

文章编号: 2095-4980(2014)05-0736-05

噪声系数测量中的温度修正方法

魏 竹, 张翠翠, 王建忠

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 一般配置非智能噪声源的噪声系数分析仪, 当环境温度变化时, 不能及时修正环境温度对噪声系数测量的影响。文中介绍了噪声系数的测量原理及影响噪声系数测量不确定度的各种因素。从 Y 因子法测量噪声系数的原理出发, 详细论述并推导了环境温度变化时噪声系数测量结果的修正方法。通过补偿温度变化对测量结果的影响, 提高噪声系数测量, 特别是低噪声器件噪声系数测量准确度。最终通过实验数据验证了理论推导的正确性, 提供了温度修正曲线。

关键词: 噪声系数; Y 因子; 温度修正

中图分类号: TN304.07

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201405.0736

Temperature correction methods for noise figure measurement

WEI Zhu, ZHANG Cui-cui, WANG Jian-zhong

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: General noise analyzer equipped with non-smart noise source can not compensate the measurement results timely when the ambient temperature changes. The noise figure measurement principles and various impact factors on its measurement uncertainty are briefly described. Based on the Y -factor noise figure measurement principle, the correction method to measurement results when ambient temperature changes is demonstrated in detail. The noise figure measurement accuracy can be improved especially for low-noise device by this compensation method. The theoretical derivation of the temperature correction curve is verified through the experimental data.

Key words: noise figure; Y -factor; temperature compensation

在无线电设置中, 除了信号, 还不可避免地存在噪声, 任何电子设备都会产生噪声^[1]。现代各类接收系统常常需要处理非常弱的信号, 系统引入的噪声将直接影响弱信号的处理。噪声系数是射频、微波系统的关键指标之一, 随着微波通信、雷达、导航等技术的迅速发展, 对微波低噪声器件的要求越来越迫切, 如何提高低噪声器件噪声系数测量的准确度变得越来越重要^[2-3]。在噪声系数的测量过程中, 影响测量不确定度的因素有很多^[4], 如: 失配、外来信号干扰、损耗补偿、环境温度。一般在测量开始之前需要输入噪声源关状态下的冷温, 即 T_c 。一般 T_c 假定为 290 K (17 °C), 但实际的环境温度并不是 290 K, 需要对测量结果进行修正。另一方面, 将实际环境温度输入到噪声系数分析仪, 但测试过程中环境温度如果发生较大变化, 也需要重新校准, 这会降低测试效率。本文从噪声系数的测量原理出发, 详细论述并推导了环境温度变化对噪声系数测量结果的影响及修正方法, 绘制了温度修正曲线, 及时补偿环境温度变化对噪声系数测量结果的影响, 节省了测试时间, 提高了噪声系数测量的准确度。

1 噪声系数测量原理

本文采用美国 Agilent 公司的 N8975A 噪声系数分析仪, 选用其配置的 346C 非智能噪声源, 采用 Y 系数法测量噪声系数^[5]、噪声开、关 2 种状态下的噪声功率^[6]。噪声源开时, 被测件输入端相当于接入输出噪声温度为 T_h 的高温噪声源, 此时被测件输出端的噪声功率为 P_h ; 当噪声源关时, 被测件输入端相当于接入输出噪声温度为 T_c 的低温噪声源, 此时被测件输出端的噪声功率为 P_c , 因此有:

$$P_h = k(T_h + T_c)BG \quad (1)$$

$$P_c = k(T_c + T_e)BG \quad (2)$$

式中: k 为波尔兹曼常量 1.38×10^{-23} J/K; T_e 为被测件的等效输入噪声温度, 单位为 K; B 为被测件的等效接受噪声带宽, $B = f_1 - f_2$, 单位为 Hz; G 为被测件的功率增益。

Y 系数的比值^[7]为:

$$Y = \frac{P_h}{P_c} \quad (3)$$

或

$$Y = \frac{T_h + T_e}{T_c + T_e} \quad (4)$$

由式(4)可得到被测件的等效输入噪声温度 T_e 为:

$$T_e = \frac{T_h - YT_c}{Y - 1} \quad (5)$$

再根据噪声系数的定义公式:

