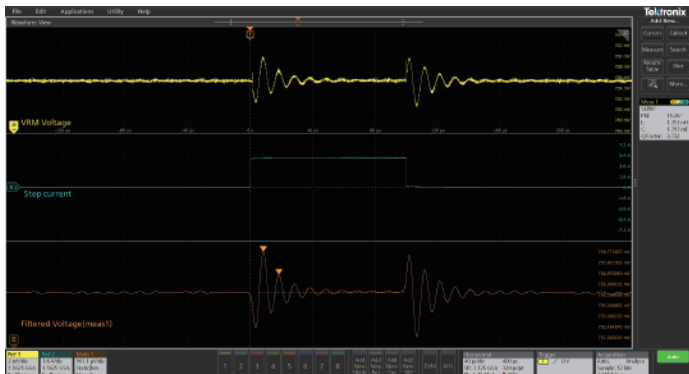


电源分配网络测量与稳定性分析

4/5/6 系列 B MSO 示波器选件 4/5/6-PDN 应用数据手册



现代电子系统依赖复杂的电源分配网络 (PDN)，其稳定性、阻抗和电源轨噪声会直接影响系统性能。确保稳健的电源分配对于可靠运行至关重要，尤其是在电压轨受到严格调节且负载动态变化快速的设计中。

适用于 4/5/6 系列 B MSO 的 PDN 分析软件选件提供了一套全面的、基于示波器的电源完整性验证与调试解决方案。工程师无需断开环路，也无需使用矢量网络分析仪 (VNA) 或频率响应分析仪等专用外部仪器，即可快速评估控制环路稳定性、表征阻抗并分析电源轨行为。

该解决方案的核心是电源完整性 (PI) 分析，结合了以下自动化测量功能：

- 控制环路响应 (波特图)
- 电源抑制比 (PSRR)
- 双端口阻抗
- 电源完整性分析稳定性评估 (SEPIA)

这些测量通过多通道、多域信号视图，从频域和时域两个方面深入了解 PDN 性能，帮助工程师识别谐振、评估瞬态响应，并确保稳压器在实际工作条件下稳定运行。

除 PI 分析外，该软件还通过电源引起的抖动 (PSIJ) 将电源轨行为与信号性能相关联，从而扩展到系统级验证。工程师可以借此了解电源噪声如何传递至高速信号，并影响整个系统的完整性。

通过在单一示波器平台中集成多通道、多域分析功能，该解决方案为 PDN 工程师提供直观的工作流程和先进的分析工具，简化测量设置、加快调试周期，并统一呈现电源性能及其对系统行为的影响。

关键测量与功能

电源完整性分析

• 控制环路响应 (波特图)：

测量整个频率范围内的增益和相位，以评估环路稳定性，并自动计算增益裕量和相位裕量。该测量可使用内部或外部激励，直接在示波器上完成，无需单独的频率响应分析仪，简化了设置过程。

• 电源抑制比 (PSRR)：

量化稳压器在不同频率下抑制输入纹波的能力。自动扫频和分析功能可快速评估纹波抑制性能。

• 双端口阻抗：

表征电源分配网络 (PDN) 在不同频率下的阻抗，以验证目标阻抗并识别谐振。集成的扫频和多通道采集功能使得直接在电路板上对低阻抗网络的测量可获得准确的结果。

• SEPIA (电源完整性分析稳定性评估)：

利用时域负载阶跃响应提取稳定性指标，估算相位裕量和品质因数 (Q 因数)，并建立可导出为网表的等效 RLC 模型。该方法无需断开控制环路或注入信号，即可在实际工作条件下简化稳定性分析，这对于数据中心电源分配网络至关重要。

信号完整性—电源完整性 (SI/PI) 分析

• 电源诱发动抖 (PSIJ)：

将电源轨噪声与高速信号中的抖动相关联，从而分析电源完整性对信号完整性的影响。内置的抖动相关和滤波技术有助于分离电源轨噪声对整体信号劣化的影响。

这些测量利用 MSO 系列示波器集成的 Spectrum View 功能，在用户可配置的频段内提供精细的频率分辨率，从而提升对噪声和谐振行为的观测能力，并提高整体测量精度。

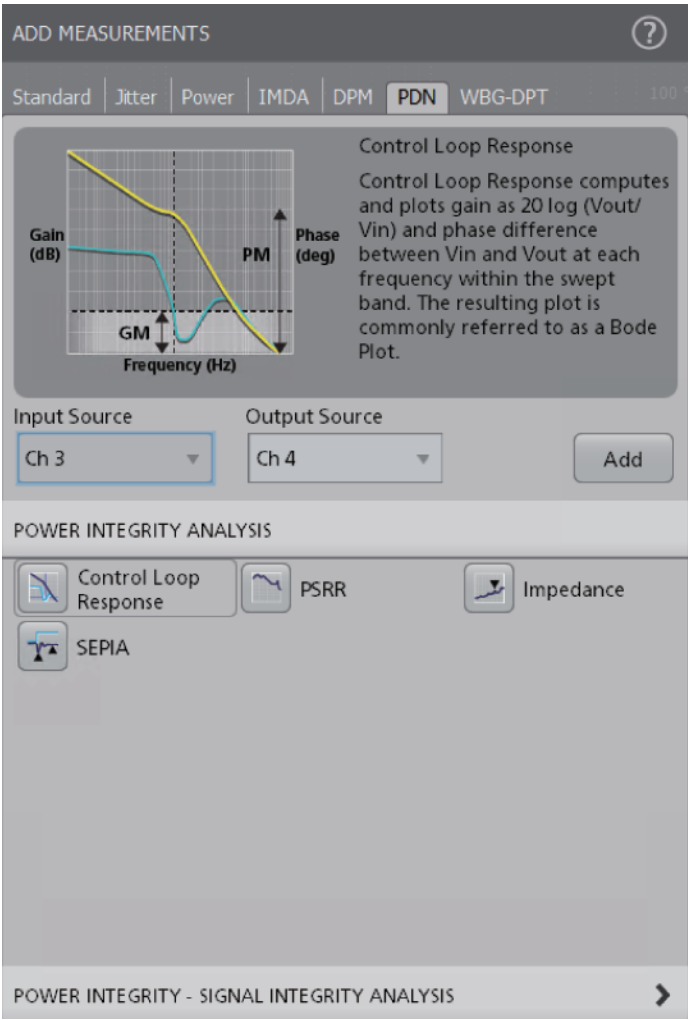
主要应用

电源完整性分析对于现代片上系统 (SoC) 和高性能微处理器设计至关重要。在这些设计中，多条电压轨及高度耦合的子系统必须在动态负载条件下可靠运行。确保每条电源轨均满足目标阻抗和稳定性要求，对于维持稳压模块 (VRM) 的正常运行以及整体系统性能至关重要，尤其是在快速瞬态负载下。

对于需要大电流输送、低阻抗和严格瞬态响应的应用，电源分配网络 (PDN) 表征日益重要，包括：

- 数据中心和 AI 基础设施 (CPU、GPU、ASIC 供电)
- 计算平台 (服务器、笔记本电脑和高性能系统)
- 汽车电子 (ECU、ADAS、电动汽车电源系统)
- 工业和嵌入式系统

