

如何选择最好的电源解决方案，以提高RF信号链相位噪声性能

Mitchell Sternberg, 系统应用工程师
Erkan Acar, RF系统应用工程师
David Ng, 电源系统经理
Sydney Wells, 应用工程师

如今的射频(RF)系统变得越来越复杂。高度的复杂性要求所有系统指标（例如严格的链接和噪声预算）达到最佳性能。确保整个信号链的正确设计至关重要。而信号链中，有一个部分经常会被忽视，那就是直流电源。它在系统中占据着重要地位，但也会带来负面影响。RF系统的一个重要度量是相位噪声，根据所选的电源解决方案，这个指标可能降低。本文研究电源设计对RF放大器相位噪声的影响。我们的测试数据证明，选择合适的电源模块可以使相位噪声改善10 dB，这是优化RF信号链性能的关键。

什么是相位噪声？

相位噪声是指当信号到达系统的接收端时，由于意外的超前或滞后而产生的信号中的噪声。正如幅度噪声是与信号标称幅度之间的偏移或偏差一样，相位噪声是与信号标称相位之间的偏移或偏差。

理想的振荡器输出正弦波，如公式1所示：

$$V_{ideal}(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

这个正弦波呈现完美的周期性，并且 $V_{ideal}(t)$ 的傅里叶变换表示为输出波形频率的脉冲函数。更真实的振荡器输出表示中包括相位（和振幅）中的随机波动，如公式2所示：

$$V_{real}(t) = [A + E(t)] \sin(2\pi ft + \phi(t)) \quad (2)$$

该波形包括一些随机过程 $\phi(t)$ ，会在一定程度上导致信号相位偏移。这种相位偏移导致非理想时钟输出的傅里叶变换看起来与图1更为相似。

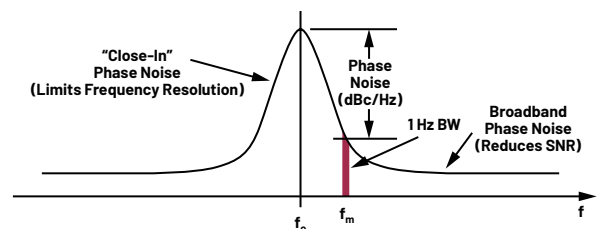


图1. 非理想正弦波的相位噪声。

由于相位是轻微偏移，所以现在信号中存在多个频率分量。因此，信号围绕中心频率周围扩散。

相位噪声的成因和贡献

信号链的DC电源解决方案是导致相位噪声的一个重要成因，但它常被忽视。为信号链供电的电源轨上的任何噪音或波纹都可能在内部耦合。这会导致相位噪声增加，从而可能隐藏发送的带宽中的关键频率分量，或从载波中引入杂散偏移。这些杂散靠近载波，所以特别难处理，且因为严格的过渡频带要求，给滤波器造成很大挑战。

