

测量开关稳压器中的输出纹波和开关瞬变

作者: Aldrick S. Limjoco

简介

对某些应用而言,最大限度地降低输出纹波和开关瞬变是非常重要的,尤其是像高分辨率ADC这样的噪声敏感型器件。将开关稳压器用作电源时,输出纹波会在ADC输出频谱上表现为独特的尖峰,从而影响其动态性能或信噪比和无杂散动态范围(SFDR)。考虑到这些不必要的输出信号,有时会用低压差(LDO)稳压器代替开关稳压器。因此会舍弃开关稳压器的高效率优势,改为获取LDO稳压器更干净的输出。在更为广泛的高性能应用和噪声敏感型系统中应用、设计和集成开关稳压器时,正确地量化这些参数会提供更好的设计视角。

本应用笔记介绍测量开关稳压器中的输出纹波和开关瞬变的有效方法。测量这些参数需要非常仔细,因为测量设置不佳会导致读数有误。由示波器探头信号和接地引线形成的环路会引入寄生电感。这样就会不准确地提高与快速开关转换相关的开关瞬变幅度。因此,必须在广泛的宽带宽测量中保证合理的连接和良好的测量方法。

用于展示输出纹波和开关噪声测量方法的ADI器件是 [ADP2114](#) 双通道2 A/单通道4 A同步降压DC-DC转换器。这款降压稳压器可提供高效率,开关频率最高可达2 MHz。

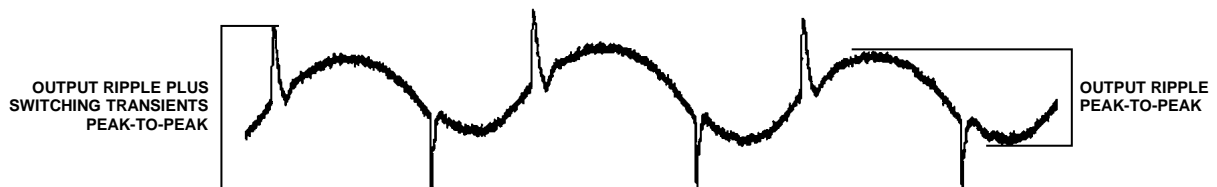


图1. 输出纹波和开关瞬变

10603-201

目录

简介.....	1	频域测量.....	4
修订历史.....	2	时域测量.....	5
输出纹波和开关瞬变.....	3	最佳方法.....	6
估算降压稳压器中的输出纹波.....	3	测量开关瞬变.....	8
输出纹波考虑因素.....	4	结论.....	8
测量输出纹波.....	4	参考文献.....	8

