



Tokyo Tech

Press Release

2024年7月10日

東京工業大学

6G に向けた高効率・低消費電力の ミリ波帯 MIMO フェーズドアレイ受信機を開発

－新開発「時分割 MIMO」技術で高データレート無線通信を実現－

【要点】

- 高面積効率の 28 GHz 帯 4 ストリーム時分割 MIMO フェーズドアレイ受信機を開発。
- 回路の時分割再利用により回路規模を削減し、低消費電力、省面積で高速通信を実現。
- IoT／モバイル端末に搭載可能で、6G の高データレート無線通信システムの実用化を加速、衛星通信への応用にも期待

【概要】

東京工業大学 工学院 電気電子系の岡田健一教授らの研究チームは、次世代の 6G（用語 1）に向け、高面積効率・低消費電力で高ビットレート動作が可能な新しい MIMO 技術（用語 2）によるフェーズドアレイ（用語 3）受信機を開発した。

第 5 世代移動通信システム（5G、用語 4）では、ミリ波（用語 5）帯の周波数を用いて通信速度の向上を図っているが、さらなる高速化のために、より高い周波数の活用や大規模 MIMO（用語 6）の利用が期待されている。しかし従来の MIMO 技術は空間分割（用語 7）により複数の無線経路を確立しているため、アンテナ数と MIMO ストリーム数の積に比例して回路規模が肥大化し、大規模 MIMO の集積化が困難になるという課題があった。

本研究では高速同期ビーム切り替えをフェーズドアレイ部で実現、MIMO ストリーム数に回路規模が依存しない時分割（用語 8）の MIMO 技術を新たに開発した。時分割による回路再利用により回路規模を大幅に削減し、MIMO による高データレートを実現しつつも、低消費電力かつ省面積コストのフェーズドアレイが実現できた。

開発した時分割 MIMO フェーズドアレイ受信機 IC は、65 nm 世代のシリコン CMOS プロセスで作製した。この IC を、アンテナを有するプリント基板に実装し、OTA 測定（用語 9）を行った結果、5G NR 規格準拠の 4 ストリーム信号の MIMO 通信に成功し、9.6Gbps の高ビットレート動作を実証した。これまで発表されている最新の 5G フェーズドアレイ受信機の中でも最高のビットレートを、最高の面積効率で実現した。

本研究で開発した受信機は 5G 及び 6G 向けの IoT やモバイル端末に搭載できるため、衛星通信への応用など、高ビットレートの特長を生かした新しい通信サービスの実用化・アプリケーション展開を大きく進展させる成果といえる。

本研究成果は、6月16日～20日に米国ホノルルで開催された「2024 IEEE Symposium on VLSI Technology & Circuits」で発表された。

●背景

デジタルトランスフォーメーション（DX、用語 10）の加速により、移動通信システムに求められる通信容量は指数関数的に増加している。このような社会的要求に応えるため、第 5 世代移動通信システム（5G）では史上初めてミリ波帯が用いられ、広帯域を生かした高速・大容量通信の大規模商用サービスの展開が進んでいる。その先の 6G では、さらなる高速化のために、より高い周波数の活用や大規模 MIMO の利用が期待されている。

空間分割多重を用いたマルチビームの MIMO 技術は複数の信号ストリームを同時に利用することで高ビットレートの伝送を実現するもので、高性能・高電力効率伝送を目指した MIMO 受信機の研究開発が盛んに行われている。特にアンテナ素子それぞれにアナログ-デジタル変換回路（A/D 変換回路）を備えて、その出力をデジタル処理することでビームフォーミングを行うデジタル MIMO 技術が、主としてマイクロ波帯で広く用いられてきた。しかしながら、ミリ波帯の無線通信においてマイクロ波帯と同じようにデジタル MIMO 技術を用いようとした場合、通信距離を延ばすために多数のアンテナを用いるため回路規模が大きくなりすぎることから、ミリ波帯ではデジタル MIMO 方式を適用できないことが課題とされてきた。

そこで、ミリ波帯ではアナログビームフォーミング方式を踏襲しつつ、MIMO ストリーム数分だけビームフォーマーを備える全接続型の回路構成（図 1 左）が用いられてきた。ただ、この全接続型の MIMO 対応ビームフォーマーにおいても、同時に伝送する MIMO ストリーム数を増やすとそれに比例して回路規模、消費電力が増大してしまうという課題がある。すなわち、全接続型の MIMO 対応ビームフォーマーにおいてアンテナの数を m 、MIMO ストリームの数を n とすると、回路の規模は $m \times n + n$ となり、MIMO ストリーム数 n を増やせば飛躍的に回路規模が肥大化し、ビームフォーマーの実現が現実的でなくなってしまう。そのため、高ビットレート化のためのストリーム数の増加にはチップ面積、消費電力の観点から、実質的な上限が存在する。実際に、これまでの研究報告では、二次元アレイの実装が可能な小型なビームフォーマーにおいて、2 ストリームまでのものが上限であった。上記の背景から、MIMO ストリーム数に回路規模が依存しない面積効率、低消費電力特性に優れた現実的な MIMO 対応ビームフォーマーの実現が望まれていた。

