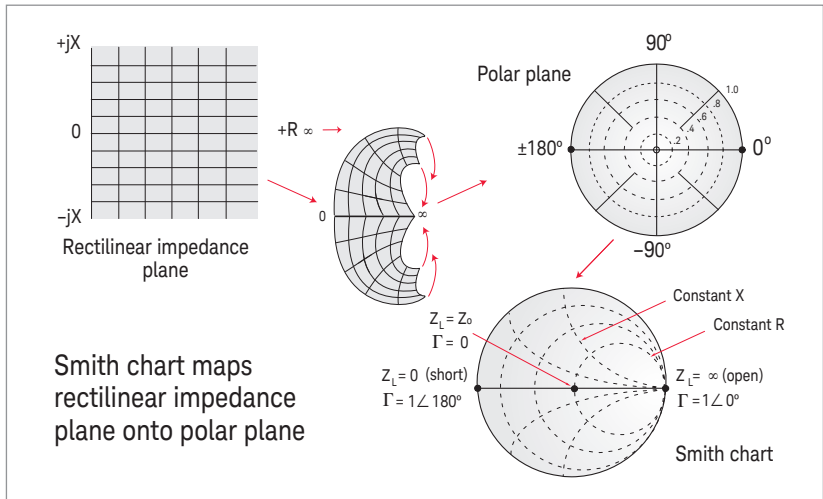


图6. 史密斯圆图

功率传送条件

给定源电阻为 R_s 及负载电阻为 R_L 时，为了将最大功率传送到负载，在两个器件的连接处必须满足理想的匹配条件。 $R_L=R_s$ 时，无论激励是直流电压源还是射频正弦波源，均能实现这一条件(图7)。

如果源阻抗不是纯电阻，那么，只有当负载阻抗与源阻抗呈现复数共轭时，才能产生最大功率传送。这个条件由对阻抗虚部取相反符号来满足。例如，若 $R_s=0.6+j0.3$ ，则复数共轭为 $R_s=0.6-j0.3$ 。

需要高效率的功率传送是在较高频率上使用传输线的主要原因之一。在很低的频率(波长非常长)处，简单的导线便适于传导功率。导线的电阻相当小，对低频信号的影响也很小。电压和电流均相同，在导线上何处进行测量则无关紧要。

在较高频率上，波长与高频电路中导体的长度相当或者更小，而功率传输可以认为是以行波方式实施。当传输线的终端负载等于其特性阻抗时，便有最大功率传送至负载。当终端负载与特性阻抗不相等时，则未被负载吸收的那部分信号将被反射回信号源。

若传输线的终端负载等于其特性阻抗时，便没有反射信号，因为所传输的功率均被负载吸收(图8)。观察射频信号包络随传输线距离的变化并未发现驻波，这是因为没有反射，能量只在一个方向上流动。