修订历史

2013年1月—修订版0：初始版

输出纹波和开关瞬变

输出纹波和开关瞬变是开关稳压器输出中的两种不希望出现的信号。这些信号取决于稳压器的拓扑结构以及所用外部元件的值和特征。

输出纹波是残余的交流输出电压，与开关稳压器的开关操作密切相关。其基频与稳压器的开关频率相同。

开关瞬变是在开关转换过程中发生的高频振荡。其幅度表示为最大峰峰值。通常，因为它高度依赖于测试设置，所以很难准确测量。

图1显示输出纹波和开关瞬变的示例。

估算降压稳压器中的输出纹波

图2显示典型的简化版降压稳压器电路。

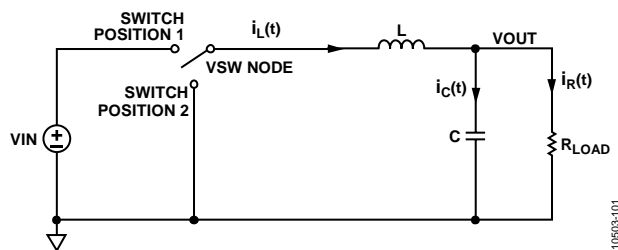


图2. 简化版降压稳压器电路

对稳态条件下的输出纹波计算而言，不得忽略主要流经电容C的电感电流纹波。图3显示图2中开关位置1和开关位置2对应的开关节点电压和电感电流波形。

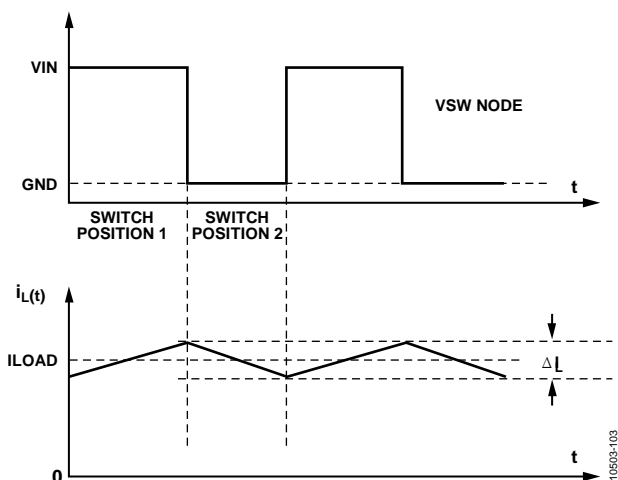


图3. 开关节点电压和电感电流波形

电感电流波形 $i_L(t)$ 包含直流电流(ILOAD)和峰峰幅度的电流纹波， ΔI_L 。

直流电流只流入负载电阻 R_{LOAD} ，因为电容阻止所有直流电流经过它流出去。电感电流纹波在电容C和负载电阻 R_{LOAD} 之间分开。但是，电容必须足够大，从而使其在开关频率条件下的阻抗明显低于负载的阻抗。然后，因为大部分电感电流纹波都流经电容C，电容就会提供足够的开关纹波过滤。

图4展示了来自降压转换器的电容输出纹波。电容输出纹波与零基准电平以上电容电流波形 $i_C(t)$ 的正值部分包含的电荷相关。电容电流波形与电感电流波形相同，但是没有ILOAD成分。电容电流波形在开关期间一半的时间内都保持在零基准电平以上，这使得电容电压 $V_C(t)$ 增长，因为电荷正存储在电容板上。电容电流波形在零基准电平以下时， $V_C(t)$ 就会降低。因此，电容电流的两次过零事件之间就是开关位置1和开关位置2的一半，这会导致电容电压在其最小值和最大值之间变化。

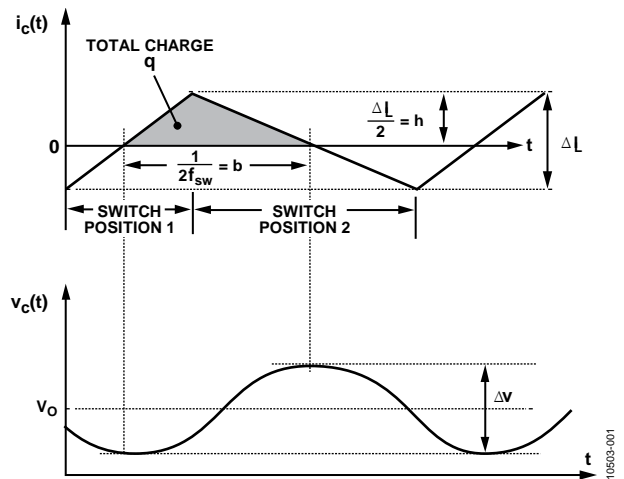


图4. 电容电流和电容电压波形

$v_{C(t)}$ 的总变化是峰峰输出纹波，即 Δv 。电容电压在其最小值和最大值之间变化时，电容中的电荷变化定义为

$$q = C(\Delta v)$$

其中电荷q是电流波形在其过零事件之间的积分。

该积分可以表示为阴影三角形区域。如果基数为 $\frac{1}{2f_{sw}}$ ，高度为 $\Delta I_L/2$ ，则可通过以下方程表示图4中的总电荷q：

$$q = \frac{b \times h}{2} = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_{sw}}$$

