

Application Note

使用时钟缓冲器进行正弦波-方波转换



Asim Khan, Eshaan Tibrewala

摘要

需要极低相位噪声的应用通常使用 OCXO (恒温晶体振荡器) 或 TCXO (温度补偿晶体振荡器) 作为系统中的基准时钟。由于振幅和频率固定不变，OCXO 和 TCXO 的正弦波输出通常成为时钟树内对压摆率敏感的器件的瓶颈。后续时钟器件的压摆率敏感性会导致整个时钟链中的相位噪声性能下降。

有多种方法可以使用外部电路或时钟缓冲器等集成芯片解决这一问题。在本应用手册中，我们将时钟树的性能改进与具有各种输出格式、输入功率级别和频率的 TI 时钟缓冲器器件进行了比较。本文档旨在说明如何根据应用要求选择最适合的正弦波-方波时钟缓冲器。

内容

1 通用时钟树.....	2
2 正弦波压摆率要求.....	2
3 当前方法与时钟缓冲器.....	3
4 时钟缓冲器实现.....	3
4.1 时钟缓冲器通用输入级.....	3
4.2 选择内部或外部直流偏置.....	4
4.3 单端或 LVCMOS 信号.....	5
4.4 差分输入.....	5
5 采用时钟缓冲器实现性能提升及结果.....	8
5.1 FSWP 相位噪声分析仪测量案例.....	8
5.2 TI LMX2820 通过正弦波-方波时钟缓冲器改善噪声.....	9
6 正弦波-方波时钟缓冲器比较.....	16
6.1 LMK1C110x 加性噪声与其他噪声对比.....	17
7 总结.....	19
8 参考资料.....	19

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 通用时钟树

通常，系统中的时钟树包含主基准，主基准通过时钟缓冲器进行扇出或通过合成器 (PLL/DPLL) 进行倍频/分频以生成不同的频率。图 1-1 展示了包含 ADC、FPGA 或收发器的系统的通用时钟树。

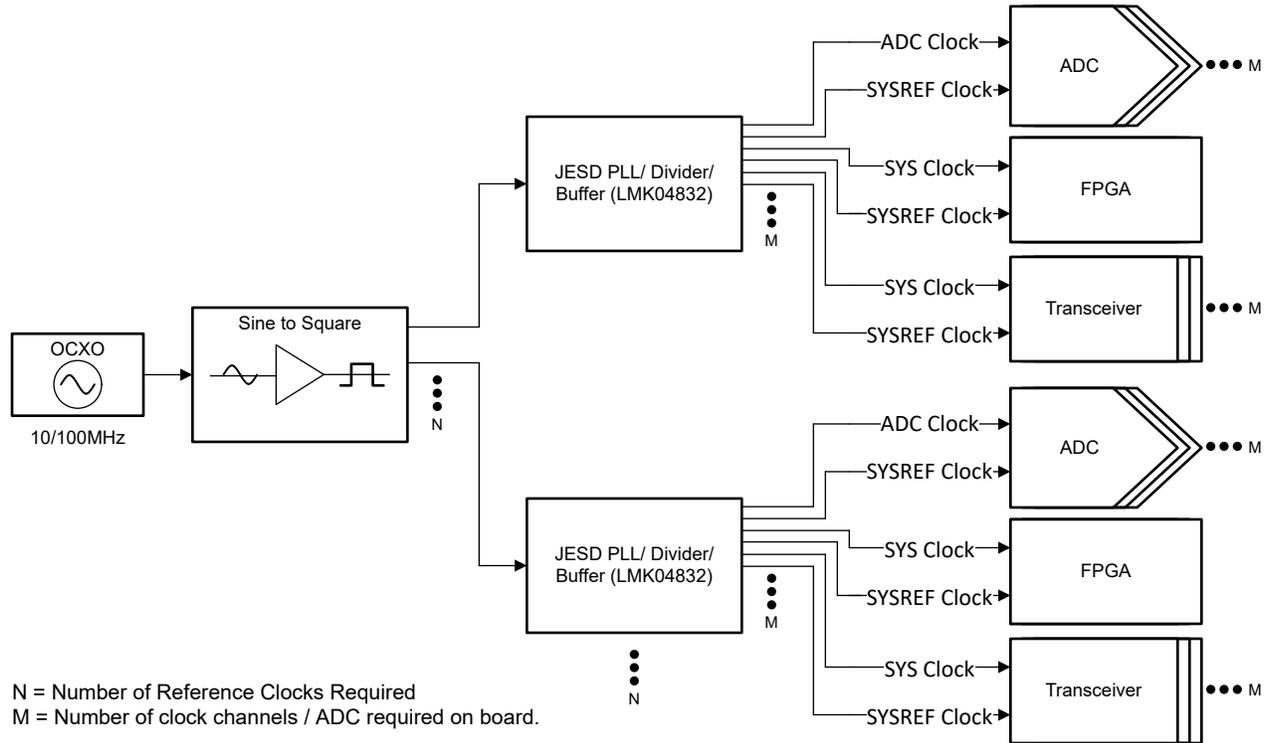


图 1-1. 通用时钟树

医疗、通信、T&M (测试与测量) 和 A&D (航天与国防) 系统中都有利用正弦波基准来满足低相位噪声要求的应用。例如，雷达依靠低相位噪声来准确检测一个或多个物体。

加性相位噪声会随着时钟树中的每个器件而累加。良好的系统设计实践对于避免其他性能下降情况至关重要。其中一个考虑因素是将正弦波转换为逻辑电平时不同器件的输入压摆率和振幅要求不同。

2 正弦波压摆率要求

正弦波的压摆率取决于工作频率和信号电压。为了提供特定的相位噪声性能，必须符合时钟器件的输入压摆率要求。

要改善时钟器件的相位噪声，建议使用更高压摆率的输入。大多数供应商会在缓冲器、合成器和抖动清除器的数据表中提出该建议。

正弦波输入信号的压摆率可通过提高/降低频率或电压来改变，如方程式 1 所示。

$$2 \times \pi \times f \times V \tag{1}$$

在使用固定输出振幅和频率源时，这两个变量都无法控制，使用 OCXO/TCXO 的系统通常就是这种情况。

3 当前方法与时钟缓冲器

当前解决压摆率敏感性问题的方法是在时钟器件的输入端使用额外的电路，因此会占用电路板上的额外空间。整个系统的成本高昂，依赖多个分立式元件也增加了设计的复杂性。此外，使用放大器或比较器级会在后续时钟树中增加噪声，因为放大器或比较器通常不会像时钟缓冲器那样针对相位噪声性能进行优化。图 3-1 展示了没有时钟缓冲器的当前方法的通用版本。一种更好的方法是使用时钟缓冲器等集成芯片，此类芯片具有放大慢速压摆率信号所需的所有电路，并针对所有时钟参数进行了优化。时钟缓冲器以极低的加性相位噪声将慢速压摆率输入转换为逻辑电平，从而提高信号压摆率，还可以通过时钟树中的器件最大限度地缓解相位噪声性能下降。此外，时钟缓冲器可以根据内部偏置和交流耦合模式等不同特性，缩减外部 BOM (物料清单)。

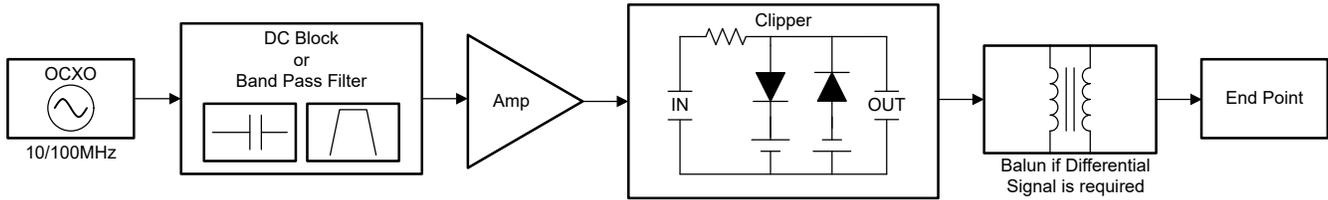


图 3-1. 通用压摆率改善方法

TI 提供大量支持正弦波输入的时钟缓冲器来用作单端、差分 and 可配置缓冲器。TI 时钟缓冲器涵盖 LVCMOS (LMK1C110x)、LVDS (LMK1D1xxx)、LVPECL (CDCLVP12xx) 及支持所有业界通用输出和输入格式的通用缓冲器 (LMK0030x、LMK01000、CDCLVC1310) 的所有逻辑电平。本应用手册特别使用 LMK1C110x 系列缓冲器进行性能测量，因为该系列缓冲器具有固有的低加性相位噪声。

