



射频电路测试原理

第十讲 噪声系数分析仪(NFA)

leiyh@mail.tsinghua.edu.cn



参考文献

- 《通信电路原理》（第二版） 董在望、陈雅琴、雷有华、肖华庭编
- Agilent仪器说明书\N8973A_噪声系数分析仪\User's Guide_N8972-900800
- ..\Y-Factor_AN57_2_5952-3706E
- ..\Fundamentals_AN57_1_5952-8255E
- ..\Performance and Calibration_5968-9498E
- ..\10 Hints_AN57_3_5980-0288E
- ..\Data Sheet_5980-0164E
- ..\LNA Designs_AN1354_5980-1916E
- ..\Frequency Converting Devices_AN1487_5989-0400EN
- ..\SNS Product Overview_5988-0081EN



内容

10.1 噪声系数分析仪的基本结构

10.2 噪声系数的基本概念

10.3 噪声系数的测量原理

10.4 典型器件噪声系数测量简介

10.5 噪声系数分析仪的基本操作

第四次实验 噪声系数分析仪的使用

第十讲 噪声系数分析仪小结

10.1 噪声系数分析仪的基本结构

- Agilent 噪声系数分析仪系列：
 - N8972A (10 MHz to 1.5 GHz)。
 - N8973A (10 MHz to 3.0 GHz)。
 - N8974A (10 MHz to 6.7 GHz)。
 - N8975A (10 MHz to 26.5 GHz)。

基本结构(续1)

- 利用通用噪声源346A/B/C系列的连接图

NFA with a Normal Noise Source connected



基本结构(续2)

■ 利用SNS噪声源N4000A、N4001A和N4002A的连接图

Typical Noise Figure Measurement Test Setup



基本结构(续3)

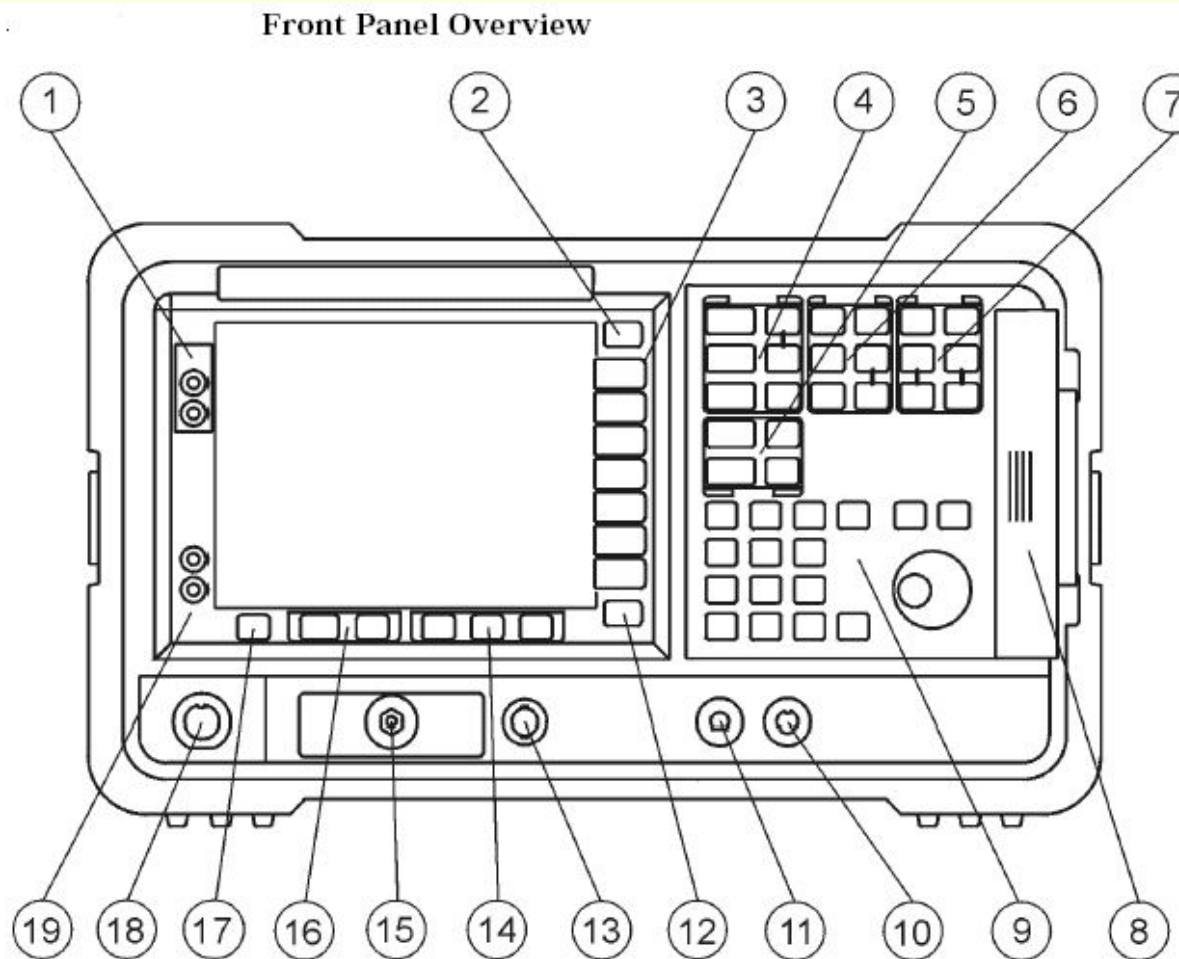
- SNS噪声源N4000A、N4001A和N4002A

An Agilent SNS Smart Noise Source



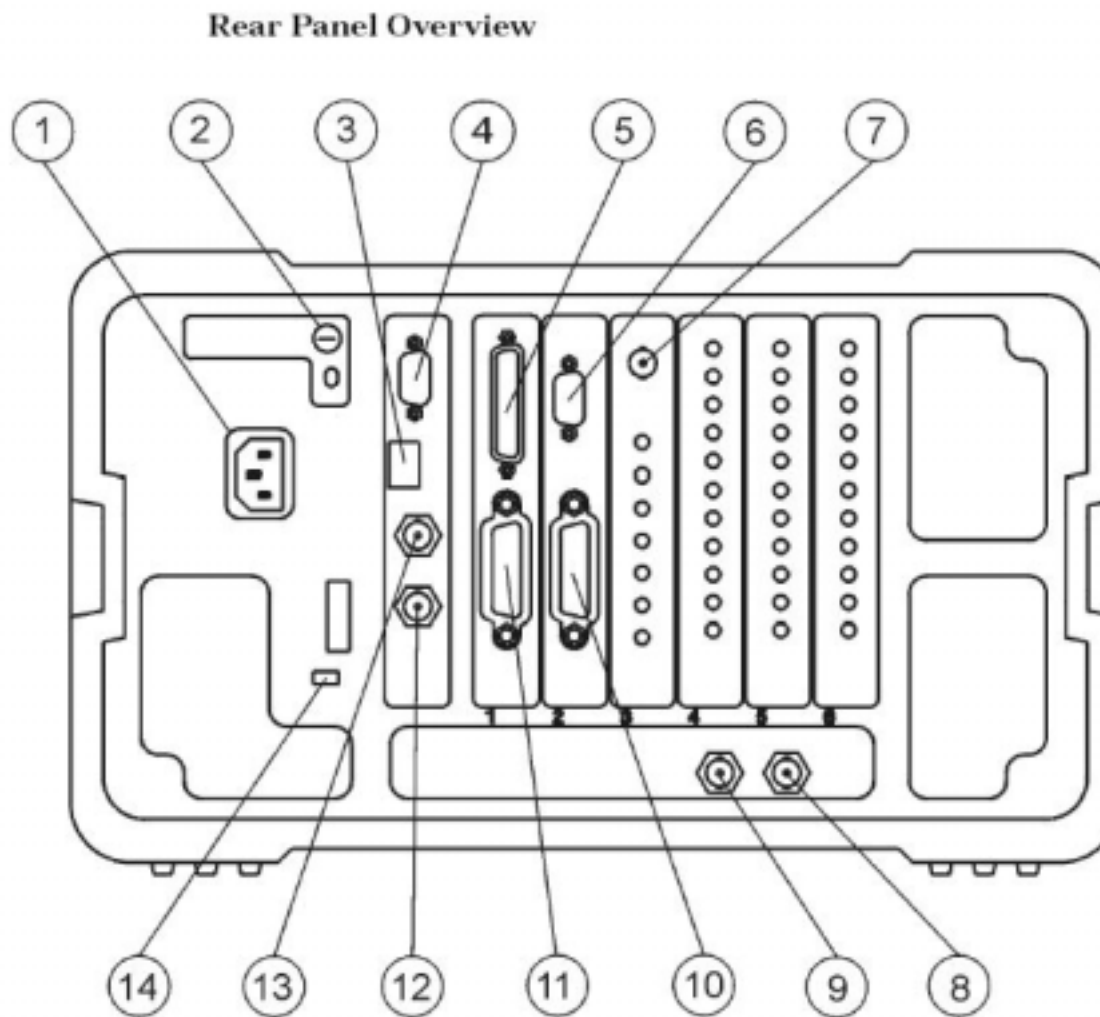
基本结构(续4)

1. 视角调整键
2. ESC回退键
3. 菜单显示键
4. 测量功能键组
5. 显示功能键组
6. 控制功能键组
7. 系统功能键组
8. 软盘驱动器
9. 数字量等输入键
10. 键盘连接器
11. 探头电源连接器
12. Prev键
13. 噪声源电源连接器
14. Tab键
15. NFA输入连接器
16. Next Window键
17. Help键
18. SNS噪声源连接器
19. 电源开关键



基本结构(续5)

1. 电源插座
2. 保险丝
3. 维修连接器
4. VGA显示输出
5. 打印机并行接口
6. RS232程控接口
7. Presel 调谐连接器
8. 10 MHz REF IN
9. 10 MHz REF OUT
10. LO GPIB
11. MAIN GPIB
12. AUX OUT(TTL)
13. AUX IN (TTL)
14. 电源接通选择





Agilent噪声系数分析仪的模式

- 放大器测量模式：DUT没有频率转换功能，可以是放大器、滤波器和衰减器。
- 放大器测量模式有两种：
 - DUT的测量频率在NFA的频率范围内，不需外接设备；
 - DUT的测量频率超出NFA的频率范围，需要外接LO（作为混频器）。
- DUT有频率转换功能的测量模式也有两种：下变频测量模式和上变频测量模式。
 - 下变频测量模式：可以是混频器和接收机。
 - 上变频测量模式：可以是发射机或复杂的电路。



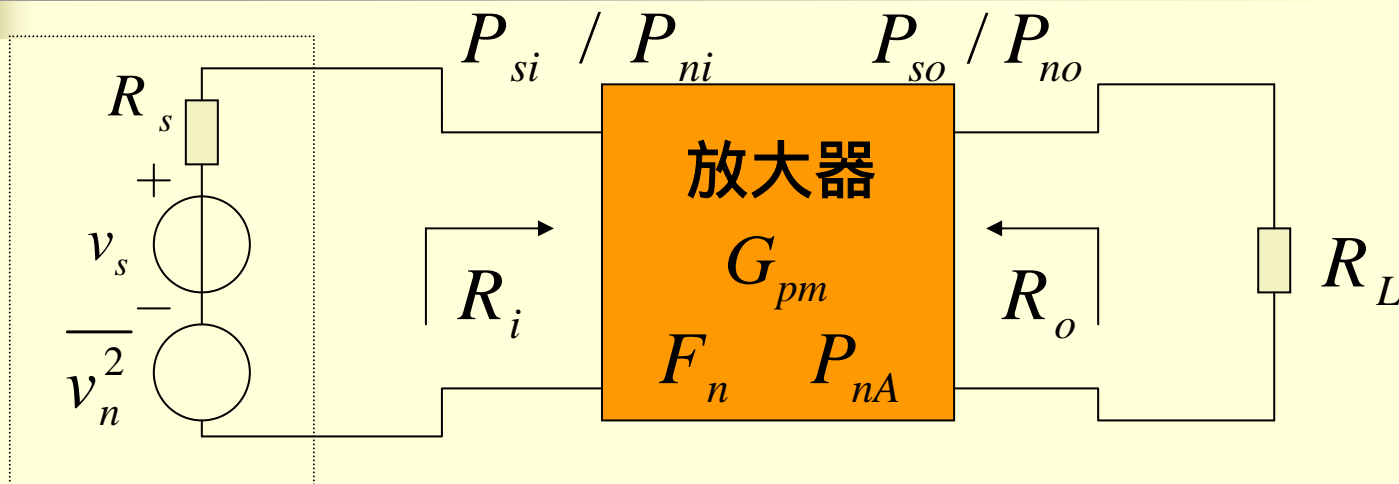
10.2 噪声系数的基本概念

- 噪声系数的定义
- 级连网络的噪声系数
- 噪声温度
- 噪声系数和相位噪声
- 高频噪声系数和低频的 $1/f$ 噪声

- 内阻 R_S 的额定噪声功率为: $P_{nim} = kT\Delta f$

噪声系数的定义

标准信号源



噪声系数的定义：

- 在**标准信号源**激励下，网络输入信噪比与其输出信噪比的比值。
即信噪比变坏的程度。

$$F_n = \frac{P_{si} / P_{ni}}{P_{so} / P_{no}}$$

- “**标准信号源**”是指信号电压为 V_s ，内阻为 R_s ，并仅含有 R_s 产生的白噪声的信号源。

$$\overline{v^2} = 4kTR \Delta f$$

对噪声系数物理意义的三种理解

■ 信噪比恶化的程度：

$$F_n = \frac{SNR_i}{SNR_o} = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}}$$

■ 网络输出噪声功率和输入噪声功率在输出端的比值：

$$F_n = \frac{SNR_i}{SNR_o} = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} = \frac{P_{no}}{(P_{so}/P_{si})P_{ni}} = \frac{P_{no}}{G_p P_{ni}}$$

■ 任何实际网络的噪声系数，都是在理想网络噪声系数的基础上加上一个增量。

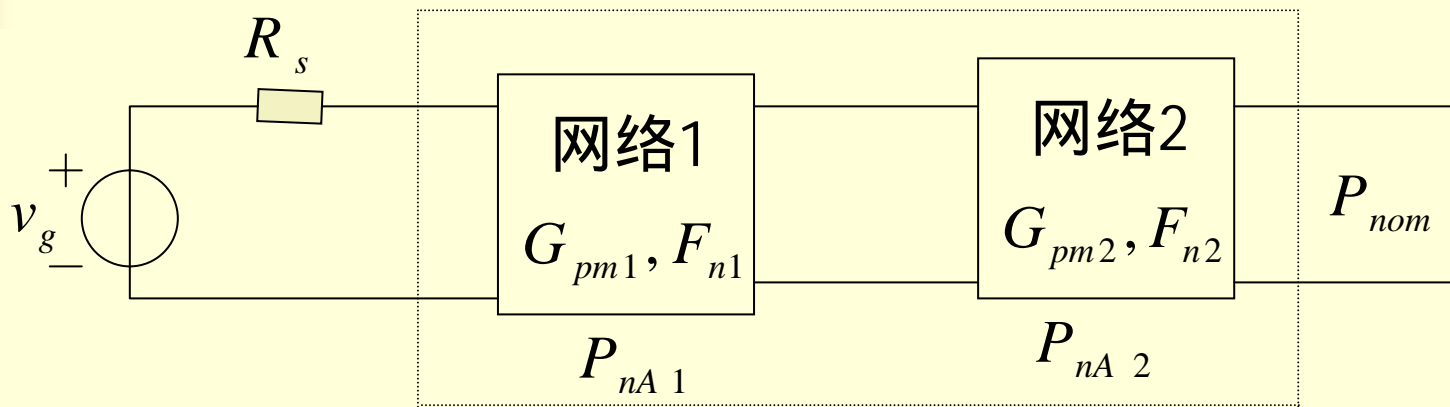
$$F_n = \frac{P_{no}}{G_p P_{ni}} = \frac{G_p P_{ni} + P_{nA}}{G_p P_{ni}} = 1 + \frac{P_{nA}}{G_p P_{ni}}$$

G_{pm1} 和 G_{pm2} 分别为两网络的额定功率增益。

F_{n1} 和 F_{n2} 分别为两网络的噪声系数。

P_{nA1} 和 P_{nA2} 分别表示两网络的附加噪声功率。

级连网络的噪声系数



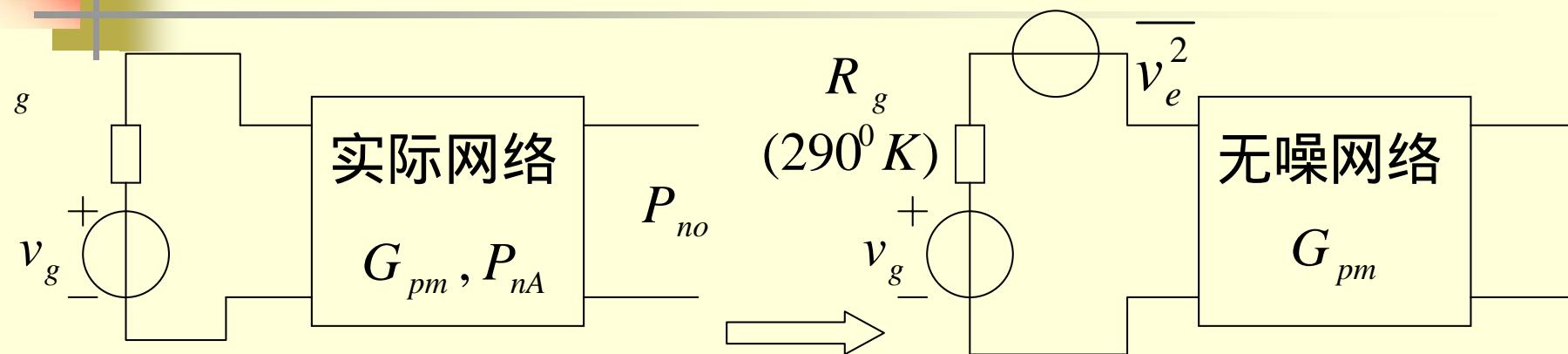
依此类推，N级级联网络的总的噪声系数为：

$$F_n = F_{n1} + \frac{F_{n2} - 1}{G_{pm1}} + \frac{F_{n3} - 1}{G_{pm1} G_{pm2}} + \dots + \frac{F_{nN} - 1}{G_{pm1} \cdots G_{pm(N-1)}}$$

上式说明：级联网络的噪声系数，主要由网络前级的噪声系数确定。前级的噪声系数越小，功率增益越高，则级联网络的噪声系数就越小。

■网络的噪声性能也可以用噪声温度来表示。但要注意的是，网络的噪声温度不是该网络的实际物理温度，而是用以表征该网络噪声性能的一种假想温度。

噪声温度



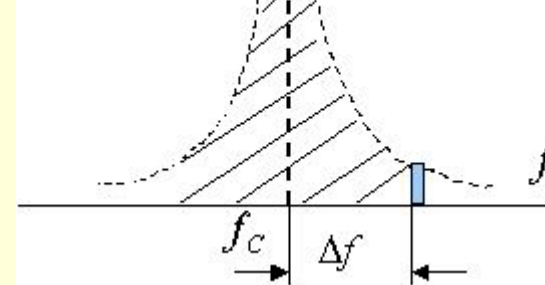
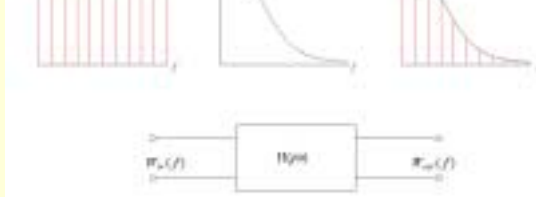
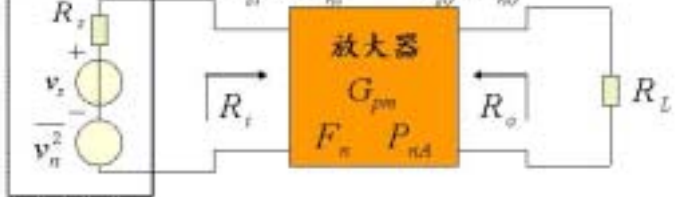
实际网络 ($T_0 = 290^0 K$) 用一无噪声网络和一噪声源 $\overline{v_e^2}$ 等效。

设 $\overline{v_e^2}$ 是由信号源内阻 R_g 在一假想温度 T_e 下产生的噪声电压。

$$\overline{v_e^2} = 4KT_e R_g \Delta f \quad \text{此温度 } T_e \text{ 是网络的等效噪声温度。}$$

当网络噪声较小时，用噪声温度来表示更方便些。

举例： $F_n = 1.1, T_e = 29^0 K$; $F_n = 1.05, T_e = 14.5^0 K$ 。



噪声系数和相位噪声

- 相同点：
 - 都是网络内部噪声在输出端的反映；
- 不同点：
 - 噪声系数是开环网络噪声在输出端的反映，相位噪声是闭环网络噪声在输出端的反映；
 - 噪声系数是在**标准信号源**激励下，网络输入信噪比与其输出信噪比的比值，**即信噪比变坏的程度**；
 - 相位噪声表示距离载波 f 处，噪声相对于平均载波功率的大小，单位是dBc/Hz，**是与载波比较的**；
 - 噪声系数是用噪声系数分析仪测量的，相位噪声是用频谱分析仪测量的。

高频噪声系数和低频的 $1/f$ 噪声

- 广义地讲，凡是功率谱密度与频率成反比的随机涨落现象都可称之为 $1/f$ 噪声(闪烁噪声)。
- 低频 $1/f$ 噪声具有两个基本特性：
- (1) 低频 $1/f$ 噪声在一个相当宽的频带内，其功率谱密度与 f 成反比，且其频带上、下限都应应是有限值，其上限频率 f_h 视 $1/f$ 噪声与白噪声的相对大小而定，而下限频率 f_l 目前已测至 10^{-6}Hz ，其功率密度仍呈很好的 $1/f$ 特性。
- (2) 低频 $1/f$ 噪声电压或电流的功率谱密度近似与器件的电流的平方成正比，这意味着低频 $1/f$ 噪声起源于电阻的涨落。

低频 $1/f$ 噪声的模型

- 低频 $1/f$ 噪声源两种较为成熟的理论：载流子数涨落和迁移率涨落模型。
- 1957年, 迈克霍特(M. McWhorter)提出了表面载流子数涨落模型, 这种涨落是由表面氧化层的陷阱通过隧道贯穿半导体导带或价带的载流子相互作用所引起的：
 - 陷阱中心若能够成为 $1/f$ 噪声源, 它与半导体导带或价带交换载流子的时间常数必须在一个相当宽的范围内, 实验已测得为 10^{-6} to 10^5 s。
 - 这个范围也正好与观测到的 $1/f$ 噪声的频率范围所一致。
- 1969年, 胡格(Hooge)总结了各种金属和半导体材料中的 $1/f$ 噪声的测量结果, 提出了迁移率涨落模型。

低频 $1/f$ 噪声的测量

- 用GaAs材料制成的新型半导体器件，微波器件性能有很大提高，但此类器件主要缺点是低频噪声过大，运用宽温度范围低频噪声谱的测量功能可发现GaAs器件内部缺陷性质，这对改进它们的噪声性能有重要应用价值；
- 低频噪声测量技术是指对频率低于100kHz以下电压噪声（或电流噪声）的测量方法及装置。其测量频率下限一般为1Hz左右，但在一些半导体器件噪声机理研究中有时低到1mHz；
- 由于人们很难找到像高频噪声测量中常用的标准噪声源来对低频噪声进行比较法测量，因此，目前低频噪声测量只能借助诸如有效值表、谱分析仪等一些测量仪器进行直接测量；
- 低频 $1/f$ 噪声的测量装置包括低噪声前置放大器和低频动态信号分析仪（Agilent 35670A：0.000122Hz to 102.4kHz）。

10.3 噪声系数的测量原理

- 噪声系数的主要测量方法有：
 - Y系数法（随后讨论）。
 - 两倍功率测量法：在噪声源使用之前，利用信号发生器的两倍功率测量法是最普遍的方法。对于高噪声系数的器件，Y系数法很难精确测量，此法特别有用。
 - 直接测量法：对于高噪声系数的器件，这种方法特别有用。

噪声系数的测量原理（续1）

- 噪声源：
 - Agilent 346A/B/C通用噪声源。
 - Agilent SNS (Smart Noise Source) 噪声源。
- 噪声和增益的校准：
 - 前面测量的噪声系数 F_{sys} 是整个系统的噪声系数，我们通常是希望测量DUT的噪声系数。
 - 从级连网络的噪声系数方程已知，若DUT的增益很高，则系统噪声系数与DUT噪声系数相差很小。
 - 若DUT的增益较低或要求较高的测量精度，则需要进行修正。

两倍功率测量法

- 在噪声源使用之前，这是最普遍的方法。对于高噪声系数的器件，Y噪声法很难精确测量，此法特别有用。
 - 首先，在DUT的输入端口接有290K的匹配负载，测量DUT的输出功率。
 - 然后，在DUT的输入端接信号发生器，提供给定的测量带宽B内的信号，增加信号发生器的功率 P_{gen} 使DUT的输出功率增加3dB。
 - 则有：
$$F_{sys} = \frac{P_{gen}}{KT_0 B}$$
 - 上式表明，求噪声系数无需知道DUT的增益。

直接测量法

- 对于高噪声系数的器件，这种方法特别有用。
 - 首先，在DUT的输入端口接有290K的匹配负载，测量DUT的输出功率。
 - 如果已知DUT的增益和系统的带宽，则可计算DUT的噪声系数：

$$F_{sys} = \frac{P_{no}}{G_P P_{ni}} = \frac{P_{no}}{G_P K T_0 B}$$

10.3.1 噪声源

- 大多数通用的噪声源是采用低结电容的二极管，当二极管反向偏置并进入雪崩状态时，二极管产生的噪声是常数。
- 精密噪声源（例如：Agilent的SNS系列）的输出端加入衰减器，以降低SWR，减少测量中失配带来的误差。
- 利用噪声源的两种状态（on和off）可以测量噪声系数。
 - 当噪声源中的二极管没有偏置时，只有噪声源中的衰减器产生的热噪声，称为“冷态”；
 - 当二极管有反向偏置并进入雪崩状态时，噪声大大增加，称为“热态”。
- Agilent提供的SNS系列噪声源指标如下图所示。

噪声

Instrument model	Frequency Range (GHz)	Maximum Standing Wave Ratio (SWR)	Reflection Coefficient (Rho) (ρ)
N4000A ¹	0.01-1.5	<1.06:1	0.03
	1.5 - 3.0	<1.06:1	0.03
	3.0 - 7.0	<1.13:1	0.06
	7.0 - 18.0	<1.22:1	0.10
N4001A	0.01-1.5	<1.15:1	0.07
	1.5 - 3.0	<1.15:1	0.07
	3.0 - 7.0	<1.20:1	0.09
	7.0 - 18.0	<1.25:1	0.11
N4002A	0.01-1.5	<1.22:1	0.10
	1.5 - 3.0	<1.22:1	0.10
	3.0 - 7.0	<1.22:1	0.10
	7.0 - 18.0	<1.25:1	0.11
	18.0 - 26.5	<1.35:1	0.15

1. Maximum change in complex reflection coefficient between source ON and source OFF at all frequencies for N4000A only: 0.01.

■ 噪声信号源的超噪比ENR (Excess Noise Ratio) 的定义：

$$ENR = (T_S^{ON} - T_S^{OFF}) / T_0 \quad or \quad (ENR)_{dB} = 10 \lg [(T_S^{ON} - T_S^{OFF}) / T_0]$$

噪声源（续2）

- N4000A噪声源中加入大数值的衰减器，以降低SWR，减少测量中失配带来的误差。
- N4001A噪声源在“热态”（on）产生的噪声为1000K（Th），在“冷态”（off）产生的噪声为290K（Tc）。
- 测量噪声系数使用的噪声源必须经过校准，这就是噪声源的超噪比ENR (Excess Noise Ratio) 。
- SNS系列噪声源的ENR是存贮在EEPROM内，其它系列噪声源的ENR是存贮在软盘内。
- 所以，0dB ENR就是噪声源在“热态”和“冷态”之间产生290的温度变化。

噪声源（续3）

- SNS系列噪声源包括有温度传感器，可由NFA读入噪声源在“冷态”时的 T_c 。
- 通用的噪声源是采用低结电容的二极管，频率低于50GHz。对于毫米波的噪声源是采用气体放电管，将其置于波导内（例如：R/Q 347B）。



SNS-Series Noise Source



R/Q 347B waveguide noise sources

噪声源（续4）

- Agilent 346A/B/C通用噪声源：
 - 频率范围：
 - 346A/B : 10MHz to 18GHz ;
 - 346C : 10MHz to 26.5GHz。
 - ENR (Excess Noise Ratio) 范围：
 - 346A : 5~ 7dB ;
 - 346B : 15~16dB ;
 - 346C : 12~16dB (10MHz to 12GHz) ; 14~17dB (12MHz to 26.5 GHz) 。
- Agilent SNS (Smart Noise Source) 噪声源：
 - 频率范围：
 - N4000A/N4001A : 10MHz to 18GHz ;
 - N4002A : 10MHz to 26.5 GHz。
 - ENR范围：
 - N4000A : 4.5~6.5dB ;
 - N4001A : 14~16dB ;
 - N4002A : 12~17dB。

$$\tau_n = \frac{P_{no}}{G_p P_{ni}} = \frac{G_p P_{ni} + P_{nA}}{G_p P_{ni}} = 1 + \frac{P_{nA}}{G_p P_{ni}}$$

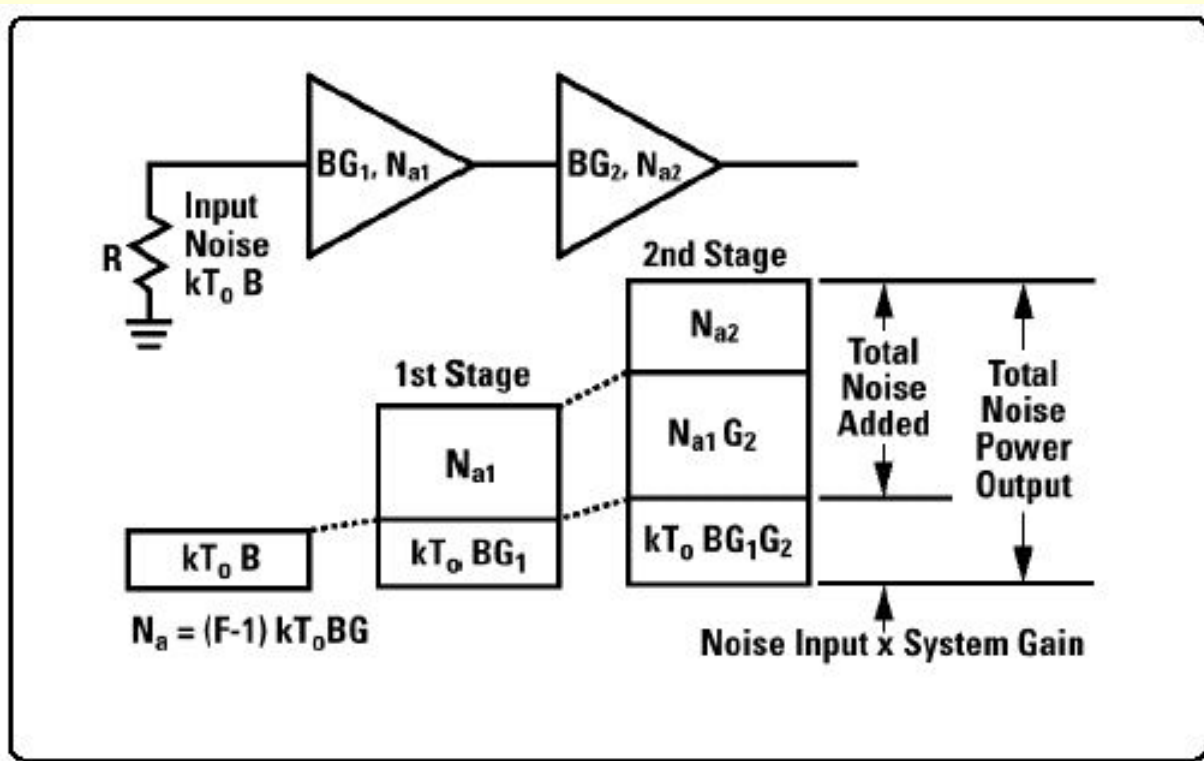
$$F_n = F_{n1} + \frac{F_{n2} - 1}{G_{pm1}} + \frac{F_{n3} - 1}{G_{pm1} G_{pm2}} + \dots + \frac{F_{nN} - 1}{G_{pm1} \dots G_{pm(N-1)}}$$

10.3.2 Y系数法测量

■ 级连网络示意图

$$F_1 = F_{12} - [(F_2 - 1) / G_1]$$

$$\Rightarrow T_1 = T_{12} - T_2 / G_1$$

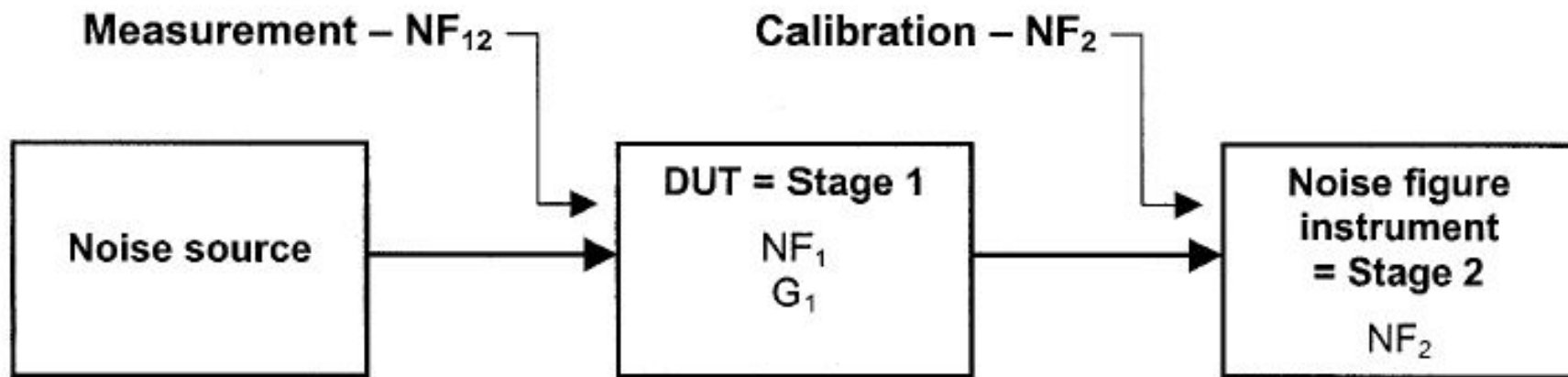


$$F_1 = F_{12} - [(F_2 - 1) / G_1]$$

$$\Rightarrow T_1 = T_{12} - T_2 / G_1$$

Y系数法测量（续1）

- 利用两级级连网络进行噪声系数测量的示意图：
 - 第一步是噪声系数测量仪的校准（测量 F_2 ）；
 - 第二步是测量（测量 F_{12} ，计算 G_1 ）。



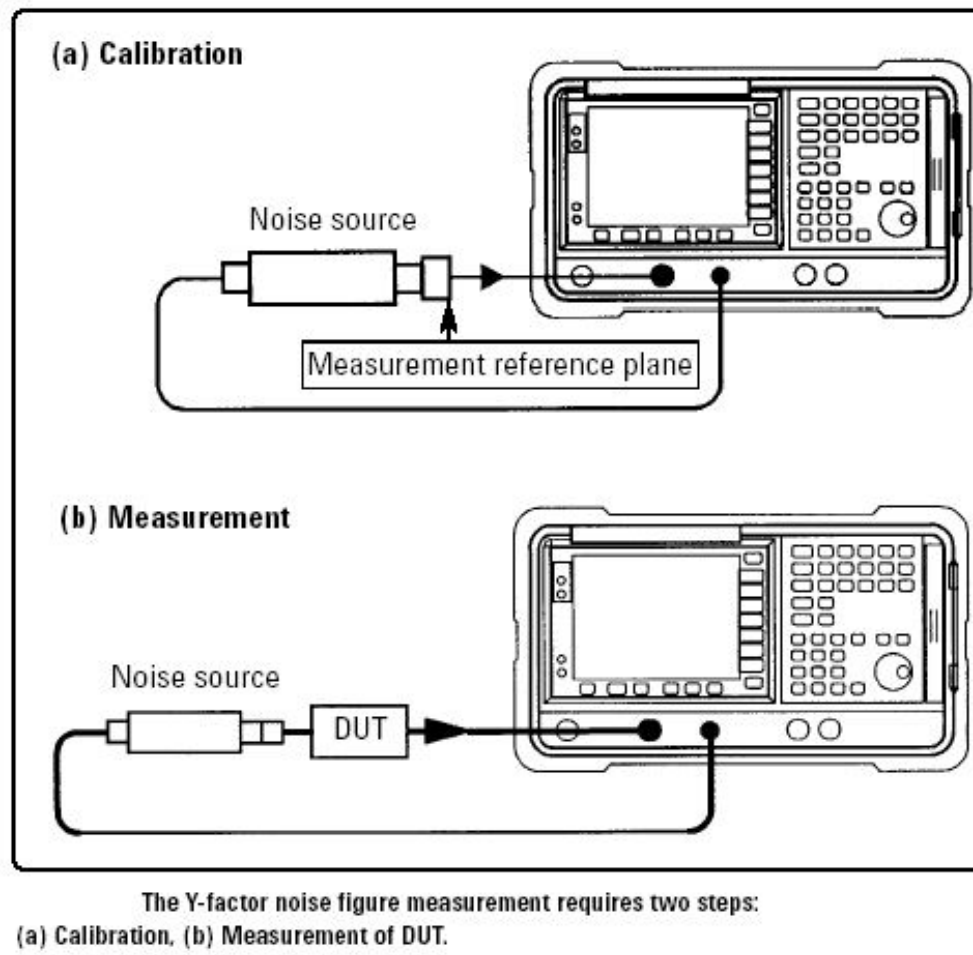
Noise figure measurement uses a two-stage system.

$$F_1 = F_{12} - [(F_2 - 1) / G_1]$$

$$\Rightarrow T_1 = T_{12} - T_2 / G_1$$

Y系数法测量（续2）

- Y系数法测量噪声系数分两步：
 - 第一步是噪声系数测量仪的校准（测量 F_2 ）；（Calibration）；
 - 第二步是测量（测量 F_{12} ，计算 G_1 ）（Measurement）；
 - 右图是使用346A/B/C通用噪声源；
 - 若使用SNS噪声源，则需利用SNS噪声源连接器。



$$F_1 = F_{12} - [(F_2 - 1) / G_1]$$
$$\Rightarrow T_1 = T_{12} - T_2 / G_1$$

Y系数法测量（续3）

- Y系数法测量步骤
- （1）什么是超噪比ENR？
- （2）什么是Y系数？
- （3）校准：进行Y系数测量（ F_2 ）；
- （4）利用DUT测量：重复Y系数测量（ F_{12} ）；
- （5）计算增益（ G_1 ）；
- （6）第二级修正。

Y系数法测量（续4）

（1）超噪比ENR： T_S^{OFF} 是物理温度， T_S^{ON} 可由ENR计算。

$$ENR = (T_S^{ON} - T_S^{OFF}) / 290$$

$$ENR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{T_S^{ON} - T_S^{OFF}}{290} \right)$$

（2）Y系数：连接噪声源到DUT，测量噪声源两种状态下（on和off）时DUT的输出功率，两种功率之比称为Y系数。也可表示为dB数。

$$Y = \frac{N^{ON}}{N^{OFF}} \quad \text{或} \quad Y = \frac{T^{ON}}{T^{OFF}}$$

■ 要完成DUT噪声系数和增益的测量，需要两步：校准和测量。

Y系数法测量（续5）

（3）校准：校准这一步没有DUT，进行Y系数测量（ F_2 ）。

$$Y_2 = N_2^{ON} / N_2^{OFF} = (T_S^{ON} + T_2) / (T_S^{OFF} + T_2)$$

$$\text{或 } T_2 = (T_S^{ON} - Y_2 T_S^{OFF}) / (Y_2 - 1)$$

（4）利用DUT测量：插入DUT，重复Y系数的测量（ F_{12} ）。

$$Y_{12} = N_{12}^{ON} / N_{12}^{OFF}$$

$$\text{或 } T_{12} = (T_S^{ON} - Y_{12} T_S^{OFF}) / (Y_{12} - 1)$$

Y系数法测量（续6）

（5）计算增益：

$$G_1 = (N_{12}^{ON} - N_{12}^{OFF}) / (N_2^{ON} - N_2^{OFF})$$

$$\text{或 } G_{1,dB} = 10 \log_{10} G_1 \text{ dB}$$

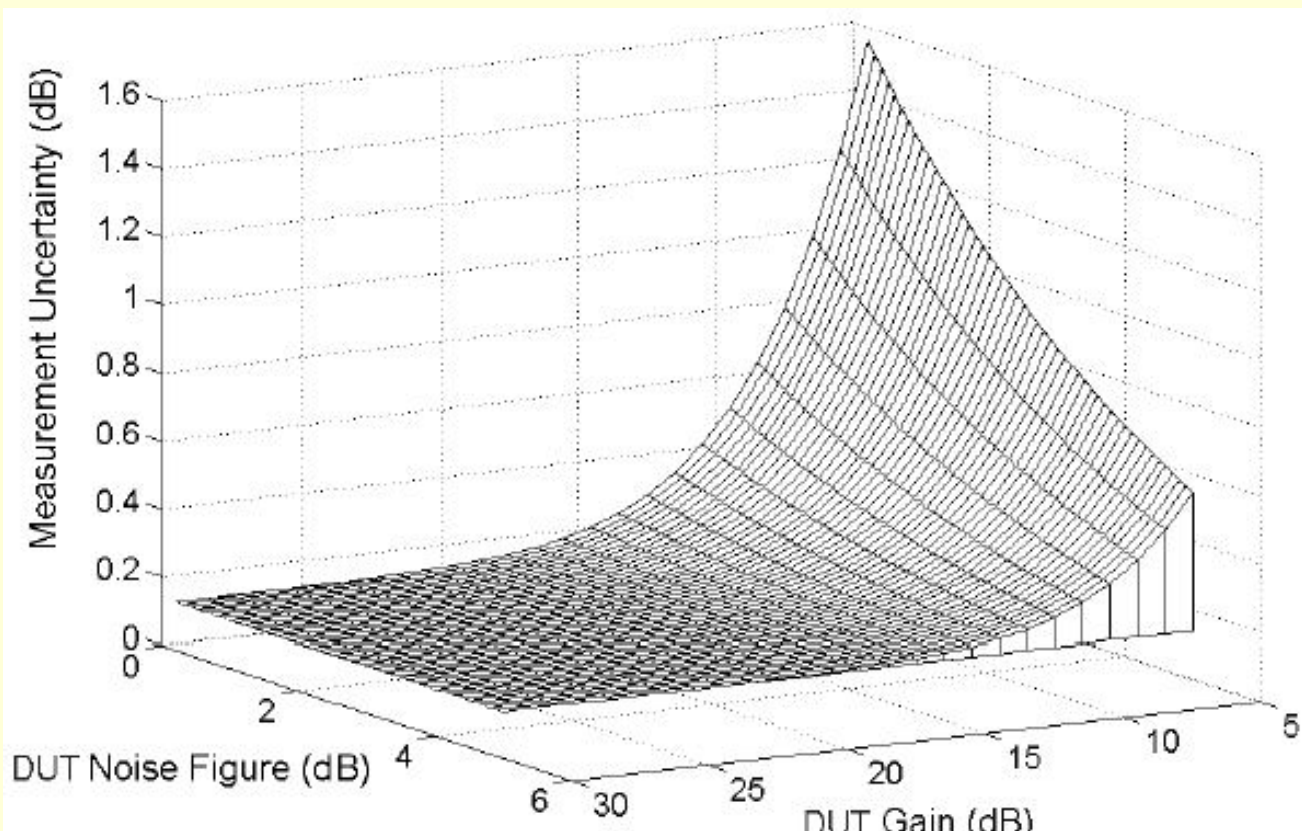
（6）第二级修正：现已测得 T_2 ， T_{12} 和 G_1 ，则有：

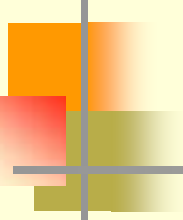
$$T_1 = T_{12} - T_2 / G_1$$

- 噪声系数分析仪可以多种方式显示测量结果：噪声温度 T_1 （单位是K）、噪声因数F（倍数_factor）和噪声系数NF（dB_figure）。

Y系数法测量精度分析

- Y系数法测量精度分析：一。可避免的测量误差；二。损耗和温度修正；三。误差计算。





一。可避免的测量误差

- (1) 预防干扰信号
- (2) 选用适当的噪声源
- (3) 如果需要利用前置放大器
- (4) 减小失配的影响
- (5) 利用平均消除显示波纹
- (6) 避免非线性和不稳定
- (7) 选用适当的测量带宽
- (8) 频率转换的计算
- (9) 计算插入损耗
- (10) 修正物理温度



二。损耗和温度修正

- (1) DUT前面的损耗修正
- (2) 组合修正
- (3) 噪声源的温度修正

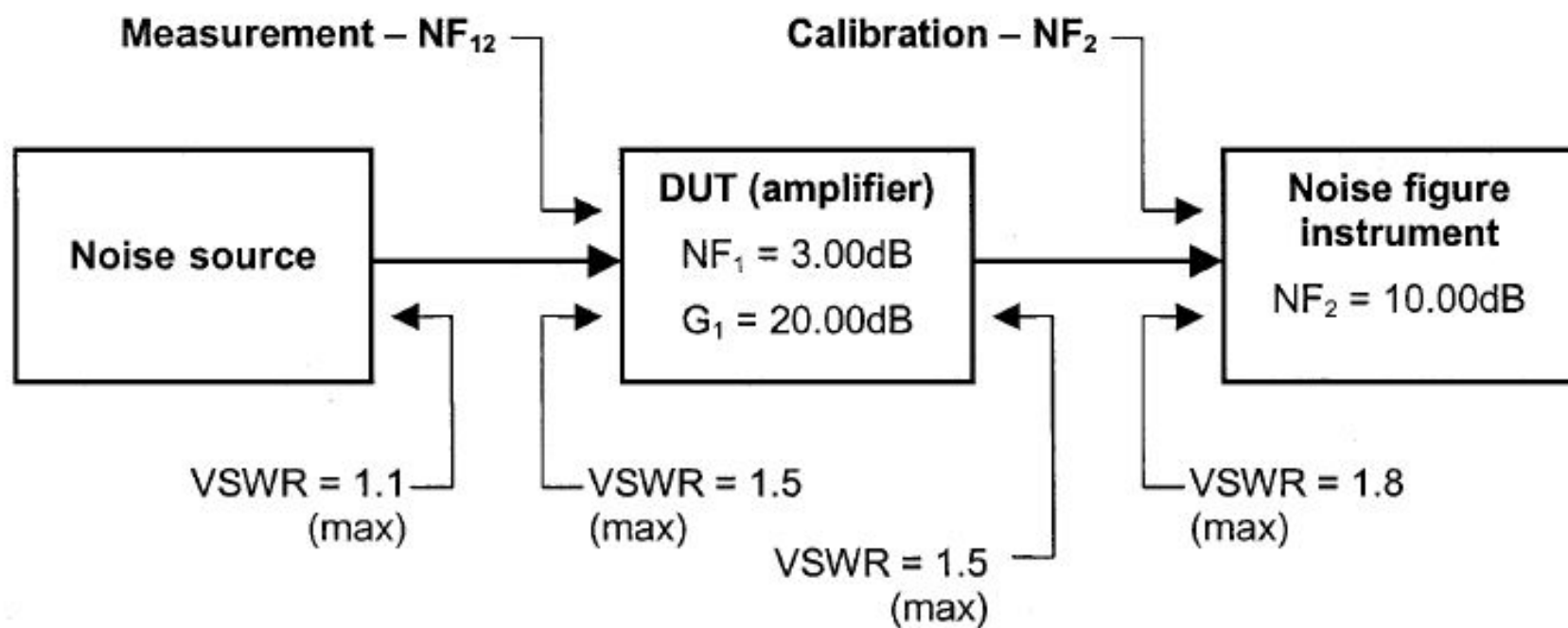
$$F_1 = F_{12} - [(F_2 - 1) / G_1]$$

$$\Rightarrow T_1 = T_{12} - T_2 / G_1$$

三。误差计算

- (1) 系统举例 (如下图所示) :
- 例如：若测得DUT的NF1=3.00dB，可能产生误差的来源有：
 - 校准时测量NF2=10dB的误差；（校准时不显示）
 - 插入DUT，测量NF12时的误差；（测量时不显示）
 - 校准时，在噪声源和NFA之间的阻抗失配；
 - 测量时，在噪声源和DUT之间的阻抗失配；
 - 测量时，在DUT和NFA之间的阻抗失配；
 - 噪声源的ENR的误差。

误差计算（续1）



Model for uncertainty calculation.

$$F_n = F_{n1} + \frac{F_{n2} - 1}{G_{pm1}} + \frac{F_{n3} - 1}{G_{pm1}G_{pm2}} + \dots + \frac{F_{nN} - 1}{G_{pm1} \dots G_{pm(N-1)}}$$

误差计算（续2）

（2）计算举例：

- 利用RSS（root sum of squares）统计法来计算噪声系数测量的误差。

$$\delta NF_1 = \sqrt{\left(\frac{F_{12}}{F_1} \delta NF_{12}\right)^2 + \left(\frac{F_2}{F_1 G_1} \delta NF_2\right)^2 + \left(\frac{F_2 - 1}{F_1 G_1} \delta G_{1,dB}\right)^2 + S \left(\left(\frac{F_{12}}{F_1} - \frac{F_2}{F_1 G_1}\right) \delta ENR_{dB}\right)^2}$$

- 上式中： F_1 是DUT的噪声系数（倍数）； F_2 是NFA的噪声系数（倍数）； F_{12} 是DUT和NFA的噪声系数（倍数）； G_1 是DUT的增益（倍数）； ENR_{dB} 是噪声源的超噪比；是总的误差（dB）； $S=1$ 对应于单频测量， $S=0$ 对应于频率转换测量。
- Agilent提供了计算噪声系数误差的表格软件方法：RSS计算方法和TAG4计算方法。

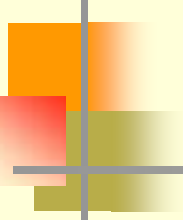


10.4 典型器件噪声系数测量简介

- 实现噪声测量的主要步骤
- 基本放大器噪声测量
- 频率变换器件的噪声测量

实现噪声测量的主要步骤

- 实现噪声测量的主要步骤：
- (1) 输入超噪比ENR (Excess Noise Ratio) 数据：使用SNS噪声源N4000A或N4001A，自动装入SNS噪声源的超噪比ENR表。
- (2) 设置测量频率：三种频率模式的选择：扫描模式Sweep，列表模式List，固定模式Fixed。
- (3) 设置带宽和平均功能。



典型器件特性测量简介

(4) 噪声系数分析仪的校准。

- 需要校准的场合：
 - NFA（噪声系数分析仪）复位或已使用一段时间。
 - 选择的测量频率或频率范围超出了校准的范围。
 - 在某一个模式下改变了固定的中频。
 - 改变了频率模式和测量模式。
 - 校准以后温度有较大的变化。
 - 输入信号电平不能大于校准时的输入衰减器范围。
 - 出现非法结果并显示“XX”时。
 - 右下角有显示“Uncorr”。

典型器件特性测量简介（续1）

（5）显示测量结果。

- 可利用的显示格式特点有：
 - 图表、表格和数值显示模式。
 - 显示一个图表或同时显示两个图表。
 - 一个显示图表的缩放。
 - 在同一个图表上显示两个类型的结果。
 - 标记可以搜索轨迹。
 - 显示一个现有的轨迹或一个存储的轨迹或两个都显示。
 - 存储现有轨迹的数据到存储器。
 - 开关网格和显示标注。

10.4.1 基本放大器噪声测量

- 基本LNA的技术指标：

The Example DUT Specifications

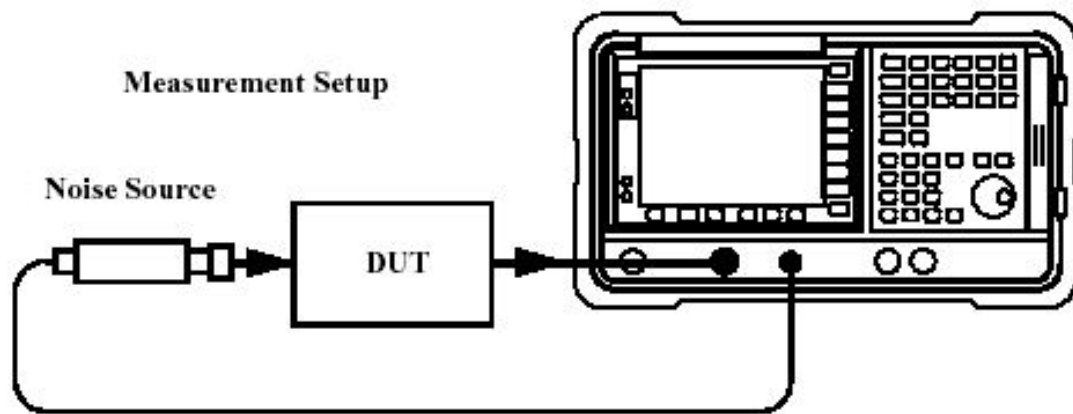
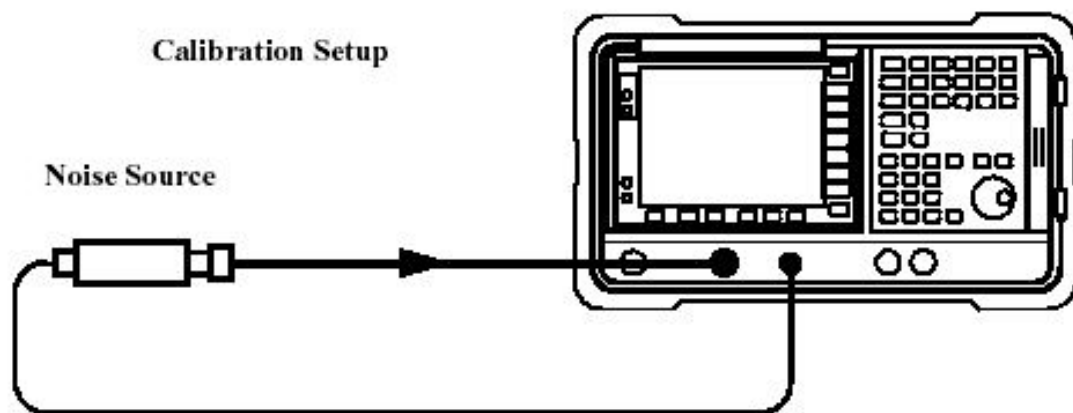
Frequency Range	Typical Gain	Minimum Gain	Typical Noise Figure
20 MHz to 3 GHz.	19 dB	14 dB	3.8 dB

- 测量的频率范围：1.0 GHz 到 2.0 GHz。
- 对于基本测量，NFA的 [Meas Mode] 是缺省设置，即：
[DUT: Amplifier]；[System Downconverter: Off]。

基本放大器噪声测量连接

Basic Noise Figure Measurement — No Frequency Conversion

- 右图是使用346A/B/C通用噪声源；
- 若使用SNS噪声源，则需利用SNS噪声源连接器。





进行NFA校准

- (1) 接通仪器的电源。为了保证测量精度，建议仪器预热至少一小时。缺省设置 [Alignment (On)]。
- (2) 返回NFA的工厂缺省模式。按 [System] , [More 1 of 3] , [Power On/Preset] , [Preset (Factory)]。按绿色的 [Preset]。
- (3) 输入噪声源的ENR数值。按 [ENR] , [ENR Mode (Table)] , [Common Table (On)] , [ENR Table]。 (频率范围为1.0 GHz 到 2.0 Hz)

进行NFA校准（续1）

- (4) 设置频率参数。按 [Frequency/Points] , [Freq Mode (Sweep)] , [Start Freq (1.0 GHz)] , [Stop Freq (2.0 GHz)] , [Points (15)] (max 401) 。
- (5) 设置带宽和平均功能。按 [Averaging/Bandwidth] , [Averaging (On)] , [Averages (5)] (max 999) , [Average Mode (Point)] , [Bandwidth (4 MHz)] 。
- (6) 若需要, 设置最大和最小的输入衰减。按 [Corr] , [Input Cal]。缺省的是 [Min RF Atten (0 dB)] 和 [Max RF Atten (20 dB)] 。



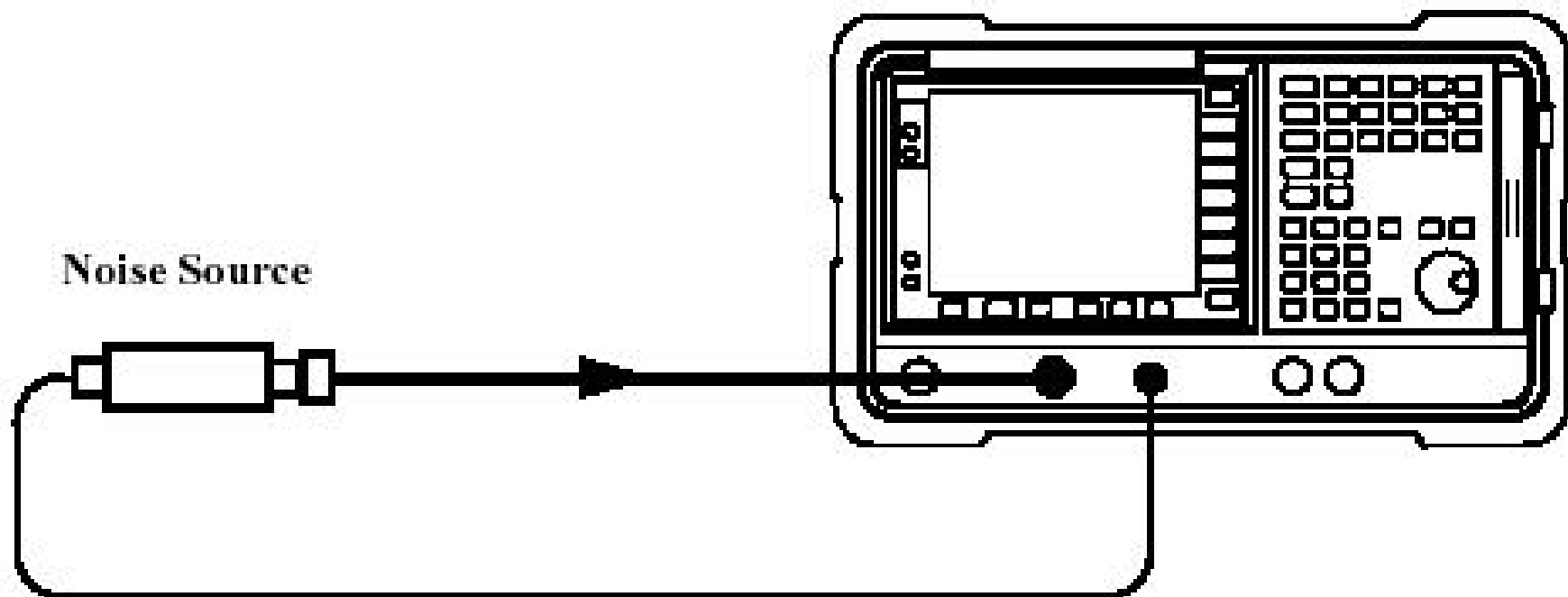
进行NFA校准（续2）

- (7) 对于通用噪声源346，噪声源的输入连接 NFA的 28V OUTPUT 端口（利用BNC电缆），噪声源的输出连接 INPUT 50 端口。对于SNS 噪声源，噪声源的输入连接 SNS Series Noise Source 端口（利用1173A电缆），噪声源的输出连接INPUT 50 端口。
- (8) 按 [Calibrate]两次，开始校准（请等待！屏幕显示校准过程）。可以给出图表和表格两种结果。

进行NFA校准（续3）

- 下图是使用346A/B/C通用噪声源；若使用SNS噪声源，则需利用SNS噪声源连接器。

Calibration Setup with Normal Noise Source

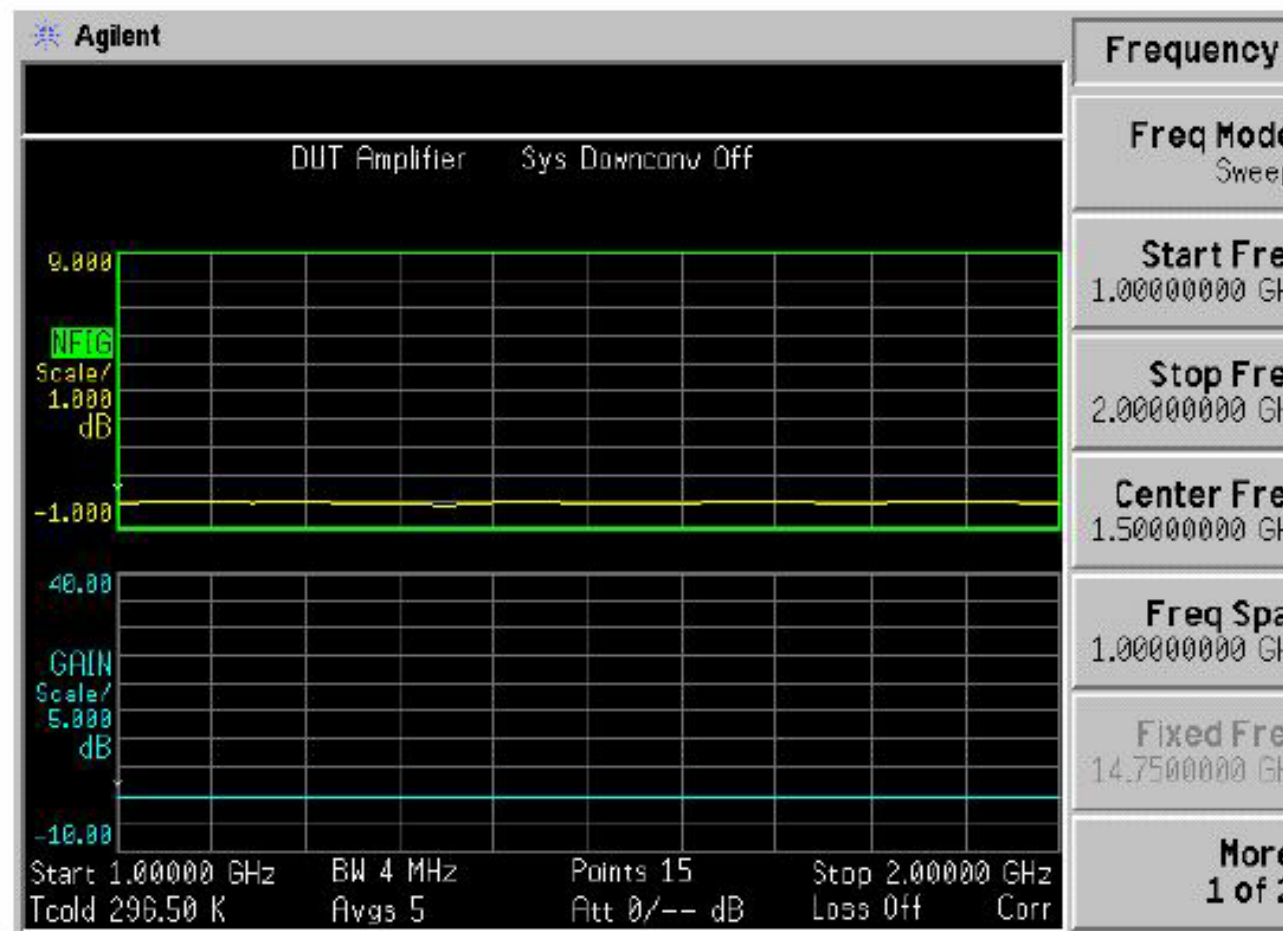


进行NFA校准（续4）

校准结果的图表表示如下：

- 因为没有DUT，所以校准后显示Corr，增益和噪声系数接近0dB。
- 因为有输入噪声，所以在0dB上下波动。

Typical Graph after calibration is complete



进行NFA校准（续5）

- 校准结果的表格表示如下：

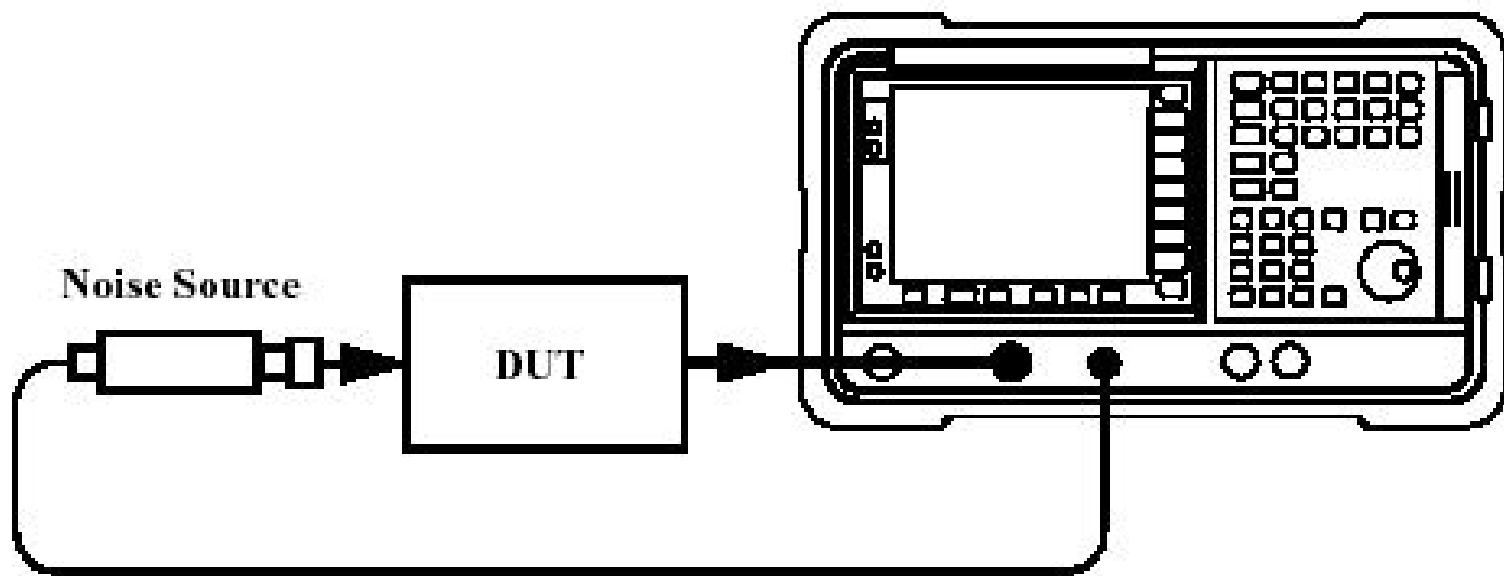
Typical Tabulated Results after Calibration

Agilent			Frequency
DUT Amplifier Sys Downconv Off			Freq Mode, Sweep
Freq	NoiseFig dB	Gain dB	Start Freq 1.00000000 GHz
1.000000 GHz	-0.040	0.013	Stop Freq 2.00000000 GHz
1.071429 GHz	0.021	0.002	Center Freq 1.50000000 GHz
1.142857 GHz	0.028	0.004	Freq Span 1.00000000 GHz
1.214286 GHz	-0.006	0.030	Fixed Freq 14.75000000 GHz
1.285714 GHz	0.074	0.000	More 1 of 2
1.357143 GHz	0.011	0.021	
1.428571 GHz	-0.050	0.005	
1.500000 GHz	-0.311	0.026	
1.571429 GHz	0.061	0.006	
1.642857 GHz	0.038	0.012	
1.714286 GHz	-0.035	0.028	
1.785714 GHz	0.036	0.005	
1.857143 GHz	0.074	0.025	
1.928571 GHz	0.029	0.019	
2.000000 GHz	0.056	0.021	
Start 1.00000 GHz BW 4 MHz Points 15 Stop 2.00000 GHz			
Tcold 296.50 K Avgs 5 Att 0/-- dB Loss Off Corr			

进行测量

- 断开噪声源与NFA的50 输入端的连接。
- 连接DUT到NFA的50 输入端。
- 连接噪声源到DUT（使用346A/B/C通用噪声源）。如下图所示。

Connecting the DUT to make a measurement



进行测量（续1）

- 如果噪声源和DUT已经连接好，测量结果就以表格的方式显示出来。若没有显示，按 [Restart]。

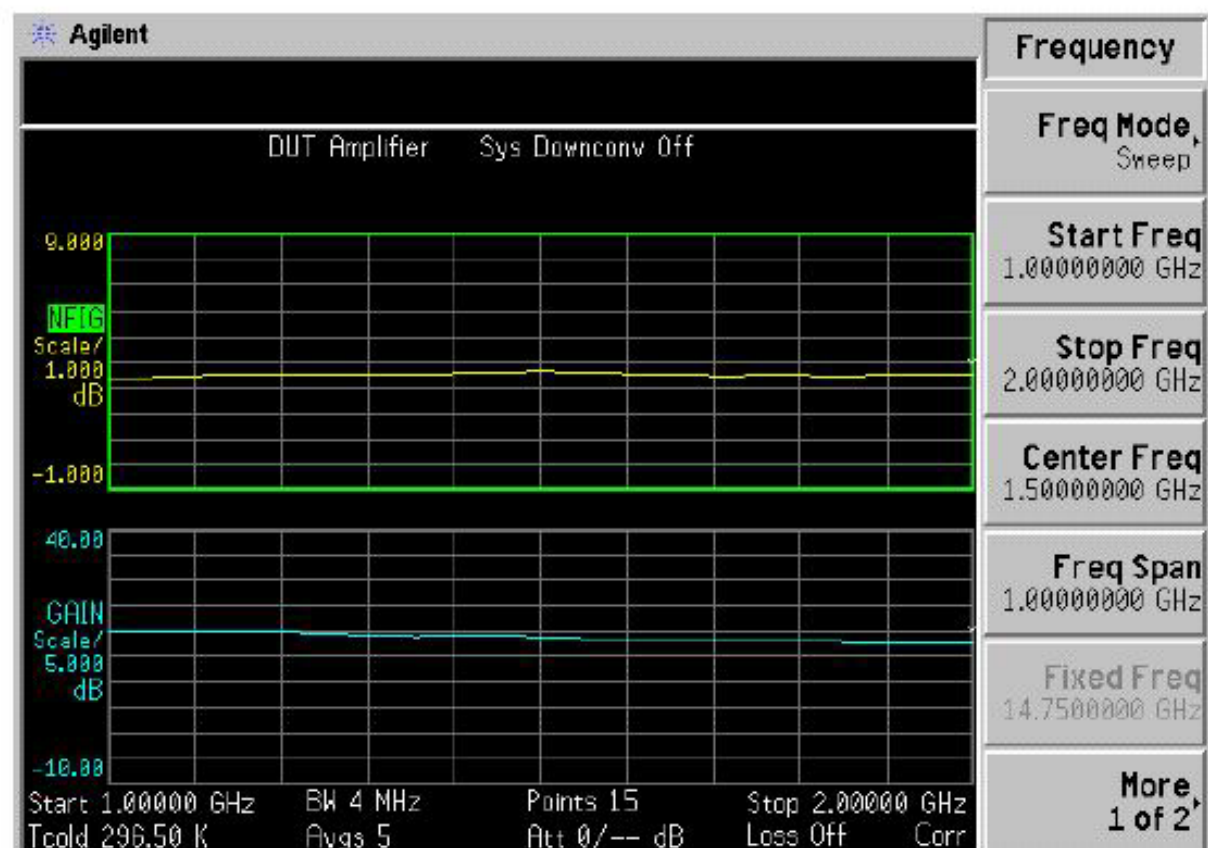
Typical Tabulated Results after Measurement

Agilent			Frequency
DUT Amplifier Sys Downconv Off			Freq Mode, Sweep
Freq	NoiseFig dB	Gain dB	Start Freq 1.0000000 GHz
1.000000 GHz	3.377	20.050	Stop Freq 2.0000000 GHz
1.071429 GHz	3.434	19.829	Center Freq 1.5000000 GHz
1.142857 GHz	3.543	19.904	Freq Span 1.0000000 GHz
1.214286 GHz	3.529	19.830	Fixed Freq 14.7500000 GHz
1.285714 GHz	3.559	19.376	More 1 of 2
1.357143 GHz	3.521	19.035	
1.428571 GHz	3.597	19.266	
1.500000 GHz	3.649	18.988	
1.571429 GHz	3.598	18.526	
1.642857 GHz	3.495	18.465	
1.714286 GHz	3.489	18.445	
1.785714 GHz	3.495	18.319	
1.857143 GHz	3.484	17.909	
1.928571 GHz	3.508	17.849	
2.000000 GHz	3.522	17.621	
Start 1.00000 GHz BW 4 MHz Points 15 Stop 2.00000 GHz			
Tcold 296.50 K Avgs 5 Att 0/-- dB Loss Off Corr			

进行测量（续2）

- 按 [Format], [Graph]。测量结果以图表的方式显示出来。

Typical Graphical Results after Measurement



10.4.2 频率变换器件的噪声测量

- 实现频率变换器件的噪声测量的主要步骤：
 - (1) 测量准备（选择噪声源、 L_0 、滤波器和前置放大器）。
 - (2) 设置测量频率方案（固定 IF 和固定 L_0 、固定 IF 和可变 L_0 、固定 L_0 和可变 IF 、边带选择）。
 - (3) 几种测量模式分析（放大器、下变频和上变频）。
 - (4) 测量举例（放大器测量、利用固定 IF 和可变 L_0 的下变频测量、利用固定 L_0 和可变 IF 的下变频测量）。



1. 测量准备

- 选择噪声源
- 选择L0
- 选择滤波器
- 选择前置放大器

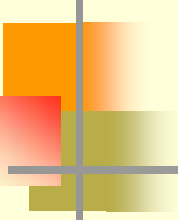
选择噪声源

■ 选择噪声源：

- 346B、346C、N4001A和N4002A可测噪声系数高达30dB。
- 346A和N4000A可测噪声系数高达20dB。
- 建议低ENR的噪声源（346A和N4000A）用于低噪声系数器件的测量。

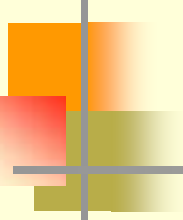
Agilent noise sources

Model number	Connector type	Frequency range	ENR range (dB)
346A	Coaxial	10 MHz – 18 GHz	4.5 – 6.5
346B	Coaxial	10 MHz – 18 GHz	14 – 16
346C	Coaxial	10 MHz – 26.5 GHz	12 – 17
346C (K01)	Coaxial	1 GHz – 50 GHz	6 – 21
R347B	Waveguide	26.5 GHz – 40 GHz	10 – 13
O347B	Waveguide	33 GHz – 50 GHz	6 – 13
N4000A	Coaxial	10 MHz – 18 GHz	4.5 – 6.5
N4001A	Coaxial	10 MHz – 18 GHz	14 – 16
N4002A	Coaxial	10 MHz – 26.5 GHz	12 – 17



选择LO的标准

- 选择LO的标准：
 - 频率范围要适合DUT的频率范围、IF范围和边带选择。
 - 有足够的功率来驱动混频器（典型值+7dBm）。
 - 噪声性能。
 - GPIB的连通性。
 - SCPI的兼容性。
- 在大多数情况下，Agilent（或其它公司）的高性能的信号发生器或频率综合器都可以作为NFA的LO使用。



选择L0的标准：L0的噪声性能

- L0的噪声性能很重要，这是因为信号发生器或频率综合器的相位噪声、频谱纯度和噪声平台都会影响到NFA的测量结果。
- 当使用信号发生器或频率综合器时，为了得到NFA精确的测量结果，需要使用滤波器。

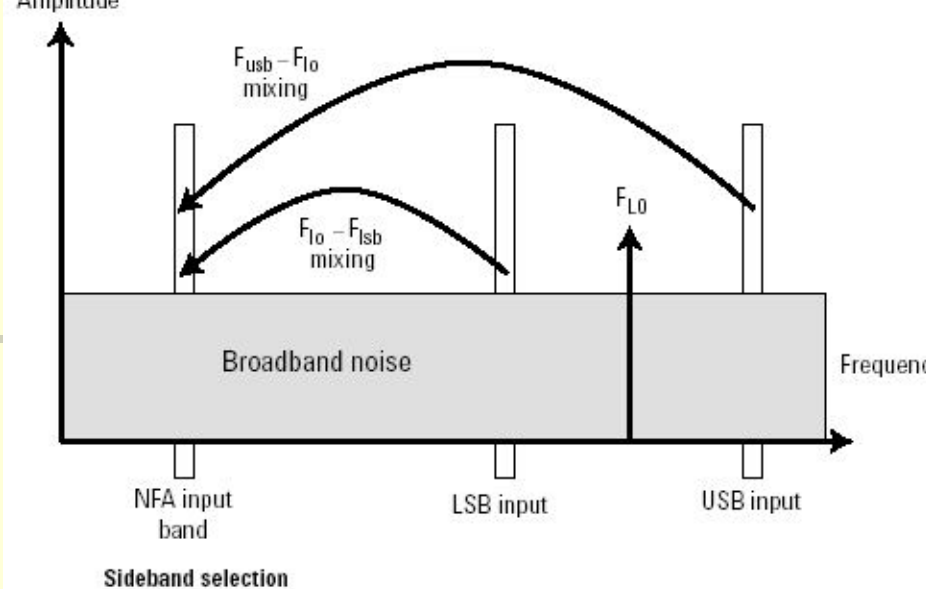
选择LO的标准：LO的GPIB控制

- NFA的后面板有两个GPIB端口：NFA可由LO GPIB端口控制LO；
- 需要连接NFA和LO后面板的10MHz时基的输入和输出端口，NFA的输出端口接到LO的输入端口。
- NFA也可以利用几个SCPI命令来设置LO的参量，例如：频率和幅度。LO的GPIB命令定位在[System]，[External LO]，[LO Commands]。
- 举例：‘FREQ 100000000HZ’表示设置LO的频率为10MHz；‘POW 7DBM’表示设置LO的幅度。
- NFA的辅助命令设置LO的工作状态，例如：缺省为‘OUTP: STAT: ON’表示设置LO的RF为‘ON’状态。

频率转换DUT的穿透（feedthrough）效应

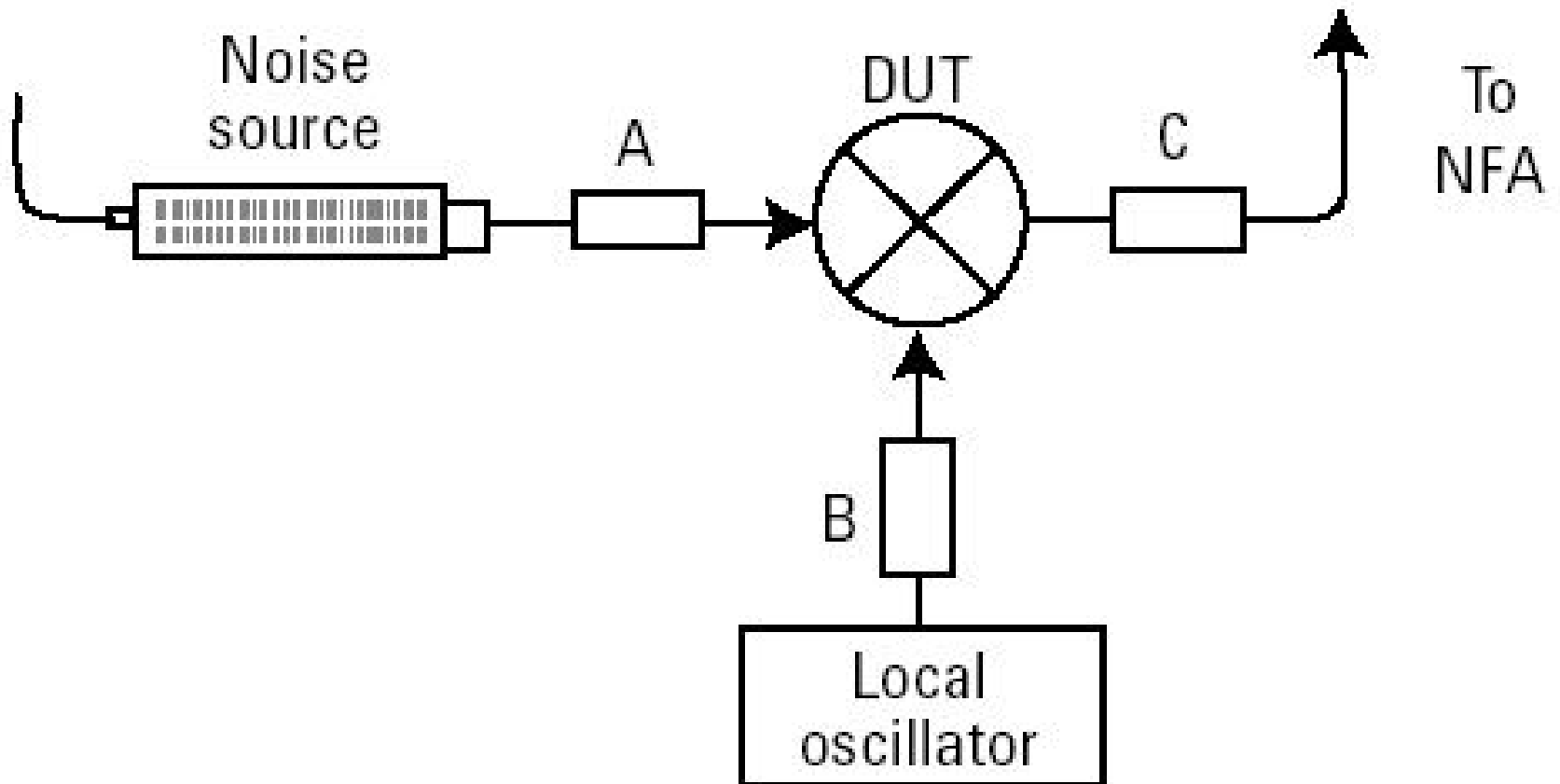
- 当进行频率变换器件的噪声测量时，NFA的校准是不包括LO的。
 - NFA的输入衰减器是根据校准时的测量功率来自动设置的。
 - LO的功率是远大于DUT的输入信号功率，当LO的频率在NFA的测量频率范围内，则在DUT的输出端口的LO泄漏是大于信号电平的，这会使NFA的输入衰减器改变输入范围，从而影响测量精度。
 - 为了防止LO的泄漏，需要在NFA的输入端增加滤波器。

选择滤波器

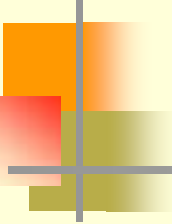


- 噪声测量时，需要滤波器。实际需要的滤波器取决于测量类型和外接元件的需要。
- 举例如下
 - 位置A：在单边带测量时滤波器是需要的，滤除不希望的边带。
 - 位置B：如果测量时使用LO时滤波器是需要的，滤除来自LO会影响测量结果的信号。
 - 位置C：需要滤波器，可以滤除来自LO的泄漏或DUT的不希望信号。

需要的濾波器



Where filtering is needed

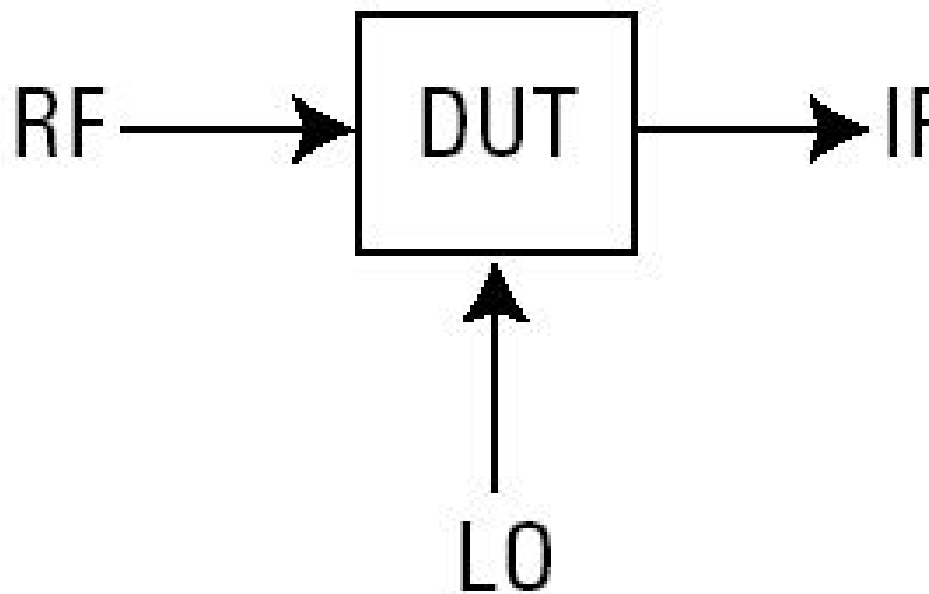


选择前置放大器

- 如果DUT增益很小、没有增益或测量系统有很高的噪声系数，就需要低噪声前置放大器。
- 这个前置放大器应具有足够高的增益，以超过DUT的噪声系数。
- 这个前置放大器的增益受限于NFA的动态范围。
- 连接前置放大器到噪声源，校准时应包括前置放大器。

2. 设置测量频率方案

- 固定IF和固定LO、固定IF和可变LO、固定LO和可变IF、边带选择。
- 进行噪声系数和增益测量时，一般都是扫频测量的，可分成RF（输入到DUT）、IF（从DUT输出）和LO。
- 注意：
 - 三端口是：RF（输入到DUT）、IF（从DUT输出）和LO。
 - 对于下变频，IF是小于RF，LO可大于或小于RF。
 - 对于上变频，IF是大于RF，LO可大于或小于RF。



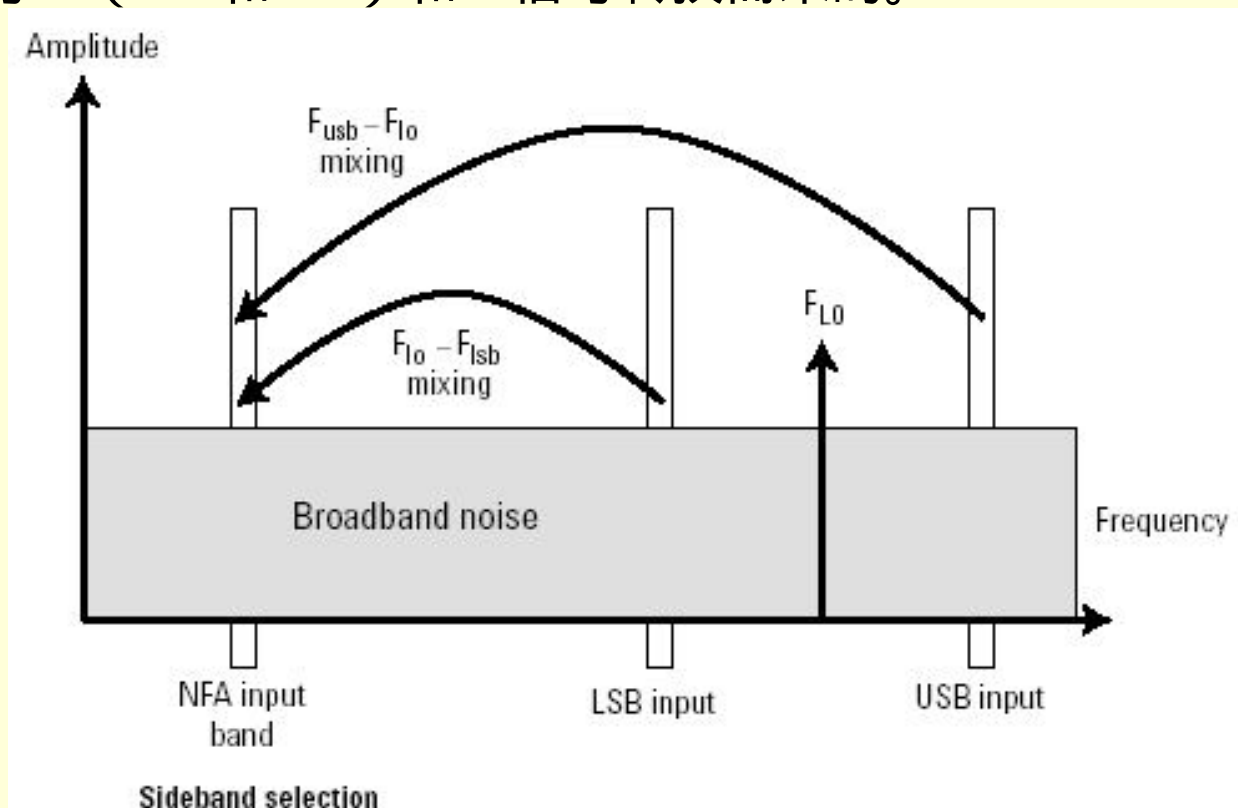


设置测量频率方案

- 固定IF和固定LO：NFA提供固定IF和固定LO设置的测量。
- 固定IF和可变LO：
 - 利用固定IF和可变LO是为了研究DUT的RF响应。
 - LO是扫描模式，并与输入信号RF同步，NFA的中频IF是固定的。NFA是对LO的扫描频率校准的。
- 固定LO和可变IF：
 - 利用固定LO和可变IF是为了研究DUT的IF响应。
 - LO是固定的，NFA的中频IF是扫描模式，并与输入信号RF同步。NFA是对IF的扫描频率校准的。

边带选择

- 简单混频器的输出是输入RF信号和LO信号的和频和差频。
- 换句话说，即输出信号IF（NFA的输入带宽内）都是由两个输入信号RF（LSB和USB）和LO信号转换而来的。



边带选择（续1）

- 由于噪声源是宽带的，所以简单混频器的噪声是由L0的上、下边带噪声信号转换到IF带宽内（由NFA调谐控制的）而来的。
- NFA接受的噪声是上述两部分的功率，这就是双边带DSB（double sideband）功率，滤除一个边带就是单边带SSB（single-sideband）功率。
- NFA可以配置成单边带或双边带测量，但需要选择特定的测量类型。



双边带测量

- DSB测量比SSB测量容易，因为无需使用像频抑制滤波器。
- 测量的结果是 $L0+IF$ 和 $L0-IF$ 噪声系数的平均值，上、下边带无法分开。
- 建议DSB测量应用在：
 - 需要DSB测量时；
 - DUT是宽带时；
 - 构建SSB系统很困难时；
 - 没有可利用的SSB滤波器时。



单边带测量

- SSB测量比DSB测量更精确，但是设置更困难。
- 必须使用滤波器，滤除不希望的边带。
- 如果使用滤波器，则滤波器的损耗必须已知，且必须要由NFA进行补偿。
- 建议SSB测量应用在：
 - 需要SSB测量时；
 - DUT是窄带时；
 - 有可利用的SSB滤波器时。



3. 几种测量模式分析

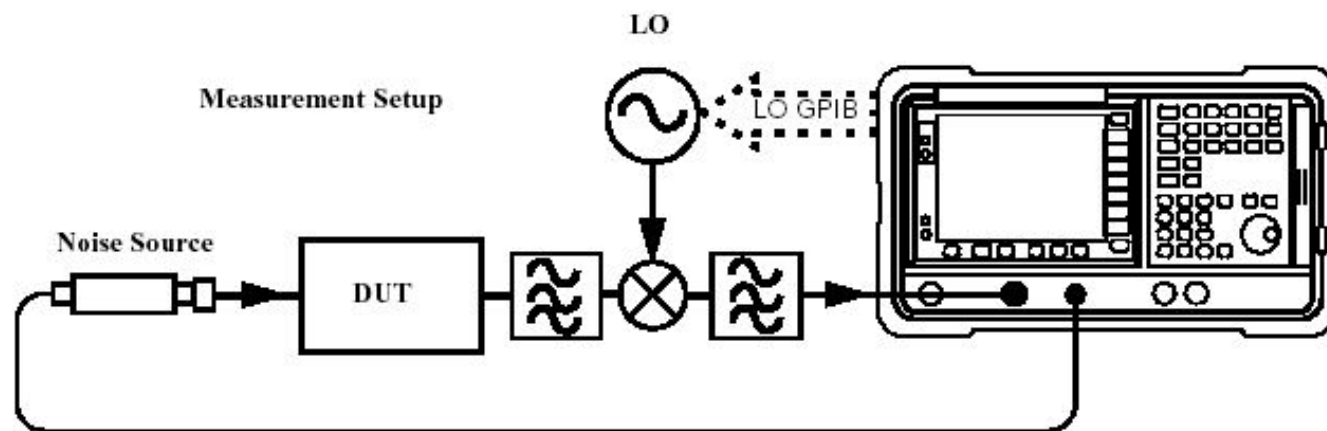
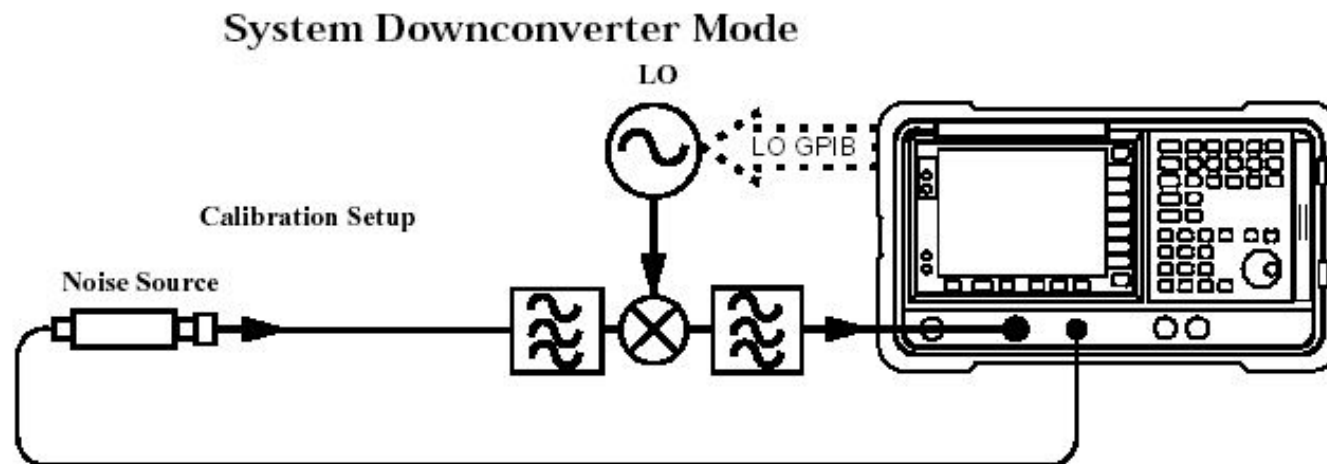
- 放大器测量模式分析
- 下变频测量模式分析
- 上变频测量模式分析

放大器测量模式分析

- 当DUT的测量频率在NFA的频率范围之内，这就是上述的基本放大器测量模式。
- 当DUT的测量频率超过了NFA的频率范围（N8973A是3.0 GHz），则需要下变频到IF，下变频可使用标准的混频器，参见下图。
- 这时有可变LO和固定IF测量模式、可变IF和固定LO测量模式。
- 测量高增益器件时需要衰减器，这是为了保护NFA的输入端口。
- 可以利用NFA的损耗补偿的功能来补偿损耗。

放大器测量模式分析（续1）

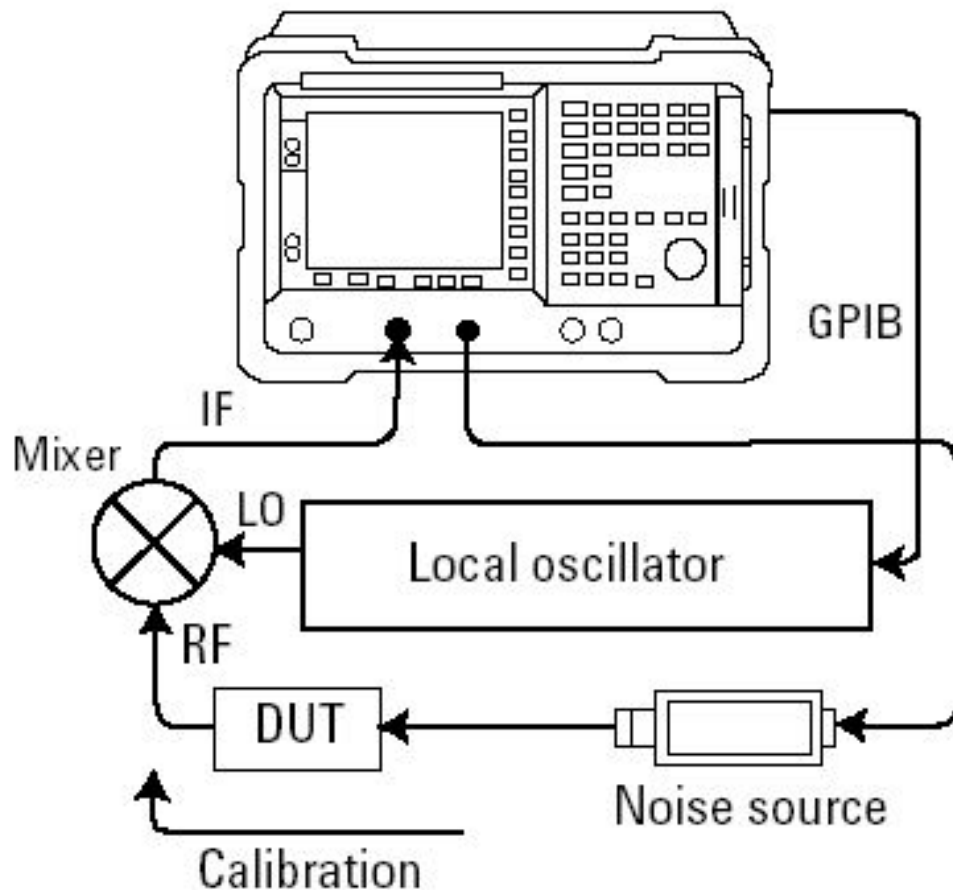
- 右图是使用346A/B/C通用噪声源；
- 若使用SNS噪声源，则需利用SNS噪声源连接器。



放大器测量模式分析（续2）

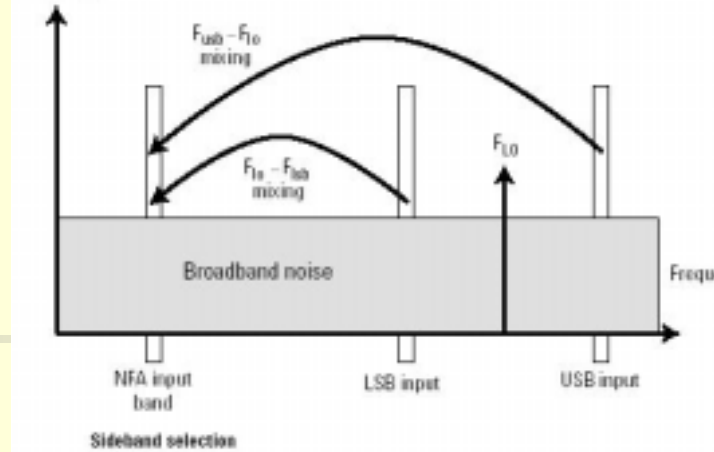
可变LO和固定IF测量模式

- LO必须连接到NFA后面板上的 LO GPIB端口。
- 噪声源是直接连接到混频器的输入端，用户校准是在RF频率上进行的。
- DUT如右图插入即可测量。
- SSB测量需要增加滤波器。



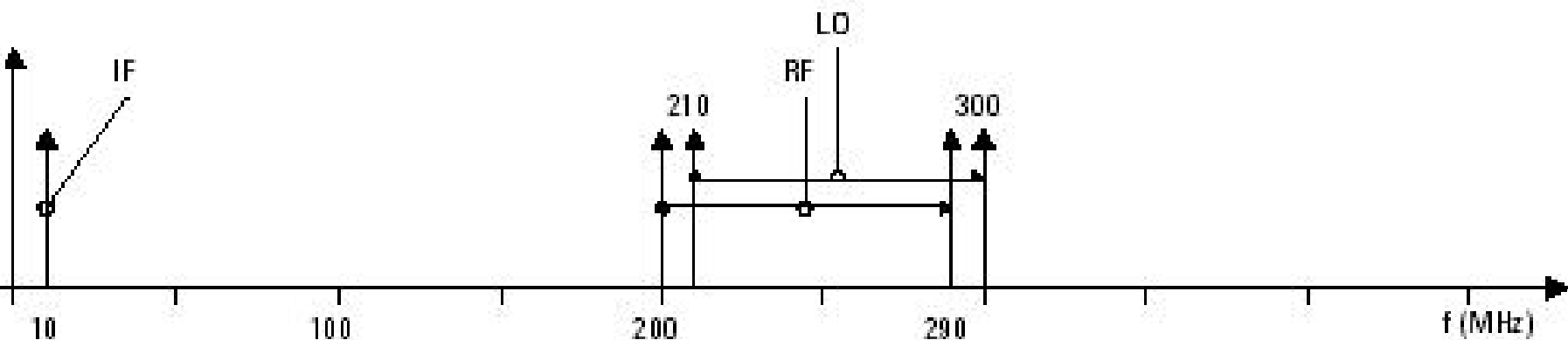
Mixer used as system downconverter

可变LO和固定IF： 下边带测量

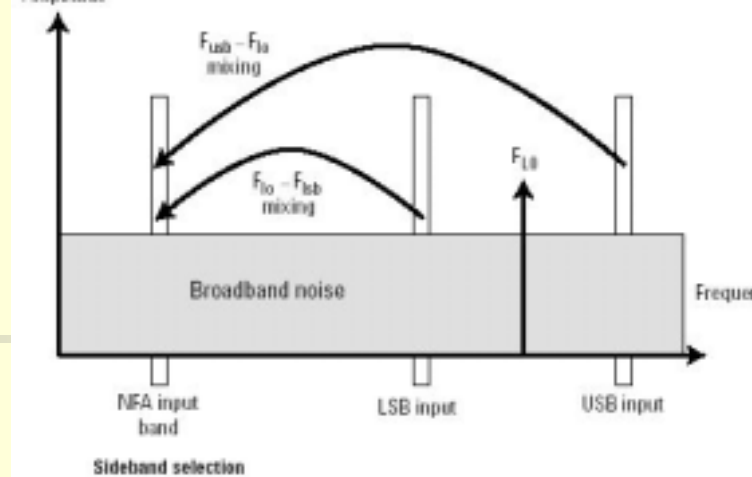


放大器测量模式分析：

- 转换方程： $LO = RF + IF$ ，IF是10MHz。
- 设置：RF：200MHz~ 290MHz； LO：210MHz~ 300MHz。
- RF总是小于LO，是下边带测量（上边带被滤除）。

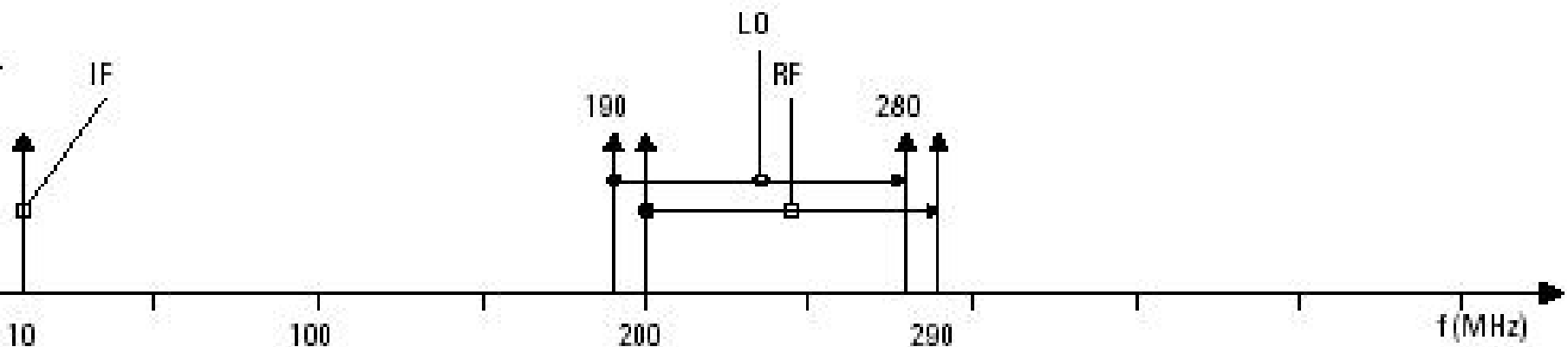


可变LO和固定IF： 上边带测量



放大器测量模式分析：

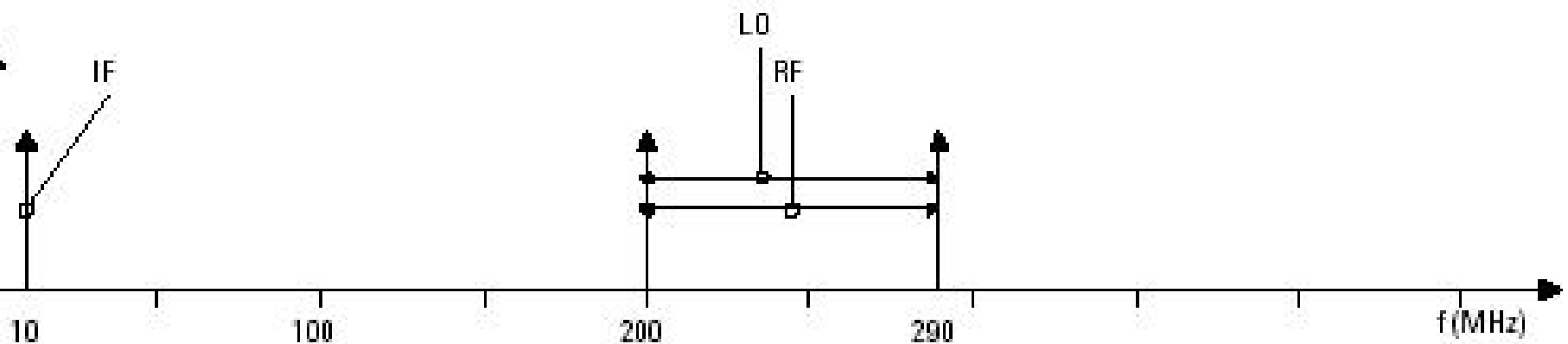
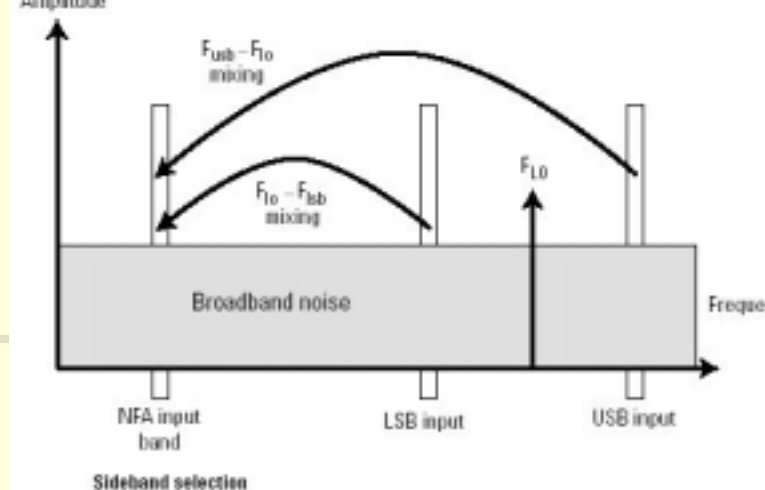
- 转换方程： $LO = RF - IF$ ，IF是10MHz。
- 设置：RF：200MHz~ 290MHz； LO：190MHz~ 280MHz。
- RF总是大于LO，是上边带测量（下边带被滤除）。



可变LO和固定IF： 双边带测量

放大器测量模式分析：

- 转换方程： $LO=RF$ ，IF是10MHz。
- 设置：RF：200MHz~ 290MHz；LO：200MHz~ 290MHz。
- RF总是与LO相同，是双边带测量（没有滤波器）。



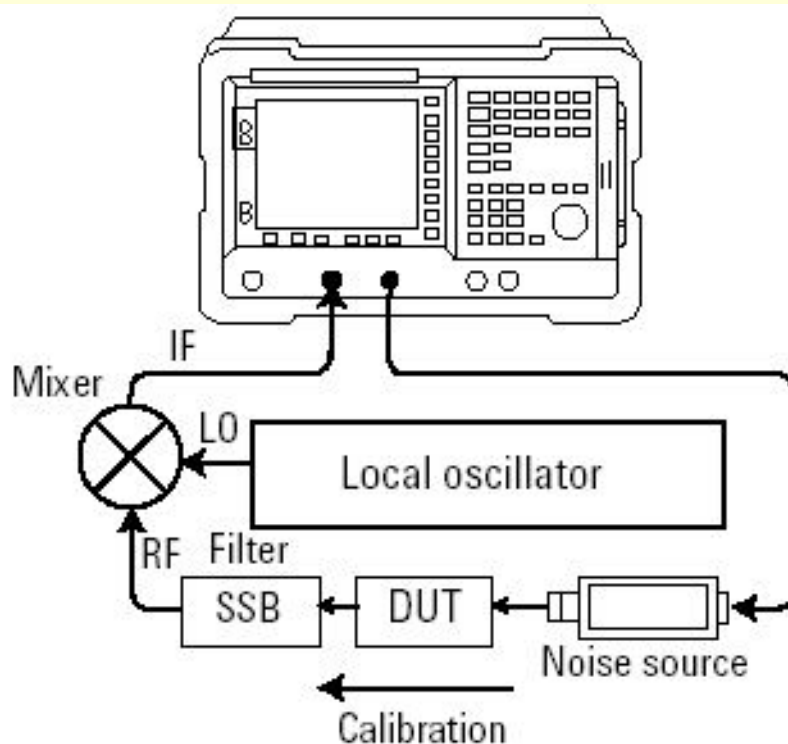
放大器测量模式分析（续3）

可变IF和固定LO测量模式

LO可由NFA控制
(GPIB) 或手动控制。

需要SSB滤波器。

噪声源是直接连接到混频器的输入端（包括SSB滤波器），用户校准是在RF频率上进行的。



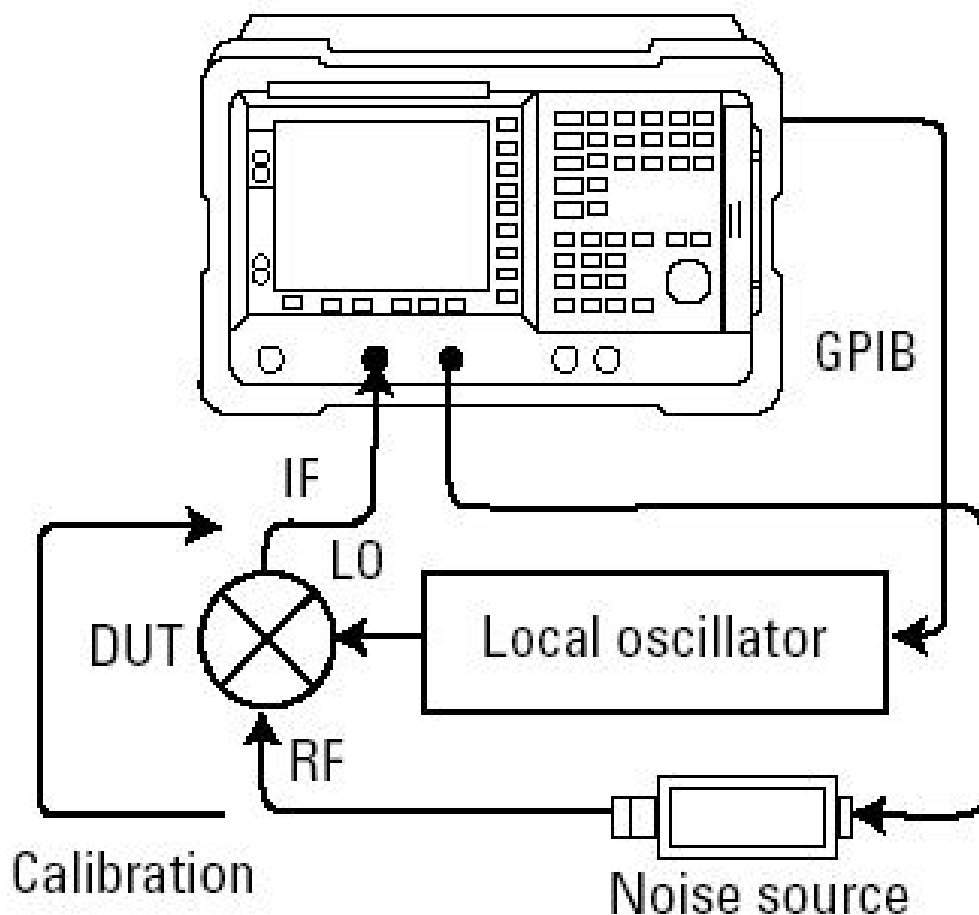
Mixer used as system downconverter with fixed LO and without GPIB control

下变频测量模式分析

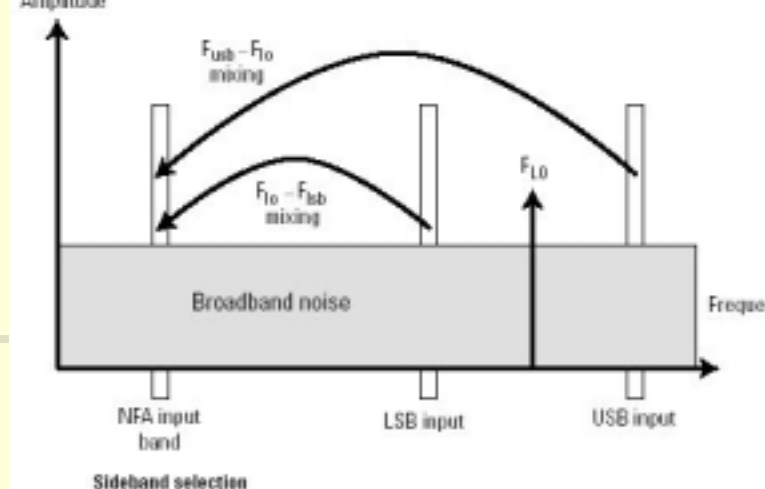
- 当DUT就是频率变换器件时，其测量频率在NFA的工作频率范围之内。参见下图。
- 可变LO和固定IF。
- LO必须连接到NFA后面板的 LO GPIB端口。
- 噪声源是直接连接到DUT的输入端，作为RF信号。
- 用户校准是在固定的IF上进行的，校准时拿走DUT。
- DUT如图插入即可测量。
- SSB测量需要增加滤波器。

下变频测量模式分析（续1）

- 可变LO和固定IF测量模式
- 右图是使用346A/B/C通用噪声源；
- 若使用SNS噪声源，则需利用SNS噪声源连接器。

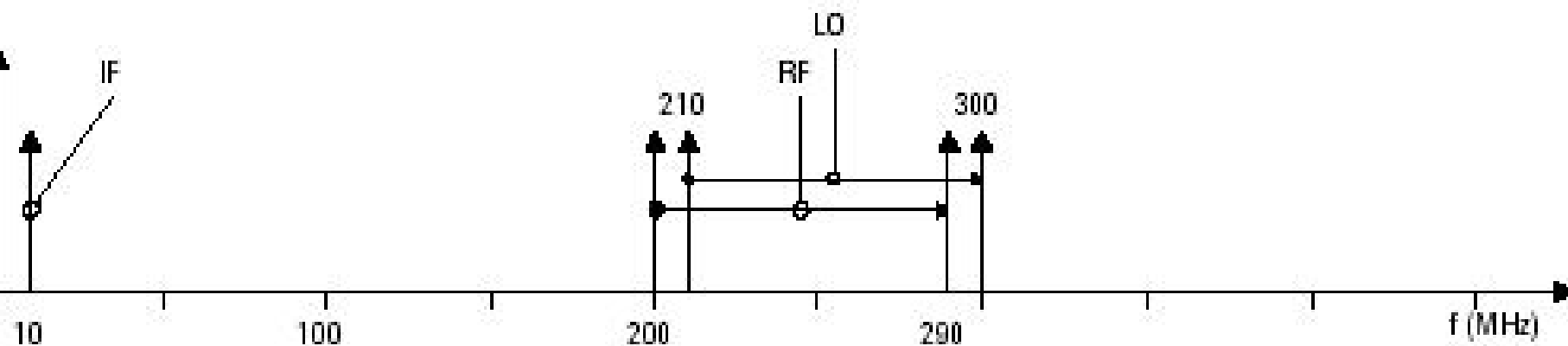


可变LO和固定IF： 下边带测量

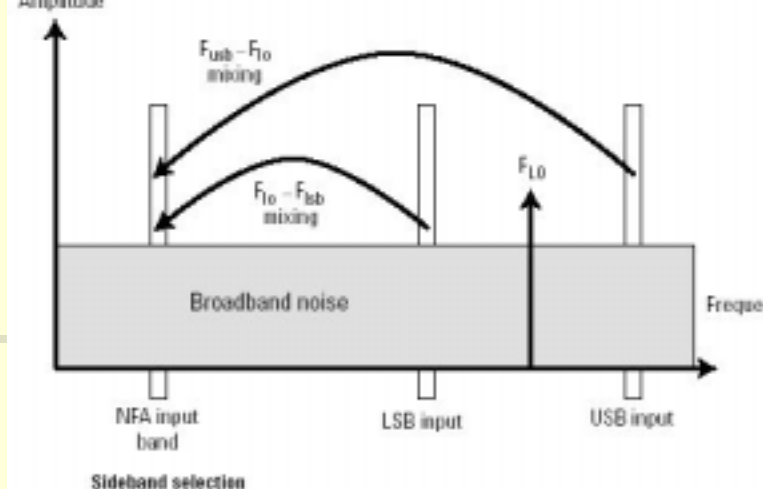


下变频测量模式分析：

- 转换方程： $LO = RF + IF$ ，IF是10MHz。
- 设置：RF：200MHz~ 290MHz；LO：210MHz~ 300MHz。
- RF总是小于LO，是下边带测量（上边带被滤除）。

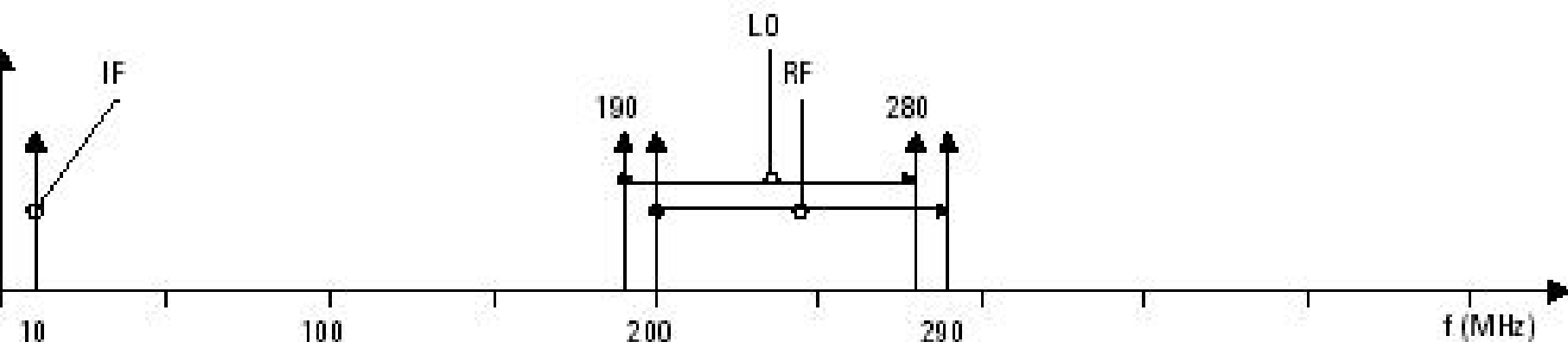


可变LO和固定IF： 上边带测量



下变频测量模式分析：

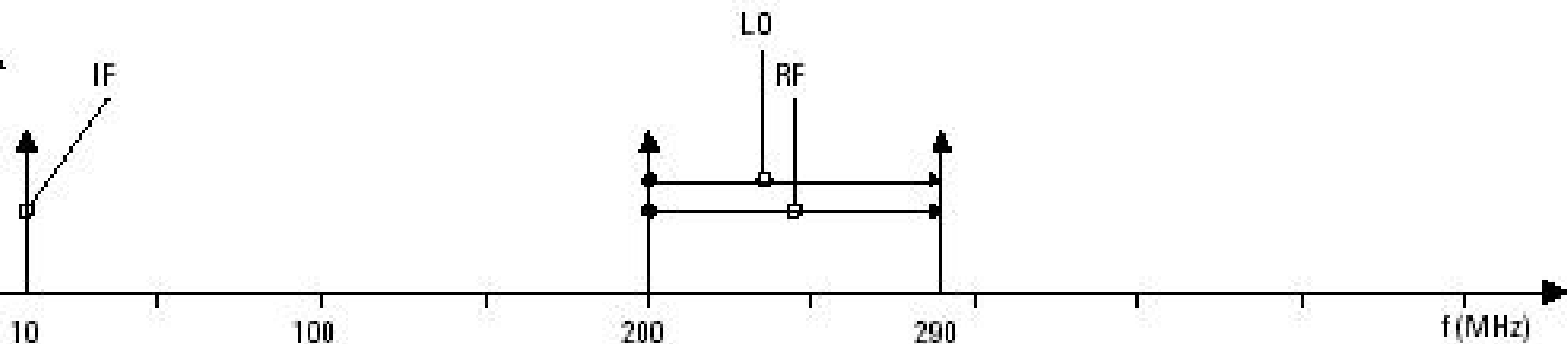
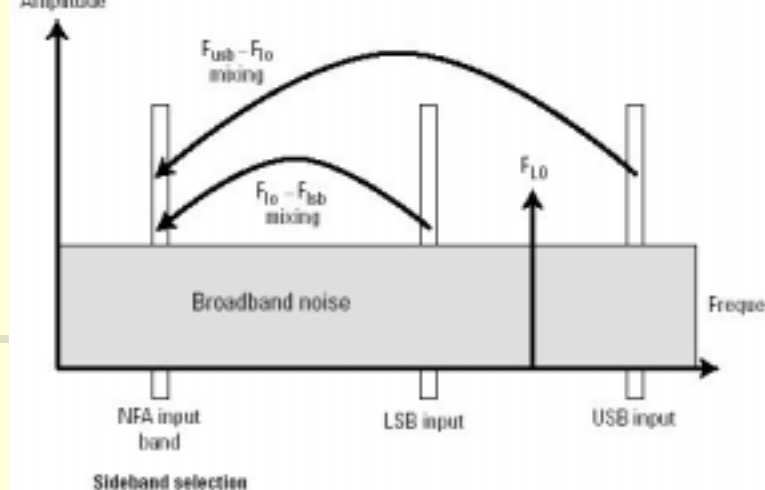
- 转换方程： $LO = RF - IF$ ， IF 是10MHz。
- 设置： RF ：200MHz~ 290MHz； LO ：190MHz~ 280MHz。
- RF 总是大于 LO ，是上边带测量（下边带被滤除）。



可变LO和固定IF： 双边带测量

下变频测量模式分析：

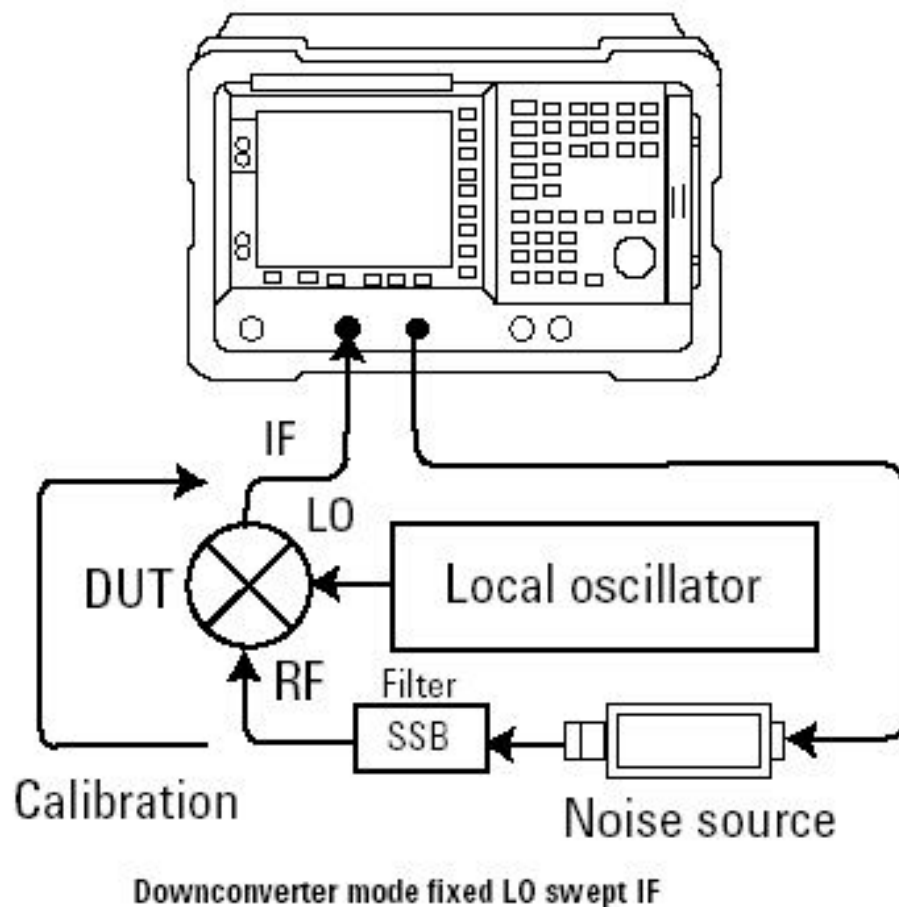
- 转换方程： $L0=RF$ ，IF是10MHz。
- 设置：RF：200MHz~ 290MHz； L0：200MHz~ 290MHz。
- RF总是与L0相同，是双边带测量（没有滤波器）。



下变频测量模式分析（续2）

可变IF和固定LO测量模式

- LO可由NFA控制（GPIB）或手动控制。
- 噪声源是直接连接到DUT的输入端。
- 用户校准是在固定的IF上进行的，校准时拿走DUT。
- 需要SSB滤波器。
- 右图是使用346A/B/C通用噪声源；
- 若使用SNS噪声源，则需利用SNS噪声源连接器。

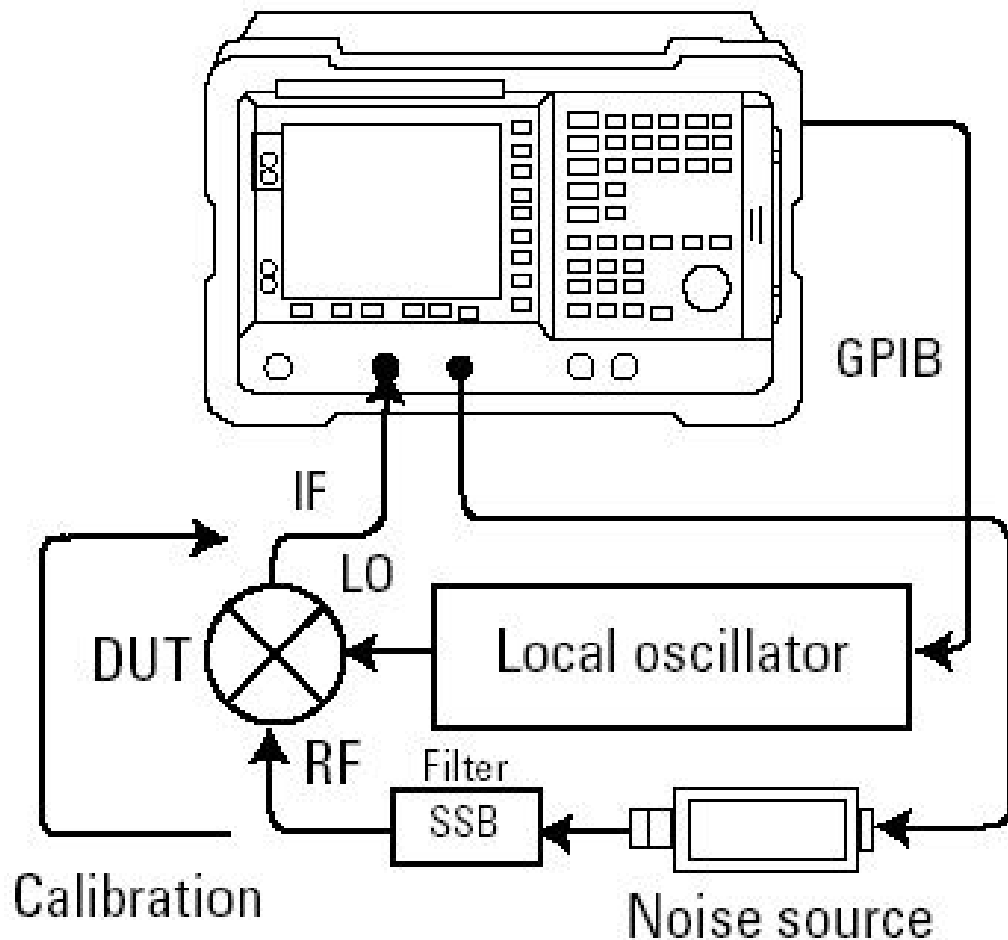


上变频测量模式分析

- 变频器件的噪声可以测量，但是要受到某些限制。
- 用户界面提供了上变频器件的选择和对LSB、USB支持。
- 上变频器件的输入是RF信号，上变频器件的输出作为IF信号。
- 可变LO和固定IF。
- LO必须连接到NFA后面板的 LO GPIB端口。
- 噪声源是直接连接到DUT的输入端，作为RF信号。
- 用户校准是在固定的IF上进行的，校准时拿走DUT。
- DUT如下图插入即可测量。
- SSB滤波器是需要的。

上变频测量模式分析（续1）

- 右图是使用346A/B/C通用噪声源；
- 若使用SNS噪声源，则需利用SNS噪声源连接器。
- 可变LO和固定IF：
 - 下边带测量
 - 上边带测量
- 可变IF和固定LO：
 - 下边带测量
 - 上边带测量



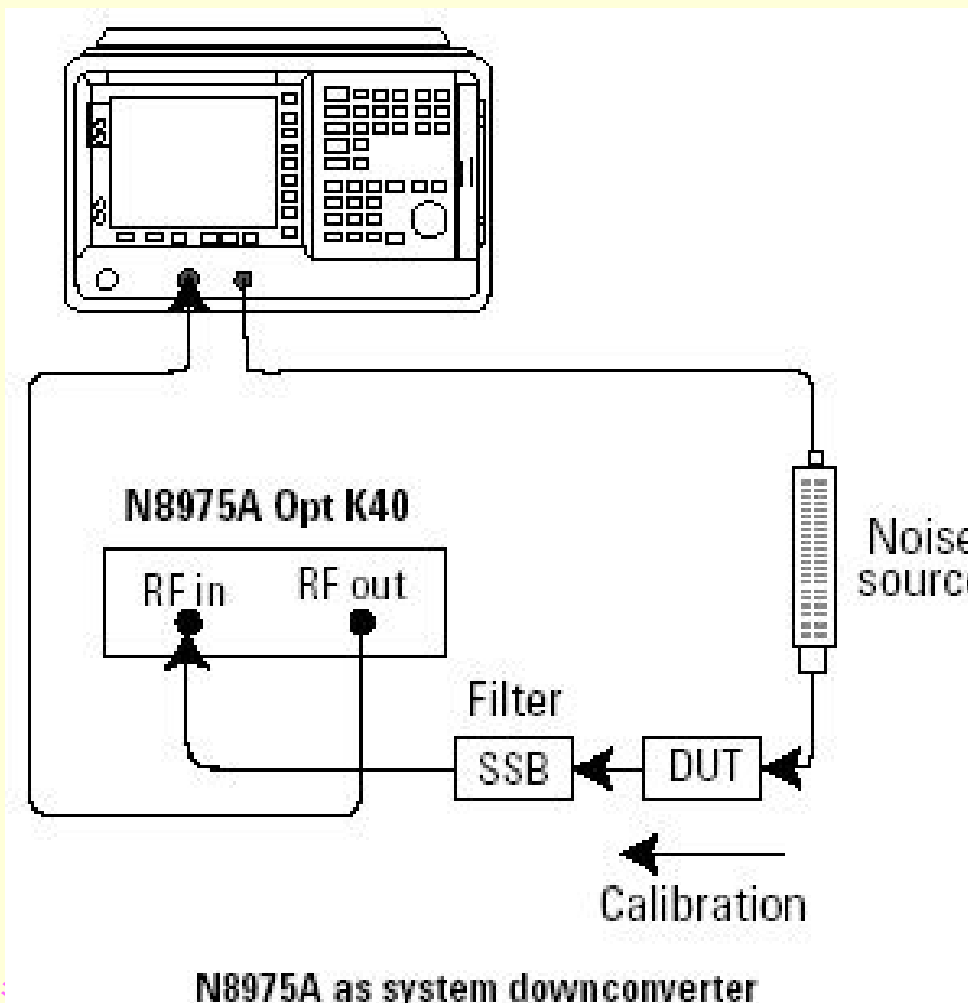


4. 测量举例

- 利用下变频方块的放大器测量
- 利用固定IF和可变LO的下变频测量
- 利用固定LO和可变IF的下变频测量

放大器测量

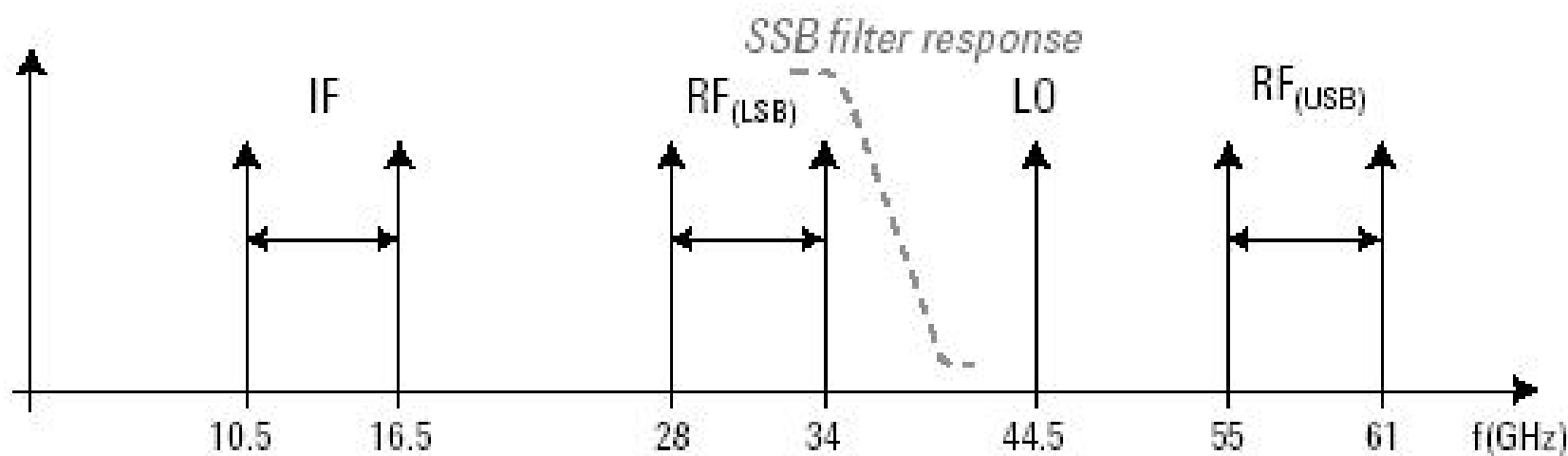
- 利用N8975A选件K40的放大器测量模式。
- 选件K40将NFA的测量频率从26.5GHz扩展到40GHz。
- K40是利用内部的44.5GHz的LO把输入信号下变频到IF（NFA的输入测量频率范围），固定LO和可变IF。
- LSB测量频率从28到34GHz（每250MHz取一点），所以噪声源需要346C（1到50GHz）或R347B（26.5到40GHz）。



放大器测量（续1）

固定LO和可变IF

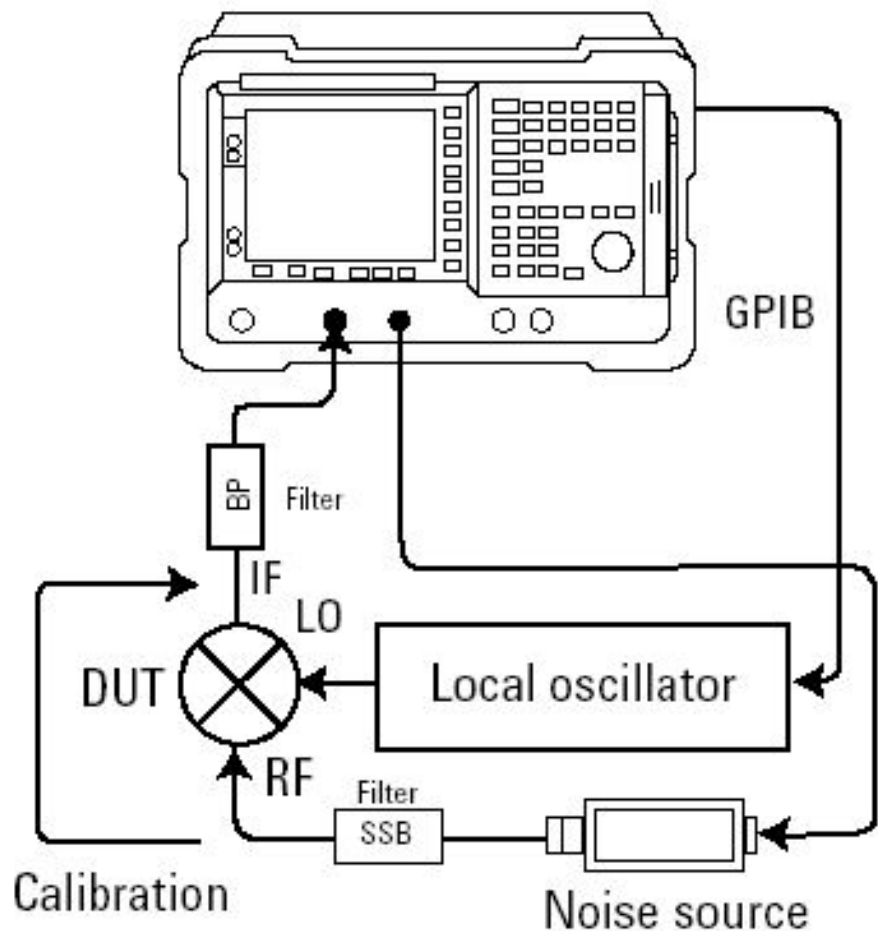
- 转换方程： $LO = RF + IF$



Frequency map

利用固定IF和可变LO的下变频测量

- 例中：DUT是混频器；LO从4.7GHz到5.2GHz扫描（11个点）；IF固定在1GHz；进行LSB测量。
- IF固定在1GHz，所以在DUT和NFA之间插入BP（bandpass）。
- 用户校准时没有DUT和SSB滤波器。
- 滤波器的损耗必须测量并进行补偿。

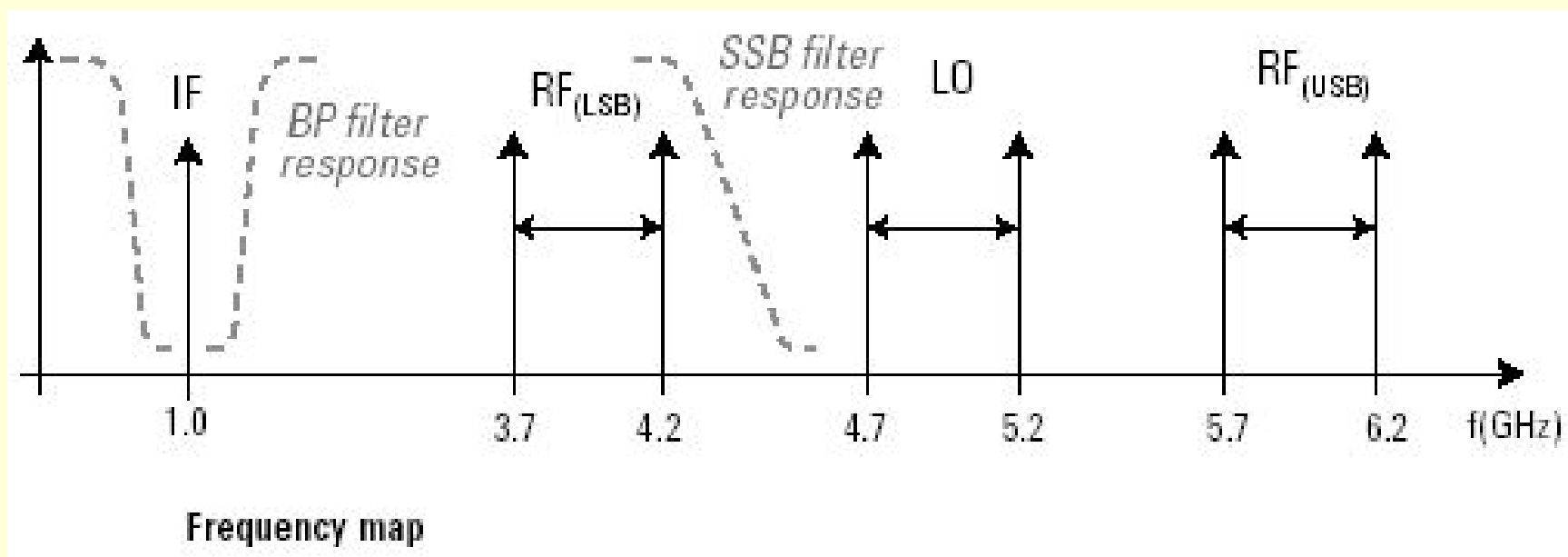


Variable LO and fixed IF with filtering

利用固定IF和可变LO的下变频测量（续1）

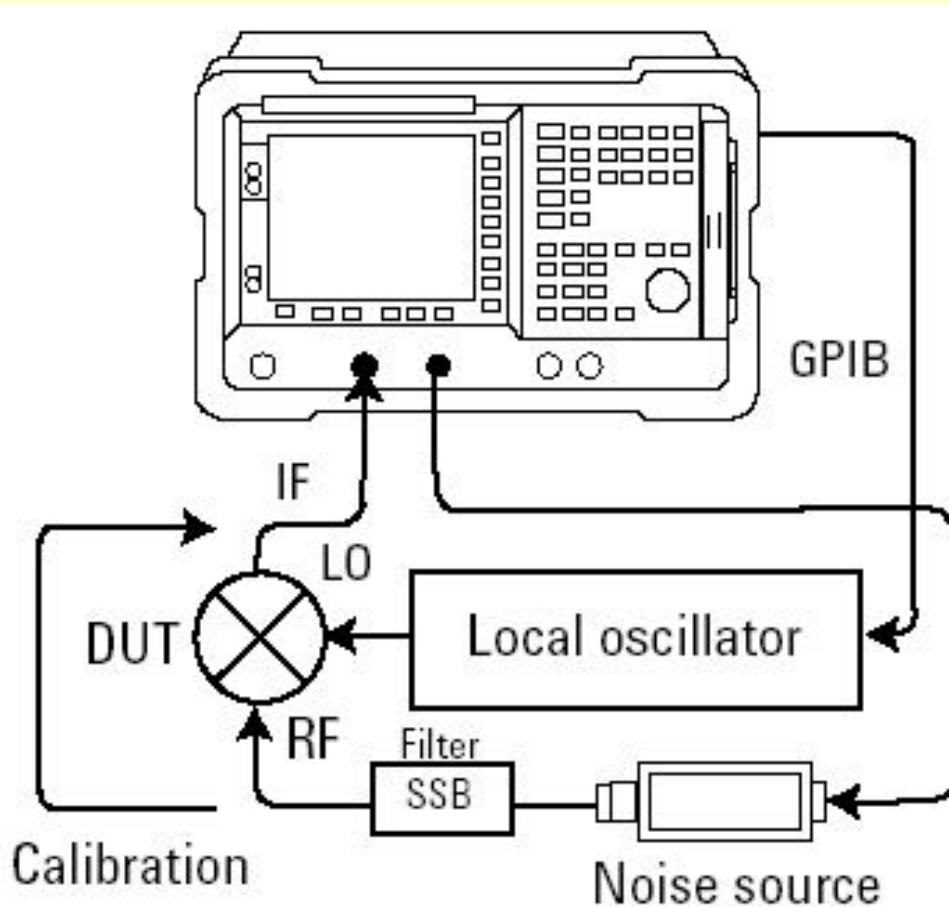
固定IF和可变LO

- 转换方程： $LO = RF + IF$



利用固定LO和可变IF的下变频测量

- 例中：DUT是混频器；LO固定在5GHz；DUT工作在5.8GHz到6.3GHz（11个点）；进行USB测量。
- IF是扫描的，所以没有BP（bandpass）。
- 用户校准时没有DUT和SSB滤波器。
- 滤波器的损耗必须测量并进行补偿。
- 噪声源可用346B/N4001A。

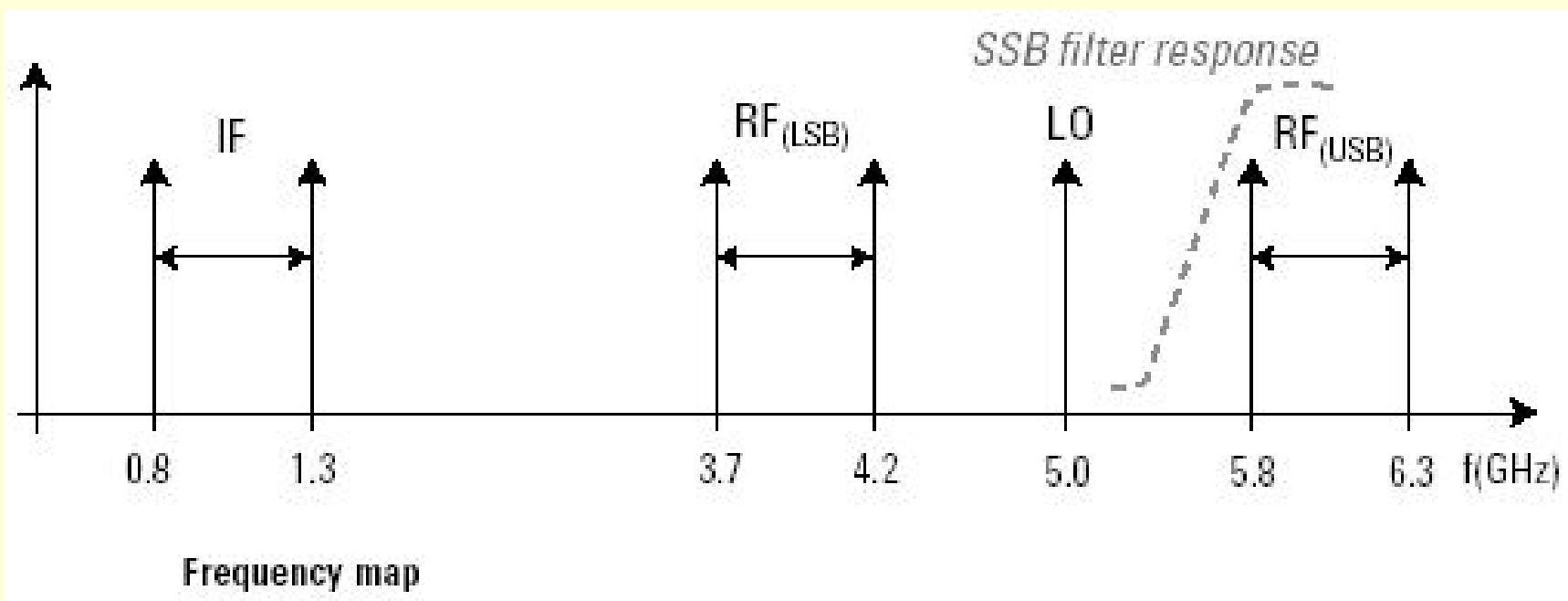


Variable IF and fixed LO with filtering

利用固定LO和可变IF的下变频测量（续1）

固定LO和可变IF

- 转换方程： $LO = RF + IF$



10.5 噪声系数分析仪的基本操作

噪声系数测量的十点提示

- 一. 选择适当的噪声源。
- 二. 将无关的信号减至最小。
- 三. 将失配的影响减至最小。
- 四. 利用平均功能来减小显示的波纹。
- 五. 避免非线性。
- 六. 说明混频特性。
- 七. 使用适当的测量修正。
- 八. 选择最理想的测量带宽。
- 九. 路径损耗的说明。
- 十. 测量对象的温度说明。



第四次实验 噪声系数分析仪的使用

- 使用SNS噪声源N4000A或N4001A，进行噪声系数分析仪的校准。
- 基本放大器测量。
- 利用固定IF和可变LO的下变频测量。

第十讲 噪声系数分析仪小结

- 噪声系数的基本概念
 - 噪声系数的定义
 - 标准信号源与信噪比
 - 级连网络的噪声
 - 噪声系数与相位噪声
 - 高频噪声与低频 $1/f$ 噪声
- 噪声系数的测量原理
- 典型器件特性测量
 - 放大器测量模式分析
 - 基本放大器测量模式
 - 利用下变频方块测量模式
 - 下变频测量模式分析
 - 上变频测量模式分析