

摘要

LMX2820 是一款低相位噪声射频合成器。该器件为需要改进相位噪声性能的情况提供了附加功能。本手册描述了 LMX2820 在不同 PFD 频率和基准源下的固有相位噪声性能。此分析用作与经过改进的拓扑进行比较的基线。第一个选项使用外部 VCO 而非内部 VCO。这有助于以调谐范围为代价获得更高 Q、更低相位噪声的 VCO。第二个选项使用外部混频器绕过内部 N 分频器。这消除了内部分频器引入的 PLL 相位噪声下降。将这两种技术与卓越的基准相结合，可产生最终可实现的相位噪声性能。

内容

1 引言.....	3
2 参考频率.....	3
3 标准 LMX2820 相位噪声性能.....	5
4 乘法器前级性能.....	7
4.1 外部 VCO 环路滤波器设计.....	8
4.2 有源环路滤波器实现.....	10
4.3 外部 VCO 性能结果.....	11
5 外部 PFD 拓扑.....	12
5.1 外部 PFD 环路滤波器修改.....	12
5.2 外部 PFD 测量结果.....	14
6 在现实世界中整合到一起.....	15
6.1 实际性能结果.....	15
6.2 为何使用双方法？.....	16
7 结论.....	17
8 修订历史记录.....	18

插图清单

图 2-1. 基准源的相位噪声比较.....	3
图 3-1. LMX2820 在 6GHz 输出下的相位噪声性能与 PFD 频率的关系.....	5
图 3-2. LMX2820 在 9GHz 输出下的相位噪声性能与 PFD 频率的关系.....	6
图 4-1. 3x 乘法器前级.....	7
图 4-2. 1474.56MHz 信号的相位噪声比较.....	7
图 4-3. 外部 VCO PLLatinum™ 仿真 GUI 环路滤波器.....	9
图 4-4. 外部 VCO 配置的方框图.....	10
图 4-5. 外部 VCO 相位噪声与 LMX2820 内部 VCO 的比较.....	11
图 5-1. 外部混频器的方框图，PFD 拓扑.....	12
图 5-2. 外部 PFD 的 PLLatinum™ 仿真.....	13
图 5-3. LMX2820 外部 PFD 相位噪声性能.....	14
图 6-1. 用于实际解决方案的双 LMX2820 方法.....	15
图 6-2. Dual LMX2820 实际相位噪声结果.....	15
图 6-3. 外部 PFD 与 PFD 分频器.....	16
图 6-4. 各个输出分频器设置的相位噪声.....	17

表格清单

表 2-1. 基准源的 RMS 抖动比较 (1kHz - 40MHz).....	4
--	---

表 3-1. LMX2820 积分 RMS 抖动 (10kHz - 40MHz) 与 PFD 频率的关系.....	6
表 4-1. Z-Comm DRO9000A 的开环相位噪声参数.....	8
表 4-2. 有源环路滤波器元件值.....	9
表 4-3. OPA211 运算放大器主要规格.....	10
表 4-4. 外部 VCO RMS 抖动性能对比.....	11
表 5-1. 外部 PFD 环路滤波器值.....	13
表 6-1. 集成 RMS 抖动与外部 PFD 的性能对比.....	15
表 6-2. 外部 PFD 与 PFD 分频器.....	17
表 6-3. 各个输出分频器设置的集成相位噪声.....	17

商标

PLLatinum™ is a trademark of Texas Instruments.

R&S® is a registered trademark of Rohde & Schwarz GmbH & Co.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

LMX2820 射频合成器本身可以提供出色的相位噪声性能，工作频率高达 22GHz；但是，有些情况需要改进相位噪声性能。LMX2820 提供了几种不同的拓扑结构来改善合成器相位噪声。一种技术绕过内部压控振荡器 (VCO) 并使用外部振荡器。这引入了卓越的低相位噪声 VCO，同时保持了 PLL 器件的编程特性。第二种技术使用外部混频器将射频频率下变频到 PFD (相位频率检测器) 频率。这绕过了内部反馈分频器，这是降低 PLL 相位噪声的来源之一。

2 参考频率

任何射频合成器的基础都是参考频率。获得更佳合成器相位噪声始于高质量的基准源。并非所有源或生成器都是等效的。有些表现出良好的低偏移性能，同时牺牲了高偏移本底噪声。根据应用的不同，基于相位噪声分布，一个源可能比另一个源更好。比较以下信号发生器源，为后续测量分析找到更佳基准源。

- Rohde & Schwarz (R&S®) SMA100B
- Wenzel 振荡器
- Agilent PSG (带有 UNR 增强相位噪声选项)
- R&S SMA100A
- Agilent ESG

图 2-1 展示了以 307.2MHz 运行的源之间的相位噪声比较。表 2-1 列出了 1kHz 至 40MHz 范围内的积分 RMS 抖动。源输出功率超过 10dBm，相位噪声测量采用 Holzworth 相位噪声分析仪来执行。

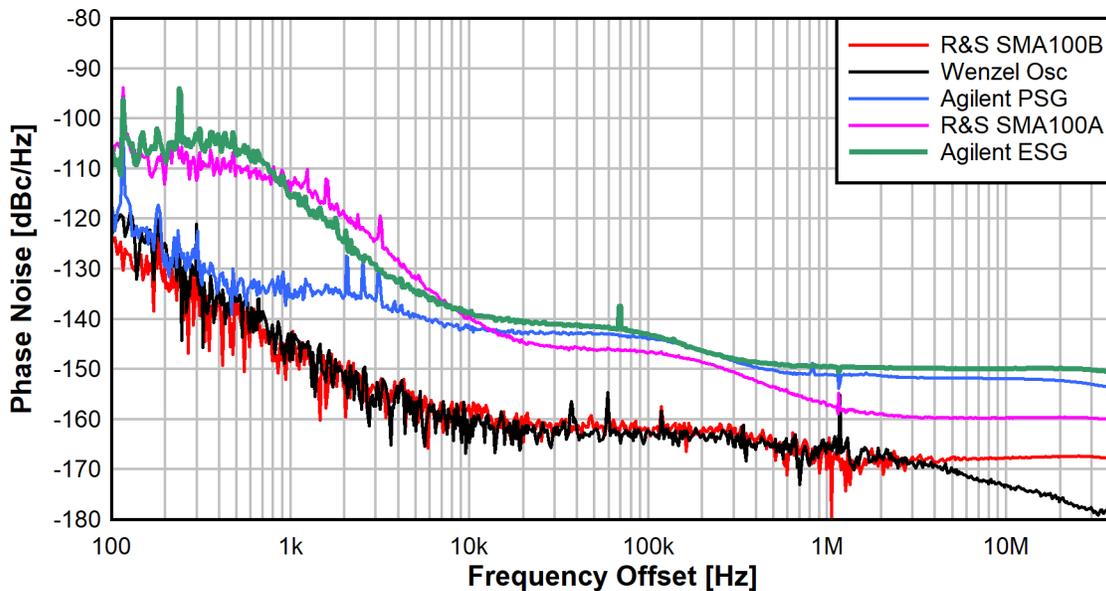


图 2-1. 基准源的相位噪声比较

表 2-1. 基准源的 RMS 抖动比较 (1kHz - 40MHz)

