

运算放大器电路中固有噪声的分析和测量 ——

第五部分：噪声测量简介

作者：德州仪器 (TI) 高级应用工程师 Art Kay

在第四部分中，我们采用了 TINA SPICE 来分析运算放大器 (op amp) 中的噪声。同时，TINA SPICE 分析所采用的示范电路也可用于第三部分的工艺分析 (hand analysis) 范例中，而且使用工艺分析和 TINA SPICE 所得出的结果非常接近。在第五部分中，我们将着重介绍用于噪声测量的几款不同型号的设备，并探讨设备的技术规范以及与噪声测量有关的运行模式。虽然探讨的是具体的设备型号，但是相关的原理适用于大多数的设备。在第六部分中，我们将向您展示实际的应用范例——如何运用相关设备来测量第三部分和第四部分中所阐述的电路。

噪声测量设备：真正的 RMS DVM

噪声测量试验设备有三种：分别为真有效值 (RMS) 表、示波器以及光谱分析仪。真有效值表可以测量各种不同波形的 AC 信号 RMS 电压。通常情况下，很多仪表通过检测峰值电压，然后将峰值电压乘以 0.707，计算出 RMS 值。然而，采用这种有效值计算方法的仪表并不是真正的 RMS 表，因为这种仪表在测量时，通常假定波形为正弦波。另一方面，一款真正的 RMS 表可以测量诸如噪声等非正弦波形。

许多高精度的数字万用表 (DMM) 都具有真正的 RMS 功能。通常而言，数字万用表通过将输入电压数字化、采集数以千计的样本并对 RMS 值进行数学计算，来实现上述功能。一款 DMM 在完成该测量时通常要具备两种设置：“AC 设置”以及“AC+DC 设置”。在“AC”设置模式下，DMM 输入电压为连接到数字转换器的 AC 电压。因此，此时 DC 组件处于隔离状态——这是进行宽带噪声测量理想的运行模式，因为，从数学层面上来说，测量结果等同于噪声的标准偏差。在“AC+DC”设置模式下，输入信号直接被数字化，同时完成了对 RMS 值的计算。这种运行模式不能用于宽带噪声测量。如欲了解典型的高精度真正 RMS 表的结构图，敬请参阅图 5.1。

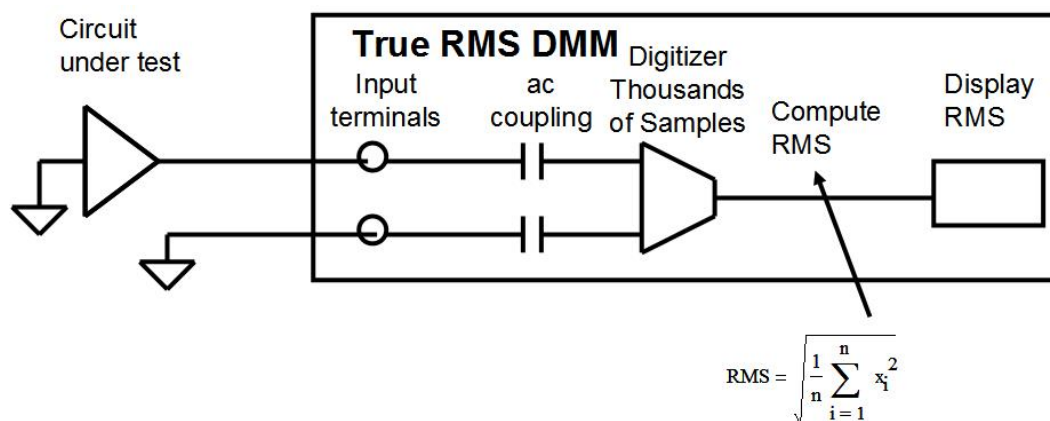


图5.1：典型的高精度真正RMS DVM 的示例

当使用真正的 RMS DVM 测量噪声时，您必须考虑其技术规范 and 不同的运行模式。部分 DMM 具有专门针对宽带噪声测量优化的特殊运行模式。在这种模式下，DMM 就成为一款真正的 RMS，运行模式为 AC 耦合模式，其能够测量从 20 Hz 至 10 MHz 的带宽噪声。对于一款高精度 DMM 来说，20uV 是固有噪声的典型值。如欲了解这些技术规范的一览表，敬请参阅图 5.2。请注意，只要将 DMM 输入端进行短路，就能测出固有噪声。

• 多种真正的 RMS 模式：请阅读有关的技术规范，以选择噪声测量的最佳模式。
• 标称带宽：20 Hz 至 10 MHz。
• 精确度：标称带宽的 0.1%。
• 固有噪声为：20uV（10mV 量程）
• 量程：10mV、100mV1000V

图5.2：典型的高精度仪表规范一览表

噪声测量的设备：示波器

采用真正的 RMS 仪表测量噪声的一个不足之处在于：这种仪表不能识别噪声的性质。例如，真正的 RMS 仪表不能识别特定频率时噪声拾波 (noise pickup) 和宽带噪声之间的区别。然而，示波器能使您观察到时域噪声波形。值得注意的是，大多数不同类型噪声的波形差异性很大，因此，利用示波器能够确定何种噪声影响最大。

数字和模拟示波器均可用于噪声测量。由于噪声在性质方面的随意性，因此噪声信号不能触发模拟示波器，只有重复性波形才能触发模拟示波器。然而，当存在噪声源输入时，模拟示波器上则显示出独特的影像。图 5.3 显示了采用模拟示波器进行宽带测量得出的结果。值得注意的是，由于显示的荧光特性以及噪声对模拟示波器的非触发性，模拟示波器常常生成一般和“拖尾”波形。大多数标准模拟示波器的缺点就是，它们不能检测到低频噪声（1/f 噪声）。

