

Application Note
三角展频电路设计



Gary Liu, Feng Ji

摘要

展频可以通过向 PWM 控制器的频率编程引脚注入三角扰动电流来实现。本应用手册演示了如何根据方波产生该三角电流，以满足特定的展频目标。以 LM5171 评估模块 (LM5171EVM-BIDIR) 为参考，本文提供了一个设计示例。分析非稳态多谐振荡器电路，以便为无 MCU 的应用生成方波。所提议的方法通过仿真进行验证，并通过实验台测量结果得到验证。

内容

1 简介.....2

2 方波的展频.....3

3 基于 LM5171EVM-BIDIR 的展频结果.....7

4 总结.....10

5 参考资料.....10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

展频技术通常称为“调制”或“抖动”，广泛应用于 DC-DC 转换器中，以减轻电磁干扰 (EMI)。这种方法的工作原理是将窄带信号转换为宽带信号，从而将能量分配到更宽的频谱范围内。因此，如图 1-1 所示，这种重新分配会显著降低峰值能量水平。[1]

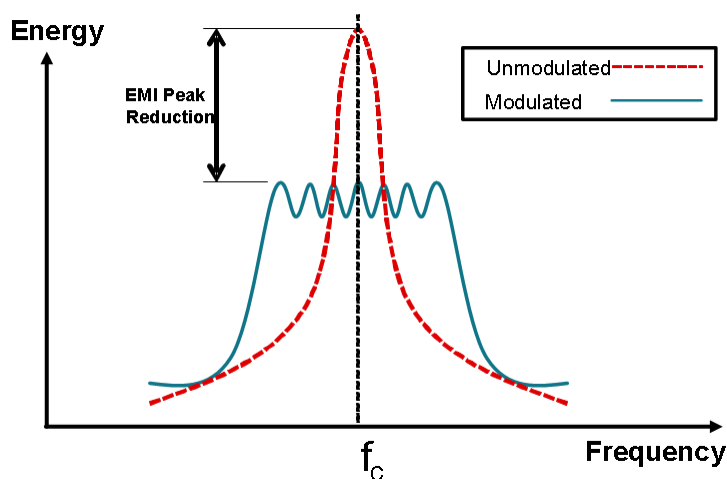


图 1-1. 通过展频降低 EMI

图 1-2 说明了时间域 (左) 和频域 (右) 中的三角调制。左侧的时域图描绘了单个调制周期，其中时钟频率随时间变化绘制。在该图中， f_c 表示未调制的振荡器频率， f_m 表示调制频率， Δf_c 表示相对于中心频率的频率偏差。右侧显示了该调制产生的基频的相应频谱分布。

