

77GHz ミリ波を使用した 液面センシング



Brian Ginsburg
mmWave Systems Manager

Karthik Ramasubramanian
Radar Systems Manager

Jasbir Singh
SoC Architect

テキサス・インスツルメンツ

要約

IWR1443ミリ波センサは高度に統合された77GHzレーダ・デバイスであり、近接センシング、エントリ・レベルの産業用レーダ・アプリケーション、および超高精度距離測定に適したシングルチップCMOSミリ波センサ・ソリューションです。

IWR1443センサには、ミリ波無線周波数(RF)と、最大で3つのトランスミッタおよび4つのレシーバに対応できるアナログ・ベースバンド・シグナル・チェーンに加え、レーダ信号の処理用に、お客様がプログラム可能なマイクロコントローラ(MCU)とハードウェア・アクセラレータが搭載されています。

このホワイト・ペーパーでは、全体的なアーキテクチャと、デバイスに搭載されている機能について取り上げます。ここでは、従来の産業用センサの電力およびインターフェイス要件を満たすために、TIの低消費電力、産業用製品ファミリであるMSP430™ MCUまたはSimpleLink™ MSP432™ MCUとIWR1443ミリ波センサを使用するプラットフォームについて紹介します。また、代表的な液面センシング・アプリケーションを示したチャープ構成例についても、いくつか解説します。

概要

ミリ波センシング・テクノロジーを利用したさまざまな産業用および車載用アプリケーションが、ここ数年で急激に増加しています。主な産業用アプリケーションには、レーダ式タンク液面計、セキュリティ・システム、ロボット・ビジョン、交通監視などがあります。液面センシング・アプリケーションの場合、使用するセンサは高い精度と、ほこりや厳しい温度条件などの多様な環境条件に対応できる堅牢性を備えています。業界内では、サイズが小さく、アンテナの指向性に優れ、より広い帯域幅や性能上の利点が得られることから、75GHz～85GHzの周波数帯の使用に向けた移行が始まっています。

レーダ・データキューブ・メモリという観点からミリ波センサの要件を見た場合、処理と機能安全性の監視に必要となるMIPS(100万命令/秒)値はアプリケーションによって異なります。このホワイト・ペーパーでは、液面センシング・アプリケーション向けの77GHzレーダ・オンチップ・ソリューションとしてIWR1443ミリ波センサを紹介し、関連する機能と全体的なアーキテクチャを示します。

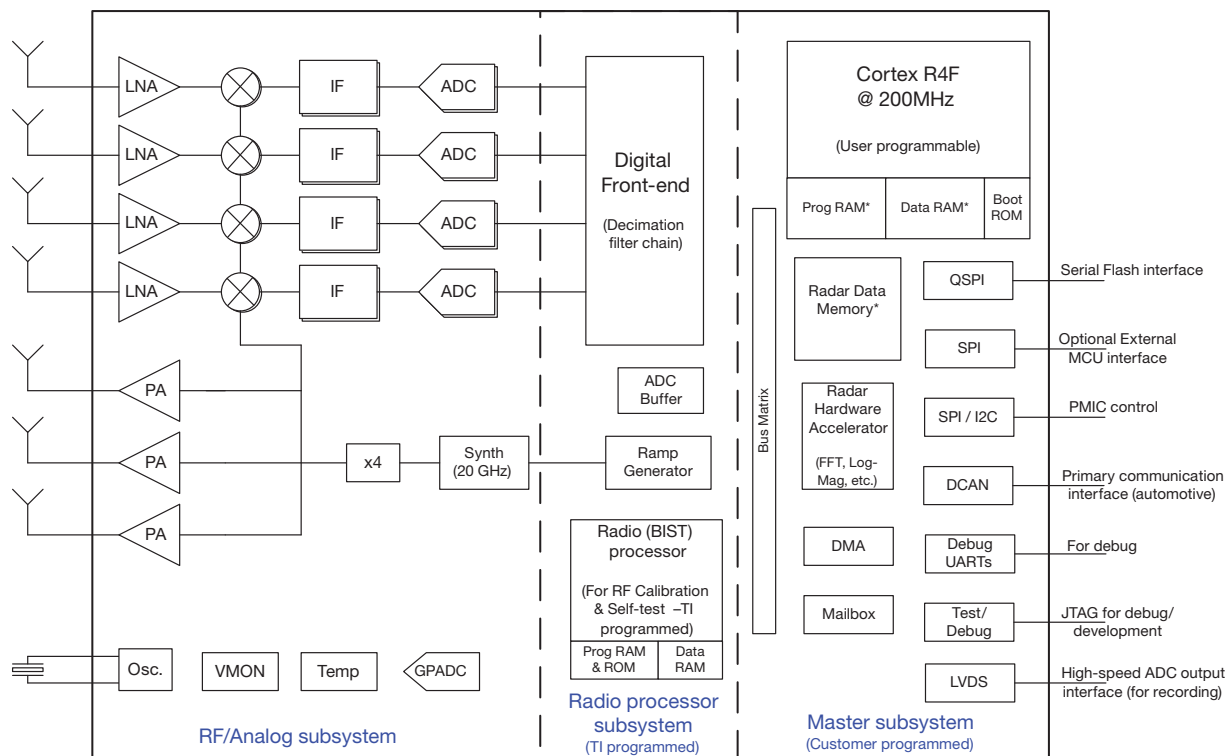


図 1 : WR1443 センサの全体的なアーキテクチャ

IWR1443ミリ波センサには、ミリ波RFフロント・エンドと最大で3つのトランスミッタおよび4つのレシーバによるアナログ・ベースバンド・シグナル・チェーンに加え、信号処理用に、お客様がプログラム可能なMCUとハードウェア・アクセラレータが搭載されています。高性能フロント・エンドでは、FMCW（周波数変調連続波）レーダ向けに、極めて高速で高リニアリティーのランプ生成と広い中間周波数（IF）帯域幅を持つ複素ベースバンドをサポートしています。[IWR1443ミリ波](#)の処理サブシステムでは、適度なメモリおよび十分な処理速度のアプリケーションがサポートされています。このような高精度フロント・エンドと組み込みの処理システムの組み合わせは、精度が最も重要視される

液面センシングに最適です。処理は1次元で構成されるので、データ・キューブを小さくでき、計算の複雑さも妥当なレベルに抑えることができます。

IWR1443ミリ波の全体的なアーキテクチャ

図1に示されている、IWR1443ミリ波センサの全体的なアーキテクチャと機能について見ていきましょう。

[IWR1443センサ](#)は高度に統合されたシングルチップの77GHzミリ波センサであり、3つの送信チェーンと4つの受信チェーン、ユーザ側でプログラム可能な200MHzのARM® Cortex®-R4Fプロセッサ、およびレーダ・ハードウェア・アクセラレータを備えています。図1に示すとおり、このデバイスは、RF/アナログ・サブシステム、無線プロセッサ・サブシステム、マスタ・サブシステムという3つの主要なサブシステムで構成されています。

RF/アナログ・サブシステムには、RFおよびアナログ回路として、シンセサイザ、パワー・アンプ(PA)、低ノイズ・アンプ(LNA)、ミキサ、IFアンプ、アナログ/デジタル・コンバータ(ADC)が組み込まれています。また、このサブシステムは水晶発振器と温度センサも備えています。FMCWチャープの生成は、閉ループの20GHz周波数シンセサイザで直接行われます。

無線プロセッサ・サブシステムには、デジタル・フロント・エンド、ランプ・ジェネレータ、内部プロセッサが組み込まれており、明確に定義されたアプリケーション・プログラミング・インターフェイス(API)メッセージに基づき、低レベルRF/アナログおよびランプ・ジェネレータのレジスタをマスタ・サブシステムから制御および構成できます(この無線プロセッサはTI側でプログラミングされており、RFの必要な較正といくつかの基本的な組み込み自己テスト(BIST)/監視機能を処理します。この無線プロセッサをお客様が直接使用することはできません)。デジタル・フロント・エンドでは、未加工のシグマ・デルタADC出力のフィルタ処理とデシメーションを行い、最終的なADCデータ・サンプルをプログラム可能なサンプリング・レートで供給します。

