

Application Note

LMK6B: 業界をリードする超低ジッタ BAW 発振器による光学モジュールの革新的性能

Andrea Vallenilla

概要

データトラフィックの指数関数的な増加に対応して光学回路が進化するにつれ、これらのシステムにクロックを供給するクロックリファレンスの性能要件はますます厳しくなっています。テキサス インストルメンツの **LMK6Bx** は発振器技術の画期的な成果であり、バルク超音波 (BAW) 共振器技術を使用して業界最小のジッタ性能を実現しています。LMK6Bx の非常に優れた位相ノイズ特性、広い周波数範囲、コンパクトなフットプリントにより、光学トランシーバ モジュールのタイミング設計の新基準が確立され、112G、224G、448G の PAM-4 イーサネットと、コヒーレント光学アプリケーションで優れた性能を実現します。

目次

1 概要.....	2
2 光学トランシーバ DSP クロック用 LMK6Bx 発振器.....	2
3 革新的な BAW テクノロジー: BAW テクノロジーが支配的である理由.....	3
3.1 革新的なジッタ性能.....	3
3.2 傑出した信頼性.....	4
3.3 製造上の長所.....	4
4 312.5MHz を超える周波数での業界最高のジッタ性能: 新たな基準の設定.....	5
4.1 かつてない低ジッタ仕様.....	5
4.2 非常に優れた PSRR 性能.....	7
4.3 競争上の優位性: 市場の支配.....	9
5 LMK6Bx の説明とその他の利点.....	12
5.1 包括的な出力オプション、フレキシビリティ、その他の主な仕様.....	12
5.2 チップ内統合の効率化とコスト削減.....	12
5.3 競合製品を置き換えるための実装ガイドライン.....	12
6 まとめ.....	13
7 参考資料.....	13

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 概要

テキサス インストルメンツは、312.5MHz を上回る業界最小ジッタの差動発振回路である **LMK6Bx BAW 発振器** を発表しました。この製品は、速度が 1.6T および 3.2T の次世代光学モジュールの厳しい要件を満たすよう特別に設計されています。LMK6Bx は、625MHz で 9.3fs を達成する画期的なジッタ性能と革新的な BAW 共振器技術を搭載しており、光学トランシーバ モジュール、スイッチ、ルータ、光学機器、高速イーサネット アプリケーション (112G、224G、448G PAM-4)、コヒーレント光学アプリケーション、NIC、スマート NIC の各アプリケーションの新基準です。

2 光学トランシーバ DSP クロック用 LMK6Bx 発振器

LMK6Bx BAW 発振器 はトランシーバ モジュールの光学 DSP への基準として機能するように設計されています。図 2-1 は、LMK6Bx と任意の光学トランシーバ モジュールの DSP 間で最高の性能を達成することを目的とした標準的な設定を示しています。

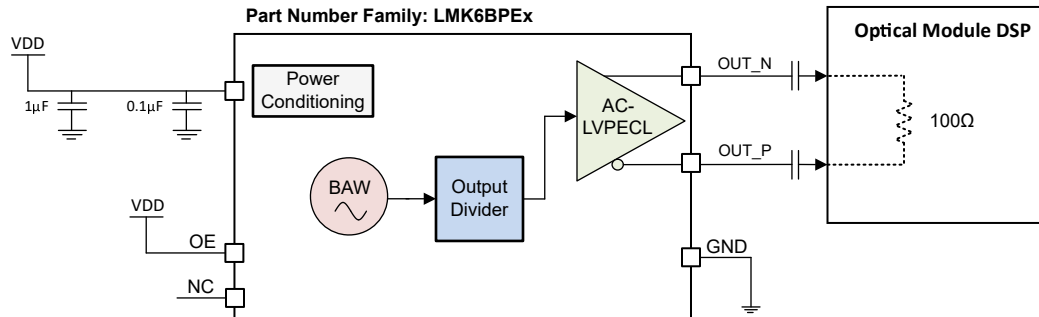


図 2-1. 光学トランシーバ モジュールの DSP 用 LMK6Bx リファレンス クロック

LMK6Bx は 312.5MHz を上回る周波数における性能で業界をリードしています。625MHz で、この発振器は 4MHz ハイパスフィルタ (HPF) による 9.3fs の RMS ジッタ (標準値) および 35fs の最高値 (フィルタなし) を達成しています。この性能改善により DSP での BER が向上します。

