

使用混合信号示波器查找和诊断功率完整性问题导致的抖动

应用指南



使用混合信号示波器查找和诊断功率完整性问题导致的抖动

串行数据线上的抖动和电源轨道分析

通过分析抖动后，我们通常会直接分析漏洞的根本原因，否则就要分析电源轨道。我们通常会同时在时域和频域中分析抖动和功率。通过对比 TIE 频谱中的 PJ (周期性抖动) 频率与功率纹波频谱中的杂散信号，我们可以快速准确地识别 PDN (配电网) 引起的信号问题。

抖动是相对于系统时钟测量的。采用嵌入式时钟的系统，也就是从数据跳变中恢复时钟，会降低低频抖动，但必须使用能够仿真精密时钟恢复方式的示波器来分析这些系统。如图 1 所示，MSO6B 系列 (混合信号示波器) 既为用户可编程的时钟恢复方式，又有许多标准指定的时钟恢复方式。



图 1: 泰克 6 系列 B 混合信号示波器上的抖动摘要。

除抖动和功率完整性功能外，MSO6B 系列的高带宽和低噪声使其特别适合进行调试工作；5 系列 MSO 提供的功能与 6 系列 MSO 相同，但测量指标不同。

本应用指南

- 介绍了信号完整性 (特别是抖动) 与功率完整性之间的关系
- 简要回顾了抖动测量和术语，包括眼图和抖动分解
- 涵盖了时钟上的随机性抖动和周期性抖动，介绍了周期性抖动与功率完整性的关系
- 介绍了功率完整性的噪声来源，特别是可能在串行数据线上引起抖动的噪声
- 举例说明了纹波对电源轨道的影响，其会在时钟上引起抖动

在本应用指南中，我们将说明怎样把抖动和功率完整性分析融合到强大的工具中，来调试 SERDES、电路、网络和系统。本应用指南使用 MSO6B 系列，来演示抖动和电源轨道测量，因为其引起的噪声低，特别适合这些测量。该示波器配有数字功率管理 (DPM) 选项和高级抖动分析 (DJA)。虽然我们以前以 MSO6B 系列为例，但 5 系列 MSO 也提供了相同的测量功能。

本指南重点介绍功率完整性与信号完整性之间的关联。如果想详细考查抖动分析，请参阅泰克“了解和表征定时抖动”入门手册 (文档 55W-16146-6 <https://www.tek.com/primer/understandingand-characterizing-timing-jitter-primer>)。

