

Purnachandar Poshala, Mahesh K Chandrashekar, Kia Rahbar, Ernest Ting-Ta Yen

摘要

BAW (体声波) 振荡器是一项全新的振荡器技术。基于晶体的振荡器已存在多年, 在 MEMS 技术推出之前就已问世。与基于晶体和基于 MEMS 的振荡器相比, BAW 技术可带来可靠性优势。BAW 在改善振动、机械冲击和故障间隔平均时间 (MTBF) 性能方面具有高度可靠性, 可减少系统设计人员对恶劣环境下振荡器性能的担忧, 使设计人员能够将更多精力放在总体系统性能上。与石英振荡器中使用的石英或机械元件不同, TI 的压电式 BAW 谐振器是使用半导体工艺设计的。

机械冲击和振动会损坏振荡器并降低性能。振动会导致相位噪声或抖动增加, 而机械冲击会导致频率偏移或尖峰。本应用手册提供了有关 BAW 振荡器在严格正弦、随机振动和机械冲击条件下性能的更多详细信息, 并介绍了各种 MIL-STD-883 测试方法、测试设置和性能结果。

内容

1 引言.....	3
2 测试标准和测试设置.....	4
2.1 测试标准.....	4
2.2 振动实验室中的测试设置.....	4
3 正弦振动、随机振动和机械冲击测试.....	5
3.1 正弦振动测试.....	5
3.2 随机振动测试.....	10
3.3 机械冲击测试.....	11
4 BAW 振荡器与晶体振荡器的振动性能比较.....	14
4.1 比较测试设置.....	14
4.2 对比测试结果.....	15
5 总结.....	15
6 参考文献.....	15

插图清单

图 2-1. 正弦和随机振动测试设置图.....	4
图 2-2. X、Y、Z 轴上带有评估板 (具有 DUT) 的振动测试装置.....	4
图 3-1. 正弦振动前的基线捕获.....	6
图 3-2. 50Hz 下正弦振动的捕获数据.....	6
图 3-3. 100Hz 下正弦振动的捕获数据.....	6
图 3-4. 200Hz 下正弦振动的捕获数据.....	6
图 3-5. 500Hz 下正弦振动的捕获数据.....	6
图 3-6. 1000Hz 下正弦振动的捕获数据.....	7
图 3-7. 2000Hz 下正弦振动的捕获数据.....	7
图 3-8. 4 引脚 DLE 封装上的组合正弦振动相位噪声图.....	8
图 3-9. 4 引脚 DLF 封装上的组合正弦振动相位噪声图.....	8
图 3-10. 6 引脚 DLE 封装上的组合正弦振动相位噪声图.....	8
图 3-11. 6 引脚 DLF 封装上的组合正弦振动相位噪声图.....	8
图 3-12. LVCMOS 输出的 ppb/g 与振动频率关系图 - DLE 和 DLF 封装 - X、Y、Z 轴.....	9
图 3-13. 差分输出的 ppb/g 与振动频率关系图 - DLE 和 DLF 封装 - X、Y、Z 轴.....	9
图 3-14. 用于随机振动测试的 VibrationVIEW 软件工具设置.....	10
图 3-15. 4 引脚 DLE (LVCMOS) 在振动测试前后的对比图.....	10

图 3-16. 4 引脚 DLE (LVCMOS) 在振动期间的捕获数据.....	10
图 3-17. 6 引脚 DLE (LVPECL) 在振动测试前后的对比图.....	11
图 3-18. 6 引脚 DLE (LVPECL) 在振动测试期间的捕获数据.....	11
图 3-19. 冲击测试设置.....	12
图 3-20. 4 引脚 DLE 在机械冲击测试前后的对比图, Z 轴.....	12
图 3-21. 4 引脚 DLE 在机械冲击测试期间的捕获数据, Z 轴.....	12
图 3-22. 4 引脚 DLF 在机械冲击测试前后的对比图, X 轴.....	13
图 3-23. 4 引脚 DLF 在机械冲击测试期间的捕获数据, X 轴.....	13
图 3-24. 6 引脚 DLE 在机械冲击测试前后的对比图, Y 轴.....	13
图 3-25. 6 引脚 DLE 在机械冲击测试期间的捕获数据, Y 轴.....	13
图 3-26. 6 引脚 DLF 在机械冲击测试前后的对比图, Y 轴.....	13
图 3-27. 6 引脚 DLF 在机械冲击测试期间的捕获数据, Y 轴.....	13
图 4-1. 振动测试实验室设置图.....	14
图 4-2. 随机振动测试的 BAW 相位噪声图.....	15
图 4-3. 随机振动测试的晶体振荡器单相噪声图.....	15
图 4-4. 随机振动测试的晶体振荡器两相噪声图.....	15

表格清单

表 1-1. 各种环境下的典型加速度水平.....	3
表 4-1. 相同条件下 TI BAW 振荡器和晶体振荡器性能的比较.....	14

商标

VibrationVIEW® is a registered trademark of Vibration Research Corp.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

在使用基于晶体或 MEMS 的时钟振荡器设计系统时，对振动和冲击的灵敏度是一项关键考量因素。对振动非常敏感的器件可能会对总体系统性能产生不利影响，从而影响相位噪声和抖动、频率稳定性和长期可靠性。时钟振荡器需要提供对加速力、振动和冲击具有强大耐受力的稳定时钟，因为在工艺和温度变化下，这种耐受性可以在产品的整个生命周期中提供稳定性。

用于量化振动的两个重要参数是应用于器件的加速力和振动频率。为了量化冲击，使用了加速力和施加峰值加速度的持续时间。振动和机械冲击会引起噪声和频率漂移，影响谐振器，并随着时间的推移导致系统性能降低。在振荡器中，振动和冲击是导致相位噪声和抖动增加、移频和尖峰甚至谐振器及其封装物理损坏的常见原因。相位噪声和抖动的此类降级会直接影响系统性能。通常，外部干扰通过封装耦合到微谐振器中。由于晶体振荡器从根本上依赖于压电式材料的振动和机械谐振，因此外部干扰会耦合到器件中，从而降低振荡器性能。具有足够幅度的机械冲击也会导致晶体振荡器输出端出现不可逆的频移。

与基于石英的振荡器相比，TI BAW 振荡器表现更好。TI BAW 振荡器更不易受到振动和机械冲击的影响，因为谐振器的质量更小（小几个数量级）并且谐振频率更高。由于质量较小，外部加速作用于器件的力要小得多。BAW 谐振器的半导体制造工艺进一步增强了器件的抗扰度。BAW 压电层和金属层周围是布拉格镜片，可屏蔽谐振器以使其免受环境应力的影响。BAW 振荡器还包括晶圆级封装，使振荡器成为一款强大可靠的产品。TI 的双布拉格 BAW 谐振器不包含任何活动器件，不仅能抵御环境压力，还具有更高的器件可靠性。

振动源存在于许多终端应用中，包括手持移动设备、设备机箱中的冷却风扇、工厂自动化设备、建筑设备、行驶车辆或飞机。下表提供了不同环境条件下的振动水平示例。

表 1-1. 各种环境下的典型加速度水平

环境 ⁽¹⁾	典型加速度 (g)
楼宇	静态 0.02rms
牵引车 - 拖车	(3Hz 至 80Hz) 0.2 峰值
装甲运兵车	0.5rms 至 3rms
船 - 平静的海面	0.02 至 0.1 峰值
船 - 波涛汹涌的大海	0.8 峰值
铁路	0.1 至 1 峰值
螺旋桨飞机	0.3rms 至 5rms
直升机	0.1rms 至 7rms
喷气式飞机	0.02rms 至 2rms
导弹 - 助推阶段	15 峰值

德州仪器 (TI) 的 LMK6x 振荡器用于量化 BAW 振荡器的振动和冲击性能。这些器件会在 X、Y 和 Z 方向出现不同频率的正弦振动。使用随机振动模式沿每个轴重复测试。最终测试会衡量各个器件在运行期间响应机械冲击时的瞬态频率偏差。然后，在这些测试期间记录相位噪声（包括杂散）和频移数据。

2 测试标准和测试设置

2.1 测试标准

本应用手册中的测试按照以下标准和过程进行。

- 随机振动：MIL-STD-883F 标准：方法 2026C
- 机械冲击：MIL-STD-883F 标准：方法 2002.4B
- 10g 下的正弦振动，振动频率为 50Hz、100Hz、200Hz、500Hz、1000Hz 和 2000Hz

按照之前的 MIL (军用) 标准，在随机振动之前、期间和之后记录相位噪声和抖动性能。根据机械冲击标准测试设置记录频率漂移。在不同振动频率下根据相位噪声结果产生正弦振动，并计算 BAW 振荡器的 ppb/g 值。测试设置、过程和测试结果将在本文档后续章节中提供。

2.2 振动实验室中的测试设置

正弦和随机振动测试设置如图 2-1 所示。

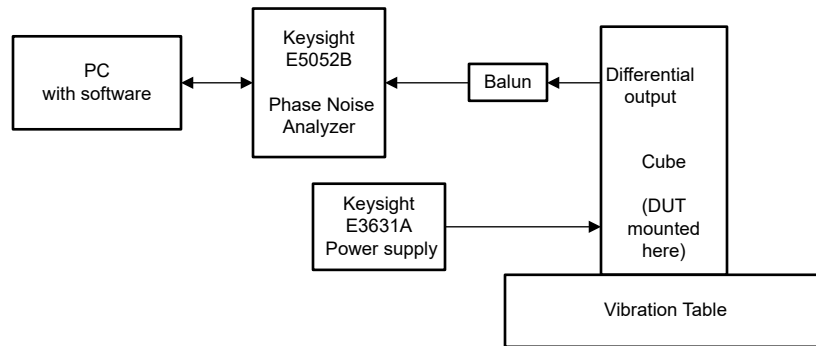


图 2-1. 正弦和随机振动测试设置图

图 2-2 显示了沿三个轴进行正弦和随机振动测试的实验室设置。

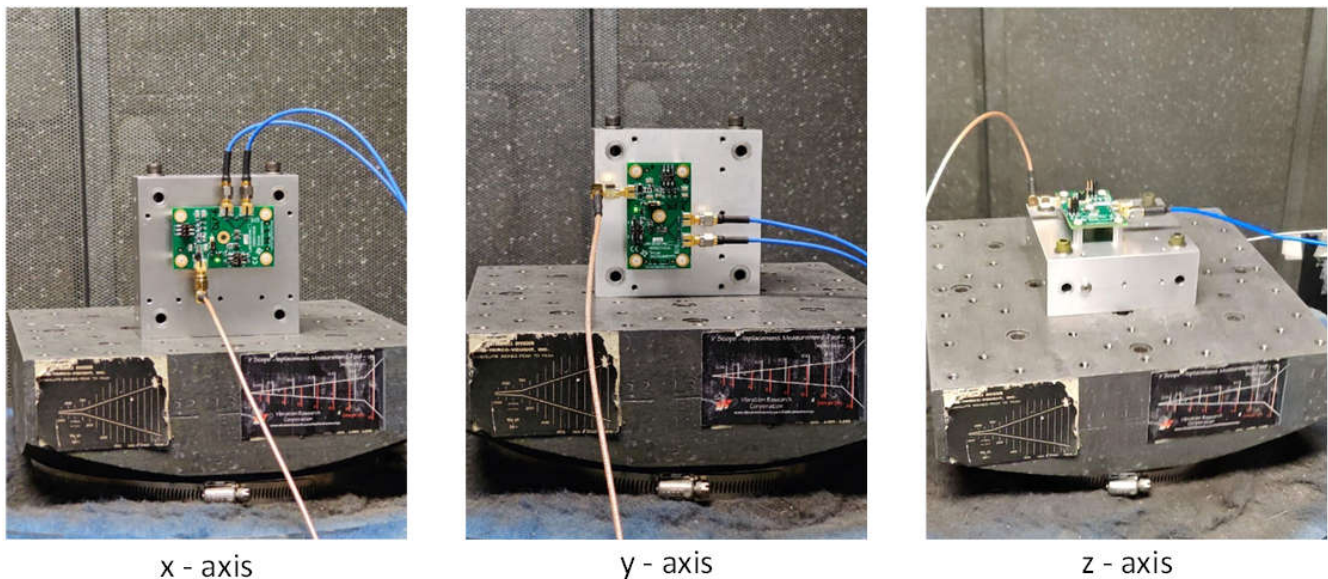


图 2-2. X、Y、Z 轴上带有评估板 (具有 DUT) 的振动测试装置

3 正弦振动、随机振动和机械冲击测试

3.1 正弦振动测试

3.1.1 正弦振动测试过程

LMK6x BAW 振荡器具有多种用于差分 and 单端输出的封装，请参阅 [LMK6x 低抖动高性能 BAW 振荡器数据表](#)，了解有关 BAW 振荡器封装选项的更多详细信息。

对于此正弦振动测试，选择了以下型号。

- LVCMOS 输出：DLE-4 (3.2mm x 2.5mm)，DLF-4 (2.5mm x 2.0mm)
- 差分输出：DLE-6 (3.2mm x 2.5mm)，DLF-6 (2.5mm x 2.0mm)。BAW 振荡器具有 LVDS、LVPECL、HCSL 输出类型。为该测试选择了 LVPECL 输出类型振荡器。

下面是在振动装置上设置受测器件 (DUT) 板以及执行正弦振动测试所涉及的步骤。

- 器件焊接在 LMK6x 评估模块 (EVM) 上，并固定到连接到振动试验台的接合板。
- Keysight E3631A 工作台电源设置为为 EVM 模块提供 3.3V 电源。
- 对于差分输出 (DLE-6 和 DLF-6 封装器件)，EVM 上提供了 LVPECL 输出终端。TC1-1-13MA+ 表面贴装射频变压器用于将差分输出转换为单端输出，并将输出连接到 Keysight E5052B 相位噪声分析仪。
- 使用 VibrationVIEW® 控制软件，振动频率在 10g 加速设置下编程为 50、100、200、500、1000、2000Hz。
- 振动机达到目标频率和强度后，会向 E5052B 相位噪声分析仪发出单次触发信号。
- 使用相位噪声分析仪捕获相位噪声数据，并针对每个振动轴 (X、Y 和 Z 轴) 收集相位噪声图和跟踪数据。
- 使用杂散功率 (归一化模式)，根据以下公式计算频率偏差：

$$fm_deviation = fm_frequency \times 10^{\left(\frac{6 + Vib_spur_power(dBc/Hz)}{20}\right)} \quad (1)$$

