

# 不同信噪比下噪声系数的测试方法研究

袁 帅 赵 云

贵州航天计量测试技术研究所 贵州 贵阳 550000

**【摘要】**：噪声系数是衡量电子设备噪声抑制能力的核心指标，其测试精度直接决定系统性能评估的可靠性。针对不同信噪比（SNR）环境下噪声系数测试方法适用性差异显著的问题，本文重点研究 Y 因子法与冷源法两种主流测试技术，系统分析其原理特性、设备要求等。通过搭建实验平台，在高、中、低三种信噪比场景下开展对比实测，深入探讨两种方法的测试区别与适用边界。本文研究成果为不同信噪比场景下噪声系数精准测试提供了方法参考与实践依据。

**【关键词】**：信噪比；噪声系数；Y 因子法；冷源法；测试对比

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.052

## 1 引言

### 1.1 研究背景

在无线通信、雷达探测、卫星导航等电子系统中，噪声是制约信号传输质量与接收灵敏度的关键因素<sup>[1]</sup>。噪声系数（Noise Figure, NF）作为表征系统自身噪声对信号恶化程度的核心参数，定义为输入信噪比与输出信噪比的比值，其数值越小，表明系统噪声抑制能力越强，弱信号接收性能越优<sup>[2]</sup>。例如，在 5G 基站接收机中，低噪声系数可有效提升边缘用户信号覆盖；在深空探测雷达系统中，噪声系数直接影响远距离目标的探测精度<sup>[3]</sup>。

随着电子设备应用场景的多元化，信噪比环境呈现显著差异：实验室理想环境下信噪比通常高于 40dB（高信噪比），户外常规通信场景信噪比为 10-20dB（中信噪比），而强干扰或偏远地区信噪比可能低于 10dB（低信噪比）<sup>[4]</sup>。不同信噪比下，信号与噪声的耦合特性、噪声分布规律存在本质区别，导致传统测试方法的适用性与精度大幅波动。Y 因子法作为高精度测试的主流技术，在低信噪比下易受噪声功率干扰；冷源法虽设备简单，但其增益测量误差对测试结果的影响随信噪比变化呈现不同规律<sup>[5]</sup>。因此，系统研究两种方法在不同信噪比下的测试区别，明确其适用场景，对提升复杂环境下电子设备性能评估准确性具有重要现实意义。

### 1.2 研究内容

国内外学者针对噪声系数测试方法开展了大量研究。提出冷源法增益测量误差补偿方案，提升了测试精度，但对两种方法的系统性对比研究仍显不足。本文核心研究内容：（1）梳理噪声系数基本定义，系统分析 Y 因子法与冷源法的测试原理、设备要求等；（2）深入探讨两种方法在高、中、低信噪

比下的测试区别，包括精度特性、抗干扰能力、适用条件；（3）搭建实验平台，设计多信噪比场景测试方案，开展实测验证；（4）总结两种方法的适用边界，提出针对性优化建议。

## 2 噪声系数测试方法原理

### 2.1 噪声系数基本定义

假设是测试系统的阻抗为 50 欧姆，噪声因子为输入端的信噪比和输出端信噪比的比值；噪声因子的对数表述就是噪声系数。具体定义如下。

$$F = \frac{(S_i/N_i)}{(S_o/N_o)} = \frac{(N_o)}{(G \times N_i)} \quad (\text{噪声因子})$$

$$NF = 10 \times \log(F) \quad (\text{噪声系数})$$

由于系统会产生加信噪声，输出信噪比会低于输入信噪比，所以噪声因子是一个大于 1 的数，噪声系数是大于 0dB 的。噪声系数有个假设，就是测量时的系统阻抗是 50 欧姆，具有同温度的导体产生的热噪声功率  $P_n = kTB$ ，K 是波尔茨曼常数，T 是导体的绝对温度，B 是带宽。

### 2.2 主流测试方法原理

#### 2.2.1 Y 因子法

Y 因子法是目前应用最广泛的噪声系数测试方法，其核心原理是利用已知噪声温度的两个噪声源（通常为冷源和热源），分别接入待测系统，测量对应的输出噪声功率，通过计算 Y 因子（两个输出噪声功率的比值）求解噪声系数。具体方法是使用一个经过工厂校准的有标称超噪比的噪声源，噪声源内部有一个可以打开或关闭的二极管，并且输出端有一个衰减器用来提供更好的匹配。

在噪声源关闭即不加电的时候，噪声源给被测件提供了一个室温下的阻抗端接，这叫做冷态。在二极管加电打开时，噪声源工作在热态。雪崩效应会产生大量的超噪声，也就是相对于冷态的额外噪声。这个超噪声的量，通常用超噪比 ENR 来表示。根据被测件的噪声系数不同，可以选择不同 ENR 的噪声源。噪声源的 ENR，通常在 5dB 或 15dB 左右。原理见下图。

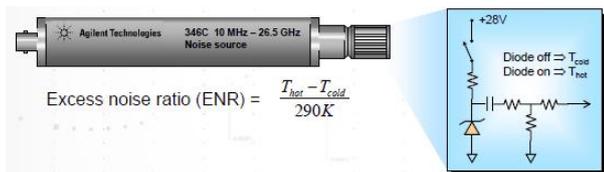


图1 噪声源 ENR 原理图

Y 因子法的优点是测试速度快、操作简便，适用于增益稳定、线性度良好的系统，在高信噪比环境下测试精度高。但其缺点是对噪声源的稳定性要求较高，且在低信噪比环境下，由于输出噪声功率中信号功率占比过低，Y 因子计算误差增大，导致噪声系数测试结果失真。

### 2.2.2 冷源法

通常是矢量网络分析仪（比如 PNA-X）使用的方法。使用冷态下（室温）阻抗端接以及独立的增益测量。通过在冷态下测量被测件的输出噪声功率，再通过用矢网测量的被测件的增益，求解噪声系数的方法。冷源法是矢网可以在测量噪声系数的同时，测量器件的其他特性参数，比如 S 参数，增益压缩，三阶交调，频谱杂散等。

冷源法的优点是测试系统简单，对噪声源的要求仅为稳定的冷源，在中低信噪比环境下抗干扰性较强。其缺点是需要准确测量系统增益，增益测量误差会直接影响噪声系数测试精度，且在高增益系统中，增益测量的微小误差可能导致噪声系数测试误差显著增大

### 2.3 不同测试方法的核心区别

两种主流测试方法的核心区别主要体现在测试原理、设备要求、适用场景及误差来源四个方面，具体对比见下表。

表 1 Y 因子法与冷源法对比

对比维度	Y 因子法	冷源法
测试原理	利用双噪声源（冷源+热源）的输出噪声功率比值	利用单冷源噪声功率与系统增益
设备要求	冷源、热源（已知噪声温度）、频谱分析仪	矢量网络分析仪、或冷源、信号源、功率计（测增益）、频谱分析仪
适用场景	高信噪比、增益稳定、线性度好的系统	中低信噪比、对设备复杂度要求低的场景

主要误差来源	噪声源温度稳定性、Y 因子计算误差	系统增益测量误差、冷源噪声温度误差
--------	-------------------	-------------------

由上表可知，Y 因子法依赖双噪声源的稳定性，在高信噪比环境下能充分发挥其快速、高精度的优势；冷源法无需热源，设备简单，且增益测量误差在中低信噪比环境下的影响相对较小，抗干扰性更强；增益法无需专用噪声源，但信号与噪声功率的分离难度较大，在低信噪比环境下误差显著增大。这些差异为不同信噪比下测试方法的选择提供了理论依据。

## 3 不同信噪比下的实测研究

### 3.1 实验平台搭建

为开展不同信噪比下噪声系数的实测研究，搭建了如下图所示的实验平台，主要设备包括：信号发生器（频率范围 100kHz-4GHz，输出功率范围-136dBm 至+13dBm）、噪声源（噪声温度范围 290K-1000K，频率范围 10MHz-26.5GHz）、频谱分析仪（，频率范围 9kHz-30GHz，动态范围>120dB）、待测低噪声放大器（频率范围 10kHz-500MHz，增益 20dB，噪声系数典型值 1.5dB）、衰减器（0-60dB 可调）、功率计（频率范围 10MHz-40GHz，功率范围-70dBm 至+44dBm）及连接线、负载等辅助设备。

