

Application Note

CC13xx、CC26xx、CC23xx、CC27xx ワイヤレス マイコンファミリの水晶発振器と水晶振動子の選択



James Murdock and Danielle Griffith

概要

CC13xx、CC26xx、CC23xx、CC27xx ファミリは、複数の標準 (Bluetooth® Low Energy、IEEE® 802.15.4、独自の RF プロトコル) をサポートするローパワー ワイヤレス マイコン (MCU) プラットフォームです。特に記述のない限り、このドキュメントは、すべての CC13xx、CC26xx、CC23xx、CC27xx ファミリのデバイスで有効です。「CC デバイス」という一般用語は、簡略化のために使用されます。CC デバイスには、TI が低コストの水晶振動子と組み合わせて使用するよう設計した 24MHz (CC13x0 および CC26x0) または 48MHz (CC13x2、CC26x2、CC23xx、CC27xx) および 32.768kHz の水晶発振器が内蔵されています。24MHz および 48MHz 発振器 (CC13xx および CC26xx の場合は XOSC-HF、CC23xx および CC27xx の場合は HFXT) は、RF ブロックおよび MCU システムの基準クロックを生成します。RF システムは、正しい動作のために正確なクロックに依存しています。クロック周波数の偏差は、無線周波数の偏差として反映されます。この偏差が生じると、RF 性能が低下したり、規制要件に違反したり、システムが機能しなくなったりする可能性があります。パワーダウン モードでは、通常、高周波発振器がオフになり、低周波数発振器がシステムクロックとなります。Bluetooth Low Energy などの時間同期型プロトコルを使用する場合、スリープクロックの厳格な許容誤差により、バッテリー駆動アプリケーションで低消費電力モードでの時間が長くなり、消費電力の低減が重要となります。この低周波数発振器では、通常 32kHz の水晶発振器 (CC13xx および CC26xx の場合は XOSC-LF、CC23xx および CC27xx の場合は LFXT) を使用します。

このアプリケーションレポートは、この CC デバイスの水晶発振器の要件とトレードオフについて説明し、適切な水晶を選択する方法について情報を提供することを目的としています。また、特定の水晶振動子で動作するようにデバイスを構成する手順も紹介します。使用する水晶振動子に基づいて CC デバイスを設定する必要があります (つまり、XOSC-HF の水晶の負荷コンデンサに一致するように内部コンデンサアレイを調整します)。このアプリケーションレポートには、水晶発振器の振幅やスタートアップ時間など、特定の性能指標の特性を評価するために使用できるいくつかの測定手法に関する説明も含まれています。

目次

1 発振器および水晶振動子の基本	3
1.1 発振器の動作.....	3
1.2 水晶振動子の電気的モデル.....	3
1.3 負性抵抗.....	4
1.4 発振器の時定数.....	5
2 CC デバイスの水晶発振器の概要	7
2.1 24MHz および 48MHz 水晶発振器.....	7
2.2 24MHz および 48MHz 水晶制御ループ.....	7
2.3 32.768kHz 水晶発振器.....	8
3 CC デバイスの水晶振動子の選択	9
3.1 動作モード.....	9
3.2 周波数の精度.....	9
3.3 負荷容量.....	11
3.4 ESR およびスタートアップ時間.....	13
3.5 励振レベルおよび消費電力.....	13
3.6 水晶振動子パッケージ サイズ.....	13
4 水晶振動子の PCB レイアウト	14
5 水晶振動子の振動の振幅の測定	15

5.1 HPMRAMP1_TH および XOSC_HF_FAST_START を決定するためのスタートアップ時間の測定.....	15
6 CC13xx、CC26xx、CC23xx、CC27xx の水晶振動子.....	16
7 高性能 BAW 発振器.....	18
8 CC23XX および CC27XX ソフトウェア振幅補償.....	18
9 CC23XX および CC27XX の内部コンデンサアレイ.....	19
10 CC13xx および CC26xx の内部コンデンサアレイ.....	22
11 まとめ.....	24
12 参考資料.....	24
13 改訂履歴.....	24

図の一覧

図 1-1. ピアス発振器.....	3
図 1-2. 水晶振動子の記号および水晶振動子の電氣的モデル.....	3
図 2-1. CC デバイス高周波発振器と水晶振動子の概略ブロック図.....	7
図 2-2. 水晶振動子を使用した 32.768kHz 発振器の概略ブロック図.....	8
図 3-1. 32.768kHz チューニング フォーク水晶振動子の標準的な周波数と温度との関係.....	10
図 3-2. 狭い間隔に配置された 13 の負荷容量値に関する高周波数水晶振動子の周波数と温度曲線との関係.....	12
図 3-3. 周波数と温度曲線のオフセットの削除.....	12
図 4-1. CC26xx 評価基板のレイアウト.....	14
図 9-1. 内蔵コンデンサアレイ図.....	19

表の一覧

表 1-1. 水晶振動子のパラメータ.....	5
表 3-1. 外部コンデンサを使用すると、温度変化に対して周波数安定性が低下します.....	11
表 6-1. CC13x2、CC26x2、CC23xx の 48MHz 水晶振動子.....	16
表 6-2. CC23xx および CC27xx 専用の 48MHz 水晶振動子.....	16
表 6-3. CC13x0 と CC26x0 の 24MHz 水晶振動子.....	16
表 6-4. CC13xx、CC26xx、CC23xx、CC27xx の 32.768kHz 水晶振動子.....	17
表 10-1. CC13XX および CC26XX の内部コンデンサアレイ デルタ.....	22

商標

SimpleLink™ and SmartRF™ are trademarks of Texas Instruments.

Bluetooth® is a registered trademark of Bluetooth SIG, Inc.

IEEE® is a registered trademark of Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ZigBee® is a registered trademark of ZigBee Alliance.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 発振器および水晶振動子の基本

このセクションでは、CC デバイスの水晶振動子を選択する際のトレードオフを理解するために必要となる水晶振動子の基本と発振器の動作について説明します。水晶発振器の完全な回路には、負荷容量、水晶振動子、およびオンチップ回路が含まれます。

1.1 発振器の動作

図 1-1 に示されているように、TI のローパワー RF 製品の高精度クロックソースとして使用する回路は、ピアス発振器をベースにしています。オンチップのダンピング抵抗がないため、顧客が追加する必要はありません。発振器回路は、反転アンプ (インバータとして表示)、帰還抵抗、2 つのコンデンサ、1 つの水晶振動子で構成されます。動作時には、水晶振動子とコンデンサはパイフィルタを形成し、内部アンプに 180 度の位相シフトを行い、指定された周波数に発振器を維持します。

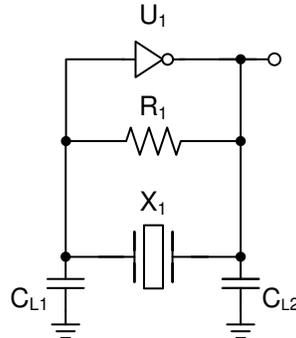


図 1-1. ピアス発振器

1.2 水晶振動子の電気的モデル

水晶振動子は、電気エネルギーを機械エネルギーに変換する圧電素子です。この変換は共振周波数で発生します。図 1-2 に、水晶振動子を表す簡略化された電気的モデルを示します。C₀ はシャント容量、L_M は直列インダクタンス、C_M は直列容量、R_M は直列抵抗です。図 1-2 のモデルは簡略化モデルで、基本的な発振周波数のみが含まれています。実際には、水晶振動子は基本周波数の奇数次高調波で振動する可能性もあります。

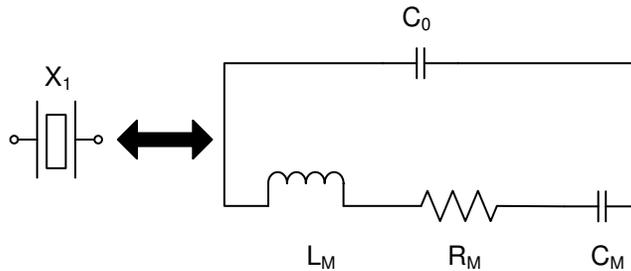


図 1-2. 水晶振動子の記号および水晶振動子の電気的モデル

1.2.1 発振の周波数

水晶振動子には 2 つの共振周波数があり、ゼロ位相シフトにより特徴付けられます。式 1 は、直列共振です。

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_M \times C_M}} \quad (1)$$

式 2 は、逆共振周波数です。

$$f_a = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_M \times \frac{C_M \times C_0}{C_M + C_0}}} \quad (2)$$

