



Badarish Colathur Arvind, Sanjay Pithadia, Ravindra Munvar, Christian Schmoeller, Julian, Hagedorn, Leni Skariah, Arvind Sridhar

摘要

本应用手册讨论了超声波时钟的重要性，并说明了一些关键的 TI 器件如何实现超低的端到端抖动和相位噪声。本应用手册还展示了不同时钟级如何实现超低的附加抖动。

内容

1 引言.....	2
2 时钟树.....	6
3 总结与结论.....	11
4 修订历史记录.....	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

医学超声系统使用声波来生成人体图像。通过向人体发射超声波，然后接收回声来实现这一点。该回声经过处理便可生成图像。

超声波信号的发送和接收必须高度同步，才能获得理想结果。精密计时对于确保显示的信息具有最小伪影至关重要。

相位噪声（频域）或抖动（时域）是衡量时钟信号的相位或开关边沿与其理想位置偏离程度的指标，是决定参考时钟对超声图像影响的重要参数。例如，超声波通常使用多普勒效应来确定血流方向和血流量。高相位噪声会导致多普勒图像中出现斑点等伪影，这些伪影代表血流计算和显示中的误差。在多普勒成像中，近表面的强反射和更深度的弱信号会导致高动态范围，参考时钟上的抖动可能会产生不希望出现的伪影。

TI 公司广受欢迎的高性能 AFE 需要小于 400fs 的抖动才能实现最佳性能，尤其是在 CW 多普勒模式下。多普勒成像的另一个重要考虑因素是低偏移频率（通常为 1kHz）下的相位噪声，以分辨彼此非常接近的物体。