其中，`fm_deviation` 是频率调制偏差，`fm_frequency` 是振动频率。

- 有了频率偏差，根据以下公式计算 ppb (十亿分率)：

$$ppb = 10^9 \times \frac{fm_deviation}{carrier_frequency} \quad (2)$$

- 然后，将 ppb 值除以所设置的 G 力，以计算 ppb/g。

3.1.2 正弦振动测试的结果

正弦测试在 50Hz、100Hz、200Hz、500Hz、1000Hz 和 2000Hz 的固定正弦振动频率下进行，所有三个轴的加速度均为 10g。捕获了这些测试的相位噪声图。以下各图对应 DLF-4 封装的 Z 轴。在每张图中都可以观察到在振动频率下出现的杂散。根据测试结果和捕获的数据，计算了 BAW 振荡器以 ppb/g 为单位的振动灵敏度。

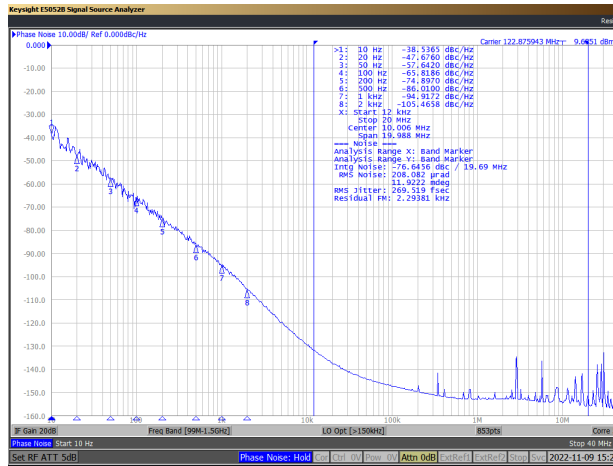


图 3-1. 正弦振动前的基线捕获

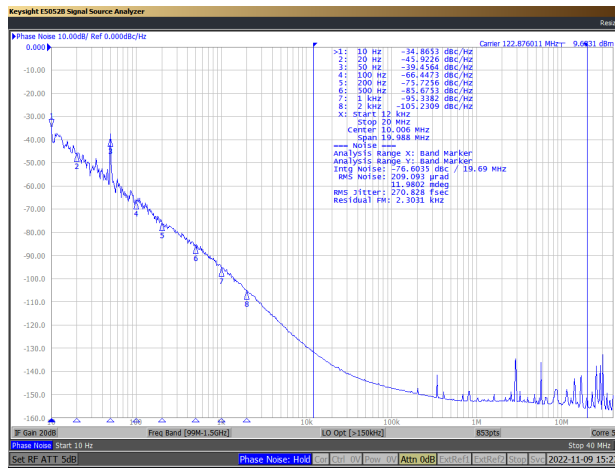


图 3-2. 50Hz 下正弦振动的捕获数据

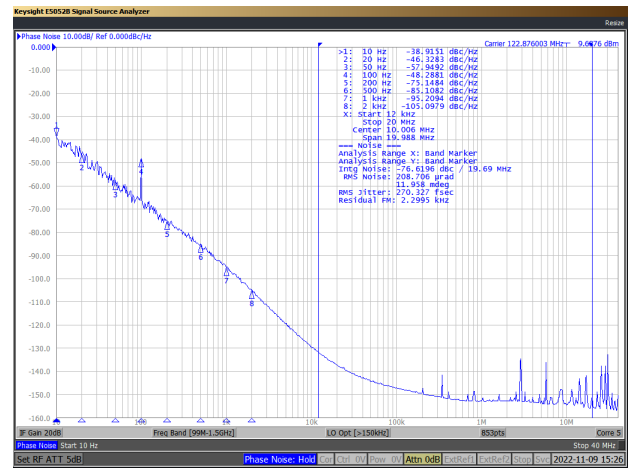


图 3-3. 100Hz 下正弦振动的捕获数据

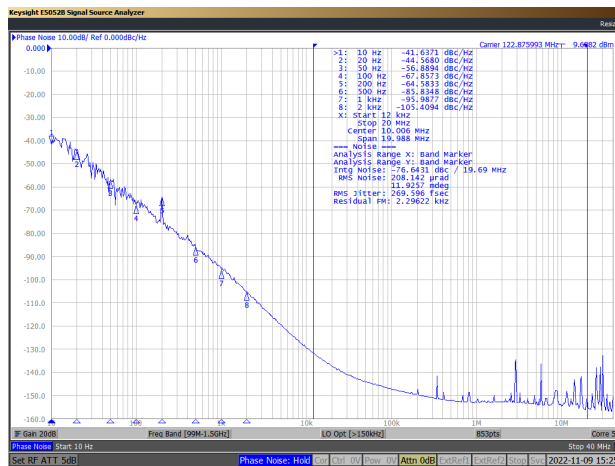


图 3-4. 200Hz 下正弦振动的捕获数据

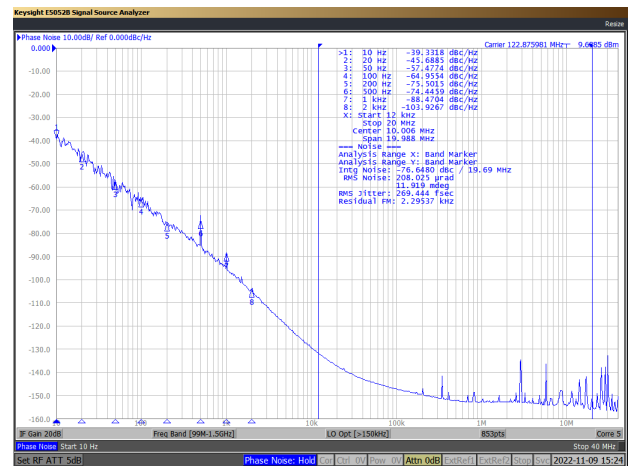


图 3-5. 500Hz 下正弦振动的捕获数据

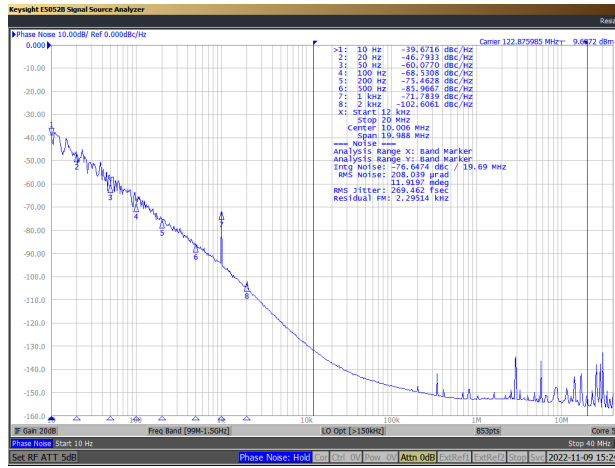


图 3-6. 1000Hz 下正弦振动的捕获数据

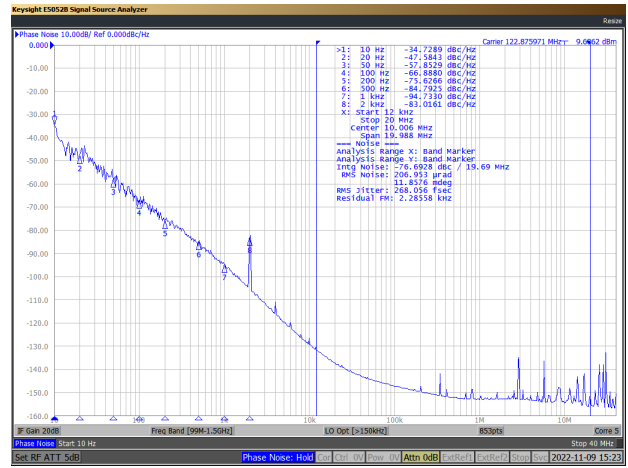


图 3-7. 2000Hz 下正弦振动的捕获数据

以下各图中显示了相位噪声图相对于振动频率的合并叠加波形。这些图显示了 DLE-4、DLF-4、DLE-6 和 DLF-6 封装的波形。

针对 LVCMOS 和 LVPECL 计算和绘制了 ppb/g。以下每幅图显示了器件在 10g 加速度时的 Z 轴数据。

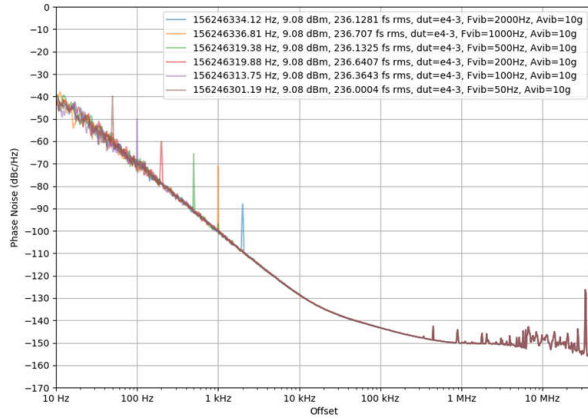


图 3-8. 4 引脚 DLE 封装上的组合正弦振动相位噪声图

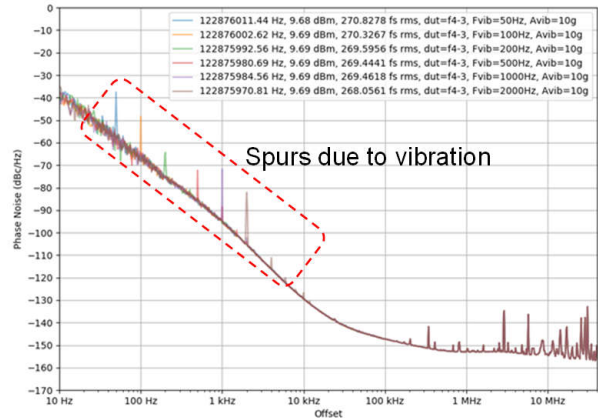


图 3-9. 4 引脚 DLF 封装上的组合正弦振动相位噪声图

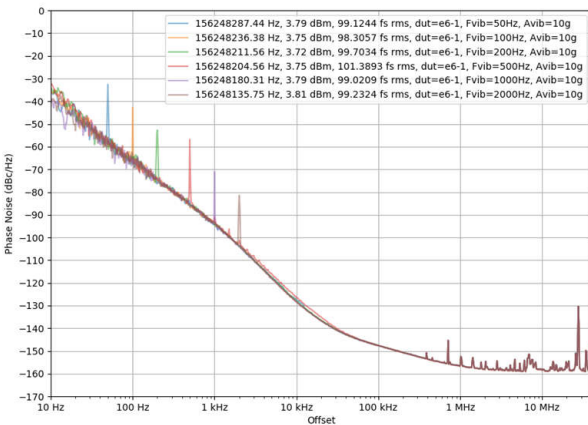


图 3-10. 6 引脚 DLE 封装上的组合正弦振动相位噪声图

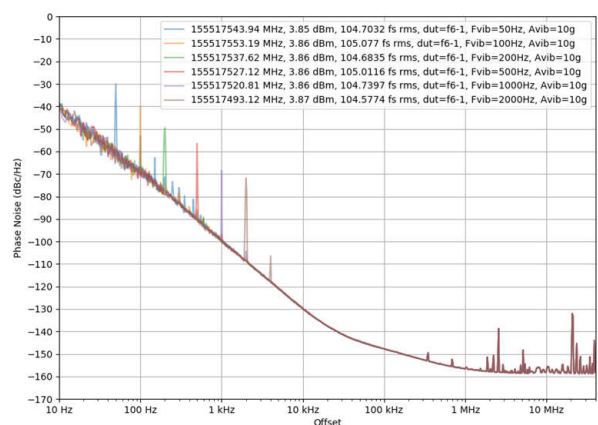


图 3-11. 6 引脚 DLF 封装上的组合正弦振动相位噪声图

针对经过测试的所有振动频率绘制了采用 DLE 和 DLF 封装的 LVCMOS 和 LVPECL 器件上为 LMK6x 计算出的 ppb/g 值。这些计算结果基于不同类型 LMK6x 封装和输出类型的各种振动频率在相位噪声测量中的振动频率杂散。节 3.1.1 中提供了公式。图 3-12 显示了振动频率与 ppb/g 值的关系。根据这些图，LMK6x LVCMOS 输出类型的振动灵敏度小于 1ppb/g，而 LMK6x 差分输出的振动灵敏度小于 2ppb/g。在图 3-12 中，上面的图是 X 轴，中间的图是 Y 轴，下面的图是 Z 轴 ppb/g 与振动频率的关系。图 3-12 中的蓝线代表 DLE 封装，绿线代表 DLF 封装。晶体振荡器的振动灵敏度在 10ppb/g 范围，这表明与晶体振荡器相比，BAW 振荡器的振动灵敏度更低。