求解 Δv 可得出以下方程：

$$\Delta v = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_{sw} \times C} \quad (1)$$

其中：

Δv 为电容电压纹波。

ΔI_L 为电感电流纹波。

f_{sw} 为开关频率。

C 为电容。

ESR可模拟为与电容串联的电阻。通过包含ESR的输出纹波方程可得出以下方程：

$$\Delta v = \Delta I_L \times \left(ESR + \frac{1}{8 \times f_{sw} \times C} \right) \quad (2)$$

输出纹波考虑因素

电感和输出电容是直接影响输出纹波的主要元件。

输出纹波与电感电流纹波关联。因此，这两者直接相关。但是，选择电感时需要进行一些权衡。例如，小电感会产生更快的瞬态响应，但代价是电感电流纹波会更大，而使用大电感会让电感电流纹波较小，相应的代价就是瞬态响应较慢。

使用低ESR电容会最大限度地减小开关稳压器的输出纹波。电介质为X5R或X7R的陶瓷电容是一个不错的选择。另一方面，大电容通常用于减小输出纹波。但是，输出电容的尺寸和数量增加可能会增大成本和电路板空间。

测量输出纹波

测量输出纹波时，必须考虑将理论计算做为一个参考。计算取决于开关稳压器的拓扑结构以及所用外部元件的值和材质。

用于计算ADP2114输出纹波的以下公式源于方程2。

此例中，ADP2114在强制PWM模式下以620 kHz的开关频率工作。总输出电容选为69 μ F，总电容ESR为1.5 m Ω 。基于方程3计算电感电流纹波。

$$\Delta I_L = \frac{VIN - VOUT}{L \times Fsw} \times \frac{VOUT}{VIN} \quad (3)$$

其中：

VIN 是以伏特为单位的输入电压，值为5 V。

$VOUT$ 是以伏特为单位的输出电压，值为1.8 V。

L 是以亨利为单位的储能电感，值为2.2 μ H。

方程3得出的理论电感电流纹波为0.85 A。将所有值代入方程2得出理论输出纹波为3.76 mV p-p。这些条件和元件值在整个应用笔记中都会用于频域和时域测量。

频域测量

电力工程师在测量开关稳压器中不必要的输出信号伪像时考虑频域是非常有用的。这样可以提供一种更好的视角，在这种情况下，输出纹波及其谐波位于离散的频率，各自对应不同的功率水平。图5为希望在RF和高速转换器应用中使用开关稳压器的工程师提供了一些信息，这样他们可以了解自己选择的开关稳压器是否适合其宽带应用。

频域测量方案在ADP2114输出电容两端使用50 Ω 的同轴电缆探头，经过一个隔直电容，在频谱分析仪的输入端采用50 Ω 端接电阻。此隔直电容可阻止任何直流电流穿过频谱分析仪。它还可以避免直流负载效应。50 Ω 传输环境可以最大限度地减小反射和驻波，尤其是在高频条件下。

测量点应该在输出电容两端，因为它是输出纹波的主要来源。从信号尖端到接地点的环路应该尽可能比较小。这样可以避免可能影响测量的额外电感。图5显示了输出纹波的频域图和ADP2114的谐波。

