

Technical White Paper

人工衛星のペイロードをセンシングするための革新的な半導体が、 私たちの世界をよりよく理解するのにどのように役立つか



Jason Clark

概要

1950年代の宇宙開発競争の始まり以来、科学者たちは地球の環境を監視し測定するための機器を設計してきました。1958年、アメリカ初の人工衛星エクスプローラー 1号が地球周辺の宇宙空間にある放射線帯を測定し、この放射線帯は後に実験を設計した科学者にちなんでヴァン・アレン帯と名付けられました。この打ち上げとヴァン・アレン帯の発見は、今日も続く地球の衛星監視の時代を始める一助となりました。技術の進歩に伴い、気象パターンの測定、汚染物質の濃度、氷床の厚さ、作物収量など、人工衛星のセンサ機能は劇的に向上しています。

このホワイト・ペーパーでは、レーダーや光学画像処理のために搭載されたさまざまなペイロード機器と、革新的な半導体を使用してそれらの機器を構築する方法について説明します。

目次

1 人工衛星のセンサ技術.....	2
2 人工衛星用アクティブ センシング ペイロード.....	2
3 人工衛星用パッシブ センシング システム.....	5
4 まとめ.....	6

図の一覧

図 2-1. ターゲットの平滑面に反射する電波.....	2
図 2-2. 電波のダブル バウンス.....	3
図 2-3. レーダー画像処理ペイロードのブロック図.....	4
図 2-4. レーザー画像処理のブロック図.....	5
図 3-1. 衛星のパッシブ センシング システムに適した光学画像処理ペイロードのブロック図.....	5

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 人工衛星のセンサ技術

人工衛星が測定に使用するセンシング ペイロード（「センシング機器」とも呼びます）の種類は、次の 2 つのカテゴリに分類できます。

- アクティブ センサは、カメラのフラッシュを使用するのと同様に、光または電磁波の形で独自の照明を生成します。2025 年に [NASA とインド宇宙研究機関 \(NISAR\) の共同ミッション](#) で打ち上げられた人工衛星に搭載された合成開口レーダ (SAR) は、アクティブ センサの一例です。
- パッシブ センサは、太陽光がある屋外で画像を撮影するのに似て、他の光源からの照明を検出します。パッシブ センサの一例として、欧州宇宙機関 (ESA) の Sentinel-2 ミッションで使用されているマルチスペクトル イメージャがあります。

2 人工衛星用アクティブ センシング ペイロード

合成開口レーダー (SAR) は、人工衛星で使われる一般的なアクティブ センシング ペイロードの一種です。他のレーダーシステムと同様、SAR はアンテナから電波のパルスまたは周波数チャープを放射します。これらの電波はターゲットまで伝搬され、その後、同じアンテナから受信できるように反射されます。この移動が発生するまでの時間を測定することで、ターゲットまでの距離を決定することができます。しかし、衛星は地上のターゲットに対して角度をつけて飛ぶので (図 2-1 を参照)、反射エネルギーの量はターゲットの平滑性と角度によって決まります。

