

Technical White Paper

AFE7950-SP の衛星通信での使用



Zoe Aboab
Bhavesh Rathod

High Speed Data Converters
Wireless Infrastructure

概要

衛星通信 (SATCOM) システムは電力とサイズの厳格な制約内で、マルチバンドの俊敏性、高スループット、耐放射線特性による信頼性を必要とします。本書では、宇宙環境でも使用できる 4T4R2F RF トランシーバである AFE7950-SP について説明します。この製品には広帯域カバレッジ、高度なデジタル機能、低消費電力動作という特性があります。目標は、システムアーキテクト、ペイロードエンジニア、および設計者が、衛星通信で AFE7950 ができることとできないことを明確に、かつ偏りなく把握できるようにすることです。

本書では特に、リピータ、フェーズドアレイ、マルチバンドシステムなど SATCOM のさまざまな使用事例に対応する柔軟なアーキテクチャを提示すると同時に、主な制限 (帯域幅、周波数ギャップ、電力のトレードオフなど) を要約しており、設計者が AFE7950 を評価し、ミッションのニーズに応じた開発を計画するのに役立ちます。

目次

1 概要.....	2
1.1 最新の衛星通信システムの概要.....	2
1.2 統合型 RF 設計としての AFE7950 のプレゼンテーション.....	2
2 SATCOM アプリケーションにおける AFE7950 の技術的な利点.....	3
2.1 スペクトルの柔軟性と俊敏性.....	3
2.2 SATCOM システム設計の利点.....	4
2.3 放射線耐性.....	5
2.4 消費電力の最適化.....	7
3 まとめ.....	10
4 参考資料.....	10

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 概要

1.1 最新の衛星通信システムの概要

衛星通信 (SATCOM) は、主に遠隔測定、追跡、コマンド (TT&C) に使用される狭帯域の低データレートリンクから、ブロードバンド インターネット、高解像度ビデオ、マシンツーマシンの遠隔測定、IoT 接続のために新たに登場したコンステレーションをサポートする広帯域の高スループット ネットワークへと進化しています。現在の SATCOM ペイロードは、L バンド、S バンド、C バンド、X バンド、Ku バンド、Ka バンド、V バンドの複数の周波数帯域で動作しています。これらの帯域では、高度な変調およびコーディング方式 (QPSK、8PSK、16QAM、LDPC、ACM など) が採用され、アダプティブなビームフォーミングと周波数を再利用する方法が統合されているため、スペクトル効率を最大化することができます。

SATCOM アーキテクチャが必要とされる主な背景は以下のとおりです。

- マルチバンド、マルチモード動作
 - プラットフォームは、位相の整合性を維持しながら帯域間で迅速に切り替えを行い、高速周波数ホッピングをサポートする必要があります
- より高いスループットの需要
 - ユーザー端末とハブステーションがメガビット/秒からマルチギガビット/秒までのリンクのデータレートを必要とする
- 制約の厳しい電力バジェット
 - 衛星ペイロードは、特に SmallSat プラットフォームと CubeSat プラットフォームを使用する場合、利用可能な電力の制約を受ける
- 過酷な環境での堅牢性
 - 放射線、極端な温度、機械的振動に対応するために、高信頼性と耐障害性を備えた部品が必要

これらのドライバを使用すると、高度に統合された低消費電力の広帯域幅オプションを必要とする RF フロントエンドの設計者は、過剰な再設計を行うことなく、さまざまなミッション プロファイルに合わせてプログラムすることができます。

表 1-1. SATCOM 固有の要件

要件	代表的な仕様	SATCOM にとっての重要性
帯域幅	チャンネルあたり 100MHz ~ 2.4GHz (動作モードによって異なる)	キャリア アグリゲーションなどの高次変調およびスループット強化手法をサポート
直線性と評価基板	変調方式によって異なる	高次 QAM および PSK のコンステレーションに不可欠であり、高密度な周波数再利用シナリオでの相互変調を回避するために必要
温度範囲	-40°C ~ +110°C (宇宙環境で使用可能)	打ち上げから軌道上のサーマル サイクリングまで、信頼性の高いパフォーマンスを提供
放射線耐性	総電離線量 (TID) = 100krad (Si)	ミッションの期間全体にわたって機能の劣化を防止
フォームファクタと統合	17mm × 17mm	SmallSat プラットフォームにとって特に重要である基板面積、重量、BOM の複雑さを緩和
プログラマビリティ	RF チューニング、調整可能なゲイン、SPI を使用したデブプレックス制御	1 つのハードウェア設計で複数のバンドと打ち上げ後のミッションの更新をサポート