水晶振動子のデータシートに指定されているように、発振周波数は共振周波数の間です。[式 3](#) を参照してください。

$$f_s < f_{XTAL} < f_a \quad (3)$$

1.2.2 等価直列抵抗

等価直列抵抗 (ESR) は、水晶振動子が直列共振周波数で示す抵抗です。[式 4](#) に、ESR を示します。

$$ESR = R_M \left(1 + \frac{C_0}{C_L} \right)^2 \quad (4)$$

通常、 C_0 は 1pF 程度、 C_L は高周波水晶振動子で 5 ~ 9pF、低周波数水晶振動子で 6 ~ 12pF であるため、多くの水晶振動子では ESR は約 R_M であり、直列抵抗として近似されることがあります。

1.2.3 励振レベル

水晶振動子の励振レベルとは、水晶振動子内で消費される電力を意味します。多くの場合、水晶振動子の最大励振レベルは、水晶振動子のデータシートに μW 単位で指定されています。この値を超えると、水晶振動子が損傷したり、寿命が短くなったりする可能性があります。[式 5](#) には、励振レベルが W 単位で示されています。

$$DL = 2 \times ESR (\pi f (C_L + C_0) V_{pp})^2 \quad (5)$$

V_{pp} は水晶振動子ピンのピークツーピークの電圧となります。

DL を計算し、この値を水晶振動子データシートで指定されている最大 DL と比較すると、水晶振動子が動作中に信頼性の問題を起こしやすくなるかどうか明らかになります。[セクション 5](#) に、 V_{pp} の値の測定方法を示します。

1.2.4 引き上げ

水晶振動子の周波数は、水晶に示される負荷容量を変更することで引き上げられるようになります。パラメーター ΔF は、ボード上の負荷容量の変化 (Launchpad 上で内部構成されているか外部構成されているかに関係なく) による水晶の共振周波数の変化です。引き上げは、水晶振動子の指定された (並列) 共振周波数の周辺で [式 6](#) で求められます。

$$\Delta F = \frac{F \times C_M}{2} \frac{C_{LMAX} - C_{LMIN}}{(C_0 + C_{LMAX})(C_0 + C_{LMIN})} \quad (6)$$

C_{LMAX} および C_{LMIN} は、水晶振動子に対して発生できる最大および最小負荷容量です。これらは、水晶振動子のデータシートで規定されている C_L とは異なるパラメータです。詳細については、『[CC13xx/CC26xx ハードウェア構成および PCB 設計の検討事項](#)』を参照してください。

1.3 負性抵抗

負性抵抗 (R_N) は、コンデンサの値、水晶振動子のパラメータ、およびオンチップ回路を含む、発振器回路全体のパラメータです。CC デバイスは発振器のパラメータを動的に調整して、水晶振動子のスタートアップ時に十分な発振器のマージンを確保し、定常状態のマージンを緩和して消費電流を減らします。つまり、CC データシートに記載されている要件内で水晶振動子を使用する場合、動作条件に対して適切なスタートアップと定常状態の余地が検証されます。

[式 7](#) は、負性抵抗を概算し、 C_L が小さいと負性抵抗が大きくなることを示しています。

$$R_N \approx \frac{-g_m}{(2\pi f)^2 (2C_L)^2} \quad (7)$$

ここで

- g_m は、発振器のアクティブ素子の相互コンダクタンスです。
- C_L は、水晶振動子のデータシートに指定されている負荷容量です。

注

CC23xx および CC27xx の場合、スタートアップ フェーズ中の高周波水晶発振器の相互コンダクタンス (g_m) は 19milli-Siemens として近似できます。

CC13xx および CC26xx の場合、の高周波水晶発振器の相互コンダクタンス (g_m) は 7milli-Siemens として近似できます。

低周波水晶振動子では、相互コンダクタンス (g_m) は 30micro-Siemens と近似できます。

また、水晶振動子と直列に抵抗を導入することで、回路の負性抵抗を確認することもできます。寄生効果を回避するために、このタスクには 0201 抵抗を使用することが推奨されます。追加の 0201 外部抵抗と ESR または発振器がスタートアップできない水晶振動子の合計のスレッシュホールドは、回路の負性抵抗とほぼ同じです。

水晶発振器を確実にスタートアップさせるために、車載用アプリケーションの場合は、負性抵抗の大きさを水晶振動子の初期スタートアップ時に ESR の 10 倍以上、定常動作時に ESR の 5 倍以上にすることを TI は推奨しています。

特定の使用事例やアプリケーションでは、スタートアップ時にこれらの値を少なくとも 3 倍に最小化できますが、SysConfig ページに示されている初期状態と定常状態のソフトウェア振幅補償の両方を使用することが推奨されます。これらより小さい動作値は TI は推奨しません。これは使用制限を表すもので、これらの余地が減少した場合に、適切な機能を検証することはできません。

1.4 発振器の時定数

水晶発振器のスタートアップ時間は、ターンオン時の過渡条件、負抵抗による小信号エンベロップ拡張、および大信号振幅の制限によって決まります。エンベロップ拡張は、水晶振動子の全負性抵抗と直列インダクタンスの関数です。式 8 に示されているように、エンベロップ拡張の時定数は、発振器のスタートアップ時間に比例します。

$$\tau = \frac{-2L_M}{(R_M + R_N)} \approx \frac{-2L_M}{R_N}, |R_n| \gg |R_m| \tag{8}$$

水晶振動子が L_M が低い場合は、スタートアップ時間が短くなり、 R_N (Low C_L) も大きくなります。小さい直列容量 (C_M) に起因するプル能力と小さい直列インダクタンス (L_M) に起因する高速なスタートアップ時間との間には、トレードオフが存在します。これは、水晶振動子の周波数は C_M と L_M の両方に依存するためです。パッケージ サイズが小さい水晶振動子の L_M は大きく、大型パッケージ サイズの水晶振動子よりもスタートアップが遅くなります (セクション 1.2.1 を参照)。

表 1-1 に、CC デバイスとの使用において TI が推奨するリファレンス水晶振動子のパラメータと値を示します。

表 1-1. 水晶振動子のパラメータ

パラメータ	説明	TI CC26x0 特性評価で使用されている 24MHz 水晶振動子	TI 特性評価 CC23XX 32.768kHz 水晶振動子	TI 特性評価 CC27XX-Q1 32.768kHz 水晶振動子	TI 特性評価 CC27XX-Q1 48MHz 水晶振動子
直列インダクタンス (L_M)	水晶振動子の応答時間を部分的に決定します (発振器からの変化に対する水晶振動子の応答速度)。小さい $L_m \rightarrow$ 水晶振動子は、発振器からの変化に対してより迅速に応答します。 C_M に加えて、水晶振動子の品質係数の主要な決定要因です	12.6mH	3.69 kH	2.95kH	3.30mH
直列容量 (C_M)	水晶振動子の応答時間の一部を決定します。小さい $C_M \rightarrow$ 水晶振動子、発振器からの変化に対してより低速に応答します。	3.4fF	6.4fF	8fF	3.40fF
直列抵抗 (R_M)	共振時には、 L_m と C_M はキャンセルされ、 R_M が発振器に示されます。 $R_M \approx$ ESR は $C_L \gg C_O$ と想定されます。	20Ω (最大 60Ω)	120 kΩ 最大値	70~75 kΩ	30Ω

表 1-1. 水晶振動子のパラメータ (続き)