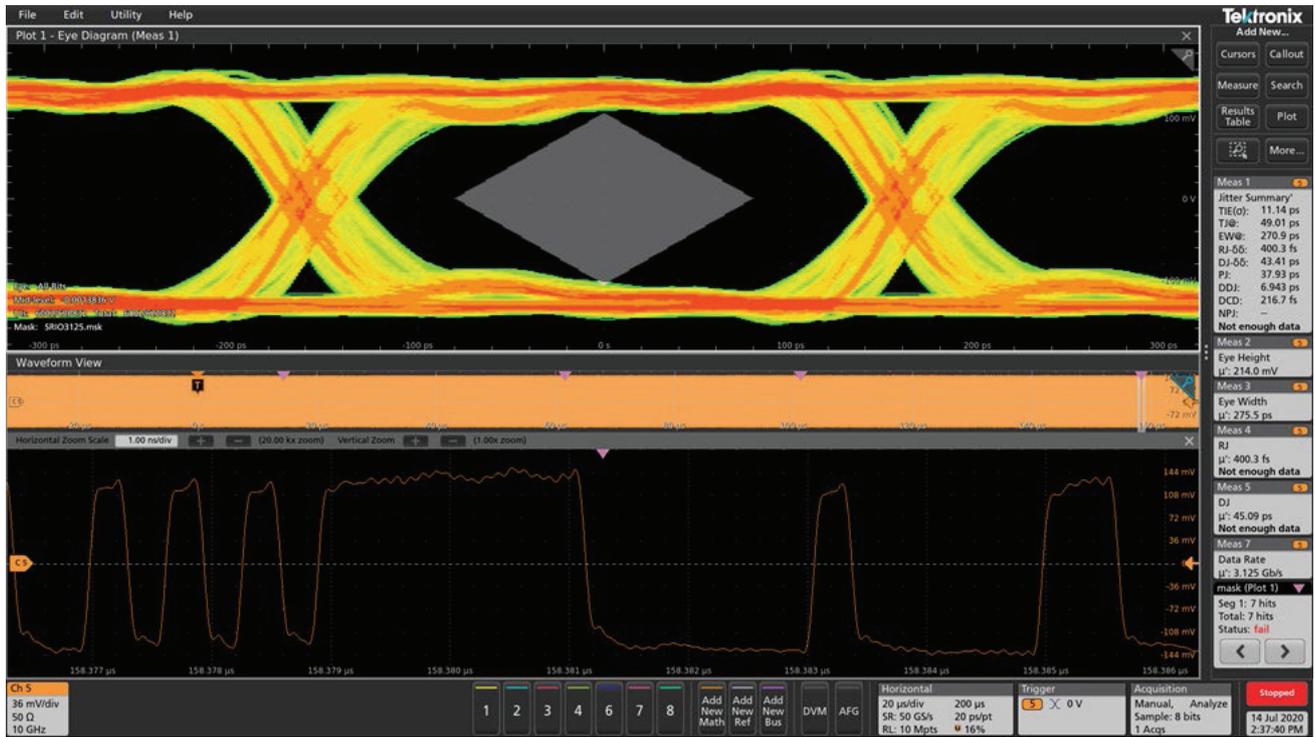


图 2: 眼图，顶部是模板测试，底部是对应的波形。

信号完整性和功率完整性对误差的影响

数字误差是由抖动和噪声引起的。噪声是一种广义上的概念，指信号幅度变化。抖动是位跳变的定时相对于数据速率时钟的变化，也就是所谓的时间间隔误差 (TIE)。抖动是由相噪和幅度噪声到抖动转换引起的。噪声到抖动转换会引发串扰、EMI (电磁干扰)、随机性噪声等问题。

信号完整性分析集中在发射机、基准时钟、通道和接收机的 BER (误码率) 性能上。功率完整性分析集中在 PDN 提供恒压电源轨道和低阻抗回路的能力上。信号完整性和功率完整性有着广泛的相关性。PDN 可能会导致噪声和抖动。电路设计和各种元器件，如芯片封装、引脚、轨迹、通路、连接器，都会影响 PDN 的阻抗，进而影响提供的功率质量。

调试信号完整性问题要先从眼图开始

硬件调试可能要先从眼图分析开始。眼图由相对于时钟的多个重叠的波形组成，如图 2 所示。

交点的水平宽度表示抖动，眼图顶部和底部的垂直宽度表示噪声。眼图张开很宽，则对应 BER 低。执行模板测试是测量信号质量的一种简便方式。

某些标准指定了一个模板，可以简单地评估被测器件上的信号完整性。在 MSO6B 系列上，可以从基于标准的模板列表中选择模板，也可以以自定义的方式建立模板。

遗憾的是，通过模板测试并不能保证系统在允许的最大 BER (一般来说 $BER \leq 1E-12$) 以下工作。

抖动分析

不管我们是否通过模板测试，如果信号完整性仍存在问题，那么我们就需要执行抖动分析。**图 3** 把抖动分成不同的成分和子成分，**图 4** 显示了抖动摘要测量，包括浴缸图、眼图、TIE 频谱和直方图、抖动测量结果和波形。

