

mMIMO と高精度のビームフォーミング テクノロジーによる 5G ネットワークの可能性の実現

Bhavesh Rathod

Applications engineer
Wireless Infrastructure

概要

ワイヤレスの新世代ごとに、データレートの向上とレイテンシの短縮に対する需要は大幅に増大します。5G は、拡張現実や仮想現実、産業用 IoT (IIoT)、自律システムなどのアプリケーションに不可欠な、数十ギガビット / 秒のスループットとサブミリ秒のレイテンシを実現し、この需要に対応できる技術の進歩を促進します。特に、人口密度が高い都市部やモビリティの高いシナリオで性能目標を達成するには、マッシブ多入力-多出力 (mMIMO) とビームフォーミングという 2 つのテクノロジーが必要です。

5G mMIMO システムは、大規模なアンテナ アレイを使用します。このアレイは通常、16 から 128 台の送信アンテナと、16 から 128 台の受信アンテナを使用します。これらのアンテナにより空間多重化が可能になり、同じ周波数で複数のデータストリームを同時に送信することで、追加の帯域幅や電力を必要とせず、スペクトル効率とユーザー容量を向上します。

フェーズド アレイ アンテナによって実装されるビームフォーミングで空間フィルタリングが可能になり、無線周波数 (RF) エネルギーを意図したユーザーに向けて集中させることで、干渉を低減し、信号対雑音比を向上できます。ビームフォーミングには、アンテナ間で一貫した位相アライメントが必要です。これにより、自由空間の経路損失と信号の妨害が大きな課題となる、より高い RF 周波数 (FR1 および FR2 帯域など) での性能が向上します。

これらの課題を克服するため、5G mMIMO とビームフォーミングを組み合わせると、高スループットで低レイテンシの通信が可能になり、スケラビリティを保証できます。これらのテクノロジーを組み合わせることで、ネットワーク事業者と開発者

は、高精度のアンテナ制御を使用して、周波数帯域を拡大する革新的なワイヤレス アプリケーションを構築できます。

mMIMO とビームフォーミングを実現するには、RF トランシーバを使用してビットを RF に、またはその逆に変換する必要があります。mMIMO とビームフォーミングのどちらも、空間的およびタイミング的な精度が必要なため、RF トランシーバのビット / RF 変換プロセスは、複数のアンテナ間で高精度のタイムスタンプと時間同期を行う必要があります。

5G 対応 RF トランシーバを搭載した無線機器は、4G と 5G の両方の無線で動作できます。第 3 世代パートナーシッププロジェクト (3GPP) の 5G 仕様によれば、5G は次の各分野で 4G より改良されています：

- 拡張モバイル ブロードバンド (eMBB)
- 産業用アプリケーション向けのクリティカル通信 (CC) と超高信頼性低レイテンシ通信 (URLLC)
- 大規模なモノのインターネット (mIoT)
- 柔軟なネットワーク運用により、適応性とネットワーク最適化を可能にするとともに、ネットワーク スライス、クラウドネイティブなインフラストラクチャ、ソフトウェア定義ネットワークによって、多様なアプリケーションとエンドユーザーのニーズに対応します。

5G mMIMO とは

5G MIMO は、5G ネットワークシステムで使用される無線通信テクノロジーです。代表的な MIMO 無線は、単一の無線ユニットで 16 から 32 本の送信および受信アンテナを使用します。これに対して mMIMO は 64 本、128 本、またはさらに多くのアンテナを使用します。このように多くのアンテナを単一

の無線ユニットに搭載することで、より多くのユーザーに高いデータレートを提供できます。

mMIMO ベースの 5G ネットワークは空間多重化をサポートしているため、帯域幅や送信電力の増加なしにチャンネル容量を大幅に増やすことができます。

業界で、ミリ波 (mmWave) (24GHz ~ 40GHz) などのより高い 5G 周波数への移行が進むにつれ、ビームフォーミングがさらに重要になっています。mmWave 周波数用のアンテナは小さいため、制限された空間に多数のアンテナを配置できます。mMIMO は、スループットとカバレッジを向上させるだけでなく、リソース (帯域幅、電力、無線) の追加なしで同時に複数のユーザーをサポートできるため、実は非常に有益であることが証明されつつあります。このような理由から、5G mMIMO はより高いデータレート、非常に低いレイテンシ、および 5G ネットワーク向けの 3GPP によって定義された大量の接続性目標を達成するために不可欠なテクノロジーです。

