

多様な近接センシング・ アプリケーション向けの AWR1443 シングルチップ・レーダ



Karthik Ramasubramanian
Radar Systems Manager

Jasbir Singh
SoC Architect

テキサス・インスツルメンツ

要約

AWR1443ミリ波センサは、高集積の76 ~ 81GHzレーダ・デバイスであり、車載用近接センシングに適したシングルチップ・レーダ・ソリューションです。

AWR1443 デバイスは、3個のトランスミッタと4個のレシーバを有するミリ波無線周波数 (RF) とアナログ・ベースバンド・シグナル・チェーン、さらに、お客様によるプログラミングが可能なマイコンと、レーダ信号処理用のハードウェア・アクセラレータを搭載しています。代表的な車載用アプリケーションとして、ドア/トランク・オープナのような近接センシング・アプリケーション、最低地上高の測定、車内アプリケーションなどを挙げることができます。

このホワイト・ペーパーでは、このデバイスの上位レベルのアーキテクチャと特長を取り扱い、さまざまなチャープ構成の例と想定されるアプリケーションについて説明します。

概要

車載用の各種アプリケーションにおけるレーダ・テクノロジーの採用例は、最近数年の間に大幅に増加してきました。代表的なアプリケーションとして挙げられるのは、ブラインド・スポット検出 (BSD)、フロント/リア・クロス・トラフィック・アラート (F/RCTA)、自律的な緊急ブレーキ (AEB)、アダプティブ・クルーズ・コントロール (ACC) です。これらのアプリケーション以外を考慮すると、近接センシングやエントリ・レベルのレーダ機能が関係する新しい使用事例で、レーダは有望なテクノロジーです。たとえば、ドア/トランク・オープナ、最低地上高の測定、車内アプリケーションのような各種アプリケーションは、かなり近接した状況 (たとえば、20m 以内) で高精度の距離測定を必要とします。

レーダ・テクノロジーの利点として、ほこり、泥、雪、霧、その他の環境条件に対する堅牢性を挙げることができます。周囲光が存在しない暗闇でも動作することができます。また、超音波テクノロジーと比較しても、レーダはより拡大された距離に対応し (最短距離と最長距離の両方)、バンパーの内側に設置しても機能するほか、物体の速度と角度も高精度で測定することができます。比較対象となる狭帯域の24GHzレーダとは異なり、76 ~ 81GHzを使用するレーダにはいくつかの利点があります。4GHzの広い帯域幅が利用できるため、高い距離分解能と高精度を実現しているほか、高いRF周波数を使用しているためセンサ・サイズが小型化し、短い波長を使用しているため良好な速度分解能を確保できます。

レーダ・デバイスの要件は、レーダ・データ・キューブと処理能力の観点で言うと、さまざまなアプリケーションごとに異なります。このホワイト・ペーパーは、AWR1443mmWaveセンサを、近接センシングとエントリ・レベルのレーダ・アプリケーションに適した76 ~ 81GHzのシングルチップ・レーダ・ソリューションとして紹介します。また、関連機能、上位レベルのアーキテクチャ、想定される使用事例も示します。

AWR1443レーダ・センサは、3個のトランスミッタと4個のレシーバに対応するmmWave無線周波数 (RF) とアナログ・ベースバンド・シグナル・チェーン全体、さらに、お客様によるプログラミングが可能なマイコン (MCU) と、レーダ信号処理用のハードウェア・アクセラレータを搭載しています。このデバイスの活用方法は、メモリ、MIPS表記の処理性能、アプリケーション・コード・サイズに関する要件を控えめに抑えたアプリケーションに適したシングルチップ・レーダとして採用することです。

AWR1642やAWR1243の各センサと、TDA3xプロセッサのようなテキサス・インスツルメンツの他のデバイスは、プログラマブルなデジタル・シグナル・プロセッサ (DSP) を通じて高いレベルの性能とフレキシビリティを実現するので、短距離、中距離、長距離の標準的な車載用レーダ・アプリケーションに適用できます。

