



射频电路测试原理

第九讲 射频矢量网络分析仪(VNA)

leiyh@mail.tsinghua.edu.cn



参考文献

- 《射频电路设计--理论与应用》，王子宇译，电子工业出版社，2002年
- 《现代网络频谱测量技术》，吕洪国编，清华大学出版社，2000
- Agilent仪器说明书\8753ES_RF矢量网络分析仪\User's Guide_08753-90472
- ..\Understanding the Fundamental Principles_5965-7707E
- ..\Characterize High-Power Components_5966-3319E
- ..\Filter and Amplifier Examples_5965-7710E
- ..\Measurements of Frequency-translating Devices_5966-3318E
- ..\RF Component Measurements_Amplifier_5956-4361
- ..\RF VNA_10 Hints_5965-8166E
- ..\Data Sheet_5968-5160E



内容

9.1 射频矢量网络分析仪的基本结构

9.2 射频矢量网络分析仪的工作原理

9.3 误差模型与校准

9.4 典型器件特性测量简介

第三次实验 射频矢量网络分析仪的使用

第九讲 射频矢量网络分析仪小结

9.1 射频矢量网络分析仪的基本结构

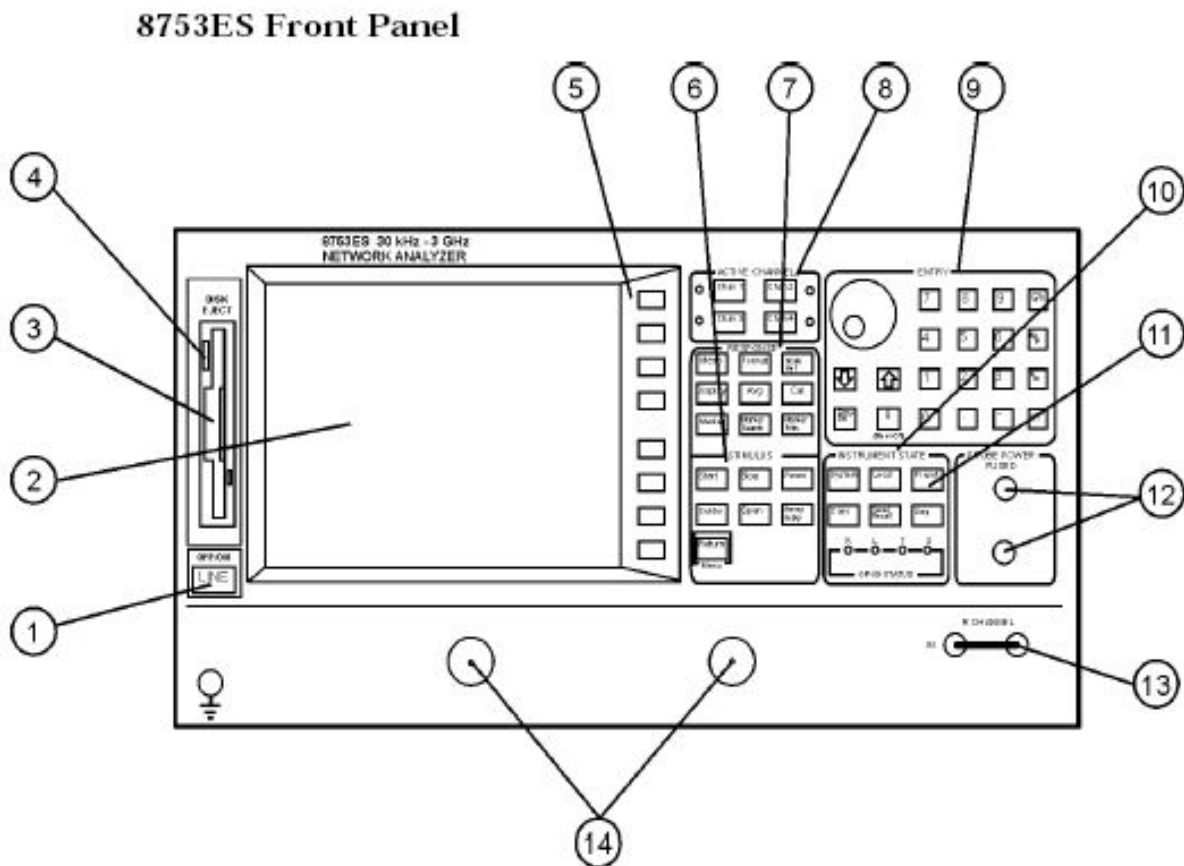
- 8753ET集成化
传输/反射测量
(正向测量)。

- 8753ES集成化
S参数测量
(正向和反向测量)。



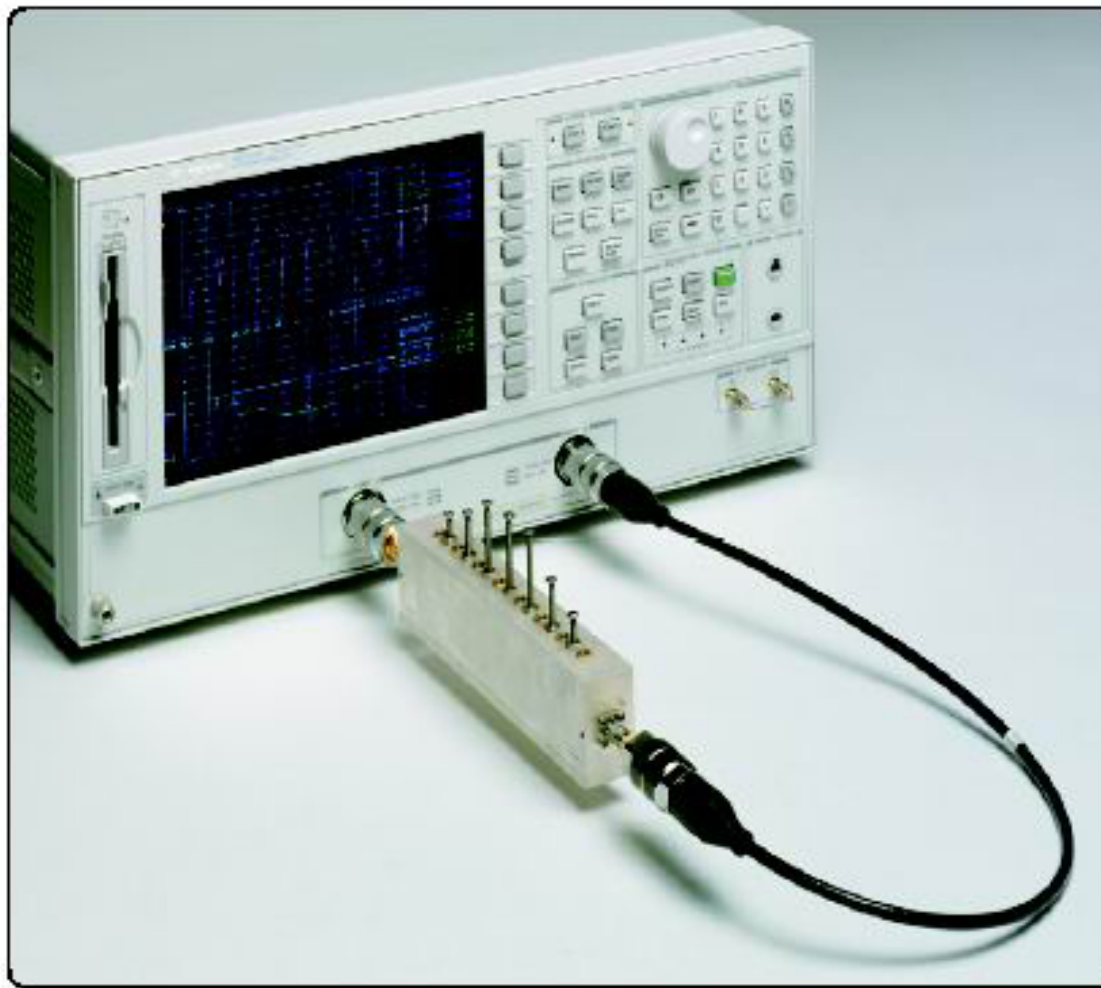
基本结构

1. 电源开关
2. 显示屏幕
3. 软盘驱动器
4. 软盘退出键
5. 软功能键
6. 激励信号源功能键组
7. 响应功能键组
8. 显示通道选择键
9. 数字量等输入硬键
10. 仪器功能键组
11. 复位键
12. 探头电源连接器
13. R通道连接器
14. 测试端口1和端口2



基本结构(续1)

- 滤波器测试连接
(二端口测试)。



基本结构(续2)

对于功率分配器和定向耦合器，它们有九个S参数，需要进行三端口测试。

本机没有Option H39，不能进行三端口器件测试。

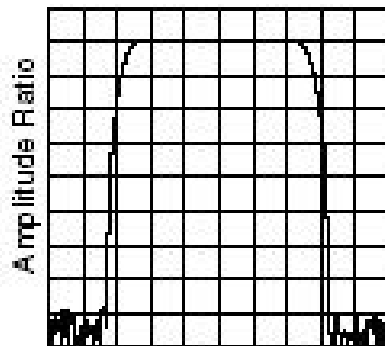


现有选件：

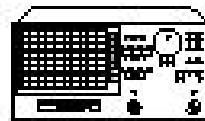
- 1D5 (High Stability Frequency Reference)
- 006 (6 GHz Operation)
- Option 010 (时域功能--本机没有)
- Option 014 (前面板按用户的需要来设置信号的路径--本机没有)



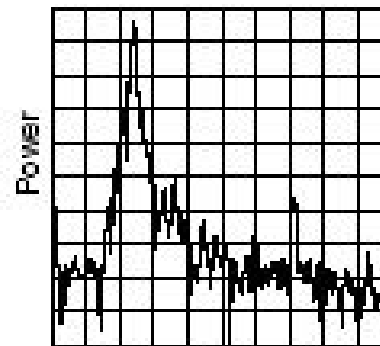
网络分析仪与频谱分析仪的区别



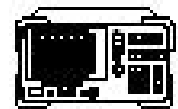
Frequency



Measures
known
signal



Frequency



Measures
unknown
signals

Network analyzers:

- measure components, devices, circuits, sub-assemblies
- contain source and receiver
- display ratioed amplitude and phase (frequency or power sweeps)
- offer advanced error correction

Spectrum analyzers:

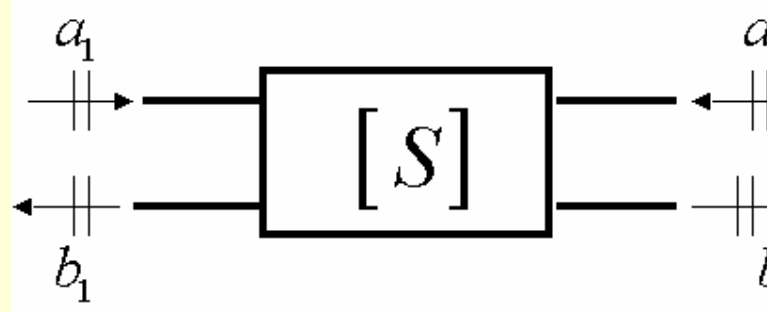
- measure signal amplitude characteristics (carrier level, sidebands, harmonics, etc.)
- can demodulate (& measure) complex signals
- are receivers only (single channel)
- can be used for scalar component test (no phase) with tracking gen. or ext. source(s)

Differences between Network and Spectrum Analyzers

9.2 射频矢量网络分析仪的工作原理

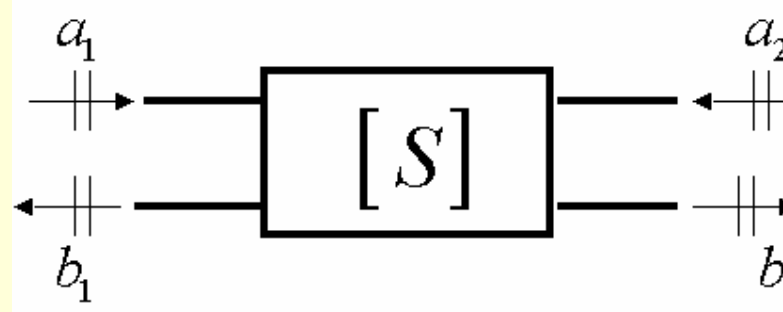
- 网络分析是在所关心的频率范围内，通过**激励—响应测试**来建立**线性网络**的**传输与阻抗特性**的数据模型的过程。
- 在频率较低时，网络的特性常用阻抗参数矩阵 Z 或导纳参数矩阵 Y 来描述其端口特性（还有 H 参数矩阵和 $ABCD$ 参数矩阵）。
- 这些参数的定义是基于电压电流的概念，因而测量时需要在一定的端口条件下，如开路或短路，测出特定的电压或电流来确定各个参数。
- 但在微波频率下，这种测量方法不再适合。因为在高频下，电压和电流很难测量。
- 在微波频段，因为采用了波的概念，所以微波网络常用 S 参数表示。**双口网络都可以用4个 S 参数来表示其端口特性。**

S参数

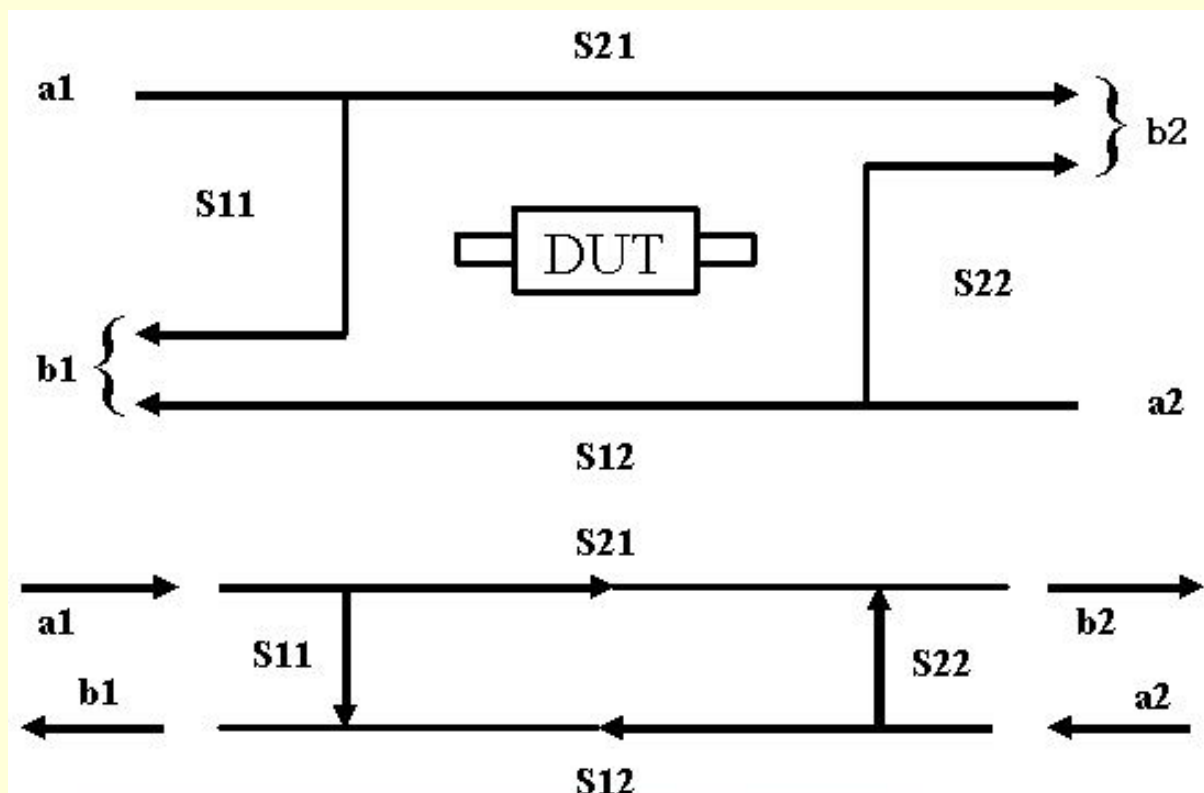


- S参量表达的是**功率波**，可以用入射功率波和反射功率波的方式来定义网络的输入、输出关系。
- 当在端口1加有入射波 a_1 时，其中一部分由于该端口的失配而被反射，成为该端口出射波 b_1 的一部分； a_1 的其余部分经网络传输到端口2，成为端口2的出射波 b_2 的一部分。同样，若当在端口2也有入射波 a_2 时，分析相同。
- 把端口1的两股出射波合在一起构成 b_1 ，把端口2的两股出射波合在一起构成 b_2 。

网络的S参数



- 二端口网络的信号流图。
- DUT : device under test.



S参数的定义

- 按上图中入射波和反射波的方向，就可以定义S参量：

$$\begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases}$$

其中符号的意义为：

$$a_2 = 0 \Rightarrow S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$

是在端口2匹配情况下端口1的反射系数

$$a_2 = 0 \Rightarrow S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$$

是在端口2匹配情况下的正向传输系数

$$a_1 = 0 \Rightarrow S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$$

是在端口1匹配情况下端口2的反射系数

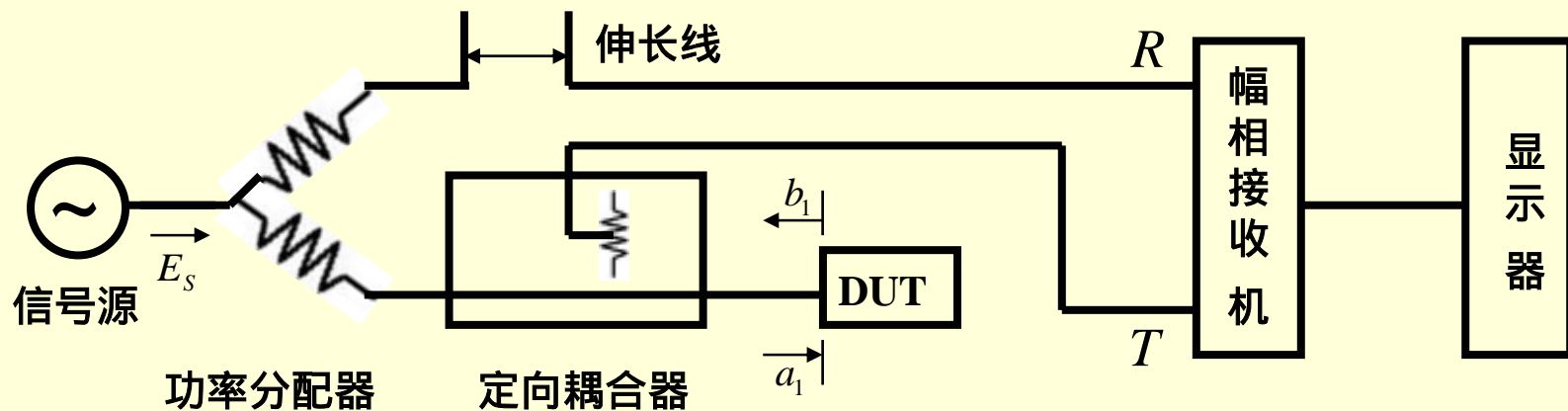
$$a_1 = 0 \Rightarrow S_{12} = \frac{b_1}{a_2}$$

是在端口1匹配情况下的反向传输系数

上述条件（ $a_1 = 0$ 或 $a_2 = 0$ ）在两端传输线分别匹配时才成立。

反射与传输测量原理

反射参数测量系统：



■ 设信号源的出射波为 E_S ，电阻式功率分配器的分配系数分别为 c_1 和 c_2 ，投向DUT的入射波为 a_1 ，参考道通的信号为 R 。定向耦合器将负载反射波 b_1 耦合到测试道通，信号为 T ，耦合系数为 c_3 。于是可以写出：

$$R = c_1 E_S, a_1 = c_2 E_S, b_1 = \Gamma_L a_1, T = c_3 b_1 \Rightarrow \frac{T}{R} = \frac{c_3 b_1}{c_1 E_S} = \frac{c_3 c_2}{c_1} \Gamma_L$$