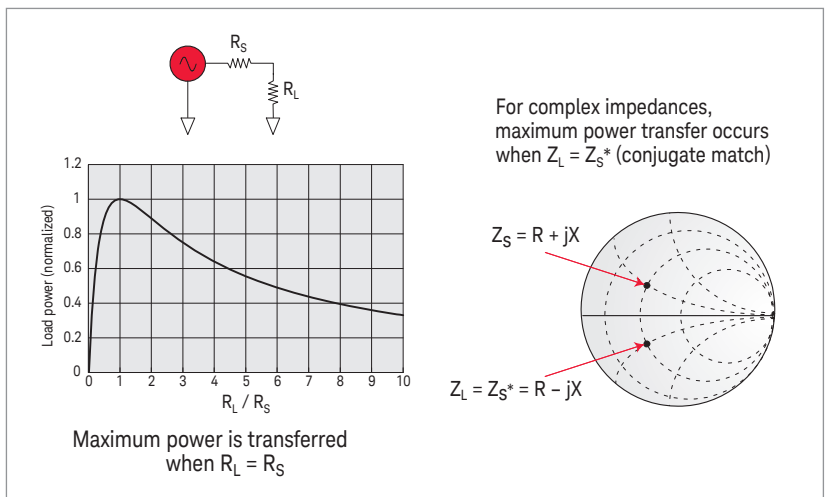


图7. 功率传送

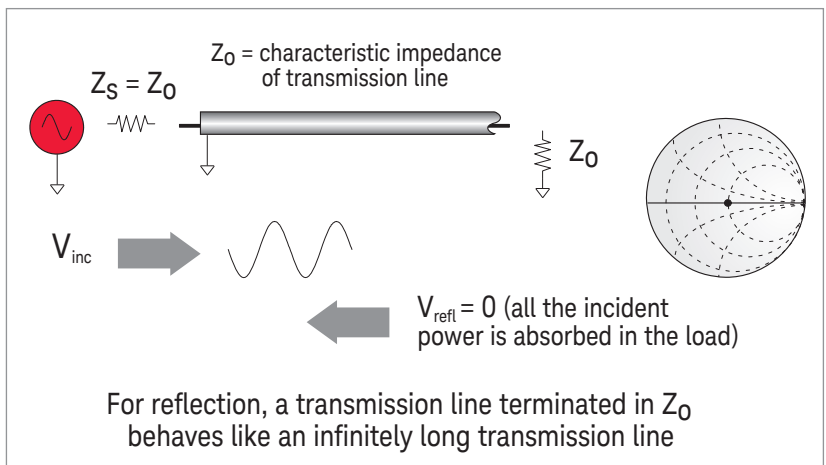


图8. 用 Z_0 端接的传输线

当传输线终端短路时(短路不能维持电压, 因而耗散功率为零), 反射波沿传输线返回到信号源(图9)。反射电压波的大小必然等于入射电压波; 而相位在负载平面处则与入射波相差 180° 。反射波与入射波的大小相等, 但按相反方向行进。

若传输线的终端开路(开路不能维持电流), 反射电流波的相位将与入射电流波相差 180° , 而反射电压波则在负载平面上与入射电压波同相。这便保证在开路处的电流为0。反射电流波和入射电流波的大小相等、但按相反方向进行。对于短路和开路两种情况, 在传输线上都会建立驻波。电压谷值将为0, 而电压峰值将为入射电压电平的2倍。

若传输张终端接入譬说一个 25Ω 的电阻器, 导致介于全吸收和全反射之间的状态, 则部分入射功率被吸收, 部分入射功率被反射。反射电压波的幅度将是入射波幅度的 $1/3$, 且两种波在负载平面处的相位相差 180° 。驻波的谷值不再为0, 而峰值则小于短路和开路情况的峰值。峰值和谷值之比将是 $2:1$ 。

确定射频阻抗的传统方法是利用射频探针/检波器、一段开槽传输和一个VSWR(电压驻波比)测试仪来测量VSWR。当探针沿传输线移动时, 测试仪便记下峰值和谷值的相对位置和数值。根据这些测量, 便可导出阻抗。在不同的频率上, 可以重复此测量步骤。现代网络分析仪能在频率扫描期间直接测量入射波和反射波, 阻抗结果可以用多种格式(包括VSWR)显示出来。

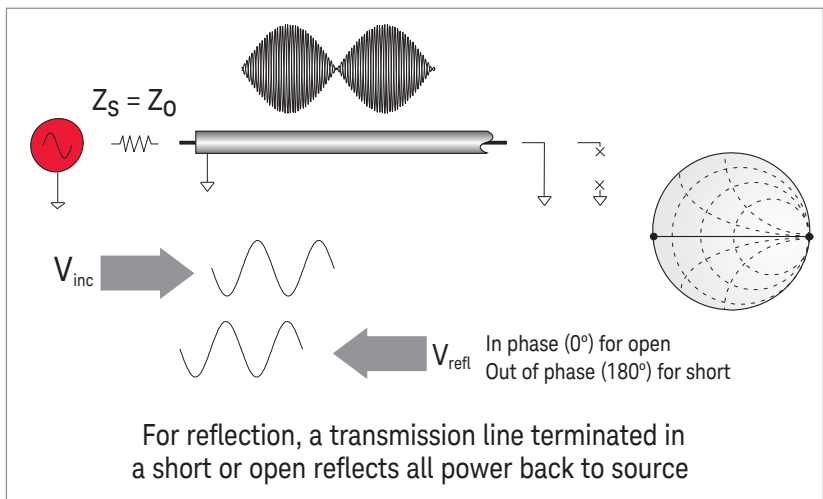


图9. 终端短路, 开路的传输线

网络分析的名词术语

理解了电磁波的一些基本知识之后，我们还须掌握测量所用的常用术语。在网络分析仪的名词术语中，一般用R或参考通道表示测量入射波。反射波用A通道测量，而传输波则用B通道测量(图10)。利用这些波中的幅度和相位信息；便能定量描述被测器件(DUT)的反射和传输特性，反射和传输特性可以表示为矢量(幅度和相位)，标量(只有幅度)或只有相位的量。例如，回波损耗是反射的标量测量，而阻抗则是矢量反射测量。比值测量法可以使我们在进行反射和传输测量时不会受到绝对功度和源功率随频率变化产生的影响。反射量的比值常常表示为A/R，而传输量的比值表示为B/R，它们与仪器中的测量通道有关。

