

星载低噪声放大器噪声系数的高精度测试方法研究^①

康红霞, 杨宁彬, 高 妍, 杨晓敏

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘 要:噪声系数是低噪声放大器的关键指标, 它决定了系统的噪声性能。然而现有的测量方法不能修正失配和噪声参数误差, 只能给出基于源阻抗的噪声系数。为了提高低噪声放大器噪声系数的测量精度, 文章基于矢网冷源噪声系数测试方法, 给出优选的矢量噪声校准法, 并提出 5 项重要技术措施以进一步提高低噪声放大器噪声系数的测量精度。相比 Y 因子法, 矢网冷源噪声系数测试方法可以修正失配和噪声参数误差, 给出系统阻抗为 50 Ω 时的噪声系数。实验测试结果表明, 在 14.25 GHz, 矢网冷源噪声系数测试方法的测量不确定度为 0.17 dB, 相比 Y 因子法测量不确定度 0.38 dB, 测量精度显著提高, 进一步满足了高精度的测试要求。

关键词:低噪声放大器; 噪声系数; 矢网冷源法; 高精度

中图分类号: TN407

文献标识码: A

文章编号: 1674-7135(2021)02-0035-06

D O I: 10.3969/j.issn.1674-7135.2021.02.006

The research on high-accuracy noise figure measurement method for space-borne low noise amplifiers

KANG Hongxia, YANG Ningbin, GAO Yan, YANG Xiaomin

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: The noise figure is a key indicator of low noise amplifiers (LNA), which determines the noise performance of communication systems. However, the existing measurement methods only provide the noise figure based on the source impedance but cannot remove the mismatch and noise-parameter-error. In order to improve the measurement accuracy of the LNA noise figure, based on the VNAs-cold source method, the authors propose optimal vector noise calibration method and 5 key technical countermeasures to further improve the measurement accuracy. Compared to the Y factor method, the VNAs-cold source method greatly reduce mismatch and noise-parameter-error and give the noise figure when the system reference impedance is 50 Ω . Our test results reveal that in the case of 14.25 GHz the measurement uncertainty of the VNAs-cold source method is 0.17 dB, and the Y-factor method, which is relatively accurate among conventional test methods can only achieve 0.38 dB. Therefore, by invoking the VNAs-cold source method and the proposed technical countermeasures, the measurement accuracy is significantly improved, which further meets the high-precision test requirements.

Key words: LNA; noise figure; VNAs-cold source method; high-accuracy

0 引言

噪声导致系统性能恶化, 影响通讯质量, 低噪声

放大器(LNA)位于通信系统的前端, 前端 LNA 的噪声性能对系统的噪声性能有决定性的影响, 而噪声

^① 收稿日期: 2021-01-28; 修回日期: 2021-04-07。

基金项目: 民用航天技术预研项目(编号: D040301)

作者简介: 康红霞(1967—), 工程师。主要研究方向为卫星、飞船等单机产品测试技术。E-mail: hongxia_67@qq.com

系数是低噪声放大器的关键指标,因此精确测量低噪声放大器的噪声系数非常重要,尤其是对于卫星等航天产品功率受限,星间链路以更佳的发射接收性能实现更远的作用距离,星载低噪声放大器的噪声系数越来越小,如有的低至 0.65 dB^[1],产品频段逐步提高,已有 Q 频段产品^[2],对噪声系数的测量精度提出了更高的要求。目前测量噪声系数的方法主要有冷源法(也称为直接法),增益法和 Y 因子法^[3-8]。传统的冷源法测量精度较低,增益法受限于频谱仪的噪声基底测试精度难以提升,只适合 10 dB 以上噪声系数的测试,Y 因子法测试增益较低的被测件或者高频段被测件时误差较大且其测量结果准确性高度依赖于匹配良好的优质源阻抗和负载阻抗。综上所述,为了克服现有方法的缺陷,对于低噪声放大器需要有更精确的噪声系数测试方法。