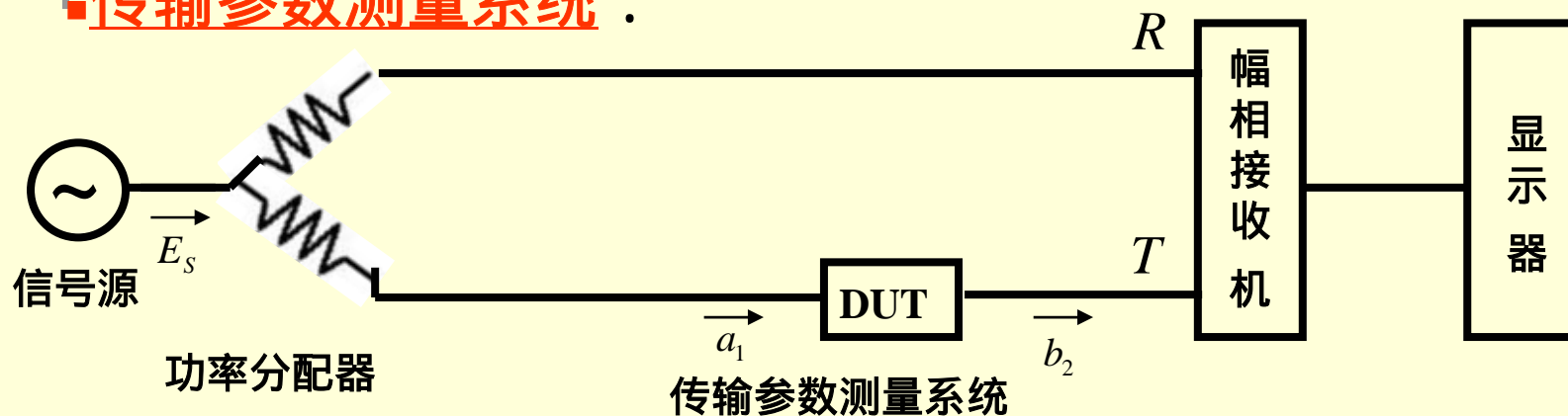
$$R = c_1 E_S, a_1 = c_2 E_S, b_1 = \Gamma_L a_1, T = c_3 b_1 \Rightarrow \frac{T}{R} = \frac{c_3 b_1}{c_1 E_S} = \frac{c_3 c_2}{c_1} \Gamma_L$$

反射与传输测量原理(续1)

- 由上图可见，只要测出T/R的复数比值，便能得出DUT的反射系数，而系数 $c_2 c_3 / c_1$ 为常数，可通过校准而消除之。
- 幅相接收机对输入的两路射频信号R和T先进行混频，然后在中频下进行幅度比较和相位比较，结果在显示屏上示出。
- 该系统使用的功率分配器和定向耦合器是两个重要的微波部件，前者的作用是把信号源的输出信号分成两路，分别作为参考信号和测试信号；后者的作用是把测试信号加于DUT的测试端口，并取出反射信号。
- 在参考通道内接一段长度可变的传输线，其作用是补偿两个通道的传输路径差。在系统校准时，起相位补偿的作用。

反射与传输测量原理(续2)

■ 传输参数测量系统：



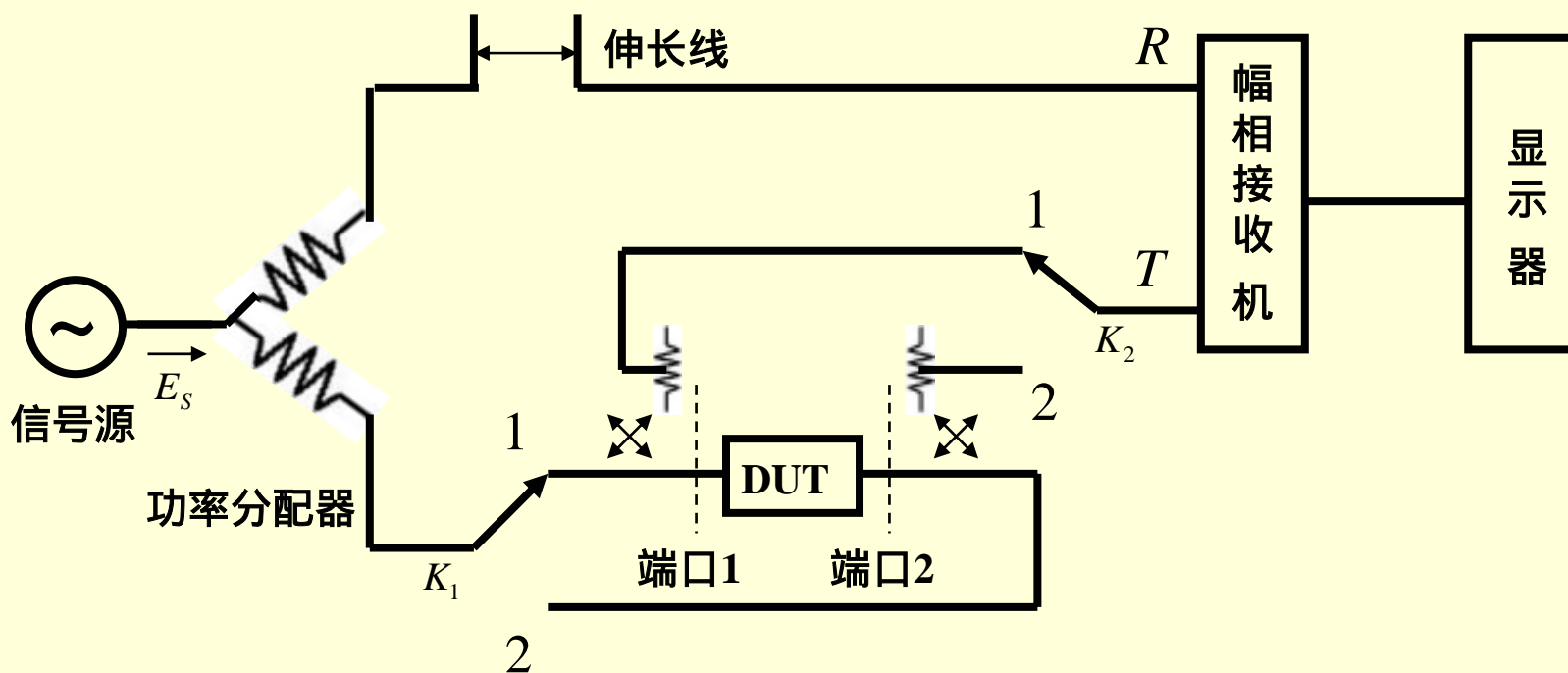
- 设信号源的出射波为 E_s ，电阻式功率分配器的分配系数分别为 c_1 和 c_2 ，投向DUT的入射波为 a_1 ，DUT的传输系数为 S_{21} 。于是可以写出：

$$R = c_1 E_s, a_1 = c_2 E_s, b_2 = S_{21} a_1 = c_2 E_s S_{21} = T \Rightarrow \frac{T}{R} = \frac{c_2}{c_1} S_{21}$$

- 只要测出 T/R 的复数比值，便能得出DUT的传输系数，而系数 c_2/c_1 为常数，可通过校准而消除之。

反射与传输测量原理(续3)

反射参数和传输参数测量系统：



■在反射参数和传输参数测量系统中增加两个微波开关，即可测试四个S参数。

反射与传输测量原理(续4)

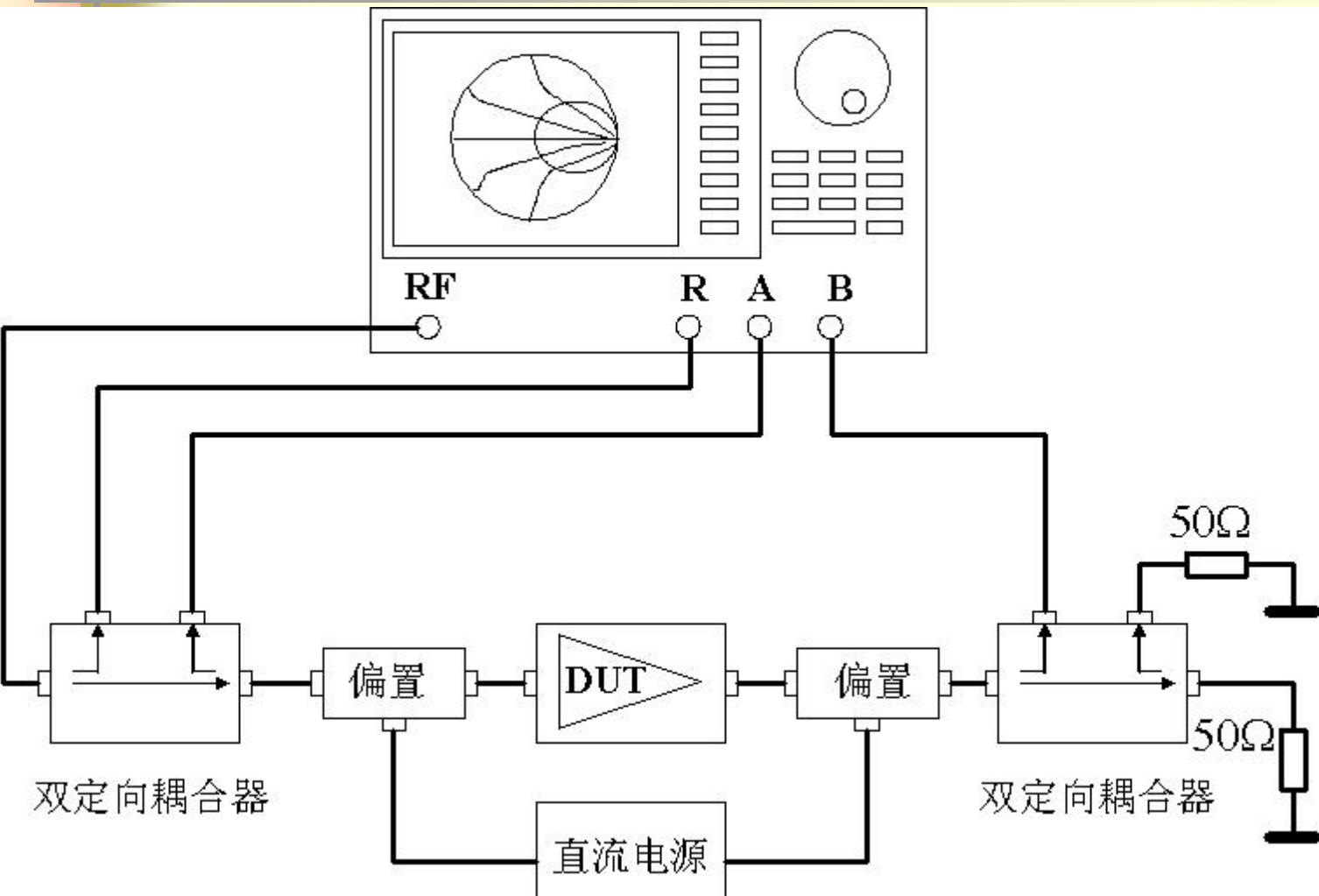
- 上图中两个微波开关的位置与四个S参数之间对应关系如下：

K1和K2的位置		选测的S参数
1	1	S_{11}
1	2	S_{21}
2	1	S_{12}
2	2	S_{22}

- 显然，采用上图所示的双向反射和传输参数测试系统时，在DUT连接好了以后，只要改变K1和K2的位置，可以测出双口网络的全部4个S参数。

- 在实际的双向S参数测试系统中（例如8753ES），K1和K2一般是可以程控的，这样更便于在自动测试系统中使用。

测试方框原理图



[返回一](#)

[返回二](#)

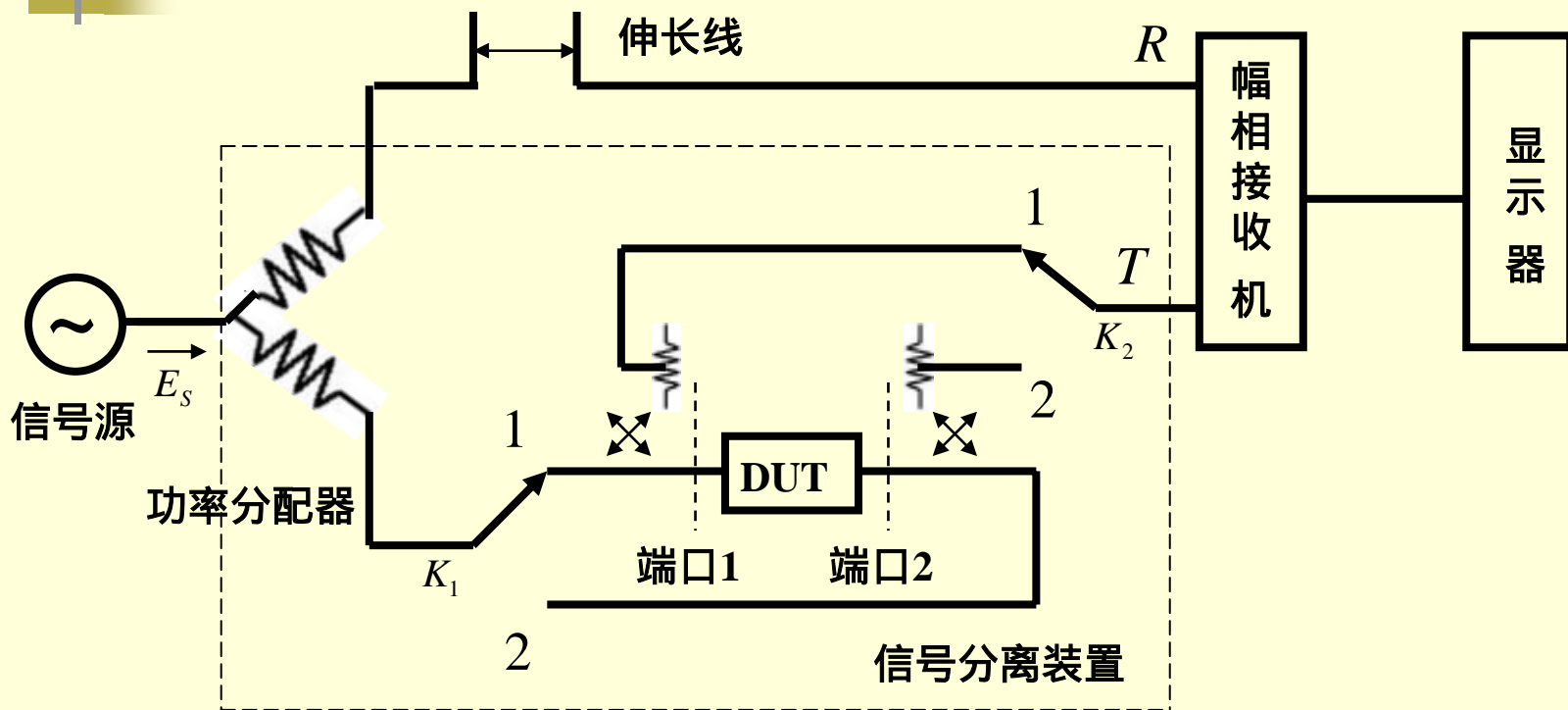
[返回三](#)

[返回四](#)

[返回五](#)

[返回六](#)

反射参数和传输参数测量系统



- 需要四部分：信号源，信号分离装置，幅相接收机，显示器（含数据处理）。



信号源

- 信号源提供对系统的激励。
- 信号源是频率扫描源或功率扫描源（幅度扫描）。
- 网络分析仪的信号源采用集成化频率综合器。

信号分离装置

- 信号分离装置必须有两种功能：
 - 第一个功能是测量入射信号的一部分作为求比值的参考，这可由功率分配器或定向耦合器完成；
 - 第二个功能是在被测件（DUT）的输入端分离出入射波（正向）和反射波（反向），采用定向耦合器或电桥。
- 功率分配器通常是电阻性的，是无定向性的器件，有很宽的频带。缺点是通常有6dB或更大一点的损耗。
- 定向耦合器要求：
 - 具有很低的损耗（例如，一个20 dB的定向耦合器，耦合端的信号电平低于输入端信号电平20 dB，通过主臂的损耗只有0.046dB）；
 - 好的隔离度（大约50 dB）；
 - 好的定向性（大约30 dB），但很难工作到低频（很难做到宽带）。



幅相接收机

- 幅相接收机是一台窄带-调谐接收机。它用一个本振源（ $L0$ ）与射频（ RF ）混频得到较低的中频（ IF ）。
- 矢量网络分析仪（采用调谐接收机）采用窄带中频滤波器（ 3KHz 中频带宽）产生相当低的噪声，结果是显著改善了灵敏度。
- 中频滤波器后采用ADC和DSP，从中频信号中提取幅度和相位信息。



数据处理和显示

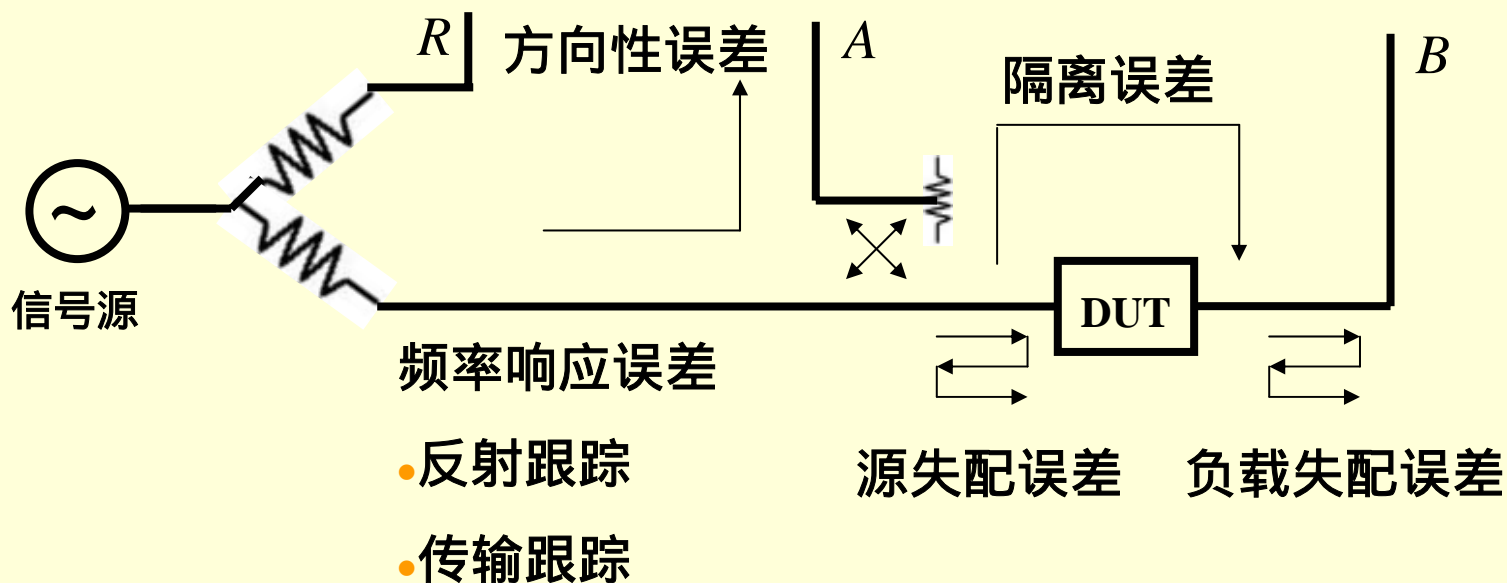
- 矢量网络分析仪中所用硬件的最后一个主要方块是处理器/显示器部分。用于解释测量结果的方式，对反射和传输数据进行格式化。
- 大多数网络分析仪都具有相类似的特点，诸如：线性扫描和对数扫描、线性格式和对数格式、极坐标图、Smith圆图等。
- 另一些共同的特点是：迹线标记、极限线和合格/不合格测试。

