

Paul Curtis, Eric Lee

摘要

展频技术在开关模式控制器和转换器中很常见，用于降低开关产生的电磁干扰 (EMI) 的影响。实现展频的方法有很多种，由于业界通用测试中使用多种分辨率带宽 (RBW)，每种方法通常只在低频或高频下表现更好。双随机展频 (DRSS) 使用一种数字算法，专门用于在多个频带中扩展频谱发射，而不会牺牲多个频带间的性能。

内容

1 引言.....	2
2 考察展频.....	3
2.1 展频的用途.....	3
2.2 定义.....	4
2.3 优化和取舍.....	4
3 模拟和伪随机技术.....	5
3.1 自适应随机展频.....	5
3.2 双随机展频.....	5
4 总结.....	6
5 参考文献.....	6
6 修订历史记录.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

展频技术 (或 “抖动”) 多年来用于各种应用，在无线电和有线通信领域的使用由来已久。在开关稳压器环境中，展频可用于在基本开关频率及其谐波下，降低固定频率开关产生的 EMI 影响 [1]。这种 EMI 可能表现为辐射发射和传导发射，这两种情况都需要加以解决。本应用手册的重点在于优化用于汽车应用的展频，主要的关注频率遵循 CISPR-25 传导 EMI 测试标准 [2]。此处所述的方法也可适用于其他测试标准。

优化展频时面临的巨大挑战之一是寻找在多个频段中均适用的解决方案，因为大多数调制方案只在一个频段中表现最佳，但在其他频段中存在缺点 [1]。这是因为业界通用 EMI 测试对不同的频段有不同的频谱分析仪 RBW 设置要求，而 RBW 对抖动性能有重大影响 [3]。本应用手册将介绍一种新颖的数字展频方案 DRSS，该方案在汽车传导 EMI 测试中使用的高 (120kHz) 和低 (9kHz) CISPR-25 RBW 下均表现良好 [4]。LM5156x(-Q1) 和 LM5157x(-Q1) 均使用此方案，这两种器件分别是电流模式、可编程频率、非同步升压/SEPIC/反激式控制器和转换器。

将使用常见的展频设计参数 (如 f_c 、 Δf_c 、 f_m 和 m)，审查优化展频时所面临的各项权衡并讨论 RBW 滤波器的时域影响。本应用手册的大部分内容侧重于考察最新技术和展频理论。这是有意为之，因为最容易了解 DRSS 价值的方式就是深刻剖析各种权衡因素。

2 考察展频

2.1 展频的用途

展频的基本原理是通过将窄带信号转换为宽带信号，将能量分散在多个频率上，从而降低 EMI 的影响。对于开关稳压器，可以通过控制设置开关频率的振荡器来实现，可以针对大多数开关模式电源拓扑（降压、升压等）完成。能量守恒要求总能量保持恒定，但将此能量分散在多个频段上，可尽量减小峰值能量。因此，附近的敏感电路（以下简称为受害者）将较少受到干扰的影响。图 2-1 说明了随时间操作时钟频率，如何分散开关生成的能量。

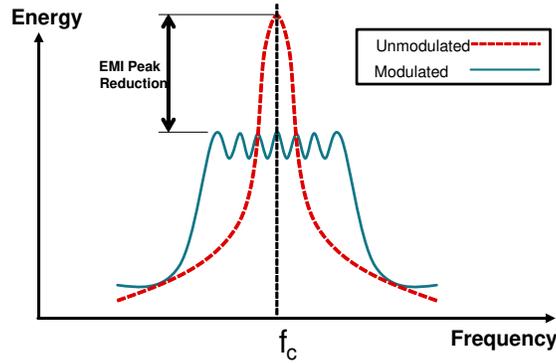


图 2-1. 展频频率调制降低 EMI

2.2 定义

使用频率调制实现展频与 FM 无线电传输类似，是通过载波频率调制来传输信号的。虽然在展频中未传输信号，但两者会用到同一个术语。

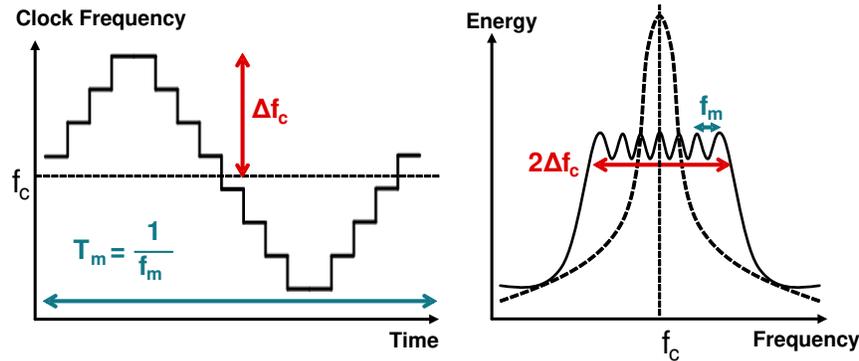


图 2-2. 时域 (左) 和频域 (右) 中的三角调制

图 2-2 (左) 显示了三角类型展频的示例，其中时钟频率是时间的函数，图 2-2 (右) 中为基波生成的频谱图。时域显示了调制波形的一个周期，其中 f_c 是未调制振荡器 (载波) 频率， f_m 是调制频率，而 Δf_c 是开关频率偏离 f_c 的距离。请注意，虽然图 2-2 (左) 中显示的波形是离散的，但这并不一定意味着这是数字抖动。由于开关稳压器的时钟频率在每个开关周期只能更新一次，因此无论采用何种调制方法，频率与时间波形都必须都是离散的。尽管三角调制曲线只是许多模拟抖动曲线之一，但由于它易于生成且性能较好 [1]，因此非常常见。因此，本应用手册不会分析其他类型的模拟抖动曲线。

2.3 优化和取舍

优化展频时，最重要的因素是调制指数 m ，它被定义为 $\Delta f_c / f_m$ [3]。一般而言，这个数字越大，基频下的能量减少就越低。增大 Δf_c 会在其他频率上分散能量，而降低 f_m 会在卡森带宽 $2\Delta f_c$ 内提供额外的频率分量，从而降低基频上的能量 [1]。但是， Δf_c 和 f_m 都有限制。对于 Δf_c ，时域和频域都有限制。在时域中， Δf_c 较大 会增加输出纹波，还会导致电感器电流纹波发生较大变化。在频域中，如果 Δf_c 太大，会可以开始将能量分散到不需要的频段中。

从数学角度来看，减少 f_m 应该始终会导致能量的减少。但是，由于 RBW 滤波器基于时间的效应，还有一个额外限制。RBW 滤波器的稳定时间是滤波器带宽的倒数 [3]。如果允许该滤波器稳定，频谱分析仪的峰值检测器将检测到能量等于未调制信号。另一方面，相对于 RBW 滤波器的稳定时间，调制速度非常快，使滤波器没有机会响应，并且不允许峰值能量衰减。换言之，在滤波器带宽之外花费的时间不足以使调制有用。图 2-3 展示了此概念，显示了进出 RBW 滤波器的有限稳定时间。由于这一限制，尽管从理论角度来看，应优先选择较小的 f_m ，但通常选择的 f_m 大致等于 RBW。从理论角度和基于时间的滤波器角度分析调制频率，是优化展频的关键。

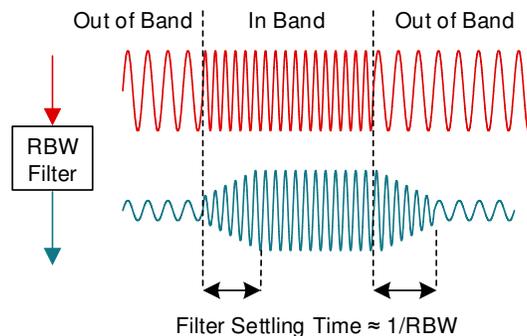


图 2-3. RBW 滤波器稳定时间的影响

请务必注意，随着系统频率 (f_c) 的降低，展频/抖动可以实现的最佳性能会降低。这只是因为 在低频时， Δf_c 受到系统限制，展频峰值减少量不能超过 $10\log(RBW/2\Delta f_c)$ [3]。

3 模拟和伪随机技术

三角模拟抖动是一种常用方法，可在 150kHz 至 30MHz 范围内的 CISPR-25 频段中提供良好的性能，这些频段具有 9kHz RBW 要求 [4]。因为这种方法容易实现宽 Δf_c ，并且 f_m 可以设置为大约等于 RBW，因此在这些频段中表现良好。遗憾的是，该频率存在于可闻范围内，因此必须注意确保模拟抖动是不可听到的。如果调制频率保持在 9kHz，则在较高的 30MHz 至 108MHz 范围内、具有 120kHz RBW 要求的频段无法达到理想性能。对于具有 120kHz RBW 要求 [4] 的更高频段，常见的解决方案是使用伪随机展频 (PRSS) [1]。在该调制方案中，频率在每个开关周期进行伪随机更改，以生成更接近 120kHz RBW 的快速调制。由于伪随机序列重复频率非常低，因此从理论角度来看， f_m 会显著降低，从而提高 EMI 和可闻性能。尽管 PRSS 在高 RBW 下非常有效，但由于快速调制不会留给 RBW 滤波器足够长的持续时间，因此在较低的 RBW 下具有劣势。其次，由于与输出纹波相关的顾虑， Δf_c 必须保持较小。这可以通过步长限制来缓解，但随机分布的变化会降低性能。

3.1 自适应随机展频

自适应随机展频 (ARSS) 技术是数字展频技术的一项最新进展。ARSS 的基本原理是获取调制频率 f_m ，并在每次斜坡结束时进行随机改变，目的是减少固定频率抖动伴随的可闻音。图 3-1 显示了在观察频谱分析仪上的传导发射时，10kHz 音调是如何降低和扩散的。在实验室中可以定性地观察到声音降低，但尚未定量测量。基频下的表现与模拟抖动相当。虽然从 RBW 的角度来看，非 RBW 的音调会降低性能，但由于采用伪随机序列的超短周期实现了理论性能的改进，抵消了性能的下降。

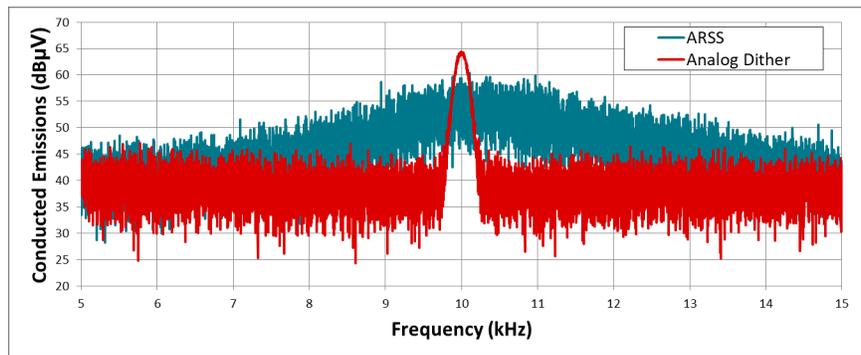


图 3-1. ARSS 通过扩散 10kHz 音调来降低可闻噪声

遗憾的是，对于任何步长有限的数字三角调制方案，都需要在高频下付出代价。由于振荡器频率的变化是以数字方式实现的，因此开关可以在多个周期内以相同的频率运行。在高 RBW 下，这具有缓慢移动的时基调制效果，可将频率扩展到多个频段，但不会降低峰值能量，这与展频的目标背道而驰。

3.2 双随机展频

要解决 ARSS 在高 RBW 时存在的问题，可在三角曲线顶部添加伪随机逐周期抖动。这种伪随机调制可提升高频性能，因为它可以为 120kHz RBW 提供足够快的调制。在低频和低 RBW 下，三角调制的包络仍然可以提供 ARSS 的低 f_m 优势。通过同时寻址低 RBW 和高 RBW，无需在二者之间进行权衡。图 3-2 展示了在时域中的实现方式。RBW 在时域中表示为窗口函数，与离散傅里叶变换理论保持一致，其中频率间隔大小由窗口大小设置。

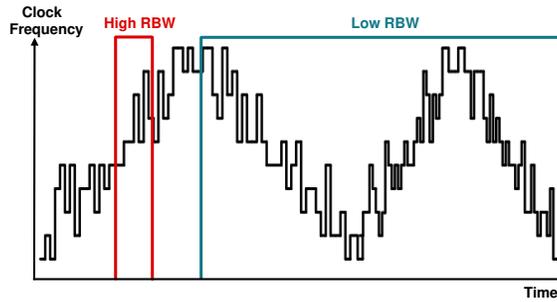


图 3-2. DRSS 的时域实现

图 3-3 显示了启用 DRSS 前后使用 LM5156 器件在 2.2MHz 下运行的非同步升压转换器的传导发射。30MHz 时的不连续性是由于 RBW 从 9kHz 变为 120kHz 所致。在 CISPR-25 低频段中，DRSS 使峰值降低了 10-15dB。在 CISPR-25 高频段中，DRSS 使峰值降低了 5-7dB。

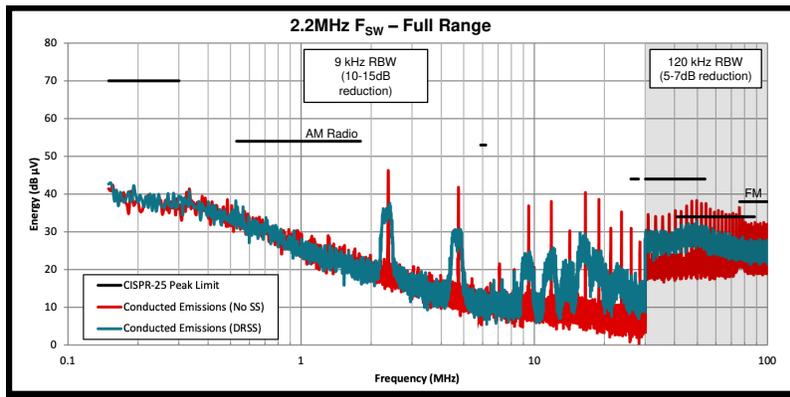


图 3-3. DRSS 降低传导 EMI (LM5156 ，开关频率为 2.2MHz)

在 LM5156 中，DRSS 的实现方式为： $f_c \times 5.5\%$ 的 Δf_c ， $f_c \times 2.3\%$ 的 Δf_{PRSS} ，以及 10kHz 至 16kHz 之间的随机 f_m 。选择这些值是为了在峰值 EMI 降低与时域中的稳压器性能之间实现良好平衡。由于输出纹波是开关稳压器的一个重要关注点，因此在实施包括 DRSS 在内的任何展频方法时务必注意。在电流模式稳压器中，调制斜率补偿斜坡时采用与振荡器频率成反比的方式，可以显著改善输出纹波。这具有保持电感器平均电流的效果，尽管展频调制会控制电感器开始通电的时间。

4 总结

本应用手册论述了展频理论、技术和权衡，以及一种用于提高开关稳压器在不同分辨率带宽的多个频段下展频性能的新数字方法。新的数字展频方案 DRSS 通过在随机变化的三角曲线顶部添加伪随机逐周期抖动，更大限度地有效降低了多个频带中的峰值 EMI。

5 参考文献

- [1] Rice, John, Dirk Gehrke 和 Mike Segal。 “了解噪声传播途径及其对开关模式电源应用的影响” TI 电源设计研讨会 SEM1800，2008 年。
- [2] Timothy Hegarty。 “The Engineer’s Guide To EMI In DC-DC Converters (Part 1): Standards Requirements And Measurement Techniques” How2Power Today, December 2017.
- [3] Pareschi, F.; Rovatti, R.; Setti, G. "EMI reduction via spread-spectrum in DC/DC converters: State of the art, optimization, and tradeoffs" IEEE Access.2015, 3, 2857 - 2874.
- [4] CISPR 25:2016, 4th edition (or EN 55025:2017), “Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers.”

6 修订历史记录

Changes from Revision * (June 2020) to Revision A (November 2022)

Page

-
- 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式..... 1
-

重要声明和免责声明

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、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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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](#) 或 [ti.com](#) 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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

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

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司