

Design Guide: TIDEP-01040

産業用アプリケーション向け、ウェハースケールパッケージ、60GHz ミリ波センサのリファレンス デザイン



説明

このリファレンス デザインは、フォーム ファクタの小型化とローパワーを必要とするアプリケーションを対象としています。このリファレンス デザインは、テキサス インストルメンツの IWRL6432W 60GHz ミリ波レーダー デバイスをベースにしており、Isola® の FR408HR 素材を使用した 4 層 PCB スタックアップを採用しています。また、このリファレンス デザインには、デバッグおよび評価インターフェイスを備えていない小型のフォーム ファクタがあります。

リソース

TIDEP-01040

デザイン フォルダ

IWRL6432W

プロダクト フォルダ

TPS6285020MDRLR

プロダクト フォルダ



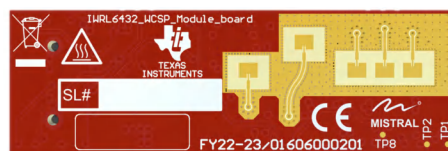
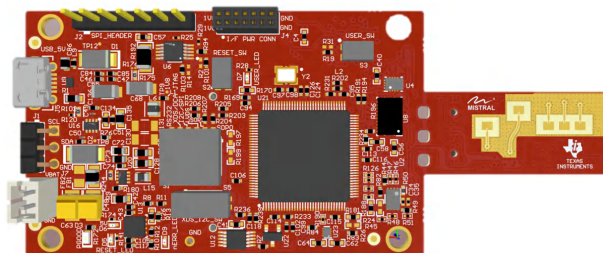
テキサス・インスツルメンツの™ E2E サポート エキスパートにお問い合わせください。

特長

- 1.8V の単一電源レール
- FR408HR ベースの 4 層 PCB のスタックアップ
- デザインのサイズ:
 - IWRL6432W リファレンス デザイン: 89mm × 37mm
 - IWRL6432W 小型フォーム ファクタのリファレンス デザイン: 12.6mm × 39mm
- IWRL6432W を使用したローパワー、低コストの 60GHz ミリ波センサ
- 通信インターフェイス: UART、SPI、I2C、RS232
 - リファレンス デザインは、XDS110 デバッグ プロンプトと LVDS データ キャプチャに適した 60 ピン ヘッダを搭載
- アンテナの特長:
 - シングル素子パッチ アンテナ アレイ
 - 120 度の視野角
 - 方位角面で 23 度、仰角面で 58 度の角度分解能
 - ボアサイトにおける最大 15m までの人の存在検出
 - 4GHz の帯域幅

アプリケーション

- パーソナル エレクトロニクス
- PC とノート PC
- TV
- ビル オートメーション
- 照明器具



1 システムの説明

産業用ビル オートメーション、駐車場オートメーション、パーソナル エレクトロニクス、照明器具、その他の最終製品にレーダーが搭載された産業用アプリケーションは、日常生活における生活の質と安全性の向上に役立っています。

周波数変調連続波 (FMCW) レーダーを使用すると、距離、角度分解能、相対速度を正確に測定することができます。レーダーは有用性が高いため、存在検出、モーション検出、追跡、その他多くの用途に使用されています。カメラや光検出と距離測定 (LIDAR) ベースのシステムと比較した際のレーダーの重要な利点は、レーダーが環境条件 (ほこりや煙の影響など) に比較的影響を受けないことです。FMCW レーダーは、完全な暗闇でも機能し、またレーダーがグレアの影響を受けないため明るい光環境でも機能します。

このリファレンス デザインは、ウェハースケール パッケージ (WCSP) のシングル チップを採用し、パッケージ サイズは 4.89mm × 4.5mm、部品表 (BOM) 最適化済みで、小型の 60GHz ミリ波設計です。このデザインは、回路図が簡略化されており、4 層レイアウトが小さいので、統合が容易です。アンテナは PCB の最下層に実装され、ミリ波デバイスは最上層に配置されています。そのため、フォーム ファクタがさらに小型化されています。このアンテナは方位角面と仰角面で ± 60 度の視野角を提供します。このリファレンス デザインは、評価目的で、高速 LVDS データ キャプチャ (オンボード 差動 LVDS ドライバを搭載) に適した XDS110 (UART と JTAG) デバッグ プローブと 60 ピン コネクタを搭載しています。また、このリファレンス デザインには、追加のデバッグおよび評価インターフェイスを備えていない小型フォーム ファクタがあります。

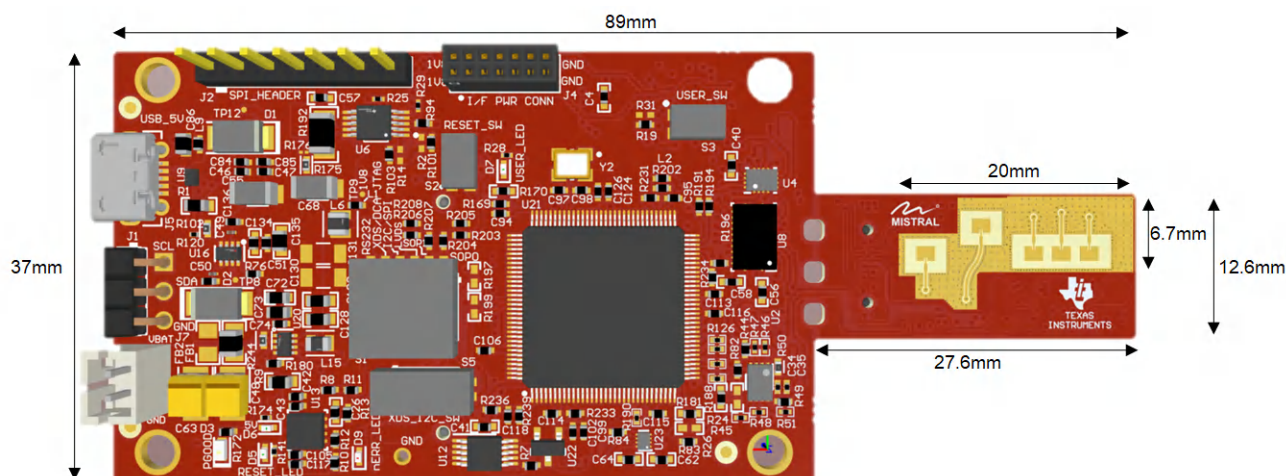


図 1-1. IWR6432W リファレンス デザインの寸法

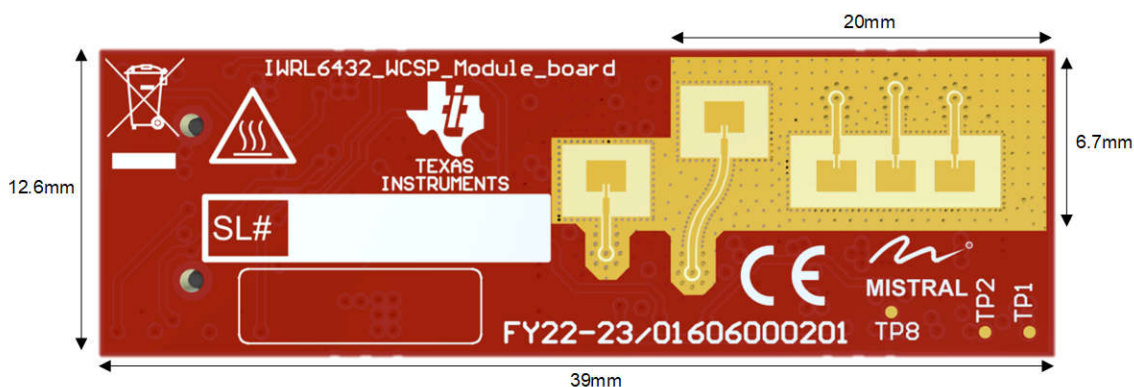


図 1-2. 小型フォーム ファクタ リファレンス デザインの寸法

2 システム概要

2.1 ブロック図

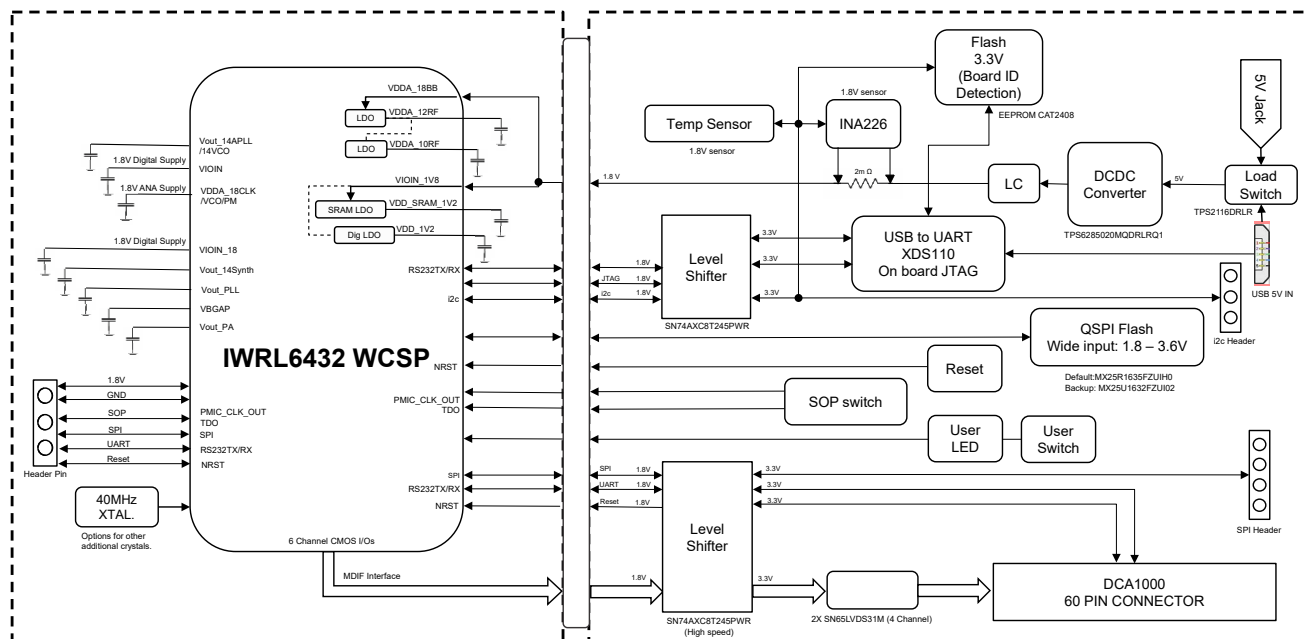


図 2-1. IWRL6432W リファレンス デザインの機能ブロック図

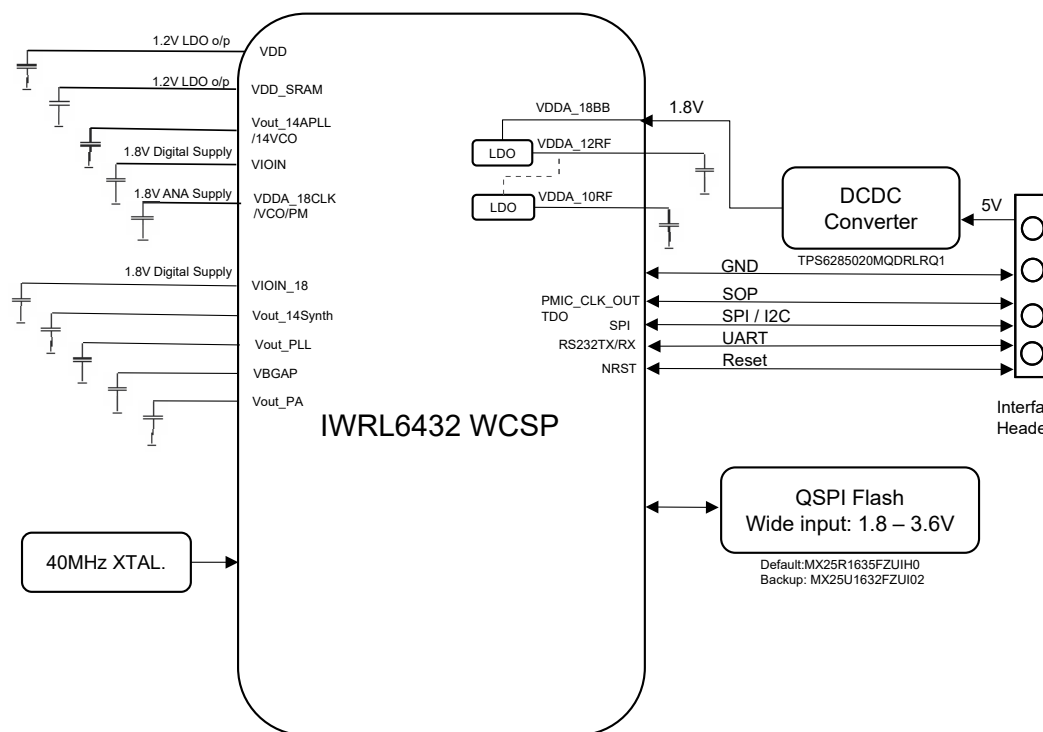


図 2-2. IWRL6432W 小型フォーム ファクタのリファレンス デザイン

2.2 設計上の考慮事項

このリファレンス デザインは、低消費電力、BOM コストの低減、センサ サイズの小型化を必要とするアプリケーションを対象として開発されました。主な設計上の考慮事項は以下のとおりです。

- **低消費電力**
この設計では、モーション検出や存在検出、ジェスチャ認識などのアプリケーションで消費される電力が低く抑えられています。
- **低コスト**
この設計では、BOM (部品表) コストが削減されています。
- **全体の小型化**
このリファレンス デザインは、TV、モニタ、デジタル ピクチャ フレームなど、スペースに制約のある環境にも設置できるよう、小型のフォーム ファクタを採用しています。これらの製品や同様の最終製品では、多くの場合レーダーをベゼル領域に配置する必要があります。そのため、アンテナ領域は、最近では幅が **2cm** 未満になることも多い領域に収まるように最適化する必要があります。
- **アンテナの視野角 (FoV) と角度分解能**
このアンテナ設計は、広い FoV と良好な角度分解能を備えており、広い範囲をカバーすることができます。

2.2.1 リファレンス デザインの特長

リファレンス デザインは、IWRL6432W のシングル レール BOM 最適化トポロジを使用しています。この設計には、レーダー デバイスに 2 つのトランスミッタと 3 つのレシーバのアンテナ アレイ、アプリケーション プログラムを格納するためのクワッド シリアル ペリフェラル インターフェイス (QSPI) フラッシュ、クロック ソースとして 40MHz の XTAL が含まれています。このリファレンス デザインは、USB 電源からのオンボード パワー ディストリビューション (配電) 機能と、XDS110 デバッグ プローブ、LVDS インターフェイスも搭載しています。このリファレンス デザインには、ホスト通信用にデバイス IO 電圧 1.8V から 3.3V に IO 電圧をシフトするオンボード レベル シフタが搭載されています。

IWRL6432W リファレンス デザインに対応する小型フォーム ファクタは、シングル レールの BOM 最適化トポロジで機能するレーダー デバイス、クロック ソースとしての 40MHz 水晶振動子、QSPI フラッシュ メモリ、および 2 つのトランスミッタと 3 つのレシーバを組み合わせたアンテナ アレイのみを搭載しています。この小型フォーム ファクタのリファレンス デザインには、外部電源と通信インターフェイス用の 14 ピン コネクタがあります。小型フォーム ファクタのリファレンス デザインでは、SPI、I2C、RS232 通信インターフェイスを使用できます。

注

この小型フォーム ファクタのリファレンス デザインは、5V の外部電源を使用します。このデバイスは、オンボード DC/DC レギュレータ内の 5V 外部電源から生成される 1.8V のシングル レール電源で動作します。デバイスの IO レベルは 1.8V に設定されています。したがって、外部通信やホスト通信の場合、IO 電圧レベルを一致させる必要があります。

表 2-1 に、リファレンス デザイン ボードの特長と基本的な部品についての概要が記載されています。

表 2-1. リファレンス デザイン ボードの特長

機能	説明
IWRL6432W	ローカル発振器内蔵、3 つの RX と 2 つの TX、低消費電力、低コストのシングル チップ レーダー トランシーバ
2-TX アンテナおよび 3-RX アンテナ	FoV 120 度の単一素子パッチ アンテナ
方位角アレイ	このアンテナ設計は 5 素子の仮想方位角アレイを形成し、角度分解能 23 度を実現します。
仰角アレイ	2 素子の仮想アレイで、角度分解能 58 度を実現します。
クロック ソース	40MHz 水晶発振器
QSPI フラッシュ	超低消費電力、80MHz、16Mbit フラッシュ メモリ
シリアル ペリフェラル	SPI、I2C、UART
評価オプション (リファレンス デザインのみ)	XDS110、LVDS

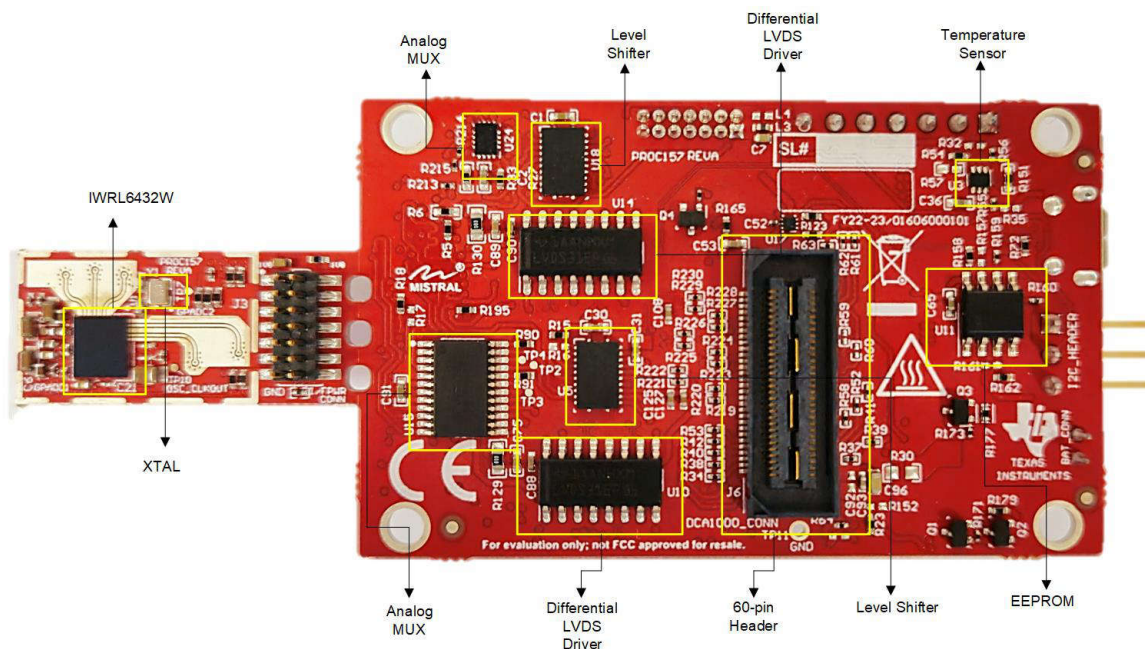


図 2-3. IWRL6432W リファレンス デザインのマークアップ:表

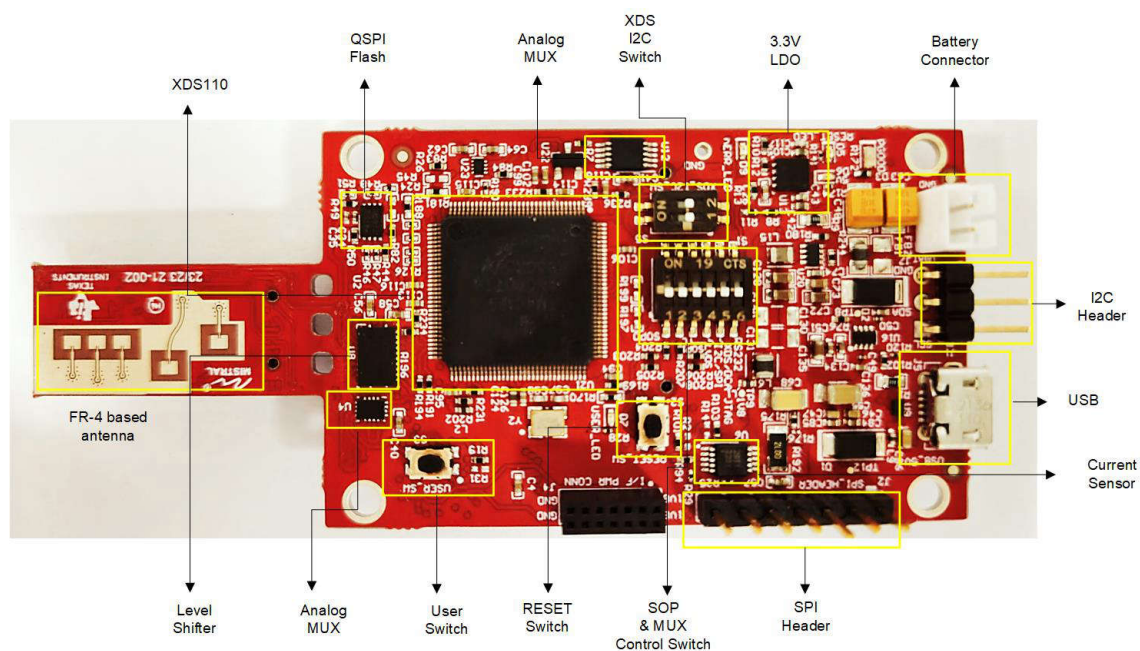


図 2-4. IWRL6432W リファレンス デザインのマークアップ:裏

2.2.2 スイッチの設定

スイッチ 1 (S1) は、さまざまな通信インターフェイスのデバイスのセンス オン パワー (SOP) とマルチプレクサを制御します。次の表は、スイッチの位置とそれぞれのコントロールについて説明しています。

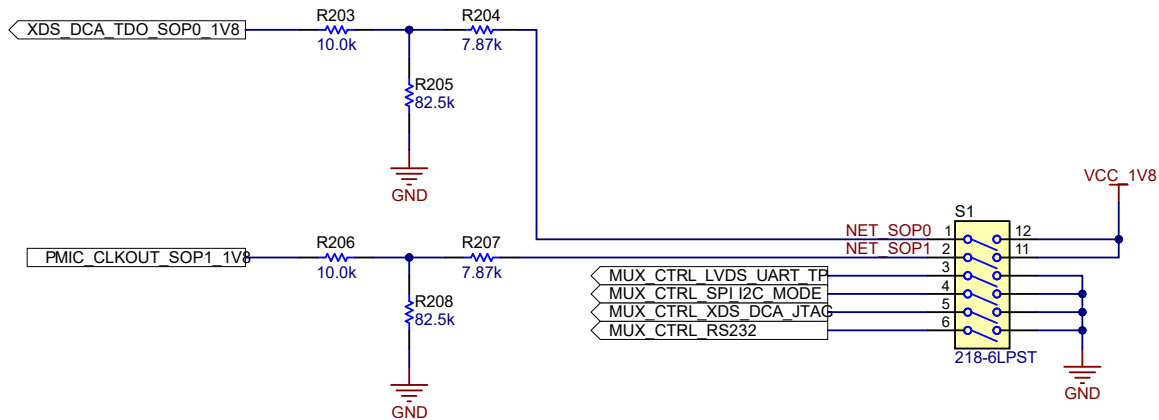


図 2-5. スイッチ 1 (S1)

表 2-2. SOP の構成

SOP モード	デバイスの機能	SOP1 (S1.2)	SOP0 (S1.1)
SOP_MODE1	デバイス管理モード、QSPI フラッシュ モード	0	0
SOP_MODE2	アプリケーション モード、機能モード	0	1
SOP_MODE4	デバッグ モード、ミリ波 Studio コネクティビティ モード	1	1

表 2-3. MUX テーブル

スイッチ	スイッチの位置オフ	スイッチの位置オン
S1.3	LVDS	XDS_UARTA、NERROR_LED、WATCH_DOG_TP、RTC_CLK_IN_TP、HOST_CLK_TP
S1.4	I2C、REG_MODE、USER_LED_SW	SPI、HOST_INTR
S1.5	XDS_JTAG	DCA_JTAG
S1.6	XDS_RS232	DCA_RS232

2.3 主な使用製品

2.3.1 IWRL6432W

IWRL6432W は、業界をリードする無線周波数 (RF) 性能を備えた、テキサス インスツルメンツのローパワー、低コストのレーダーです。IWRL6432W は、57GHz ~ 63.9GHz の周波数帯域で動作可能な、統合型シングル チップ、ローパワーの周波数変調連続波 (FMCW) レーダー センサです。このデバイスは、テキサス インスツルメンツのローパワー 45nm RF 相補型金属酸化膜半導体 (CMOS) プロセスで製造され、超小型のフォーム ファクタでかつてないレベルの統合を実現しています。このデバイスは 3 つのレシーバ、2 つのトランスミッタ、バイナリ位相変調機能を備え、MIMO レーダー、TX ビームフォーミング アプリケーション、プログラマブルトランスミッタ バック オフ サポート向けです。

シングル チップ レーダー トランシーバに搭載されている 160MHz の Arm® Cortex® M4F、80MHz の ARM Cortex M3F、80MHz のレーダー ハードウェア アクセラレータ (HWA) がレーダー処理を行っています。このデバイスは、最大 5MHz の中間周波数 (IF) 帯域幅をサポートしています。

IWRL6432W は、産業用 (およびパーソナル エレクトロニクス) 分野のローパワー、自己監視機能付き、超高精度のレーダー システム向けに設計されています。アプリケーションの例は、ビル / ファクトリ オートメーション、商用 / 住宅用セキュリティ、パーソナル エレクトロニクス、存在 / モーション検出、ヒューマン マシン インターフェイス (HMI) 向けジェスチャ検出 / 認識などです。

2.3.2 水晶振動子

40MHz クロック ソースとして、Diodes Incorporated® の FW4000044Q 水晶振動子セラミック表面実装デバイスが使用されています。この水晶振動子の周波数の許容誤差は ± 10 ppm、負荷容量は 8pF、ESR は 50 Ω です。

2.3.3 TPS6285020M - 1.8V DC/DC レギュレータ

TPS6285020M は、テキサス インスツルメンツの 2A (連続)、高効率、同期整流降圧、固定 1.8V 出力 DC/DC コンバータで、このリファレンス デザインでは 1.8V レールへの供給に使用されています。

デバイスの 1.8V レールからのピーク電流要件を満たす必要があります。詳細については、『**IWRL6432 WCSP シングル チップ 57 ~ 64GHz 産業用レーダー センサ**』データシートの「電圧レールごとのピーク電流要件」セクションも参照してください。電流要件に加えて、DC/DC レギュレータは、強制 PWM モード (またはスイッチングの自動モード) と スペクトラム 拡散クロック処理 (SSC) 機能を備えている必要があります。

注

通常、軽負荷状態が続くデバイスのディープ スリープ状態において、システム全体の消費電力を最適化する必要がある場合、スイッチングの自動モードを有効にできます。このモードでは、軽負荷状態に応じて、PFM モードのスイッチングが有効になり、DC レギュレータの消費電力が削減されます。自動モードと強制 PWM スイッチング モードは、DC レギュレータの MODE ピンを使用して変更できます。DC/DC レギュレータの MODE ピンは、デバイスの GPIO を介して制御可能で、デバイスのディープ スリープの開始と終了に合わせて、DC/DC レギュレータが自動モードと強制 PWM モード間で切り換わります。「**DC/DC コンバータの PFM モードの有効化**」も参照してください。

2.3.4 QSPI フラッシュ メモリ

このリファレンス デザインは、低コスト、ローパワーの 16Mbit フラッシュ メモリである Macronix® MX25R1635FZUIH0 デバイスを使用しています。このフラッシュ メモリは、デバイスの 3.3V と 1.8V の両方の IO 電圧に対応するために、1.65V ~ 3.6V の広い入力電圧範囲をサポートしています。

このリファレンス デザインでは、デバイスは 1.8V のシングル レール電源トポロジで動作するため、1.65V ~ 2.0V で動作する Macronix® MX25U1632FZUI02 も使用できます。

注

フラッシュ バリエーションの互換性については、『**ミリ波センサがサポートしているフラッシュ バリエーション**』アプリケーション レポートを参照してください。

3 システム設計理論

3.1 アンテナ

このリファレンス デザインでは、3 つのレシーバ アンテナと 2 つのトランスミッタ アンテナ用に単一素子のパッチ アンテナを使用しています。このリファレンス デザインでは、1 つの TX アンテナがもう 1 つの TX アンテナより仰角面の $\lambda/2$ 下、方位角面の $2 \times \lambda/2$ 離れた位置に配置されています。RX アンテナはすべて、RX1 と RX2、RX2 と RX3 の間の距離が $\lambda/2$ の同じプレーンに保持します。

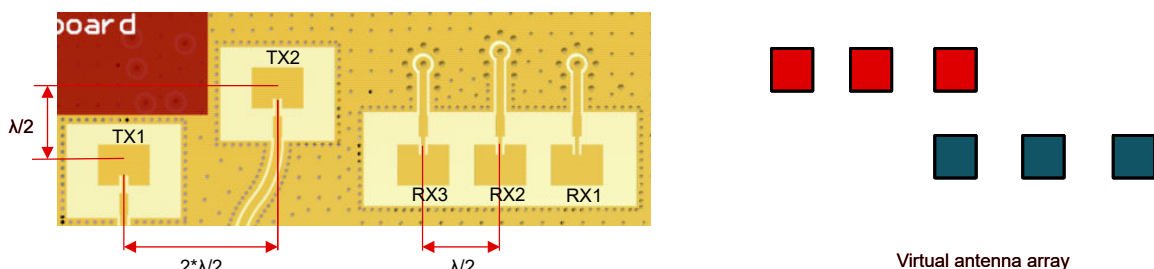


図 3-1. 仮想アンテナ アレイ

全体のスペースを節約するため、FR4 ベースのアンテナは IWRL6432W チップの PCB の反対側 (裏側) に配置しています。

RX アンテナは TX アンテナとは上下逆になっています。したがって、仮想アンテナ アレイも、所定の位置にある仮想アンテナの位置を取得した後には上下逆になります。

対応するアンテナ ジオメトリ CLI コマンドは次のとおりです。

```
antGeometryCfg 1 2 1 1 1 0 0 4 0 3 0 2 2.5 2.5
```

注

- 各コマンドラインは、どの構成にも追加する必要があり、デバイスに送信する前に追加しなければなりません。そうしないと、処理チェーンによって計算される到来角が誤ったものになる可能性があります。
- この CLI コマンドの詳細については、MMWAVE-L-SDK の資料 (チューニング ガイド) を参照してください。

方位角と仰角の異なる周波数に対するアンテナのゲイン プロットを、図 3-2 に示します。

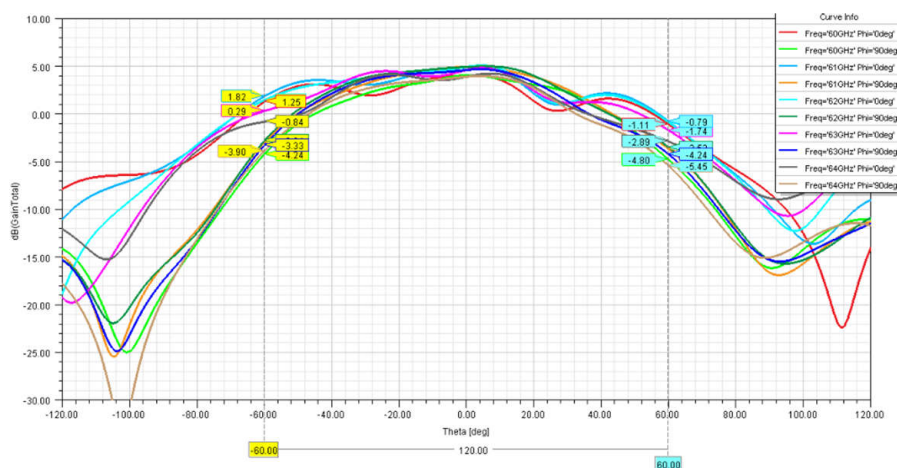


図 3-2. アンテナのゲイン プロット

3.1.1 範囲および位相の補償

範囲バイアスと位相誤差は、compRangeBiasAndRxChanPhase コマンドを使用して、さまざまなアンテナ設計に応じて補償が必要です。MMWAVE-L-SDK (バージョン 5.5.3.0 以上) に含まれるデモ構成にはデフォルト値が組み込まれています。

アンテナが反転した場合、範囲バイアスと位相の補償 API を使用して位相を補正する必要があります。詳細な手順については、MMWAVE-L-SDK を参照してください。

注

範囲バイアスおよび位相の補償は製造後に行う必要があります。そうしないと、処理チェーンによって計算される範囲と到来角が誤っている可能性があります。

3.1.2 チャープ構成

チャープ特性は、構成ファイル内のさまざまなコマンドを使用して、アプリケーション要件に応じて変更することができます。特定のチャープ プロファイルを決定する要因には、最大検出距離要件、消費電力、性能などがあります。チャープ構成の詳細については、『[テキサス インストルメンツのレーダー デバイスにおけるチャープ パラメータのプログラミング](#)』および『[MIMO レーダー](#)』アプリケーションレポートを参照してください。

3.2 PCB

このリファレンス デザインでは、PCB に 4 層のスタックアップを使用しています。アンテナは PCB の最下層 (Lyr 4) に実装されています。最上層と最下層には、FR408HR 誘電体材料が使用されています。両方の層が接地された共平面導波管 (GCPW) 転送ラインに寄与するため、スタックアップ、特にこれらの層の誘電体は、良好なアンテナ性能を得るために重要です。これらの両方の層の誘電体の重要な特性を以下に示します。

1. 誘電体は 2 x 1067 (デュアル プライ) のスプレッド ガラス構造を採用
2. 誘電体の厚さは 5mils (127 μ m) で、この厚さの値はインピーダンス整合のために調整されている
3. 誘電体の Dk 値は 60GHz で 3.3
4. コア材料

注

- 誘電体の厚さを変えると、インピーダンスの不整合が生じて放射電力の反射が大きくなる可能性があるため、誘電体の厚さは変えないでください。
- プリプレグ材はアンテナ層に使用しないでください。

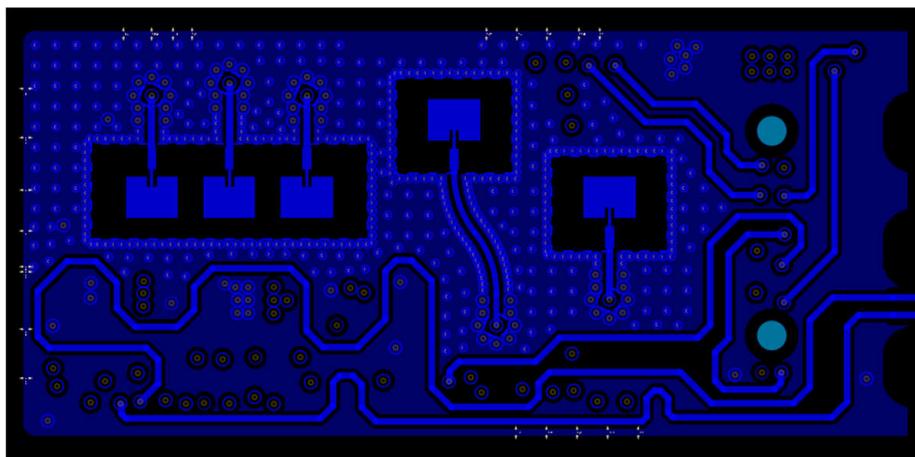


図 3-3. 最下層のアンテナ

接地された共平面導波管 (GCPW) 転送ラインは、RF 信号をアンテナに転送するために使用されています。以下に、アンテナ層とそれに続くグランド層に関する重要な考慮事項を示します。

1. アンテナ層の仕上がり銅箔の厚さは 40 μ m
2. グランド プレーン (アンテナ プレーンの下、第 2 層) の厚さは 1oz (1oz が利用できない場合は 0.5oz も使用可能)。
3. 表面粗さを低減するため、銅は超低プロファイル (VLP) またはそれ以上
4. PCB 表面仕上げは OSP または浸漬銀

注

無電解ニッケル金めっき (ENIG) の表面仕上げは、ミリ波周波数範囲で挿入損失が大きくなる可能性があるため 推奨されません。

リファレンス デザインの PCB 全体の厚さは 1.17mm です。

スタックアップの詳細を 図 3-4 に示します。

STACKUP REPORT

Part Number: IWRL6432W EVM & MODULE

Program: N/A

Target Thickness: 47.000

± 10%

Over mask on plated copper

Total Thickness: 45.898

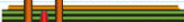
Lyr	Lyr Type	Image	Foil Wt	Thk (mil)	Cu Thk (mil)	Er	Generic Name	Construction	Material Family
tsmp				0.400		3.9			
1	Sig		0.5	5.000	1.600	3.18	Core 0.130 mm H/1	2x1067	FR408HR
2	Sig		1	5.597	1.150	3.24	1080		FR408HR
						3.24	1080		FR408HR
3	Sig		1	5.000	1.150	3.49	Core 0.130 mm 1/1	2116	FR408HR
4	Sig		1	3.826	1.150	3.03	106		FR408HR
						3.03	106		FR408HR
5	Sig		1	5.000	1.150	3.49	Core 0.130 mm 1/1	2116	FR408HR
6	Sig		1	5.574	1.150	3.24	1080		FR408HR
						3.24	1080		FR408HR
7	Pln		1	1.150		3.18	Core 0.130 mm H/1	2x1067	FR408HR
8	Sig		0.5	5.000	1.600				
bsmp				0.400		3.9			

図 3-4. スタックアップの設計

注

1. TI のスタックアップを製造された状態で使用してください。異なるスタックアップを使用する場合は、3D 電磁界ソルバーが推奨され、アンテナの最適化を行う必要があります。
2. スタックアップで記載されている Er 値は、低い周波数であり、60GHz 用に最適化されていません。また、構造の種類によって、値は少し変わる可能性があります。

4 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、テスト結果

4.1 ハードウェア要件

4.1.1 リファレンス デザイン

このリファレンス デザインは、USB 経由で電源供給およびホストとの通信が可能です。オンボードの XDS110 デバッグプローブと、高速 LVDS 用の 60 ピンコネクタが、評価の目的で提供されています。

注

また、このリファレンス デザインは、J7 コネクタ経由で 5V バッテリーを使用して電源を供給することもできます。その場合、VBAT_IN を VCC_IN にバイパスするために、電源負荷スイッチ U16 の PR1 ピンを Low にプルダウンする必要があります。

4.1.2 小型フォーム ファクタのリファレンス デザイン

この小型フォーム ファクタのリファレンス デザインには、14 ピン コネクタがあります。

表 4-1. 小型フォーム ファクタリファレンス デザインのピンの説明

ピン番号	ピン名	機能
1 (J3A)	VCC_5V	5V 電源
2 (J3B)	VCC_5V	5V 電源
3 (J3A)	RS232_TX_1V8	UART B (RS232) TX
4 (J3B)	SPI_MISO_REG_MODE_1V8	SPI MISO 信号
5 (J3A)	SPI_CS_I2C_SDA_1V8	SPI チップ セレクト / I2C の SDA
6 (J3B)	GPIO2_1V8	GPIO
7 (J3A)	SPI_CLK_I2C_SCL_1V8	SPI クロック、I2C の SCL
8 (J3B)	TDO_SOP0_1V8	SOP0 制御
9 (J3A)	RS232_RX_1V8	UART B (RS232) RX
10 (J3B)	SPI_MOSI_1V8	SPI MOSI 信号
11 (J3A)	HOST_INTR_GPIO_1V8	GPIO
12 (J3B)	RADAR_NRST_1V8	NRESET 制御ピン
13 (J3A)	GND	グランド
14 (J3B)	GND	グランド

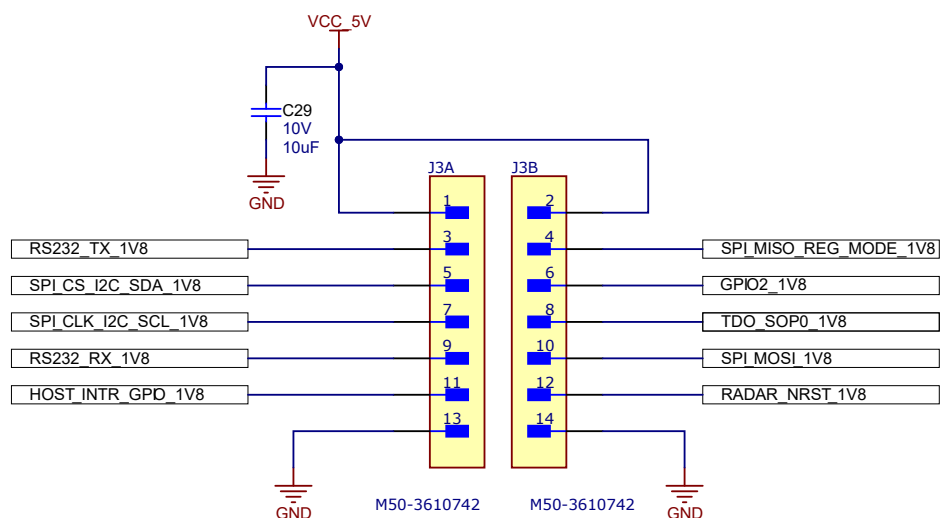


図 4-1. ピン説明

この小型フォーム ファクタのリファレンス デザインは、5V の電力を使用します。ただし、デバイスは 1.8V 単一電源で動作するため、IO 電圧レベルは 1.8V です。ホスト側の IO 電圧と一致します。

小型フォーム ファクタのリファレンス デザインは、LaunchPad™ 開発キットを使用してホスト PC に接続できます。

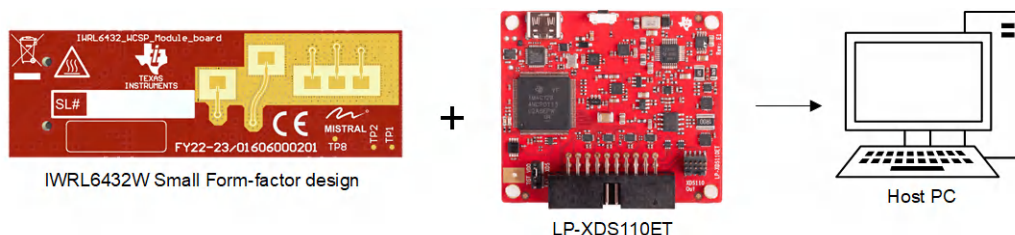


図 4-2. ホスト PC への接続オプション

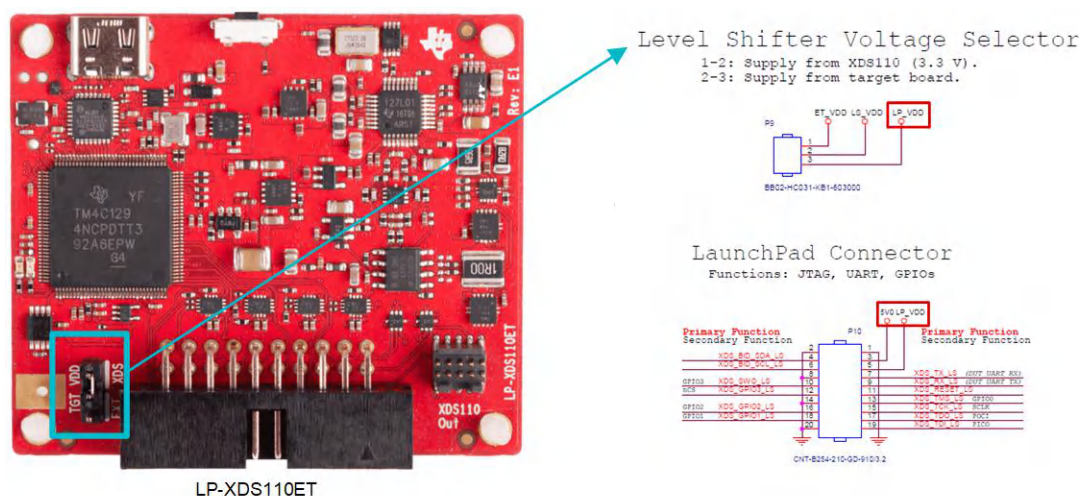


図 4-3. LaunchPad™ 開発キットの接続

LP-XDS110ET LaunchPad 開発キットを使用して、小型フォーム ファクタのリファレンス デザインをホスト PC に接続できます。この接続には、次の点を考慮してください。

1. このリファレンス デザインには、LaunchPad 開発キットから 5V 電源を直接供給できます。
2. このリファレンス デザインの IO は 1.8V です。ただし、LaunchPad 開発キットにはデフォルトの 3.3V IO (P9 ジャンパ位置 1-2) が備わっています。LaunchPad 開発キットの IO を変更するには、P9 ジャンパを 2-3 (図 4-3 を参照) に配置して、ターゲット ボードからの IO 電圧を設定します。
3. LaunchPad 開発キットの IO 電圧を 1.8V に変更するには、LaunchPad 開発キットの P10 のピン 5 (LP_VDD) に 1.8V (リファレンス デザインの IO 電圧) を接続します。

この小型フォーム ファクタのリファレンス デザインでは、1.27mm ピッチのピンを使用してフォーム ファクタを縮小しています。ただし、ほとんどの USB-UART アダプタに接続するには、2.54mm ピッチのジャンパが必要です。このため、ピッチコンバータ DR127D254P20F を使用して USB ブリッジと接続しました。

図 4-4 は、この接続を示しています。

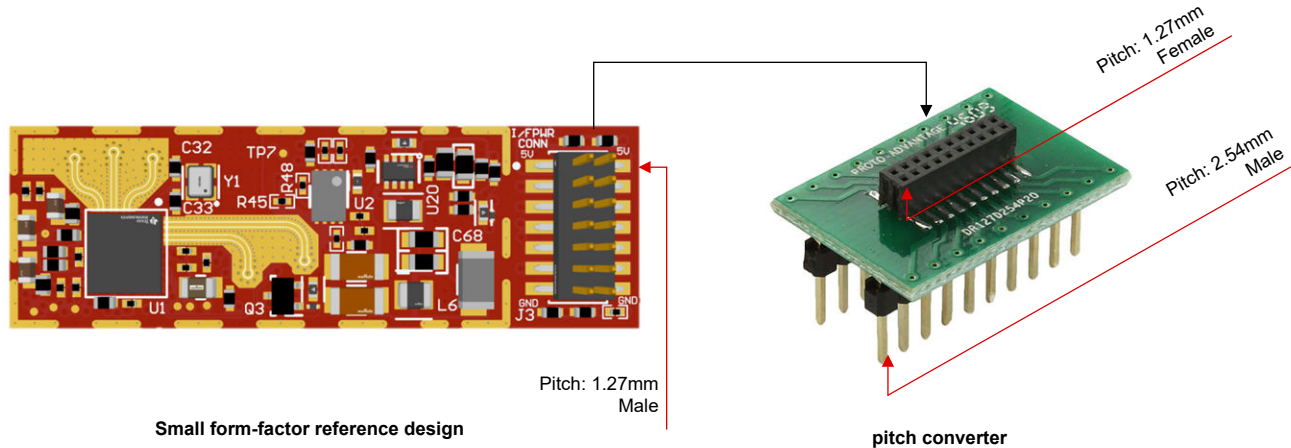


図 4-4. ピッチ コンバータの使用

この手順では、リファレンス デザインがピッチ コンバータに接続されます。接続には、ピッチ コンバータの反対側から 2.54mm ピッチのオス ヘッダを使用しました。次のリストに、接続の確立時に考慮すべき注意事項をいくつか示します。

この接続では、ジャンプワイヤは次のようになります。

1. 電源ピン (5V) の最大ピーク電流要件 (例: 200mA ~ 300mA) に対応する必要がある
2. より小さく、かつ同じ長さで、データ転送速度を低下させて情報を失う原因となるような大きな DCR を発生させることがない
3. 電源と GND のリンギングを防止するため、IR 電圧降下とインダクタンスを小さくする必要がある

4.2 ソフトウェア要件

このリファレンス デザインは、[UniFlash フラッシュ プログラミング ツール](#)を使用してプログラムできます。MMWAVE-L-SDK5.5.3.0 およびそれ以降のバージョンでは、IWRL6432W をサポートしています。歩行者検出テストは、MMWAVE-L-SDK5.5.3.0 を使用して実施されました。

4.3 テスト設定

このセンサを、テストのために開放空間に配置しました。このテストでは、ボアサイトにおける 15m での人の存在が検出されました。TI は MATLAB® を使用して、無響室から収集したデータにより、FoV 全体でのアンテナ放射パターンと角度誤差を分析しました。以下にテスト結果を示します。

1. 15m での人の存在検出 (ボアサイト)
2. アンテナ放射パターン
3. FoV での角度誤差

4.4 テスト結果

4.4.1 ポアサイトにおける 15m での人の存在検出

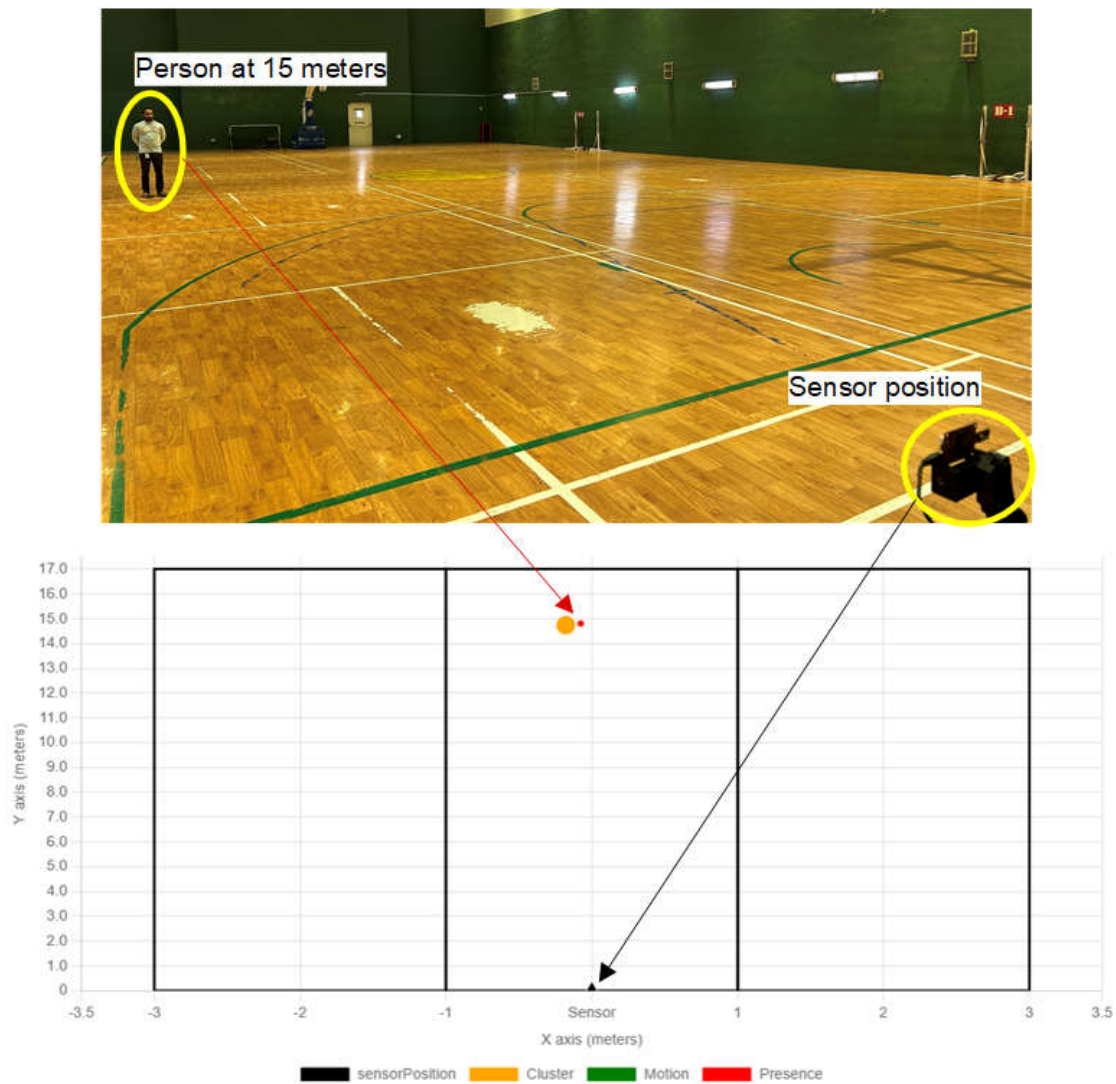


図 4-5. テスト結果:15m での人の存在検出

4.4.2 アンテナの放射プロット

FoV 全体にわたるアンテナ放射パターンと角度誤差を、無響室で収集された未加工データを使用して MATLAB で処理しました。

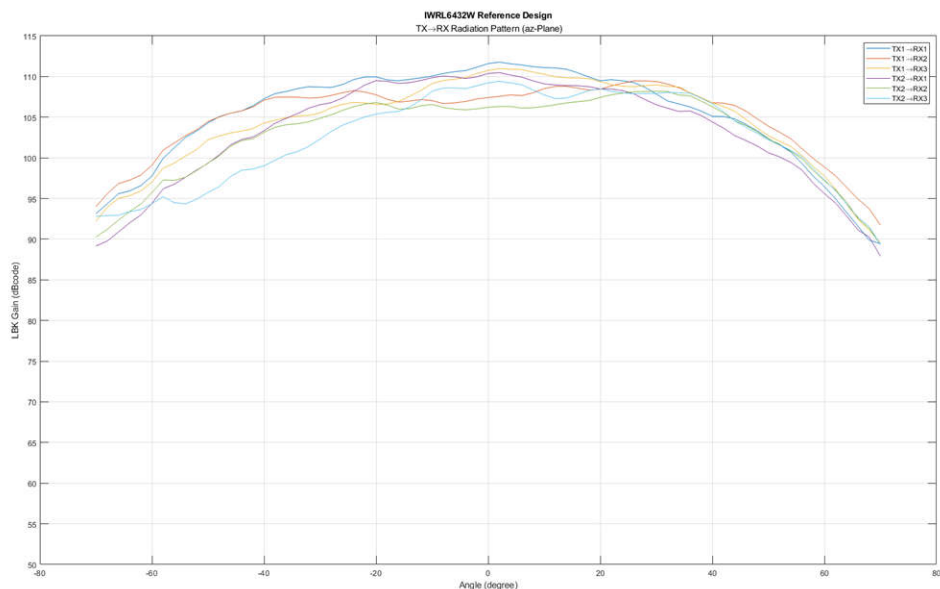


図 4-6. 放射パターンの測定 (方位角)

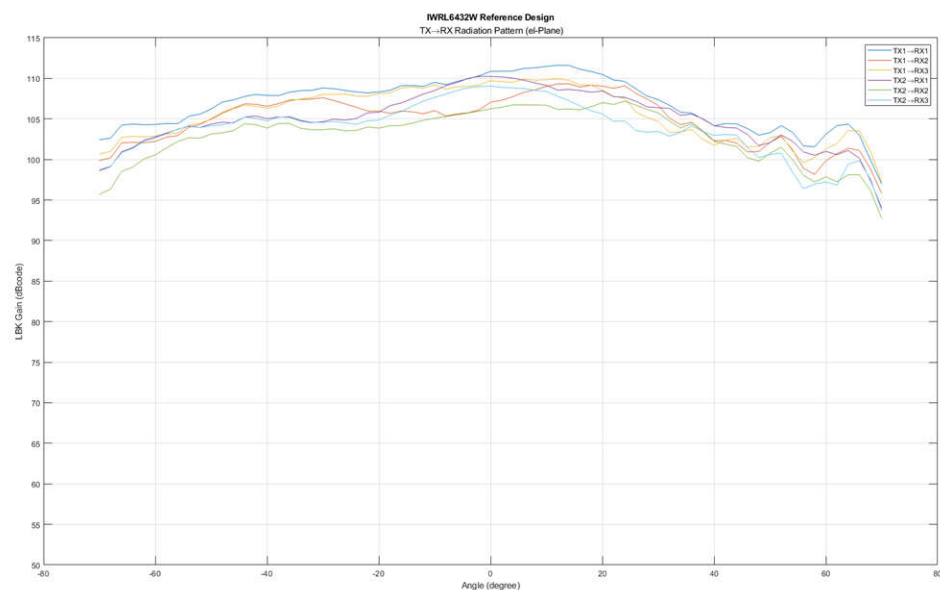


図 4-7. 放射パターンの測定 (仰角)

4.4.3 角度推定精度

角度を推定するために、まずボアサイト位相キャリブレーションが行われます。これにより、角度推定誤差を減らすことができます。FoV スイープ全体では、角度推定誤差は ± 10 度以内です。

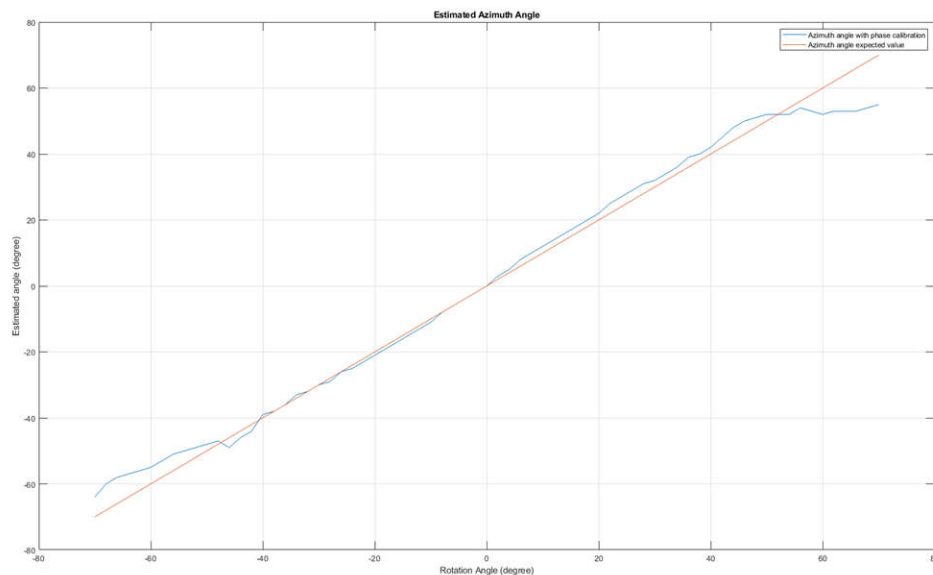


図 4-8. 方位角度の推定

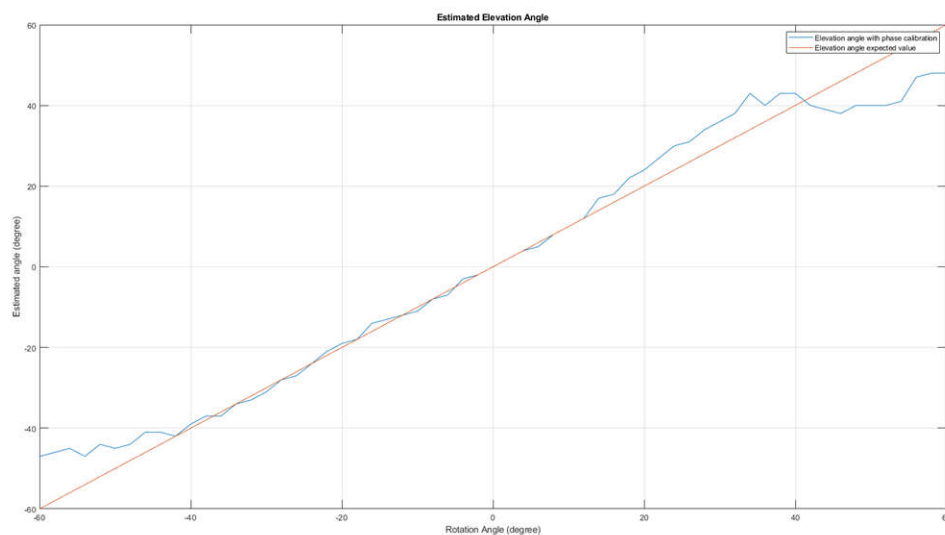


図 4-9. 仰角の推定

5 設計とドキュメントのサポート

5.1 デザイン ファイル

5.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDEP-01040](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.2 BOM

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDEP-01040](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.2 ツールとソフトウェア

ツール

CCS 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。このツールは、組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。ツールは、[テキサス・インスツルメンツ 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

UniFlash

UniFlash は、テキサス・インスツルメンツのマイクロコントローラやワイヤレス コネクティビティ デバイスに搭載されているオンチップ フラッシュと、テキサス・インスツルメンツ製プロセッサ向けのオンボード フラッシュに対してプログラミング (書き込み) を行うためのソフトウェア ツールです。Uniflash は、グラフィカル インターフェイスとコマンドライン インターフェイスの両方を採用しています。

5.3 ドキュメントのサポート

1. テキサス インスツルメンツ、『[IWRL6432 WCSP シングルチップ 57 ~ 64GHz 産業用レーダー センサ](#)』データシート

5.4 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。

5.5 商標

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

Isola® is a registered trademark of ISOLA USA Corporation.

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

Diodes Incorporated® is a registered trademark of Diodes Incorporated.

Macronix® is a registered trademark of Macronix International Co., Ltd.

MATLAB® is a registered trademark of The MathWorks, Inc.

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。

6 著者について

CHETHAN KUMAR Y. B. は、勤続 25 年目のテキサス インストルメンツの社員です。インド理科大学院で電子設計技術の修士号を取得し、2000 年に設計エンジニアとしてテキサス インストルメンツに入社した後、これまでにアナログ、ワイヤレス、組み込みプロセッシングの各グループでさまざまな職位を経験してきました。この 25 年間で、シリコン、システム、アプリケーション分野でさまざまなミックスド シグナル製品に携わり、自身の専門分野で複数の特許を取得して、さまざまな学会で論文を発表しています。現在は、ミリ波ワイヤレス システムに特化したレーダー グループのハードウェア システムとアプリケーションのチームを率えています。

SAMI MARDINI は、テキサス インストルメンツのレーダー ADAS ハードウェア アプリケーション マネージャです。担当チームは、テキサス インストルメンツのミリ波センサ製品向けのリファレンス デザイン評価基板の開発を専門としています。テキサス大学アーリントン校で電気工学の理学士号を取得し、22 年以上にわたってテキサス インストルメンツに勤務し、その間には多くの職位に携わってきました。

BLAKE KISSHAUER は、産業用レーダー チームのハードウェア アプリケーション エンジニアです。フロリダ大学を卒業し、電気工学の学士号と修士号を取得。テキサス インストルメンツで、ミリ波レーダーのアナログ フロント エンドに携わるミリ波レーダー検証チームの特性評価エンジニアとしてキャリアを開始しました。マイクロ波の試験と測定に関する知識と実践的な経験を活かして、お客様が設計上の課題を克服し、ミリ波レーダーを最終製品プロジェクトに統合できるように支援しています。

SWARNENDU CHATTOPADHYAY は、産業用レーダー チームのハードウェア アプリケーション エンジニアです。インド工科大学で VLSI 設計の修士号を取得しています。2023 年にテキサス インストルメンツに入社後、ミリ波センサ向けのハードウェアを開発し、お客様と密接に協力して、ミリ波レーダー センサを設計に統合し、設計上の課題をシームレスに解決できるよう支援しています。

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