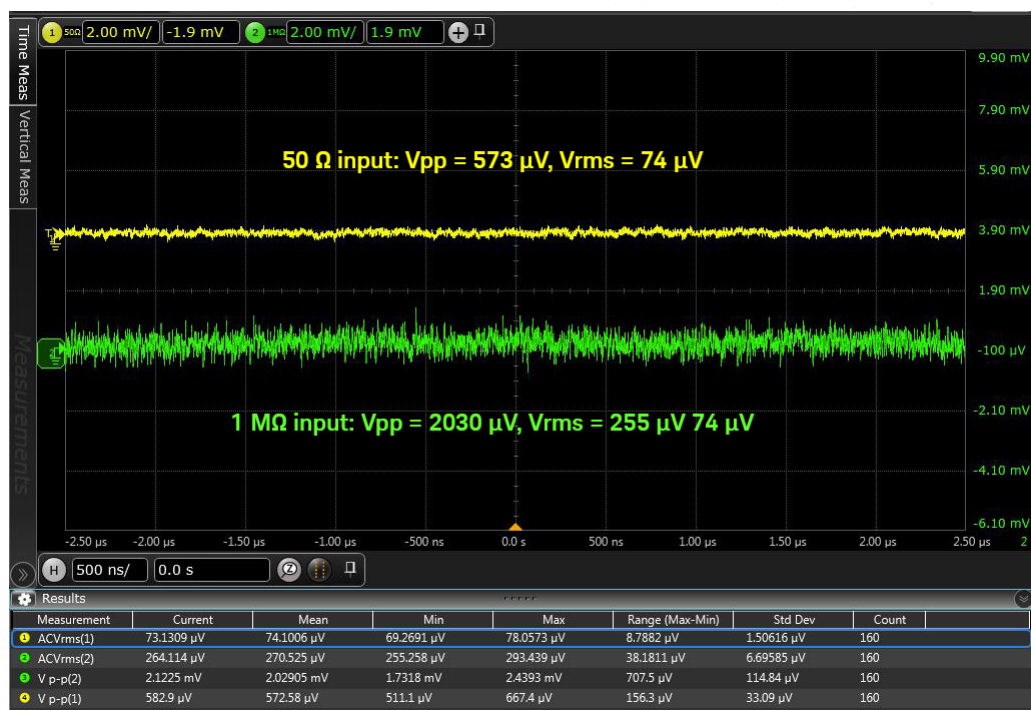


执行最出色的电源完整性测量



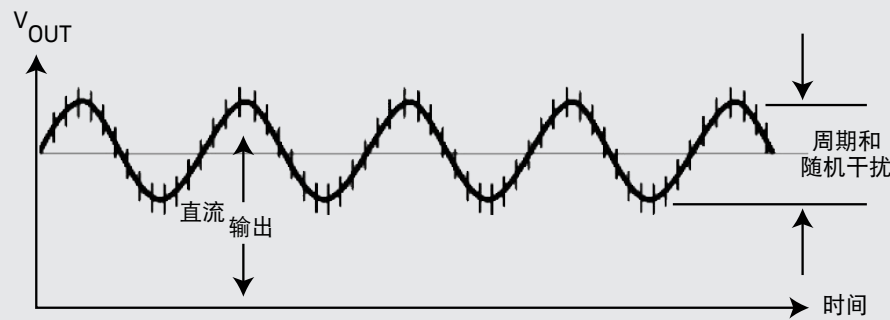
引言

数十年来，电子行业在摩尔定律的引领下飞速发展，产品的功能日益强大，特性日益丰富，让我们所有人都可以享受到更加现代化的生活。经济适用的微控制器呈现爆炸式增长，这意味着越来越多的器件（如家用电器、汽车、医疗设备、可穿戴设备、物联网、智能手机、云）在微控制器的控制下工作，提供更优异的性能和更多样化的特性。但是这些产品的设计人员也面临着一项挑战，即必须为产品中的器件和电路供应“纯净”的电力。为此，业界投入了大量的时间、人力和设备，专注于设计现代产品中的配电网（PDN）。设计人员通常使用实时示波器来测量这些产品中的直流电源。本应用指南介绍了测量和分析直流电源的实用技巧，并讨论了如何选择和评测在直流电源测量中使用的工具。

PDN 和电源完整性

电源完整性 (PI) 是电子行业中的一个常用术语，它指的是对系统中的电源如何有效地为负载供应和转换电力进行分析。从电源到负载的无源元件和互连（含半导体封装）构成配电网（PDN），电源输出的电力通过这个 PDN 供应给负载。电源完整性分析通常包括从直流到数千兆赫的测量。常见的电源完整性测量有：

- PARD — 周期和随机干扰，这个术语在业内广泛使用，它的定义为在所有其他参数保持不变的情况下，直流输出与其平均值的偏差。它衡量的是直流输出经过调理和滤波电路之后仍然残留的多余交流和噪声分量，用有效值（RMS）或峰峰值表示。在 20 Hz 至 20 MHz 的带宽范围内，峰峰值测量更常用。在 20 Hz 以下发生的类似 PARD 的变化通常称为漂移。



- 负载响应 — 指的是静态或瞬态负载，它主要衡量在预定负载条件下，电源输出保持在指定阈值内的能力。它通常包括测量电源的瞬态恢复时间，也就是当负载发生变化时，电源从瞬态恢复到预定义的稳定频段内所需的时间。
- 噪声 — 指直流电源与其标称值的偏差。噪声可能包括随机噪声（如热噪声）和杂散信号（如相邻电路的开关耦合或 PARD 和负载响应）。