4 时钟缓冲器实现

在将时钟缓冲器用于正弦波-方波转换时，请务必考虑每个时钟缓冲器的具体输入 V_{OH} 、 V_{OL} 、 V_{OD} 、输入共模、交流耦合输入以及内部或外部偏置要求。

以下各节讨论了 TI 缓冲器最常用的输入接口、外部或内部偏置提示。由于不同缓冲器系列的输入架构会随着时间的推移而不断改进，因此在将时钟信号连接到每个缓冲器的输入端时需要牢记细微差异。

4.1 时钟缓冲器通用输入级

有两个主要的缓冲器输入级：单端 (LVCMOS) 或差分 (LVDS、LVPECL、CML、LP-HCSL、HCSL、HTSL)。差分输入可以是特定于标准的输入或通用输入。通用输入接受所有受支持的标准输入驱动器接口。

差分输入也可用作单端输入。选择反相或同相输入作为基准时钟输入，另一输入直流偏置到 midpoint 基准时钟输入。时钟基准输入和直流偏置输入均在每个器件的输入摆幅和共模范围要求范围内进行设置。

在以下各节中，我们将讨论不同 TI 时钟缓冲器系列的内部或外部直流偏置使用情况、单端输入和差分输入重新偏置技术。

4.2 选择内部或外部直流偏置

通常，TI 差分时钟缓冲器系列具有两个不同的直流偏置选项，即具有小直流失调电压的内部偏置或具有迟滞的内部直流偏置。这两个直流偏置选项都用于将输出设置为低电平状态，并避免在信号或时钟丢失时在输出端产生毛刺脉冲。图 4-1 和图 4-2 展示了这两种偏置技术。

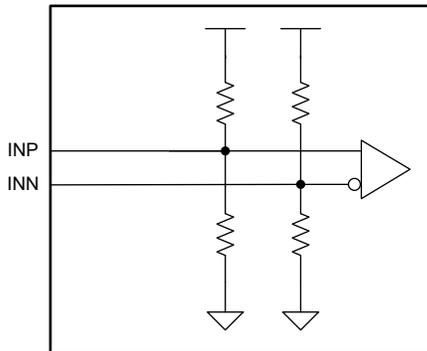


图 4-1. 内部直流偏置失调电压架构

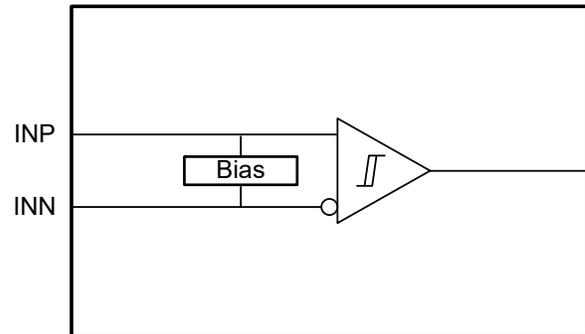


图 4-2. 具有迟滞的内部直流偏置

选择内部和外部直流偏置之前的注意事项：

- 检查器件是否具有内部直流偏置选项，否则通过分压器使用外部偏置。可以探测示波器上具有高阻抗的输入来检查输入端的内部偏置。一些 TI 器件为外部偏置提供了 VAC_REF 引脚，可用于代替分压器。
- 如果内部直流偏置在输入端有失调电压，使用正弦波输入时，建议使用外部直流偏置，以避免输出端出现占空比失真。占空比失真是开关阈值处正弦波不平衡的结果，如图 4-3 所示。
- 在差分输入级上使用大输入信号时，确保内部偏置足够好，以使输入信号的低电平或高电平不超出数据表中的输入绝对最大值。否则，请使用外部偏置来重新偏置输入信号，以避免超出 V_{IH} 和 V_{IL} 绝对最大值。
- 请参阅器件数据表，了解由于任何特定输入要求而需要的特定输入端接。

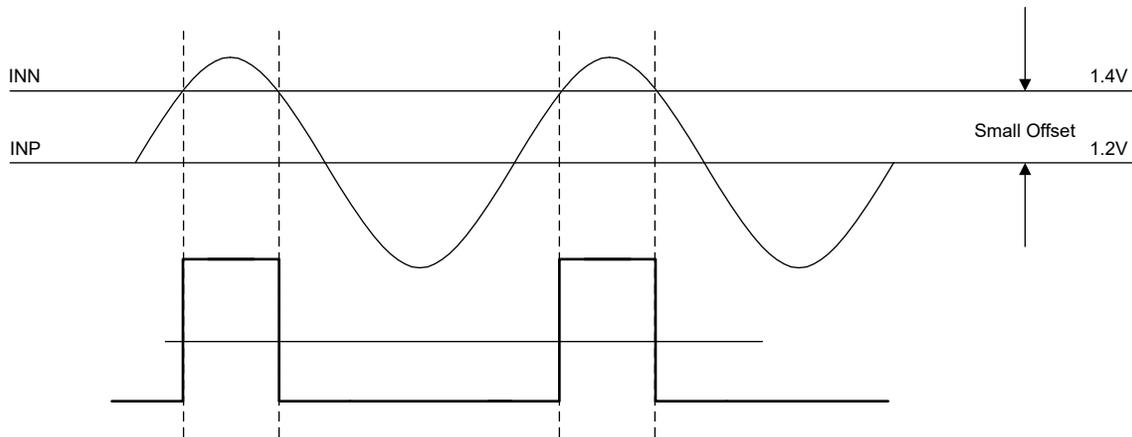


图 4-3. 具有不平衡正弦波的占空比失真

4.3 单端或 LVCMOS 信号

单端或 LVCMOS 输入级根据阈值 (V_t) 点附近的输入信号电平检测到 0 或 1。建议使用 V_{IH} 和 V_{IL} 限值来避免多个器件之间的温度和电压检测问题。

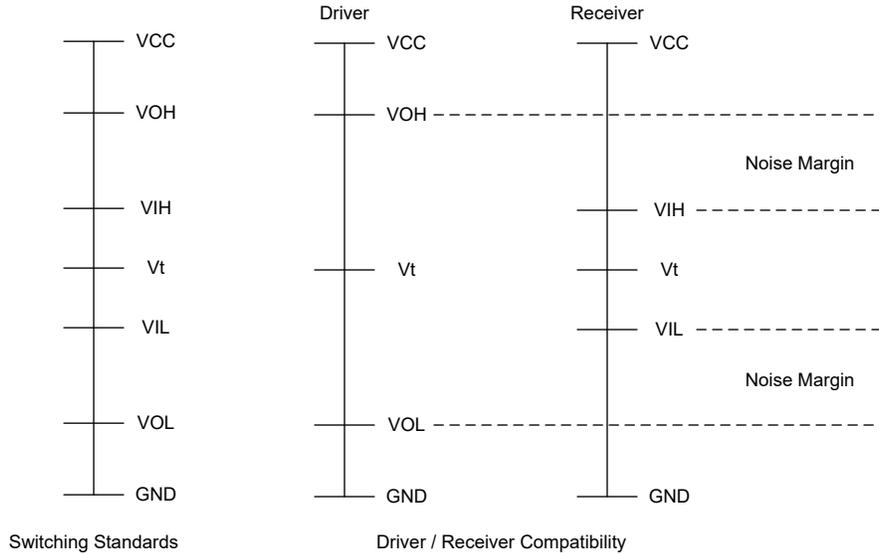


图 4-4. LVCMOS 阈值

为了对 LVCMOS 缓冲器输入级使用正弦波，输入信号需要满足 LVCMOS 接收器阈值规格。因为大多数时候由 OCXO 或其他源生成的正弦波信号都以 0V 直流失调电压为中心，所以输入信号从外部或内部（如果可用）重新偏置到阈值 V_t 或 $V_{DD}/2$ 值。

