

# 是德科技 完成理想的电源完整性测量

应用指南

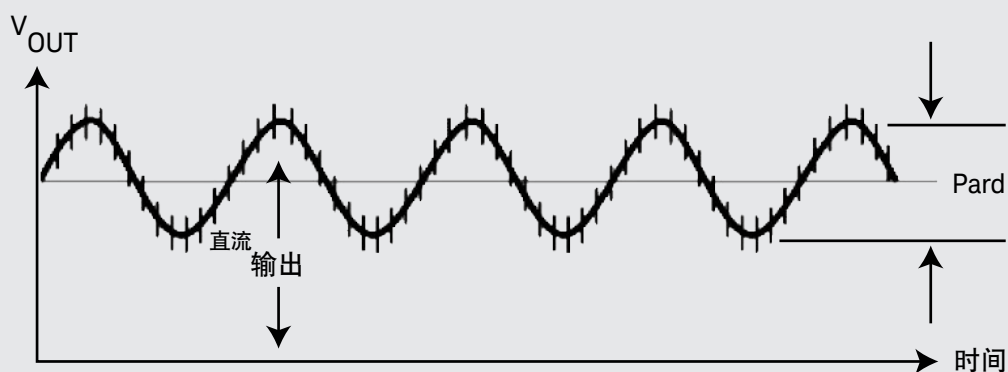
## 序言

由于摩尔定律的影响不断变化，种类繁多的电子产品为我们带来了更多新的功能和特性，极大地方便了人们生活。经济型微控制器的发展势不可挡，越来越多的设备依赖微控制器完成控制操作，真正体验到了改良的性能和更丰富的功能（例如：家用电器、汽车、医疗设备、可穿戴设备、物联网、智能手机、云）。为电子产品中的器件和电路提供“纯净”电源，是产品设计人员面临的一大难题，他们在现代产品的配电网（PDN）设计上投入了大量的时间、人力和设备。设计人员通常使用实时示波器来测量产品中的直流电源。本篇应用指南介绍了直流电源测量和分析所需要的实用技术，并针对直流电源测量工具的选择和评估进行了探讨。

### PDN 和电源完整性

电源完整性 (PI) 是电子行业中广泛使用的一个术语，可分析系统内部电源从源端向负载转换和传输的效率。配电网 (PDN) 负责发电，它是由无源器件、源端和负载间的互连构成，包括封装和半导体。它通常包括在直流至多千兆赫兹的频率范围内的测量。一些常见 PI 测量包括：

- PARD——周期和随机偏差，这是电子行业广泛应用的一个术语，它描述了在其他所有参数均为常数时直流输出与直流平均值的偏差。它用来衡量直流输出经过电压调整和滤波电路之后所残留的多余的交流和噪声分量。可以在 20 Hz 至 20 MHz 的带宽范围内通过有效值或峰峰值测量来得到这个 PARD，其中后者较为常见。20 Hz 以下频率的 PARD 偏差一般被称为漂移。



- 负载响应——是指一个静态或瞬态负载，根据预先确定的负载可以衡量电源维持在指定输出电压范围内的能力。通常要测量电源在基于负载的预定义频段内的瞬态恢复时间。
- 噪声——直流电源与标称值的偏差。包括随机噪声（如热噪声）、杂散信号（例如相邻电路或 PARD 和负载响应中的开关耦合）。

## 问题

随着一代又一代产品的密度和速度增加，“纯净”电源的重要性也随之日渐凸显。直流电源偏差是数字系统产生时钟和数据抖动的最大根源。在数字设备中，电源电压下降会使信号经过栅极的传播时延降低，从而减少时序裕量或出现比特位失效。为应对这个问题，电源容差减少到了 5% 或更低。

由于数字设备的切换速度和信号转换速率增加，电源中引入了更多的切换噪声。切换噪声是在切换电流的带宽范围内，可轻松扩展到 1 GHz 以上。

在数字系统中，减少信号幅度可以实现更快的切换速度。减小信号幅度会转为减少电源中的噪声裕量。

提高电源效率或降低功耗是设置更严格的电源容差的另一个目的。假设一个电源已有 10% 的容差，使其容差减少到 5%，那么产品设计的功耗下降幅度可达 5%。

设计人员面临的另一个挑战是测量直流电源上的极小、极快的信号。

## 直流电源噪声

在理想的情况下，电源是不会有噪声的。那么电源噪声是怎么产生的呢？

这里产生了由于热过程不可避免引起的高斯噪声（由于电子的热骚动而产生的电子噪声）。这个通常不是最大的噪声源。

直流电源噪声的主要来源是开关电源自身产生的噪声以及设备在电路中的切换电流所产生的噪声，这会对电源产生瞬态电流需求。这些切换虽然会随机的发生，但是会趋向于和系统时钟一致。

当我们把这些看作是叠加在直流电源上的“信号”而不是“噪声”的时候，例如电源切换噪声和切换电流噪声，测量和分析就会变得简单有效。

## 测量挑战

由于直流电源的噪声带宽很大，考虑到示波器的宽带宽、易用性和可用性，设计人员更倾向于用示波器来测量电源噪声。我们会在后面讲述示波器对噪声原因分析的独特作用。

实时高带宽数字示波器和高带宽探头自身也有噪声，这个必须要考虑。如果您要测量的直流电源噪声和示波器以及探头的噪声是在一个数量级上的话，您的直流电源测量的精度就会出现問題。

另外一个测量挑战是动态范围。您关注的电源是直流电压，上面的交流信号（噪声）占直流电平的比例很小。要缩放交流噪声——把示波器放在更敏感的范围才能更好地观测噪声细节，同时示波器自身的噪声电平很小（参见侧边栏“示波器噪声的简要介绍”）。根据所用的示波器和探头，设计人员或许不太可能设置好偏置以完成测量。