问题

目前正在设计的后继几代产品中，元器件密度和速度越来越高，而“纯净”电力的重要程度也随之升高。直流电源偏差可能是造成数字系统中的时钟和数据抖动的最主要原因。电源到数字器件的压降可能会减少经过该器件内选通电路的传播时延，从而导致时序裕量减少甚至是比特位失效。为了解决这个问题，电源容限缩小到 5% 甚至更低。

由于数字器件的开关速度和转换速率大幅升高，所以开关噪声进入电源的可能性也随之增加。这种噪声会出现在开关电流的带宽上，并且很容易就超过 1 GHz。

降低数字系统中的信号幅度可加快开关速度，但同时也要求降低电源的噪声裕量。

提高效率或降低功耗是要求更严苛控制电源容限的另一个原因。如果电源的容限以前是 10%，现在降低到了 5%，那么设计的功耗也可以降低最多 5%。

接下来，设计人员面临的挑战是测量驻留在直流电源上的更小、更快的交流信号。

直流电源噪声

在理想情况下，直流电源不会产生任何噪声。那么噪声是从何而来的呢？

电源上不可避免会产生热噪声，也就是由电子热扰动所产生的电子噪声，它会形成简单的高斯噪声。高斯噪声通常不是最大的噪声来源。

直流电源上噪声的主要来源是电源本身的开关噪声以及电路中器件的开关电流所引起的噪声，开关会产生瞬态电流需求。这种因为开关事件而产生的噪声在时间上可能是随机出现的，但是它们往往趋向于与系统中的时钟保持一致。

我们可以将直流电源上的噪声视为电源开关噪声和开关电流噪声等“信号”的组合，并且它们是叠加在直流电源上的，这样测量和分析起来更加容易。

测量挑战

由于直流电源噪声的带宽很宽，因此在测量这一噪声时，用户往往更喜欢使用示波器，因为示波器不仅具有非常宽的带宽，而且简单易用，容易获得。示波器还可以对噪声的成因提供独特的分析视角，请看下面的例子。

实时宽带示波器和它们配备的探头都有一定的本底噪声。如果示波器和探头的噪声幅度与直流电源的噪声相似，那么会让直流电源噪声测量变得非常麻烦。

动态范围是测量直流电源噪声的另一个挑战。您关注的电源输出位于某个直流电平上，而想要测量的电源输出上的小交流信号（噪声）远远小于这个直流电平。您希望放大交流噪声，将示波器设置到更灵敏的量程以观察噪声的细节，同时让示波器继续维持较低的噪声电平（参见右栏的“关于示波器噪声的小经验”部分）。取决于所使用的示波器和探头，您可能无法完全做到这一点。

技巧 1. 选择噪声最低的示波器测量路径

显然，如果要测量直流电源上的噪声，您肯定希望示波器测量系统的噪声尽量小，以免影响您的测量结果。遗憾的是，许多用户正是在这里感到迷茫，他们不知道可能有更好的选择。示波器测量路径由所使用的示波器和示波器输入端子（50 Ω 或 1 MΩ）组成。

对于许多示波器而言，50 Ω 输入路径的噪声比 1 MΩ 路径低。下面的图 1 显示了 Keysight DSOS054A 高清示波器（500 MHz，4 通道）的 50 Ω 输入和 1 MΩ 输入的基线噪声。

