



Taemin Kim

摘要

本应用手册介绍了满足 GSM 频带应用相位噪声规格（一项关键规格）的 VCO（电压耦合电路）的设计和测量。文中先介绍了 PLL 和 VCO 在发送器中的作用，然后说明每个块的功能，包括 VCO 频率范围、变容器和电容器组。本手册适用于希望了解 VCO 和 PLL 等时钟器件基本工作原理及简单芯片制造工艺的用户。在满足 GSM 频带相位噪声规格的射频 PLL 中，包括了 LMX 系列（LMX2820、LMX2594 等）。

内容

1 简介.....	2
2 VCO 基本理论和关键因素.....	3
2.1 VCO.....	3
2.2 VCO 频率范围.....	4
2.3 相位噪声.....	4
3 CMOS LC VCO 设计.....	5
3.1 PLL 结构.....	5
3.2 LC VCO 的结构和运行.....	5
3.3 每个电路和块操作.....	7
3.4 仿真.....	8
3.5 实现方案和测量结果.....	9
4 总结.....	11
5 参考资料.....	11

插图清单

图 1-1. 发送器顶部方框图.....	2
图 2-1. VCO 的基本定义和特性曲线.....	3
图 2-2. 系统频率范围和 VCO 频率范围方案.....	4
图 3-1. VCO 原理图.....	5
图 3-2. 差分调谐变容器.....	6
图 3-3. V_{BIAS} 下的变容器特性曲线.....	7
图 3-4. 二进制加权 7 位 MIM 电容器阵列.....	7
图 3-5. VCO 频率范围仿真.....	8
图 3-6. VCO 相位噪声仿真.....	8
图 3-7. VCO 和 LOGEN 布局.....	9
图 3-8. 测得的 VCO 频率范围.....	10
图 3-9. 测得的 VCO 相位噪声.....	10

表格清单

表 2-1. GSM 频带相位噪声要求.....	4
--------------------------	---

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

本应用手册介绍了 VCO 的基本理论、关键因素以及如何设计 LC CMOS VCO。本应用手册的结构如下。节 2 介绍了 VCO 的基本理论以及决定性能的因素。节 3 描述了 CMOS LC VCO 的结构 (满足四个带宽)、每个块的电路和工作原理、布局以及对所制造的芯片的评估结果。最后，本应用手册以 节 4 结尾。

