参考資料

パワーダウンの強化 – 5G 無線のエネルギー効率のための RF システムおよびトランシーバの革新

Kang Hsia, Neeraj Sharma, Dhruvil Solanki, Serkan Tokgoz, Ben Uhing

概要

本資料では、現代の 5G 無線ネットワーク、ネットワーク展開の傾向、および消費電力を低減するための全体的な取り組みについての概要を提供します。本資料を読み終えることにより、以下の点について学ぶことができます。

- **5G 無線ネットワーク内の多様な無線の種類**：マクロ基地局、Massive MIMO (mMIMO)、スモール セルなどの無線
- **省電力を可能にする 5G ネットワーク無線プロトコル**：未使用のトランスミッタまたはレシーバ チャネルのアイドル化を可能にする周波数分割複信 (FDD) または時分割複信 (TDD)
- **省電力を可能にする無線コンポーネント レベルでの革新**：RF トランシーバと、それに伴うデジタル、アナログ、およびデジタル プリディストーション、高速ウェークアップ時間を伴う未使用チャネルのアイドル化、電源負荷応答の最適化調整などの省電力機能

用語集

1. 3GPP：第 3 世代パートナーシップ プロジェクト
2. ACLR：隣接チャネル リーク比
3. BBU：ベースバンド ユニット
4. CFR：波高率低減
5. DPD：デジタル プリディストーション
6. FDD：周波数分割複信
7. LTE：第 4 世代 3GPP 規格
8. mMIMO：大規模複数入力 - 複数出力無線
9. Micro-DTX：マイクロ不連続伝送
10. Micro-DRX：マイクロ不連続受信
11. NR：第 5 世代 3GPP 規格
12. OFDM：直交周波数分割マルチプレクシング
13. PA：パワー アンプ
14. PAR：ピーク対平均電力比
15. PCB：プリント基板
16. PoE：Power over Ethernet
17. PoF：Power over Fiber
18. RAN：無線アクセス ネットワーク
19. RF：無線周波数
20. RRU：リモート無線ユニットまたはマクロ ユニット
21. RFIC：無線周波数集積回路
22. SSB：5G 無線規格同期信号ブロック
23. TDD：時分割複信

概要

3GPP 5G ネットワークは、モバイル通信に広範なカバレッジとより高いスループットを提供します。2022 年以降、ビデオ会議、クラウド コンピューティング、拡張現実 (AR)、人工知能 (AI) アプリケーションの増加に伴ってワイヤレス データ スループットへの需要が高まり、モバイル オペレータはカバレッジの拡大を推進しています。しかし、展開の速度に影響を与える可能性のある 2 つの大きな課題があります。それは、世界的なエネルギー コストの上昇と、5G 無線システムに固有の消費電力の高さです。5G 規格における OFDM シグナリングは高い PAR を引き起こすため、信号のピークに対応するにはパワー アンプを低い効率で動作させざるを得なくなります。その結果、通信オペレータは現在、運用電力量コストの削減を最優先事項としており、機器ベンダに革新的な省電力ソリューションを求めています。この記事では、5G システムにおける消費電力を低減するためのシステム レベルおよびシリコン レベルの両方の手法について説明します。

まず、トラフィックの非ピーク時に無線の一部を無効にすることを含む、スタンバイ動作向けに 3GPP 規格で定義されたサイレント タイム スロットを活用することにより得られる RF システム レベルの省電力について議論します。Micro-DTX および Micro-DRX 動作は 5G NR のリーン キャリア設計を活用したもので、SSB 送信は通常 20ms ごとに発生するため、トラフィックが少ない期間中に基地局がマイクロ スリープ状態に入ることを可能にします。RFIC レベルに着目したさらなる改善策として、無線チャネルのプログラマブルな独立したスタガード制御を可能にし、電流スルーレートを大幅に低減する手法を提示します。全チャネルの同時アクティブ化または非アクティブ化を防止することにより、16 チャネル RFIC において最大 75% の負荷過渡応答が抑えられることを示しています。この手法により、性能低下の原因となる電圧トランジェントが減少し、PCB 上の電源供給ネットワークがシンプルになります。高度な実装には、受信モードと送信モード間の事前スタガリングおよびオーバーラップ スタガリングが含まれ、通信の完全性を維持しながら消費電力を最適化するために、最小限の負荷過渡応答を戦略的に優先します。全体として、RF システムと RFIC の両方の省電力化により、大きな電源トランジェントによって性能を損なうことなく、5G システムの運用コストを低減できます。