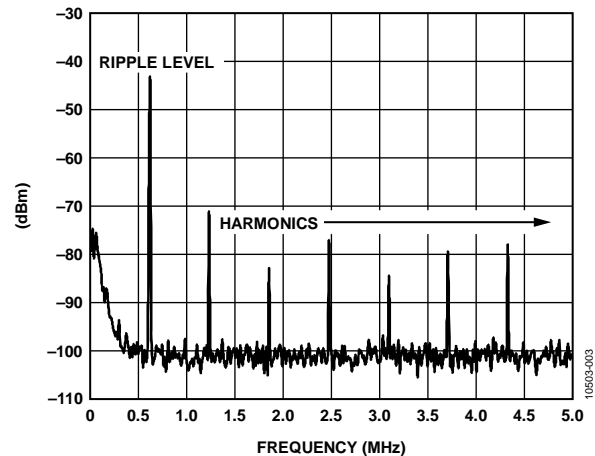


图5. 采用频谱分析仪的频域图

ADP2114在指定工作条件下以4 mV p-p的基频工作并产生较低的输出纹波电压。

时域测量

采用示波器探头时，不用长接地引线可避免接地环路，因为信号尖端和长接地引线形成的环路会产生额外电感，事实上会在开关转换过程中造成较高的开关瞬变。

测量低电平输出纹波时，不建议使用常见的10倍示波器探头。信号可能会低于示波器探头的最大灵敏度。它可以与通道本底噪声保持相同电平。因此，10倍探头将信号衰减到十分之一，从而使低电平信号降为示波器本底噪声。如果需要执行低电平纹波测量，则考虑1倍无源探头或50 Ω同轴电缆。

图6显示错误的探测方法，图7则显示其测量波形。

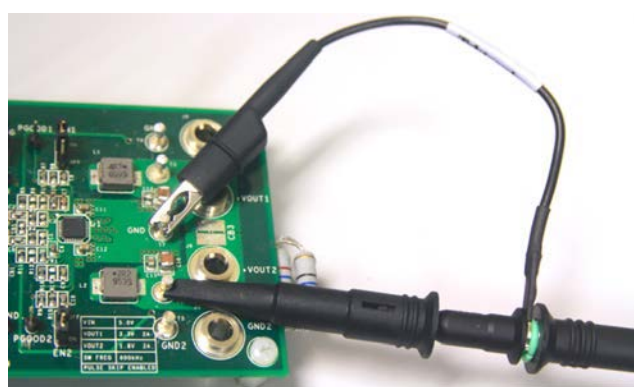


图6. 错误的接地环路方法

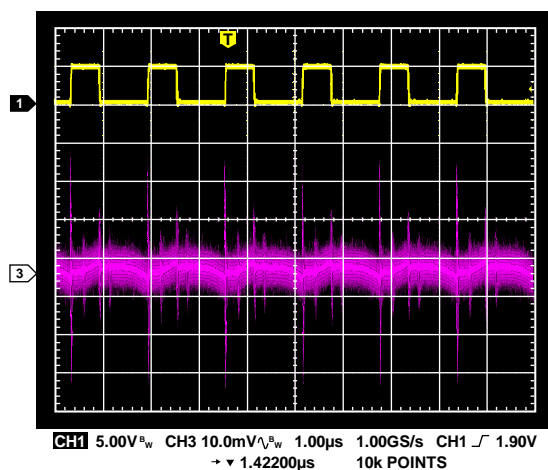


图7. 图6的开关节点和交流耦合输出波形

由于示波器探头的长接地引线形成了环路，图7中的高频瞬变很明显。此值采用示波器中的500 MHz带宽设置测得。图7中的大幅度瞬变不是器件的内在特性，而是一种测量假象。