图 1-1 显示了发送器结构，包括 VCO。在 PLL 中，VCO 接收 VTUNE 电压并输出所需的频率。

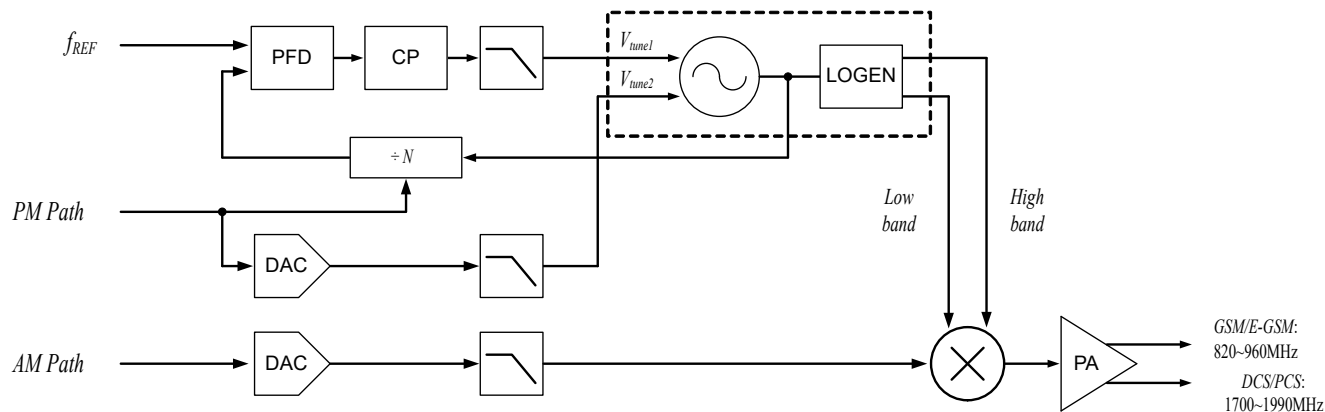


图 1-1. 发送器顶部方框图

2 VCO 基本理论和关键因素

2.1 VCO

大多数通信系统需要具有可控输出频率的振荡器。为此，需要将输入信号施加到振荡器以生成所需的输出频率。输出频率随输入电压变化的振荡器称为 VCO（压控振荡器）。VCO 的理想输出频率随输入电压的变化而变化，如 [方程式 1](#) 所示

$$f_{out} = f_0 + K_{VCO} \times V_{tune} \quad (1)$$

在 [方程式 1](#) 中， f_0 表示 V_{tune} 电压为 0 时的状态。 K_{VCO} 表示 VCO 的增益或灵敏度，表示为输出频率随 V_{tune} 电压变化的变化率。[图 2-1](#) 显示了 VCO 的工作特性。

