 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i5.10526

Design of A Noise Generator Calibration System

Liying Zheng Benlin Zhang Sen Liu Qing'e Song

Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266555, China

Abstract

This paper introduces the calibration test method of noise generator in Y-factor method firstly, then designs an automatic calibration system of noise generator, and finally gives the test process and measurement results of the automatic calibration system. The automatic calibration system adopts domestic equipment, which is easier to build and more efficient.

Keywords

noise generator; automatic calibration system; domestic equipment

噪声发生器校准系统设计

郑利颖 张本林 刘森 宋青娥

中电科思仪科技股份有限公司，中国·山东 青岛 266555

摘要

针对噪声系数高精度测量与噪声源精确标定的需求，本文详细介绍了Y因子法噪声发生器的校准测试方法，设计了一款以国产3986噪声系数分析仪、3672矢量网络分析仪为核心的噪声发生器自动校准系统，详细阐述了系统的软硬件组成与模块化设计方案。给出系统完整测试流程并优化出高效批量校准流程，大幅减少设备连接次数。实测显示该系统噪声系数测量不确定度小于0.1dB，指标对标国外同类产品，可节约成本与人力、提升测量精度和生产效率，基于该系统标定的噪声源产品已市场化，并取得了良好经济效益。

关键词

噪声发生器；自动校准系统；国产设备

1 引言

噪声发生器是一种可产生连续广谱白噪声的器件，其核心为噪声管[1]。噪声发生器为被测器件（DUT）的噪声系数（NF）测量提供准确、稳定的白噪声激励，可分为普通噪声发生器和智能噪声发生器两类。标准噪声发生器采用国际上通用BNC阴头驱动接口和+28V脉冲驱动电压，和噪声系数测试仪器组建测试系统时，超噪比（ENR）数据可手动输入或按ENR文件格式存储于噪声系数测试仪器中，使用时直接调用。标准噪声发生器使用通用驱动接口，兼容性强，主流噪声系数测试仪器均支持。智能噪声发生器采用专用驱动通信接口与智能总线接口技术，可实现噪声发生器ENR的智能加载与环境温度实时检测，提升噪声系数测量精度和智能化程度。

不同型号噪声发生器的频段范围存在差异，且每台噪声发生器都有唯一表征其性能的ENR值。因此，噪声发生器ENR的精准校准对保障测试结果准确性具有决定性作用。在噪声发生器的生产与研发过程中，为精准校准其ENR，需进行大量重复测试与数据处理工作，人工操作模式存在明显局限性。

本文设计的基于噪声系数分析仪的噪声发生器校准系统，通过对国产仪器程控、测试项重组配置、测试数据记录、校准算法实现及测试结果保存，实现了国产系列噪声发生器的校准标定，噪声系数测量不确定度对标国外同类产品，可节约成本与人力，提升测量精度和生产效率。

2 校准测试方法——Y因子法

Y因子法引入了噪声发生器的使用，噪声发生器有一个标准的超噪比（ENR）。

【基金项目】国家重点研发计划（项目编号：2023YFF0718202）；山东重点研发计划（项目编号：2024CXPT007）项目资助。

【作者简介】郑利颖（1972–），女，中国安徽淮北人，本科，高级工程师，从事网络参数测试技术及测量仪器研究。

$$ENR = \frac{T_h - T_c}{T_0}$$

式中，T_h和T_c为噪声发生器热态（开状态）和冷态（关状态）的等效输出噪声温度，T_0为标准噪声温度，T_0=290K。

根据Y因子定义知：

$$Y = \frac{N_h}{N_c} = \frac{T_e + T_h}{T_e + T_c}$$

其中，N_h为噪声源开态时的噪声输出功率；N_c为噪声源关态时的噪声输出功率；T_e为等效输入噪声温度。

噪声系数定义表示为网络输入端信噪比与输出端信噪比的比值：

$$F = \frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S_o}{N_o}} = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