在深入研究近年来国际上噪声系数测试技术新进展^[9-13]的基础上,本文提出矢网冷源噪声系数测试方法,即用矢量网络分析仪(简称矢网),结合冷源法噪声系数测量,通过给出的矢量噪声校准及控制误差的 5 项技术措施,有效提升了低噪声放大器噪声系数的测量精度,本文所述噪声系数测试方法以下简称矢网冷源法。

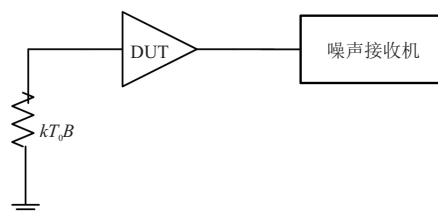
1 矢网冷源法

对于一个线性二端口网络,噪声系数定义^[3]为输入端信噪比与输出端信噪比的比值,噪声系数常用噪声因子的对数表达形式 $NF = 10 \log(F)$ 。其中噪声因子式(1)中,

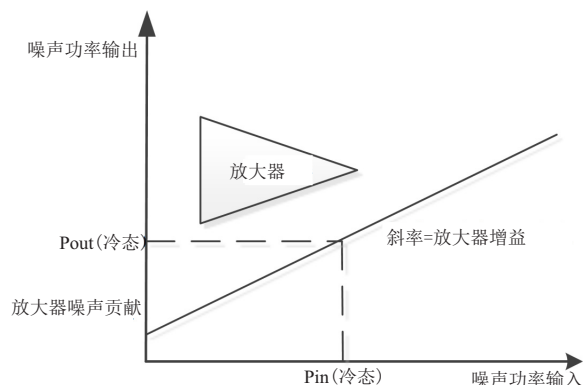
$$F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} = \frac{N_o}{GN_i} = \frac{kT_0BG + N_a}{kT_0BG} = 1 + \frac{N_a}{kT_0BG} \quad (1)$$

S_i 为输入信号功率, N_i 为输入端噪声功率, S_o 为输出信号功率, N_o 为输出端噪声功率, N_a 为被测件的噪声功率, k 是玻尔兹曼常数 1.38×10^{-23} J/K, T_0 是标准噪声温度 290 K, B 是噪声带宽, G 是被测件增益。

冷源法噪声系数测试原理如图 1 所示,在被测件输入端连接一个物理温度为 290 K 的负载,在被测件的输出端直接测试输出噪声功率,测试得到放大器的增益,由式(1)计算出噪声因子。



(a) 示意图



(b) 基本原理

图 1 冷源法噪声系数测试原理

Fig. 1 Graphical representation of cold-source method for noise figure

精确的冷源法测量须具备的条件之一是高精度的被测件增益,矢网通过双端口矢量误差修正可以提供所需的精度。将冷源法与矢网特性相结合,通过在矢网内配置阻抗调谐器和噪声接收机组成的噪声系数测试系统,能够修正不完美的源匹配带来的噪声参数误差和失配误差,其原理如下:

一个产品在任何反射参数下的噪声因子 F 都可以表述为 4 个变量 $F_{\min}$ 、 Γ_{opt} 、 R_n 、 Γ_s 的式子^[9],式(2)中, Γ_{opt} 为最佳复反射系数,是噪声因子测量的最佳阻抗; $F_{\min}$ 为最小噪声因子,发生在 Γ_{opt} ; R_n 为噪声电阻,是源阻抗改变时噪声电平的变化率,是一个标量; Γ_s 为源阻抗;系统阻抗 Z_0 一般为 50 Ω 。 Γ_{opt} 、 $F_{\min}$ 、 R_n 是噪声参数,是被测件的固有参数,式(2)表述了噪声因子和噪声参数的关系。式(2)也表明噪声因子是源阻抗的函数,测量到的噪声系数随系统源阻抗的变化而变化。这种效应既发生在被测件的输入端,也发生在测试仪器的输入端,如果不进行修正,噪声参数的影响会成为一个很大的误差源。