图 1-1 是具有代表性的高层方框图。

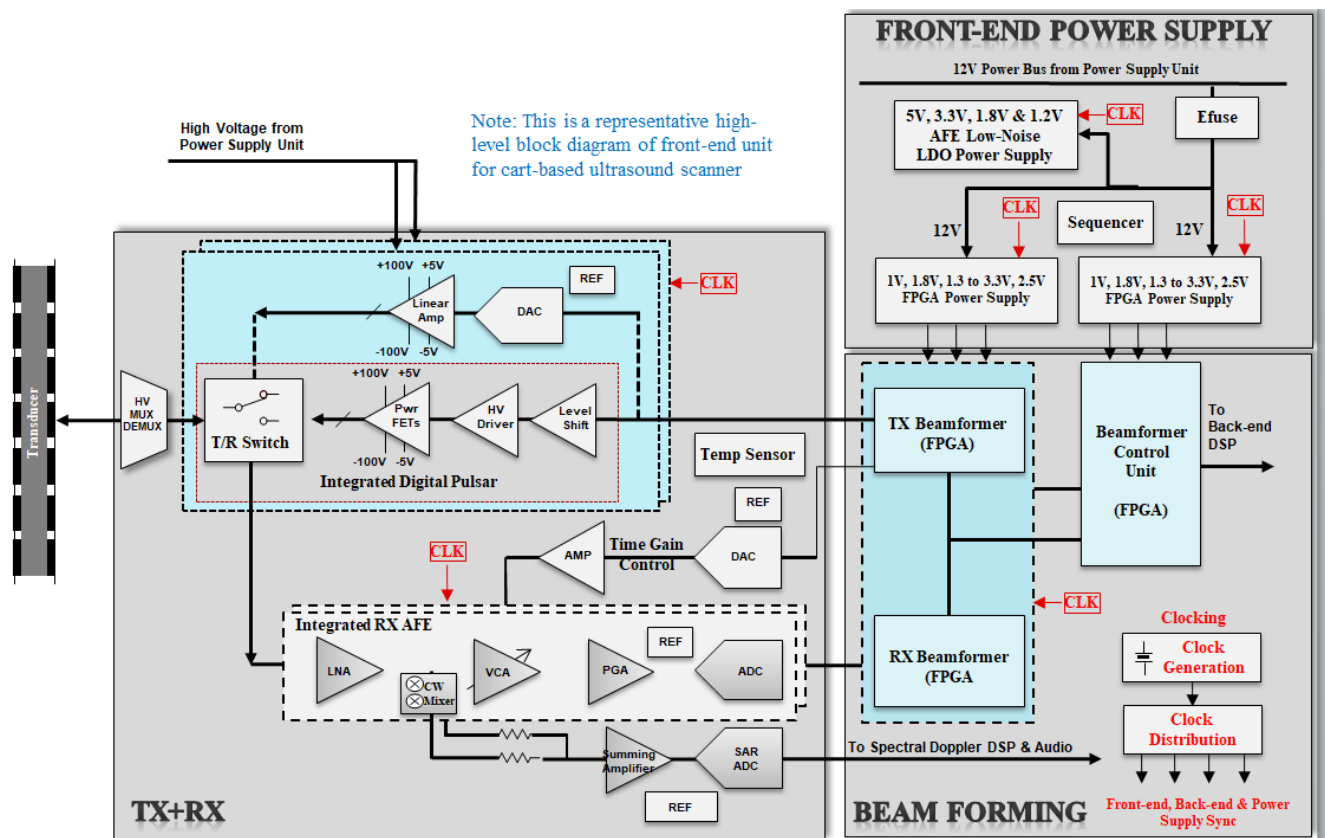


图 1-1. 代表性框图（前端单元）

超声系统中有各种需要时钟的子系统：

1. 前端：

- a. 发射脉冲发生器 - 需要几个在 200MHz 范围内抖动超低的高频时钟副本，以实现良好的光束聚焦。（TI 公司生产的超低抖动参考源的一个示例是 LMK61E2 系列晶体振荡器，其在 200MHz 载波发生 1kHz 偏移时也具有非常好的接近相位噪声 - 140dBc/Hz。TI 可用于分配低噪声参考时钟的超低附加抖动缓冲器的示例有：用于 LVCMOS 的 LMK1C110x 和用于差分输出的 LMK0030X。）
- b. 接收 AFE - 接收 AFE 中最敏感的组件是 ADC 时钟。该时钟需要非常低的抖动，并且在 1kHz 偏移时具有低相位噪声。此外，在波束成形方面，所有 AFE 的高度同步时钟的几个低偏移副本可以确保同时采样数据。频率范围为 40 至 125MHz。（TI 公司生产的低偏移分布缓冲器系列的一个示例是 LMK0030X。）

- c. CW 多普勒 - 需要两个时钟，即 $16 \times f_{CW}$ 和 $1 \times f_{CW}$ 。 $16 \times f_{CW}$ 用于在 AFE 内部产生具有 16 个精确相位的 LO 信号，而 $1 \times f_{CW}$ 用于多个 AFE 器件的同步。非常好的相位噪声性能是决定频移的关键，此规格仅适用于 16x 时钟，因为 1x 时钟主要用于同步。16x 时钟的范围通常为 16 至 128MHz。（TI 公司生产的适用于生成 CW 多普勒时钟的高性能双环路抖动衰减器/时钟发生器器件系列的一个示例是 [LMK04832](#)。
- d. 波束成形 - 对于发送和接收波束成形，时钟需要高度同步（LMK0030x 扇出缓冲器）。发射波束形成聚焦超声波阵面。精确计时是必需的，时钟边缘（抖动）的任何变化都可能导致失去焦点。发射和接收波束成形之间的精确同步损失也会导致图像分辨率的损失。
- e. 时钟分配 FPGA - [FPGA](#) 也可用于生成发送和接收计时所需的时钟，但这些时钟的抖动性能通常不如专用时钟 IC。因此，需要通过外部抖动清除器来清除抖动。（TI 公司生产的高性能双环路抖动衰减器的一个示例是 LMK04832。）

另一个重要的最新发展是引入了 JESD204B ADC (ADS52J90) 和 AFE (AFE58JD28、AFE58JD48)，它们通过同步多个器件来提供更高的数据转换器分辨率和前端灵敏度。这种同步方案需要非常精确的时钟，如 JESD204B 中定义的那样；TI 公司生产的 LMK04832 支持 JESD204B 时钟，可实现最高系统级性能。

2. 电源：

- a. 超声系统内的所有电源通常都同步到一个主时钟上，以避免开关噪声导致图像中出现伪影（通过滤波）。这些电源通常在 100kHz 至 1MHz 的范围内运行。更高的开关频率通常会产生更小的磁分量，但也会在更接近超声信号本身的动态范围内工作。将所有开关电源同步到相同（较低）频率，然后在该频率下进行滤波，可以避免这种噪声耦合到超声信号链中。此外，扩频时钟有助于降低 EMI 效应。（用于最小化系统中 EMI 且具有扩展频生成功能的灵活时钟发生器的示例包括 [CDCE913](#) 和 [CDCE6214](#)。）

3. 后端：

- a. 一旦信号被数字化并提供给数字后处理子系统，抖动就不那么重要了。但在整个系统中，仍希望拥有干净的时钟 - 以确保系统实现最佳性能和更低的整体噪声。
- b. 用于图像处理的 FPGA 需要的频率包括采样频率以及通信和内部逻辑块所需的其他频率。[CDCM6208](#)、[LMK033x8](#)、[CDCE6214](#) 和 [LMK60E2](#) 是一些可用于生成相关频率的 TI 器件。
- c. 用于图像处理的 DSP 和处理器需要 100MHz 等常见频率。（[CDCM6208](#)、[LMK03328](#)、[CDCE6214](#)）
- d. 外部通信 - PCI、PCI Express、USB、以太网等，通常需要 24、48 和 100MHz 时钟以及将其分配给各种外围设备的缓冲器。TI 时钟发生器（如 [CDCM6208](#)、[CDCE6214](#) 和时钟缓冲器 [LMK00334](#)、[LMK00338](#)）符合 PCIe Gen1 至 Gen5 标准并满足系统要求。

系统设计人员更喜欢使用具有下列功能的时钟：

1. 可编程性和可扩展性 - 在频率布局规划中提供灵活性，以确保最佳系统性能，并在以后支持附加功能或变化 - 无需更改硬件。（[LMK61E2](#) 参考振荡器，任何 LMK 或 CDC 时钟发生器）
2. JESD204B 支持（会在下一代高性能 AFE，例如 [LMK04832](#) 中获得支持）
3. 高集成度、更少的零件和更小的电路板解决方案尺寸（[LMK04832](#)、[LMK00328](#)、[CDCE9XX](#) 等等）。
4. 低功耗 ([CDCE6214](#))
5. 在信号链中尽可能采用全差分时钟（共模噪声抑制）。

通过超低噪声时钟源、发生器/分频器、分配器和缓冲器，实现精确时钟。与小数模式 PLL 和/或小数输出分频器相比，使用整数模式 PLL 和输出分频器时，时钟发生器是准确的，并且通常具有较低的相位噪声 - 这可能会引入额外的相位噪声和一些潜在的小频率合成误差。

通过确保前端信号链仅使用整数分频器来生成性能关键的前端时钟所需的时钟，可以最小化影响。

对于时钟信号的扇出，选择附加抖动极低的缓冲器很重要，否则每次缓冲时，高质量源时钟（即 [LMK61E2](#)）的本底噪声都会显着降低。适合此类应用的缓冲器是 [LMK0030x](#) 系列（差分）和 [LMK1C110x](#) 系列（LVCMOS），它们具有极低的附加抖动和出色的本底噪声。

TI 的时钟发生器、分频器和低抖动缓冲器是一些有助于实现所需性能的关键组件。

192 通道推车超声系统的时钟要求和图 2-1 示出了超声系统的典型时钟树。此时钟树演示了不同构建模块 (传输、接收、FPGA、处理器、电源等等) 的各种参考时钟的使用。

表 1-1. 192 通道推车超声系统的时钟要求

时钟数	频率	格式	目标	TI 器件
92	> 250 MHz	LVC MOS	TX (DAC + AMP 时钟)	LMK04832+LMK0030X ⁽¹⁾
12	高达 320 MHz	LVDS/LVPECL/LVC MOS	TX (波束形成器时钟)	LMK04832+LMK0030X ⁽¹⁾
2	120MHz	LVDS	FPGA (AWG)	LMK04832+LMK0030X
2	200MHz	LVDS	FPAG (发送)	LMK04832+LMK0030X
1	200MHz	LVDS	FPGA (接收)	LMK03328+CDCLVD12XX
16	100 kHz 至 500 kHz	LVC MOS	电源	CDCE913+LMK1C110X
12	高达 128 MHz	LVDS	AFE (CW 16x 时钟)	LMK04832+LMK0030X ⁽¹⁾
12	高达 125 MHz	LVDS/LVPECL	AFE (ADC 采样时钟)	LMK04832+LMK0030X ⁽¹⁾
12	高达 8 MHz	LVDS	AFE (CW 1x 时钟)	FPGA
1	122.88 MHz	LVDS	DSP	LMK03328
3	100MHz	LVDS	DSP	LMK03328
1	24.576 MHz	LVC MOS	音频编解码器	LMK03328

1. 相位噪声性能关键时钟。

表 1-2. 常见的超声参考频率

值						TI 器件
80MHz	96 MHz	100MHz	160MHz	200MHz	320MHz	LMK61E2

2 时钟树

示例：192 通道推车超声系统的时钟树。

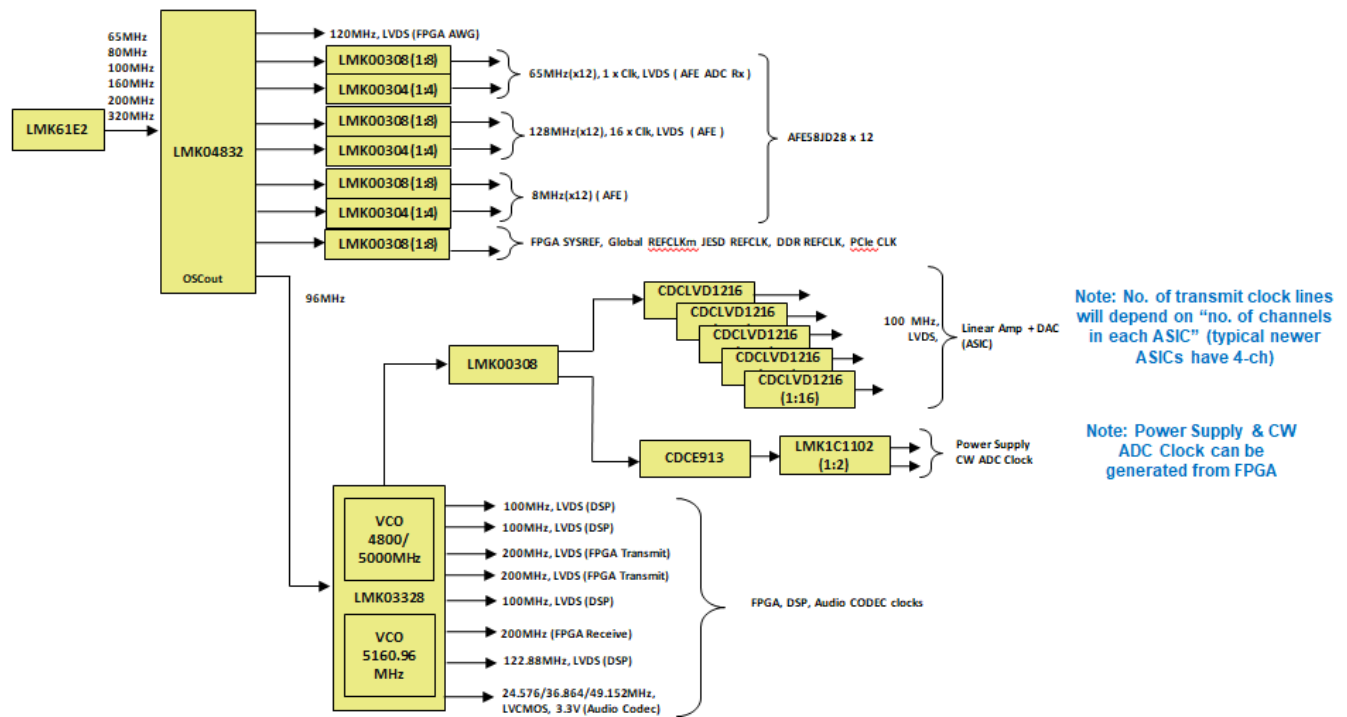