测量概述



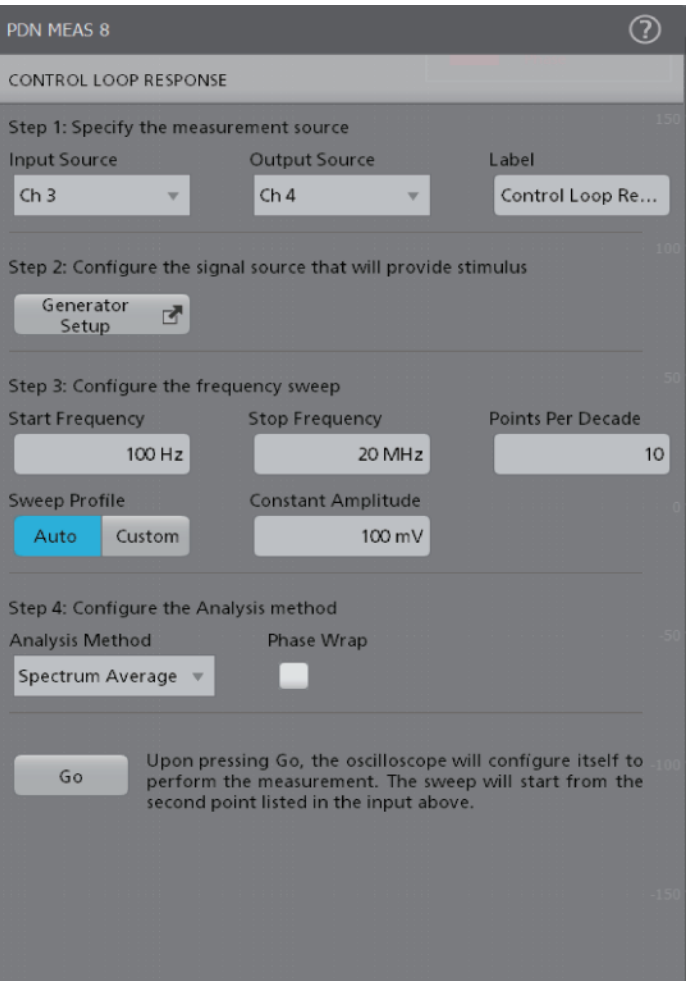
控制环路响应(波特图)

波特图以及增益裕度和相位裕度测量可帮助设计人员确定电源控制环路的稳定性。不稳定的控制环路会导致振荡和性能低下。滤波器设计人员也会使用幅度和相位图来测试滤波器设计。

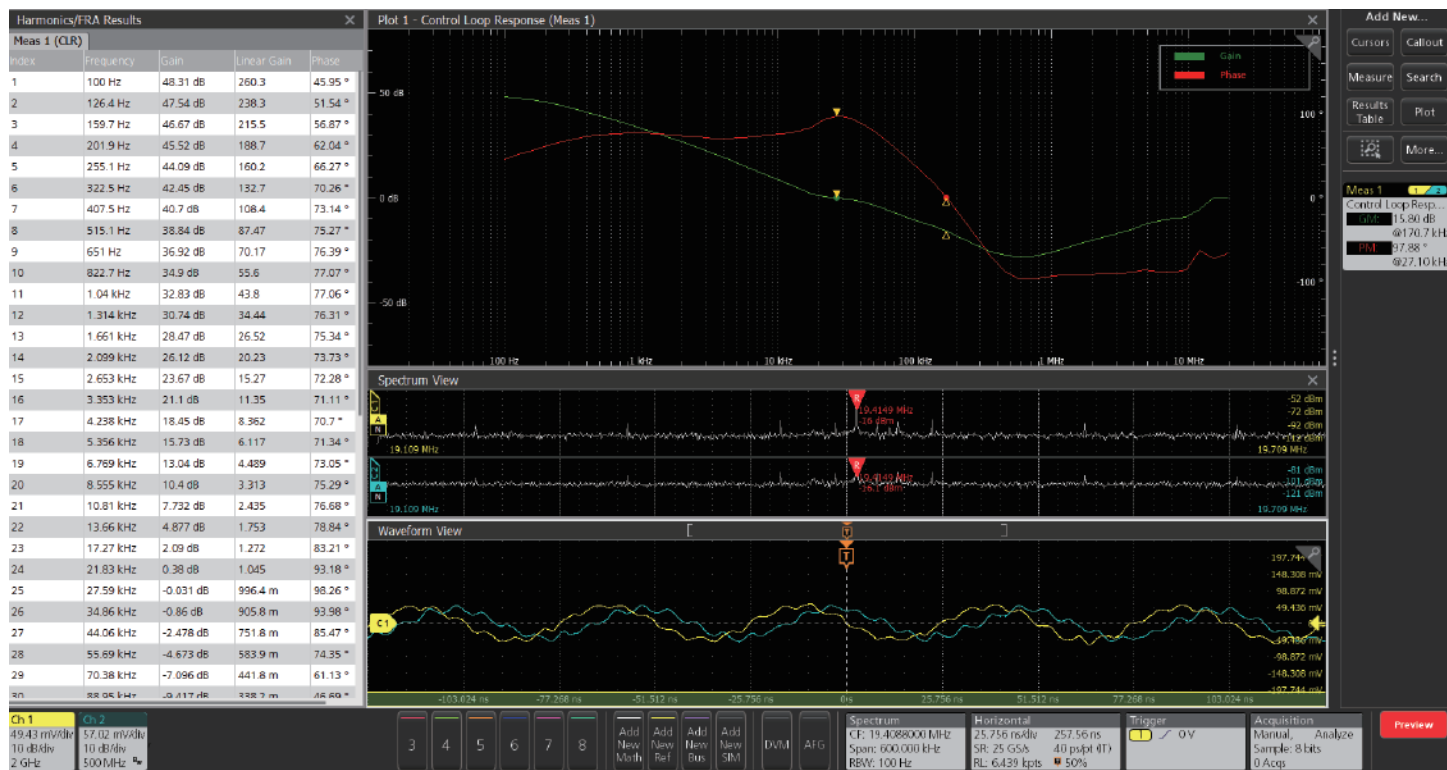
自动控制环路响应测量使用示波器内置的AFG, 或Tektronix AFG31000 系列函数发生器, 在指定频率范围内进行扫频, 并绘制每个频率点的幅度和相位。通过注入变压器 (例如 Picotest 的 J21xxA 型号) 将信号引入控制环路。生成的增益和相位图 (波特图) 用于自动计算增益裕度和相位裕度。利用游标可以查看曲线上任意频率处的增益值和相位值。

控制环路响应测量配置允许设置起始频率和终止频率, 选择恒定/幅度曲线、阻抗、相位包络, 以及将 FFT、频谱平均和频谱普通作为分析方法, 并设置每十倍频程的点数, 以获得最佳的曲线显示效果。

相位包络配置允许在相位迹线跳变超过相邻字段中设置的角度数值时, 对相位迹线进行展开。相位默认设置为 180°。



波特图测量支持设置起始频率和终止频率, 可使用示波器内置或外部函数发生器, 选择幅度曲线、相位包络、不同的分析方法, 并选择每十倍频程点数 (ppd) 以获得更好的波形图显示效果。