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

矢网冷源法的修正方法如下:位于矢网端口 1 的阻抗调谐器以 $50\ \Omega$ 附近为中心改变源阻抗,提供一组非 $50\ \Omega$ 的阻抗,它们的值是已知的,在每个频率点提供 4~7 种阻抗状态,在每种阻抗值测量来自被测件的噪声功率。在校准过程中测量得到 4~7 种阻抗状态的 Γ_s ,在对被测件测量过程中测量对应的噪声功率,得到 4~7 组对应的阻抗-噪声功率对,用来解出包括 4 个未知量(Γ_{opt} —幅度、 Γ_{opt} —相位、 F_{min} 、 R_n)的噪声参数方程组,再用解出来的噪声参数由式(2)计算 $50\ \Omega$ 处的噪声系数。在测试系统校准期间,在不同的源阻抗状态测量噪声接收机的噪声功率,用同样的方法得到噪声接收机的噪声参数。上述方法通过获得噪声参数进行源修正,很大程度上降低了噪声参数效应对噪声系数带来的影响;在系统校准过程中也获得了源端匹配 Γ_s 、噪声接收机负载匹配参数 Γ_r ,被测件测试过程中获得其输入输出端口的 S11 和 S22,据此对测试过程中的失配误差也进行了修正,这是本方法提高精度的主要途径。

图 2 所示为设计的基于矢网冷源法的低噪声放大器(DUT)噪声系数测试框图,其中矢网采用是德科技公司的 PNA-X,用一个电子校准件作阻抗调谐器,噪声接收机专门用于测量噪声功率,功率计通过 GPIB 接口与矢网连接,使用功率计和另外一个电子校准件(虚线方框内所示)对测量系统进行校准,计算机通过 LAN 接口采集矢网的测试数据用于实时分析测量不确定度,测试人员根据分析情况可进一步优化设置测试参数。

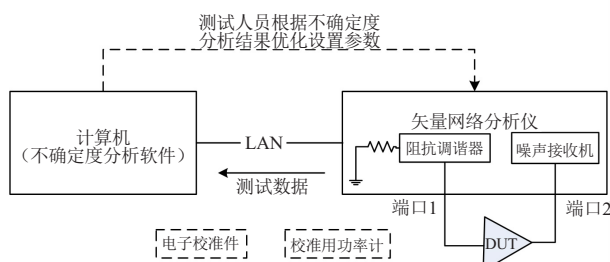


图 2 基于矢网冷源法的低噪声放大器噪声系数测试框图

Fig. 2 Test block diagram of LNA noise figure based on VNAs-cold source method

1.1 测试系统的校准

测试前测试系统的校准也是保证测量精度的一个关键环节,采用的矢量噪声校准方法包括以下 3 步:

1) 进行源功率标定。将功率计连接至矢网端口 1 进行源功率校准,校准电平优选 $0\ \text{dBm}$,通过带向导的修正匹配误差的功率校准,使矢网噪声接收机与功率计的频率响应有相同的准确度。

2) 噪声接收机增益和噪声系数标定。用直通件连接矢网端口 1 和端口 2,矢网先测试出噪声接收机增益,再测出阻抗调谐器在 4~7 个阻抗状态的噪声输出功率、阻抗调谐器源匹配 Γ_s 和噪声接收机负载匹配 Γ_r 。

3) 进行标准 S 参数双端口校准。在矢网端口 1 和端口 2 之间连接校准件,测出阻抗调谐器在 4~7 个阻抗状态下,不同源匹配时所对应的系统误差,然后作修正。校准件可以为电子校准件或机械校准件,本文优选精度更高的电子校准件 N4291B,其产生的 S21 不确定度为 $0.057\ \text{dB}$,而常见机械校准件 85052D 的不确定度达 $0.166\ \text{dB}$ ^[9]。

通过校准得到了噪声接收机的噪声参数,校准步骤 1 也可选用噪声源方法,本文校准优选功率计法,校准精度优于噪声源^[11]校准法。阻抗状态最少为 4 个,选用的阻抗状态越多,测量精度越高。