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (6)$$

可得:

$$F = 1 + \frac{T_h - YT_c}{T_0(Y - 1)} \quad (7)$$

式中 $T_0 = 290$ K, 为标准噪声温度。

2 温度变化所引起的噪声系数测量误差

基于 Y 因子法的噪声系数分析仪假设在测量过程中所有器件的物理温度都为默认值 290 K, 但当环境温度不是 290 K 时, 需要将正确的温度输入到分析仪, 否则会产生误差^[8]。即便如此, 在测量过程中一旦环境温度发生变化, 同样会产生误差。假设 F_{mea} 为没有考虑环境温度变化时的噪声系数测量值(此时认为 $T_c = T_{c1} = T_0 = 290$ K); F_{actual} 为考虑了环境温度变化时的噪声系数测量值(此时的 T_c 为环境温度 $T_c = T_{c2}$);

$$\Delta F = F_{\text{mea}} - F_{\text{actual}} \quad (8)$$

式中:

$$F_{\text{mea}} = 1 + \frac{T_h - YT_{c1}}{(Y - 1)T_0} \quad (9)$$

$$F_{\text{actual}} = 1 + \frac{T_h - YT_{c2}}{(Y - 1)T_0} \quad (10)$$

由式(7)可得:

$$Y = \frac{T_h + (F - 1)T_0}{(F - 1)T_0 + T_c} \quad (11)$$

因为 Y 是噪声源开关 2 种状态下实际测得的噪声功率之比, 其 T_c 为真实的环境温度 T_{c2} 。所以有:

$$Y = \frac{T_h + (F - 1)T_0}{(F - 1)T_0 + T_{c2}} \quad (12)$$

噪声系数一般用对数表示, 其 ΔF 也用对数表示为:

$$\Delta F = 10 \log(F_{\text{mea}}) - 10 \log(F_{\text{actual}}) = 10 \log \left(\frac{F_{\text{mea}}}{F_{\text{actual}}} \right) = 10 \log \left(\frac{1 + \frac{T_h - YT_{c1}}{(Y - 1)T_0}}{1 + \frac{T_h - YT_{c2}}{(Y - 1)T_0}} \right) = 10 \log \left(\frac{(Y - 1)T_0 + T_h - YT_{c1}}{(Y - 1)T_0 + T_h - YT_{c2}} \right) \quad (13)$$

假设此时噪声源的超噪比(Excess Noise Ratio, ENR)为 1 dB, 由 ENR 的定义公式:

$$ENR = 10 \log \left(\frac{T_h}{T_0} - 1 \right) \quad (14)$$

可得:

$$T_h = \left(10^{\frac{ENR}{10}} + 1 \right) T_0 \tag{15}$$

将式(12)、式(15)代入式(13)，得到在不同环境温度时 ΔF 随 F 的变化曲线和数据，如图 1、表 1 所示。

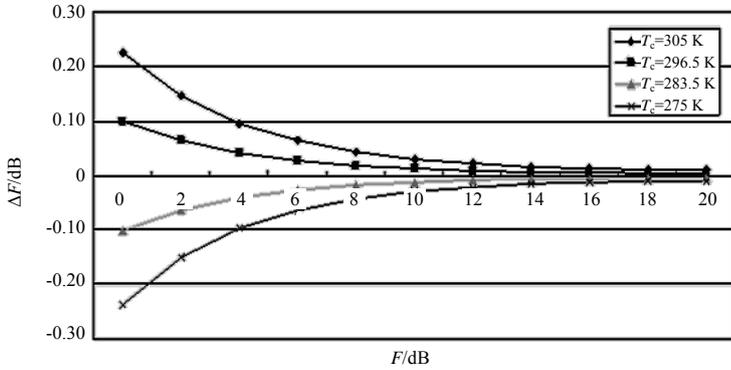


Fig.1 ΔF changing with F under different temperature conditions
图 1 不同温度下 ΔF 随 F 的变化曲线

表 1 不同温度下 ΔF 随 F 的变化数据
Table1 ΔF changing with F under different temperature conditions

