



Dean Banerjee, Jacob Mieso

摘要

锁定时间是指当从一个频率切换到另一个频率时，PLL 在给定的容差范围内稳定到最终频率（和相位）所需的时间，它对于快速跳频应用至关重要。锁定时间包括写入器件所需的时间、VCO 校准时间和 PLL 环路的模拟稳定时间。对于开关速度非常快的应用，VCO 校准时间会占主导地位，这就需要确保校准速度尽可能快。本文讨论了采用片上集成 VCO 技术的 PLL，需要校准的原因，以及一些实现超快锁定时间的改进方法。德州仪器 (TI) 的 LMX2820 合成器突破了限制，能够在 5 μ s 内完成该 VCO 校准。

内容

1 跳频概述	2
2 集成 VCO 概述	3
2.1 片上集成 VCO 结构	3
2.2 VCO 校准的可靠性和一致性	3
3 合成器锁定时间的组成部分	4
3.1 写入时间	4
3.2 VCO 校准时间	4
3.3 模拟稳定时间	5
4 利用 LMX2820 缩短 VCO 校准时间	5
4.1 利用部分辅助方法改善 LMX2820 VCO 校准	7
4.2 缩短 VCO 校准时间的完全辅助方法	7
4.3 即时校准 - 实现超快 VCO 校准的终极选择	8
5 结论	11
6 参考文献	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 跳频概述

在多个频率之间快速切换的功能（也称跳频）是通信、国防无线电和电子战等诸多系统中的关键要素。对于这些应用，必须尽可能快地在各频率之间进行切换。

例如，北约用于传输实时战术信息的 Link-16 网络需要 13 μs 以下的跳频。^{[1][2]}

图 1-1 展示了典型的接收器架构，其中需要一个或多个本地振荡器 (LO) 来生成不同频率的信号，并将它们与输入接收信号相混合。

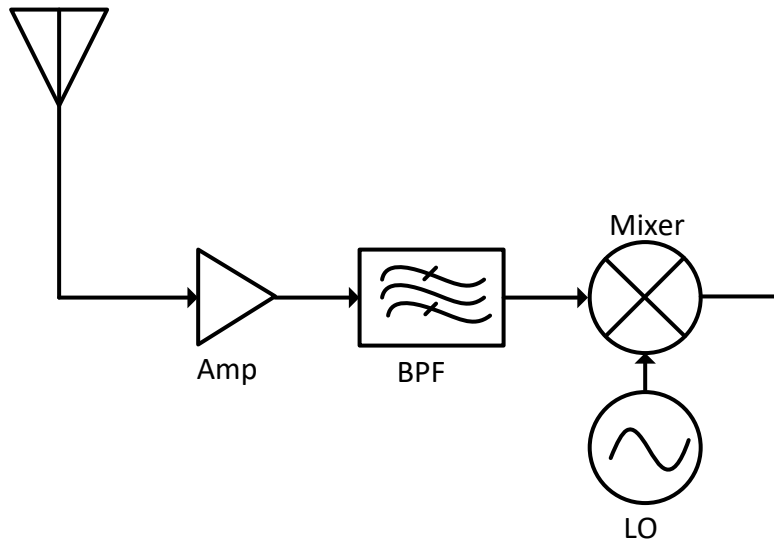


图 1-1. 典型的接收器架构

在这样的架构中，LMX2820 器件可用作 LO，并通过两个主要特性来简化设计：(1) 将多个 VCO 内核集成到一个芯片，(2) 采用超快速 VCO 校准。LMX2820 中的八个 VCO 内核允许通过单个 IC 实现从 43.75 MHz 到 22.4 GHz 的宽带频率范围，从而无需多个 LO。为了在这些 VCO 内核之间快速切换，LMX2820 器件的即时校准功能将 VCO 校准时间大幅缩短至 5 μs 以内，从而减少了整体锁定时间。

该报告提供了一个使用 LMX2820 实现少于 11 μs 的锁定时间的示例。与现有的其他校准方法相比，即时校准显然为设计跳频系统提供了最快的解决方案。

2 集成 VCO 概述

压控振荡器 (VCO) 可将调谐电压转换为输出频率。将这些功能与其他功能一同集成到集成电路上的做法已变得越来越流行。为了实现良好的相位噪声性能和宽调谐范围，VCO 频率范围通常划分为几个重叠的频段。这使得各个频段具有较低的 VCO 增益，这相当于更好的 VCO 相位噪声性能。通过将所有频段加在一起，它们可以共同创建一个宽调谐范围。为了使这项技术发挥作用，必须使用校准例程来告诉 VCO 在给定的频率下可用的合适频段。