また、近年、地球上のほぼどこでも通信が可能で災害の被害を受けにくい衛星電話等の衛星通信サービス普及の期待が高まっているが、衛星通信では頻繁にリンクする衛星を切り替える必要があり、多接続が可能な新しいビームフォーマー技術が求められている。

●研究成果

本研究では、信号が変化するよりも速くビーム方向を切り替えることで、多数の MIMO ストリームを同時に受信することができる時分割 MIMO（図 1 右）を新たに考案し、回路規模増大の問題を解決した。具体的には、高速同期ビーム切り替えをフェーズドアレイ部で実現することで、MIMO ストリーム数に回路規模が依存しない MIMO 受信機を新たに開発した。時分割による回路再利用により MIMO にかかる回路規模を大幅に削減で

きることから、MIMO による高データレートを実現しつつも、低消費電力かつ省面積コストのフェーズドアレイが実現できる。

時分割 MIMO 動作は高速切替**移相器**（用語 11）と同期技術により、異なる MIMO ストリームを高いアイソレーションをもって切り替えることで実現した。本研究で開発した高速切替移相器は 0.15 ns（ナノ秒）という従来比 20 倍以上の高速スイッチングが可能で、これより 400 MHz 帯域の信号周期 2.5 ns の間に、4 回のビームパターンの切替を行い、4 ストリームの時分割 MIMO 動作を可能にした（図 2）。

開発した時分割 MIMO フェーズドアレイ受信機 IC（図 3）は、雑音除去と電流再利用技術を用いた低雑音増幅器と高速切替移相器、利得可変増幅器からなる受信回路を 8 系統有し、電力合成回路や制御回路も 1 チップに集積化した。本 IC は 65 nm（ナノメートル）世代のシリコン CMOS プロセスで作製、8 個のパッチアンテナを有するプリント基板に実装して OTA 測定を行った。5G NR 規格準拠信号を用いて 1 m の距離で評価した結果、4 ストリームの MIMO 通信が確認できた。**64 QAM**（用語 12）で 400 MHz 帯域の 4 ストリームの MIMO 通信により、9.6 Gbps の伝送速度を達成した。本 IC の 1MIMO ストリーム当たりのチップ面積は僅か 0.1 mm²、消費電力は 8 mW で、これまで発表されている最新の 5G フェーズドアレイ受信機の中でも最高の面積効率で、最高のビットレートを実現した（図 4）。

