参考資料

Technical White Paper

TI AFE8030 で、D2D、IoT、そしてその先に向けた次世代衛星接続を実現

Jenny Yu, Ben Uhing, Bhavesh Rathod

概要

衛星 D2D (ダイレクト・トゥ・デバイス) と IoT (モノのインターネット) 接続の急速な成長により、柔軟でコンパクトかつ電力効率に優れた衛星ペイロード無線に対する需要が高まっています。スマートフォンや低消費電力の IoT デバイスとの直接通信をサポートするには、厳しいリンク バジェット、多様なスペクトル要件、大型フェーズド アレイ アンテナにおけるサイズ、重量、電力、信頼性に関する厳しい制約など、特有の RF 設計上の課題が伴います。

このホワイトペーパーでは、衛星 D2D/IoT サービス リンクにおける主要な RF 設計上の検討事項を探り、テキサス インスツルメンツの AFE8030 (高集積、低消費電力、オクタル チャネル直接 RF サンプリング トランシーバー) がこれらの課題にどのように対処するかを示します。主な機能として、マルチ バンドの同時動作、高速周波数ホッピング、柔軟な JESD204 インターフェイス、マルチ デバイス同期、簡素化したアンテナ キャリブレーション、動的な省電力機能について説明します。これらの機能を組み合わせることで、D2D、IoT、そしてそれ以降の次世代衛星通信向けに、拡張性、ソフトウェアによる構成可能性、そして電力効率に優れた無線アーキテクチャを実現できます。

目次

1 概要 2
2 命名規則 3
3 衛星 D2D/IoT サービス リンクにおける無線設計上の課題 3
3.1 スペクトルと RF の柔軟性 3
3.2 大型フェーズド アレイ アンテナ 3
3.3 SWaP と空間的な信頼性 4
4 TI AFE8030 4
5 TI AFE8030 を使用した D2D/IoT 通信ペイロード無線の設計 4
5.1 AFE8030 のデュアル DUC とデュアル DDC チェーンによるマルチ バンド サポート 4
5.2 RF サンプリングによる高速周波数ホッピングと周波数アジリティ 6
5.3 柔軟な SerDes および JESD 構成 7
5.4 アンテナ キャリブレーション 9
5.5 マルチ デバイス同期 10
5.6 ソフトウェア エコシステム 12
5.7 放射線耐性 12
6 D2D/IoT の枠を超えて：より広範な衛星通信アプリケーション 12
7 まとめ 13
8 参考資料 14

商標

Linux® is a registered trademark of Linus Torvalds.
すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 概要

衛星通信は、地上の携帯電話ネットワークと非地上ネットワーク (NTN) の融合によって、新たな成長段階に入っています。従来型の衛星サービスは、主に独自の技術と専用端末に依存していましたが、大規模な低軌道 (LEO) 衛星群の出現、打ち上げコストの削減、ソフトウェア定義のペイロード、電子制御アンテナの出現により、かつてない規模で衛星接続を可能にしています。

市場で最も重要な動向の 1 つは、衛星 D2D (ダイレクト・トゥ・デバイス) と IoT (モノのインターネット) 接続が急速に普及していることです。2020 年に従来型の携帯電話への衛星直接接続が実証されて以来、衛星 D2D/IoT 技術は急速に商用展開に向けて進歩しており、2030 年までに大幅な市場拡大が見込まれています。3GPP NTN の標準化により、衛星通信がセルラー エコシステムに取り込まれつつあり、また、宇宙からの補完的カバレッジ (SCS) などの規制枠組みによって、衛星がセルラー スペクトルを使用して地上モバイル ネットワークを補完することが可能になっています。これらの開発は、従来型のモバイル衛星サービス (MSS) スペクトルと組み合わせることで、特殊な衛星端末を必要とせずに、地方、遠隔地、使用率の低い地域でスマートフォンや低消費電力 IoT デバイスへの直接接続を拡張する機会を生み出します。

このような市場動向も衛星無線技術を再形成しています。図 1-1 に示されているように、衛星通信システムには通常、サービス リンク、フィーダ リンク、衛星間リンクの 3 種類のリンクが含まれます。ユーザーは、ユーザー端末 (専用端末、携帯電話、IoT 機器) を衛星に接続するサービス リンクを介して、衛星サービス (テキスト、音声、ブロードバンド インターネット) を受信します。地上局 (ゲートウェイ) は、衛星ネットワークに出入りするすべてのユーザー トラフィックの主要な集約ポイントとして機能し、フィーダ リンクを介して衛星を接続し、ゲートウェイはバックエンドのデータ ネットワークとインターフェイスします。サービスの目的が異なるため、サービス リンクとフィーダ リンクの無線設計は異なる場合があります。

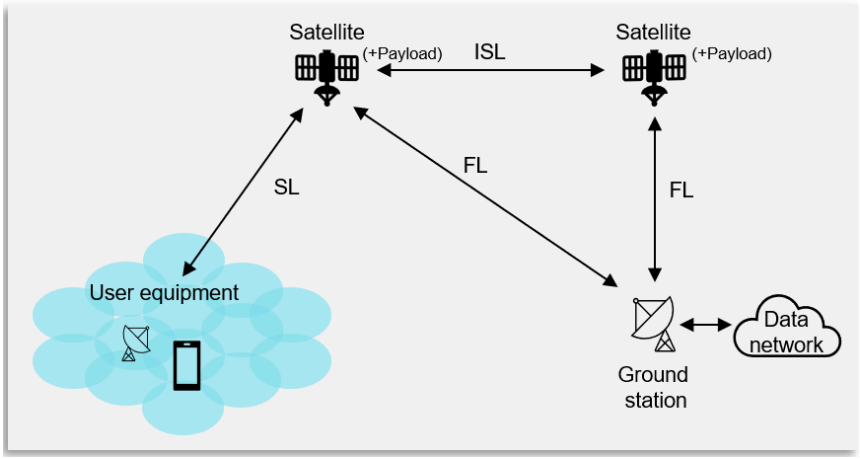


図 1-1. 衛星通信システムの概要

このホワイトペーパーでは、D2D/IoT 衛星通信ペイロード設計が直面する課題について詳細に説明します。また、TI AFE8030 により、D2D/IoT サービス リンク向けの低消費電力、コンパクト、多用途、高性能 Satcom ペイロード無線設計をどのように実現できるかを示します。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 命名規則

