

LDO 环路稳定性及其对射频频综相噪的影响

李俊明, 龙云

摘要

相位噪声是时钟、射频频综最为关注的技术指标之一。影响锁相环相噪的因素有很多，比如电源、参考源相噪、VCO 自身的相噪、环路滤波器的设置等。其中，电源引入的低频噪声往往对锁相环的近端相噪有着很大的影响。对于高性能的时钟和射频频综产品，为了获得极低的相噪性能，往往采用低噪声的 LDO 供电。然而，采用不同的 LDO 给频综供电，取得的相噪性能往往会有很大差别，同时，LDO 外围电路设计也会影响到频综的相噪性能。

本文首先简要地介绍了 LDO 的噪声来源及环路稳定性对输出噪声的影响；其次，根据调频理论推导出 VCO 的相位噪声与 LDO 的噪声频谱密度的理论计算关系。在此基础上，为了验证 LDO 噪声对射频频综输出相噪的影响，分别采用 TPS7A8101 和 TPS74401 LDO 评估板给 TRF3765 射频频综评估板供电，对比测试这两种情况下的 TRF3765 相噪曲线；同时，为了验证 LDO 环路稳定性对频综相噪的影响，针对 TPS7A8101 评估板的参考电路做出部分修改，并对比测试了电路修改前后的 TRF3765 输出相噪。

目录

1 LDO 噪声来源及环路稳定性对输出噪声影响	2
1.1 LDO 噪声来源.....	2
1.2 LDO 噪声抑制方法.....	3
1.3 LDO 环路稳定性与输出噪声的关系.....	4
2 LDO 噪声与 VCO 输出相噪的关系	5
3 采用不同 LDO 进行射频频综供电对比测试	6
3.1 TPS7A8101/TPS74401 频综供电对比测试.....	6
3.2 TPS7A8101 输出电路优化及其对频综相噪的影响.....	8
4 结论	10
5 参考文献	10

图表

图 1 LDO 的 PSRR 与噪声	2
图 2 LDO 内部框图（噪声源）	3
图 3 LDO 内部框图（增加噪声抑制电容和前馈电容）	3
图 4 不同 C_{FF} 下的噪声频谱密度图	4
图 5 LDO 小信号模型	4
图 6 增加前馈电容后的频率响应波特图	5
图 7 由电源噪声引入的 VCO 相噪恶化	5
图 8 TPS7A8101 与 TPS74401 噪声频谱密度图	7
图 9 LDO 频综供电对比测试设置	7

图 10 采用 TPS7A8101/TPS74401 供电的 TRF3765 相噪曲线 8
 图 11 TPS7A8101 评估板初始原理图..... 8
 图 12 TPS7A8101 提高环路稳定性后的原理图 9
 图 13 TPS7A8101 稳定性改善前后 TRF3765 相噪曲线..... 9

表格

表 1 不同 LDO 给频综供电对比测试结果..... 10

1 LDO 噪声来源及环路稳定性对输出噪声影响

1.1 LDO 噪声来源

LDO 的噪声分为 LDO 内部的噪声和 LDO 外部的噪声。LDO 内部的噪声来自于内部电路的带隙基准源，放大器以及晶体管。LDO 外部的噪声来自于输入。在 LDO 的手册中，PSRR 是表征 LDO 抑制外部噪声的能力，但 PSRR 高并不代表 LDO 内部噪声小。LDO 的总输出噪声才是表征 LDO 内部噪声抑制的参数，一般在电气特性表里用单位 μV_{RMS} 表示，或者在噪声频谱密度图上表示。