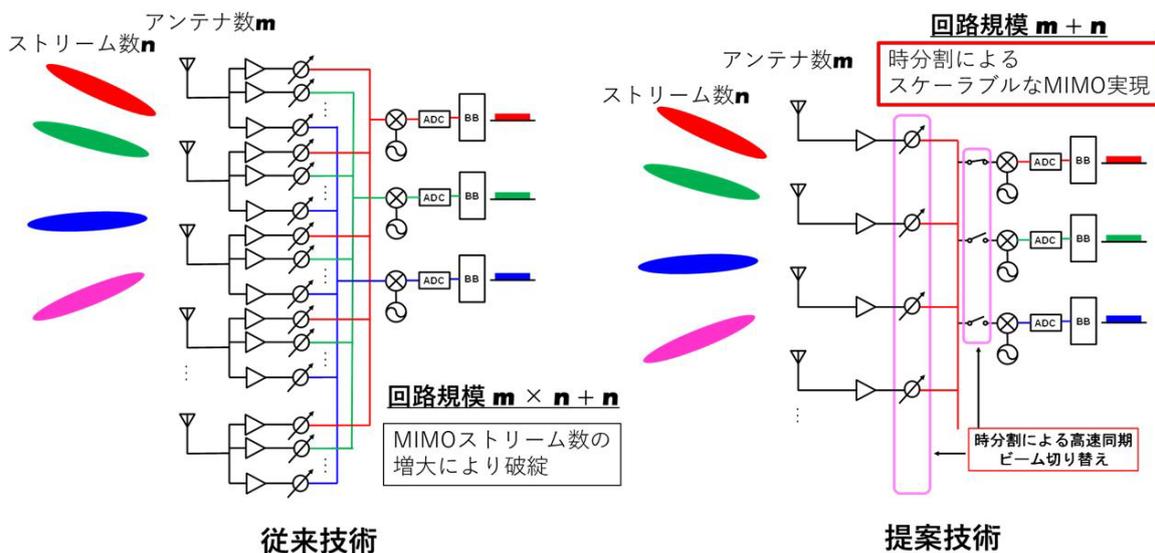


図 1. 開発した時分割 MIMO フェーズアレイ技術と従来技術の比較

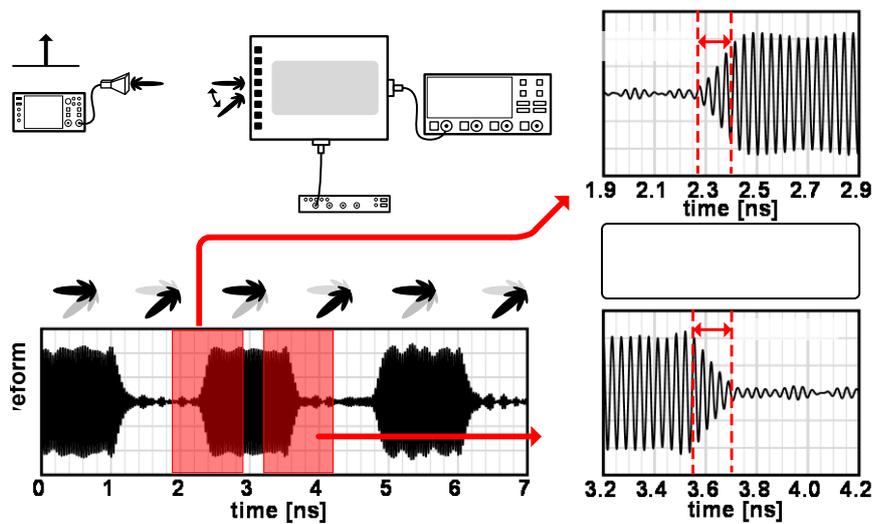


図 2. 開発した高速切替移相器によるビーム切替時間測定結果

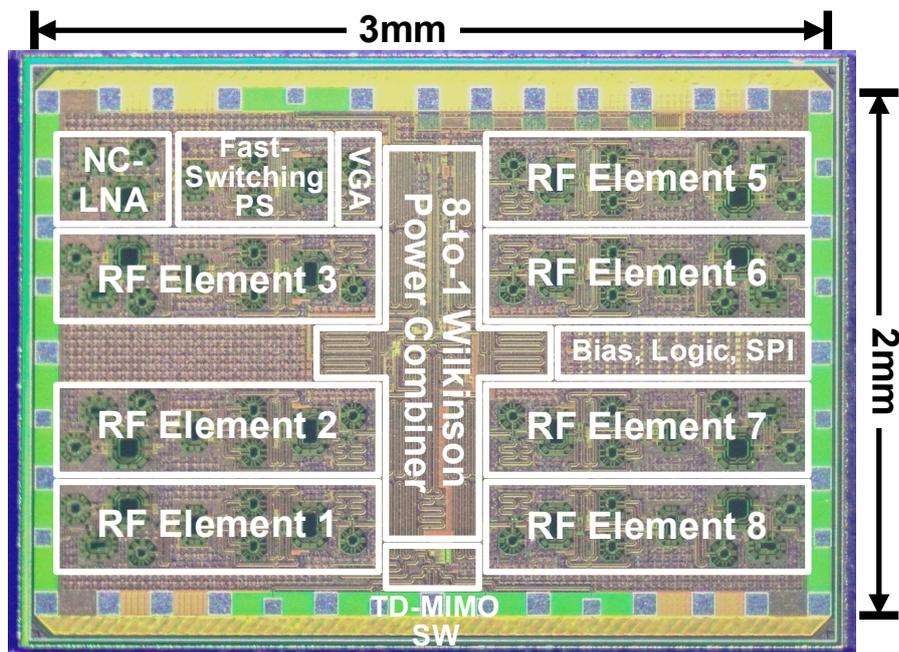


図 3. 開発した時分割 MIMO フェーズドアレイ受信機 IC のチップ写真

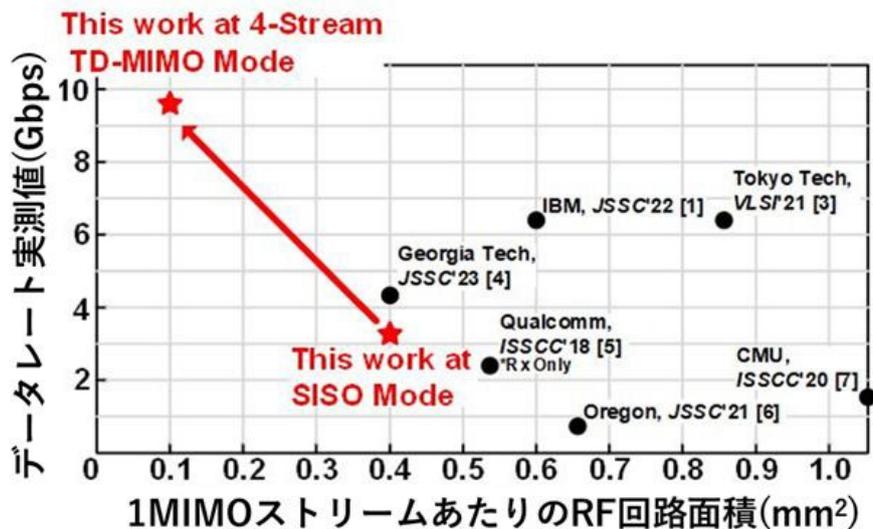


図4. 開発した時分割 MIMO チップのデータレートとストリームあたりの面積の比較

●社会的インパクト

本研究成果によって、回路規模を増加させることなく、MIMO ストリーム数を増やすことが可能になり、大規模 MIMO を用いた 6G ならではの高速データレート利用した、新しい通信サービスの実用化が今後ますます進展していくものと思われる。特に、時分割による回路再利用により、MIMO にかかわる回路規模を大幅に削減し、MIMO による高速データレートを実現しつつも、低消費電力かつ省面積（コスト）なフェーズドアレイが実現可能となり、大規模 MIMO を IoT 端末／モバイル端末への実装を現実的なものとした。このことは 6G の高速データレート無線通信システムの実用化を加速するうえで大きな意味がある。

また本研究成果の受信機は、すでに普及している通常の CMOS プロセスによって IC 化が実現されているため、低コスト化・小型化が可能であり、IoT／モバイル端末をはじめとするさまざまなアプリケーションに展開できる。そうしたアプリケーションを通じて、高速・大容量 6G 通信の社会実装を加速させるという意味で、本成果が与える社会的インパクトは非常に大きいといえる。

●今後の展開

今後は、今回開発した技術のサブテラヘルツ帯（用語 13）等のさらなる高周波帯への展開を図るとともに、高機能化・高性能化・小型化・低コスト化などを通して、本技術の実用化に向けた研究開発を推進していく。

また、最近急速に開発・実用化が進んでいる衛星通信において、リンクしている衛星を切り替える際に **Make-Before-Break (MBB:メークビフォアブレイク)**（用語 14）が必要となるが、本研究で開発した時分割 MIMO 技術はこれを容易に実現できることから、地上側、衛星搭載側含め本技術を用いた新しいアプリケーションの展開が期待できる。

●付記

本研究は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究「継続的進化を可