图 2-1. 前端单元和后端单元

通过使用不同时钟组件的单个评估模块进行测试，演示了总附加抖动以及时钟树中各种时钟配置产生的抖动。

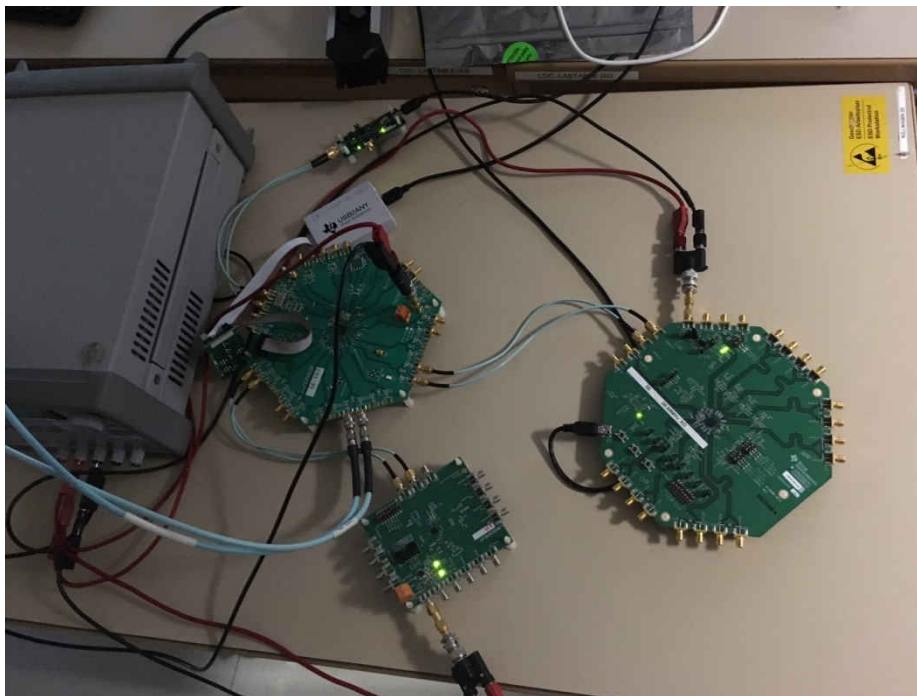
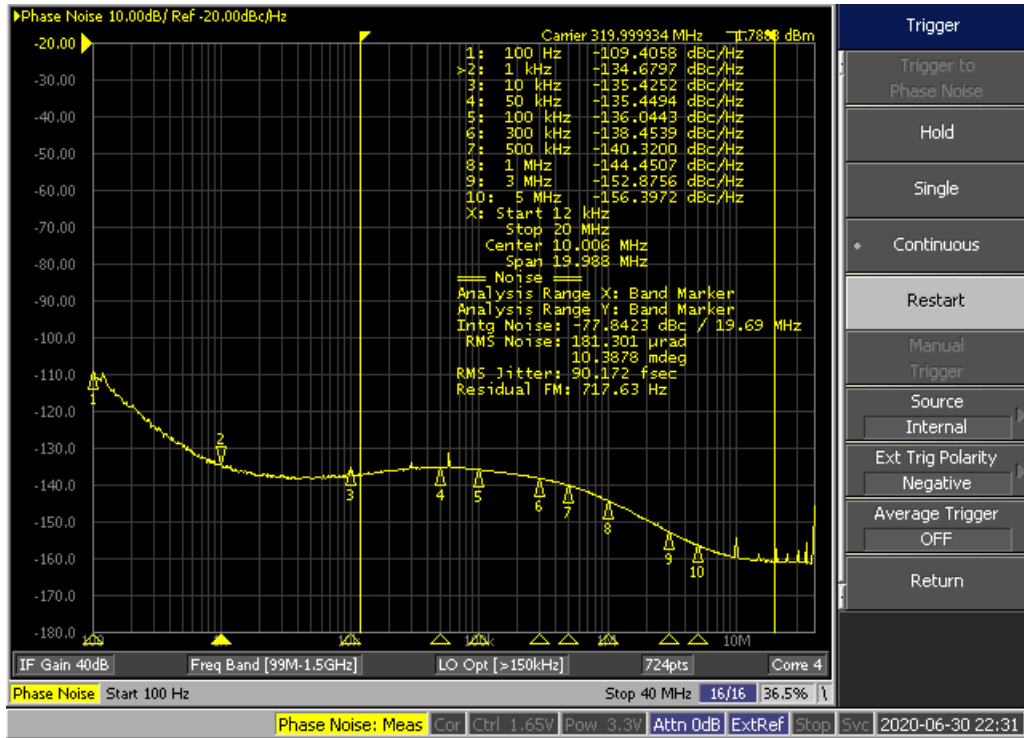