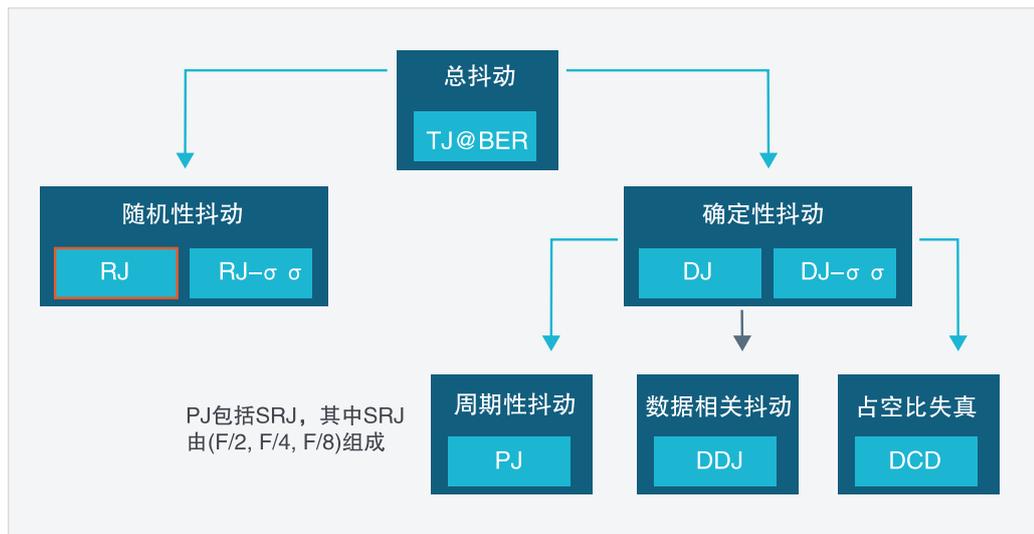


图 3: 把抖动划分成不同的成分。

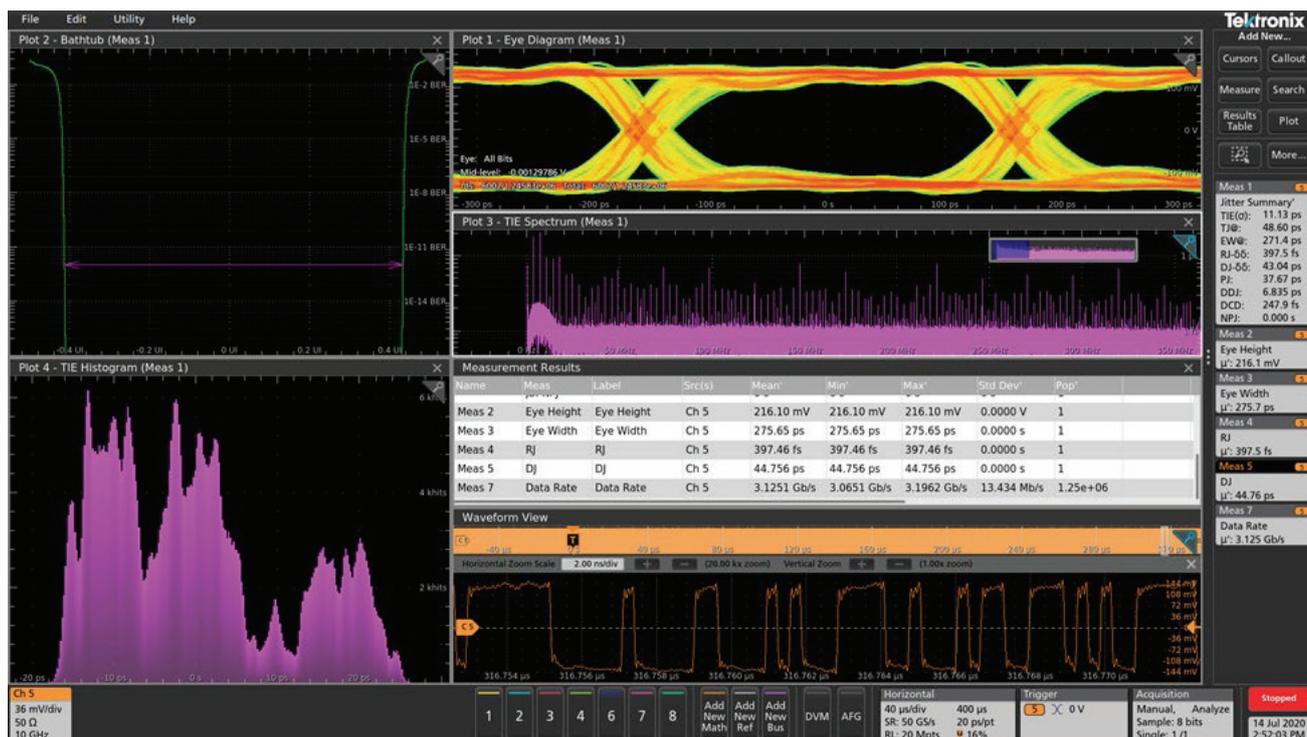


图 4: 抖动摘要截屏，从左上开始顺时针方向：浴缸图，眼图，TIE 频谱，抖动分析结果，波形，TIE 直方图。

使用混合信号示波器查找和 诊断功率完整性问题导致的抖动

在划分抖动时，首先要把 TIE 分布分成随机性成分和确定性成分，也就是 RJ (随机性抖动) 和 DJ (确定性抖动)。DJ 进一步划分成与数据中的位序列有关的抖动—DDJ (数据相关抖动)，以及与其无关的抖动，如 PJ (周期性抖动)。