有几种方法可以减小杂散电感。一种方法是移除标准示波器探头的长接地引线，并将其管体连接至接地基准点。

图8显示了尖端和管体法。

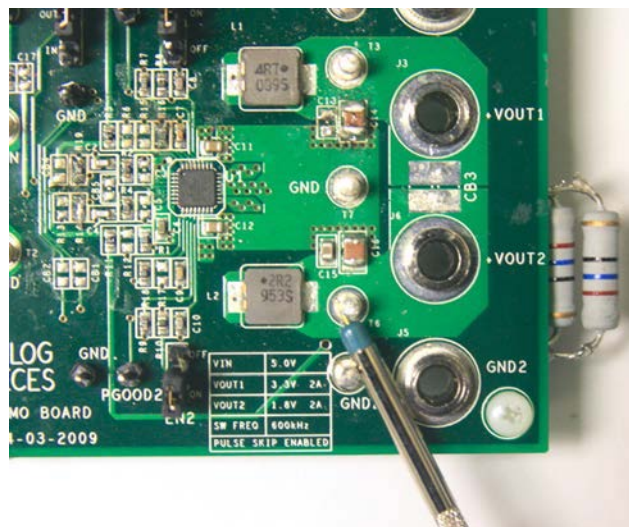


图8. 在开关输出的任意点探测的尖端和管体法

尖端连接到错误的开关稳压器输出点。接地引线也已移除，但电路板上走线路径引起的电感仍然存在。我们建议改为直接在输出电容上进行探测。

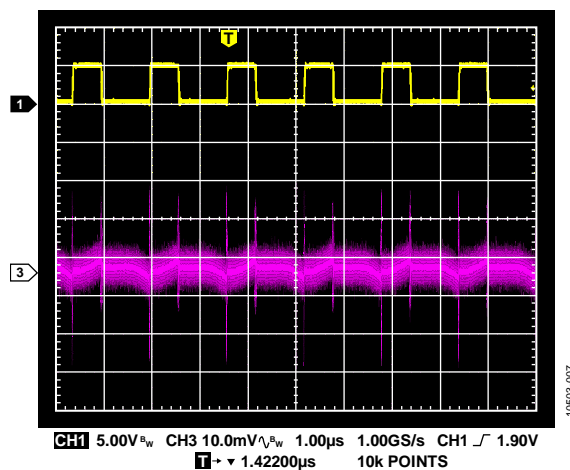


图9. 图8的开关节点和交流耦合输出波形

图9显示按图8所示方法采用500 MHz带宽设置得到的结果。因为移除了长接地引线，所以最大限度地减小了高频瞬变。

AN-1144

使用接地线圈在输出电容上探测(参见图10)可以产生近乎最佳的纹波细节。电路板上的走线电感明显变小, 开关瞬变幅度也得以降低。但是, 如图11所示, 纹波上还是明显叠加了较低的信号轮廓。

