

Technical White Paper

Skyworks パワー・アンプを搭載した **AFE7769D** を使用したトリプル・バンド・基地局無線設計を実現

Jenny Yu, Neeraj Kumar Sharma, Simran Nanda

概要

マルチバンド無線は、最新のワイヤレス・ネットワーク・インフラにとってますます重要になっています。ネットワーク機器や無線導入のコスト効率、電力効率、フレキシブル、スケーラビリティを高めることになるからです。マルチバンド無線の設計は、無線のサイズ、重量、消費電力、性能を最適化する上で多くの課題に直面しています。このホワイトペーパーは、マルチバンド無線向けに RF トランシーバの観点で必要とされる重要な機能について説明します。たとえば、**Skyworks** パワー・アンプにトリプルバンドのユース・ケースに CFR/DPD を内蔵したクワッド・チャネル RF トランシーバである **AFE7769D** の波高率低減 (CFR)/デジタル・プリディストーション (DPD) 性能の結果を示します。これについては、**AFE7769D** を活用してコンパクトで効率的なマルチバンド無線設計を実現する方法を示しています。

目次

| | |
|--|---|
| 1はじめに..... | 2 |
| 2コンパクトで効率的なマルチバンド無線を実現..... | 3 |
| 2.1 CFR/DPD 内蔵 TI RF トランシーバ: AFE7769D..... | 3 |
| 2.2 Skyworks パワー・アンプ..... | 3 |
| 3トリプルバンド CFR/DPD パフォーマンス・テストの構成と条件..... | 4 |
| 4トリプルバンド CFR/DPD パフォーマンス・テスト結果..... | 5 |
| 4.1 TX1 のテスト結果 (バンド 41)..... | 5 |
| 4.2 TX3 のテスト結果 (バンド 3)..... | 6 |
| 4.3 TX4 のテスト結果 (バンド 1)..... | 7 |
| 5まとめ..... | 8 |

図の一覧

| | |
|--|---|
| 図 1-1. トリプルバンド無線 (2T2R N41 + 1T1R B1 + 1T1R B3) のブロック図例..... | 2 |
| 図 3-1. AFE7769D トリプルバンド DPD 性能テスト構成のブロック図..... | 4 |
| 図 4-1. TX1 ACLR プロット: 2.595GHz の中心周波数による 2x100MHz 信号..... | 5 |
| 図 4-2. TX1 EVM% プロット: 2.595GHz の中心周波数 (PAR = 8dB) での 2x100MHz 信号..... | 6 |
| 図 4-3. TX3 ALCR プロット: 1.8425GHz の中心周波数による 3x20MHz + 15MHz 信号..... | 6 |
| 図 4-4. TX3 EVM% プロット: 3x20MHz + 15MHz 信号、1.8425GHz の中心周波数 (PAR = 8.5dB)..... | 7 |
| 図 4-5. TX4 ACLR プロット: 2.140GHz の中心周波数で 3x20MHz の信号..... | 7 |
| 図 4-6. TX4 EVM% プロット: 2.140GHz の中心周波数 (PAR = 8.5dB) での 3x20MHz 信号..... | 8 |

表の一覧

| | |
|----------------------------------|---|
| 表 3-1. テスト設定の詳細..... | 5 |
| 表 3-2. パワー・アンプの詳細..... | 5 |
| 表 4-1. TX1: ACLR のまとめ..... | 5 |
| 表 4-2. TX3: ACLR のまとめ..... | 6 |
| 表 4-3. TX4: ACLR のまとめ..... | 7 |
| 表 5-1. テストケースの要約..... | 8 |
| 表 5-2. CFR/DPD パフォーマンス結果の要約..... | 8 |

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

今日では、携帯電話のパブリック ネットワークとプライベート ネットワークの両方で、1 つの無線で複数の周波数帯域をサポートする基地局無線機の需要が高まっています。この需要は、次のような多くの要因によって引き起こされています。