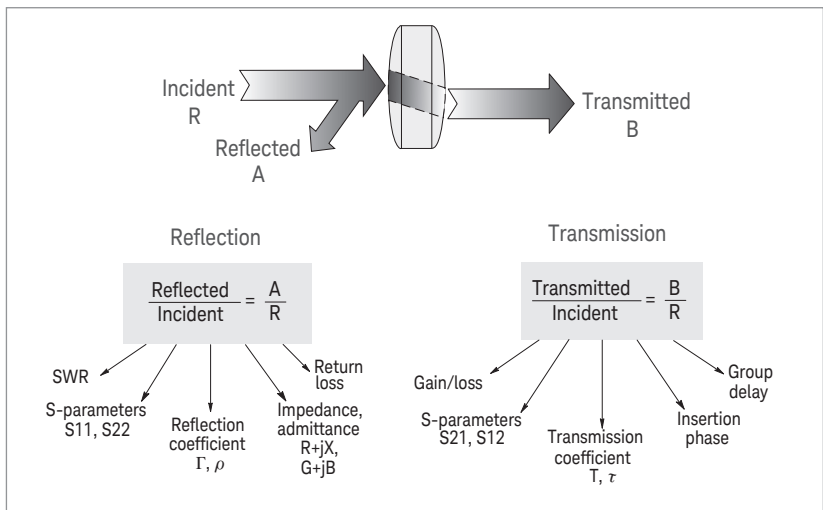


图10. 说明高频器件特征的常用术语

反射量比值表示的最一般术语是复反射系数G图11。G的幅值称为 ρ 。反射系数是反射信号电压电平与入射信号电压电平之比。例如，终端负载，阻抗等于特性阻抗 Z_0 的传输线将把全部能量传送至负载，所以 $V_{refl}=0$ 和 $\rho=0$ ，当负载阻抗 Z_L 不等于特性阻抗时，能量即被反射， ρ 大于0。当负载阻抗为短路或开路时，全部能量被反射， $\rho=1$ 。因此， ρ 取值范围为0~1。

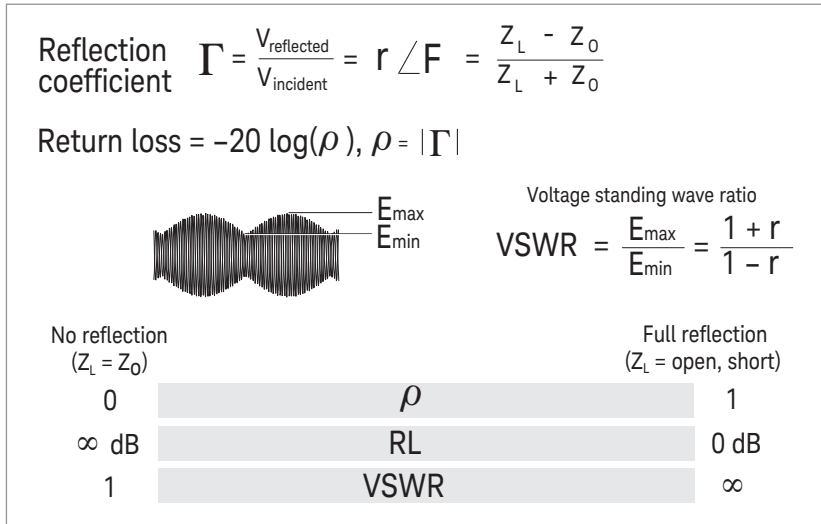


图 11. 反射参数

回波损耗是用对数项 (dB) 表示反射系数的一种方法。回波损耗是反射信号低于入射信号的 dB 数。回波损耗总是表示为正数，且在无限大 (对具有特性阻抗的负载) 和 0 dB (对开路或短路) 之间变化。另一个用来表示反射的常用术语是电压驻波比 (VSWR)。VSWR 定义为射频络的最大值与射频包络的最小值之比。它与 ρ 的关系为 $(1+\rho)/(1-\rho)$ 。VSWR 的数值范围从 1 (无反射) 到无限大 (全反射)。