仪表	抖动
R&S SMA100B	19.5fs
Wenzel 振荡器	10.4fs
Agilent PSG	113.4fs
R&S SMA100A	70.8fs
Agilent ESG	150.0fs

Wenzel 振荡器是首要标准。该振荡器提供出色的近端和远端相位噪声性能，非常适合参考，但仅限于一个频率。Rohde and Schwarz SMA100B 可与 Wenzel 相媲美。近端相位噪声几乎与 Wenzel 一样好（甚至在某些偏移情况下更好一点）。只有在超过 3 MHz 的非常高的频率偏移下，SMA100B 才会严重偏离 Wenzel。

Agilent PSG 具有良好的极低频偏移性能，在 300 Hz 附近接近 Wenzel。之后，与标准有很大的偏差。Rohde SMA100A 和 Agilent ESG 在低频偏移处有明显的降级。

总体而言，SMA100B 是 Wenzel 振荡器的良好替代品，可用作参考，为合成器选择参考频率提供了灵活性。

3 标准 LMX2820 相位噪声性能

要了解替代拓扑的性能改进，首先使用内部 VCO 表征 LMX2820 的固有性能。TIDA-010230 参考设计包含两个 LMX2820 合成器，并包括在标准或替代拓扑中运行的选项。它是比较不同设置下的相对相位噪声性能的理想平台。使用 TIDA-010230 参考设计，LMX2820 具有不同的 PFD 频率。请注意，LMX2820 PFD 频率最大值为 400MHz。预计转换为较低 N 分频器值的较高 PFD 频率将提供更好的结果。

相位噪声响应和积分抖动取决于基准源。相位噪声测量的基准源是非常好的 SMA100B；但是，可以想象一个更好的基准源可以提供略有改进的结果。RMS 抖动计算从 10kHz 开始，以解耦基准性能支配的极低频率偏移中的一个位。

图 3-1 显示了 LMX2820 在 6GHz 输出时具有各种 PFD 频率的相位噪声性能。RMS 抖动在 10kHz 至 40MHz 范围内积分。同样，图 3-2 显示了在射频放大器将信号放大到 10dBm 左右后测量的 9GHz 相位噪声性能。Agilent E5052 在低于 7GHz 的频率下测量的性能；Rohde and Schwarz FSWP 在较高频率下测量的性能。

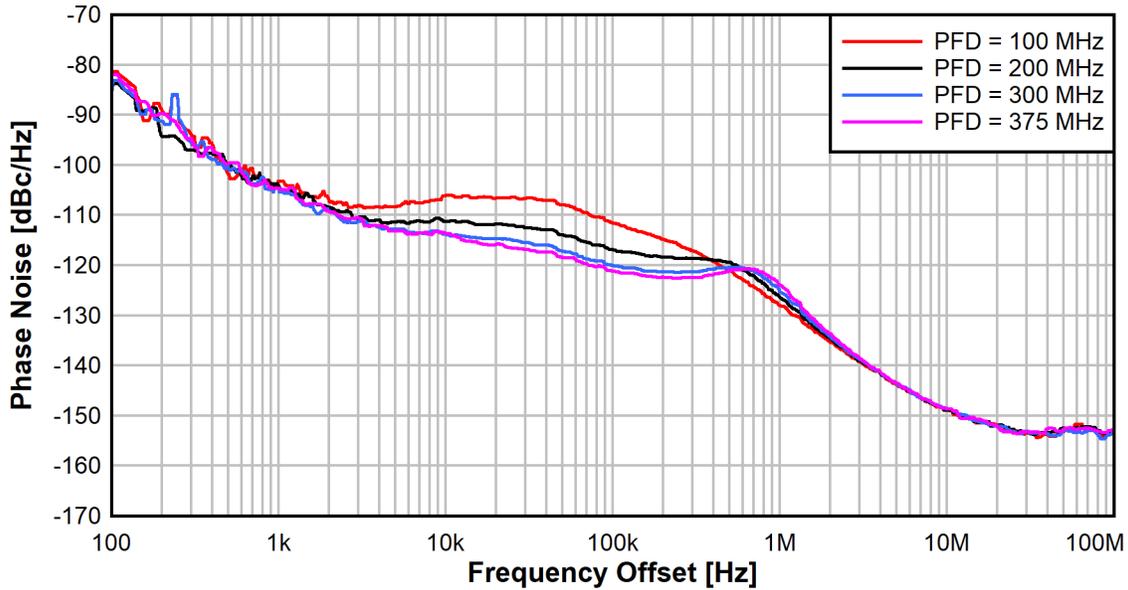


图 3-1. LMX2820 在 6GHz 输出下的相位噪声性能与 PFD 频率的关系

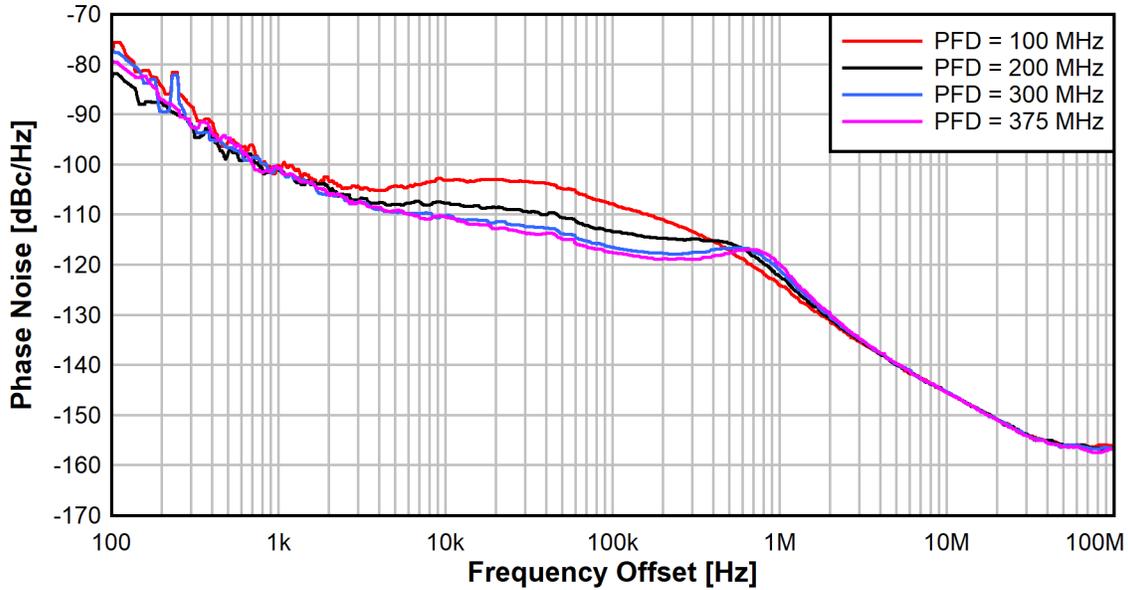


图 3-2. LMX2820 在 9GHz 输出下的相位噪声性能与 PFD 频率的关系

表 3-1 显示了 6GHz 输出和 9GHz 输出下的积分 RMS 抖动。在所有情况下，环路滤波器保持不变；如果环路滤波器针对所需的 N 分频器设置进行了优化，则降低 PFD 频率可能会有所改善。