パラメータ	説明	TI CC26x0 特性評価で使用されている 24MHz 水晶振動子	TI 特性評価 CC23XX 32.768kHz 水晶振動子	TI 特性評価 CC27XX-Q1 32.768kHz 水晶振動子	TI 特性評価 CC27XX-Q1 48MHz 水晶振動子
負荷容量 (C_L)	水晶振動子を適切な周波数に調整するための負荷コンデンサの大きさです。この負荷容量は励振レベルの決定にも役立ちます。	9pF	7pF	7pF	7pF
シャント容量 (C_0)	これは、水晶振動子パッケージによる寄生容量です。許容される励振レベルを決定するのに役立ちます。	1.2pF	1.3pF	1.5pF	0.84 pF
ESR	等価直列抵抗 $C_L \gg C_0$ の場合は $ESR \approx R_M$	20Ω (最大 60Ω)	120 kΩ 最大値	70~75 kΩ	30Ω
励振レベル	信頼性の高い長期動作を実現するための水晶振動子の最大電力レベルについては、式 5 を参照してください	200μW	<500uW	<500uW	50μW 標準値:最大 200μW

2.3 32.768kHz 水晶発振器

図 2-2 に、32.768kHz 水晶発振器の概略ブロック図を示します。発振器回路は、反転アンプ、帰還ネット、コンデンサ、水晶振動子で構成されます。32kHz の水晶振動子には内部コンデンサがなく、外部の負荷コンデンサが必要です。

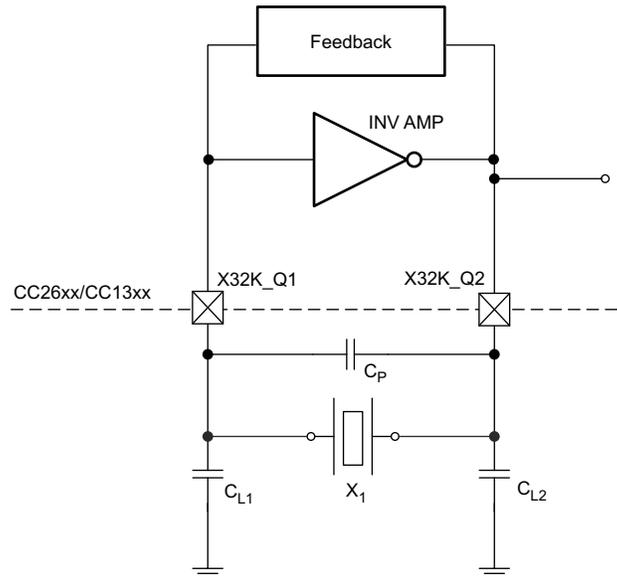


図 2-2. 水晶振動子を使用した 32.768kHz 発振器の概略ブロック図

3 CC デバイスの水晶振動子の選択

このセクションでは、CC デバイスの水晶振動子を選択する際の重要な検討事項を紹介します。特定のアプリケーションにおける水晶振動子の選択は、次の 3 つの要因に依存します。

- サイズ (フットプリントの面積と高さ)
- 性能 (温度範囲全体にわたる精度、寿命、消費電力、スタートアップ時間)
- コスト

水晶振動子を選択するときは、次の点を考慮してください

- 水晶振動子は、CC のデータシートまたは仕様に記載されている要件を満たすように選択する必要があります。
 - ESR は CC デバイスによって駆動できる値より大きくしないでください。
 - 容量性負荷および周波数の許容誤差は、使用する規格 (Bluetooth Low Energy など) の仕様を満たす必要があります。
 - 直列インダクタンスも仕様を満たす必要があります。多くの水晶振動子メーカーは、顧客の要求に応じて、直列インダクタンス データのみを提供します。
- 水晶振動子を選択する際のその他の検討事項は次の通りです。
 - スタートアップ時間を短縮し、消費電力を削減するには、水晶振動子が次の要件を満たしている必要があります。
 - 低容量負荷 (しかし、環境による周波数変動の影響を受けやくなる)
 - 小さい直列インダクタンス
 - 小さい直列抵抗

3.1 動作モード

水晶振動子は、CC デバイスに関連する周波数の基本共振周波数で使用されますが、基本周波数の奇数の倍音で動作する水晶振動子があります。CC デバイスの基本モードで動作する水晶振動子を使用することが推奨されます。

3.2 周波数の精度

水晶振動子の周波数精度の合計許容誤差は、いくつかの要因に依存します。

- 製造の許容誤差
- 温度の許容誤差
- 経年劣化の影響
- 負荷容量の不一致による水晶振動子の周波数プル

水晶振動子を選択するときは、これらのパラメータを考慮してください。式 9 に、水晶振動子の総許容誤差を示します。

$$Tol_{tot} = Tol_{prod} + Tol_{temp} + Tol_{age} + Tol_{pull} \text{ (ppm)} \quad (9)$$

これらの値は百万分の 1 (ppm) 単位で表され、水晶振動子メーカーのデバイス固有のデータシートに記載されています。しかし、引き上げは、セクション 1 の式で計算できます。

3.2.1 24MHz および 48MHz 水晶振動子

24MHz および 48MHz の水晶発振器は、RF 信号を生成するための基準として使用されるため、水晶振動子の周波数偏差は RF 信号の偏差に直接転送されます。たとえば、周波数偏差が 10ppm の場合、RF 搬送周波数の偏差は 10ppm になります。RF 仕様の制限範囲内で性能を持つ水晶振動子を選択します。

- 802.15.4 (Thread/ ZigBee®) の場合、搬送周波数の最大偏差は $\pm 40\text{ppm}$ に制限されます ([1] を参照)。
- Bluetooth® Low Energy の場合、制限値は $\pm 40\text{ppm}$ です ([2] を参照)。
- CC13X2 で水晶振動子より厳密な周波数精度を必要とする場合は、TCXO を使用することもできます。

3.2.2 32.768kHz 水晶振動子

32.768kHz 水晶発振器は、読み取り時間クロック (RTC) として使用され、デバイスがスタンバイモードのときは動作を維持します。Bluetooth® Low Energy は時間同期プロトコルであるため、高精度のクロックを使用すると、低消費電力モードでより長い時間使用することもできます。より精度の低い水晶振動子を使用する場合、クロックの精度が低下するように、本デバイスは早期にウェークアップする必要があります。Bluetooth® Low Energy に準拠するには、クロックの誤差が最大 $\pm 500\text{ppm}$ でなければなりません。詳細については、[2] を参照してください。標準的な Bluetooth® Low Energy 接続で平均消費電力を減らすため、許容誤差のより厳格な 32.768kHz 水晶振動子を使用することが推奨されます。

『SimpleLink™ CC2650 評価基板キット 4XD (CC2650EM-4XD) v1.0.3 設計ファイル』では、TI は Epson FC-135 水晶振動子を使用しています。異なる仕様の水晶振動子を使用する場合は、Bluetooth® Low Energy スタックでこの設定を調整する必要があります。詳細については、BLE スタック ユーザー ガイドを参照してください。

低周波数のチューニング フォーク水晶振動子には共振周波数があり、温度に応じて、 $(-0.04 \times 10^{-6}) / ^\circ\text{C}^2$ 標準の放物線係数で変化することに注意してください。図 3-1 に例を示します。図 3-1 では、 $-10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ の間でのみ 40ppm の精度が維持されます。

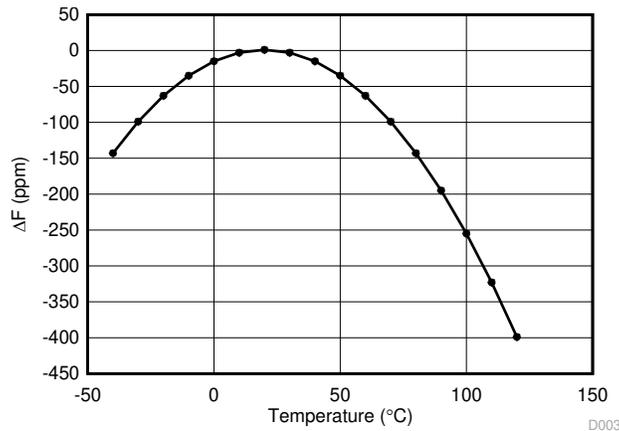


図 3-1. 32.768kHz チューニング フォーク水晶振動子の標準的な周波数と温度との関係

3.3 負荷容量

水晶発振器の周波数は、水晶振動子の容量性負荷に依存します。水晶振動子のデータシートに、発振が正しい周波数になるために必要な負荷容量 C_L が記載されています。 C_L の合計は、負荷コンデンサおよびレイアウトとパッケージの寄生容量で構成されます。 C_{L1} と C_{L2} は、水晶振動子に対して直列に接続されています。したがって、存在する実効負荷容量 C_{L1} と C_{L2} は $C_{L1}/2$ となり、 $C_{L1}=C_{L2}$ と仮定されます。水晶振動子に接続する基板パターン間に追加の容量があると、実効 C_L が増加します。

