

Design Guide: TIDA-010267

低PI向けダイナミックレンジ90dBのシングルチップパルスオキシメータのリファレンスデザイン



概要

このリファレンス デザインは、低コストのシングルチップ パルス オキシメータ設計で使用する MSPM0L1306 のアナログ機能を示します。MSPM0L1306 内の複数のオペアンプ (OPA) は、ゼロドリフト、低ノイズ性能を持つトランスインピーダンス アンプ (TIA) や電流制御ドライバとして機能します。内蔵の高速 A/D コンバータ (ADC) にはオーバーサンプリング機能があり、高い水準のダイナミックレンジを実現できます。この設計では、光電式容積脈波 (PPG) の波形と、1 分あたりの心拍数 (BPM) や末梢酸素飽和度 (%SpO₂) のようなバイタルサイン測定値を視覚化する GUI を採用しています。

リソース

TIDA-010267	デザイン フォルダ
MSPM0L1306	プロダクトフォルダ
MSPM0-SDK	設計および開発
GUI	GUI ギャラリー

特長

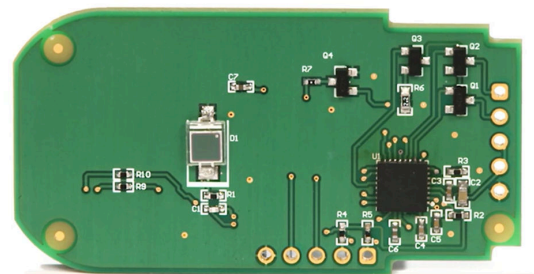
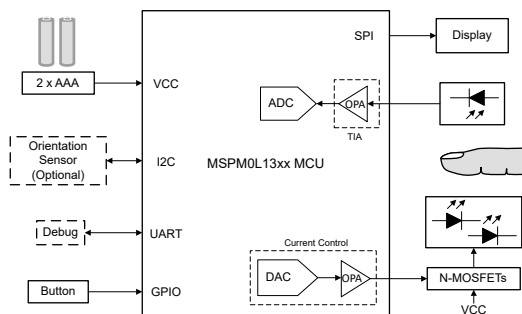
- 測定可能な心拍数は 30 ~ 240 ビート/分 (BPM) の範囲、灌流指標 (PI) は 0.1% ~ 20% の範囲であり、さまざまな脈拍強度への対応と信頼性の向上に貢献
- 内部 12 ビット ADC とオーバーサンプリングへの対応を通じて、90dB のダイナミックレンジを実現
- 標準的な表示解像度は 1BPM と 1% の SpO₂ であり、高精度のバイタル測定に寄与
- デバイスのオフ期間はシャットダウン電流が非常に小さく (83nA 未満)、バッテリー動作時間の延長に貢献

アプリケーション

- 医療用パルス オキシメータ
- マルチパラメータ メディカル モニタ



テキサス・インスツルメンツの TI E2E™ サポート エキスパートにお問い合わせください。



1 システムの説明

パルス オキシメータは、血中酸素飽和度および脈拍数を監視するための医療機器です。機器によって測定された酸素レベルと心拍数は、ユーザーの健康状態を監視し、医師が病気の原因や状態を迅速に診断するのに役立ちます。したがって、この装置は病院や家庭で広く使用されています。

パルス オキシメータは、脈拍数と血中の末梢酸素飽和度 (%SpO₂) をモニタリングするための非侵襲的機器です。

パルス オキシメータによる血液の酸化レベル (SpO₂) の計算は、体組織によって減衰した光の強度測定を基にしています。SpO₂ は、総ヘモグロビンレベル (酸化ヘモグロビンと脱酸化ヘモグロビン (Hb)) に対する酸化ヘモグロビン (HbO₂) レベルの比として定義されます。式 1 を参照してください。

$$SpO_2 = \frac{HbO_2}{HbO_2 + Hb} \quad (1)$$

原理的に、HbO₂ と Hb は、光の波長によって異なる応答を示します。Hb は赤外 (IR) 光よりも赤色光を多く吸収する一方、HbO₂ は赤外光をより多く吸収します。図 1-1 に示すように、赤色発光ダイオードと IR 発光ダイオード (LED) を交互に駆動して指を通過させると、指で吸収されていない光の量 (感知素子としてフォトダイオードを使用) と、血液中の Hb および HbO₂ の濃度は関連しています。

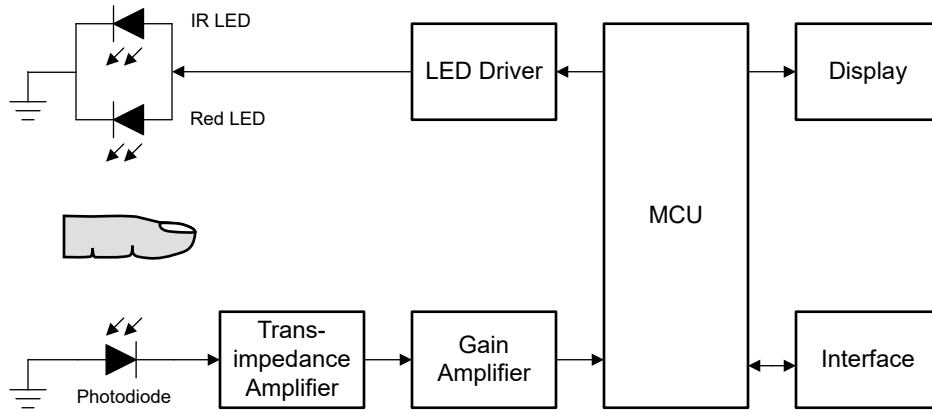


図 1-1. パルス オキシメータのブロック図

2 種類の光の波長を使用し、それぞれをオンにしながら交互に測定します。2 つの異なる波長を使用することで、計測の数学的複雑さを低減できます。

$$R = \frac{\log(I_{ac})\lambda_1}{\log(I_{ac})\lambda_2} \quad SpO_2 \propto R \quad (2)$$