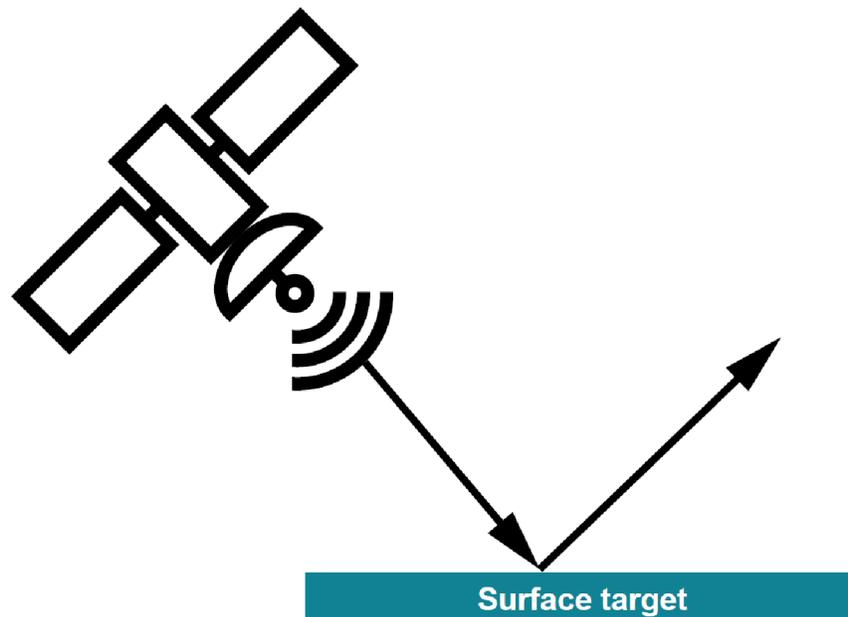


図 2-1. ターゲットの平滑面に反射する電波

たとえば、滑らかな水は、レーダー センシングに使用されるすべての電波を受信機 (アンテナ) から遠ざかる方向に反射します。反射エネルギーの量はグレイ スケール画像で表示されます。画像の白い領域は高反射を示し、暗い領域は低反射を示します。

電波は、複数の物体に反射する場合があります。たとえば、最初に水、次に木に反射します。これはダブル バウンスと呼ばれます。ダブル バウンスでは、図 2-2 にあるように、滑らかな水面が SAR 画像では暗くなく明るく見えることがあります。これは、電波が最初に水面に反射し、次に木に反射するためです。

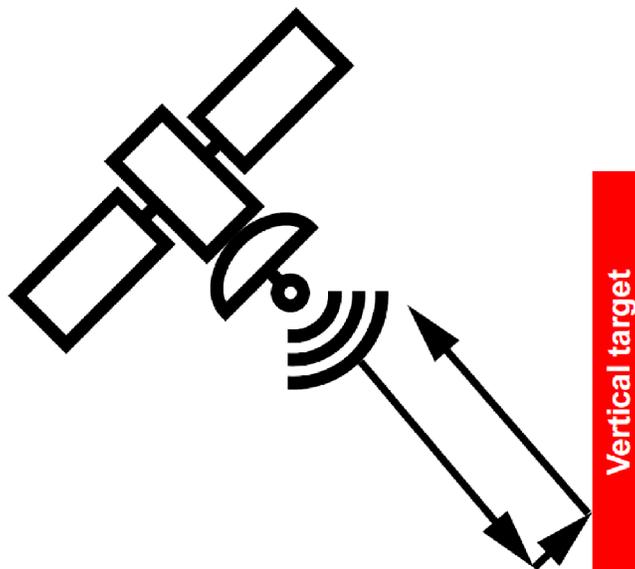


図 2-2. 電波のダブル バウンス

レーダーの周波数は、観測できるものに大きな影響を与える重要な特性です。電波は、波の波長よりも大きい物体にのみ反射します。

電波反射の性質により、雲や地面の植生を通してレーダーを観測できます。超低周波レーダーは、光学イメージングでは検出できない水分レベルや特徴を決定するために土壌を貫通することさえできます。

このレーダーのもう 1 つの特長が開口サイズです。レーダーの有効サイズは、レーダー ビームが地面をスキャンするときのスポット サイズに反比例します。スポット サイズはレーダーの方位分解能と呼ばれ、衛星が互いに近接している 2 つの物体を区別する能力を指します。レーダーが大きいほど、地表上のスポット サイズが小さくなり、方位分解能がより良好になります。残念ながら、サイズと重量を考慮すると、非常に大きいレーダーを宇宙に打ち上げようとするのは実用的ではありません。ただし、システム設計者はコンピュータ処理を使用して、レーダーを物理サイズより大きく見せることができます。この方法は、衛星がターゲットに対して動いているという事実を利用し、レーダーのスポット サイズにおける複数のオーバーラップ パルスの反射を利用して開口部を合成します。

衛星に SAR 装置を実装するには、非常に特化した無線周波数 (RF) コンポーネントが必要です。図 3 に、衛星に SAR を実装するためのレーダー画像処理ペイロードの標準的なブロック図を示します。