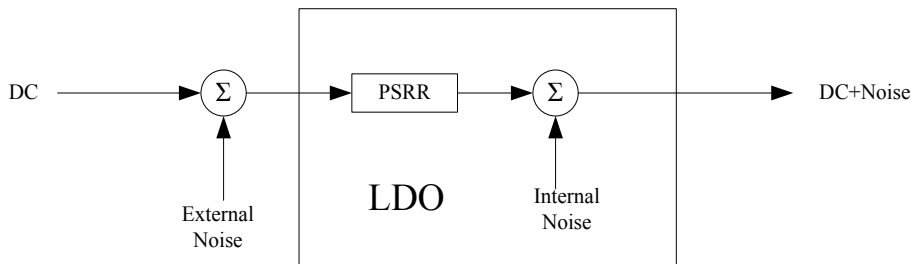


图 1 LDO 的 PSRR 与噪声

图 2 是 LDO 内部结构框图， V_N 代表等效噪声源。噪声源包括带隙基准源产生的噪声 $V_{N(REF)}$ ，误差放大器产生的噪声 $V_{N(AMP)}$ ，FET 产生的噪声 $V_{N(FET)}$ 以及反馈电阻产生的噪声 $V_{N(R1)}$ 和 $V_{N(R2)}$ 。在大多数情况下，由于带隙基准源电路是由很多不同的电阻、晶体管和电容组成，它所产生的噪声会远远大于反馈电阻产生的噪声。而且带隙基准源是误差放大器的输入，它所产生的噪声也会经由误差放大器放大来控制 FET，所以误差放大器本身以及 FET 所产生的噪声也会比带隙基准源的噪声要低。可以说，LDO 内部最大的噪声源就是带隙基准源。我们把 LDO 输出噪声 $V_{N(OUT)}$ 表示为

$$V_{N(OUT)} = V_{N(Other)} + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \times V_{N(REF)} \tag{1}$$

$V_{N(Other)}$ 是 $V_{N(AMP)}$ 以及 $V_{N(FET)}$ 的和。由公式 1 可以得出，输出噪声最小值出现在 R1 短接到 FB，误差放大器的增益近似为 1 的时候。

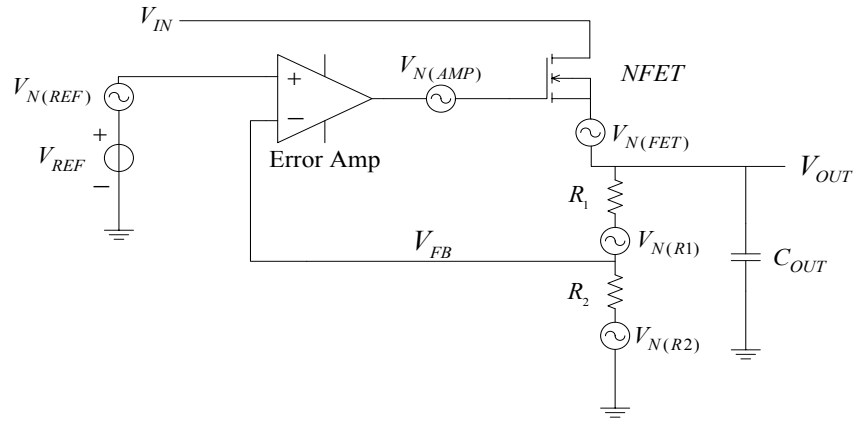


图 2 LDO 内部框图（噪声源）

1.2 LDO 噪声抑制方法

为了抑制带隙基准源产生的噪声，有三种办法。

一是降低误差放大器的带宽，抑制了带隙基准源的高频噪声。但是降低带宽会使 LDO 的动态性能降低。

二是在带隙基准源和误差放大器之间加低通滤波。高性能的 LDO 都会有一个噪声抑制 NR 管脚， C_{NR} 并联在带隙基准源和 GND 之间，起到低通滤波的作用。如图 3 所示。

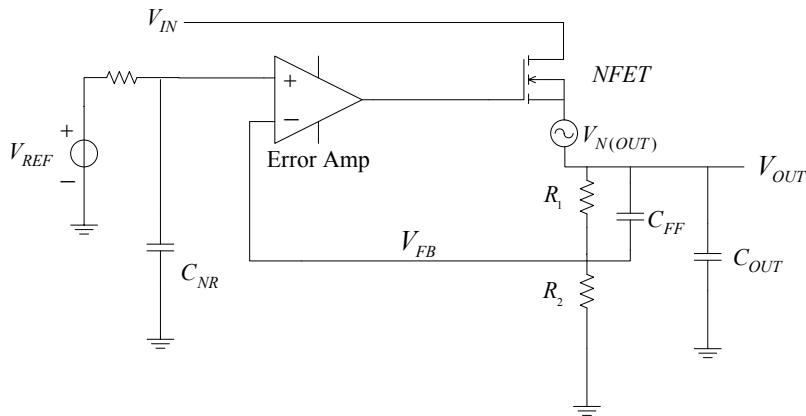


图 3 LDO 内部框图（增加噪声抑制电容和前馈电容）

三是在反馈电阻 R_1 上增加前馈电容 C_{FF} 。在增加了 C_{FF} 和 C_{NR} 后，输出噪声可以表示为

$$V_{N(OUT)} = V_{N(Other)} + \left(1 + \frac{R_1 \parallel \frac{1}{2\pi \times f \times C_{FF}}}{R_2} \right) \times G_{RC} \times V_{N(REF)} \quad (2)$$

