

## Application Note

**LMK6B : 利用业界领先的超低抖动 BAW 振荡器颠覆光学模块性能**

Andrea Vallenilla

## 摘要

随着光网络不断发展以满足数据流量的指数级增长，为这些系统提供时钟信号的时钟参考面临着日益严苛的性能要求。德州仪器 (TI) **LMK6Bx** 代表了振荡器技术的一项突破，通过体声波 (BAW) 谐振器技术提供业界超低的抖动性能。**LMK6Bx** 出色的相位噪声特性、宽频率覆盖范围和紧凑的外形为光学收发器模块的时序设计树立了新标准，能够在 112G、224G 和 448G PAM-4 以太网和相干光学应用中实现卓越的性能。

## 内容

1 简介.....	2
2 用于提供光收发器 DSP 时钟信号的 LMK6Bx 振荡器.....	2
3 颠覆性 BAW 技术：BAW 技术占据主导地位的原因.....	3
3.1 颠覆性的抖动性能.....	3
3.2 卓越的可靠性.....	4
3.3 出色的制造.....	4
4 在高于 312.5MHz 的频率下具有业界理想的抖动性能：树立新标准.....	5
4.1 前所未有的低抖动规格.....	5
4.2 出色的 PSRR 性能.....	7
4.3 竞争优势：主导市场.....	9
5 LMK6Bx 说明和其他优势.....	12
5.1 全面的输出选项、灵活性和其他主要规格.....	12
5.2 简化的片上集成和成本节省.....	12
5.3 取代竞品的实施指南.....	12
6 总结.....	13
7 参考资料.....	13
8 修订历史记录.....	14

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

德州仪器 (TI) 推出了 **LMK6Bx BAW 振荡器**，一款频率高于 312.5MHz 的业界超低抖动差分振荡器，专为满足 1.6T 和 3.2T 速度的下一代光学模块严格要求而设计。LMK6Bx 拥有突破性的抖动性能，在 625MHz 时可达 9.3fs，并采用颠覆性的 BAW 谐振器技术，为光收发器模块、交换机、路由器、光学设备、高速以太网应用 (112G、224G 和 448G PAM-4)、相干光学应用、NIC 和智能 NIC 应用树立了新标准。

## 2 用于提供光收发器 DSP 时钟信号的 LMK6Bx 振荡器

**LMK6Bx BAW 振荡器**旨在用作收发器模块光学 DSP 的参考。图 2-1 展示了一种典型设置，旨在实现 LMK6Bx 与任何光学收发器模块 DSP 之间的理想性能。

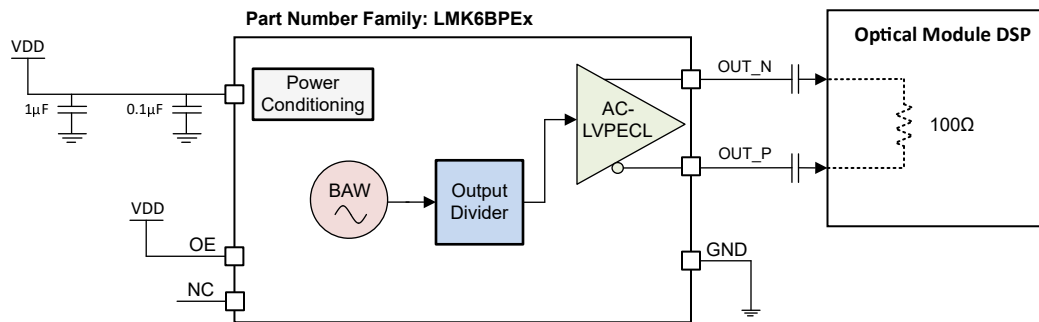


图 2-1. 光学收发器模块 DSP 的 LMK6Bx 参考时钟

LMK6Bx 在高于 312.5MHz 的频率下性能处于业界领先地位。在 625MHz 下，该振荡器采用 4MHz 高通滤波器 (HPF) 时的 RMS 抖动典型值为 9.3fs，最大值为 35fs (无滤波器)。这种提升的性能带来了 DSP 更好的 BER。