9.3 误差模型与校准

- 三种基本的误差来源：**系统误差**，随机误差和漂移误差。
 - **系统误差**是由于分析仪和测量装置不理想引起的，它是重复出现的（因而是可预示的），并假设不随时间变化。系统误差在校准过程中可以消除它。
 - **系统误差**有三类共六种：
 - 与信号泄漏有关的方向性误差D和隔离误差C；
 - 与反射有关的源失配误差MS和负载失配误差ML；
 - 由接收机内部的反射和传输跟踪引起的反射路径的频率响应误差TR和传输路径的频率响应误差TT。
 - 随机误差是不可预示的，因此不能通过校准的方法消除它。主要有：仪器噪声（源的相位噪声、采样噪声、中频本底噪声等等），开关的重复性，连接器的重复性等。
 - 漂移误差是在校准之后由于仪器或测量装置的特性变化引起的，主要起因是温度变化。

9.3.1 系统误差

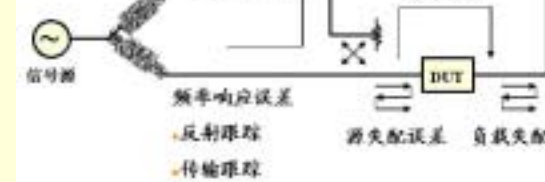
- **系统误差**有三类共六种：
 - 方向性误差D和隔离误差C；
 - 源失配误差MS和负载失配误差ML；
 - 反射路径的频率响应误差TR和传输路径的频率响应误差TT。



1. 方向性误差



- **方向性误差D** (directivity error)：反射测量时，未经DUT反射而直接进入定向耦合器耦合口的部分信号统称为方向性误差，该误差是由于定向耦合器的方向性或连接部件的失配造成的。
- 对于一般的定向耦合器，这部分误差约在 -40dB左右。
- 由转换接头引起的信号反射可由转换接头的驻波比来计算。



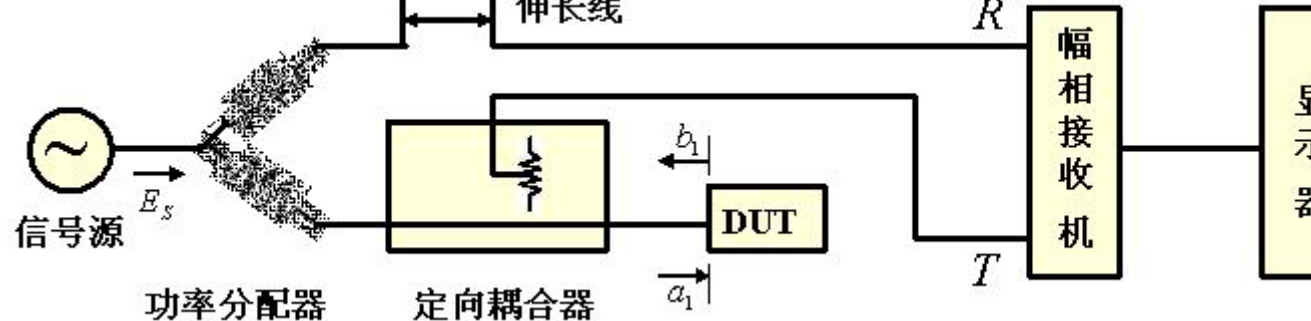
2. 反射路径的频率响应误差

- 反射路径的频率响应误差 TR (frequency response error) :
- 如果把DUT换成一个短路器，这时看到的系统频响轨迹并不是很平的直线，这就是由功率分配器、定向耦合器、转换接头及测试电缆等部件的频率响应特性造成的频响误差，它们也给反射系数的测量带来影响。

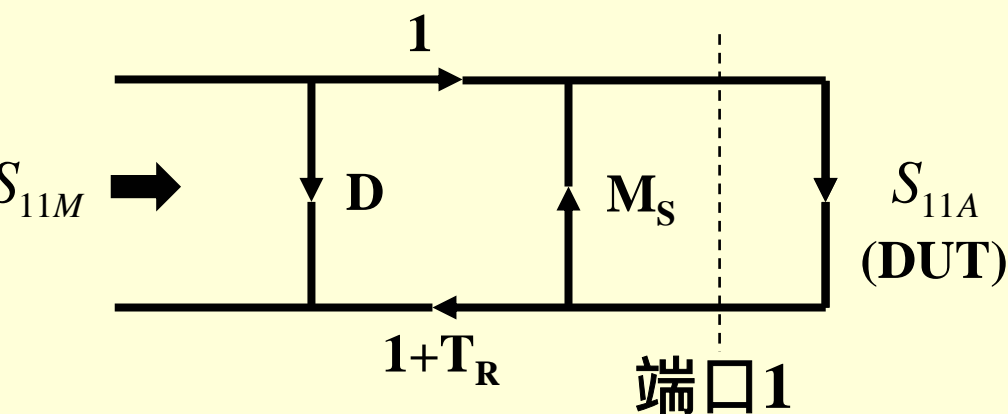
3. 源失配误差



- 源失配误差 MS (source match error) :
- 实际的S测量系统并不是理想匹配的。反射测量时，从DUT向信源方向看去的等效源反射系数也不会完全等于零。这样，由DUT反射的信号中有一部分信号会在DUT和源之间来回反射，使反射系数的测量产生误差。



反射参数测量系统的误差模型



$$S_{11M} = D + \frac{S_{11A}(1 + T_R)}{1 - M_S S_{11A}}$$

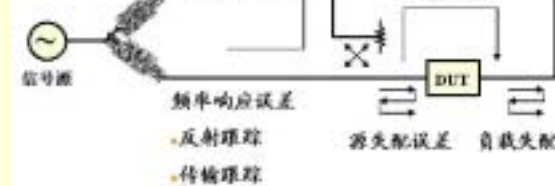
S_{11A} : DUT实际反射系数;

S_{11M} : 测量值。

4. 隔离误差



- 隔离（泄漏）误差C (isolation error) :
- 这是由于信号源直接泄漏到负载，它们也给传输系数的测量带来影响。



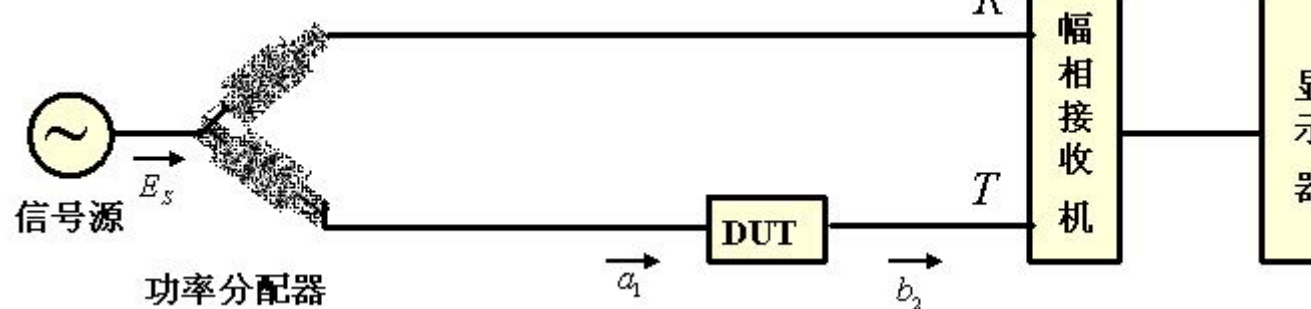
5. 传输路径的频率响应误差

- 传输路径的频率响应误差 TT (frequency response error) :
- 这是由传输路径上的功率分配器、定向耦合器、转换接头及测试电缆等部件的频率响应特性造成的频响误差，它们也给传输系数的测量带来影响。

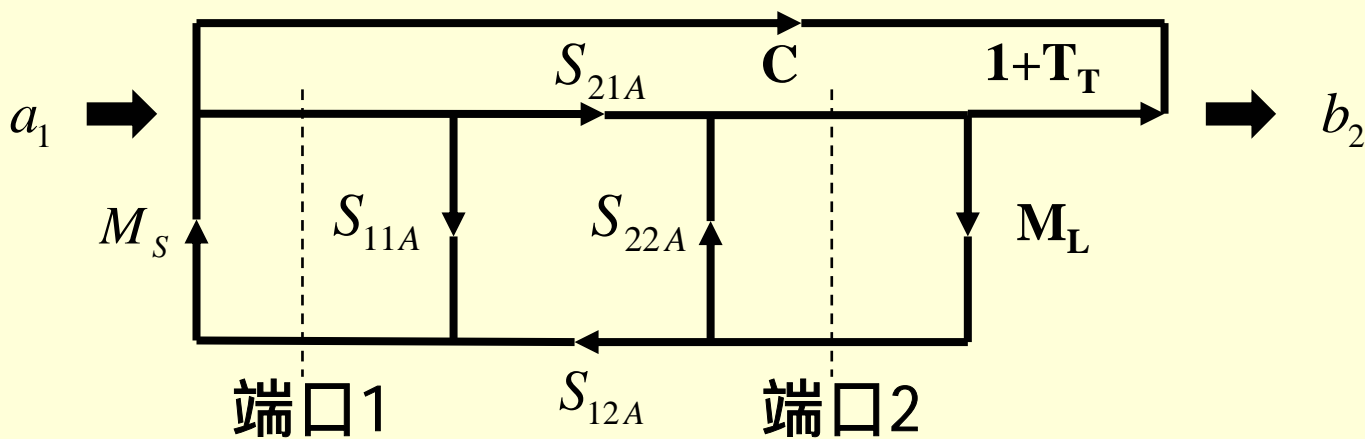


6. 负载失配误差

- 负载失配误差 ML (load match error) :
- 实际的S测量系统并不是理想匹配的。传输测量时，从DUT向负载方向看去的等效负载反射系数也不会完全等于零。这样，由DUT传输的信号中有一部分信号会在DUT和负载之间来回反射，使传输系数的测量产生误差。



传输参数测量系统的误差模型



根据梅森 (Meason) 不接触环路法则，传输参数测量系统的误差模型为：

$$S_{21M} = \frac{b_2}{a_1} = C + \frac{S_{21A}(1+T_T)}{1 - M_S S_{11A} - M_L S_{22A} - M_L S_{21A} S_{12A} M_S + M_S M_L S_{11A} S_{22A}}$$

$$\approx C + \frac{S_{21A}(1+T_T)}{1 - (M_S S_{11A} + M_L S_{22A})}$$

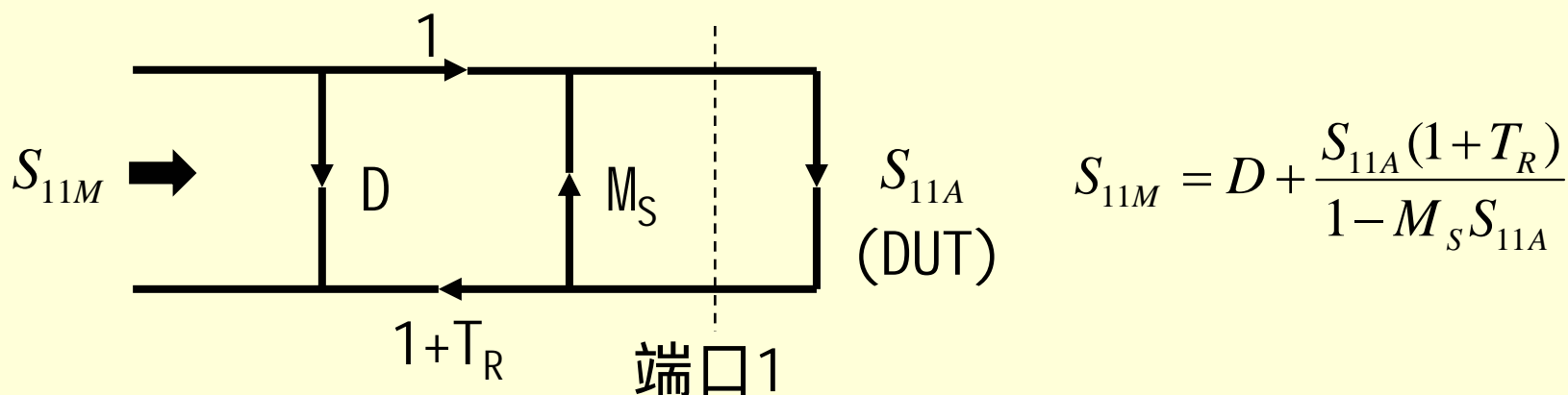


9.3.2 系统误差校准

1. 反射参数测量系统的误差校准
2. 传输参数测量系统的误差校准
3. 双口网络的误差校准

1. 反射参数测量系统的误差校准

■ 反射参数测量系统的误差模型



■ 在微波测量中，可选用这样的校准件：

- 匹配负载（则反射参数 $S_{11A}=0$ ，得到测量数值 M_1 ）
- 短路器（则反射参数 $S_{11A}= -1$ ，得到测量数值 M_2 ）
- 开路器（则反射参数 $S_{11A}= +1$ ，得到测量数值 M_3 ）

反射参数测量系统的误差模型

$$M_1 = D + \frac{0 \times (1 + T_R)}{1 - M_S \times 0} = D$$

$$M_2 = D + \frac{(-1) \times (1 + T_R)}{1 - M_S \times (-1)} = D - \frac{1 + T_R}{1 + M_S}$$

$$M_3 = D + \frac{(+1) \times (1 + T_R)}{1 - M_S \times (+1)} = D + \frac{1 + T_R}{1 - M_S}$$



$$D = M_1$$

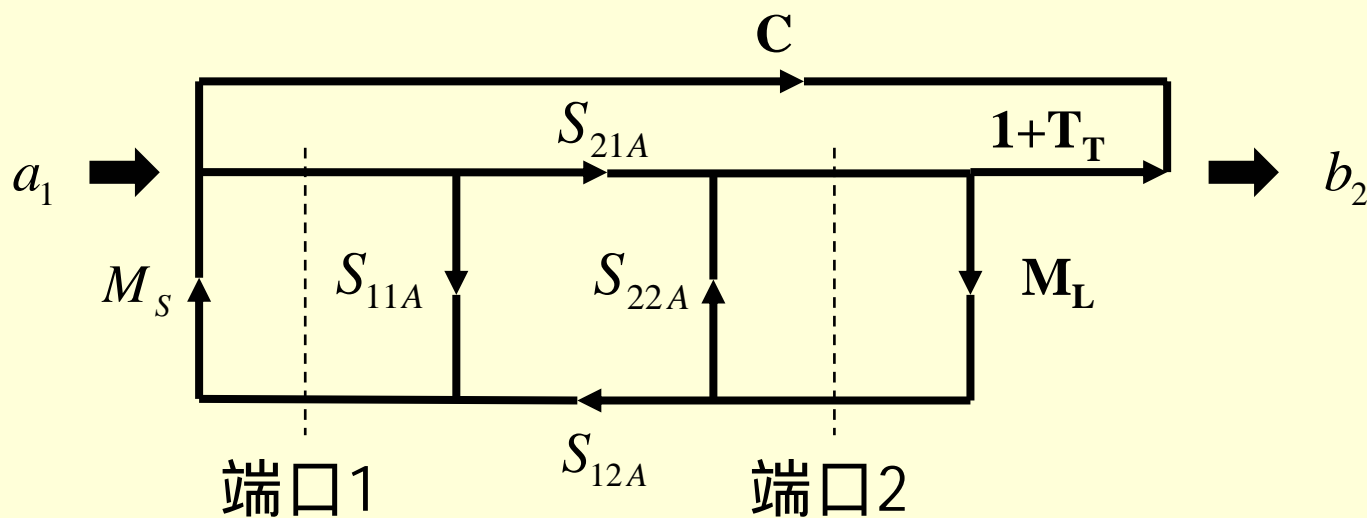
$$T_R = \frac{2AB - A - B}{A + B}$$

$$M_S = \frac{B - A}{A + B}$$

$$A = M_1 - M_2, \quad B = M_3 - M_1$$

2. 传输参数测量系统的误差校准

■ 传输参数测量系统的误差模型



$$S_{21M} = \frac{b_2}{a_1} = C + \frac{S_{21A}(1+T_T)}{1 - M_S S_{11A} - M_L S_{22A} - M_L S_{21A} S_{12A} M_S + M_S M_L S_{11A} S_{22A}}$$

$$\approx C + \frac{S_{21A}(1+T_T)}{1 - (M_S S_{11A} + M_L S_{22A})}$$

传输参数测量系统的误差模型

$$S_{21M} = \frac{b_2}{a_1} \approx C + \frac{S_{21A}(1 + T_T)}{1 - (M_S S_{11A} + M_L S_{22A})}$$