## 技巧1. 选择噪声最低的示波器测量路径

这看上去显而易见：如果您想要测量直流电源上的噪声，您要尽可能地降低示波器测量系统中的噪声，以便不遮蔽您的测量结果。不幸的是，很多用户在这方面都失败了，他们并不清楚还能有其他更好的选择。示波器测量路径由示波器和示波器输入端构成 (50 Ω/1 MΩ)。

对许多示波器来讲，50 Ω 输入路径的噪声要比 1 MΩ 输入路径的噪声低。图 1 显示了 Keysight DSOS054A 高清晰度示波器 (500 MHz，4 通道) 的 50 Ω 输入和 1 MΩ 输入的基线噪声。

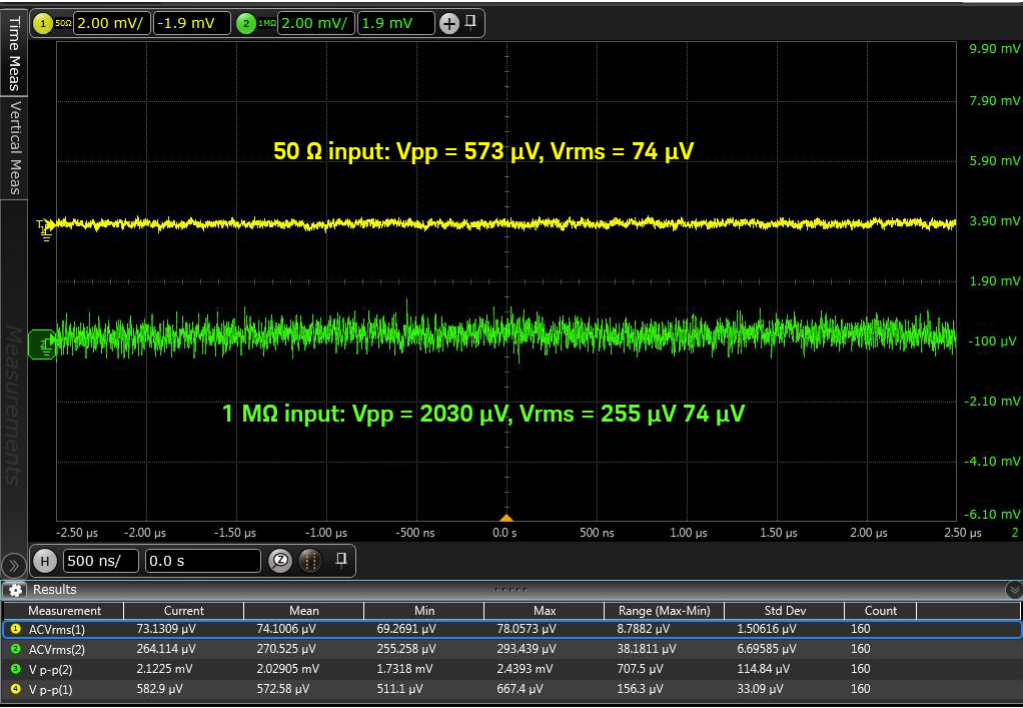


图 1. Keysight DSOS054A 示波器的 50 Ω 和 1 MΩ 输入的基线噪声比较

此类测量通常被称为空值测量，用来测量示波器测量系统的基线噪声。这是一项彻底检查，效果类似于在执行导通或电阻测量之前先使数字万用表上的所有测试引线短路。最佳实践应是对完整的示波器测量系统（以及探头）执行空值测量，确保您的示波器以及探头最适合您要开始的电源噪声测量。为执行空值测量，您只需在执行电源噪声测量之前配置好您所需的示波器和探头，然后使接地输入端短路（或使差分探头上的输入端一起短路），即可开始测量噪声。

## 技巧2. 通过限制带宽来减少测量系统噪声

带宽越高越好吗？不一定。示波器和探头的噪声电压随频率而变化。根据测量需要限制带宽，我们可以减少示波器和探头在测量过程中产生的噪声。考虑图 2 所示的测量。我们使用 Keysight MSOS804A 示波器 (8 GHz、10 位 ADC、20 GSa/s) 与 N7020A 电源探头 (2 GHz、1:1 衰减) 完成了这个空值测量。表 1 为测量结果汇总。

表 1. 不同带宽条件下的空值测量噪声结果

空值测量		
带宽	Vpp	Vrms
2 GHz	1,040 $\mu$ V	110 $\mu$ V
1 GHz	860 $\mu$ V	90 $\mu$ V
500 MHz	800 $\mu$ V	80 $\mu$ V
20 MHz	460 $\mu$ V	60 $\mu$ V



图 2. 使用 N7020A 电源探头和 S 系列示波器在不同带宽限制条件下测量基线噪声



### 技巧3. 使用 1:1 衰减器来减少测量系统噪声

示波器探头有各种各样的衰减比。您可能最熟悉的是 10:1 无源探头。10:1 探头的优势是它允许您测量宽带宽信号，使用其他探头可能会超出示波器的最大输入。这个衰减比的劣势是，相对于被测信号的示波器噪声分量会随着衰减比成正比增加。详情参见侧边栏“示波器噪声的简要介绍”。

考虑图 3 显示的测量结果。使用 10:1 探头和 1:1 探头同时测量同一个信号 -20 MHz 50 mV p-p 正弦波信号。两个测量的唯一不同是衰减比。1:1 探头的测量结果是 52 mV p-p，10:1 测量结果是 65 mV p-p。更高的衰减比意味着更低的信噪比，可使测量结果改善至少 25%。由此可知，在测量小信号时，示波器和探头的噪声会对测量结果造成影响，所以最好是使用尽可能低的衰减比。