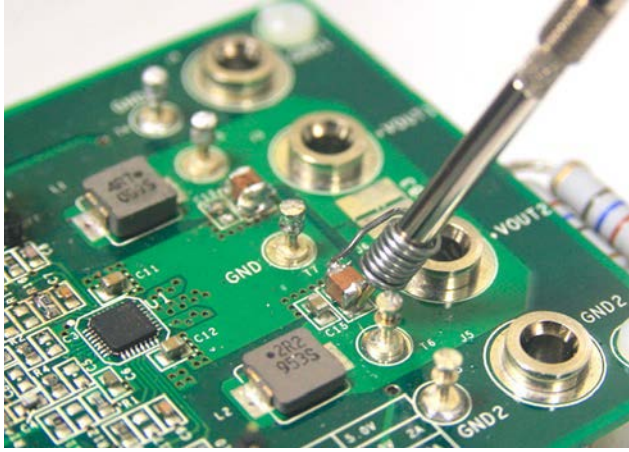


图10. 使用线圈在输出电容上探测的尖端和管体法

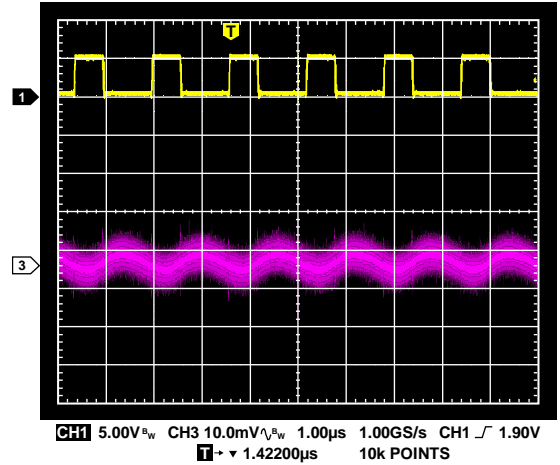
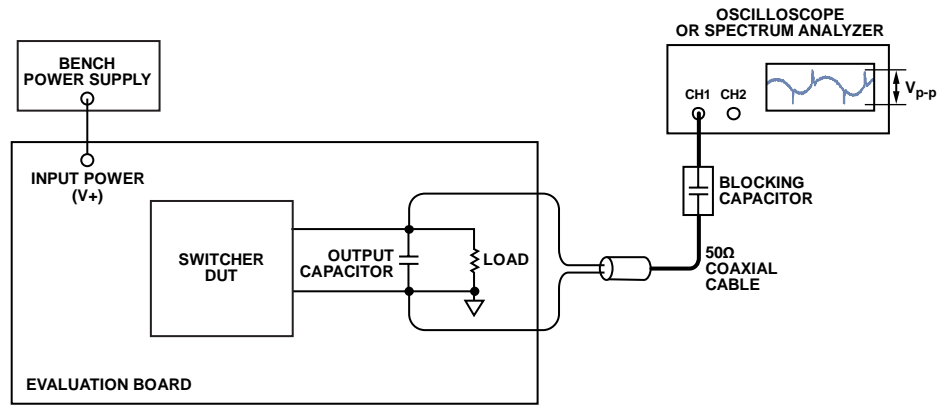


图11. 图10的开关节点和交流耦合输出波形

最佳方法

最佳方法是使用50Ω同轴电缆, 该电缆维持在50Ω环境下, 并通过可选的50Ω示波器输入阻抗端接。在开关稳压器输出电容和示波器输入端之间放置一个隔直电容。电缆的另一端可通过非常短的飞线直接焊接到输出电容上(参见图12和图13)。这样可以保持信号完整性, 尤其是在较宽的带宽范围内测量电平非常低的信号时。



- NOTES
 1. OSCILLOSCOPE OR SPECTRUM ANALYZER SHOULD BE SET FOR A 50Ω TERMINATION.
 2. USE AN OSCILLOSCOPE WITH 500MHz BANDWIDTH.