从式 2 可以得出， C_{FF} 越大，输出噪声就越小。频率越高，输出噪声越小。

图 4 是不同 C_{FF} 下的噪声频谱密度图。可以看出， C_{FF} 越大，噪声从低频开始都能被很好的抑制。 C_{FF} 太小的时候，抑制噪声的作用就不太明显。当频率很高的时候，不管用多大的 C_{FF} ，噪声频谱密度相差不多。所以，增加合适的前馈电容 C_{FF} ，对改善 LDO 低频噪声有非常好的效果。

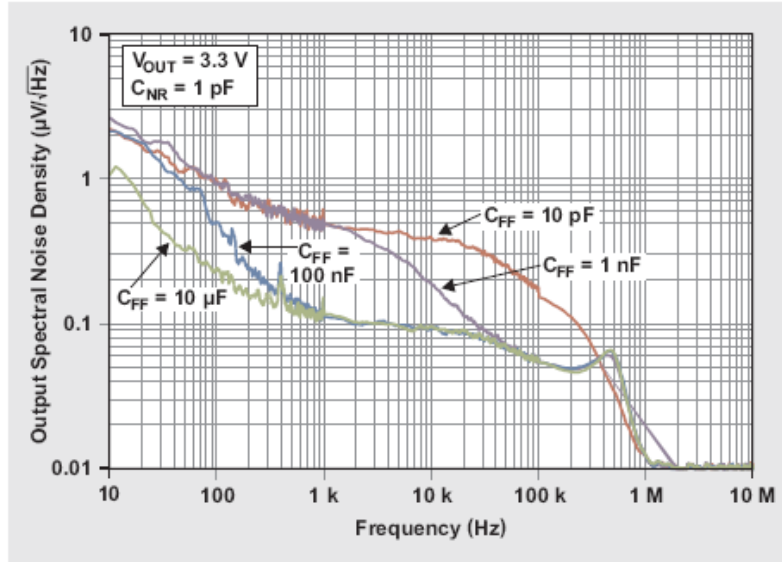


图 4 不同 C_{FF} 下的噪声频谱密度图

1.3 LDO 环路稳定性与输出噪声的关系

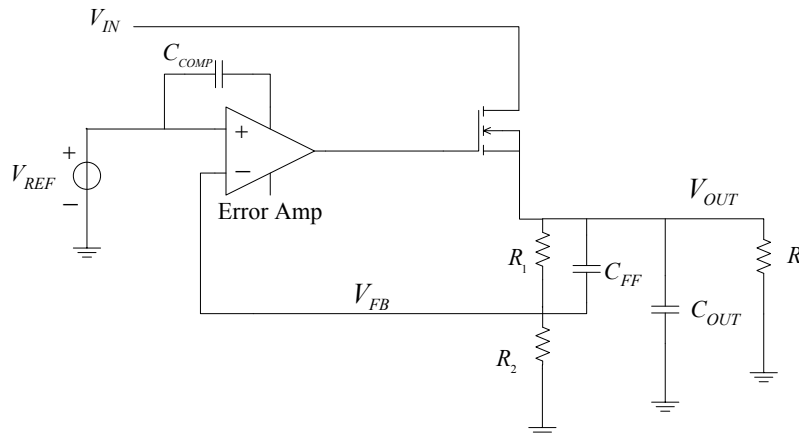


图 5 LDO 小信号模型

从 LDO 的小信号分析可以看出，LDO 有两个低频极点，如果没有合适的零点补偿，LDO 的稳定裕度不够，就有可能产生震荡。稳定裕度不够的 LDO 产生的内部噪声会更大。上节中提到第三种噪声抑制方法，即增加前馈电容 C_{FF} 是实际上为了改善系统稳定裕度。由 C_{FF} 与 R_1 组成一个低频