#### 示波器噪声的简要介绍

请参考下面的结构图。示波器探头系统中有两个主要的噪声源。示波器的输入放大器和缓冲电路会造成噪声，探头放大器自身设计也会带来噪声。

所有的示波器都用衰减器来调整垂直方向缩放系数。在衰减器之后噪声会出现。所以当衰减器的比例是其他任何不为 1:1 的比例时（也就是示波器最敏感的硬件范围），噪声在输入连接器处会相应的被放大。例如，如果一台示波器在没有衰减器的时候，最小的敏感范围是 5 mV/格。假定示波器在调成 5 mV/格时本底噪声是 500  $\mu$ Vrms。把最小敏感范围调节成 50 mV/格时，示波器在输入处串联了一个 10:1 的衰减器，噪声在输入处就会变成 5 mVrms(500  $\mu$ V 乘以 10)。当一个带有衰减器的探头连接到示波器时也会出现同样的情况。所以当衰减器是这个比例时，示波器噪声在探头输入处会相应的被放大。

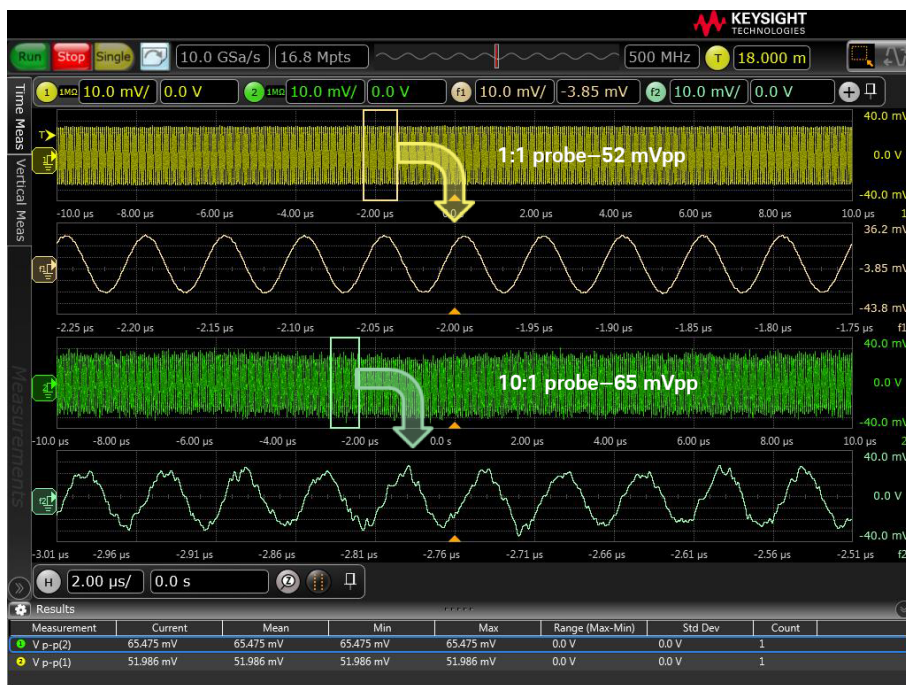
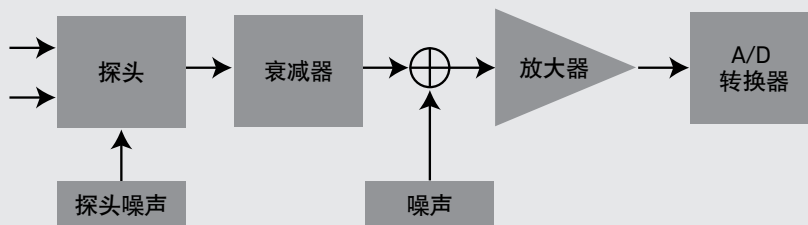


图 3. 使用 1:1 和 10:1 探头测量一个 50 mVpp 正弦波的噪声比较

## 技巧4. 使用探头偏置来提高动态范围

探头偏置是有源探头的一个特性，可以让用户去除被测信号中的直流偏置。当直流信号上有一个小的交流信号时，也就是在测量电源噪声时，这个特性非常有用。图 4 显示了一个 1.5 V 电源在有 / 无探头偏置时的噪声测量结果。结果的不同是由于具有较高 V/格设置的示波器所带来的衰减。

提示：大多数有源探头在提供偏置的同时也会有不为 1:1 的衰减比，这与减少示波器测量系统噪声的目标背道而驰。可以选择其他的探头，例如 Keysight N7020A 电源探头，它能够提供偏置功能和 1:1 衰减比。N7020A 的偏置范围是  $\pm 24\text{ V}$ 。



图 4. 一个 1.5 V 电源在无偏置 / 有探头偏置时的噪声测量结果

## 技巧5. 了解隔直器的局限性

隔直器是专用的大容量电容器，可与信号串联在一起并放置在示波器输入端前面。隔直器的优势在于它可以阻隔或消除较大直流，从而将示波器设为更为敏感的范围——与上文所述的探头偏置特性是相同的测量原则。隔直器的局限性体现在，它能够阻隔除了直流之外的一些低频交流，例如电源漂移或压缩。图 5 显示了 5 V 直流电源使用隔直器与使用 N7020A 电源探头（带有探头偏置特性）进行测量的比较。从中可以看到，使用隔直器得到的测量结果已消除了低频电源漂移，可能会给用户带来误导。另外，因为直流信息被隔直器阻隔且不会在测量结果中体现，所以无法通过示波器确定这个电源的直流值。这就要求使用数字万用表或执行类似的测量才能得到直流值。为说明这一点，图 6 比较了 1.5 V DDR3 电源使用隔直器以及带偏置特性的 N7020A 电源探头的测量结果。