外部コンデンサを使用して適切な周波数を得るということは、内部コンデンサを最小限に設定する必要があるということです。たとえば、アプリケーションでは、約 2 ~ 3pF の最小オンチップ容量と 7pF のオフチップ容量を使用して、水晶振動子に $C_L = 9\text{pF}$ を供給できます。

表 3-1 に、外部コンデンサを使用する方法を示しています (CC13xx のみ)。この方法では、内部コンデンサを使用する場合に比べて、温度に対する周波数安定性がわずかに低下します。特定の Sub-1GHz ユーザーは、RF 搬送周波数からの水晶周波数の 2 倍のオフセットにおけるスプリアスを低減するために、外部負荷コンデンサを使用する必要があります。

表 3-1. 外部コンデンサを使用すると、温度変化に対して周波数安定性が低下します

	9pF 内部 C_L	最小内部 C_L 、外部 C_L
周波数変動 -40°C ~ 90°C	水晶振動子により設定	水晶振動子により +5ppm で設定
電圧精度、ppm/V	6.9	9

以下に、異なる C_L 値を持つ水晶振動子の相対的な利点を示します。

C_L が小さいことに伴う欠点は次の通りです：

- C_L が 7pF 未満の水晶振動子は、短いリードタイムで供給するのが困難です。
- C_L が小さくなるにつれて、周波数は基板の容量の変化に敏感になります。これは、最小 3pF の C_L で、周波数安定性仕様を満たすことが可能です。
- C_L を小さくすると、RF 位相ノイズが劣化します。

C_L が小さい場合の利点は次の通りです：

- C_L が小さいほど、スタートアップ時間は大幅に短くなります。(スタートアップ時間は C_L^2 に比例します)
- C_L が小さいほど、振幅制御ループの応答時間が短くなります。
- C_L が小さいほど、小型の水晶振動子 (2.0×1.6 など) を使用しやすくなり、400μs 以下でのスタートアップ時間を維持できます。水晶振動子が小さいほど、 L_M が増加するため、スタートアップ時間が悪化します。

内部負荷容量は、高周波水晶振動子の周波数形状と温度との関係に大きな影響を与えません。これは、以下の 2 つのプロットから確認できます。図 3-2 に、13 の異なる負荷容量を使用した水晶振動子の周波数と温度との関係を示します。負荷容量が異なると、曲線は上下にシフトしますが、曲線全体の形状は変化しません。図 3-3 に示されているように、これは、各曲線のオフセットを除去することで確認できます。

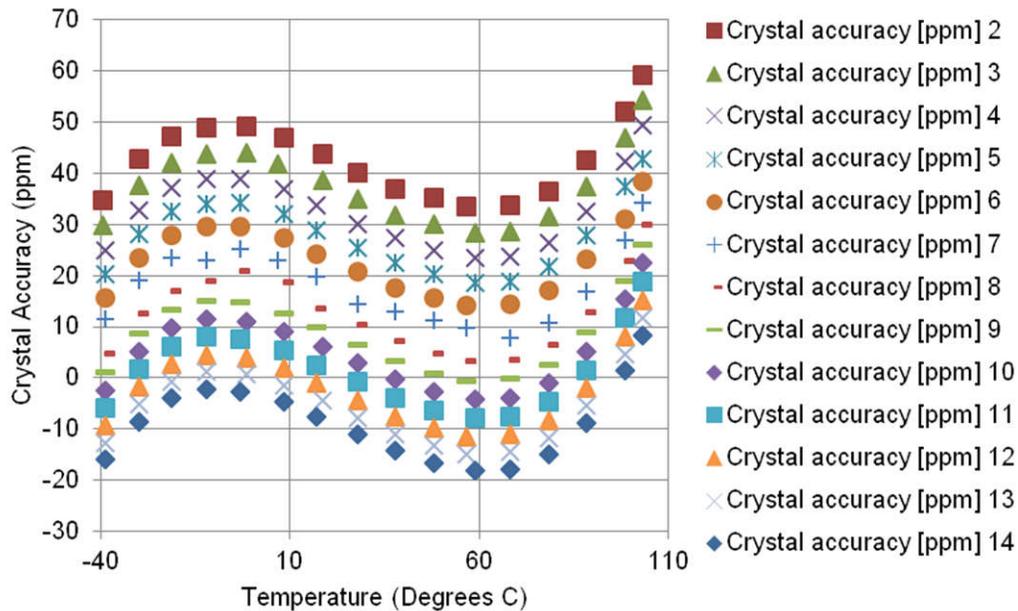


図 3-2. 狭い間隔に配置された 13 の負荷容量値に関する高周波数水晶振動子の周波数と温度曲線との関係

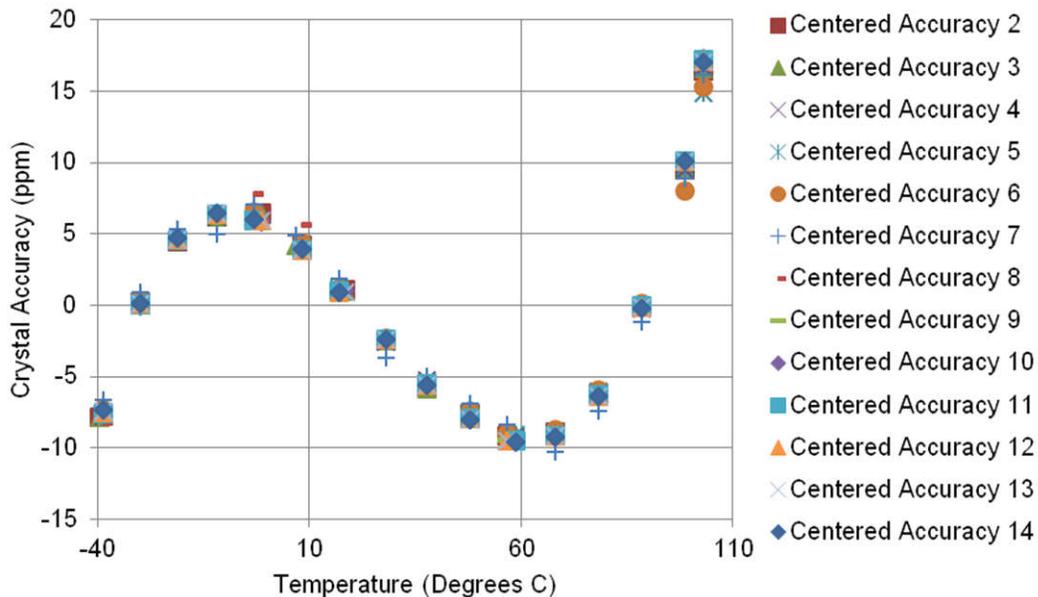


図 3-3. 周波数と温度曲線のオフセットの削除

図 3-3 は、内部負荷容量の変化が周波数と温度曲線の形状に影響を与えないことを示しています。これは、内部負荷コンデンサがこの曲線に及ぼす影響は最小限であることを示しています。

水晶振動子のオンチップ負荷コンデンサを変更する方法は、『[CC13xx/CC26xx ハードウェア構成および PCB 設計の検討事項](#)』アプリケーション ノートに説明が含まれています。