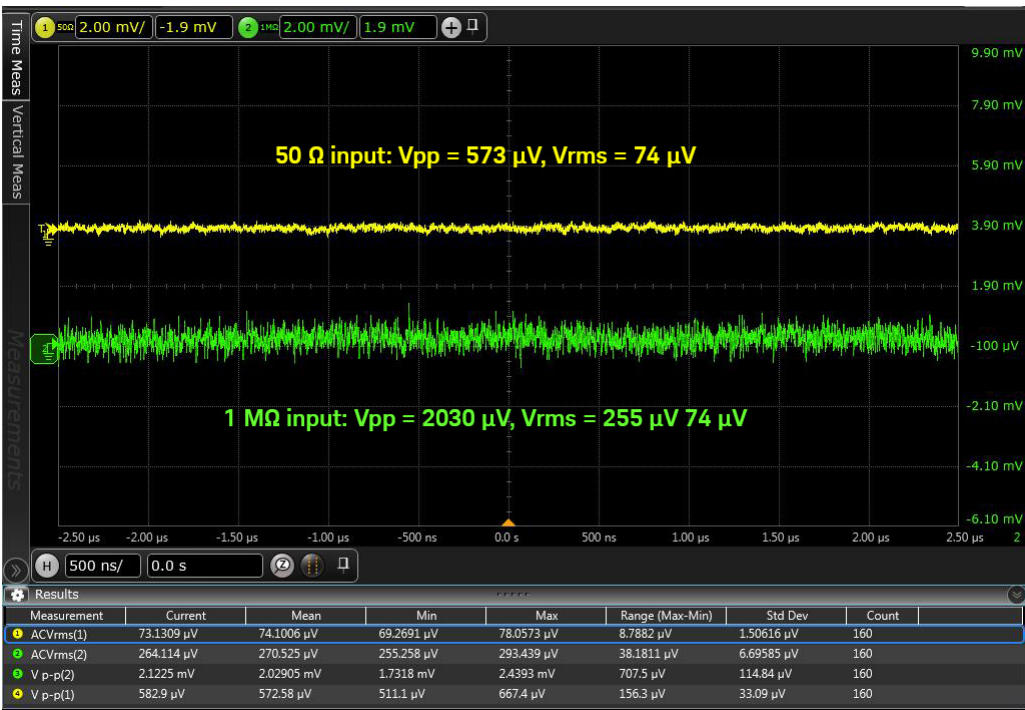


图 1. Keysight DSOS054A 的 50 Ω 和 1 MΩ 示波器输入的基线噪声比较。

这种类型的测量通常称为指零测量，是确定示波器测量系统基线噪声的一种测量。这是一种合理性校验，类似于在进行导通或电阻测量之前先将数字万用表上的引线短接一下的做法。您最好对整个示波器测量系统（包括探头）执行一次指零测量，这样可以确保示波器和探头适合用于您要执行的电源噪声测量。要进行指零测量的话，只需像进行电源噪声测量一样对示波器和探头进行配置，然后将输入端短接到地（或在差分探头上短接一下输入），即可开始测量噪声。

技巧 2. 通过限制带宽降低测量系统的噪声

带宽是不是越高越好？不一定。示波器和探头的噪声电压与频率有关。通过将使用的带宽限制为给定测量所需的带宽，我们可以减少测量中出现的示波器和探头噪声。我们以图 2 中显示的测量为例进行说明。在这些测量中，我们使用了 Keysight MSOS804A 示波器（8 GHz，10 位 ADC，20 GSa/s）和 N7020A 电源探头（2 GHz，1:1 衰减）来执行前面提到的指零测量。测量结果汇总在表 1 中。

表 1. 在不同带宽下得到的指零测量噪声结果

指零测量		
带宽	Vpp	Vrms
2 GHz	1,040 μ V	110 μ V
1 GHz	860 μ V	90 μ V
500 MHz	800 μ V	80 μ V
20 MHz	460 μ V	60 μ V



图 2. N7020A 电源探头和 S 系列示波器在不同带宽限值下的基线噪声。

技巧 3. 使用 1:1 衰减降低测量系统的噪声

示波器探头具有不同的衰减比。您可能最熟悉 10:1 无源探头。使用 10:1 探头的优势是它能让您测量超过示波器最大输入的信号。衰减的不利之处在于，衰减比越大，示波器噪声幅度相对于被测信号幅度就越大。详细信息请参见右栏的“关于示波器噪声的小经验”部分。

我们以图 3 中所所示的测量结果为例进行说明。使用 10:1 探头和 1:1 探头分别测量同一个信号，即 20 MHz 50 mV p-p 正弦波信号。两次测量的唯一区别是衰减比不同。1:1 探头测得的值为 52 mV p-p，而 10:1 探头测得的值为 65 mV p-p。较高的衰减比使得信噪比降低，所以测量值超过实际值至少 25%。由此可以看出，在测量小信号时，示波器和探头噪声可能对测量结果有很大影响，此时最好使用尽量小的衰减比。

关于示波器噪声的小经验

参见下面的方框图。示波器和探头系统中的噪声主要来自两个方面。示波器中的输入放大器和缓冲电路会产生一些噪声，有源探头的探头放大器也会产生噪声。

示波器使用衰减器来改变垂直标度系数。当信号经过衰减后，相对来说示波器的噪声就变大了。当衰减器设置为大于 1:1（最灵敏的示波器硬件量程）时，噪声看起来相比示波器输入端口处的信号成比例放大。例如，在未插入衰减（1:1）时，示波器的基本灵敏度为 5 mV/格。在这个例子中，我们假设示波器在 5 mV/格时的本底噪声为 500 μ Vrms。如果我们将灵敏度改为 50 mV/格，示波器会在输入端串联一个 10:1 的衰减器。此时的噪声相对输入来说，就像是 5 mVrms 一样（500 μ V*10）。如果将配有衰减器的探头连接到示波器，会发生同样的情况。示波器的噪声看起来相对探头输入端的信号成比例放大，放大倍数等于衰减比例。

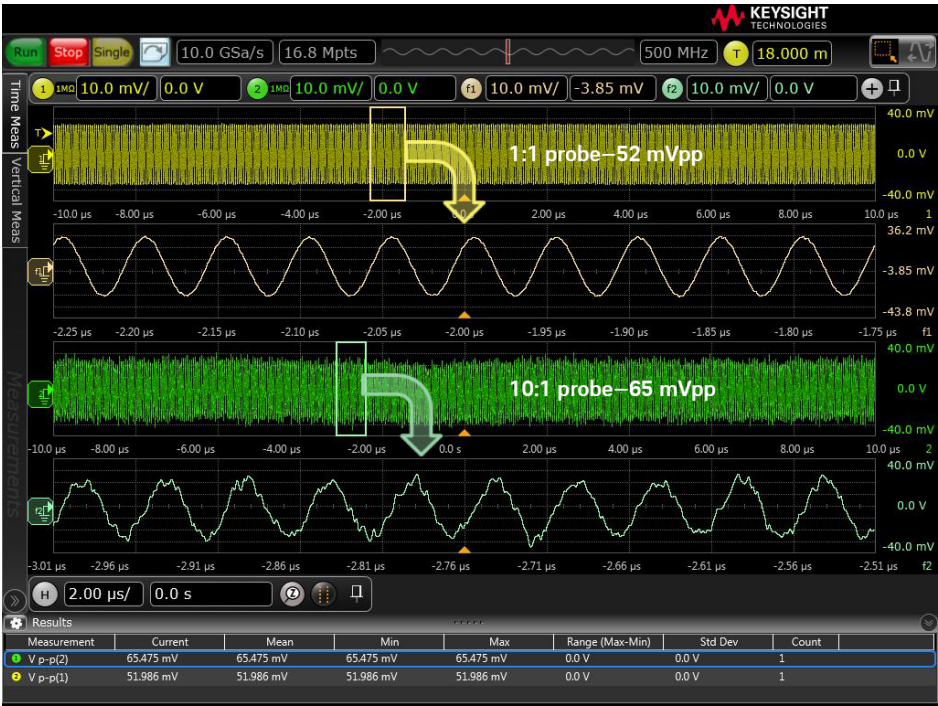
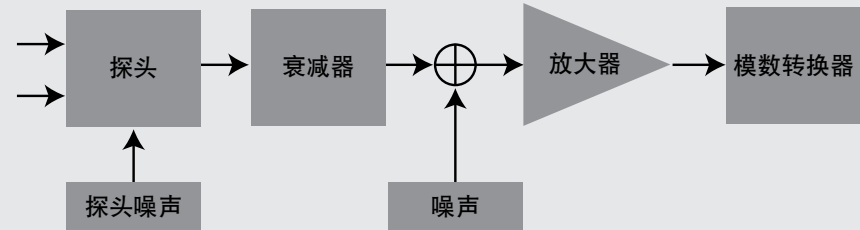