これらすべての基準を同時に満たすことは簡単ではありません。SATCOM には、高性能なアナログ ブロック、デジタル機能、およびコンパクトな省電力アーキテクチャを組み合わせた無線周波数 (RF) フロント エンドが必要です。

1.2 統合型 RF 設計としての AFE7950 のプレゼンテーション

テキサス インスツルメンツの AFE7950 は、4 つの送信チャンネル、4 つの受信チャンネル、2 つのフィードバック チャンネルを備えた (4T-4R-2F) RF トランシーバで、周波数範囲の広い衛星や航空宇宙のアプリケーション向けに設計されています。このトランシーバの主なアーキテクチャ機能は、表 1-1 に示す SATCOM の要件に適合しています。

- 連続的な周波数範囲をサポートする広帯域のフロント エンドにより、再設計なしで、Ku バンド、Ka バンド、低帯域の衛星ウィンドウ全体での動作が可能
 - トランスミッタ (TX): 600MHz ~ 12GHz
 - レシーバ (RX): 5MHz ~ 12GHz
- RX の入力電力レベルを維持するためにデジタル ステップ アッテネータ (DSA) を制御する、オンチップの自動ゲイン制御 (AGC) ブロック

- パワー アンプ保護 (PAP) や数値制御発振器 (NCO) のホッピングなどのデジタル機能を制御する複数の GPIO
- 消費電力を 1 ワット未満に低減するパワーダウン モードを使用した全二重動作時の標準消費電力は約 7.5 ワット
- 最大 70MeV·cm²/mg のシングル イベント ラッチアップ (SEL) および最大 100krad (Si) の総電離線量 (TID) に対する試験によって放射線耐性保証 (RHA) を検証済み
- 0.8mm ピッチ、17mm × 17mm の BGA パッケージで実装

このような属性によって、AFE7950 は総合的にシングルチップのマルチバンド RF フロント エンドとして機能し、部品表 (BOM) の規模の縮小、基板面積の小型化、開発期間の短縮と同時に、SATCOM ペイロードが必要とする性能エンベロープを実現することができます。

2 SATCOM アプリケーションにおける AFE7950 の技術的な利点

2.1 スペクトルの柔軟性と俊敏性

AFE7950 は、高性能のマルチチャネルトランシーバで、4 つの RF サンプリング デジタル オーディオ コンバータ (DAC) トランスミッタ パス、4 つの RF サンプリング A/D コンバータ (ADC) レシーバ パス、および 2 つの RF サンプリング ADC フィードバック パスが 1 つのダイに統合されています。

各レシーバ (RX) チャネルには、3GSPS の非インターリーブ RF サンプリング ADC に接続されたデジタル ステップ アップ アンプ (DSA) が組み込まれています。各チャネルには、アナログ ピークパワー デテクタと複数のデジタル パワー デテクタ ブロックが搭載されており、外部または内部から自律的に AGC を制御するほか、デバイスの信頼性を確保するための RF 過負荷検出器も搭載されています。ADC 出力は、柔軟性の高いシングルバンドまたはデュアルバンドのデジタル ダウン コンバータ (DDC) に供給され、サンプル レートを目的の帯域まで下げることができます。

フィードバック (FB) チェーンは外部の線形化 DPD エンジンのパワー アンプ (PA) 出力の観測経路としてよく使用されますが、追加のレシーバとしても使用できます。FB ADC は RX ADC と同じです。

各トランスミッタ (TX) チャネルは、12GSPS の RF サンプリング DAC を駆動できるシングルバンドまたはデュアルバンドのデジタル アップコンバータ (DUC) を備えており、その後 DSA ブロックが続きます。

シングルバンド DUC または DDC モードでは、各アップコンバージョン チェーンとダウンコンバージョン チェーンに 16 個の独立した数値制御発振器 (NCO) が内蔵されており、アイドル状態の NCO の位相を維持しながら、RF 周波数間の高速度スイッチングを可能にします。デュアルバンド DUC または DDC モードでは、各チェーンが 2 つの NCO を提供し、同じ位相コヒーレント動作で 2 つの RF 周波数間の高速度スイッチングを可能にします。

2.1.1 広い周波数範囲 (600MHz ~ 12GHz)

AFE7950 の 12 GSPS ダイレクト RF サンプリングは、外部ミキサを必要とせずに、L バンド、S バンド、C バンド、X バンドをカバーしており、多様なアプリケーションへのデバイスの適合性を大幅に高めています。X バンドまでは、このデバイスは真の RF サンプリング オプションとして動作します。より高い周波数の場合、このデバイスはヘテロダイン アーキテクチャをシームレスにサポートします。特に 8GHz の能力を活用して効率的な周波数計画を実施できる Ku バンドでは、このデバイスが適切です。