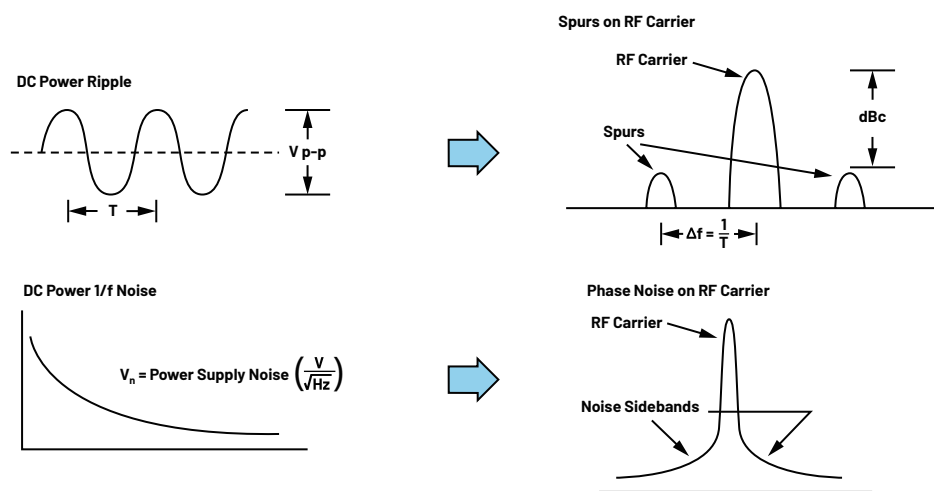


图2. 电源轨中的噪声及其对RF载波信号的影响。

许多不同的因素都会导致产生相位噪声。来源主要有三个，分别是白底噪声、散粒噪声和 $1/f$ ，或者称为闪烁噪声。白底噪声是电流通过时，自由电子的随机热运动引起的。它类似于散粒噪声，这种噪声是因为电流的随机性能引起的。不同于白底噪声和散粒噪声，闪烁噪声会随频率变化。它源于半导体晶格结构中的缺陷，本质上也是随机的。闪烁噪声随着频率的增加而降低；所以，低 $1/f$ 角频非常有用。典型的相位噪声曲线可以近似表示为各个区域，各区域的斜率为 $1/f^x$ ，其中 $x = 0$ 时对应于白噪声区域（斜率 = 0 dB/十倍频程），而 $x = 1$ 时对应于闪烁相位噪声区域（斜率 = -20 dB/十倍频程）。 $x = 2、3、4$ 的区域更接近载波频率。

电源解决方案

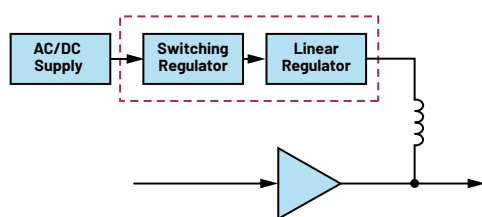


图3. RF信号链中的电源拓扑。

在RF信号链中，确保适当的偏置和为放大器提供电源可能具有挑战性，特别是在漏极电压也用作输出端口时。市面上有许多类型的电源解决方案和拓扑。具体需要哪种电源解决方案，取决于您的应用和系统要求。本实验采用低压差(LDO)线性稳压器和降压开关稳压器采集数据，如图3所示。降压开关稳压器是一种典型的解决大压降的解决方案，效率高，工作温度低。开关电源可以将更高的电压（例如12 V）降低至更常用的芯片级电压（例如3.3 V和1.8 V）。但是，它们可能给输出电压带来严重的开关噪声或纹波，导致性能大幅下降。LDO稳压器也可以降低这些电压，且噪声更低；但是，它们的功耗主要表现为热量。当输入电压和输出电压之间的差值较小时，使用LDO稳压器是一个不错的选择，但当连接环境热阻 θ_{JA} 超过 $30^\circ\text{C}/\text{W}$ 时，从FPGA和ASIC获取的大电流会导致LDO稳压器的性能迅速下降。

测试设置

本实验使用了三款不同的ADI电源产品：[LTM8063](#)、[LTM4626](#)和[LT3045](#)。表1汇总了所用电源解决方案的部分数据手册规格。

表1. 所用电源解决方案的数据手册规格

	LTM8063	LTM4626	LT3045
拓扑结构	Buck μ Module [®]	Buck μ Module	LDO稳压器
输入电压范围	3.2 V 至 40 V	3.1 V至20 V	1.8 V 至 20 V
输出电压范围	0.8 V 至 15 V	0.6 V至5.5 V	0 V至15 V
输出电流	2 A	12 A	500 mA
噪声	~15 mV纹波	~35 mV纹波	1 μV rms
开关频率	200 kHz至2 MHz	600 kHz至2 MHz	—

输入信号扫描100 MHz、200 MHz、500 MHz，以及1 GHz至10 GHz的频率。选择10 Hz至30 MHz频率偏移，分析了相位噪声。测试设置如图4所示。输入RF信号由Rohde & Schwarz FSWP50相位噪声分析仪从内部生成。这款振荡器性能出色，使用它是因为能清楚表现电源导致的附加相位噪声或调制杂散。

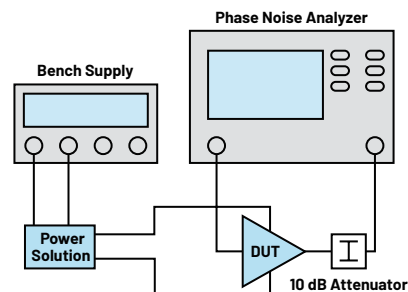


图4. 本实验使用的测试设置的简化框图。

使用两个ADI放大器产品来表示RF信号链中的一个模块。

表2. 所用RF放大器的数据手册规格

	HMC8411	ADPA9002
频率范围	10 MHz至10 GHz	DC至10kHz
V _{DD} (典型值)	5 V	12 V
I _{DD} (典型值)	56 mA	385 mA
增益	15.5 dB	15 dB
输出P1dB补偿 (典型值)	20 dBm	29 dBm