1.2 测试中控制误差措施

实际测试过程中,还需要控制多项重要的误差源,减少各个环节的误差,给出如下 5 项具体措施:

1) 根据低噪声放大器特点优化矢网激励参数,提高 S 参数校准精度,降低 S21 不确定度。低噪声放大器在增益测试时输入电平通常较低,如果按常规在校准和测试时输入端口都选择低电平难以达到高的测量精度,可通过手动选择源端衰减器,在校准和测量时保持该衰减器不变,校准时提高电平,测试时再降低电平^[14]。输出端电平设置时先去耦合(矢网默认两个端口电平为耦合方式),再独立设置输出端口为高电平,其原因是低噪声放大器通常有很高的反向隔离度,反向测量时到达测量接收机的电平很低会影响 S 参数的测量精度,另外被测件输出端口的 S22 用于噪声修正,因此该端口功率必须足够高,才能保证反射测量具有良好的信噪比;

2) 避免噪声接收机压缩引起噪声系数测量误差。噪声接收机增益有高、中、低三档,测试时依据被测件增益与噪声系数之和进行选择,需避免噪声接收机工作于压缩状态,在考虑压缩时须同时考虑被测件的增益和带宽,因为随着增益和带宽的增加,被测件输出的噪声功率在增大,当噪声接收机压缩

时,会导致噪声系数测试结果偏小,压缩不确定度增大,严重时甚至会损坏噪声接收机。如果仪器提示接收机压缩,这时需降低接收机增益再进行测试,不需重新校准。噪声接收机处于轻微压缩状态时仪器没有提示信息,本文提出的测试过程中采用“实时不确定度分析”方法是判断噪声接收机是否压缩的有效方法,有效降低压缩不确定度;

3) 在噪声功率测量中适当增加噪声接收机测量带宽用以降低测量中的抖动,但是接收机测量带宽应小于被测件带宽。由于噪声接收机测量的是随机噪声,各次采样的测量结果之间必然会有抖动。噪声抖动的大小与采样次数的平方根成反比,而单位时间的采样次数与带宽成正比,因此较宽的带宽可以在相同的时间内提供更多的采样数,从而在相同测量时间内降低了抖动;

4) 在校准过程和测试过程均选择噪声平均 (Noise Averaging) 以减小抖动。如果在校准过程中没有使用噪声平均,即使之后测试中使用噪声平均,校准过程中出现的噪声也无法从后续测量中去除。在校准和测试过程中推荐使用 10 ~ 20 次平均,增加

平均次数会增加测量时间,平均次数选取应在测量精度得到保证时,测试时间是可接受的;

5) 降低环境温度对测量的影响。记录测试系统所处的环境温度用于计算输入噪声功率的修正值,在校准向导的输入框设置该环境温度,该值应该代表从校准端面之前矢网的所有组件的平均温度。

2 实验验证及测量不确定度分析

以一台工作频段在 14 GHz ~ 14.5 GHz 的 Ku 频段低噪声放大器为例,用矢网冷源法和 Y 因子法进行了实际的性能指标测量,测试情况详见 2.1 节和 2.2 节。

2.1 矢网冷源法测量结果

用 PNA-X 矢网对 Ku 频段低噪声放大器的噪声系数进行测量,按照 1.2 节的原则设置矢网的端口电平、衰减器等参数,详见表 1,噪声接收机选择中档增益。采用功率计和电子校准件在校准程序引导下校准,然后按图 2 连接被测件测试,测试结果见表 1,其测量不确定度分析结果见表 2,对于正态分布,扩展不确定度的置信区间约为 95%^[15]。

表 1 测试参数设置及测试结果

Tab. 1 Test parameters and test results

仪器校准设置	Port1 电平	Port1 源衰减器	Port2 电平	Port2 源衰减器	噪声测量带宽	中频带宽	平均次数
	- 20 dBm	20 dB	- 20 dBm	0 dB	4 MHz	1 kHz	10
测试设置	-50 dBm	20 dB	- 20 dBm	0 dB	4 MHz	1 kHz	10
测试结果	14.25 GHz; 增益 G=45.60 dB, NF=1.78 dB(10 次测量均值,其标准偏差 0.013 dB)						
测试仪器	矢网; N5247A	功率计; N1914A	功率探头; N8487A				