联立公式(1)、公式(2)和公式(3)，可得出噪声系数F的计算公式为：

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0} = \frac{ENR}{Y-1}\left(1 - \frac{(Y-1)(T_c - T_0)}{T_h - T_c}\right)$$

当 $T_c = T_0$时，公式（4）简化为：

$$F = \frac{ENR}{Y-1}$$

对数形式如公式（6）所示，Y表示为线性值。

$$F(dB) = ENR(dB) - 10\log(Y-1)$$

当参考噪声发生器接入3986噪声系数分析仪时，可获得其噪声系数ENR、和Y因子，分别记为$ENR_{参考}$和$Y_{参考}$。更换为被测噪声发生器，可在3986噪声系数分析仪上获得$Y_{待测}$，基于同频点噪声系数测量相等的标准传递依据，由公式（6）可得待测噪声发生器的超噪比为：

$$ENR(dB)_{待测} = ENR(dB)_{参考} - 10\log(Y_{参考} - 1) + 10\log(Y_{待测} - 1)$$

3 自动校准系统设计

3.1 自动校准系统硬件组成

目前噪声发生器的校准硬件主要由进口设备构成：接收机采用安捷伦（Agilent）N8975A/B，并搭配可编程衰减器11713B；驻波比测量多采用安捷伦或罗德与施瓦茨（R&S）的矢量网络分析仪（VNA）；参考噪声发生器则采用安捷伦346C/N4002A[3]等型号。当前国产噪声系数分析仪与进口产品的性能差距已大幅缩小。

但将噪声发生器返厂校准不仅耗时久，还会产生高额费用，同时会造成噪声发生器停产、产能下降等损失[4]。为此，本文设计了噪声发生器自动校准系统，硬件平台采用国产3986型噪声系数分析仪与3672型矢量网络分析仪，参考噪声发生器仍采用安捷伦346C、346CK01与N4002A。系统连接如图1所示。

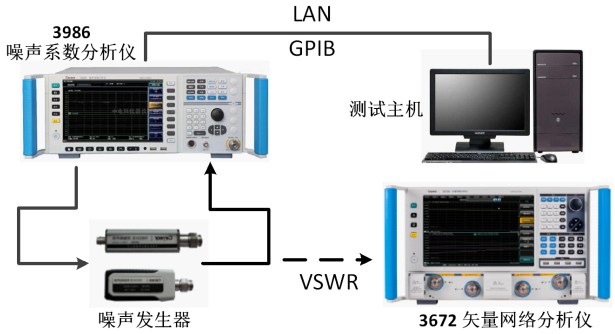


图1 噪声发生器自动校准系统

噪声发生器自动校准系统还由测试主机、网络电缆、通用接口总线（GPIB）卡、普通噪声发生器、BNC电缆、智能噪声发生器、多芯电缆等组成。3986型噪声系数分析仪用于测量ENR，3672型矢量网络分析仪用于测量电压驻波比（VSWR）。

3.2 自动校准系统软件设计

噪声发生器自动校准系统软件基于Visual Studio 2010、采用C++语言开发，运行于Windows 7系统测试主机，可通过网络电缆或GPIB卡程控噪声系数分析仪[5]，实现噪声发生器的自动校准与测量。

为提升软件易用性与测试效率，系统采用模块化设计理念，划分为四大功能模块：系统配置模块、测试对象模块、测试结果模块与文件保存模块，各模块进一步细分为更小的子模块，结构如图2所示。