### 3 颠覆性 BAW 技术：BAW 技术占据主导地位的原因

与传统的石英和 MEMS 振荡器相比，LMK6B BAW 的谐振器技术具有根本性的优势。

#### 3.1 颠覆性的抖动性能

LMK6Bx 使用 BAW 谐振器，该谐振器可在 2.4GHz 至 2.6GHz 之间运行，频率比石英或 MEMS 谐振器频率高 50 至 100 倍，因此 BAW 成为能够以千兆赫兹频率运行的独特谐振器。这种高谐振频率会产生更尖锐的时钟边沿，从而提升本底噪声性能（高于 100kHz 偏移）。这种设计采用干净的高频谐振器进行分频以产生尖锐的输出边沿，而不是使用 PLL 从较低频率倍增，从而在性能上优于竞品。表 3-1 和图 3-1 展示了 LMK6Bx 在核心 BAW 频率下运行时的性能，可实现 17.3fs 的抖动。添加 4MHz 高通滤波器 (HPF) 时，可实现 3.8fs RMS 抖动。

表 3-1. 2.5GHz LMK6Bx 相位噪声值：BAW 频率

频率偏移	相位噪声 (dBc/Hz) - 无 HPF	相位噪声 (dBc/Hz) - 4MHz HPF
1kHz	-88.1	-160.1
10kHz	-112.5	-164.4
100kHz	-135.3	-167.2
1MHz	-153.4	-165.6
10MHz	-160.1	-160.7
100MHz	-160.4	-160.4
1000MHz	-160.4	-160.4
<b>RMS 抖动<sup>(1)</sup></b>	<b>17.3fs</b>	<b>3.8fs</b>

(1) 计算带宽为 12kHz 到 20MHz

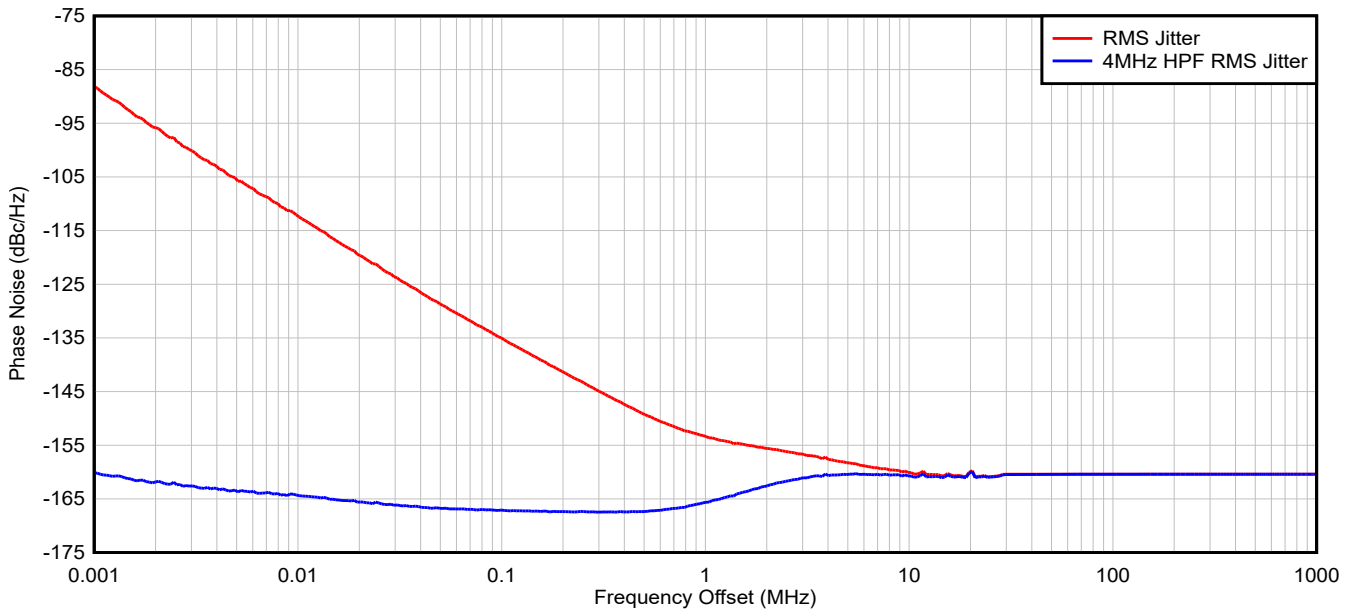


图 3-1. 2.5GHz LMK6Bx 相位噪声曲线：BAW 频率

### 3.2 卓越的可靠性

与基于石英的振荡器相比，LMK6Bx 的故障间隔平均时间 (MTBF) 高出 100 倍。BAW 谐振器结构通过固态构造实现这种提升的可靠性。[高可靠性 BAW 振荡器 MTBF 和 FIT 率计算应用手册](#)介绍了有关 BAW 稳健性的更多详细信息。