图12. 使用端接50Ω同轴电缆的最佳方法

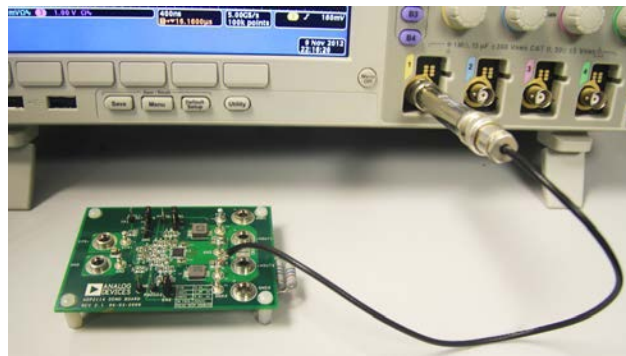


图13. 最佳方法示例

在500 MHz的带宽条件下，上述每一种测量方法都与50 Ω 同轴电缆方法进行了比较。图14至图17显示了相应的结果。

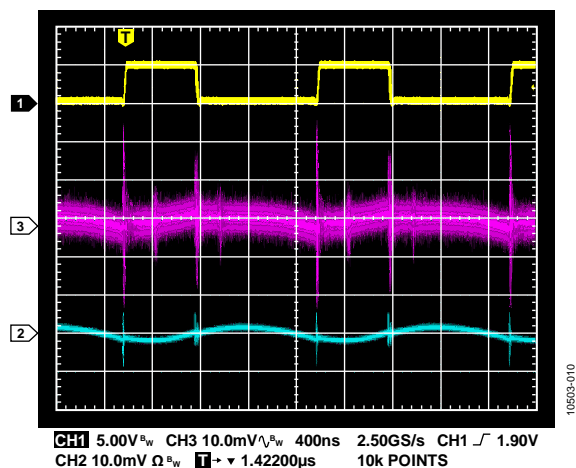


图14. 开关节点(1)、带有长接地引线的标准示波器探头(3)和50 Ω 同轴电缆方法(2)波形

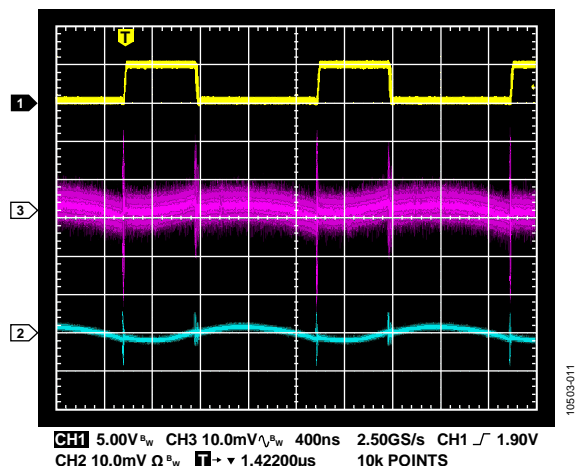


图15. 开关节点(1)、在开关输出的任意点探测的尖端和管体法(3)以及50 Ω 同轴电缆法(2)波形

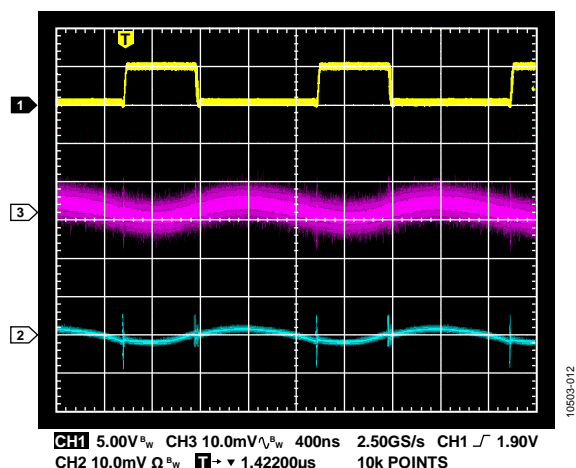


图16. 开关节点(1)、在输出电容上探测的尖端和管体法(3)以及50 Ω 同轴电缆法(2)波形

比较不同方法显示，在50 Ω 环境下使用同轴电缆会产生更为准确的结果，这样纹波本身的噪声较低，即使采用500 MHz的带宽设置也是如此。将示波器带宽设置更改为20 MHz可以消除信号的高频成分，只留下输出纹波本身(参见图17)。

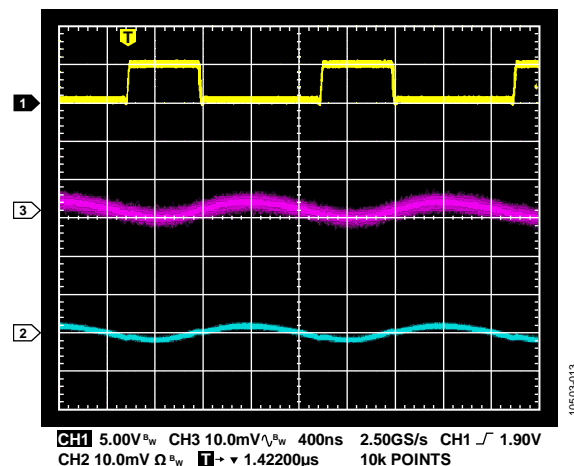


图17. 开关节点(1)、在输出电容上探测的尖端和管体法(3)以及采用20 MHz示波器带宽设置的50 Ω 同轴电缆法(2)波形

带宽降低后，除了消除开关瞬变以外，还会发现纹波上的信号或噪声轮廓变化最小，而且没有其他不必要的信号伪像了。这表明，在较宽的带宽范围内测量低输出纹波和开关瞬变信号时，在50 Ω 环境下使用同轴电缆是最佳解决方案。