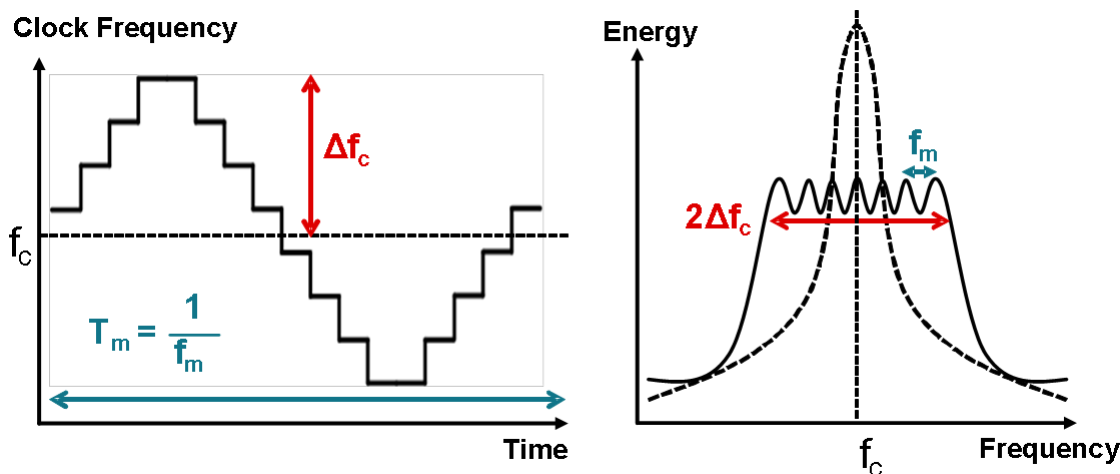


图 1-2. 时域 (左) 和频域 (右) 中的三角调制

请注意，虽然图 1-2 (左) 所示的波形是离散的，但这并不意味着采用了数字抖动。在任何开关稳压器中，每个开关周期只能更新一次时钟频率；因此，无论调制方法是模拟还是数字，频率本质上都是离散的。

本应用手册重点介绍三角调制，这是因为其简单易实现且性能经过验证 [2]。

执行展频时， Δf_c 和 f_m 是关键参数。选择 Δf_c 和 f_m 时，需要权衡多个目标。

更大限度地提高 Δf_c 以降低 EMI，受以下因素限制：

- 谐波之间相互重叠
- 扩展至不需要的频段
- 电流或电压纹波

- 将 f_m 设置为接近分辨率带宽 (RBW)
- 将 f_m 保持在控制环路带宽以下
- 如果可能, 使 f_m 远离可听频段

通常, 可将 Δf_C 选择为 f_C 的 $\pm 4\%$ 至 $\pm 10\%$, 并将 f_m 选择在 4kHz 至 15kHz 之间 (当 RBW=9kHz 时)。

通常, 有两种实现展频的方法。以下以 LM5171 为例:

• SYNCI 引脚方法

内部 PLL 锁定施加于 SYNCI 引脚的外部调频时钟。虽然这种方法支持高达标称开关频率 $\pm 20\%$ 的抖动范围, 但它需要 MCU 持续输出调频时钟, 从而增加了固件复杂性。

• OSC 引脚方法

开关频率由 OSC 引脚输出的电流决定。向 OSC 引脚注入小幅三角扰动电流, 即可对开关频率进行调制。这只需要低频方波, 而不是主动频率调制。固件复杂性显著降低。

本应用手册重点介绍 OSC 引脚方法。

2 方波的展频

如图 2-1 所示, 外部电阻器 (R_{OSC}) 设置稳定状态振荡器电流。OSC 引脚的电压在内部调节为 V_{OSC} 。通过 R_f 施加外部方波 (范围为 0V 至 V_{SQ}) 后, C_f 两端会产生三角波电压。随后, 该电压会在流经 R_m 的路径中产生相应的三角波电流。

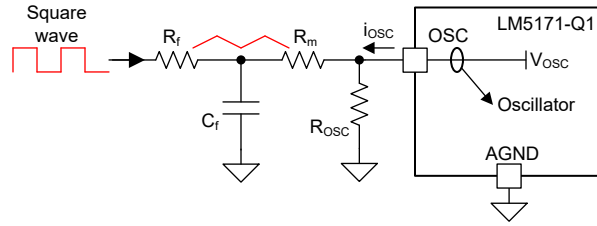


图 2-1. 方波的展频

振荡器频率与 OSC 引脚的电流 (i_{OSC}) 成正比。

具体而言, 在无展频的情况下 (例如, R_m 保持开路), 振荡器频率 f_{OSC} 由以下公式得出:

$$f_{OSC} = 4.15 \times 10^9 \frac{\text{Hz}}{\text{A}} \cdot \frac{V_{OSC}}{R_{OSC}} \quad (1)$$

通过选择 $R_f \ll R_m$, C_f 两端的平均电压约为 $V_{SQ}/2$ 。 f_C 可通过以下公式得出:

$$f_C = 4.15 \times 10^9 \frac{\text{Hz}}{\text{A}} \cdot \left(\frac{V_{OSC}}{R_{OSC}} + \frac{V_{OSC} - \frac{V_{SQ}}{2}}{R_m} \right) \quad (2)$$