3 革新的な BAW テクノロジー:BAW テクノロジーが支配的である理由

LMK6B BAW の共振器テクノロジーには、従来の水晶振動子や MEMS 発振器を超える抜本的な利点があります。

3.1 革新的なジッタ性能

LMK6Bx は、水晶振動子または MEMS 共振器の周波数より 50 ~ 100 倍高い 2.4GHz ~ 2.6GHz で動作する BAW 共振器を使用しており、BAW はギガヘルツ周波数で動作する唯一の共振器です。この高い共振周波数によりクロック エッジがより鮮明になり、ノイズフロア性能が向上します (100kHz 以上のオフセット)。これにより、PLL を使って低周波から増幅する代わりに、分割して鋭い出力エッジを作るクリーンで高周波の共振器を使うことができ、競合製品より優れた効率を実現できます。表 3-1 と 図 3-1 は、コア BAW 周波数で動作し 17.3fs のジッタを実現する LMK6Bx の性能を示しています。4MHz ハイパスフィルタ (HPF) を追加すると、3.8fs RMS のジッタを達成できます。

表 3-1. 2.5GHz LMK6Bx の位相ノイズの値:BAW 周波数

周波数オフセット	位相ノイズ (dBc/Hz) - HPF なし	位相ノイズ (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
RMS ジッタ (1)	17.3fs	3.8fs

(1) 12kHz ~ 20MHz の帯域幅で計算

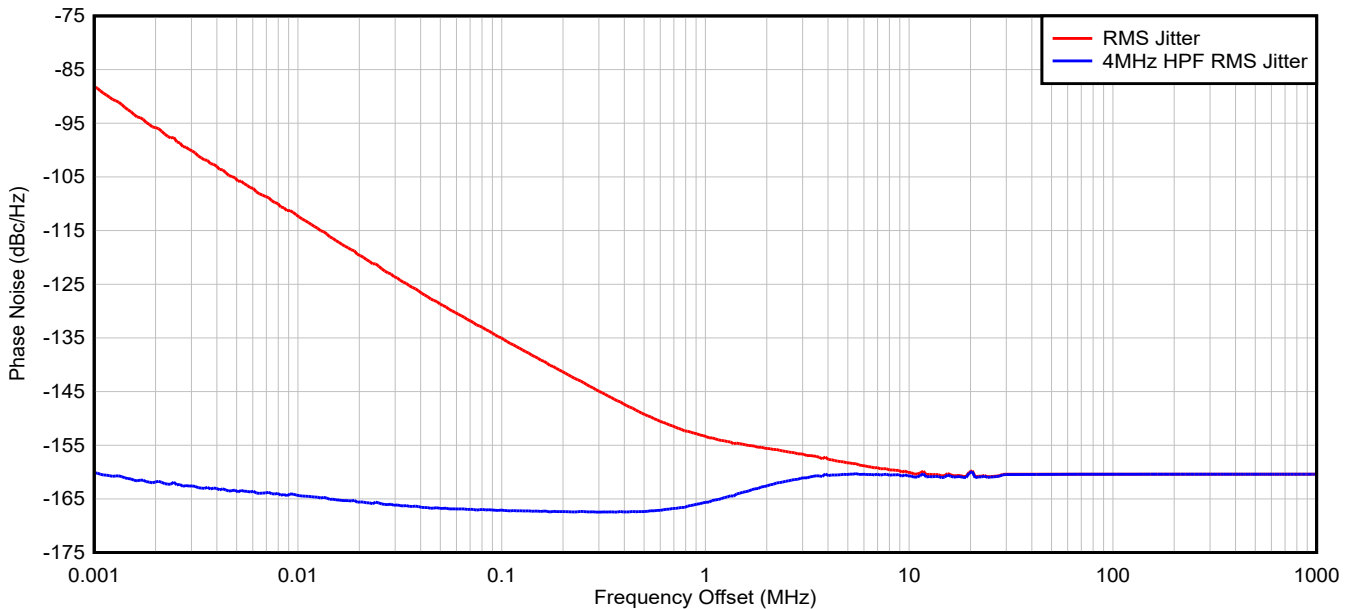


図 3-1. 2.5GHz LMK6Bx の位相ノイズ曲線:BAW 周波数

3.2 傑出した信頼性

LMK6Bx は水晶ベースの発振器の 100 倍の平均故障間隔 (MTBF) を実現します。BAW 共振器の構造はソリッド ステート構造を採用しており、この信頼性の向上に貢献しています。『[信頼性の高い BAW 発振器の MTBF と FIT レートの計算](#)』アプリケーション ノートでは、BAW の堅牢性について詳細に説明しています。