图 4-5 展示了在输入端使用分压器进行偏置的简化图。LMK1C110x 使用相同的偏置配置。

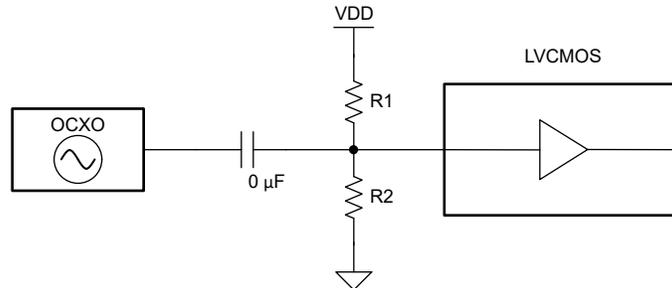


图 4-5. 重新偏置到 LVCMOS 电平

R_1 和 R_2 是用于获得 $V_{DD}/2$ 、具有相同阻值的电阻器。 R_1 和 R_2 均采用 $100\ \Omega$ 电阻器可实现传输线路阻抗匹配，因此流经电阻器的电流较高会导致功耗增加。为了降低功耗，也可以使用 1K 或 10K 电阻值。

表 4-1. 分压器的电流消耗

VDD	100 Ω	1k Ω	10k Ω
3.3V	16.5mA	1.65mA	0.165mA
2.5V	12.5mA	0.125mA	0.125mA
1.8V	9mA	0.9mA	0.09mA

4.4 差分输入

在使用差分交流或直流耦合模式时，输入摆幅、振幅、输入共模和适当的直流偏置是必须了解的重要要求。

对于正弦波输入信号，INN 引脚或基准引脚始终在有效时钟输入信号的中点偏置。这样可以避免占空比失真，如下面的图 4-6 所示。

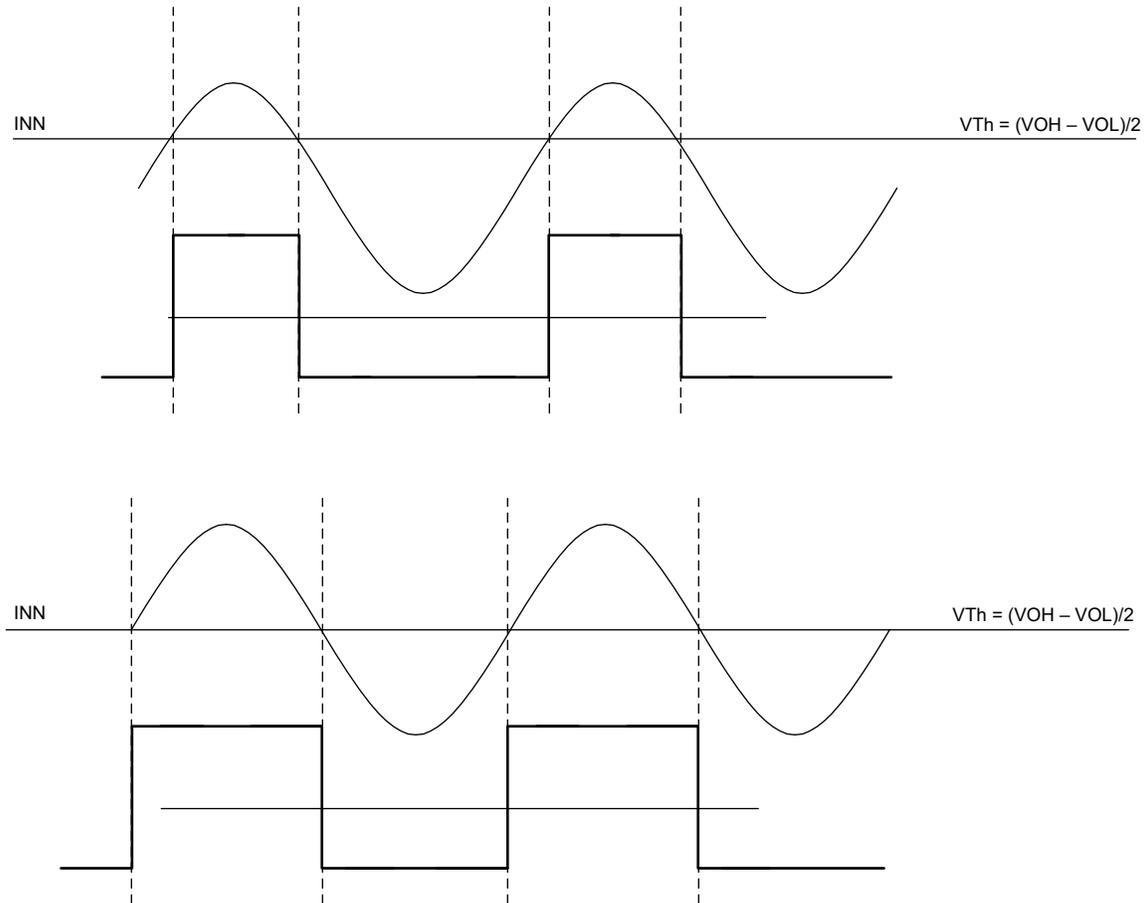
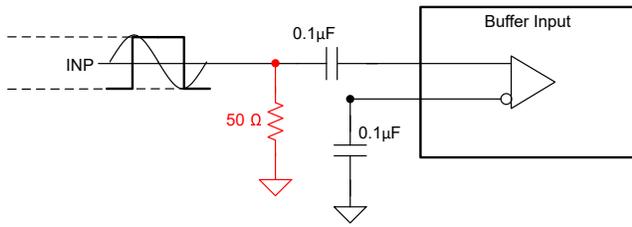


图 4-6. 占空比失真

以下是 TI 器件共有的一些常见直流重新偏置技术和注意事项。

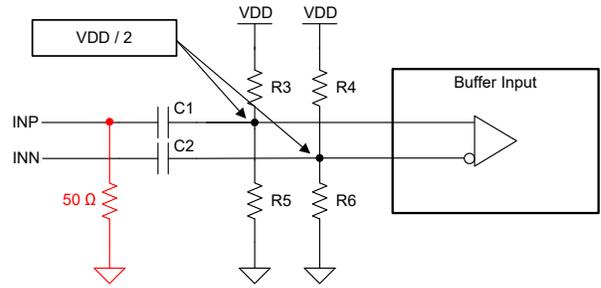
- 交流耦合内部直流偏置选项：大多数 TI 器件都具有数据表中指定的某种内部直流偏置。用户无需外部元件即可对单端或差分输入进行交流耦合。对于此类用例，请务必考虑输入振幅要求，以及为每个器件指定的内部偏置类型。图 4-7 展示了交流耦合单端内部选项。
- 交流耦合外部直流偏置选项：如果器件的时钟输入端不存在内部偏置，或者在处理较小振幅或正弦波输入时 INP 和 INN 引脚的内部偏置之间的任何直流失调电压导致占空比成为一个问题，建议使用外部分压器将信号重新偏置到器件输入共模要求范围内所需的直流电平。与内部弱偏置选项相比，外部偏置有助于缩短启动时间，因为电容器充电时间是可控的。单端和差分情况下的外部偏置示例如图 4-8 所示。
- 使用差分输入的直流耦合单端输入：使用直流耦合 LVCMOS 或任何其他格式单端波形时，INN 或未使用的输入设置为输入信号的中点，如图 4-9 所示。
- 具有 VAC_Pin 的外部直流偏置：一些 TI 器件提供 VAC_REF 引脚以重新偏置输入，如图 4-10 所示。这样可以缩短启动时间，同时与带有分压器电路的外部直流偏置选项相比，使用的元件更少。

对于使用差分输入作为单端输入的情况（正弦波或 LVCMOS），如果需要降低输入摆幅以满足数据表输入要求，通常需要将一个 $50\ \Omega$ 电阻器接地（如图 4-7、图 4-8 和图 4-10 所示）。此外，为支持差分输入的单端用例，INN 引脚还会交流耦合接地或保持悬空。



If the input amplitude or V_{pp} is greater than datasheet specification a 50Ω resistor to ground is used to meet the input requirements.

图 4-7. 交流耦合内部直流偏置选项



If the input amplitude or V_{pp} is greater than datasheet specification a 50Ω resistor to ground is used to meet the input requirements. This is usually not required in this case because bias point is set around $V_{DD}/2$ and there is usually enough room for the input swing between GND and VDD for absolute maximum specification. This re-biasing is true for both differential (using INP and INN) and single ended input waveforms (using just INP).

图 4-8. 交流耦合外部直流偏置选项

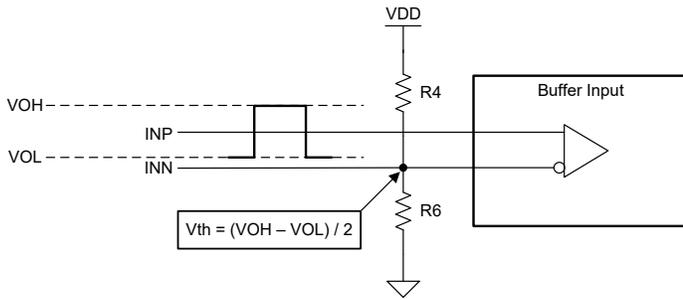
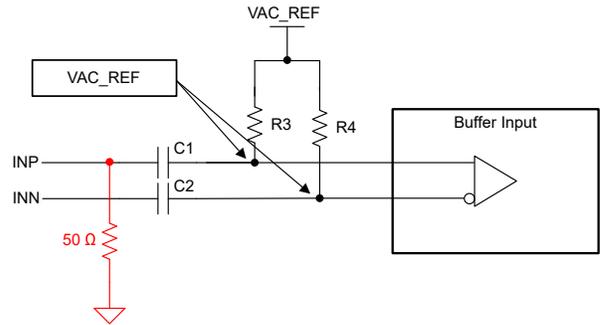


图 4-9. 具有差分输入级的直流耦合单端输入



If the input amplitude or V_{pp} is greater than datasheet specification a 50Ω resistor to ground is used to meet the input requirements. This re-biasing is true for both differential (using INP and INN) and single ended input waveforms (using just INP). R3 and R4 are usually 50Ω.

图 4-10. 具有 VAC_REF 引脚选项的外部直流偏置

5 采用时钟缓冲器实现性能提升及结果

在 OCXO/TCXO 输入端和对压摆率敏感的时钟器件之间添加低噪声时钟缓冲器有助于最大限度缓解相位噪声性能下降。基于 PLL 的时钟器件中的相位噪声改善常有争议，这是因为对相位噪声至关重要的 PLL 器件上的输入缓冲级具有极低的噪声，所以添加缓冲器来提高压摆率最终会增加总相位噪声。在下一节中，我们将介绍在 LMX2820 合成器器件之前使用和不使用低噪声正弦波-方波缓冲器的研究情况，并记下结果。

5.1 FSWP 相位噪声分析仪测量案例

在较低频率下进行处理时，与 SMA100B 的较低频率源输入相比，使用低噪声时钟缓冲器 (LMK1C110x) 时的相位噪声在 FSWP 相位噪声分析仪上显示出更好的性能 (如图 5-2 所示)。这一结果表明，在较低频率下，压摆率敏感性会影响 FSWP 的内部电路，因此源测量结果趋于悲观。通过 LMK1C110x 在较低频率下缓冲来自 SMA100B 的相同输入时，在较低失调频率下会显示出更好的结果。类似的概念适用于所有对压摆率敏感且基于 PLL 的合成器器件。

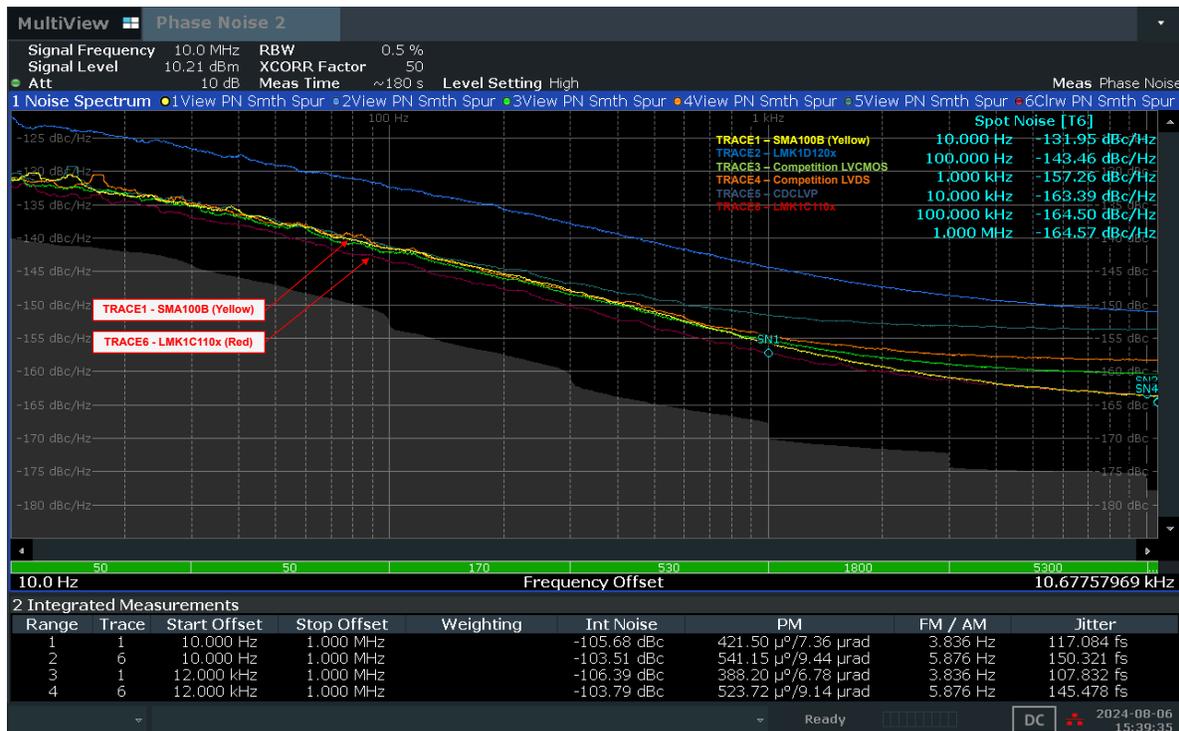


图 5-1. LMK1C110x 在源和缓冲器之间的 10MHz 输出相位噪声差

在较高频率下，FSWP 上显示的源噪声测量结果和缓冲器测量结果之间的差距会减小，因为更好的压摆率有助于在较高频率下有效使用测量仪器，如图 5-2 所示。添加低噪声缓冲器仍然有助于提高缓冲器噪声性能，特别是在较低的输入振幅下，但在某些时候，由于压摆率较高，添加时钟缓冲器根本不起作用。由于大多数近端相位噪声很重要的系统都是从较低频率开始，因此添加缓冲器可显著提高裕度。

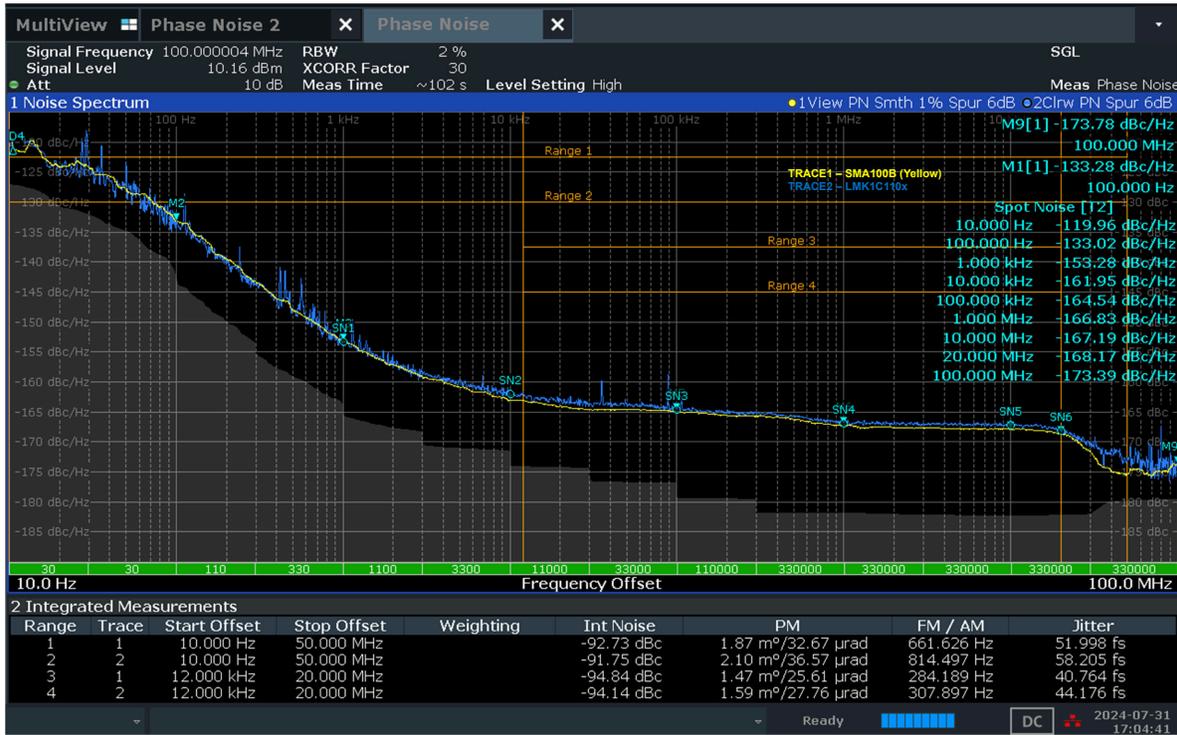


图 5-2. LMK1C110x 在源和缓冲器之间的 100MHz 输出相位噪声差

以较高频率运行的 LMX2820 等合成器器件具有较宽的输入频率范围，输入级通常针对较高频率进行了优化。当使用 10MHz 输入源或其他较低的频率时，相位噪声性能下降非常明显。在 100MHz 下，由于压摆率要高得多，因此性能下降并不明显，但在使用低噪声正弦波-方波转换缓冲器时，尤其是在较低的输入功率级别下仍有一些改善。

5.2 TI LMX2820 通过正弦波-方波时钟缓冲器改善噪声

根据 FSWP 噪声分析仪的结果，我们在 TI 基于 PLL 的合成器 LMX2820 上执行了相同的实验。不同功率级别下的 10MHz 正弦波输入被直接注入以及通过低噪声缓冲器 (LMK1C110x) 注入。

该实验有两个用例：

- 用例 1：在不同功率级别下从 SMA100B 到 LMX2820 的正弦波输入。
- 用例 2：在与用例 1 相同的功率级别下从 SMA100B 通过 LMK1C110x 时钟缓冲器放大到 LMX2820 中的输入正弦波。

在输入端采用了不同的功率级别来查看 PLL 与缓冲器输入级对性能的影响。

如图 5-3 所示，PLL 的相位噪声得到显著改善，从而提高了不同频带的抖动性能。随着我们降低图 5-3 迹线 1 (黄色) 和迹线 4 (橙色) 之间所示的 10MHz 输入基准处的功率，PLL 性能差距会增大。这是由于输入端的压摆率进一步下降所致。

如图 5-4 所示，在较高的输入频率下，正弦波-方波情况之间的性能差距变小，但如果输入振幅很小，则缓冲器有助于改善相位噪声。

在较低的功率下添加缓冲器级有助于提高系统中的性能裕度。即使在 14dBm 和 10dBm (迹线 6：红色) 输入功率级别下，时钟缓冲器的压摆率也优于 PLL 输入级。这一点表明，即使在较高的功率级别下，仍可以使用时钟缓冲器来进一步改善相位噪声。

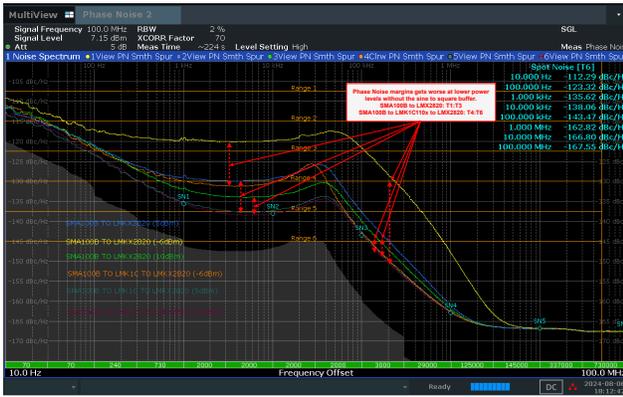


图 5-3. 10MHz 基准输入至 LMX2820 100MHz 输出，带或不带缓冲器（用例 1：T1 至 T3，用例 2：T4 至 T6，输入功率：-6dBm、5dBm、10dBm）



图 5-4. 100MHz 基准输入至 LMX2820 1GHz 输出，带或不带缓冲器（用例 1：T1 至 T3，用例 2：T4 至 T6，输入功率：-6dBm、5dBm、10dBm）



图 5-5. 10MHz 基准输入至 LMX2820 100MHz 输出，带或不带缓冲器（用例 1：T1 至 T3，用例 2：T4 至 T6，输入功率：-10dBm、0dBm、14dBm）

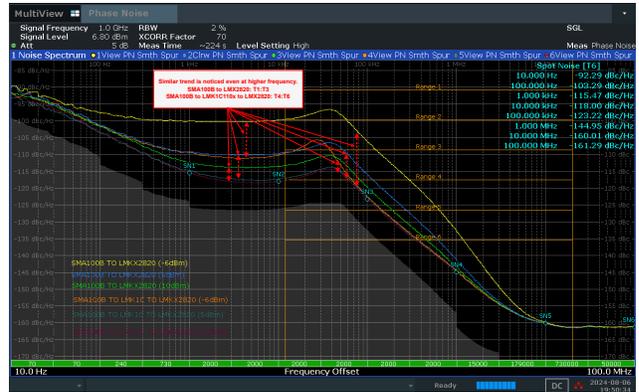


图 5-6. 10MHz 基准输入至 LMX2820 1GHz 输出，带或不带缓冲器（用例 1：T1 至 T3，用例 2：T4 至 T6，输入功率：-6dBm、5dBm、10dBm）

以下抖动测量图展示了使用 LMX2820 的直接正弦波输入与通过 LMK1C110x 时钟缓冲器使用正弦波输入时在不同频带中的抖动影响。当使用时钟缓冲器时，最坏情况选项的集成抖动大约改善 5 倍，如图 5-11 所示。



图 5-7. 总 RMS 抖动 (12kHz 至 20MHz) : 10MHz 基准输入至 LMX2820 100MHz 输出, 带或不带缓冲器 (用例 1 : T1 至 T3, 用例 2 : T4 至 T6, 输入功率 : -6dBm、5dBm、10dBm)

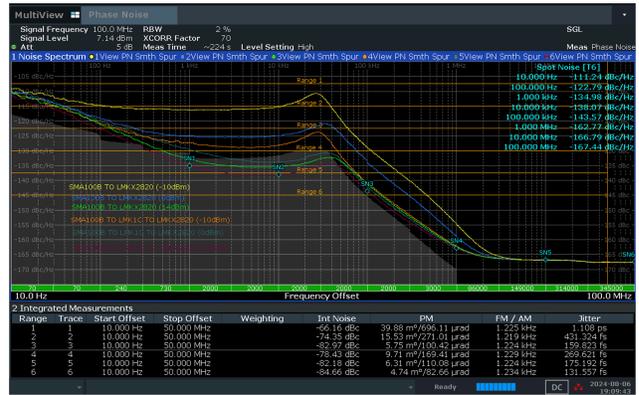


图 5-8. 总 RMS 抖动 (12kHz 至 20MHz) : 10MHz 基准输入至 LMX2820 100MHz 输出, 带或不带缓冲器 (用例 1 : T1 至 T3, 用例 2 : T4 至 T6, 输入功率 : -10dBm、0dBm、14dBm)

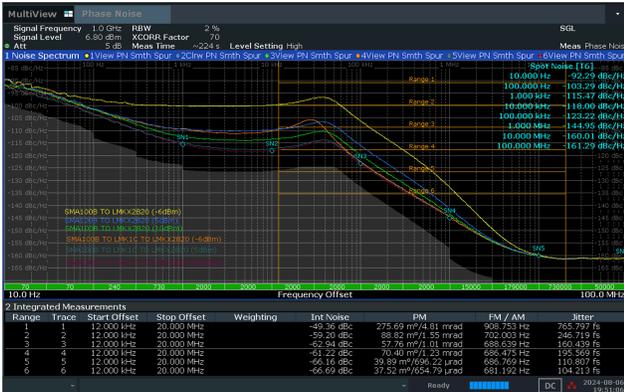


图 5-9. 总 RMS 抖动 (12kHz 至 20MHz) : 10MHz 基准输入至 LMX2820 1GHz 输出, 带或不带缓冲器 (用例 1 : T1 至 T3, 用例 2 : T4 至 T6, 输入功率 : -6dBm、5dBm、10dBm)

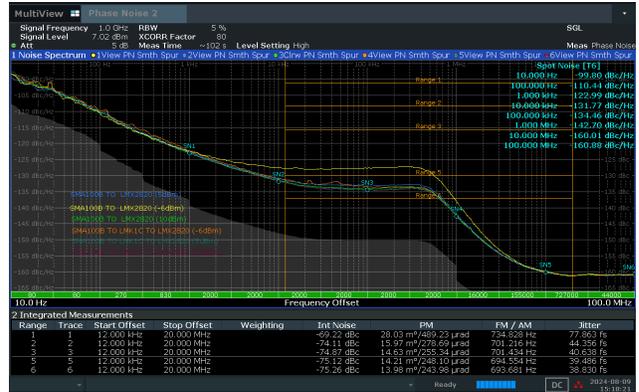


图 5-10. 总 RMS 抖动 (12kHz 至 20MHz) : 100MHz 基准输入至 LMX2820 1GHz 输出, 带或不带缓冲器 (用例 1 : T1 至 T3, 用例 2 : T4 至 T6, 输入功率 : -6dBm、5dBm、10dBm)



图 5-11. 总 RMS 抖动 (10Hz 至 50MHz) : 10MHz 基准输入至 LMX2820 100MHz 输出, 带或不带缓冲器 (用例 1 : T1 至 T3, 用例 2 : T4 至 T6, 输入功率 : -6dBm、5dBm、10dBm)

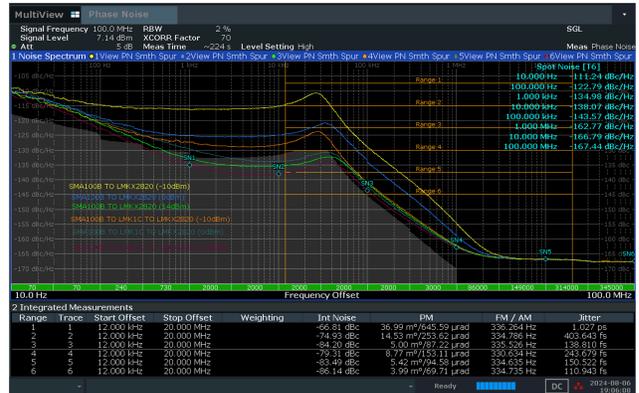


图 5-12. 总 RMS 抖动 (10Hz 至 50MHz) : 10MHz 基准输入至 LMX2820 100MHz 输出, 带或不带缓冲器 (用例 1 : T1 至 T3, 用例 2 : T4 至 T6, 输入功率 : -10dBm、0dBm、14dBm)



图 5-13. 总 RMS 抖动 (10Hz 至 50MHz) : 10MHz 基准输入至 LMX2820 1GHz 输出, 带或不带缓冲器 (用例 1 : T1 至 T3, 用例 2 : T4 至 T6, 输入功率 : -6dBm、5dBm、10dBm)

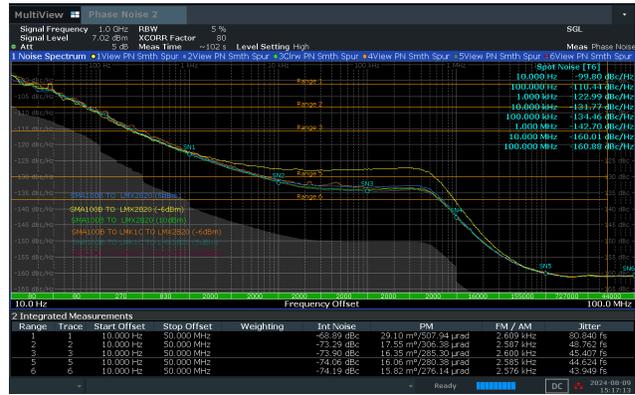


图 5-14. 总 RMS 抖动 (10Hz 至 50MHz) : 100MHz 基准输入至 LMX2820 1GHz 输出, 带或不带缓冲器 (用例 1 : T1 至 T3, 用例 2 : T4 至 T6, 输入功率 : -6dBm、5dBm、10dBm)

5.2.1 LMX2820 相位噪声和 RMS 抖动结果汇总

表 5-1、表 5-2 和表 5-4 展示了使用正弦波-方波缓冲器时的量化改进结果汇总。需要注意的几个关键点。

- LMX2820 PLL 噪声在 10kHz 失调频率附近得到显著改善。远端噪声主要取决于 VCO。
- 与没有缓冲器的情况相比, 使用缓冲器时, 较高功率级别下的 RMS 抖动和相位噪声更好。对于最差情况 (最低功率级别) 下的缓冲器, 抖动降低 75.6%, 而对于最佳情况 (最高功率级别) 下的缓冲器, 抖动降低 20%。
- 100MHz 输入频率下也有轻微改善, 但与更低频率的用例相比, 改善并不显著, 如表 5-3 和表 5-5 所示。这一现象的原因之一是 LMX2820 上使用了倍频器级来提高器件输入端的压摆率。

表 5-1. 相位噪声：10MHz 输入、100MHz 输出

参数		数据						单位
输入功率		-10	-6	0	5	10	14	dBm
迹线		迹线 1：黄色		迹线 2：蓝色		迹线 3：绿色		
用例 1：不带缓冲器时的相位噪声	10Hz	-108.93	-109.24	-110.16	-111.43	-111.28	-110.3	dBc
	100Hz	-114.68	-117.08	-119.04	-120.96	-121.32	-120.84	
	1kHz	-116.29	-119.31	-125.16	-128.95	-131.84	-132.96	
	10kHz	-115.2	-119.78	-124.95	-129.29	-133.58	-135.34	
	100kHz	-128.82	-121.58	-134.10	-137.62	-140.04	-141.22	
	1MHz	-154.72	-147.92	-158.94	-161.33	-162.04	-162.20	
	10MHz	-166.76	-166.75	-166.87	-166.79	-166.80	-166.84	
100MHz	-167.49	-167.53	-167.57	-167.54	-167.46	-167.57		
迹线		迹线 4：橙色		迹线 5：灰蓝色		迹线 6：红色		-
用例 2：带缓冲器时的相位噪声	10Hz	-109.73	-111.12	-110.34	-112.72	-112.29	-111.24	dBc
	100Hz	-121.17	-122.06	-119.96	-123.5	-123.32	-122.79	
	1kHz	-127.26	-129.94	-129.64	-135.14	-135.62	-134.98	
	10kHz	-128.17	-130.12	-133.81	-137.32	-138.06	-138.07	
	100kHz	-140.83	-142.73	-142.23	-142.97	-143.47	-143.57	
	1MHz	-162.13	-162.50	-162.52	-162.75	-162.82	-162.77	
	10MHz	-166.79	-166.77	-166.71	-166.82	-166.80	-166.79	
100MHz	-167.51	-167.51	-167.6	-167.54	-167.56	-167.44		
相位噪声增量：用例 2 - 用例 1	10Hz	-0.8	-1.88	-0.18	-1.29	-1.01	-0.94	dBc
	100Hz	-6.49	-4.98	-0.92	-2.54	-2	-1.95	
	1kHz	-10.97	-10.63	-4.48	-6.2	-3.78	-2.02	
	10kHz	-12.97	-10.34	-8.86	-8.03	-4.48	-2.73	
	100kHz	-12.01	-21.15	-8.13	-5.32	-3.43	-2.35	
	1MHz	-7.41	-14.58	-3.58	-1.42	-0.78	-0.57	
	10MHz	-0.03	-0.02	0.16	-0.03	0	0.05	
100MHz	-0.02	0.02	-0.03	0	-0.1	0.13		

表 5-2. 相位噪声：10MHz 输入、1GHz 输出

参数		数据			单位
输入功率		-6	5	10	dBm
迹线		迹线 1：黄色	迹线 2：蓝色	迹线 3：绿色	
用例 1：不带缓冲器时的相位噪声	10Hz	-89.51	-90.23	-91.79	dBc
	100Hz	-97.59	-101.37	-101.54	
	1kHz	-100.09	-109.46	-112.42	
	10kHz	-99.74	-109.75	-113.45	
	100kHz	-106.25	-116.11	-119.71	
	1MHz	-132.78	-141.33	-143.48	
	10MHz	-159.69	-160.05	-160.09	
100MHz	-161.12	-161.08	-161.21		
迹线		迹线 4：橙色	迹线 2：灰蓝色	迹线 3：绿色	-

表 5-2. 相位噪声：10MHz 输入、1GHz 输出（续）

参数		数据			单位
用例 1：不带缓冲器时的 相位噪声	10Hz	-91.55	-93.20	-92.29	dBC
	100Hz	-101.64	-103.60	-103.29	
	1kHz	-109.23	-114.71	-115.47	
	10kHz	-110.154	-117.31	-118.00	
	100kHz	-122.66	-122.68	-123.22	
	1MHz	-144.60	-144.63	-144.95	
	10MHz	-159.83	-159.94	-160.01	
	100MHz	-161.17	-161.04	-161.29	
相位噪声增量：用例 2 - 用例 1	10Hz	-2.04	-2.97	-0.5	dBC
	100Hz	-4.05	-2.23	-1.75	
	1kHz	-9.14	-5.25	-3.05	
	10kHz	-10.414	-7.58	-4.55	
	100kHz	-16.41	-6.57	-3.51	
	1MHz	-11.81	-3.3	-1.47	
	10MHz	-0.14	0.111	0.08	
	100MHz	-0.05	0.04	-0.08	

表 5-3. 相位噪声：100MHz 输入、1GHz 输出

参数		数据			单位
输入功率		-6	5	10	dBm
迹线		迹线 1：黄色	迹线 2：蓝色	迹线 3：绿色	-
用例 1：不带缓冲器时的 相位噪声	10Hz	-98.37	-99.46	-98.25	dBC
	100Hz	-110.61	-110.59	-110.44	
	1kHz	-122.42	-122.73	-123.05	
	10kHz	-127.55	-131.08	-131.60	
	100kHz	-127.63	-133.04	-133.93	
	1MHz	-138.10	-142.00	-142.47	
	10MHz	-159.88	-159.90	-159.97	
	100MHz	-160.91	-161.00	-160.94	
迹线		迹线 4：橙色	迹线 2：灰蓝色	迹线 3：绿色	-
用例 1：不带缓冲器时的 相位噪声	10Hz	-98.28	-97.79	-99.78	dBC
	100Hz	-109.90	-110.39	-110.44	
	1kHz	-122.34	-122.71	-122.99	
	10kHz	-130.77	-131.49	-131.77	
	100kHz	-133.43	-134.26	-134.46	
	1MHz	-142.43	-142.67	-142.70	
	10MHz	-160.06	-159.93	-160.01	
	100MHz	-161.08	-161.07	-161.88	
相位噪声增量：用例 2 - 用例 1	10Hz	0.08	1.67	-1.54	dBC
	100Hz	0.70	0.12	0	
	1kHz	0.08	0.02	0.05	
	10kHz	-3.23	-0.40	-0.17	
	100kHz	-5.80	-1.22	-0.52	
	1MHz	-4.33	-0.66	-0.23	
	10MHz	-0.18	-0.04	-0.03	
	100MHz	-0.17	-0.07	-0.06	

表 5-4. 总 RMS 抖动：10MHz 输入、100MHz 和 1GHz 输出

参数			数据						单位
输入功率条件			-10	-6	0	5	10	14	dBm
迹线			迹线 1：黄色		迹线 2：蓝色		迹线 3：绿色		-
用例 1：不带缓冲器时的 RMS 抖动	FOUT = 100MHz	12kHz 至 20MHz	1027	931.858	403.643	244.971	165.222	138.81	fs
		10kHz 至 50MHz	1108	968.048	431.324	266.197	185.035	159.823	
	FOUT = 1GHz	12kHz 至 20MHz	-	765.797	-	246.719	160.439	-	
		10kHz 至 50MHz	-	805.778	-	262.336	172.988	-	
迹线			迹线 4：橙色		迹线 5：灰蓝色		迹线 3：红色		-
用例 1：不带缓冲器时的 RMS 抖动	FOUT = 100MHz	12kHz 至 20MHz	243.679	197.268	150.522	118.663	111.924	110.943	fs
		10kHz 至 50MHz	269.621	219.699	175.192	137.409	131.464	131.557	
	FOUT = 1GHz	12kHz 至 20MHz	-	195.569	-	110.807	104.213	-	
		10kHz 至 50MHz	-	212.638	-	120.615	114.175	-	
RMS 抖动增量：用例 2 - 用例 1	FOUT = 100MHz	12kHz 至 20MHz	-783.321	-734.59	-253.121	-126.308	-53.298	-27.867	fs
		10kHz 至 50MHz	-838.379	-748.349	-256.132	-128.788	-53.571	-28.266	
	FOUT = 1GHz	12kHz 至 20MHz	-	-570.228	-	-135.912	-56.226	-	
		10kHz 至 50MHz	-	-593.140	-	-141.721	-58.813	-	

表 5-5. 总 RMS 抖动：100MHz 输入、1GHz 输出

参数			数据			单位
输入功率条件			-6	5	10	dBm
迹线			迹线 1：黄色	迹线 2：蓝色	迹线 3：绿色	-
用例 1：不带缓冲器时的 RMS 抖动	FOUT = 1GHz	10kHz 至 50MHz	80.840	48.762	45.407	fs
迹线			迹线 4：橙色	迹线 5：灰蓝色	迹线 3：红色	-
用例 1：不带缓冲器时的 RMS 抖动	FOUT = 1GHz	10kHz 至 50MHz	47.177	44.624	43.949	fs
RMS 抖动增量：用例 2 - 用例 1	FOUT = 1GHz	10kHz 至 50MHz	-33.663	-4.138	-2.458	fs

6 正弦波-方波时钟缓冲器比较

我们前面的研究表明，低噪声时钟缓冲器有助于在进行正弦波-方波转换时提高相位噪声性能。在本节中，针对 TI 和其他供应商提供的不同时钟缓冲器，在用作正弦波-方波转换的基准时，我们对其进行了比较。

在相同条件下，我们为所有缓冲器使用了输入功率级别为 10dBm 的 10MHz 正弦波输入。LMK1C110x 的总相位噪声在比较的所有缓冲器中最低。表 6-1 提供了在使用每个缓冲器的直接正弦波输入时的加性相位噪声数字，因为在需要进行正弦波-方波转换时，这是实际系统的主要用例。

由于设备可能会受到 [FSWP 相位噪声分析仪测量案例](#) 中所述的压摆率问题的影响，因此在后续章节中会使用级联配置进行 LMK1C110x 和其他器件的实际加性相位噪声建模。