2.1 片上集成 VCO 结构

如今，由于成本、尺寸、宽带频率范围和性能等原因，采用片上集成 VCO 技术的 PLL 已很常见。为了在保持良好相位噪声性能的同时实现出色的宽带性能，通常的做法是使用一系列开关电容器和电感器。

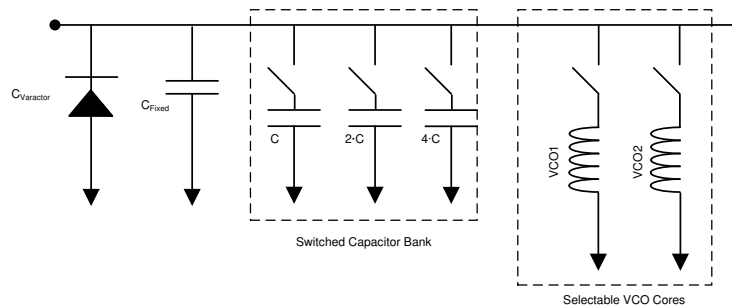


图 2-1. 片上 VCO 的简化振荡电路

对于这个特定示例，有 8 种电容器组合和 2 种电感器组合，可以实现 16 个可能的频段，如图 2-2 所示。

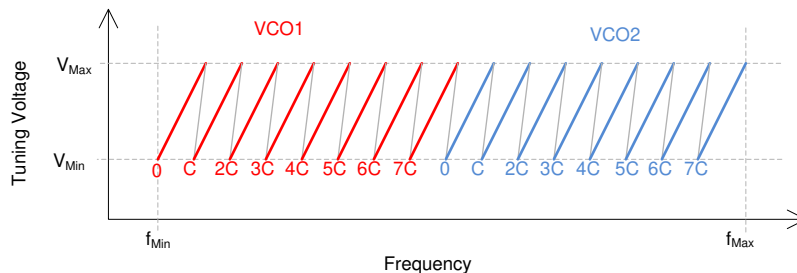


图 2-2. 频段

现代合成器通常具有更多的电容器和电感器。例如，LMX2820 器件的电容器组中具有 8 个 VCO 内核和 192 个不同的值，一共可创建 1536 个频段。这些频段之间存在重叠，可适应温漂和工艺变化。除此之外，还有一个随频率和温度的变化而变化的内部幅度设置。总之，VCO 校准要确定的三个关键参数是：

- VCO_CORE：这是对频段影响很大的电感器选项
- VCO_CAPCODE：这是可改变频段的电容器组设置
- VCO_DACISSET：这是优化相位噪声的幅度设置

VCO 校准的目的是为这三个参数找到合适的值。当需要改变频率时，可通过可编程串行命令来激活校准操作。

2.2 VCO 校准的可靠性和一致性

VCO 校准应设计为在过热条件下具有稳健性。即使 VCO 在不同极端温度下进行校准，也应能保持锁定，且不需要重新编程。对于德州仪器 (TI) 的片上集成 VCO，可以选择重新校准 VCO 来实现改进，使相位噪声小于 1 dB。VCO 设计为可以容忍较宽的温漂，因此频段之间存在相当大的重叠，这就导致了 VCO 校准的另一个一致性问题。由于频段存在相当多的重叠，有多个频段可以达到相同的频率。当 VCO 未选择相同的校准设置 (VCO_CORE、VCO_CAPCTRL、VCO_DACISSET) 时，杂散、VCO 增益、VCO 相位噪声和传播延迟会有所不同。如果选择了不同的 VCO 内核，这一点将尤其明显。

3 合成器锁定时间的组成部分

合成器从一个频率变为另一个频率所需的时间由三个主要部分组成。第一个组成部分是指示合成器改变频率实际花费的时间。这通常是通过串行编程总线来完成的。第二个组成部分是 VCO 校准时间，即 VCO 找到正确设置 (VCO_CORE、VCO_CAPCODE、VCO_DACISSET) 所需的时间。完成 VCO 校准后，将有一些频率误差 (Δf)。最后一个组成部分是模拟稳定时间，它是完成 VCO 校准后出现的这个最终频率误差稳定在给定容差范围内所需的时间。

3.1 写入时间

若要让合成器改变频率，首先需要做的是发送该命令。通常需要更改几个寄存器值，而写入时间指的是写入这些寄存器所需的时间。例如，如果 SPI 编程总线可以在 75 MHz 频率下运行，并且需要对三个 24 位寄存器进行编程，那么可以在略少于 3 μs 的时间内完成。减少写入时间的最直观方法是提高时钟速度，这肯定是一种有效的方法。