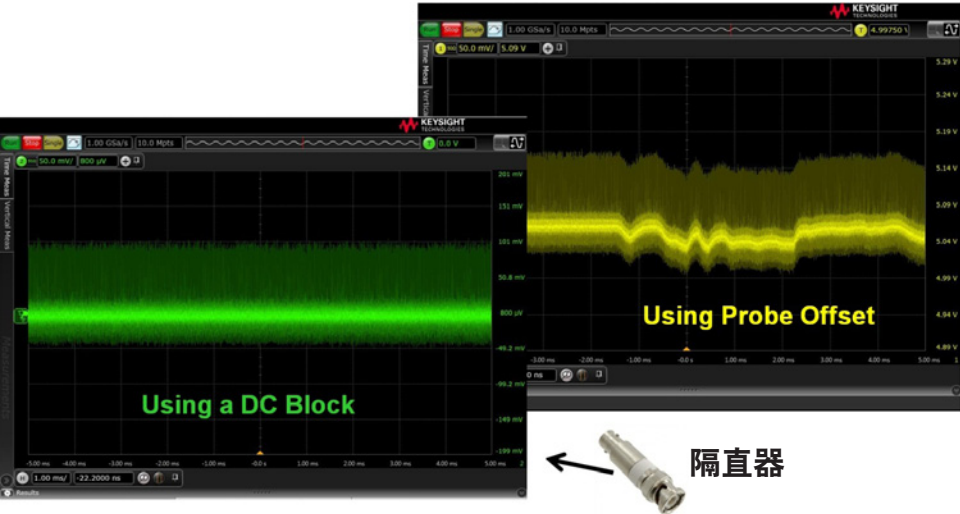


图 5. 显示了直流电源使用隔直器测量噪声时出现的低频损耗，例如电源漂移或压缩

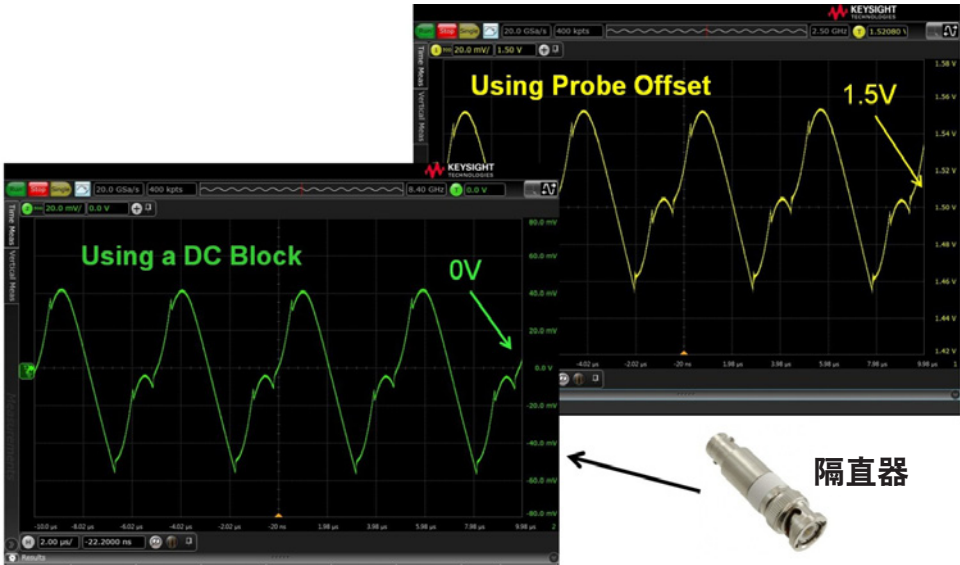


图 6. 显示了示波器使用隔直器进行测量时出现的直流损耗。另外，需要使用数字万用表来测量直流值，以便了解噪声所对应的直流值。



## 技巧6. 尽量减少电源加载示波器和探头的需要

每次使用示波器对系统进行探测时，示波器就能通过电气接触成为系统的一部分，但是这会使得被测系统的特性发生变化。这一过程被称为加载。我们要尽可能地减少这种加载。在直流电源测量过程中，一种常见的过度加载是在用户把一根 50 Ω 同轴电缆接到电源和 50 Ω 示波器输入端时出现。用户这样做是为了改进测量，因为 50 Ω 示波器输入端具有较低噪声，并且同轴电缆具有屏蔽和低电感接地连接；但这样做，示波器 50 Ω 端接将会加载 20 mA/V 电源。例如，3.3 V 电源探头将从示波器中得到 66 mA 负载。所以更好的办法是，使用一个直流输入阻抗为 50 kΩ 的 N7020A 电源探头。图 7 显示了这两种方法所得到的结果比较。首先，使用数字万用表来测试电源，结果是 3.31 V。其次，使用 N7020A 电源探头对电源进行探测，电压值保持不变 (3.31 V)。最后，把电源直接连接到 50 Ω 示波器输入端进行探测，电压值从 3.31 V 下降到了 3.25 V。但不是所有电源都会受到这种不利的影响。一些电源可以为驱动额外的负载提供足够的过剩供电能力，而其他的电源则不能。所以要小心，该负载可能会影响系统中的 PMIC( 电源管理 IC)。

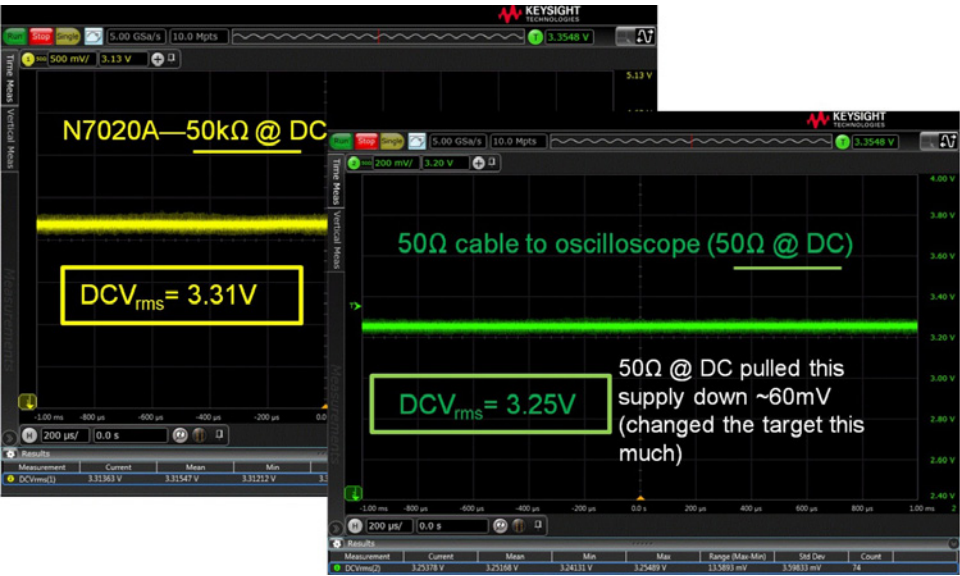


图 7. 探头加载到电源上所产生的影响。使用具有 50 kΩ 直流阻抗的 N7020A 电源探头来探测一个 3.3 V 电源，再通过直接连接 50 Ω 示波器输入端对同一个电源进行探测。

