

Application Report
LDO 噪声揭秘



Sanjay Pithadia and Ankur Verma

PMP - LP Linear Regulators

摘要

此应用报告说明了 LDO 的噪声与 PSRR 之间的差异，还说明了 LDO 数据表中噪声的不同规定方式以及在实际应用中应采用的噪声规格，最后说明了降低 LDO 噪声的方法。

内容

1 LDO 噪声和 PSRR.....	2
2 LDO 噪声类型.....	3
3 LDO 数据表中的噪声规格.....	4
4 哪种规格适合您的应用？.....	5
5 如何降低 LDO 噪声？.....	8
6 LDO 噪声的影响.....	9
7 修订历史记录.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 LDO 噪声和 PSRR

低压差线性稳压器 (LDO) 为调节由较高电压输入产生的输出电压提供了一种简单方法。虽然操作简单，但其自生噪声在很多时候易与电源抑制比 (PSRR) 混淆。这两者在很多情况下统称为“噪声”，这是不恰当的。噪声是由 LDO 内部电路中的晶体管和电阻器以及外部元件产生的。噪声类型有热噪声、闪烁噪声和散粒噪声。PSRR 可以衡量一个电路的电源抑制能力，表示为输出噪声与电源输入噪声的比值。它可测量电路在各种频率下对输入电源注入纹波的抑制能力。在 LDO 中，PSRR 是在宽频率范围内输出纹波与输入纹波之比，单位为分贝 (dB)。PSRR 的基本公式为[方程式 1](#)：

$$\text{PSRR} = 20 \log \frac{\text{Ripple}_{\text{Input}}}{\text{Ripple}_{\text{Output}}} \quad (1)$$

[图 1-1](#) 说明了噪声和 PSRR 之间的差异。LDO 噪声包括内部噪声和外部噪声，而 PSRR 是 LDO 的一个内部参数。LDO 用户通常专注于 PSRR 而不是自生的输出噪声。PSRR 可抑制来自 LDO 外部的噪声，但 LDO 内部始终会产生噪声。因此，具有高 PSRR 的 LDO 可能不会很好地抑制内部噪声。用户应始终考虑这两个参数。

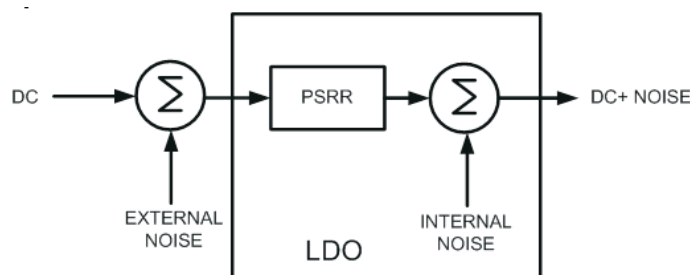


图 1-1. LDO 的 PSRR 和噪声

2 LDO 噪声类型

噪声是晶体管 and 电阻器内产生的纯物理现象。晶体管会产生散粒噪声和闪烁噪声。MOSFET 的电阻元件 (如电阻器) 也会产生热噪声。热噪声和散粒噪声本质上是随机的, 其功率在频谱上是平坦的。在放大器带宽范围内, 功率都是平坦的。MOSFET 栅极上的电荷被捕获时, 会产生闪烁噪声。散粒噪声符合泊松分布, 而 $1/f$ 噪声 (闪烁噪声) 的功率与频率成反比, 即频率越低, 噪声越高。 $1/f$ 噪声是系统的主要噪声来源, 仅次于热噪声。(请参阅图 2-1)