表 2 矢网冷源法测试噪声系数测量不确定度分析

Tab. 2 The Uncertainty Analysis of the Noise Figure Measured by the VNAs Cold Source Method

序号	不确定度来源	标准不确定 度分量 (dB)	合成不确定度 (dB) u_c (dB)	扩展不确定 度 U (dB) ,k=2
1	S21 不确定度(u_1)	0.063	0.082	0.17
2	功率计不确定度(u_2)	0.043		
3	测量抖动不确定度(u_3)	0.025		
4	校准抖动不确定度(u_4)	0.001		
5	压缩不确定度(u_5)	0.005		
6	漂移不确定度(u_6)	0.009		
7	测量重复性(u_7)	0.013		
说明	$u_c=\sqrt{\sum_{i=1}^7u_i^2}=\sqrt{0.063^2+0.043^2+0.025^2+0.001+0.005+0.009^2+0.013^2}=0.082$ 扩展不确定度 $U=2 * u_c=2 * 0.082=0.17$			

测试过程中,在首次测试完成后的不确定度分析结果中观察到压缩不确定度最大为 0.06 dB,应用第 1.2 节第 2 项技术措施,改选低增益档测试,接收机压缩不确定度降至 0.005 dB,中心频率处噪声系数示值由 1.65 dB 变为 1.79 dB。

2.2 Y 因子法测量结果

噪声系数分析仪测量原理是 Y 因子法,用 N8975A 噪声系数分析仪对被测件进行测试,测试连接见图 3,噪声测量带宽 4 MHz。首先用 N4000A 噪声源连接至噪声系数分析仪输入端进行校准,然后接入被测件测量。表 3 显示了使用 Y 因子法测试被测件的噪声系数、增益的测试结果,其测量不确定度分析见表 4。

如表 5 所示,在 14.25 GHz 使用矢网冷源法测量的不确定度为 0.17 dB,Y 因子法测量的不确定度为 0.38 dB。由此可见矢网冷源法的测量不确定度优于 Y 因子法。

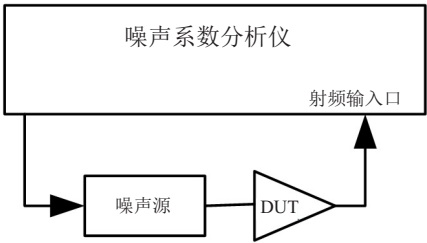


图 3 基于 Y 因子法的低噪声放大器噪声系数测试框图

Fig. 3 Test block diagram of LNA noise figure based on Y factor method

表 3 Y 因子法测试参数设置及测试结果

Tab.3 Test parameters and test results of the Y-factor method

仪器校准设置	噪声测量带宽:4 MHz	
测试结果	14.25 GHz;增益 G=45.66 dB, NF=2.02 dB (10 次测量均值,其标准偏差 0.031 dB)	
测试仪器	噪声系数测试仪:N8975A	噪声源:N4000A

表 4 Y 因子法测试噪声系数测量不确定度分析

Tab.4 The Uncertainty Analysis of the Noise Figure Measured by the Y-factor method

序号	不确定度来源	标准不确定度分量 (dB)	合成不确定度 u_c (dB)	扩展不确定度 U (dB), $k=2$
1	ENR 不确定度 (u_1)	0.165	0.186	0.38
2	NF12 不确定度 (u_2)	0.062		
3	NF2 不确定度 (u_3)	0.049		
4	G1 不确定度 (u_4)	0.001		
5	测量重复性 (u_5)	0.031		
$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u_i^2} = \sqrt{0.165^2 + 0.062^2 + 0.049^2 + 0.001^2 + 0.031^2} = 0.186$				
说明 扩展不确定度 $U = 2 * u_c = 2 * 0.186 = 0.38$				
噪声源的 ENR 不确定度所用数据为 0.33 dB,来源于计量数据。				