结果

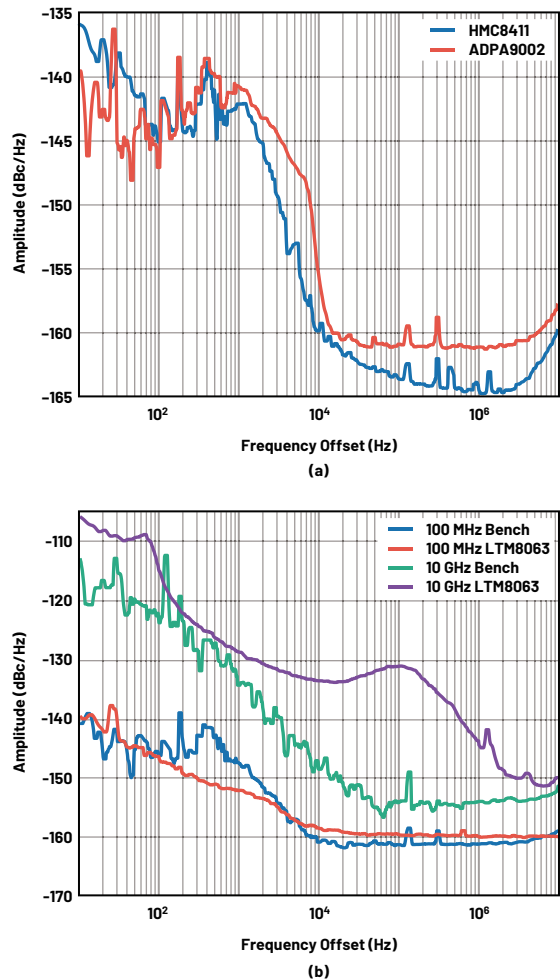


图5. (a) HMC8411和ADPA9002在2 GHz时的性能, (b)试验台和LTM8063供电的ADPA9002在两个不同的输入频率下的相位噪声响应。

图5比较在由LTM8063和试验台电源供电时, 功率放大器的相位噪声响应。可以看到, 在超过1/f频率后, 功率放大器的性能稍微降低。功率放大器消耗更多供电电流, 所观察的相位噪声大约增加2 dB至4 dB。

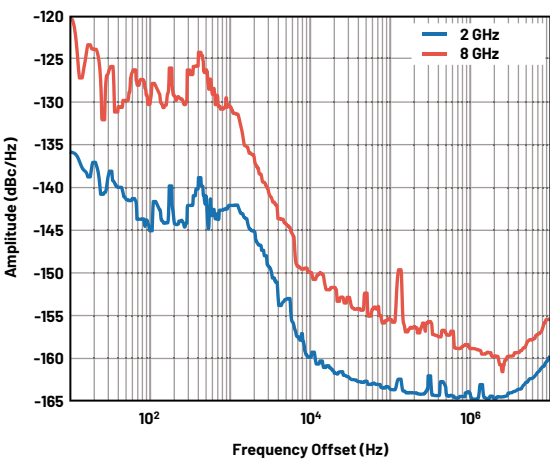


图6. HMC8411与LTM8063的相位噪声响应, 显示相位噪声/频率关系。

图6显示在输入频率为2 GHz和8 GHz时, HMC8411的相位噪声响应。响应紧随其后, 共模相位噪声/频率关系如公式3所示:

$$\phi(f_c) \propto 20 \log \left(\frac{f_c}{f_{ref}} \right) \quad (3)$$

这种关系表明, 输入频率每增加一倍, 相位噪声大约增加6 dB。可以看出, 频率增大4×时, 在10 Hz至100 Hz频率偏移下, 相位噪声大约增加12 dB。