3.4 ESR およびスタートアップ時間

ESR (等価直列抵抗) は、水晶振動子のデータシートに記載されている水晶振動子のパラメータです。負性抵抗は、コンデンサの値、水晶振動子のパラメータ、およびオンチップ回路を含む、発振器回路全体のパラメータです。水晶発振器の最適にスタートアップさせるために、初期スタートアップ時に負性抵抗の大きさを R_N の少なくとも 3 倍にする必要があります (式 10 および 式 11 を参照)。

$$ESR < \frac{|R_N|}{3} \quad (10)$$

$$R_N = \frac{-g_m}{(2\pi f)^2 (2C_L)^2} \quad (11)$$

初期スタートアップ時に負性抵抗の大きさが ESR の 3 倍でないと、発振器が最良レベルで動作しない可能性、または環境の変化や水晶振動子の製造のばらつきがあるためにスタートアップに失敗する可能性があります。

注

水晶振動子の ESR が大きい場合、一般に、ESR の小さい水晶振動子よりもスタートアップ時間が長くなります。負荷容量が大きいと発振器の負性抵抗が減少し、スタートアップ時間が長くなります。

3.5 励振レベルおよび消費電力

多くの場合、水晶振動子の最大励振レベルは、水晶振動子のデータシートに μW 単位で指定されています。この値を超えると、水晶振動子が損傷したり、寿命が短くなったりする可能性があります。CC13xx および CC26xx デバイスは、24MHz および 48MHz 水晶振動子では最大 $1.6\text{V}_{pp_differential}$ 、32.768kHz 水晶振動子では最大 $600\text{mV}_{pp_differential}$ で水晶振動子を駆動します。セクション 1.2.3 に示されているように、式 5 では励振レベルが W 単位で示されています。

総容量負荷と ESR が大きいほど、水晶振動子を駆動するためにより多くの電力が必要になるため、発振器の消費電力が増加します。32.768kHz 水晶振動子は長時間オンになるため、この増加は重要です。低消費電力モードで低消費電力を実現するには、低 ESR および低 C_L 32.768kHz 水晶振動子を選択することが重要です。

注

24MHz または 48MHz の水晶発振器ピンにプローブを印加する際には、内部 DC-DC を使用しないでください。このプローブを印加すると、発振器が停止し、内部 DC/DC によって高い出力電圧が生成され、デバイスに損傷を与える可能性があります。

3.6 水晶振動子パッケージ サイズ

水晶振動子には複数の異なるパッケージがあります。使用可能な基板面積とコストによって、使用するパッケージ サイズが決まります。パッケージが小さい水晶振動子では、ESR と直列インダクタンスが大きくなります。これらが小さいパッケージは、水晶発振器のスタートアップ時間が長くなります。より小型のパッケージが必要な場合は、 C_L の低い水晶を選択することで、このスタートアップ時間の延長を補償できます。

4 水晶振動子の PCB レイアウト

水晶振動子のレイアウトによって寄生容量を低減でき、さらに重要なことには発振器の入力で結合することによるノイズを低減できます。発振器の入力にノイズが発生すると、クロックグリッチ、フラッシュの破損、システムクラッシュなどの深刻な副作用につながる可能性があります。これは、CC26xx と CC13xx の各デバイスは、高周波および低周波のシステムクロックとして水晶発振器に依存しているためです。

水晶振動子のレイアウトについて、以下にいくつかの推奨事項を示します。

- PCB 配線の長さを最小限に抑えるため、水晶振動子はデバイスのできるだけ近くに配置します。(この配置により、クロストークが低減され、EMI が最小化されます。)
- TI は、水晶の下にソリッドのグランドプレーンを配置することを推奨しています。
- 発振器へのノイズのクロス結合を最小限に抑えるため、高速デジタル信号が水晶振動子の近くに配置されていないことを確認します。

図 4-1 に、CC26xx リファレンス デザインのレイアウトの最上位層を示します。下層はソリッドのグランドプレーンです。詳細については、『[SimpleLink™ CC2650 評価基板キット 4XD \(CC2650EM-4XD\) v1.0.3 設計ファイル](#)』を参照してください。同じ水晶振動子レイアウトを CC13xx デバイスで使用できます。

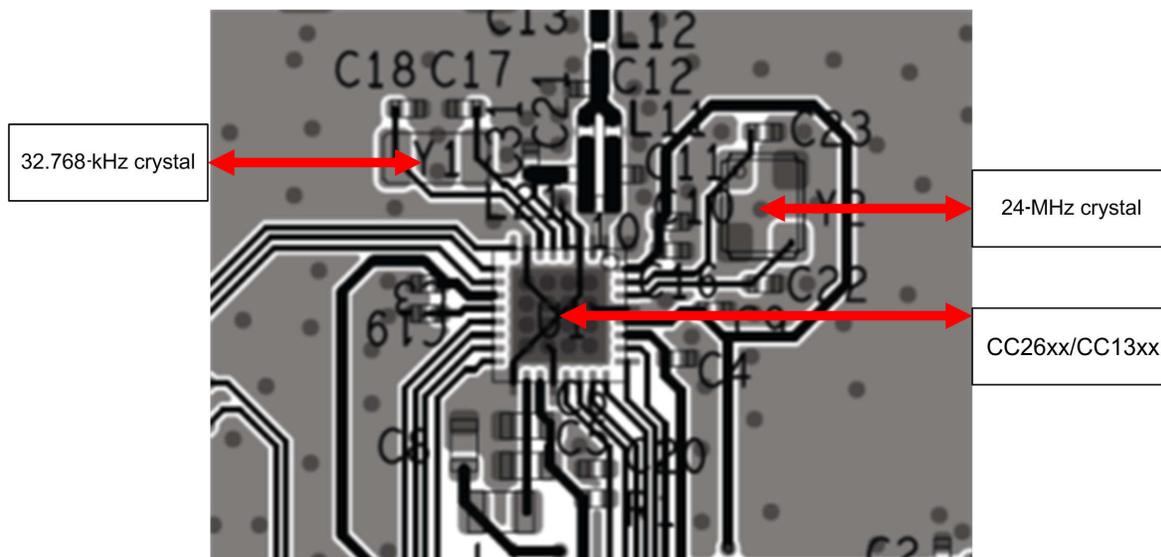


図 4-1. CC26xx 評価基板のレイアウト

5 水晶振動子の振動の振幅の測定

CC26XX および **CC13XX** には、水晶振動子の振動の振幅を測定し、この振幅を予想される振幅と比較する 2 つの機能が存在します。これらの機能は以下の通りです:

- uint32_t OSCHF_DebugGetCrystalAmplitude (void);
- uint32_t OSCHF_DebugGetExpectedAverageCrystalAmplitude (void);

コードに挿入された最初の関数は、水晶振動子の振幅を mV 単位で返します。第 2 の関数は、予想される発振の振幅を mV 単位で返します。これらはデバッグ機能のみです。最初の機能は、オンチップ ADC を使用して水晶振動子の振幅を測定します。これらの関数が非常に異なる値を返す場合、水晶振動子に問題がある可能性があります。最初の関数の不確定性は $\pm 50\text{mV}$ です。予測値から 50mV の偏差が懸念になることはありません。

5.1 HPMRAMP1_TH および XOSC_HF_FAST_START を決定するためのスタートアップ時間の測定

次のコードを使用して、**CC26X2** および **CC13X2** デバイスの高周波水晶振動子のおおよそのターンオン時間を測定できます。この機能は、高周波クロックの有効化から高周波クロックが適格になるまでの低周波クロック エッジの数をカウントすることによって動作します。より正確な結果を得るには、外部の測定機器が必要です。

```
uint32_t OSCHF_DebugGetCrystalStartupTime( void )
{
    uint32_t lfEdgesFound = 0 ;
    // Start operation in sync with the LF clock
    HWREG( AON_RTC_BASE + AON_RTC_O_SYNCLF );
    OSCHF_TurnOnXosc();
    while ( ! OSCHF_AttemptToSwitchToXosc() ) {
        HWREG( AON_RTC_BASE + AON_RTC_O_SYNCLF );
        lfEdgesFound ++ ;
    }
    OSCHF_SwitchToRcOscTurnOffXosc();
    return ( lfEdgesFound );
}
```