$T_{c2}=305\text{ K}, ENR=15\text{ dB}, T_{c1}=T_0=290\text{ K}$		$T_{c2}=296.5\text{ K}, ENR=15\text{ dB}, T_{c1}=T_0=290\text{ K}$	
F/dB	$\Delta F/\text{dB}$	F/dB	$\Delta F/\text{dB}$
0	0.226	0	0.099
0.2	0.217	0.2	0.095
0.4	0.207	0.4	0.091
0.6	0.198	0.6	0.087
0.8	0.190	0.8	0.083
1.0	0.182	1.0	0.080
1.2	0.174	1.2	0.076
1.4	0.167	1.4	0.073
1.6	0.160	1.6	0.070
1.8	0.153	1.8	0.067

设 ENR 为 15 dB, $F=1\text{ dB}$, $T_{c1}=T_0=290\text{ K}$, ΔF 随环境温度的变化曲线和数据，如图 2、表 2 所示。

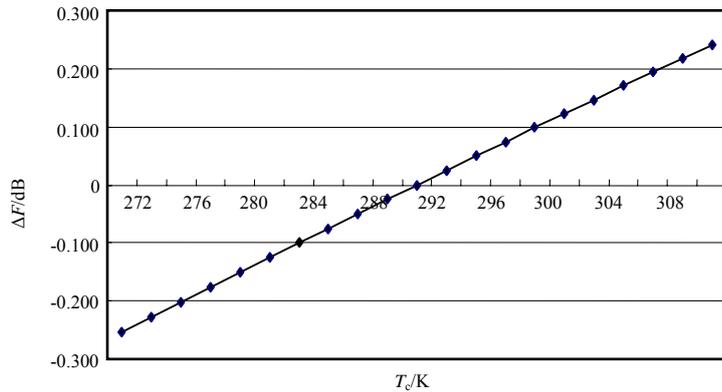


Fig.2 ΔF changing with environmental temperature
图 2 ΔF 随环境温度变化的曲线

表 2 ΔF 随环境温度变化的数据
Table2 ΔF changing with environmental temperature
 $ENR=15\text{ dB}, F=1\text{ dB}, T_{c1}=T_0=290\text{ K}$

T_{c2}/K	$\Delta F/\text{dB}$	T_{c2}/K	$\Delta F/\text{dB}$
270	-0.254	292	0.025
272	-0.228	294	0.049
274	-0.202	296	0.074
276	-0.176	298	0.098
278	-0.151	300	0.122
280	-0.125	302	0.146
282	-0.100	304	0.170
284	-0.075	306	0.194
286	-0.050	308	0.218
288	-0.025	310	0.241
290	0		

设 $F=1\text{ dB}$, $T_{c1}=T_0=290\text{ K}$, T_c 为 305 K, 得到 ΔF 随 ENR 的变化数据,一般噪声源 ENR 主要有 6 dB 和 15 dB 两种形式。

当环境温度不是 290 K 时,实际上噪声源的超噪比 ENR 也需要修正, ENR 值的微小改变对 ΔF 的影响很小,不代入计算。考虑了环境温度影响的 ENR 的公式应为:

$$ENR = 10 \log \left(\frac{T_h - T_c}{T_0} \right) \tag{16}$$

以一组数据(见表 4)可以证明温度改变时, ENR 值的微小改变对 ΔF 的影响很小。

表 4 ENR 值的改变对 ΔF 的影响

Table4 ΔF changing with ENR
 $F=1\text{ dB}, T_{c1}=T_0=290\text{ K}$

T_{c2}/K	ENR/dB	$\Delta F/\text{dB}$ (considering the change of ENR)	$\Delta F/\text{dB}$ (without considering the change of ENR)	effect on correction of $\Delta F/\text{dB}$
305	5.943	0.232 42	0.231 66	-0.000 76
300	5.962	0.185 35	0.185 01	-0.000 34
295	5.981	0.089 86	0.089 78	-0.000 08
290	6.000	0	0	0

表 3 ΔF 随 ENR 变化的数据
Table3 ΔF changing with ENR
 $F=1\text{ dB}, T_{c1}=T_0=290\text{ K}, T_{c2}=305\text{ K}$

ENR/dB	$\Delta F/\text{dB}$
6	0.231
15	0.182

数据表明,考虑 ENR 变化和不考虑 ENR 变化对修正噪声系数不会带来足够的影响,所以在计算环境温度变化对噪声系数测量带来的影响时,可以不考虑此时 ENR 值改变所造成的影响。