50Hz ~ 2kHz で 1ppb/g (標準値) の振動性能を達成しますが、水晶発振器は一般に数 ppb/g から数十 ppb/g の振動性能を示します。BAW 共振器の機械的構造には固有の振動抵抗が含まれ、MIL-STD-F Method 2007 および MIL-STD-F Method 2002 規格に合格しています。詳細は「[水晶発振器に対するスタンドアロン BAW 発振器の利点](#)」に示されています。これらのテスト方法では、機械的ストレスおよび環境条件下での性能を検証します。

信頼性に関する利点は BAW 共振器の半導体製造プロセスに由来しており、水晶振動子に見られるワイヤ ボンドと機械的な取り付け構造が不要になります。この構造により機械的ストレスや熱サイクルに関連する故障モードを削減できます。

3.3 製造上の長所

LMK6Bx は、標準的なプラスチック パッケージと大量の半導体ウェハー プロセスを使用して、すべて TI の製造施設で製造されています。この統合的な製造アプローチにより、外部の水晶振動子サプライヤ、ASIC サプライヤ、製造プロセス、または特化型パッケージ プロセスに依存する発振器より、短いリード タイムと安定供給を実現できます。

BAW 共振器は他の半導体部品と統合され、追加 IC との共同パッケージに対応しています。標準的な半導体製造により、ディスクリット水晶振動子取り付けに伴う組み立ての複雑さが解消され、製造のばらつきが小さくなり、大量生産が可能になります。

4 312.5MHz を超える周波数での業界最高のジッタ性能: 新たな基準の設定

4.1 かつてない低ジッタ仕様

LMK6Bx は業界トップのジッタ性能を備え、競合製品の性能を上回っています。より高い周波数において、LMK6B は 625MHz AC-LVPECL で 35fs の最大 RMS ジッタを実現し、これは業界内の最低値です。312.5MHz AC-LVPECL では 28fs 標準 RMS ジッタを達成し、非常に優れた標準性能を示しています。

図 4-1 および 図 4-2 に示すように、この並外れたノイズフロアで SerDes クロック データリカバリ (CDR) 4MHz のハイパス・フィルタ (HPF) を適用すると、1 桁のジッタ値が実現します。625MHz で 9.6fs の標準 RMS ジッタ、312.5MHz で 19.7fs の標準 RMS ジッタ。これらの優れた性能により、PAM-4、イーサネット クロック処理アプリケーション、コヒーレント光学アプリケーションに対応する比類のないタイミング マージンを実現でき、システム性能の向上やビット エラー レート (BER) の低減につながります。