- **ネットワークの設置面積とコストの削減:** マルチバンドベースステーションは、セル サイトで必要となる物理無線とアンテナの数を削減し、設置面積の削減、施設のレンタルコストと公共料金の削減、設置コストの削減につながります。
- **柔軟性と適応性:** マルチバンド無線は、変化するネットワーク条件に対応できるため、ネットワーク オペレータのフレキシビリティが向上します。マルチバンド無線は、既存のネットワークを新しいテクノロジーに移行する際に役立ち、よりスマートで段階的な移行プロセスを促進します。例えば、4G と 5G のサービス、あるいは一部の開発途上国や地域では 2G と 4G のサービスが共存するのは珍しいことではありません。
- **スペクトルの可用性と効率的な利用:** 周波数帯域によって特性は異なります。長距離にわたって対応範囲を向上させるものもあれば、より高密度な場所で高いデータレートや容量を実現するものもあります。マルチバンドベースステーションを使用すると、オペレータはこれらのさまざまな帯域で利用可能なスペクトルを最大限に活用し、さまざまなニーズや環境条件に対応することができます。
- **中立ホスト ネットワーク:** オペレータはネットワークの高密度化に焦点を当てています。ラスト マイルやビジネス中のカバレッジに関しては、中立ホストはますます重要な役割を果たしてきました。中立ホスト ネットワークは、インフラストラクチャ、導入、管理コストを共有することで全体的なネットワークコストを削減します。また、ネットワークのカバレッジと容量を改善し、ユーザ体験を向上させます。中立的なホスト ネットワークでは、マルチバンド サポートが必須です。

マルチバンド無線の設計には、サイズと重量の増加、消費電力の増加、帯域間干渉の追加など、多くの課題があります。このホワイトペーパーでは、図 1-1 に示すように、TI の RF トランシーバ AFE7769D を使用してコンパクトなトリプルバンド無線設計を実現する方法を示します。この例では、1T1R は、周波数帯域 N41 で動作する 3GPP の周波数帯域 B3、1T1R は、周波数帯域 B1 および 2T2R で動作します。Skyworks の以下のパワー アンプ (PA) と組み合わせた AFE7769D トランシーバの波高率低減 (CFR) とデジタル プリディストーション (DPD) の結果: [SKY66391-12](#)、[SKY66394-11](#)、および [SKY66522-11](#) があります。