CC26XX および **CC13XX**、**CC26X2** および **CC13X2** デバイスの場合、OSCHF_DebugGetCrystalStartupTime() の組み込み driverlib 実装を使用して水晶のスタートアップ時間を測定することもできます。

6 CC13xx, CC26xx, CC23xx, CC27xx の水晶振動子

表 6-1 ~ 表 6-4 に、CC デバイスで使用するための適切な水晶振動子を示します。

表 6-1. CC13x2, CC26x2, CC23xx の 48MHz 水晶振動子

メーカー	MPN	パッケージ	ESR 最大 [Ω]	CL [pF]	合計 [ppm]	温度合計 [ppm]	温度範囲 [°C]	準拠	コメント
KDS	DSX211S 7AF04800A1M	2016	30	8	±10	±40	-40/125	AEC-Q200	LAUNCHXL-CC26X2R1 と LP-EM-CC2340R5 で KDS によりテスト済み
京セラ	CX2016DB 4800C0FPLC1	2016	30	7	±10	±20	-40/85		LAUNCHXL-CC26X2R1 で使用
京セラ	CX2016DB 4800C0FRFC1	2016	30	7	±10	±20	-40/105	AEC-Q200	LAUNCHXL-CC26X2R1 で京セラによりテスト済み
NDK	NX2016SA 48.000MHz EXS00A-CS05517	2016	40	7	±10	±30	-40/85		CC26x2REM-7ID で特性評価に使用
TXC	8Y48072007	2016	40	8	-3/+7	-14/+12	-40/95		
Tai-Saw (TST)	TZ2365D	2016	40	7	±10	±25	-40/105	AEC-Q200	CC26x2REM-7ID-Q1 で特性評価に使用

表 6-2. CC23xx および CC27xx 専用の 48MHz 水晶振動子

メーカー	MPN	パッケージ	ESR 最大 [Ω]	CL [pF]	合計 [ppm]	温度合計 [ppm]	温度範囲 [°C]	準拠	コメント
エプソン	FA2016AA X1E000381A17100	2016	60	7	±10	±35	-40/125	AEC-Q200	LP-EM-CC2340R5 でエプソンによりテスト済み
京セラ	CX2016DB 4800C0WSRT1	2016	30	7		±40 (全範囲)	-40/125	AEC-Q200	LP-EM-CC2340R5 で京セラによりテスト済み
NDK	NX2016SA 48.000MHz EXS00A-CS14953	2016	40	8		±40 (全範囲)	-40/105		Launchpad LP-EM-CC2340R5_E3 で NDK によりテスト済み
NDK	NX1612SA 48MHz EXS00A-CS15039	1612	50	8		±40 (全範囲)	-40/125	AEC-Q200	Launchpad LP-EM-CC2340R5_E3 で NDK によりテスト済み
Tai-Saw (TST)	TZ3908AAAO43	2016	30	7	±5	±30	-40/125	AEC-Q200	Launchpad LP-EM-CC2340R5_E3 と特性評価で使用。水晶振動子は CC2745R10-Q1 Launchpad で使用
Murata (村田製作所)	XRCGE48M000MXF1LR 0	2016	60	7		±40 (全範囲)	-40/125	AEC-Q200	Launchpad LP-EM-CC2340R5_E3 で村田製作所によりテスト済み

表 6-3. CC13x0 と CC26x0 の 24MHz 水晶振動子

メーカー	MPN	パッケージ	ESR 最大 [Ω]	CL [pF]	合計 [ppm]	温度合計 [ppm]	温度範囲 [°C]	準拠	コメント
エプソン	TSX-3225 24.000MF15X-AC3	3225	60	9	±10	±10	-40/85		特性評価 (EMS) で使用
エプソン	TSX-3225 24.000MF10Z-AC3	3225	60	9	±10	±10	-20/75		F15X と同様の仕様だが、温度範囲が狭い
エプソン	TSX-3225 X1E000021004800	3225	40	9	±10	±20	-40/105	AEC-Q200	CC2640Q1EM
NDK	NX2016SA 24MHz EXS00A-CS08891	2016	60	6	±10	±15	-30/85		CC2640R2F WCSP の特性評価で使用
NDK	NX2016SA 24MHz EXS00A-CS07553	2016	60	7	±10	±15	-30/85		NDK によりテスト済み
NDK	NX3225SA 24MHz EXS00A-CS07532	3225	50	9	±10	±15	-30/85		NDK によりテスト済み
京セラ	CX2016DB 2400C0WPRC1	2016	60	7	±10	±15	-40/85		京セラによりテスト済み
京セラ	CX2016SA 2400C0FRNC1	2016	30	7	±10	±25	-40/105	AEC-Q200	

表 6-3. CC13x0 と CC26x0 の 24MHz 水晶振動子 (続き)

メーカー	MPN	パッケージ	ESR 最大 [Ω]	CL [pF]	合計 [ppm]	温度合計 [ppm]	温度範囲 [°C]	準拠	コメント
TXC	8Q24030001	1612	70	5.8	±15	±15	-30/85		TXC によりテスト済み
Murata (村田製作所)	XRCGB 24M000FBP12R0	2016	80	6	±15	±20	-40/85		村田製作所によりテスト済み

表 6-4. CC13xx、CC26xx、CC23xx、CC27xx の 32.768kHz 水晶振動子

メーカー	MPN	パッケージ	ESR 最大 [Ω]	CL [pF]	合計 [ppm]	放物線係数 [ppm/°C ²]	温度範囲 [°C]	準拠	コメント
エプソン	FC-135	3215	70k	7	±20	-0.04	-40/85		最小消費電流。特性評価 (EMS) で使用
エプソン	FC-13A X1A000091001214	3215	70k	7	±20	-0.04	-40/125	AEC-Q200	LaunchPad CC26x2REM-7ID-Q1_A1 で 使用
エプソン	FC2012AA X1A000181000318	2012	75k	7	±20	-0.04	-40/125	AEC-Q200	この水晶振動子は CC2745R10-Q1 Launchpad で使用。LP-EM-CC2340R5 でエプソンによりテスト済み
KDS	DST1610A 7BG03276AAC	1610	70k	7	±20	-0.04	-40/125	AEC-Q200	LAUNCHXL-CC26X2R1 と LP-EM-CC2340R5 で KDS によりテスト済み
NDK	NX3215SA 32.768kHz EXS00A-MU00529	3215	70k	7	±20	-0.04	-40/85		最小消費電流。特性評価で 使用
NDK	NX2012SA 32.768kHz EXS00A-MU00530	2012	80k	7	±20	-0.04	-40/85		
NDK	NX2012SA 32.768kHz EXS00A-MU01792	2012	120k	9	±20	-0.04	-40/125	AEC-Q200	Launchpad LP-EM- CC2340R5_E3 で NDK により テスト済み
セイコーインスツル株式会社	SC-32S 6pF	3215	70k	7	±20	-0.03	-40/85		セイコーによりテスト済み
セイコーインスツル株式会社	SC-20S 7pF	2012	70k	7	±20	-0.03	-40/85		セイコーによりテスト済み
セイコーインスツル株式会社	SC-16S 7pF	1610	90k	7	±20	-0.035	-40/85		セイコーによりテスト済み
京セラ	ST3215SB 32768C0HPWBB	3215	70k	7	±20	-0.05	-40/85		京セラによりテスト済み
京セラ	ST2012SB 32768C0HPWB4	2012	70k	7	±20	-0.05	-40/85		京セラによりテスト済み
Tai-Saw (TST)	TZ3359DAAO73	1610	120k	7	±20	-0.04	-40/125		Launchpad LP-EM- CC2340R5_E3 と特性評価 で使用
TXC	9H03270072	2012	90k	7	±20	-0.04	-40/105		