如果眼图交点分布宽，那么表明抖动是随机性的。如果眼图表现为由许多近乎不同的线组成，那么表明眼图是 DDJ，可能源于信号路径中的阻抗不匹配，但眼图分析在查找眼图闭合根本原因时几乎没有什么帮助。在配备选配的高级抖动分析 (DJA) 包时，MSO6B 系列可以测量多种抖动类型，找到硬件漏洞，包括：TIE, RJ, DJ, DDJ, PJ, TJ (总抖动), EH (眼高), EW (眼宽), 眼高, 眼低。**表 1** 列出了不同的抖动类型及导致抖动的原因实例。

抖动类别	缩写	导致原因实例
随机性抖动	RJ	热噪声
确定性抖动	DJ	PJ, DDJ
周期性抖动 正弦曲线抖动	PJ SJ	电源馈通 电磁干扰
数据相关抖动	DDJ	通道阻抗不匹配
占空比失真	DCD	时钟不对称
亚速率抖动	SRJ	复用器不良

表 1: MSO6B 系列上执行的抖动测量及常见原因实例。

时钟上的随机性抖动和周期性抖动

时钟设定发射机中的位跳变定时及接收机中的分片器定时。分布式时钟为相关组件提供了一个常用的定时基准，可以在示波器上直观观察分布式时钟。

在嵌入式时钟系统中，我们不能直接观测时钟信号。振荡器集成在发射机芯片中，接收机从数据中恢复时钟信号。CR(时钟恢复)电路使用 PLL(锁相环)、DLL(延迟锁定环路)或类似技术从数据跳变中提取数据速率时钟。嵌入式时钟较分布式时钟有多种优势：第一，它们不要求额外的轨迹完成分布；第二，它们会过滤低频抖动。

时钟噪声作为随机性抖动和 / 或周期性抖动传播到信号上。如果数据速率时钟上的随机性抖动太高，那么时钟相噪可能会引发问题。尽管相噪在时钟上不可避免，但如果观察到有大量的周期性抖动，则表明出现了问题。

分析分布式时钟上的抖动

由于分布式时钟系统中的示波器探头可以接入时钟，所以我们可以 MSO6B 系列的 Spectrum View 频谱视图中分析时钟。谐振应该锐利、窄，没有谐波杂散信号。所有谐振都有一些近载波相噪，也就是随机性抖动的来源，但如果谐振宽且呈块状，并且白噪声过高，那么这种谐振则是由于电子器件有噪声、电阻器件或电子器件过热引起的。杂散信号会引起周期性抖动，可能是由于振动和 EMI 引起的，其可能来自 PDN，后面我们将进一步说明。

图 5 所示的时钟频谱和波形拥有干净锐利的谐振，但有许多杂散信号，约比谐振低 50 dB，在时域中会看到其影响。杂散信号在数据信号中可能会导致周期性抖动，但借助手边的杂散信号频率，我们通常能够找到问题，只需检查系统设计中的振荡器或开关电路是否会在这些频率产生 EMI 辐射。