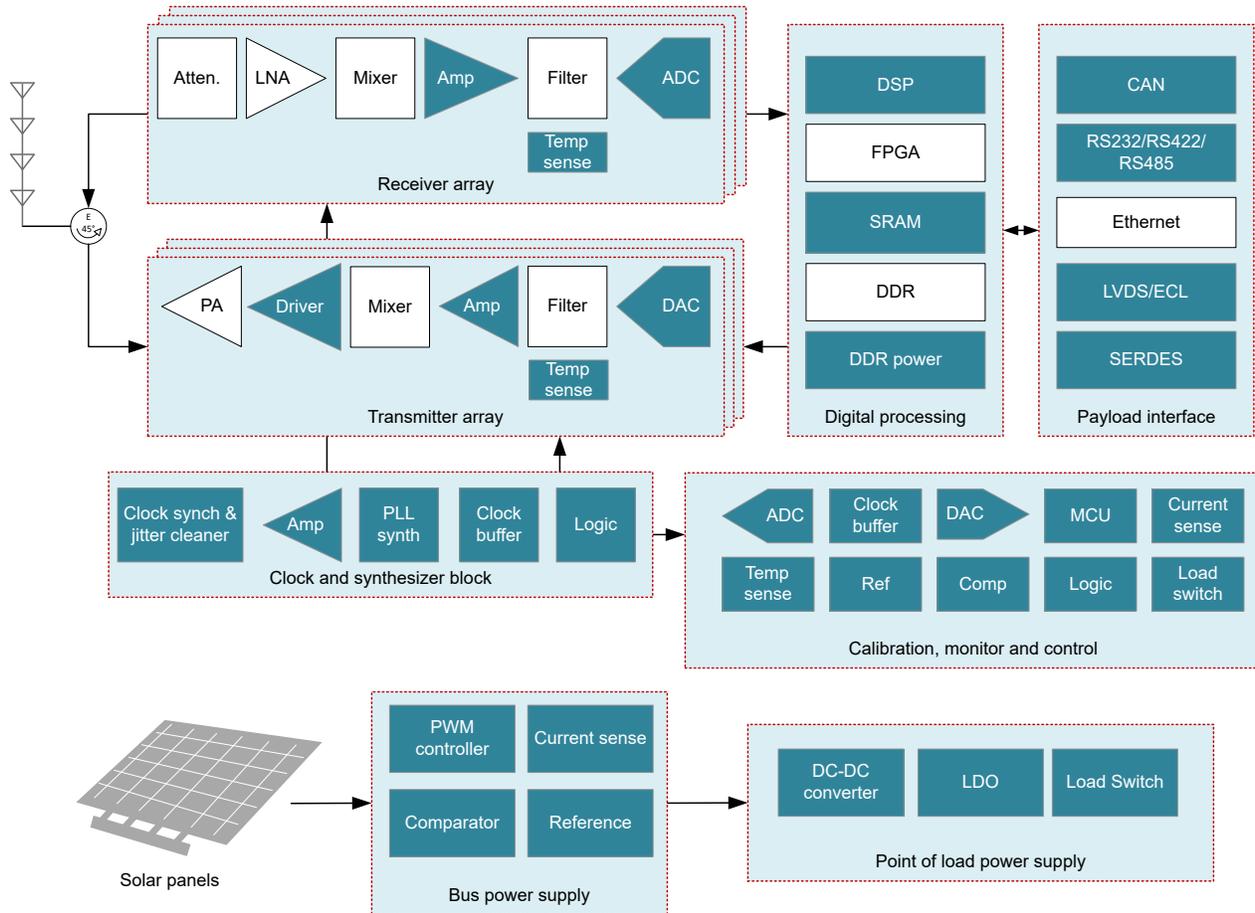


図 2-3. レーダー画像処理ペイロードのブロック図

レーダー画像処理ペイロード内の高速データコンバータは、レーダーの性能とアーキテクチャの決定に役立ちます。たとえば、RF サンプリングのデータコンバータは、レーダー周波数帯域を処理のためにデジタル情報に直接変換することができます。これらのデータコンバータにとって最も重要な要件は次のとおりです。

- アナログ入力帯域幅が、最大入力周波数を上回っている。
- サンプリングレートが、レーダー信号の瞬時帯域幅の 2 倍より大きい。
- 関心のある周波数でシステムの性能要件を満たすのに役立つ、高い信号雑音比 (SNR) とスプリアスフリーダイナミックレンジ。
- ミッションのニーズを満たす耐放射線特性。

たとえば、AFE7950-SP RF サンプリングトランシーバには、以下の機能があります。

- L バンドから X バンドまでの RF サンプリングをサポートする 10.6GHz、-3dB アナログ入力帯域幅。
- 6 個の 3GSPS A/D コンバータ (ADC) と 4 個の 12GSPS D/A コンバータ (DAC)。最大瞬間帯域幅が 1.2GHz であるため、距離分解能が向上し、アンチジャミング技術を実装できます。
- 155dBc/Hz よりも優れたノイズスペクトル密度と、5GHz の入力周波数による IMD3 (3 次相互変調歪み) > 76dBc の実現により、高いレーザ感度を可能にします。
- 100krad/75MeV とのピン互換性を確保し、LEO (地球低軌道) と LEO (静止軌道) の間での使用を可能にします。