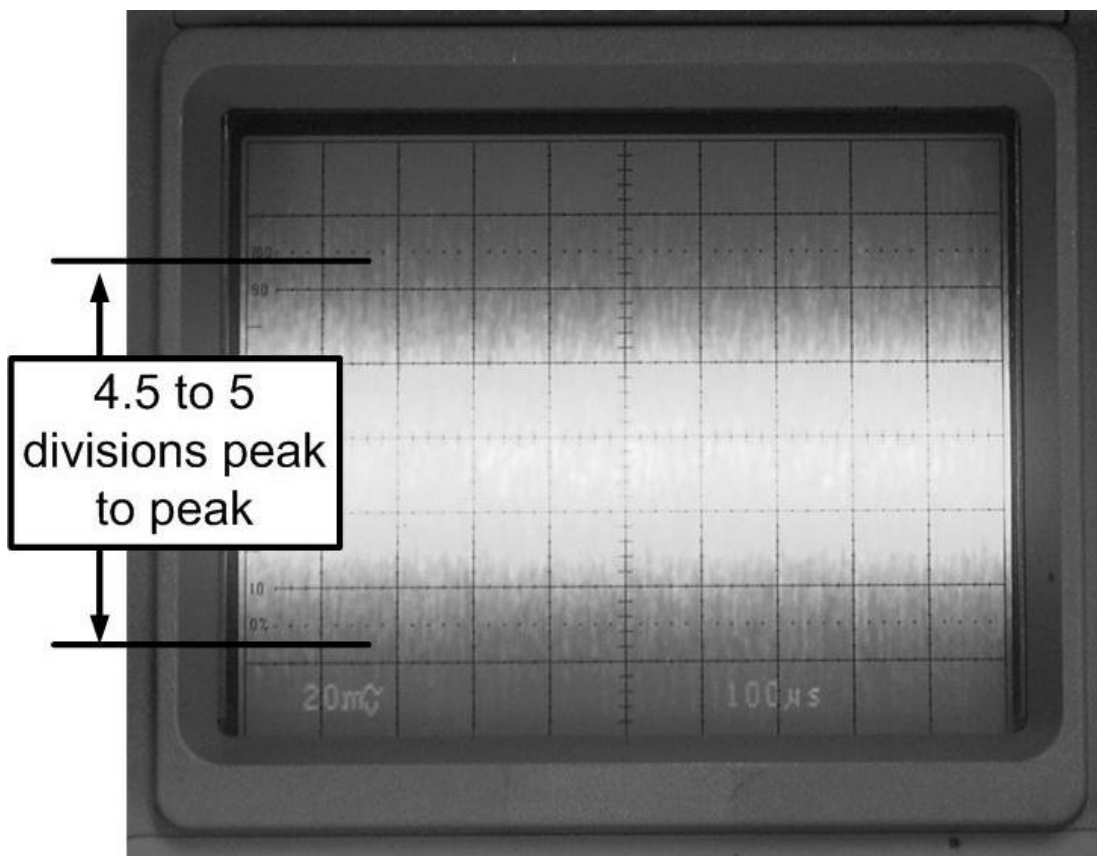


图5.3：模拟示波器上的白噪声

数字示波器具有诸多有助于测量噪声的实用的特性，其能检测到低频噪声波形（如 $1/f$ 噪声）。同时，数字示波器还可以对 RMS 进行数学计算。图 5.4 所示的噪声源与图 5.3 中的噪声源相同的，这种噪声源采用数字示波器才能检测出。

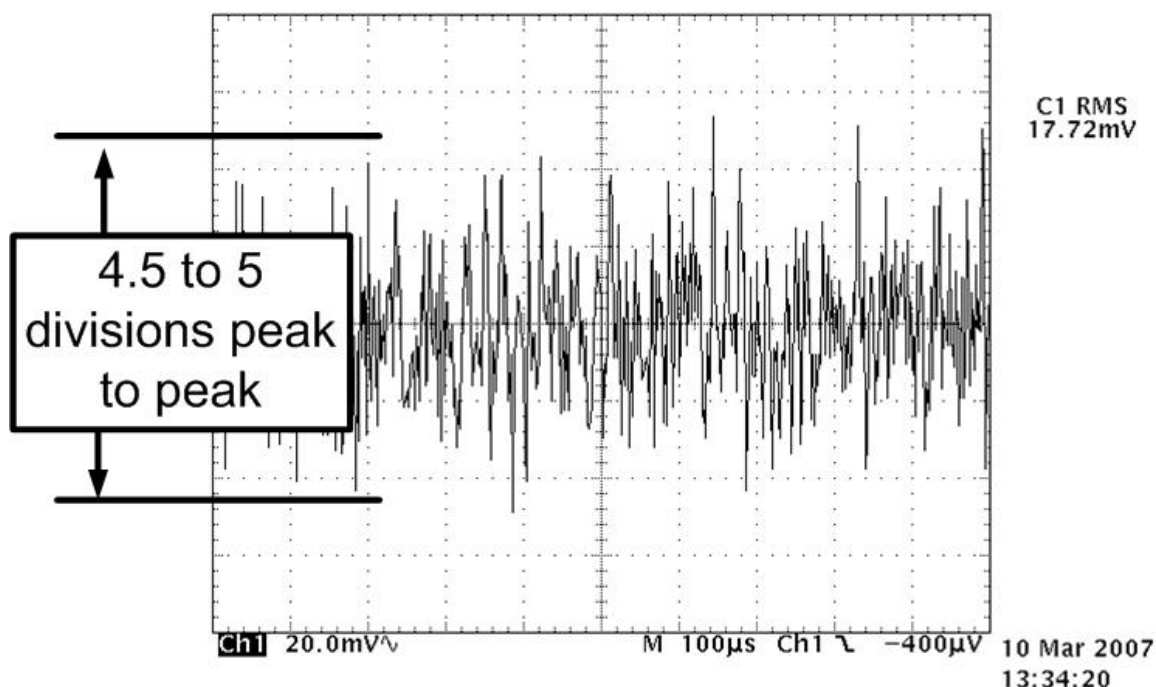


图5.4：数字示波器上的白噪声

当使用示波器测量噪声时，应遵循一些通用指南。首先，在测量噪声信号前，有一项重要的工作就是检查示波器的固有噪声。这项检查工作可以通过连接示波器输入端的 BNC 短路电容器 (shorting cap)，或将示波器引线与接地短路连接（如果采用了 1x 探针）。这种考虑之所以这么重要，是因为采用 1x 探针时的测量范围会小 10 倍。大多数质量上乘的示波器都拥有 1mV/division 量程，并配有 1x 示波器探针或 BNC 直接连接；同时，还具有带 10x 探针的 10mV/division 固有噪声。

需要注意的是，与 1x 示波器探针相比，我们应优先考虑 BNC 直接连接，因为接地的连接方式能够减小 RFI / EMI 干扰（请参阅图 5.5）。其中一种避免这种情况的方法就是，拆除示波器探针的接地引线和上端引线 (top cover)，同时在探针的侧面进行接地（请参阅图 5.6）。图 5.7 显示了一个 BNC 短路电容。