## 技巧 7. 使用频域分析

示波器内置的 FFT 功能可以让您观察频域中的信号，有助于识别电源中的噪声源。

在本例中，我们使用开关型直流 - 直流转换器把电源电压从 5 V 转换到 3.3 V。这个转换器在 2.8 MHz 频率上工作。有一个 10 MHz 时钟和一个 125 MHz 时钟运行在印刷电路板的其他位置。借助前面介绍的几个技巧，我们将使用衰减比 1:1 的 Keysight N7020A 电源探头，施加 3.3 V 的探头偏置，把带宽限制在 500 MHz，以便测量 3.3 V 电源上的噪声。探头连接到一台是德科技 S 系列示波器。图 8 显示了时域中的测量结果。我们在时域中可以看到一个周期为 360 ns 左右的信号，该信号是转换器在 2.8 MHz 频率上的残留，但是这不能表明 10 MHz 和 125 MHz 时钟是导致 3.3 V 电源产生噪声的根源。

图 9 显示了在频域中的相同数据。我们使用 FFT 功能创建了两个能覆盖不同频率范围的窗口，这样可以清楚地看到 2.8 MHz 频率上出现了峰值。该频率可以关联开关型转换器的频率，后者会在 10 MHz 和 125 MHz 频率上出现峰值，代表着上面两个时钟的噪声耦合。可以在观察时域的同时查看频域中的噪声，进而更深入地分析噪声源。

### 示波器 FFT 的考虑因素

示波器在每次触发时受到存储器容量和采样率的限制，只能捕获有限时间的波形。FFT 无法“看到”小于示波器时间捕获窗口倒数的输入信号的频率。使用 FFT 分析的最低频率可由公式  $1/[1/(\text{采样率}) \times (\text{存储器深度})]$  计算。为了在 FFT 中查找可疑的噪声源，必须把存储器深度设置成能够捕获足够多的样本。例如，如果开关电源的工作频率为 33 KHz，则需要捕获  $1/(33 \text{ KHz})$  或 30 ms 的信号活动。采样率为 20 GSa/s 时，要求存储器有 600,000 个点。FFT 通常只以屏幕上显示的数据速率运行。

技巧7. 使用频域分析（续）

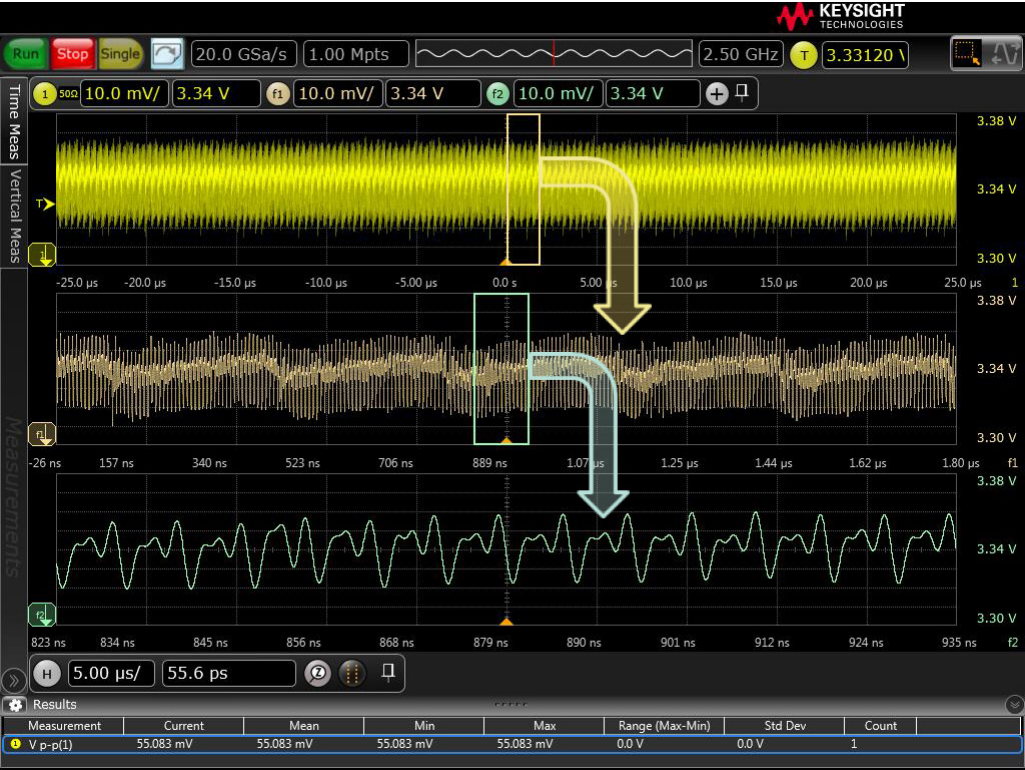


图 8. 3.3 V 直流电源的时域视图。放大屏幕中间的轨迹，可以看到 2.8 MHz 切换器的残留信号。通过放大屏幕下方的轨迹来查看细节，这不能表明 10 MHz 和 125 MHz 时钟是导致电源产生噪声的根源。

