

噪声系数测量手册

Part 1. 噪声系数定义及测试方法

安捷伦科技： 顾宏亮

一. 噪声系数定义

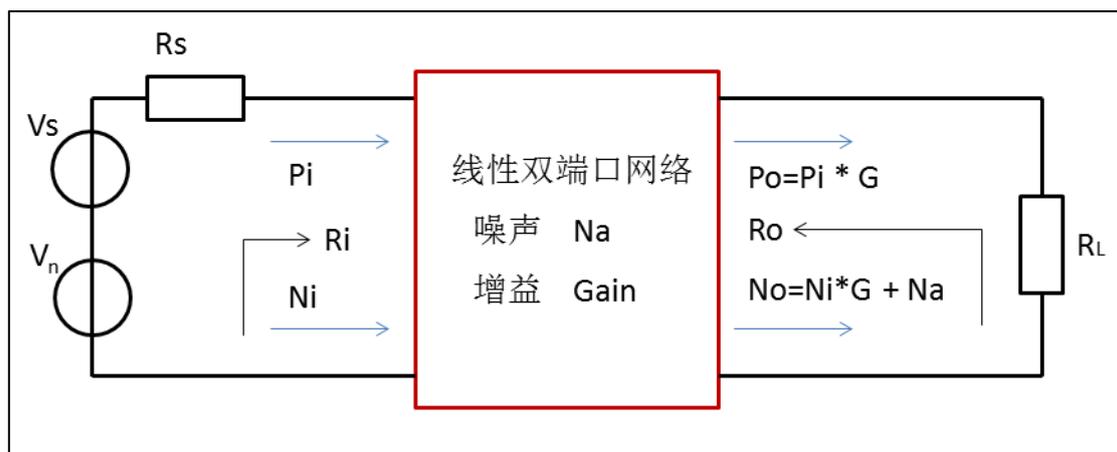
最常见的噪声系数定义是：输入信噪比 / 输出信噪比。它是衡量设备本身噪声品质的重要参数,它反映的是信号经过系统后信噪比恶化的程度。 噪声系数是一个大于 1 的数，也就是说信号经过系统后信噪比是恶化了。噪声系数是射频电路的关键指标之一，它决定了接收机的灵敏度，影响着模拟通信系统的信噪比和数字通信系统的误码率。无线通信和卫星通信的快速发展对器件、子系统和系统的噪声性能要求越来越高。

输入信噪比 $SNR_{input}=P_i/N_i$

输出信噪比 $SNR_{output}=P_o/N_o$

噪声系数 $F = SNR_{input}/SNR_{output}$ 通常用 dB 来表示 $NF= 10\text{Log}(F)$

假设放大器是理想的线性网络，内部不产生任何噪声。那么对于该放大器来说,输出的功率 P_o 以及输出的噪声 N_o 分别等于 $P_i * \text{Gain}$ 以及 $N_i * \text{Gain}$ 。这样噪声系数= $(P_i/N_i)/(P_o/N_o)=1$ 。但是现实中，任何放大器的噪声功率输出不仅仅有输入端噪声的放大输出，还有内部自身的噪声(N_a)输出，下图为线性双端口网络的图示。



双端口网络噪声系数分析框图

V_s : 信号源电动势

R_s : 信号源内阻

Ri: 双端口网络输入阻抗

RL: 负载阻抗

Ni: 输入噪声功率

Pi: 输入信号功率

No: 输出噪声功率

Po: 输出信号功率

Vn: 该信号源内阻 Rs 的等效噪声电压

Ro: 双端口网络输出阻抗

输出噪声功率: $N_o = N_i * Gain + N_a$; $P_o = P_i * Gain$

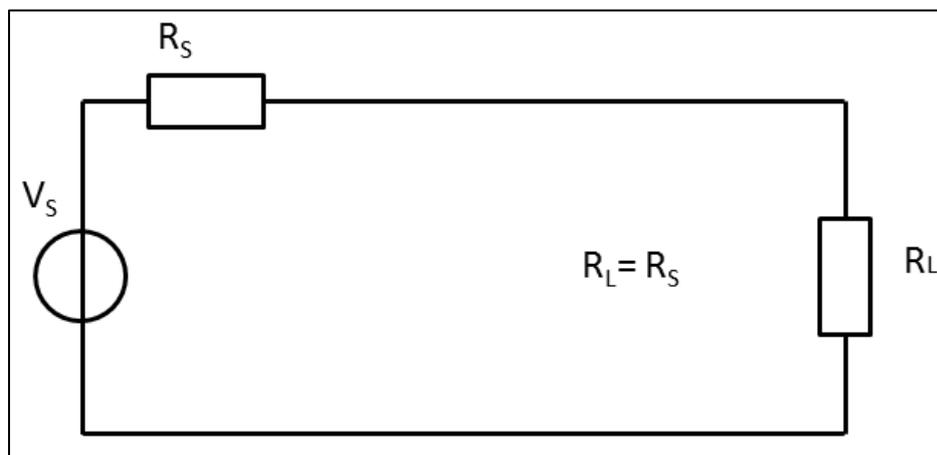
噪声系数 = $(P_i * N_o) / (N_i * P_o) = (N_i * Gain + N_a) / (N_i * Gain) = 1 + N_a / (N_i * Gain) > 1$

根据 IEEE 的噪声系数定义: **The noise factor, at a specified input frequency, is defined as the ratio of (1) the total noise power per unit bandwidth available at the output port when noise temperature of the input termination is standard (290 K) to (2) that portion of (1) engendered at the input frequency by the input termination."**

- a. 输入噪声被定义成负载在温度为 290K 下产生的噪声。
- b. 输入噪声功率为资用功率, 也就是该负载(termination)能产生的最大功率。
- c. 假定了被测件和负载阻抗互为共轭关系. 如果被测件是放大器, 并且噪声源阻抗为 50ohm, 那么假定了该放大器的输入阻抗为 50ohm。

综合上述的结论, 我们可以这样理解噪声系数的定义: 当输入噪声功率为 290K 温度下的负载所产生的最大功率情况下, 输入信噪比和输出信噪比的比值。

资用功率指的是信号源能输出的最大功率, 也可以称为额定功率。



信号源输出框图

只有当源的内阻和负载相等(复数互为共轭), 源输出最大功率。

$$P_{\text{available}} = [V_S / (R_S + R_L)]^2 * R_L \quad \text{当 } R_S = R_L \text{ 时候 } P_{\text{available}} = V_S^2 / (4 * R_S)$$