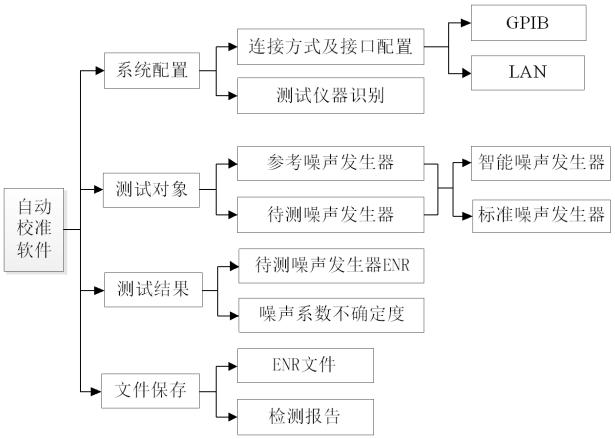


图2 噪声发生器自动校准系统软件模块

测试对象模块分为参考噪声发生器和待测噪声发生器。参考噪声发生器和待测噪声发生器都有智能和普通类型。智能噪声发生器ENR自动加载，标准噪声发生器ENR手动加载。

参考噪声发生器要求是一个精度很高的噪声发生器，待测噪声发生器在定标前可以为无ENR值的新品或需要重新计量的噪声源，常用型号如表1所示，待测噪声发生器型号如表2所示。参考噪声源作为一个标准，通过其ENR和测量的Y因子来计算待测噪声源ENR值，从而实现噪声源超噪比的传递。定标时，根据被测噪声发生器的频率范围，选

择合适的参考噪声发生器。当待测噪声发生器频率范围不超过26.5GHz时，用346C或N4002A作为参考噪声发生器；当待测噪声发生器频率范围超过26.5GHz时，参考噪声发生器选择N4002A（或346C）和346CK01作为标准，由于346CK01起始频率为1GHz，待测噪声发生器起始频率为10MHz，所以346CK01测量26.5GHz以上的频段，不能测量10MHz的频段。

表1 参考噪声发生器

类型	型号	范围
标准噪声源	346C	10MHz ~ 26.5GHz
标准噪声源	346CK01	1GHz ~ 50GHz
智能噪声源	N4002A	10MHz ~ 26.5GHz

表2 被测噪声发生器

类型	型号	范围
标准噪声源	C1	10MHz ~ 18.0GHz
	C2	10MHz ~ 26.5GHz
	C3	10MHz ~ 40.0GHz
	C4	10MHz ~ 50.0GHz
智能噪声源	I1	10MHz ~ 18.0GHz
	I2	10MHz ~ 26.5GHz
	I3	10MHz ~ 40.0GHz
	I4	10MHz ~ 50.0GHz

测试结果模块包括待测噪声发生器的ENR和噪声系数不确定度。待测噪声发生器的ENR为测试结果，分为标准噪声发生器ENR和智能噪声发生器ENR。噪声系数不确定度为参考噪声发生器的噪声系数和待测噪声发生器的噪声系数之差，是衡量ENR定标准确性的指标，噪声系数不确定度越接近0说明待测噪声发生器ENR越准确。

文件保存模块包括ENR文件和检测报告。ENR文件又分为普通噪、智能两种文件格式，前者拷贝到噪声系数分析仪中加载，后者写入智能噪声发生器。测试帮助说明是在测试过程中提示的连接示意图和说明文字，可辅助测试人员正确完成测试。

4 系统测试流程与测量结果

4.1 测试流程

完整测试流程如图3所示。

运行噪声发生器自动定标软件后，首先进入系统设置页面，进行定标软件与3986噪声系数分析仪的连接，有GPIB和网络两种连接方式，选择一种连接方式进行配置。

连接成功后，选择参考噪声发生器和待测噪声发生器的类型，有智能和标准两种。然后，根据示意图将参考噪声发生器连接到噪声系数分析仪并加载其ENR，查看仪器状态是否正常。选择待测噪声发生器型号，然后输入其编