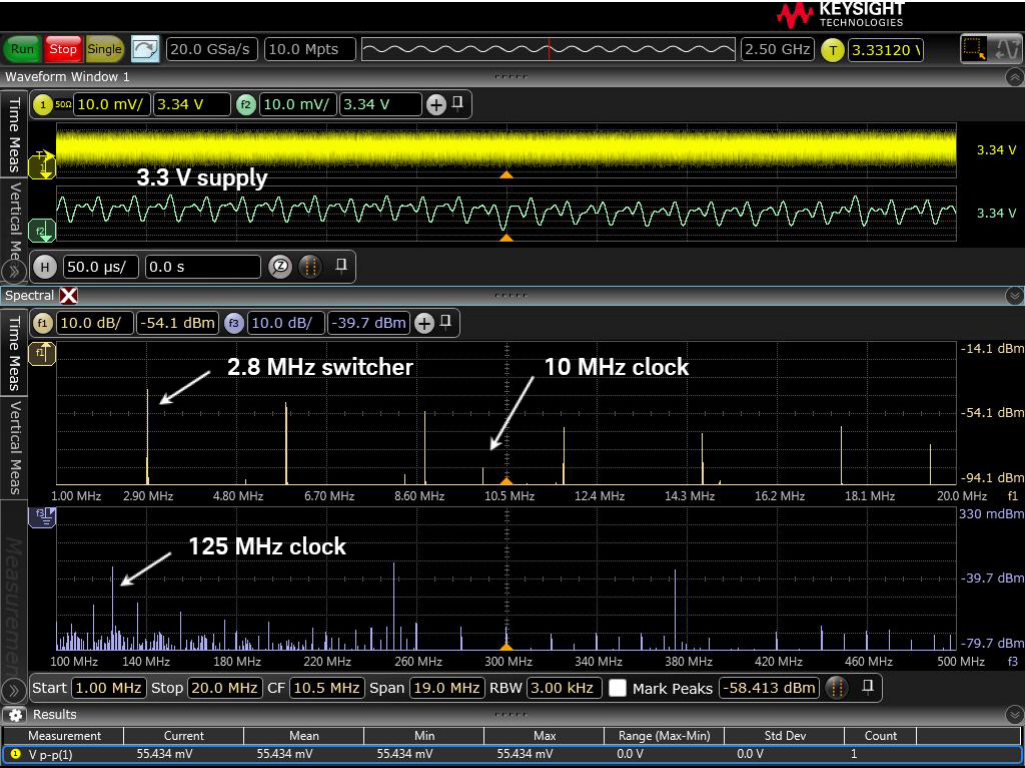


图 9. 使用 FFT 功能来确认 2.8 MHz 切换器、10 MHz 和 125 MHz 噪声可以导致 3.3 V 电源产生噪声。



## 技巧8. 利用触发来查看和测量电源噪声中的信号分量

触发功能可以帮助用户查看和测量电源中的噪声分量。这些噪声分量已耦合到了电源，并与系统中的其他组件有相位相干关系。在演示中，我们将使用“技巧 5”介绍的测量系统（具有偏置功能和带宽限制的 N7020A 探头，与一台 S 系列示波器连接），并针对一个 2.8 MHz 开关式稳压器（为系统提供 3.3 V 电源和 10 MHz 时钟）进行深入分析。图 10 给出了测量结果。通过使用 FFT 功能，我们可以看到一个 2.8 MHz 时钟以及谐波，10 MHz 频率上的峰值代表这个时钟。由此我们可知，该时钟把噪声耦合到了 3.3 V 电源。现在，我们将要触发这个时钟，再打开平均值功能。通过这步操作，平均值功能将会消除所有随机噪声以及与时钟不相干的其他信号分量。最终只保留与 10 MHz 时钟相干的电源噪声。如图 11 所示。