零点，

$$Z_{FF} = \frac{1}{2\pi \times R_1 \times C_{FF}}$$

由下图的频率响应可以看出，零点是相位裕度有了很大的提升，增加了系统稳定性，从而减小了系统低频噪声。

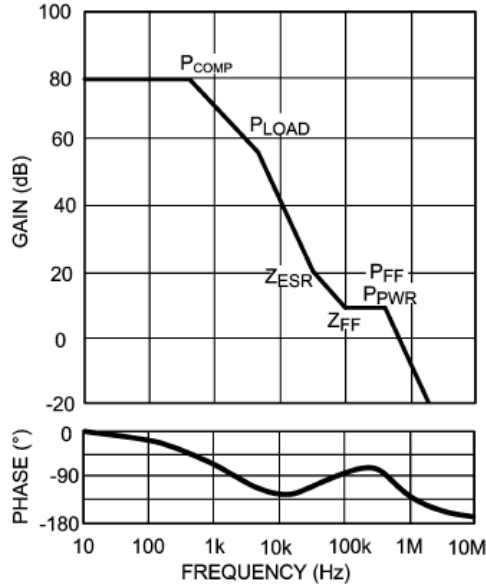


图 6 增加前馈电容后的频率响应波特图

2 LDO 噪声与 VCO 输出相噪的关系

电源引入噪声对锁相环中各个有源器件都可能造成影响，其中最为敏感的部分是 VCO，本文将着重讨论 LDO 输出噪声对 VCO 相噪的影响。

一个典型的 LDO 供电的频综系统框图如图 7 所示：加载在电源上的噪声信号通过频率调制过程调制到 VCO 的输出，造成 VCO 输出相噪恶化。

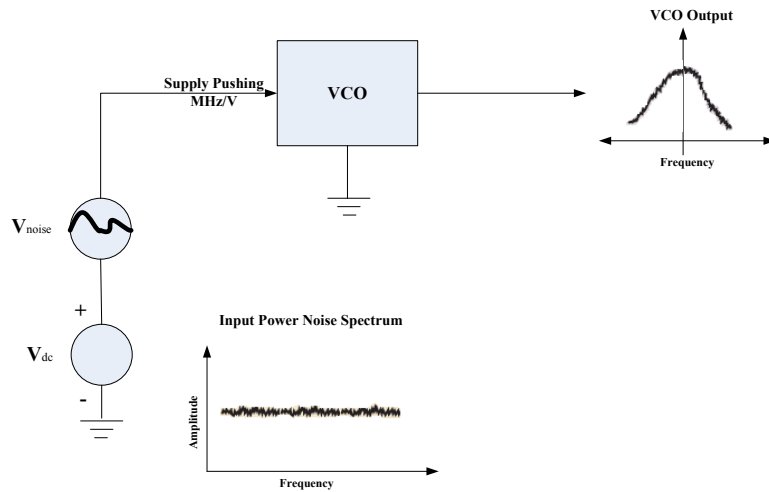


图 7 由电源噪声引入的 VCO 相噪恶化

根据经典调频系统理论，调制指数 β 由式 (3) 来表示

$$\beta = \frac{\text{FrequencyDeviation}}{\text{ModulationFrequency}} \quad (3)$$

对于电源噪声调制，式中的频率背离（Frequency Deviation）可由下式得到

$$\text{FrequencyDeviation} = K_{\text{push}} \cdot A \quad (4)$$

式中， K_{push} 是 VCO 的电源推压指数，它表征的是 VCO 对电源噪声波动的灵敏度，单位用 MHz/V 来表示；A 是电源噪声信号幅度。

对于采用 LDO 供电的射频频综来说，通常用 LDO 的指定频率偏移的频谱噪声密度 $S_{\text{ldo}}(f)$ （Noise Spectrum Density）来表征电源噪声，由于它是一个 RMS 电压值，所以式（4）可以表示为

$$\text{FrequencyDeviation} = K_{\text{push}} \cdot A = K_{\text{push}} \cdot \sqrt{2} \cdot S_{\text{ldo}}(f) \quad (5)$$