在 50Hz 至 2kHz 范围内，实现的振动性能典型值为 1ppb/g，而石英振荡器的振动性能通常为几 ppb/g 至几十 ppb/g。BAW 谐振器的机械结构提供固有的抗振性，并通过了 MIL-STD-F 方法 2007 和 MIL-STD-F 方法 2002 标准，进一步说明如[独立 BAW 振荡器相对于石英振荡器的优势](#)中所示。这些测试方法可验证各种机械应力和环境条件下的性能。

可靠性优势源于 BAW 谐振器的半导体制造工艺，该工艺无需石英晶体中的引线键合与机械安装结构。这种构造减少了与机械应力和热循环相关的故障模式。

### 3.3 出色的制造

LMK6Bx 完全在 TI 制造工厂中制造，采用标准塑料封装和大容量半导体晶圆工艺。与依赖外部晶体供应商、ASIC 供应商、制造或专用封装工艺的振荡器相比，这种集成制造方法可缩短交货周期并实现一致的供应。

BAW 谐振器与其他半导体元件集成，支持与其他 IC 共封装。标准的半导体制造消除了与分立式晶体安装相关的组装复杂性，降低了制造不确定性并实现了更高的产量。

## 4 在高于 312.5MHz 的频率下具有业界理想的抖动性能：树立新标准

### 4.1 前所未有的低抖动规格

LMK6Bx 提供业界领先的抖动性能，优于同类竞品。在较高频率下，LMK6B 在 625MHz AC-LVPECL 时可实现 35fs 的最大 RMS 抖动，这是业界超低的绝对水平；在 312.5MHz AC-LVPECL 时可实现 28fs 的典型 RMS 抖动，同样展现了出色的典型性能。

凭借这种出色的本底噪声，在应用 SerDes 时钟数据恢复 (CDR) 4MHz 高通滤波器 (HPF) 时可实现个位数抖动值，如图 4-1 和图 4-2 所示。625MHz 时的 RMS 抖动典型值为 9.6fs，312.5MHz 时的 RMS 抖动典型值为 19.7fs。这些出色的性能为 PAM-4、以太网时钟应用和相干光学应用提供了前所未有的时序裕量，从而直接提升系统性能并降低误码率 (BER)。

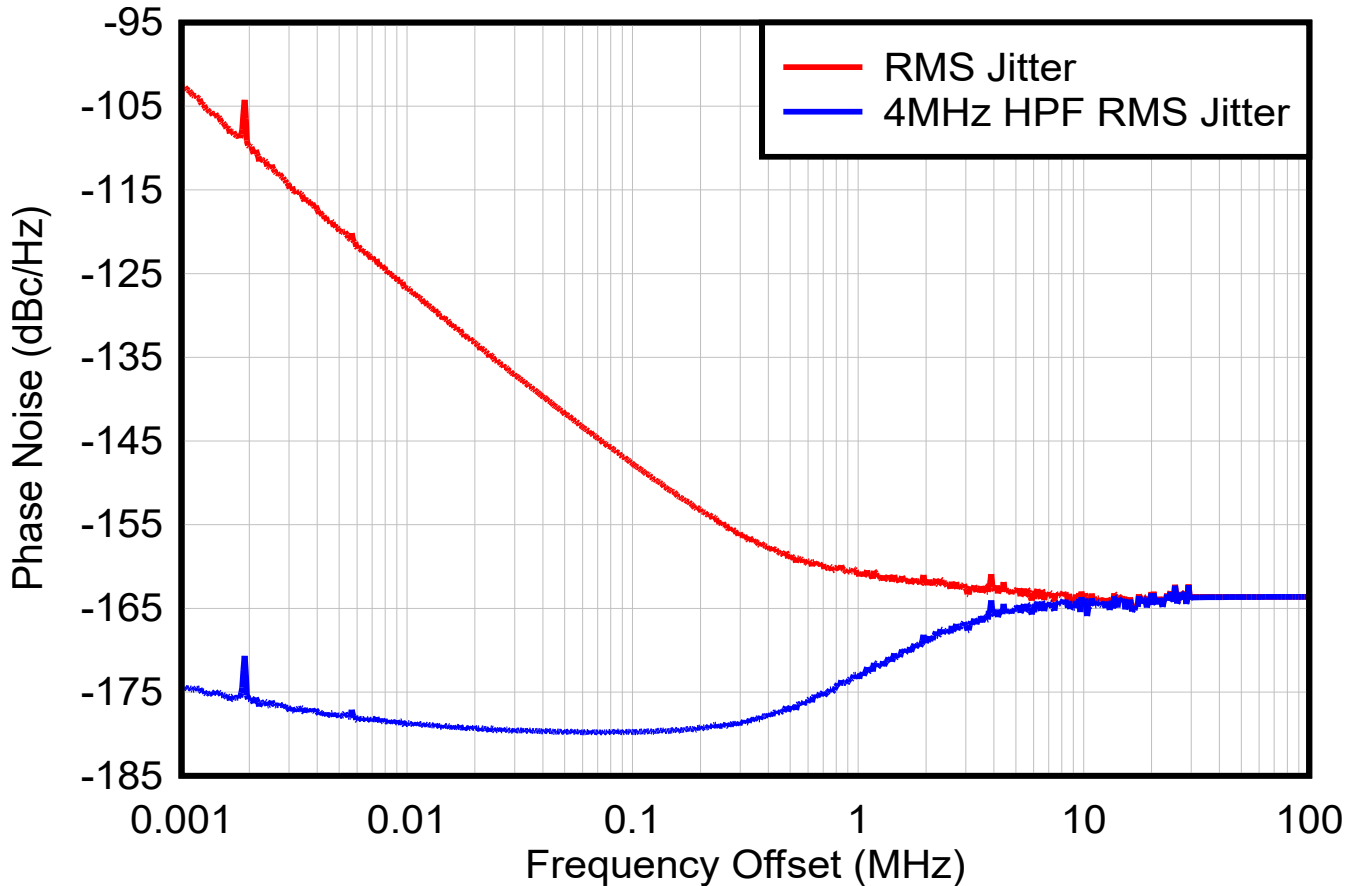


图 4-1. LMK6Bx AC-LVPECL 625MHz 典型相位噪声图 - 4MHz HPF RMS 抖动 9.6fs 和 RMS 抖动 18.1fs (12kHz 至 20MHz)

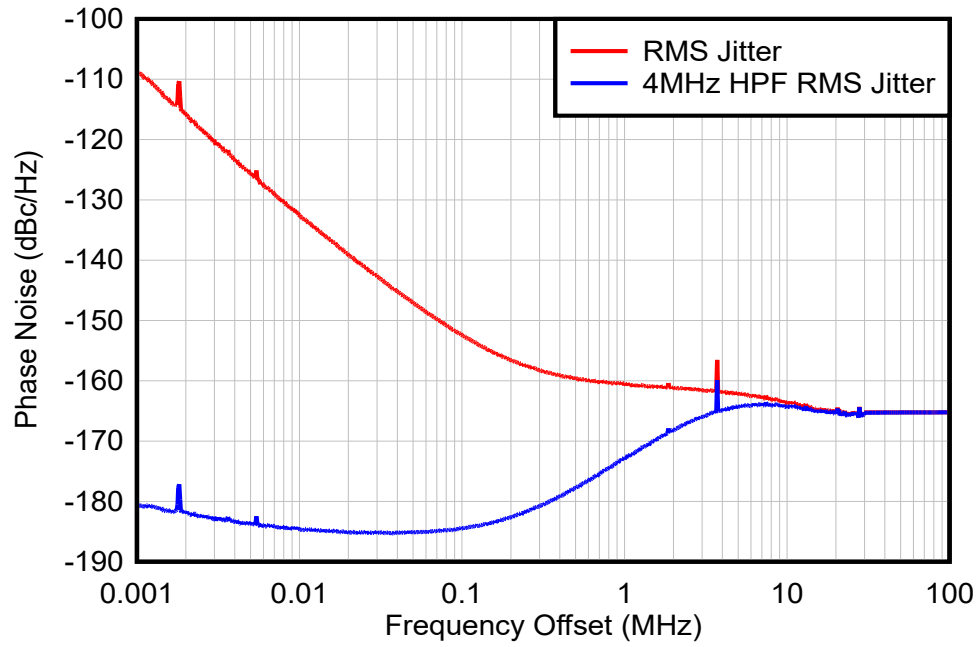


图 4-2. LMK6Bx AC-LVPECL 312.5MHz 典型相位噪声图 - 4MHz HPF RMS 抖动 19.7fs 和 RMS 抖动 28.2fs (12kHz 至 20MHz)

## 4.2 出色的 PSRR 性能

LMK6Bx 在各种输出频率和输出类型下均具有出色的 PSRR 性能。在 156.25MHz 条件下，当电源纹波为 50mVpp 且纹波频率高于 10kHz 时，LMK6Bx LVDS 无需去耦电容器即可保持低于 -78dBc 的 PSRR。在 312.5MHz 条件下，不使用去耦电容器时 PSRR 保持低于 -74dBc。使用去耦电容器时，LMK6Bx LP-HCSL PSRR 在 156.25MHz 时低于 -83dBc，在 312.5MHz 时低于 -79dBc。表 4-1 至表 4-4 进一步详细说明了 LMK6B 在施加 50mVpp 电源纹波时，针对纹波频率高于 10kHz、各种输出类型、使用和不使用去耦电容器以及各种输出频率的出色性能。

**表 4-1. 在 156.25MHz 和 50mVpp 纹波条件下，不使用去耦电容器时，LMK6Bx 在各种纹波频率和输出类型下的 PSRR 性能**

纹波频率 (kHz)	杂散 (dBc)		
	LVDS	LP-HCSL	AC-LVPECL
10	-86.1	-86.8	-80.8
100	-79.4	-87.0	-76.5
300	-79.3	-87.6	-75.3
500	-79.4	-86.9	-75.4
800	-78.1	-84.8	-75.3
1000	-78.1	-83.3	-75.2
1500	-78.7	-80.0	-75.5
1800	-78.7	-78.7	-75.6
2000	-78.8	-77.8	-75.8
4000	-80.5	-80.3	-76.4
7000	-85.5	-143.1	-75.5
10000	-90.7	-148.8	-132.5

**表 4-2. 在 312.5MHz 和 50mVpp 纹波条件下，不使用去耦电容器时，LMK6Bx 在各种纹波频率和输出类型下的 PSRR 性能**

纹波频率 (kHz)	杂散 (dBc)		
	LVDS	LP-HCSL	AC-LVPECL
10	-81.0	-77.5	-69.7
100	-74.0	-87.6	-63.3
300	-74.2	-82.3	-62.5
500	-74.4	-78.2	-62.6
800	-74.2	-73.9	-62.4
1000	-74.2	-71.6	-62.4
1500	-74.4	-67.3	-62.6
1800	-74.6	-65.8	-62.7
2000	-74.7	-65.0	-62.9
4000	-75.0	-67.2	-64.8
7000	-132.2	-133.5	-124.1
10000	-133.7	-138.4	-126.2

**表 4-3. 在 156.25MHz 和 50mVpp 纹波条件下，使用 0.1 μF 去耦电容器时，LMK6Bx 在各种纹波频率和输出类型下的 PSRR 性能**

纹波频率 (kHz)	杂散 (dBc)		
	LVDS	LP-HCSL	AC-LVPECL
10	-84.0	-95.4	-78.9
100	-86.7	-108.0	-82.1
300	-95.6	-155.4	-91.1
500	-100.0	-158.3	-95.7

**表 4-3. 在 156.25MHz 和 50mVpp 纹波条件下，使用 0.1  $\mu$ F 去耦电容器时，LMK6Bx 在各种纹波频率和输出类型下的 PSRR 性能 (续)**

纹波频率 (kHz)	杂散 (dBc)		
	LVDS	LP-HCSL	AC-LVPECL
800	-102.4	-158.5	-99.4
1000	-104.2	-158.1	-100.9
1300	-106.4	-159.0	-103.0
1500	-107.6	-158.7	-104.1
1800	-108.8	-158.5	-105.4
2000	-109.3	-159.8	-106.1
3000	-160.0	-160.0	-108.4
4000	-161.9	-159.3	-109.3
5000	-163.4	-161.0	-159.2

**表 4-4. 在 312.5MHz 和 50mVpp 纹波条件下，使用 0.1  $\mu$ F 去耦电容器时，LMK6Bx 在各种纹波频率和输出类型下的 PSRR 性能**

纹波频率 (kHz)	杂散 (dBc)		
	LVDS	LP-HCSL	AC-LVPECL
10	-79.6	-76.2	-69.2
100	-82.6	-96.5	-70.6
300	-91.8	-101.2	-80.0
500	-96.3	-102.1	-84.6
800	-99.7	-102.4	-88.5
1000	-101.2	-102.9	-90.3
1300	-103.3	-104.3	-92.6
1500	-104.5	-105.2	-93.8
1800	-106.0	-105.2	-95.5
2000	-106.0	-106.2	-96.4
3000	-158.0	-157.5	-100.1
4000	-101.6	-102.9	-102.8
4900	-160.3	-158.1	-104.3

### 4.3 竞争优势：主导市场

#### 4.3.1 LMK6B 与竞品的 PSRR 性能对比

针对主要竞品的独立测试表明，LMK6B 具有出色的 PSRR 性能。我们对两款振荡器执行的两项测试均以 156.25MHz 运行：LMK6Bx 采用 AC-LVPECL 输出类型和 2.5V 电源，振荡器 1 采用 LVDS 输出类型和 1.8V 电源。