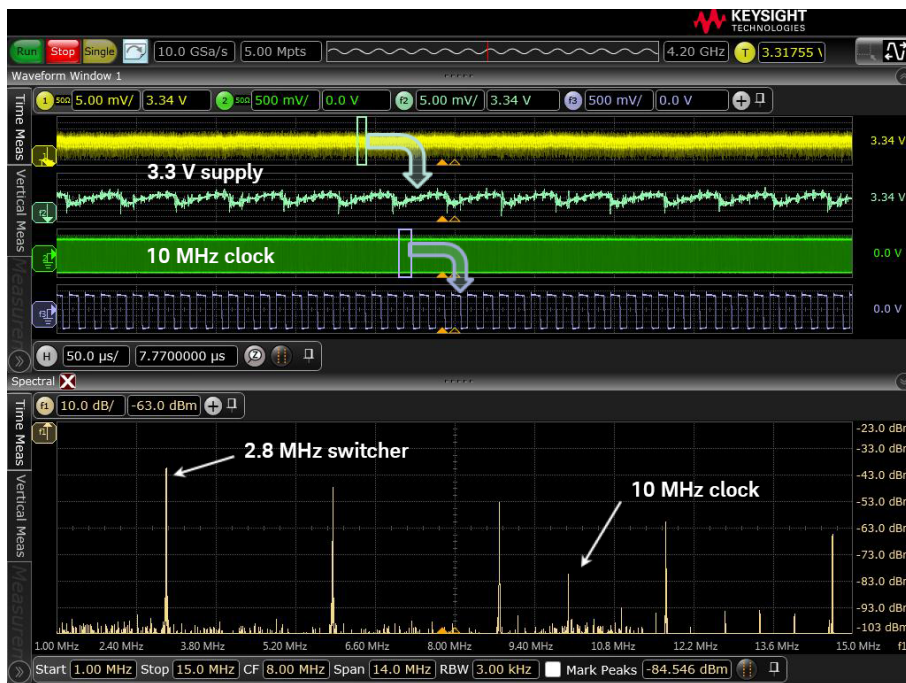


图 10. 在目标系统中，3.3 V 电源和 10 MHz 时钟的测量结果。使用 FFT，我们可以确定 10 MHz 时钟是 3.3 V 电源的噪声源。



图 11. 触发这个 10 MHz 时钟并打开平均值功能，可以消除所有随机噪声以及与时钟不相干的信号。所生成的视图显示了与 10 MHz 时钟相关的电源噪声。

## 技巧9. 拥有足够的带宽

正如我们在“技巧 2”中讨论的，限制测量带宽的目的是为了尽可能地减少电源噪声。用户可能面临一个虽然相似却截然相反的测量陷阱——因为他们没有足够的测量带宽，所以将会丢失高频噪声和瞬态噪声，从而对系统内部时钟和数据产生不利影响。时钟和数据所形成的切换电流可以产生高频电源噪声。同样地，这些相同的设备很容易受到高频电源噪声的干扰。在许多现代系统中，这种噪声需要使用 1 GHz 以上的带宽才能观测到，所以用户有必要选择一款带宽充足的探头。图 12 比较了使用常用的 35 MHz 1:1 探头和 2 GHz N7020A 探头对 1.5 V DDR3 存储器上的电源噪声进行测量所得到的结果。这表明，带宽更高的探头能够轻松地捕获高频噪声，这些噪声会给许多数字系统带来困扰。

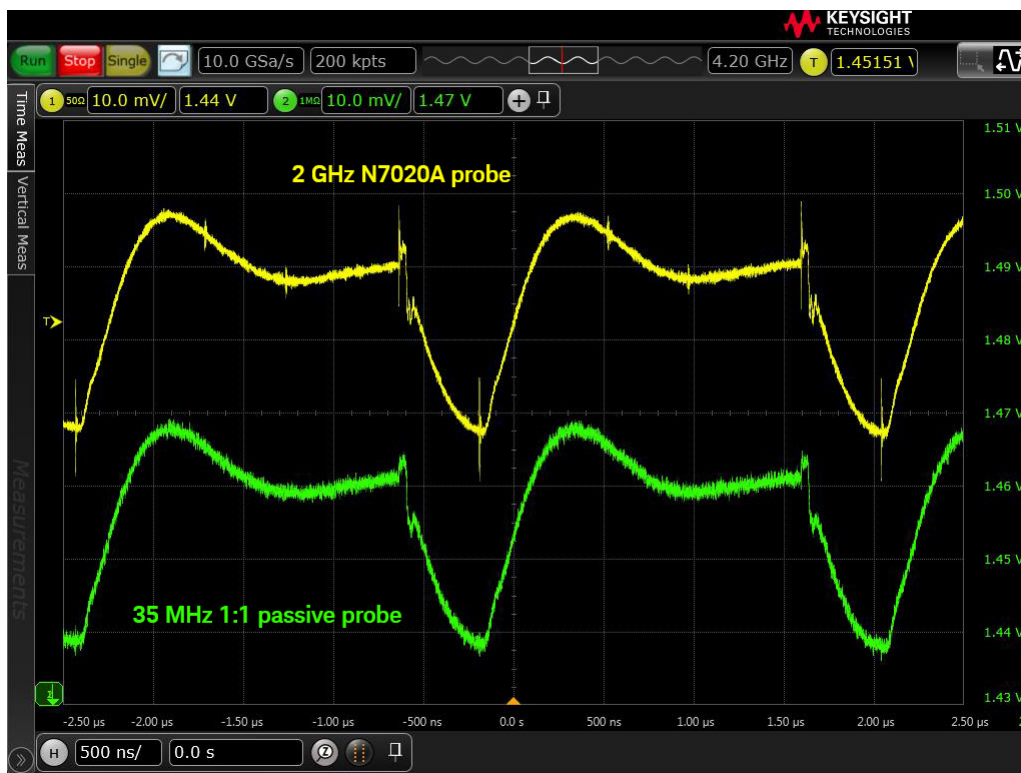


图 12. 比较了使用 35 MHz 1:1 探头和 2 GHz N7020A 电源探头对 1.5 V DDR3 存储器上的电源噪声进行测量所得到的结果。带宽较低的探头会丢失高频噪声和峰值，给高速数字系统带来了挑战。



## 技巧 10. N7020A 电源探头

借助前面介绍的那些技巧，用户能够在电源噪声测量过程中尽量减少示波器测量系统噪声，并能识别电源中的噪声源。这些技巧如果与专为电源噪声测量而设计的工具结合在一起，将发挥更大的作用。例如，图 13 所示的 N7020A 电源探头（同样也用于前面提到的几个实例）是业界首个专为测量直流电源噪声而设计的探头。该探头具有 1:1 衰减比（见“技巧 3”）和  $\pm 24\text{ V}$  偏置（见“技巧 4”），可以连接到  $50\ \Omega$  示波器输入端（见“技巧 1”）。探头使用 2 GHz 带宽来捕获可能导致时钟和数据抖动的高频噪声和瞬态噪声（见“技巧 7”）。与 Keysight Infiniium S 系列示波器结合使用时，如果不需要全 2 GHz 带宽，那么该探头就可以限制其带宽（见“技巧 2”）以便减少噪声。