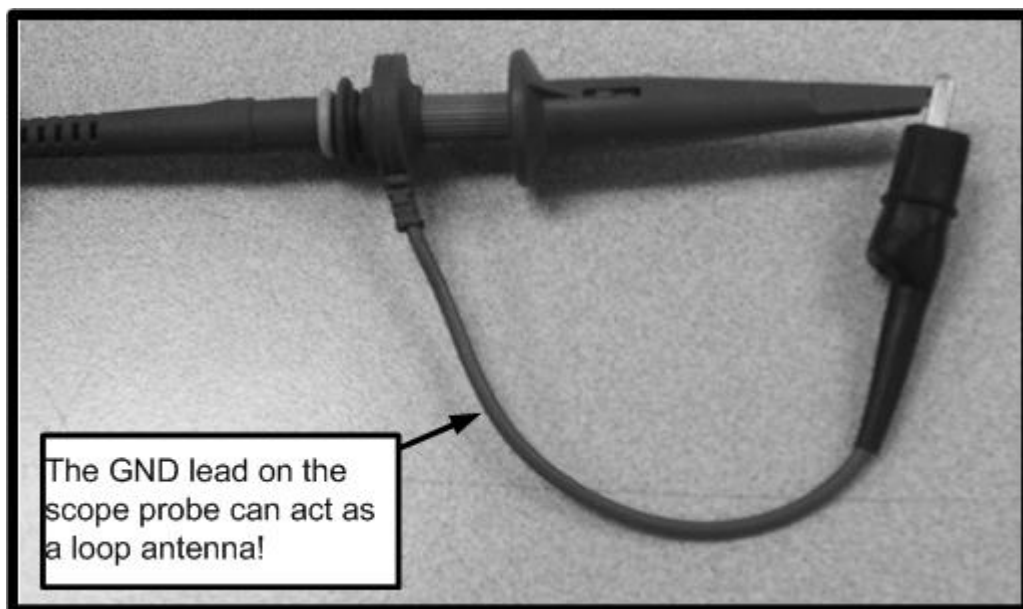


图5.5: 接地能够减小 RFI/EMI 干扰

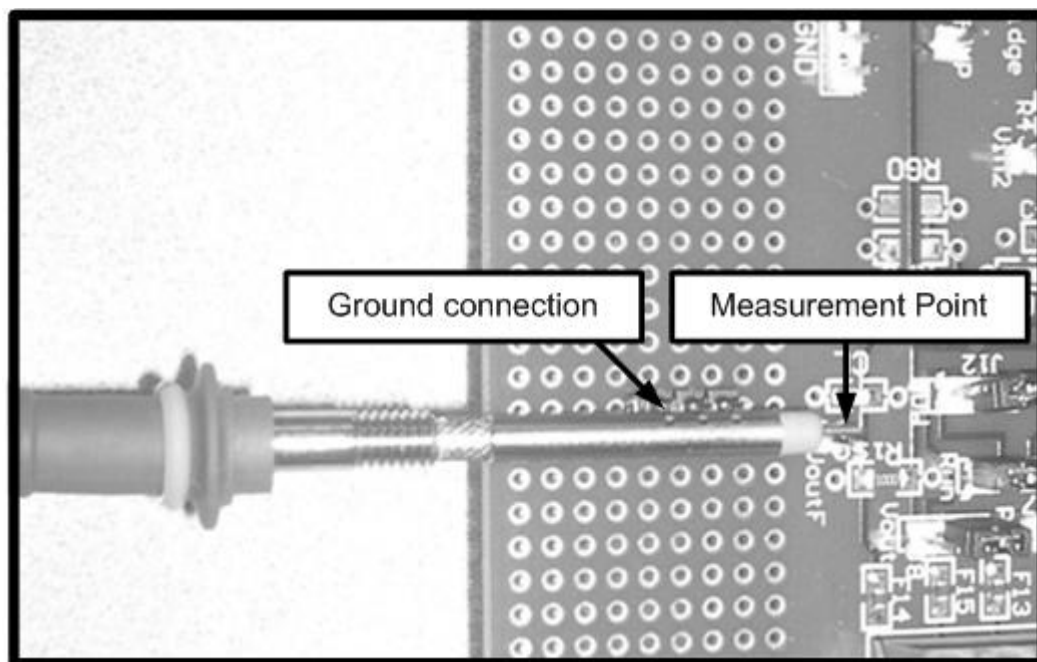


图5.6: 拆除接地的示波器探针



图5.7: BNC 短路电容

大多数示波器都具有带宽限制功能。为了准确测量噪声，示波器的带宽必须比所测量电路中的噪声带宽高。但是，为了获得最佳的测量结果，示波器的带宽应调整为大于噪声带宽的某一数值。例如，假设示波器全带宽为 400 MHz，当开启限制功能时，带宽则为 20 MHz。如果使用 100 kHz 的噪声带宽测量电路中的噪声，此时开启带宽限制功能，才有实际意义。就这个示例而言，由于超过带宽的 RFI/EMI 干扰将被消除，因此固有噪声较低。图 5.8 和图 5.9 显示了具有和不具有带宽限制功能的典型数字示波器的固有噪声。图 5.10 显示了采用 10x 探针示波器的固有噪声相当高。