3 实验验证

根据理论推导出的 ΔF 随环境温度变化的公式和曲线,可以及时修正噪声系数的测量结果。为了验证该理论的正确性,安排2组实验,第1组:在环境温度不发生变化的条件下,将实测环境温度输入到噪声系数分析仪,作为 T_c ,此时测量所得的噪声系数 F 作为真值 F_{act} ;第2组:在噪声系数分析仪内输入的 T_c 温度为270 K(这时噪声系数分析仪内部会进行与实际不一致的补偿),得出一组错误的测量结果 F_{mea} , F_{mea} 与 F_{act} 的差值应该与利用式(13)计算的补偿值一致,数据如表5所示。

表5 实验验证数据
Table5 Experimental verification data

f/MHz	F_{act}/dB	F_{mea}/dB	actual measurement $\Delta F=(F_{mea}-F_{act})/\text{dB}$	compensation calculated by the formula(13) $\Delta F/\text{dB}$
100	1.100	1.436	0.336	0.314
200	1.095	1.431	0.336	0.314
300	1.288	1.607	0.319	0.303
400	1.382	1.696	0.314	0.298
500	1.431	1.739	0.308	0.296
600	1.443	1.750	0.307	0.295
700	1.466	1.774	0.308	0.294
800	1.541	1.850	0.309	0.290
900	1.600	1.894	0.295	0.287
1 000	1.746	2.041	0.295	0.280

从实验数据可以看出利用式(13)计算出的补偿数据虽然与实际需补偿的数据很一致,但是偏小,这是由于在利用公式计算补偿结果时未考虑端口间的失配,而实际实验中,被测放大器输出端、噪声系数分析仪输入端之间存在失配。

4 结论

大部分的噪声系数分析仪提供了温度补偿功能,如美国 Agilent 公司的 N8975A,其带有智能噪声源,内置了温度计,可以自动测量出冷温并显示出来,同时用于补偿温度变化对测量结果的影响;但对仅配有非智能噪声源的噪声系数分析仪来说,在测量噪声系数的过程中不允许环境温度发生较大变化,否则将产生较大的误差,特别是对低噪声器件,由于噪声系数小,这种影响更是不可忽略。本文所推导的温度补偿公式成功解决了这一问题,使得噪声系数的测量更加准确、灵活和方便。

参考文献:

- [1] 宋青娥. 一种减小噪声系数测量不确定度的方法[J]. 应用天地, 2008,27(7):52-54. (SONG Qing-e. Method to reduce the uncertainty of noise coefficient measurement[J]. Application Field, 2008,27(7):52-54.)
- [2] 黄珍元,隋魏. 噪声系数测量准确度分析仪[J]. 科技信息, 2008(26):39. (HUANG Zhen-yuan,SUI Wei. The analysis of noise factor measurement accuracy[J]. Science And Technology Information, 2008(26):39.)
- [3] 陈晓华. 噪声系数测量中误差分析和不确定度的评定[J]. 半导体技术, 2010,35(8):806-809. (CHEN Xiao-hua. Error analysis and uncertainty evaluation in noise figure[J]. Semiconductor Technology, 2010,35(8):806-809.)
- [4] 王瑛,朱祥维,王飞雪. 一种新的噪声系数测量方法[J]. 电子学报, 2005,33(6):1132-1135. (WANG Ying,ZHU Xiang-wei, WANG Fei-xue. A new method of noise figure measurement[J]. Acta Electronic Sinica, 2005,33(6):1132-1135.)
- [5] 董建涛. Y-因子算法与噪声系数不确定度分析[J]. 理论与方法, 2009,28(3):28-30. (DONG Jian-tao. Y Factor algorithm and uncertainty analysis in noise figure[J]. Theory and Method, 2009,28(3):28-30.)
- [6] Agilent Technologies. Noise figure measurement accuracy—the Y-factor method[Z]. 2001.
- [7] Agilent Technologies. Measurement noise figure with a spectrum analyzer application note 1439[Z]. 2001.
- [8] Agilent Technologies. Fundamentals of RF and microwave noise figure measurement[Z]. 2001.

(下转第 749 页)