要实现线性频率调制, 请按照以下公式选择 R_f 和 C_f :

$$R_f C_f \geq \frac{1}{f_m} \quad (3)$$

C_f 两端的峰值间电压约为:

$$\Delta V_{Cf} \approx \frac{V_{SQ}}{4 \cdot f_m \cdot R_f \cdot C_f} \quad (4)$$

Δf_C 的计算公式为:

$$\Delta f_C = 4.15 \times 10^9 \frac{\text{Hz}}{\text{A}} \cdot \frac{V_{SQ}}{8 \cdot f_m \cdot R_f \cdot C_f \cdot R_m} \quad (5)$$

在方程式 2 中，通常情况下， $\frac{V_{OSC} - \frac{V_{SQ}}{2}}{R_m} \ll \frac{V_{OSC}}{R_{OSC}}$ ，因此可将 f_C 近似为 f_{OSC} 。将 f_C 替换为 f_{OSC} ，并结合方程式 5 和方程式 1，可推导出 $\Delta f_C/f_C$ ：

$$\frac{\Delta f_C}{f_C} \approx \frac{1}{8} \cdot \frac{R_{OSC}}{V_{OSC}} \cdot \frac{V_{SQ}}{f_m \cdot R_f \cdot C_f \cdot R_m} \quad (6)$$

基于 LM5171EVM-BIDIR 的展频示例

在 LM5171EVM-BIDIR 中， $V_{OSC} = 1\text{V}$ ， $R_{OSC} = 38.3\text{k}\Omega$ 。方波的振幅为 $V_{SQ} = 2.5\text{V}$ 。

选择低于 LM5171EVM-BIDIR 交叉频率的调制频率 f_m 。此处选择 $f_m = 1\text{kHz}$ 。在此情况下，选择 $\Delta f_C/f_C = 7\%$ 。

根据方程式 3，选择：

$$R_f C_f = \frac{1}{f_m} \quad (7)$$

方程式 4 和方程式 6 可简化为：

$$\Delta V_{Cf} = \frac{V_{SQ}}{4} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta f_C}{f_C} = \frac{1}{8} \cdot \frac{R_{OSC}}{V_{OSC}} \cdot \frac{V_{SQ}}{R_m} \quad (9)$$

选择 $C_f = 100\text{nF}$ ，根据方程式 7 可得 $R_f = 10\text{k}\Omega$ 。

根据方程式 9 可得 $R_m = 171\text{k}\Omega$ 。

使用非稳态多谐振荡器生成方波

使用 MCU 生成方波非常简单。对于无 MCU 的应用，可采用非稳态多谐振荡器电路作为有效替代方案。如图 2-2 所示，比较器输出端可产生方波。

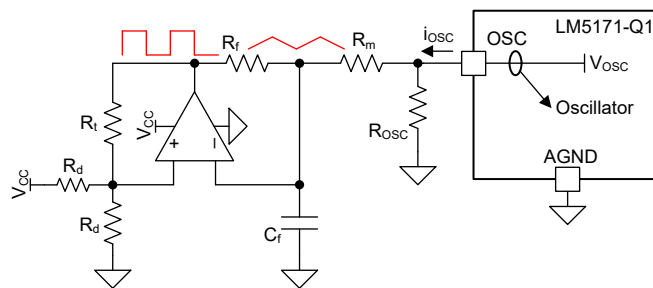


图 2-2. 使用稳态多谐振荡器展频

在此应用中，建议使用轨到轨输入、推挽输出比较器。如果使用轨到轨输入/输出运算放大器，请检查过载恢复时间。

要实现线性频率调制，请选择较小的 ΔV_{Cf} 。选择 $\Delta V_{Cf} = \frac{V_{CC}}{4}$ 后，可利用方程式 7 和方程式 9 计算 R_f 、 C_f 和 R_m 。