5G mMIMO とビームフォーミング

ビームフォーミングは、5G ワイヤレス通信システムに必要な主要技術の 1 つです。5G の超広帯域周波数は、6GHz 以下の周波数範囲と mmWave 周波数帯で動作します。この周波数スペクトルは、信号の減衰が大きいうえ、経路上にある物体からの干渉が発生しやすく、さらに mmWave は 4G ほど簡単に壁を透過できません。そのため、5G では特に高密度の都市部への導入において、高いデータレートを実現するため、ビームフォーミングによって特定の地域に電力を集中させることが必要です。図 1 を参照してください。

ビームフォーミングのもう 1 つの利点は、3GPP のリリースで定義されているように、ビームステアリングやビームトラッキングを使用して、移動中の車両のようなモバイル ターゲットとの接続を維持できることです。ビームフォーミングには、デジタル、アナログ、ハイブリッドのいずれかのビームフォーミングアーキテクチャを使用できます。このテクノロジーの背後にある数学について解説しましょう。

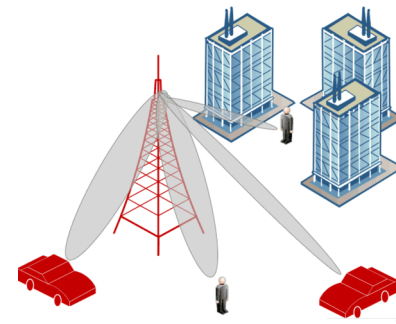


図 1. 人口密度の高い都市部で 5G ネットワークを介してより多くの人々を接続するためにビームフォーミングがどのように役立つか。

ビームフォーミングの基礎となる数学

式 1 は、チャンネル上の信号伝播をモデル化したもので、式 2 は詳細な H 行列です。行列 H の各要素 h_{mn} は、各送信アンテナ n から各受信アンテナ m までの複素ゲインを表します。ここで、 ρ は受信機での信号、 τ は送信された信号、行列 H はチャンネルの特性行列です。行列 H は、すべてのチャンネルのゲイン応答と位相応答を表します。

$$\rho = H \times \tau \quad (1)$$

$$\rho = \begin{bmatrix} h_{11}h_{12} \cdots h_{1n} \\ \vdots \\ h_{m1}h_{m2} \cdots h_{mn} \end{bmatrix} \tau \quad (2)$$

線形プリコーディングで、式 3 は送信信号 τ を次のように計算します：

$$\tau = \Sigma w \times s \quad (3)$$

ここで s は送信されるシンボル、 w は線形プリコーディングベクトルです。

プリコーディングベクトルは、各送信チャンネルの相対位相差を調整することにより、ビームの方向を決定します。

プリコーディングベクトルを計算するには、H 行列を推定します。それぞれの送信機は、相対的な位相差を決定論的に持つことが重要です。この条件が満たされない場合、推定された H 行列と計算されたプリコーディングベクトルは有効になりません。ビームフォーミングにおいて、送信された信号を受信側で建設的に結合するには、送信された信号の位相精度が必要です。

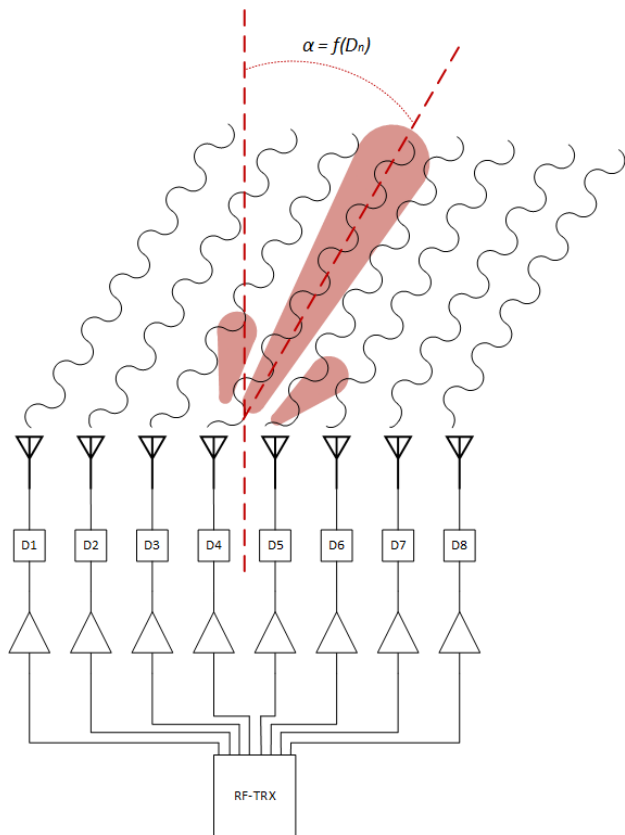


図2. 時間同期アンテナ間の位相の調整によって形成される(8チャンネルのトランシーバを使用する)ビーム。

無線ユニットに複数のアナログフロントエンドデバイスがある場合、1つのmMIMOから行われる複数の送信の出力フェーズを同期することは困難です。128アンテナのmMIMOシステムには、8～16チャンネルのアナログフロントエンドデバイスが搭載されます。

mMIMOシステムの現在の課題

代表的な5G mMIMOトランシーバでは、1つの基板に複数のRFトランシーバが搭載されます。64チャンネル構成の場合、基板には8チャンネルのトランシーバを8つ、または16チャンネルのトランシーバを4つ実装できます。信頼性の高いビームフォーミングを実現するには、システムのライフサイクル全体にわたってすべての送信パスと受信パスが位相同期されている必要があります。このサイクルには、最初の起動、その後でのアナログフロントエンドと特定用途向け集積回路(ASIC)やフィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)との間でのJESD204BおよびJESD204Cリンクの再初期化、パワーオンリセットが含まれます。これは、すべての無線シス

テムの設計者が直面する基本的な課題です。決定論的な相対位相関係により、複合アンテナアレイがビームを予測可能に形成し、方向を操作することが保証されます。

トランシーバに内蔵された数値制御発振器(NCO)の内部位相シフト機能を利用することで、マルチエレメントアンテナアレイ全体に存在する残留静的位相オフセットのみを補償できます。このオフセットは、起動サイクル、JESD再リンクイベント、パワーサイクルの全体にわたって不変に保たれるため、NCOキャリブレーションを1回行うだけですべてのチャンネルの位相が同期され、ビームフォーミング性能が維持されます。しかし、無線のすべてのRFトランシーバが時間同期されている根本的な必要性は残っています。

TIのAFE80xxおよびAFE81xx RF ICファミリには、mMIMO要件を達成するために役立つ複数の機能が搭載されています。

シングルショット sysrefモードの使用

ほとんどのシステムにおいて、デフォルトの動作モードは連続sysrefモードで、このsysrefは周期的な低周波信号です。ただし、AFE8092、AFE8030、AFE8128、AFE8190、AFE8192の「シングルショット」システムリファレンスクロック(sysref)モードを使用して、マルチデバイス同期を実現することもできます。シングルショットモードでは、sysref信号は単一のパルスで、ボード上のすべてのアナログフロントエンドへ同時に供給されます。すべてのアナログフロントエンドが、リファレンスクロックに対して正確に同じ瞬間にsysrefを受信すると、当然位相同期になります。

この方法を実装する際の課題の1つは、sysrefとリファレンスクロックを、どのようにして基板上の複数のデバイスへ差動配線するかです。プリント基板内の無線レベルでは、sysrefとリファレンスクロックの配線のタイミングを、リファレンスクロックに対してピコ秒レベルに維持する必要があります。

図3に示すように、AFE8092、AFE8030、AFE8128、AFE8190、AFE8192を使用するシングルショットのsysrefモードには、特定のシーケンシングが必要です。

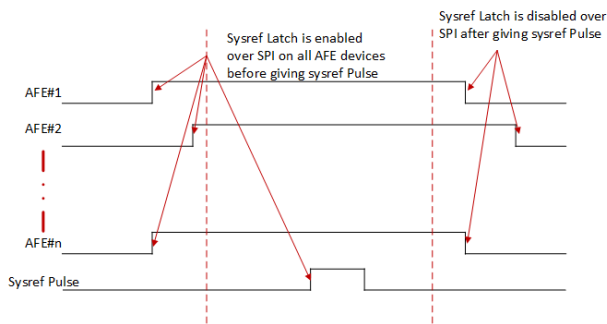


図 3. シングルショット sysref モードのタイミング図。

GPIO による共通タイムスタンプ信号を使用して RF IC を時間同期する

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できます。このモードでは、sysref は連続 sysref モードで動作できます。すべてのアナログ フロントエンド デバイスは、GPIO ベースのラッチ イネーブル信号を受信した後で、最初のリファレンス クロックの立ち上がりエッジにラッチされます。それ以降のすべてのパルスは無視されます。