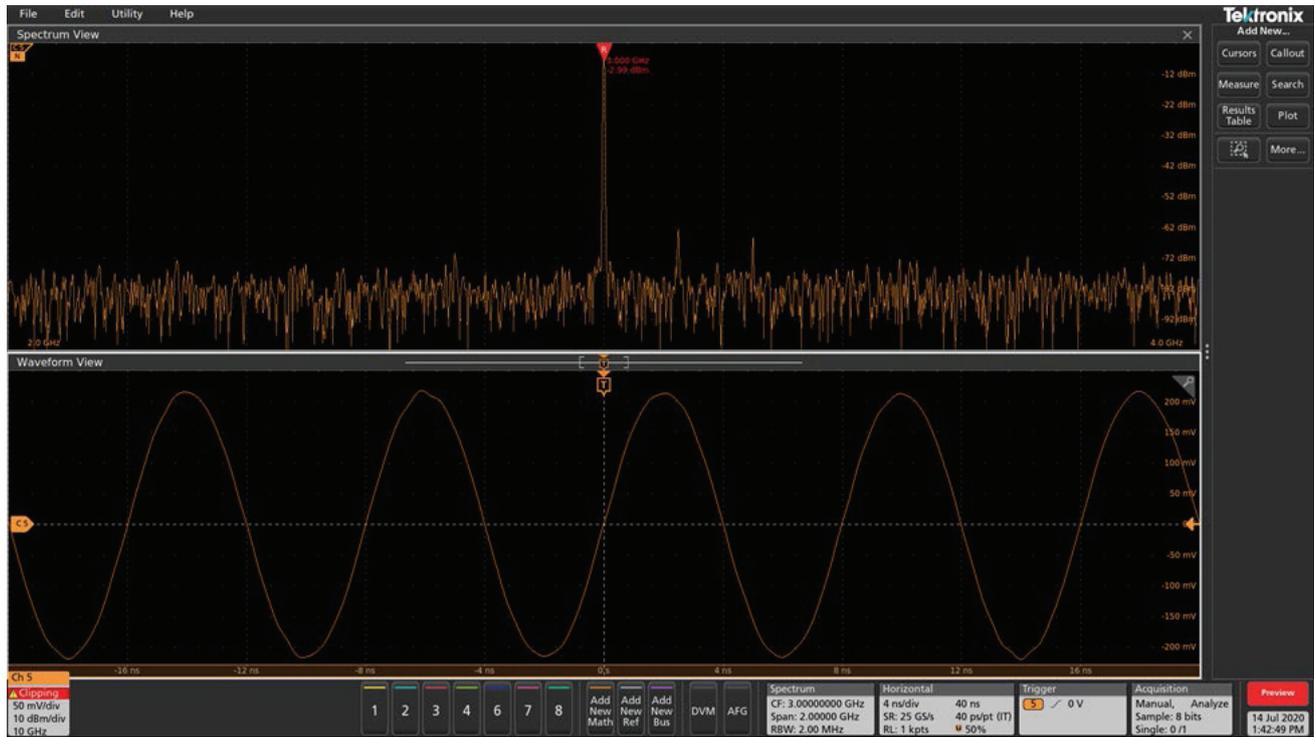


图 5: 时钟频谱 (顶部) 和时钟信号 (底部)。

分析嵌入式时钟上的抖动

在大多数情况下，嵌入式时钟系统中的发射机和接收机都不能通过引脚接入基准时钟或恢复的时钟，但我们仍能分析它。

为了把时钟与系统的其他方面分开，我们可以分析重复的测试码型：固定数量的 0，后面跟着相同数量的 1，如 01010。交替码型的优点是可以去除与位序列有关的抖动，也就是 DDJ (数据相关抖动)。

从数据中恢复时钟，使得接收机能够追踪低频抖动。低于 CR 带宽的抖动会同时出现在数据和时钟上，确

定分片器样点位置。在分片器的定时拥有的抖动幅度和相位与信号相同时，该抖动不会导致错误。

另一方面，高于 CR 带宽的频率上的抖动可能会导致错误。CR 带宽由标准指定，其通常由黄金 PLL 设置 (即 $f_d/1667$)。

为分析相关抖动频率，示波器必须捕获足够的时间，包含时钟的最低频率成分。MSO6B 系列在软件中仿真时钟恢复，您可以自行配置，也可以从标准指定的 PLL 列表中选择。

使用混合信号示波器查找和 诊断功率完整性问题导致的抖动

功率完整性问题

图 6 显示了低的和不同的时钟恢复方式的影响，顶部是恒定时钟 CR，底部是二类 PLL，从左到右是 TIE 频谱、眼图和波形。周期性抖动在频谱中显示为杂散信号，随机性抖动显示为噪底。