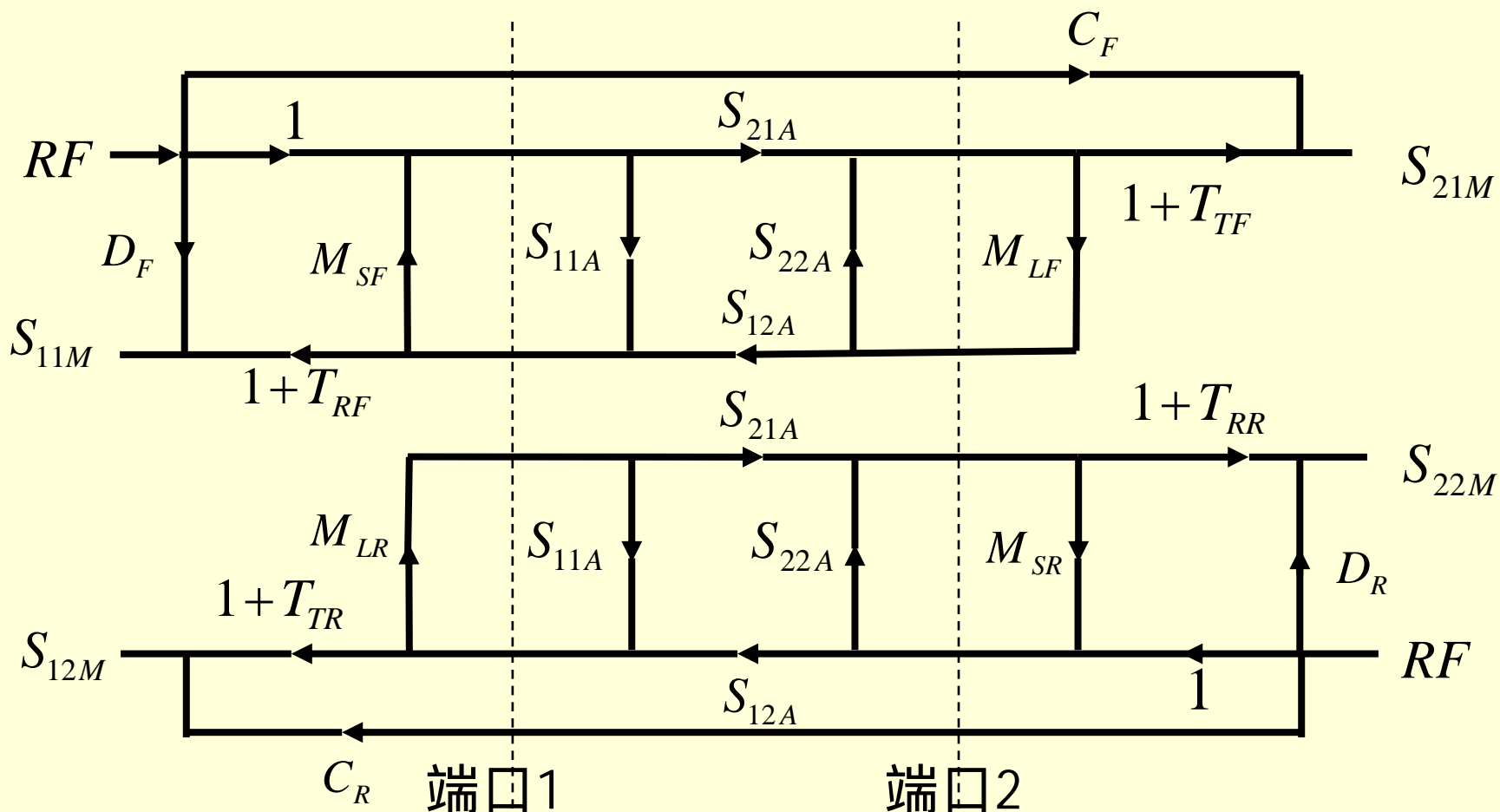
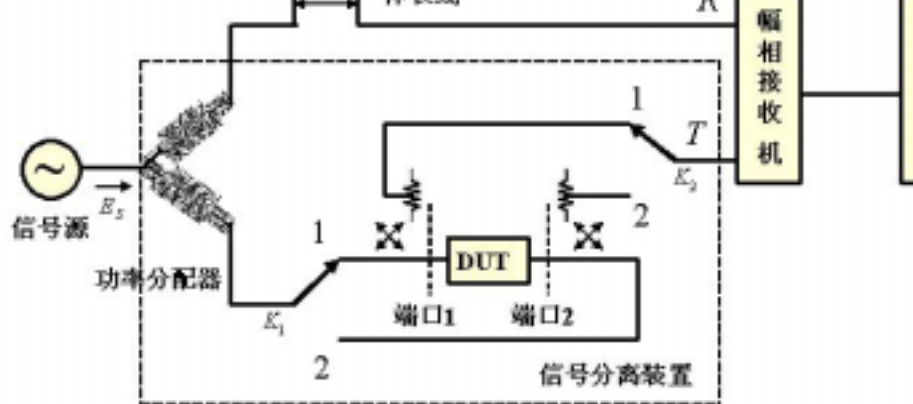
■ 确定隔离误差C：可将DUT移开，使两端口断开，并分别接上匹配负载，这时有 $S_{21A}=0$ ，则测量传输系数即可以得到隔离误差C。

■ 确定传输路径的频率响应误差 T_T ：将DUT移开，将两端口形成直通（Through），即长度为 0 的传输线。这时有 $S_{11A}=S_{22A}=0$ ， $S_{21A}=S_{12A}=1$ ，则测量反射系数和传输系数即可以得到 M_L 和 T_T 。

3. 双口网络的误差校准

双口网络的误差模型

下标F表示正向测量，
下标R表示反向测量。



双口网络的误差模型公式

$$S_{11M} = D_F + \frac{(1 + T_{RF})[S_{11A}(1 - S_{22A}M_{LF}) + S_{21A}S_{12A}M_{LF}]}{1 - S_{11A}M_{SF} - S_{22A}M_{LF} - S_{21A}S_{12A}M_{SF}M_{LF} + S_{11A}S_{22A}M_{SF}M_{LF}}$$

$$S_{21M} = C_F + \frac{S_{21A}(1 + T_{TF})}{1 - S_{11A}M_{SF} - S_{22A}M_{LF} - S_{21A}S_{12A}M_{SF}M_{LF} + S_{11A}S_{22A}M_{SF}M_{LF}}$$

$$S_{22M} = D_R + \frac{(1 + T_{RR})[S_{22A}(1 - S_{11A}M_{LR}) + S_{12A}S_{21A}M_{LR}]}{1 - S_{22A}M_{SR} - S_{11A}M_{LR} - S_{12A}S_{21A}M_{SR}M_{LR} + S_{11A}S_{22A}M_{SR}M_{LR}}$$

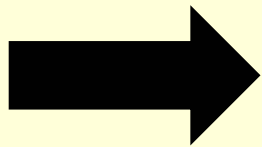
$$S_{12M} = C_R + \frac{S_{12A}(1 + T_{TR})}{1 - S_{22A}M_{SR} - S_{11A}M_{LR} - S_{12A}S_{21A}M_{SR}M_{LR} + S_{11A}S_{22A}M_{SR}M_{LR}}$$

■ 经常采用短路-开路-负载-直通式校准法（SOLT）：正向校准时，需要测量6次；反向校准时，也需要测量6次。这样总共需要测量12次。

双口网络 S 参数的公式

$$A = \frac{S_{11M} - D_F}{1 + T_{RF}}, \quad B = \frac{S_{21M} - C_F}{1 + T_{TF}}, \quad C = \frac{S_{12M} - C_R}{1 + T_{TR}}, \quad D = \frac{S_{22M} - D_R}{1 + T_{RR}}$$

$$d = (1 + AM_{SF})(1 + DM_{SR}) - BCM_{LR}M_{LF}$$



$$S_{11A} = \frac{(1 + DM_{SR})A - M_{LF}BC}{(1 + AM_{SF})(1 + DM_{SR}) - BM_{LR}M_{LF}}$$

$$S_{12A} = \frac{[1 + A(M_{SF} - M_{LR})]C}{d}$$

$$S_{21A} = \frac{[1 + D(M_{SR} - M_{LF})]B}{d}$$

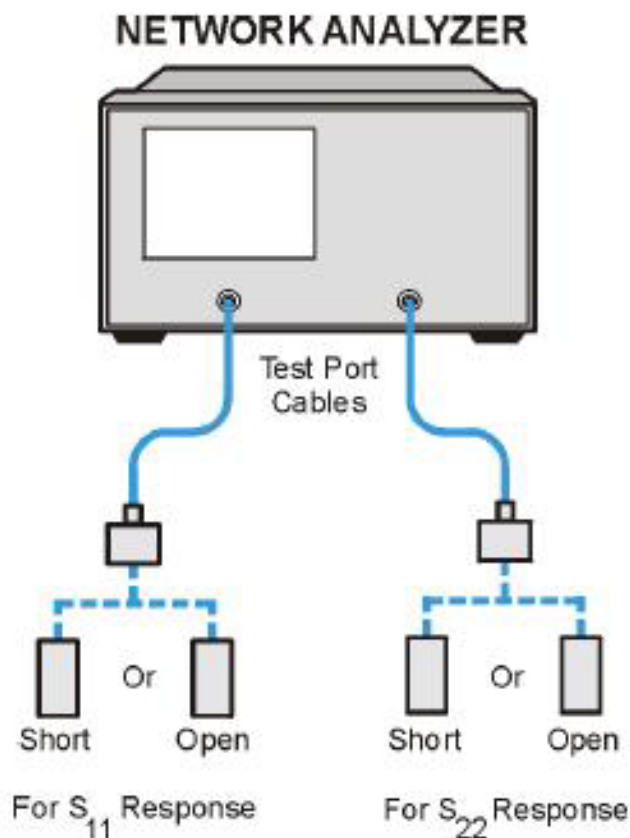
$$S_{22A} = \frac{(1 + AM_{SF})D - M_{LR}BC}{d}$$

9.3.3 8753中的四种校准过程

- 8753中四种校准过程：频响校准，频响和隔离校准，单端口校准和双端口校准。
- 频响校准是最容易的，它仅需一个校准件（短路器或开路器），它仅可对频响误差进行修正（没有定向耦合器的方向性或连接部件的失配造成的方向性误差）。
- 频响和隔离校准扣除了频响误差和隔离误差，它需要两个校准件（短路器和匹配负载）。
- 双端口校准采用短路-开路-负载-直通式校准法（SOLT）。

在反射测量中频响误差校准的标准连接

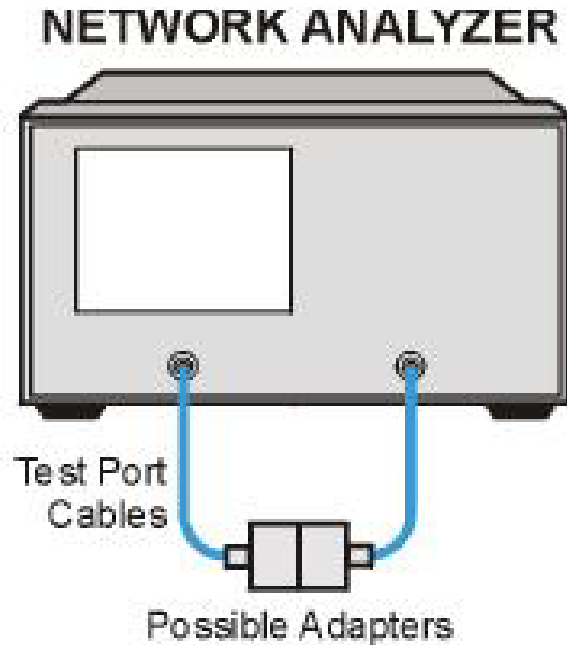
Standard Connections for a Response Error Correction for Reflection Measurement



- 确定传输路径的频率响应误差 T_T ：将DUT移开，将两端口形成直通（Through），即长度为 0 的传输线。

在传输测量中频响误差校准的标准连接

Standard Connections for Response Error Correction for Transmission Measurements

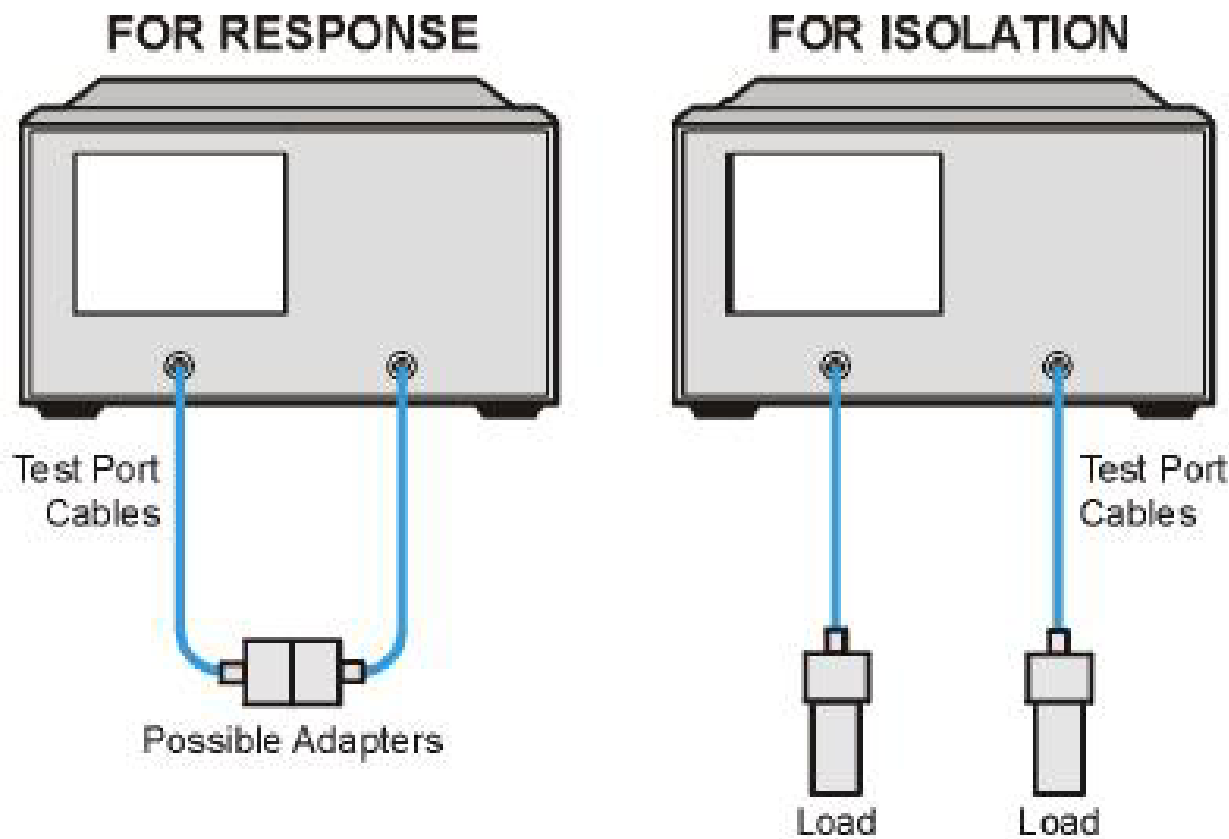


$$\Gamma_M = \frac{b_2}{a_1} \approx C + \frac{S_{21A}(1 + \Gamma_T)}{1 - (M_S S_{11A} + M_L S_{22A})}$$

■确定隔离误差C：可将DUT移开，使两端口断开，并分别接上匹配负载，这时有 $S_{21A}=0$ ，则测量传输系数即可以得到隔离误差C。

在传输测量中频响和隔离误差校准的标准连接

Standard Connections for a Response and Isolation Error Correction for Transmission Measurements

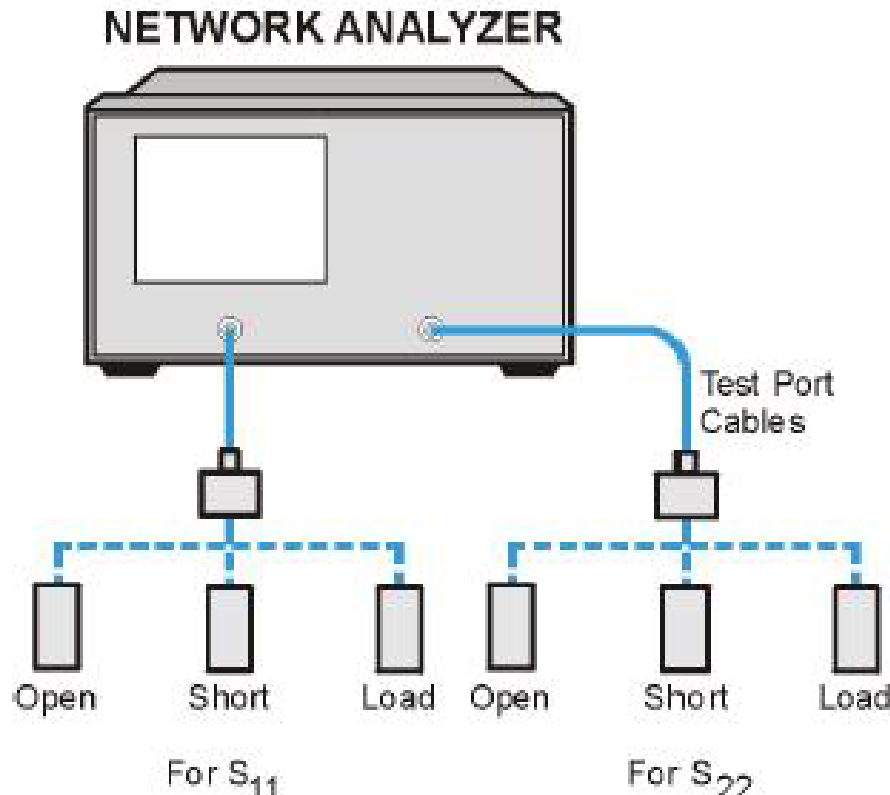


$$\Gamma_M = D + \frac{S_{11A}(1 + \Gamma_R)}{1 - M_S S_{11A}}$$

- 匹配负载（则反射参数 $S_{11A}=0$ ，得到测量数值 M_1 ）
- 短路器（则反射参数 $S_{11A}= -1$ ，得到测量数值 M_2 ）
- 开路器（则反射参数 $S_{11A}= +1$ ，得到测量数值 M_3 ）

单口反射误差校准的标准连接

Standard Connections for a One Port Reflection Error Correction



$$A = \frac{(1 + AM_{SF})(1 + DM_{SR}) - BM_{LR}M_{LF}}{d}$$

$$B = \frac{[1 + A(M_{SF} - M_{LR})]C}{d}$$

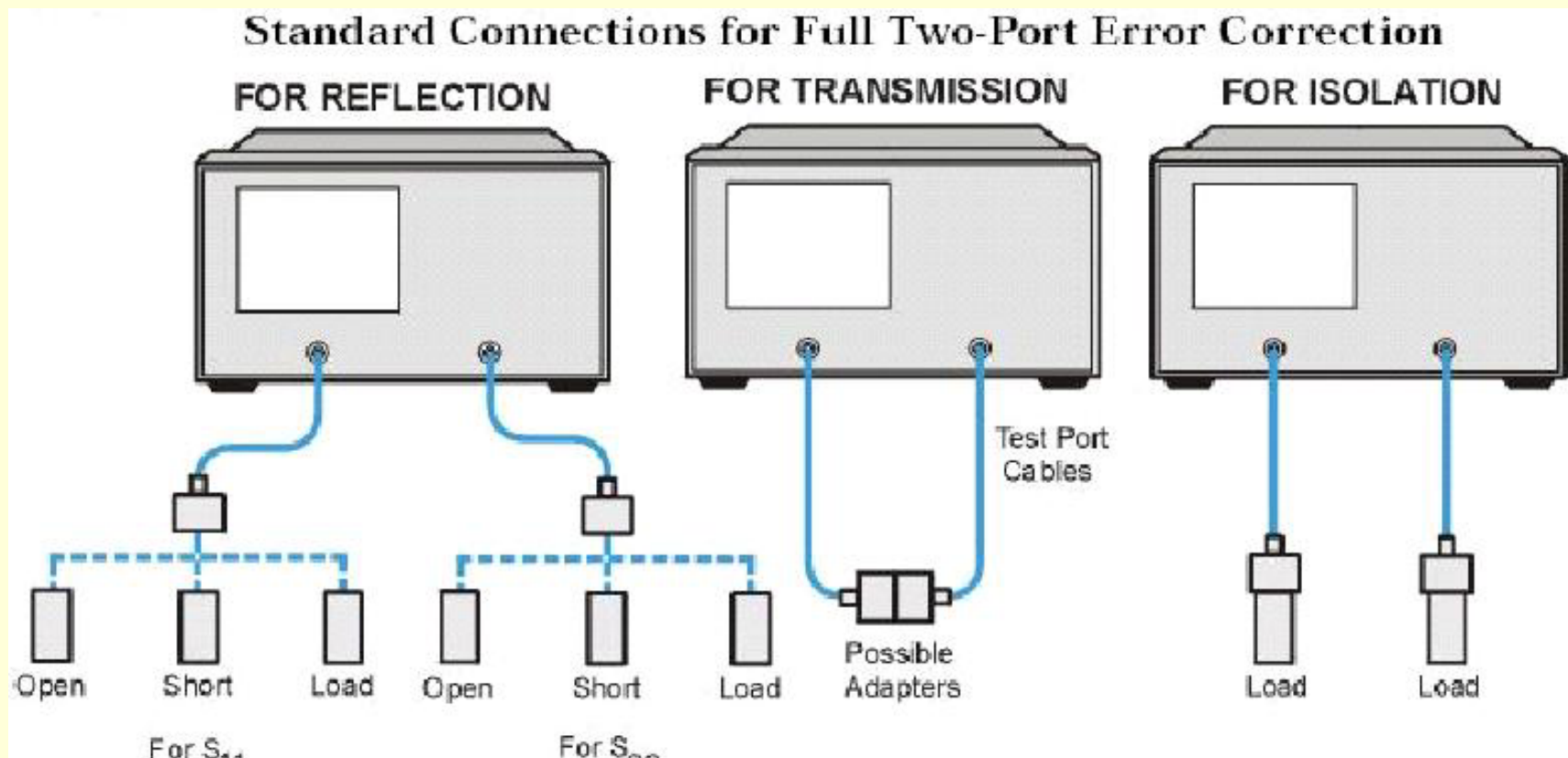
$$C = \frac{[1 + D(M_{SR} - M_{LF})]B}{d}$$

$$D = \frac{(1 + AM_{SF})D - M_{LR}BC}{d}$$

- 双端口校准采用短路-开路-负载-直通式校准法 (SOLT)。

两端口器件误差校准的标准连接

- 两端口器件误差校准的标准连接：(只有ES型号分析仪有)