由此可见, 资用功率是源的本身参数, 它只和内阻以及电动势有关, 和负载没有关系。

那如果输入是一个负载的噪声，该噪声大小是如何计算的呢？

根据噪声系数的定义，输入端的噪声是温度为 290K 的电阻所产生的热噪声功率，我们假定电阻为 R,那么根据 JB Johnson 以及 Nyquist 对噪声功率的推导可得电阻产生的噪声功率为：

$$N_i = e^2 / (4 * R)$$

$$e^2 = 4KTBR$$

$$K = \text{玻尔兹曼常数} (1.3806505 * 10^{-23} \text{ J/K})$$

$$T = \text{开尔文温度(K)}$$

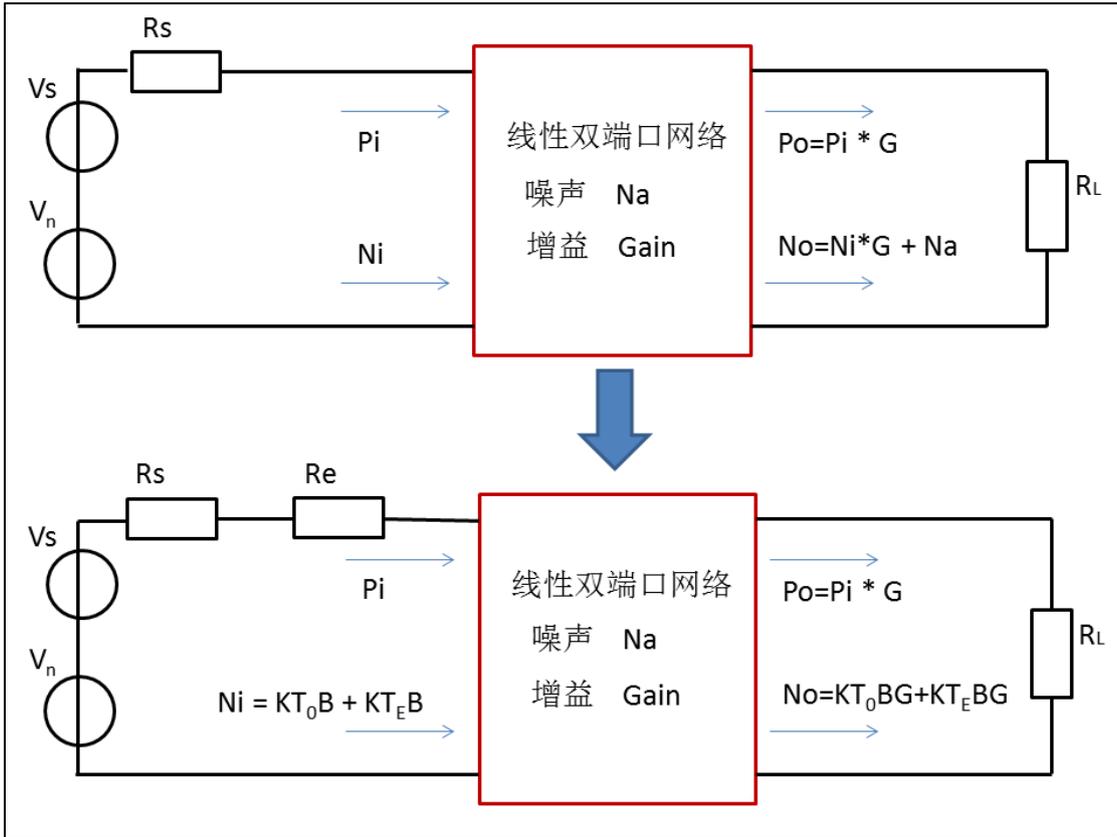
$$B = \text{带宽(Hz)}$$

因此输入端额定的噪声功率 $N_i = 4KTBR / 4R = KTB$ 。由上述可知，无论信号源的内阻大小如何，它所产生的额定噪声功率都是相同的。它的大小只和该电阻所处的温度以及带宽有关。

$$\text{当 } T = T_0 = 290\text{K} \text{ 时， } N_i = KT_0B。$$

噪声温度：通常为了简化计算可以使用噪声温度来表示噪声功率。它等于一个电阻在与这个噪声源相同的带宽内输出相同的功率时所具有的绝对温度。

因此放大器的内部自身噪声输出 N_a 可以等效为当输入端为 T_E 温度的电阻时的输出噪声 $N_a = KT_EBG$ 。



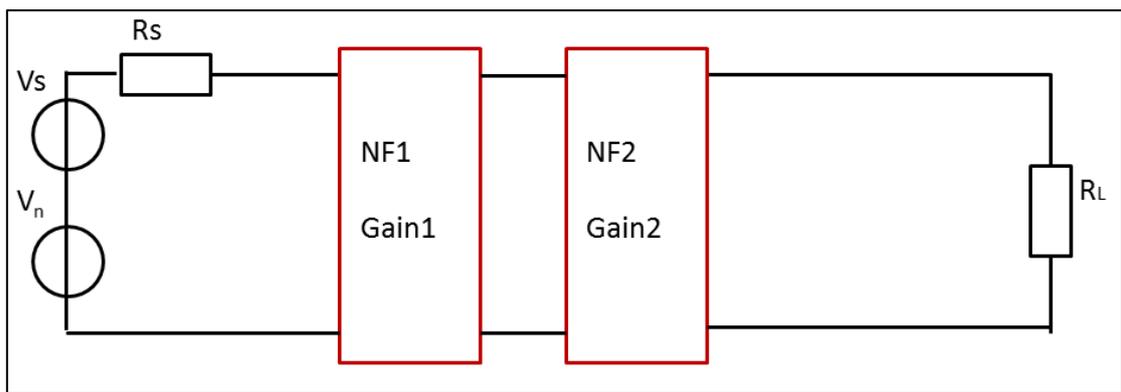
线性双端口网络噪声

这样噪声系数可以简化为: $NF = 1 + N_a / (N_i * Gain) = 1 + K T_E B Gain / K T_0 B Gain = 1 + T_E / T_0$

$NF = 1 + T_E / T_0$ 可推得 $T_E = T_0 (NF - 1)$

$NF(dB) = 10 \log(1 + T_E / T_0)$ 其中 $T_0 = 290 K$

对于下图的级联噪声系数



噪声系数级联框图

很容易证明级联以后的噪声系数为: $NF = NF1 + (NF2 - 1) / G1$

对于 n 级的系统, 可以证明噪声系数为:

$$NF(1..n) = NF1 + (NF2 - 1) / G1 + (NF3 - 1) / G1G2 + (NF4 - 1) / G1G2G3 + \dots + (NFn - 1) / G1G2G3 \dots Gn$$

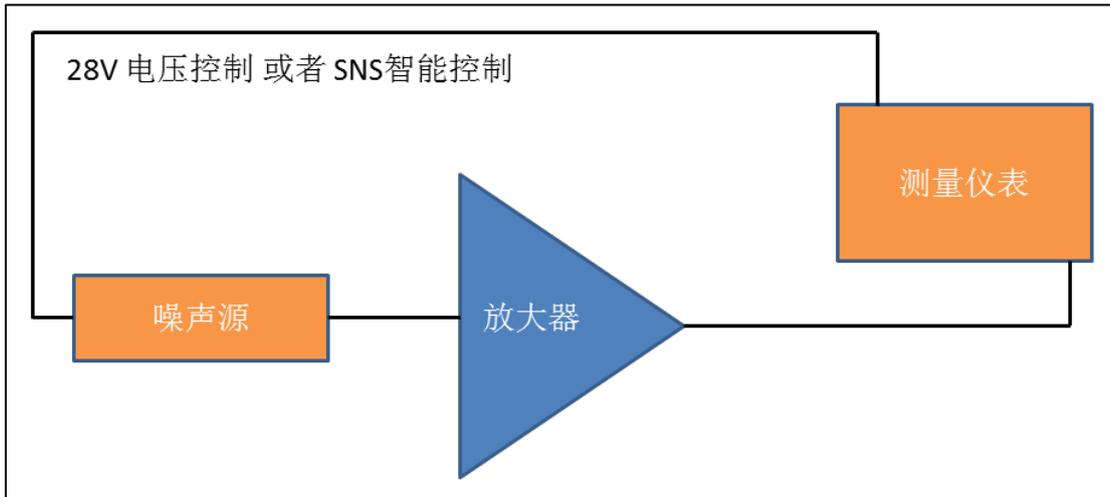
二. 噪声系数测试方法

噪声系数的精确测量对于产品的研发和制造都非常关键。在研发领域，高测试精度可以保证设计仿真和真实测量之间的可复验性很高，并有助于发现在仿真过程中未予以考虑的噪声来源。在生产和制造领域，更高的测试精度意味着在设定和验证器件的技术指标时可以把指标的余量设定得更小。