表 5 矢网冷源法的测试结果与 Y 因子法测试结果对比

Tab.5 Comparison of test results based on VNAs cold source method and Y factor method

测试方法	矢网冷源法	Y 因子法
噪声系数 (dB)	1.78±0.17	2.02±0.38

3 结论

本文提出采用冷源法噪声系数测试和矢量网络分析仪相结合并在过程中采用矢量噪声校准与计算

机实时在线分析测量不确定度等措施测试低噪声放大器噪声系数的方法,可消除失配和噪声参数误差,这些误差也存在于 Y 因子测试方法中,通过实验结果比对,表明矢网冷源法是提高低噪声放大器噪声系数测量精度的有效途径。高精度的噪声系数测量结果有助于更精确验证电路模型,优化系统配置,提高系统工作能力,目前业界已有高达 50 GHz 的噪声接收机选件可配置到矢网中,可用于如 Ka^[16]、Q 等更高频段低噪声放大器采用矢网冷源法测试噪声系数,并可进一步推广到行波管放大器的噪声系数测试。

参考文献:

- [1] 宋志强,孙逸帆. 精确设计的星用 L 波段低噪声放大器[J]. 空间电子技术,2003(01):1-3+13.
- [2] MARAL G,BOUSQUET M ,ECOLE, et al. SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEMS-Systems Techniques and Technology (Sixth Edition) [M]. USA: John Wiley & Sons Ltd,2020:497-498.
- [3] 刘峰,邵晖,李远朝,等. 射频电路噪声系数的测量方法研究[J]. 国外电子测量技术,2014,33(12):4-8.
- [4] 郭海帆,陈建华,陈鑫友,等. 基于矢量网络分析仪功率测量的噪声系数测量方法[J]. 中国测试,2014,40(6):35-38.
- [5] 黄成,浦璞,文忠锋. 噪声系数测试方法研究[J]. 微电子学,2013,43(6):867-870.
- [6] 郑利颖. 温度对噪声系数测量的影响及修正[J]. 电子世界,2019(16):43-44.
- [7] 李家怡,匡环,孟春蕾. 噪声系数的测量方法研究[J]. 电子质量,2019(02):13-16.
- [8] 陈广聪,郑大勇. 低噪声放大器 LNA 噪声系数测试技术研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2013,31(S1):238-241.
- [9] JOEL P. DUNSMORE. 微波器件测量手册[M]. 陈新等译. 北京:电子工业出版社,2014:310-324.
- [10] Keysight Technologies Application Notes. Fundamentals of RF and Microwave Noise Figure Measurements[EB/OL], [2017-09-06]. <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06808/application-notes/5952-8255.pdf>,2017.
- [11] Keysight Technologies Application Notes. High-Accuracy Noise Figure Measurements Using the PNA-X Series Network Analyzerhttps[EB/OL], [2020-05-18]. <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-02539/application-notes/5990-5800.pdf>.
- [12] Keysight Technologies. User Manual & Online Help on PNA-X, [EB/OL], [2019-09-25], 2019. <http://na.support.keysight.com/pna/help/pnahelp.pdf>.
- [13] Keysight Agilent Technologies Application Notes. 10 Hints for Making Successful Noise Figure Measurements Optimize Your Measurements and Minimize the Uncertainties[EB/OL], [2019-09-25]. <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06795/application-notes/5980-0288.pdf>.
- [14] 孙现福,王国彬. 基于网络分析仪提高低噪声放大器的测量精度[J]. 电信网技术,2007(09):63-66.
- [15] 刘春浩. 测量不确定度评定方法与实践[M] 北京:电子工业出版社,2019:76-91.
- [16] 黄艳,邓向科,徐辉,马海虹. Ka 频段 MMIC 低噪声放大器的研制[J]. 空间电子技术,2017,14(02):38-42.