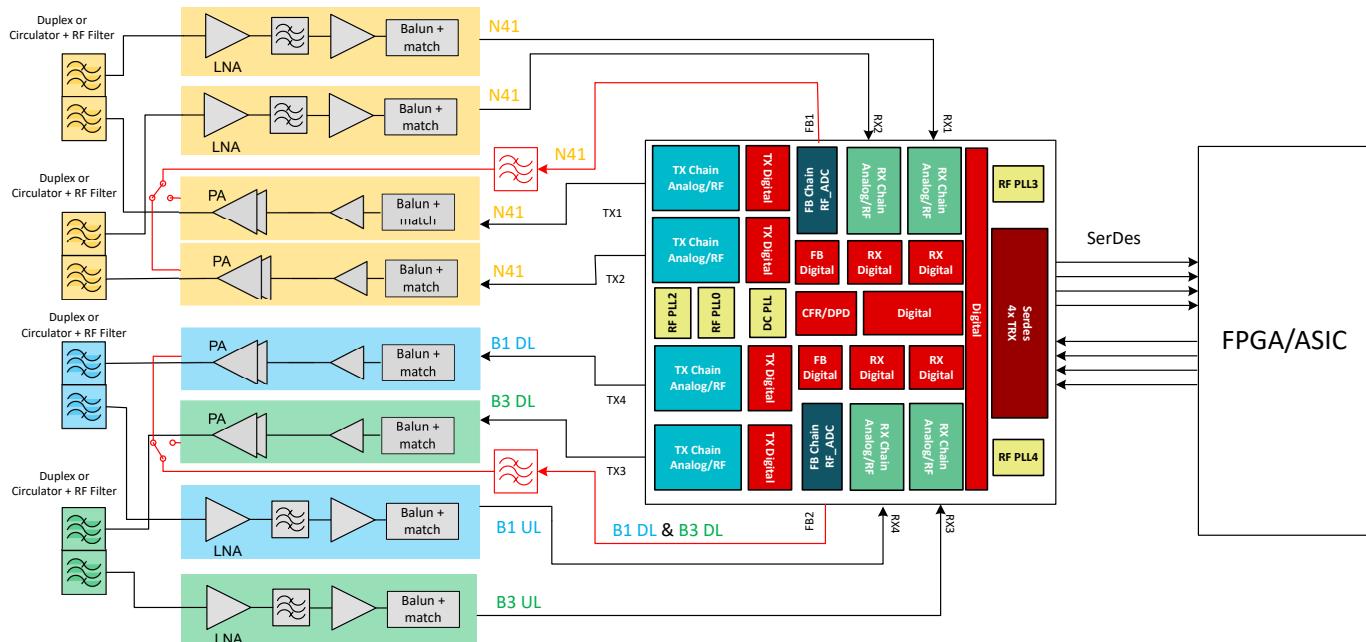


図 1-1. トリプルバンド無線 (2T2R N41 + 1T1R B1 + 1T1R B3) のブロック図例

2 コンパクトで効率的なマルチバンド無線を実現

2.1 CFR/DPD 内蔵 TI RF トランシーバ: AFE7769D

AFE7769D (4T4R2F) は高性能のマルチチャネルトランシーバであり、4 つのダイレクト アップコンバージョントランスマッタ チェーン、4 つのダイレクト ダウンコンバージョン レシーバ チェーン、2 つの広帯域 RF サンプリング デジタイジング補助 チェーン (フィードバック パス)、および PA 線形化のためのローパワー CFR/DPD エンジンを統合しています。

AFE7769D は、低消費電力で小型のマルチバンド無線設計を実現するために、以下の特長を備えています。

- AFE7769D は、トランスマッタまたはレシーバとアップコンバータまたはダウンコンバータ ミキサとの間のローカルオシレータ (LO) 信号を合成するために、**4 つのフラクショナル RF PLL** を内蔵しています。さらに、各トランスマッタおよびレシーバ チェーンにはオプションの低 IF ミキサがあり、周波数のアップコンバージョンまたはダウンコンバージョンに LO とともに使用できます。
- AFE7769D の直接 RF サンプリングベースのフィードバック パスには、DPD 推定用に PA 出力信号を観測するための本質的な広帯域レシーバ チェーンがあり、TX チェーンの障害の較正も簡素化されます。各フィードバック パスには **2 つの切り替え可能な NCO** があり、本書の例に示すように、2 つのトランスマッタ パスが異なる RF 周波数で動作している場合に、2 つの異なる RF 周波数間を切り替えるために使用できます。スイッチング中も NCO 位相を維持できます。
- AFE7769D の内蔵 DPD エンジンは、最大 50dBm 以上 (平均電力) のさまざまな出力電力レベルと、高速な収束およびトラッキング、低消費電力による PA テクノロジー (GaAs, LDMOS, GaN) により PA を線形化できます。DPD を使用すると、電力増幅はより高い電力効率で動作しながら、トランスマッタの RF 放射要件を満たします。

2.2 Skyworks パワー アンプ

Skyworks の SKY66394-11、SKY66391-12、SKY66522-11 は完全にマッチングされた高効率のパワーアンプで、温度補償のためにアクティブ バイアスを内蔵しています。5G NR および 4G LTE ワイヤレス インフラ アプリケーション向けに、+28dBm 最大 +30dBm の平均出力電力を必要とし、これらのパワー アンプは小型の 5mm x 5mm モジュールにパッケージ化されており、テキサス インスツルメンツの AFE7769D トランシーバに内蔵されているようなデジタル プリディストーション手法で動作するよう設計されています。SKY66394-11、SKY66391-12、および SKY66522-11 パワー アンプが現在入手可能です。

3 トリプルバンド CFR/DPD パフォーマンス テストの構成と条件

図 3-1 に、トリプルバンド セットアップの AFE7769D での CFR/DPD 性能テストを示します。ここで、トランシミッタ チャネル TX1、TX3、TX4 は、3 つの異なる Skyworks パワー アンプを備えたバンド N41、B3、B1 で動作するよう構成されています。それぞれ SKY66522-11、SKY66391-12、SKY66394-11 です。チャネル TX2 も TX1 として帯域 N41 で動作するように構成されていますが、テストを簡単にするために、CFR/DPD 性能テスト中は、TX2 出力を接続して追加の増幅を行っていません。