在噪声系数的测量过程中，必须在器件的线性区进行。如果被测件是放大器并且带有自动增益控制，那么必须关闭 AGC 功能。

2.1 Y 系数法

在 Y 系数测试方法中，需要用到的仪表为噪声系数分析仪或者是频谱分析仪带有噪声系数选件,另外还需要一个噪声源。通常噪声源采用雪崩二极管制作而成，可以在一定的频带内产生冷态噪声以及热态噪声，分别称之为 T_C 以及 T_H 。



放大器噪声系数测量框图

当噪声源产生 T_C 的噪声时候，放大器总得输出噪声为 T_C+T_E

当噪声源产生 T_H 的噪声时候，放大器总得输出噪声为 T_H+T_E

$Y = (T_H+T_E)/(T_C+T_E)$ 加上 $T_E = T_0 (NF-1)$ 联立方程式后 可以解得

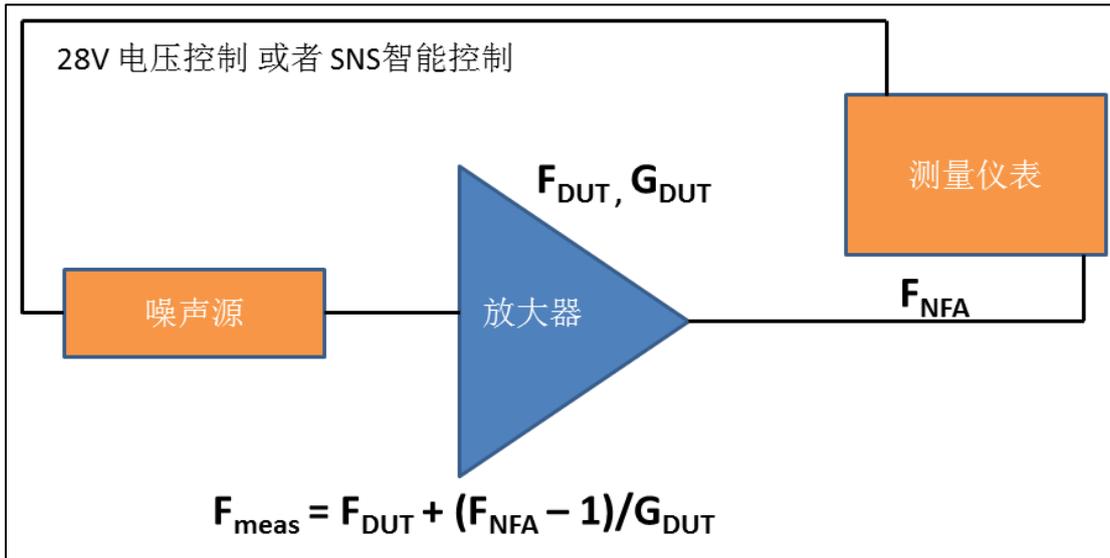
$NF = [(T_H-T_0)+(T_0-T_C)Y]/[(Y-1)*T_0]$ 对于噪声源来说 $T_C=T_0=290K$,因此 NF 可以简化为

$$NF = (T_H - T_0) / [(Y - 1) * T_0]$$

求对数后得到 $NF(dB) = 10\text{Log}[(T_H-T_0)/T_0] - 10\text{Log}(Y-1)$ 其中 $\text{Log}[(T_H-T_0)/T_0]$ 称之为噪声源的超噪比 $ENR(\text{Excessive Noise Ration})$,单位为 dB 。

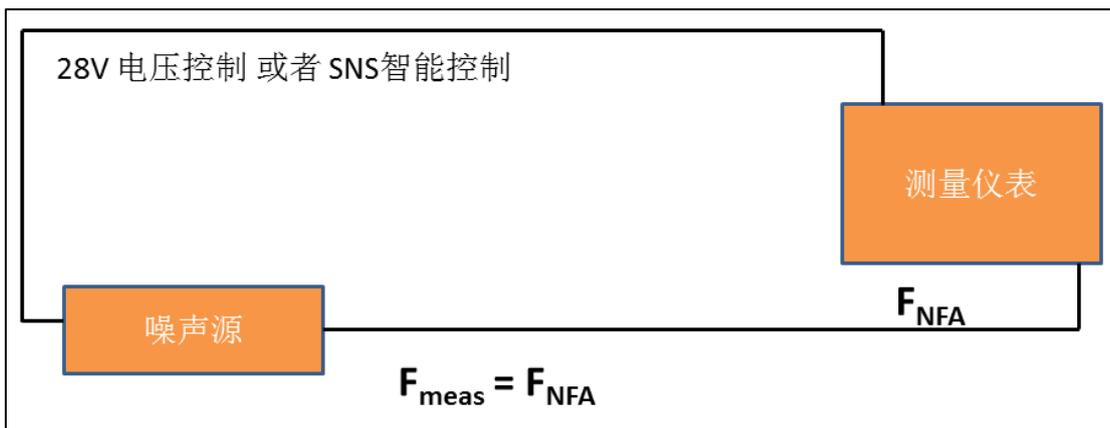
$NF(dB) = ENR - 10\text{Log}(Y-1)$ 这个结果 NF 并不是真正的放大器的噪声系数，而是放大器以及测量仪表的噪声系数，根据噪声系数级联运算可以知道

$$F_{\text{meas}} = F_{\text{DUT}} + (F_{\text{NFA}} - 1) / G_{\text{DUT}}$$



放大器噪声系数测量框图

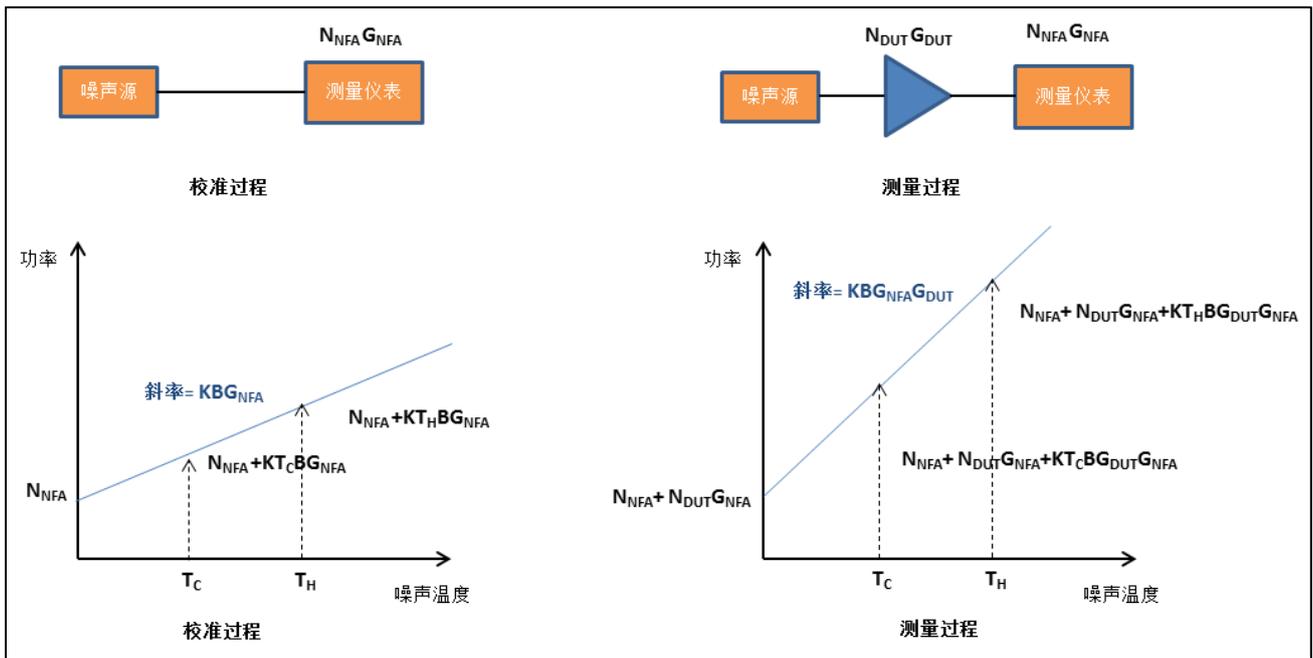
因此只要知道 G_{DUT} 以及 F_{NFA} 就可以算得 F_{DUT} ，首先来看 F_{NFA} 如何获得。在测量之前，都需要对仪表进行校准，如下图所示