5G 無線展開トレンド

ワイヤレス セルラー ネットワークにおいて、サービス オペレータには標準的なヘキサゴン セルのサイズとカバレッジを設計するためのネットワーク計画を担当するチームがあります。セル サイズは、基地局の RF 電力およびサポートされる接続数に直接関係しています。**図 1** は、mMIMO、RRU、およびスモール セル無線の展開における現在の傾向を示しています。2 つの軸は、それぞれ人口密度とデータ トラフィックを強調しています。人口軸には、高層マンションやオフィス ビルがある都市エリア、典型的な 1 階から 2 階建ての住宅やショッピング モールのある郊外エリア、農地などの農村エリアが含まれています。トラフィック軸には、高、中、低のトラフィックが含まれます。

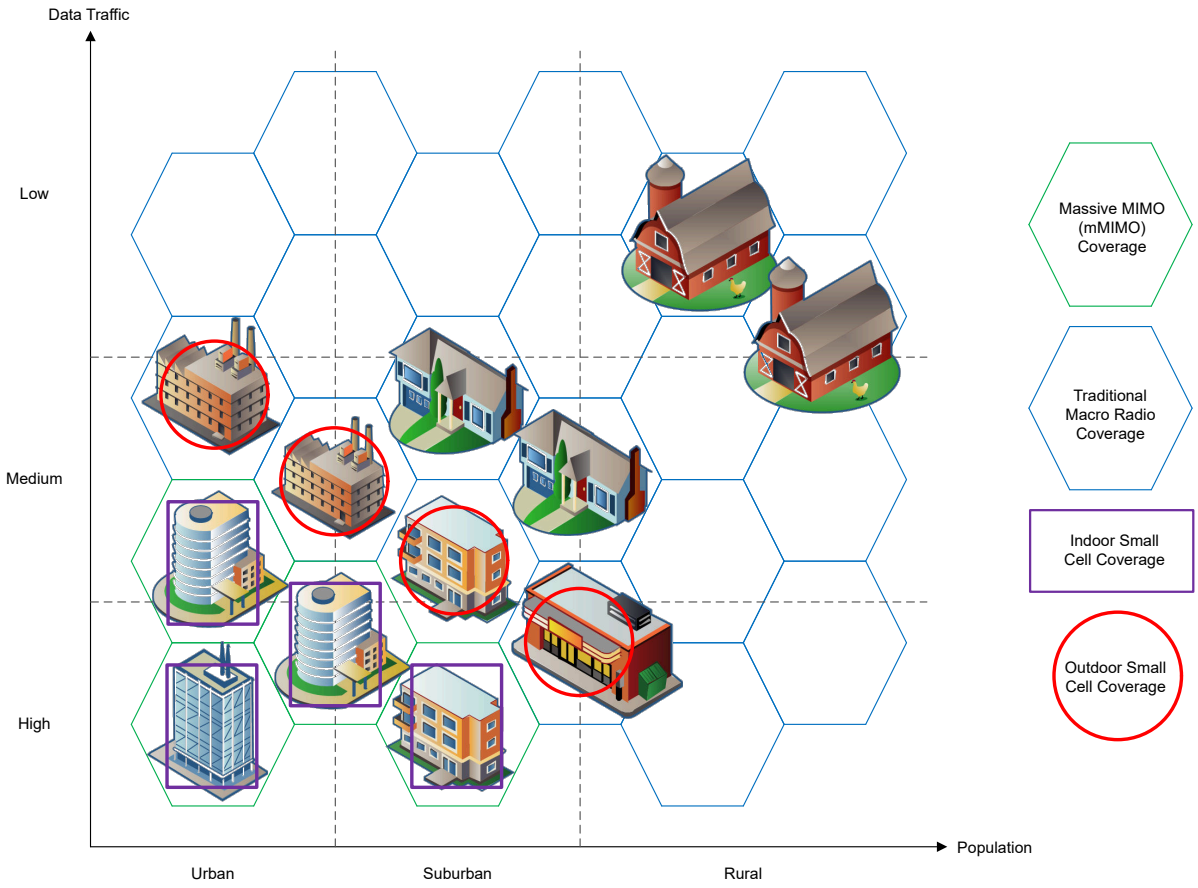


図 1. *5G 無線展開戦略*

ネットワーク全体の消費電力を最適化するため、業界の現在の展開トレンドでは、都市部で mMIMO を使用し、郊外や地方で RRU を使用し、カバレッジの隙間があるエリアを埋めるためにスモール セル無線を使用しています。この戦略は、モバイル データの 80% が屋内で発生するという現在の傾向に合致しています。[1][2]。サービス プロバイダは一般に、都市部および高トラフィック エリアに MIMO を展開します。このエリアは、従来の水平エリア カバレッジを超えて高層ビルをカバーするために必要な垂直ドメイン ビームフォーミングを提供する mMIMO の能力から利益を得ます。高層ビルのある高密度都市エリアのサイトでは、トラフィック負荷が高い場合は mMIMO、トラフィック負荷が低い場合は RRU のいずれかが採用されます。

MIMO およびマクロ RRU の動向

mMIMO における主なデータ トラフィック転送には依然として TDD バンドが使用されていますが、FDD バンドに基づく MIMO 無線が補助的なパスとして登場しています。FDD バンドには専用のアップリンク周波数があるため、FDD mMIMO は混雑エリアにおける全体的なアップリンク トラフィック品質を向上させることができます。**表 1** に示すように、FDD バンドの大部分は 2.7GHz 未満 (例えば 3GPP のバンド 1、バンド 3、バンド 7 のケース) であり、3.3GHz を超える N77 や N78 バンドなどの TDD バンドの高い周波数範囲と比較されます。その結果、FDD ベースの mMIMO システムのアンテナ サイズには、波長の物理的特性による固有の制限が存在します。しかし、RFIC のチャネル数密度や全体の消費電力に関する革新 (TI の **AFE8030**、**AFE8128**、**AFE8192** ファミリなどの RFIC) により、設計者は無線の電気部品全体のサイズを縮小して、現場での設置を容易にできます。

帯域	二重	RAT	アップリンク (MHz)	ダウンリンク (MHz)
B1/N1	FDD	LTE/NR	1920～1980	2110～2170
B3/N3	FDD	LTE/NR	1710～1785	1805～1880
B7/N7	FDD	LTE/NR	2500～2570	2620～2690
N77	TDD	NR	3300～4200	
N78	TDD	NR	3300～3800	

表 1. *代表的な 3GPP 帯域*

スモール セルの台頭

従来のセルラー ネットワークは、ベースバンド信号処理がセルラー アンテナの設置場所で実行される RAN に依存しています。トラフィックが増加するにつれてセル サイズは縮小しており、セル サイトの数とその容量は大幅に増加しています。これら多数のアクセス ポイントの拡張性を向上させるため、機器ベンダやネットワーク オペレータは RRU と BBU の分離を提案しています。セル サイズの縮小と RRU および BBU の分離という全体的な傾向が、スモール セル無線の導入をもたらしています。

スモール セルは、従来のマクロ RRU よりも大幅に少ない電力で伝送します。スモール セルのカバー エリアには以下の利点があります。

1. 必要な屋内またはあらかじめ定義された屋外エリアをカバーするのに十分なセル サイズと電力レベル。
2. BBU からのデータ接続の大部分をカバーするために光ネットワークを活用すること。光リンク経由の伝送に必要な電力はワイヤレス リンクよりも小さくできるため、所定のビット レートにおける送信電力は、従来のマクロ セルと比較してスモール セルのほうが小さくできます。
3. RAN のオプションによって、BBU 機能の分割が異なります。分割の方式にかかわらず、スモール セルはセル サイズが小さいため周波数の再利用を高めてローカル エリアの容量を向上させ、信号損失を最小限に抑えて屋内のカバー範囲の隙間を減らすことができます。
4. 複数のスモール セル無線が共通の BBU に接続されている場合、BBU はセル間での無線リソースの割り当てと干渉管理を調整し、特定のエリアにおける全体的なスループットとエンド ユーザーのエクスペリエンスを向上させることができます。
5. サービス プロバイダは、スモール セルの集合体と各セルの電力レベルの組み合わせを展開して、ネットワーク レベル全体で高い電力効率を達成することを選択できます。サービス プロバイダは、ネットワーク レベルのエネルギー効率を向上させる潜在的な戦略として、大電力マクロ RRU の従来の戦略と比べて、これを代替戦略として使用できます。

一方で、ネットワーク オペレータは、既存のマクロ セルとの干渉を避けるため、スモール セル ネットワークの展開時に注意を払う必要があります。スモール セル無線の数量は、ネットワークのカバレッジと性能に依存します。試算[3] に基づくと、範囲は無線機あたり 4000 ～ 10000 平方フィートです。さらに、RF 受信状態が悪いオフィス ビルやマンション内部では、ビルの所有者がスモール セル、リピータ、または分散アンテナ システム (DAS) の組み合わせを展開して、カバレッジを拡大することを選択する場合があります。屋内カバレッジ向けに設計する場合、通常アンテナ 1 本あたり 0.25W ～ 1W のカバレッジで十分な場合があります。トラフィックが中 ～ 低の郊外エリアなどでは、リモート マクロ無線で十分な容量とカバレッジが提供されます。ビルの間やスタジアム、ショッピング モールなどのデータ トラフィックが多いエリアでは、建物の所有者はカバレッジを確保するために 5W ～ 10W の範囲の屋外用スモール セルを展開することを選択できます。

電力バジェットに収めるための無線規格および設計手法

エネルギー コストの上昇により、建物の所有者は通常、光熱費を賃料から分離したいと考えており、サービス プロバイダに対して、建物内からではなく主電力網から給電される独立した電力能力を備えた無線を展開することを要求しています。独立した電力には Power-over-Ethernet (PoE) または Power-over-Fiber (PoF) ソリューションが必要ですが、これらは伝送電力が制限されています。PoE 規格では、許容電力によって区別される複数のクラスが定義されています。無線設計者は、上位クラスへのアップグレードに伴う追加のハードウェアとコストを回避するため、無線の総電力を目標のクラス内に維持するよう努めています。そのため、無線設計者は無線レベルで電力を削減するために以下の手法を調査することがよくあります。

- 3GPP の 5G 規格では、物理層にマイクロ スリープ機能が含まれています。この機能により、動作中の動的な無線スタンバイモードが可能になり、5G 波形シンボル単位のより細かいレベルで無線が省電力モードに入ることができます。マイクロ スリープ機能には、TDD、FDD micro-DTX 状態、FDD micro-DRX 状態が含まれます。これらの規格により、無線設計者は特定の受信チャネルや送信チャネルをターゲットにして省電力モードに入らせることができます。
- トランスミッタ チェーンの効率：消費電力の大部分はパワー アンプ (PA) による伝送チェーンで発生するため、デジタル プリディストーション (DPD) 線形化を通じてパワー アンプの効率を高める傾向にあります。従来、スモール セルの設計者は、PA 効率が 10 ～ 15% 低下するコストと引き換えに直線性を達成するためにリニア アンプを利用していました。業界の現在のトレンドは、DPD を活用して PA の電力効率を 30% 以上向上させることです。

AFE8128、**AFE8192**、**AFE8030**、**AFE7769D** RF トランシーバなどの TI の RFIC により、エンジニアはこれらの目標を達成できます。TI のすべての RFIC は、3GPP 仕様のマイクロ スリープ機能を有効にするための高速スタンバイ / ウェークアップ機能を備えています。スタンバイから ウェークアップまでの時間は、一般的に 2µs 未満 [1]。統合 DPD を備えた TI の **AFE7769D** RFIC は、RFIC の上流での外部デジタル処理を行うことなく、PA の高度な線形化を通じて無線システム全体の電力効率を独自に向上させることができます。

TI RFIC の高速スタンバイおよびウェークアップ機能

TI の RFIC は、多くのユースケースで 2µs のウェークアップ時間を維持しながら、無線システムの低消費電力モードを最適化するための高速スタンバイ / ウェークアップ時間を備えています。FDD システムでは、これにより主に Micro-DTX および Micro-DRX が可能になり、TDD システムでは、アップリンク時のトランスミッタおよびダウンリンク時のレシーバの最大チャネル無効化時間が可能になります。

トランスミッタまたはダウンリンク レベルのスタンバイは、PA の消費電力を低減する主なメカニズムとなります。無線ユニットの電力の 50% 以上を消費する可能性のある PA は、常にエネルギー削減の最大の目標です。FDD システム向けに、5G 標準ではデータ フレーム内の OFDM シンボル レベルで送信チャネルを非アクティブにできる Micro-DTX が導入されました。これにより、エンジニアは未使用のスロット中に無線を送信スタンバイ状態にする機会が増えます。Micro-DTX は、空の OFDM シンボル中にパワー アンプをスリープ状態にすることによって機能します。実際の実装での課題は、1 OFDM シンボル期間という厳格なウェークアップ時間です。

図 2 を参照すると、マルチチャネル無線システムで全チャネルを同時にウェークアップすると大きな電流トランジェントが発生し、RFIC の電源レールに電圧リプルが生じる可能性があります。これは電源レールのセトリングにより、RFIC の初期サンプリング性能に影響を与える可能性があります。電源設計者は、アップリンクとダウンリンクの両方が無効になっている TDD ガード時間の短いインターバル (**図 2** には図示せず) も考慮する必要があります。このシナリオでは、電流引き込みが大電流から小電流、そして

[1] スタンバイから ウェークアップ時間までの標準的なテスト条件。厳格な 5G シンボル レベルのタイミング要件を満たすための、アプリケーション向けに最適化された RFIC 構成に基づく特定のスタンバイ / ウェークアップ時間については、TI にお問い合わせください

大電流状態へと変化するため、さらに多くのトランジェントが発生します。さらに、電源にはより大きなトランジェント サージ損失が発生する可能性もあり、システム全体の効率が損なわれます。

これらの問題に対処するため、TI の RFIC は、**図 3** に示すように、各チャネル グループのイネーブル信号が時間 (Ts) 的にスタガードされた、個々のチャネルまたは特定のチャネル グループに対してスタガード方式でウェークアップできます。構成に応じて、RFIC は GPIO をプログラミングしてチャネル イネーブル信号を独立して制御できるため、2 チャネル、4 チャネル、または 8 チャネル レベルでの柔軟な制御が可能になります。

設計者は、同じスタンバイおよびウェークアップ省電力戦略をレシーバ チェーンに適用できます。省電力の主な焦点は、レシーバ アップリンク チェーンの低ノイズ アンプ (LNA) です。

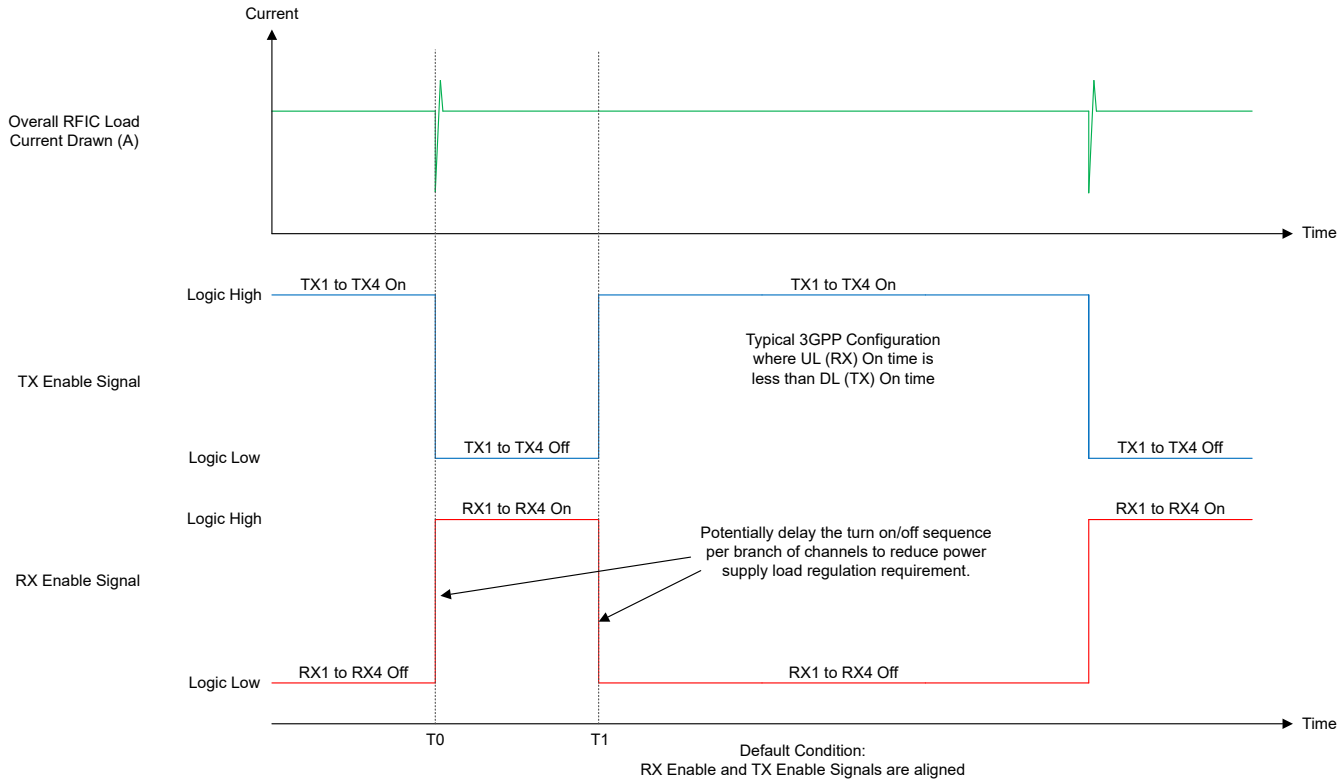


図 2. *TDD ベースの無線の代表的な動作およびチャネル アイドル プロファイル例：RFIC チャネル グループのウェークアップのスタガリング - 全チャネルの同時オン / オフ*

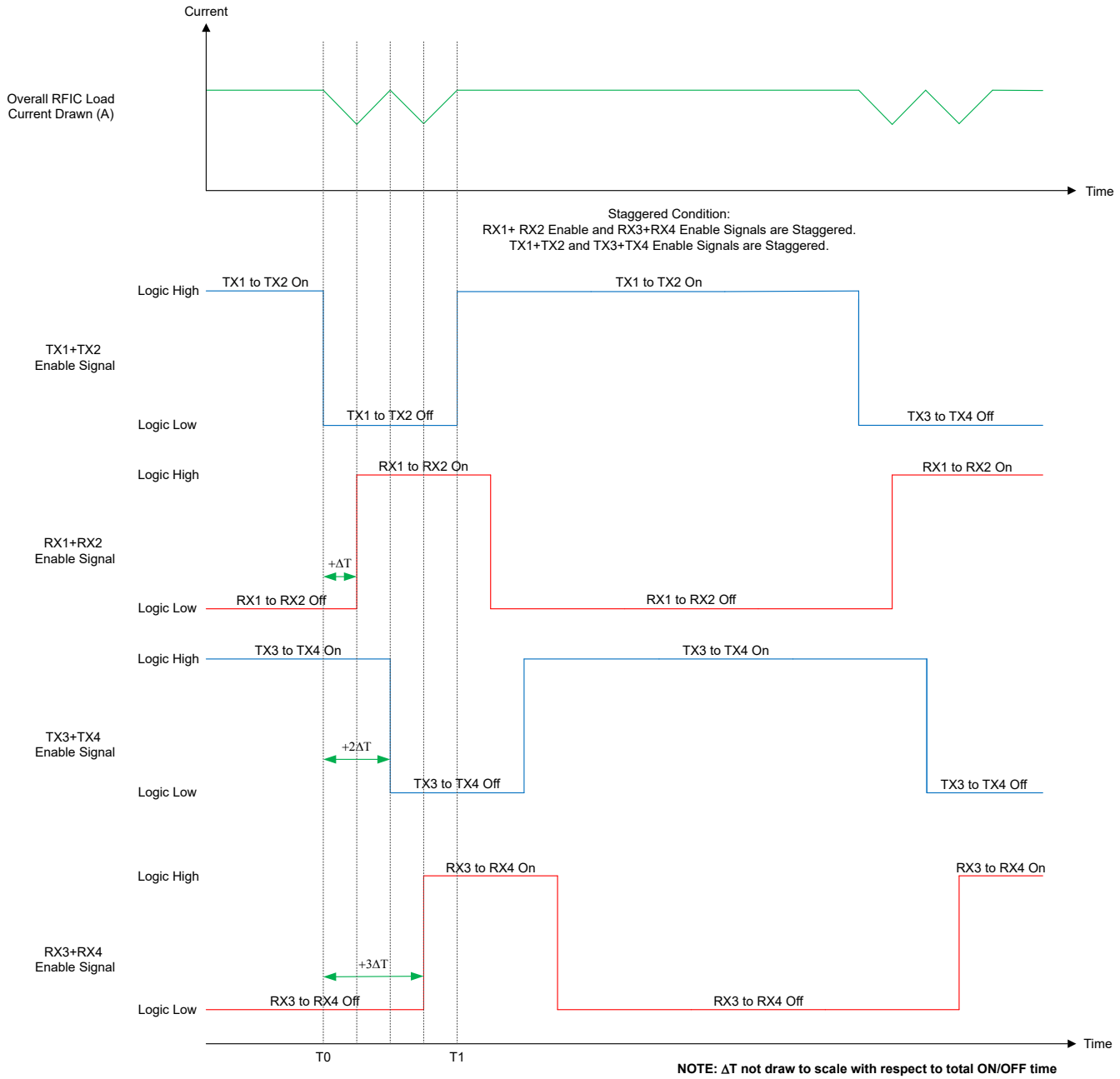


図 3. *TDD ベースの無線の高度な動作例およびチャネル アイドル プロファイル例：RFIC チャネル グループのウェークアップのスタガリング - 負荷電流のサージを最小限に抑えるために時間的にスタガードされたチャネル*

トランスミッタ チェーンの PA 効率を向上させる DPD

PA は、周波数応答および直線性性能とのトレードオフにおいて最適な電力効率を達成するために、大電力で駆動されることがよくあります。無線設計者は従来から、大電力 PA を電力効率良く駆動することによって生じる非線形性を補正するために DPD を利用してきました。MIMO と RRU システムでは、これらの大電力システムにおける電力効率を向上させるために、ほぼ例外なく DPD が活用されています。スモール セル システムにおいてさえも、設計者は従来の線形アンプから、3GPP 性能仕様を満たすために DPD を必要とする、より電力効率の高い PA (GaN など) へと徐々に移行しています [2]。現実の多くのケースにおいて、TI の DPD 性能は、PA が標準的なバイアスで動作している状態で、ACLR (帯域内および帯域外エミッションの測定値) の十分なマージンを達成できます。例えば、一般的な N77 バンドにおける 2 つの 100MHz 5G NR キャリアにおいて、TI の DPD 技術は -51dBc[3] より優れた隣接チャネル リーケージ比を達成でき、これは 3GPP 仕様の -45dBc の ACLR から 6dB のマージンがあります。そのような場合、設計者は PA バイアス電圧を低減して PA の効率を向上させつつ、TI DPD エンジンに PA 自体からの ACLR 劣化を吸収させることが検討できます。そのような場合、低減された PA 電圧バイアスで動作し、ある程度のマージンを持って標準的な 3GPP 仕様を満たしながらも、全体の性能は元の性能と同等を維持できます。

4T4R C バンド マクロ RRU の設計要件の例

設計パラメータ	数値の例
RF 周波数帯域	3740MHz ～ 3940MHz
瞬時帯域幅	200MHz
PLL リファレンスクロック	491.52MHz
FPGA、ASIC SerDes の最大データ レート	10Gbps
JESD204 モード (エンコード)	8b/10b
PA 出力電力	47.5dBm

表 2. *4T4R C バンド マクロ RRU の設計要件の例*

主な属性	値
パワー アンプ	GTRB424908FC
動作周波数範囲	3700MHz ～ 3980MHz
定格出力電力	47.5dBm
PA の種類	大電力 RF GaN-on-SiC HEMT
ゲイン	12dB
効率	40.4%
電源電圧	48V_{DS}

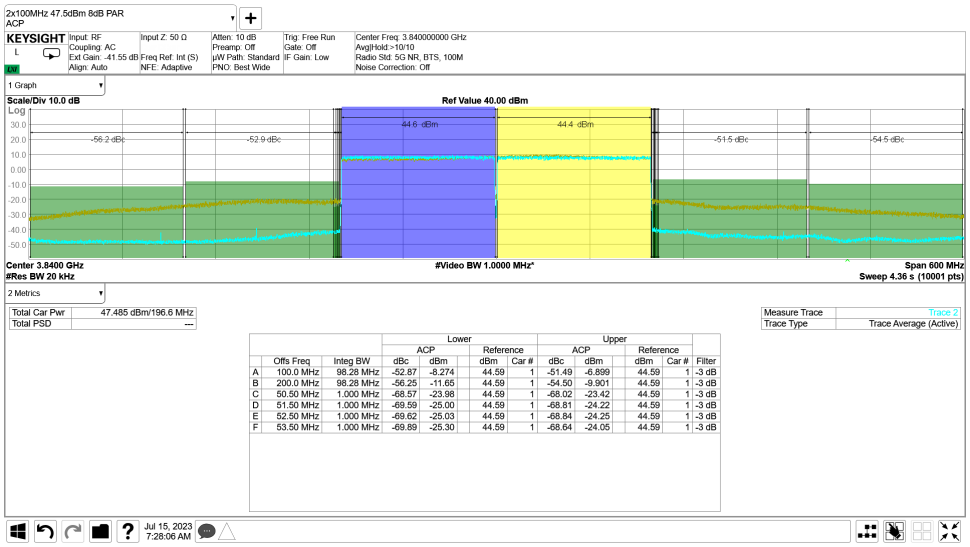
表 3. *パワー アンプ仕様*

パラメータ	値
TX インターフェイスレート	245.76MSPS
DPD レート	737.28MSPS
CFR ターゲット	8dB

表 4. *TX インターフェイス、DPD レート、CFR 構成*

(1) MACOM Technology Solutions Inc.、『**大電力 RF GaN アンプ 450W、48V、3700 ～ 4000MHz**』、データシート

[2] 例となる PA の線形化性能については、「関連情報」セクションの TI の DPD テスト レポートを参照してください
[3] 室温における標準的な測定条件。



			Lower				Upper				
			ACP		Reference		ACP		Reference		
	Offs Freq	Integ BW	dBc	dBm	dBm	Car #	dBc	dBm	dBm	Car #	Filter
A	100.0 MHz	98.28 MHz	-52.87	-8.274	44.59	1	-51.49	-6.899	44.59	1	-3 dB
B	200.0 MHz	98.28 MHz	-56.25	-11.65	44.59	1	-54.50	-9.901	44.59	1	-3 dB
C	50.50 MHz	1.000 MHz	-68.57	-23.98	44.59	1	-68.02	-23.42	44.59	1	-3 dB
D	51.50 MHz	1.000 MHz	-69.59	-25.00	44.59	1	-68.81	-24.22	44.59	1	-3 dB
E	52.50 MHz	1.000 MHz	-69.62	-25.03	44.59	1	-68.84	-24.25	44.59	1	-3 dB
F	53.50 MHz	1.000 MHz	-69.89	-25.30	44.59	1	-68.64	-24.05	44.59	1	-3 dB

図 4. *47.5dBm の出力電力および 8dB の PAR を備えた、3.84GHz N77 バンドにおける 2x100MHz NR キャリア向け AFE7769D および Macom GTRB424908FC の ACLR 性能*

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
DPD なし (オレンジ)	47.5dBm	–30.16dBc	–32.15dBc	–35.87dBc	–36.62dBc
DPD あり (青)	47.5dBm	–52.87dBc	–51.49dBc	–56.25dBc	–54.50dBc

表 5. *ACLR のまとめ*

まとめ

全体として、オペレータは 5G の展開に伴い、mMIMO、RRU、およびスモール セル無線のミックスを活用して、ネットワーク レベルでのスペクトル効率と電力効率を最適化しています。無線レベルにおいて、TI の RFIC は送信および受信のアイドル期間中に無線設計者に省電力の機会を提供します。さらに、TI の統合 DPD RFIC ソリューションにより、高い直線性性能を維持しながら、より電力効率の高い PA を使用できるようになります。設計者は、厳格な 3GPP 仕様を遵守しながら、DPD を活用してシステム効率を最適化することにより、無線の最大電力損失サブシステムの 1 つに対応できます。

参考資料

1. Ericsson、『**Ericsson MIMO Handbook**』
2. Ericsson、『**Ericsson Mobility Report**』
3. HELIOS Technologies、『**Helio's Blog: What is 5G-Oriented Indoor Innovative Solutions?**』
4. TI AFE7769D PA 線形化レポート
   a. テキサス・インスツルメンツ、『**DPD テスト レポート：SKY66522-11 パワー アンプ搭載 AFE77xxD**』、アプリケーション ブリーフ
   b. テキサス・インスツルメンツ、『**DPD テスト レポート：SKY66391-12 パワー アンプ搭載 AFE77xxD**』、アプリケーション ブリーフ
   c. テキサス・インスツルメンツ、『**DPD テスト レポート：GTRB267008FC パワー アンプ搭載 AFE77xxD**』、アプリケーション ブリーフ

重要なお知らせ：ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

© 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