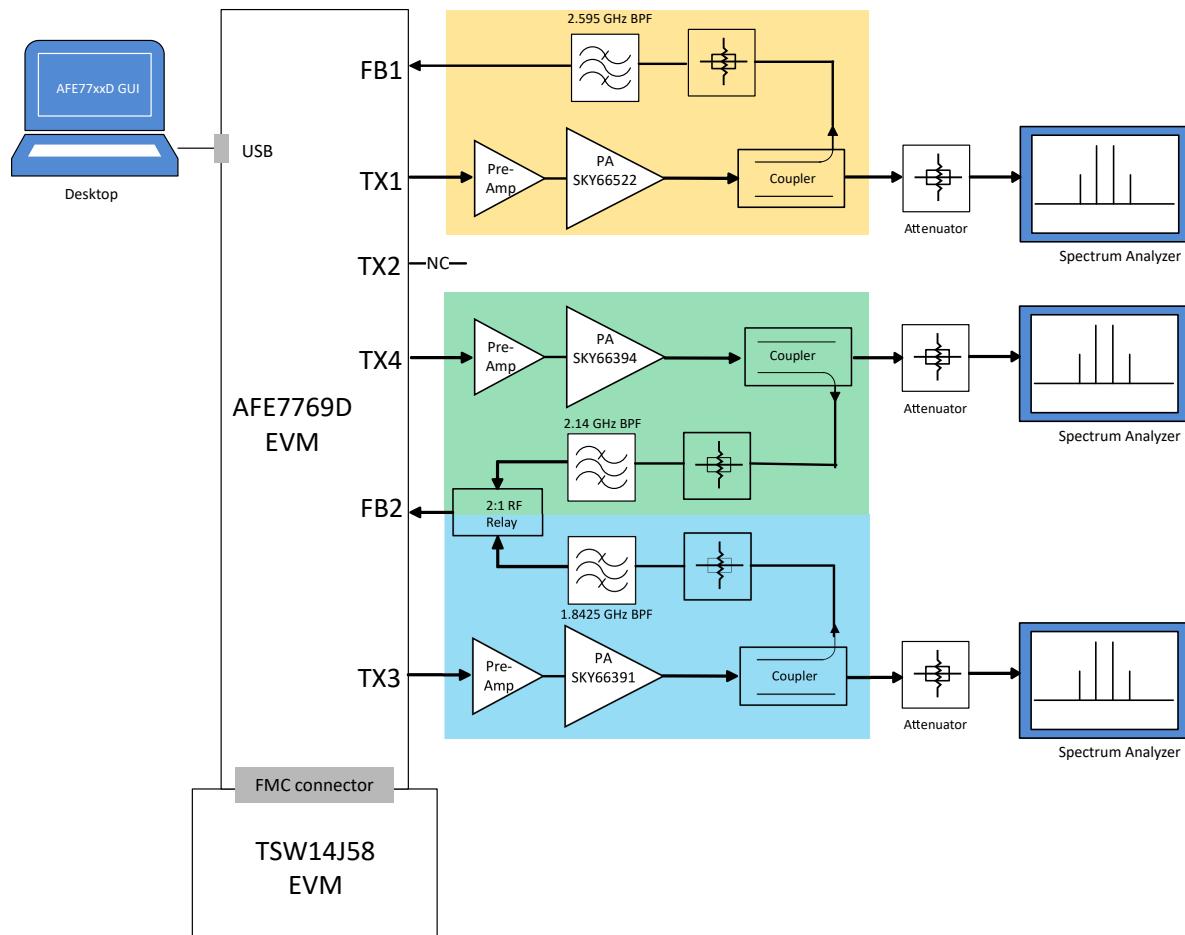


図 3-1. AFE7769D トリプルバンド DPD 性能テスト構成のブロック図

注

TX RF フロントエンドのラインアップには、同じボードに半田付けする代わりに、ディスクリートのスタンドアロン評価ボードや受動部品を接続します。したがって、このレポートに示されている結果は、表 3-1 および表 3-2 に示す特定のテスト条件における、特定の評価基板ボードの標準的なベースライン性能となります。デバイス間およびボード間のばらつきが予想されます。TI および Skyworks アプリケーションチームと連携することで、DPD のパフォーマンスと PA の効率をさらに最適化できます。

表 3-1 から 表 3-2 では、テスト構成 (フロントエンド ゲイン、キャリア プロファイル) と最終段のパワー アンプの詳細を示すため。

表 3-1. テスト設定の詳細

| パラメータ | TX1 パス | TX3 パス | TX4 パス |
|----------------|-------------|-------------|-------------|
| RF 中心周波数 | 2595MHz | 1842.5MHz | 2140MHz |
| 瞬間信号帯域幅 (IBW) | 200MHz | 75MHz | 60MHz |
| プリアンプ ステージのゲイン | 16dB | 19.7dB | 19.2dB |
| 最終段のパワー アンプを使用 | SKY66522-11 | SKY66391-12 | SKY66394-11 |

表 3-2. パワー アンプの詳細

| 主な属性 | SKY66522-11 | SKY66391-12 | SKY66394-11 |
|---------|-------------------------------------|------------------|------------------|
| 動作周波数範囲 | 2300 ~ 2690MHz | 1800 ~ 1900MHz | 2000 ~ 2300MHz |
| 定格出力電力 | 31dBm | 28dBm | 28dBm |
| ゲイン | 36.5dB | 35.9dB | 38dB |
| 電源電圧 | 5V _{DS} /12V _{DS} | 5V _{DS} | 5V _{DS} |

4 トリプルバンド CFR/DPD パフォーマンス テスト結果

テストした各チャネルについて、PA 出力での隣接チャネルのリーク比 (ACLR) とエラー ベクトル振幅 (EVM%) の結果を示します。収集した ACLR 性能プロットでは、オレンジの曲線は DPD を適用する前の ACLR 性能を示し、青の曲線は AFE7769D 統合型 DPD アルゴリズムを使用して PA を線形化した後の ACLR 性能を示しています。

4.1 TX1 のテスト結果 (バンド 41)

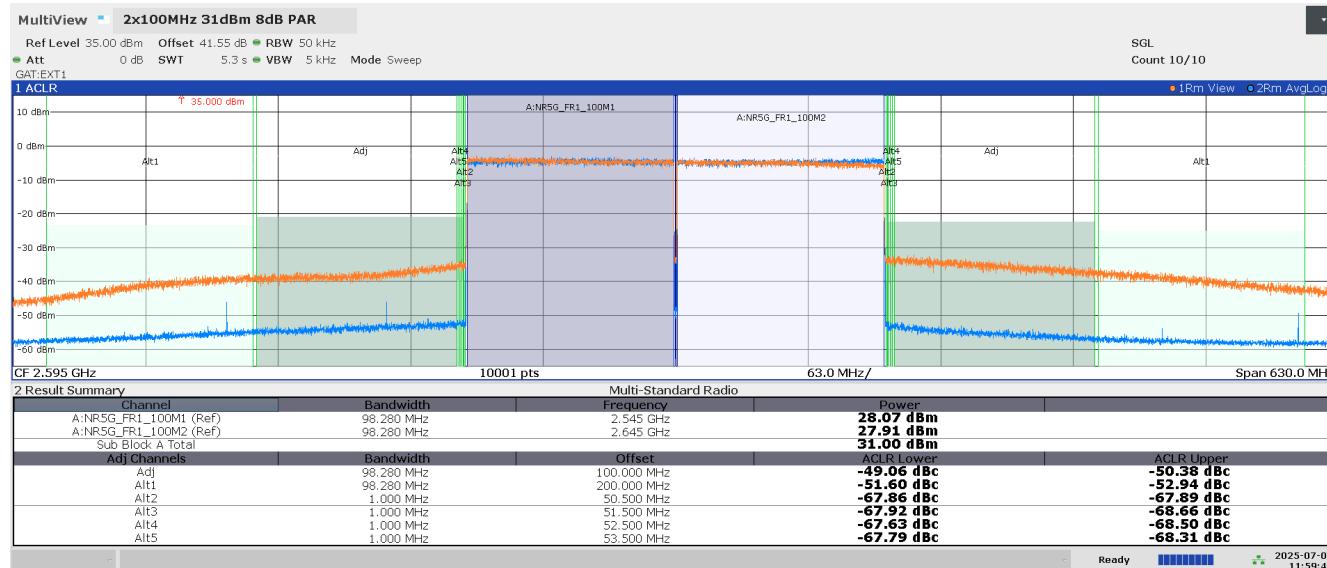


図 4-1. TX1 ACLR プロット: 2.595GHz の中心周波数による 2x100MHz 信号

表 4-1. TX1:ACLR のまとめ

| パラメータ | PA 出力電力 | 隣接電力低下 | 隣接電力上昇 | 代替電力低下 | 代替電力上昇 | PA の効率 |
|--------|---------|----------|----------|----------|----------|--------|
| DPD なし | 31dBm | -33.2dBc | -30.1dBc | -36.6dBc | -34.5dBc | - |
| DPD 付き | 31dBm | -49.0dBc | -50.3dBc | -51.6dBc | -52.9dBc | 31.0% |

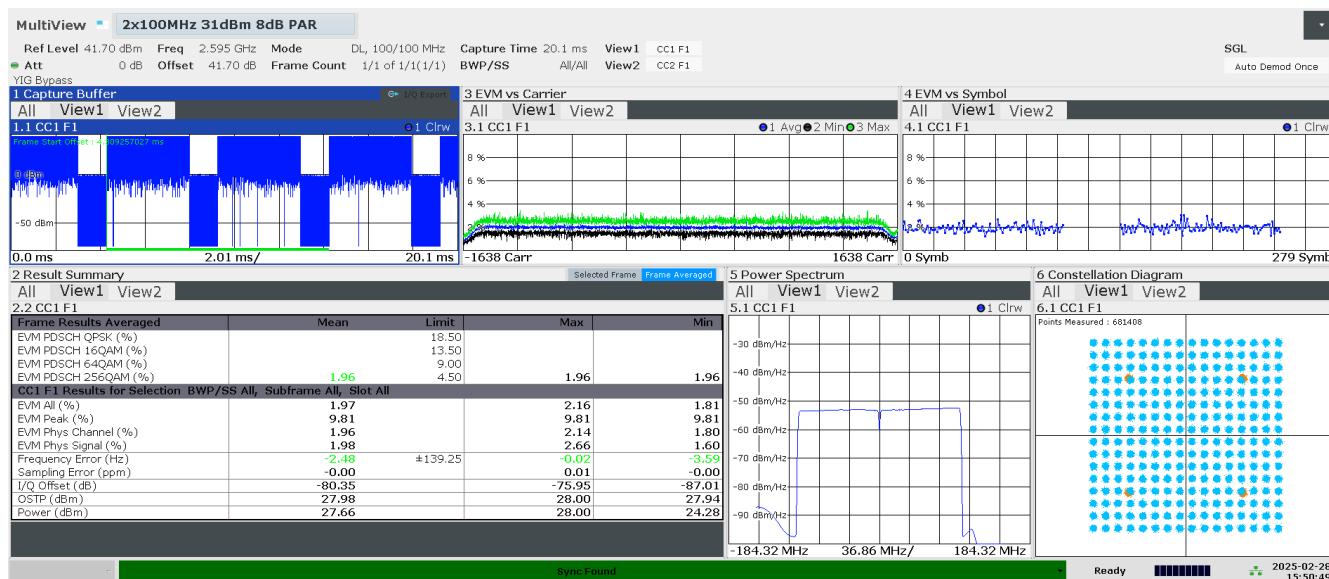


図 4-2. TX1 EVM% プロット: 2.595GHz の中心周波数 (PAR = 8dB) での 2×100MHz 信号

4.2 TX3 のテスト結果 (バンド 3)

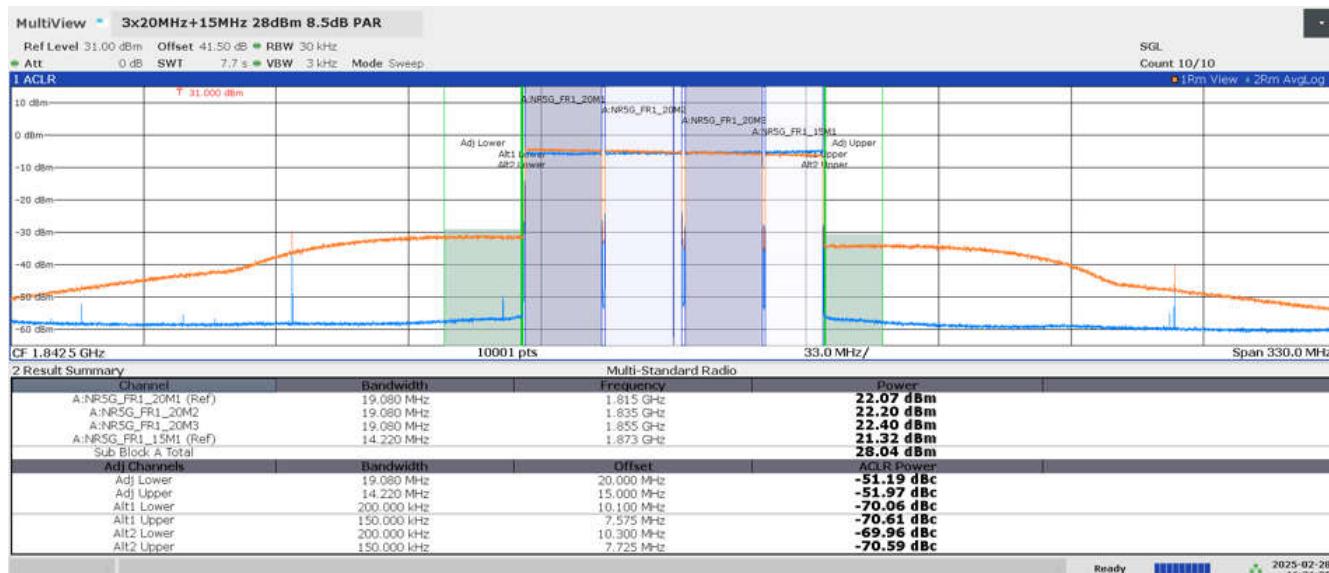


図 4-3. TX3 ALCR プロット: 1.8425GHz の中心周波数による $3 \times 20\text{MHz} + 15\text{MHz}$ 信号

表 4-2. TX3:ACLR のまとめ

| パラメータ | PA 出力電力 | 隣接電力低下 | 隣接電力上昇 | PA の効率 |
|--------|---------|----------|----------|--------|
| DPD なし | 28.0dBm | -27.0dBc | -24.0dBc | - |
| DPD 付き | 28.0dBm | -51.2dBc | -52.0dBc | 31.8% |

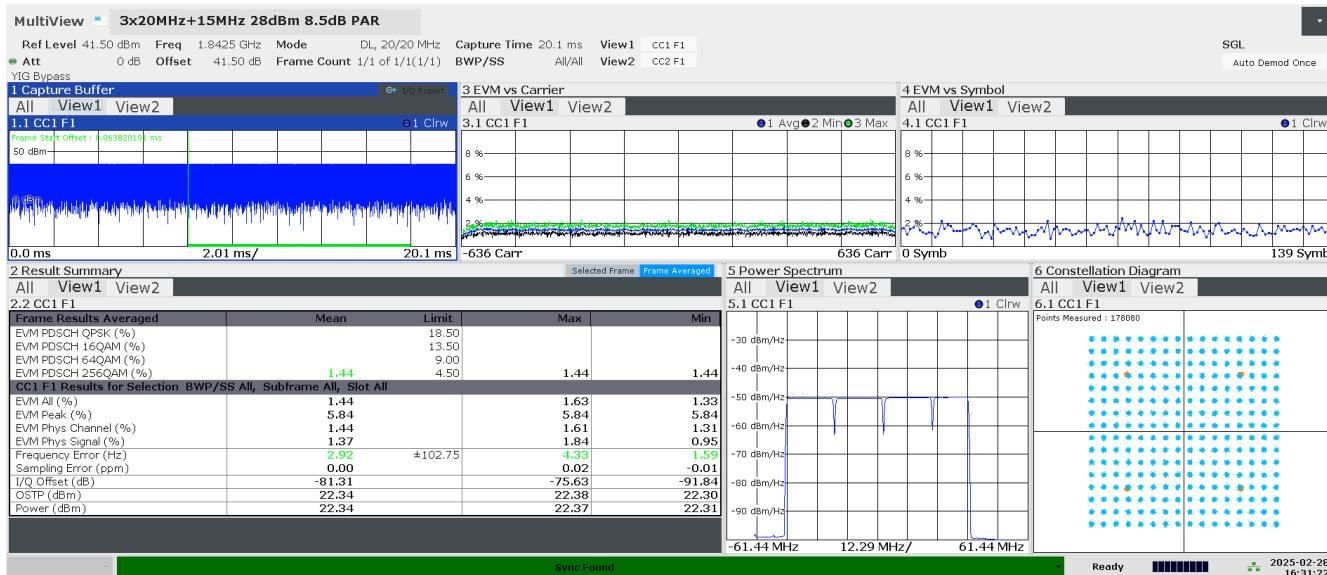


図 4-4. TX3 EVM% プロット: 3x20MHz + 15MHz 信号、1.8425GHz の中心周波数 (PAR = 8.5dB)

4.3 TX4 のテスト結果 (バンド 1)



図 4-5. TX4 ACLR プロット: 2.140GHz の中心周波数で 3x20MHz の信号

表 4-3. TX4: ACLR のまとめ

| パラメータ | PA 出力電力 | 隣接電力低下 | 隣接電力上昇 | 代替電力低下 | 代替電力上昇 | PA の効率 |
|--------|---------|----------|----------|----------|----------|--------|
| DPD なし | 28.0dBm | -29.0dBc | -33.6dBc | -32.0dBc | -34.2dBc | - |
| DPD 付き | 28.0dBm | -50.3dBc | -49.6dBc | -51.6dBc | -50.8dBc | 30.0% |