表 3-1. LMX2820 积分 RMS 抖动 (10kHz - 40MHz) 与 PFD 频率的关系

PFD	6GHz		9 GHz	
	N 分频器	集成相位噪声	N 分频器	集成相位噪声
100MHz	60	62.4fs	90	61.5fs
200MHz	30	43.9fs	36	46.0fs
300MHz	20	38.1fs	30	40.5fs
375 MHz	16	36.4fs	24	37.9fs

正如预期的那样，较高的 PFD 频率对应于较低的 N 分频器值会产生理想结果。理想值是 375MHz，便于锁定到 6GHz 或 9GHz VCO。

显示差异的曲线区域是从大约 1kHz 偏移到 1MHz 偏移的中间部分。该区域受 PLL 性能和相应的 N 分频器设置的影响很大。基准源决定了非常低的频率偏移下的性能。VCO 决定了高频偏移下的性能。这些区域不会随着 PFD 的变化而发生显著变化。

对于后续测量，基准将设置为 375MHz，合成器设置为 9GHz 输出。9GHz 时钟便于为射频采样数据转换器（如在 S 带或 X 带工作的 AFE7950）提供时钟。

4 乘法器前级性能

下面展示了使用 TRF37C75 放大器的 3x 乘法器前级的方框图。图 2-3 比较了乘法器前级与信号发生器的相位噪声性能。表 2-2 提供了每种配置的积分抖动性能。

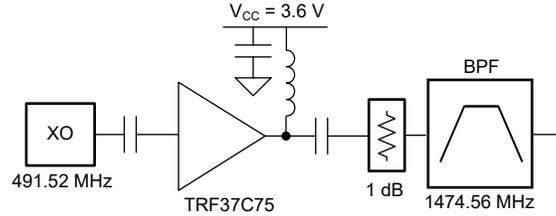


图 4-1. 3x 乘法器前级

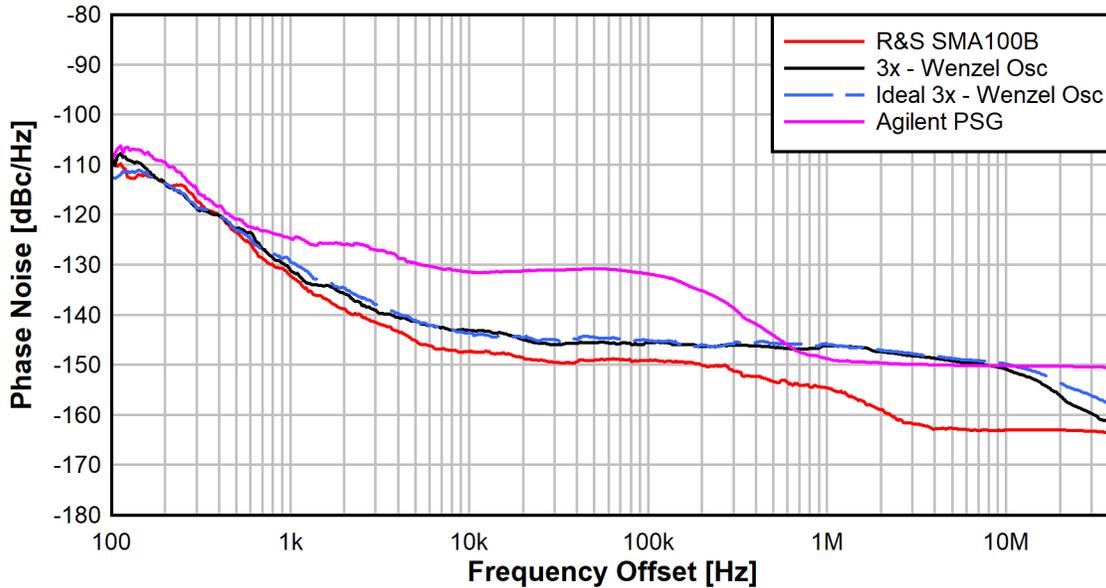


图 4-2. 1474.56MHz 信号的相位噪声比较

正如预期的那样，SMA100B 在 1474.56MHz 时提供最佳输出。3 倍 Wenzel 振荡器性能也相当好。当输入性能下降 $20 \cdot \log(n)$ 时（其中 $n = 3$ ，为乘数），其扫描与理想响应几乎相同。与先前一样，倍增 Wenzel 方法比 Agilent PSG 明显更好。

表 2-2 : 1474.56MHz 时的积分 RMS 抖动

频率	吸电流	RMS 抖动
1474.56 MHz	R&S SMA100B	8.1fs
	Wenzel 振荡器 - 3x	22.2fs
	Agilent PSG	35.4fs

4.1 外部 VCO 环路滤波器设计

外部 VCO 的增益 (kV) 与 LMX2820 的内部 VCO 明显不同。因此，必须修改环路滤波器才能实现出色性能。使用 TI 的 PLLatinum™ 仿真软件工具版本 1.6.0 或更高版本来优化外部 VCO 的环路滤波器。

在 PLLatinum 仿真 GUI 中，从 **Select Device** 菜单中选择 LMX2820。这将预加载器件的标准配置。调整以下参数，以反映设置配置和外部 VCO 参数：

- Fosc、Fpfd：375MHz 最高 PFD 频率会产生更佳相位噪声
- Fout、FVCO：9000MHz 将 VCO 频率设置为 9GHz
- KVCO：从其数据表中提取的 0.6MHz/V VCO 增益
- 更改 **滤波器设计器** > 三阶滤波器
- 选择有源 B 拓扑

同时切换 **Advanced** 单选按钮 (在 **Feature Level** 下方)。在 **Phase Noise** 选项卡中，加载反映系统参考频率的用户指定相位噪声文件。此分析使用从 SMA100B 信号发生器的测量性能导出的文件，该信号发生器在 375MHz 下运行。接下来，为外部 VCO 的开环相位噪声 (来自测量值或来自器件数据表) 加载一个文件。表 4-1 显示了此分析中使用的值。

表 4-1. Z-Comm DRO9000A 的开环相位噪声参数

频率偏移 (Hz)	相位噪声 (dBc/Hz)	注意事项
1000	-77.8	来自数据表
10000	-106.2	来自数据表
100000	-126.5	来自数据表
10000000	-146	测量值
20000000	-150	测量值
40000000	-154	测量值
100000000	-154	测量值