如果不使用任何去耦电容器，LMK6Bx 在所有纹波频率下的性能均优于振荡器 1，在 5MHz 以上频率的 PSRR 性能高出 15dBc。图 4-3 展示了用于测试两款振荡器的 PSRR 设置，表 4-5 汇总了在振荡器之间收集的数据。

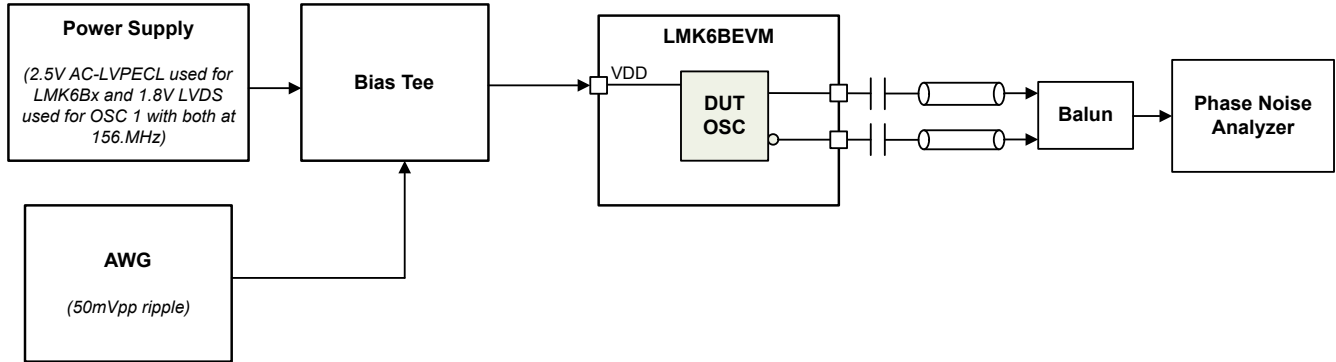


图 4-3. 不使用任何去耦电容器的 PSRR 测试设置

表 4-5. 不使用任何去耦电容器时 LMK6Bx 与振荡器 1 之间的 PSRR 性能比较

纹波频率	LMK6B 杂散 (dBc)	振荡器 1 杂散 (dBc)
50kHz	-60.41	-60.40
100kHz	-61.20	-60.01
200kHz	-62.12	-60.44
500kHz	-63	-61.8
1MHz	-61.77	-61.23
2MHz	-64.95	-59.243
5MHz	-73.85	-58.65
10MHz	-76.88	-61.49
15MHz	-79.33	-64.873
19MHz	-81.3	-67.87
20MHz	-81.11	-68.47

使用 0.1  $\mu$ F 去耦电容器时，LMK6Bx 可在所有纹波频率下实现比振荡器 1 高出 3dBc 至 6dBc 的性能。对于 50kHz 以上的纹波频率，LMK6Bx 的每杂散性能均小于 -71dBc。图 4-4 显示了用于测试两款振荡器的 PSRR 设置，表 4-6 汇总了获得的数据。