Y 系数法 校准框图

在校准时候，只需要将噪声源直接连接到仪表。在这个过程中，仪表会测量自身的噪声系数，并且会在不同的仪表前端输入衰减器下进行测量。因为在测量的时候，针对不同增益的放大器需要仪表选择不同的前端衰减器。当改变了仪表的前端衰减器后，仪表自身的噪声系数 F_{NFA} 也会相应的变化。所以在校准的过程中，仪表会在不同的衰减器下进行校准，你可以听到步进衰减器的切换声音。

再来看看放大器的增益是如何获得的。我们知道在测量以及校准过程中，噪声源会输出冷态噪声以及热态噪声，如下图所示



Y 系数法校准以及测量框图

在校准的时候，仪表在 T_C 以及 T_H 测量得到的噪声分别为：

T_C 时候: $N_{NFA} + KT_CBG_{NFA}$ ①

T_H 时候: $N_{NFA} + KT_HBG_{NFA}$ ②

在测量的时候，仪表在 T_C 以及 T_H 测量得到的噪声分别为：

T_C 时候: $N_{NFA} + N_{DUT}G_{NFA} + KT_CBG_{NFA}G_{DUT}$ ③

T_H 时候: $N_{NFA} + N_{DUT}G_{NFA} + KT_HBG_{NFA}G_{DUT}$ ④

其中 N_{DUT}

用 $(④ - ③) / (② - ①)$

$$= (KT_HBG_{NFA}G_{DUT} - KT_CBG_{NFA}G_{DUT}) / (KT_HBG_{NFA} - KT_CBG_{NFA})$$

$$= G_{DUT} * (KT_HBG_{NFA} - KT_CBG_{NFA}) / (KT_HBG_{NFA} - KT_CBG_{NFA})$$

$$= G_{DUT}$$

Agilent 支持 Y 系数法测量的仪表主要如下所示

	噪声系数测量频率范围	增益不确定度	噪声系数不确定度
 N897xA	10MHz – 3GHz/6.7GHz/26.5GHz	±0.17 dB	±0.05 dB
 N9030A	10MHz – 3.6GHz/8.4GHz/13.6GHz/26.5GHz/50GHz	±0.10 dB	±0.02 dB
 N9020A	10MHz – 3.6GHz/8.4GHz/13.6GHz/26.5GHz	±0.10 dB	±0.02 dB
 N9010A	10MHz – 3.6GHz/7GHz/13.6GHz/26.5GHz	±0.15 dB	±0.03 dB
 N9000A	10MHz – 3.0GHz/7.5GHz	±0.20 dB	±0.05 dB

2.2 直接测试法

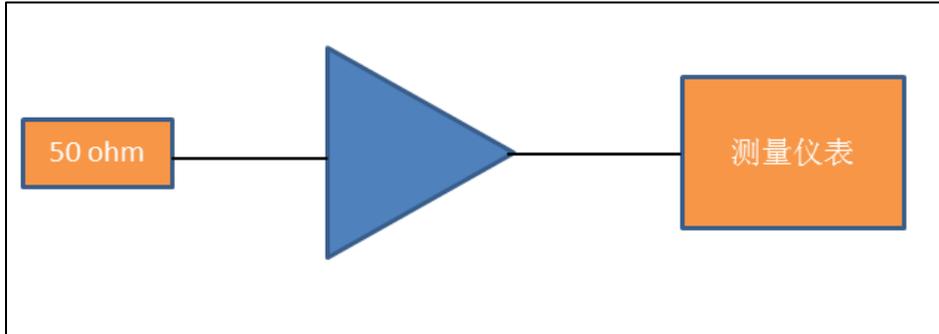
直接测试法就是根据噪声系数的定义直接进行测试

$$NF(dB) = (P_i * N_o) / (N_i * P_o)$$

根据噪声系数定义 $N_i = KT_0B = -174 \text{ dBm/Hz}$, $P_o/P_i = \text{Gain}$, N_o 为总的输出噪声

$$NF(\text{dB}) = N_o (\text{dBm/Hz}) + 174 (\text{dBm/Hz}) - \text{Gain}$$

因此在测量的时候只需要在放大器的输入端接上 50ohm 负载，利用频谱分析仪测量输出的噪声谱密度



直接测试法框图

	噪声系数测量频率范围	灵敏度	灵敏度 带前置放大器
 N9030A	3.6GHz/8.4GHz/13.6GHz/26.5GHz/50GHz	-157dBm@1GHz -157dBm@6GHz -153dBm@20GHz -145dBm@40GHz -142dBm@50GHz	-166dBm@1GHz -163dBm@6GHz -163dBm@20GHz -156dBm@40GHz -150dBm@50GHz
 N9020A	3.6GHz/8.4GHz/13.6GHz/26.5GHz	-151dBm@1GHz -149dBm@6GHz -143dBm@20GHz	-163dBm@1GHz -162dBm@6GHz -157dBm@20GHz
 E444xA	6.7GHz/13.2GHz/26.5GHz/42.98GHz/50GHz	-154dBm@1GHz -152dBm@6GHz -147dBm@20GHz -131dBm@40GHz -127dBm@50GHz	-165dBm@1GHz -165dBm@6GHz -161dBm@20GHz -146dBm@40GHz -140dBm@50GHz