在 **Integrated Noise** 部分，根据需要更改积分限制。对于此分析，限制为 10kHz 至 40MHz。将起始频率推至 10kHz 更注重 PLL 和 VCO 性能，而不是参考频率性能。为方便起见，在 **Filter Design** 选项卡 (在 **Filter Optimizer** 部分中) 上，从下拉菜单中选择 “Jitter (fs)”。这将在选项卡上显示模拟的积分抖动性能，而无需切换到 **Phase Noise** 选项卡即可查看结果。

有源环路滤波器使用对应于有源 B 拓扑的三阶拓扑。仿真工具绘制了复合相位噪声性能以及构成 VCO 和 PLL 的各个元件。一旦更改了前面提到的参数，模拟器中的默认环路滤波器组件值便会产生 **峰值** 相位噪声响应。这主要是由于外部 VCO 的 VCO 增益非常低。使用模拟器调整环路滤波器值，以获得更佳响应。一般策略是降低滤波器的环路带宽，以利用低 VCO 噪声性能。

环路滤波器没有绝对正确的值。有多种组合可以产生良好的效果。PLLatinum 仿真工具中的 **Calculate Loop Filter** 工具有助于接近目标。调整特定元件，以保持最小值或可实现的值。然后，额外的试错调整可实现出色抖动性能。

对于此分析，环路滤波器带宽约为 41kHz。图 4-3 显示了仿真结果。忽略与 PFD 频率相关的警告；任何低于 400MHz 的频率都是可以接受的。也忽略电容值 C1 上的警告；将值保持在 1.5nF 以上是可取的。表 4-2 列出了一种优化解决方案的环路滤波器元件值。从 10kHz 到 40MHz 的仿真 RMS 抖动略低于 14fs。

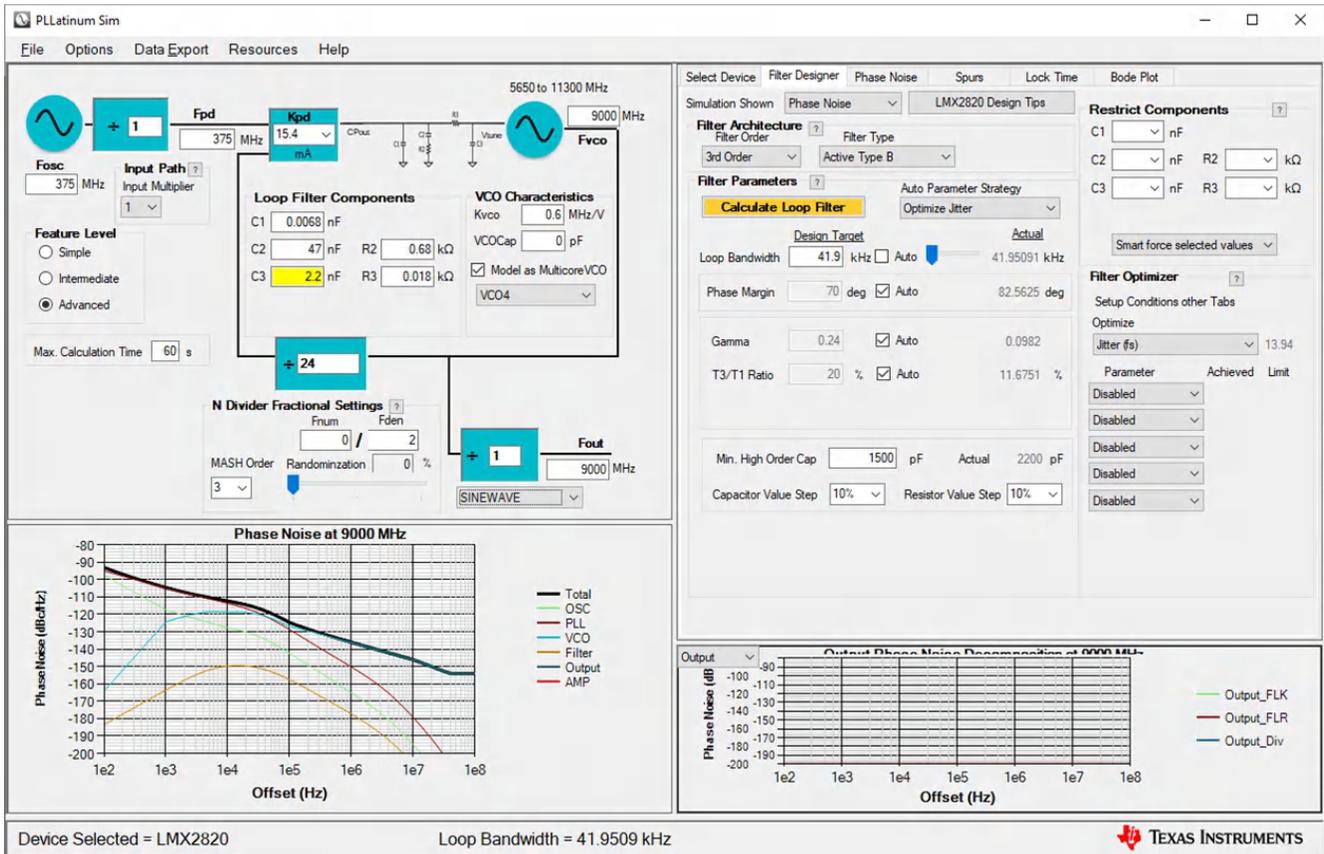


图 4-3. 外部 VCO PLLatinum™ 仿真 GUI 环路滤波器

表 4-2. 有源环路滤波器元件值

仿真参考编号	值
C1	6.8pF
C2	47nF
R2	680Ω
C3	2.2nF
R3	18Ω

4.2 有源环路滤波器实现

图 4-4 显示了外部 VCO 和有源环路滤波器的方框图。有几个关键元素需要在拓扑中突出显示。使用外部 VCO 时，没有内部反馈机制为 PFD 电路供电。使用外部分离器将 VCO 输出分离到 LMX2820 射频输入和最终合成器输出。如果需要，使用外部射频放大器来提升合成器输出并补偿分路器损耗。

运算放大器是一个关键组件。选择低噪声并支持轨至轨输出的器件。如果输出不能降至 0V，则无法利用整个调谐范围。对于单电源运行，将正极端子偏置到合适的共模电压。该电压大约是器件最大电荷泵电压的一半。对于此设计，在 10V 电压轨上运行的分压器将 V_{cm} 设置为 1.2V。