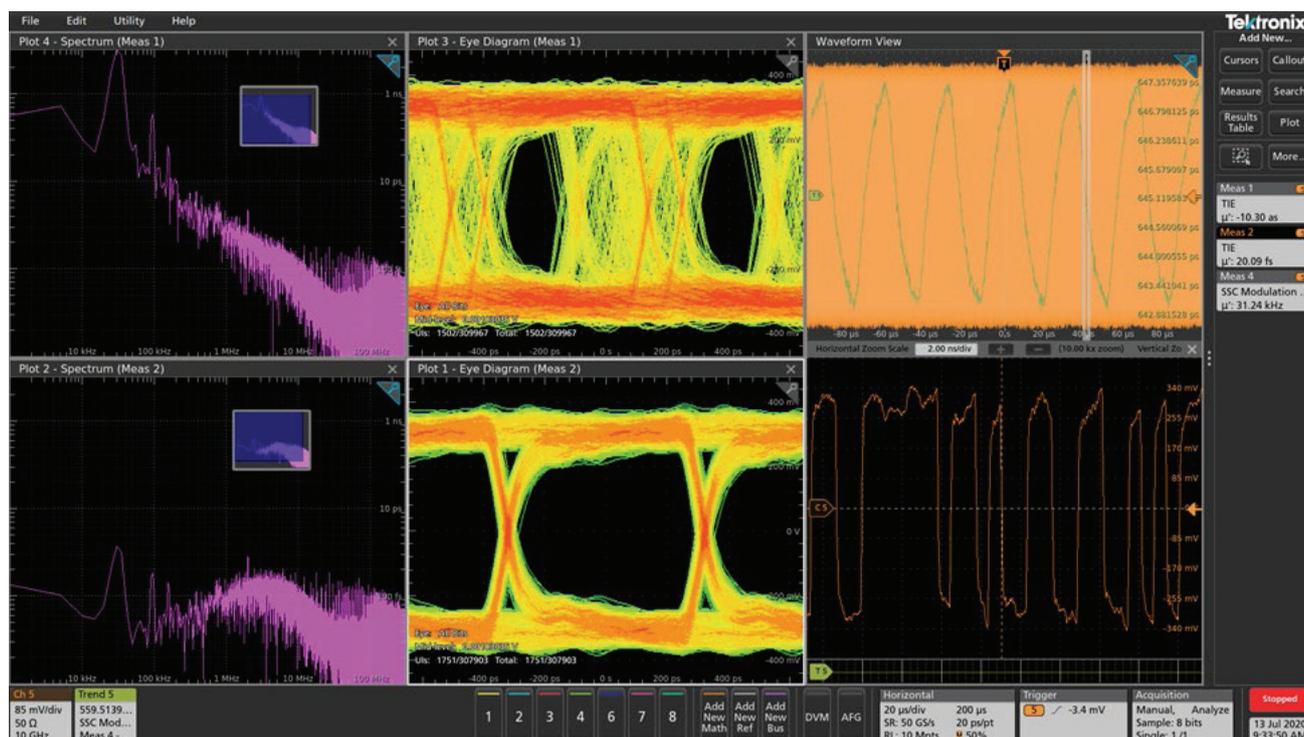


图 6: TIE 频谱、眼图和波形，顶部是恒定时钟 CR，底部是二类 PLL。注意对低频抖动、进而对信号完整性的影响。

在图 6 顶行中，恒定时钟频率的抖动幅度和相位与数据抖动差异很大。结果是眼图和波形的信号完整性差，导致高 BER。在底部，二类 PLL 恢复的时钟的低频抖动与数据相同，在 CR 带宽内的频率上有效过滤了随机性抖动和周期性抖动。结果，眼图和波形拥有良好的信号完整性和低 BER。

即使是二类 PLL 的时钟，TIE 频谱中的杂散信号也表明存在周期性抖动。再次对比手边的杂散信号频率，我们可以检查系统设计中是否有任何器件在这些频率上有 EMI 辐射，从而找到问题。

遗憾的是，解决周期性抖动问题，通常要远比在电路中找到对应的振荡器复杂。在没有明显的周期性抖动来源时，我们必须分析系统的功率完整性。电源轨道纹波经常会导致周期性抖动，有时还会导致随机性抖动。

抖动和配电网

PDN 的工作是保持恒压及为每个有源器件提供足够的电流。它影响着每个要素的性能，不管是有源还是无源。PDN 包括整个系统，而不只是 VRM (稳压器模块) 和内部芯片配电，而是包括每个互连、轨迹、通路、连接器、电容器、封装、引脚和球栅。其性能取决于 SERDES 特点及系统整体有效的串联阻抗、ESR、ESC 和 ESL (有效串联电阻、电容和电感)。

使用混合信号示波器查找和诊断功率完整性问题导致的抖动

纹波对随机性抖动 / 周期性抖动的影 响

电源轨道噪声通常称为纹波，一般在几毫伏。在几 GHz 频率的电源轨道上准确测量几 mV 噪声，要求使用高 DC 阻抗的高带宽探头，其在高频下作为 50Ω 传输线操作。TPR1000 和 TPR4000 电源轨道探头就是专为这一目的设计的。在选配 MSO6B 系列数字功率管理 (6-DPM) 分析包后，您可以在多条电源轨迹上自动进行功率分析，该分析包可以方便地进行关键抖动测量 (TIE, RJ, DJ, PJ)。

开关式电源调节电源轨道和回路 (即“地面”) 之间的电压，在低耗散开关状态之间连续切换，通过改变

开 / 关占空比，实现恒压。通过避免高耗散状态，它们浪费的功率要远远低于线性电源。遗憾的是，驱动开关单元的开 / 关脉宽模式可能会感应“开关噪声”，导致周期性抖动。

开关以固定频率发生，应记录在 VRM 产品技术资料中。如图 7 左上方所示，如果纹波频谱及紧下方的 TIE 频谱在开关频率上都有杂散信号，那么我们知道其来源，可以处理设计。注意图 7 中红色标记处的大的重叠杂散信号。TIE 频谱右面的 TIE 直方图有签名正弦曲线抖动分布 (马蹄铁形)，在一个频率上有周期性抖动。

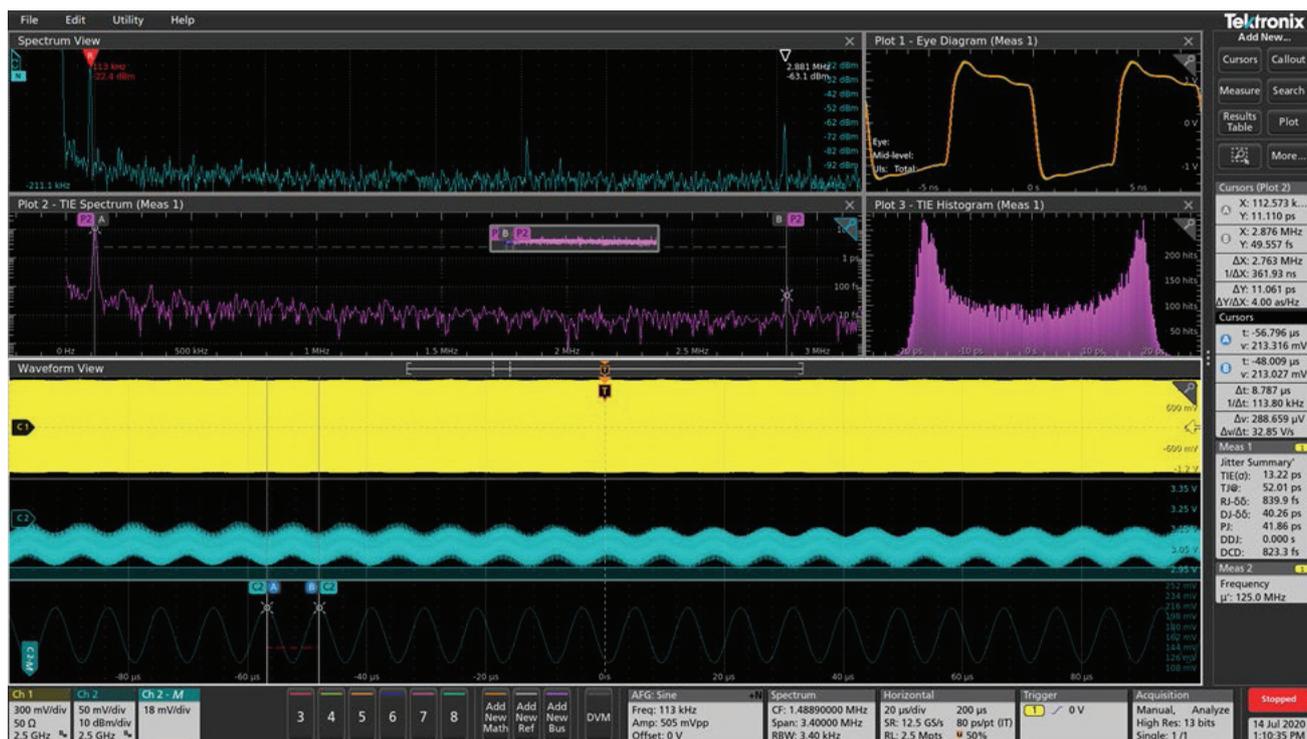


图 7: 左上方 Spectrum View 频谱视图中的电源轨道纹波，紧下方是 TIE 频谱，还有信号和电源轨道波形及 TIE 直方图。

电源可能会引入随机性噪声，导致随机性抖动。电源轨道随机性噪声在图 7 表现为左上方 Spectrum View 频谱视图的噪底。在这个实例中，功率纹波引起的随机性噪声很低，随机性抖动很小，约为 0.84 ps。

使用混合信号示波器查找和诊断功率完整性问题导致的抖动

周期性抖动和地面弹跳

在逻辑跳变过程中，发射机和接收机为 PDN 提供电流，或从 PDN 接收电流。当多个信号在不同电平之间同时切换时，它们可能会沉积电荷或从电源轨道和 / 或地平面中移除大量的电荷。短期引入电荷密度会改变本应在导体中作为公共接地的电压。得到的电压变化称为地面弹跳，也可以称为同时开关噪声 (SSN)。

我们先阐明几点：第一，我们所说的“地面”，指的是回路希望的公共基准电压，其通常定义为 0 V；第二，“同时”指的是在上升 / 下降时间重叠时，在这个时间间隔内多个元器件同时提供或接收电荷。

SSN 在时域中看上去是随机的，但在频域中看上去不是随机的。数据信号由许多频率成分组成，包括基础频率或内奎斯特频率，可能多达两个更高谐波，外加来自连续的完全相同的位的子谐波。同时开关可能发生在任何频率上。因此，SSN 是周期性噪声，有许多低幅度杂散信号，可能会导致周期性抖动。

为了确认周期性抖动是由 SSN 导致的，我们对比一下 **图 8** 左上方的电源轨道频谱与紧下方的 TIE 频谱。在两个频谱中，高幅度杂散信号都出现在相同的频率上，表明周期性抖动主要源于 SSN。



图 8: (a) 电源轨道纹波频谱和 (b) TIE/ 抖动频谱。

使用混合信号示波器查找和 诊断功率完整性问题导致的抖动

小结

信号完整性和功率完整性是一个反馈回路。网络中的每个要素、每条轨迹、通路、连接器、引脚、封装等，都会影响 PDN 阻抗和每条通道的阻抗，每个有源器件都会改变电源轨道和地平面的电压。

眼图可能告诉我们与信号完整性有关的许多东西，但几乎不能帮助我们确定具体问题。通过分析 TIE 分布，我们可以把抖动分成不同的成分，了解问题出在哪儿。随机性抖动高，通常意味着时钟有噪声，但也表明电源有随机性噪声。

周期性抖动可能表明时钟有问题，电源有开关噪声，或存在地面弹跳 /SSN。对比电源轨道纹波频谱与 TIE

频谱，可以分两步隔离问题。TIE 频谱中有杂散信号，但在电源轨道频谱中没有任何对应的杂散信号，表示时钟有问题。在两个频谱的相同频率上有一个或两个杂散信号，表明存在电源开关噪声。两个频谱都有大量的杂散信号，表明 SSN 有问题。不管是哪种情况，进行抖动和功率综合分析都能隔离很多棘手的问题。

信号完整性和功率完整性通常被视为不同的两个学科，但我们已经看到，只有同时了解这两者，才能找到与高抖动有关的问题。幸运的是，MSO6B 系列提供了必要的工具，在简便易用的触摸屏环境中把这两个学科结合在一起。



泰克官方微信

如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！

或登录泰克公司中文网站：www.tek.com.cn

泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835

泰克科技(中国)有限公司

上海市浦东新区川桥路1227号
邮编：201206
电话：(86 21) 5031 2000
传真：(86 21) 5899 3156

泰克北京办事处

北京市朝阳区酒仙桥路6号院
电子城·国际电子总部二期
七号楼2层203单元
邮编：100015
电话：(86 10) 5795 0700
传真：(86 10) 6235 1236

泰克上海办事处

上海市长宁区福泉北路518号
9座5楼
邮编：200335
电话：(86 21) 3397 0800
传真：(86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处

深圳市深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦3001-3002室
邮编：518008
电话：(86 755) 8246 0909
传真：(86 755) 8246 1539

泰克成都办事处

成都市锦江区三色路38号
博瑞创意成都B座1604
邮编：610063
电话：(86 28) 6530 4900
传真：(86 28) 8527 0053

泰克西安办事处

西安市二环南路西段88号
老三届世纪星大厦26层L座
邮编：710065
电话：(86 29) 8723 1794
传真：(86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处

武汉市洪山区珞喻路726号
华美达大酒店702室
邮编：430074
电话：(86 27) 8781 2760

泰克香港办事处

香港九龙尖沙咀弥敦道132号
美丽华大厦808-809室
电话：(852) 2585 6688
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，敬请登录：WWW.TEK.COM.CN

© 泰克公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和外国专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。本文中的技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

08/20 SBG 48C-61721-0