マスタ・サブシステムには、お客様側でプログラム可能なARMのCortex-R4Fプロセッサ(200MHzクロックで動作)が組み込まれています。このプロセッサでは、デバイスの全体的な動作の制御、信号処理の実装(RFハードウェア・アクセラレータで支援)、明確に定義されたAPIメッセージ(メールボックス・インターフェイスを通じて無線プロセッサに書き込まれる)によるフロント・エンドの送信/受信動作の構成を行います。

IWR1443ミリ波は自律センサとして機能し、CANインターフェイスを介して、またはシリアル・ペリフェラル・インターフェイス(SPI)を使用してプライベート・コントローラ・エリア・ネットワーク(CAN)バスと通信することができます。このデバイスには、ユーザのコードをシリアル・フラッシュから直接ダウンロードできる、クワッドSPI(QSPI)が搭載されています。また、このデバイスはセンサ内ホスト(外部MCUなど)の制御下でも動作できます。この場合、センサ内ホストでデバイス

と通信し、SPIインターフェイスを介して、そのインターフェイス経由でのコードのダウンロードを含むコマンドをデバイスに送信します。IWR1443ミリ波を自律センサとして使用している場合は、電源管理IC(PMIC)制御に追加のSPI/IC間(I²C)インターフェイスを利用できます。IWR1443センサには通信およびPMIC制御用として4つのインターフェイス(CAN×1、I²C×1、SPI×2)が搭載されていますが、これらのインターフェイスのうち、同時に使用できるのは2つだけです。

マスタ・サブシステムで使用できるメモリの合計は576KBです。このメモリ容量は、R4FプログラムRAM、R4FデータRAM、レーダ・データ・メモリに分配されます。R4Fの最大使用可能サイズは448KBであり、これがR4Fの密結合メモリ(TCM)、TCMA(320KB)とTCMB(128KB)に分配されます。448KBすべてが統合メモリであり、プログラミングやデータに使用できますが、代表的なアプリケーションではTCMAがプログラム・メモリ、TCMBがデータ・メモリとして使用されています。

128KBを最小値とする残りのメモリは、レーダ・データ・キューブを保存するためのレーダ・データ・メモリとして使用できます。レーダ・データ・メモリのサイズを64KB単位で増やすことも可能ですが、それに合わせてR4FプログラムまたはデータRAMのサイズを減らす必要があります。表1に、サポート対象となる構成の例を2つ示します。

Option	R4F program RAM	R4F data RAM	Radar data memory
1	320 KB	128 KB	128 KB
2	256 KB	128 KB	192 KB

表1:メモリ構成の例

高速フーリエ変換(FFT)や対数振幅など、頻繁に使用されるレーダ信号処理の計算時にR4Fを支援するため、マスタ・サブシステムにもレーダ・ハードウェア・アクセラレータが組み込まれています。では、このモジュールについて見ていきましょう。

チャープ・スティッチングによる閉ループ周波数合成

正確な産業用プロセス制御を実現するには、液体の使用量を厳密かつ持続的に制御し、漏れや溢れがあれば早期に検出できるように、液面センシングやレーダ式タンク液面計で高精度の距離測定を行う必要があります。ミリ波センサの距離精度に影響する要因として、RF帯域幅、信号対ノイズ比(SNR)、レーダ・ターゲットの形状と安定性、レーダ変調の不完全性などがあります。FMCWレーダの場合、不完全なレーダ変調はランプ生成の非直線性やデバイスの位相ノイズにつながります。そのため、周波数生成ブロックは高精度を実現するうえで最も重要なブロックであり、すべての直線性、位相ノイズ、RF帯域幅を決定します。

代表的なFMCWレーダ・システムでは、レーダ・ランプを生成するために、デジタル/アナログ・コンバータ(DAC)によって駆動する閉ループの電圧制御発振器(VCO)が使用されています。この方法では、時間の経過と共に著しい非直線性と不安定性が生じることになるため、FFTのピークに影響が及び、結果として推定距離が不正確になります。こうした不正確さは、スイープ帯域幅の拡大によってさらに悪化するため、大部分のシステムの帯域幅が2GHz以下に制限されます。

TIのIWR1443ミリ波センサは閉ループのフェーズロック・ループ(PLL)を備えており、これによって直線性の高いチャープを生成できるため、距離精度が向上します。マイクロメータの精度はRF帯域幅に反比例するため、直線性を低下させることなく4GHz帯域幅に対応することで、さらに距離精度が向上します。TIのミリ波CMOSテクノロジーの利用により、フラクショナルN PLLの効率を高めつつ量子化ノイズを抑制できるため、直線性と位相ノイズの間のトレードオフを排除できます。

同期して生成されるmmWave波形を利用すると、液面センシング・アプリケーションをさらに自由に設計できます。具体的には、異なる周波数から開始する2つのランプを、誤差を発生させることなく正確に生成できます。たとえば1GHzのランプを76GHz～77GHzで生成し、その後4GHzのランプを77GHz～81GHzで生成することができます。両方のランプの反射波形デジタル処理により結合することで、精度がさらに25%向上します。

レーダ・ハードウェア・アクセラレータ

レーダ・ハードウェア・アクセラレータ・モジュールは、FMCWレーダ信号処理で頻繁に使用される計算をR4Fプロセッサの代わりに実行することで、その負荷を軽減できます。FMCWレーダ信号処理では、距離、速度、方向の各次元でレーダ画像を取得するために、FFTと対数振幅の計算を行う必要があります。FMCWレーダ信号処理で頻繁に使用される関数の一部はレーダ・ハードウェア・アクセラレータ内で実行されますが、一方でクラスタリングや物体追跡に関連する独自のアルゴリズムはR4Fプロセッサで実行されます。レーダ・ハードウェア・アクセラレータの主な機能を以下に示します。

- 高速FFT演算。プログラム可能なサイズ(2の累乗)は最大で1,024ポイントの複素FFT。
- 優れた信号対量子化ノイズ比(SQNR)性能を得るために内部FFTビット幅は(IとQで)各24ビットとし、基数2の各ステージで行う完全にプログラム可能なパタフライ・スケーリングにより、ユーザに柔軟性を提供。
- FFT前の単純な処理に使用できる組み込み機能：プログラム可能なウィンドウ処理、基本的なバイナリ位相変調(BPM)除去および干渉除去。
- 振幅(絶対値)と対数振幅の計算機能。
- 柔軟なデータ・フローとデータ・サンプルの構成により、効率的な多次元FFT演算と必要に応じた転置行列アクセスに対応。
- チェーンとループのメカニズムを利用してアクセラレータの一連の動作をシーケンス処理し、メイン・プロセッサからの介入を最小限に抑える。
- 線形モードと対数モードをサポートしている、一定誤警報率・セル平均化(CFAR-CA)検出器。
- その他の各種機能：FFTスティッチング(最大4,000FFT)、低速離散フーリエ変換(DFT)、複素ベクトル乗算機能。

図2に示したレーダ・ハードウェア・アクセラレータは、メイン・アクセラレータ・エンジンに対して入力データの送信と出力データの取得を行う、4つのメモリ(各16KB)で構成されています。これらのメモリは、レーダ・ハードウェア・アクセラレータの"ローカル・メモリ"と呼ばれ、前節で説明した合計576KBのRAMとは別になっています。

一般的なデータ・フローでは、ダイレクト・メモリ・アクセス(DMA)モジュールによってサンプル(FFT入力サンプルなど)がレーダ・ハードウェア・アクセラレータのローカル・メモリに入力されるため、メイン・アクセラレータ・エンジンからこれらのサンプルにアクセスし、処理することができます。アクセラレータによる処理が終わると、DMAモジュールによってこれらのローカル・メモリから出力サンプルが読み取られ、レーダ・データ・キューブ・メモリに保存されるか、またはR4Fプロセッサでの追加処理のためにR4FデータRAMに保存されます。図2の赤い矢印は、FFTとその他の処理ステップの両方で行われる、レーダ・データ・キューブ・メモリとローカル・メモリの間でのデータの移動を示しています。

レーダ・ハードウェア・アクセラレータ内に4つの16KBメモリが個別に搭載されていますが、これには、入力と出力の両方で、たとえばDMA書き込み(および読み取り)動作をアクセラレータの主な計算処理と並列に実行するような"ping-pong"メカニズムを利用できるようにするという目的があります。4つのメモリがあることで、このような並列処理が可能になります。

レーダ・ハードウェア・アクセラレータの動作は、"パラメータ・セット"と静的〈汎用〉レジスタという2種類のレジスタによって構成されます。パラメータ・セットによる構成では、R4Fプロセッサからの介入を最小限に抑えながらアクセラレータで各動作を実行できるように、アクセラレータの動作全体のシーケンスを事前にプログラミングできます(適切なソース・メモリと保存先メモリのアドレス、およびシーケンス内の動作ごとに指定されたその他の構成を使用)。アクセラレータに組み込まれたステート・マシンでは、一度に1つのパラメータ・セット構成の読み込み処理と、事前にプログラミングされた動作のシーケンス処理が行われるため、R4Fプロセッサに対する頻繁な割り込みの必要性が低下します。

レーダ・ハードウェア・アクセラレータの動作クロック周波数は200MHzです。アクセラレータ・エンジンの内部アーキテクチャは、定常状態のFFTスループットとして200MSPSが実現でき、初期レイテンシ後はクロック・サイクルごとに1つのFFT入力とFFT出力が実行されるような設計になっています。『[IWR1443 Technical Reference Manual](#)』に、IWR1443の機能と使用手順に関する詳細情報が記載されています。

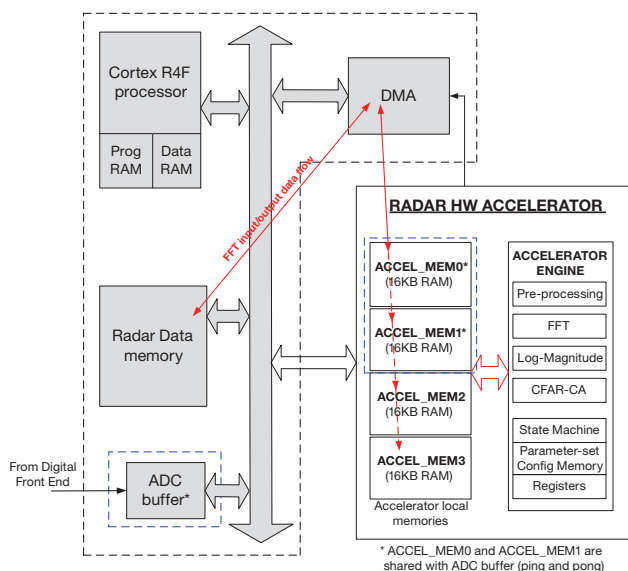


図2：レーダ・ハードウェア・アクセラレータ

IWR1443の使用例

液面センシングの基本的な要件は、極めて高い距離精度とループ駆動アプリケーションとの互換性であることから、レーダ・モジュール全体で15V電源からの消費電流を4mA未満に抑えるという厳密な電力要件が適用されます。

IWR1443センサと低消費電力の外部MCUを組み合わせることで、IWR1443デバイスで主なミリ波信号処理の計算（FFT、ピーク検出、距離補間）を実行しつつ、外部MCUで二次的な計算と産業用デバイスに固有のインターフェイスを処理するようなアプリケーションが実現できます。産業向けの特定用途では、2線式ループ駆動での動作が要求されるため、消費電力に対して厳密な要件が課されます。IWR1443センサでは低リークのスリープ・モードがサポートされていないため、このようなケースでは、デバイスをパワーダウンして測定サイクルのたびに起動することにより、平均消費電力を低く抑える必要があります。

図3は、IWR1443センサとTIのMSP430 MCUを使用したループ駆動システムの例を示したものです。この構成では、超低消費電力の16ビットMSP430 MCUがシステムのマスタとして機能しており、HART（Highway Addressable Remote Transducer）プロトコル・モデムを実行して4mA～20mAのインターフェイスを介した通信を行い、発射波の各バーストに対するIWR1443センサのデューティ・サイクルを制御しています。ローカル分析用のさらに優れた処理性能や追加の内蔵アナログ機能が必要な場合は、低消費電力の32ビットMSP432 MCUを使用することもできます。MSP432 MCUも最適化されたワイヤレス・ホストMCUとして機能し、BLE、Sub-1GHz、Wi-Fi® などの広範なワイヤレス通信プロトコルを介してレーダ・データをワイヤレスで送信できます。

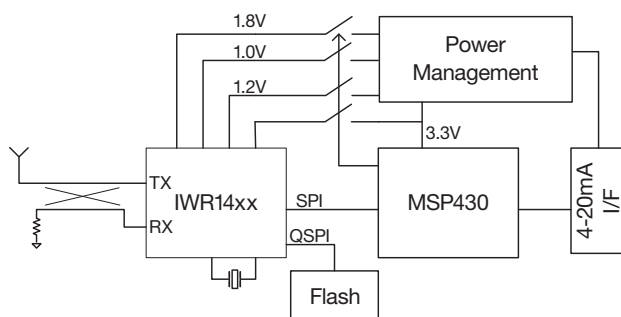


図 3 : IWR1443 センサと MSP430 MCU によるループ駆動液面センシングのシステム図

各測定の前に、MSP430 MCUによってIWR1443センサがイネーブルにされると、IWR1443センサはQSPIを使用し、シリアル・フラッシュに保存されている任意のアプリケーション・コードをダウンロードします。Cortex-R4Fで実行中のアプリケーションによってレーダ・フロント・エンド（BISTプロセッサ）が構成され、SPI経由でMSP430 MCUとの通信が行われます。IWR1443によってチャープのバーストがトリガーされ、それがレーダ・データ・キューブ・メモリに保存されます。バックグラウンドでは、レーダ・ハードウェア・アクセラレータによってチャープごとにFFTが実行され、その結果がSNRの改善のために蓄積されます。ハードウェア・アクセラレータとCortex-R4Fによって検出と後処理が実行され、最終的なレベルがSPIを介してMSP430 MCUに通知されます。また、FFT出力をMSP430 MCUに直接出力して最終的な後処理を行うこともできます。最後に、MSP430 MCUにより、次のバーストの前にIWR1443センサが完全にシャットダウンされます。

この例での最大連続スイープ帯域幅は4,000MHz（これによって得られる距離分解能は3.75cm）です（2,048ポイントの複素FFTを使用）。5つのチャープが連続で取得され、ハードウェア・アクセラレータによってFFT出力が結合されます。表2は、全チャープ構成をまとめたものです。

Example chirp configuration for illustrative purposes (one TX, one RX)	
Sweep bandwidth	4,000 MHz
Range resolution	3.75 cm
Maximum unambiguous range	60 m
Ramp slope	20 MHz/μs
Chirp duration	200 μs valid (+10 μs inter-chirp)
Number of chirps	5
Maximum beat frequency	8.9 MHz
ADC sampling rate (I, Q)	10 MSPS (complex)
Frame time	5 × 210 μs = 1.1 ms
Range FFT size	2,048 (complex)
Radar data memory	2,048 × 5 × 1 RX × 4 Bytes = 40 KB

表 2 : 液面センシング用のチャープ構成とレーダ性能

表2からわかるように、前述の例では128KBを最小値とするレーダ・データ・メモリの最低条件での構成を使用しています。

IWR1443センサで消費される電力全体には、コードのダウンロード、アクティブなレーダ周期、データの後処理、MSP432 MCUへの出力の転送などの初期構成中に使用される電力が含まれます。IWR1443センサのピーク電力は約1.3Wであり、2Hz～4Hzのフレーム・レートで平均化すると6mWを下回るため、4mA～20mAリンクのパワー・バジェット内に十分収まります。その他の動作の管理については別の戦略が用意され、これらはコードのダウンロード時間、出力の転送時間、およびIWR1443センサとMSP432 MCUの間での計算の分離とトレードオフの関係にあります。詳細については、『[77GHzレベル・トランスミッタ向け電力最適化設計のリアレンス・デザイン](#)』を参照してください。

まとめ

IWR1443センサとMSP430/MSP432 MCUの組み合わせは、その直線性の高いチャープ生成と高度な統合により、コンパクトで高精度な液面センシング測定を実現できます。

関連情報

[IWR1443ポートフォリオ](#)の詳細については、以下のリンク先をご覧ください。

- [ポートフォリオのポータル・ページ](#)
- [TI Design](#)
- [mmWave ホワイト・ペーパー概要](#)



TIの設計情報およびリソースに関する重要な注意事項

Texas Instruments Incorporated ("TI")の技術、アプリケーションその他設計に関する助言、サービスまたは情報は、TI製品を組み込んだアプリケーションを開発する設計者に役立つことを目的として提供するものです。これにはリファレンス設計や、評価モジュールに関する資料が含まれますが、これらに限られません。以下、これらを総称して「TIリソース」と呼びます。いかなる方法であっても、TIリソースのいずれかをダウンロード、アクセス、または使用した場合、お客様(個人、または会社を代表している場合にはお客様の会社)は、これらのリソースをここに記載された目的にのみ使用し、この注意事項の条項に従うことに合意したものとします。

TIによるTIリソースの提供は、TI製品に対する該当の発行済み保証事項または免責事項を拡張またはいかなる形でも変更するものではなく、これらのTIリソースを提供することによって、TIにはいかなる追加義務も責任も発生しないものとします。TIは、自社のTIリソースに訂正、拡張、改良、およびその他の変更を加える権利を留保します。

お客様は、自らのアプリケーションの設計において、ご自身が独自に分析、評価、判断を行う責任がお客様にあり、お客様のアプリケーション(および、お客様のアプリケーションに使用されるすべてのTI製品)の安全性、および該当するすべての規制、法、その他適用される要件への遵守を保証するすべての責任をお客様のみが負うことを理解し、合意するものとします。お客様は、自身のアプリケーションに関して、(1) 故障による危険な結果を予測し、(2) 障害とその結果を監視し、および、(3) 損害を引き起こす障害の可能性を減らし、適切な対策を行う目的で、安全策を開発し実装するために必要な、すべての技術を保持していることを表明するものとします。お客様は、TI製品を含むアプリケーションを使用または配布する前に、それらのアプリケーション、およびアプリケーションに使用されているTI製品の機能性を完全にテストすることに合意するものとします。TIは、特定のTIリソース用に発行されたドキュメントで明示的に記載されているもの以外のテストを実行していません。

お客様は、個別のTIリソースにつき、当該TIリソースに記載されているTI製品を含むアプリケーションの開発に関連する目的でのみ、使用、コピー、変更することが許可されています。明示的または黙示的を問わず、禁反言の法理その他どのような理由でも、他のTIの知的所有権に対するその他のライセンスは付与されません。また、TIまたは他のいかなる第三者のテクノロジーまたは知的所有権についても、いかなるライセンスも付与されるものではありません。付与されないものには、TI製品またはサービスが使用される組み合わせ、機械、プロセスに関連する特許権、著作権、回路配置利用権、その他の知的所有権が含まれますが、これらに限られません。第三者の製品やサービスに関する、またはそれらを参照する情報は、そのような製品またはサービスを利用するライセンスを構成するものではなく、それらに対する保証または推奨を意味するものでもありません。TIリソースを使用するため、第三者の特許または他の知的所有権に基づく第三者からのライセンス、あるいはTIの特許または他の知的所有権に基づくTIからのライセンスが必要な場合があります。

TIのリソースは、それに含まれるあらゆる欠陥も含めて、「現状のまま」提供されます。TIは、TIリソースまたはその仕様に関して、明示的か暗黙的にかかわらず、他のいかなる保証または表明も行いません。これには、正確性または完全性、権原、続発性の障害に関する保証、および商品性、特定目的への適合性、第三者の知的所有権の非侵害に対する黙示的保証が含まれますが、これらに限られません。

TIは、いかなる苦情に対しても、お客様への弁済または補償を行う義務はなく、行わないものとします。これには、任意の製品の組み合わせに関連する、またはそれらに基づく侵害の請求も含まれますが、これらに限られず、またその事実についてTIリソースまたは他の場所に記載されているか否かを問わないものとします。いかなる場合も、TIリソースまたはその使用に関連して、またはそれらにより発生した、実際の、直接的、特別、付随的、間接的、懲罰的、偶発的、または、結果的な損害について、そのような損害の可能性についてTIが知らされていたかどうかにかかわらず、TIは責任を負わないものとします。

お客様は、この注意事項の条件および条項に従わなかったために発生した、いかなる損害、コスト、損失、責任からも、TIおよびその代表者を完全に免責するものとします。

この注意事項はTIリソースに適用されます。特定の種類の資料、TI製品、およびサービスの使用および購入については、追加条項が適用されます。これには、半導体製品(<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、評価モジュール、およびサンプル(<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>)についてのTIの標準条項が含まれますが、これらに限られません。