运算放大器是 OPA211。该器件具有非常低的输出噪声电压，具有合适的带宽和轨至轨输出能力。表 4-3 显示了 OPA211A 的主要规格。

表 4-3. OPA211 运算放大器主要规格

参数	规格
低电压噪声 (1kHz)	1.1nV/√Hz
增益带宽积 (G = 100)	80MHz
压摆率	27 V/μs

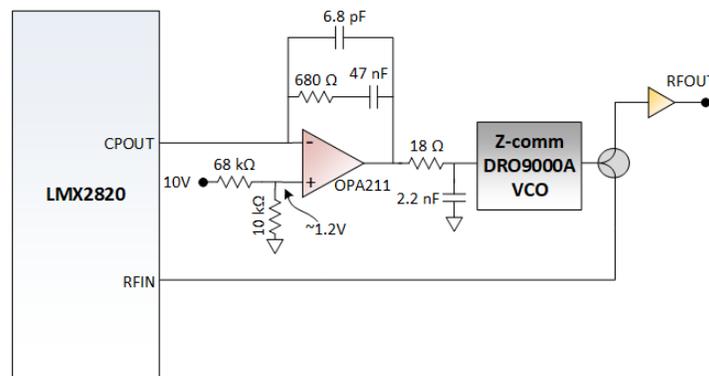


图 4-4. 外部 VCO 配置的方框图

4.3 外部 VCO 性能结果

图 4-5 显示了与使用内部 VCO 运行的 LMX2820 相比的外部 VCO 相位噪声图。SMA100B 信号发生器提供参考信号。来自发生器的基准信号功率设置为 14dBm，以补偿电路板走线损耗，并确保 LMX2820 的基准引脚输入处的大信号摆幅（因此具有高压摆率）。性能包括带有 OP211A 运算放大器和 Qorvo NBB-312-T1 输出功率放大器的有源环路滤波器。表 4-4 列出了 9GHz 时从 10kHz 到 40MHz 积分的 RMS 抖动性能。相位噪声图显示了内部 VCO 和外部 VCO 之间的等效性能，偏移量约为 10kHz。低于 10kHz 偏移的性能仍由 PLL 和参考频率性能决定。之后，外部 VCO 本身的优越性能占主导地位。例如，外部 VCO 和内部 VCO 之间在 1MHz 偏移处的点噪声改善超过 20dB。总体而言，带有有源环路滤波器的外部 VCO 可将 RMS 抖动改善超过 20fs。

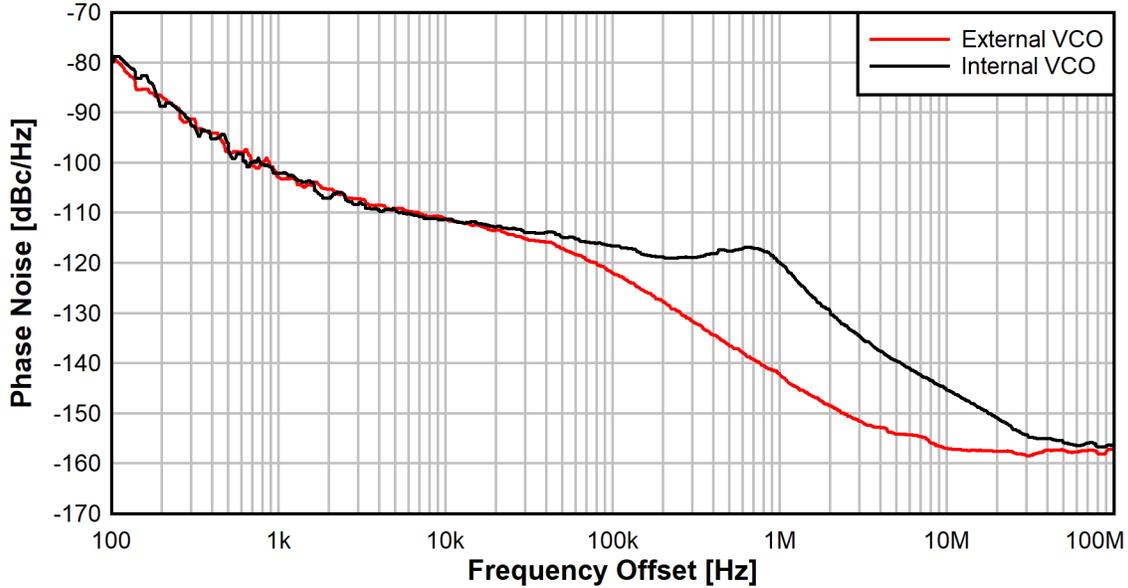


图 4-5. 外部 VCO 相位噪声与 LMX2820 内部 VCO 的比较

表 4-4. 外部 VCO RMS 抖动性能对比

PFD	N 分频器	射频输出	内部 VCO	外部 VCO
375 MHz	24	9000 MHz	37.9fs	13.2fs

5 外部 PFD 拓扑

PLL 中的主要噪声源之一是 N 分频器。对于高频应用，N 分频器必须相当大，才能分频到更合理的低参考频率。外部 PFD 方法使用外部混频器绕过内部 N 分频器。射频混频器将 VCO 频率直接下变频为 PFD 频率。当然，要有所改进，与内部分频器相比，混频操作本身必须具有更低的噪声。这要求混频器 LO 本身是低噪声的。使用 LMX2820 生成需要另一个频率音作为 LO 源的频率音似乎有点矛盾。这将在下一节中讨论。

TIDA-010230 参考设计还提供了使用外部 PFD 运行的选项。参考图 5-1 中的方框图。内部 VCO 的输出被放大并馈入混频器的射频输入。正确选择 LO 频率，以将 VCO 输出混合到 PFD 频率。LMX2820 提供了一个外部 PFD 分频器，以便在需要将频率进一步降低至基准。绕过此分频器（即保持为 1）时将获得出色性能。

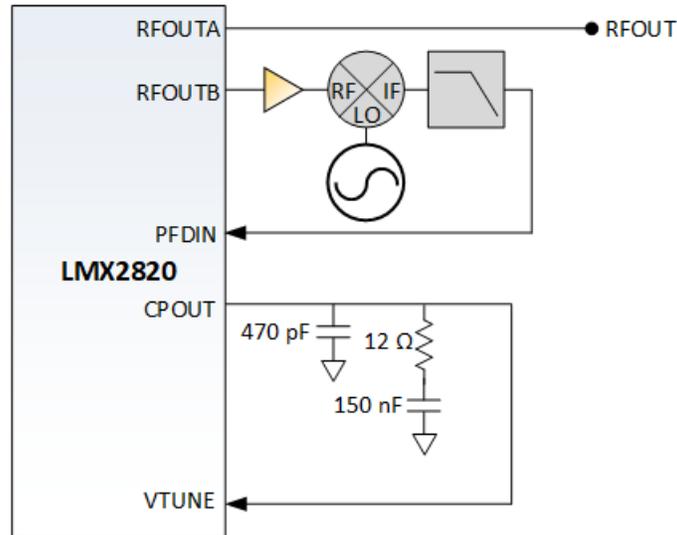


图 5-1. 外部混频器的方框图，PFD 拓扑

尽管此拓扑需要外部电路和额外的 LO 源，但它仍使用内部 VCO。这允许 VCO 的全范围产生高达 22GHz 的频率。

5.1 外部 PFD 环路滤波器修改

使用外部 PFD 功能时，有效 N 分频器为 1，必须修改环路滤波器，以保持理想结果。一般策略是增大环路带宽，以充分利用低 PLL 噪声。

使用 PLLatinum 仿真工具提供优化性能的指南。首先，从 LMX2820 设置的默认值开始。和以前一样，加载特定的基准相位噪声性能文件。保持默认 VCO 配置，因为内部 VCO 仍在运行。像以前一样将积分限制调整为 10kHz 至 40MHz。将电荷泵电流更改为 7mA；这是在外部分 PFD 模式下运行时的最大值。将环路滤波器修改为二阶无源拓扑；对于最小分压器情况，简化配置就足够了。