控制环路响应（波特图）绘制增益和相位随频率变化的曲线，并计算增益裕度和相位裕度。

电源抑制比 (PSRR)

PSRR 测量可帮助 DC-DC 转换器和稳压器设计人员,在指定频率范围内量化器件衰减交流信号的能力。该测试使用 4/5/6 系列 MSO B 型号的可选内置函数发生器,或外部 Tektronix AFG31000 函数发生器,并配合注入变压器 (例如 Picotest J2120A 线路注入器) 对稳压器输入进行调制。系统会自动测量调制输入端和输出端的交流电压。在扫描频带内的每个频率点,系统根据 $20\log(V_{in}/V_{out})$ 计算抑制比,并绘制测量结果。

PDN MEAS 9

PSRR

Step 1: Specify the measurement source

Input Source

Output Source

Label

Ch 3

Ch 4

PSRR

Step 2: Configure the signal source that will provide stimulus

Generator Setup

Step 3: Configure the frequency sweep

Start Frequency

Stop Frequency

Points Per Decade

100 Hz

20 MHz

10

Sweep Profile

Response (mV)

Constant Amplitude

Auto

Custom

100 mV

Step 4: Configure the Analysis method

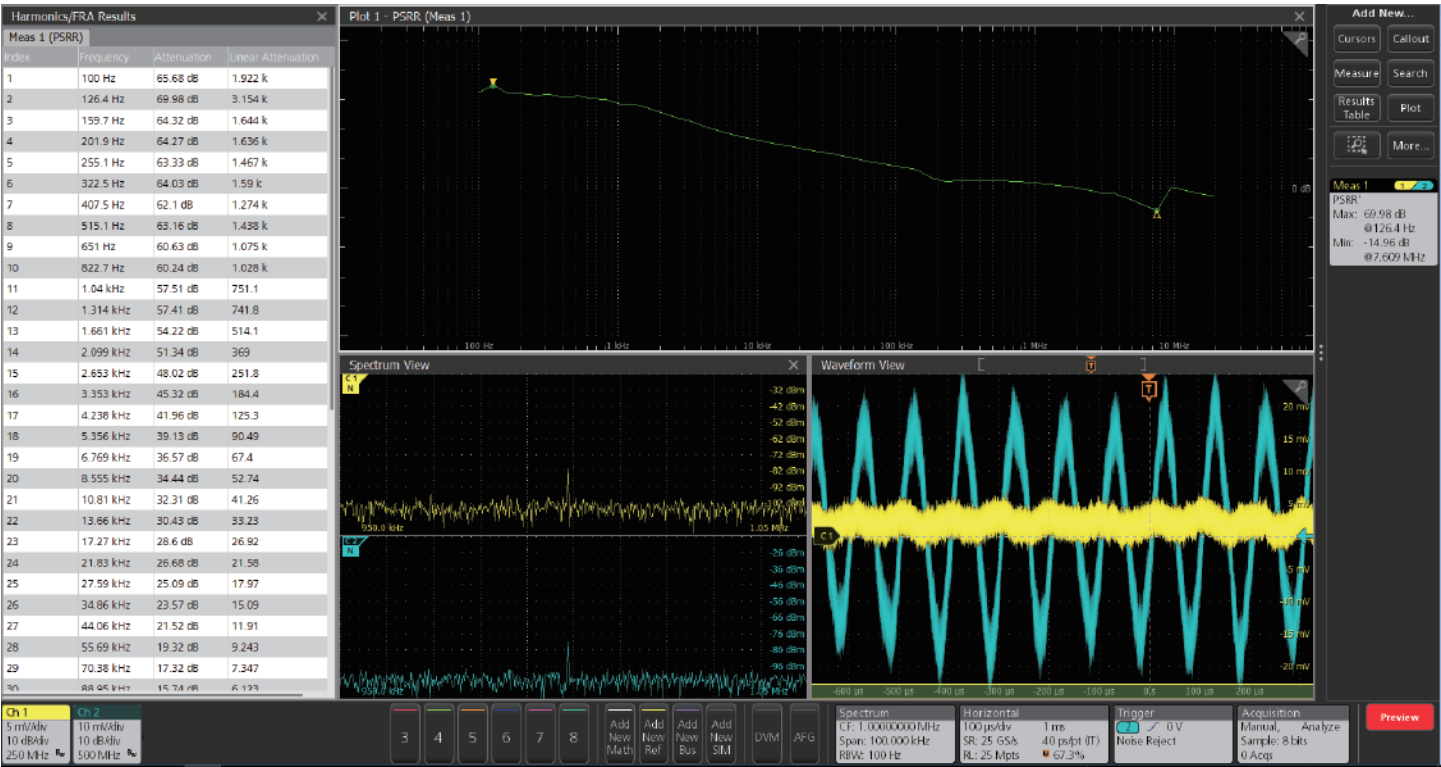
Analysis Method

Spectrum Average

Go

Upon pressing Go, the oscilloscope will configure itself to perform the measurement. The sweep will start from the second point listed in the input above.

PSRR 测量允许您设置内部或外部信号发生器的起始和终止频率,选择恒定幅度曲线、阻抗和分析方法 (频谱视图或 FFT),并设置每十倍频程的点数,以获得更好的绘图效果。



电源抑制比（PSRR）会绘制频率范围内的抑制比曲线，并标注最小值和最大值。

阻抗测量

双端口阻抗测量使设计人员能够在指定频率范围内验证其电源分配网络 (PDN) 的阻抗。该测试使用 4/5/6 系列 B MSO 的可选内置函数发生器，或外部 Tektronix AFG31000 系列函数发生器，并结合有源分路器 J2161A (需要电源 J2170B) 和注入变压器 (例如 Picotest J2102B 或 J2113A 线路注入器)，以测量 PDN 网络的阻抗。系统会自动计算扫描频段内每个频率点的阻抗，并绘制结果。建议使用 BNC 或直接 SMA 连接。