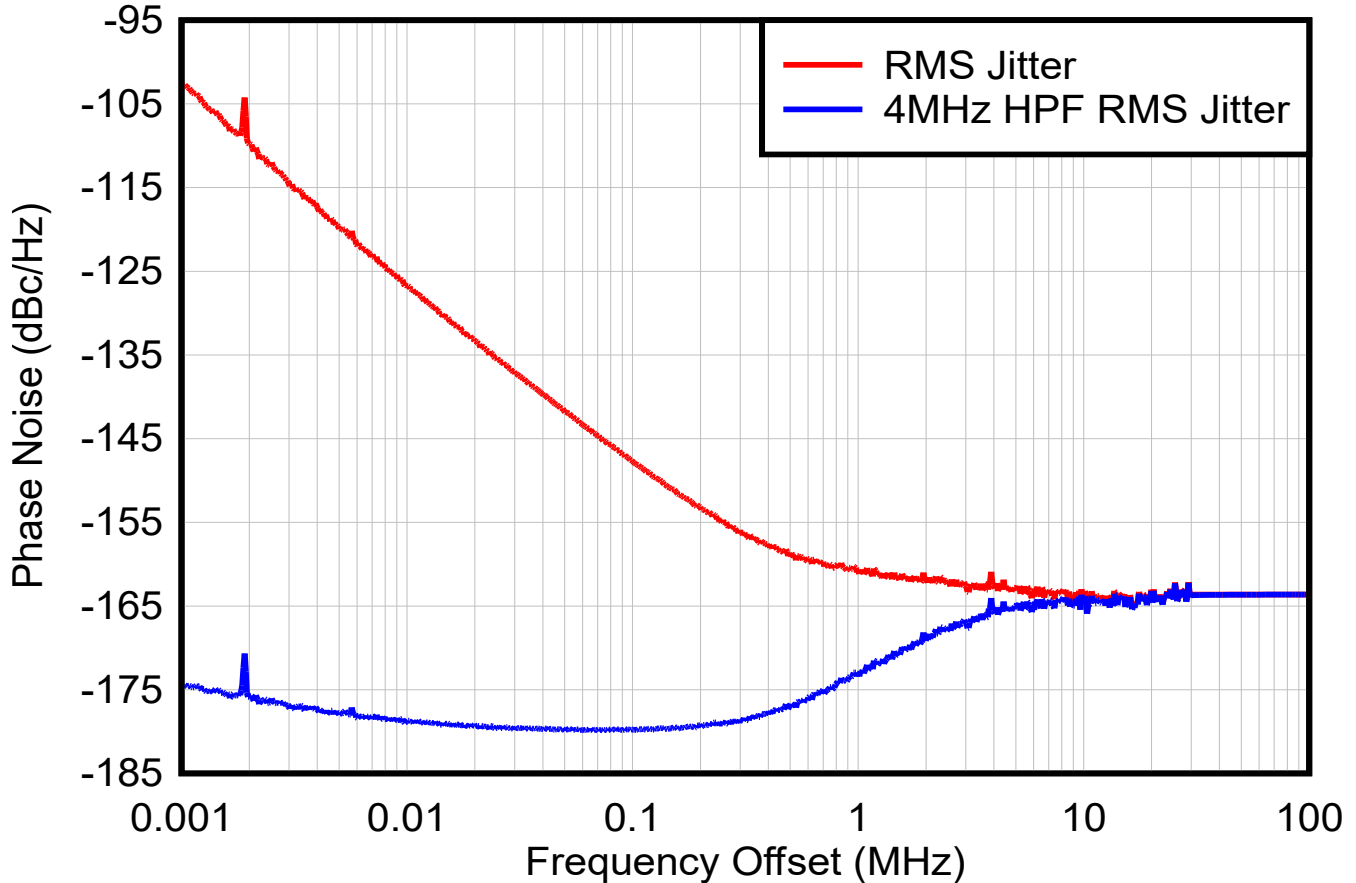


図 4-1. LMK6Bx AC-LVPECL 625MHz の標準位相ノイズプロット - 4MHz HPF RMS ジッタ 9.6fs および RMS ジッタ 18.1fs (12kHz ~ 20MHz)

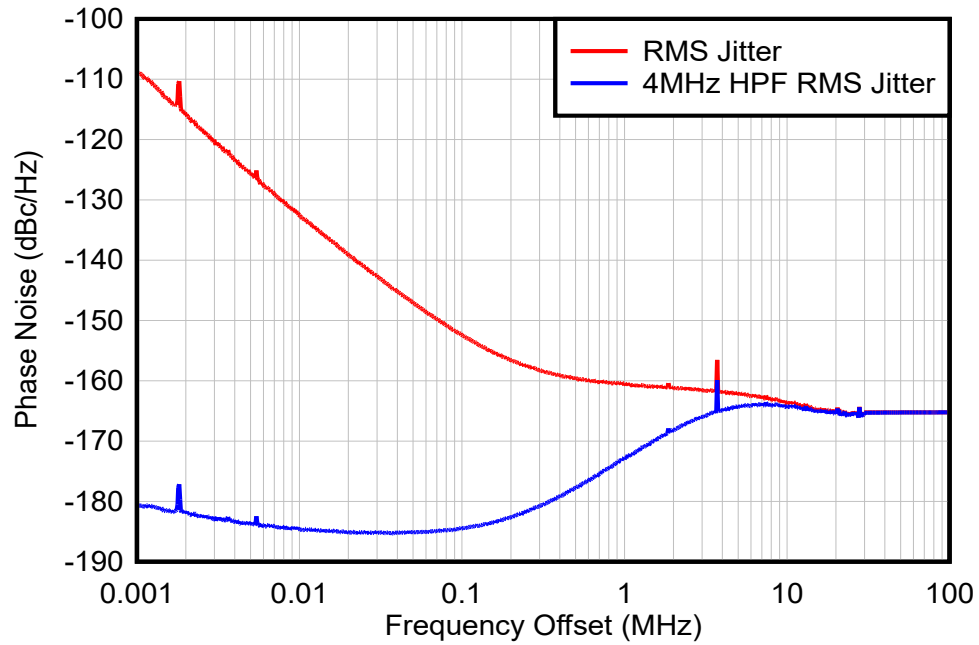


図 4-2. LMK6Bx AC-LVPECL 312.5MHz の標準位相ノイズプロット - 4MHz HPF RMS ジッタ 19.7fs および RMS ジッタ 28.2fs (12kHz ~ 20MHz)

4.2 非常に優れた PSRR 性能

LMK6Bx は出力周波数と出力タイプ全体にわたり非常に優れた PSRR 性能を示します。LMK6Bx LVDS は、10kHz を上回るリップル周波数では 50mVpp の電源リップルが発生する 156.25MHz で、デカップリング コンデンサを必要とせずに -78dBc を下回る PSRR を維持します。312.5MHz で、PSRR はデカップリング コンデンサなしで -74dBc 未満を維持します。デカップリング キャパシタを使用する場合、LMK6Bx LP-HCSL の PSRR は 156.25MHz での -83dBc を下回り、312.5MHz での -79dBc を下回ります。表 4-1 から表 4-4 は、10kHz を上回るリップル周波数、出力タイプ、デカップリング コンデンサの有無、50mVpp の電源リップルが発生する出力周波数における、LMK6Bx の優れた性能について詳しく説明しています。

表 4-1. リップル周波数と出力タイプごとの 156.25MHz および 50mVpp リップルでの LMK6Bx PSRR の性能 (デカップリング コンデンサなし)

リップル周波数 (kHz)	スプリアス (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. リップル周波数と出力タイプごとの 312.5MHz および 50mVpp リップルでの LMK6Bx PSRR の性能 (デカップリング コンデンサなし)

リップル周波数 (kHz)	スプリアス (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. リップル周波数と出力タイプごとの 156.25MHz および 50mVpp リップルでの LMK6Bx PSRR の性能 (0.1µF のデカップリング コンデンサあり)

リップル周波数 (kHz)	スプリアス (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

表 4-3. リップル周波数と出力タイプごとの 156.25MHz および 50mVpp リップルでの LMK6Bx PSRR の性能 (0.1μF のデカップリング コンデンサあり) (続き)

リップル周波数 (kHz)	スプリアス (dBc)		
	LVDS	LP-HCSL	AC-LVPECL
500	-100.0	-158.3	-95.7
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. リップル周波数と出力タイプごとの 312.5MHz および 50mVpp リップルでの LMK6Bx PSRR の性能 (0.1μF のデカップリング コンデンサあり)

リップル周波数 (kHz)	スプリアス (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 競争上の優位性: 市場の支配

4.3.1 競合製品に対する LMK6B PSRR の性能

主要な競合製品に対する独立テストは LMK6B の優れた PSRR 性能を示しています。どちらのテストも 156.25MHz で動作する発振器で実行され、LMK6Bx は AC-LVPECL 出力タイプと 2.5V 電源を備え、発振器 1 は LVDS 出力タイプと 1.8V 電源を備えています。

デカップリング コンデンサなしで、LMK6Bx はすべてのリップル周波数において発振器 1 の性能を上回り、5MHz を超えると PSRR が 15dBc 向上します。図 4-3 は両方の発振器の PSRR をテストするために使用する構成を示し、表 4-5 は発振器間で収集されたデータの概要を示します。

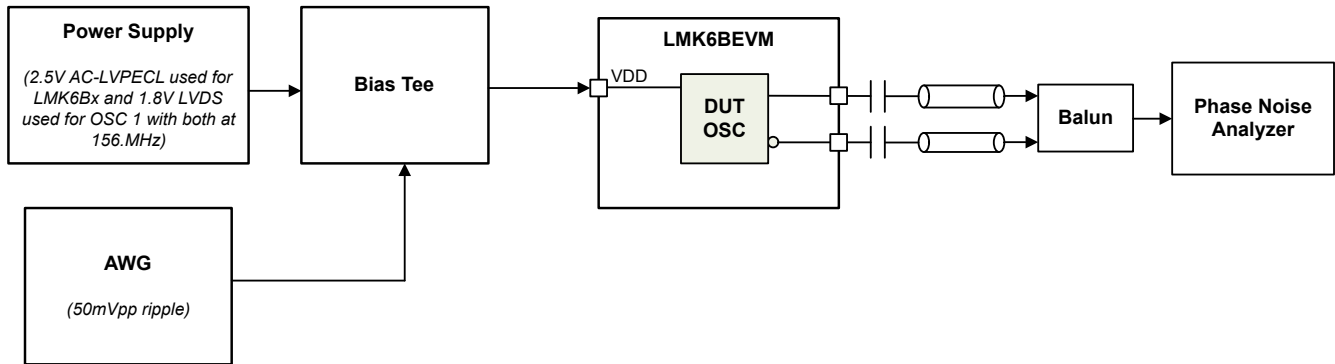


図 4-3. デカップリング コンデンサなしの PSRR テスト構成

表 4-5. デカップリング コンデンサなしの LMK6Bx と発振器 1 間の PSRR 性能の比較

リップル周波数	LMK6B のスプリアス (dBc)	発振器 1 のスプリアス (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

0.1µF のデカップリング コンデンサでは、LMK6Bx はすべてのリップル周波数にわたり発振器 1 より 3dBc ~ 6dBc 性能が優れています。LMK6Bx は 50kHz を上回るリップル周波数で -71dBc/スプリアス未満の性能を実現します。図 4-4 は両方の発振器の PSRR をテストするために使用する構成を示し、表 4-6 は得られたデータの概要を示します。

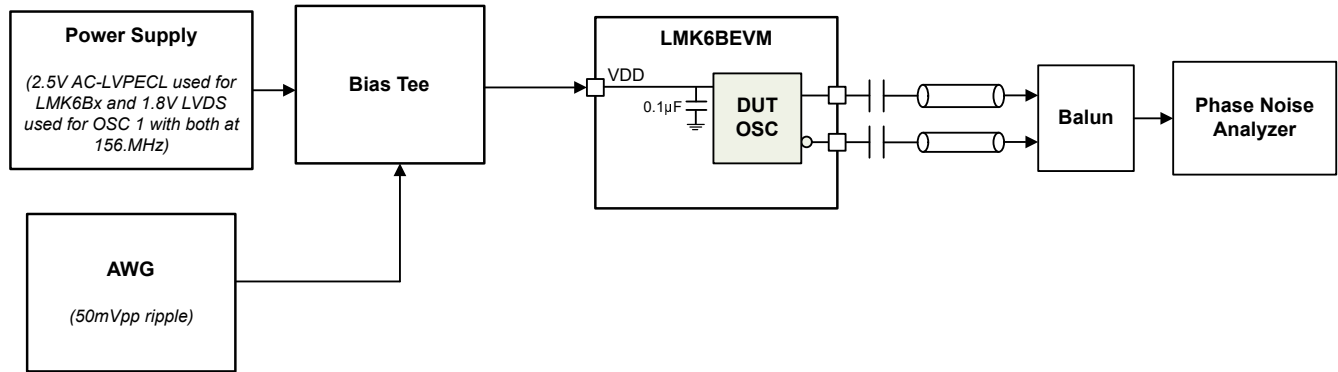


図 4-4. 0.1µF のデカップリング コンデンサを使用した PSRR テスト構成

表 4-6. 0.1µF のデカップリング コンデンサを使用した LMK6Bx と発振器 1 の PSRR 性能の比較

リップル周波数	LMK6B のスプリアス (dBc)	発振器 1 のスプリアス (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 全体的な競合製品の比較