图 3. 使用 1:1 和 10:1 探头分别测量 50 mVpp 正弦波时的噪声比较。

技巧 4. 使用探头偏置增加动态范围

探头偏置是有源探头的一项功能,它使用户可以去除被测信号中的直流内容。尤其是在直流信号上有较小的交流信号时(比如测量电源噪声时),探头偏置更加重要。图 4 显示了分别使用和不使用探头偏置时,对 1.5 V 电源上的噪声进行测量的结果。其中的差异是因为示波器在较大 V/格设置下应用了衰减。

注: 提供偏置的大多数有源探头也具有超过 1:1 的衰减比,这与降低示波器测量系统噪声的目标相悖。有一些探头(例如 Keysight N7020A 电源探头)能够同时提供偏置功能和 1:1 衰减比。N7020A 的偏置范围为 ± 24 V。



图 4. 使用和不使用探头偏置时测量 1.5 V 直流电源的噪声。

技巧 5. 了解直流阻断器的缺点

直流阻断器是一种专用的大电容，可以插入到信号与示波器输入端之间。直流阻断器的用途是阻断或去除信号中较大的直流分量，以便将示波器设置到更灵敏的量程，这一测量原理与前文中关于使用探头偏置的原理是一样的。直流阻断器的缺点在于它除了阻断直流内容之外，还会阻断低频交流内容，例如漂移或电源压缩。图 5 显示了分别使用直流阻断器和具有探头偏置功能的 N7020A 电源探头对 5 V 直流电源进行测量的比较。从这个例子中，您可以看到使用直流阻断器进行的测量会去除低频电源漂移并可能产生误导。另外，由于直流信息被阻断，测量结果中没有包括这一信息，因此无法通过示波器确定存在电源噪声的直流值。想要获取这个信息，还需要额外使用数字万用表或进行类似的测量。为了说明这一点，图 6 对比了分别使用直流阻断器和具有偏置功能的 N7020A 电源探头对 1.5 V DDR3 电源进行测量的结果。