2.1.2 構成可能な帯域幅

AFE7950 デバイスには、シングル DDC モードとデュアル DDC モードの 2 つのモードをサポートする構成可能な帯域幅があります。これらの帯域幅設定はプログラマブルで、幅広い範囲から設定可能であるため、AFE7950 をスケーラブルかつ柔軟に利用できます。

シングルバンド DDC モードでは、ADC フロントエンドのデジタル デシメーション ブロックを、100MHz から最大で 1200MHz の瞬間信号帯域幅までにプログラムできます。

デュアル DDC モードでは、チャンネルごとに独立した NCO 制御を維持しながら、集約された帯域幅である 2400MHz に対応できます。

2.1.3 SATCOM に対する周波数ホッピングの重要性

周波数ホッピングは、衛星通信に役立つアンチジャミング、スペクトル共有、リンクレイヤの俊敏性を実現します。

高速 NCO の再プログラミングにより、疑似ランダムまたはアダプティブ ホッピング シーケンスが可能になり、飛行中に最小限のオーバーヘッドで更新することができます。さらに、複数の周波数ホップ間で位相のコヒーレンスを維持できるため、復調器を再トレーニングすることなく、周波数の異なるビーム間でシームレスなハンドオーバーが可能です。

表 2-1 に、周波数ホッピングをサポートする AFE7950 デバイスの機能を示します。

表 2-1. AFE7950 内の周波数ホッピングのサポート

パラメータ	仕様	運用上の影響
NCO の数	デュアル DDC モードでチャンネルごとに 2 つ、シングル DDC モードで 16 個の NCO	個別に構成可能な 16 個の NCO を使用して、複数の帯域をカバーするようにデバイスを構成可能
位相コヒーレントな NCO ホッピング	ホップ間で NCO の位相を維持	SPI または GPIO を使用して、アップリンクおよびダウンリンクでの位相コヒーレントな周波数ホッピングを有効化
デュアル DDC モード	チャンネルごとに 2 つのデジタル ミキサ	同じ広帯域信号に対して、DDC または DUC チェーンごとに 2 つのデシメーション係数と 2 つの NCO を個別に構成可能
GPIO ベースのホップトリガ	専用の HOP ピン (エッジトリガ)	CPU が介在しない確定的なホップのスケジューリングを支援

2.1.4 JESD204B と JESD204C の柔軟性

AFE7950 は、JESD204B および JESD204C の両方と互換性があります。8b/10b および 64b/66b エンコード方式をサポートしており、ほとんどの FPGA および ASIC と互換性があります。このデバイスは、JEDEC 規格による複数の追加機能をサポートしています。

2.1.4.1 サブクラス 1 の同期

AFE7950 は JESD204B および JESD204C サブクラス 1 を実装しており、確定的なレイテンシを実現し、複数のデバイス間で SYSREF に一致したフレームを開始します。単一の共有 SYSREF パルスで複数のデバイスが同期されるため、フェーズドアレイトランシーバ内のすべての AFE7950 が RF フロント エンドを同時にサンプリングできます。複数デバイスの同期は、大容量の SATCOM で使用されるコヒーレントビームフォーミングおよび MIMO 技術の前提条件です。

2.1.4.2 レーンの低減による省電力

AFE7950 デバイスは、複数の LMFS 設定をサポートしています。これは特に衛星ペイロードに有益です。衛星ペイロードでは、節約されたすべての電力がペイロード マージンの増加やミッションの期間延長につながるためです。レーン 1、レーン 2、レーン 3、レーン 4 の任意の組み合わせは、JESD データ転送に使用するように構成できます。

2.1.4.3 推奨される JESD エンコード

8b/10b モードは、低レイテンシと高堅牢性を実現しています。コントロールプレーンのデータを対象に、または放射線の影響を受けやすい環境での操作で、より強力なエラー検出が必要な場合にこのモードを選択します。

64b/66b モードは、スループットが高く、オーバーヘッドが低いモードです。バルク IQ サンプル ストリーミングの場合は 64b/66b モードを選択します。64b/66b モードは、8b/10b モードの場合の 80% のライン効率に対して約 93% のライン効率を達成します。AFE950 の内部フレーミング ロジックにより、必要な整列文字が自動的に挿入され、デバイスはリンクに応じてエンコードを切り替えることができます。エンコードの切り替えにより、1 つのレーンで低レイテンシで制御し、残りのレーンで高スループットのサンプリングを実行するなど、混在モードのデータパスが可能になります。

2.2 SATCOM システム設計の利点

確定的なレイテンシにより、オンボードのデジタル バック エンドおよびグラウンド セグメントのタイミング アライメントのためのタイミング バジレットの計算を簡素化できます。

消費電力を考慮したレーンのスケールリングにより、トラフィックが少ない期間など、リンク バジレットでサンプル レートの低減が可能な場合に、設計者は未加工のデータレートと電力の節約とのトレードオフを実現できます。

エンコードを選択することによって、放射線によるビット反転 (8b/10b エンコードを優先) とスペクトル効率 (64b/66b エンコーディングを優先) に対する堅牢性のバランスを取るための手段をハードウェアを再設計せずに実現できます。

2.3 放射線耐性

AFE7950-SP は、宇宙アプリケーション向けに設計された、宇宙空間で使用できる RF サンプリグトランシーバです。AFE7950-SP の放射線耐性は、地球低軌道 (LEO)、地球中軌道 (MEO)、静止軌道 (GEO) の過酷な環境で信頼性の高い性能を維持するために、一連の標準化テストを通じて検証済みです。

2.3.1 AFE7950-SP: 宇宙環境で使用可能なバージョン

AFE7950-SP が強い放射線にどのように対処できるかを確認するために、このデバイスを長期的に高レベルの放射線にさらして試験しました。

2.3.1.1 Total Ionizing Dose (TID)

このデバイスは、テキサス州ダラスにあるテキサス インストルメンツの CLAB 施設で、Co-60 のガンマ ソースを使用して、120rad (Si)/s という高レートでの総電離線量 (TID) にさらされました。合計 25 個のデバイスに対して 3、10、30、50、100krad (Si) の線量の放射線が照射されました。照射後の電氣的試験により、すべてのデバイスがデータシートの仕様範囲内にとどまり、最大試験線量 100krad (Si) でも機能的な劣化は見られないことが確認されました。この試験は、宇宙放射線の長期的な被ばくに対するデバイスの堅牢性を示します。

図 2-1 に、放射線被ばく試験における AFE7950-SP デバイスの性能を示します。AFE7950-SP TID の放射線レポートもご覧ください。

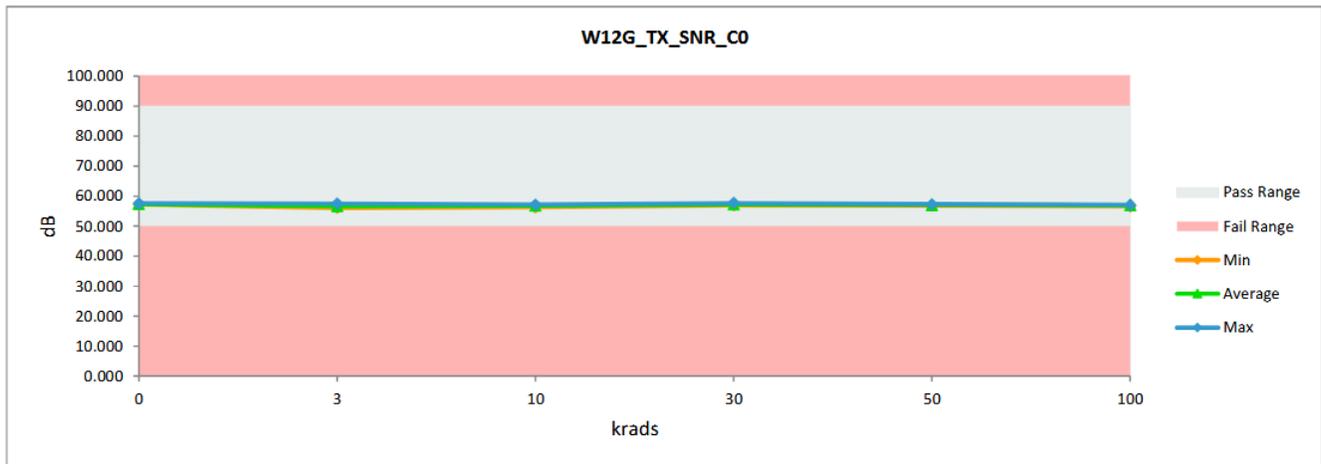


図 2-1. AFE7950-SP 性能

2.3.1.2 シングル イベント ラッチアップ (SEL)

TID に加えて、AFE7950-SP はシングル イベントラッチアップ (SEL) 耐性についても評価されています。このデバイスは、125°C の接合部温度において 70MeV·cm²/mg までの耐性があり、すべての試験済みサンプルでラッチアップ イベントは記録されていません。高エネルギー粒子が一般的である宇宙空間での中断のない動作を検証するには、このレベルの耐性が不可欠です。

2.3.1.3 シングル イベント機能割り込み (SEFI)

AFE7950-SP にとって、SEFI の堅牢性は重要な考慮事項です。SEFI を回復するには、電源を切って再投入し、再プログラミングする必要があります。SEFI を測定するために、ビームはフラックスに基づいて設定された時間 (通常は 1E2 で 5 分間) 実行されます。各インターバルの後、ビームは停止し、デバイスは元の状態に戻ります。RX チャンネル 1 の信号対雑音比が 100dB のノイズフロアに戻る場合、テストは続行されます。そうでない場合、パワー サイクル後にデバイスは再構成されます。次に、累積されたフルエンスを使用して、指定された LET の SEFI の断面積を計算します。

表 2-2. SEFI の動作

フラックス (イオン・ cm^2/s)	イオン	LET ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$)	時間	フルエンス	SEFI かどうか
1.00×10^4	Ar	9.75	25 秒	2.45×10^5	いいえ
1.00×10^4			50 秒	4.88×10^5	いいえ
1.00×10^4			75 秒	7.15×10^5	いいえ
1.00×10^4			100 秒	9.53×10^5	はい
1.00×10^2	Cu	24.54	5 分	4.43×10^4	いいえ
1.00×10^2			10 分	8.79×10^4	いいえ
1.00×10^2			15 分	1.28×10^5	いいえ
1.00×10^2			20 分	1.71×10^5	いいえ
1.00×10^2			25 分	2.16×10^5	いいえ
1.00×10^2			30 分	2.56×10^5	いいえ
1.00×10^2	Ag	57.73	35 分	3.00×10^5	はい
1.00×10^2			5 分	3.92×10^4	いいえ
1.00×10^2			20 分	1.60×10^5	いいえ
1.00×10^2			25 分	2.00×10^5	いいえ
1.00×10^2			30 分	2.39×10^5	はい

表 2-3. 最悪週の LEO および GEO 軌道の SEFI の SET イベントレートの計算

軌道タイプ	Onset LET _{EFF} ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$)	σSAT (cm^2)	イベントレート (/日)	イベントレート (FIT)	MTBE (年)
LEO (ISS)	1	2.33×10^{-5}	9.48×10^{-5}	3.95×10^3	2.89×10^1
GEO			8.29×10^{-4}	3.45×10^3	3.30

2.3.1.4 放射線ロット受け入れ試験

生産ロット全体で一貫した放射線性能を実現するため、放射線ロット受け入れ試験 (RLAT) も実施されています。各ウェハー ロットについて、5 つの代表的なユニットが最大 100krad (Si) の照射を受けます。

2.3.1.5 ガス放出に関する ASTM E595 への準拠

AFE7950-SP は、低ガス放出に関する ASTM E595 規格に準拠しています。放出のテストは、125°C で 24 時間の間、 5×10^{-5} Torr 未満の真空中で 5 ユニットに対して実行されました。材料は合計質量損失 (TML) $\leq 1\%$ と再凝縮物質量 (CVCM) $\leq 0.1\%$ のスレッシュホールドを使用してスクリーニングされました。

表 2-4. ガス放出テスト結果

サンプル	材料	TML 1%	CVCM < 0.1%
AFE7950ALKSHP	アンダーフィル	合格	合格
AFE7950ALKSHP	サブストレート	合格	合格
AFE7950ALKSHP	TIM	合格	合格

この準拠によって、宇宙船内で感度の高い光学表面または熱表面が汚染されるリスクが最小限に抑えられ、ミッションの耐用期間と性能が向上します。実際に、AFE7950-SP で使用されている材料は規格に準拠しています。

2.3.2 SATCOM に対する利点

AFE7950-SP の放射線耐性は、衛星通信システムの信頼性に直結します。このデバイスは SEL 耐性があるため、過酷な宇宙放射線下でも動作が継続され、複雑なラッチアップ保護回路が不要になります。これは、高エネルギー粒子へのばく露が常に懸念される LEO、MEO、GEO ミッションで特に有用です。

また、放射線にさらされても確実に動作し続けるため、高品質で強力な信号の維持につながり、システムの動作が安定します。高性能 RF (12GSPS DAC と 3 個の GSPS ADC を使用した最大 12GHz で動作) と、宇宙グレードの信頼性を兼ね備えた AFE7950-SP は、以下の分野に適した選択肢です。

- 衛星通信
- フェーズド アレイ アンテナ
- ビームフォーミング システム
- 高スループットの衛星リンク

2.4 消費電力の最適化

AFE7950-SP は、柔軟性のある電源アーキテクチャを使用して設計されており、エンジニアはミッションの要件に応じてエネルギー使用量を最適化できます。消費電力は、以下に応じて変動します。

- アクティブなチャネル数
- JESD インターフェイス構成
- デジタル処理設定 (補間やデシメーションなど)

2.4.1 電力モードの構成

2.4.1.1 Rx 専用モード

このモードでは、4 つの ADC のみが有効化され、TDD モードでは、すべての DAC がスタンバイ状態のままになります。これらの条件下でのデバイスの消費電力は約 4.85W です。

2.4.1.1.1 Rx モードの使用事例

この構成は通常、エネルギー効率が重要である狭帯域の監視または低データレートのテレメトリ アプリケーションで使用されます。

2.4.1.1.2 Rx モードの利点

Rx モードでは、JESD レーンが最小限になります。低消費電力モードでの動作は、熱ストレスを低減し、過酷な環境での長期的な信頼性に貢献する可能性があります。

表 2-5. Rx モードでの電気的特性

$T_A = +25^\circ\text{C}$ での代表値、全動作温度範囲は $T_{A,MIN} = -40^\circ\text{C} \sim T_{J,MAX} = +110^\circ\text{C}$ 、TX 入力レート = 491.52MSPS、 $f_{DAC} = 8847.36\text{MSPS}$ インターリーブ モード、 $f_{ADC} = 2949.12\text{MSPS}$ 、公称電源、-1dBFS で 1 トーン、DSA 減衰 = 0dB、SerDes レート = 24.33Gbps、特に記述のない限り。

パラメータ		テスト条件	最小値	標準値	最大値	単位	
I_{VDD1P8}	グループ 3A: VDD1P8FB + VDD1P8RX + VDD1P8TX	モード 7b: TDD 4R (スタンバイでの TX) TX 9G および FB 3G -16 ビット: 368.64M、 DSA = 6dB、非インターリーブ モード、スタンバイ RX 3G: 368.64M の詳細を示します。16 ビット SerDes: 25Gbps -> Rx/FB (レーン共有) 用に 2 レーン、Tx 用に 2 レーン		789.5		mA	
	グループ 3B: VDD1P8FBCLK + VDD1P8RXCLK + VDD1P8TXDAC + VDD1P8GPIO + VDDA1P8			471.3		mA	
	グループ 3C: VDD1P8PLL + VDD1P8PLLCO			73.4		mA	
I_{VDD1P2}	グループ 2A: VDD1P2FB + VDD1P2RX				599.3		mA
	グループ 2B: VDD1P2TXCLK + VDD1P2TXENC				169.6		mA
	グループ 2C: VDD1P2FBCML + VDD1P2RXCML + VDD1P2PLLCLKREF				39.1		mA
I_{VDD0P9}	グループ 1A: DVDD0P9 + VDDT0P9			1645.3		mA	
P_{diss}	消費電力			4851.9		mW	

2.4.1.2 代表的な動作モード

この構成は 4T4R1FB の設定を使用して TDD モードで動作するため、総消費電力 7.62W で、性能と電力効率の間のバランスを取ることができます。サンプリング レートと JESD204 スループットに関して適度にスケールアップされていると同時に、このモードは SATCOM アプリケーションで高い能力を発揮します。

- 8GHz (X バンド) の広帯域転送をサポート
- 高速の JESD204 リンク経由で信頼性の高いデータ配信を実現
- フィードバック チャネルによるリアルタイムの監視とアダプティブ キャリブレーションが可能
- TDD 構造によりアップリンクを優先するシステム (空中端末やモバイル端末など) に有益

- 熱やエネルギーに関する厳しい制約があるプラットフォーム向けに設計

表 2-6. 代表的な動作モードの電気的特性

$T_A = +25^\circ\text{C}$ での代表値、全動作温度範囲は $T_{A,MIN} = -40^\circ\text{C} \sim T_{J,MAX} = +110^\circ\text{C}$ 、TX 入力レート = 491.52MSPS、 $f_{DAC} = 8847.36\text{MSPS}$ インターリーブ モード、 $f_{ADC} = 2949.12\text{MSPS}$ 、公称電源、-1dBFS で 1 トーン、DSA 減衰 = 0dB、SerDes レート = 24.33Gbps、特に記述のない限り。

パラメータ		テスト条件	最小値	標準値	最大値	単位	
I_{VDD1P8}	グループ 3A: VDD1P8FB + VDD1P8RX + VDD1P8TX	モード 7b: TDD 4R (スタンバイでの TX)TX 9G および FB 3G - 16 ビット: 368.64M、DSA = 6dB、非インターリーブ モード、スタンバイ RX 3G: 368.64M の詳細を示します。16 ビット SerDes: 25gbps) → Rx/FB (レーン共有) 用に 2 レーン、Tx 用に 2 レーン		789.5		mA	
	グループ 3B: VDD1P8FBCLK + VDD1P8RXCLK + VDD1P8TXDAC + VDD1P8GPIO + VDDA1P8			471.3		mA	
	グループ 3C: VDD1P8PLL + VDD1P8PLLVC0			73.4		mA	
I_{VDD1P2}	グループ 2A: VDD1P2FB + VDD1P2RX				599.3		mA
	グループ 2B: VDD1P2TXCLK + VDD1P2TXENC				169.6		mA
	グループ 2C: VDD1P2FBCML + VDD1P2RXCML + VDD1P2PLLCLKREF				39.1		mA
I_{VDD0P9}	グループ 1A: DVDD0P9 + VDDT0P9				1645.3		mA
P_{diss}	消費電力				4851.9		mW

2.4.1.3 4T4R FDD モード

4T4R FDD モードでは 4 つの ADC すべてと 4 つの DAC すべてが有効であり、それぞれ 3GSPS と 12GSPS のフルサンプリング レートで動作します。この構成では、デバイスのピーク消費電力は約 10.640W に到達します。

このモードのその他の特長:

- 完全に実装された JESD インターフェイスにより、高いデータ レートを維持 (送信用に 8 レーン、受信用に 4 レーン)
- 内部デジタル処理ブロックは最大容量で動作し、帯域幅シェーピングのための補間とデシメーションを処理

表 2-7. 4T4R FDD モードの電気的特性

$T_A = +25^\circ\text{C}$ での代表値、全動作温度範囲は $T_{A,MIN} = -40^\circ\text{C} \sim T_{J,MAX} = +110^\circ\text{C}$ 、TX 入力レート = 491.52MSPS、 $f_{DAC} = 8847.36\text{MSPS}$ インターリーブ モード、 $f_{ADC} = 2949.12\text{MSPS}$ 、公称電源、-1dBFS で 1 トーン、DSA 減衰 = 0dB、SerDes レート = 24.33Gbps、特に記述のない限り。

パラメータ		テスト条件	最小値	標準値	最大値	単位	
I_{VDD1P8}	グループ 3A: VDD1P8FB + VDD1P8RX + VDD1P8TX	モード 11d: FDD 4T4R シングル バンド: 8x Int, RX が使用する FB TX/FB/RX レート = 1474.56MSPS $f_{DAC} = 11796.48\text{MSPS}$ $f_{ADC} = 2949.12\text{MSPS}$ $f_{TX} = f_{RX} = 8\text{GHz}$ 64/66 コーディング、24.33Gbps TX: 8-8-2-1、FB/RX: 4-4-4-2		1260		mA	
	グループ 3B: VDD1P8FBCLK + VDD1P8RXCLK + VDD1P8TXDAC + VDD1P8GPIO + VDDA1P8			940		mA	
	グループ 3C: VDD1P8PLL + VDD1P8PLLVC0			73		mA	
I_{VDD1P2}	グループ 2A: VDD1P2FB + VDD1P2RX				630		mA
	グループ 2B: VDD1P2TXCLK + VDD1P2TXENC				1480		mA
	グループ 2C: VDD1P2FBCML + VDD1P2RXCML + VDD1P2PLLCLKREF				78		mA
I_{VDD0P9}	グループ 1A: DVDD0P9 + VDDT0P9				4200		mA
P_{diss}	消費電力				10640		mW

2.4.1.3.1 4T4R FDD モードの使用事例

この構成は、複数のビームまたはワイドバンド チャネルが同時にアクティブである、高スループットな SATCOM ペイロードに推奨されます。

2.4.2 省電力戦略

AFE7950-SP には、電力使用量を最適化するための複数の手段が用意されています。

2.4.2.1 低消費電力動作モード

2.4.2.1.1 スタンバイモード

スタンバイモードではデータコンバータは無効になりますが、クロック処理と JESD インターフェイスはアクティブのままです。アイドルスロット中、対応するチェーンをスタンバイにすることで、電力を節約しながら高速スイッチングを引き続き利用することができます。この方法によって、システムは PLL の再ロックや JESD リンクの再初期化を必要とせずに、同期を維持して動作をほぼ即時に再開できます。

スタンバイモードの特長:

- ウェークアップ時間: 2 μ s 未満
- 制御: SPI によって構成され、GPIO によってアクティブ化
- 使用事例: Tx スロットと Rx スロットが交互に配置された TDD ベースの SATCOM システムに適切
- 利点: 同期を維持し、PLL の再ロックや JESD リンクの再初期化を必要とせずに、ほぼ即時のリカバリが可能

2.4.2.1.2 スリープモード

スリープモードを使用すると、スタンバイモードに比べて消費電力をさらに低減できます。ただし、JESD リンクは完全にシャットダウンされ、再確立する必要があるため、スリープモードでは長いウェークアップ時間が必要です。

スリープモードの主な特長を以下に示します。

- ウェークアップ時間: 再初期化の要件により、スタンバイモードより長い時間がかかる
- 制御: SPI またはスリープ GPIO ピンにより管理する
- 使用事例: 完全な動作が必要でない、エネルギーが制約されるシステムでの長時間のアイドル期間向けに設計されている

表 2-8. スリープモードの電気的特性

$T_A = +25^\circ\text{C}$ での代表値、全動作温度範囲は $T_{A,MIN} = -40^\circ\text{C} \sim T_{J,MAX} = +110^\circ\text{C}$ 、TX 入力レート = 491.52MSPS、 $f_{DAC} = 8847.36\text{MSPS}$ インターリーブモード、 $f_{ADC} = 2949.12\text{MSPS}$ 、公称電源、-1dBFS で 1 トーン、DSA 減衰 = 0dB、SerDes レート = 24.33Gbps、特に記述のない限り。

パラメータ		テスト条件	最小値	標準値	最大値	単位
I_{VDD1P8}	グループ 3A: VDD1P8FB + VDD1P8RX + VDD1P8TX	モード 8: モード 7 と同じ構成、スリープモード。SLEEP ピンは High にする。		20.3		mA
	グループ 3B: VDD1P8FBCLK + VDD1P8RXCLK + VDD1P8TXDAC + VDD1P8GPIO + VDDA1P8			292.8		mA
	グループ 3C: VDD1P8PLL + VDD1P8PLLVC0			12.6		mA
I_{VDD1P2}	グループ 2A: VDD1P2FB + VDD1P2RX			4.6		mA
	グループ 2B: VDD1P2TXCLK + VDD1P2TXENC			54.3		mA
	グループ 2C: VDD1P2FBCML + VDD1P2RXCML + VDD1P2PLLCLKREF			15.3		mA
I_{VDD0P9}	グループ 1A: DVDD0P9 + VDDT0P9			313.1		mA
P_{diss}	消費電力		956.8		mW	

2.4.3 SATCOM のスリープモードおよびスタンバイモードの利点

スリープモードとスタンバイモードのトレードオフは明確です。スタンバイモードではやや大きな消費電力で高速な回復を実現できますが、スリープモードではウェークアップが遅くなる代わりに最大のエネルギー削減を実現できます。

SATCOM では、両方のモードがエネルギー効率、熱管理、迅速な回復、柔軟な制御の実現に役立っています。

AFE7950-SP は幅広い動作エンベロップを実現するので、設計者はアクティブチャンネル、JESD レーン割り当て、デジタル処理パラメータを注意深く構成することによって、性能と電力効率のバランスを取ることができます。

3 まとめ

結論として、AFE7950 は、スペクトルに関する柔軟性、放射線への耐性、電力効率を、単一の高集積設計で実現しています。このデバイスは、放射線耐性が実証済みであり、過酷な宇宙環境で信頼性を維持できます。このデバイスの幅広い周波数範囲、JESD204B および JESD204C の高度な機能、動的な構成オプションにより、設計者は多様なミッションプロファイルの性能を向上させると同時に、サイズ、重量、消費電力を最小化できます。

AFE7950 の SEP バージョンは開発中であり、LEO ミッションなどの複数のミッションプロファイルをサポートするためのデバイスの拡張性と能力がさらに強化されています。今後は複数の AFE 構成を採用すると、先進的なフェーズドアレイと MIMO (多入力、多出力) システムを導入して静電容量化をさらに進め、回復力を強化した衛星リンクを実現することができます。このような能力によって、AFE7950 は汎用性に優れ、次世代の SATCOM プラットフォームに適した、将来に対応できる選択肢になります。

4 参考資料

- Agoro, Yusuf (2020 年 7 月)。AFE79xx を使用して周波数ホッピングを実現する方法、テキサス インストルメンツのアプリケーションレポート。
- Guibord, Matt (2015 年 4 月)。JESD204B マルチデバイス同期:要件の分析、テキサス インストルメンツの Analog Design Journal
- Iyer, Srinivasan および Murphy, Srinivas (2023 年 5 月)。シングルチップの広帯域リピータソリューションとしての AFE79xx、テキサス インストルメンツのアプリケーション ノート。
- テキサス インストルメンツ、AFE7950-SP 製造フローおよび信頼性レポート、放射線レポート。
- テキサス インストルメンツ、AFE7950-SP 総電離線量 (TID) 放射線レポート、放射線レポート。
- テキサス インストルメンツ、12GSPS DAC および 3GSPS ADC 搭載、AFE7950-x 4T6R RF サンプリング AFE、データシート。

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、

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