将式（5）带入式（3），可以得到

$$\beta_{\text{ldo}} = \frac{\text{FrequencyDeviation}}{\text{ModulationFrequency}} = \frac{\sqrt{2}K_{\text{push}} \cdot S_{\text{ldo}}(f)}{f} \quad (6)$$

式中， f 是相应的频率偏移。

由不同频率成分噪声调制到载波输出引起的单边带噪声，由下式表示

$$\text{Sideband}(f) = 20 \cdot \log |J_1(\beta)| = 20 \cdot \log \left(\frac{\beta}{2} - \frac{\beta^3}{2^2 \cdot 4} + \frac{\beta^5}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6} + \dots \right) \approx 20 \cdot \log \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (7)$$

将式（6）带入式（7）有

$$\text{Sideband}(f_{\text{ldo}}) \approx 20 \cdot \log \left(\frac{\beta}{2} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{K_{\text{push}} \cdot S_{\text{ldo}}(f)}{\sqrt{2}f} \right) \quad (8)$$

由式（8）可见，对于给定的 VCO，由于 K_{push} 是一个确定的值，因此由 LDO 噪声引起的 VCO 输出相噪是由 LDO 的噪声频谱密度（Noise Spectrum Density）决定的。

3 采用不同 LDO 进行射频频综供电对比测试

3.1 TPS7A8101/TPS74401 频综供电对比测试

TPS7A8101 和 TPS74401 是 TI 推出的两款高性能 LDO 芯片。与 TPS74401 相比，由于具有更高的环路增益和带宽，TPS7A8101 具有更高的电源噪声抑制比（PSRR）；然而，由于具有更好的系统稳定性，TPS74401 拥有更低的噪声频谱密度（NSD），如下图 8 所示。

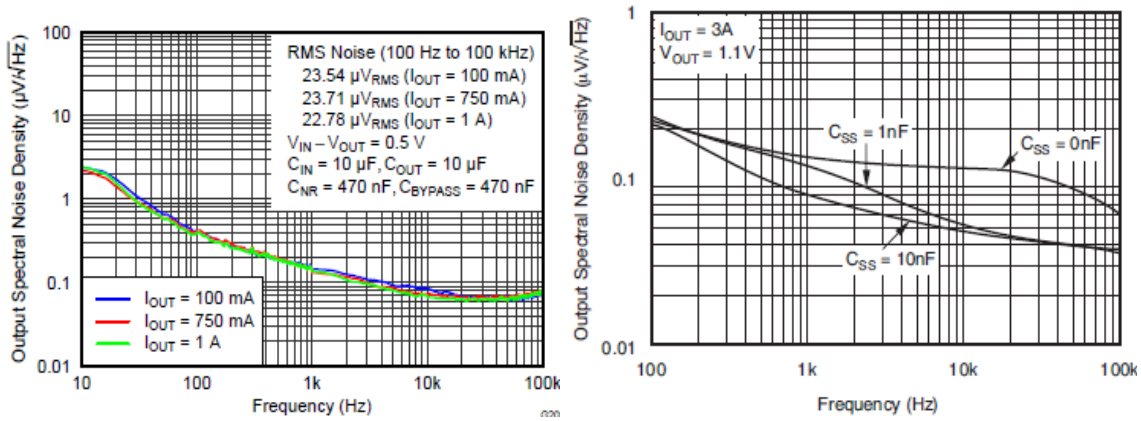


图 8 TPS7A8101 与 TPS74401 噪声频谱密度图

下面我们分别采用 TPS7A78101 和 TPS74401 评估板对 TRF3765 评估板进行供电，比较两者的输出相噪。测试设置如下图 9 所示，LDO 的输入 5V 电源由 Agilent E3634 提供，通过 LDO 评估板后转变成 3.3V 给 TRF3765 供电。TRF3765 采用评估板上自带的 61.44MHz 晶振作为参考输入，输出频率为 2.28GHz。TRF3765 的射频输出连到 R&S FSQ8 相噪分析仪上测试相应的相噪曲线。