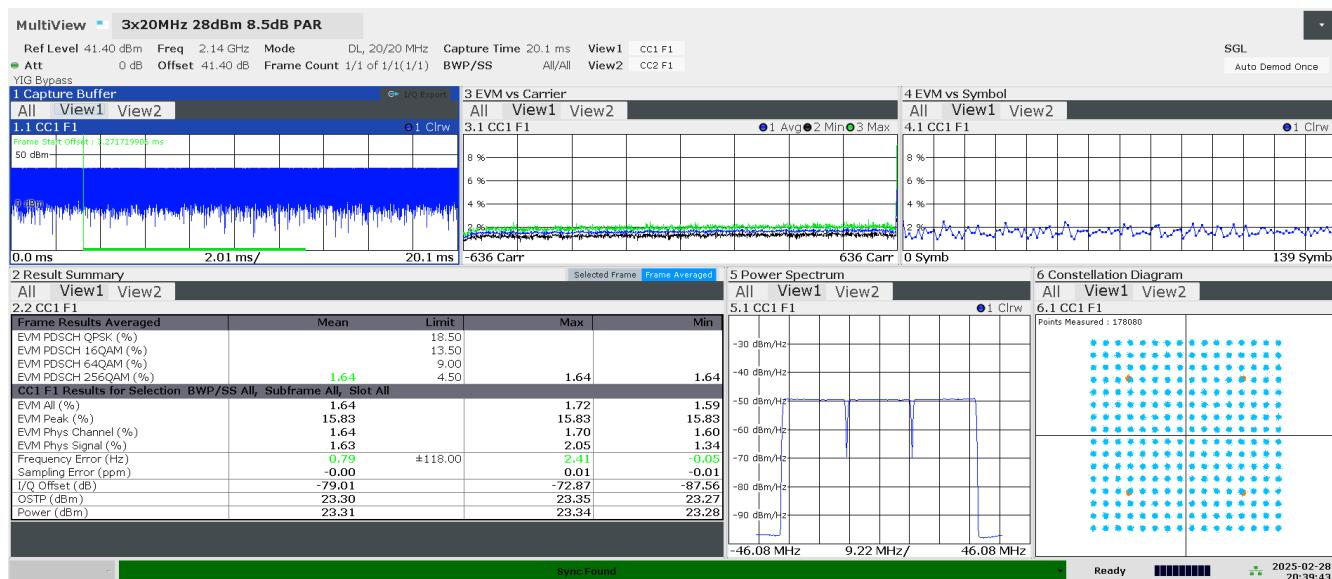


図 4-6. TX4 EVM% プロット: 2.140GHz の中心周波数 (PAR = 8.5dB) での 3×20MHz 信号

5 まとめ

表 5-1 および 表 5-2 に、AFE7769D をトリプルバンド構成で使用し、3 つの異なるパワー・アンプを備え、3 つの異なる RF 周波数で動作する 3 つの異なる TX チャネルのテスト条件と ACLR および EVM % の結果をまとめます。

その結果、内蔵 CFR/DPD アルゴリズムと LO シンセサイザの豊かさにより、AFE7769D を使用して、コンパクトで効率的なトリプルバンド無線設計を実現できることが実証されています。

表 5-1. テストケースの要約

| テスト | 中心周波数 | キャリアプロファイル | 電源 | PAR | V _{DS} |
|-----------------|-----------|---------------|-------|-------|-----------------|
| TX1:SKY66522-11 | 2.595GHz | 2x100MHz | 31dBm | 8.0dB | 5V, 12V |
| TX3:SKY66391-12 | 1.8425GHz | 3x20MHz+15MHz | 28dBm | 8.5dB | 5V |
| TX4:SKY66394-11 | 2.140GHz | 3x20MHz | 28dBm | 8.5dB | 5V |

表 5-2. CFR/DPD パフォーマンス結果の要約

| テスト | PA 出力電力 | 隣接チャネル ACLR (下/上) | 代替チャネル ACLR (下/上) | PA の効率 | EVM% |
|-----|---------|-------------------|-------------------|--------|-------|
| TX1 | 31dBm | -49.0dBc/-50.3dBc | -51.6dBc/-52.9dBc | 31.0% | 1.94% |
| TX3 | 28dBm | -51.2dBc/-52.0dBc | - | 31.8% | 1.44% |
| TX4 | 28dBm | -50.3dBc/-49.6dBc | -51.6dBc/-50.8dBc | 30.0% | 1.64% |

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默示保証、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、明示的または默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](#) 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

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默示保証、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、明示的または默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、(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、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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月