该工具没有专门用于外部 PFD 运行的模式。要模拟外部 PFD 配置，请将 F_{osc} 和 F_{pd} 设置为与 VCO 输出相同的值。这会欺骗该工具将 N 分频器设置为 1。忽略突出显示的红色错误。如果使用默认环路滤波器值并将 N 分频器设置为 1，初始相位噪声响应会显示 10MHz 左右的峰值响应。

调整环路滤波器值，以增加补偿带宽。最初以 2000kHz 左右的环路带宽为目标。自动 *Calculate Loop Filter* 会使相关值接近所需值；之后，手动调整环路滤波器值，以考虑经过优化且可实现的滤波器。和以前一样，没有一种绝对的环路滤波器解决方案；图 5-2 显示了本分析中使用的外部 PFD 配置 PLLatinum 仿真设置，表 5-1 显示了修改后的环路滤波器值。

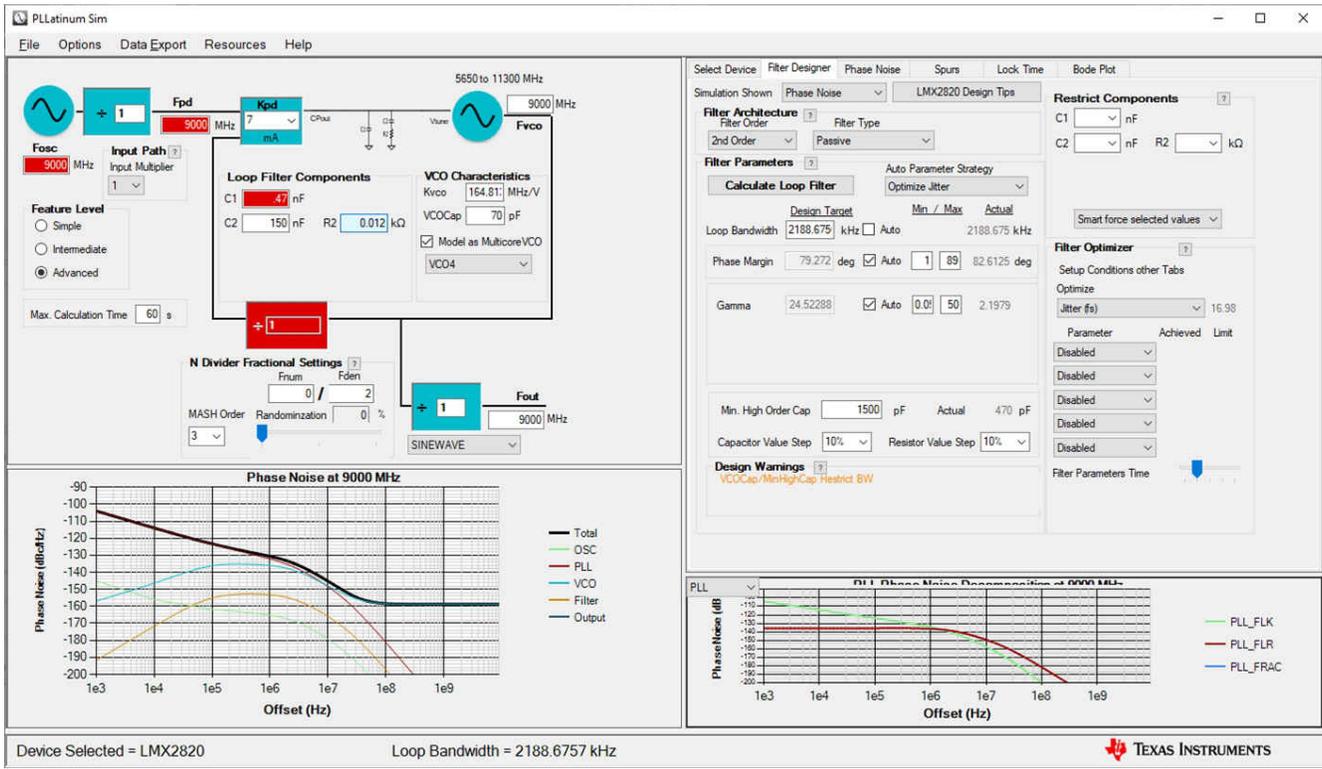


图 5-2. 外部 PFD 的 PLLatinum™ 仿真

表 5-1. 外部 PFD 环路滤波器值

仿真参考编号	值
C1	470pF
C2	150nF
R2	12Ω

5.2 外部 PFD 测量结果

对于基线测量，Rohde SMA100B 将 LO 信号提供给混频器。LO 信号必须是低相位噪声，具有非常好的低频偏移性能。LO 中较差的相位噪声性能直接转化为合成器输出。使用外部 PFD 配置，基准的相位噪声不太重要；对于这些实验，Agilent PSG 信号发生器提供参考信号。

LMX2820 输出频率为 9375MHz。N 分频器为 25。出于内部 VCO 校准目的，内部 N 分频器仍必须正确设置。切换到外部 PFD 模式并切换频率校准位。在切换到外部 PFD 输入之前，器件必须首先使用内部分频器校准内部 VCO。LO 频率为 9000MHz。这会将 PFD 频率设置为 375MHz。图 5-3 显示了与外部 VCO 响应相比，外部 PFD 的相位噪声结果。请注意，由于有效的低 N 分频器设置和高频偏移下的正常内部 VCO 性能，中频偏移性能得到了改善。

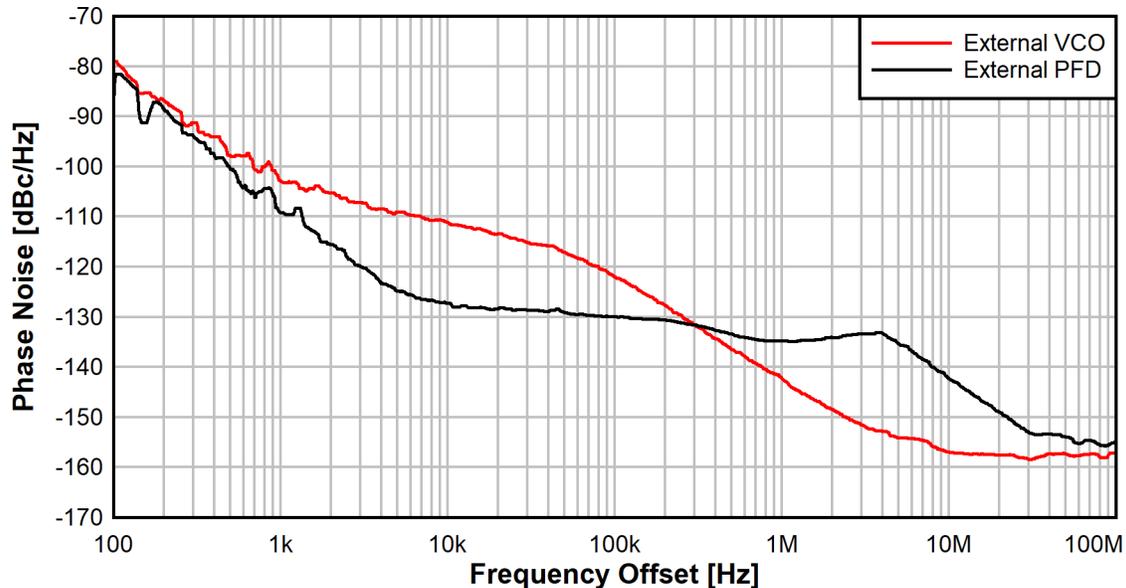


图 5-3. LMX2820 外部 PFD 相位噪声性能

6 在现实世界中整合到一起

当外部 PFD 使用 Rohde SMA100B 作为 LO 源时，LMX2820 可产生出色的相位噪声性能。性能极具吸引力，但在实际应用中并不实用。一个现实的选择是使用额外的 LMX2820 作为混频器 LO。使用带有内部 VCO 的标准 LMX2820 配置作为 LO 会产生比直接使用器件更差的性能。鉴于 LO 源与源相比没有改进，这是预期行为。或者，使用配置有外部 VCO 的另一个 LMX2820 作为 LO 源。图 6-1 显示了使用两个 LMX2820 器件的框图方法。外部 VCO 后面是级联放大器，用以将 LO 驱动信号增加到 16dBm (或更高)。混频器需要高 LO 驱动电平，以确保实现更佳相位噪声性能所需的更佳动态范围和线性度。

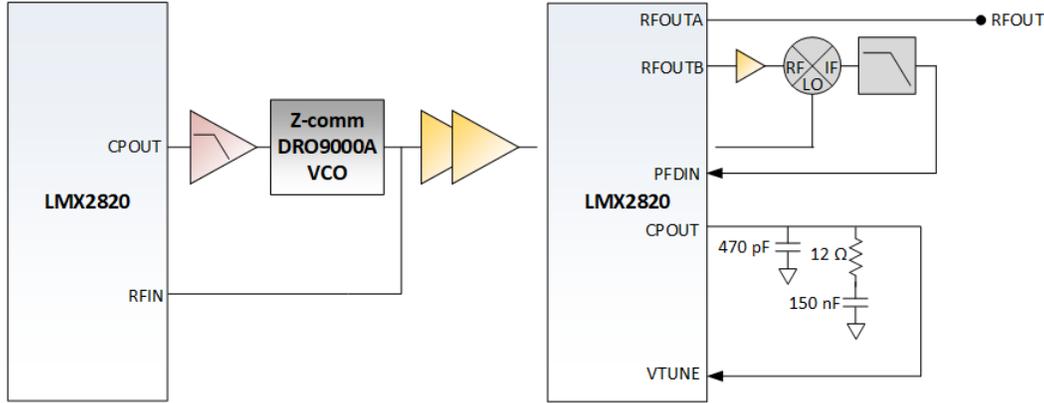


图 6-1. 用于实际解决方案的双 LMX2820 方法

6.1 实际性能结果

图 6-2 显示了双通道 LMX2820 方法与独立外部 PFD (使用 SMA100B 作为 LO)、独立外部 VCO 和内部 VCO 的相位噪声性能对比。表 6-1 显示了不同配置之间的综合抖动比较。

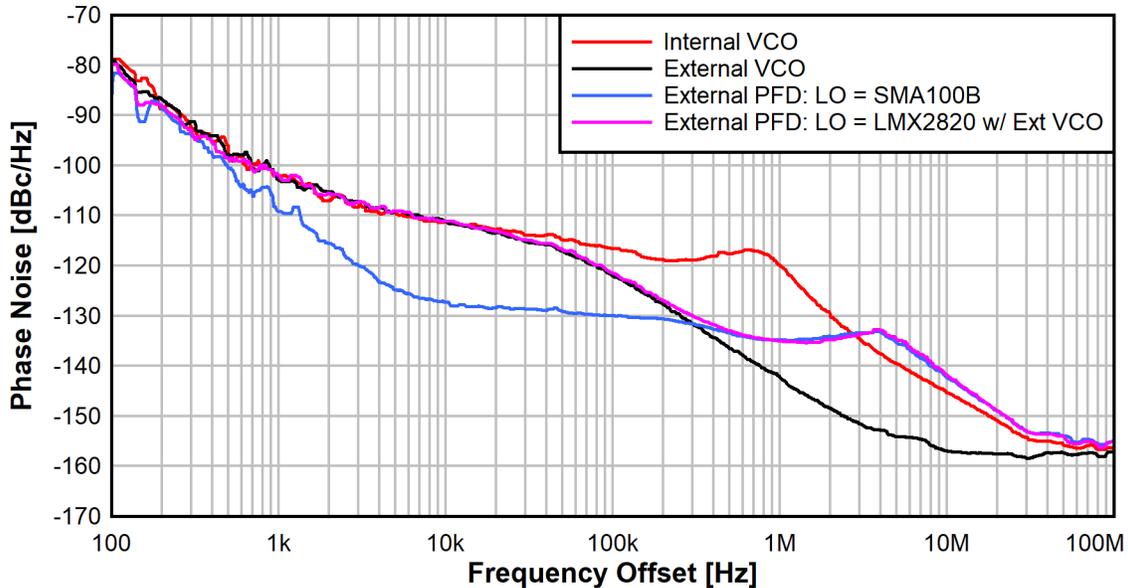


图 6-2. Dual LMX2820 实际相位噪声结果

表 6-1. 集成 RMS 抖动与外部 PFD 的性能对比

射频输出频率	来源	集成相位噪声
9000 MHz	内部 VCO	37.9fs
9000 MHz	外部 VCO	13.2fs

表 6-1. 集成 RMS 抖动与外部 PFD 的性能对比 (continued)

射频输出频率	来源	集成相位噪声
9375 MHz	外部 PFD (LO = SMA100B)	13.9fs
9375 MHz	外部 PFD (LO = LMX2820 , 带外部 VCO)	18.5fs

双路 LMX2820 方法可产生低于 20fs 的集成相位噪声性能。虽然不如独立外部 VCO 或 SMA100B 作为 LO 的外部 PFD 好，但它是对内部 VCO 的显著改进，并提供了可与许多高端信号发生器相媲美的响应。它是一种现实世界的拓扑结构，支持极严格的通信和防御应用。

6.2 为何使用双方法？

当外部 VCO 之类的东西产生更好的集成性能时，为什么要使用双 LMX2820 方法？外部 PFD 拓扑仍然使用内部 VCO，因此可以灵活地在较大范围内调整频率以及使用内部输出分频器。这为调整外部 VCO 方法无法实现的合成器频率输出提供了额外的灵活性。

一种选择是使用外部 PFD 分频器来调整频率。本质上，这相当于用同样的方式改变频率的 N 分频器调整。外部 PFD 拓扑的好处是起点是最小分频器值（即 1）。图 6-3 显示了当外部 PFD 分频器从 1 调整到 6 时的外部 PFD 性能响应。这是根据将 SMA100B 作为 LO 源的相对基准测量的。当然，可以进一步增加分频器，以根据需要不断提高输出频率。表 6-2 报告了 PFD 分频器设置的集成相位噪声性能。

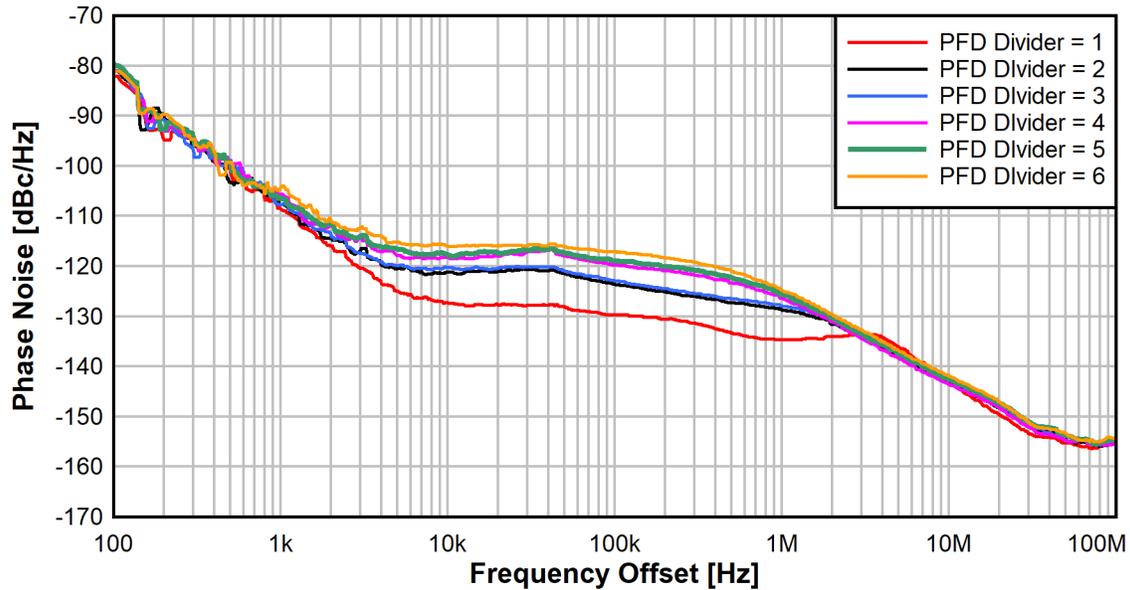


图 6-3. 外部 PFD 与 PFD 分频器

表 6-2. 外部 PFD 与 PFD 分频器

PFD 分压器	射频输出频率	集成相位噪声
1	9375 MHz	13.2fs
2	9750 MHz	13.7fs
3	10,125 MHz	17.8fs
4	10,500 MHz	20.3fs
5	10,875 MHz	21.6fs
6	11,250 MHz	23.9fs

该拓扑还提供了使用输出分频器进一步扩展频率范围的选项。图 6-4 显示了从 2 到 16 的输出分频器设置的相位噪声性能。表 6-3 报告了各个输出分频器设置的集成相位噪声性能。

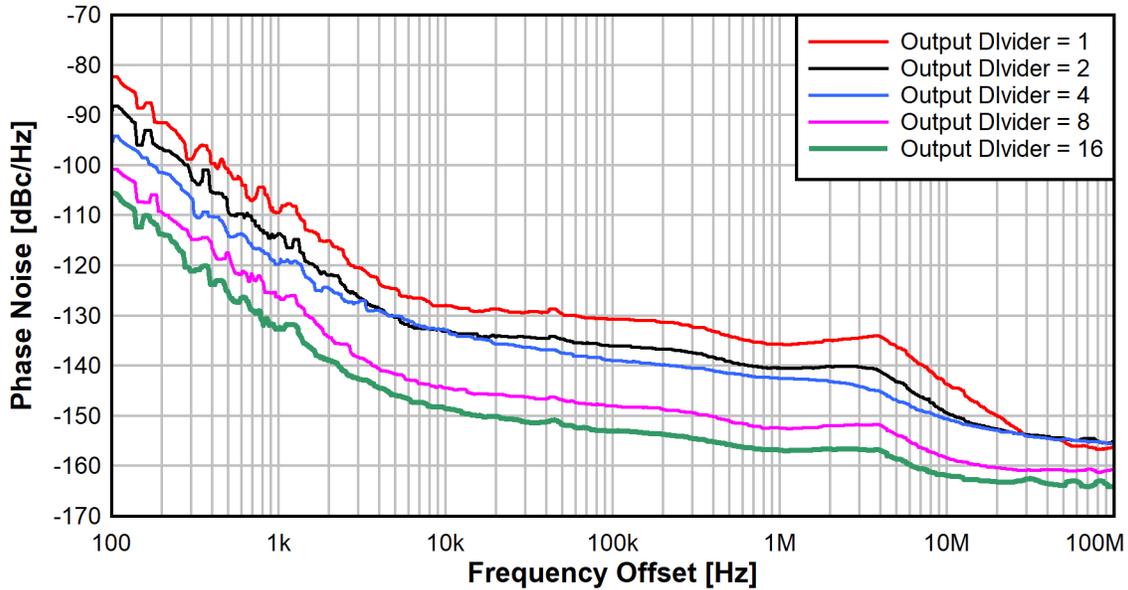


图 6-4. 各个输出分频器设置的相位噪声

表 6-3. 各个输出分频器设置的集成相位噪声

输出分频器	射频输出频率	集成相位噪声
1	9000 MHz	13.0fs
2	4500 MHz	14.0fs
4	2250 MHz	20.5fs
8	1125 MHz	17.3fs
16	562.5 MHz	22.3fs

7 结论

LMX2820 是一款出色的低噪声射频合成器器件。两种替代拓扑提供可与高端测试器件相媲美的改进性能：外部 VCO 和外部 PFD。将这两种方法结合起来，就产生了一个真实世界的拓扑结构，它提供了极好的相位噪声性能，同时还提供了调整频率输出的灵活性。

改进的合成器性能为无线基础设施收发器和软件定义无线电等高干扰系统中的严格点噪声应用提供了可实现的时钟和 LO 解决方案。出色的积分 RMS 抖动性能适用于高分辨率雷达系统和高 QAM 速率通信系统中的时钟解决方案。

8 修订历史记录

Changes from Revision * (April 2022) to Revision A (May 2023)

Page

-
- 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式..... 1
-

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司