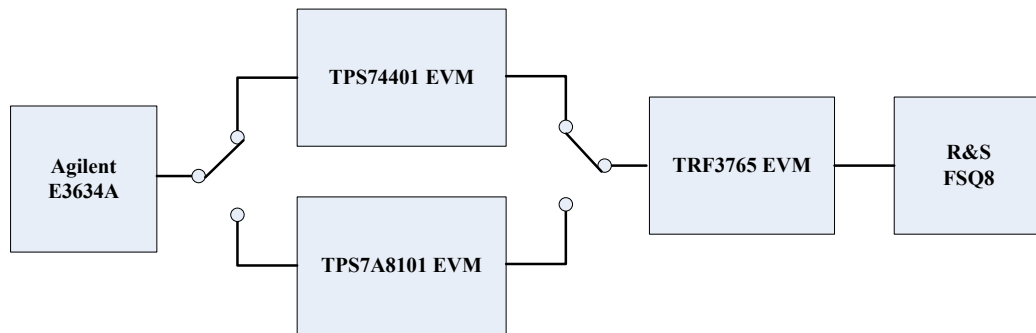


图 9 LDO 频综供电对比测试设置

两者对比测试结果如下图 10 所示，

PHASE NOISE				
Settings		Residual Noise		Spot Noise [T1]
Signal Freq:	2.279981 GHz	Evaluation from 1 kHz to 10 MHz		1 kHz ...
Signal Level:	4.94 dBm	Residual PM	0.362 °	10 kHz ...
Signal Freq Δ:	-127.13 Hz	Residual FM	1.596 kHz	100 kHz ...
Signal Level Δ:	-0.28 dBm	RMS Jitter	0.4405 ps	1 MHz ...

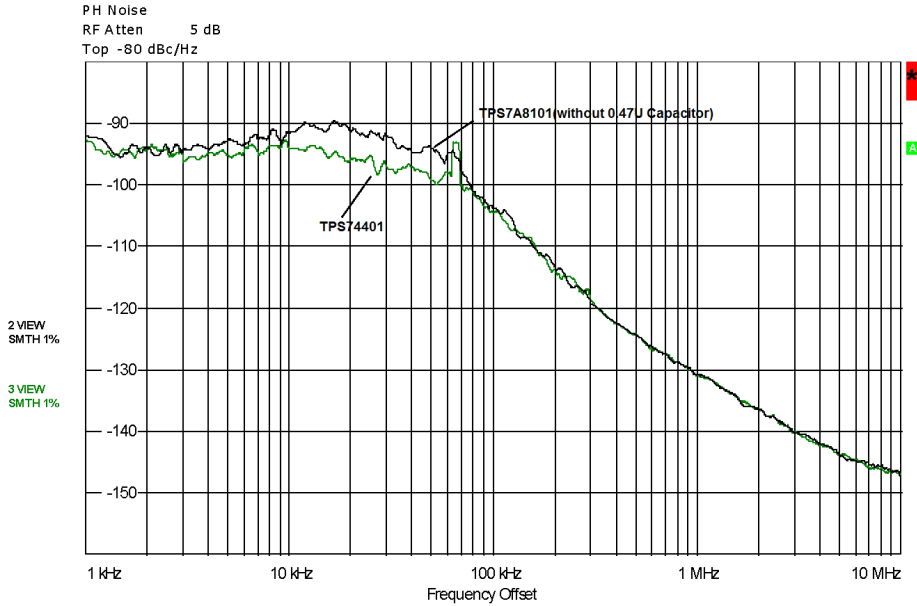


图 10 采用 TPS7A8101/TPS74401 供电的 TRF3765 相噪曲线

由上图看见，采用 TPS7A8101 供电，TRF3765 在整个积分区间内（1KHz~10MHz）的 RMS 抖动为 0.62ps；而 TPS74401 的 RMS 抖动仅为 0.44ps。