別のタイプのアクティブセンサは、レーダーからの電磁波ではなく照射用光源としてレーザーを使用しますが、距離を測定するために時間を使用するという同じ原理が適用されます。しかし、レーザーは非常に高い周波数で、短い波長で動作しており、これは地上の雲や他の物体を貫通できないため、明確な条件が必要です。レーザーシステムは、アンテナの代わりにフォトダイオードを使用して、ターゲットから反射されたレーザー光を受信し、測定します。図 2-4 に、この種のシステムのブロック図を示します。

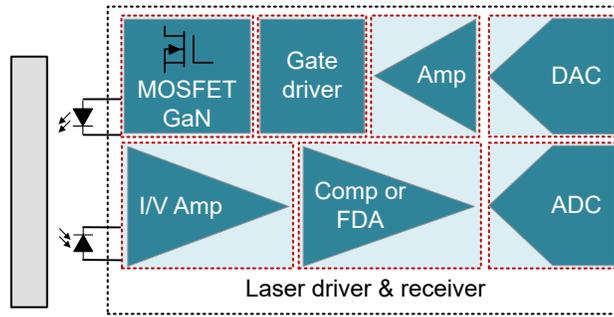


図 2-4. レーザー画像処理のブロック図

図 2-4 に示すように、フォトダイオード センサ アレイの後にトランスインピーダンス アンプが接続されており、その電流出力を、データ コンバータがサンプリング可能な電圧に変換します。この場合、データ コンバータは、反射された光パルスの立ち上がりエッジと波形をサンプリングできる十分な速度を必要とします。これらの速度は、レーザーの立ち上がり時間とパルス反復率によって異なります。

3 人工衛星用パッシブ センシング システム

最初に、最も一般的なパッシブ センシング システムはカメラです。携帯電話に搭載されているカメラと同様、CMOS (相補型金属酸化膜半導体) または CCD (電荷結合素子) を使用して、ターゲットに反射された光の光子を、太陽などの光源によってキャプチャします。センサの各ピクセルがキャプチャした光子は、ADC 経由でデジタル情報に変換され、システムのプロセッサによって処理されて、宇宙から地球の画像を形成します。

これらの画像を使用すると、気象パターン、氷床の範囲、自然災害の影響を見ることができます。ただし、画像の品質は、センサの解像度 (ピクセル数)、センサのダイナミックレンジ (ピクセルが保持できる光子数)、およびその情報をデジタル形式に変換する精度によって決まります。図 3-1 は、衛星にパッシブ センシング を実装するための光学画像処理ペイロードの代表的なブロック図です。

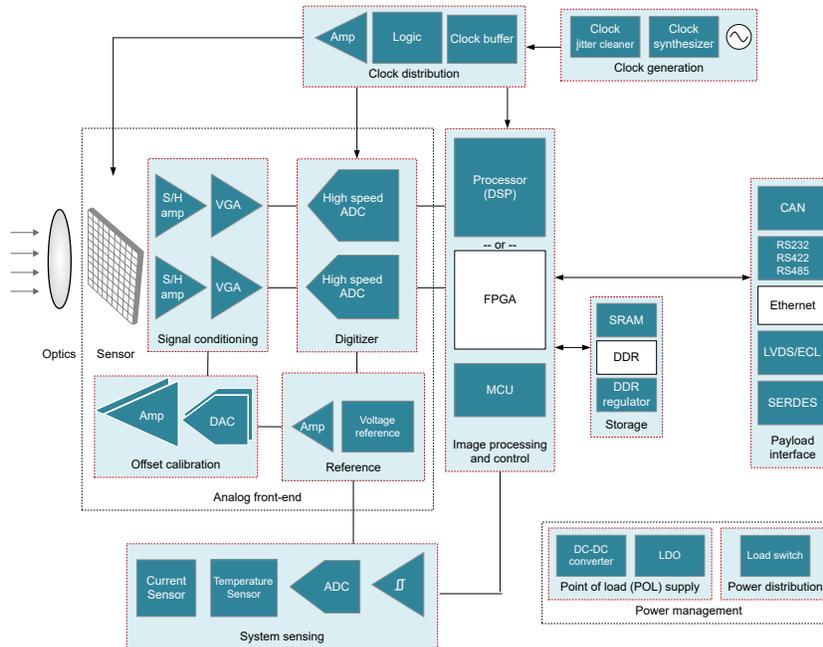


図 3-1. 衛星のパッシブ センシング システムに適した光学画像処理ペイロードのブロック図。

一部のイメージ センサはデータ コンバータを内蔵していますが、他のイメージ センサは以下の機能を実現する **ADC3683-SP** など外部データ コンバータの性能に依存します。

- デュアル チャネル、18 ビットの分解能で最大 65MSPS を達成すると、イメージ センサのダイナミック レンジを最大で抽出できます。
- ノイズ スペクトル密度は -160dBFS/Hz で、クリーンな画像に対して高い信号対雑音比を実現します。
- 消費電力は 100mW 未満 で、センサのノイズに影響を及ぼす可能性のある電子機器からの発熱を低減します。
- 100krad/75MeV (-SP バージョン) と 30krad/43MeV (-SEP バージョン) により、LEO から GEO までのあらゆる宇宙軌道で使用できます。
- 11mm x 11mm セラミック クワッド フラット パック (-SP バージョン)

可視光には精通していますが、赤外線や紫外線など、人間の目には見えない光の波長がたくさんあります。

あらゆる光のスペクトルからの写真を見ることによって、科学者は大気中の汚染物質の量、作物収量の変化、地質学的な形成、植生密度、水分などの詳細を測定することができます。これらの詳細が時間とともにどのように変化するかを探ることで、科学者は遠くの過去に何が起こったのかを予測するだけでなく、将来何が起こる可能性があるのかを推定することができます。

目に見えない光を測定するには、次の 3 つの方法があります。

- シングル バンド イメージングでは、電磁スペクトルのうち 1 つの帯域を測定します。たとえば、赤外線センサは温度変化を測定するために赤外線放射を検出します。
- マルチスペクトル イメージングでは、複数の帯域の画像を組み合わせて、単一の帯域では見えない植生密度などの現象を検知します。マルチスペクトル センサは、3 つ以上の粗いスペクトル帯域を測定します。
- ハイパースペクトル イメージングでは、特定の光の帯における非常に狭いスライスから画像をキャプチャします。ハイパースペクトル センサは、数百もの狭い帯域を測定して、マルチスペクトル イメージングの粗い帯域では見られない特徴を識別できます。

これらの画像処理システムはいずれも、測定する光の特定の帯域に敏感なセンサ IC に依存しています。可視光や近赤外線スペクトルには CMOS センサや CCD センサを使用することもできますが、それより長い波長の光には適用できません。インジウムガリウムヒ素検出器は 900nm から 2500nm までの波長を測定でき、近赤外線スペクトルで見するのに適しています。

イメージ センサの前に配置されるプリズムまたは回折格子により、光は個別の帯域に分離されます。y 次元のセンサの各ピクセルは、1 つのバンドを検出します。結果として得られる 2 次元画像には、直線上の各ポイントのスペクトル情報がすべて含まれています。その結果、個々のピクセルのスペクトル構成を調べて、鉱物、植生、汚染などの物事のパターンや特徴を探せるようになります。

ただし、センサは画像を生成するために必要な部品の 1 つにすぎません。センサの出力をコンディショニングし、高速 ADC によりデジタル化した後、表示可能な形式で処理する必要もあります。上述のイメージ センサの場合と同様に、ADC の性能は画像の品質に不可欠であり、最良の結果を得るには、センサのダイナミック レンジと一致している必要があります。加えて、センサ出力やデータ コンバータに付加的なノイズを追加しないように、シグナル コンディショニング、クロック供給、電源の各部品を注意深く選択することが重要です。TPS7H1111-SP RF 低ドロップアウトレギュレータのような低ノイズコンポーネントでは、システム内のノイズをできるだけ少なく抑えることができます。

4 まとめ

これらのセンシング技法はすべて、科学コミュニティに貴重なデータを提供し、地球の過去、現在、および潜在的な将来についてより的確に理解するのに役立ちます。人工衛星のセンシング ペイロードと、それらに必要なコンポーネント (半導体など) の精度が向上するにつれて、私たちはより詳細な測定と、身の回りの世界の未来について、より正確な予測を行えるようになるでしょう。

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