另一种技术是使用影子寄存器，也称双缓冲技术。对于这种方法，可以在需要多个寄存器之前向其中写入，然后一次写入结束可以触发所有寄存器同时发生。这是假设知道所需的下一个频率。除了消除写入时间，影子寄存器还有助于防止出现故障。例如，假设需要在一个寄存器中写入反馈分频器 (N)，然后通过写入另一个寄存器来触发 VCO 校准。如果首先写入 N 分频器，VCO 将满贯到调谐轨，因为该频率对该频段无效。然后对 VCO 进行编程以进行校准，它将进入正确的频率。但是，在电源轨上设置 VCO 调谐电压会增加 VCO 校准完成后的模拟稳定时间。总而言之，影子寄存器可以消除编程时间，并防止不必要且较长的模拟稳定时间。

3.2 VCO 校准时间

另一个问题是 VCO 进行校准所需的时间，这取决于器件和设置条件。VCO 将从某个初始起点开始，然后 VCO 校准会搜索正确的校准值。最简单的方法是“无辅助”校准，其中无需执行任何操作即可选择初始起点。这可通过 LMX2594 PLL 校准加以说明，如图 3-1 所示。

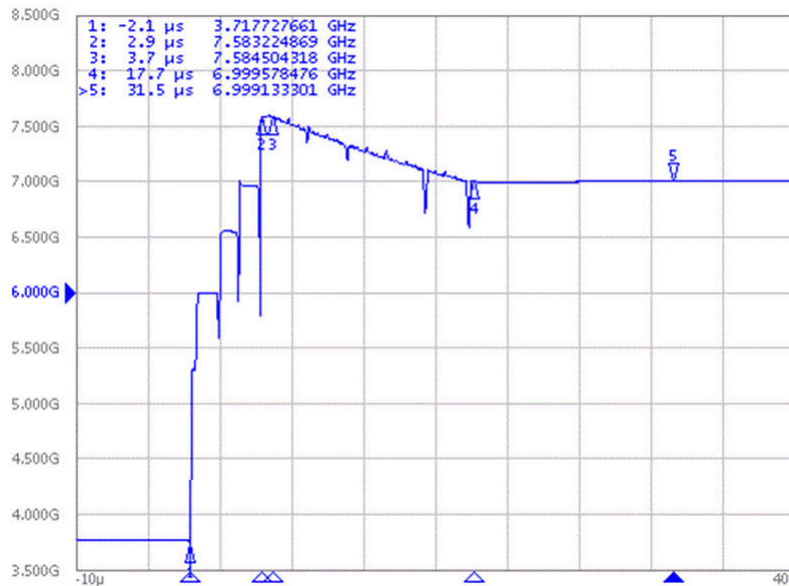


图 3-1. 无辅助 LMX2594 VCO 校准

第一步是让 VCO 选择正确的内核，我们可以看到在标记 2 处以 2.9 μs 结束的几个阶跃响应。在此之后，它会遍历 CAPCODE 值以找到正确的值，这在标记 4 处完成。幅度校准是选择正确 DACISSET 值的过程，在此之后，最终模拟稳定时间在标记 5 处完成。

查看图 3-1 时，通常会遇到的问题是，是否存在有助于进行 VCO 校准的方法，初始猜测是让 VCO 以更接近的频率开始。确实有这样一种方法，它被称为部分辅助。通过对 VCO_CORE、VCO_CAPCODE 和 VCO_DACISSET 给出初始猜测，即使猜测略有偏差，也可以改进 VCO 校准。图 3-2 说明了这一点。

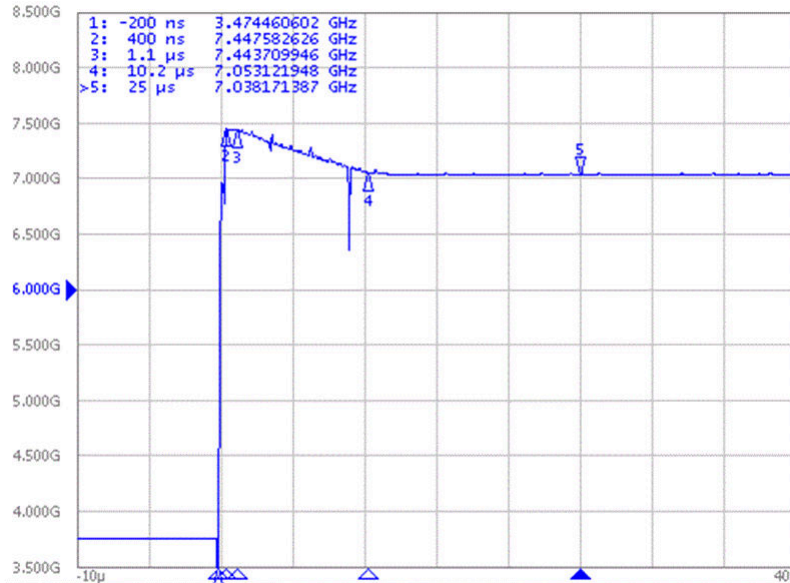


图 3-2. 采用部分辅助的 LMX2594 VCO 校准

除了以简单的方式给 VCO 一个好的起点，还有完全辅助校准方法，这涉及到强制执行准确的值。对于这种方法，它需要将器件锁定到以前的频率，并将校准设置存储在外部存储器中。然后可以读入并强制执行这些值。尽管需要对每个器件执行此操作，但无需花时间进行校准所带来的优势会让许多用户觉得这是值得的。对于 LMX2594 和 LMX2820 等器件，可以在整个温度范围内使用这些相同的设置。

3.3 模拟稳定时间

VCO 校准将找到正确的内核 (VCO_CORE)、频段 (VCO_CAPCODE) 和幅度设置 (VCO_DACISSET)。在此期间，VCO 调谐电压将被强制为接近实际值的中心电压，但在此之后，最终的频率误差必须趋于稳定。

4 利用 LMX2820 缩短 VCO 校准时间

在图 4-1 中，我们可以看到在使用任何增强功能之前，原始的无辅助校准时间为 153 µs。德州仪器 (TI) 的 LMX2820 合成器具有多项增强功能，可实现快速开关时间。

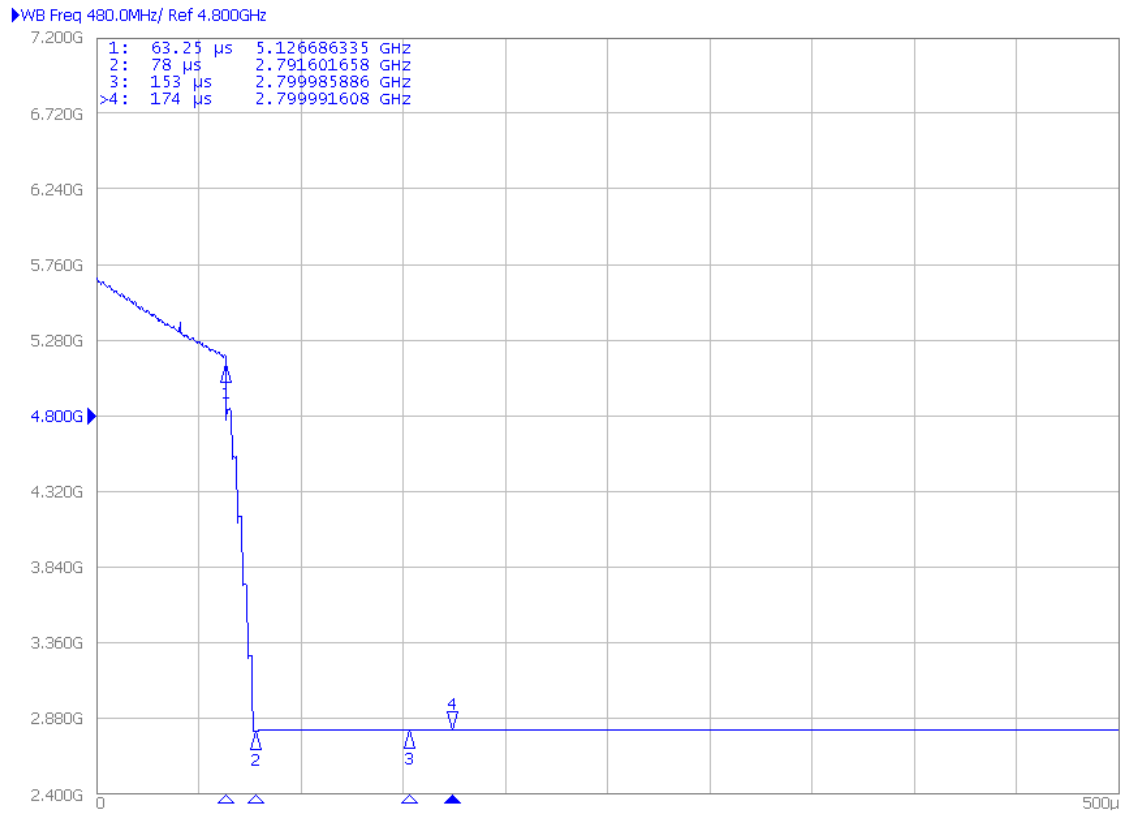


图 4-1. LMX2820 无辅助锁定时间

4.1 利用部分辅助方法改善 LMX2820 VCO 校准

对于这个 LMX2820 示例，可以使用部分辅助方法来缩短锁定时间。为此，选择了一些接近但不等于表 4-1 所示起始值的值。

表 4-1. VCO 校准起始值

设置	实际值	无辅助起始值	部分辅助起始值
VCO_SEL	1	7	1
VCO_CAPCTRL	186	0	180
VCO_DACISSET	336	300	330

使用这种部分辅助方法，VCO 校准时间从 174 μ s 减少到 80 μ s。这一减少幅度值得肯定，但即时校准可以实现更出色的效果。有关部分辅助 VCO 校准的更多信息和示例，请参阅[简化射频合成器 VCO 校准并优化 PLL 锁定时间应用报告](#)。

4.2 缩短 VCO 校准时间的完全辅助方法

部分辅助方法的优势取决于具体情况，但通常可能会减少约 50% 的 VCO 校准时间。这会很有帮助，但许多应用具有更高要求。完全辅助方法通过完全绕过校准并强制执行正确的值来解决这个问题。挑战在于这些值因器件不同而异，因此必须事先使用标准校准锁定器件并回读设置。然后可以强制它们进入并绕过校准时间。完全辅助方法具备的优势是最快的校准时间和一致的值，尽管它需要大量的编程开销。此外，如果写入速度很慢，这将限制 VCO 改变频率的速度。完全辅助 VCO 校准可以显著缩短 VCO 校准时间，但需要大量设置，这就是此方法没有显示结果的原因。完全辅助模式的另一个缺点是，需要多次执行寄存器写入操作才能更改 VCO_SEL、VCO_CAPCTRL、VCO_DACISSET、PLL N 值和 PLL 分数的值。在这些写入之间，PLL 将不会处于正确状态，并将 VCO 调谐电压满贯到电源轨。为了缓解这种情况，可以为电荷泵设置三态，但这需要更多的编程工作。总之，完全辅助校准速度较快，而且还具有始终为相同频率提供相同校准设置的优势。缺点是增加了编程开销，还需要将器件锁定到所有需要的频率，并回读和存储校准值，以便之后可以强制它们进行完全辅助校准。如需了解有关完全辅助校准的更多详细信息和示例，请参阅[简化射频合成器 VCO 校准并优化 PLL 锁定时间应用报告](#)。

4.3 即时校准 - 实现超快 VCO 校准的终极选择

LMX2820 引入了即时校准，是对完全辅助校准的全新升级。利用这种即时校准，无需太多编程和设置开销即可获得同样快速的 VCO 校准结果。这集结了多项优势。

1. CAPCODE、CORE 和 DACISET 的校准值在相同频率下始终相同，从而提供一致的性能。此处假设没有移除器件的电源，并且有一个需要校准的初始设置例程。
2. VCO 校准时间可以减少到 $5 \mu s$ 以下，并且不会影响性能或可靠性。
3. LMX2820 具有双缓冲（影子寄存器），它不仅简化了开关频率，而且一次将所有寄存器设置应用到新频率，这样 VCO 调谐电压就不会满贯到错误的值。

使用初始设置条件测量了许多不同的情况，如图 4-2 所示。VCO 频率、分频器和 INSTCAL_FNUM 值已更改，但其他条件相同。将 FCAL_INSTCAL_DLY 设置为 250，这使得 VCO 校准时间持续 $2.5 \mu s$ 。

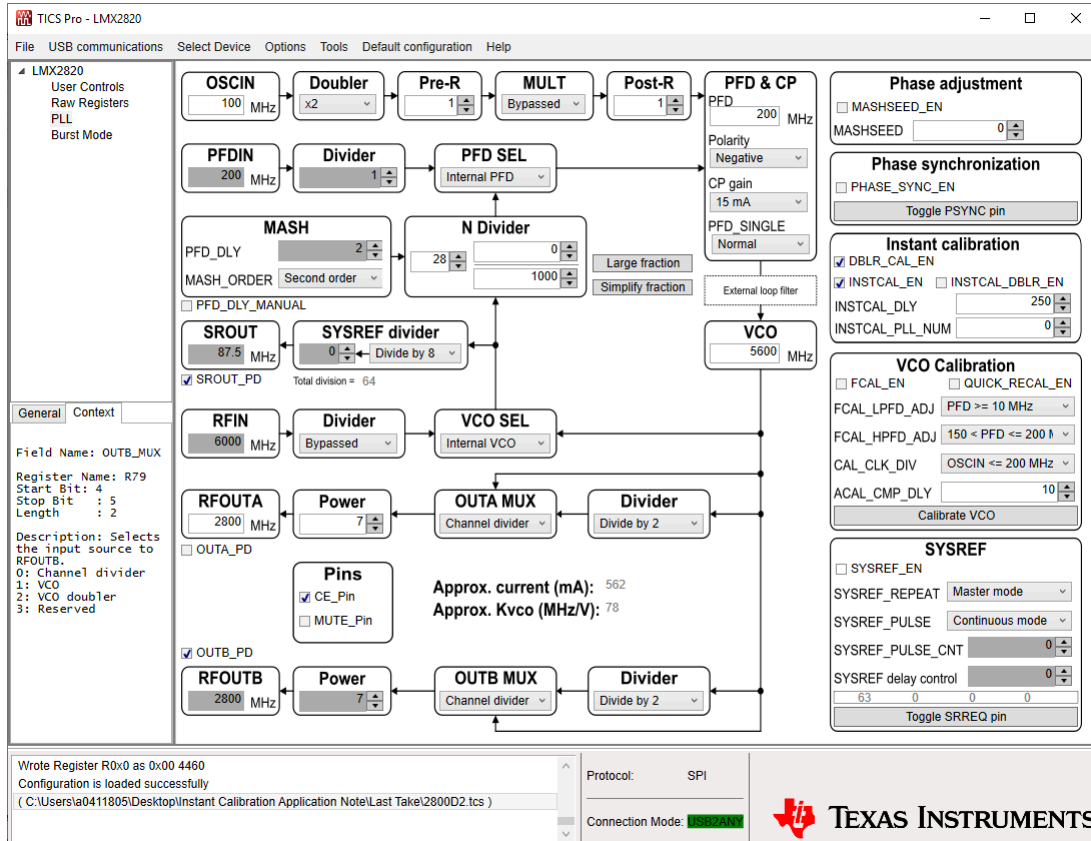


图 4-2. TICSPRO 设置

其余的锁定时间归结于环路的模拟稳定时间。测量了模拟校准开始时的频率误差 (Δf)，并使用 LD 引脚输出测量了锁定时间，结果记录在表 4-2 中。

表 4-2. 锁定时间测量

输出频率 (MHz)		VCO 频率 (MHz)		输出分频器		dF (MHz)	锁定时间 (μ s)
Fstart	Fstop	Fstart	Fstop	DivStart	DivEnd		
5600	6000	5600	6000	1	1	6.7	11.8
6000	5063	6000	10126	1	2	0.5	9.8
5600	6053	5600	6053	1	1	-3.2	9.7
6053	5600	6053	5600	1	1	1.4	10.9
5595	6028	11190	6028	2	1	14.5	12.2
6028	5595	6028	11190	1	2	2.2	9.5
2800	5600	11200	11200	4	2	0.9	11.9
5600	2800	11200	11200	2	4	2.2	10.8

环路滤波器会影响环路的模拟稳定时间，并会产生一定的影响。

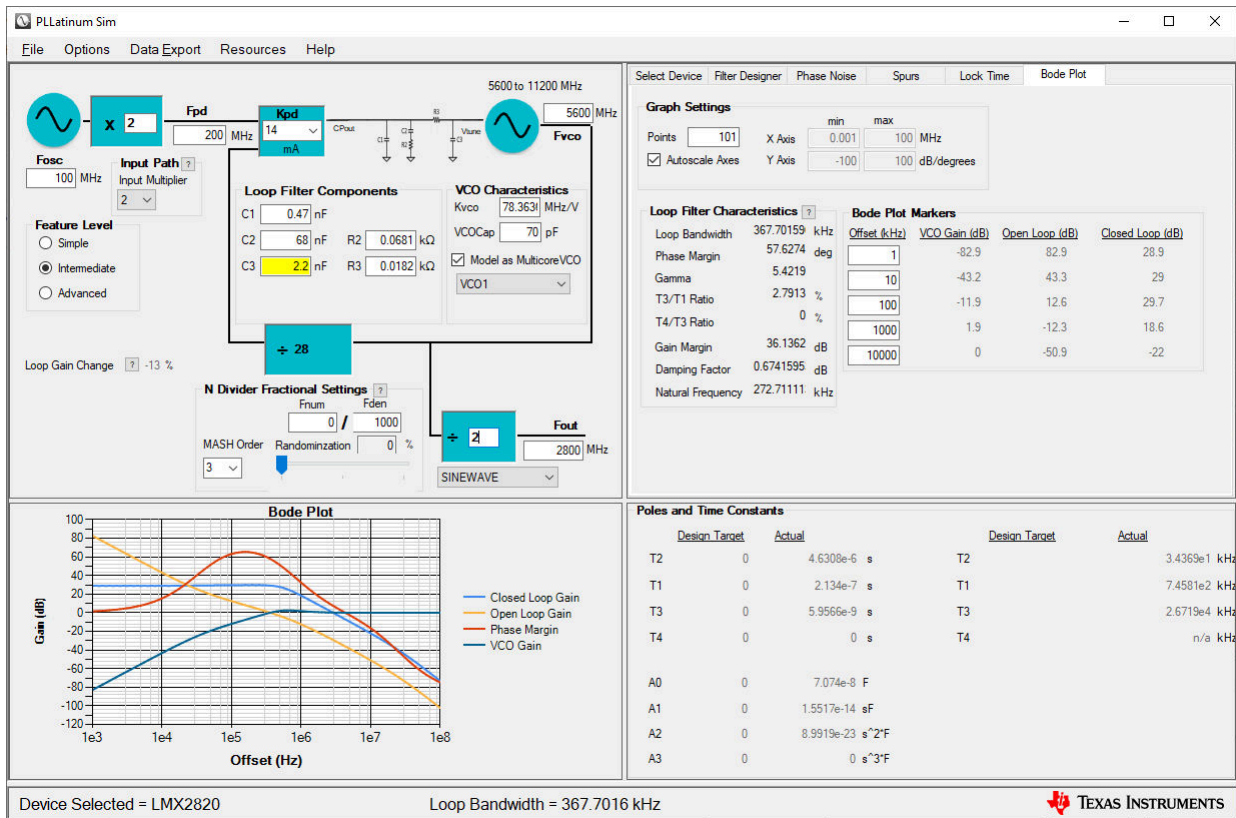


图 4-3. 环路滤波器配置

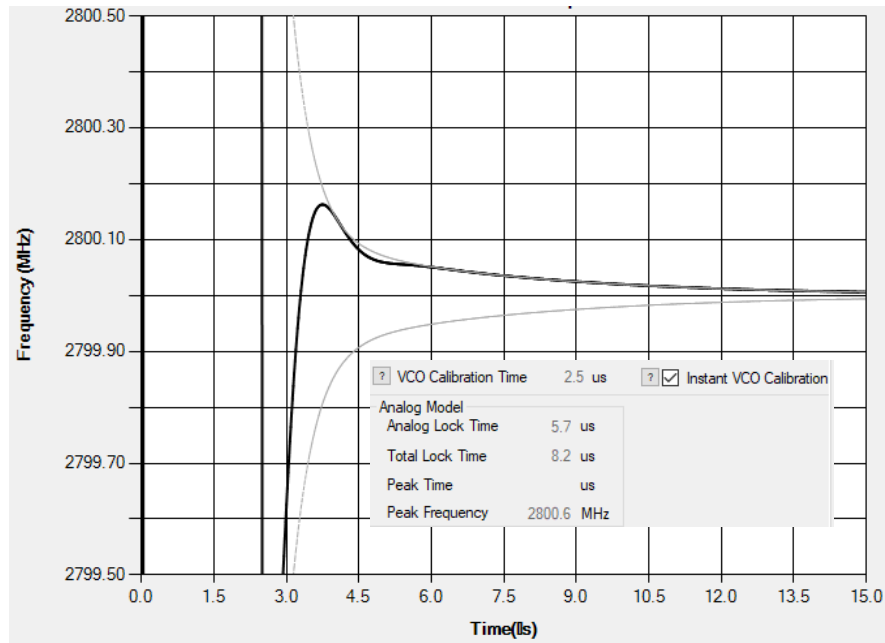


图 4-4. 锁定时间仿真

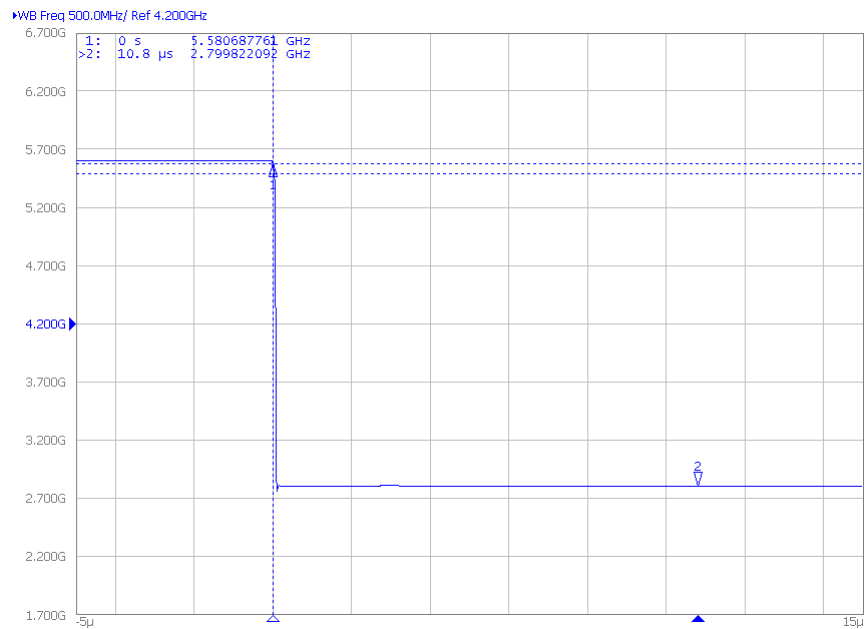


图 4-5. 利用 LMX2820 进行宽跨度即时校准

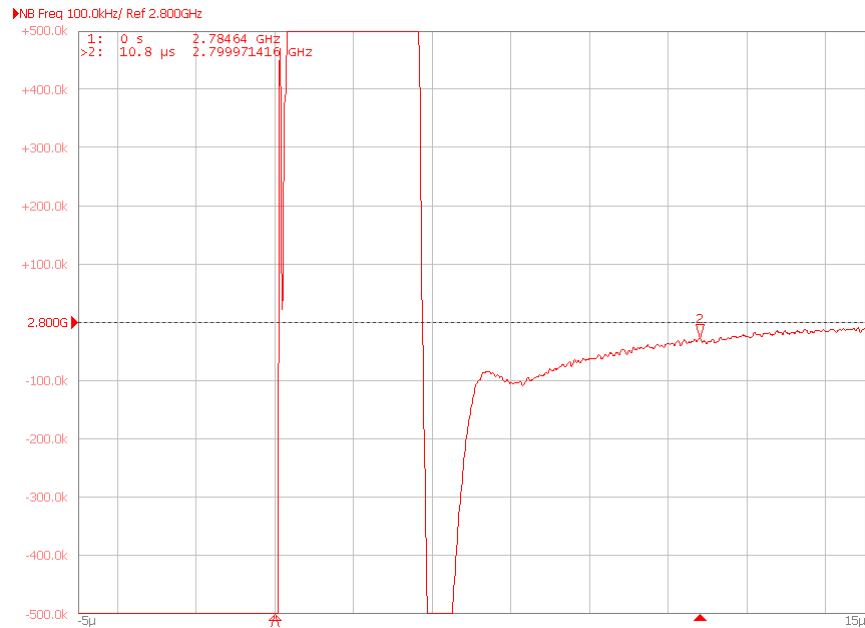


图 4-6. 利用 LMX2820 进行窄跨度即时校准

图 4-6 显示，在 $10.8 \mu\text{s}$ 处（锁定检测引脚指示锁定的位置），频率略微偏离了大约 30 kHz 。有一条长尾表明它逐渐稳定到这一点，有时可以通过将电容器类型从 X7R 更改为 C0G 来实现改进（不过还没有尝试这一做法）。在图 4-4 中，测量了校准后的频率误差，使用了 30 kHz 的稳定容差，并且仿真结果显示为 $8.2 \mu\text{s}$ ，而实际测量结果为 $10.8 \mu\text{s}$ 。在任何情况下，无论使用何种测量技术或电容器类型，该锁定时间都飞快地流逝。

5 结论

对于需要快速跳频的应用，PLL 合成器的锁定时间是一个关键参数。该时间包括编程时间、VCO 校准时间和模拟稳定时间。带有集成 VCO 的片上合成器提供了宽调谐范围，有些合成器还具有使锁定时间减少的优势。特别是，LMX2820 具有影子寄存器和即时校准功能，可在不影响性能的情况下实现闪电般的快速校准。

6 参考文献

1. [Understanding Voice and Data Link Networking](#). Northrum Grumman Corporation. December 2014.
2. [LINK 16 ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY \(EMC\) FEATURES CERTIFICATION PROCESS AND REQUIREMENTS](#). US Department of Defense. April 2005.
3. 德州仪器 (TI), “具有相位同步功能并支持 JESD204B 的 LMX2820 22.4 GHz 宽带 PLLatinum™ 射频合成器”数据表
4. 德州仪器 (TI), “简化射频合成器 VCO 校准并优化 PLL 锁定时间”应用报告

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