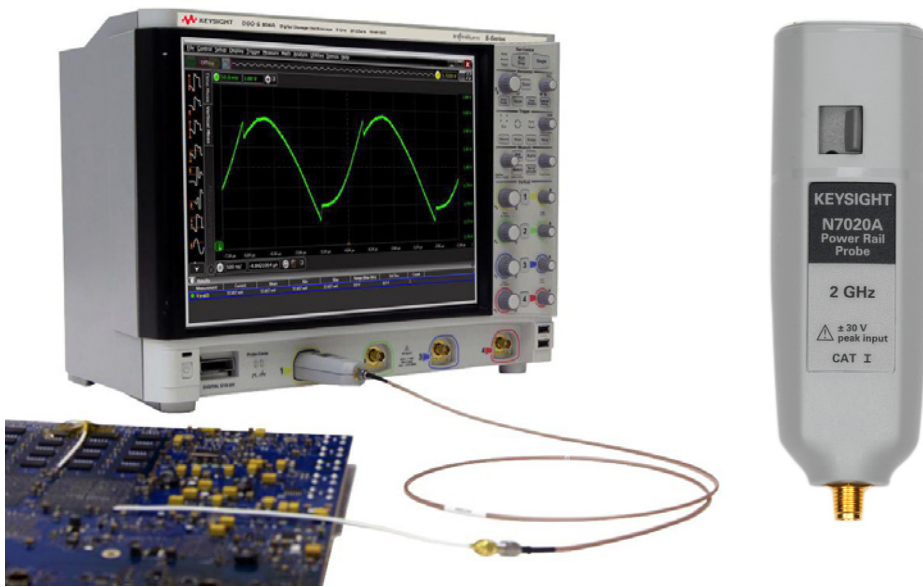


图 13. N7020A 电源探头（右）是专为测量电源噪声而设计的探头，可以与各种不同的是德科技示波器结合使用，包括 S 系列高清晰度示波器（左）。

## 特征和技术指标 : N7020A 电源探头

	描述
(“技巧 9”)	探头带宽 (-3 dB)
	2 GHz
(技巧 “3”)	衰减比
	1:1
(技巧 “4”)	偏置范围
	± 24 V
(技巧 “6”)	输入阻抗 (直流)
	50 kΩ ± 2%
	有源信号范围
	± 850 mV 偏置电压
	探头噪声
	已连接示波器的噪声增加 10%
	探头类型
	单端
	随附配件
	N7021A – 同轴探头前端
	N7022A – 主电缆
	最大无损输入电压
	± 30 V( 直流 + 交流峰值 )
(技巧 “1”)	输出阻抗
	50 Ω
	环境工作温度
	探头适配夹: 0 至 40° C
	N7021A 主电缆, N7022A 同轴电缆前端:
	0 至 85° C

## 技巧和技术汇总

- 技巧 1: 使用 50 Ω 示波器输入端——示波器通常具有最低的噪声，通过执行空值测量来测量电源噪声，可以让您了解您的示波器测量系统有多少噪声。
- 技巧 2: 使用有限的测量带宽。
- 技巧 3: 选择衰减比尽可能低的探头——理想选择是 1:1 探头。
- 技巧 4: 使用探头偏置功能来放大查看信号。
- 技巧 5: 正确地使用隔直器。
- 技巧 6: 注意：示波器 50 Ω 端接 ( 直流 ) 会加载您的电源。
- 技巧 7: 使用 FFT 进行深入分析。
- 技巧 8: 触发可疑的干扰源，并使用平均值法减少无关噪声。
- 技巧 9: 使用足够的带宽来捕获令人困扰的瞬态和噪声。
- 技巧 10: 充分利用 N7020A 电源探头。

**myKeysight**

myKeysight  
[www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)  
个性化视图为您提供最适合自己的信息！



### 3 年保修

[www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty](http://www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty)  
是德科技卓越的产品可靠性和广泛的 3 年保修服务完美结合，从另一途径帮助您实现业务目标：增强测量信心、降低拥有成本、增强操作方便性。



### 是德科技保证方案

[www.keysight.com/find/AssurancePlans](http://www.keysight.com/find/AssurancePlans)  
5 年的周密保护以及持续的巨大预算投入，可确保您的仪器符合规范要求，精确的测量让您可以继续高枕无忧。



[www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)  
Keysight Technologies, Inc.  
DEKRA Certified ISO 9001:2008  
Quality Management System

### 是德科技渠道合作伙伴

[www.keysight.com/find/channelpartners](http://www.keysight.com/find/channelpartners)  
黄金搭档：是德科技的专业测量技术和丰富产品与渠道合作伙伴的便捷供货渠道完美结合。

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息，请与是德科技联系。如欲获得完整的产品列表，请访问：[www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)

### 是德科技客户服务热线

热线电话：800-810-0189、400-810-0189  
热线传真：800-820-2816、400-820-3863  
电子邮件：[tm\\_asia@keysight.com](mailto:tm_asia@keysight.com)

### 是德科技(中国)有限公司

北京市朝阳区望京北路3号是德科技大厦  
电话：86 010 64396888  
传真：86 010 64390156  
邮编：100102

### 是德科技(成都)有限公司

成都市高新区南部园区天府四街116号  
电话：86 28 83108888  
传真：86 28 85330931  
邮编：610041

### 是德科技香港有限公司

香港北角电器道169号康宏汇25楼  
电话：852 31977777  
传真：852 25069233

### 上海分公司

上海市虹口区四川北路1350号  
利通广场19楼  
电话：86 21 26102888  
传真：86 21 26102688  
邮编：200080

### 深圳分公司

深圳市福田区福华一路6号  
免税商务大厦裙楼东3层3B-8单元  
电话：86 755 83079588  
传真：86 755 82763181  
邮编：518048

### 广州分公司

广州市天河区黄埔大道西76号  
富力盈隆广场1307室  
电话：86 20 38390680  
传真：86 20 38390712  
邮编：510623

### 西安办事处

西安市碑林区南关正街88号  
长安国际大厦D座501  
电话：86 29 88861357  
传真：86 29 88861355  
邮编：710068

### 南京办事处

南京市鼓楼区汉中路2号  
金陵饭店亚太商务楼8层  
电话：86 25 66102588  
传真：86 25 66102641  
邮编：210005

### 苏州办事处

苏州市工业园区苏华路一号  
世纪金融大厦1611室  
电话：86 512 62532023  
传真：86 512 62887307  
邮编：215021

### 武汉办事处

武汉市武昌区中南路99号  
武汉保利广场18楼A座  
电话：86 27 87119188  
传真：86 27 87119177  
邮编：430071

### 上海MSD办事处

上海市虹口区欧阳路196号  
26号楼一楼J+H单元  
电话：86 21 26102888  
传真：86 21 26102688  
邮编：200083