误差和校准标准件

- Calibration kits : N50 Ω 85032B :
 - 50 Ω 匹配负载 ;
 - 开路和短路的电路 ;
 - 两根7-mm到N接口的电缆。

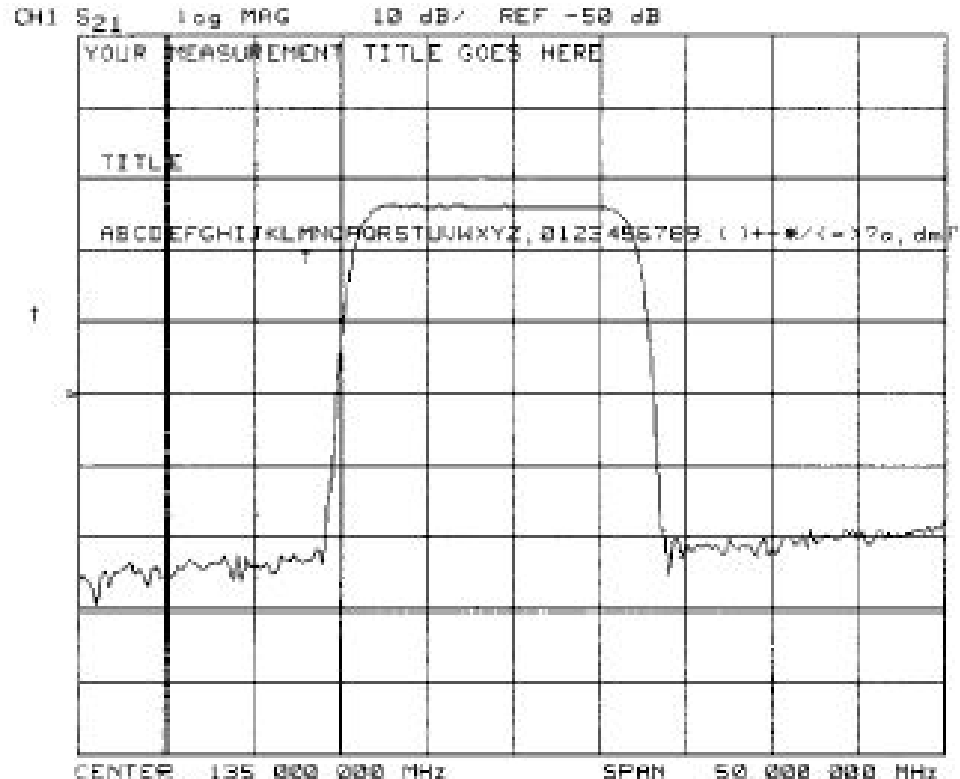


8753ES的测量显示功能

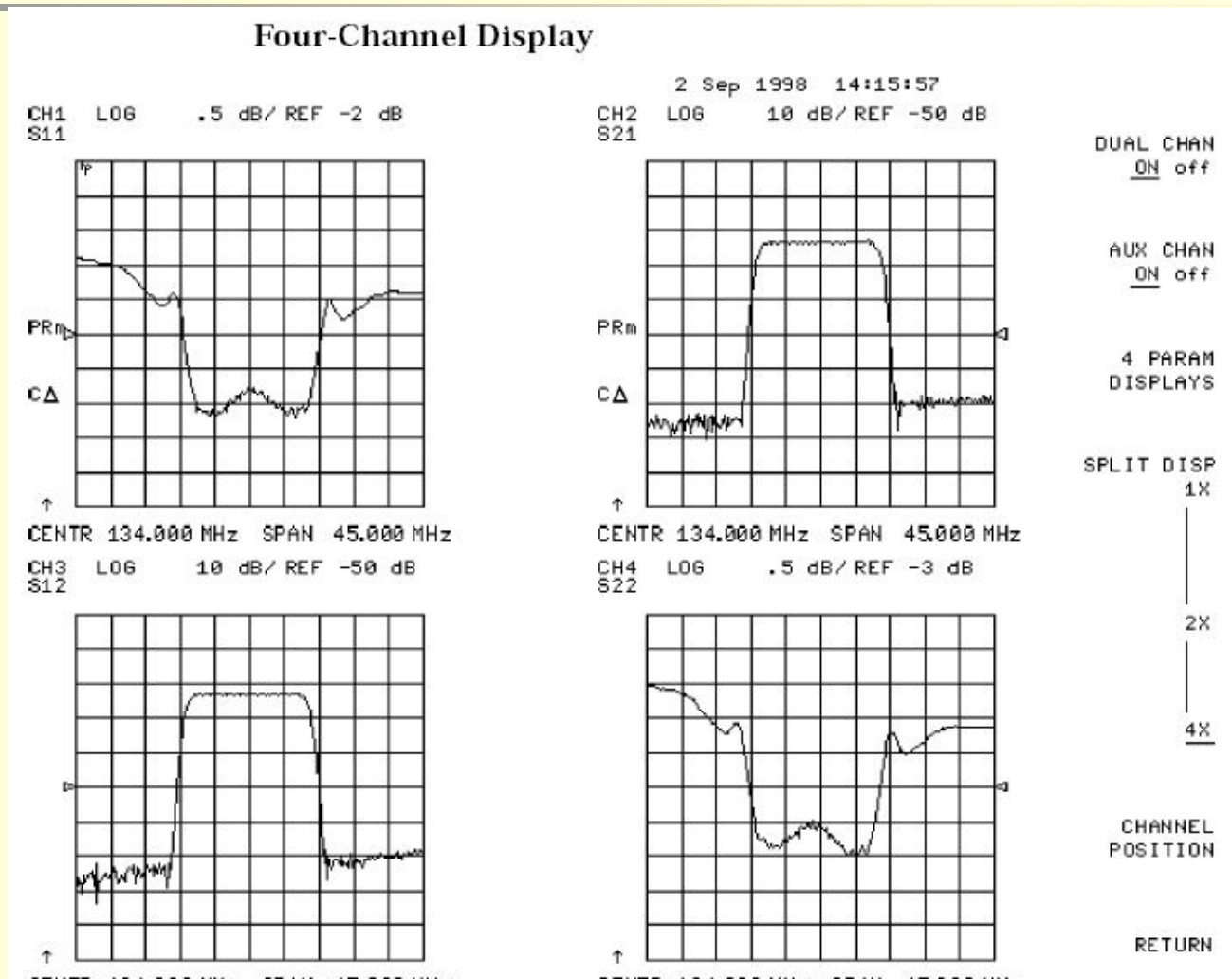
- 输入标注和说明显示功能
- 四通道测量结果同时显示功能
- 自定义四通道测量显示功能
- 彩色显示功能

输入标注和说明显示功能

Example of a Display Title



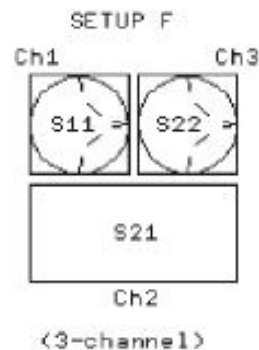
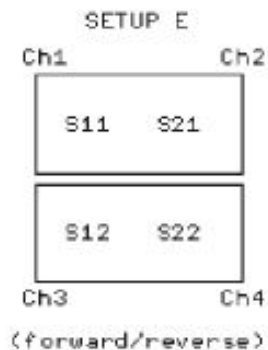
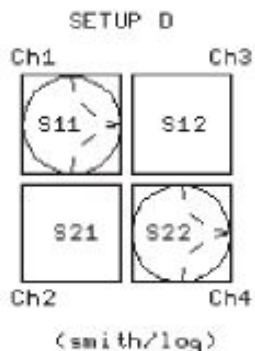
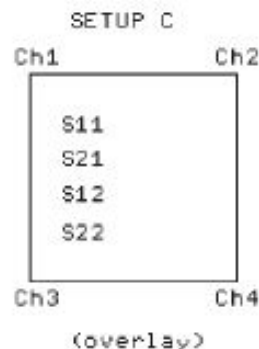
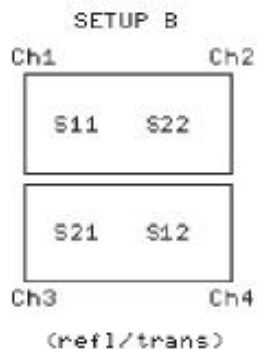
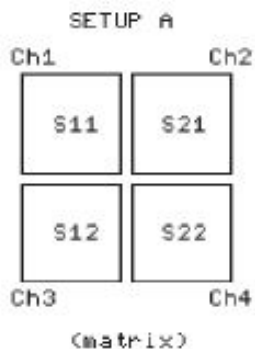
四通道测量结果同时显示功能



自定义四通道测量显示功能

4 Param Displays Menu

4-PARAMETER SHORTCUT KEYS



SETUP A

SETUP B

SETUP C

SETUP D

SETUP E

SETUP F

TUTORIAL

RETURN

彩色显示功能





9.4 典型器件特性测量简介

9.4.1 基本测量步骤

9.4.2 滤波器测试

9.4.3 放大器测试

9.4.4 混频器测试

9.4.5 时域分析功能



9.4.1 基本测量步骤

- 基本测量的五个步骤：
 - 1。连接DUT；
 - 2。设置测量参数；
 - 3。移走DUT，进行相应的误差校准；
 - 4。重新连接DUT，进行相应的测量；
 - 5。输出测量结果。

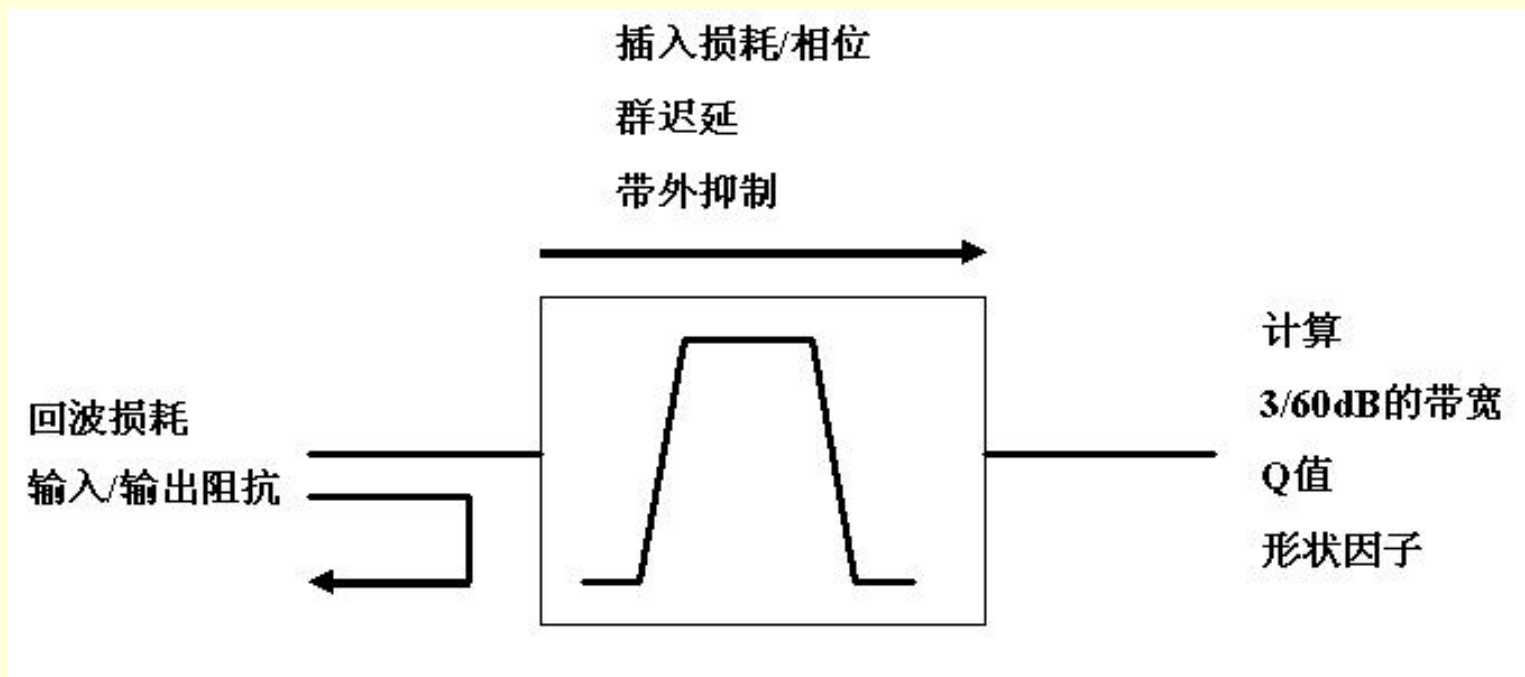


9.4.2 滤波器测试

- 滤波器是通用的无源、线性、两端口器件。通常采用扫频传输/反射技术来完整无缺地表征它的特性。
- 滤波器的特性在元件测试系统中的地位是很重要的。
 - 一个宽带滤波器，要求它在指定带宽内的信号具有最小的损耗和失真；而对于通带外的信号，有最大的抑制。
 - 对于窄信道间隔的通信系统，要求滤波器具有低的插入损耗，高的Q值和高的频率选择性，它们必须满足更严格的频响特性。

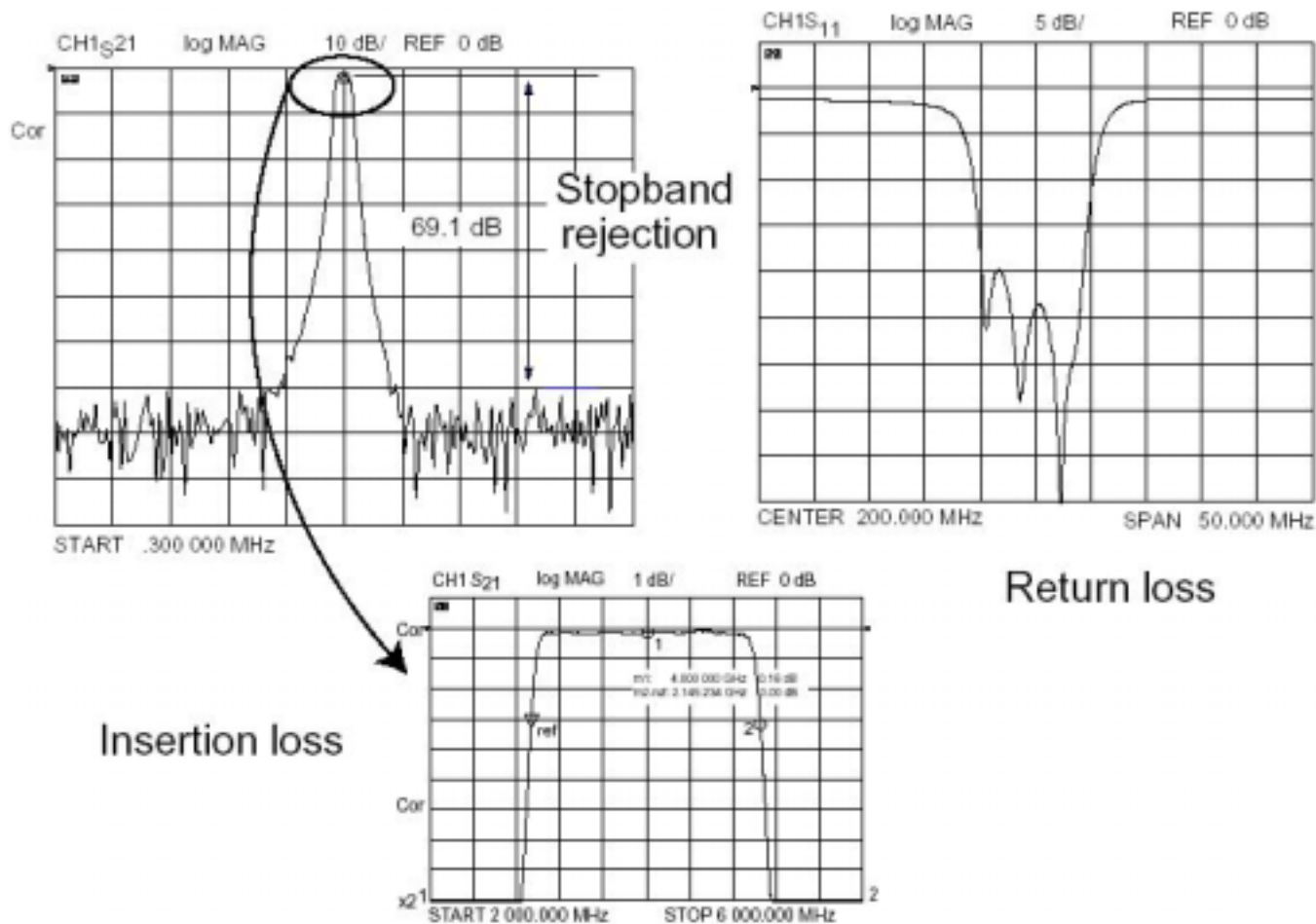
滤波器有三个方面的测量参数

- (1) 传输参数 (插入损耗/相位、群延迟、带外抑制) ;
- (2) 反射参数 (回波损耗、输入/输出阻抗) ;
- (3) 计算 (3/60dB的带宽、Q值和形状因子) 。



滤波器扫描测试举例

- 传输响应和反射响应。

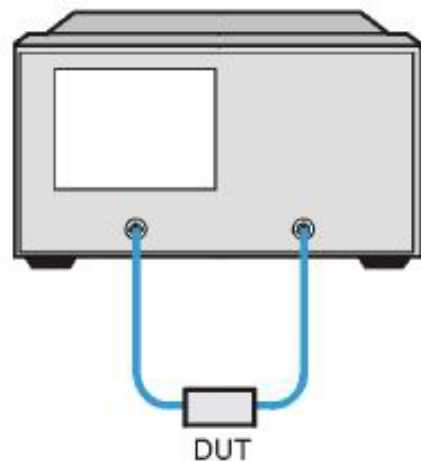


SAW滤波器测试举例

- 测量幅度响应
- 1。连接DUT
- 2。设置测量参数
- 3。移走DUT，连接直通电缆，进行传输路径的频率响应误差校准
- 4。重新连接DUT
- 5。更好地观察测量跟踪
- 6。搜索幅度响应的最大值

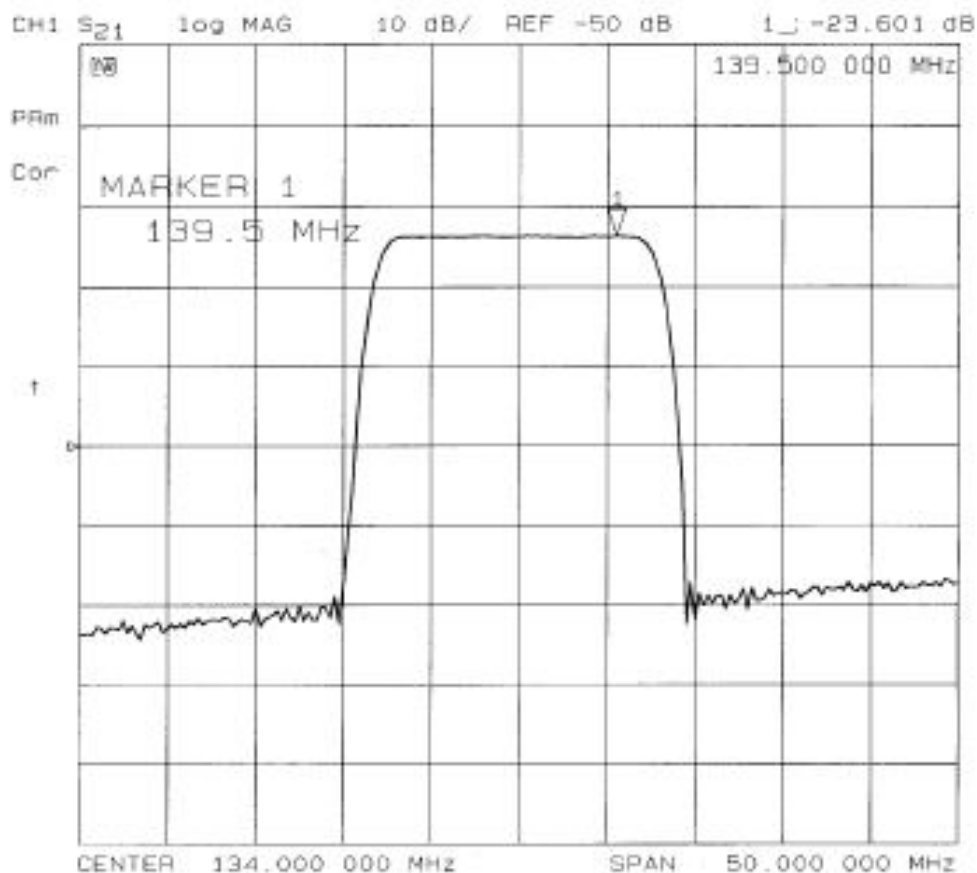
Device Connections for Measuring a Magnitude Response

NETWORK ANALYZER



测量幅度响应并搜索幅度响应的最大值

Example Magnitude Response Measurement Results



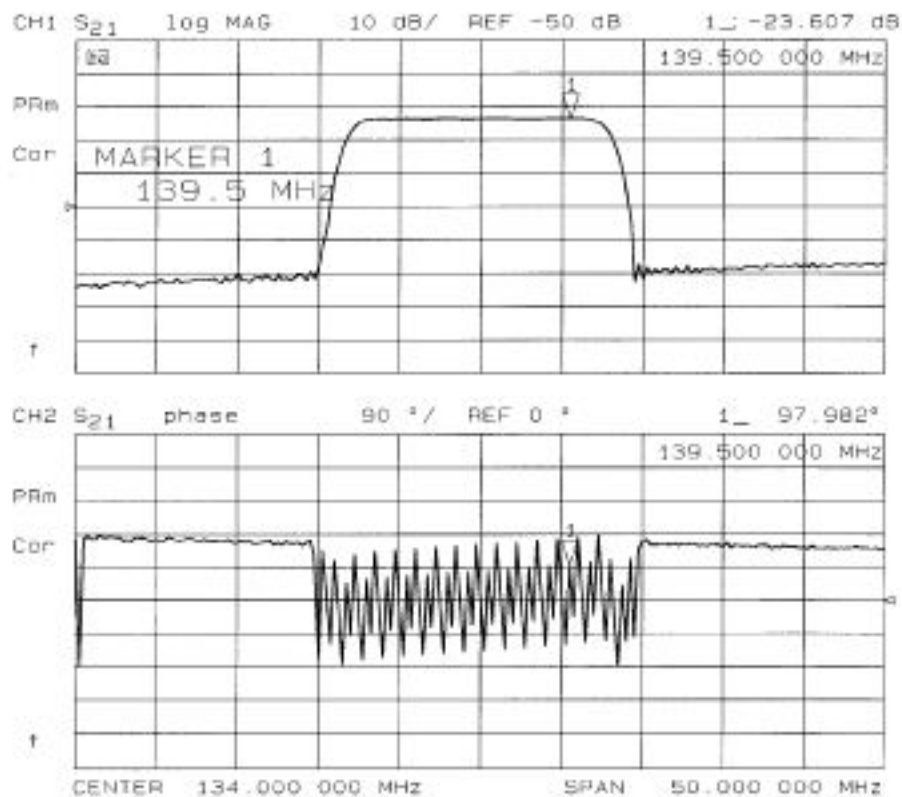
测量插入相位响应

- 如下图所示，图中通道2显示的是DUT的插入相位响应。
- 网络分析仪测量和显示的相位变化范围是从 -180° 到 $+180^{\circ}$ ，所以当相位的变化超过范围时，显示的数据会产生 360° 的跳变。
- 可以从下图来理解相位采样，若采样点之间的相位变化大于 180° ，显示就会出现错误的相位和延时。
- 对于电长度较长的器件，为了避免产生上述错误，可以减少频率间隔或增加测量点数，以使采样点之间的相位变化小于 180° 。

DUT的插入相位响应

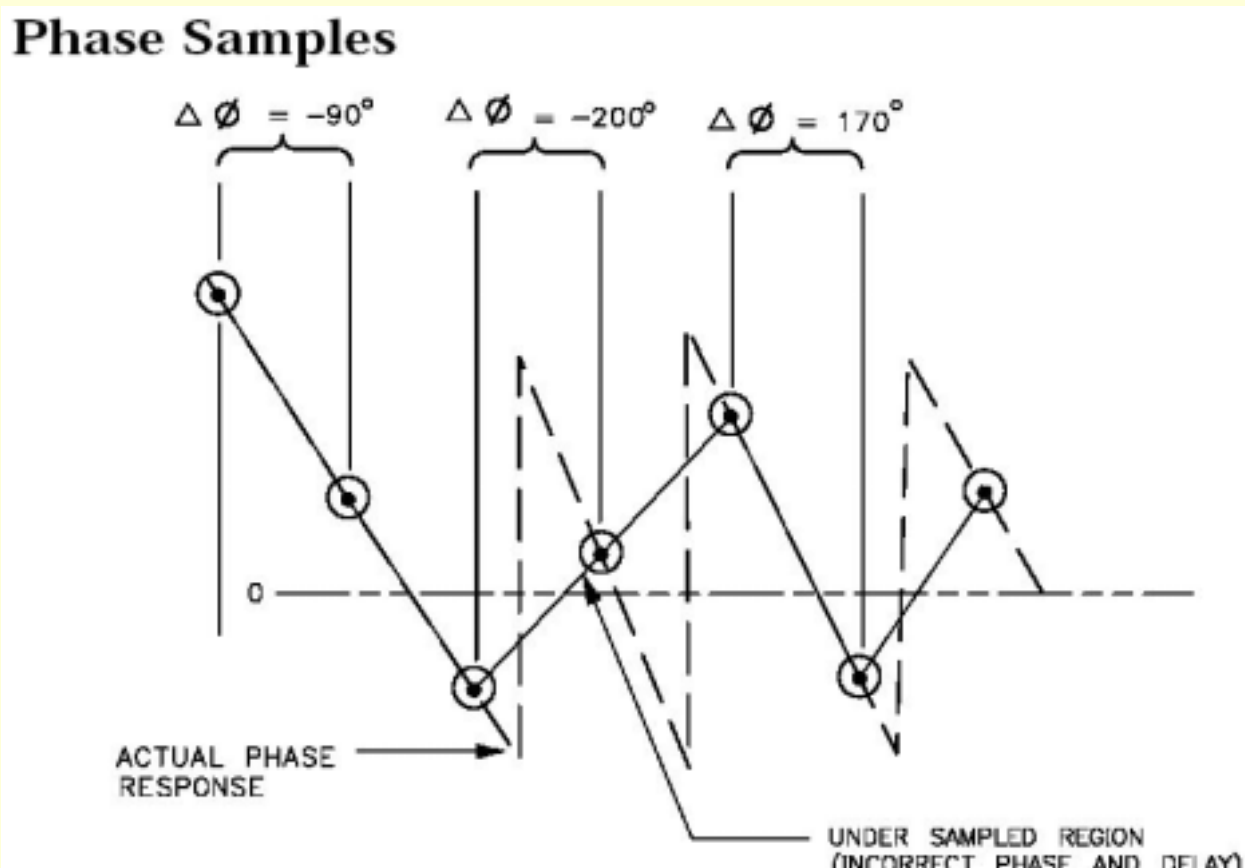
- 下图中通道2显示的就是DUT的插入相位响应。

Example Insertion Phase Response Measurement



理解相位采样

- 可从下图来理解相位采样：



滤波器的精确测量

- 在滤波器的精确测量中，传输通带内的误差校准是十分重要的。如下图所示，校准前后的测量结果是十分不同的。
 - 如果只进行了频率响应校准，由于源和负载的不匹配，测量的幅度会有起伏波纹。
 - 有些波纹甚至超过0dB参考线，这显然是不可能的。这是由于测量不匹配造成的，采用二端口校准就可以了。
 - 滤波器的精确测量需要采用二端口校准，幅度起伏波纹可达到 $\pm 0.1\text{dB}$ 。

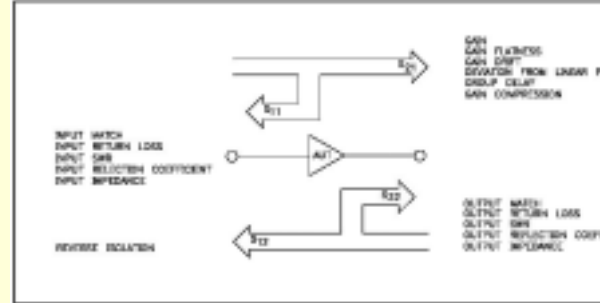
滤波器的精确测量(续1)

Measuring filter insertion loss



Response versus Two-Port Calibration

9.4.3 放大器测试



■ 如下图所示，放大器的参数定义：

■ 输入端口：

- 输入匹配，输入反射损耗，输入SWR，输入反射系数，输入阻抗（以上 S_{11} ）；
- 反向隔离（ S_{12} ）；

■ 输出端口：

- 增益，增益平坦度，增益偏移，与线性相位的偏差，群延时，1dB增益压缩点（以上 S_{21} ）；
- 输出匹配，输出反射损耗，输出SWR，输出反射系数，输出阻抗（以上 S_{22} ）；

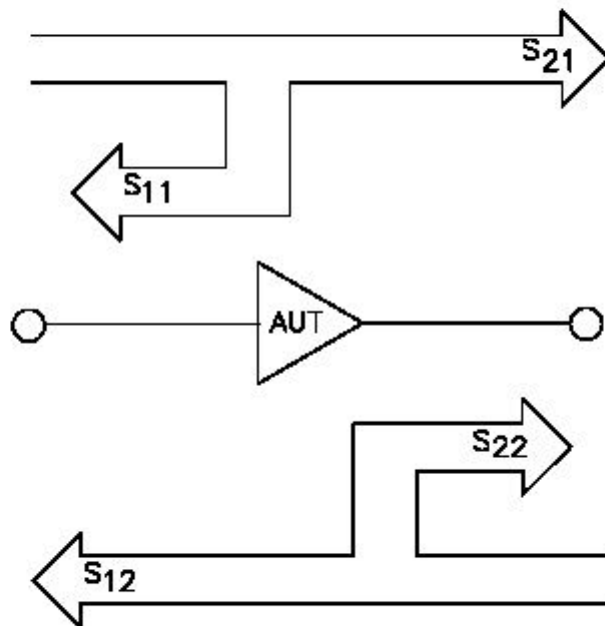
■ 非线性参数定义：调幅-调相变换（AM-PM）和放大器的非线性失真测量。

放大器的参数定义

Amplifier Parameters

INPUT MATCH
 INPUT RETURN LOSS
 INPUT SWR
 INPUT REFLECTION COEFFICIENT
 INPUT IMPEDANCE

REVERSE ISOLATION



GAIN
 GAIN FLATNESS
 GAIN DRIFT
 DEVIATION FROM LINEAR PHASE
 GROUP DELAY
 GAIN COMPRESSION

OUTPUT MATCH
 OUTPUT RETURN LOSS
 OUTPUT SWR
 OUTPUT REFLECTION COEFFICIENT
 OUTPUT IMPEDANCE

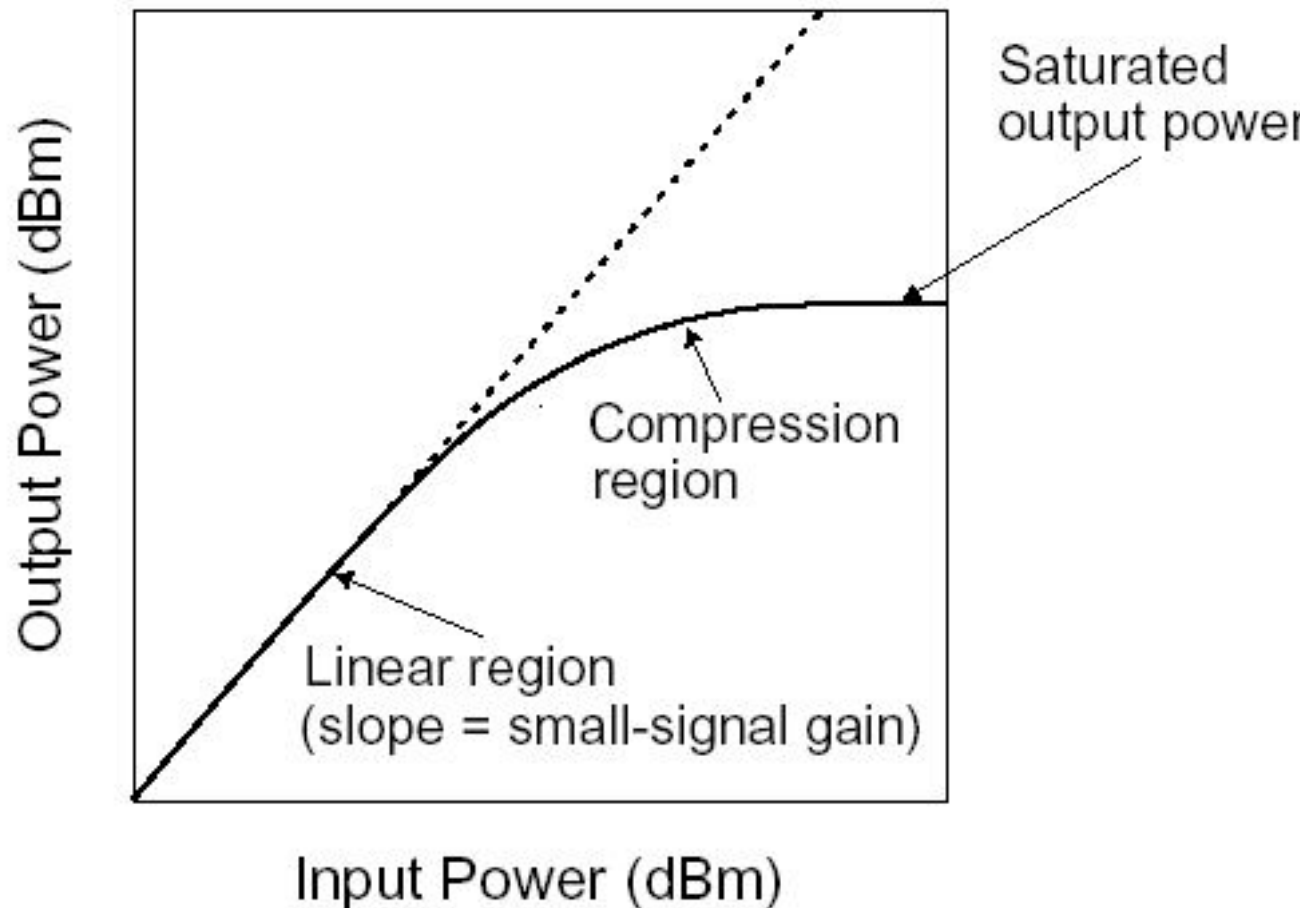
放大器的参数定义(续1)

- 反射损耗R/SWR：
 - 反射增益 $G = V_{\text{reflected}} / V_{\text{incident}} = r$,
 - 反射损耗 $R = -20 \log_{10} r$,
 - 驻波比 $\text{SWR} = (1+r)/(1-r)$ 。
- 输入/输出阻抗：放大器的复数阻抗 $Z = Z_0 (1+G)/(1-G)$ 。
- 1dB压缩点：定义是使放大器增益下降1dB的输入功率为1dB增益压缩点（以放大器小信号增益作为参考）。
- 放大器非线性特性的另一种常用测量是调幅（AM）-调相（PM）变换，它是由系统（调幅系统）内部固有幅度变化引起的不希望出现的相位偏移（PM）的量度。
- 在采用相位（角度）调制的系统中，调幅-调相变换是一个特别重要的参数。调幅-调相变换一般定义为放大器输入功率增加1dB时输出相位的变化，并用（度/dB）表示。

放大器增益的1dB压缩点

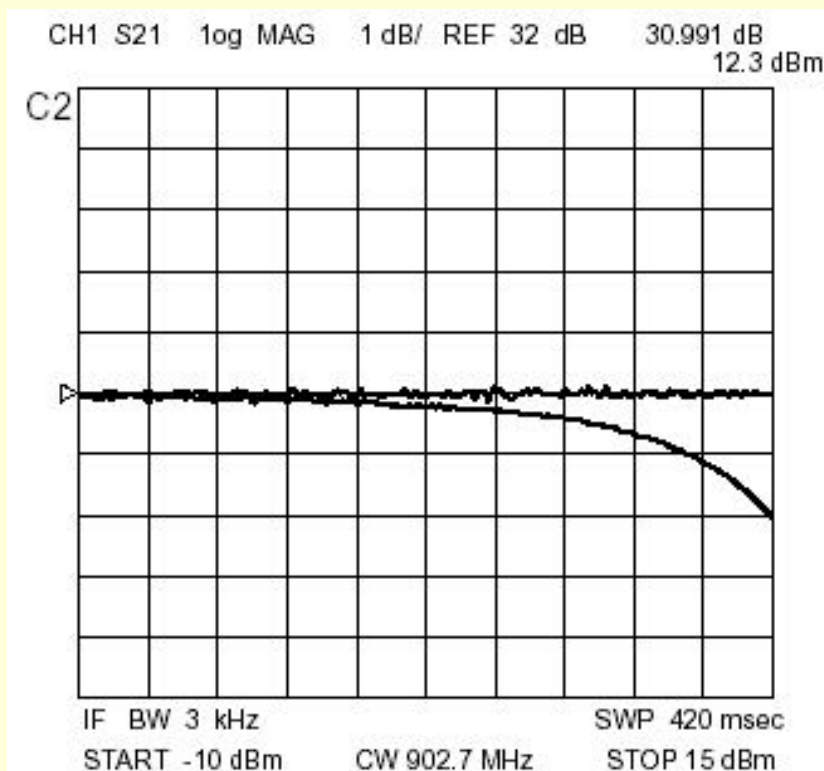
1dB压缩点：

定义是使放大器增益下降1dB的输入功率为压缩点（以放大器小信号增益作为参考）。



1dB压缩点最普遍的测量方法

- 如下图所示，这是1dB压缩点最普遍的测量方法：输出功率扫描（ $F=902.7\text{MHz}$ ）。



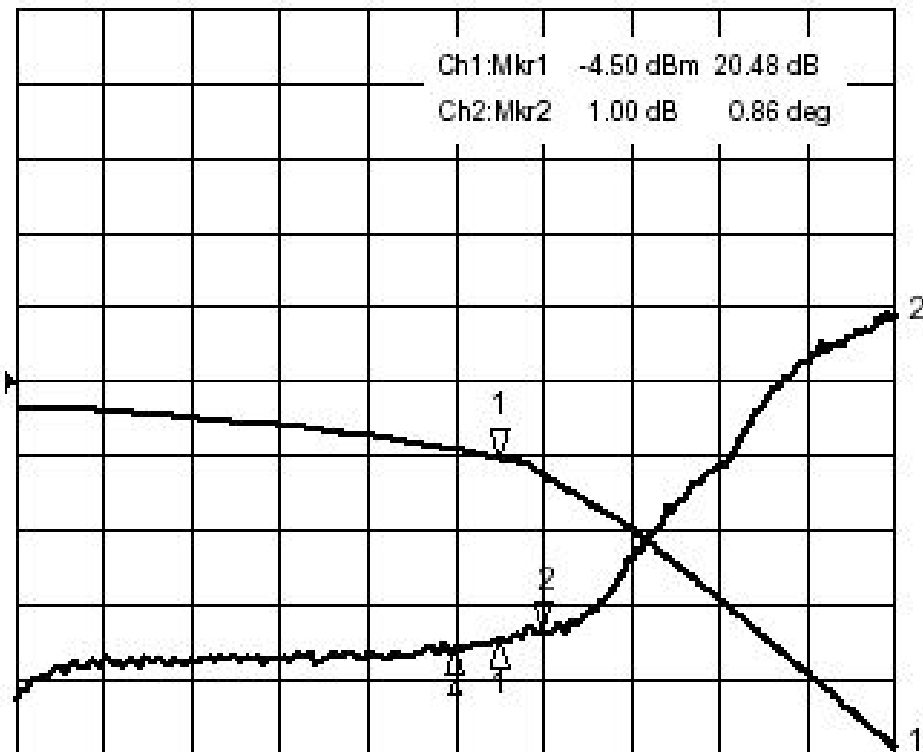
- **1-dB compression:** input power resulting in 1-dB drop in gain
- Ratioed measurement
- Output power available (non-ratioed measurement)