ここで

- λ_1 と λ_2 は、使用する 2 つの異なる光の波長を表します。

測定には DC 成分と AC 成分があります。DC 成分は、体組織、静脈および毛細血管内の血液、および動脈内の脈を打たない (周期的な変動のない) 血液による吸収および散乱の結果であると仮定します。AC 成分は、動脈内の脈動性 (周期的な変動を伴う) の血液による吸収の結果です。

実際には、SpO₂ と R の関係は、式 2 で示されているほど線形ではありません。このため、ルックアップ テーブルを使用して正しい読み値を取得します。

R つまり SpO₂ の信頼性は、信号入力で良好なダイナミックレンジを達成できるかどうか依存します。ダイナミックレンジ (DR) は式 3 を使用し、有効ビット数 (ENOB) から計算されます。

$$DR = 20 \times \log_{10}(2^{ENOB}) \quad (3)$$

2 システム概要

2.1 ブロック図

MSPM0 パルス オキシメータ設計では、図 2-1 に示すように、さまざまなアナログおよびデジタル ペリフェラルを使用して、高性能で低コストのパルス オキシメータ設計をシングル チップに統合しています。

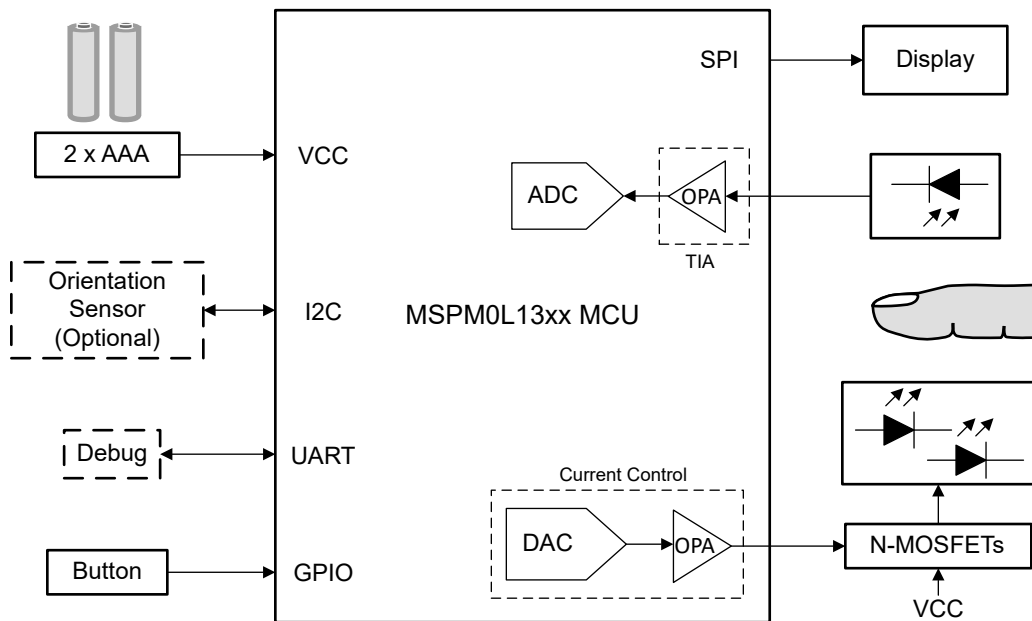


図 2-1. TIDA-010267 パルス オキシメータのブロック図

2.2 設計上の考慮事項

図 2-2 に、MSPM0L1306 で使用されているアナログブロックと、それらのブロックが LED やフォトダイオード部品とどのように相互作用しているかを示します。

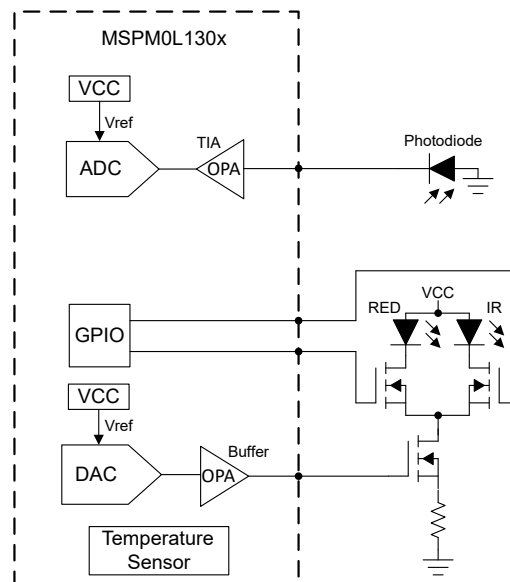


図 2-2. TIDA-010267 パルス オキシメータのアナログ フロント エンド

2.2.1 フォトダイオード、TIA、ADC

TIDA-010267 では、ナノアンペア程度の電流で得られるフォトダイオード信号を電圧に変換し、MSPM0L1306 の ADC の範囲に収まるように増幅しています。これは、内蔵 OPA の低い入力バイアス電流を使用することで実現でき、図 2-5 に示すように、設計で OPA を TIA として利用できるようになります。高速 ADC の基準として MSPM0L1306 電圧入力を使用することで、このコンバータはより迅速なサンプリングが可能になり、オーバーサンプリングや LED のオン時間の短縮ができます。サンプリングの間に内部電圧を監視する機能があるため、MSPM0L1306 は着信信号のレベルを定量化し、それに応じてパラメータを調整できます。内部温度センシングなど、その他の機能も使用できます。

2.2.2 LED の駆動

AFE ブロック図 (図 2-2) は、各 LED の電力が MOSFET によって管理され、MSPM0L1306 の GPIO ピンによって制御されることを示しています。これら 2 つの MOSFET が、それぞれ LED のオン状態とオフ状態を制御します。