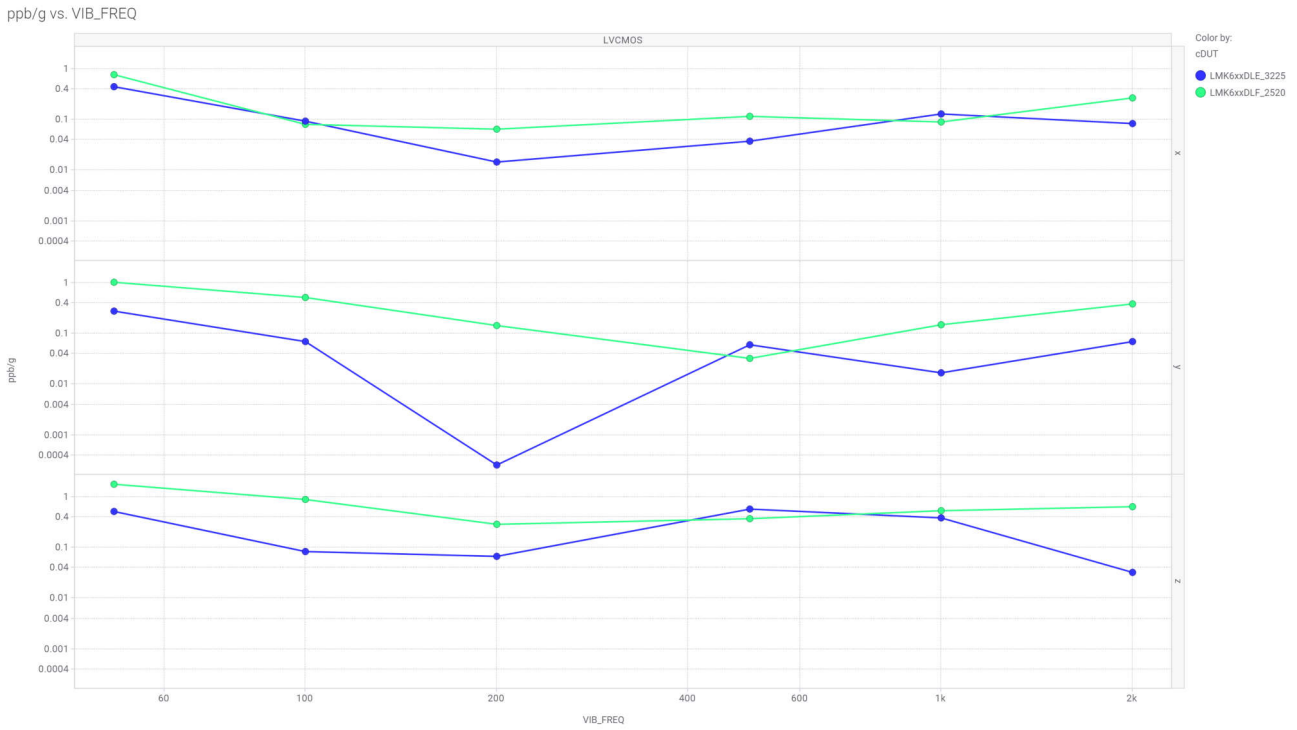


图 3-12. LVC MOS 输出的 ppb/g 与振动频率关系图 - DLE 和 DLF 封装 - X、Y、Z 轴

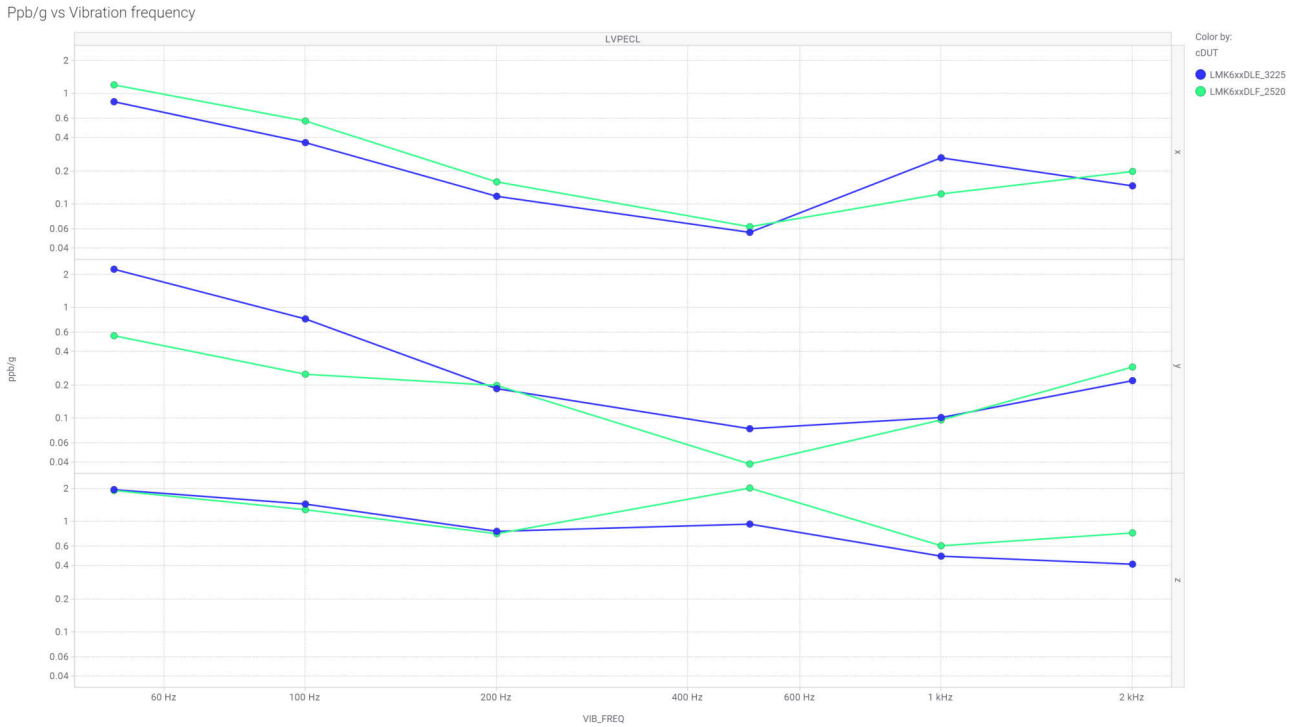


图 3-13. 差分输出的 ppb/g 与振动频率关系图 - DLE 和 DLF 封装 - X、Y、Z 轴

3.2 随机振动测试

3.2.1 随机振动测试过程

随机振动测试模式和设置遵循 MIL-STD-883F 方法 2026C。随机振动表示电子系统的真正工作环境。随机振动同时包含所有频率，因此所有产品谐振都同时激励，这比单独激励产品谐振更糟糕（如在正弦振动测试中）。随机振动测试有助于识别在正弦环境中无法重现的故障。

EVM 板的设置与节 3.1.1 中所示的设置相同。但是，随机振动的模式不同。图 3-14 中使用 VibrationVIEW® 显示了相对于振动频率的加速频谱密度，在整个测试期间都使用该软件。

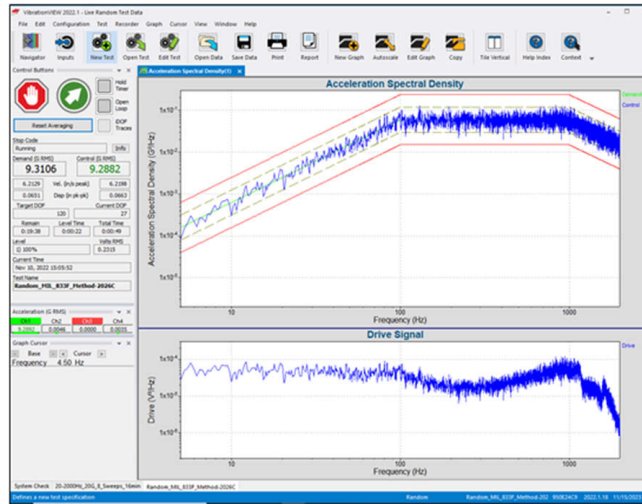


图 3-14. 用于随机振动测试的 VibrationVIEW 软件工具设置

3.2.2 随机振动测试的结果

本节提供了随机振动测试之前、期间和之后捕获的图，测试按照 MIL-STD-883F 方法 2026C 进行。

图 3-15 和图 3-16 显示了 DLE 4 引脚 (LVCMOS) 振荡器 Z 轴运动的捕获数据。

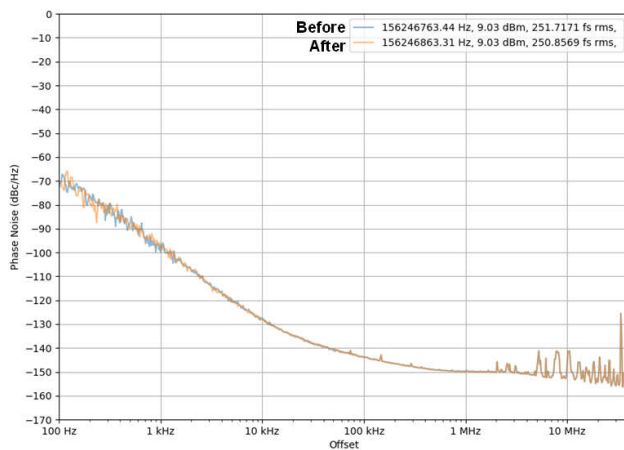


图 3-15. 4 引脚 DLE (LVCMOS) 在振动测试前后的对比图

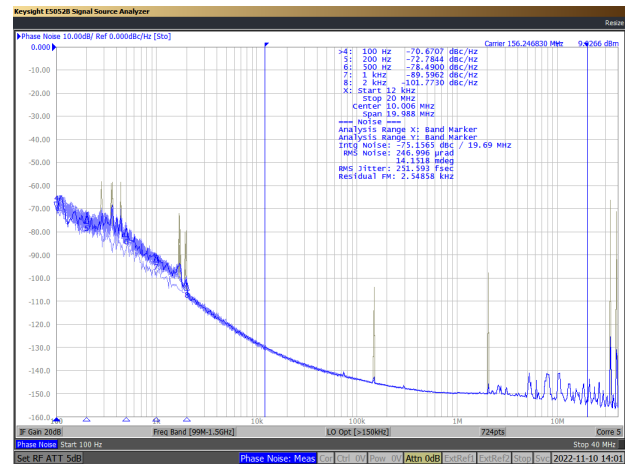


图 3-16. 4 引脚 DLE (LVCMOS) 在振动期间的捕获数据

图 3-17 和图 3-18 显示了 DLE 6 引脚 (LVPECL) 振荡器 Z 轴运动的捕获数据。

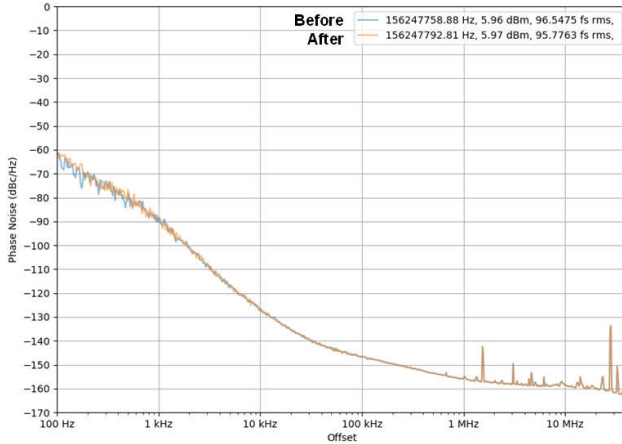


图 3-17. 6 引脚 DLE (LVPECL) 在振动测试前后的对比图

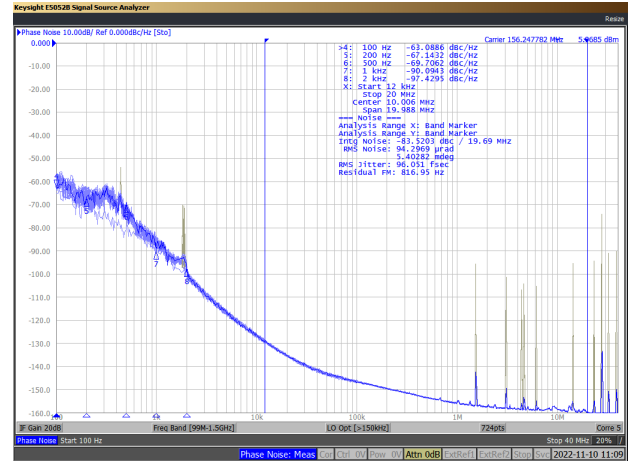


图 3-18. 6 引脚 DLE (LVPECL) 在振动测试期间的捕获数据

前面的图表明，BAW 振荡器在振动期间和之后的性能很稳定，抖动性能未下降。

3.3 机械冲击测试

3.3.1 机械冲击测试过程

对于机械冲击测试，使用了 MIL-STD-883F 方法 2002、条件 A 模式 (500g 加速度) 和条件 B 模式 (1500g 加速度)。

对于此正弦振动测试，选择了以下型号。

- LVCMOS 输出：DLE-4 (3.2mm x 2.5mm)，DLF-4 (2.5mm x 2.0mm)
- 差分输出：DLE-6 (3.2mm x 2.5mm)，DLF-6 (2.5mm x 2.0mm)

下面是在振动装置上设置受测器件 (DUT) 板以及执行机械冲击测试所涉及的步骤。

- 器件焊接在 LMK6x 评估模块 (EVM) 上，并可固定到与机械冲击测试机相连的接合板。
- Agilent E3631A 工作台电源设置为为 EVM 模块提供 3.3V 电源。
- 对于差分输出 (DLE-6 和 DLF-6 封装器件)，EVM 上提供了 LVPECL 输出终端。TC1-1-13MA+ 平衡-非平衡变压器表面贴装射频变压器用于将差分输出转换为单端输出，并将输出连接到 Keysight E5052B 相位噪声分析仪。
- 冲击参数设置如下
 - 对于 1500g，将板垂直提升 10.4 英寸。
 - 对于 500g，将板垂直提升 3.8 英寸。
 - 空气吸力将装置向下拉以达到适当的 G 力。
- 对接受测试的每个样本至少执行 3 个周期的冲击。
- 瞬态数据是在冲击测试期间获取的。
- 相位噪声数据作为冲击测试后的屏幕截图进行收集

图 3-19 中显示了冲击测试装置设置，其中显示了安装的 LMK6x EVM。



图 3-19. 冲击测试设置

3.3.2 机械冲击测试结果

图 3-20 至图 3-23 显示了机械冲击测试的结果。

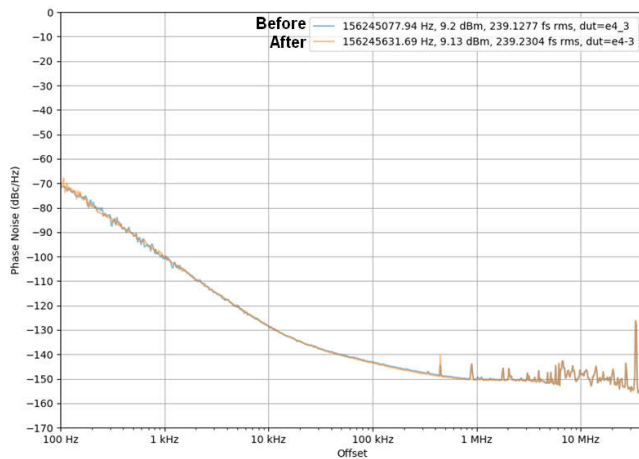


图 3-20. 4 引脚 DLE 在机械冲击测试前后的对比图，Z 轴



图 3-21. 4 引脚 DLE 在机械冲击测试期间的捕获数据，Z 轴

y 轴的标度以 Hz (赫兹) 为单位，图中任一侧都为 0.5PPM 的变化提供了标记，以方便参考帮助了解 PPM 变化。

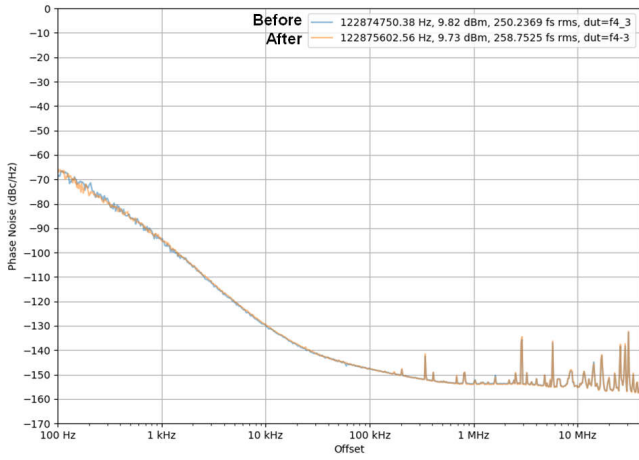


图 3-22. 4 引脚 DLF 在机械冲击测试前后的对比图，X 轴

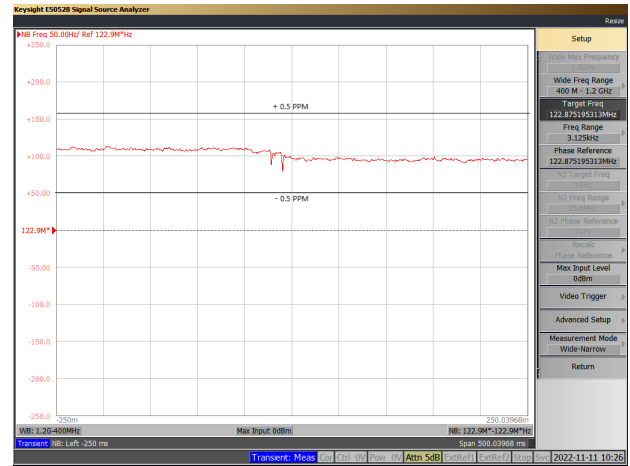


图 3-23. 4 引脚 DLF 在机械冲击测试期间的捕获数据，X 轴

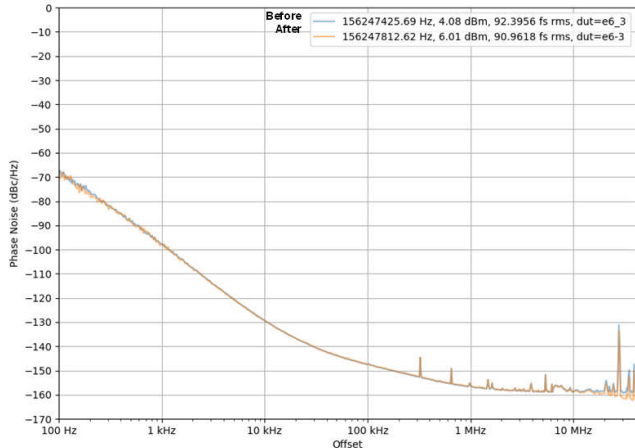


图 3-24. 6 引脚 DLE 在机械冲击测试前后的对比图，Y 轴

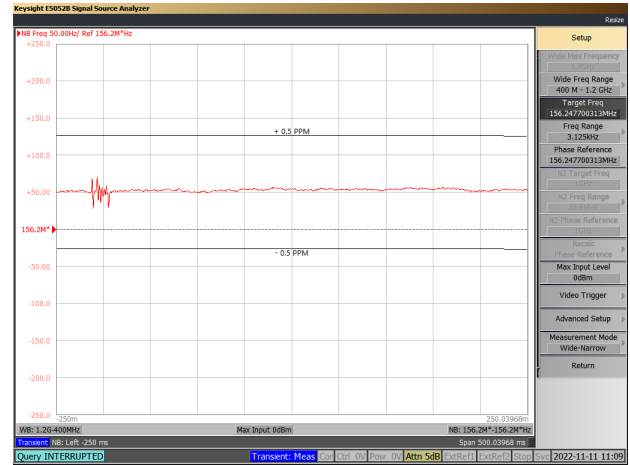


图 3-25. 6 引脚 DLE 在机械冲击测试期间的捕获数据，Y 轴

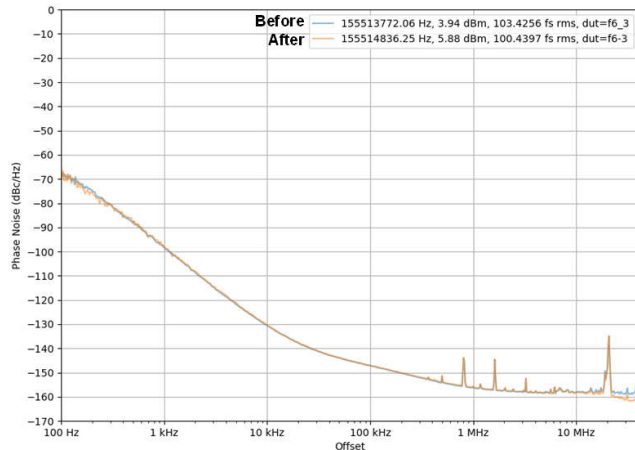


图 3-26. 6 引脚 DLF 在机械冲击测试前后的对比图，Y 轴

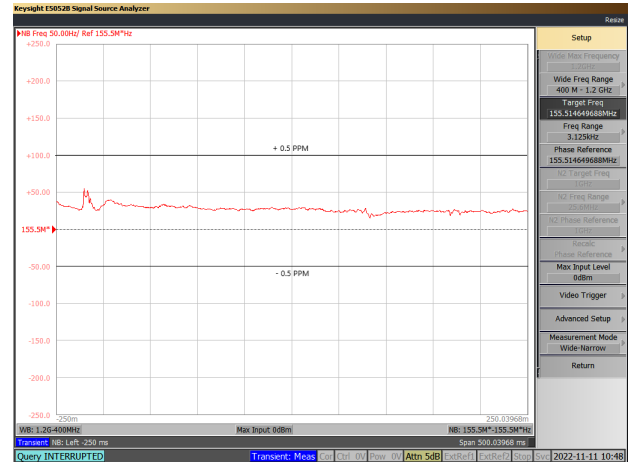


图 3-27. 6 引脚 DLF 在机械冲击测试期间的捕获数据，Y 轴

在机械冲击测试期间观察到的 ppm 变化可以忽略不计，变化小于 0.5ppm，测试完成后器件正常运行。

4 BAW 振荡器与晶体振荡器的振动性能比较

为了比较随机振动下的器件性能，选择了 TI BAW 振荡器和晶体振荡器器件并在相同测试条件下进行了测试。

表 4-1. 相同条件下 TI BAW 振荡器和晶体振荡器性能的比较

器件型号	技术	封装	频率	VDD	输出	精度
LMK6x BAW 振荡器	BAW	3.2 x 2.5 mm	156.25 MHz	3.3V	LVPECL	±25ppm
晶体振荡器 1	石英 (集成)					±50ppm
晶体振荡器 2	石英 (集成)					±30ppm