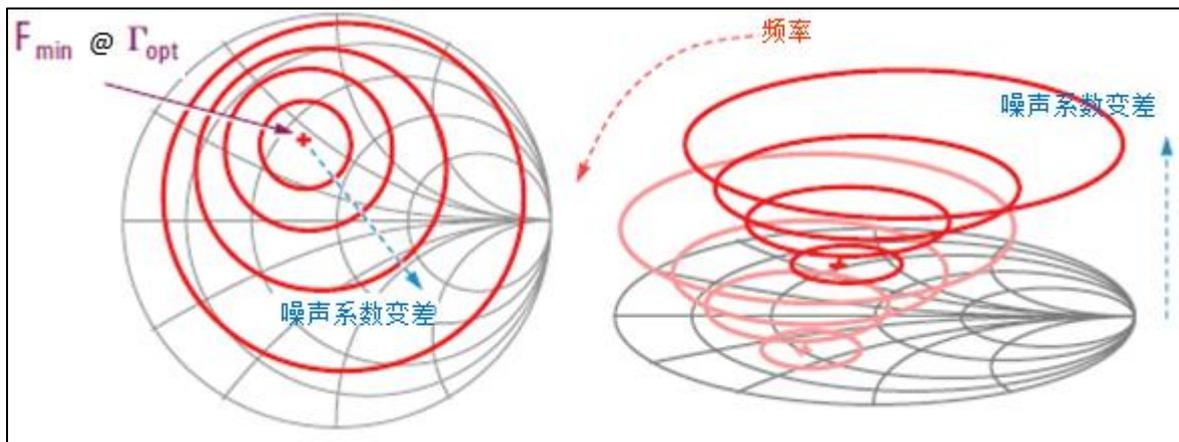
2.3 冷态噪声源法

在使用 Y 系数法或者直接测试法中，都假设源是匹配的。但是事实上，噪声源的输出和放大器的输入都存在这失配，并且源端的失配会最终影响到测量的噪声系数。

源阻抗对噪声系数的影响可以通过噪声参数来表征,那首先来看看什么是噪声参数。放大器的噪声参数是描述噪声系数 vs 源阻抗 Γ_s 发生变化的参量,在史密斯图上,噪声参数通常被画成一些等噪声系数的圆。在这个圆上, Γ_s 虽然不同但是噪声系数是相同的。对任何一种放大器,在某个源阻抗值可以对应一个最小的噪声系数,我们把这个源阻抗的反射系数叫做 Γ_{opt} 。源阻抗偏离这个阻抗的值越远,放大器的噪声系数就会变得越大。放大器的噪声参数是晶体管偏置电流以及放大器的工作频率有关的。

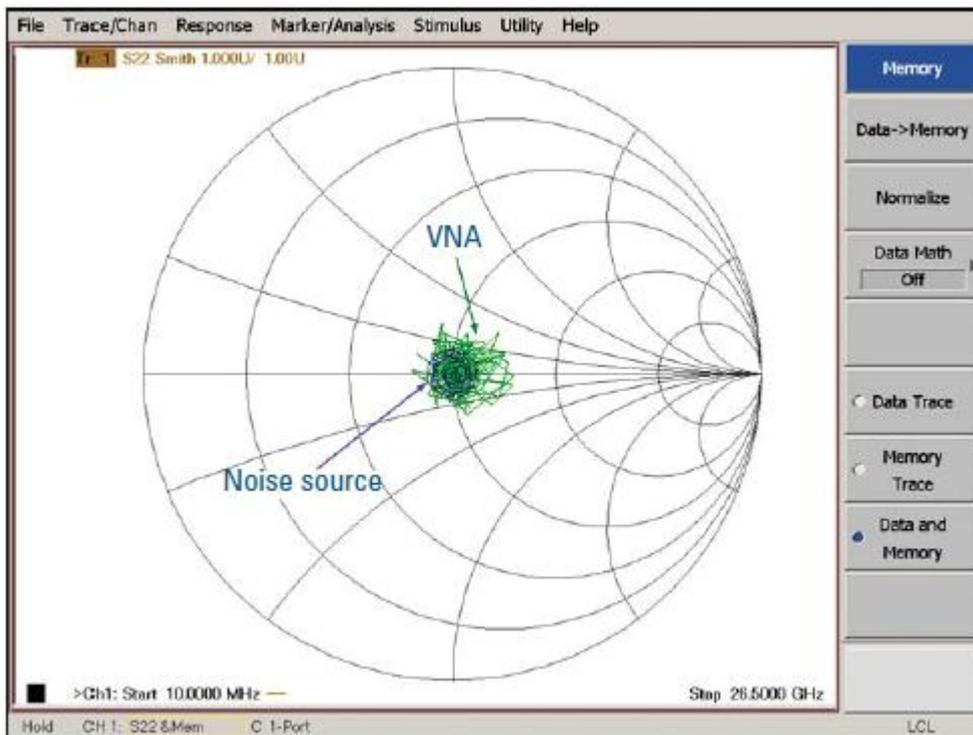
$$F = F_{min} + \frac{4R_n}{Z_0} \frac{|\Gamma_{opt} - \Gamma_s|^2}{|1 + \Gamma_{opt}|^2 (1 - |\Gamma_s|^2)}$$

其中 F_{min} 最小噪声系数, R_n 噪声电阻, Γ_s 源反射系数, Γ_{opt} 最佳源反射系数, Z_0 系统阻抗。



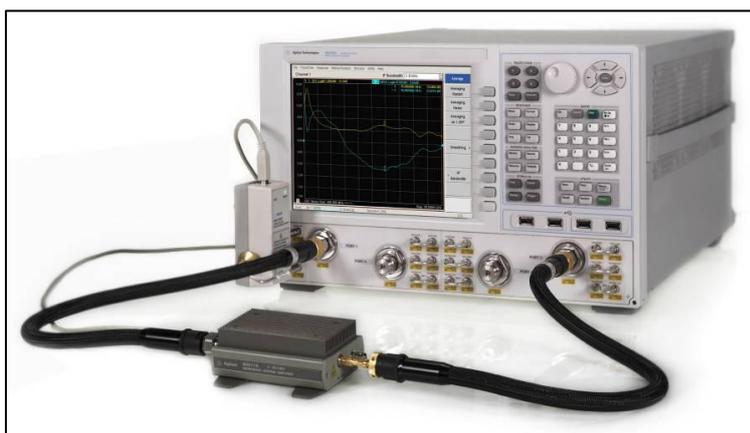
噪声系数和源阻抗以及频率的关系

噪声参数的概念直接关系到我们精确测量 50ohm 噪声系数的能力。当测量系统的源阻抗在 50ohm 附近改变的时候, Γ_s 就会在靠近史密斯图圆心的几个噪声圆之间变来变去,所测量到的被测器件的噪声系数也会随之改变。下图显示的是一个超噪比 ENR 为 15dB 的噪声源在不加电状态下的输入匹配,虽然它的中心是在 50ohm 上,但是它的反射系数很明显是随着频率的变化而改变的。



噪声源输出驻波

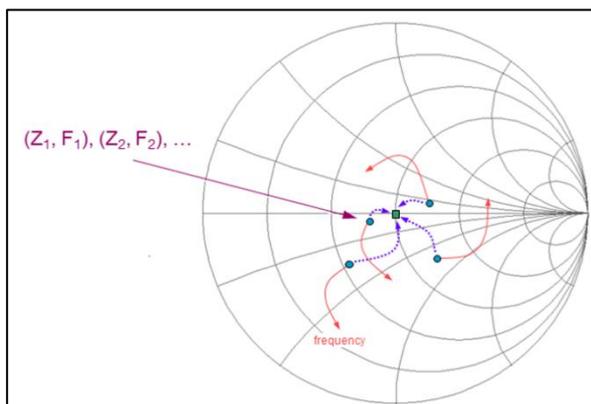
因为放大器的噪声系数是和源阻抗相关的，不同的源阻抗下放大器的噪声系数会发生变化。因此在 Y 系数法或者直接测试法中，由于假定是在 50ohm 输入匹配下获得结果，测量结果的不确定度主要会来自于输入端的匹配。因此在测量结果中，会有很大的纹波，并且很难分辨这些纹波到底是来自于器件本身还是来自于放大器输入源失配。



当使用一般的矢量网络分析仪用冷源法进行测量时，如果不采用对内部衰减器或源进行校准的技术的话，那么系统原始的源匹配通常也是比较差的。Agilent 率先在业界推出了基于 PNA-X 网络分析仪的矢量源校准方法，实际得到的源匹配的结果非常理想，这样被测器

件和 PNA-X 内噪声测量接收机的噪声参数对测量结果造成的不确定性就会非常小。

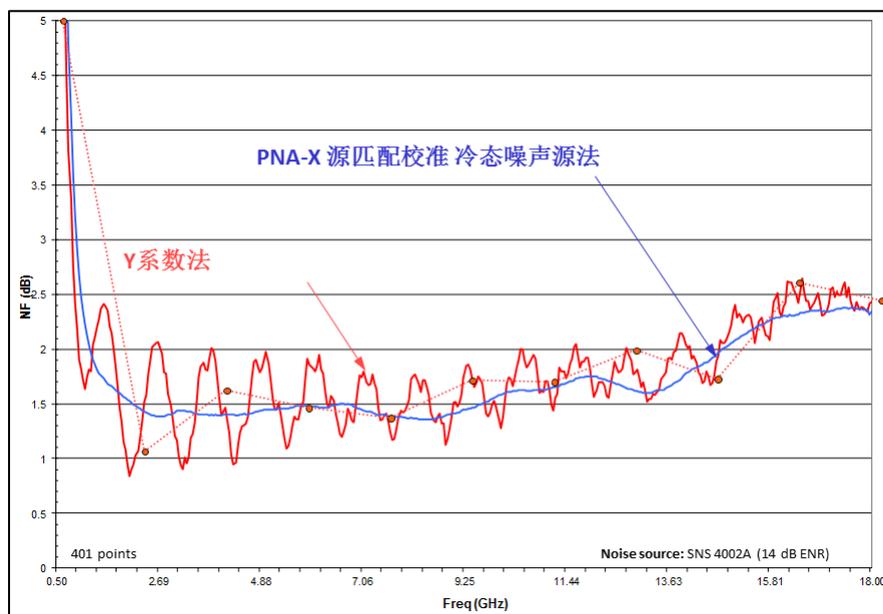
在 PNA-X 噪声系数测量中，会使用一个电子校准件连接在被测件的输入端作为源阻抗调谐器。



首先 PNA-X 会测量该电子校准件的各个阻抗值，一般情况下会使用 4 个阻抗值。然后在这 4 个不同的源阻抗下，去测量器件的噪声系数，通过使用噪声参数的定义式解方程可以获得在 50ohm 源阻抗下的噪声系数。

为了提高测试精度，你可以最多选择 7 个阻抗值。

下图为对同一个放大器使用 PNA-X 冷态噪声源测试以及 Y 系数法测试的结果曲线比较，可以看到由于源失配，Y 系数法测量的抖动会非常大。



PNA-X 源匹配校准冷态噪声源测试结果

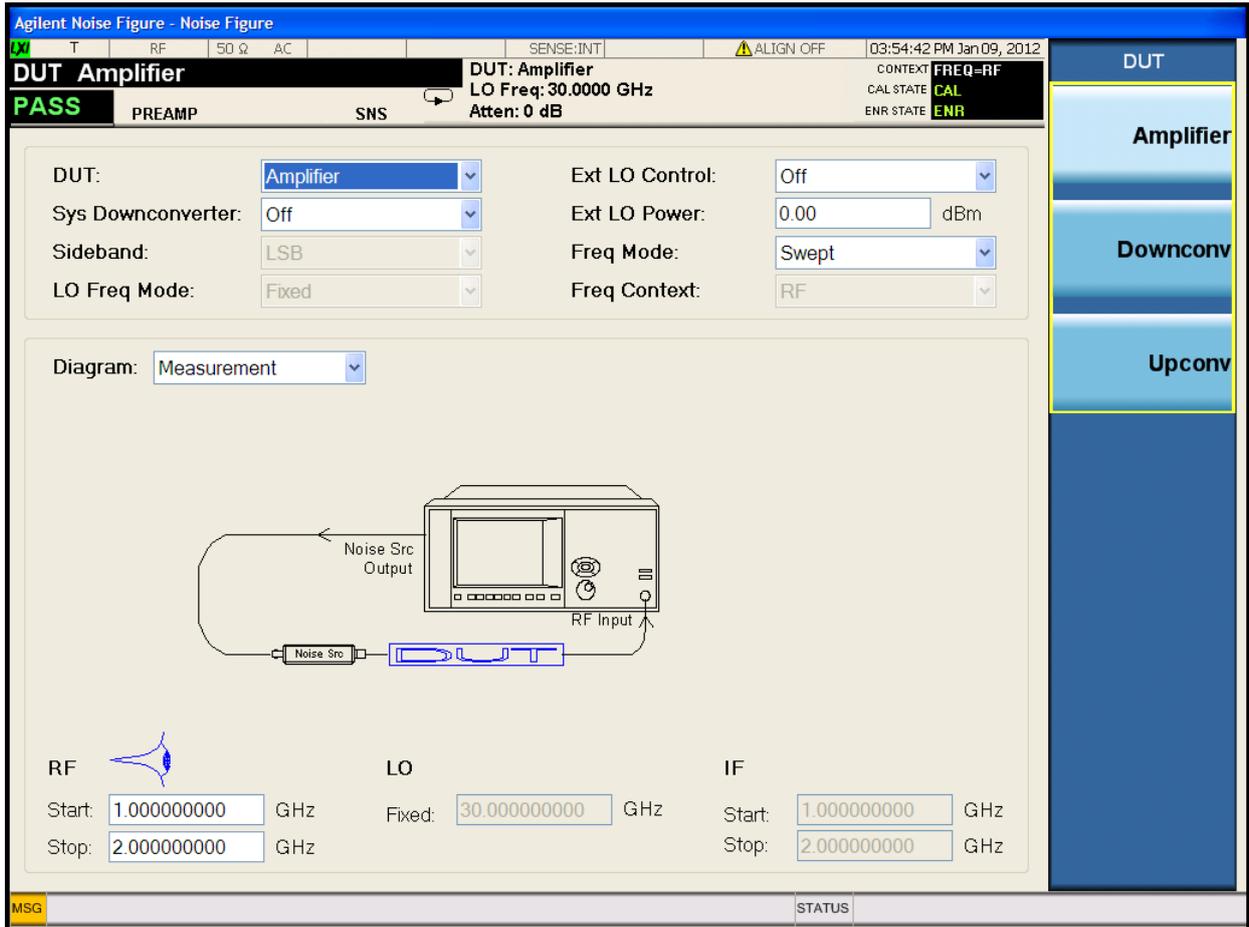
三. 测量实例

3.1 放大器 Y 系数法

仪器：Agilent N9030A 信号分析仪 + N9069A 噪声系数测量选件

a. 测量设置

设置 DUT 的测量模式， 这里测量的是放大器 所以选择 Amplifier。



放大器 Y 系数法测量框图

b. 超噪比 ENR 设置

如果你使用的是智能噪声源(SNS)系列，那么它可以直接上超噪比 ENR 值到仪表。如果你使用的是普通的 346 系列的噪声源，那么需要你手动输入超噪比 ENR.

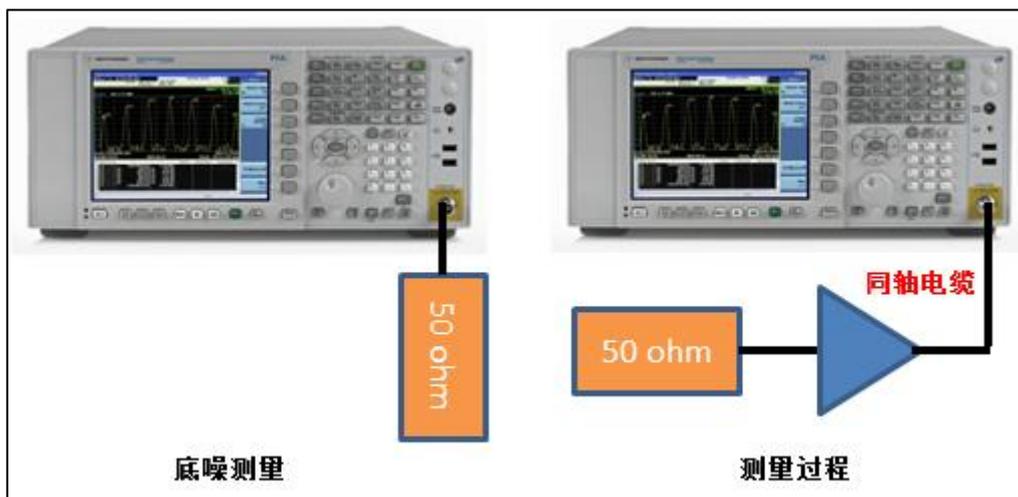
c. 设置测量频率范围

你可以选择固定点的测量，或者扫频的测量。

3.2 放大器直接测量法

首先需要知道放大器的增益，可以通过信号源+频谱仪测量方式或者网络分析仪来得到增益。

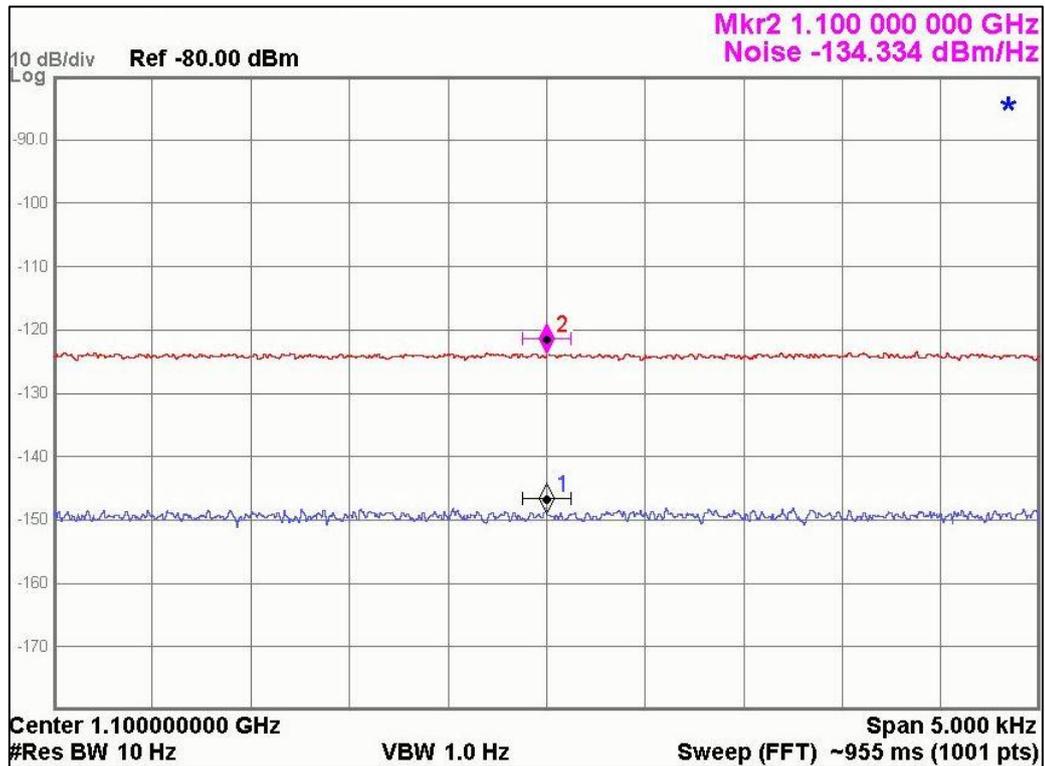
需要判断仪表的底部噪声是否足够低，是否能够测量到放大器的输出噪声。



放大器直接测量法框图

在 N9030A 中设置如下

- Center Freq 中心频率设置
- Span 扫宽 建议设置为 5KHz 或者更小
- RBW 设置 建议为 10Hz
- VBW 设置 建议为 1Hz
- Detector 检波器 设置为 RMS
- Avg 平均 设置为打开
- Marker Noise 将标记点设置为噪声谱密度测量方式，这样读的结果就是 dBm/Hz. 这个结果是包含了放大器输出到仪表的电缆损耗的。因此，千万记住一定要将结果扣除掉连接在放大器输出端的同轴电缆损耗



放大器噪声系数直接测量法

上图蓝色曲线为仪表底噪，红色曲线为放大器输出噪声，信噪比大于 25dB。这样放大器的输出噪声测量结果是可信的。

在本例中，电缆的损耗大约为 1.1dB @ 1.1GHz,因此实际的放大器输出噪声谱密度为:

$$N_o = -134.33 + 1.1 \text{ dB} = -133.23 \text{ dBm/Hz}$$

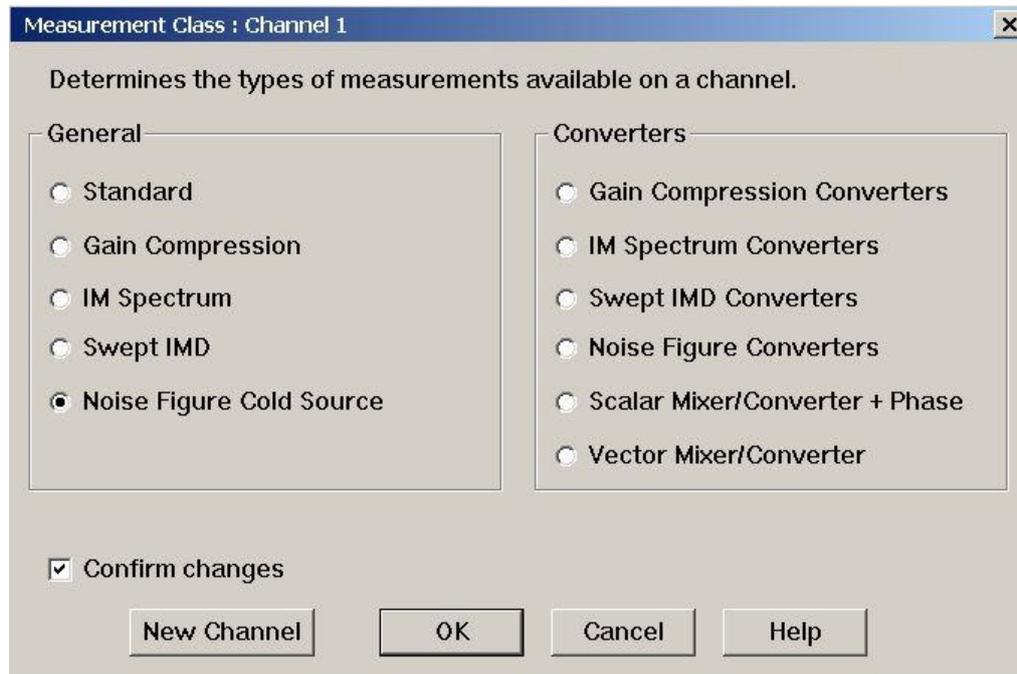
$$\text{NF(dB)} = N_o \text{ (dBm/Hz)} + 174 \text{ (dBm/Hz)} - \text{Gain} = -133.23 + 174 - 33.73 = 7.04 \text{ dB}$$