两个 R_d 和 R_t 决定 C_{fa} 的峰值电压和谷值电压。

C_f 两端的峰值间电压也可以写为：

$$\Delta V_{Cf} = \frac{R_d}{R_d + 2R_t} \cdot V_{CC} \quad (10)$$

将 $\Delta V_{Cf} = \frac{V_{CC}}{4}$ 代入 方程式 10 可得：

$$R_t = 1.5 \cdot R_d \quad (11)$$

在相同的展频规格下，当 $V_{CC} = 2.5V$ 时，可得 $C_f = 100nF$ ， $R_f = 10k\Omega$ ， $R_m = 171k\Omega$ 。选择 $R_d = 20k\Omega$ ，根据 方程式 11 可得 $R_t = 30k\Omega$ 。

图 2-3 显示了基于这些参数的 TINA 原理图。仿真中选用 TLV9002，以实现降低成本，其过载恢复时间为 $0.85\mu s$ 。

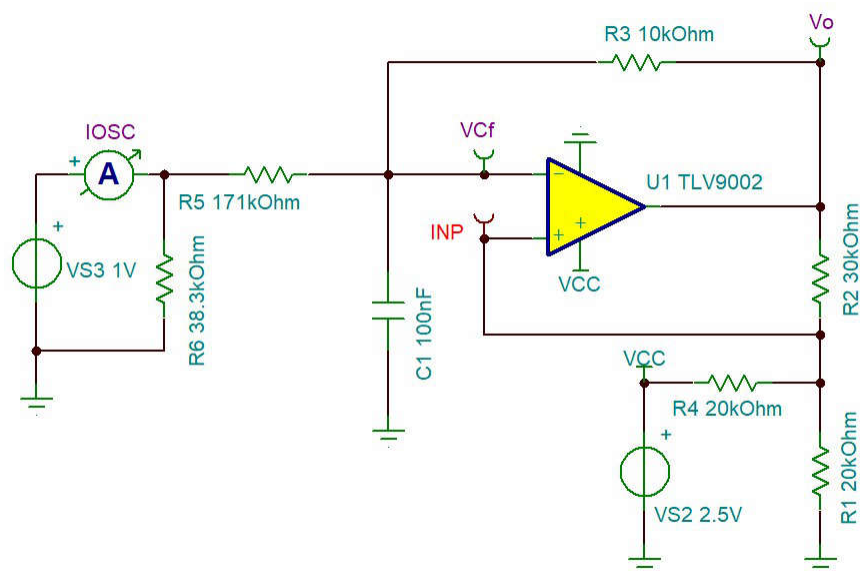


图 2-3. 采用 TLV9002 的稳定多谐振荡器的原理图

图 2-4 显示了仿真结果。

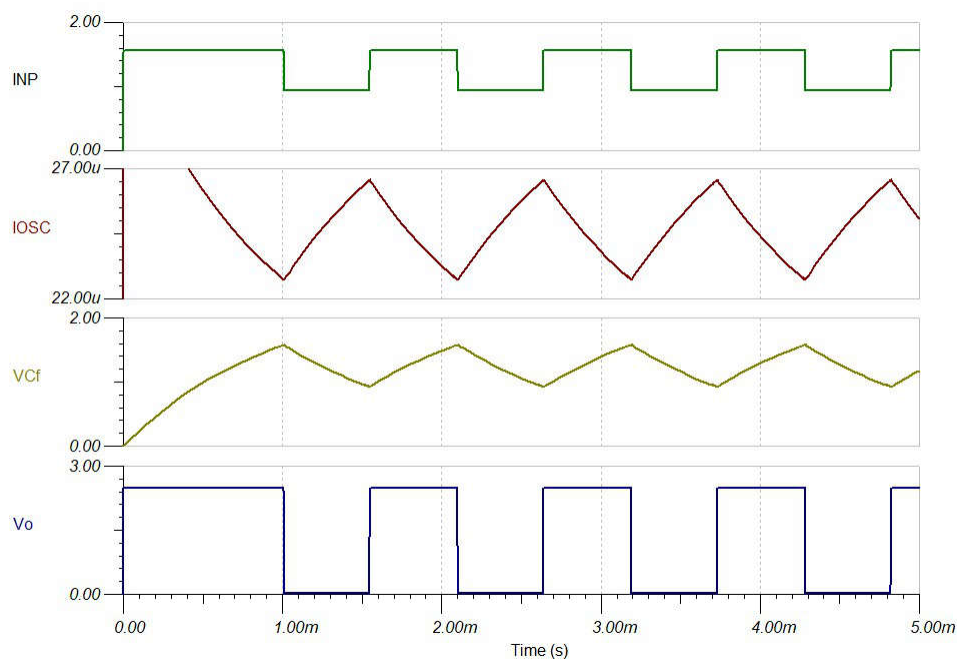


图 2-4. 采用 TLV9002 的稳定多谐振荡器的仿真结果

3 基于 LM5171EVM-BIDIR 的展频结果

EVM 配置为降压模式， $V_{out} = 14.5V$ 。有关更多详细信息，请参阅 LM5171 EVM 用户指南 [3] 第 2.4.1 节“具有电压调节功能的降压模式”。负载电流为 20A。

在 LM5171EVM-BIDIR 上， $R_{OSC}(R16) = 38.3k\Omega$ ， $R_f(R18) = 10k\Omega$ ， $C_f(C14) = 100nF$ 。施加的方波为 $V_{SQ} = 2.5V$ ，且 $f_m = 1kHz$ 。

未应用展频（ R_m 保持开路）时，输出电压纹波和开关频率如图 3-1 所示。

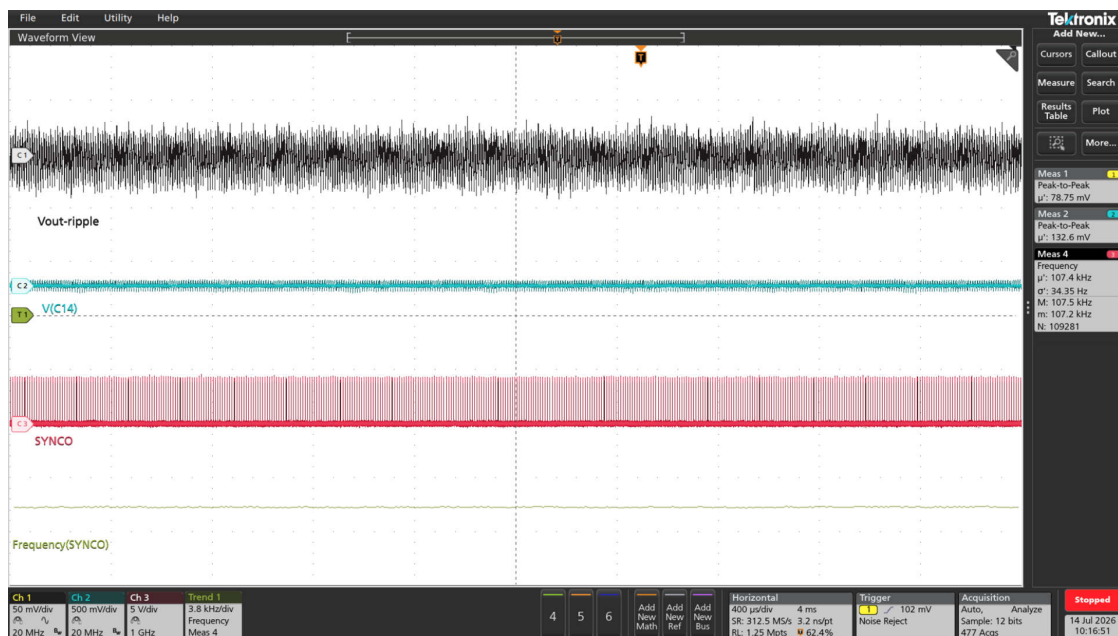


图 3-1. 无展频时的输出电压纹波和开关频率

尽管计算出的理论开关频率为 108.4kHz，但台架测试结果为 107.4kHz，略低于理论值。根据方程式 1，可计算得出 $R_{OSC} = 38.64k\Omega$ 。此值用于以下计算，以匹配 $f_{OSC} = 107.4kHz$ 的测量开关频率。