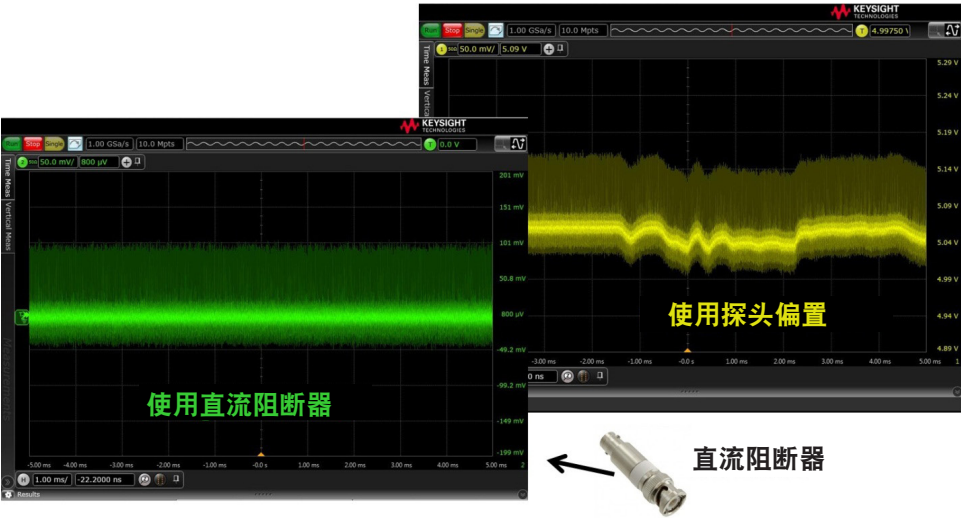


图 5. 使用直流阻断器测量直流电源噪声时低频内容（如压缩的电源漂移）的损失。

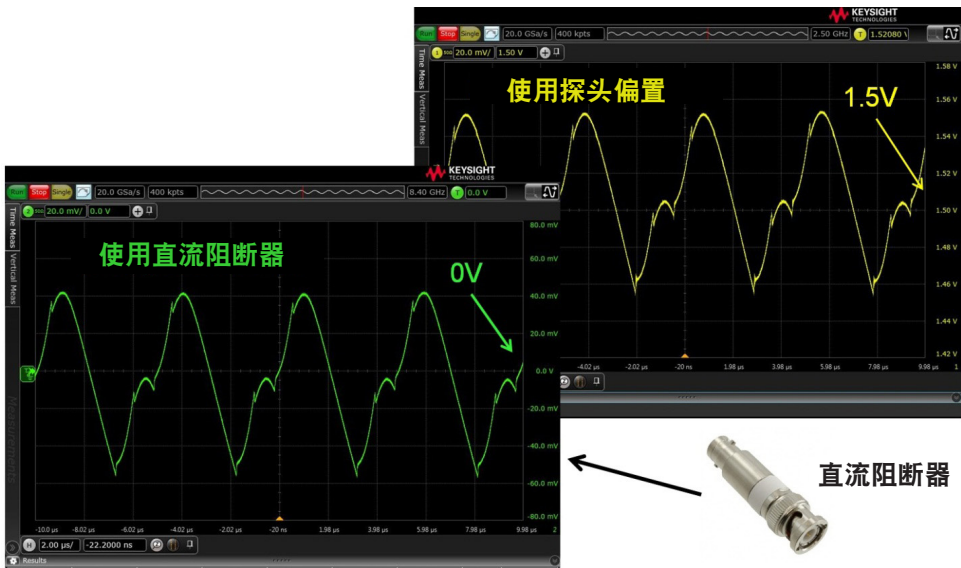


图 6. 使用直流阻断器时示波器测量结果不包含直流内容。因此，要知道存在噪声的直流值是多少，需要采取额外的步骤（如使用数字万用表测量直流值）。

技巧 6. 尽量减小示波器和探头对电源产生的负载效应

当示波器对系统进行探测时，因为发生了电气接触，它就相当于变成了系统的一部分，因而会改变被测系统的特性。这种作用称为负载效应，而我们的目标是尽可能地减少这种影响。在测量直流电源时，如果用户将 50 Ω 同轴电缆连接到电源和示波器的 50 Ω 输入端，那么很容易会产生过大的负载效应。用户这样做的出发点是好的，选择 50 Ω 示波器输入是因为其噪声较低，选择同轴电缆是因为它能够提供屏蔽和低接地电感，但示波器的 50 Ω 端子将对电源产生 20 mA/V 的负载效应。例如，使用这种方式探测 3.3 V 电源，示波器将给其增加 66 mA 的负载。更好的办法是使用直流输入阻抗达到 50 kΩ 的探头，比如说 N7020A 电源探头。图 7 显示了这两种方法的比较。首先用数字万用表测量电源，结果为 3.31 V。然后用 N7020A 电源探头测量电源，测量结果没有变化，仍然是 3.31 V。最后，将电源直接连接到 50 Ω 示波器输入端，用示波器对电源进行探测，电源电压测量结果从 3.31 V 下降到 3.25 V。并非所有电源都会受到这样的不利影响。有些电源的能力足够强大，可以驱动这个额外负载，而有些电源则不行，或者这个额外的负载可能会影响到系统中的 PMIC（电源管理 IC）特性，因此要格外注意。

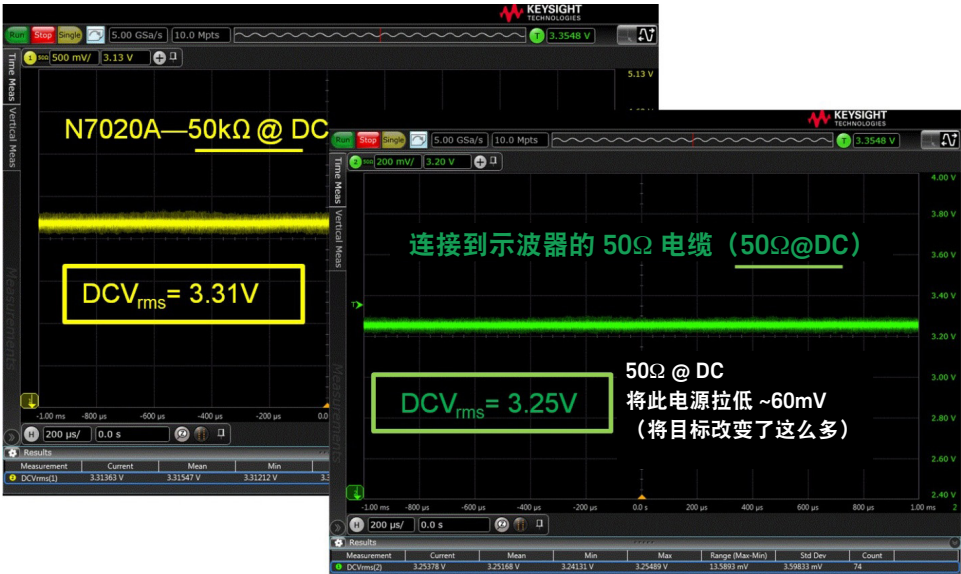


图 7. 探头负载效应对电源的影响。使用直流阻抗为 50 kΩ N7020A 电源探头探测 3.3 V 电源，再通过直接连接到示波器的 50 Ω 输入端探测同一电源。