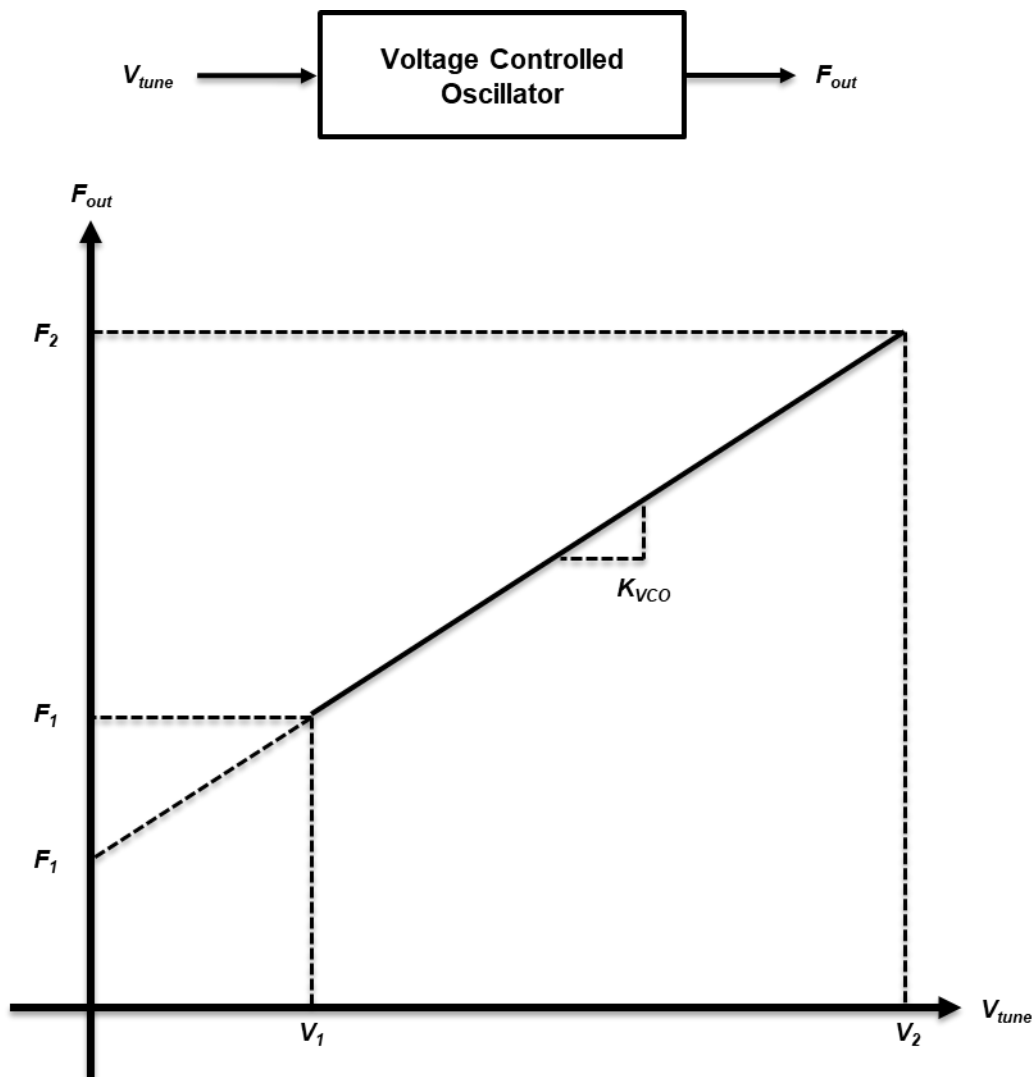


图 2-1. VCO 的基本定义和特性曲线

2.2 VCO 频率范围

VCO 频率范围由 VCO 的中心频率及其产生的频率变化决定。输出频率范围随施加到 VCO 的电压而变化，决定了 VCO 的整体频率范围。确定 VCO 频率范围时，必须考虑几个因素。一个是 VCO 中心频率因工艺和温度变化而发生的变化，另一个是适用系统所需的频率范围。这两个因素决定了总体 VCO 频率范围。

图 2-2 显示了 2G 通信的 VCO 频率方案，计算时已考虑最终输出级的分频比。2G 通信包括 GSM、EGSM、DCS 和 PCS。

Band	Dividing Ratio	Frequency Band (MHz)	Required VCO Output Frequency (MHz)							
			3300	3400	3500	3600	3700	3800	3900	4000
PCS 1900	+2	1930~1990								
	+2	1850~1910								
DCS 1800	+2	1805~1880								
	+2	1710~1785								
EGSM 900	+4	925~960								
	+4	880~915								
GSM 850	+4	869~895								
	+4	824~850								

图 2-2. 系统频率范围和 VCO 频率范围方案

2.3 相位噪声

相位噪声是指出现在所需频率附近的无用能量源，而不是信号分量。相位噪声的主要来源是热噪声和 $1/f$ 噪声。相位噪声在频域中测量，表示为相对于中心频率偏移点处 1Hz 带宽内的噪声分量与信号输出之比。单位为 dBc/Hz。

相位噪声是 VCO 设计中的一个关键设计因素。每个 VCO 必须满足系统相位噪声要求。根据 GSM05.05 标准，必须使用适用于带内和带外的公式计算最终的 VCO 相位噪声。

对于带内噪声，在 400kHz 偏移时规格为 -60dBc/30kHz。要将该值转换为 dBc/Hz (VCO 相位噪声单位)，请使用 [方程式 2](#)

$$\text{dBc/Hz} = \text{dBc} - 10\log(\text{BW}) - 8 \quad (2)$$

将 400kHz 偏移频率下的给定值转换为 VCO 相位噪声可得到 11.8dBc/Hz。从 dBc/GMSK 转换得到一个 BW 调制值。因此，在转换为连续波期间会出现 8dBc 的差异。

对于带外，规格在 20MHz 偏移频率下为 -79dBm/100kHz。要将给定值转换为 dBc/Hz (即 VCO 相位噪声单位)，请使用 [方程式 3](#)

$$\text{dBc/Hz} = \text{TXMaxPower} + \text{TXPowerLevel} - 10\log(\text{BW}) \quad (3)$$

将 20MHz 偏移时的给定值转换为 VCO 相位噪声会产生 -162.0dBc/Hz。对于带外信号，必须考虑最大发送器功率 (33dBm)。通过这些转换确定的 GSM 频段相位噪声如 [表 2-1](#) 所示。

表 2-1. GSM 频段相位噪声要求

频段	偏移频率	GSM05.05 规格	转换后的相位噪声
GSM	400kHz	-60dBc/30kHz	-112.8dBc/Hz
	10MHz	-67dBm/100kHz	-150.0dBc/Hz
	20MHz	-79dBm/100kHz	-162.0dBc/Hz