Noise Floor= 0.2mVp=p
1x scope connection BNC shorting cap
20MHz BW Limit

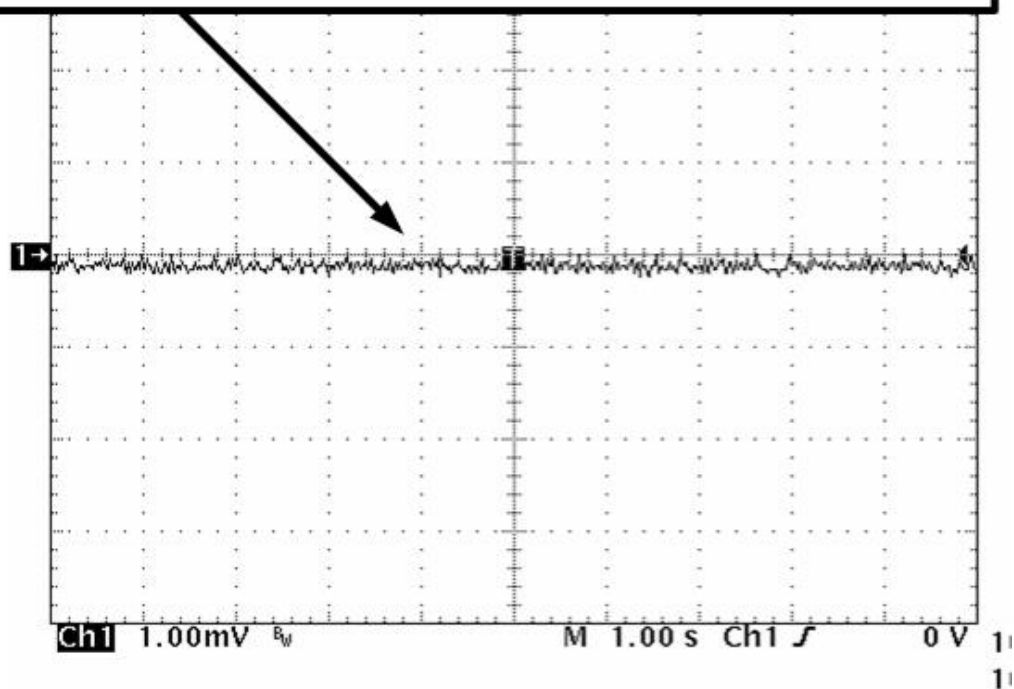


图5.8: 具有 1x 探针和带宽限制功能的示波器固有噪声

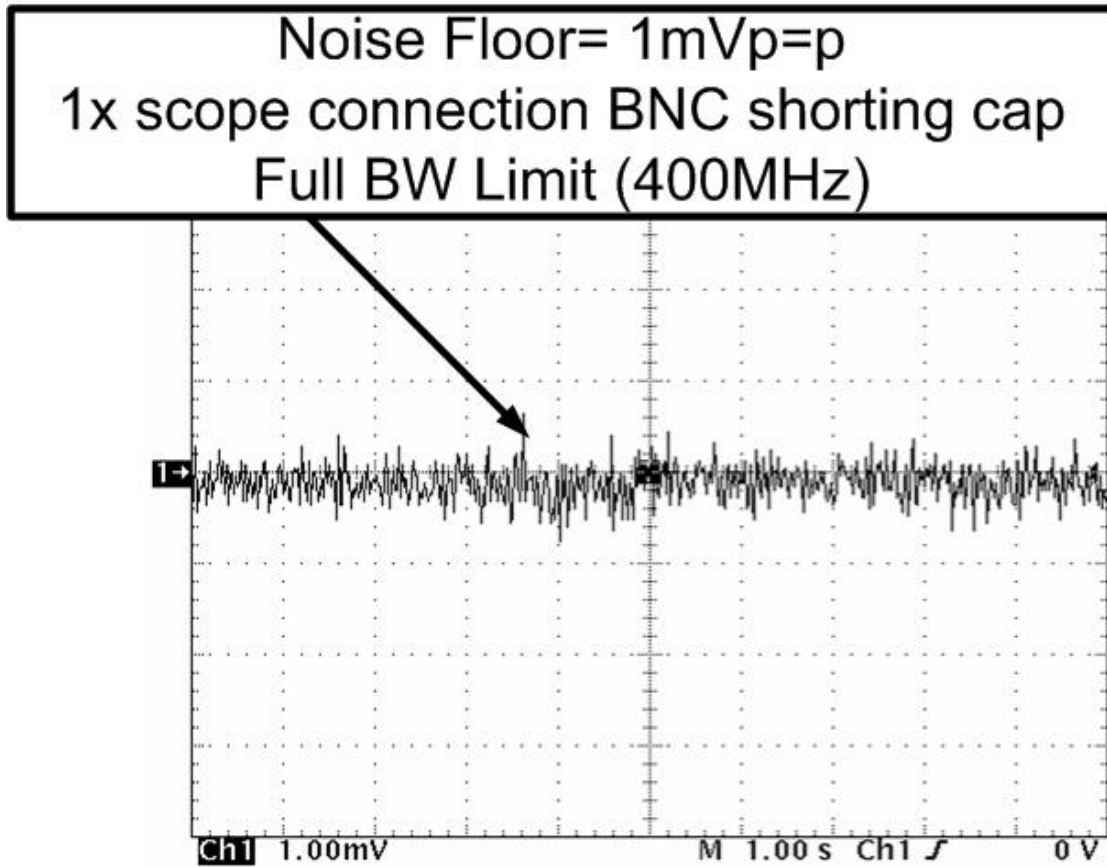


图5.9: 具有1x 探针，但不具备带宽限制功能的示波器固有噪声

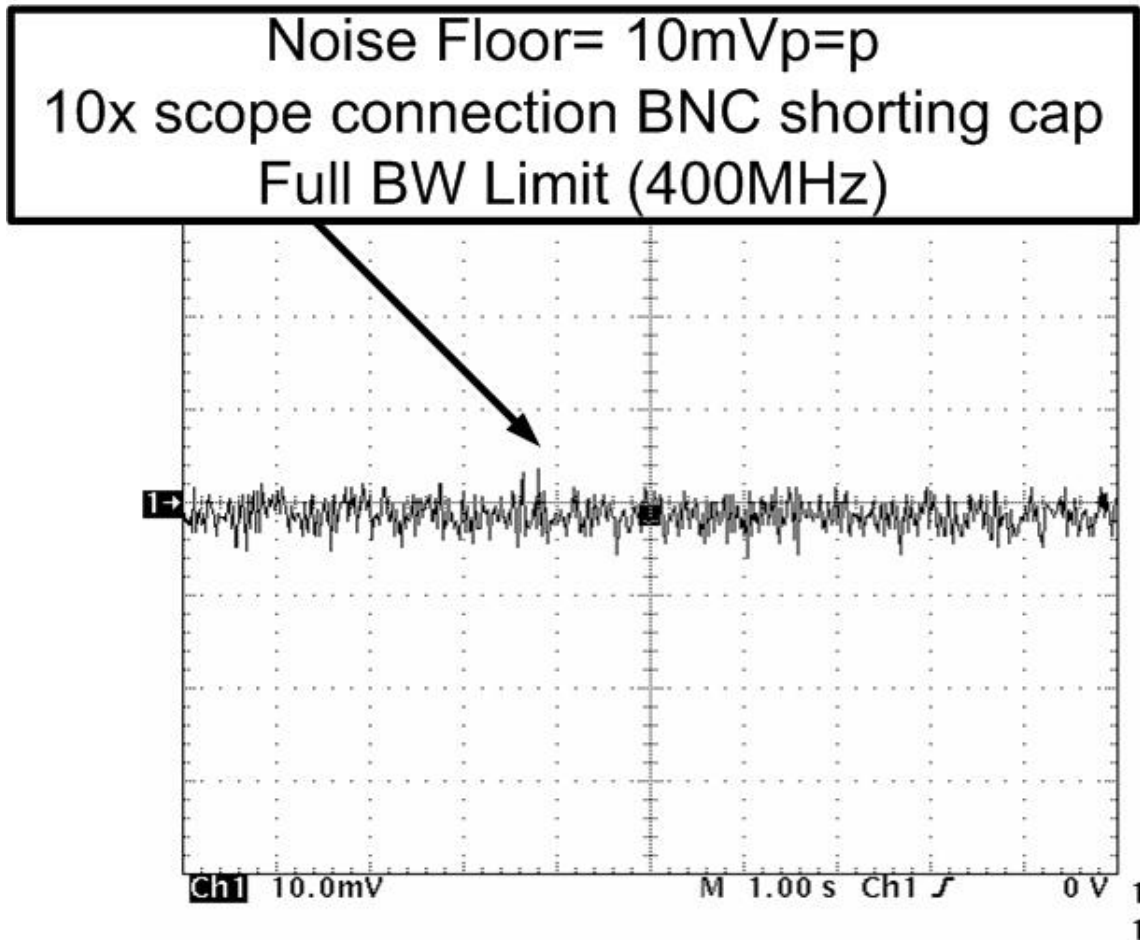


图5.10：具有10x 控针，但不具备带宽限制功能的示波器固有噪声

另外，当开展噪声测量工作时，必须考虑示波器的耦合模式。通常情况下，在一个数值较高的 DC 电压下工作才会产生噪声信号，因此宽带测量时，应采用 AC 耦合模式。例如，1mVpp 噪声信号在 2V 的 DC 信号时，才能被触发。因此，在 AC 耦合模式下，AC 信号被剔除，从而获得了最高的增益。但是，需要特别说明的是，AC 耦合模式不能用于测量 1/f 噪声。这是因为在 AC 耦合模式下，带宽的截止频率通常较低，约为 10 Hz。当然，该截止频率也会因耦合模式的不同而有所差别，但是，关键问题是这一较低的截止频率对大部分的 1/f 噪声测量而言过高。一般而言，1/f 的大小从 0.1 至 10 Hz 不等。因此，进行 1/f 的测量工作时，通常采用具有外部带通滤波器的 AC 耦合模式。图 5.11 对使用示波器进行噪声测量的通用指南作了总结。

使用示波器进行噪声测量的通用指南
• 切勿使用 10x 探针进行低噪声测量工作
• 采用 BNC 直接连接方式（比固有噪声测量结果精确 10 倍）
• 采用 BNC 短路电容来测量固有噪声