AWR1443レーダ・センサは、3つの送信チェーンと4つの受信チェーン、200MHz動作のユーザ・プログラマブル ARM® Cortex® - R4Fプロセッサ、およびレーダ・ハードウェア・アクセラレータを搭載しています。図1に示すように、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個の主要なサブシステムで形成されています。

RF/アナログ・サブシステムは、RF回路とシンセサイザ、パワー・アンプ(PA)、低ノイズ・アンプ(LNA)、ミキサ、中間周波数(IF)アンプ、A/Dコンバータ(ADC)のアナログ回路を実装しています。このサブシステムは、水晶発振器と複数の温度センサも実装しています。

3つの送信チャンネルのうち2つは、必要に応じてビーム・フォーミング送信の目的で同時に動作させることができます。一方、4つの受信チャンネルすべては、同時に動作させることができます。このデバイスは、広いRF帯域幅をサポートし、76～77GHzと77～81GHzの各バンドを網羅しています。

無線プロセッサ・サブシステムは、デジタル・フロント・エンド、ランプ・ジェネレータ、内部プロセッサを実装しています。内部プロセッサは、マスタ・サブシステムから受信した、適切に定義されたAPI(アプリケーション・プログラミング・インターフェイス)メッセージに基づいて、RF/アナログとランプ・ジェネレータ用の低レベル・レジスタを制御および構成します。[この無線プロセッサはTIによってプログラムされており、RFキャリブレーションのニーズを満たすほか、いくつかの内蔵セルフ・テスト(BIST) / 監視機能を持つことに注目してください。このプロセッサは、お客様の意図する用途で直接的に使用することはできません。デジタル・フロント・エンドは、デルタ・シグマADCの未処理の出力のフィルタリングとデシメーションを実行し、プログラマブルなサンプリング・レートで、最終的なADCデータ・サンプルを提供します。

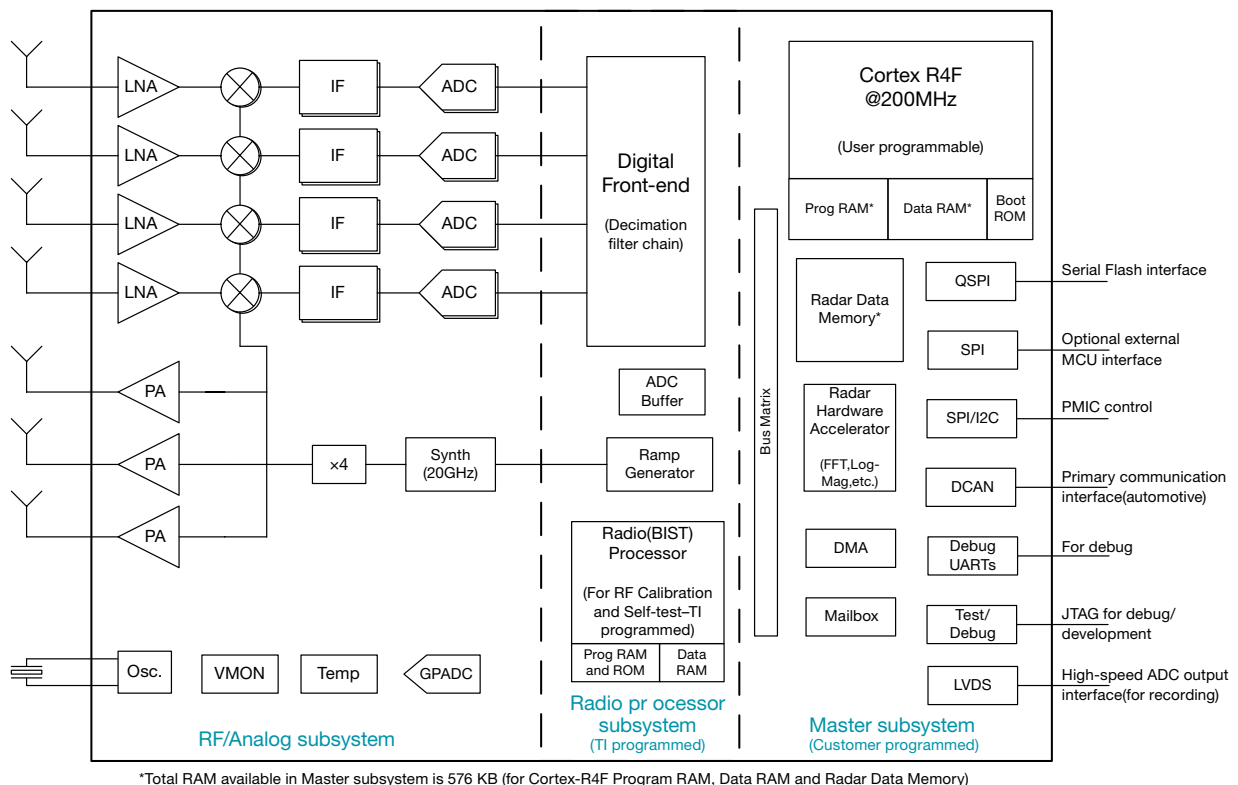


図1 : AWR1443レーダの上位レベル・アーキテクチャ

マスタ・サブシステムは、200MHzのクロックで動作する車載グレードのARM Cortex-R4Fプロセッサを実装しており、お客様がプログラムすることができます。このプロセッサは、デバイスの全体的な動作を制御し、(レーダ・ハードウェア・アクセラレータの支援を受けて) レーダ信号処理を実装するほか、適切に定義されたAPIメッセージを通じてレーダの送受信動作を構成します。このメッセージは、メールボックス・インターフェイス経由で、無線プロセッサに書き込まれます。

近接センシングとエントリ・レベルのアプリケーション向けに、AWR1443デバイスは自律的なシングルチップ・レーダ・センサとして機能することもできます。このデバイスは、クワッド・シリアル・ペリフェラル・インターフェイス(QSPI)を実装しており、お客様のコードをシリアル・フラッシュから直接ダウンロードすることができます。実装している(従来型の)CANインターフェイスは、デバイスからCANバスへの直接の通信を行います。I²C/シリアル・ペリフェラル・インターフェイス(SPI)は、AWR1443ミリ波センサを自律的なセンサとして使用する場合に、電源IC(PMIC)の制御目的で使用できます。

より複雑なアプリケーションの場合、このデバイスは低コストの外部マイコンの制御下で動作することができます。外部マイコンは、SPI インターフェイス経由で、デバイスとの通信、デバイスへのコマンド発行、さらにコードのダウンロードを実行できます。この場合、AWR1443デバイスをレーダ・センサとして使用し、検出した物体に関する未加工のデータを外部マイコンに提供することもできます。外部マイコンは、(モーター制御のような)追加機能を提供し、AWR1443デバイス内で処理するアプリケーション・コード(Automotive Open Systems Architecture [AUTOSAR]やセキュリティ機能など)の複雑さを緩和することができます。この構成により、AWR1443デバイス内部でレーダ・キューブ・データに使用できるメモリが多くなるほか、個別のシリアル・フラッシュをAWR1443デバイスに接続する必要もなくなります。さらに、レーダ・センサがCPU(中央演算装置)に接続できるように、必要に応じて、外部マイコンはCAN FD(CAN flexible data rate) やイーサネットのような、より高速なインターフェイスを提供することができます。

マスタ・サブシステムで利用できる合計メモリは、576KBで、このメモリは、R4FプログラムRAM、R4FデータRAM、レーダ・データ・メモリに区分されています。

R4Fで使用可能な最大サイズは448KBであり、このサイズは、R4Fに緊密に結合されたメモリ・インターフェイスであるTCMA(320KB)とTCMB(128KB)の間で区分されています。

最小128KBから始まる残りのメモリは、レーダ・データ・キューブを蓄積する目的で、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の増分単位で増やすこともでき、この場合、R4FのプログラムRAMまたはデータRAMのサイズが、同じ量だけ減ることが代償になります。実現可能なレーダ・データ・メモリの最大サイズは、384KBです。表1に、いくつかの構成の例を示します。

Option	R4F program RAM	R4F data RAM	Radar data memory
1	320 KB	128 KB	128 KB
2	256 KB	128 KB	192 KB
3	256 KB	64 KB	256 KB
4	128 KB	64 KB	384 KB

表1: メモリ構成の例

マスタ・サブシステムも、レーダ・ハードウェア・アクセラレータを搭載しており、高速フーリエ変換(FFT)や対数振幅など使用頻度の高いレーダ信号処理に関してR4Fを支援します。このモジュールを検討してみましょう。

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・モジュールにより、FMCW(周波数変調連続波)レーダ信号処理で、使用頻度の高い特定の計算をR4Fプロセッサからオフロードすることができます。FMCWレーダ信号処理は、FFTと対数振幅の計算を包含するもので、レーダの画像を取得して、距離、速度、角度の数値を求めることがその目的です。

FMCW レーダ信号処理で使用頻度の高い関数のいくつかはレーダ・ハードウェア・アクセラレータで実行されるのに対し、クラスタ化や物体追跡に関連する独自アルゴリズムはR4F プロセッサ内で実行されます。

レーダ・ハードウェア・アクセラレータの主な特長は、以下の通りです。

- 高速FFTの計算は、サイズがプログラマブル (2のべき乗) で、最大1,024ポイントの複素FFT。
- 内部FFTでビット幅は24ビット (IとQのそれぞれが該当) しており、信号対量子化ノイズ比 (SQNR) 性能が良好であるほか、ユーザのフレキシビリティを高めるために、基数2の段ごとにフル・プログラマブルなバタフライ・スケール化が利用可能。
- 簡潔なFFT前処理用の内蔵機能：プログラマブル・ウィンドウ化、基本的な2相位相変調 (BPM) の除去、干渉のゼロ出力。
- 振幅 (絶対値) と対数振幅の計算機能。

- フレキシブルなデータ・フローとデータ・サンプルの調整機能により、効率的な多次元FFT演算と、必要に応じた転置アクセス。
- チェーン化とループ化のメカニズムは、メイン・プロセッサからの干渉を最小限に抑えて、一連のアクセラレータ演算をシーケンス化。
- CFAR-CA (Constant False Alarm Rate - Cell Averaging、一定の誤警報レート - セル平均化) 検出機能は、線形モードと対数モードをサポート。
- その他の各種機能：FFTスティッチ、低速離散フーリエ変換 (DFT)、複素ベクトル乗算機能。

図2に示すレーダ・ハードウェア・アクセラレータは、それぞれが16KBである4個のメモリによって形成されており、これらのメモリはメイン・アクセラレータ・エンジンに対する入力データの送信と、出力データの取り出しを行います。

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」と呼ばれており、前のセクションで説明した、合計576KBのRAMに属さない個別のメモリです。

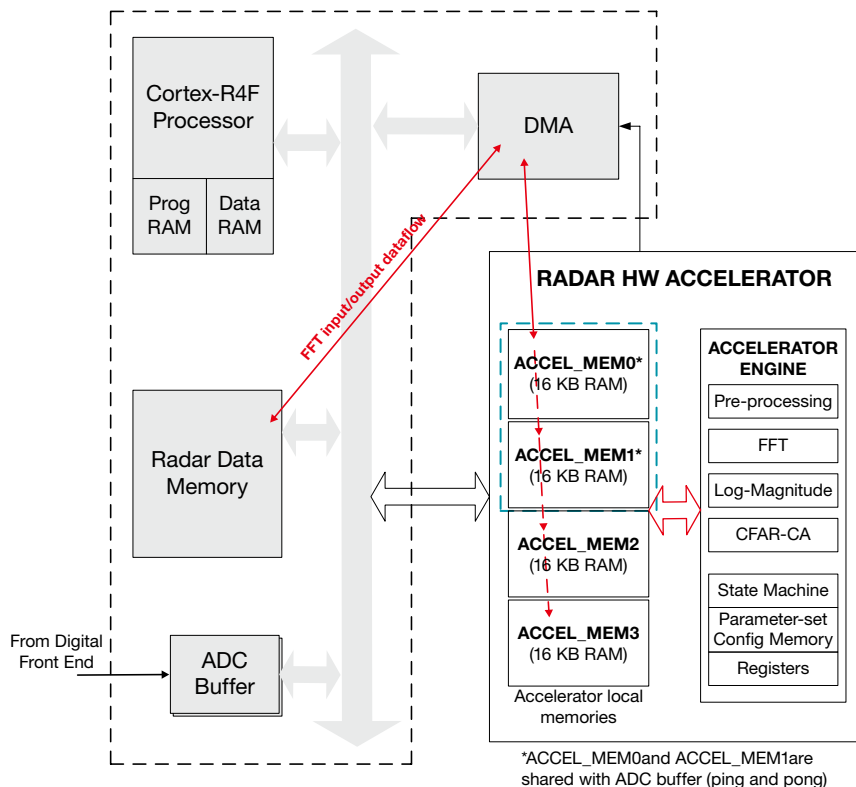


図2：レーダ・ハードウェア・アクセラレータ

一般的なデータ・フローとして、DMA (Direct Memory Access) モジュールが(FFT入力サンプルのような) サンプルをレーダ・ハードウェア・アクセラレータのローカル・メモリに書き込み、メイン・アクセラレータ・エンジンがそのサンプルにアクセスし、処理します。アクセラレータの処理が完了した後、DMAモジュールはこれらのローカル・メモリから出力サンプルを読み取り、それらをレーダ・データ・メモリまたはR4FデータRAMに格納して、R4Fプロセッサによるそれ以降の処理を任せます。図2で、赤い矢印が示しているのは、レーダ・データ・メモリと、FFTや他の処理ステップで使用するローカル・メモリの間の双方向のデータ移動です。

レーダ・ハードウェア・アクセラレータの内部に4つの16KBメモリを個別に用意した目的は、「ピンポン」メカニズムによる交互形式で入力と出力を行い、DMAによる書き込み（または読み取り）動作が、アクセラレータのメイン計算処理と並列で実行できるようにすることです。4つのメモリが存在するので、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・アクセラレータは、良好な性能を実現するとともに、ユーザのフレキシビリティを高めて、さまざまな計算動作を実装できるようにしています。動作を構成するには、次のような2種類のレジスタを使用します。「パラメータ設定」(parameter sets) レジスタと、静的(共通) (static (common)) レジスタです。パラメータ設定レジスタの目的は、アクセラレータ動作のシーケンス全体を事前プログラム（そのシーケンスで使用する適切なソース・メモリ・アドレスとターゲット・メモリ・アドレスや、他の構成を指定する方法）できるようにすることです。この結果、アクセラレータは、R4Fプロセッサからの介入を最小限に抑えて、それらの処理を実行することができます。ステート・マシンはアクセラレータに内蔵されており、一度に1つのパラメータ・セットの構成をロードし事前プログラムされた動作をシーケンス処理する役割を果たします。したがって、R4Fプロセッサに対して頻繁に割り込みを行う必要が低下します。

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、安定状態のFFTスループットとして200MSPSが実現できることを意図しています。つまり、初期の待ち時間が完了した後、クロック・サイクルごとに、1つのFFTが入力を行い、もう1つのFFTが出力を行います。詳細なユーザ・ガイドは、アクセラレータの能力と、使用法の詳細情報を掲載しています。

AWR1443 デバイスの使用事例

すでに説明したように、AWR1443デバイスは近接センシングとエントリ・レベルのアプリケーション向けに、シングルチップ・レーダ・センサとして機能します。その動作方法を説明します。

表2に、AWR1443デバイスを使用して、近接センシングまたは超音波をアップグレードする例を示します。この例では、2つのチャープ構成を使用し、フレームに変更を加えて、一方が近距離(最大4.5m)で非常に高い分解能、もう一方が最大距離(最大16m)で通常の分解能の検出を行います。

近接センシング・アプリケーションの場合、77～81GHzの広いバンドを使用して、最大4GHzの掃引帯域幅が利用できるので、高い距離分解能を実現できます。

近接センシング / 超音波のアップグレードの例

(フレームに変更を加えて、近距離と最大距離のそれぞれに対応する異なったチャープ構成を使用)

Sweep bandwidth	3.75 GHz	500 MHz
Range resolution	4 cm ← High resolution	30 cm ← Normal resolution
Maximum unambiguous range	4.5 cm ← Near range	16 m ← Full range
Ramp slope	100 MHz/μs	25 MHz/μs
Chirp duration	37.5 μs valid (+120 μs inter-chirp)	20 μs valid (+15 μs inter-chirp)
Number of chirps	64	128
Maximum unambiguous relative velocity	±22 kmph	±100 kmph
Maximum beat frequency	3.0 MHz	2.66 MHz
ADC sampling rate (I, Q)	3.33 MSPS (complex)	3 MSPS (complex)
Frame time	64 × 157.5 μs = 10 ms	128 × 35 μs = 4.5 ms
Range FFT size	128 (complex)	64 (complex)
Radar data memory	128 × 64 × 4 RX × 4 Bytes = 128 KB	64 × 128 × 4 RX × 4 Bytes = 128 KB

表2：超音波アップグレード用のチャープ構成の例

超音波センサに比べて、このような高い距離分解能は、最小距離の測定能力が向上することを意味します。

AWR1443デバイスで3つの送信チャンネル (TX) と4つの受信チャンネル (RX) が利用できることも、推定能力の向上につながります。特に、(表2に示した水平スキャンに加えて) 追加のチャープやフレームを送信すると、1つまたは複数のTXチャンネルを使用して、スキャン能力を向上させることができます。

表2に示した例は、128KBから始まる最小構成のレーダ・データ・メモリを使用しています。すでに説明したように、レーダ・データ・メモリを64KB単位で増やし、最大384KBにすることができます。その目的は、高性能化 (距離の延長、距離分解能の向上、最大速度の引き上げ、速度分解能の向上など) であり、R4F用のプログラム・メモリがそれに相対して減少します。

まとめ

車載アプリケーションでレーダの使用は急激に成長しています。短距離、中距離、長距離に関する従来の使用事例を上回る、新しいアプリケーションが新規に登場しています。AWR1443デバイスを採用すると、車載分野で新規に発生している近接センシング・アプリケーションで、レーダ・テクノロジーの優れた性能を活用できます。想定されるアプリケーションとして、ドア保護、最低地上高の測定、車内の乗員検出を挙げることができます。世界全体で車載用レーダを対象として77～81GHzのバンドに対して策定される今後の規制に対応するために、将来のレーダ・センサは非常に近接した位置でセンシングを行う場合に、非常に高い距離分解能と精度を実現できるようにすることが想定されます。シングルチップ・ソリューションである [AWR1443](#) ミリ波センサは、そのようなアプリケーションに最適であり、小型フォーム・ファクタとコスト効率に優れた方法で、レーダ・ベースの近接センサを実現することができます。

関連資料

- ホワイト・ペーパー [「ミリ波センサの基礎」](#)



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/sampterms.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。