3GPP	第 3 世代パートナーシップ プロジェクト
D2D	ダイレクト・トゥ・デバイス
DSA	デジタル ステップ アッテネータ
DDC	デジタル ダウン コンバータ
DUC	デジタル アップ コンバータ
FL	フィーダ リンク
ISL	衛星間リンク
IoT	インターネット関係
LEO	低軌道
MSS	モバイル衛星サービス
NCO	数値制御発振器
NTN	非地上ネットワーク
SCS	宇宙からの補完的カバレッジ
SL	サービス リンク
TT&C	テレメトリ、追跡、コマンド

3 衛星 D2D/IoT サービス リンクにおける無線設計上の課題

衛星 D2D と IoT サービスは、無線設計に特有の課題をもたらします。指向性アンテナを備えた専用端末を使用する従来型の衛星サービスとは異なり、D2D/IoT システムはスマートフォンやコンパクトな低消費電力 IoT デバイスと直接通信します。これらのデバイスは、送信電力が制限されており、小型の低ゲイン アンテナも搭載しているほか、衛星は数百キロまたは数千キロも離れていることがあります。ペイロードのサイズ、重量、電力 (SWaP) を最小限に抑えつつ、この困難なリンク バジェットを達成することは、衛星 RF アーキテクチャに大きな要求が課されます。

3.1 スペクトルと RF の柔軟性

D2D および IoT サービス リンクは通常、L バンドおよび S バンドの MSS スペクトルなどの低い周波数で動作し、SCS に使用される sub-3GHz の地上波セルラー スペクトルで動作します。これらの低周波数は、小型で低ゲインのユーザー デバイスと通信する際に良好な伝搬特性を提供します。

個々の D2D/IoT キャリアは、通常、数メガヘルツから数十メガヘルツの帯域幅しかありません。したがって、RF の主な課題は、超広帯域の瞬時帯域幅ではなく、複数の周波数帯域、オペレータ、および地理的地域をサポートできることです。衛星が地球上を移動するにつれて、LEO 衛星群の増加に伴い、広い周波数範囲、高速な周波数ホッピング、およびスペクトルの柔軟性を備えた高度に構成可能な RF アーキテクチャがますます重要になってきています。

この要件には、**直接 RF サンプリング アーキテクチャ**が最適です。従来型のゼロ IF アーキテクチャとは異なり、直接 RF サンプリング アーキテクチャによって柔軟なマルチ バンド動作と高速な周波数再構成が実現すると同時に、I/Q のミスマッチ、局部発振器のリーク、DC オフセット キャリブレーションを排除できます。この柔軟性により、共通のペイロード ハードウェア プラットフォームが、ソフトウェア構成により、さまざまな周波数帯域と動作シナリオをサポートできます。

3.2 大型フェーズド アレイ アンテナ

スマートフォンや IoT デバイスは伝搬距離が長く、アンテナ ゲインが限られているため、リンク バジェットが困難です。大型フェーズド アレイ アンテナとビームフォーミング技術を組み合わせると、リンク マージンを回復するために必要な高い指向性ゲインを実現すると同時に、地理的範囲とスペクトルの再利用のために複数のステアリング可能なスポット ビームを生成することができます。

また、大規模なアレイには、多くの RF チャネルが必要です。**チャネル密度が高い RF トランシーバ**は、部品点数、基板面積、ペイロードの重量を大幅に低減できます。数百個または数千個のアンテナ素子にまたがる小規模な省電力も増加するため、チャネルあたりの消費電力も同様に重要になります。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3.3 SWaP と空間的な信頼性

SWaP の最適化は、電力供給が限られている衛星ペイロードにとって特に重要であり、ペイロードの質量と体積は宇宙船の設計と打ち上げコストに直接影響を与えます。RF 集積度の向上とデバイス レベルでの消費電力の低減は、ペイロード サイズの小型化と消費電力の低減につながります。動的な省電力モードなどのシステム レベルの手法を使用すると、全体的な効率をさらに向上させることができます。

最後に、ペイロードの電子機器は、物理的なメンテナンスなしに、ミッション全体を通して確実に動作しなければなりません。ミッションの寿命や軌道に応じて、信頼性、電力、重量、コストの間で必要なバランスを達成するために、設計では異なるレベルの耐放射線性やシステム冗長性を用いることができます。

4 TI AFE8030

上記のような設計上の課題が相まって、統合型 RF トランシーバは、広い周波数範囲とスペクトル アジリティ、高いチャネル密度、低消費電力、そして空間的な信頼性を備えた直接 RF サンプリングへと向かっています。**TI AFE8030 は、オクタル チャネル、直接 RF サンプリング方式、低消費電力、高度な構成が可能な RF トランシーバであり、これらの設計上の課題に対応し、サービス リンク向けの柔軟性と電力効率の高い小型の衛星 D2D/IoT ペイロード無線を実現する上で最適な製品です。**以下のセクションでは、AFE8030 を D2D/IoT 通信ペイロード無線設計に使用する際の複数のエンジニアリング トピックについて詳しく説明します。

- マルチ バンド サポート
- 高速周波数ホッピングと周波数アジリティ
- SerDes および JESD 構成
- アンテナ キャリブレーション
- マルチ デバイス同期
- 省電力
- ソフトウェア エコシステム

5 TI AFE8030 を使用した D2D/IoT 通信ペイロード無線の設計

5.1 AFE8030 のデュアル DUC とデュアル DDC チェーンによるマルチ バンド サポート

D2D と IoT に対応する LEO 衛星ペイロードは、複数の周波数帯域で同時に動作する能力から大きな恩恵を受けることができます。従来型のディスクリート RF アーキテクチャでは、マルチ バンド動作でミキサ、発振器、データ コンバータなど、シグナル チェーンのかなりの部分を複製しなければならない場合があります。一方、AFE8030 の直接 RF サンプリング アーキテクチャは、周波数変換、帯域の組み合わせ、分離をデジタル形式で実行するため、マルチ バンドの実装を簡素化できます。

AFE8030 は、トランシーバ チャネルごとにデュアル デジタル アップ コンバータ (DUC) とデジタル ダウン コンバータ (DDC) チェーンを搭載しており、それぞれが専用の数値制御発振器 (NCO) を使用して独立して動作します (図 5-1 および 図 5-2 を参照)。したがって、単一の AFE8030 は、追加のミキサや発振器のオーバーヘッドなしで、2 つの送信帯域を同時にアップ コンバートし、2 つの受信帯域をダウン コンバートすることができます。