TIDA-010267 は、波長が 660nm (赤) および 940nm (IR) の単一部品 LED を使用しています。MSPM0L1306 の内部 8 ビット DAC と、LED を流れる電流を決定する共通の MOSFET に OPA 電圧フォロワを出力することで、LED の輝度制御を実現できます。内部 ADC 接続と内部電圧リファレンスを使用してバッテリーの電圧を定期的に監視できるため、DAC の電圧出力を既知のレベルまで確実に減衰させ、LED に流れる望ましい電流を正確に特定できます。

2.2.3 電源

TIDA-010267 の電力は、MSPM0L1306 に直接接続された 2 個の単四電池から供給します。単四電池は使用時に電圧が低下する傾向がありますが、MSPM0L1306 は電源電圧範囲が最小 1.62V と広いので、バッテリーの寿命をより長く利用することができます。MSPM0L1306 に内蔵されている LED の駆動設定により、電池から LED に電力を供給することもでき、これにより、MCU からの電流制御によるバッテリー駆動 LED の輝度制御が可能になります。電力と制御可能な機能の柔軟性から、外部電源 IC がなくてもデバイスは適切に機能するので、コストとチップ数を削減できます。

2.2.4 ディスプレイ、方向、通信機能

図 2-3 および 図 2-4 に、パルス オキシメータのオプション機能配線とレイアウトスペースを示します。ドライバを内蔵したディスプレイは、4 線式 SPI を介して MSPM0L1306 の SPI ポート 0 に接続できるため、簡単に組み込み可能です。また、MSPM0L1306 の I2C ポート 0 を使用すると、デバイス ユーザーがより簡単な方法でディスプレイの向きを変えられるよう、方向センサを組み込むことができます。さらに、MSPM0L1306 の汎用非同期レシーバトランスミッタ (UART) のポート 1 を使用すると、テキサス・インスツルメンツの POX GUI またはその他のシリアル データ互換ソフトウェアに送信されるシリアル データの受信および解釈のための通信が可能になります。最後に、TIDA-010267 を使用すると、10 ピン SWD 構成を使用して MCU をプログラミングすることができるようになるため、テキサス・インスツルメンツのリソースを簡単にデバッグおよびテストすることができます。