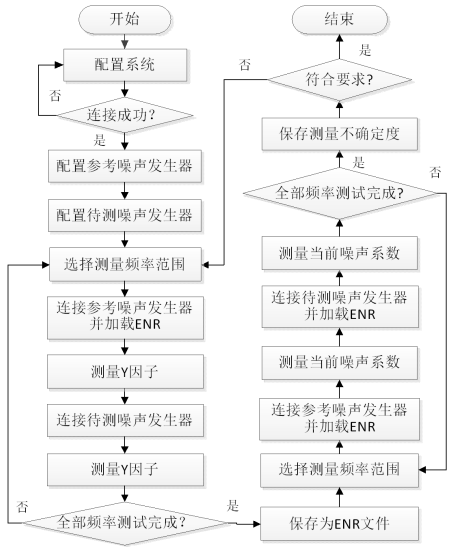


图3 自动校准系统测试流程

号。下一步，进行Y因子法定标测试，根据当前频率范围选择待测频率范围，测量参考噪声发生器的Y因子，同时噪声系数分析仪自动读取了其ENR。下一步，更换为待测噪声发生器再测量Y因子。如果待测噪声发生器的频率范围已全部覆盖，则保存ENR文件；否则，再更换另一参考噪声发

生器进行另一频段的测试，即可得到待测噪声发生器在该频段的Y因子，测试完成后，保存全部频率的ENR文件。

ENR文件和ENR交检文件保存后，进行噪声系数不确定度的测试。首先连接参考噪声发生器并加载其ENR，选择合适频率范围后测量噪声系数。下一步，连接待测噪声发生器，加载刚刚获取的ENR到噪声系数分析仪中，测量噪声系数。如果待测噪声发生器的频率范围已经全部覆盖，则保存为噪声系数不确定度交检文件；否则，再更换另一参考噪声发生器进行另一频段的测试，重复测试，这样就获取了整个频段的噪声系数不确定度，然后保存。根据噪声系数不确定的大小可判断ENR定标的准确性，若噪声系数不确定度大于要求，需重新进行ENR测量。

4.2 测试结果及注意事项

3986噪声系数分析仪开机后预热半小时以上，以保证仪器的性能的稳定，然后通过自动定标软件和仪器连接。选择高精度、高准确度的噪声发生器作为参考噪声发生器，选择高精度的转接器来连接3986噪声系数分析仪和噪声发生器，可减少系统配置带来的影响、提高测量的准确度。

使用自动定标软件时，用户应严格按照测试流程进行操作。在测试执行时，可随时终止测试线程，每次测试完成后，当前测得的Y因子、ENR或噪声系数会以列表形式在对话框中显示，用户可判断结果是否符合要求，决定进行下一步操作还是重新测量。

参照图2流程图，用户可对任意一个噪声发生器完成定标和噪声系数不确定度的测试。

对于频段为10MHz~18GHz或10MHz~26.5GHz的待测噪声发生器，可用10MHz~26.5GHz的参考噪声发生器。由于参考噪声发生器频段全覆盖待测噪声发生器，定标和噪声系数不确定度的测试时一共连接参考噪声发生器2次、待测噪声发生器2次。对于频段为10MHz~40GHz或10MHz~50GHz的待测噪声发生器，需要一个10MHz~26.5GHz的参考噪声发生器和一个1GHz~50GHz的参考噪声发生器，所以定标和噪声系数不确定度的测试时一共连接参考噪声发生器4次、待测噪声发生器4次。定标一个噪声发生器连接次数统计如表3。

表3 校准一个噪声发生器连接次数统计

频率范围	噪声发生器连接次数		
	参考	待测	合计
10MHz ~ 18.0GHz	2	2	4
10MHz ~ 26.5GHz	2	2	4
10MHz ~ 40.0GHz	4	4	8
10MHz ~ 50.0GHz	4	4	8

实际测试中往往需要批量对噪声发生器进行校准，若逐台校准并测试噪声系数不确定度，工作量极大。例如校准20个10MHz~26.5GHz噪声发生器，需连接80次；校准20个10MHz~40GHz噪声发生器，需连接160次。为减少连接次数，建议采用参考噪声发生器连接一次测试后，对多个待测噪声发生器进行连接测试的高效率定标流程，如图4所示。

采用该流程后，校准20台10MHz~26.5GHz噪声发生器仅需连接42次，校准20台10MHz~40GHz噪声发生器仅需连接84次，工作量减少近一半。由于被测ENR与噪声系数不确定度需分别存储，10 MHz~40GHz或10MHz~50GHz频段需合并数据，但总体更显著提升测量效率。