3.2 TPS7A8101 输出电路优化及其对频综相噪的影响

TPS7A8101 评估板初始原理图如图 11 所示，由上节的测试结果可知，采用该电路给 TRF3765 供电，RMS 抖动为 0.62ps。

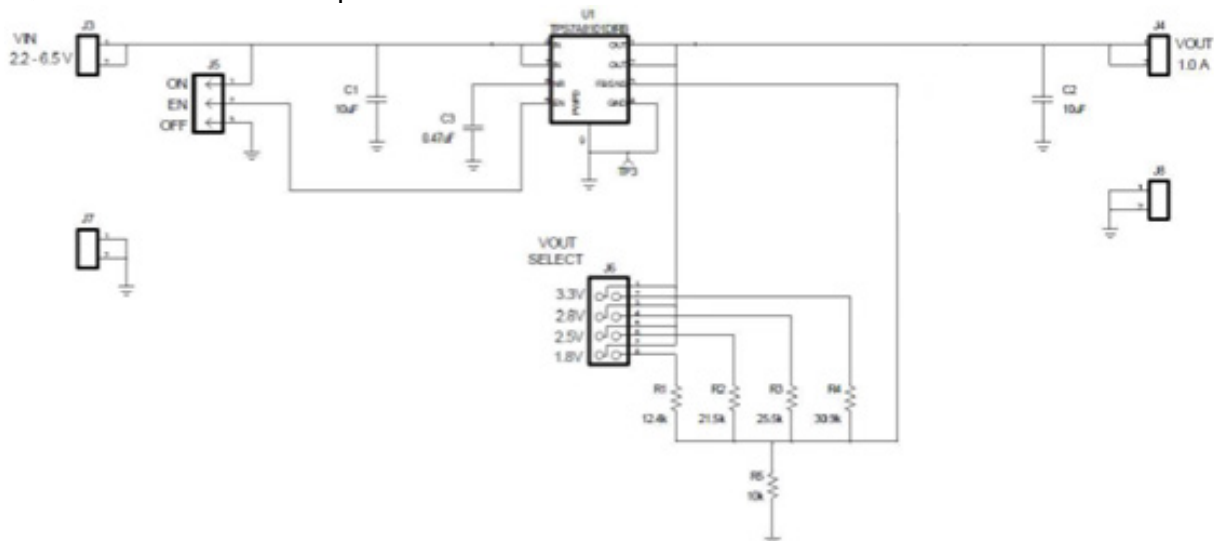


图 11 TPS7A8101 评估板初始原理图

第一章中我们已经讨论了 LDO 加一个前馈电容可以有效的提高电源的环路稳定性，从而降低 LDO 的输出噪声频谱密度。基于此，我们在 TPS7A8101 输出加一个 $0.47 \mu F$ 的前馈电容，修改后的原理图如下图 12 所示。

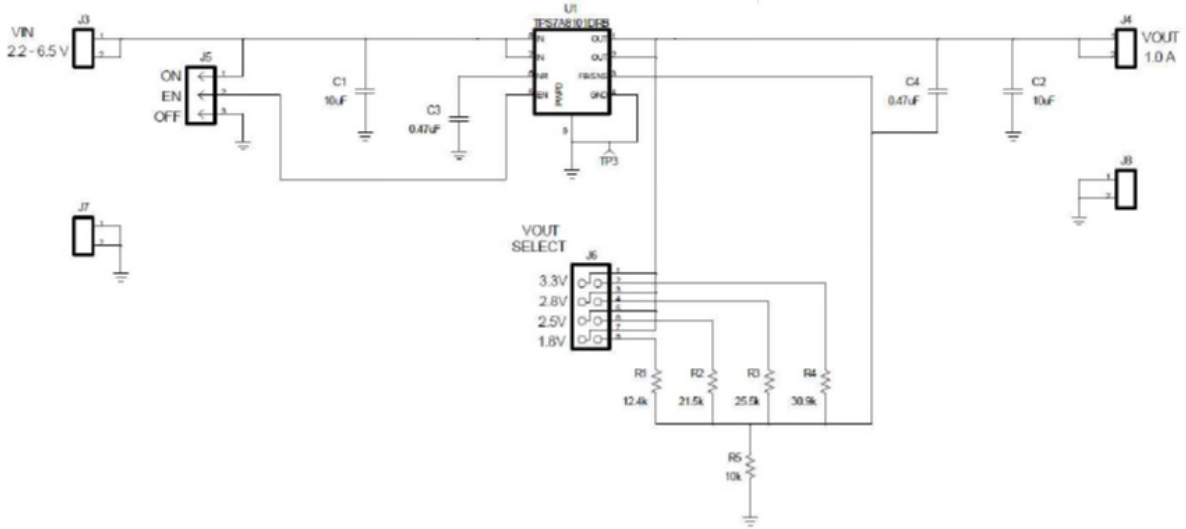


图 12 TPS7A8101 提高环路稳定性后的原理图

针对修改前后的设计，我们对比测试了相应的 TRF3765 相噪曲线，如图 13 所示，由图可见，增加 $0.47 \mu F$ 输出电容后，1KHz 到 10MHz 的 RMS 抖动由 $0.62ps$ 提高到 $0.49ps$ 。