3 CMOS LC VCO 设计

3.1 PLL 结构

图 1-1 展示了发送器的基本模块。要将数字信号合成为射频信号，VCO (压控振荡器) 和 PLL (锁相环) 至关重要。

3.2 LC VCO 的结构和运行

图 3-1 显示了基本 CMOS LC VCO 电路图。该电路图旨在使用单级 VCO 满足 GSM 频段的要求。它使用交叉耦合负 GM 结构并生成负 GM 信号进行振荡。由 R1 和 C1 组成的低通滤波器用于阻断电流镜中的噪声。L1、L2 和 C2 旨在更大限度地减少 VCO 共模节点处产生的谐波分量及 MOSFET 产生的热噪声。

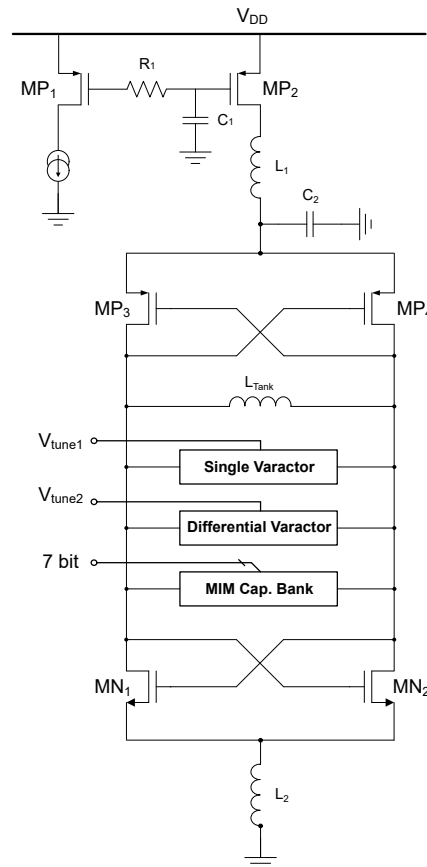


图 3-1. VCO 原理图

LC 电路的电容器组决定了谐振频率，由一个可变电容二极管端口和一个 MIM 电容器组组成，可通过数字调整来满足宽频率范围要求。MIM 电容器组采用 7 位二进制加权结构设计。7 位 MIM 电容器组可在满足宽频率范围的同时保持低 K_{VCO} 值。因此，低 K_{VCO} 还降低了整体 VCO 相位噪声，从而提高了整体性能。LC VCO 的振荡频率由方程式 4 确定

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

VCO 输出频率由 LC 振荡电路的电感器和电容器的值决定。由于在 CMOS 工艺中通过改变电感器值来调整频率很困难，因此可以使用电容相对容易变化的电容器来实现所需的振荡频率。为此，需要一个用于频率调整的可变电容器二极管和一个可通过数字调整满足宽频率范围要求的 MIM 电容器阵列。如果还考虑设计中的寄生元件的电容，最终振荡频率公式如下：

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{fix} + C_{VAR} + C_{MIM})}} \quad (5)$$

在上面的公式中， L 表示 LC 振荡电路的电感值， C_{fix} 表示寄生元件。 C_{VAR} 表示可变电容二极管的值， C_{MIM} 表示数字控制 MIM 电容器阵列的值。

图 3-2 显示了 K_{VCO} 的可变电容二极管电路。通过锁相环的电荷泵和环路滤波器产生的直流电压会改变 C_{VAR} 电容，从而确定 VCO 的振荡频率。耦合电容器用于为可变电容二极管提供基准电压。