图 2-2. 不同的时钟组件

下图演示了在信号源分析仪上测得的实际信号的噪声性能。

演示 1 :

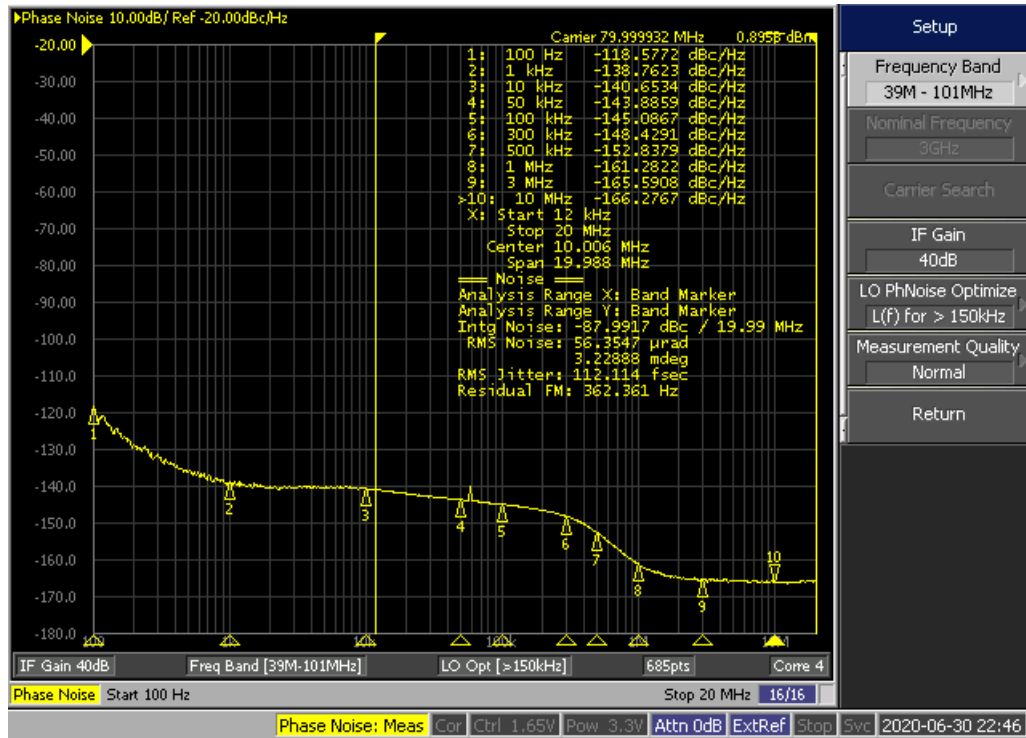


参考 = 320MHz LVPECL

集成 RMS 抖动 (12kHz-20MHz) - 90fs

图 2-3. 演示 1 , LMK61E2

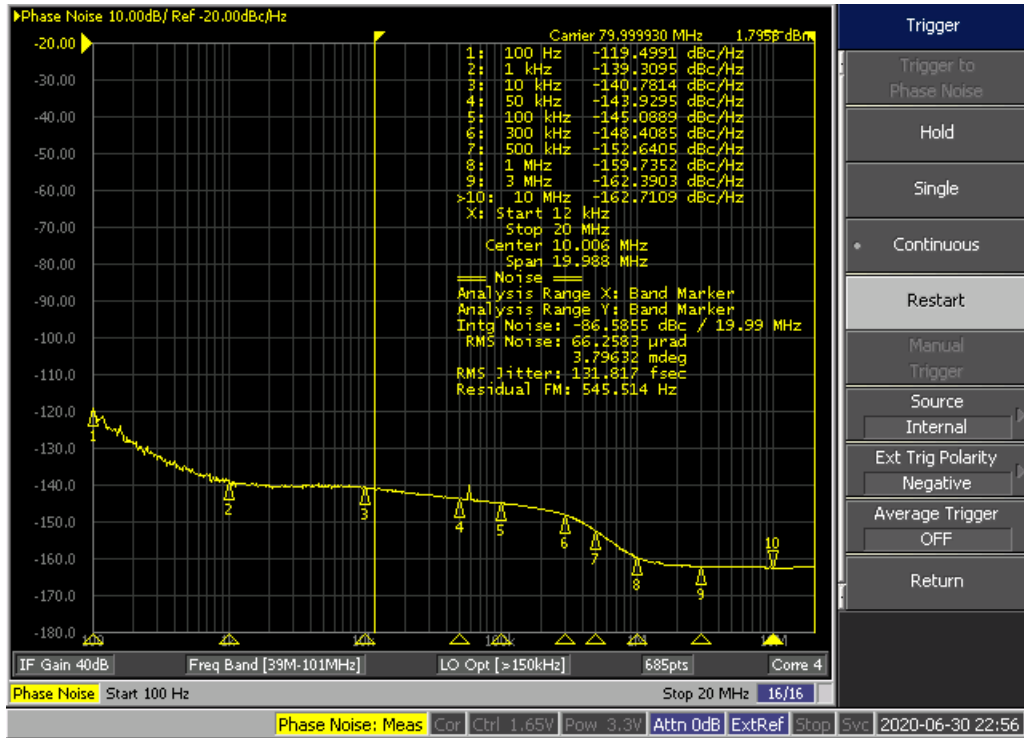
演示 2 :



参考 = 320MHz 来自 LMK61E2 和 LMK04832 输出 = 80MHz LVPECL
集成 RMS 抖动 (12kHz-20MHz) - 112fs

图 2-4. 演示 2 , LMK04832

演示 3 :



输入 = 80MHz 来自 LMK04832，输出 = 80MHz LVPECL
 集成 RMS 抖动 (12kHz-20MHz) - 132fs

图 2-5. 演示 3，LMK0030X 的输出

三个演示的摘要如下：

- LMK61E2 和 LMK04832 的总集成 RMS 抖动为 116fs (RMS)。LMK0030X 仅为 LMK04832 的输出增加了 70fs (RMS)。
- 从 LMK61E2 到 LMK0030X 输出的总集成 RMS 抖动仅为 132fs。
- 该时钟树抖动是添加到 ADC 孔径抖动的均方根，并与 ADC SNR 的抖动要求进行比较，以确保时钟树不会降低 ADC 性能。
- 由于此处展示的时钟树的总集成 RMS 抖动很低，因此在大多数超声应用中它不会限制 ADC 性能。