• 如有必要，则可开启带宽限制功能
• 在 AC 耦合模式下使用数字示波器进行 1/f 噪声测量（AC 耦合模式下，示波器带通较高，为 10 Hz）
• 如有必要，则可采用 AC 耦合模式进行宽带测量

图5.11：使用示波器进行噪声测量的通用指南

噪声测量设备：频谱分析仪

频谱分析仪是进行噪声测量的功能强大的工具。一般说来，频谱分析仪能够显示功率（或电压）与频率之间的关系，其与噪声谱密度曲线相类似。实际上，一些频谱分析仪具有特殊的运行模式，这种运行模式使测量结果以频谱密度单位（即 nV/rt-Hz）的形式，直接显示出来。在其他情况下，测量结果必须乘以一个校正系数，从而将相关计量单位转化成频谱密度单位。

频谱分析仪和示波器一样，既有数字型的，也有模拟型的。模拟频谱分析仪生成频谱曲线的一种方法是：扫描各种频率下的带通滤波器，同时标绘出滤波器的测量输出值。另一种方法是运用超外差接收技术，该技术在各种频率下完成对本地振荡器的扫描。然而，数字频谱分析仪则采用快速傅里叶变换来产生频谱（常常与超外差接收技术配合使用）。

虽然所使用的频谱分析仪型号各异，但是一些主要参数仍需予以考虑。起始和终止频率表明了带通滤波器被扫描的频率范围。分辨率带宽是带通滤波器在频率范围内被扫描的宽度。降低分辨率带宽，则能提升频谱分析仪处理在离散频率时信号的能力，同时，将延长扫描时间。图 5.13 说明了扫描滤波器的运行情况，图 5.14 和图 5.15 显示了同一频谱分析仪采用不同分辨率带宽时，所得出的两种测量结果。在图 5.14 中，由于分辨率带宽被设置得非常小，从而使离散频率分量（即 150 Hz）得到了妥善处理。另一方面，在图 5.15 中，由于分辨率带宽被设置得非常大，使离散频率分量（即 1200 Hz）未能得到妥善处理。