传输系数定义为被传输的电压除以入射电压 (图 12)，若被传输电压的绝对值大于入射电压的绝对值，则认为被测器件或系统具有增益。若被传输电压的绝对值小于入射电压的绝对值，则认为被测器件或系统具有衰减或插入损耗。传输系数的相位部分称为插入相信。

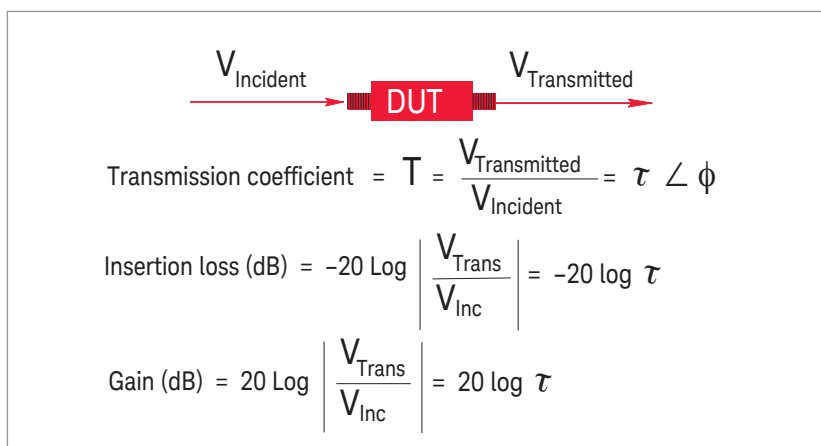


图 12. 传输参数

通常，直接考察插入相们并不能提供有用信息。这是因为，由于被测器件的电长度，使插入相们相对于频率具有很大的(负)斜率。该斜率正比于被测器件的电长度。由于与线性相们的这一偏差是唯一能引起通信系统失真的原因，故要求去掉相们响应的线性部分，以便对于余下的非线性部分进行分析。为此，可以利用网络分析仪的延迟特性自动抵消被测器件的平均电长度。结果是相们失真或偏离线性相们的高分辨率显示(13图)。

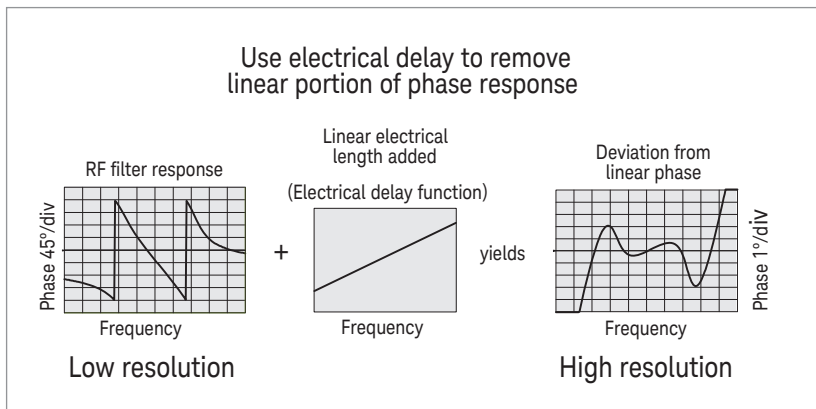


图 13. 与线性相位的偏离

测量群时延

相们失真的另一个有用量度是群时延(图 14)。这个参数是信号通过被测器件的渡越时间随频率变化的量度。群时延可以由对被测器件的相位响应随时间的变化取微分进行计算。它将相位响应的线性部分简化为一个恒定值，再将对线性相们的偏离变换为对恒定群时延的偏离(这将引起通信系统中的相们失真)。平均延时代表信号通过被测器件的平均渡越时间。