10MHz~50GHz频段被测噪声发生器实测结果见表4，噪声系数测量不确定度均小于0.1，结果满足要求。

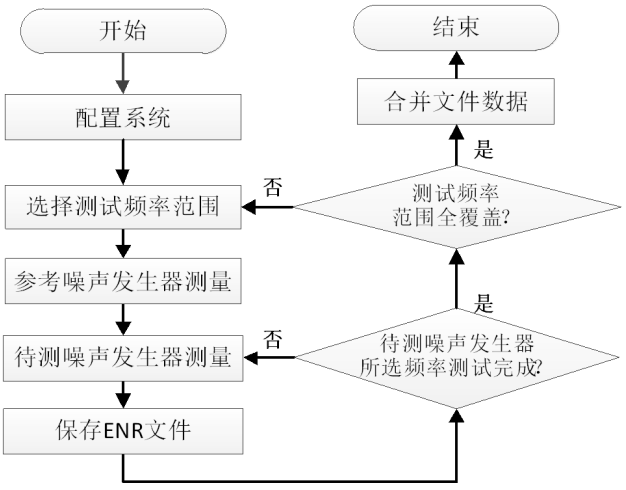


图4 高效自动校准流程

表4 被测噪声发生器测量结果

频率（GHz）	校准ENR（dB）	NF测量不确定度（dB）	频率（GHz）	校准ENR（dB）	NF测量不确定度（dB）
0.01	14.43	0.02	26	14.24	-0.02
0.1	15.08	0.03	26.5	14.34	0.03
1	15.03	-0.03	27	14.01	0.02
2	14.91	-0.02	28	14.35	-0.01
3	14.73	-0.01	29	14.57	0.01
4	14.78	0.02	30	14.17	0.02
5	14.57	0.02	31	14.62	0.02
6	14.39	0.03	32	14.47	0.02
7	14.49	0.01	33	14.72	0.03
8	14.38	-0.02	34	14.57	0.03
9	14.49	0.01	35	14.68	-0.02
10	14.45	-0.02	36	14.84	0.03
11	14.48	0.01	37	14.83	0.02
12	14.26	0.00	38	14.34	0.01
13	14.48	-0.03	39	13.92	-0.01
14	14.04	-0.02	40	13.66	0.02
15	14.10	0.02	41	14.03	0.02
16	13.82	0.01	42	14.27	0.03
17	13.89	0.00	43	14.23	0.02
18	13.98	0.02	44	13.73	0.03
19	13.82	0.02	45	13.10	0.03
20	13.89	0.01	46	13.26	-0.02
21	13.56	-0.01	47	13.03	-0.03
22	13.75	0.02	48	12.86	0.02
23	13.98	0.01	49	12.63	0.04
24	14.15	-0.01	50	12.02	0.02
25	14.14	-0.03			

5 结论

本文中3986型噪声系数分析仪与被测噪声发生器均采用中电科思仪科技股份有限公司的产品，使用该校准系统进行标定的噪声源产品已投入市场实现噪声系数测量，产生了良好的经济效益，获得用户广泛认可。噪声发生器校准系统可帮助测试人员完成校准与送检工作，有效节约成本与人力，提升生产效率。

参考文献

[1] 许建华. 现代通信测试仪器[M]. 北京: 军事科学出版社, 1995.
[2] 董建涛. Y因子法及噪声系数不确定度分析[J]. 国外电子测量技术, 2009(3):28-30.
[3] Agilent Technologies. Application Note 57-1: RF与微波噪声系数测量基础[Z]. 2000.
[4] 宋青娥, 董建涛. 微波噪声源测量方法与不确定度分析[J]. 国外电子测量技术, 2008(5):59-61
[5] 中电科思仪科技股份有限公司.3986系列噪声系数分析仪编程手册,2017.12:A.2