评价调幅-调相变换 (AM-PM)

- 评价调幅-调相变换 (AM-PM) :
 - 它是描述由系统内部固有幅度变化引起的不希望出现的相位偏移的量度；
 - 在相位调制的系统中，AM-PM是一个特别重要的参数；在模拟系统中，会使信号退化；在数字系统中，会增加误码率BER；
 - AM-PM一般定义为放大器输入功率增加1dB时输出相位的变化，并用（度/dB）表示；
 - 如下图所示，利用功率扫描，测得S21中的相位即可；
 - 测得：在输入功率-4.5dBm处，AM-PM为0.86度/dB。

调幅-调相变换 (AM-PM)

1: Transmission Log Mag 1.0 dB/ Ref 21.50 dB
 2: Transmission /M Phase 5.0 deg/ Ref -115.7 deg



Start -10.00 dBm CW 900.000 MHz Stop 0.00 dBm
 Start -10.00 dBm CW 900.000 MHz Stop 0.00 dBm

- Use transmission setup with a power sweep
- Display phase of S_{21}
- AM - PM = 0.86 deg/dB at -4.5 dBm input power

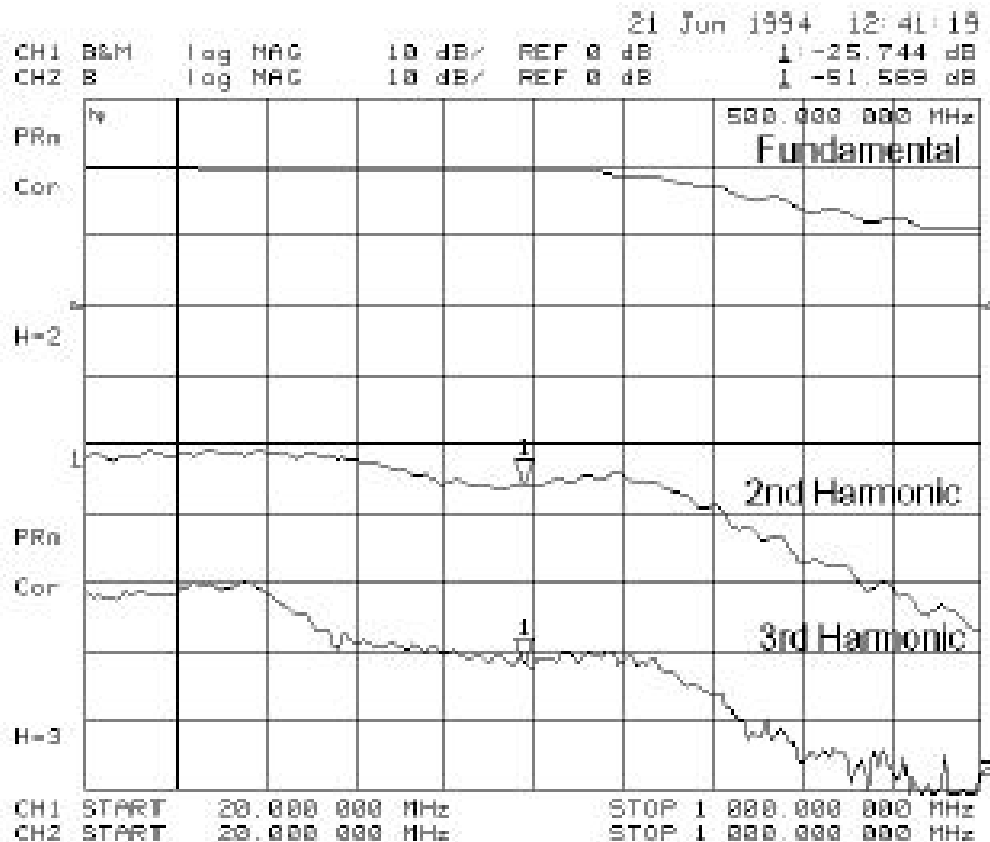


放大器的非线性失真测量

- Operation 002 (放大器的非线性失真测量--本机没有)
- 可以直接测量放大器的二次和三次谐波，如下图所示。

放大器的二次和三次谐波失真

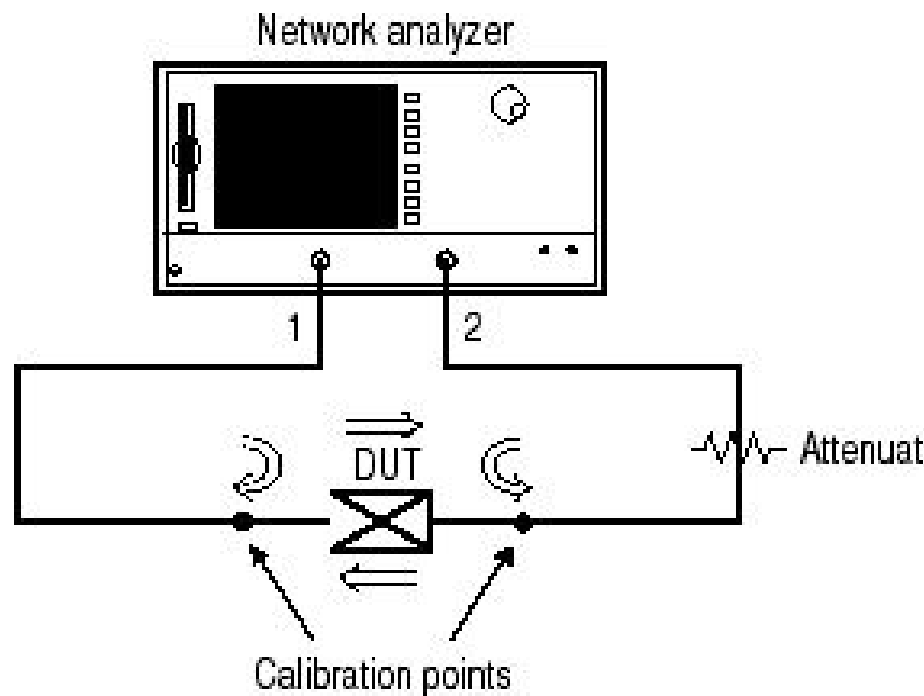
Absolute Fundamental, 2nd, and 3rd Harmonic Output Levels



pg6239

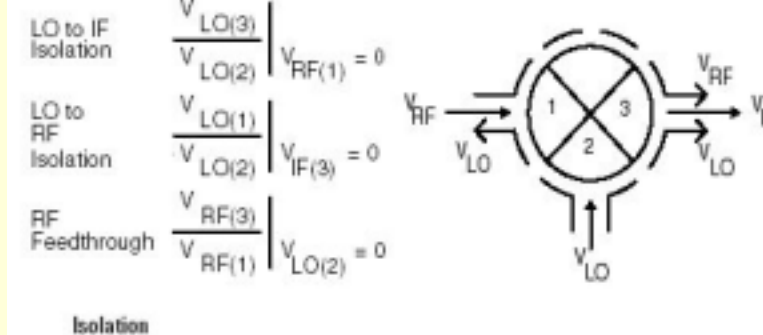
功率放大器测试

- 无需前置放大器；
- 正向和反向测量；
- 两端口误差校准或频响误差校准。



Configuration 1

9.4.4 混频器测试



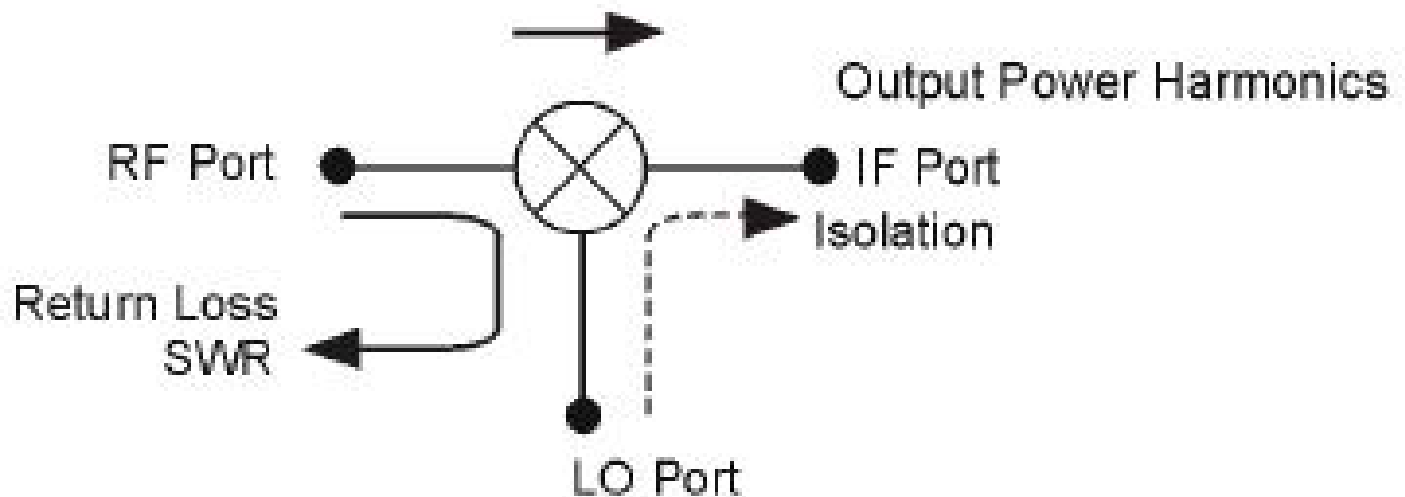
- 频率转换器件（FTDs：Frequency-translation devices）的测量，包括混频器、频率转换器和调谐电路的测量。
- 利用射频网络分析仪，我们可以测量混频器RF输入端口的反射参数，变频转换损耗，LO端口-IF端口隔离，LO端口-RF端口隔离，IF端口-RF端口泄露。

混频器参数

Mixer Parameters

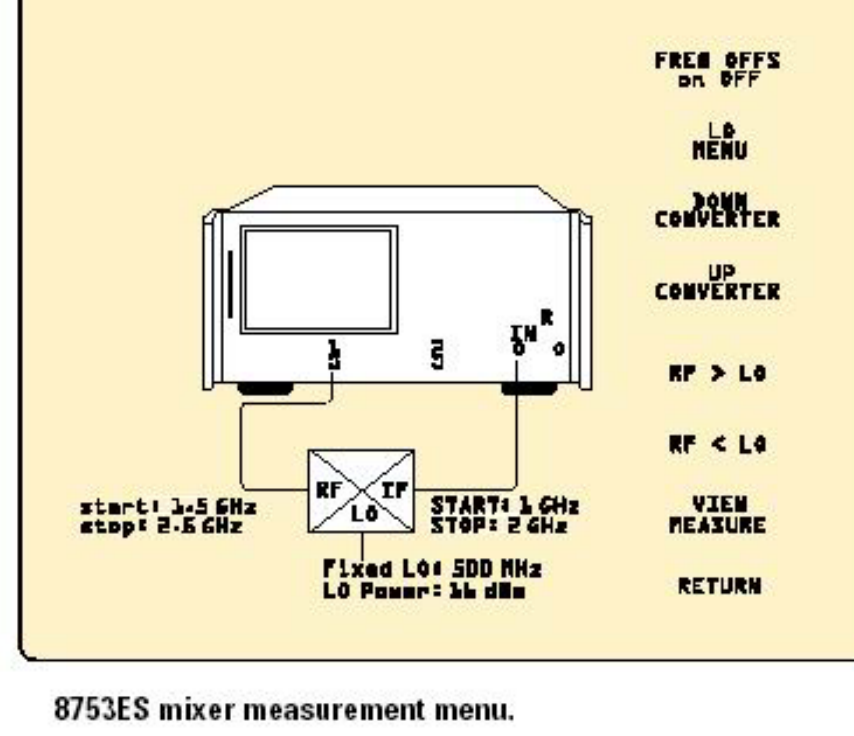
Conversion Loss
Conversion Compression
RF Desensitization

RF Feedthru
Phase Linearity
Group Delay (Compared to Reference)



混频器测试

- 8753ES工作于 FREQ OFFS on off模式；
- 有上、下变频模式；
- 变频转换损耗的定义、测量方法；
- 反射测量；
- 隔离的测量。

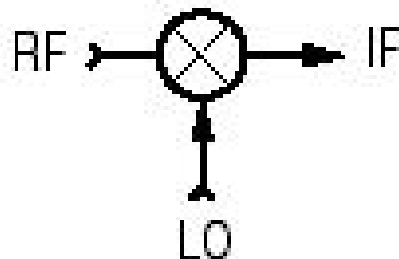


变频转换损耗

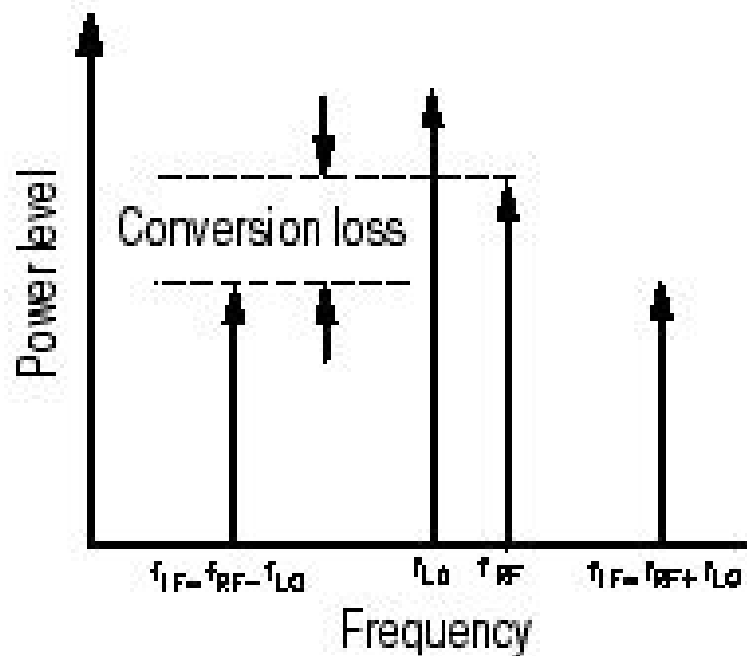
- 变频转换损耗的定义、测量方法和重要性：
- 变频转换损耗的定义：
 - **如下图所示**，变频转换损耗的定义是：在 L_0 功率固定的情况下，输出信号功率（IF）和输入信号功率（RF）之比。
 - 固定 L_0 的功率是重要的，这是因为二极管的阻抗是随着 L_0 的功率变化而变化的。
- 变频转换损耗的两种测量方法：
 - **如下图所示**，一种是固定 L_0 的频率，测量变频转换损耗随IF变化的曲线；
 - 另一种是固定IF的频率，测量变频转换损耗随RF变化的曲线。

变频转换损耗的定义

注意：这里
IF是指混频
器的输出。

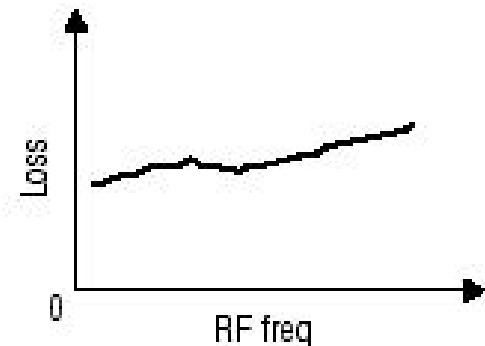
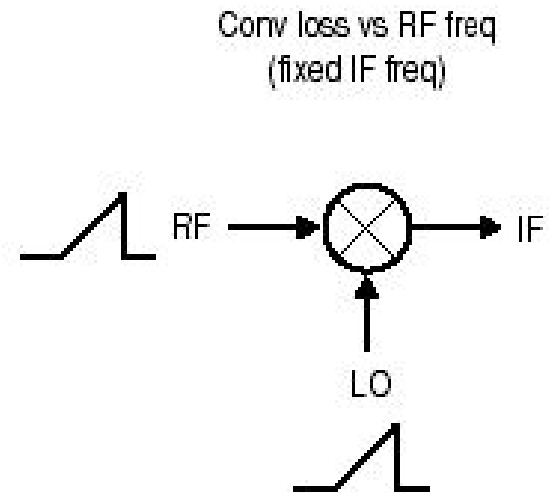
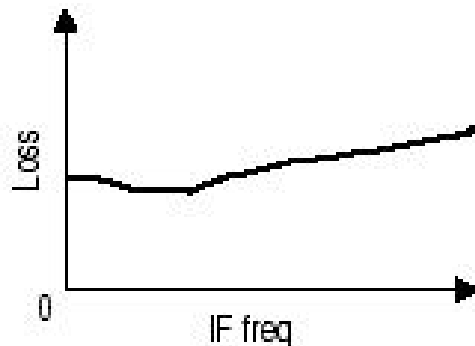
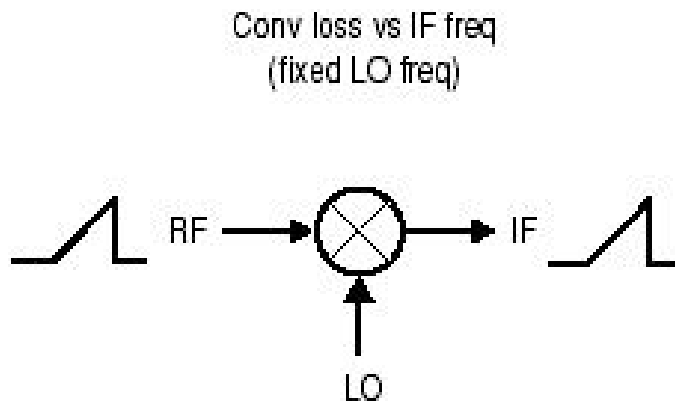


$$\text{Conversion loss} = 20 \cdot \log \left[\frac{\text{mag}(f_{\text{IF}})}{\text{mag}(f_{\text{RF}})} \right]$$