PDN MEAS 7

IMPEDANCE

Step 1: Specify the measurement source

Input Source

Output Source

Label

Ch 3

Ch 4

Impedance

Splitter

Active

Passive

Step 2: Configure the signal source that will provide stimulus

Generator Setup

Step 3: Configure the frequency sweep

Start Frequency

Stop Frequency

Points Per Decade

100 Hz

20 MHz

10

Sweep Profile

Constant Amplitude

Auto

Custom

100 mV

Step 4: Configure the Analysis method

Analysis Method

Phase Wrap

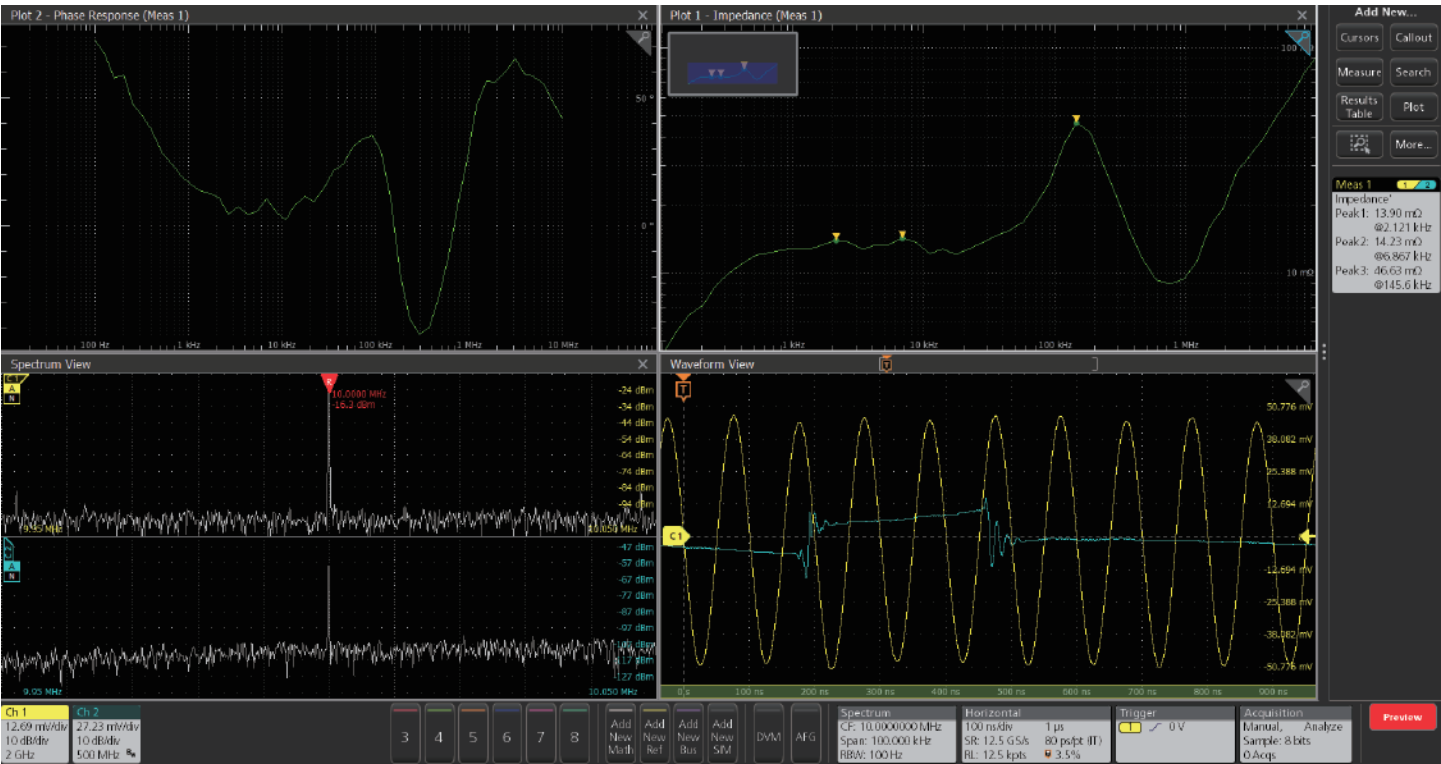
Spectrum Average

Go

Upon pressing Go, the oscilloscope will configure itself to perform the measurement. The sweep will start from the second point listed in the input above.

Plots :

双端口阻抗测量允许您设置内部或外部信号发生器的起始和终止频率，选择恒定幅度曲线、相位包络、分析方法（频谱视图或 FFT），并设置每十倍频程的点数，以获得更好的绘图效果。



阻抗测量结果表和结果标记会显示峰值阻抗点的数值。同时还会显示对应的阻抗曲线、群延迟曲线和相位曲线。

控制环路响应、PSRR 和阻抗测量的幅度配置曲线

“配置曲线”菜单可对电源抑制比 (PSRR)、控制环路响应 (波特图) 和阻抗测量进行精确的幅度配置。您可以自定义内部或外部发生器在各频率范围内的幅度, 使其匹配被测器件 (DUT) 的灵敏度: 在关键交越点附近使用较低幅度, 在其他频段使用较高幅度。该功能尤其适用于电源, 因为电源在零度交越频率附近非常敏感。与恒定幅度信号相比, 幅度曲线配置可将失真降至最低, 并优化测量精度。

CONFIGURE PROFILE

Step	Start Frequency	Stop Frequency	Amplitude
1	1 kHz	10 kHz	100 mV
2	10 kHz	300 kHz	250 mV
3	300 kHz	1 MHz	100 mV
4	1 MHz	5 MHz	50 mV
5	5 MHz	10 MHz	A80 mV