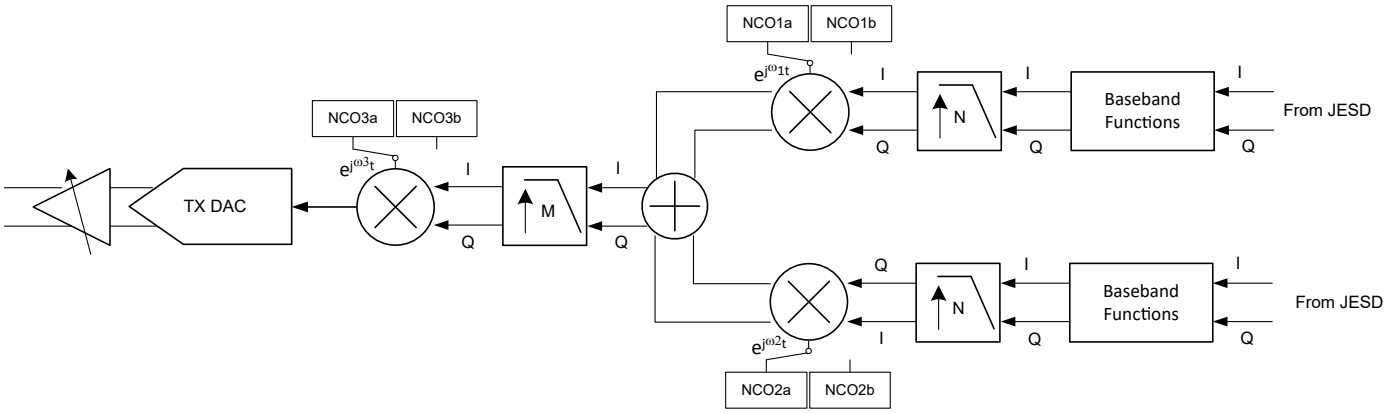


図 5-1. AFE8030 デジタル アップ コンバータ (DUC) のブロック図

English Document: STDA043
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

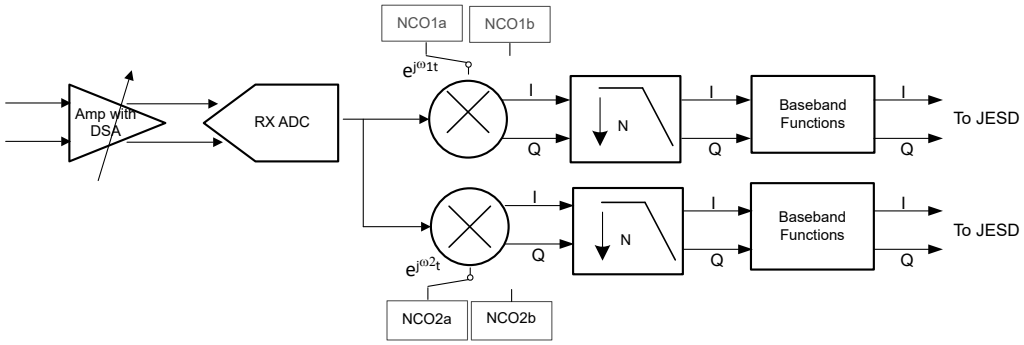


図 5-2. AFE8030 デジタル ダウン コンバータ (DDC) のブロック図

衛星 D2D アプリケーションの代表的な例として、L バンドと S バンドの同時カバレッジが挙げられます。DAC サンプリング周波数が 6GSPS、ADC サンプリング レートが 3GSPS の場合、AFE8030 は同じナイキスト ゾーン内で L バンドと S バンドの下半分に対応できます。AFE8030 は、デュアル DUC モードとデュアル DDC モードに構成できます。デュアル DUC モードでは、2 つの独立した DUC チェーンでそれぞれの周波数帯域を処理して、それらを 1 つのトランスミッタ出力に結合できます。デュアル DDC モードでは、シングル レシーバは 1 つの ADC を介して両方の帯域をデジタル化でき、2 つの独立した DDC チェーンはデジタル ドメインで 2 つの周波数帯域を分離できます。さらに、AFE8030 の 8 つのトランスミッタおよび 8 つのレシーバ チェーンはそれぞれ、独立した NCO 周波数を使用して構成できるため、マルチバンド動作とスペクトルの割り当てに柔軟性が得られます。

D2D 波形と IoT 波形の帯域幅は比較的狭いため、各 DUC および DDC チェーンで利用可能な帯域幅内に簡単に収まり、デジタル制御 NCO により中心周波数を柔軟に選択できます。また、各 DUC および DDC チェーンには 2 つの独立した NCO があるため、AFE8030 を使用すると各帯域内の複数の中心周波数間で高速にスイッチングできます。

AFE8030 を組み合わせることで、単一の RF トランシーバを使用してマルチ バンド範囲を同時に実現し、デバイスのデジタル ドメインで周波数変換と帯域の組み合わせ / 分離を維持できます。従来型のアーキテクチャに比べて、このアプローチは部品数とハードウェアの複雑さを大幅に低減します。図 5-3 に、トランスミッタの出力スペクトラムの例を示します。AFE8030 の 1 つのトランスミッタ チェーンが、デュアル DUC モードと同時に L バンドと S バンドの両方の信号を送信します。

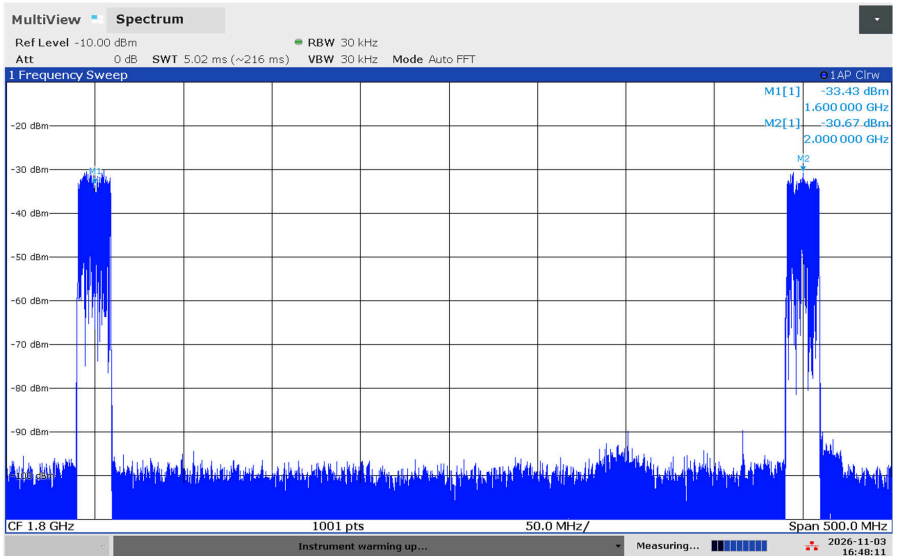


図 5-3. デュアル バンド (L + S) TX 出力スペクトル

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

デュアル DUC モードとデュアル DDC モードのあらゆる利点を享受できる一方で、同時マルチ バンド運用には、綿密な RF 周波数計画とフィルタリングが必要となります。マルチ バンド構成では、DAC と ADC は複数のバンドにまたがる合成スペクトルを処理するため、設計者は不要な相互変調成分が帯域内に入らないように周波数計画を慎重に行い、帯域外のバンド間変調成分を十分に除去できるようにフィルタ配置を慎重に設計する必要があります。レシーバ側では、AFE8030 のデジタル デシメーション フィルタは、デジタル帯域分離後に約 85dB 以上の帯域外除去を実現できます。

もう 1 つの重要な検討事項は、システムの電力効率です。デュアル DUC 動作によりトランシーバ アーキテクチャが簡素化されますが、複数の帯域をカバーする広帯域パワー アンプは、個別帯域用に最適化された狭帯域アンプよりは効率が低くなります。したがって、設計者は、意図した特定の使用事例に基づいて、RF 統合、フィルタリングの複雑さ、パワー アンプの効率、システム全体の消費電力に関するトレードオフの評価を行う必要があります。

5.2 RF サンプリングによる高速周波数ホッピングと周波数アジリティ

高速周波数ホッピングと周波数アジリティは、衛星 D2D (ダイレクト・トゥ・デバイス) 通信にとって重要な機能です。複数の地理的領域にサービスを提供する衛星は、複数の周波数チャネルや帯域をサポートしなければならない場合があります。周波数アジリティにより、衛星はスペクトルの利用可能性、規制の制約、干渉条件に基づいて周波数帯域またはチャネルを切り替えることができます。

AFE8030 の直接 RF サンプリング アーキテクチャは、これらの要件に対応するのに最適です。AFE8030 の周波数変換は NCO を使用してデジタル形式で実行されるため、アナログ局部発振器の再チューニングを必要とせずに迅速な周波数再構成が可能になるためです。

AFE8030 では、各トランスミッタ / レシーバ パスは最大 2 つの DUC/DDC チェーンをサポートし、デジタル ミキサごとに個別に構成可能な 2 つの NCO を搭載しています。このデバイスは、位相連続動作を維持しながら、2 つの NCO を切り替えることができ、SPI コマンドまたは専用 GPIO 信号のいずれかでスイッチングを制御できます。

NCO ベースの周波数ホッピングは、数百ナノ秒ほどのセトリング タイムを達成できます。合計ホッピング時間には、SPI コマンドまたは GPIO トリガに関連するレイテンシと、無効なサンプルをフラッシュするために必要なデジタル シグナル チェーン遷移が含まれます。

図 5-4 に示されているように、AFE8030 では、GPIO トリガを使用して 2 つの NCO 周波数を切り替える場合、約 215ns のトランスミッタ周波数ホッピング時間を示しています。

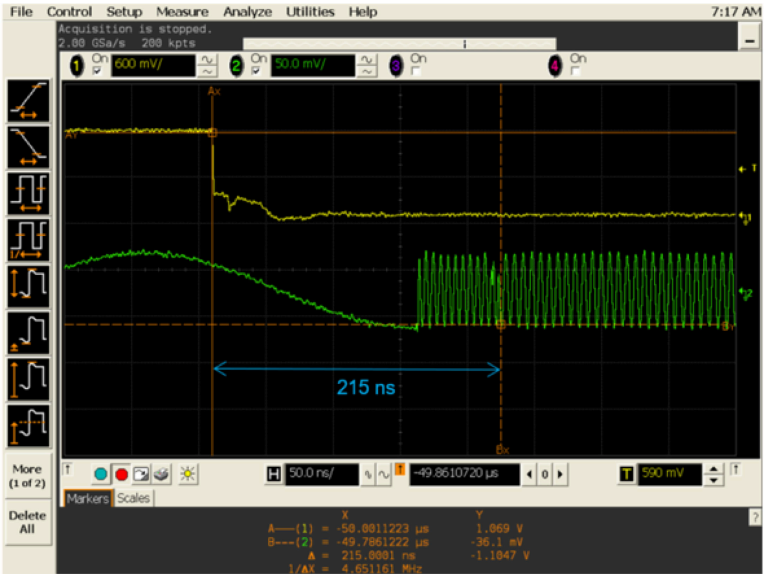


図 5-4. AFE8030 での高速周波数ホッピングの設定時間

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

図 5-5 に、高速周波数ホッピングによる位相連続性を示します。ここで、RX チャネル B は NCO 周波数を NCO1 に設定したリファレンス チャネルで、RX チャネル A の NCO 周波数は NCO1 から NCO2 に切り替わり、その後 NCO1 に戻ります。図に示されているように、両方の RX チャネルの初期位相は一致しており、RX チャネル A の NCO 位相は、NCO1 から NCO2、そして再び NCO1 へと周波数がホッピングされた後も、RX チャネル B と一致したままです。