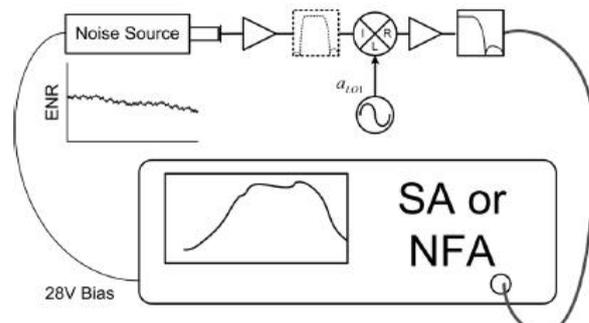


图2 噪声系数测试接线示意图

实验平台的工作原理：信号发生器产生特定频率和功率的测试信号，通过衰减器调节信号功率，进而控制输入到待测放大器的信噪比；噪声源提供冷源（290K）和热源（800K）信号，用于 Y 因子法和冷源法测试；频谱分析仪用于测量输出噪声功率和信号功率；功率计用于测量系统增益；待测放大器作为测试对象，其噪声系数为核心测试参数。

根据实际应用场景，将信噪比分为高、中、低三个区间：

高信噪比（SNR ≥ 30dB）：模拟实验室理想环境，无明显外部干扰；

中低信噪比（10dB < SNR < 30dB）：模拟一般户外通信环境，存在轻微电磁干扰；

低信噪比（SNR ≤ 10dB）：模拟偏远地区或强干扰环境，外部干扰显著。

通过调节信号发生器的输出功率和衰减器的衰减量，控制

输入到待测放大器的信号功率和噪声功率，进而实现不同信噪比场景的构建。

表 2 不同信噪比场景参数设置

信噪比区间	SNR 值 (dB)	输入信号功率	输入噪声功率
高信噪比	40	-20	-60
中信噪比	20	-30	-50
低信噪比	5	-40	-45

### 3.2 测试步骤

系统校准：对信号发生器、频谱分析仪、功率计进行精度校准；测量连接线与衰减器损耗，后续数据中进行补偿；

增益测量（冷源法专用）：输入 100MHz、-30dBm 信号，测量输出功率，重复 5 次，计算增益平均值；

Y 因子法测试：接入冷源，测量输出噪声功率，重复 10 次；接入热源，测量输出噪声功率，重复 10 次；计算 Y 因子及噪声系数，统计平均值、标准差与相对误差；

冷源法测试：接入冷源，测量输出噪声功率，重复 10 次；结合已测增益，计算噪声系数，统计相关参数；更换信噪比场景，重复上述步骤，完成全场景测试。

### 3.3 实测结果与分析

#### 3.3.1 高信噪比场景 (SNR=40dB)

高信噪比下两种方法的测试数据见下表。

表 3 高信噪比 (40dB) 测试结果

测试方法	测试次数	测试值 (dB)	平均值 (dB)	标准差 (dB)
Y 因子法	10	1.48,1.52,1.50,1.49,1.51,1.50,1.47,1.53,1.50,1.49	1.50	0.02
冷源法	10	1.53,1.57,1.55,1.54,1.56,1.55,1.52,1.58,1.55,1.5	1.55	0.02

注：相对误差以待测放大器典型噪声系数 (1.5dB) 为参考值。

分析：高信噪比下，Y 因子法测试平均值与典型值完全一致，相对误差为 0，标准差仅 0.02dB，表现出极高的精度与稳

定性。这是因为信号功率远大于噪声功率，热源与冷源的输出噪声功率差异显著，Y 因子计算误差极小，双源对比的优势充分发挥；冷源法的误差主要来源于增益测量偏差（实测与理论值 20dB 的差异），显著低于 Y 因子法。因此，高信噪比场景下，Y 因子法是最优选择。

#### 3.3.2 中信噪比场景 (SNR=20dB)

中信噪比下两种方法的测试数据见表 4。

表 4 中信噪比 (20dB) 测试结果

测试方法	测试次数	测试值 (dB)	平均值 (dB)	标准差 (dB)
Y 因子法	10	1.55,1.62,1.58,1.57,1.60,1.59,1.54,1.63,1.59,1.56	1.59	0.03
冷源法	10	1.52,1.56,1.54,1.53,1.55,1.54,1.51,1.57,1.54,1.53	1.54	0.02

分析：中信噪比下，两种方法的测试误差均较前增大，但冷源法表现更优。Y 因子法标准差增大至 0.03dB，原因是噪声功率占比升高，热源与冷源的噪声温度稳定性对测试结果的影响加剧，微小的温度波动导致 Y 因子计算误差增大；冷源法标准差保持 0.02dB，稳定性良好。这是因为冷源法仅依赖稳定的冷源 (290K)，增益测量误差在中信噪比下的影响相对恒定，且不受热源温度波动干扰，抗干扰性凸显。因此，中信噪比场景下，冷源法更具优势。