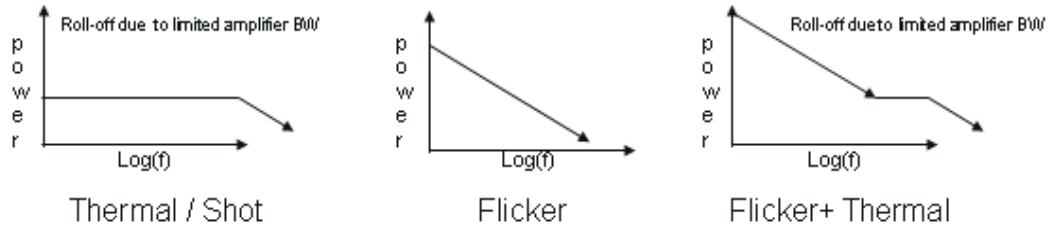


图 2-1. LDO 噪声 (类型)

3 LDO 数据表中的噪声规格

通常，数据表规定 LDO 噪声的方式有两种。一种是“总（积分）输出噪声，以 μV_{rms} 为单位”，即在有限频率范围内积分的频谱噪声密度 RMS 值。第二种是“频谱噪声密度曲线，以 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 为单位”，即噪声密度与频率的关系图。图 3-1 显示了 TPS717xx 系列 LDO 的两种规格。

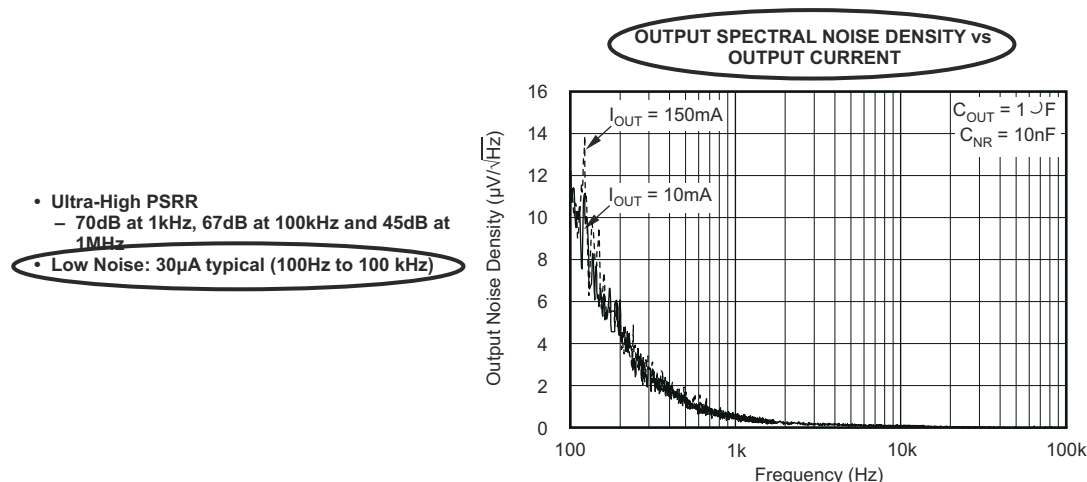


图 3-1. 噪声的两种规定方式 (TPS717xx LDO)

由于输出噪声电压规定为单个数字，因此非常适合用于比较。比较不同 LDO 的噪声规格时，必须在相同的频率范围内以及相同的输出电压和电流值下测量两个稳压器的噪声。

4 哪种规格适合您的应用？

用户应该了解具体应用需要哪种 LDO 噪声规格，因为有些应用与频谱噪声密度相关，而某些应用可以利用总（积分）噪声。以下示例对此进行了说明。

1. 考虑一个射频系统中 LDO 为压控振荡器 (VCO) 供电的例子。VCO 接收两个输入信号并将其混合为一个信号。如果两个信号为 $\sin(\omega_1 t)$ 和 $\sin(\omega_2 t)$ ，则混合后输出 $\sin((\omega_1 - \omega_2)t)$ 、 $\sin((\omega_1 + \omega_2)t)$ 和谐波信号。射频信号链通过 VCO 后，一般会进入仅针对一种频率调优的带通系统，即信号混合后，只有较高频率的信号不会通过。大多数宽带应用都对每个频带的频谱和功率进行非常严格地调节。任何频带的寄生噪声均须通过控制来满足所谓的“传输掩模”要求。传输掩模对于最终产品的机构认证而言非常重要。本底噪声在较高频率下产生的任何峰值，都可能导致传输信号超出传输掩模范围，从而无法通过认证测试。

如果供电导体或 LDO 输出中出现噪声，在 FR 频率下的这一噪声与载波频率信号混合后，会产生两个边带，如图 4-1 所示。噪声太高时，会使因噪声而产生的边带超出传输掩模范围，进而导致系统故障。

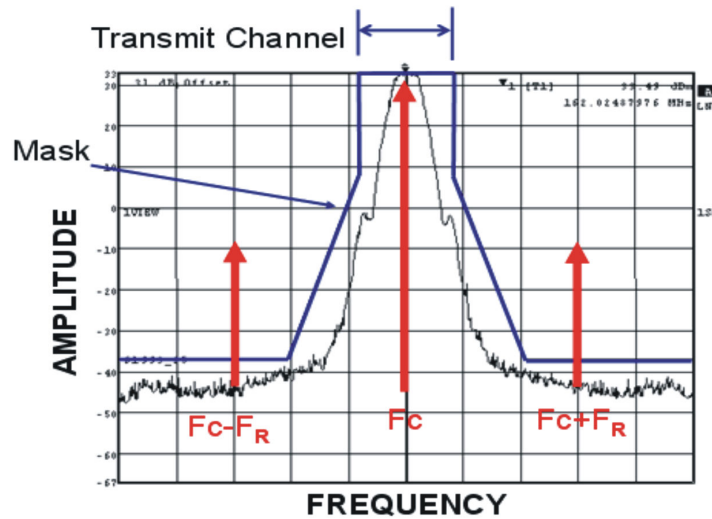


图 4-1. 传输掩模和因噪声产生的边带

同样，假设射频系统在 2.4GHz 频率下工作，那么 LDO 噪声会将 2.4GHz 上下的 VCO 噪声频谱提高至 LDO 带宽。在 VCO 原始噪声图中加入图 2-1 所示的 LDO 噪声后，中心频率附近的 VCO 本底噪声等级提高。

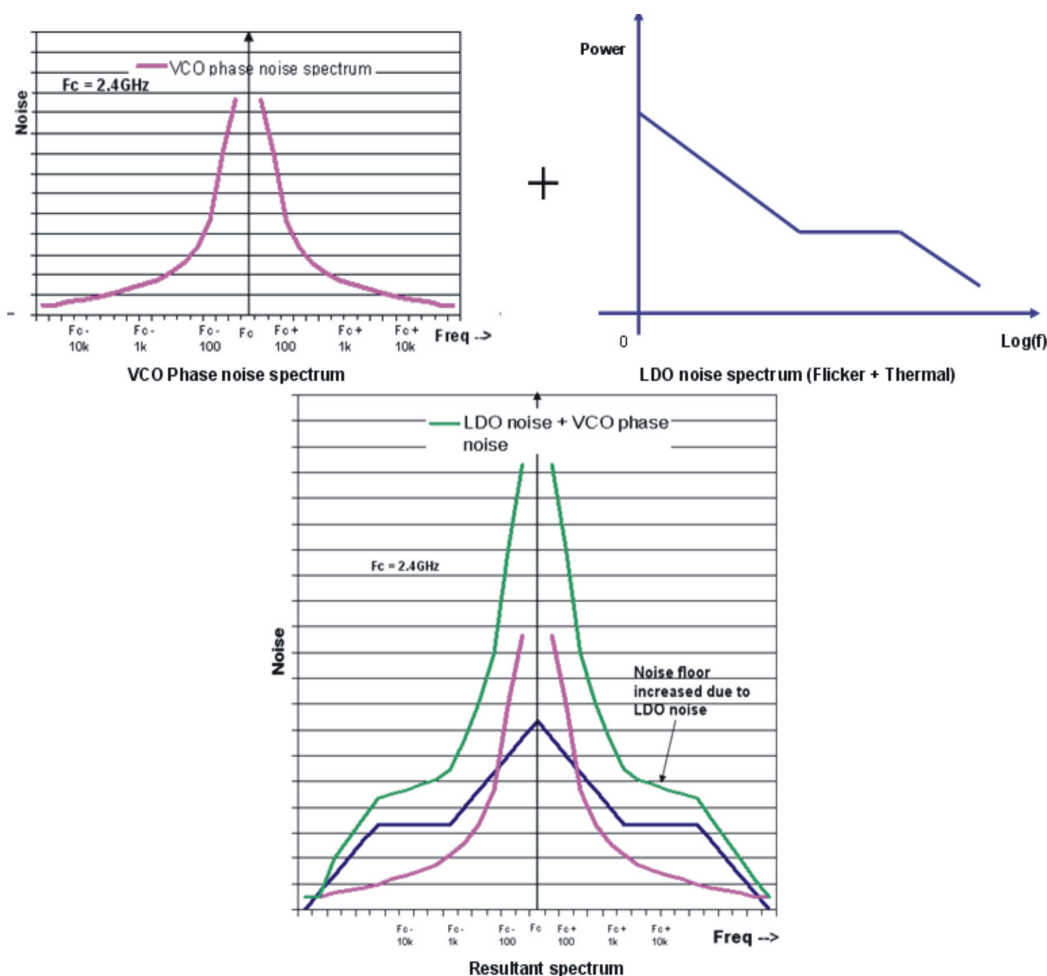


图 4-2. LDO 噪声提高了 VCO 本底噪声

因此，在射频应用中，用户应使用频谱噪声密度曲线。因为单一噪声无频率相关性，不会准确地表示最终输出。

- 假设在一个系统中 LDO 为 ADC 或 DAC 供电。任何采样系统由于混叠现象都会使高频噪声的频率降低。例如，如果采样频率为 100kHz，LDO 产生的噪声为 90kHz 和 110kHz、190kHz 和 210kHz 等，则所有噪声将折返至拍频 10kHz。任何频率的输出噪声都会出现这种情况，因此所有 LDO 噪声都会折返至采样系统的带宽范围内。这相当于对系统的直流噪声到带宽噪声进行积分，然后计算总噪声。LDO 的总（积分）噪声较高时，会影响 ADC/DAC 的性能。图 4-3 下面显示了 LDO 噪声混叠是如何发生的。第一个图是由理想 LDO 供电的系统，第二个图是由具有热噪声的 LDO 供电的系统（热噪声使本底噪声增加），第三个图是由具有高频噪声的 LDO 供电的系统（因混叠现象使频率降低）。

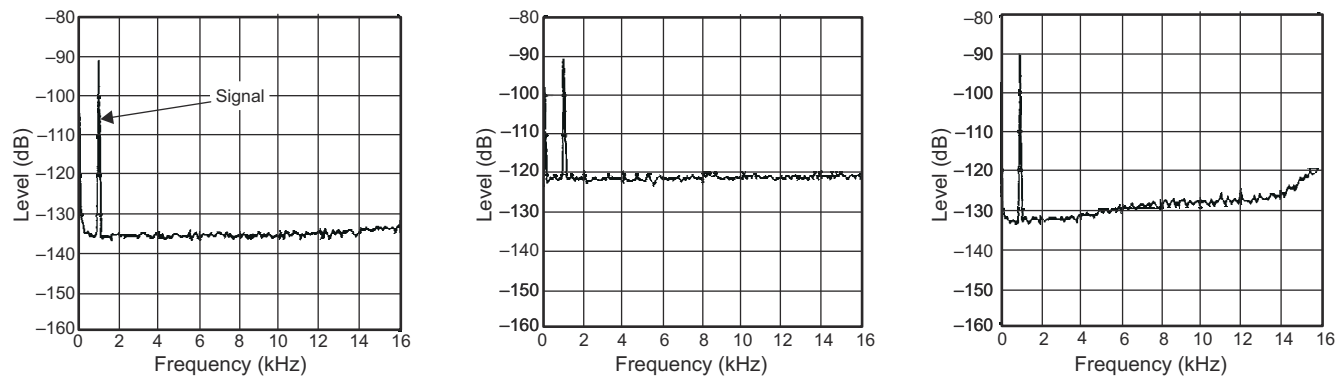


图 4-3. LDO 噪声混叠

由于系统会使所有噪声的频率降低，并对噪声进行积分，因此，用户在此应用中应使用总（积分）输出噪声。

5 如何降低 LDO 噪声？

LDO 中的主要噪声来自带隙基准源。可使用两种方法来降低 LDO 中的噪声。下面内容详细说明了这两种方法。

降低噪声的一种方法是降低 LDO 带宽，这可以通过降低 LDO 内部误差放大器的带宽来实现。但是，如果我们降低误差放大器的带宽，则会降低 LDO 瞬态响应速度。

另一种方法是使用低通滤波器 (LPF)。我们知道，LDO 噪声的最主要来源是内部的带隙基准源。因此，我们可在带隙输出和误差放大器输入之间插入一个 LPF，从而在误差放大器将带隙噪声放大之前将其降低。通常，该 LPF 由一个内部大电阻器和一个外部电容器组成。此滤波器的截止频率设置得越低越好，从而滤除几乎所有的带隙噪声。

这里始终有一个问题：为什么占用大部分芯片面积的大功率导通元件（主要是 FET）不是主要噪声源？答案是没有增益。作为主要噪声源的带隙基准源连接至误差放大器的输入端，因此会被误差放大器的增益放大。我们知道，要研究输出噪声，首先要了解运算放大器输入的几个噪声影响因素；所以，要研究导通 FET 的噪声，需要先找到噪声的影响因素，即导通 FET 和误差放大器输入之间的开环增益。开环增益非常大，因此，导通 FET 的其他噪声影响因素通常可以忽略不计。

总之，LDO 噪声和 PSRR 都是选择 LDO 时需要考虑的重要规格。这里有两种 LDO 噪声的规定方式，用户应查找适合其应用的规格。

6 LDO 噪声的影响

我们以具有集成 LDO (如 TPS57140-Q1) 的直流/直流转换器为例说明。

LDO 稳压器内部的带隙噪声是抑制高频成分的限制因素。在直流/直流转换器的输入端施加快速下降的输入瞬态时,带隙噪声会产生不良影响。在输入的快速下降沿期间,如果输入的压摆率高于特定值,直流/直流转换器的内部 LDO 稳压器由于电源抑制比 (PSRR) 的限制,会发生复位。频率越高,转换速度越快。LDO 稳压器内部的带隙噪声是抑制高频成分的限制因素。例如,使用 TPS57140-Q1 设计仿真和基准测试测量时,测得的压摆率值为 $1.2\text{V}/\mu\text{s}$ 。如果压摆率高于此值,该器件将被禁用并重新进行软启动。根据 $\text{ESR} \times C \times dV/dt$,在通过 ESR 的瞬态电流越来越高的情况下,输入电容器的 ESR 越高,越会对输入电压的压摆率和转换持续时间造成不利影响。因此,推荐使用低 ESR 陶瓷电容器。

参阅 [《直流/直流转换器在快速输入压摆率应用中的设计注意事项》](#) (SLVA693), 了解更多信息

7 修订历史记录

注: 以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

重要声明和免责声明

TI 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。您将独自承担以下全部责任: (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开发本资源所述的使用 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 (<http://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [TI.com.cn](http://www.ti.com.cn) 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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2020, 德州仪器 (TI) 公司

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

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 © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司