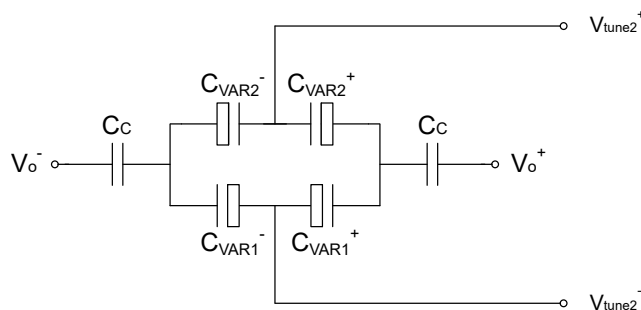


图 3-2. 差分调谐变容器

3.3 每个电路和块操作

3.3.1 调谐变容器偏置电路

图 3-3 根据 V_{BIAS} 电压显示了可变电容器二极管的特性。可变电容器二极管的特性图根据基准 V_{BIAS} 电压向 V_{tune} 电压水平移动。因此，选择适当的调节电压范围和施加基准电压对于实现线性度至关重要。在该线性范围内运行 VCO，相较于非线性范围，可在相同电压变化下实现相对较宽的输出频率调节范围。

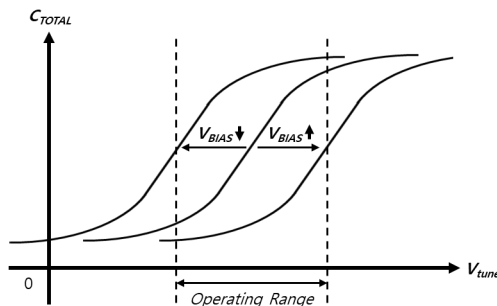


图 3-3. V_{BIAS} 下的变容器特性曲线

3.3.2 7 位 MIM 电容器组

图 3-4 显示了二进制加权 7 位 MIM 电容器的结构。7 位 MIM 电容器阵列占用的面积比低位 MIM 电容器阵列更大，但每位所需的频率范围很窄，从而导致较低的 K_{VCO} 值。因此，在相位噪声是关键因素的 VCO 中，较低的 K_{VCO} 值也可以改善相位噪声。

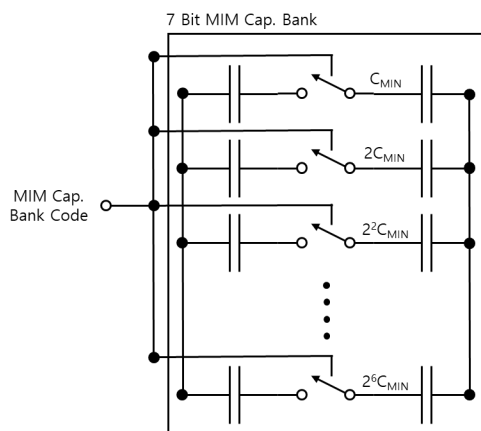


图 3-4. 二进制加权 7 位 MIM 电容器阵列

3.4 仿真

图 3-5 显示了使用可变电容二极管和二进制加权 7 位 MIM 电容器确认 VCO 频率范围的仿真结果。当 V_{tune} 从 0.3V 变为 0.9V 时，实现了所需的范围。

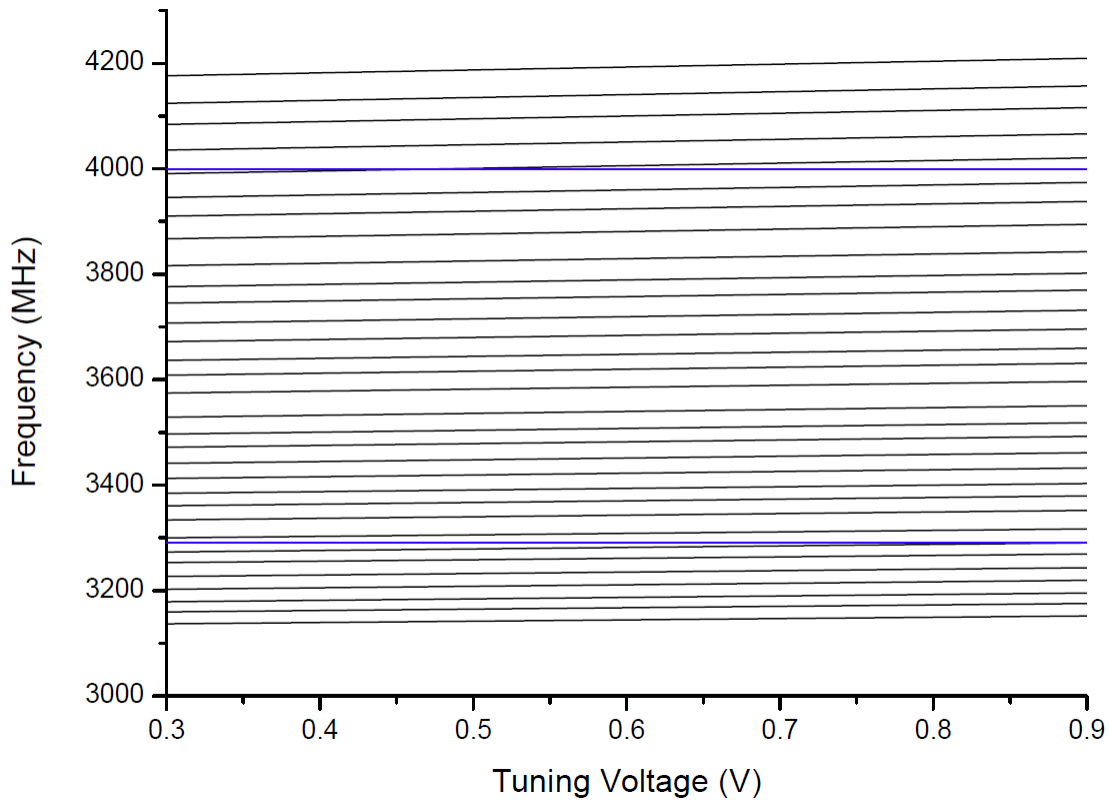


图 3-5. VCO 频率范围仿真

图 3-6 显示了相位噪声的仿真结果，相位噪声是 VCO 最重要的性能特性。400kHz 偏移时的相位噪声为 -113dBc/Hz，10MHz 偏移时的相位噪声为 -147dBc/Hz，20MHz 偏移时的相位噪声为 -155dBc/Hz。

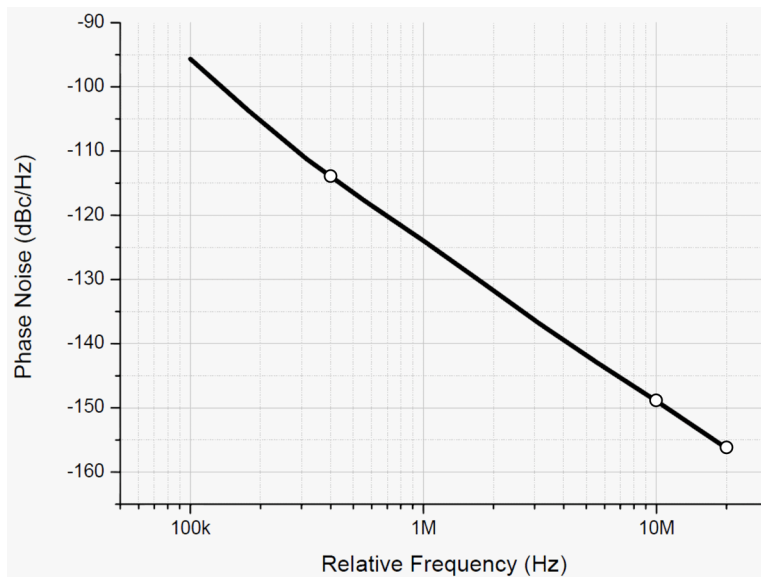


图 3-6. VCO 相位噪声仿真

3.5 实现方案和测量结果

3.5.1 布局

图 3-7 展示了所设计的芯片的布局。由于交叉耦合 LC VCO 会输出差分频率信号，因此设计中考虑了对称性。可变电容二极管组、MIM 电容器组和晶体管按此顺序连接，从 LC 振荡电路电感器的正下方开始。此外，数字控制和电流控制部分位于 VCO 的右侧。

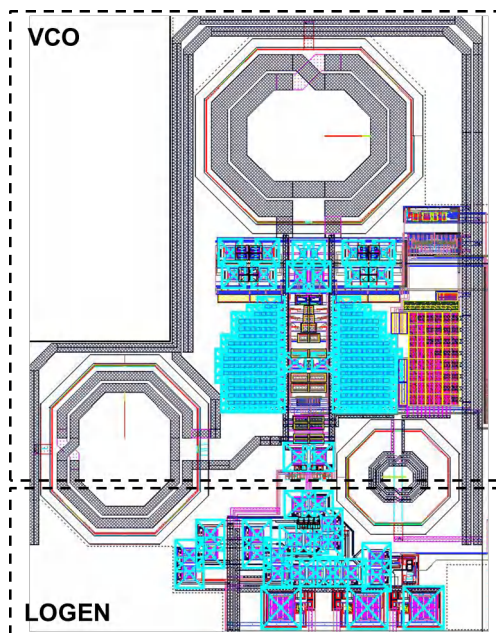


图 3-7. VCO 和 LOGEN 布局

3.5.2 制造和测量结果

图 3-8 显示了 LC VCO 频率范围测量的结果。施加到可变电容器二极管的电压固定为 0.6V，通过对 MIM 电容器组代码进行数字控制来测量频率范围。测得的 VCO 频率范围在 2930 至 4150MHz 之间。图 3-9 显示了相位噪声测量。在 400kHz 偏移时，相位噪声值为 -108.54dBc/Hz；在相对于 3.9GHz 输出频率的 10MHz 偏移时，相位噪声值为 -142.18dBc/Hz。

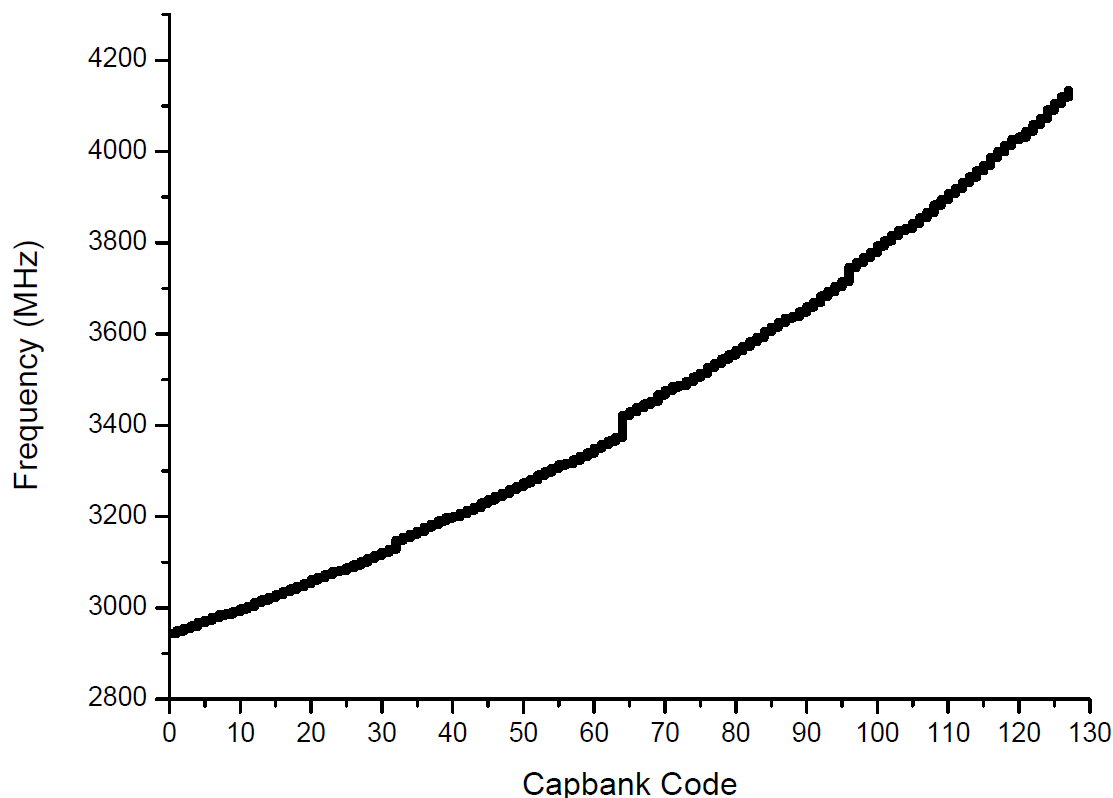


图 3-8. 测得的 VCO 频率范围

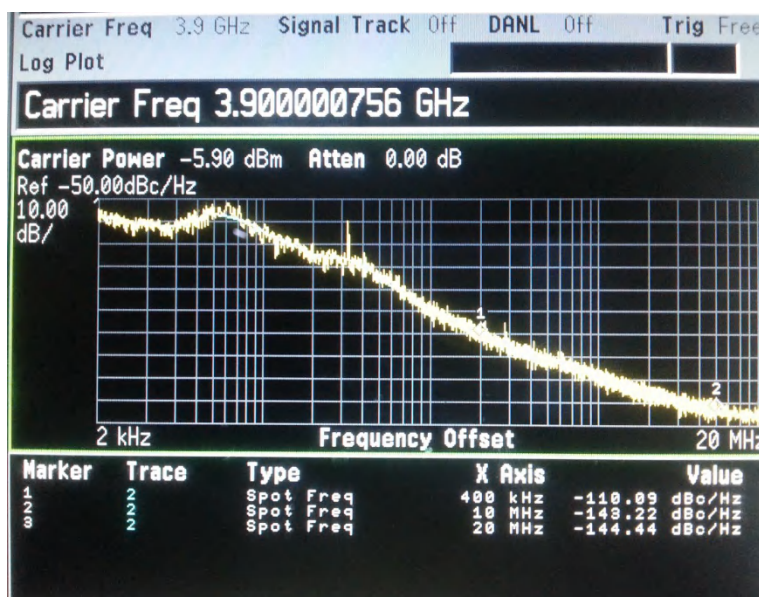


图 3-9. 测得的 VCO 相位噪声

4 总结

本应用手册介绍了 VCO 设计的关键要素以及从实际设计到测量的过程。我们设计了一个由 R 和 C 元件组成的低通滤波器，用于消除电流镜级的噪声。此外，还使用 L_1 、 L_2 和 C_2 来尽量减少 $1/F$ 、热噪声和谐波分量。差分可变电容器结构用于更大限度地降低其他电路的共模噪声。此外，7 位 MIM 电容组旨在提高相位噪声性能，并保持低 K_{VCO} 。

LC VCO 的频率范围为 2.93GHz 至 4.15GHz，在 10MHz 偏移时，载波频率为 3.9GHz 时的品质因数为 -181.7dBc/Hz。

5 参考资料

1. IEEE，[面向 65nm CMOS 四频带 GSM/GPRS/EDGE 极性发送器的两点调谐 LC VCO，具有很小的 \$K_{VCO2}\$ 变化](#)
2. 德州仪器 (TI)，[分数/整数 N 分频 PLL 基础知识](#)，技术简报。
3. 德州仪器 (TI)，[具有相位同步功能和 JESD204B 支持的 LMX2594 15GHz 宽带 PLLATINUM™ 射频合成器数据表](#)。
4. 德州仪器 (TI)，[LMX2594 EVM 说明 - 带集成 VCO 的 15GHz 宽带低噪声 PLL 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