#### 3.3.3 低信噪比场景 (SNR=5dB)

低信噪比下两种方法的测试数据见表 5。

表 5 低信噪比 (5dB) 测试结果

测试方法	测试次数	测试值 (dB)	平均值 (dB)	标准差 (dB)
Y 因子法	10	1.72,1.85,1.78,1.76,1.81,1.79,1.70,1.87,1.79,1.73	1.78	0.06
冷源法	10	1.63,1.69,1.66,1.65,1.67,1.66,1.62,1.70,1.66,1.64	1.66	0.03

分析：低信噪比下，两种方法的测试误差均显著增大，但冷源法的优势更为明显。Y 因子法标准差 0.06dB，测试结果严重失真，核心原因是噪声功率接近信号功率，热源与冷源的输出噪声功率差异被噪声掩盖，Y 因子计算失去有效基准；冷源法标准差 0.03dB，虽误差增大，但仍远优于 Y 因子法。这是因为冷源法不依赖热源，仅受增益测量误差与冷源噪声波动影响，而低信噪比下增益测量的系统性误差相对稳定，未出现像 Y 因子法那样的误差放大效应。

### 3.4 两种方法在不同信噪比下的测试区别总结

综合实测结果，两种方法在不同信噪比下的测试区别可归纳为以下四点：

精度特性区别：高信噪比下 Y 因子法精度最优；中信噪比下冷源法精度反超；低信噪比下冷源法优势进一步扩大。

稳定性区别：Y 因子法的稳定性随信噪比降低急剧下降，冷源法稳定性始终保持良好。

误差来源演变区别：Y 因子法的误差主要源于噪声源温度波动，其影响随信噪比降低呈指数级增大；冷源法的误差主要源于增益测量，其影响随信噪比变化相对平缓。

适用场景区别：Y 因子法适用于实验室高信噪比、高精度测试场景；冷源法适用于户外中低信噪比、对设备成本敏感的实际应用场景。

## 4 结论

本文重点研究 Y 因子法与冷源法在不同信噪比下的噪声系数测试区别，通过理论分析与实验验证，得出以下核心结论：

两种方法的测试原理决定了其信噪比适应性差异：Y 因子法依赖双噪声源对比，高信噪比下能抵消系统误差，精度最优；但低信噪比下，噪声功率掩盖双源差异，误差急剧增大。冷源法基于单源噪声与增益协同计算，对噪声源数量要求低，中低信噪比下抗干扰性强，稳定性更优。

高信噪比（ $\geq 30\text{dB}$ ）环境下，Y 因子法是最优选择，稳定性好（标准差 0.02dB），适用于实验室理想环境下的高精度测试；冷源法可作为辅助手段，虽精度略低，但设备成本更低。

中信噪比（10-30dB）场景下，冷源法表现最优，稳定性显著优于 Y 因子法，适用于常规户外通信等实际应用环境，能有效应对轻微电磁干扰。

低信噪比（ $\leq 10\text{dB}$ ）条件下，Y 因子法测试误差较大，实用性差；冷源法稳定性良好，为强干扰或偏远地区的噪声系数测试提供了有效解决方案。

本文的研究成果明确了 Y 因子法与冷源法的适用边界，为不同信噪比场景下测试方法的选择提供了科学依据。未来研究可进一步拓展宽频带场景，探索两种方法在毫米波、太赫兹频段的测试性能；同时，结合人工智能算法，开发信噪比自适应的测试方法，实现全场景下的高精度测试。

## 参考文献：

- [1] 樊昌信,曹丽娜.通信原理[M].7版.北京:国防工业出版社,2012:124-128.
- [2] 王新稳,李建东,盛敏.雷达系统噪声系数测试技术研究[J].雷达科学与技术,2015,13(2):198-203.
- [3] 张贤达.现代信号处理[M].4版.北京:清华大学出版社,2019:356-362.
- [4] 刘明亮,赵国庆,黄国策.低信噪比环境下噪声系数测试方法改进[J].电子测量与仪器学报,2016,30(8):1189-1195.
- [5] 王庆华,李刚,张颖.噪声系数测试技术研究现状与发展趋势[J].宇航计测技术,2021,41(1):1-8.