技巧 7. 使用频域进行分析

使用示波器的 FFT 功能在频域中查看信号，可能对识别电源噪声的来源很有帮助。

在这个示例中，我们有一个开关直流/直流转换器，它可将 5 V 转换为 3.3 V。转换器的工作频率为 2.8 MHz。在印刷电路板上还有一个 10 MHz 时钟和一个 125 MHz 时钟在运行。我们利用之前的技巧，使用衰减比为 1:1 的 Keysight N7020A 电源探头，应用 3.3 V 探头偏置，并将带宽限制在 500 MHz，经过这些设置后再来测量 3.3 V 电源的噪声。探头与 Keysight S 系列示波器相连。图 8 在时域中显示了这种测量的结果。从时域视图中，我们可以看到周期为 ~360 ns 的信号，这是 2.8 MHz 的残余，但 10 MHz 时钟和 125 MHz 时钟给 3.3 V 电源带来的噪声并不明显。

图 9 显示了同一数据的频域视图。在这个使用 FFT 的视图中，我们设置了两个不同的窗口，分别覆盖两个不同的频率范围。我们可以清楚地看到 2.8 MHz 处有一个峰值（它与开关转换器的频率有关），并且在 10 MHz 和 125 MHz 处都有一个尖峰，表明噪声与两个时钟耦合。除了时域之外，在频域中查看噪声也能让我们更深入地了解噪声的来源。

示波器中关于 FFT 的注意事项

示波器将根据存储器深度和采样率在每次触发上捕获有限时间的波形。FFT 无法“看到”输入信号中低于示波器时间捕获窗口倒数的频率，它能够分析的最低频率为 $1/[1/(\text{采样率}) \times (\text{存储器深度})]$ 。要在 FFT 中查看可疑的噪声源，应正确设置存储器深度，以便捕获足够多的样本。例如，如果您的开关电源工作频率为 33 kHz，那么您需要捕获 $1/(33 \text{ kHz})$ 或 30 微秒的信号活动才能在 FFT 中看到它。在 20 GSa/s 的采样率下，这将需要 600,000 点的存储器深度。FFT 通常只处理屏幕上显示的数据。

技巧 7. 使用频域进行分析 (续)

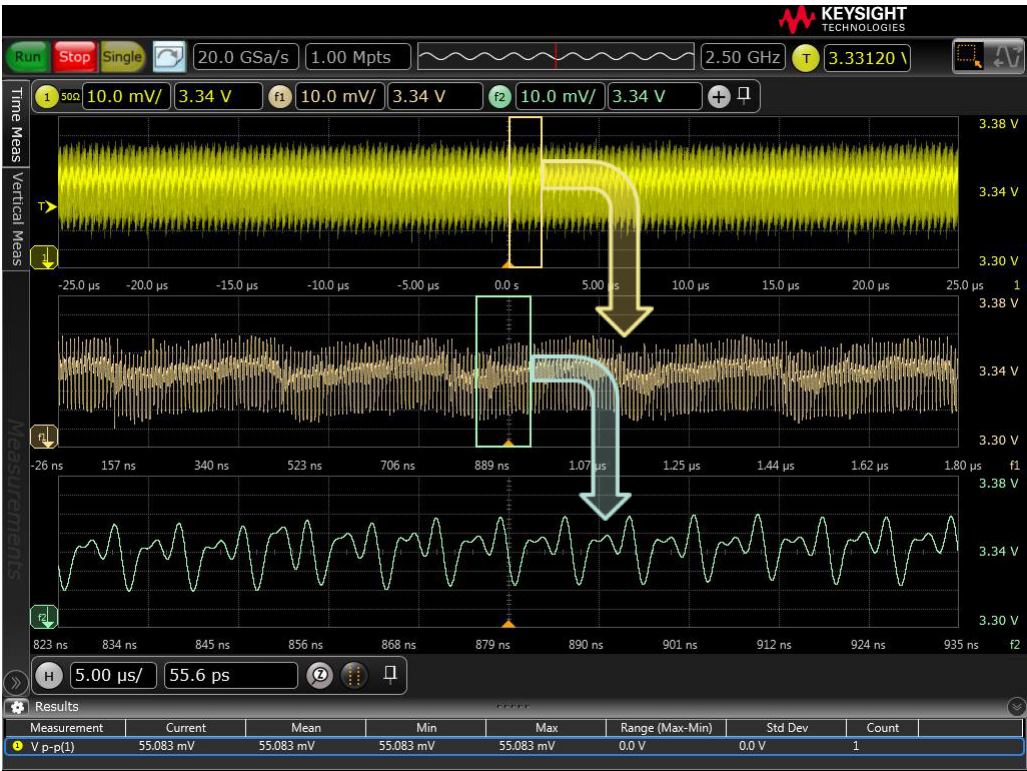


图 8. 3.3 V 直流电源的时域视图。2.8 MHz 转换器的残余部分可以在中间放大的迹线上看到。在底部放大的迹线中，10 MHz 和 125 MHz 时钟是产生噪声的主要来源，只不过看起来不太明显。