当 R_m 为 374k Ω 时，测试波形如图 3-2 所示。

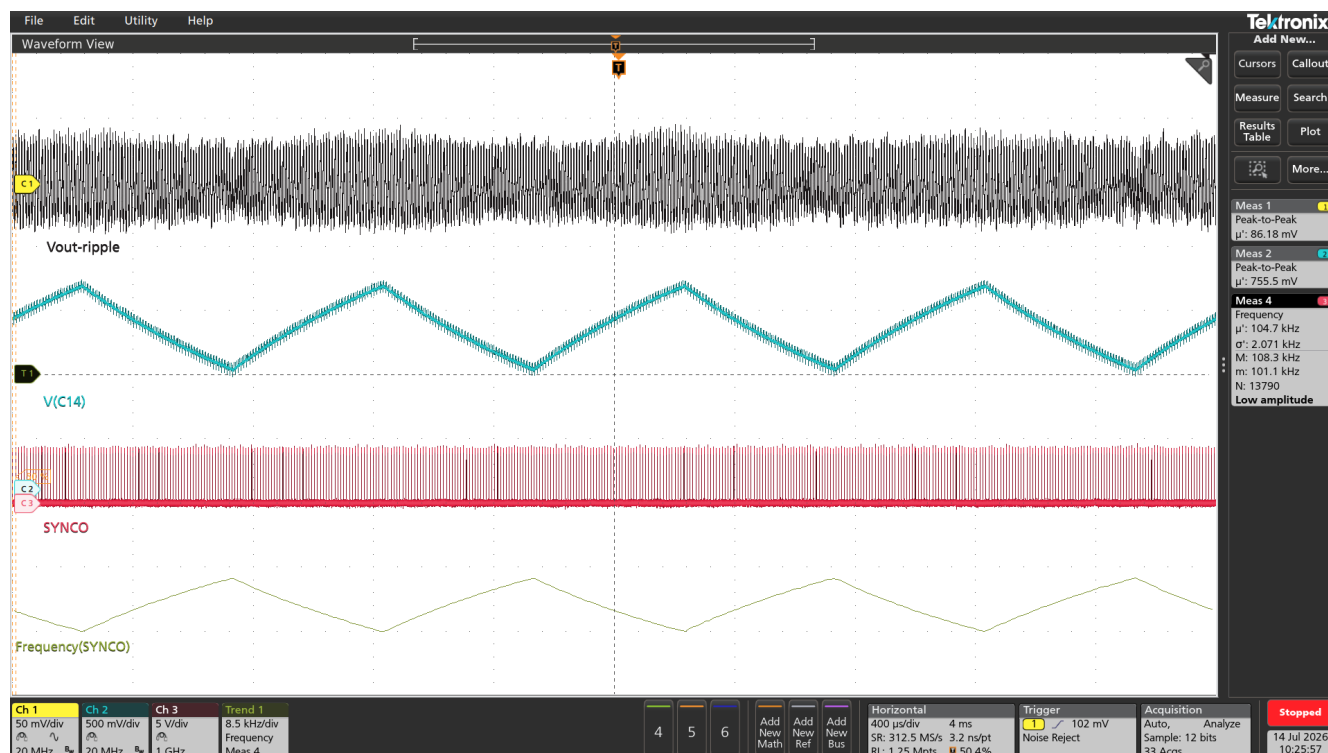


图 3-2. 输出电压纹波和开关频率 ($R_m = 374k\Omega$)

最大开关频率为 108.3kHz，最小开关频率为 101.1kHz。表 3-1 比较了 $\Delta f_c/f_{osc}$ 和 f_c 的计算结果和测量结果。

表 3-1. 计算结果与测量结果对比 ($R_m = 374k\Omega$)