这个结果和前面用 Y 系数法的测量结果非常接近。

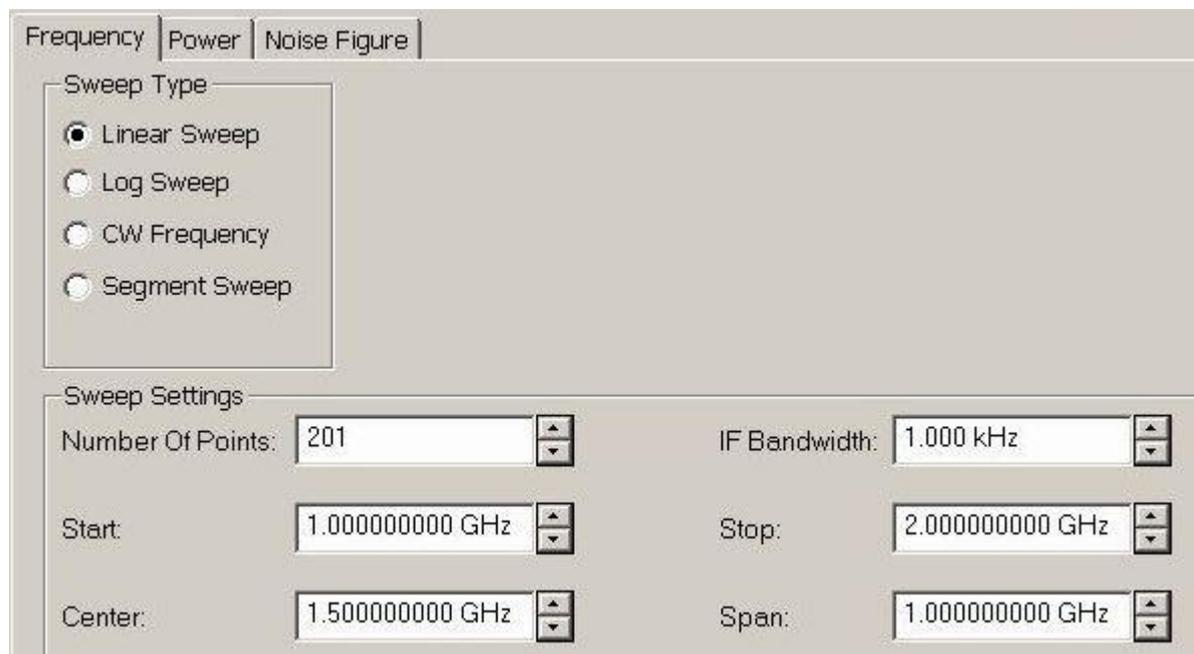
3.3 放大器冷态噪声源法

Agilent PNA 以及 PNA-X 系列网络分析仪，通过选件可以支持冷态噪声源方法。可以选择标准网络分析仪接收机或者专用高灵敏度接收机来测量噪声系数。下面介绍的是，采用标准网络分析仪进行的标量噪声系数测量方法。

a. 在 Meas Class 中选择冷态噪声源测量应用



b. 在 Noise Figure Setup 中，首先设置扫描方式以及频率范围



- c. 设置端口的输出功率。其中 Power Level 指的是在 S 参数测试中的端口输出功率，注意不要设置太大以免在 S 参数测试中使放大器压缩导致增益测量发生较大的误差。

Frequency | Power | Noise Figure

Power On (All Channels)

DUT Input Port

Input Port: Port 1

Power Level: -30.00 dBm

Source Attenuator: Auto 20 dB

Receiver Attenuator(A): 0 dB

Source Leveling Mode: Internal

DUT Output Port

Output Port: Port 2

Power Level: -20.00 dBm

Source Attenuator: Auto 10 dB

Receiver Attenuator(B): 0 dB

Source Leveling Mode: Internal

- d. 最后设置噪声系数测量设置。一般 Noise Bandwidth 设置越大，这样测量结果的抖动就越小，但是相应的噪声系数测量频率分辨率也越差。记住一个原则，Noise Bandwidth 必须小与被测件的带宽。如果被测件是放大器+滤波器，那么在边带处单独测量时需要设置较小的 Noise Bandwidth。最后通过校准后的测量结果如下图所示。

e.

Frequency | Power | Noise Figure

Bandwidth/Average

Noise Bandwidth: 1.2 MHz

Average Number: 100

Average ON

Noise Receiver

NA Receiver (Port 2)

Noise Receiver

Receiver Gain

High

Medium

Low

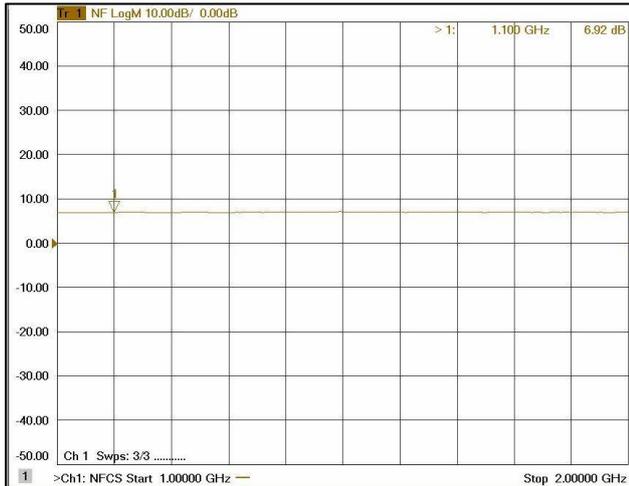
Ambient Temperature

295.00 K

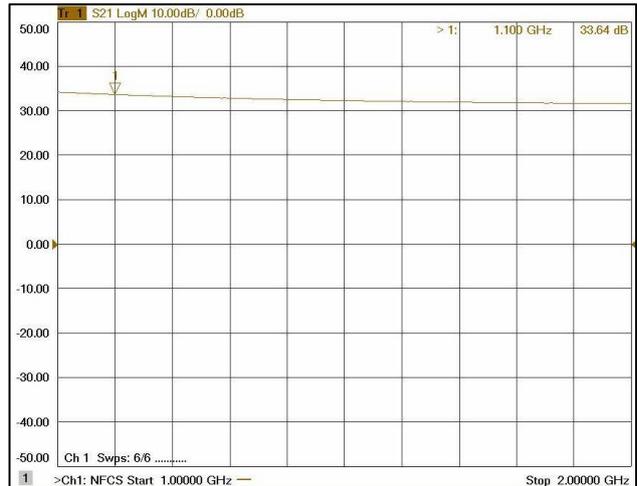
Impedance States

Noise Tuner: N4691-60004 ECal 07429

Max Acquired Impedance States: 4



噪声系数测量结果



增益测量结果

可以看到测量结果和 Y 系数法 或者是直接测试法都是相当接近的。但是别忘了，网络仪这个测量结果是 201 点，如果在噪声系数分析仪或者频谱仪上同样完成这些点数测量，将耗费大量的时间。而且 Agilent 冷态噪声源法测量结果非常平滑。