Insert Step

Delete Step

Clear Table

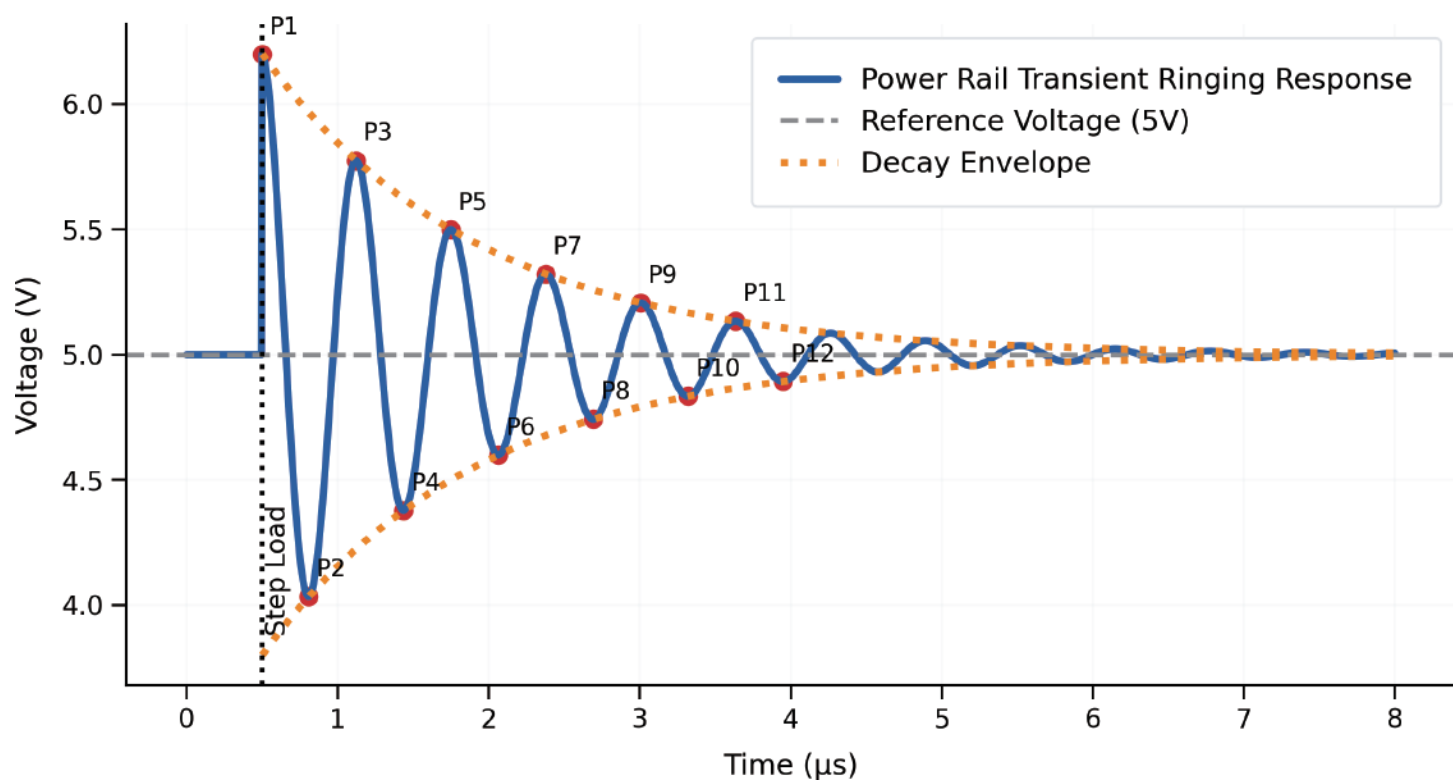
☒ Auto Span & RBW

在所需的起始频率和终止频率处配置幅度。频谱视图分析方法中可以配置频宽和 RBW。

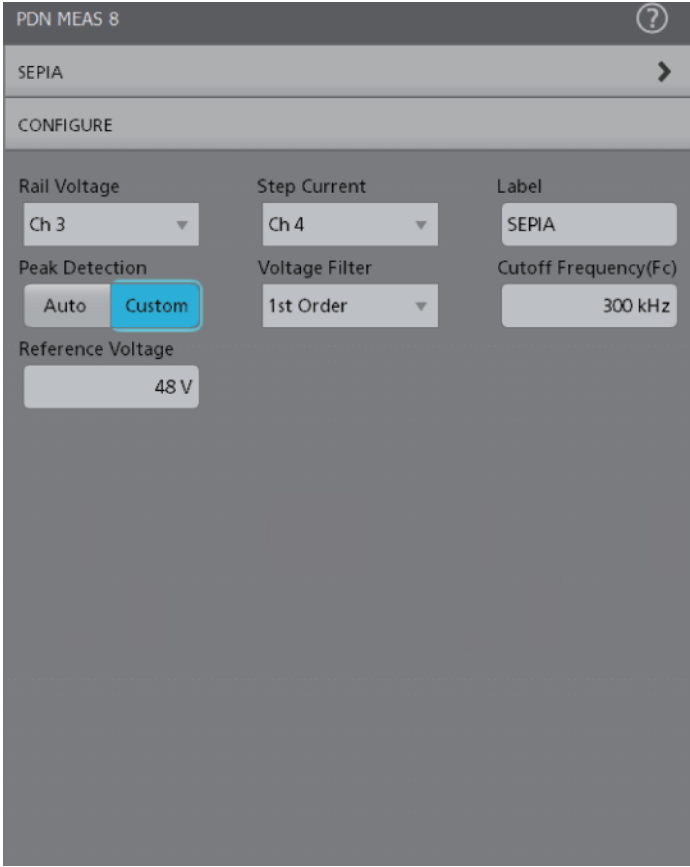
SEPIA——电源完整性分析稳定性评估

Picotest 的 SEPIA 是一种时域技术,可从测得的阶跃负载响应中提取稳定性指标以及紧凑的 R-L-C 等效模型。二阶主导系统会产生振铃波形,其衰减速率和峰值数量由品质因数 Q 决定。因此,可根据阻尼瞬态响应估算 Q 值。这使得 SEPIA (也称为基于示波器的嵌入式电源完整性分析) 特别适用于非线性、时变的 VRM,在这类系统中,波特图分析已不再可靠。由于 VRM 电压输出包含纹波和噪声,因此使用 IIR 滤波器来分离有效的

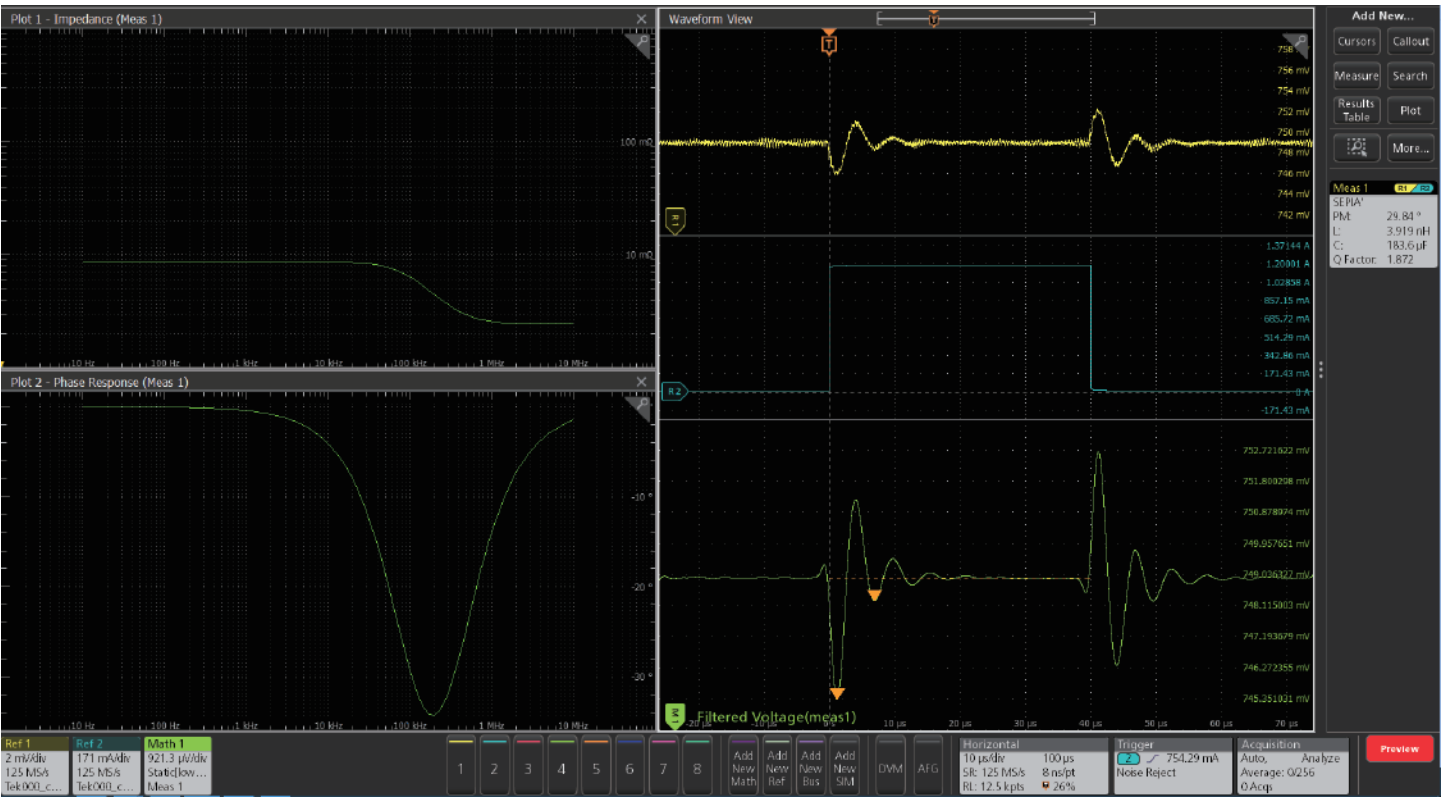
峰值和谷值。根据电压边沿确定瞬态区域。在自动模式下,系统利用算法生成的参考电压,通过统计方式检测峰值和谷值。根据振铃特征识别高阶行为并进行相应补偿,同时仅保留主导峰值。在自定义模式下,您必须始终一致地选择连续的峰值或谷值;随后使用用户定义的参考电压确定相对幅度。



VRM 5V 电源轨输出瞬态振铃响应波形示例



SEPIA测量设置，具备电源轨电压和阶跃电流输入，可显示可选阻抗与相位响应曲线图，用于瞬态稳定性分析。



SEPIA测量，具备结果表格及结果标识，可显示PM、L、C、Q参数值，并同时呈现对应的阻抗图与相位图。

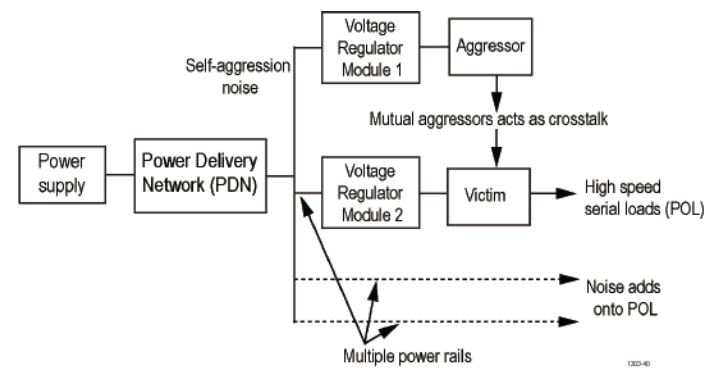
电源完整性与信号完整性分析

电源诱发抖动 (PSIJ)

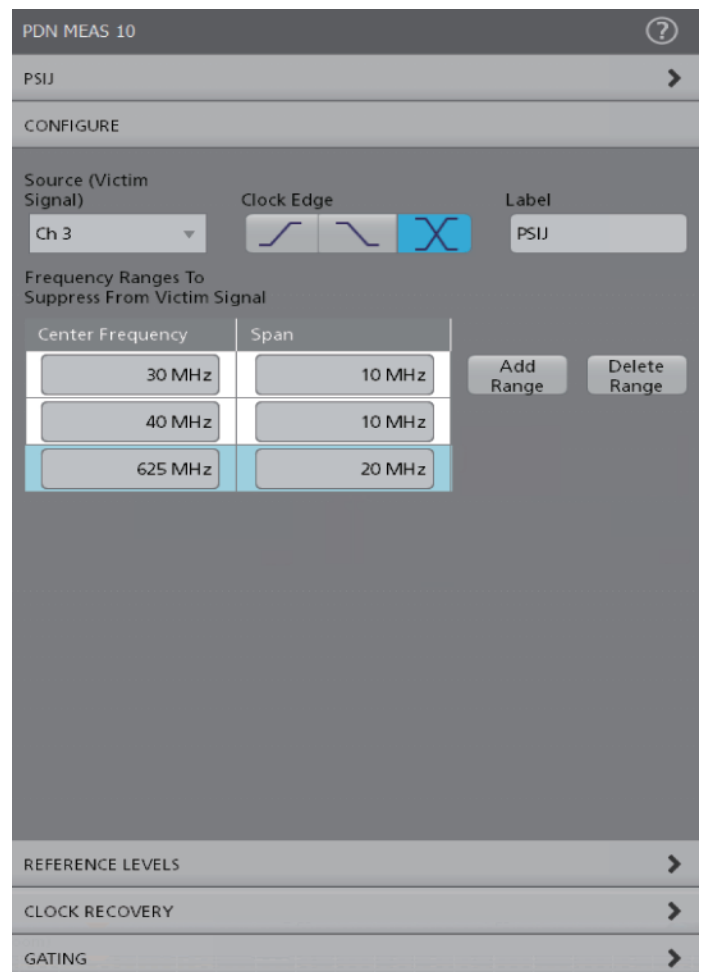
PSIJ (电源诱发抖动) 作为一项关键的SI/PI测量, 为高速串行 (HSS) 设计工程师提供深入洞察与设计信心, 使其能够在原型阶段进行任何电源相关硬件更改之前优化设计。

该测量有两项目标:

- 识别电源轨噪声引起的抖动。
- 抑制HSS波形上的抖动, 并观察信号质量的改善

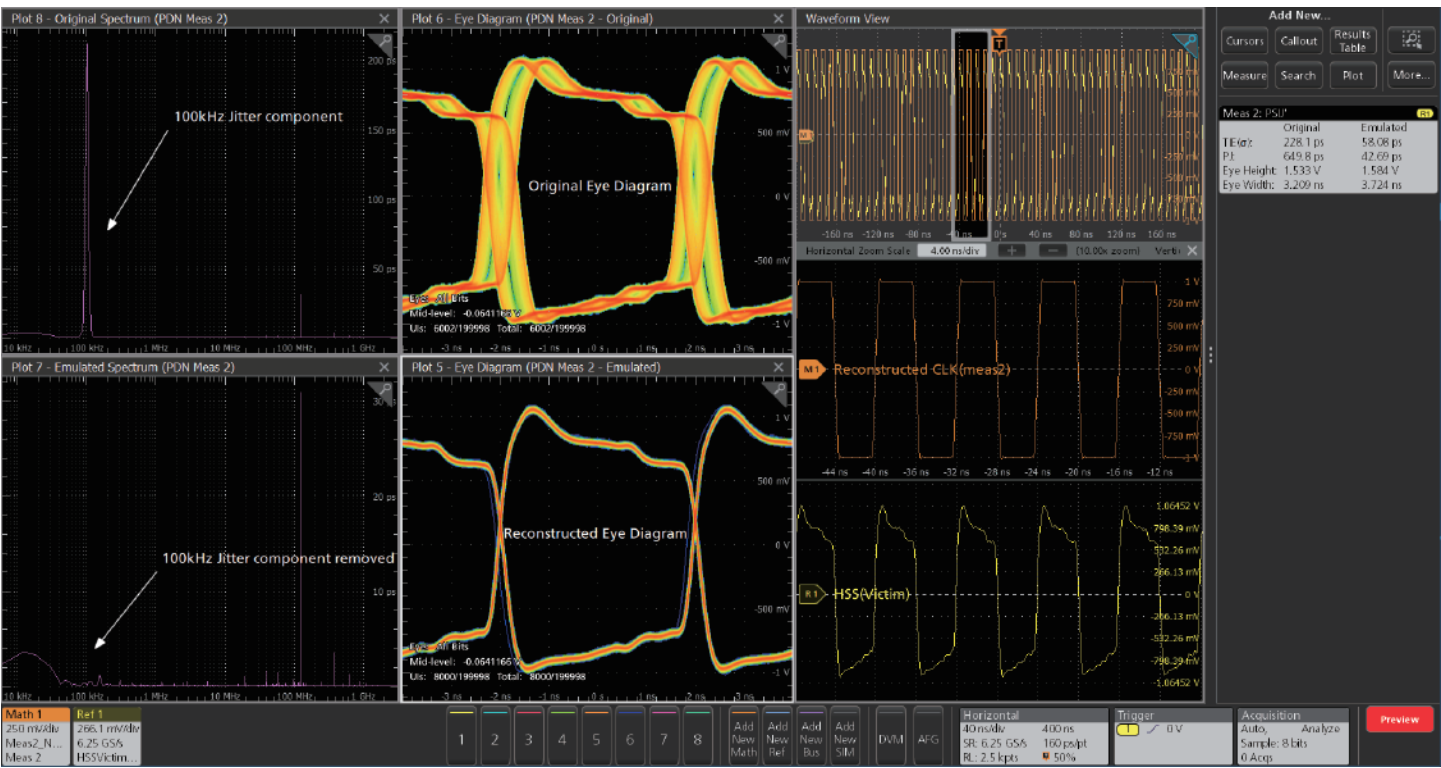


该图显示了一个多电源轨示例, 展示噪声对各负载点 (POL) 的影响, 例如DDR内存、PCIe等。



PSIJ测量利用抖动抑制技术, 将高速信号 (受扰信号) 中的周期性抖动 (PJ) 分量与电源 (扰源) 轨噪声相关联。抖动抑制算法从受扰信号中滤除由电源轨引入的指定频率。配置陷波滤波器, 设置需要从受扰信号中抑制的中心频率。陷波滤波器的跨度为一个绝对值, 指定中心频率两侧的滤波范围。最多可配置12组陷波滤波器设置。建议采用恒定时钟恢复方法运行PSIJ测量。滤除电源轨噪声前后的HSS频谱图有助于验证信号质量的改善, 也可通过添加HSS信号眼图来进一步确认。

该测量提供关键结果, 包括原始信号和仿真信号的眼图高度、眼图宽度、PJ及TIE。



该图显示了消除电源轨源引入的抖动后PSII结果的改善。

报告生成

数据收集、归档与文档记录工作繁琐,但在设计与开发流程中至关重要。4-PDN、5-PDN和6-PDN分析软件内置自动化报告生成器,便于沟通与存档。只需按下按钮即可生成报告,显示所有当前测量结果。可添加图形或附加测试以自定义报告。报告支持可编辑的.mht文件或.pdf文件输出。下方为报告示例。

Measurement Report

Teltronix
2026-06-26T12:26:20+09:30

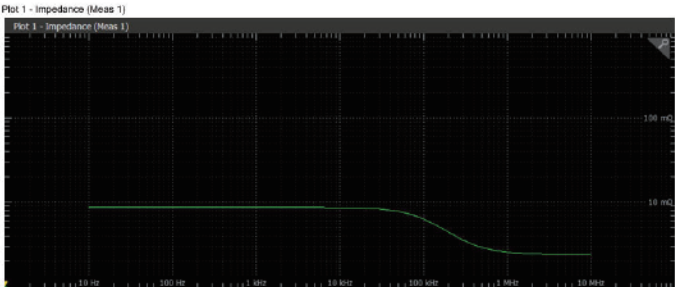
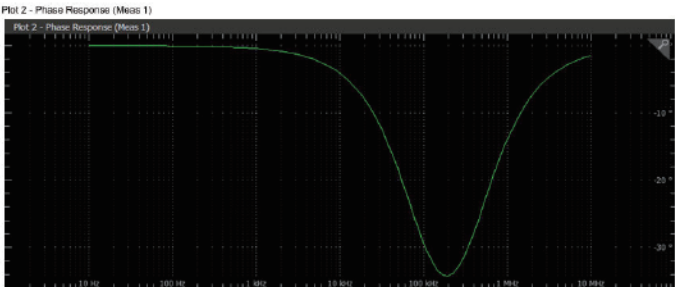
Setup Configuration

Scope Details			
Scope Model Number	Scope Serial Number	TekScope Version	Scope Calibration Status
MS056	Q100066	2.26.13	Pass
Probe Details - CH1			
Probe Type	Probe Serial Number	Probe Cal Status	
TPR4000	C011787	Default	
Probe Details - CH3			
Probe Type	Probe Serial Number	Probe Cal Status	
TPP1000	C066538	Default	
Probe Details - CH4			
Probe Type	Probe Serial Number	Probe Cal Status	
TPP1000	C066246	Default	

Waveform Histogram Results

No Waveform Histogram Results Available

Measurement Results													
Name	Measure ment	Src(s)	Mean'	Min'	Max'	Pk-Pk'	Std Dev'	Populat ion'	Accum Mean	Accum Min	Accum Max	Accum Pk-Pk'	Accum Std Dev
PDN Measure 1 - SEPIA	Phase Margin	Ref 1,Ref 2	29.836	29.836	29.836	0.0000	0.0000	1	29.836	29.836	29.836	0.0000	0.0000
			Degrees	Degrees	Degrees	Degrees	Degrees		Degrees	Degrees	Degrees	Degrees	Degrees
	L		3.9190	3.9190	3.9190	0.0000	0.0000	H	3.9190	3.9190	3.9190	0.0000	0.0000
			nH	nH	nH				nH	nH	nH		
	C		183.56	183.56	183.56	0.0000	0.0000	F	183.56	183.56	183.56	0.0000	0.0000
			pF	pF	pF				pF	pF	pF		
	Q Factor		1.8720	1.8720	1.8720	0.0000	0.0000	1	1.8720	1.8720	1.8720	0.0000	0.0000



Global Configuration

Standard Configuration							
Gating	Display Unit	Standard Reference Levels	Jitter Separation Model	Dual Dirac Model	Jitter Reference Levels	Lock RJ	Jitter Analysis Method
None	Seconds	Every Acquisition	SpectralOnly	PCIExpress	First Acquisition	False	JitterOnly

Reference Levels Configuration	
Ref Levels	Ref 1, Ref 2
Ref Level Type	Global
Base Top Method	Automatic
RiseHigh	90%
RiseMid	50%
RiseLow	10%
FallHigh	90%
FallMid	50%
FallLow	10%
Hysteresis	5%

PDN Measure 1 - SEPIA					
Ref Levels		Configurations		Gating	
Ref Level Type	Global	Custom Measurement Name	SEPIA	Gating Type	None
Source(s)	Ref 1,Ref 2	Peak Detection	Custom		
		Voltage Filter	Second		
		Cutoff Frequency(f _c)	500.00 kHz		
		Reference Voltage	748.90 mV		

技术规格

测量

测量	说明
控制环路响应	测量整个扫描范围内的增益 ($20 \log(V_{out}/V_{in})$) 及相位随频率的变化. 频率扫描: 使用示波器内部AFG时, 范围为10 Hz至50 MHz; 使用外部AFG31000系列发生器时, 范围为10 Hz至该发生器最高频率 动态范围: 典型值55 dB. 支持的探头: 推荐使用TPP0502探头进行单端测量, 使用TDP系列差分探头进行差分测量 信号源: 示波器内部AFG (最高5 V) 或外部AFG31000系列发生器 (最高10 Vpp) 需搭配: Picotest隔离变压器和注入变压器.
电源抑制比 (PSRR)	测量调制输入和输出交流电压电平, 并在指定频带内各频率点处将抑制比绘制为 $20 \log(V_{in}/V_{out})$ PSRR动态范围典型值为85 dB。
阻抗	测量并绘制扫描频带内各频率点处的双端口阻抗双端口阻抗测量需使用带隔直器的BNC或直连SMA电缆. 频率范围: 使用内部AFG时为10 Hz至50 MHz; 使用外部AFG31000系列发生器时为10 Hz至该发生器最高频率. 可测最小阻抗为10 mΩ, 最大阻抗为47 Ω.
频谱-相位-阻抗分析 (SEPIA)	SEPIA通过从阶跃负载的时域电压响应中提取频域信息, 评估电源和VRM稳定性. 它分析瞬态振铃以估计等效RLC模型, 无需断开环路即可深入了解阻尼、谐振和控制环路稳定性.
电源诱发抖动 (PSIJ)	PSIJ测量用于识别电源轨噪声在高速串行数据上引入的周期性抖动

订购信息

型号

产品	选型	支持的仪器
新仪器订购选型	4-PDN 5-PDN 6-PDN	4 系列 B MSO (MSO44B, MSO46B) 5 系列 B MSO (MSO54B, MSO56B, MSO58B, MSO58LP) 6 系列 B MSO (MSO64B, MSO66B, MSO68B)
产品升级选择	SUP4-PDN SUP5-PDN SUP6-PDN	
浮动许可证	SUP4-PDN-FL SUP5-PDN-FL SUP6-PDN-FL	4系列B MSO (MSO44B、MSO46B) 浮动许可证可从任意4系列示波器转移至任意其他4系列示波器, 每次仅限一台仪器使用 5系列B MSO (MSO54B、MSO56B、MSO58B、MSO58LP) 浮动许可证可从任意5系列示波器转移至任意其他5系列示波器, 每次仅限一台仪器使用 6系列B MSO (MSO64B、MSO66B、MSO68B) 浮动许可证可从任意6系列示波器转移至任意其他6系列示波器, 每次仅限一台仪器使用

软件套装

套装选择	支持的仪器	说明
4-PRO-POWER-1Y	4 系列 B MSO	1年期专业电源套装许可证
4-PRO-POWER-PER		永久许可证专业电源套装
4-ULTIMATE-1Y		1年期终极套装许可证
4-ULTIMATE-PER		永久许可证终极套装
5-PRO-POWER-1Y	5 系列 B MSO	1年期专业电源套装许可证
5-PRO-POWER-PER		永久许可证专业电源套装
5-ULTIMATE-1Y		1年期终极套装许可证
5-ULTIMATE-PER		永久许可证终极套装
6-PRO-POWER-1Y	6 系列 B MSO	1年期专业电源套装许可证
6-PRO-POWER-PER		永久许可证专业电源套装
6-ULTIMATE-1Y		1年期终极套装许可证
6-ULTIMATE-PER		永久许可证专业电源套装

推荐探头与附件

测量	所需附件	
	来自 Tektronix	来自 Picotest (https://www.picotest.com/)
控制环路响应 (波特图)	TPP0502无源探头 (2个) 内部AFG选件/AFG31000 (频率最高250 MHz)	隔离变压器 J2100A (用于1 Hz至5 MHz工作频率) J2101A (用于10 Hz至45 MHz工作频率) J2110A 固态注入器 (用于DC至45 MHz工作频率)
电源抑制比 (PSRR)	TPP0502无源探头 (2个) 内部AFG选件/AFG31000 (频率最高250 MHz)	线路注入器 J2120A (用于10 Hz至10 MHz工作频率)
2双端口阻抗	内部AFG选件/AFG31000 (频率最高250 MHz)	P2102A-1X 双端口PDN探头, 1X衰减 J2102B 共模变压器 J2161A 双路宽带有源分路器 PPDN电缆: 端口保护隔直器 – 2个 (若待测设备为有源且电压高于2 V时需要) 2根*1米 SMA转Mini SMP (随P2102A提供), 2根*24英寸 BNC转SMA (用于J2161A的OUT2至DUT, 以及DUT至J2102B), 2根12英寸 BNC转BNC (一根从J2161A的OUT1至示波器输入, 另一根从J2102B输出至示波器输入), 1根1米 BNC转BNC (从AFG输出至J2161A输入) 端口保护隔直器 – 2个 (若待测设备为有源且电压高于2 V时需要)
频谱-相位-阻抗分析 (SEPIA)	AFG31000系列/等效信号发生器 (用于负载阶跃生成) 泰克电源轨探头 (TPR1000/TPR4000) 泰克隔离电流探头 (TICP系列) – 可选	P2105A (S10版本) 配负载阶跃头 (根据测试电压和目标负载电流, 从50 mΩ至47 Ω范围内选择负载阶跃头) P2104A或P2105A, 用于配合TICP差分探头: 1个 (若TICP探头用于电源轨电压测量, 则需要2个) J2115A 地环路隔离器: 1个 (与TPR探头搭配时为强制要求, TICP探头为可选)

认证

泰克已通过ISO 9001:2015和ISO 14001:2015认证.

联系方式

地区 / 区域 联系电话

澳大利亚 1 800 709 465

奥地利 * 00800 2255 4835

巴西 +55 (11) 3530-8901

比利时 * 00800 2255 4835

加拿大 / 美国 1 800 833 9200

丹麦 +45 80 88 1401

法国 * 00800 2255 4835

德国 * 00800 2255 4835

中国香港 400 820 5835

印度 000 800 650 1835

印度尼西亚 007 803 601 5249

意大利 * 00800 2255 4835

日本 81 (3) 6714 3086

马来西亚 1 800 22 55835

新西兰 0800 800 238

挪威 800 16098

中国内地 400 820 5835

菲律宾 1 800 1601 0077

葡萄牙 80 08 12370

韩国 +82 2 565 1455

新加坡 800 6011 473

中国台湾 886 (2) 2656 6688

泰国 1 800 011 931

越南 12060128

巴尔干、以色列、南非、中东欧 / 波罗的海、中欧 / 希腊、芬兰、卢森堡、波兰、中东 / 亚洲 / 北非、西班牙 *、瑞典 *、瑞士 *、英国 / 爱尔兰 *

注: 带 * 的号码为欧洲免费电话号码, 若无法接通, 请拨打通用热线: +41 52 675 3777

墨西哥、中南美洲、加勒比地区 52 (55) 88 69 35 25

俄罗斯 / 独联体 +7 (495) 6647564

注: 带 * 的号码为欧洲免费电话号码, 若无法接通, 请拨打通用热线: +41 52 675 3777

在TEK.COM上查找更多有价值的资源

Tektronix®

版权所有©Tektronix。保留所有权利。Tektronix产品受美国及海外已授权及待授权专利保护。本出版物中的信息优先于所有先前发布的资料。规格与价格变更权保留。tektronix及TEK为Tektronix, Inc. 的注册商标; 文中提及的其他商品名称均为其各自公司的服务标志、商标或注册商标。

61W-74247-0 2026年7月7日