7 高性能 BAW 発振器

SimpleLink™ 製品ファミリーは、高性能のバルク弾性波 (BAW) 発振器も搭載しており、水晶振動子なしの無線動作を実現できます。この画期的な技術については、TI.com で「[水晶不使用 BAW 共振器を内蔵した SimpleLink™ 32 ビット Arm Cortex-M4F マルチ プロトコル 2.4GHz ワイヤレス マイコン](#)」について説明されている複数の技術資料に記載されています。

8 CC23XX および CC27XX ソフトウェア振幅補償

概要

このセクションでは、CC23XX および CC27XX で HFXT 振幅を制御するために必要なソフトウェア補償と実装の詳細について説明します。これは、ソフトウェアレベルで次の 2 つを行うことを目的としています：

1. 優れた振幅を実現するには、HFXT のリファレンス電流 (IREF) を調整する。
2. フォルト状態を検出して処理し、システムを正常に動作させる。

注

SysConfig で構成できるオプションのブートアップ補正があり、これにより水晶が初めて起動するときに電流を十分に調整できるようになります。これには、スタンバイ後の動作は含まれません。

これらのレジスタのドキュメントを確認してください。デバッグ時の詳細については、HFXTFAULT、TRACKREFLOSS、TRACKREFLOOR を参照してください。

9 CC23XX および CC27XX の内部コンデンサアレイ

概要

48MHz HFXT (高周波水晶発振器) キャパシタアレイは、負荷容量を調整することによって水晶振動子の周波数を微調整できるように設計されています。このセクションでは、設定の概要、主な検討事項、およびベストプラクティスについて説明します。

キャパシタアレイは、ピンごとに 4 行の直列に 16 個のコンデンサとして構成されているため、負荷容量を正確に調整できます。

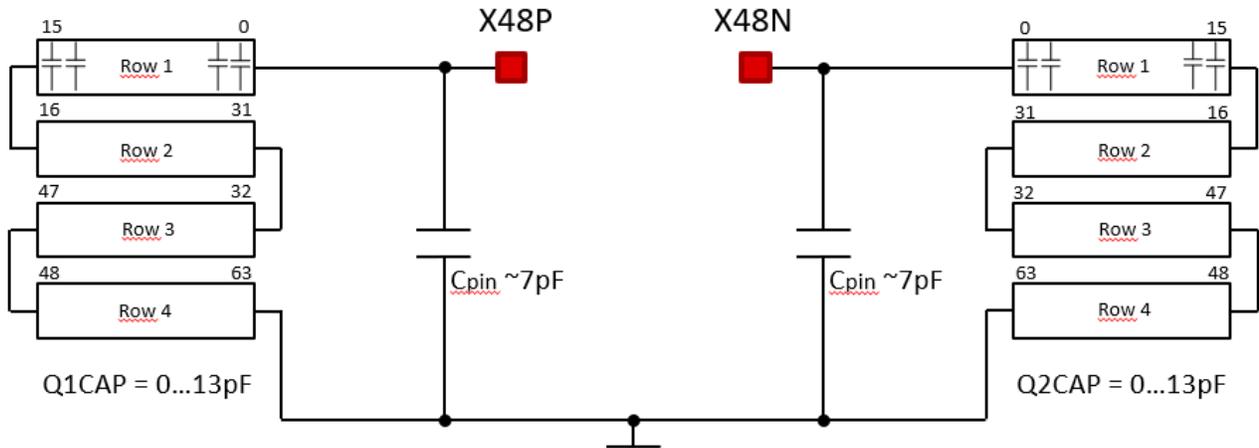


図 9-1. 内蔵コンデンサアレイ図

キャパシタアレイのプログラミング

キャパシタアレイは、SDK の「デバイス構成」セクションに入っている `syscfg` ファイルを使用して構成できます。

- トリムコードの範囲は、ピンごとに 0 ~ 63 (0x0 ~ 0x3F) です。

注

非単調なトリムカーブを避けるために、トリムコード 16 および 48 を使用しないでください。

負荷容量に関する検討事項

水晶周波数に影響を与える総負荷容量は次ので構成されます。

- ピン容量 (ピンごとに $\approx 7\text{pF}$)
- キャパシタアレイの寄与 (Q1CAP + Q2CAP、それぞれ最大 13pF)
- PCB レイアウトとパッケージ特性による付加的な寄与

制約

- ユーザーは、キャパシタアレイ機能を無効化できません。
- 外部負荷コンデンサを使用する場合は、`syscfg` ファイルで Q1CAP および Q2CAP を 0 に設定することが推奨されます。これにより、寄生容量の推定値は約 3 ~ 4pF となります。
- わずかな温度依存性があり、105°C を超える温度値ではこれがより顕著になります。周波数シフトを考慮することで、この影響を軽減できます。これは、容易に観測できる構造化された挙動によって、効果が非常に予測可能であるためです。

CC23XX および CC27XX の内蔵コンデンサアレイ値

キャップ アレイ値 (Q1 = Q2)	リファレンス ボードで測定された CC23xx の容量 (pF)	リファレンス ボードで測定された CC27xx の容量 (pF)
1	3.7	3.9
2	3.7	4.0
3	3.8	4.1
4	3.9	4.1
5	4.0	4.2
6	4.1	4.3
7	4.1	4.4
8	4.2	4.4
9	4.3	4.5
10	4.4	4.6
11	4.4	4.7
12	4.5	4.7
13	4.6	4.8
14	4.6	4.9
15	4.7	5.0
16	4.7	5.0
17	4.8	5.0
18	4.9	5.1
19	5.0	5.2
20	5.1	5.3
21	5.2	5.4
22	5.3	5.5
23	5.3	5.6
24	5.4	5.7
25	5.5	5.8
26	5.6	5.9
27	5.7	6.0
28	5.8	6.1
29	5.9	6.2
30	6.0	6.3
31	6.1	6.4
32	6.3	6.6
33	6.4	6.7
34	6.5	6.8
35	6.6	6.9
36	6.7	7.0
37	6.8	7.2
38	6.9	7.3
39	7.1	7.4

キャップ アレイ値 (Q1 = Q2)	リファレンス ボードで測定された CC23xx の容量 (pF)	リファレンス ボードで測定された CC27xx の容量 (pF)
40	7.2	7.5
41	7.3	7.6
42	7.4	7.8
43	7.5	7.9
44	7.6	8.0
45	7.7	8.1
46	7.8	8.2
47	7.9	8.3
48	7.9	8.3
49	8.1	8.5
50	8.3	8.7
51	8.4	8.8
52	8.6	9.0
53	8.7	9.2
54	8.9	9.3
55	9.0	9.5
56	9.2	9.7
57	9.3	9.8
58	9.5	10.0
59	9.6	10.1
60	9.8	10.3
61	9.9	10.5

水晶振動子のチューニングの詳細については、技術サポートにお問い合わせください。

10 CC13xx および CC26xx の内部コンデンサアレイ

概要

CC26x2 および CC13x2 無線には、周波数基準として 24MHz または 48MHz 水晶振動子が必要です。しかし、水晶振動子と XOSC チューニング コンデンサの間の大電流は、48MHz が倍数のときにスプリアスが発生する可能性があります。これらのスプリアスは、PA と VCO との共有電源レールで電圧降下を発生させることで、干渉を引き起こす可能性があります。XOSC チューニング コンデンサをゼロに減らすと、最大のスプリアスが約 5dB 減少します。

負荷容量に関する検討事項

通常は内部コンデンサアレイで十分ですが、ARIB STD T-108 および中国規制 (470–510MHz) への準拠が必要なシステムの場合、および +20dBm PA を使用する場合は、外部水晶振動子負荷コンデンサが推奨されます。この場合、内部 XOSC チューニング コンデンサをゼロに設定すると、スプリアスを最小化できます。このシステムでは、正または負にできるオフセット値を使用して調整でき、容量を微調整できます。

制約

サポートされている最小値以下にキャップ アレイ デルタが設定されていない限り、内蔵コンデンサアレイを完全に無効化することはできません。実際の結果として得られる容量には寄生容量が含まれるため、最小の設定は 0pF と等しくなりません。発振器の精度を検証するには、スペクトル アナライザを使用して、変調されていない搬送波を測定する必要があります。ソフトウェアで値を確定する前に、SmartRF™ Studio を使用して、負荷容量を即座に調整できます。