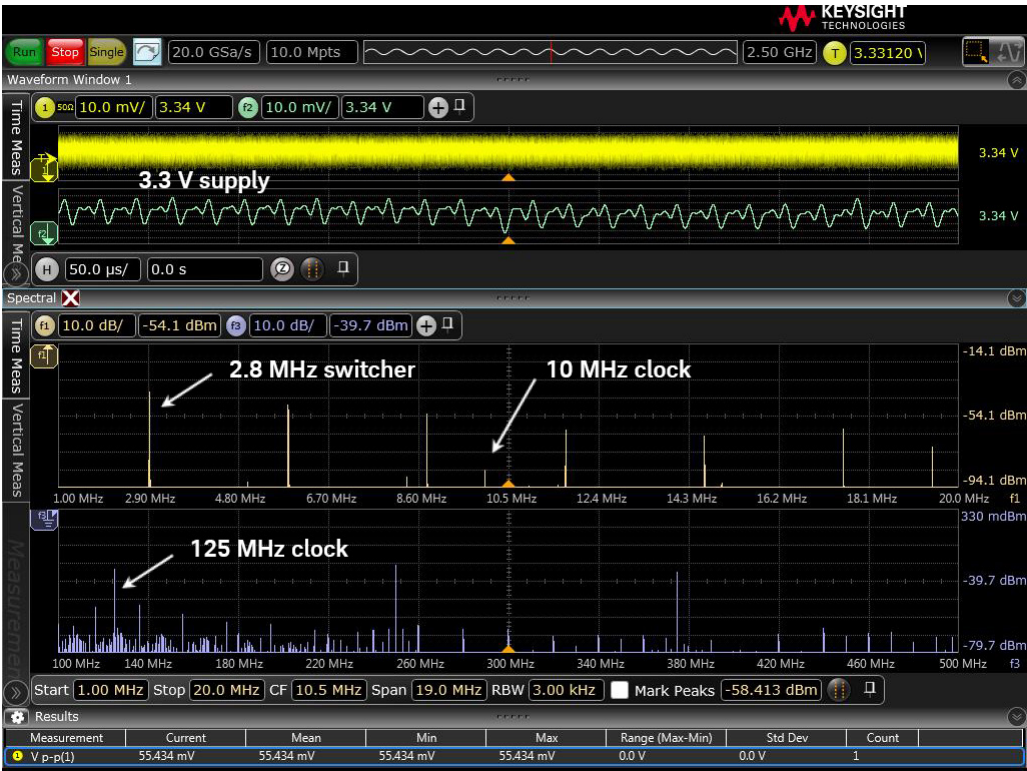


图 9. 利用 FFT 确定来自 2.8 MHz 转换器以及 10 MHz 和 125 MHz 时钟的噪声位于 3.3 V 电源上。

技巧 8. 使用触发查看和测量电源噪声中的信号分量

触发可以帮助呈现和测量电源噪声的分量，这些分量会与系统中其他元件的电源耦合，并与这些元件相位相干。为了证明这一点，我们将使用与技巧 5 中所述相同的测量系统（配有偏置功能和带宽限制的 N7020A 探头与 S 系列示波器相连），并使用 2.8 MHz 开关稳压器在系统中提供 3.3 V 和 10 MHz 时钟。图 10 显示了测量结果。我们可以在 FFT 中看到 2.8 MHz 时钟及其谐波，以及表示时钟的 10 MHz 尖峰。由此我们知道，时钟将噪声耦合到了 3.3 V 电源中。现在我们要触发时钟并开启平均功能。平均将消除所有随机噪声以及与时钟不相干的其他信号分量。最终得到的是与 10 MHz 时钟相关的电源噪声部分。图 11 对这个问题进行了解释。