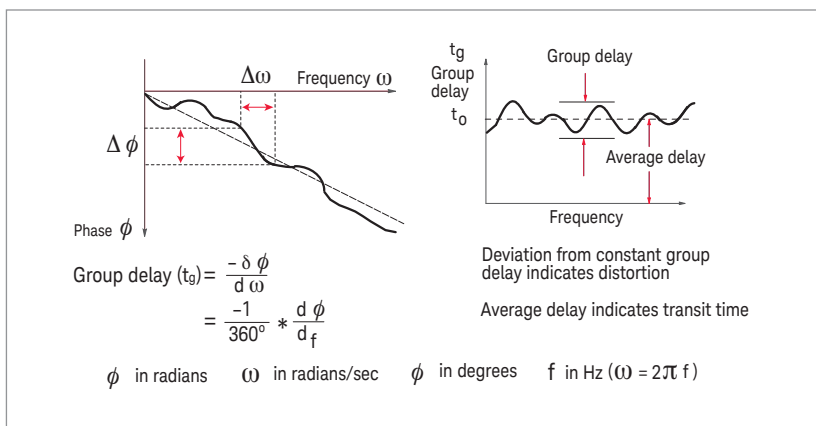


图 14. 群延时的定义

依据器件的不同，与线性相位和群延时的偏离都有可能需要测量，因为两者都很重要。规定器件中的最大峰-峰相位波动可能不足以全面反映器件的特性，因为相位波动的斜率取决于每单位频率发生的波动次数。群延时则考虑了这种情况，因为它是经微分的相位响应。利用群延时往往更便于说明相位失真的迹象(图15)。

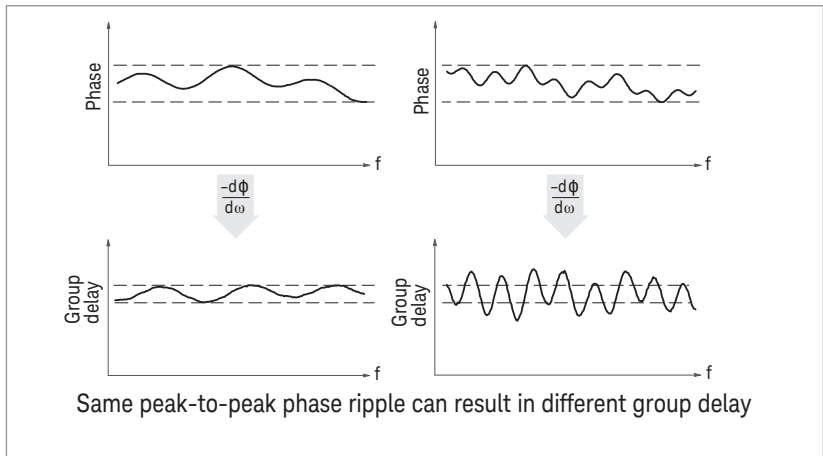


图15. 为什么要测量群时延？

网络的表征

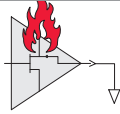
为了全面表征一个未知的线性二端口器件，我们必须在不同的条件下进行测量并计算一组参数，即便在源和负载条件与测量不相同的场合，这些参数也能用来全面描述所测试器件(或网络)的电气性能。低频器件或网络的表征通常是建立在测量H、Y和Z参数的基础上，为此，必须测量器件的输入或输出端口上或网络节点上的总电压和总电流，而且测量必须在开路状态和短路状态下进行。

由于很难测量高频总电流或总电压，故通常代之以测量S参数(图16)。这些S参数与一些熟悉的测量，如增益、损耗和反射系数均有联系。它们能相当简单的加以测量，而无需将不适宜的负载连接到被测器件上。测得的多个器件的S参数可以利用矩阵运算预示整个系统的性能。S参数无论在线性或非线性CAE电路仿真工具中都非常容易使用，而H、Y和Z参数在必要时则可从S参数导出。

对于给定器件，S参数的数量等于端口数的平方。例如，二端口器件有4个S参数。S参数的编号习惯是，S之后的第一个数字是能量出射的端口，而第二个数字则是能量进入的端口。因此， S_{21} 是由于对端口1加入射频激励而从端口2输出功率的量度。当数字相同(例如 S_{11})时，便表示为反射测量。

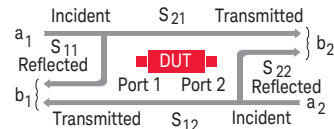
H, Y, and Z parameters

- Hard to measure total voltage and current at device ports at high frequencies
- Active devices may oscillate or self-destruct with shorts or opens