4.1 比较测试设置

选择 MIL-STD-883H 方法 2026.B 进行振动比较测试。该测试模式让 DUT 经受 7.3g rms 的加速度。图 4-1 显示了在实验中创建的振动测试设置。固定装置安装在振动台上，然后沿着垂直轴以特定幅度进行加速。在 BAW 振荡器和晶体振荡器器件上执行了三项测试。与石英振荡器相比，BAW 振荡器表现出更好的抗振性。

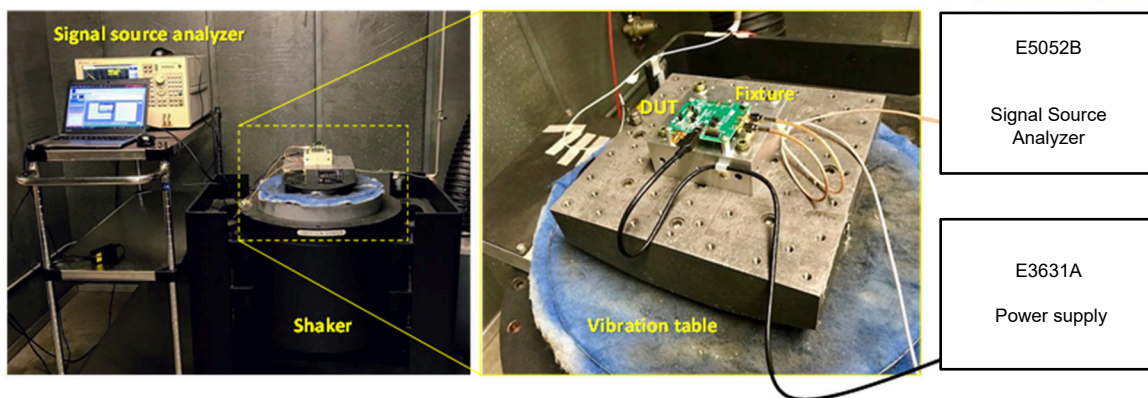


图 4-1. 振动测试实验室设置图

随机振动也会增加振荡器相位噪声。测试硬件会根据 MIL-STD-883H 中的功率频谱密度水平，在指定频率范围内产生随机振动。由于随机振动分布在一系列频率范围内，因此来自 DUT 的输出时钟的相位噪声总体上会增加，而不仅仅是在正弦振动测试中通常观察到的特定频率偏移处出现杂散。集成 RMS 相位抖动值在 12kHz 至 20MHz 范围内的集成频带上进行测量。分别在存在和不存在振动的情况下进行测量，并计算两种情况之间的 RMS 抖动差异，以确定每个 DUT 的振动引起的抖动。

4.2 对比测试结果

BAW 振荡器与对等晶体振荡器在随机振动测试下的动态相位噪声测量结果如下所示。从下图中可以看出，BAW 振荡器的抗扰度比晶体振荡器更好，RMS 抖动更低 (12kHz 至 20MHz)。

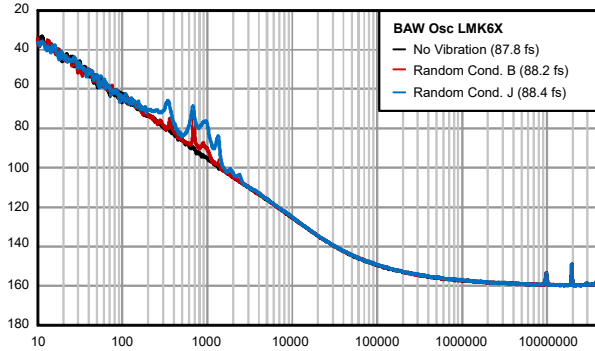


图 4-2. 随机振动测试的 BAW 相位噪声图

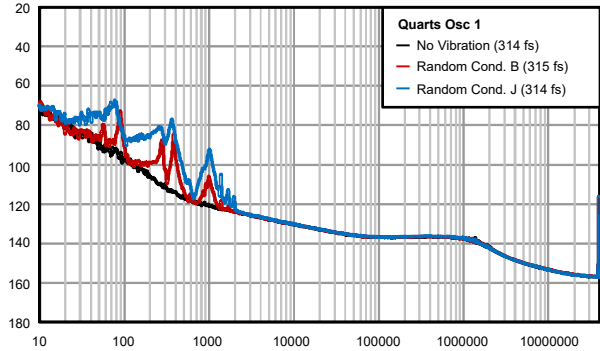


图 4-3. 随机振动测试的晶体振荡器单相噪声图

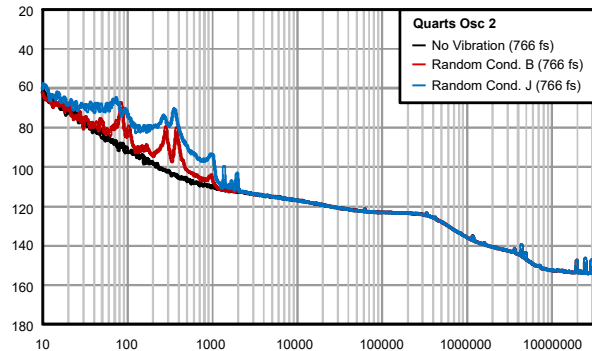


图 4-4. 随机振动测试的晶体振荡器两相噪声图

5 总结

根据本应用手册中的正弦振动、随机振动和机械冲击测试以及测试结果，可以得出以下几个重要的观察结果。

- 在正弦、随机振动和机械冲击测试期间和之后，BAW 振荡器未损坏，并且可以正常工作。
- 根据正弦振动测试，在所有类型的封装以及单端和差分端输出类型中，BAW 振荡器的振动灵敏度都小于 2ppb/g。
- 根据随机振动测试，抖动不会降低，并且器件性能在测试之前、期间和之后没有明显变化。
- 根据机械冲击测试，1500g 加速度测试期间的 ppm 变化小于 0.5ppm。

这些结果表明，BAW 振荡器稳健且高度可靠，不受振动和机械冲击的影响。

6 参考文献

1. John R. Vig.(2004).*Quartz Crystal Resonators and Oscillators*, US Army Communications-Electronics Research, Development & Engineering Center.
2. 德州仪器 (TI), [探索机械冲击和振动环境中的物联网无线连接](#) 白皮书
3. 德州仪器 (TI), [振动和冲击灵敏度：振荡器对比研究](#) 应用报告

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司