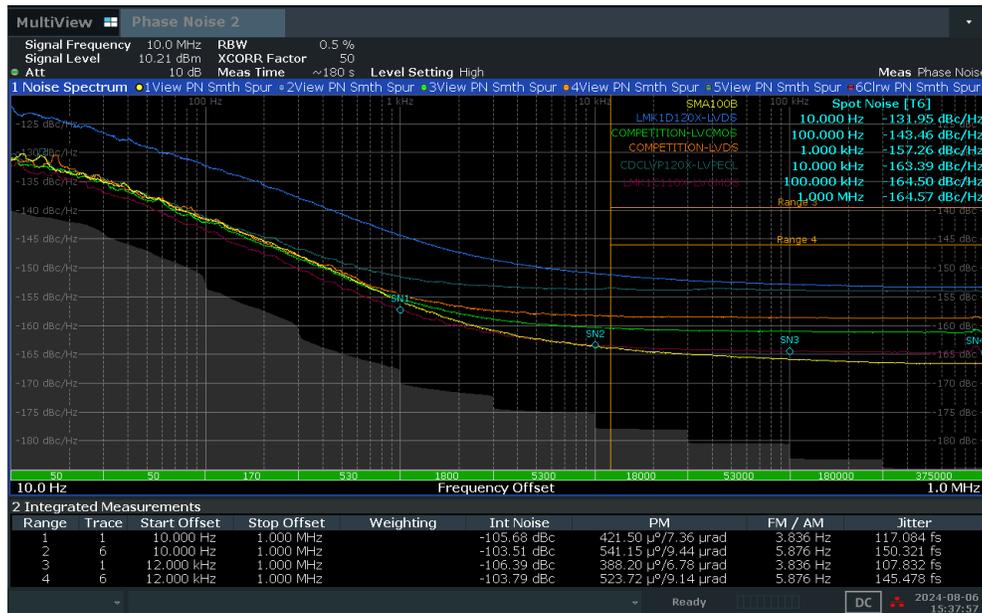


图 6-1. 正弦波-方波缓冲器比较

表 6-1. 正弦波 10MHz、10dBm 条件下的加性抖动比较

参数	LMK1C110x	CDCLVP120x	COMP.LVCMOS	COMP.LVDS	单位
源 RMS 抖动 (10Hz 至 1MHz)	117.084	117.084	117.084	117.084	fs
总 RMS 抖动 (10Hz 至 1MHz)	150.321	457.152	210.055	271.11	
加性 RMS 抖动 (10Hz 至 1MHz)	94.274	441.904	174.397	244.524	
源 RMS 抖动 (10Hz 至 1MHz)	107.832	107.832	107.832	107.832	
总 RMS 抖动 (12kHz 至 1MHz)	145.478	452.119	204.935	266.091	
加性 RMS 抖动 (12kHz 至 1MHz)	97.653	439.071	174.271	243.263	

6.1 LMK1C110x 加性噪声与其他噪声对比

如节 5.1 中所述，由于压摆率问题，噪声测量设备可能对加性相位噪声结果给出乐观的结果。此处使用了另一种级联设置来模拟 LMK1C110x 与竞争对手性能最佳的缓冲器的实际加性相位噪声。我们使用级联缓冲器并将第一个缓冲器视为源。缓冲器的相位噪声设置如图 6-2 所示

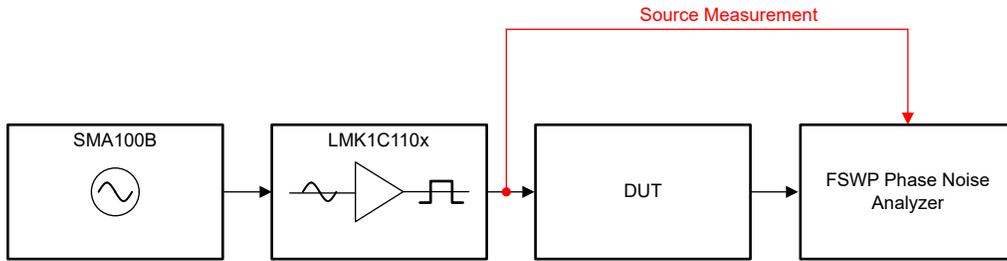
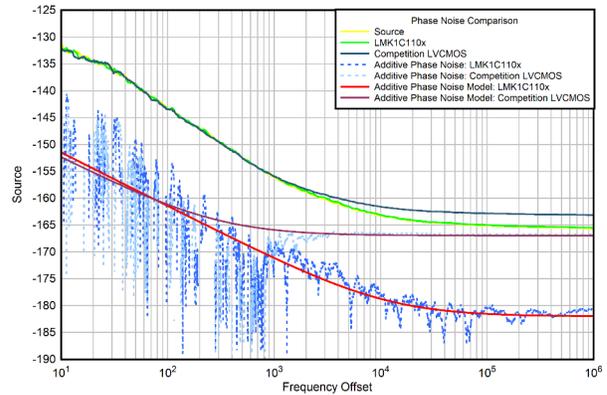


图 6-2. 加性噪声缓冲器设置

以下加性相位噪声图比较了 TI 缓冲器与竞品的性能。



图 6-3. 10MHz 输出时的总相位噪声

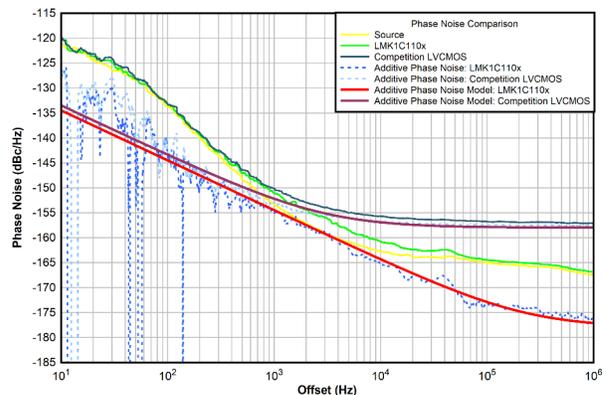


10kHz 时的本底噪声 = -181.9dBc/Hz、1/f 噪声 = 178.5dBc/Hz

图 6-4. 10MHz 输出时的加性相位噪声



图 6-5. 100MHz 输出时的总相位噪声



10kHz 时的本底噪声 = -177.9dBc/Hz、1/f 噪声 = -164.3dBc/Hz

图 6-6. 100MHz 输出时的加性相位噪声



图 6-7. RMS 抖动 (12kHz 至 1MHz) : 10MHz 输出 - LMK1C110x 与竞品比较



图 6-8. RMS 抖动 (10Hz 至 1MHz) : 12MHz 输出 - LMK1C110x 与竞品比较



图 6-9. RMS 抖动 (12kHz 至 20MHz) : 100MHz 输出 - LMK1C110x 与竞品比较



图 6-10. RMS 抖动 (10Hz 至 50MHz) : 100MHz 输出 - LMK1C110x 与竞品比较

表 6-2. LMK1C110x 与竞品的加性抖动比较

参数	LMK1C110x		竞品 LVC MOS		单位
	10MHz	100MHz	10MHz	100MHz	
频率	10MHz	100MHz	10MHz	100MHz	
加性抖动 (10Hz 至 1MHz)	21.87	-	104.82	-	fs
加性抖动 (12kHz 至 1MHz)	21.39	-	104.41	-	
加性抖动 (12kHz 至 20MHz)	-	4.51	-	133.35	
加性抖动 (10Hz 至 50MHz)	-	16.38	-	200.90	

7 总结

TI 时钟缓冲器有助于降低由于压摆率敏感性问题而对整体相位噪声产生的影响，并提供面向所有终端应用用例的全面产品系列。使用 LMK1C110x 获得的改善结果表明，在相位噪声要求严格的应用中，低基准频率源 (OCXO/TCXO) 的相位噪声和抖动可得到改善。通过正弦波-方波的这种性能比较，用户可以为每个用例选择合适的器件，从而提高系统中的设计裕度。

8 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [LMK1C110x 1.8V、2.5V 和 3.3V LVCMOS 时钟缓冲器系列](#) 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [LMK00301 3GHz 10 路输出超低加性抖动差分时钟缓冲器和电平转换器](#) 数据表。
3. 德州仪器 (TI), [LMK1D120x 低加性抖动 LVDS 缓冲器](#) 数据表。
4. 德州仪器 (TI), [CDCLVP1208 八路 LVPECL 输出、高性能时钟 2:8 缓冲器](#) 数据表。

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司