PHASE NOISE				
Settings		Residual Noise		Spot Noise [T2]
Signal Freq:	2.27998 GHz	Evaluation from 1 kHz	to 10 MHz	1 kHz ...
Signal Level:	4.96 dBm	Residual PM	0.508 °	10 kHz ...
Signal Freq Δ:	-33.42 Hz	Residual FM	1.623 kHz	100 kHz ...
Signal Level Δ:	-0.3 dBm	RMS Jitter	0.6187 ps	1 MHz ...

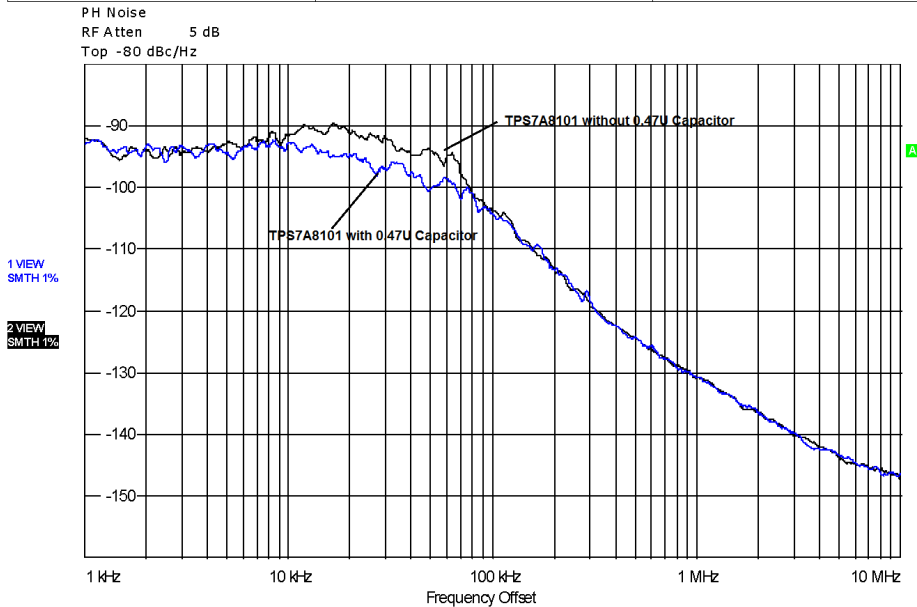


图 13 TPS7A8101 稳定性改善前后 TRF3765 相噪曲线

4 结论

综合以上两组测试的测试结果，可以得到下表

LDO 评估板	TPS74401	TPS7A8101 (初始设计)	TPS7A8101 (改善环路稳定性后)
RMS Jitter (TRF3765)	0.44ps	0.62ps	0.49ps

表 1 不同 LDO 给频综供电对比测试结果

由表 1 可以看到，由于 TPS74401 的噪声频谱密度最小，在给频综供电的时候可以取得最好的相噪性能；TPS7A8101 噪声频谱密度相对较大，在给频综供电的时候取得的相噪性能相对较差；但是通过优化 TPS7A8101 的输出电路设计，频综的相位噪声得到了明显的改善。

实测结果很好的验证了前文的理论分析，即：LDO 的噪声频谱密度参数（NSD）决定了由电源噪声引起的 VCO 相噪恶化；通过提高 LDO 的环路稳定性可以达到降低噪声频谱密度的目的，从而改善频综的输出相噪。

5 参考文献

- [1] LDO Noise Examined In Detail (SLAA412)
- [2] LDO Noise Demystified (SLYT489)
- [3] Externally Inducted VCO Phase Noise, DENNIS COLIN, Mica Microwave
- [4] TPS74401 Datasheet (SBVS066M)
- [5] TPS7A8101 Datasheet (SBVS179A)

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号, 中建大厦 32 楼 邮政编码: 200122
Copyright © 2013 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司