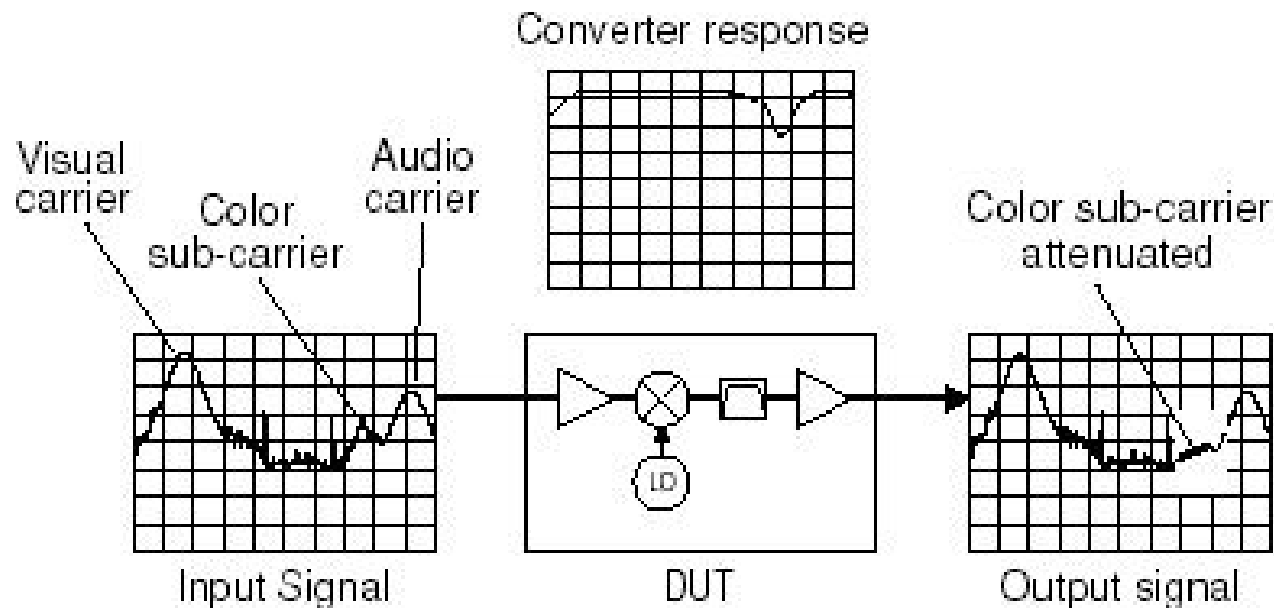
Conversion loss

变频转换损耗的两种测量方法

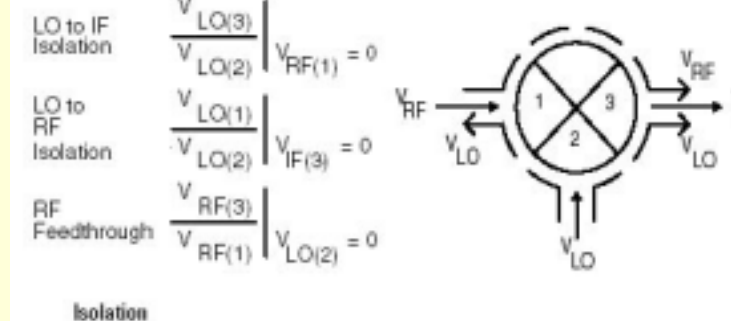


变频转换损耗平坦的重要性

- 以CTV为例，输入信号有视频载波、音频载波和色度付载波，若变频转换损耗不平坦，丢失了色度付载波，则无法进行色度解码。如下图所示。



反射测量



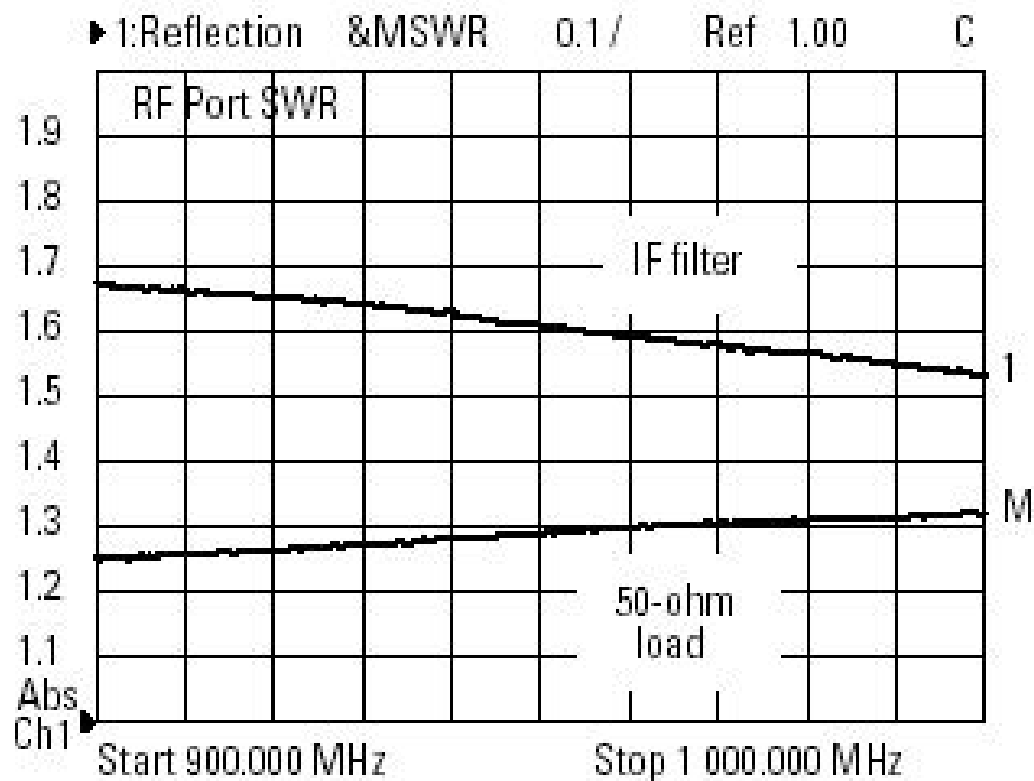
- 由于反射的信号没有经过频率转换，所以反射测量是线性的。因此，反射测量本质上是类似于滤波器和放大器的。
- 混频器是三端口器件，所以任何一个端口反射的测量都取决于另外两个端口的负载情况。
- 如果IF端口后接滤波器，那么若要测量RF端口或LO端口的反射，IF端口就需要断开滤波器，接上匹配负载。
- 若要测量RF端口或IF端口的反射，LO端口应处于实际工作状态，这是因为混频二极管的偏置阻抗都是LO端口电平的函数。
- **如下图所示**，这是混频器的一种最普遍的工作情况。即LO端口处于实际工作状态，测量RF端口的反射。

反射测量(续1)

- 反射测量是使用窄带检波器，所以反射测量也用电压驻波比来VSWR来表示。
- LO端口和IF端口的VSWR测量是类似的。若要测量IF端口的VSWR，RF端口应接上匹配负载，LO端口应处于实际的工作状态。
- 若要测量LO端口的VSWR，RF端口和IF端口应处于通常的工作状态。
- 调谐器的测量与混频器的测量是类似的，而且调谐器只要测量RF和IF两个端口，LO端口是已设置好了的。

混频器RF端口的反射测量

- 下面的曲线是IF端口接50 Ω 负载，上面的曲线是IF端口接滤波器。



隔离的测量

- 隔离就是一端口到另一端口的泄露，所以隔离测量也是传输测量。混频器各端口之间需要较好的隔离。
- 隔离测量是一端口到另一端口的同频率信号的泄露测量。
- 如下图所示的定义，感兴趣的有三种主要的隔离：射频-中频泄露；本振-中频泄露；本振-射频泄露。
- 由于混频器是位于接收机的前端，前面接有电缆或天线。所以，若有本振-射频泄露，将对其它的频带产生干扰。
- 对于单边带或双边带混频器，L0端口的隔离是比较小的。
- 对于双边带混频器，射频-中频泄露是比较低的。
- 由于L0的功率是大于RF的功率，所以射频-中频泄露是小于本振-中频泄露的。

三种主要的隔离

- 三种主要的隔离：
 - 射频-中频泄露的测量是类似于变频转换损耗的测量的，这是因为信号源和接收机的频率相同，不同的是IF端口后的滤波器必须断开。
 - 由于射频-中频泄露与LO的电平有关，所以测量射频-中频泄露时，LO端口应处于实际的工作状态。
 - 如下图所示，是射频端口泄露的测量举例。
 - 本振-中频泄露和本振-射频泄露的测量是类似于上面讨论的测量方法。
 - 需要注意的是，未使用的端口要接上合适的负载；LO端口的电平应处于混频器要求的实际的工作状态。

三种主要隔离的定义

LO to IF Isolation

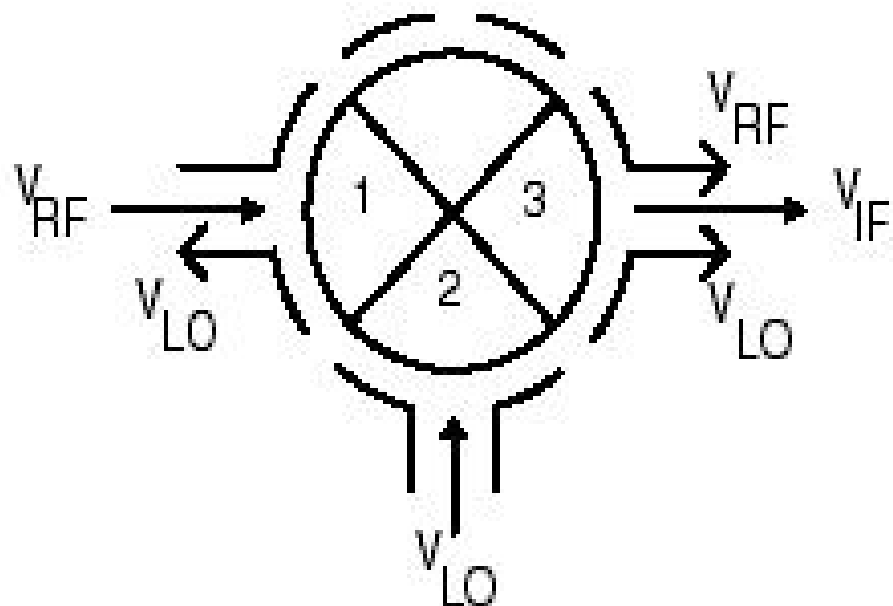
$$\left. \frac{V_{LO(3)}}{V_{LO(2)}} \right|_{V_{RF(1)} = 0}$$

LO to RF Isolation

$$\left. \frac{V_{LO(1)}}{V_{LO(2)}} \right|_{V_{IF(3)} = 0}$$

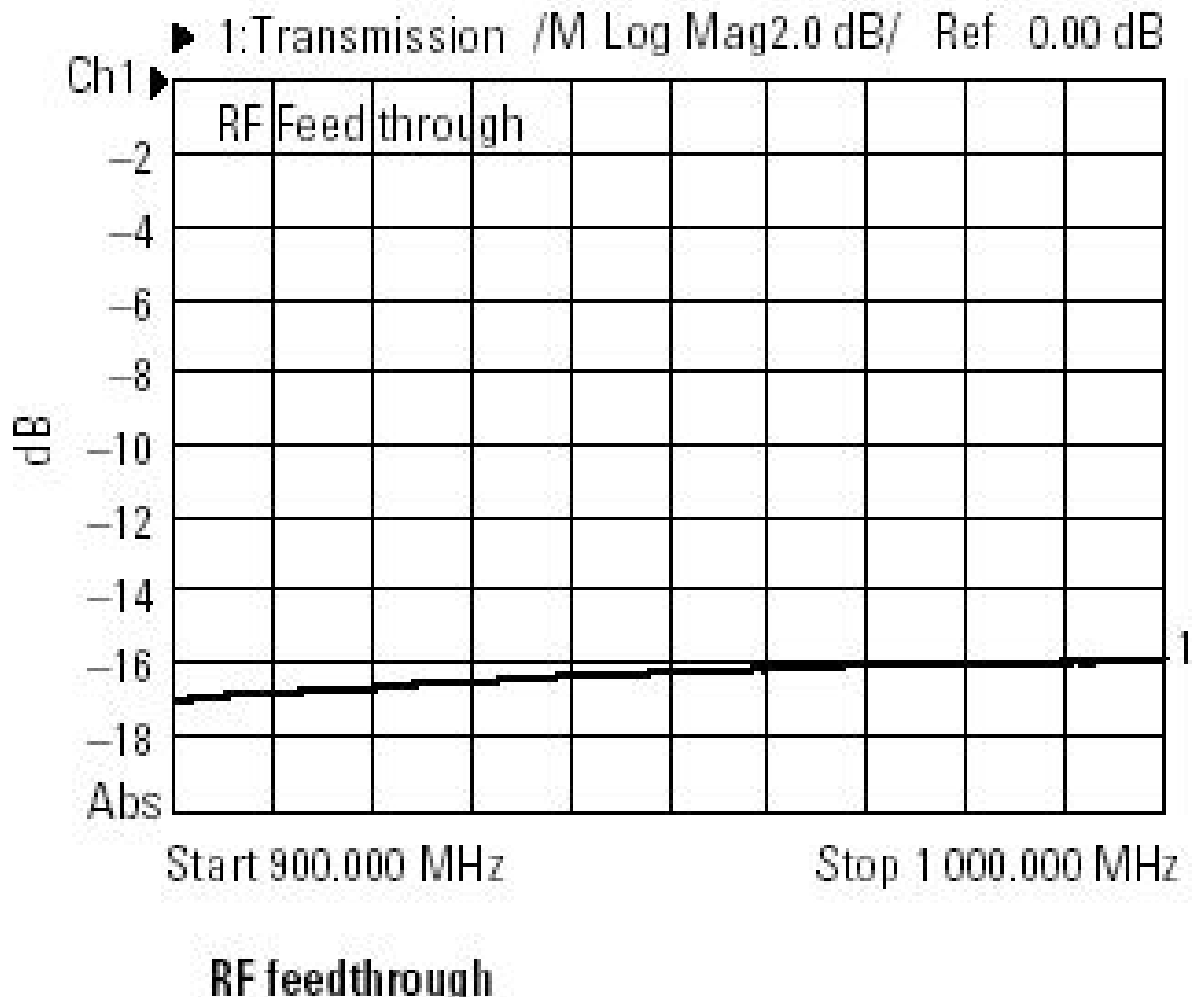
RF Feedthrough

$$\left. \frac{V_{RF(3)}}{V_{RF(1)}} \right|_{V_{LO(2)} = 0}$$

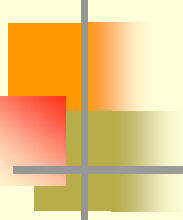


Isolation

射频端口泄露的测量



- Remove IF filter
- Apply proper LO power

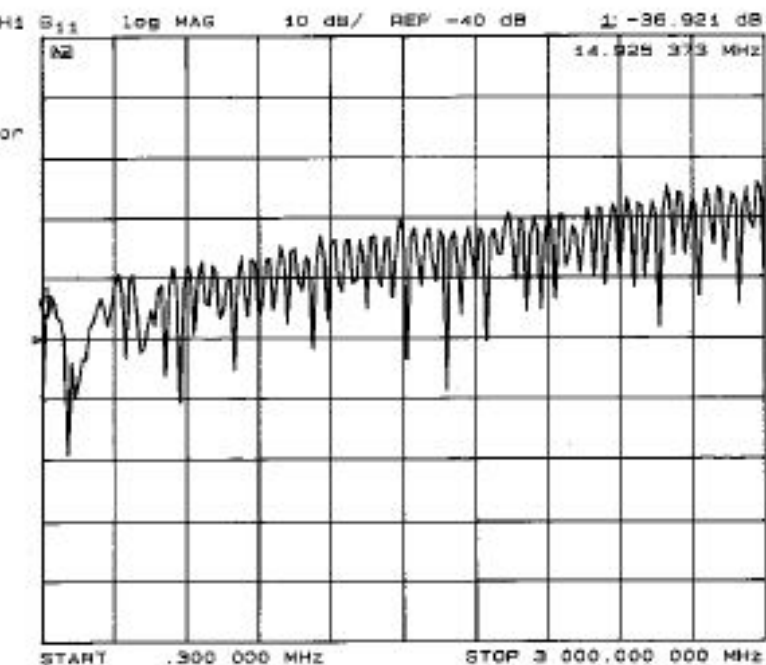


9.4.5 时域分析功能

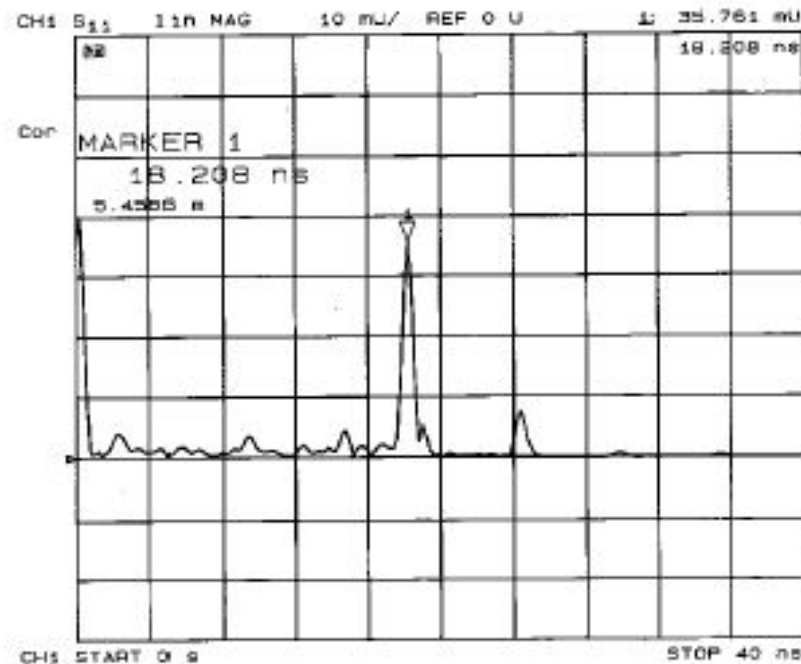
- Option 010 (时域功能--本机没有)
- 网络分析仪测量器件的频域特性经过反富里叶变换就变成器件的时域特性。
- 这种数学变换是由网络分析仪中的计算机完成的。

频域特性和时域特性的变换

Device Frequency Domain and Time Domain Reflection Responses



(a) Frequency Domain



(b) Time Domain Bandpass



第三次实验 射频矢量网络分析仪的使用

- 进行8753ES中四种校准过程：频响校准，频响和隔离校准，单端口校准和双端口校准的测量。
- 利用8753ES进行典型器件特性测量的测量：基本测量，滤波器测试，放大器和混频器测试。

第九讲射频矢量网络分析仪小结

- 网络分析是在所关心的频率范围内，通过**激励—响应测试**来建立**线性网络**的**传输与阻抗特性**的数据模型的过程。
- 在微波频段，因为采用了波的概念，所以微波网络常用S参数表示。**双口网络都可以用4个S参数来表示其端口特性。**
- 三种基本的误差来源：**系统误差**，随机误差和漂移误差。
- **系统误差**有六种：方向性误差D；反射路径的频率响应误差TR；源失配误差MS；隔离误差C；传输路径的频率响应误差TT；负载失配误差ML。
- 8753中四种校准过程：频响校准，频响和隔离校准，单端口校准和双端口校准。
- 双端口校准采用**短路-开路-负载-直通式校准法（SOLT）**。