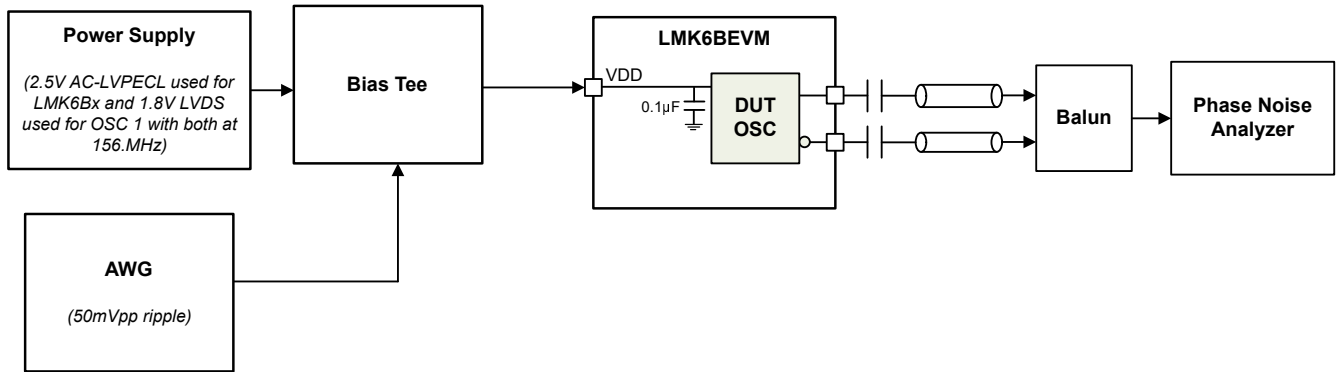


图 4-4. 使用 0.1  $\mu$ F 去耦电容器的 PSRR 测试设置

表 4-6. 使用 0.1  $\mu$ F 去耦电容器时 LMK6Bx 与振荡器 1 之间的 PSRR 性能比较

纹波频率	LMK6B 杂散 (dBc)	振荡器 1 杂散 (dBc)
50kHz	-71.21	-68.26
100kHz	-72.11	-65.59
200kHz	-75.56	-69.89
500kHz	-80.68	-75.96
1MHz	-88.36	-85
2MHz	-93.80	-90.24
5MHz	-100.25	-93.70

### 4.3.2 全面竞品对比

表 4-7 列出了 LMK6Bx 优于竞品或可与竞品匹敌的主要参数。总之，LMK6Bx 的输出频率比竞品高四倍，通过向 DSP 的 PLL PFD 提供更高的输入频率，实现更优的 DSP PLL 性能。LMK6Bx 在 625MHz 下还拥有市场上更低的输出抖动，可实现更好的 BER 结果。

表 4-7. 光学模块主要厂商竞品对比

供应商	TI	供应商 1		供应商 2	
器件型号	LMK6B	振荡器 1	振荡器 2	振荡器 3	振荡器 4
超小封装	2.0mm x 1.6mm	2.0mm x 1.6mm	2.5mm x 2.0mm	2.0mm x 1.6mm	2.0mm x 1.6mm
最宽温度范围	-40°C 至 105°C	-40°C 至 105°C	-40°C 至 105°C	-40°C 至 105°C	-40°C 至 105°C
最严格的频率稳定性 <sup>(1)</sup>	±20ppm	±20ppm	±50ppm	±20ppm	±20ppm
老化	85°C 条件下 10 年	25°C 条件下 10 年	25°C 条件下 10 年	85°C 条件下 10 年	85°C 条件下 10 年
输出类型选项	LVDS、HS-LVDS、AC-LVPECL、LP-HCSL、自定义摆幅	LVPECL、LVDS、HS-LVDS、HCSL	LVPECL、LVDS、HS-LVDS	LVDS、LVPECL、HCSL、LP-HCSL、FlexSwing	LVDS、LVPECL、HCSL、LP-HCSL、FlexSwing
最高输出频率	2500MHz	500MHz	625MHz	644.53125MHz	625MHz
156.25MHz 时的 RMS 抖动 (12kHz 至 20MHz)	AC-LVPECL : 47fs (典型值)	LVPECL : 70fs (最大值)	不适用	LVPECL : 100fs (最大值)	LVPECL : 100fs (最大值)
	LVDS : 52fs (典型值)	LVDS : 60fs (最大值)	不适用	LVDS : 100fs (最大值)	LVDS : 100fs (最大值)
	LP-HCSL : 44fs (典型值)	HCSL : 70fs (最大值)	不适用	HCSL 或 LP-HCSL : 100fs (最大值)	HCSL 或 LP-HCSL : 100fs (最大值)
625MHz 时的 RMS 抖动 (12kHz 至 20MHz)	AC-LVPECL : 35fs (最大值)	不适用	LVPECL : 40fs (最大值)	数据未公开提供	数据未公开提供
	LVDS : 35fs (最大值)	不适用	LVDS : 40fs (最大值)	数据未公开提供	数据未公开提供
	LP-HCSL : 50fs (最大值)	不适用	HCSL : 不适用	数据未公开提供	数据未公开提供

(1) 包含所有因素，包括下行所示的老化因素

## 5 LMK6Bx 说明和其他优势

### 5.1 全面的输出选项、灵活性和其他主要规格

LMK6Bx 是一款固定频率、出厂已编程、超低抖动的 BAW 振荡器，提供无与伦比的多功能性，具有多种出厂编程的输出格式：LVDS、HS-LVDS、AC-LVPECL、LP-HCSL 和自定义摆幅。HS-LVDS 和自定义摆幅输出的摆幅均可按 50mVppd 的步长进行编程：对于 3.3V 电源，范围从 350mVppd 至 2Vppd；对于 2.5V 电源，自定义摆幅范围从 350mVppd 至 1.5Vppd，而 HS-LVDS 范围从 350mVppd 至 1.6Vppd。LMK6Bx 还有两个功能引脚。引脚 1 具有输出使能 (OE) 和待机 (ST) 控制功能，引脚 2 提供输出频率选择 (FSEL)，其中 OPN 中指定的频率可进行二分频或四分频。LMK6Bx 是能够为光学模块市场中使用的 3 种最常见频率提供一个 OPN 的市售独特振荡器，其简化了供应和订购过程。图 5-1 展示了 LMK6Bx 的方框图。

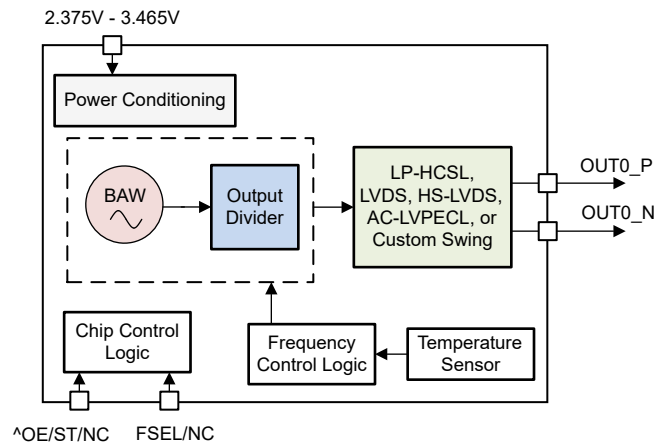


图 5-1. LMK6Bx 简化方框图

该振荡器可在 2.375V 至 3.465V 的电压范围内运行，工作温度为  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $+105^{\circ}\text{C}$  (PCB 温度)，并可实现  $\pm 25\text{ppm}$  (在  $25^{\circ}\text{C}$  PCB 条件下 10 年老化) 或  $\pm 20\text{ppm}$  (在  $85^{\circ}\text{C}$  PCB 条件下 10 年老化) 的总频率精度。LMK6Bx 采用  $2.0\text{mm} \times 1.6\text{mm}$ 、 $2.5\text{mm} \times 2.0\text{mm}$  和  $3.2\text{mm} \times 2.5\text{mm}$  封装尺寸。有关更多信息，请参阅 [LMK6Bx 数据表](#)。

### 5.2 简化的片上集成和成本节省

LMK6Bx 不仅集成了稳压器，可省去外部 LDO 和铁氧体磁珠，而且简化了输出终端，减少了所需无源元件的数量。这种集成方法减小了 PCB 面积并降低了系统成本，是空间受限型应用的理想选择。

### 5.3 取代竞品的实施指南

LMK6Bx 可用于取代竞争对手的 LVPECL、LVDS、HS-LVDS、LP-HCSL 和 HCSL 振荡器。要取代 LVDS、HS-LVDS 和 LP-HCSL 振荡器，LMK6Bx 可以即插即用，无需任何改动。对于 LVPECL 和 HCSL 竞品振荡器，由于 LMK6Bx 需要的外部元件更少 (可节省面积和成本)，因此需要进行一些更改。有关如何使用 LMK6Bx 取代 LVPECL 和 HCSL 振荡器的详细说明，请参阅 [LMK6Bx 数据表](#)。

## 6 总结

LMK6B 代表了光学模块振荡器技术的范式转变。LMK6B 将颠覆性的 BAW 谐振器技术与业界领先的抖动性能、全面的输出选项和集成设计特性相结合，为下一代光学系统提供了无与伦比的价值。LMK6Bx 的主要差异化优势包括：

- 在高频下具有业界超低的抖动 ( 625MHz HS-LVDS 时的 4MHz HPF RMS 抖动为 9.3fs )
- 出色的 PSRR 性能，对于 HS-LVDS 低于 -85dBc，且杂散比某些竞品低 15dBc
- 业界超高频率输出，在 3.8fs HS-LVDS 4MHz HPF RMS 抖动时为 2.5GHz 输出
- 通过消除外部 LDO、铁氧体磁珠和终端无源器件来减小面积并降低成本，实现更高系统集成度的设计
- 利用 TI 工厂实现卓越的制造和供应能力，从而缩短交货周期

对于需要绝对理想时序性能、超低系统成本和更短交货周期的光学模块设计人员而言，LMK6Bx 是一种明确的解决方案。立即联系德州仪器 (TI)，开始使用业界更先进的振荡器技术进行设计。

## 7 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[LMK6Bx 数据表](#)，数据表。
2. 德州仪器 (TI)，[高可靠性 BAW 振荡器 MTBF 和 FIT 率计算](#)，应用手册。
3. 德州仪器 (TI)，[独立 BAW 振荡器相对于石英振荡器的优势](#)，应用手册。

## 8 修订历史记录

Changes from Revision * (March 2026) to Revision A (May 2026)	Page
• 已更正排印错误.....	9

## 重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月