S-parameters

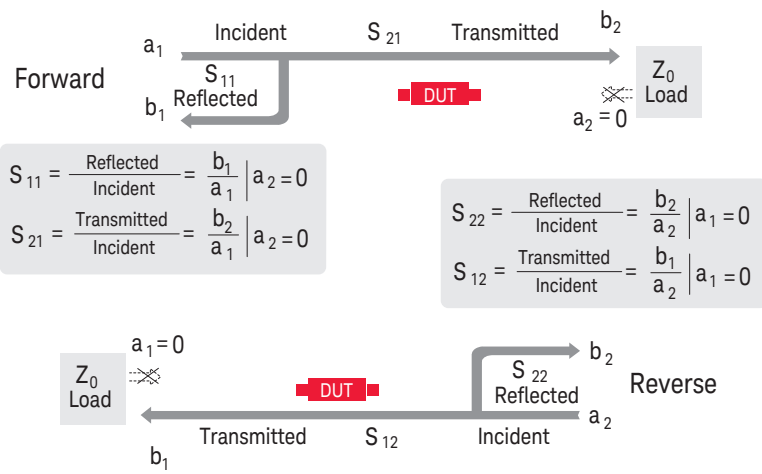
- Relate to familiar measurements (gain, loss, reflection coefficient, etc.)
- Relatively easy to measure
- Can cascade S-parameters of multiple devices to predict system performance
- Analytically convenient
 - ▲ CAD programs
 - ▲ Flow-graph analysis
- Can compute H, Y, or Z parameters from S-parameters if desired



$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$

图 16. H、Y 和 Z 参数的局限性 (为什么要使用 S 参数?)



Forward

$$S_{11} = \frac{\text{Reflected}}{\text{Incident}} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

$$S_{21} = \frac{\text{Transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

$$S_{22} = \frac{\text{Reflected}}{\text{Incident}} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

$$S_{12} = \frac{\text{Transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

Reverse

图 17. 测量 S 参数

正向 S 参数由输出端接入精确等于测试系统特性阻抗的负载时，测量入射信号、反射信号和传输信号的幅度与相位确定。在简单二端口网络的情况下， S_{11} 等效于被测器件的输入复反射系数或阻抗，而 S_{21} 则是正向复传输系数。将信号源置于被测器件的输出端口以及用理想负载接入输入端口，便能测量另两个（反向）S 参数。参数 S_{22} 等效于被测器件的输出复反射系数或输出阻抗，而 S_{12} 则是反向复传输系数（图 17）。

Related Literature

Exploring the Architectures of Network Analyzers, Application Note 1287-2, Literature number 5965-7708E

Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements, Application Note 1287-3, Literature number 5965-7709E

Network Analyzer Measurements: Filter and Amplifier Examples, Application Note 1287-4, Literature number 5965-7710E

myKeysight

myKeysight
www.keysight.com/find/mykeysight
个性化视图为您提供最适合自己的信息！



3年保修
是德科技卓越的产品可靠性和广泛的3年保修服务完美结合，从另一途径帮助您实现业务目标：增强测量信心、降低拥有成本、增强操作方便性。



是德科技保证方案
www.keysight.com/find/AssurancePlans
5年的周密保护以及持续的巨大预算投入，可确保您的仪器符合规范要求，精确的测量让您可以继续高枕无忧。



www.keysight.com/quality
Keysight Electronic Measurement Group
DEKRA Certified ISO 9001:2008
Quality Management System

是德科技渠道合作伙伴
www.keysight.com/find/channelpartners
黄金搭档：是德科技的专业测量技术和丰富产品与渠道合作伙伴的便捷供货渠道完美结合。

www.keysight.com/find/NA

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息，请与是德科技联系。如欲获得完整的产品列表，请访问：
www.keysight.com/find/contactus

请通过 Internet、电话、传真得到测试和测量帮助。

热线电话：800-810-0189、400-810-0189
热线传真：800-820-2816、400-820-3863

是德科技(中国)有限公司

地址：北京市朝阳区望京北路3号
电话：(010) 64397888
传真：(010) 64390278
邮编：100102

上海分公司

地址：上海市虹口区四川北路1350号
中信泰富申虹广场5楼、16-19楼
电话：(021) 36127688
传真：(021) 36127188
邮编：200080

广州分公司

地址：广州市天河区北路233号
中信广场66层07-08室
电话：(020) 38113988
传真：(020) 86695074
邮编：510613

成都分公司

地址：成都高新区南部园区
天府四街116号
电话：(028) 83108888
传真：(028) 85330830
邮编：610041

深圳分公司

地址：深圳市福田区
福华一路六号免税商务大厦3楼
电话：(0755) 83079588
传真：(0755) 82763181
邮编：518048

西安分公司

地址：西安市碑林区南关正街88号
长安国际大厦D座5/F
电话：(029) 88867770
传真：(029) 88861330
邮编：710068

是德科技香港有限公司

地址：香港北角电气道169号25楼
电话：(852) 31977777
传真：(852) 25069292

香港热线：800-938-693
香港传真：(852) 25069233