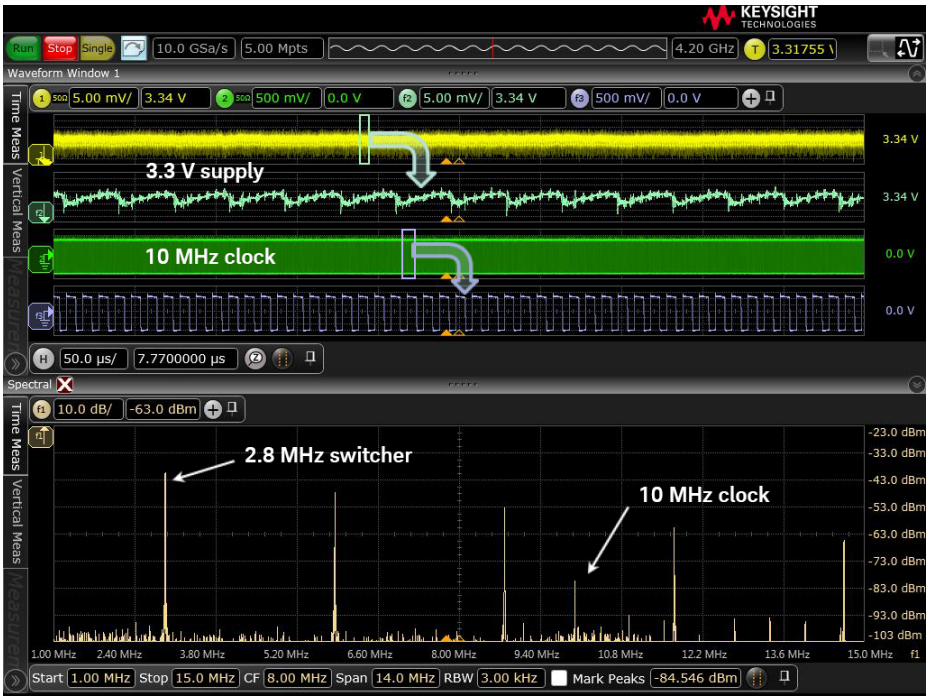


图 10. 目标系统中 3.3 V 电源和 10 MHz 时钟的测量结果。通过 FFT 我们可以验证 10 MHz 时钟是否在 3.3 V 电源上产生了噪声。



图 11. 基于 10 MHz 时钟进行触发并启用平均功能可消除所有随机噪声和与时钟不相干的信号。得到的结果是与 10 MHz 时钟相关的电源噪声。

技巧 9. 拥有足够的带宽

在技巧 2 中，我们讨论了将测量带宽限制到必要值以内，从而尽量降低当前任务的噪声。没有足够带宽执行任务的用户可能会陷入另一个类似但是恰好相反的误区——他们有可能无法探测高频噪声和瞬态，这可能同样会给系统中的时钟和数据带来负面影响。来自时钟和数据的开关电流可能会产生高频电源噪声，同样容易对这些器件产生影响。在许多现代化系统中，您可能需要 1 GHz 以上的带宽才能发现这种噪声，因此必须选择具有足够带宽的探头。图 12 显示了分别使用常见的 35 MHz 1:1 探头和 2 GHz N7020A 探头测量 1.5 V DDR3 存储器电源噪声的结果比较。该图显示带宽较宽的探头能够更准确地捕获高频噪声。在许多现代化数字系统中，这种噪声都是很难看到的。



图 12. 分别使用 35 MHz 1:1 无源探头和 2 GHz N7020A 电源探头测量 1.5 V DDR3 存储器电源噪声的结果比较。带宽较低的探头没有发现影响高速数字系统的高频噪声和尖峰。

技巧 10. N7020A 电源探头

前面提到的技巧可以帮助您在测量电源噪声时最大限度地降低示波器测量系统的噪声，并找到产生电源噪声的来源。这些技术与专门用于测量电源噪声的工具结合使用，甚至能够发挥更大作用。例如，图 13 所示（并且在前面的一些示例中使用过）的 N7020A 电源探头是第一款专门设计用于测量直流电源噪声的探头。该探头具有 1:1 衰减比（技巧 3）、± 24 V 偏置（技巧 4），并与 50 Ω 示波器输入相连（技巧 1）。它具有 2 GHz 带宽，可以捕获可能导致时钟和数据抖动的高频噪声和瞬态（技巧 7）。如果与类似 Keysight Infiniium S 系列这样的示波器配合使用，它可以在不需要完整 2 GHz 带宽时将带宽限制在必要程度（技巧 2），以便降低噪声。

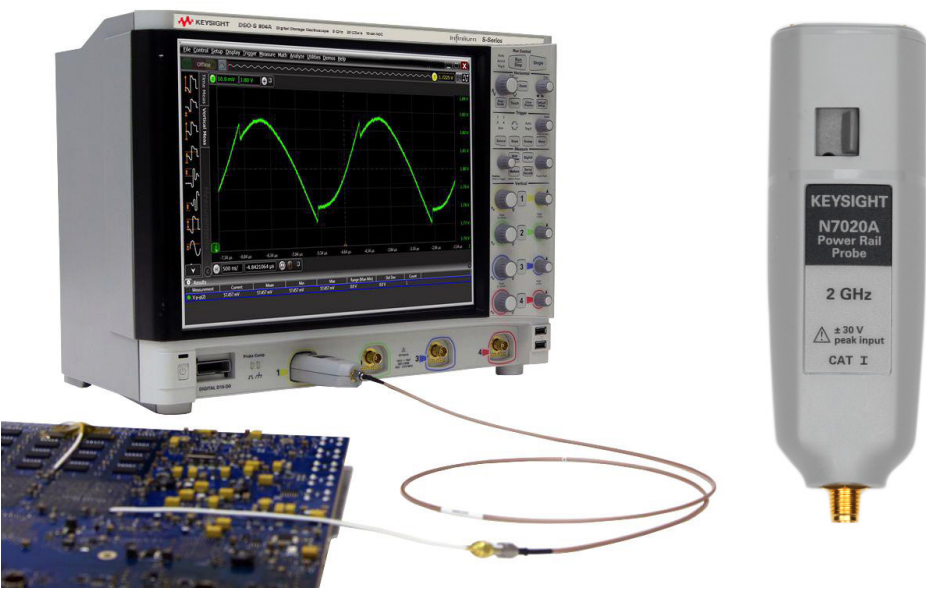


图 13. N7020A 电源探头（右）专为测量电源噪声而设计，可与各种是德科技示波器配合使用，包括 S 系列高清示波器（左）。

技术指标和特征：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)	直流输入阻抗	50 kΩ ± 2%
	有源信号范围	± 850 mV (偏置电压)
	探头噪声	连接的示波器噪声增加 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	±30V (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 同轴探头前端: 0 至 85°C

技巧和诀窍汇总

技巧 1: 使用 50 Ω 示波器输入 — 它的噪声通常最低，您可以从指零测量入手，先了解示波器测量系统有多大噪声，然后再进行电源噪声测量。

技巧 2: 只使用必要大小的带宽。

技巧 3: 尽量使用衰减比较小的探头，最好是 1:1 探头。

技巧 4: 使用探头偏置放大信号。

技巧 5: 如果选择了直流阻断器，使用起来一定要灵活。

技巧 6: 注意通过示波器的 50 Ω 端子（50 Ω 直流）连接时给电源带来的负载效应。

技巧 7: 使用 FFT 获得另一个分析视野。

技巧 8: 在可疑的噪声源上触发，并采取平均功能去除无关的噪声。

技巧 9: 使用足够的带宽，以便捕获麻烦的瞬态和噪声。

技巧 10: 充分利用 N7020A 电源探头。

如欲了解更多信息，请访问：www.keysight.com

如需了解关于是德科技产品、应用和服务的更多信息，请与是德科技联系。

如需完整的联系方式，请访问：www.keysight.com/find/contactus