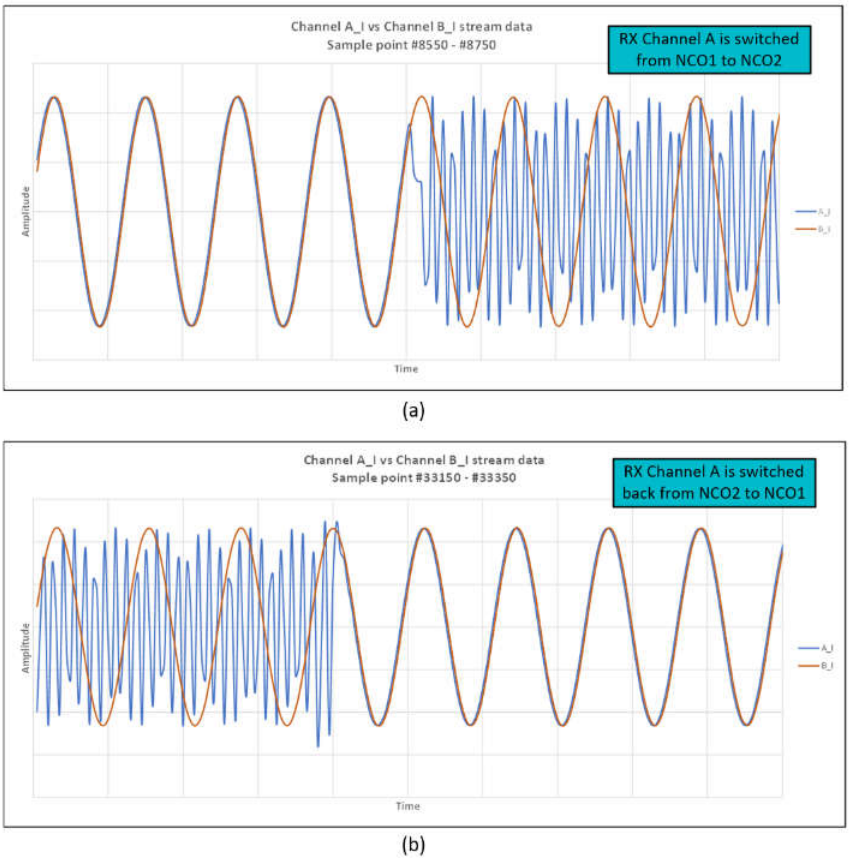


図 5-5. AFE8030 高速周波数ホッピングによる位相連続性

AFE8030 では、高速周波数ホッピング機能に加えて、各 NCO の周波数と位相を個別にプログラムでき、ドップラー偏移による周波数オフセットの補償や、デジタル ビームのデジタル位相制御のためにも利用できます。

AFE8030 は、高速な周波数切り替え、独立した NCO 構成、デジタル制御の周波数および位相調整を組み合わせており、衛星 D2D/IoT ネットワークの動的な動作条件に適応できる周波数アジャイルな無線アーキテクチャを実現します。

5.3 柔軟な SerDes および JESD 構成

AFE8030 は、高度に構成可能な高速 JESD インターフェイスを搭載しており、ペイロード設計者は、ミッション要件に応じてデジタル スループット、消費電力、基板レベルの接続性を最適化できます。

AFE8030 は 2 つの独立した SerDes マクロを内蔵しています。各マクロには、4 つの送信レーンと 4 つの受信レーンが含まれており、合計 8 つの高速シリアル トランシーバが搭載されています。各レーンは、3 つの構成可能な速度モードをサポートしています。

- フル レート モード:19Gbps ～ 32.5Gbps
- ハーフ レート モード:9.5Gbps ～ 16.25Gbps
- クォーター レート モード:4.75Gbps ～ 8.12Gbps

これらの構成可能な動作モードにより、設計者はアクティブな RF チャネルの数と必要な信号帯域幅に基づいて、合計データ スループットと SerDes の消費電力とのバランスを取ることができます。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

内蔵の SerDes マルチプレクサにより、論理 JESD データ ストリームからの物理レーン割り当てが分離されるため、コンバータの JESD データ ストリームと SerDes レーン間で柔軟なマッピングが可能です。この柔軟性は、衛星ペイロードで特に有益です。基板レベルの配線の制約、システム パーティショニング、冗長性の要件により、デジタル サブシステムを再設計することなく、従来とは異なるレーン間のマッピングが要求される可能性があります。SerDes トランスミッタは、高密度に実装されたペイロード PCB 上の周波数依存の配線損失を補償するために、完全なプログラマブル係数を持つマルチタップ フィードフォワード イコライザ (FFE) を組み込んでいます。一方、レシーバは、連続時間リニア イコライザ (CTLE) と判定帰還イコライザ (DFE) を組み合わせて、困難なチャネル応答に対応し、衛星ペイロード アーキテクチャで一般的なバックプレーンまたは基板間相互接続を介して信頼性の高いリンク動作を実現します。

AFE8030 は、JESD204B と JESD204C の両方の規格をサポートしており、JESD204B 向けに 8b/10b エンコードを、JESD204C 向けにより効率的な 64b/66b エンコードを実行します。データ パッキングは高度に構成可能です。例:

- アクティブ JESD レーン L の数は、1、2、4、8 のいずれかに設定できます
- コンバータ数 M は、1 ～ 16 に設定できます
- フレーム F あたりのオクテット数は、1 ～ 32 の異なる値に設定できます
- JESD サンプル分解能 N' は、12 ビットまたは 16 ビットに設定できます

この柔軟性により、同じ AFE8030 ハードウェア プラットフォームを、狭い高レート リンクで動作する宇宙グレードの FPGA から、より多くの低レート レーンを使用するマルチ デバイス DSP クラスタに至るまで、広い範囲のデジタル処理バックエンドとのインターフェイスを可能にします。SYSREF によるサブクラス 1 のマルチ デバイス同期は完全にサポートされており、クラスタ化されたペイロード配置で複数の AFE8030 デバイス間で決定論的レイテンシと位相コヒーレント整列を実現します。これは、フェーズド アレイ ビームフォーミングおよびマルチ ビーム衛星ペイロードの基本的な要件であり、チャネル間のタイミングをナノ秒未満の精度で制御する必要があります。

5.3.1 D2D アップリンクの JESD 構成の例

多くの場合、衛星 D2D/IoT アプリケーションは、比較的狭帯域波形を使用し、ベースバンド データ レートの低減と消費電力の低減を実現するため、デジタル インターフェイスを最適化できます。通常、1 つのバンドに対して 50MHz 信号帯域幅を受信するには、61.44MSPS のベースバンド データ レートで十分です。

衛星 D2D および IoT ペイロード アプリケーションの場合、61.44MSPS の 12 ビット コンバータのサンプル分解能により、リンク バジェットとダイナミック レンジの要件を満たすのに十分な性能を実現できます。地上インフラで一般的に使用されている 16 ビット JESD サンプル構成と比較して、JESD サンプル解像度を 12 ビットに下げると、ペイロード データ レートが 25% 低下し、SerDes の動作速度の低下、インターフェイスの消費電力の削減、および基板レベルの相互接続の簡素化が可能になります。

シングル バンドの使用事例では、8 つの受信チャネルすべてが 61.44MSPS のシングル バンド モードでアクティブになっている場合、JESD204C のフレーミング構成 LMFS = 1-16-24-1 および N’ = 12 ビットにより、約 12.165Gbps のレーン レートが得られます。これは、AFE8030 のハーフ レート SerDes 動作範囲 (9.5Gbps ～ 16.25Gbps) 内に収まりますが、等価な 16 ビット構成ではレーンあたり約 16.22Gbps が必要であり、SerDes はフル レート モードになり、それに関連する高い PLL 周波数とコア電力が必要です。したがって、SerDes をハーフ レートで動作させることは、単なる利便性のためではなく、衛星ペイロードの熱的に制約のある環境に適した意図的な電力削減戦略です。

ペイロードが 2 つの周波数帯域を同時にカバーしなければならないデュアル バンドの使用例では、AFE8030 のデュアル DDC モードは、受信チャネルごとに 2 つの独立した複素 IQ ストリームを生成することで、実効コンバータ数を M = 32 に倍増させます。対応する JESD204C 構成 LMFS = 1-32-48-1 および N’= 12 ビット、バンドあたり 61.44MSPS のベースバンド データ レートにより、レーン レートは約 24.33Gbps となり、これは AFE8030 のフル レート SerDes 範囲 (19Gbps ～ 32.5Gbps) 内に収まります。また、デュアル バンド ペイロード全体を 1 つの物理 SerDes レーンに集中させ、ペイロードのスペクトル容量が 2 倍になっても、下流の FPGA へのコンパクトでピン数の少ないデジタル インターフェイスを維持します。これは、マルチ バンド D2D/IoT アプリケーションにとって非常に効率的なインターフェイス オプションです。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

表 5-1. AFE8030 JESD204C 構成比較

パラメータ	シングル バンド 16 ビット	シングル バンド 12 ビット	デュアル バンド 12 ビット
ベースバンド データ レート	61.44MSPS	61.44MSPS	61.44MSPS
JESD 規格	JESD 204C	JESD 204C	JESD 204C
エンコード	64b/66b	64b/66b	64b/66b
JESD フレーム マッピングのワードあたりのビット数 (N')	16	12	12
JESD レーン数 (L)	1	1	1
コンバータ数 (M)	16	16	32
フレームあたりのオクテット数 (F)	32	24	48
フレームあたりのサンプル数	1	1	1
レーン レート	約 16.22Gbps	約 12.17Gbps	24.33Gbps
SerDes レート モード	フル レート	ハーフ レート	フル レート
レーン レートと 16 ビット ベースラインとの関係	ベースライン	25% 低減	50% 向上、デュアル バンド (2 倍のベースバンド複素 IQ ストリーム) 付き

5.4 アンテナ キャリブレーション

送信チャネルと受信チャネル全体で一貫性のあるビームフォーミング性能を維持するには、高精度のフェーズド アレイ アンテナ キャリブレーションが不可欠です。チャネル間のゲインと位相の変動は、ビームフォーミングの精度低下、アレイのゲイン低減、サイドローブ レベルの上昇をもたらす可能性があります。目的のアンテナ性能を維持するには、これらの影響を較正する必要があります。

従来型のキャリブレーション アーキテクチャでは、個別の送信チャネルと受信チャネルに専用の RF スイッチが必要になることがあり、特に大型アンテナ アレイの場合、部品点数、基板面積、配線の複雑さ、時間の増加につながります。AFE8030 は、TX NCO SWAP、RX NCO SWAP、TX GAIN SWAP、RX GAIN SWAP などの内蔵デジタル機能により、キャリブレーションを簡素化します。これらの機能は、デバイスの C-SDK を使用して、GPIO 信号または SPI コマンドを使用して制御できます。

図 5-6 に示されているように、RX アンテナのキャリブレーション時に、高速 TX NCO SWAP 機能を使用して 1 つの TX チャネルをアップリンク (RX) NCO 周波数にすばやく再構成でき、送信された信号はすべての RX チャネルによって同時に観測され、キャプチャされたデータに基づいて、RX アンテナ キャリブレーション係数が計算されて FPGA に保存されます。このプロセス中、RX DSA 減衰設定も RX GAIN SWAP 機能によって高い値に素早く切り替わるため、キャリブレーション モードでは TX パワー アンプからの出力が高くなるため、RX チェーンが飽和しません。高速 RX NCO SWAP および TX GAIN SWAP 機能を使用して、TX アンテナのキャリブレーションでも同様のプロセスを行うことができます。

このアプローチにより、基板上に追加の回路を発生させずに、アンテナ キャリブレーションの迅速かつ洗練された方法を実現できます。AFE8030 は、これらの内蔵デジタル機能を活用することで、衛星ペイロードの SWaP 制約を満たす合理性とハードウェア効率の高いキャリブレーション アーキテクチャを実現します。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

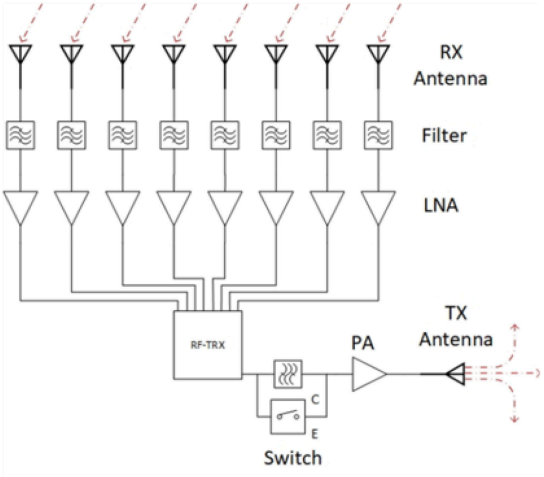


図 5-6. AFE8030 でのアンテナ キャリブレーション

5.5 マルチ デバイス同期

大型フェーズド アレイ アンテナを採用する衛星 D2D/IoT ペイロードには、マルチ デバイスの同期が不可欠です。これらの機器では、高精度のビームフォーミングをサポートするために複数の RF トランシーバがコヒーレントに動作する必要があります。タイミングまたは位相の不一致があると、ビームフォーミングの性能が低下し、リンク マージンとシステム全体の効率が低下する可能性があります。最初の起動、その後の JESD204B および JESD204C リンクの再初期化、パワーオン リセットなど、複数のデバイス間で高精度のタイミングおよび位相整列をシステムのライフサイクル全体にわたって維持する必要があります。

これを実現するには、3 つの重要な同期機能が必要です。

1. SYSREF がラッチされるように位相整列されたデバイス クロック
2. SYSREF ベースのデータ パスの決定論的レイテンシ
3. デバイス間で一貫したデジタル周波数と位相関係を維持するための同期された NCO 動作

最初の機能は、クロック分配デバイスと最適化されたレイアウトに依存し、複数のデバイス間の伝搬遅延の変動を最小限に抑えます。SYSREF 信号は、デバイス クロックのセットアップ時間とホールド時間の要件を満たす必要があります。

AFE8030 は、SYSREF ベースの決定論的レイテンシを実現するため、複数のアプローチをサポートしています。1 つの方法は、シングル ショット SYSREF を使用することです。シングル ショット モードでは、SYSREF 信号は単一のパルスであり、基板上のすべての RF トランシーバに同時に供給されます。すべてのトランシーバがデバイスのクロックに対して全く同じ瞬間に SYSREF を受信すると、位相が同期されます。汎用入出力 (GPIO) ベースの制御を使用して SYSREF ラッチを有効にすることも可能です。このモードでは、SYSREF は連続 sysref モードで動作できます。すべての RF トランシーバは、GPIO ベースのラッチ イネーブル信号を受信した後、最初のデバイス クロックの立ち上がりエッジにラッチされます。以降のパルスはすべて無視されます。このアプローチでは、CMOS GPIO 信号を RF トランシーバにルーティングするだけで済むため、シングル ショット SYSREF 方式に比べて実装が比較的容易です。シングル ショット SYSREF 方式では、長さを揃えた差動信号を基板上の複数の AFE にルーティングすることが困難な場合があるためです。同時に、このアプローチでは、ホストから AFE ごとに 1 つの GPIO を同期する必要があります。ホスト ASIC または FPGA に十分な GPIO がない場合には、これが課題になる可能性があります。

デバイス間で NCO を同期させる場合、位相同期を実現する最も簡単な方法は、トランスミッタとレシーバの NCO を SYSREF 周波数の整数倍にすることです。この方法は、複数のアナログ フロント エンド デバイス間で送受信用の NCO を同期させるための追加メカニズムを必要としないため、シングル ショットと連続 SYSREF モードの両方でうまく機能します。すべてのトランシーバが異なる sysref エッジでラッチされていても、問題はありません。図 5-7 に、このモードでは、すべてのアナログ フロント エンドが異なるシステム sysref エッジにラッチされていても問題ないことを示します。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

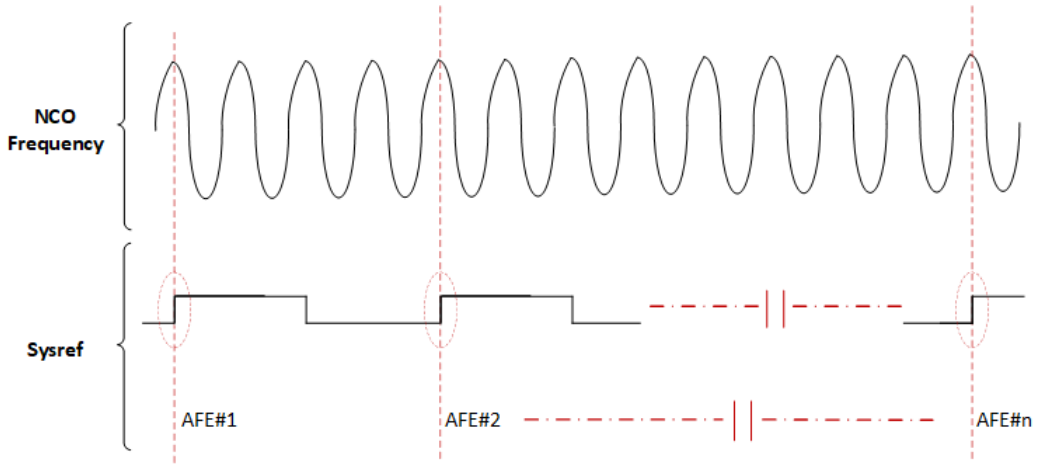


図 5-7. NCO 周波数が Sysref 周波数の 4 倍になることを示す例

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

図 5-8 に、2 つのデバイスの TX 出力間の位相差のヒストグラムを電源サイクルにわたって示します。左側では、NCO 位相が同期されていないため、電源サイクルにわたる位相差はランダムです。右側では、複数のデバイスにわたる NCO 位相が SYSREF ベースのラッチで同期されているため、電源サイクルにわたる位相差は約 1.5 度という狭い偏差内に維持されます。

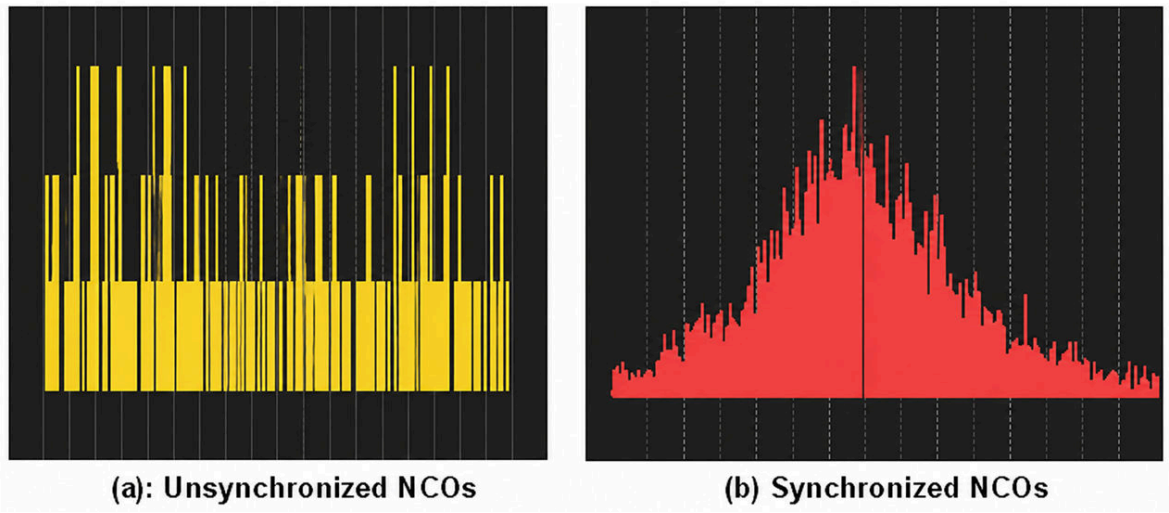


図 5-8. TX 出力の分布、パワー サイクルに 2 つの AFE 間の位相差

5.6 ソフトウェア エコシステム

統合を迅速化し、開発のオーバーヘッドを低減するために、TI は AFE8030 向けに包括的なソフトウェア エコシステムを提供しています。C-SDK (CAPI) を使用することで、AFE8030 のデジタル機能 (NCO 構成、NCO 位相調整、ゲイン設定、アラーム処理、キャリブレーション ルーチンなど) のデバイス初期化と起動後の制御を容易に行うことができ、ソフトウェア エンジニアは低レベルのレジスタ マップを直接操作することなく、デバイスを迅速に起動して微調整できます。システム レベルの統合向けに、TI は PetaLinux などの標準的な組込み Linux® 環境と互換性のある統合型 Linux ドライバを提供しています。そのため、SoC ベースの多様なプラットフォームにシームレスに導入できます。さらに、TI はエコシステムの一部として JESD204B/C IP コアを追加のライセンス コストなしで提供しています。そのため、高速データ コンバータの展開で共通の障壁がなくなり、顧客は市場投入期間を短縮できます。

5.7 放射線耐性

AFE8030 は SnPb 半田ボールを含むパッケージ オプションを提供しています。さらに、AFE8030 の耐放射線特性は、一連の標準化テストを通じて検証済みであり、過酷な環境で信頼性の高い性能を維持しています。宇宙認定バリアントの詳細については、TI にお問い合わせください。

6 D2D/IoT の枠を超えて：より広範な衛星通信アプリケーション

このホワイトペーパーでは、衛星 D2D および IoT サービス リンクに焦点を当てていますが、AFE8030 の高度に統合された柔軟な RF サンプリング アーキテクチャは、より幅広い衛星通信アプリケーションもサポートします。最大 6GHz の周波数範囲と最大 800MHz の瞬時信号帯域幅を備えた AFE8030 は、テレメトリ、追跡、コマンド (TT&C)、地球観測データ ダウンリンク、スペクトル センシング、ブロードバンド通信など、多様な要件に対応できます。Ku バンドや Ka バンドの衛星通信など、より高い RF 周波数で動作するアプリケーションの場合、AFE8030 はスーパーヘテロダイン アーキテクチャの中間周波数 (IF) 段トランシーバとしても機能し、外部の周波数変換段とインターフェイス接続することでシステム レベルの周波数範囲を拡張できます。このホワイトペーパーで説明されている設計手法の多くは、マルチ バンド動作、周波数アジリティ、マルチ デバイス同期、アンテナ キャリブレーション、電力最適化などがあり、これらの多様な衛星アプリケーションにも同じように適用できます。TI AFE8030 は、広い帯域幅、高いチャネル密度、そして柔軟なデジタル信号処理機能といった特長を備えており、多様な衛星アプリケーションに対応する次世代ソフトウェア定義衛星ペイロードのための汎用性の高いビルディング ブロックとなっています。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

7 まとめ

衛星 D2D と IoT 接続は、携帯電話や IoT サービスを従来型のユーザー デバイスに直接拡張することで、衛星通信を変革しています。専用端末に依存する従来型の衛星システムとは異なり、D2D/IoT ペイロードは、多様な周波数割り当て、大型フェーズド アレイ アンテナ、そして厳格なサイズ、重量、電力、信頼性の要件をサポートしながら、厳しいリンク バジェットを克服する必要があります。

TI AFE8030 は、高度に統合された低消費電力の直接 RF サンプリング アーキテクチャによって、これらの課題を解決します。AFE8030 のデュアル DUC/DDC 構成により、マルチ バンド動作を同時に実現できるだけでなく、デジタル制御の NCO により高速な周波数ホッピングとスペクトル アジリティが実現します。高いチャネル密度、柔軟な JESD204B/C 構成、決定論的マルチ デバイス同期、効率的なアンテナ キャリブレーションという特長があるため、スケーラブルなフェーズド アレイ ペイロードをシンプルに実装できます。さらに、アクティブ モード消費電力が低く、構成可能な省電力モードにより、さまざまな交通条件にわたってペイロードの電力効率を最適化できます。

AFE8030 は、RF の柔軟性、高集積、電力効率の高い動作、包括的なソフトウェア エコシステムを組み合わせることで、ソフトウェアで構成可能なコンパクトかつスケーラブルな衛星ペイロード無線アーキテクチャを実現できます。こうした機能により、衛星システムの設計者は、ハードウェアの複雑さを低減し、SWaP を最適化して、進化を続ける次世代の衛星接続に対する要求に迅速に適応することができます。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

8 参考資料

1. テキサス インスツルメンツ、『AFE8030 オクタル チャネル RF トランシーバ』、データシート
2. Jenny Yu、Sanjay Pithadia、『Next-Gen RF Transceivers Deliver Seamless Earth-to-Space Connectivity』、Microwave & RF、2025 年 12 月
3. Bhavesh Rathod、『mMIMO と高精度ビームフォーミング技術による 5G ネットワークの可能性の実現』、テキサス インスツルメンツの Analog Design Journal、2026 年第 2 四半期
4. Kang Hsia、Neeraj Sharma、Dhruvil Solanki、Serkan Tokgoz、Ben Uhing、『パワーダウンをパワーアップ - 5G 無線エネルギー効率に向けた RF システムとトランシーバの革新』、テキサス インスツルメンツのホワイトペーパー、2026 年 10 月
5. Kang Hsia、『JESD204B から JESD204C へのアップグレード時のシステム設計上の検討事項』、テキサス インスツルメンツのアプリケーション レポート、2021 年 4 月
6. Matt Guibord、『JESD204B マルチ デバイス同期：要件の詳細』、テキサス インスツルメンツの Analog Application Journal、2015 年第 2 四半期

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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 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 、 TI の総合的な品質ガイドライン 、 ti.com または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。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。 TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月