表 4-7 に、LMK6Bx が競合製品以上の性能を示す主要なパラメータを表示します。要約すると、LMK6Bx の出力周波数は競合製品の 4 倍で、DSP の PLL PFD への入力周波数が高く、DSP PLL 性能に優れています。また、LMK6Bx 625MHz での出力ジッタが市場最小であり、BER 結果がより優れています。

表 4-7. 光学モジュールで上位を占める競合製品の比較

ベンダ	TI	ベンダ 1		ベンダ 2	
部品番号	LMK6B	発振器 1	発振器 2	発振器 3	発振器 4
最小パッケージ	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
最も広い温度範囲	-40°C ~ 105°C	-40°C ~ 105°C	-40°C ~ 105°C	-40°C ~ 105°C	-40°C ~ 105°C
最安定周波数 ⁽¹⁾	±20ppm	±20ppm	±50ppm	±20ppm	±20ppm
経時変化	85°C で 10 年	25°C で 10 年	25°C で 10 年	85°C で 10 年	85°C で 10 年
出力タイプ オプション	LVDS、HS-LVDS、AC-LVPECL、LP-HCSL、カスタム スイン グ	LVPECL、LVDS、HS-LVDS、HCSL	LVPECL、LVDS、HS-LVDS	LVDS、LVPECL、HCSL、LP-HCSL、FlexSwing	LVDS、LVPECL、HCSL、LP-HCSL、FlexSwing
最高出力周波数	2500MHz	500MHz	625MHz	644.53125MHz	625MHz
156.25MHz における RMS ジッタ (12kHz ~ 20MHz)	AC-LVPECL: 47fs (標準値)	LVPECL: 70fs (最大値)	該当なし	LVPECL: 100fs (最大値)	LVPECL: 100fs (最大値)
	LVDS: 52fs (標準値)	LVDS: 60fs (最大値)	該当なし	LVDS: 100fs (最大値)	LVDS: 100fs (最大値)
	LP-HCSL: 44fs (標準値)	HCSL: 70fs (最大値)	該当なし	HCSL または LP-HCSL: 100fs (最大値)	HCSL または LP-HCSL: 100fs (最大値)
625MHz における RMS ジッタ (12kHz ~ 20MHz)	AC-LVPECL: 35fs (最大値)	該当なし	LVPECL: 40fs (最大値)	データは一般には入手不可	データは一般には入手不可
	LVDS: 35fs (最大値)	該当なし	LVDS: 40fs (最大値)	データは一般には入手不可	データは一般には入手不可
	LP-HCSL: 50fs (最大値)	該当なし	HCSL: 該当なし	データは一般には入手不可	データは一般には入手不可

(1) 下の行に示す経時変化を含む、すべての要因を含みます

5 LMK6Bx の説明とその他の利点

5.1 包括的な出力オプション、フレキシビリティ、その他の主な仕様

LMK6Bx は固定周波数で工場出荷時にプログラムされた超低ジッタ BAW 発振器で、以下の複数の出力形式が工場出荷時にプログラムされており、比類のない汎用性を実現します: LVDS、HS-LVDS、AC-LVPECL、LP-HCSL、カスタム スイング。HS-LVDS およびカスタム スイングの出力スイングは、3.3V 電源と 2.5V 電源で 350mVppd ~ 2Vppd (50mVppd ステップ)、カスタム スイングで 350mVppd ~ 1.5Vppd、HS-LVDS で 350mVppd ~ 1.6Vppd にプログラムできます。LMK6Bx には 2 つの機能ピンがあります。ピン 1 には出力カインープル (OE) とスタンバイ (ST) 制御機能があり、ピン 2 には出力周波数選択機能 (FSEL) があり、OPN で指定した周波数を 2 分割または 4 分割できます。LMK6Bx は、光学モジュール市場で使用される最も一般的な 3 つの周波数に対して 1 つの OPN を供給できる市場で唯一の発振器であり、供給と注文が簡素化されています。図 5-1 に、LMK6Bx のブロック図を示します。

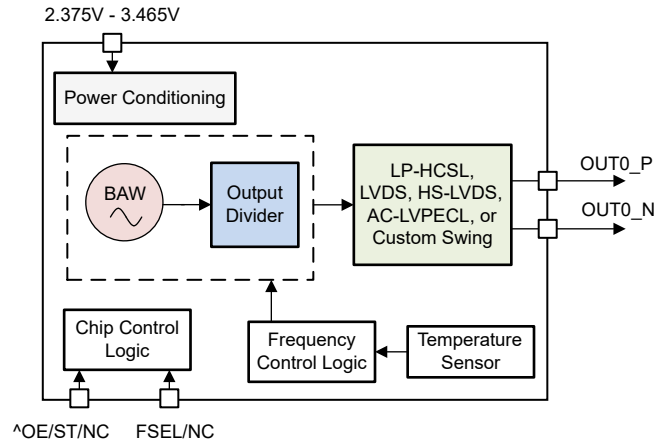


図 5-1. LMK6Bx の概略ブロック図

この発振器は 2.375V ~ 3.465V で動作し、動作温度 -40°C ~ $+105^{\circ}\text{C}$ (PCB 温度)、総周波数精度 $\pm 25\text{ppm}$ (25°C PCB で 10 年の経年劣化) または $\pm 20\text{ppm}$ (85°C PCB での 10 年の経年劣化) を達成できます。LMK6Bx は $2.0\text{mm} \times 1.6\text{mm}$ 、 $2.5\text{mm} \times 2.0\text{mm}$ 、 $3.2\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ で提供されます。詳細については、[LMK6Bx データシート](#)を参照してください。

5.2 チップ内統合の効率化とコスト削減

LMK6Bx は、外部 LDO とフェラライトビーズが不要なレギュレータを内蔵しているだけでなく、必要な受動部品が少なくて済むように出力終端が簡素化されています。この統合アプローチにより PCB 面積とシステムコストを削減できるため、スペースに制約のあるアプリケーションに最適です。

5.3 競合製品を置き換えるための実装ガイドライン

LMK6Bx は、競合製品 LVPECL、LVDS、HS-LVDS、LP-HCSL、HCSL の各発振器の代替として使用できます。LVDS、HS-LVDS、LP-HCSL の各発振器をの代わりに LMK6Bx を実装する際、変更は必要ありません。LMK6Bx では面積とコストを削減するために外部コンポーネントが少ないため、LVPECL および HCSL と競合する発振器ではいくつかの変更が必要です。LVPECL および HCSL 発振器を LMK6Bx に置き換える方法の詳細については、[LMK6Bx データシート](#)を参照してください。

6 まとめ

LMK6B は光学モジュールにおける発振器技術のパラダイム シフトを表しています。LMK6B は革新的な BAW 共振器技術を、業界トップのジッタ性能、包括的な出力オプション、統合型設計の特徴と組み合わせ、次世代光学システムにおいて貴重な存在となっています。LMK6Bx の主な差別化要因は次のとおりです：

- 高周波での業界最小ジッタ (625MHz HS-LVDS での 4MHz HPF RMS ジッタが 9.3fs)
- HS-LVDS で -85dBc を下回る優れた PSRR 性能を実現し、スプリアスは一部の競合製品に比べ 15dBc の低減を達成
- 3.8fs HS-LVDS 4MHz HPF RMS ジッタで業界最高の周波数 2.5GHz の出力
- 外部 LDO、フェライトビーズ、終端受動部品を不要にして面積を低減しコストを削減するシステム統合型設計
- TI の工場を使用してリード タイムの短縮を実現する、製造と供給におけるメリット

LMK6Bx は、最高のタイミング性能、最小のシステム コスト、最速のリード タイムが必要な光学モジュール設計者にとって最善の選択です。業界最先端の発振器技術で設計を開始するには、今すぐテキサス インストルメンツにお問い合わせください。

7 参考資料

1. テキサス インストルメンツ、『[LMK6Bx データシート](#)』、データシート。
2. テキサス インストルメンツ、『[高信頼性 BAW 発振器の MTBF と FIT レートの計算](#)』アプリケーションノート。
3. テキサス インストルメンツ、『[水晶発振器に対するスタンドアロン BAW 発振器の利点](#)』アプリケーション ノート。

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月