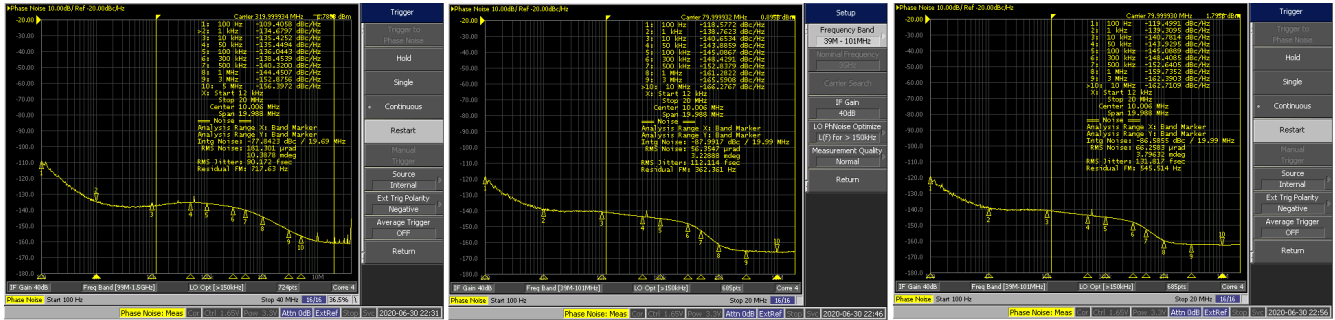


图 2-6. LMK61E2 与 LMK0030X 的比较

图 2-7 演示了各种时钟器件的 PN。

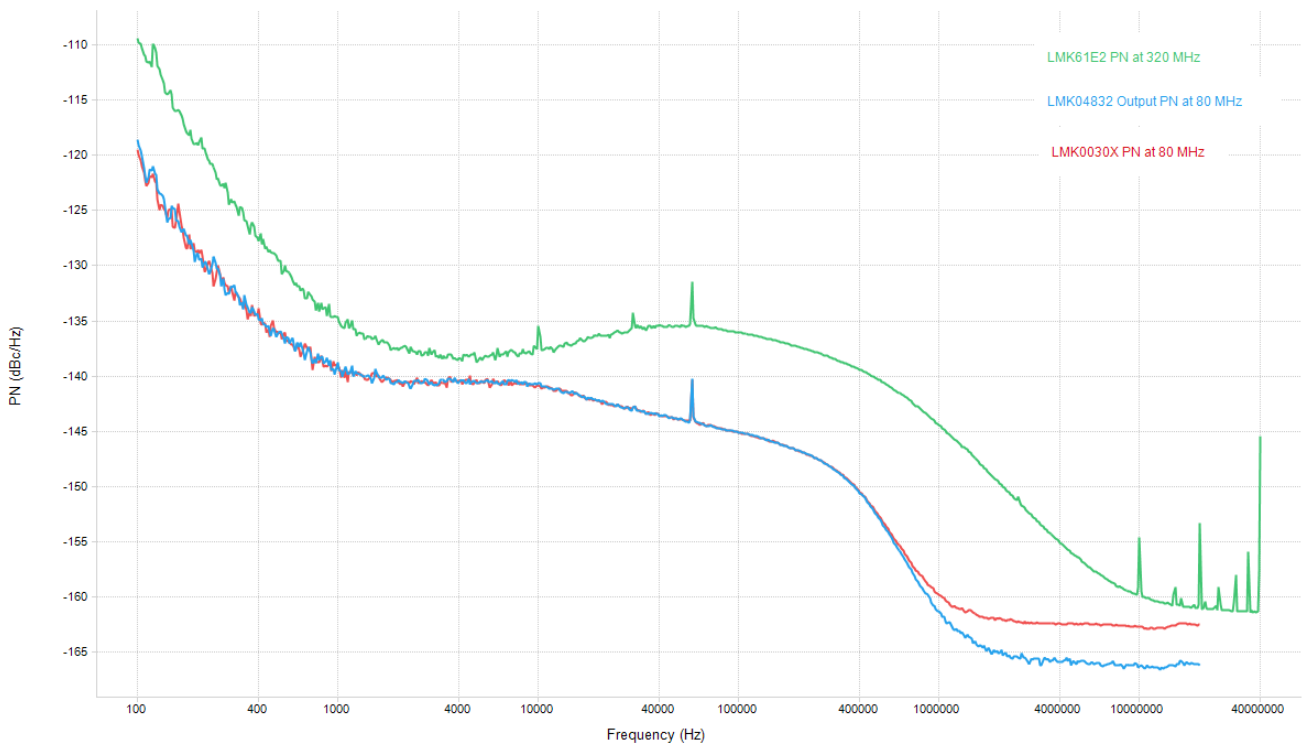


图 2-7. 标准化为 1GHz 的各种时钟器件的 PN

3 总结与结论

- TI LMK 系列时钟器件在整个时钟链中提供了出色的附加抖动性能，非常适合超声波应用。
- 端到端抖动完全限制在 TI 高性能 AFE 所需的范围内，以实现最佳性能。TI 时钟器件的低端到端抖动可确保系统设计人员实现最佳性能，同时还为电源噪声或耦合等其他可能降低时钟性能的因素提供足够的裕量。
- 对于典型的超声应用，可以通过确保极低的参考时钟相位噪声和边缘抖动来实现低噪声时钟。
- 由于引入了 JESD204B AFE (AFE58JDxx) 和 ADC (ADS52J90)，双路抖动清除器/时钟发生器 LMK04832 符合 JESD204B 标准，并满足了新 AFE/ADC 部件对相位噪声和抖动的严格要求。使用 LMK04832 设计的系统提供了额外的好处，例如：
 1. 低 1kHz 接近相位噪声
 2. 更好的 VCO 噪声性能确保了更低的本底噪声
 3. 更高的相位检测器工作速率，进一步降低了 PLL 噪声
 4. 集成型 LDO

4 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (September 2017) to Revision A (September 2020)	Page
• 更新了 修改版 A 中大部分应用报告内容.....	2

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司