图18中，ADP2114在时域中产生3.9 mV p-p的输出纹波，接近于采用20 MHz带宽设置测得的频域值4 mV p-p。测得的结果也与3.76 mV p-p的理论结果密切相关。

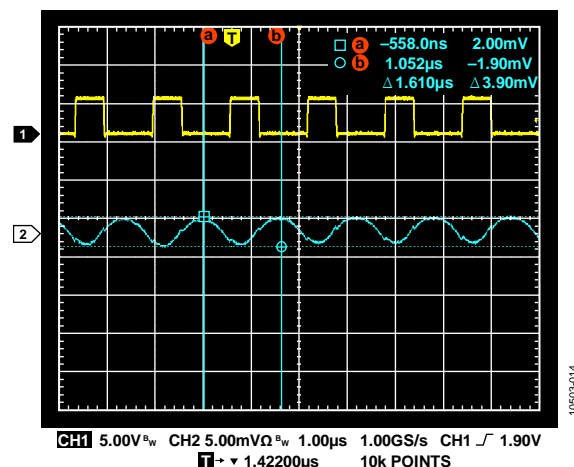


图18. 开关节点(1)和输出纹波(2)波形

测量开关瞬变

开关瞬变的能量较低，但是有比输出纹波更高的频率成分。这种情况会在开关转换过程中发生，通常标准化为包含纹波成分的峰峰值。

图19显示使用带有长接地引线的标准示波器探头与使用50 Ω同轴端接电缆的开关瞬变波形。通常，由长接地引线造成的接地环路会产生比预期水平更高的开关瞬变测量值。

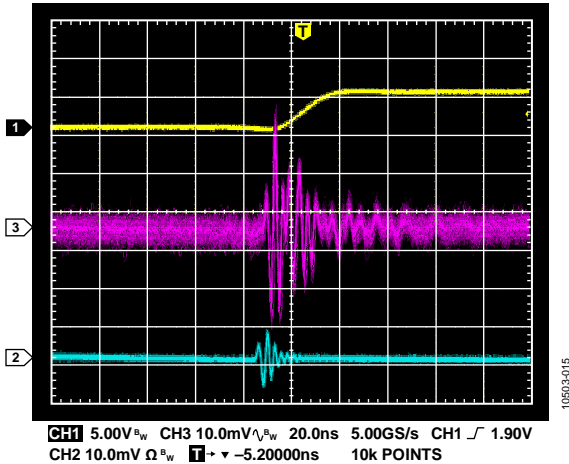


图19. 开关节点转换(1)、使用标准示波器探头(3)和50 Ω同轴端接电缆(2)的波形

结论

本文为了得出准确、可再现的时域和频域结果而研究、试验了上述测量方法。

在较宽的频率范围内测量低电平信号时，维持50 Ω的环境非常重要。进行这项测量的一种简单的低成本方法是使用合理端接的50 Ω同轴电缆。这种方法可用于各类开关稳压器拓扑结构。

面向低噪声、敏感型高性能应用设计和优化系统电源时，输出纹波和开关瞬变的测量方法是非常重要的考虑因素。

参考文献

ADP2114 Data Sheet. Analog Devices, Inc.

Erickson, R. W. *Fundamental of Power Electronics*. New York: Springer Science & Business Media, Inc., 2001.

SynQor. Application Note 01-08-01, Rev. 01., *Output Ripple Voltage Measurements*. (Available on the SynQors website).

Williams, Jim. Application Note 70, *A Monolithic Switching Regulator with 100 μV Output Noise*. Linear Technology, 1997.