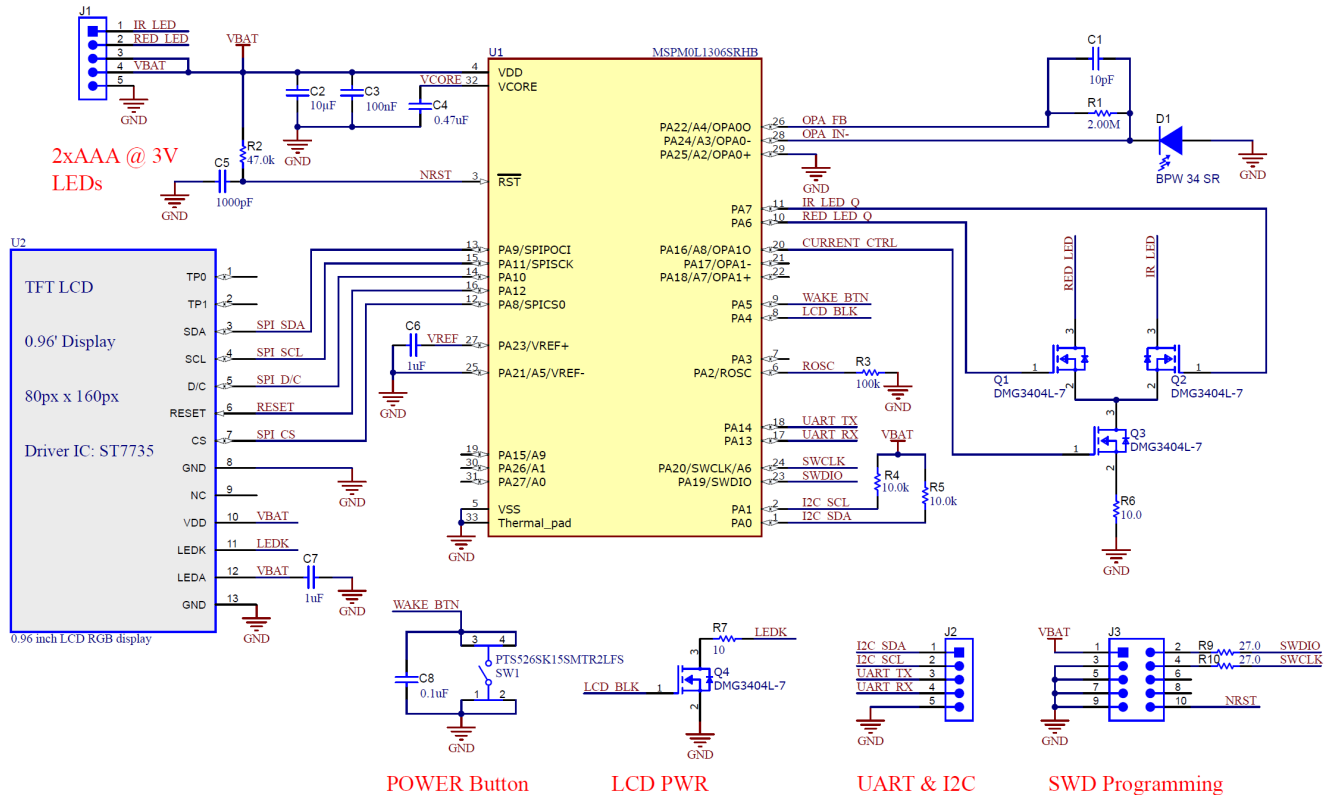


図 2-3. TIDA-010267 のパルス オキシメータの回路図

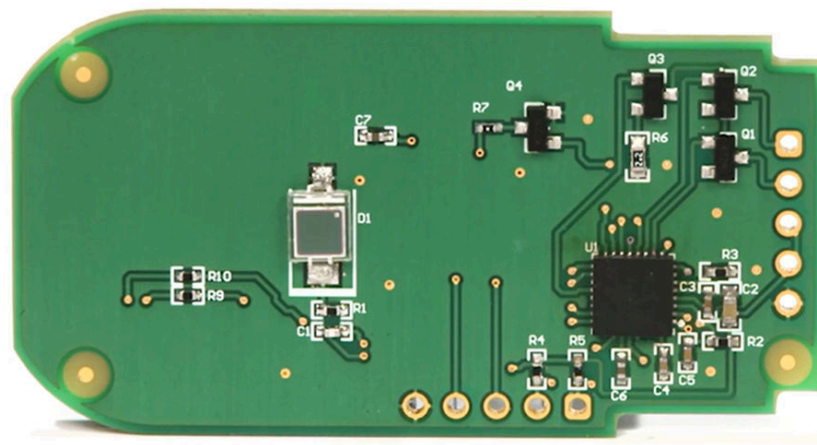


図 2-4. パルス オキシメータ用 TIDA-010267 の PCB

2.2.5 ソフトウェア

2.2.5.1 タイミング構造

図 2-5 に、パルス オキシメータの動作の符号化されたタイミング構造を示します。

- PPG 信号の固有周波数をキャプチャするために、フォトダイオードが赤色光と IR 光の両方を 125Hz でサンプリングしキャプチャします。この信号は変化しますが、通常、周波数は 1 桁です。
- MSPM0L1306 の TIMG0 ブロック (T8 と呼ぶ) によって管理される、キャプチャの 8ms の間の、フォトダイオード サンプリングの取得に関連するいくつかの部品動作ステータスの詳細を図 2-5 に示します。
- TIMG1 ブロック (T1 と呼ぶ) が、8ms の期間の開始時にそれぞれ 2 回、1ms にわたって実行されます。これは、それぞれ赤色 LED および IR LED のオン時間を表します。
- T1 と T8 は、割り込みを利用してアクティブ化と DAC 出力レベルのタイミング、および LED ごとの 256 個の ADC サンプル キャプチャの開始時間を管理します。
- 両方の LED からキャプチャされた ADC データが保存され、T1 からの 2 番目の割り込みを受信すると、MSPM0L1306 は両方の LED を非アクティブ化して電力を節約し、データの処理と計算を開始します。
- この間、ADC はサイクルを繰り返す前に、内部電圧の監視またはシリアル データの送信 (またはその両方) に切り替えることができます。

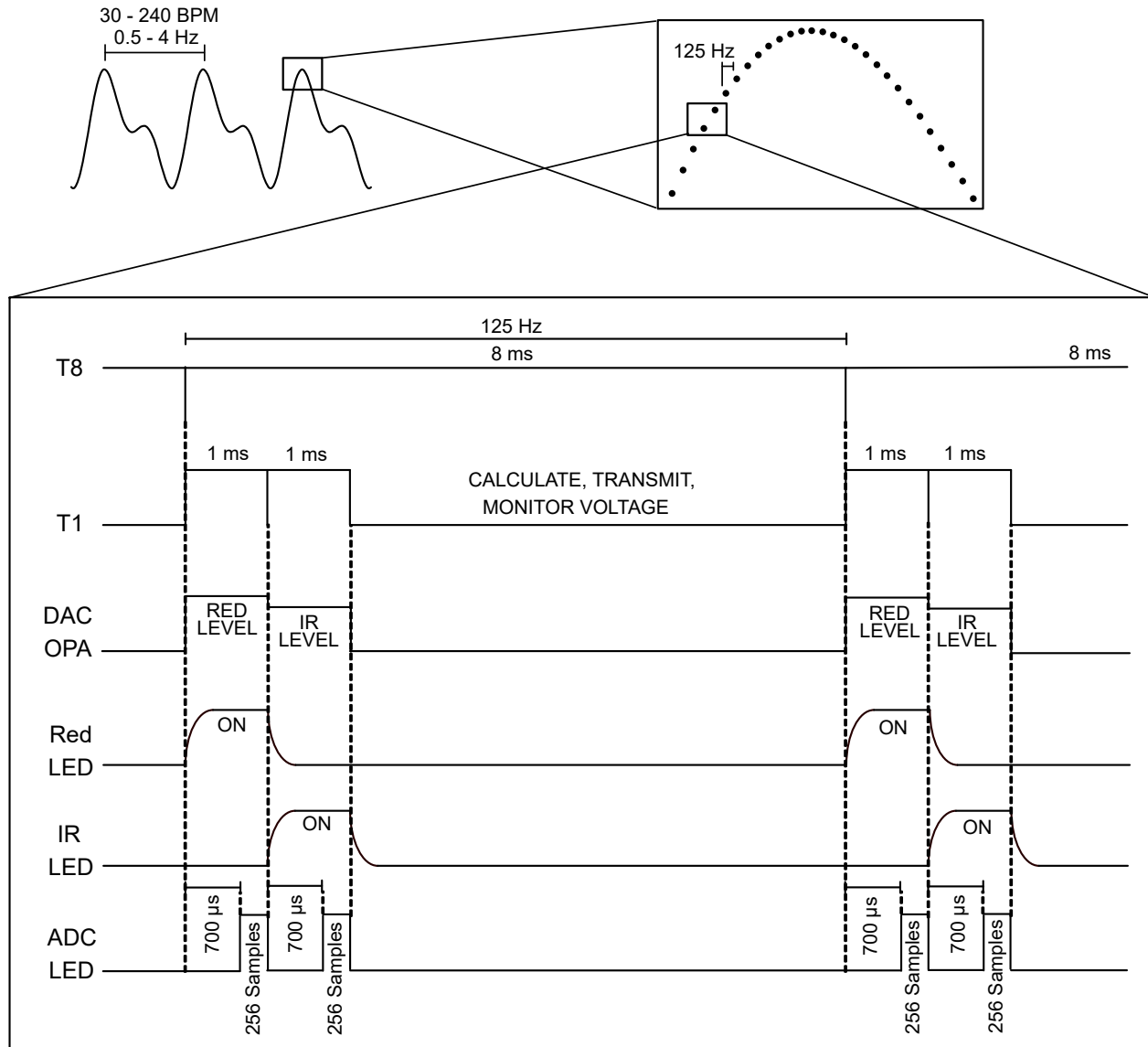


図 2-5. TIDA-010267 タイミング図

2.2.5.2 オーバーサンプリングとデジタル フィルタリングによりダイナミックレンジ拡大

TIDA-010267 リファレンス デザインの主な特長は、オーバーサンプリングとデジタルによるフィルタリングを行うことで達成できる、優れたダイナミックレンジにあります。MSPM0L1306 の高速 12 ビット ADC は、ユーザーの選択に応じてオーバーサンプリングし、ビット数を 16 に増やすことができます。これにより、ENOB の増加と、それによるダイナミックレンジの拡大を設計で活用できるようになります。この設計では、ADC 信号の ENOB をさらに高めるために、振幅を調整可能な移動平均 FIR フィルタを使用し、環境ノイズをフィルタリングして除去しています。PPG 信号はこのような低周波数で動作するため、ダイナミックレンジを拡大するこれらの方法は非常に効果的です。オーバーサンプリングがダイナミックレンジに及ぼす影響の詳細については、[セクション 3](#) を参照してください。

2.2.5.3 バイトルの計算

オーバーサンプリングされたデータには DC 信号と AC 信号の組み合わせが含まれているため、DC 信号を除去できるシンプルなデジタル ローパス IIR フィルタが適用されます。フィルタは、入力値と最後の出力値の差のごく一部を最後の出力値に追加して、新しい出力値を形成することで機能します。入力にステップ状の変化があった場合、一定時間にわたって出力が入力と同じになるように補正を実行します。変化率は、ユーザーが決定するプログラム可能な係数によって制御されます。TIDA-010267 は、実験で決定された係数を使用します。PPG の AC 信号のピークとトラフを検出するアルゴリズムは、信号のピーク間の期間、つまりハートビートの期間を記録するために使用されます。これらの同じ検出を DC 成分の除去と組み合わせ使用して R を計算し、最終的には %SpO₂ を計算します。

2.3 主な使用製品

2.3.1 MSPM0L1306

MSPM0L130x マイクロコントローラ (MCU) は、最高 32MHz の周波数で動作する拡張 Arm® Cortex®-M0+ コア プラットフォームをベースとした、高集積超低消費電力 32 ビット MSPM0 MCU ファミリの製品です。コスト最適化されたこれらの MCU は高性能アナログ ペリフェラルを統合しており、-40°C から 125°C の拡張温度範囲をサポートしており、1.62V から 3.6V の電源電圧で動作します。MSPM0L130x デバイスは、最大 4KB の SRAM を持った、最大で 64KB の内蔵フラッシュ プログラム メモリを提供します。これらの MCU は $\pm 1.2\%$ の精度の高速オンチップ発振器を内蔵しているため、外部水晶振動子は不要です。追加機能には、3 チャンネル DMA、16 および 32 ビット CRC アクセラレータ、各種の高性能アナログ ペリフェラル (1 つの設定可能内部リファレンス電圧付き 12 ビット 1.68MSPS ADC、1 つのリファレンス電圧 DAC 内蔵高速コンパレータ、2 つのゲインをプログラム可能なゼロドリフト ゼロクロスオーバー オペアンプ、1 つの汎用アンプ、1 つのオンチップ温度センサなど) が含まれます。これらのデバイスは、4 つの 16 ビット汎用タイマ、1 つのウィンドウ付きウォッチドッグ タイマ、各種通信ペリフェラル (2 つの UART、1 つの SPI、2 つの I2C を含む) などのインテリジェントなデジタル ペリフェラルも備えています。これらの通信ペリフェラルは LIN、IrDA、DALI、マンチェスター、スマートカード、SMBus、PMBus プロトコルをサポートしています。

3 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、テスト結果

TIDA-010267 の重要な性能は、テキサス・インスツルメンツのラボでテスト済みです。このセクションでは、使用した機器、テストプロセス、および結果について説明します。

3.1 ハードウェア要件

表 3-1. TIDA-010267 のハードウェア要件

装置	説明
TIDA-010267	クリップ形状の LED を使用して組み立てたデモ
TI XDS110 JTAG デバッグ プロンプ	MSPM0L1306 プログラミング用デバッグ プロンプ
FTDI TTL-234X-3V3	信号レベル +3.3V の USB-UART ケーブル
2.5V 電圧リファレンス	ADC 性能をテストするための ADC 範囲内の DC 信号



図 3-1. テスト用の TIDA-010267 を組み立てたデモ

3.2 ソフトウェア要件

3.2.1 テキサス・インスツルメンツ GUI

TI デベロッパー ゾーンのギャラリーから、[TI Pulse Oximeter Demo GUI](#) にアクセスします。

Pulse Oximeter Demo GUI を選択すると、新しいタブが開き、TIDA-010267 に関する情報が表示されます。また、GUI の追加のタブを使用して、データ グラフとバイタル サインにアクセスすることもできます。

3.2.2 CCS プロジェクト

テキサス・インスツルメンツの Pulse Oximeter Demo CCS Project を使用するには、Project タブで最新の MSPM0 SDK フォルダ (ファイルパス `mspm0_sdk_1_10_00_05\examples\nortos\LP_MSPM0L1306\demos`) に移動し、Import CCS Projects を選択します。

CCS プロジェクトを使用すると、デモで目的とする仕様や機能に応じてパラメータを変更できます。

3.2.3 アナログ技術者向けカリキュレータ

カリキュレータをダウンロードするには、[TI Analog Engineers Calculator](#) にアクセスしてください。

このカリキュレータには、ADC と OPA 向けの多様なアナログ シミュレーション ツールとデータ解析ツールが用意されており、ユーザーは設計のニーズに合わせてデータとパラメータで実験を行うことができます。データコンバータの下にあるデータ解析ツールキットを使用して、TIA OPA 入力での ADC の性能をグラフ化できます。

3.3 テスト設定

コードパラメータの制御とシリアルデータの表示に必要な UART およびデバッグ接続を [図 3-2](#) に示します。

XDS1100 デバッグプローブは、10 ピン JTAG コネクタを使用して、PCB 上のアダプタに接続できます。[図 3-2](#) に示す向きに注意してください。

黒、オレンジ、黄色の配線と UART-USB ケーブルを使用して UART 接続を確立します。

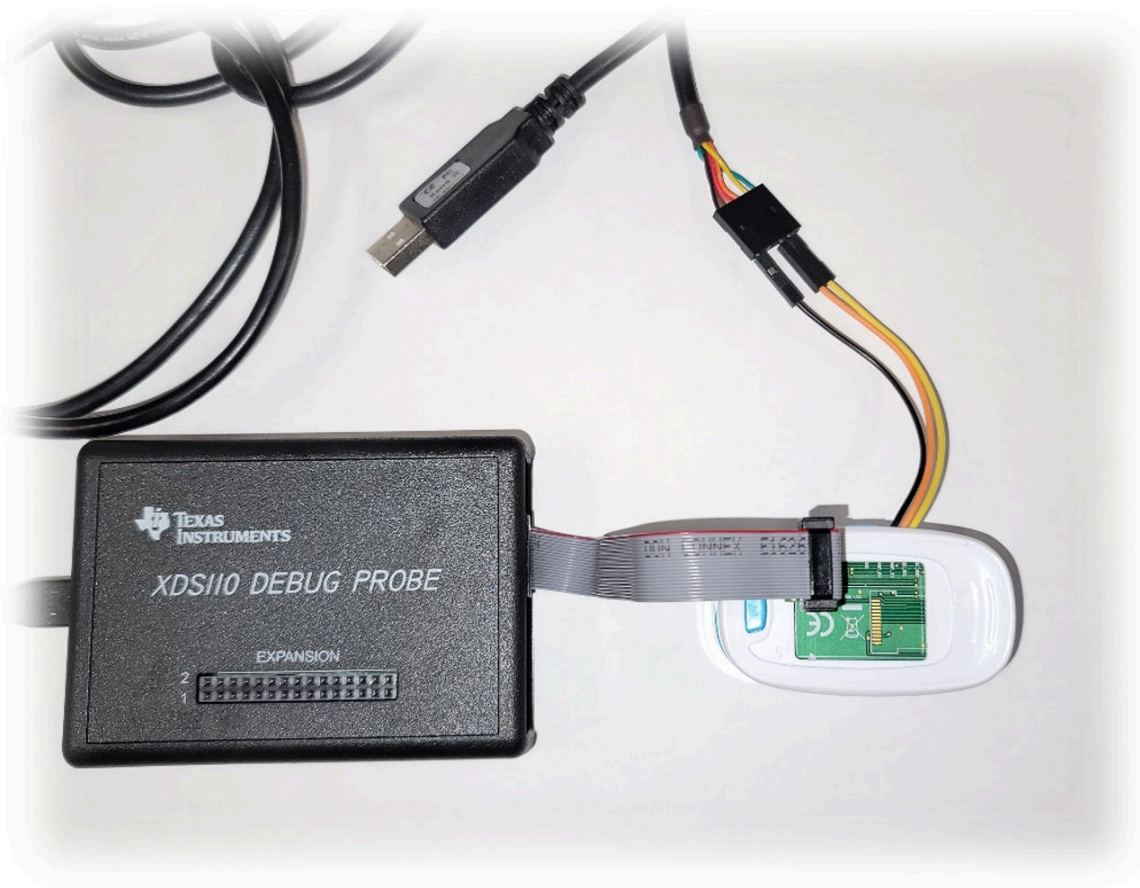


図 3-2. テスト用の TIDA-010267 パルス オキシメータのデモ接続

3.4 テスト結果

パルス オキシメータのデモをコンピュータに接続し、GUI グラフを実行すると [図 3-3](#) が生成されます。クリーンな信号がグラフに表示され、99% SpO2 および 62BPM がユーザーの値として正確に表示されます。

ソフトウェアには、次のグラフ オプションが含まれています。

- オーバーサンプリングされた波形グラフ: DC と AC の両方の成分を表す 16 ビットでのオーバーサンプリングを使用した ADC のフルスケール レンジを示します。
- IR 波形グラフ: IR 信号の AC 成分を拡大して、より明瞭に表示します。
- 赤い波形グラフ: IR 信号の AC 成分を拡大して、より明瞭に表示します。

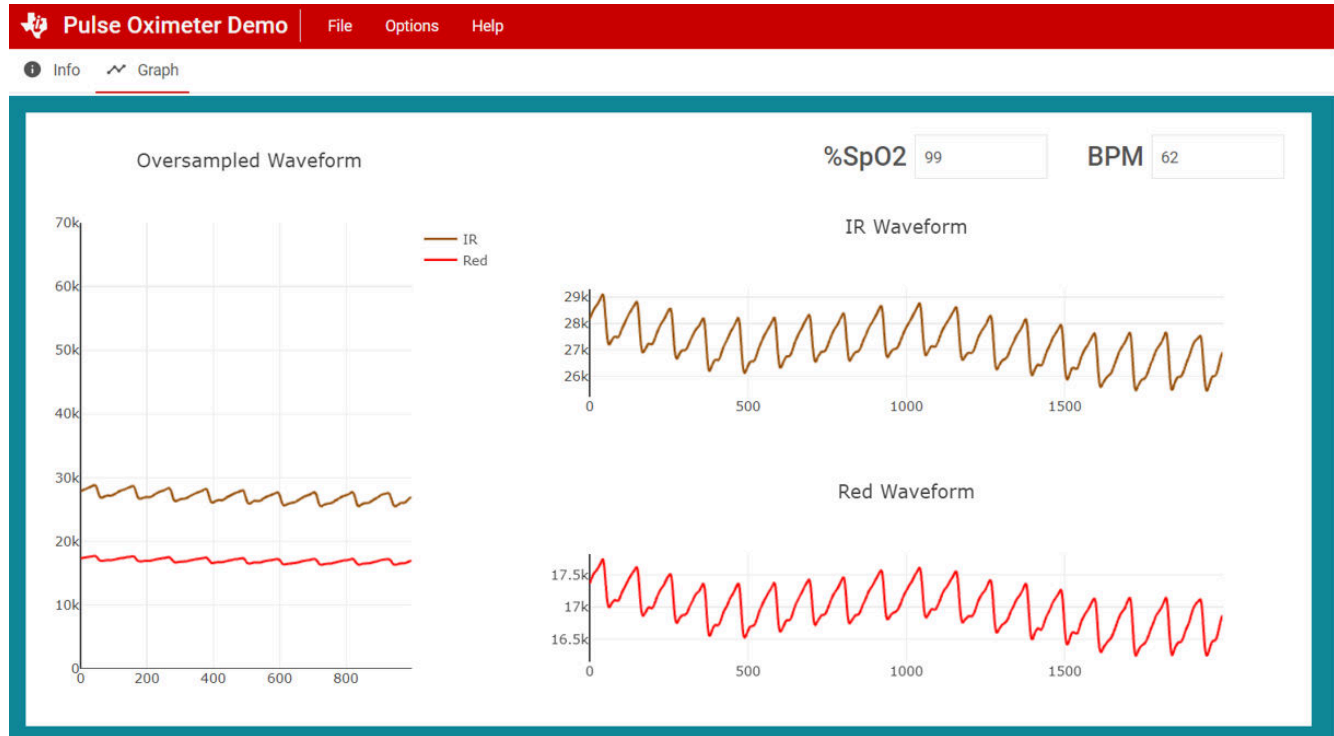


図 3-3. テストおよび表示向けの TIDA-010267 パルス オキシメータ デモの GUI

テストのために 2.5V の電圧リファレンスを OPA+ADC 入力に接続すると、ユーザーはデータをシリアルにキャプチャしてコンピュータで分析し、[図 3-4](#) と [図 3-5](#) を生成することができます。この図はそれぞれ低ノイズフロアと低偏差ヒストグラムを示し、90dB を超えるダイナミックレンジで 15.3 ビットの ENOB を実現しています。

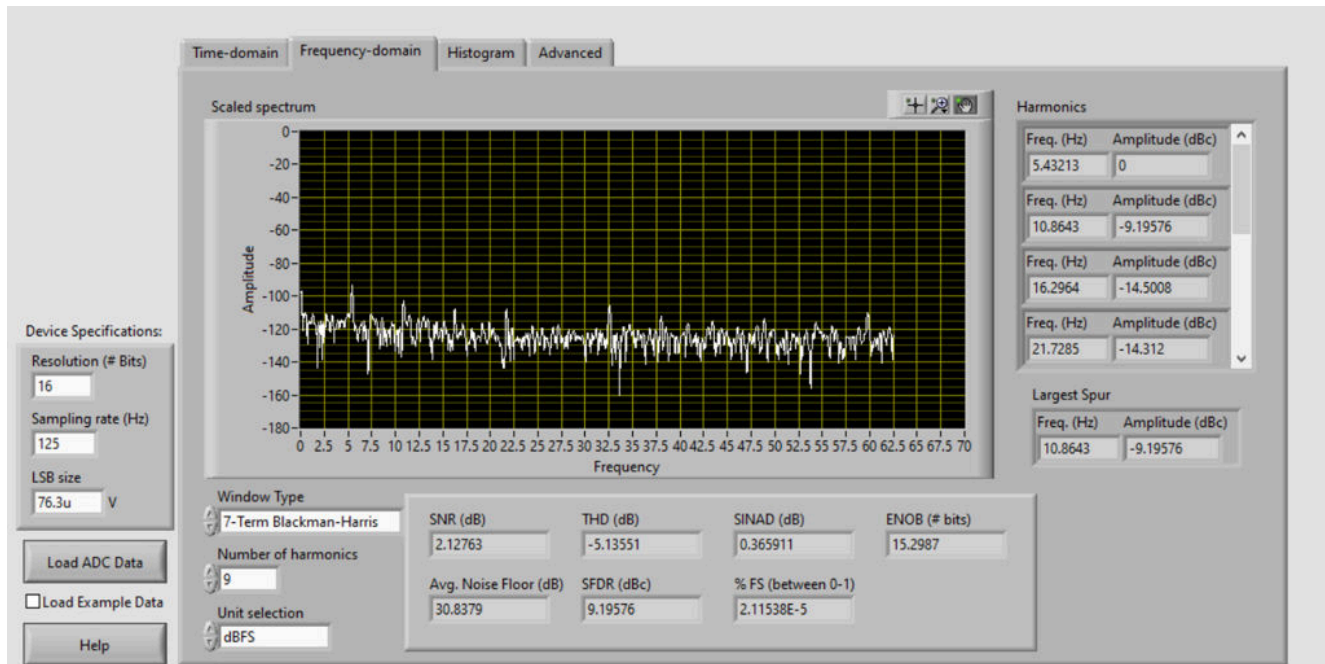


図 3-4. MSPM0L1306、16 ビットのオーバーサンプリング周波数ドメイン ノイズのグラフ

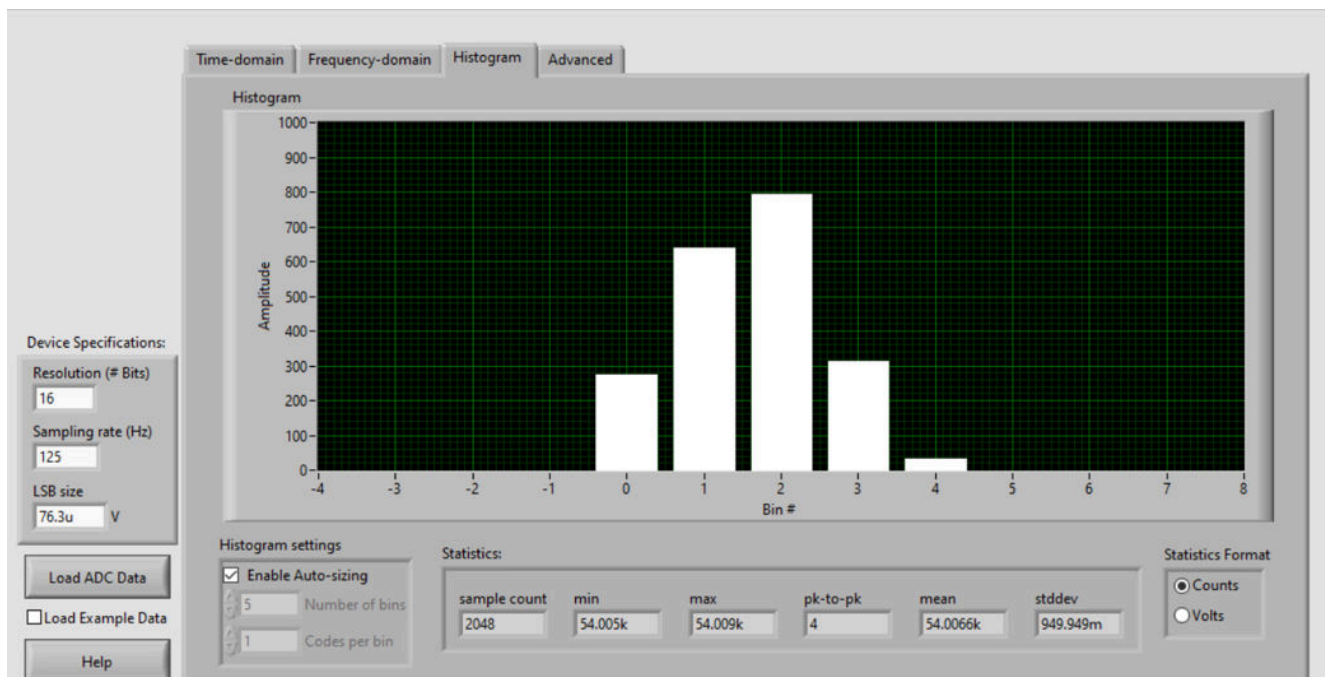


図 3-5. MSPM0L1306、16 ビットのオーバーサンプリング周波数ドメイン ノイズのヒストグラム

4 設計とドキュメントのサポート

4.1 デザイン ファイル

4.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-010267](#) のデザイン ファイルを参照してください。

4.1.2 BOM

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDA-010267](#) のデザイン ファイルを参照してください。

4.2 ツールとソフトウェア

ツール

Code Composer Studio™

Code Composer Studio は、テキサス・インスツルメンツのマイクロコントローラおよびプロセッサ向けの統合開発環境 (IDE) です。Code Composer Studio は、組み込みアプリケーションの開発およびデバッグに必要な一連のツールで構成されています。Code Composer Studio は、Microsoft® Windows®、Linux®, macOS® のデスクトップからダウンロードできます。この製品は、TI デベロッパー ゾーンにアクセスし、クラウド環境で使用することもできます。

ソフトウェア

TIDA-010267- MSPM0L130x- FW

このダウンロード可能なファームウェアにより、TIDA-010267 リファレンス デザインに搭載されているオンボードの MSPM0L1306 を使用すると、PPG 波形とバイタル サイン測定の実行内蔵アナログ ブロックを使用したシングルチップの低コスト パルス オキシメータ設計を実現できます。

4.3 ドキュメントのサポート

1. テキサス・インスツルメンツ、『MSPM0L130x ミックスド シグナル マイクロコントローラ』データシート
2. テキサス インスツルメンツ、『Arm® Cortex®-M0 と MCU を使用した低コストのパルス オキシメータと血圧モニタ』ビデオ
3. テキサス インスツルメンツ、『低コストの高集積 MSPM0 MCU によるパルス オキシメータ設計の簡素化』アプリケーション ブリーフ
4. テキサス インスツルメンツ、『MSP430FR2355 をベースとしたシングルチップ パルス オキシメータの設計』アプリケーション レポート

4.4 サポート・リソース

テキサス・インスツルメンツ E2E™ サポート・フォーラムは、エンジニアが検証済みの回答と設計に関するヒントをエキスパートから迅速かつ直接得ることができる場所です。既存の回答を検索したり、独自の質問をしたりすることで、設計に必要な支援を迅速に得ることができます。

リンクされているコンテンツは、各寄稿者により「現状のまま」提供されるものです。これらはテキサス・インスツルメンツの仕様を構成するものではなく、必ずしもテキサス・インスツルメンツの見解を反映したものではありません。テキサス・インスツルメンツの使用条件を参照してください。

4.5 商標

TI E2E™ and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

Microsoft® and Windows® are registered trademarks of Microsoft Corporation.

Linux® is a registered trademark of Linus Torvalds.

macOS® is a registered trademark of Apple Inc.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

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 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](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 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。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。

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、TI 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated