

ミリ波レーダー・センサを使用した家庭用複数患者の非接触型バイタルサイン・センサの構築

Greg Peake

Field Applications Engineer

Matthieu Chevrier

Field Applications Engineer

概要

通常、人間のバイタルサインは、従来は患者の体にコードで接続されたモニタリング・システムを通して測定し、心電図と酸素飽和度センサを組み合わせることで心拍数と呼吸数を報告しています。これらのセンサは、新生児や重度のやけどを負った患者、てんかんの患者や精神科の患者に常に接触させておくことは難しい場合があります。動ける患者にとって、日常生活を送りながらバイタルサインを監視することは困難です。

ミリ波 (mmWave) レーダー・センサは、患者の胸部の動きのような、非常に微細な動きも検出できます。胸部の動きは呼吸 (基本周波数) と心拍数の動き (追加の高調波) に影響されるため、胸部の動きの微細な測定によりバイタルサインを非接触に測定することが可能となります。

この機能の一番の成功要因は、患者の胸部の位置と速度を周波数変調連続波 (FMCW) センシングと複数の入出力 (MIMO) アンテナ・レーダー・システムを組み合わせることで検出するセンサ能力です。

このセンサはベッドの動きも検出できるため、介護者に床擦れの可能性を通知したり、高齢の夫婦など、複数の患者を同時に監視することも可能です。また、ミリ波センサは、人の転倒を検出して、介護者にリアルタイムに通知することもできます。

統合の重要性

FMCW システムにおいて、測定の精度と再現性を保証するパラメータの 1 つは、チャープの傾斜の直線性です。モノリシック・マイクロ波 IC にアナログ・チェーンを統合することによ

り、耐用年数まであらゆる温度帯におけるモニタリングとキャリブレーションを効率的に実行できるため、設計ごとのばらつきが減少するだけでなく、測定の直線性全体が向上します。

図 1 のテキサス・インスツルメンツ (TI) の IWR6843 のブロック図を参照すると、トランスミッタ - レシーバ・セクションの唯一の外付け部品は、標準的な 40MHz の水晶振動子だけであることがわかります。この外付け 40MHz 水晶振動子に加えて、IWR6843 は次のような完全なトランスミッタ - レシーバ統合機能を提供します。

- 1 つのランプ生成器。
- 分数フェーズ・ロック・ループ。
- 20GHz 電圧制御発振器 (VCO)。これは、外部配線 (または、外部電源から選択) された場合に、複数のフロント・エンドと同期し、より大きな仮想アンテナでコヒーレントなサンプリングを実現します。

また、IWR6843 には、次のようなトランスミッタとレシーバ向けの完全高周波 (RF) チェーンも搭載されています。

- 1 つのソフトウェア・プログラマブル・パワー・アンプ。送信電力のレベルが複数あるため、リンク・バジェットを環境や RF の法規制に適用した場合に、最大限の柔軟性をもたらします。
- ビームステアリング用動的プログラマブル位相シフタ。
- 1 つの低ノイズアンプ。パワー・アンプと組み合わせてプログラムすることで、リンク・バジェットを微調整することができます。
- 送信および受信チャープから中間周波数 (IF) を生成するミキサ。

- IF アナログ・フィルタ。
- 最大 25MHz のサンプリング周波数を持つアナログ / デジタル・コンバータ (ADC)。

MMIC システム・オン・チップに完全な RF チェーンを統合することにより、機能安全に必要な診断能力を実現します。

IWR6843 には、以下の完全なデジタル信号チェーン処理が統合されています。

- 1 つのレーダー・ハードウェア・アクセラレータ。16 ビット・レンジのドップラーまたは到来角の高速フーリエ変換 (FFT)、および従来のレーダー信号処理による一定誤警報確率 (CFAR) をサポートします。

- 完全にカスタマイズ可能な信号処理を実現する 1 つの 600MHz フルプログラマブル・デジタル信号プロセッサ。
- クラスタ化、追跡、アプリケーションレベルのコード向けに完全にプログラム可能な 200MHz Arm® Cortex®-R4F マイクロコントローラ。

ダイレベルの統合に加えて、IWR6843 の派生製品である IWR6843AOP には、パッケージにアンテナが付属しており、空間に制約のあるアプリケーション用や、RF 信号の PCB 配線が困難な場合でも、プリント基板 (PCB) の面積を縮小することで、より統合性を高めています。

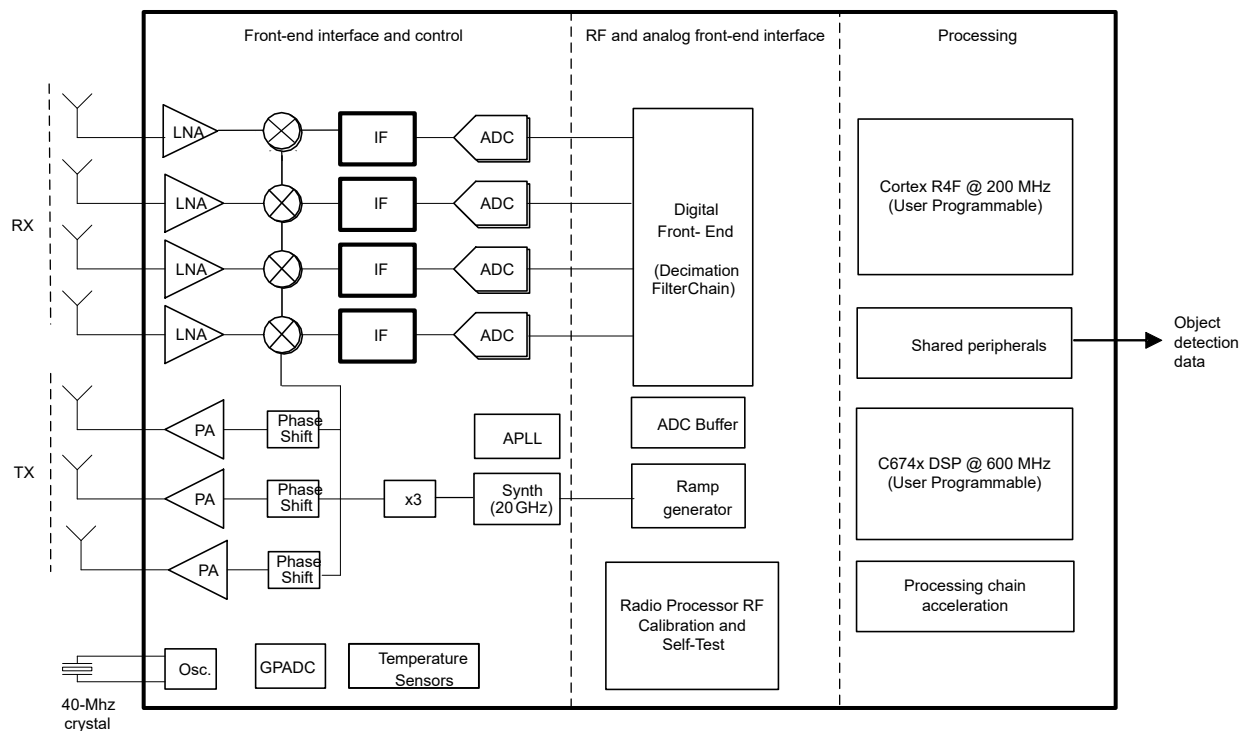


図 1. IWR6843 のブロック図。

FMCW

FMCW は、距離の測定時に広い範囲での高精度を実現する最もシンプルな変調方式です。また、FMCW は、自動車などの高速でも、呼吸時の胸部の上下のような低速でも、半径方向（レーダーと対象の間の直線）の速度測定手段も提供します。こうした小さな動きの追跡は、ドップラーまたはマイクロドップラー検出と呼ばれます。

チャープ

チャープは FMCW で使用される変調を示します。瞬時周波数 $f(t)$ は時間とともに線形に変化するため、線形周波数チャープです。送信チャープと受信チャープの周波数差は、飛行時間（対象に到達してから戻るまでの時間）、つまり対象までの距離に正比例します。

送信波形の振幅は、以下の式 **式 1** で表されます。

$$y_T(t) = A_T \times \sin(2\pi \times (f_0 + K \times t) \times t) \quad (1)$$

ここで、 K は単位時間当たりの送信周波数による傾きです（IWR6843 の場合、この値は $0 \sim 250\text{MHz}/\mu\text{s}$ の間になります）。 A_T は信号を送信する振幅です（送信電力）。 f_0 はチャープの開始時における最低送信周波数です（VCO の選択に応じて 57GHz または 60GHz ）。

受信波形の振幅は、以下の式 **式 2** で表されます。

$$y_R(t) = A_R \times \sin(2\pi \times (f_0 + K \times (t - \delta)) \times (t - \delta)) \quad (2)$$

ここで、 $\delta = \frac{2 \times d}{v}$ （これは飛行時間の 2 倍になります） d は対象までの距離、 v は媒質中の光の速度です。

ミキサ

ミキサは、送信信号と受信信号の周波数差の乗算です（**式 3**）。

$$y_M = y_T \times y_R \quad (3)$$

基本的な三角法の規則に従って、ミキサの出力は、1 つは f_{TX} と f_{RX} の差である周波数と、もう 1 つはその和になる 2 つのサイン関数の合計です。

ローパス・フィルタを通してミキサの出力を渡すと、IF 信号は復旧します。この信号の周波数は、トランスミッタとレシーバの差です。

式 4 は、積和公式を表しています。

$$\sin(x) \times \sin(y) = \frac{1}{2} \times (\cos(x - y) + \cos(x + y)) \quad (4)$$

ミキサの出力はローパス・フィルタを通じて IF を生成します。これは、トランスミッタとレシーバ（結果的に、飛行時間に正比例する量）の差です。

式 5 により、最終的に IF 信号を求めることができます。

$$y_{IF} = \cos\left(2\pi\left[-f_0\delta - 2 \times K \times \delta \times t + K \times \delta^2\right]\right) \quad (5)$$

ADC は信号をデジタル化します。信号の周波数はチャープの周波数に比べてかなり低いため、通常の ADC でも簡単に基準を満たせます。たとえば、IWR6843 における ADC の最大サンプリング周波数は 25MHz です。

式 5 を見れば、ドップラー・エレメントが胸部の動きから心拍数と呼吸数の測定に使われていることが明確です。

FFT とピーク検出

関連情報が信号のみによって伝達されると (y_{IF} 周波数は飛行時間のイメージです)、信号は距離 FFT を通過し、CFAR またはスレッショルド・アルゴリズムの段階に到達します。

図 2 に、異なるアンテナごとの飛行時間の差を示します。

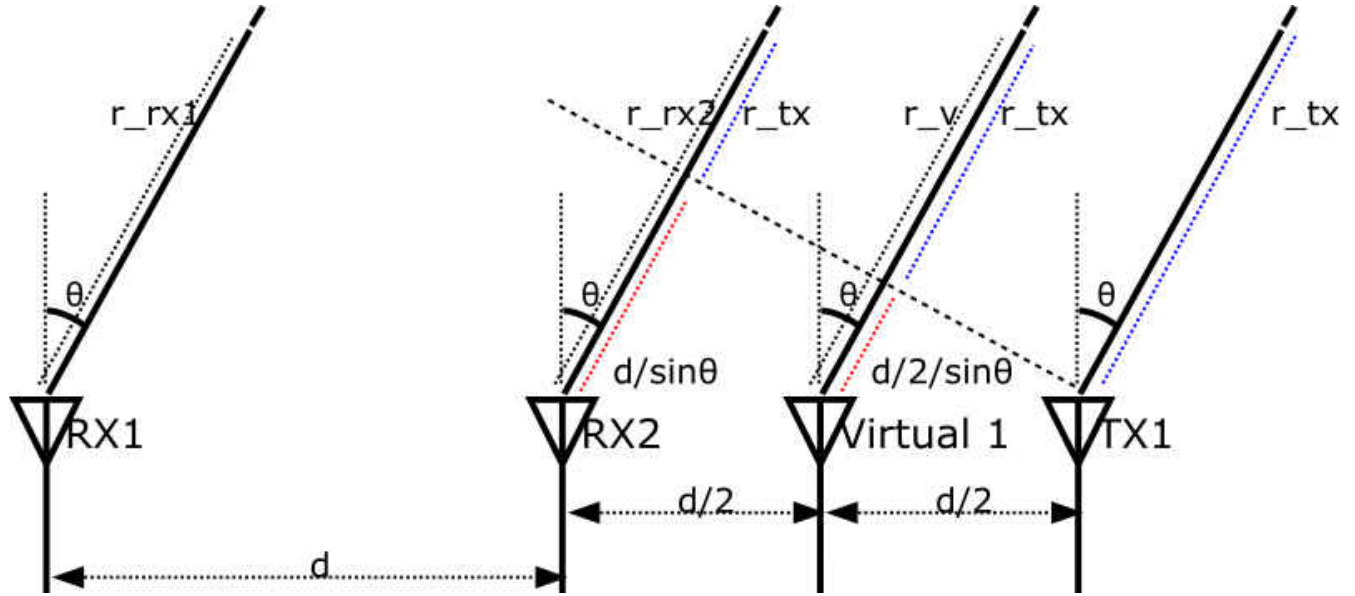


図 2. 受信アンテナごとに位相が増加する MIMO。

ハイレベルでは、到来角は受信アンテナごとの飛行時間の差から求めます。

数学レベルでは、各アンテナからステアリング・ベクトルは次の式 6 のように定義されます。

$$a(\theta) = \begin{bmatrix} e^{jx2\pi dx \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} e^{jx2\pi dx 2x \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} e^{jx2\pi dx 3x \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} \\ \dots e^{jx2\pi dx Nx \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ステアリング・ベクトルを使用して、各アンテナの各対象からの信号を結合します。式 7 は、すべてのアンテナを経由した各対象から送信される全信号の合計を表します。x_i は、i 番目のアンテナで受信される信号です。

$$y(t) = a^H x(t) = \sum_1^N a_i x_i(t) \quad (7)$$

次の式 8 で平均電力を計算します。

$$P(a) = \frac{1}{T} x \sum_1^N |y(t)|^2 = a^H E \{ x(t) x^H(t) \} a = a^H R a \quad (8)$$

Bartlett ビームフォーミング手法と呼ばれる従来型の受信ビームフォーミングは、狭帯域アレイをベースとする最も古い到着方向推定アルゴリズムです。このアルゴリズムは、特定の

方向に対するビームフォーマの出力電力を最大化します。この最大化は以下の式 9 のような関係式で表されます。

$$\theta_{Barlett} = \operatorname{argmax}_a [P(a)] \quad (9)$$

各 θ の $P(a(\theta))$ を得るには、式 10 で R の近似値を求めます。

$$R_{zz} \approx \sum_{k=0}^n X(t) x X^H(t) \quad (10)$$

ここで、X は信号の行列です (式 11)。

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_1(t_1) & x_1(t_2) & \dots & x_1(t_n) \\ x_1(t_1) & x_1(t_2) & \dots & x_1(t_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_M(t_1) & x_M(t_2) & \dots & x_M(t_n) \end{pmatrix} \quad (11)$$

これらの式から、MIMO レーダーを使用して 3 次元での位置を導出する方法がわかります。

信号検出の指向性を持つビームステアリング

一般的に、レーダー・センサを使用してシーン・データをキャプチャするには、アンテナのビーム幅によって提供される視野全体にわたって、フレーム期間ごとにコース・スキャンを実施する必要があります。このコース・スキャンは、関連性の有無にかかわらず物体からの反射や、抽出して定式化したい特定

の物体からの反射を補足します。これは例えば、バイタルサインを測定する必要がある患者のようなケースです。患者の位置を特定すると、すでに説明したように、送信ビームフォーミングを使用してビームの焦点をそこに合わせるすることができます。

患者に照準が合っていない場合は、ビームステアリングをアクティブにできます。この機能をイネーブルにするには、各トランスミッタのステップサイズが 5.625° で、 $0 \sim 360^\circ$ の位相シフト 64 個の設定でカバーできる構成可能な 6 ビットの位相シフトを使用します。位相シフトは各パワー・アンプの前に設置されており、メイン・ビームの焦点を合わせる場所に応じて、各送信チャンネルに対して個別にプログラムされます。図 3 を参照してください。通常、位相シフトはベクトル変調器をベースとするアナログ構造であり、デジタル / アナログ・コンバータを使用して信号の位相シフトを作成してから増幅します。

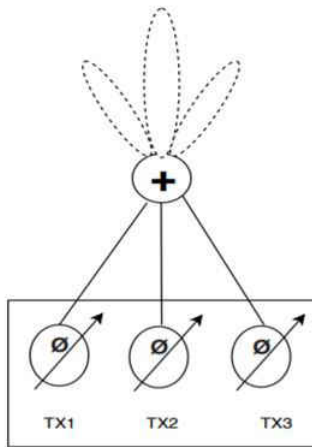


図 3. 送信段に含まれる位相シフト。

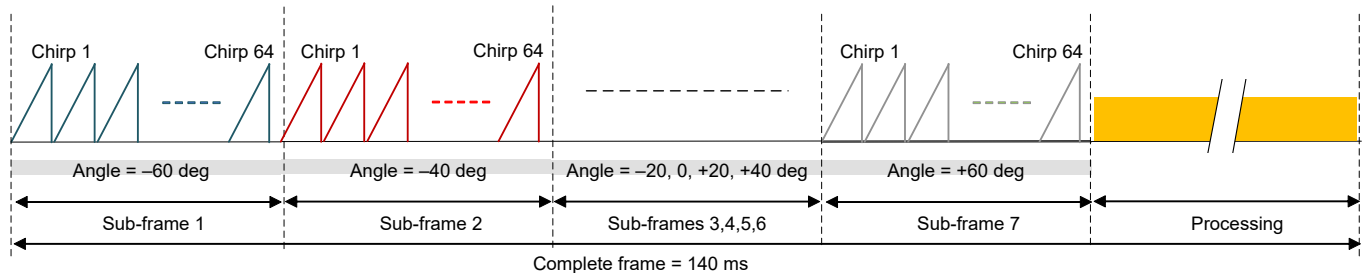


図 4. ビームステアリングの角度はサブフレームごとに 20° ずつ変更されている。

較正

電圧と温度の変動に対する性能を維持するため、テキサス・インスツルメンツのミリ波レーダー・デバイスは、ランタイム時

レーダー・センサに対する方位角が異なる位置に複数の被験者がいる場合は、位相シフトをリアルタイムでプログラムすることができ、フレーム間なら通常は $100 \sim 200\text{ms}$ に、またはサブフレームを使用するときはそれ以下に設定できます。たとえば、図 4 に示すように、ビームは 20° ごとのサブフレームで $-60^\circ \sim 60^\circ$ の範囲を、 200ms 以下で終了するフルシーン・スキャンでスイープできます。これにより、部屋全体の壁と壁の間にいる複数の被験者や、異なる角度に位置し、送信ビームで次々に照射された複数の被験者のバイタルサインを容易に検出することができます。

(アプリケーションの実行時) だけでなく、RF の初期化フェーズ (Rflnit() アプリケーション・プログラミング・インターフェイスを呼び出す) におけるブート時間のキャリブレーションをサポート

トしています。図 5 に、以下の種類のキャリブレーションの順序例を示します。

- アナログ・フェーズ・ロック・ループのキャリブレーション。
- シンセサイザ VCO。
- ローカル発振分配キャリブレーション。
- ADC DC オフセット。

- IF アンプのハイパスおよびローパスのカットオフ周波数。
- ピーク検出器。
- 送信および受信ゲイン。
- 静止電流のミスマッチ。
- 送信位相シフト。

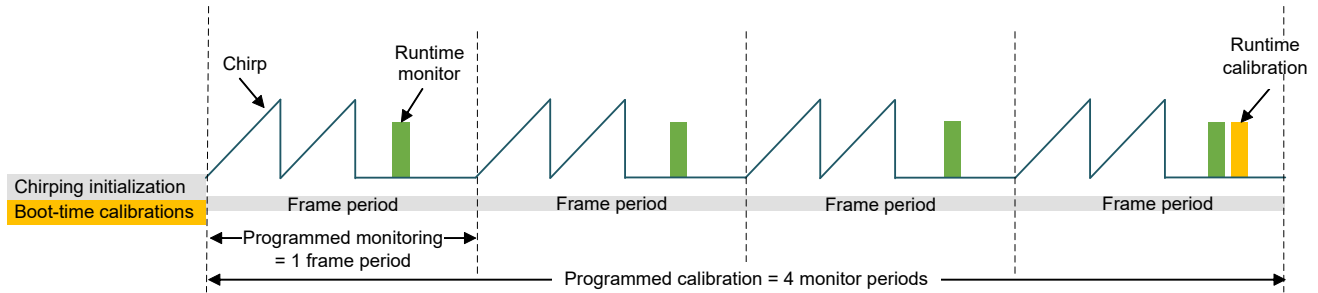


図 5. 機能的なチャープピング、監視、キャリブレーションのタイミング・シーケンス。

図 6 に、送信および受信アナログ・フロント・エンド・パラメータのキャリブレーション用に RF フロント・エンドに統合されている機能の一部を示します。PA 出力および LNA 入力用の電

力検出器に加えて、ループバック・パスと組み合わせることで、フロント・エンド全体を継続的に監視および補償できます。

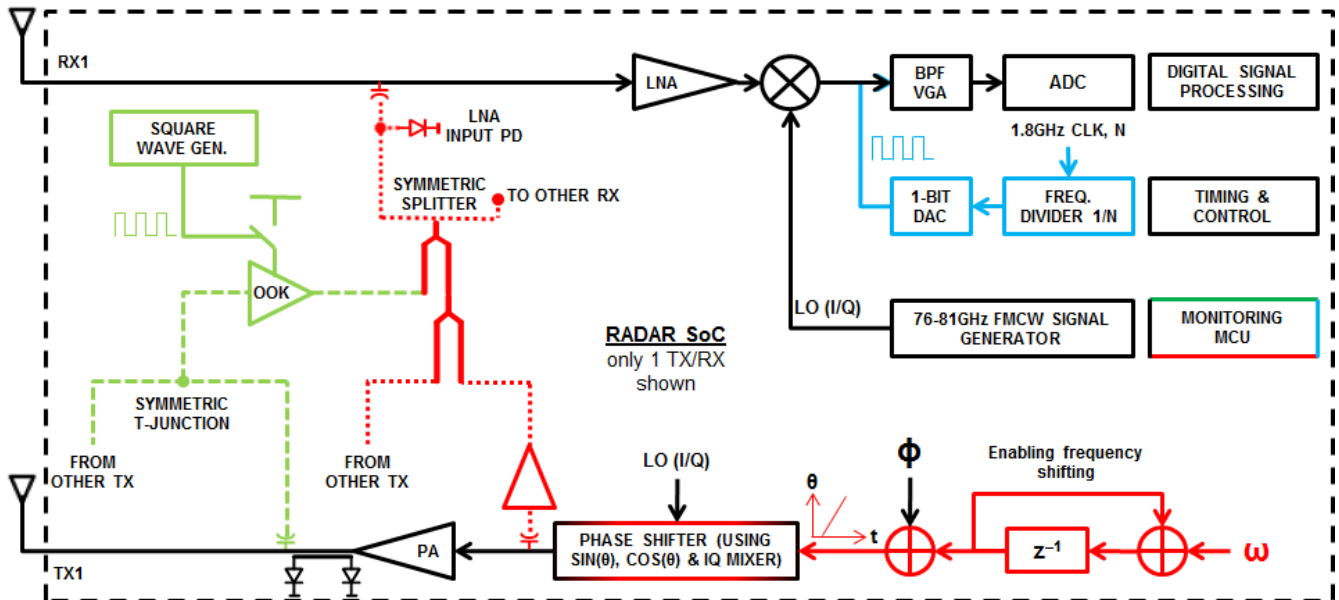


図 6. IWR6843 に搭載されている診断と監視の概要。

まとめ

テキサス・インスツルメンツのミリ波デバイスには、FMCW レーダーに必要な高性能の機能が搭載されており、フロント・エンドのクロック用に 40MHz の外付け水晶振動子が 1 つあれば完成します。これらの製品は高精度なマイクロドップラー・

モーションを 3 次元で検出できるため、人間の呼吸や心拍数を検出することも可能です。

さらに複数の TX チェーンと位相シフトを統合することにより、送信ビームフォームとビームステアリングが使用できるため、3D センシング用の MIMO 動作を維持しながら、狭い視野でも SNR を向上させることが可能になります。

最後に、すべてのアナログ部品にモニタリング機能とキャリブレーションを統合することで、デバイスの寿命まで安定した性能を実現できます。このアナログ統合レベルにより、複数の患者の非接触型バイタルサイン・センサを在宅で使用することが可能となります。

関連 Web サイト

- テキサス・インスツルメンツ Resource Explorer の『[バイタルサイン・サポート・ガイド](#)』と『[バイタルサインと追跡ユーザー・ガイド](#)』をご確認ください。
- トレーニング『[テキサス・インスツルメンツのミリ波デバイスで機能安全を実現する](#)』で、安全性機能の詳細をご確認ください。
- 『[mmWave Vital Signs Lab](#)』トレーニング・ビデオをご覧ください。
- テキサス・インスツルメンツ、『[テキサス・インスツルメンツのミリ波レーダー・デバイスのセルフ・キャリブレーション](#)』
- テキサス・インスツルメンツ、『[カスケード・コヒーレンシおよび位相シフタのキャリブレーション](#)』

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、テキサス・インスツルメンツの販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、テキサス・インスツルメンツ製品とサービスに関する完全な最新情報の入手をお勧め致します。テキサス・インスツルメンツは、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他社の製品またはサービスに関する情報は、テキサス・インスツルメンツによる同意、保証、または承認を意図するものではありません。

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere.
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、

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](https://www.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 © 2023, Texas Instruments Incorporated