表 10-1. CC13XX および CC26XX の内部コンデンサアレイ デルタ

リファレンス ボードでの 容量測定 (pF)	CC13x0/CC26x0 QFN の CCFG デルタ 値	CC2640R2F WCSP の CCFG デルタ値	CC13x1/CC26x1 QFN の CCFG デルタ 値	CC13x2/CC26x2 QFN の CCFG デルタ 値	CC13x4/CC26x4 QFN の CCFG デルタ 値
2.1	< -55	< -28	< -40	< -40	< -40
2.1	-55	-28	-40	-40	-40
2.2	-54	-27	-39	-39	-39
2.3	-53	-26	-38	-38	-38
2.4	-52	-25	-37	-37	-37
2.5	-51	-24	-36	-36	-36
2.6	-50	-23	-35	-35	-35
2.7	-49	-22	-34	-34	-34
2.7	-48	-21	-33	-33	-33
2.8	-47	-20	-32	-32	-32
2.9	-46	-19	-31	-31	-31
3.0	-45	-18	-30	-30	-30
3.1	-44	-17	-29	-29	-29
3.2	-43	-16	-28	-28	-28
3.3	-42	-15	-27	-27	-27
3.4	-41	-14	-26	-26	-26
3.4	-40	-13	-25	-25	-25
3.6	-38	-12	-24	-24	-24
3.7	-37	-11	-23	-23	-23
3.8	-36	-10	-22	-22	-22
3.9	-35	-9	-21	-21	-21
4.0	-34	-8	-20	-20	-20
4.1	-33	-7	-19	-19	-19
4.3	-32	-6	-18	-18	-18
4.4	-31	-5	-17	-17	-17

表 10-1. CC13XX および CC26XX の内部コンデンサアレイ デルタ (続き)

リファレンス ボードでの 容量測定 (pF)	CC13x0/CC26x0 QFN の CCFG デルタ 値	CC2640R2F WCSP の CCFG デルタ値	CC13x1/CC26x1 QFN の CCFG デルタ 値	CC13x2/CC26x2 QFN の CCFG デルタ 値	CC13x4/CC26x4 QFN の CCFG デルタ 値
4.5	-30	-4	-16	-16	-16
4.6	-29	-3	-15	-15	-15
4.7	-28	-2	-14	-14	-14
4.8	-27	-1	-13	-13	-13
5.0	-26	0	-12	-12	-12
5.1	-25	1	-11	-11	-11
5.2	-24	2	-10	-10	-10
5.3	-23	3	-9	-9	-9
5.5	-21	4	-8	-8	-8
5.6	-20	5	-7	-7	-7
5.8	-19	6	-6	-6	-6
5.9	-18	7	-5	-5	-5
6.1	-17	8	-4	-4	-4
6.2	-16	9	-3	-3	-3
6.4	-15	10	-2	-2	-2
6.5	-14	11	-1	-1	-1
6.7	-13	12	0	0	0
6.8	-12	13	1	1	1
7.0	-11	14	2	2	2
7.1	-10	15	3	3	3
7.3	-9	16	4	4	4
7.4	-8	17	5	5	5
7.6	-7	18	6	6	6
7.7	-6	19	7	7	7
7.9	-5	21	8	8	8
8.2	-4	22	9	9	9
8.4	-3	23	10	10	10
8.6	-2	24	11	11	11
8.8	-1	25	12	12	12
9.0	0	26	13	13	13
9.2	1	27	14	14	14
9.4	2	28	15	15	15
9.6	3	29	16	16	16
9.8	4	30	17	17	17
10.1	5	31	18	18	18
10.3	6	32	19	19	19
10.5	7	33	20	20	20
10.7	8	34	21	21	21
10.9	9	35	22	22	22
11.1	10	36	23	23	23
11.1	> 10	> 36	> 23	> 23	> 23

11 まとめ

TI の低消費電力ワイヤレス マイコン CC13xx、CC26xx、CC23xx、CC27xx ファミリーでは、RF およびシステム機能用のリファレンス クロックとして内蔵の 24MHz または 48MHz 高周波発振器 (XOSC-HF または HFXT) に依存しています。高精度のクロック ソースは、RF 性能の維持、規制への準拠、効率的なシステム動作に不可欠です。パワーダウン モードでは、高周波発振器は通常オフになり、特に Bluetooth Low Energy のような時間同期プロトコルでは、32.768kHz の低周波数発振器 (XOSC-LF または LFXT) がシステム タイミングを維持します。これらの発振器はピアス アーキテクチャを使用し、水晶と関連するコンデンサがパイ フィルタを形成して、周波数を安定させます。

水晶振動子を選択する際の主要な要因には、等価直列抵抗 (ESR)、直列インダクタンス、励振レベル、容量性負荷があります。ESR は、共振時の水晶振動子の抵抗を表し、信頼性の高いスタートアップと効率的な動作を確実に実現するために十分に低い値にする必要があります。水晶振動子の励振レベルは、マイクロワットで定義され、損傷を防ぐためにメーカーの仕様を超えないようにする必要があります。発振器回路の相互コンダクタンス (gm) によって水晶振動子を駆動する能力が決まります。CC23xx または CC27xx は高周波発振器で、19mS gm、CC13xx または CC26xx は 7mS、低周波発振器は 30μS です。スタートアップ時間は、負性抵抗、直列インダクタンス、回路全体の条件に依存します。

周波数精度は、製造時の許容誤差、温度安定性、経年劣化、負荷容量の不一致による周波数プルに依存します。負荷容量 (CL) は、正しい発振周波数を検証する上で重要であり、オンチップ コンデンサと外部コンデンサの両方を考慮に入れます。デバイスの仕様に適合するように、水晶振動子を選択する必要があります。これにより、低容量性負荷とのバランスを維持し、電力効率の向上と環境変動に対する安定性のバランスを確保することができます。信頼性の高いスタートアップを保証するには、負性抵抗を ESR の少なくとも 3 倍にする必要があります。ESR が過度な場合、スタートアップ時間が長くなる可能性があります。

水晶振動子の選択を最適化するには、サイズ、性能、コストの間でのトレードオフを考慮する必要があります。直列抵抗と直列インダクタンスが小さく、適切な容量性負荷のある水晶振動子を選択することで、スタートアップ時間と消費電力を削減することができます。推奨水晶振動子のリストが表示されていますが、重要な仕様を満たしている限り、その選択は水晶振動子だけに限定されません。内部容量設定が最小限に抑えられている場合、外部コンデンサを使用して CL を微調整できます。バッテリー駆動のワイヤレス アプリケーションで安定した動作と効率的な性能を維持するには、水晶振動子の適切な選択が不可欠です。

12 参考資料

1. IEEE、『Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 802.15.4-2006』、Web ページ
2. Bluetooth、『Bluetooth Core Specifications, Version 4.2』、Web ページ
3. テキサス インストルメンツ、『CC13xx/CC26xx ハードウェア構成および PCB 設計の検討事項』、アプリケーション ノート
4. テキサス インストルメンツ、『CC2650 SimpleLink™ 高性能マルチバンド ワイヤレス マイコン』、データシート
5. テキサス インストルメンツ、『SimpleLink™ CC2650 評価基板キット 4XD (CC2650EM-4XD) v1.0.3 設計ファイル』
6. テキサス インストルメンツ、『CC13x0, CC26x0 SimpleLink™ ワイヤレス マイコン』、テクニカル リファレンス・マニュアル

13 改訂履歴

Changes from Revision K (April 2024) to Revision L (April 2025)	Page
• 「CC27xx ファミリー」を追加.....	1
• 「各デバイス ファミリーの負性抵抗の推定値」を変更および追加.....	4
• 「48MHz」の「TI 特性値」を追加.....	5

Changes from Revision J (August 2021) to Revision K (April 2024)	Page
• セクション 6 の 表 6-1、表 6-2、表 6-4 の水晶振動子を追加.....	16

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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ます。

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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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、ます。

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テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated