

全面了解和析开关稳压器噪声

Leo Liu
ADI公司

摘要

本文将介绍开关稳压器的几种不同类型的固有噪声：开关纹波、宽带噪声和高频尖峰。本文还将讨论和分析与输入噪声抑制相关的开关稳压器PSRR。设计低噪声开关稳压器时，为了消除LDO后置稳压器以提高功率转换器效率、减小解决方案尺寸并降低设计成本，全面了解开关稳压器噪声非常重要。

简介

一般而言，与低压差(LDO)稳压器输出相比，人们认为传统开关稳压器的输出电压噪声很大。然而，LDO电压会引起严重的额外热问题，并使得电源设计更加复杂。全面认识开关稳压器噪声很有必要，有助于设计低噪声开关解决方案，使之产生与LDO稳压器相当的低噪声性能。本文分析和评估的目标是采用电流模式控制的降压稳压器，因为它在应用中最常用。信号分析是了解开关纹波噪声、当前宽带噪声特性（及其来源）、开关引起的高频尖峰噪声的主要方法。本文将讨论开关稳压器PSRR（电源抑制比，其对输入噪声抑制很重要）以及信号分析方法。

开关纹波噪声

本部分依据基波和谐波理论介绍降压转换器输出纹波计算公式。

根据开关稳压器拓扑结构和基本操作，纹波始终是开关稳压器中的主要噪声，因为峰峰值电压幅度一般为几mV到几十mV。它应被视为周期性且可预测的信号。如果以固定开关频率工作，则在时域中通过示波器，或在频域中通过傅立叶分解，很容易将其识别并进行测量。

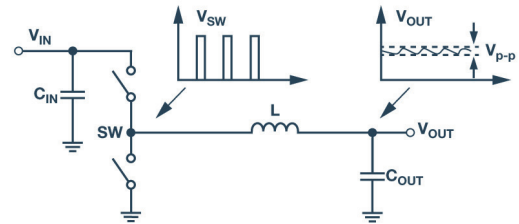


图1. 降压稳压器拓扑

图1所示为典型的降压稳压器。两个开关交替接通和断开，因此SW节点电压 V_{SW} 是一个理想的方波，此特性进而传递到占空比和输入电压。 V_{SW} 可以用下面的公式表示：

$$V_{SW}(j\omega) = V_{IN} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{2\sin(k \times \pi \times D)}{k} \times \delta(\omega - k \times \omega_0)$$

$$V_{SW}(t) = V_{IN} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(k \times \pi \times D)}{k \times \pi} \times e^{j\omega_0 \times k \times t} \quad k=0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

其中：

V_{IN} 为输入电压。D为占空比；对于降压稳压器，其等于 V_{OUT}/V_{IN} 。

V_{IN} 确定后， V_{SW} 基波和谐波成分仅取决于占空比。图2显示了与占空比相关的 V_{SW} 基波和谐波幅度。当占空比接近一半时，纹波幅度以基波为主。

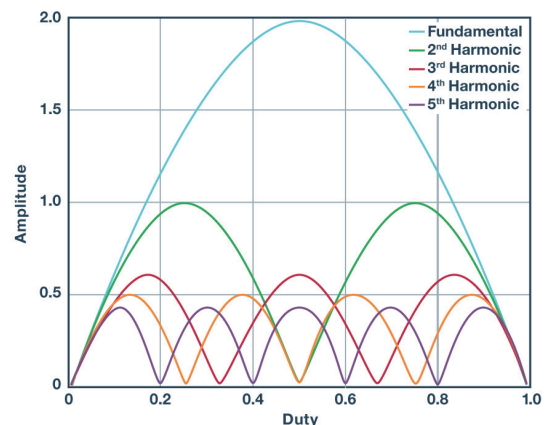


图2. 降压稳压器 V_{SW} 幅度与占空比的关系

降压稳压器输出LC级传递函数如下:

$$T_{LC}(j\omega) = \frac{ESR + j\omega \times ESL + \frac{1}{j\omega \times C_{OUT}}}{ESR + j\omega \times ESL + \frac{1}{j\omega \times C_{OUT}} + \frac{\frac{1}{j\omega \times C_L}(\text{DCR} + j\omega \times L)}{\frac{1}{j\omega \times C_L} + \text{DCR} + j\omega \times L}}$$

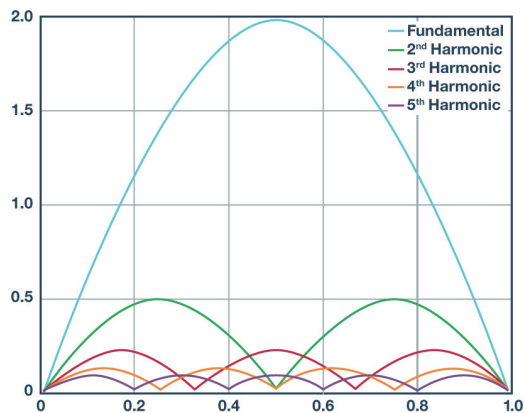
其中, L 为输出电感值, DCR 为电感电阻值, C 为电感并联电容值。

C_{OUT} 为输出容量值。ESL为电容串联电感值。ESR为电容串联电阻值。

因此, V_{OUT} 可表示如下:

$$V_{OUT}(j\omega) = V_{SW}(j\omega) \times T_{LC}(j\omega)$$

为了简化计算，我们假设输出LC级为20 dB/十倍频程，然后是与占空比相关的 V_{OUT} 纹波基波和谐波幅度，如图3所示。当占空比接近一半时，三次或奇数次谐波将高于偶数次谐波。由于LC抑制，较高的谐波将具有较低的幅度，并且与总纹波幅度相比，其比例非常小。同样，基波幅度是开关稳压器输出纹波中的主要成分。

图3. 降压稳压器 V_{OUT} 纹波幅度与占空比的关系

对于降压稳压器，基波幅度与输入电压、占空比、开关频率和LC级有关；但是，所有这些参数都会影响应用要求，如效率和解决方案尺寸等。为了进一步降低纹波，建议增加后置滤波器。

宽带噪声

开关稳压器中的宽带噪声是输出电压上的随机幅度噪声。它可以用整个频率范围内的噪声密度来表示，单位为 $\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，或用 V_{rms} 来表示，其与频率范围内的密度不可分。由于硅工艺和基准电压源滤波器设计的限制，宽带噪声主要位于开关稳压器的10 Hz至1 MHz频率范围内，在低频范围内很难通过增加滤波器来将其降低。

典型降压稳压器宽带噪声峰峰值幅度电压约为 $100\mu\text{V}$ 至 $1000\mu\text{V}$ ，远低于开关纹波噪声。如果使用额外的滤波器来降低开关纹波噪声，则宽带噪声可能成为开关稳压器输出电压的主要噪声。

图4显示了当没有额外滤波器时, 降压稳压器输出噪声的主要来源是开关纹波。图5显示了当使用额外滤波器时, 输出噪声的主要来源是宽带噪声。

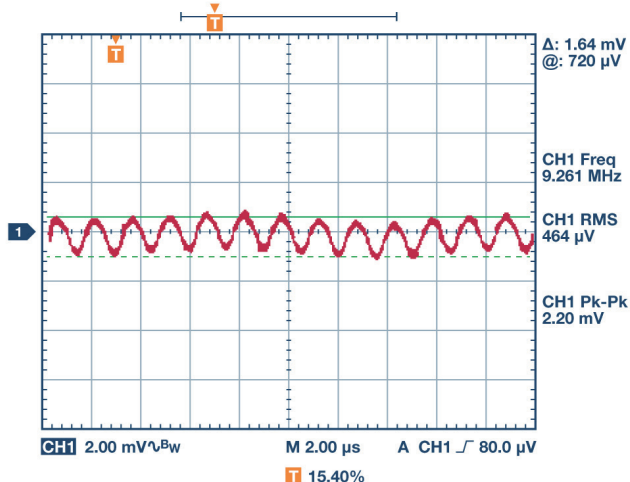


图4. 无额外滤波器的 V_{OUT}

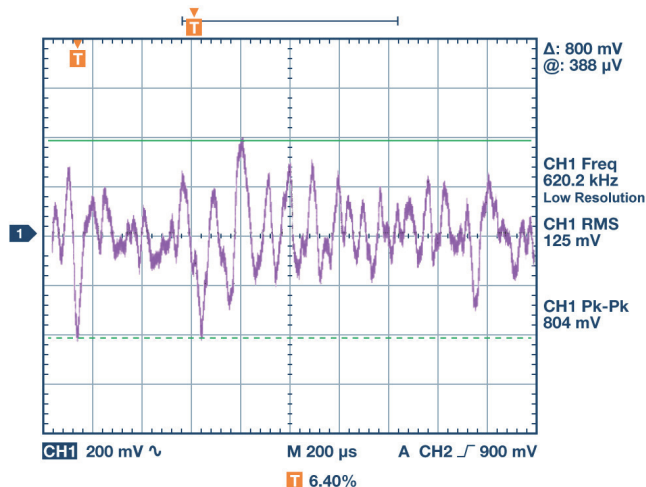


图5. 有额外滤波器的 V_{OUT} (使用1000倍前置放大器进行测量)

为了识别和分析开关稳压器输出宽带噪声，必须获得稳压器控制方案和模块噪声信息。例如，图6显示了典型的电流模式降压稳压器控制方案和模块噪声源注入。

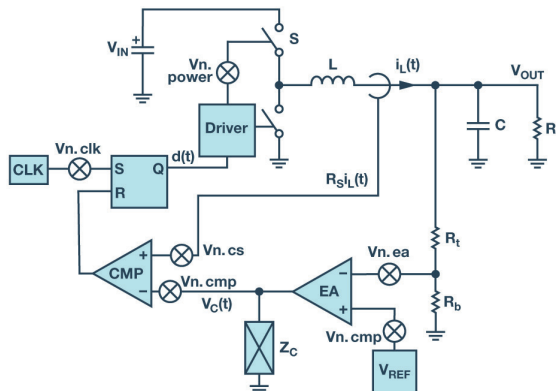


图6. 典型电流模式降压稳压器控制方案

对于获得的控制环路传递函数和模块噪声特性信息,有两种不同的噪声:环路输入噪声和环内噪声。控制环路带宽内的环路输入噪声会传输到输出,而环路带宽之外的噪声会被衰减。对于开关稳压器,设计低噪声EA和基准电压源至关重要,因为单位反馈增益会保持噪声水平不变,而不是随着输出电压电平增加而提高它。最大的挑战是找出整个系统中最大的噪声源,并在电路设计中降低该噪声。ADP5014针对低噪声技术进行了优化,采用电流模式控制方案和一个简单的LC外部滤波器,在10 Hz至1 MHz频率范围内实现了低于20µV rms的噪声性能。ADP5014的输出噪声性能如图7所示。

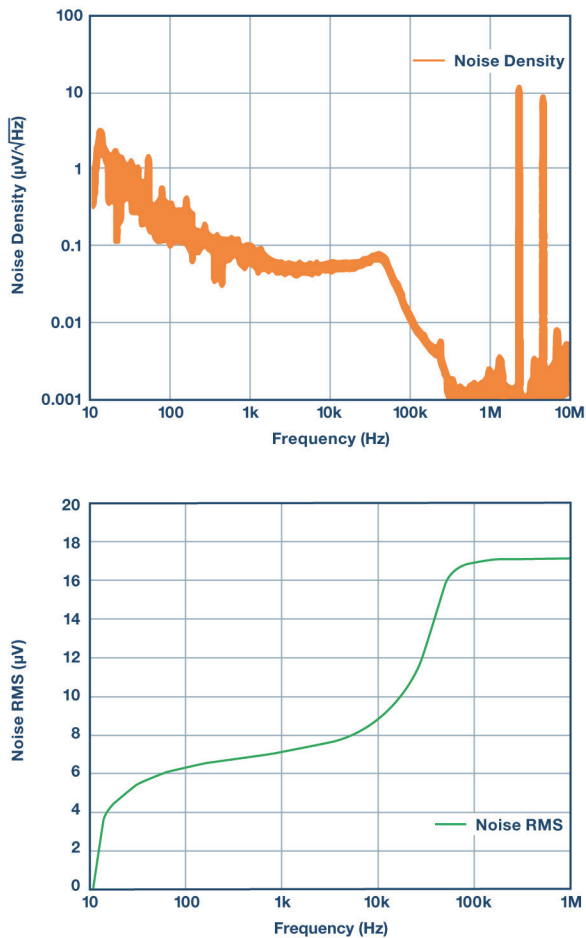


图7. 采用额外LC滤波器的ADP5014输出噪声性能

高频尖峰和振铃

第三类噪声是高频尖峰和振铃噪声,因为输出电压是由开关稳压器导通或关断瞬变产生的。考虑硅电路和PCB走线中的寄生电感和电容;对于降压稳压器,快速电流瞬变将在SW节点处引起高频电压尖峰和振铃。尖峰和振铃噪声会随着电流负载的提高而提高。图8显示了降压稳压器如何形成尖峰。根据开关稳压器的导通/关断压摆率,最高尖峰和振铃频率将在20 MHz至300 MHz范围内,受寄生电感和电容影响,输出LC滤波器在抑制方面可能不是非常有效。与上述关于传导路径的所有讨论相比,最差的是来自SW和 V_{IN} 节点的辐射噪声,由于其频率非常高,输出电压和其他模拟电路会受到影响。

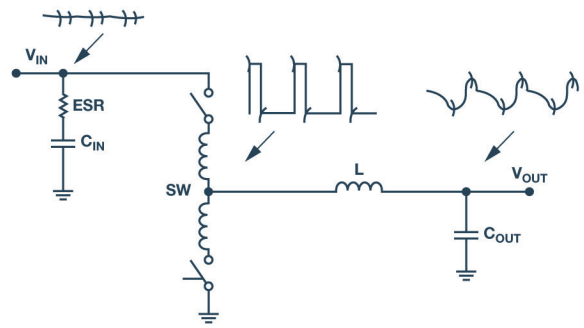


图8. 降压稳压器高频尖峰和振铃噪声

为了降低高频尖峰和振铃噪声,建议采用有效方法实施应用和芯片设计。首先,在终端负载上应使用额外的LC滤波器或磁珠。通常,这会使输出上的尖峰噪声远小于纹波噪声,但会增加更高频率的成分。其次,应屏蔽SW和输入节点的噪声源或让其远离输出侧及敏感模拟电路,并且屏蔽输出电感。精心布局和布线对设计很重要。第三,优化开关稳压器的导通/关断压摆率,并尽量减小开关稳压器的寄生电感和电阻,从而有效降低SW节点噪声。ADI Silent Switcher®技术也有助于通过芯片设计降低 V_{IN} 节点噪声。

开关稳压器PSRR

PSRR反映开关稳压器抑制输入电源噪声传输到输出的能力。本部分分析低频范围内的降压稳压器PSRR性能。高频噪声影响输出电压主要是通过辐射路径,而不是通过前面讨论的传导路径。

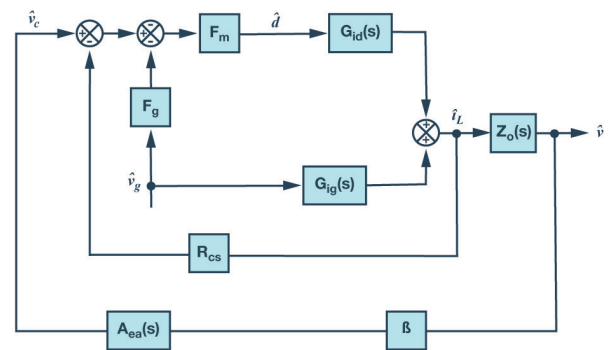


图9. 从输入电压到输出的电流模式降压小信号图

根据图9所示的降压小信号图,降压PSRR可以表示如下:

$$G_{go}(s) = \frac{(G_{ig}(s) - F_m \times F_g \times G_{id}(s)) \times Z_o(s)}{(1 + F_m \times G_{id} \times R_{cs})(1 + T_v(s))}$$

其中:

$$G_{ig}(s) = \frac{D(1 + sRC)}{R(1 + sL/R + s^2LC)} \quad G_{id}(s) = \frac{V_{IN}(1 + sRC)}{R(1 + sL/R + s^2LC)}$$

F_m 为斜率增益

F_g 为控制输入电压

R_{cs} 为电流检测增益

$Z_o(s)$ 为输出电容和负载

$T_v(s)$ 为环路传递函数

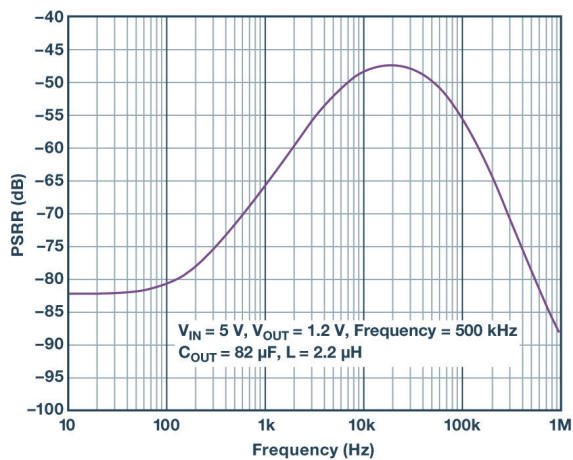


图10. 采用降压小信号模式的PSRR计算结果

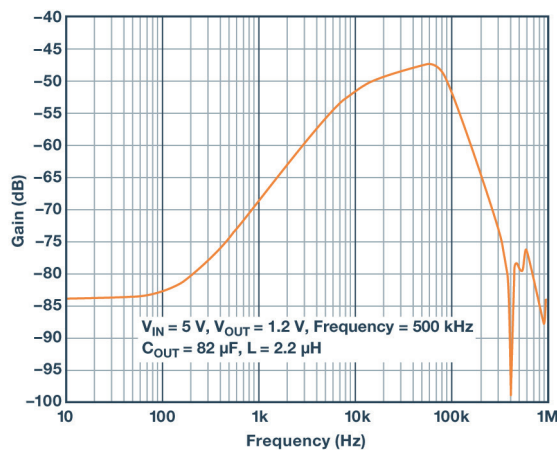


图11. SIMPLIS模式的PSRR仿真

将信号模式计算与仿真结果进行比较。小信号模式是有效的，与仿真结果一致。

开关稳压器的PSRR性能取决于低频范围内的环路增益性能。开关稳压器的固有LC滤波器可以抑制中频范围（100 Hz至10 MHz）内的输入噪声。此范围内的抑制性能比LDO PSRR好得多。因此，开关稳压器具有理想的PSRR性能，因为其在低频时具有高环路增益，而固有LC滤波器会影响中频范围。

结论

越来越多的模拟电路，如ADC/DAC、时钟和PLL等，需要干净的能提供高电流的电源。每个器件对不同频率范围内的电源噪声都有不同的要求和规格。有必要全面了解不同类型的开关稳压器噪声并认知电源噪声要求，从而设计和实现高效率、低噪声开关稳压器，以满足大多数模拟电路电源的低噪声规格。与LDO稳压器相比，这种低噪声开关解决方案将有更高的功效比、更小的解决方案尺寸和更低的成本。

参考资料

Glenn Morita。“可调节输出低压差稳压器的降噪网络”。《模拟对话》，第48卷，2014年。

Glenn Morita。应用笔记AN-1120：低压差(LDO)稳压器的噪声源。ADI公司，2011年

Matthew Felmlee。应用笔记AN-1066：低噪声时钟AD9523、AD9524和AD9523-1的电源考虑。ADI公司，2017年

Rob Reeder。技术文章。“高速ADC的电源设计”，ADI公司，2012年

作者简介

Leo Liu 于 2005 年加入ADI公司，在中国销售团队担任现场应用工程师。2011年，他加入电源管理产品部门，担任应用工程师，自此以后一直负责PMU产品应用。他毕业于浙江大学，2001年和2004年分别获得电气工程学士学位和硕士学位。联系方式：leo.liu@analog.com。

在线支持社区

访问ADI在线支持社区，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ezchina.analog.com



全球总部
One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部
上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司
深圳市福田区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210 室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司
北京市海淀区西小口路 66 号
中关村东升科技园
B-6 号楼 A 座一层
邮编: 100191
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司
湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路 889 号光谷国际广场
写字楼 B 座 2403-2405 室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

©2019 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA20874sc-0-1/19

analog.com/cn