この方法では、CMOS GPIO 信号をすべてのアナログ フロントエンドに配線するだけで済むため、シングルショット sysref 方式と比べて、実装が比較的簡単になります。基板上で、複数のアナログ フロントエンド デバイスに同じ長さで作動信号を配線するのは困難な場合があるためです。一方でこの方法では、ホストの ASIC からデバイスごとに 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、この方法は適していません。

図 4 に示すように、GPIO ベースの制御を使用して AFE8092、AFE8030、AFE8128、AFE8190、AFE8192 で sysref ラッチを有効にするには、特定のシーケンシングが必要です。

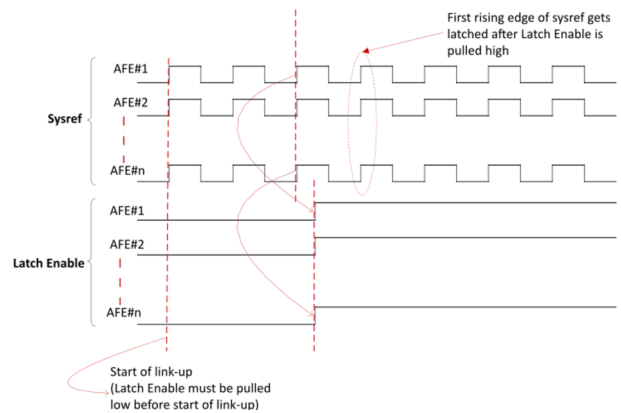


図 4. GPIO ベースの制御を使用して sysref ラッチ モードを有効にするタイミング図。

NCO の選択

位相同期を実現する最も簡単な方法は、sysref 周波数の整数倍の送信機および受信機の NCO を選択することです。この方法は、複数のアナログ フロントエンド デバイス間で送信の NCO を同期させるための追加のメカニズムを必要としないため、連続 sysref モードでも使用できます。

この方法は、既存のハードウェアに変更を加えることなく位相同期を実現できるため、NCO 周波数の制限が最終機器で許容される場合に最適です。アナログ フロントエンド デバイスで再リンクまたはパワー サイクルを実行するには、特定のソフトウェア シーケンスに従う必要があります。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 sysref エッジにラッチされても問題ないことを、図 5 に示します。

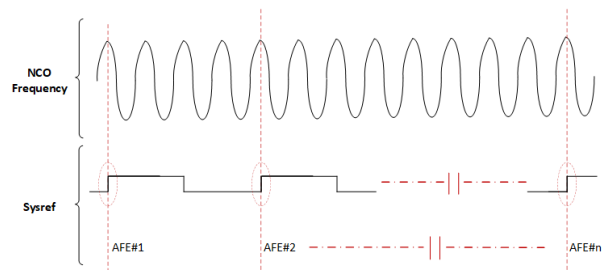


図 5. NCO 周波数が sysref 周波数の 4 倍に等しくなることを示す例。

まとめ

mMIMO とビームフォーミングのテクノロジーの統合は、5G ネットワークの可能性を最大限に引き出し、これまでにないデータ レートと非常に低いレイテンシを可能にするうえで重要です。これらのテクノロジーは、大型のアンテナ アレイと高精度

の空間フィルタリングを活用することで、高周波信号の伝搬の課題を克服し、多様なシナリオにおいて信頼性とスループットの高い通信を確実に実現します。3GPP 仕様に概説されているように、eMBB、CC、URLLC、mIoT、および柔軟なネットワーク運用における 5G の機能拡張は、mMIMO とビームフォーミングの相乗効果によるものです。

TI の AFE8092、AFE8030、AFE8128、AFE8190、AFE8192 トランシーバは、拡張現実と仮想現実、IIoT、自律システム、さらに高度なワイヤレス アプリケーションをネットワーク事業者がサポートするために役立ちます。

著者について

Bhavesh Rathod は、テキサス インストルメンツのアプリケーション エンジニアで、RF アプリケーションとワイヤレス インフラストラクチャ ソリューションを専門としています。Bhavesh は、ポストシリコン検証と組み込みシステムの実践的な専門知識を活かし、最先端のワイヤレス インフラストラクチャ テクノロジーの開発をサポートします。同氏はパデュー大学で電気およびコンピュータ工学の修士号を取得し、プネー工科大学で電気工学の学士号を取得しました。Bhavesh は、受動的に安定化された通信衛星 Swayam に関する研究により、2017 年に Gandhian Young Technological Innovation 賞を受賞しました。

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスト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。

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