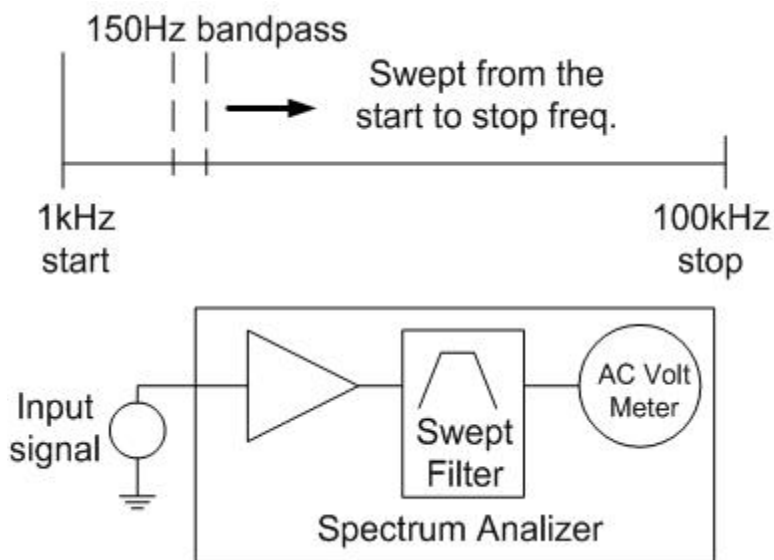


图5.12：频谱分析仪运行情况

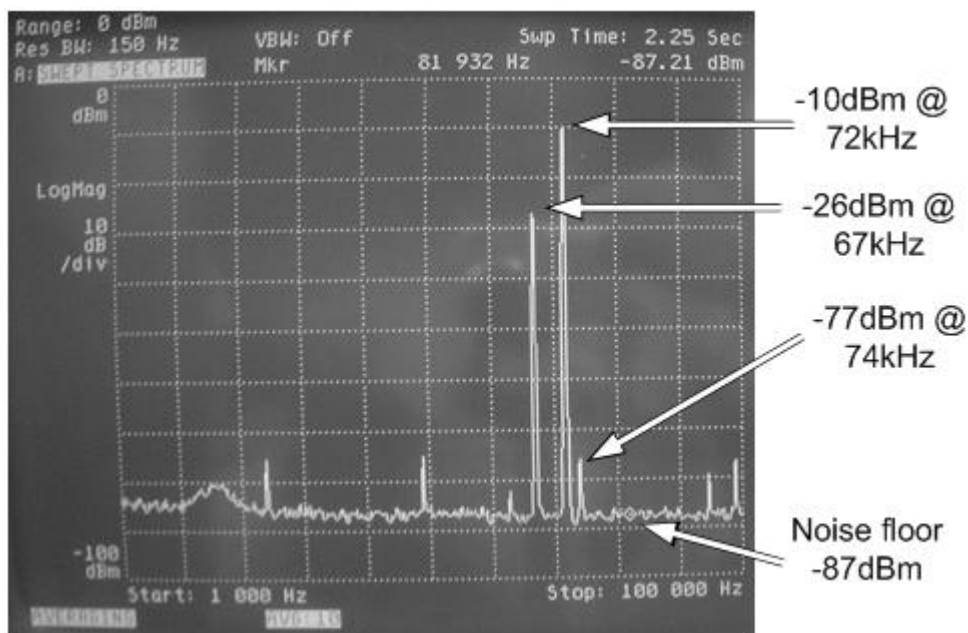


图5.13：针对高分辨率信号选择的分辨率带宽

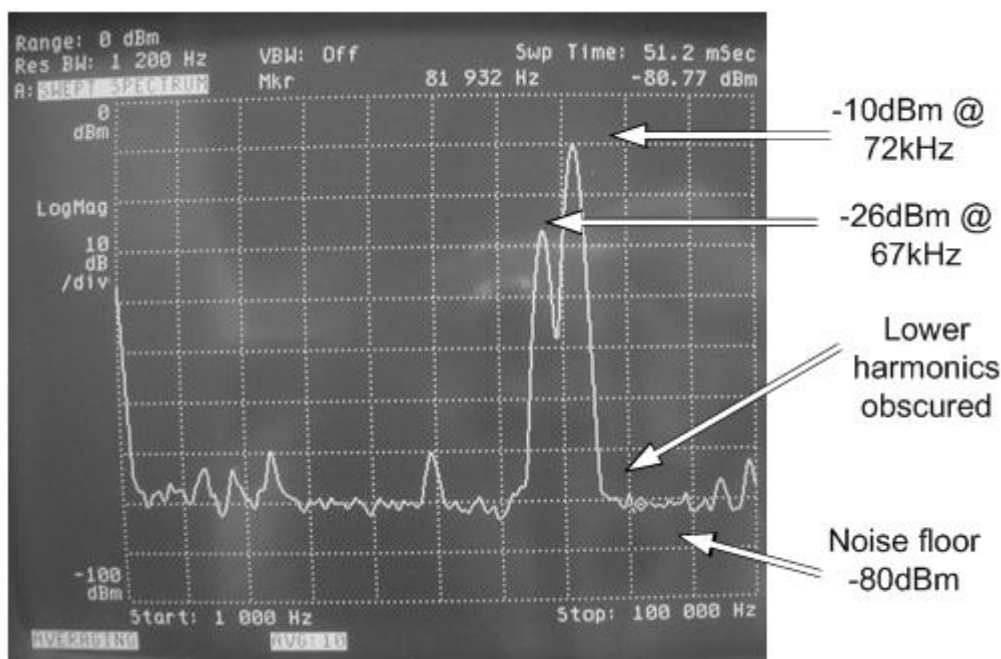


图5.14：针对低分辨率信号选择的分辨率带宽

在图 5.13 和图 5.14 中，频谱的大小以分贝毫瓦 (dBm) 为单位表示，这是频谱分析仪常用的测量单位。一分贝毫瓦是指相对于一毫瓦，用分贝来计量的功率比值。就本例中的频谱分析仪而言，分贝毫瓦的测量也要事先假设输入阻抗为 50 欧姆。对大多数的频谱分析仪而言，当输入阻抗选择为 1M 欧姆时，情况也是如此。图 5.15 列出了将分贝毫瓦转化为电压有效值所采用公式的推导过程。在图 5.16 中，该公式用于计算在图 5.13 – 5.14 中列出的测量结果——-10 dBm 信号的电压有效值。

从图 5.13 – 5.14 中，我们可以看出，当分辨率带宽降低时，固有噪声则从 -87 dBm 增加到 -80 dBm。另一方面，当分辨率带宽发生改变时，频率处于 67 kHz 和 72 kHz 时的信号幅度并未发生改变。固有噪声之所以受分辨率带宽的影响，是因为其为热噪声，因此，带宽的提高也增加了热噪声总量。另外，由于信号波形为正弦波曲线，而且不管带宽如何变化，带通滤波器内部的振幅都会保持恒定，因此，频率处于 67 kHz 和 72 kHz 时的信号幅度并不会受分辨率带宽的影响。因为我们必须清楚在频谱密度计算中不应该包含离散信号，所以，有关噪声分析方面的特性应引起我们足够的重视。比如，当测量运算放大器的噪声频谱密度时，您会发现频率在 60 Hz（功率上升线）时出现的一个离散信号。因为这个 60 Hz 的信号并非频谱密度，而是一个离散信号，所以它并未包含在功率噪声频谱密度曲线中。

$$\text{NdBm} = 10 \cdot \log \left(\frac{P}{1\text{mW}} \right) \quad (5.1)$$

where

NdBm -- decibel milliwatts

P -- Measured power

solve for power

$$P = \left[10^{\left(\frac{\text{NdBm}}{10} \right)} \right] \cdot (1\text{mW}) \quad (5.2)$$

power formula for resistors

$$V = \sqrt{P \cdot R} \quad (5.3)$$

substitute (5.2) into (5.3)

$$V = \sqrt{\left(10^{\left(\frac{\text{NdBm}}{10} \right)} \cdot (1\text{mW}) \right) \cdot R} \quad (5.4)$$

Where

R - spectrum analyzer input impedance. Some models will assume

R=50 ohm for both 50ohm and 1Mohm input impedance.

NdBm -- decibel milliwatts as displayed on spectrum analyzer

图5.15： 将分贝毫瓦转化为电压有效值

From figure 5.13 the signal at 72kHz has a magnitude of -10dBm

Use (5.4) to convert -10dBm to volts rms.

$$V = \sqrt{\left(10^{\left(\frac{-10\text{dBm}}{10} \right)} \cdot (1\text{mW}) \right) \cdot 50\Omega} = 0.071 \text{ V}_{\text{rms}}$$

图5.16： 将分贝毫瓦转化为电压有效值

一些频谱分析仪同噪声频谱密度一样，可以 nV/rt-Hz 为单位显示频谱幅度。但是，如果不具备这种功能，我们可以用频谱幅度除以分辨率噪声带宽的平方根来计算频谱密度。需要说明的是，通常我们需要一个换算系数，将分辨率带宽转化成分辨率噪声带宽。**图 5.17** 给出了将分贝毫瓦频谱转化成频谱密度的方程式。**图 5.17** 还给出了将分辨率带宽转化成噪声带宽所需的换算系数表。**图 5.18** 显示了将示例频谱分析仪中的频谱转化为频谱密度的实例。

$$V_{\text{spect_anal}} = \sqrt{\left(\frac{N_{\text{dBm}}}{10}\right) \cdot (1\text{mW}) \cdot R} \quad (5.4)$$

$$V_{\text{spect_den}} = \frac{V_{\text{spect_anal}}}{\sqrt{K_n \cdot \text{RBW}}} \quad (5.5)$$

Where

N_{dBm} -- the noise magnitude in dBm from the spectrum analyzer

R -- the reference impedance used for the dBm calculation

$V_{\text{spect_anal}}$ -- noise voltage measured by spectrum analyzer per resolution bandwidth

RBW -- resolution bandwidth setting on spectrum analyzer

$V_{\text{spect_den}}$ -- spectral density in (nV/rt-Hz)

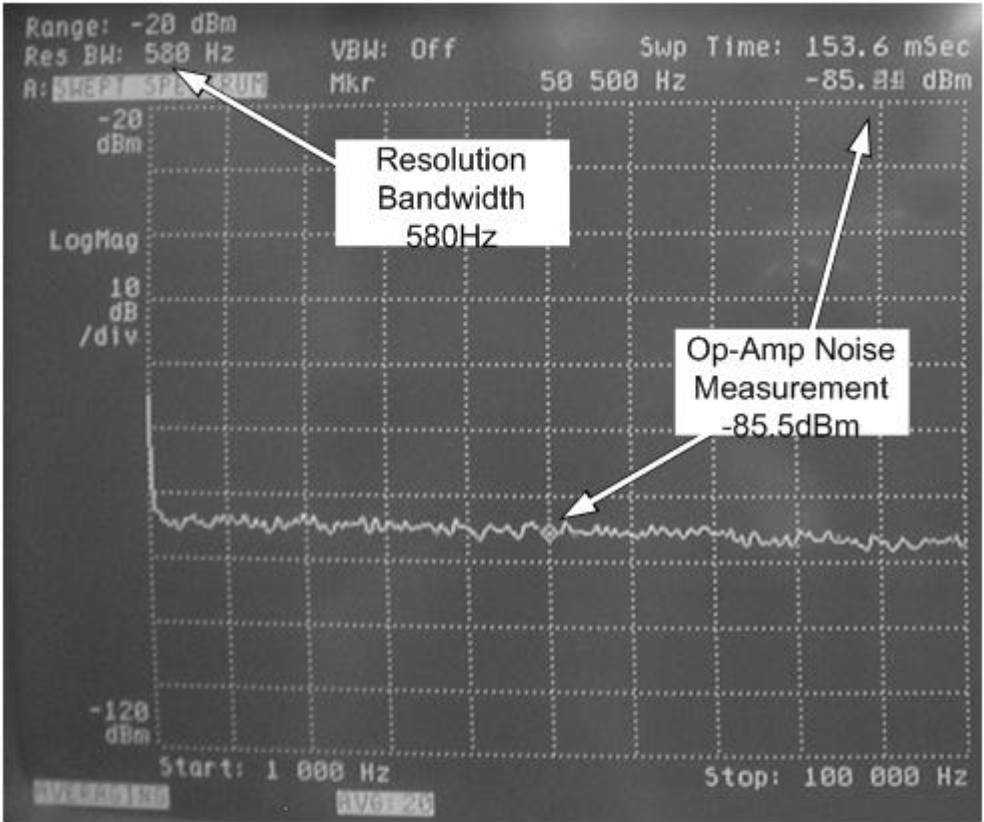
K_n -- conversion factor that changes the resolution bandwidth to a noise bandwidth

图5.17：将 dBm 转化为频谱密度的方程式

此表摘自安捷伦频谱分析仪测量和噪声应用手册 1303 页 [1]

滤波器类型	应用范围	Kn
4 极同步滤波器	大部分频谱分析仪模拟	1.128
4 极同步滤波器	部分频谱分析仪模拟	1.111
典型的 FFT 滤波器	基于 FFT 的频谱分析仪	1.056

图5.18：将 dBm 转化为频谱密度的方程式



$$V_{\text{spect_anal}} = \sqrt{\left(\frac{-85.5}{10}\right) \cdot (0.001) \cdot 50} = 11.871 \times 10^{-6} \text{ V}_{\text{rms}}$$
$$V_{\text{spect_den}} = \frac{11.871 \times 10^{-6}}{\sqrt{1.128 \cdot 580}} = 464 \text{ nV/rt-Hz}$$

图5.19：频谱分析仪测量结果向频谱密度转化的实例

另外，大多数频谱分析仪都具有计算平均值的功能。这一功能消除了测量波动的影响，因此，测量结果的重复性更高。平均值的数量由频谱分析仪的前置面板输入

（通常从 1 至 100）。图 5.20 – 5.22 显示了采用不同的平均值水平，测量得出的同一信号。

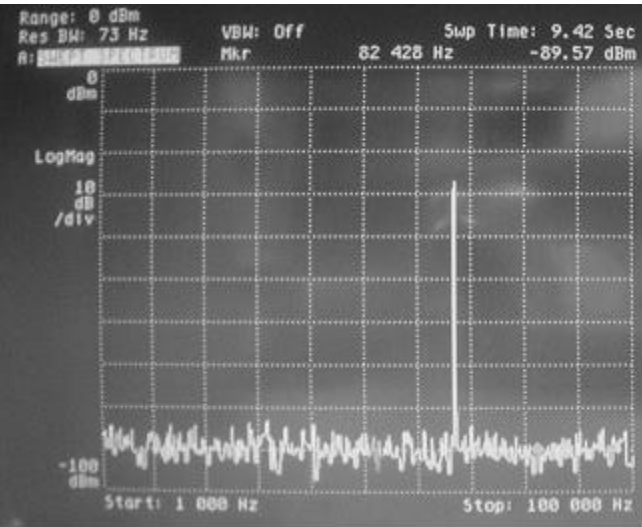


图5.20 关闭平均值功能时的频谱分析仪

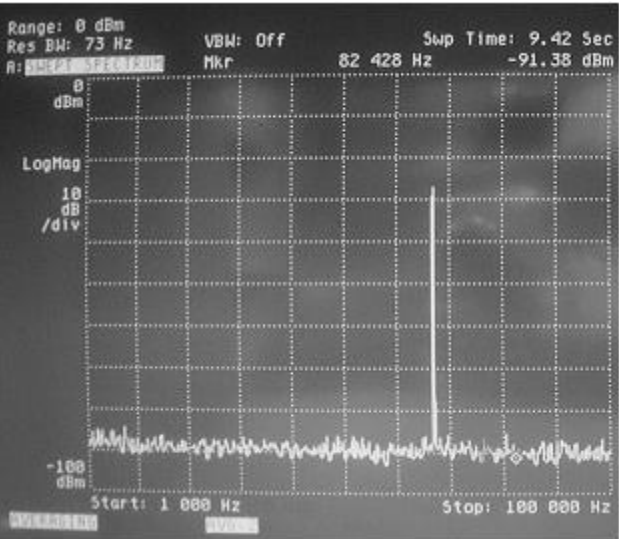


图5.21 平均值 = 2 时的频谱分析仪

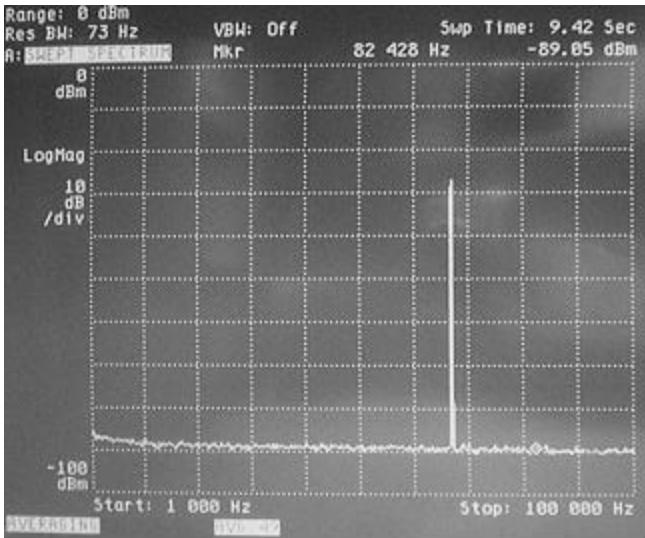


图5.22 平均值 = 49 时的频谱分析仪

当使用（或选择）频谱分析仪时，我们需要考虑的主要技术规范就是固有噪声和带宽。图 5.23 中的表格列出了两款不同频谱分析仪的部分技术规范。

	典型的数字频谱分析仪	典型的模拟频谱分析仪
固有噪声	20 nV/rt-Hz	50 nV/rtHz
带宽	0.016Hz 至 120 kHz	10 Hz 至 150 MHz
总体评价	这是一款先进的数字频谱分析仪，其采用 FFT 来产生频谱。其可以测量极低的频率，适用于 1/f 等方面的测量工作。	这是一款款式较老的模拟频谱分析仪，其采用超外差接收技术产生频谱。截止频率较低，为 10Hz，因此其不适用于典型的运算放大器 1/f 等方面的测量工作。

图 5.23：两款不同频谱分析仪的技术规范比较

总结与回顾

本文介绍了用于噪声测量的几款不同型号的设备，重点阐述了设备的技术规范以及与噪声有关的主要运行模式。需要特别说明的是，虽然探讨的是具体型号的设备，但是其中的工作原理适用于大部分的设备。本文旨在帮助您在选择噪声测量设备时，应考虑的主要规格参数。在**第六部分**，我们将列举使用该设备的实际应用范例。

感谢

特别感谢 TI 的技术人员，感谢他们在技术方面所提供的真知灼见。这些技术人员包括：

- 高级模拟 IC 设计经理 Rod Burt
- 线性产品经理 Bruce Trump`
- 应用工程经理 Tim Green
- 高速产品市场开发经理 Michael Steffes

参考书目

[1] 安捷伦频谱分析仪测量与噪声应用手册 1303 页，2003 年 12 月版（网址：www.agilent.com）

[2] 概率与统计参考，第三版，作者：Robert V. Hogg 和 Elliot A Tanis。由麦克米兰出版公司 (Macmillan Publishing Co) 出版。

[3] 低噪声电子系统设计，作者：C. D. Motchenbacher 和 J. A. Connelly，由 Wiley InterScience 公司出版。

作者简介

Arthur Kay 先生现任 TI 高级应用工程师，专门负责传感器信号调节器件的技术支持工作。他于 1993 年毕业于乔治亚理工学院 (Georgia Institute of Technology)，获电子工程硕士学位。