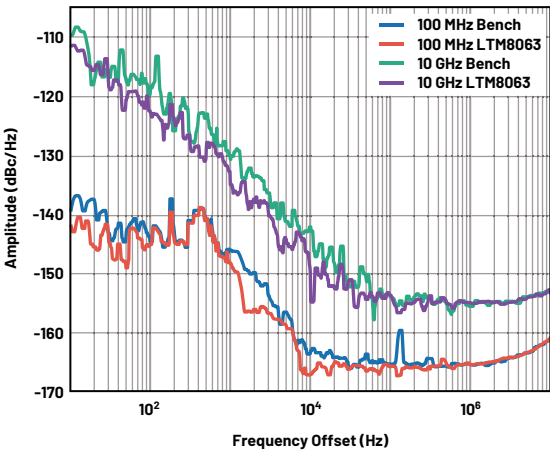


图7. 由试验台和LTM8063供电的HMC8411在两个不同的输入频率下的相位噪声响应。

图7显示在由LTM8063供电和由试验台电源供电时, HMC8411在100 MHz和10 GHz时的相位噪声响应。试验台电源相位噪声响应被用作判断某些电源解决方案性能的基准。与试验台电源相比, LTM8063在多种频率下都具有出色性能, 宽带本底噪声仅增加约2 dB。

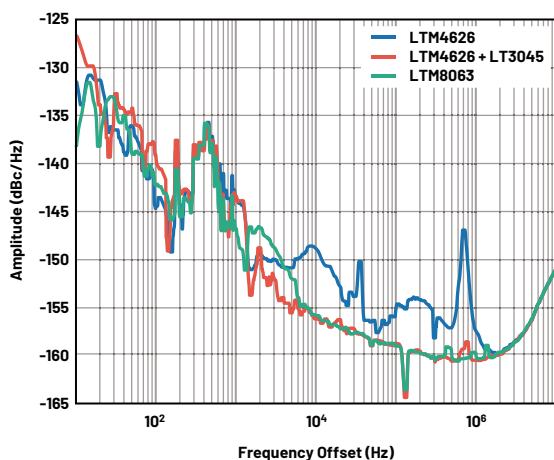


图8. 采用各种电源解决方案时，HMC8411的相位噪声响应。 $f_c = 5$ GHz。

一般会采用大电流模块（例如LTM4626）作为主电源，以便配电网络根据各个电路模块的要求降压。从图8中，可以看到LTM8063与级联LT3045超低噪声LDO稳压器的LTM4626的相位噪声性能相似。如果LTM8063提供的电压和电流输出能满足设计要求，该电源解决方案可以节省大幅成本和电路板空间。

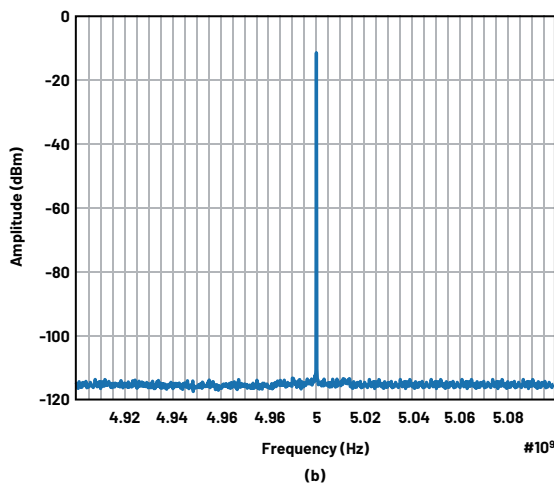
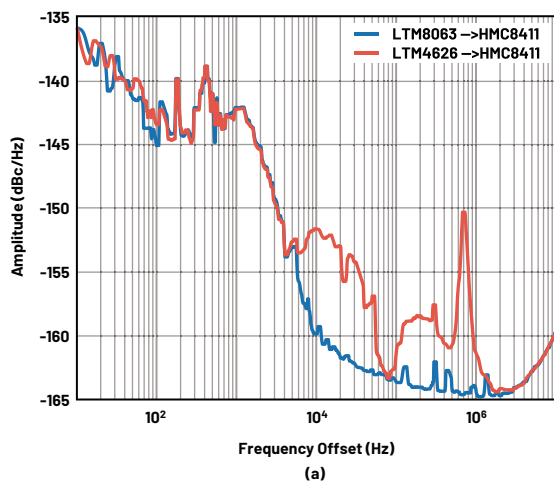


图9. (A)由不同开关稳压器供电的HMC8411在5 GHz的相位噪声响应，(b)由LTM4626供电的HMC8411的频谱中没有杂散。

从图9a可以看出，开关电源在不同频段下，可以表现出明显不同的行为。对于5 kHz以下的功率LNA相位噪声，LTM8063和LTM4626对它的影响可忽略不计，这一点上两者相似，但在5 kHz以上，两者之间的表现相差很大。LTM4626针对高端数字产品设计和优化。这些器件通常需要高效率 and 快速的瞬态响应，因此它们的电源可能具有极低的无源阻抗、快速开关边缘率、高控制环路增益和带宽等特性。这些特性会在输出电压中产生几毫伏的扰动。虽然这些扰动在数字系统中无关紧要，但却会降低信号链产品的性能。尽管如此，使用LTM4626，SFDR为102.7 dB时，输出频谱中没有明显的杂散，如图9b所示。但是，LTM8063是针对低噪声（EMI和输出）设计的，会在信号链应用中优化其性能。它具有很好的低频稳定性、很小的输出扰动，在开关基波及其谐波上的噪声更小。

结论

在进行信号链分析时，必须考虑到所有噪声来源，这很重要。DC电源解决方案这个噪声源常常被忽视掉，这可能会影响和严重降低信号链的性能。实验结果表明，选择正确的电源模块至关重要，在10 kHz偏移下，可以使相位噪声改善多达10 dB。在这个应用中，LTM8063给出的结果最好。虽然级联LT3045的LTM4626能提供同等相位噪声性能，但应明白，选择正确的电源解决方案对于优化RF信号链非常重要。

参考资料

Erkan Acar. “为何完全集成式转换环路器件可实现出色的相位噪声性能。” ADI公司，2021年4月。

Jarrah Bergeron. “分析及管理电源噪声和时钟抖动对高速DAC相位噪声的影响。” 模拟对话，第51卷第1期，2017年3月。

Delos, Peter和Jarrett Liner. “改进DAC相位噪声测量以支持超低相位噪声DDS应用。” 模拟对话，第51卷第3期，2017年8月。

Kester, Walt. “MT-008教程：将振荡器相位噪声转换为时间抖动。” ADI公司，2009年。

Liu, Leo. “全面了解和析开关稳压器噪声。” ADI公司，2019年1月。

作者简介

Mitchell Sternberg是ADI公司仪器仪表团队的系统应用工程师。他的工作经验涵盖信号链设计和分析、信号和电源完整性，以及无线通信系统。Mitchell曾经担任过多种职位，例如测试工程师和硬件开发人员，负责测试以太网的一致性。Mitchell毕业于新罕布什尔州达勒姆市的新罕布什尔大学，拥有电气工程学士学位。联系方式：mitchell.sternberg@analog.com。

Erkan Acar在北卡罗来纳州杜克大学达勒姆分校取得博士学位和硕士学位。Erkan领导了有关低成本RF测试、自动化测试设备、高速接口的信号和电源完整性的许多研发项目。他拥有多项专利并发表了许多文章。他目前对频率范围从基带到110 GHz及以上的RF和毫米波信号链感兴趣。联系方式：erkan.acar@analog.com。

David Ng是ADI公司电源系统经理，工作地点位于加利福尼亚。他负责管理面向工业、航空航天和医疗健康应用的高性能ADC、DAC、收发器、放大器和其他信号链器件的电源解决方案开发工作。David创立了LTM8000 µModule®产品线并将其成功发展为高创收的事业部。联系方式：david.ng@analog.com。

Sydney Wells目前正参与ADI公司的现场开发轮岗项目，接受担任现场应用工程师的培训。她于2020年获得康涅狄格大学电气工程学士学位。此前曾从事过电源转换器评估、制造自动化和供应商开发工程等工作。目前专注于研究电源和仪器仪表。联系方式：sydney.wells@analog.com。

在线支持社区



访问ADI在线支持社区，中文技术论坛

与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

请访问ez.analog.com/cn



如需了解区域总部、销售和分销商，或联系客户服务和
技术支持，请访问analog.com/cn/contact。

向我们的ADI技术专家提出棘手问题、浏览常见问题解
答，或参与EngineerZone在线支持社区讨论。
请访问ez.analog.com/cn。

©2021 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。
商标和注册商标属各自所有人所有。

“超越一切可能”是ADI公司的商标。

T23288sc-12/21



请访问analog.com/cn