	$\Delta f_c/f_{osc}$	f_c
计算结果	3.2%	104.6kHz
测量结果	3.4%	104.7kHz

当 R_m 为 182kΩ 时，测试波形如图 3-3 所示。

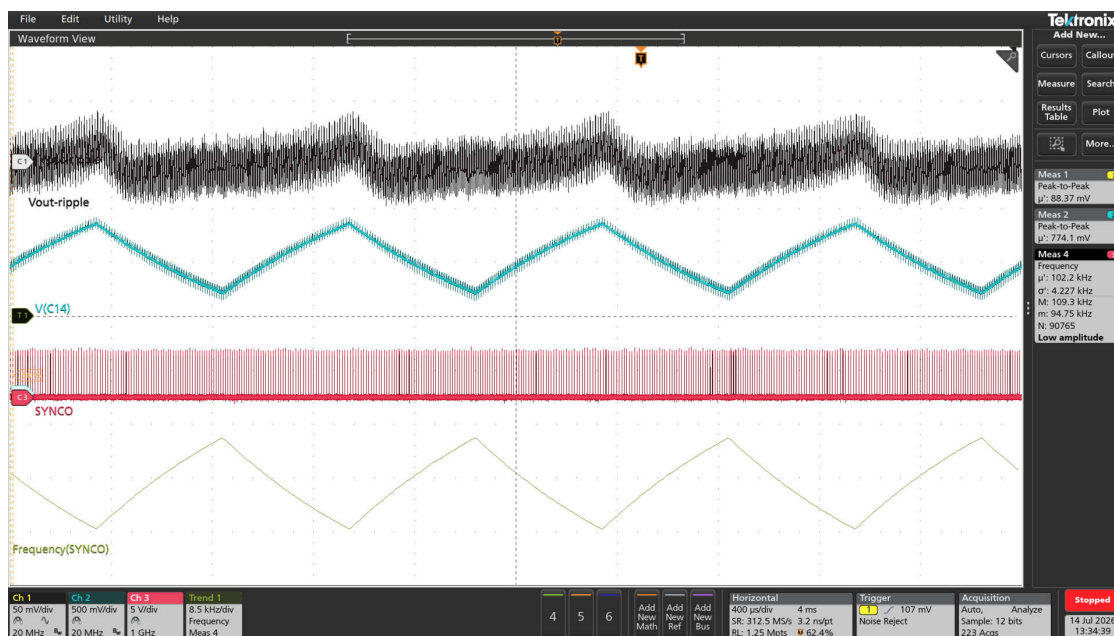


图 3-3. 输出电压纹波和开关频率 ($R_m = 182k\Omega$)

最大开关频率为 109.3kHz，最小开关频率为 94.75kHz。表 3-2 比较了 $\Delta f_c/f_{osc}$ 和 f_c 的计算结果和测量结果。

表 3-2. 计算结果与测量结果对比 ($R_m = 182k\Omega$)

	$\Delta f_c/f_{osc}$	f_c
计算结果	6.6%	101.7kHz
测量结果	6.8%	102.2kHz

根据上述测量结果，我们可以得出：

- 计算结果和测量结果吻合良好。
- 如图 3-3 所示，展频引入的输出电压纹波变得显著。

4 总结

本应用手册介绍了通过向频率编程引脚注入三角扰动电流实现展频的方法。这只需要低频方波，而不是主动频率调制。文中介绍了 RC 滤波器和注入电阻器的设计。基于 LM5171EVM-BIDIR，提供了一个实际设计示例。此外，对于无 MCU 的应用，提议使用简单的非稳态多谐振荡器电路。最后，通过经验台架测试结果对提议的方法进行了验证。

5 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[《EMI 降低技术，双随机展频》](#) 应用报告
- 德州仪器 (TI)，[《了解噪声传播技术及其在开关模式电源应用中的影响》](#) 技术研讨会资料。
- 德州仪器 (TI)，[LM5171 评估模块用户指南](#)，用户指南。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月