能とする B5G IoT SoC 及び IoT ソリューション構築プラットフォームの研究開発」(JPJ012368C00801) の成果の一部である。

【用語説明】

- (1) **6G**：第 5 世代移動通信システム (5G) の次の世代の移動通信システム。
- (2) **MIMO 技術**：MIMO (multiple input multiple output) とは、複数の送受信アンテナを使用することで複数の無線通信経路を確立し、利用する技術であり、帯域あたりの伝送速度の向上が可能である。
- (3) **フェーズドアレイ**：複数のアンテナをアレイ状に配置し (アレイアンテナ)、各アンテナへ位相差・振幅差をつけた信号を給電する技術。ビームフォーミングの実現に利用される。
- (4) **第 5 世代移動通信システム (5G)**：2019 年に展開を開始した、国際的な移動通信ネットワークの第 5 世代技術標準。現在ほとんどの携帯電話に用いられている第 4 世代移動通信システム (4G) ネットワークの後継の規格である。4G までは 6 GHz 以下の周波数帯が用いられてきたが、5G ではその 6 GHz 以下の周波数帯と併用してミリ波も利用することで、大幅な通信速度の向上を可能にしている。
- (5) **ミリ波**：波長が 1~10 mm、周波数が 30~300 GHz の電波。
- (6) **大規模 MIMO**：大規模 MIMO は、より多数のアンテナを用いる MIMO 技術の総称である。Massive MIMO (マッシブマイモ) と呼ばれることが多い。
- (7) **空間分割**：空間的に別の経路に分けることにより、多重化を実現する方法。
- (8) **時分割**：同じ経路でも時間で区切って異なる時間スロットを使用することで多重化を実現する方法。
- (9) **OTA 測定**：OTA は Over The Air の略。実際に電波を飛ばして測定すること。
- (10) **デジタルトランスフォーメーション (DX)**：5G、IoT、AI 等の通信・デジタル技術を活用し、浸透させることで、人々の生活や社会の構造などをより望ましい方向に変化させていく概念をいう。
- (11) **移相器**：入力した信号に対して、位相を一定の角度でシフトした信号を出力する回路・装置。
- (12) **64QAM**：16 Quadrature Amplitude Modulation の略。搬送波の振幅および位相変化の 16 値を用いる変調方式。
- (13) **サブテラヘルツ帯**：テラヘルツ (THz) に迫る高い周波数帯で、一般には 100 GHz ~1 THz あたりを指すが、移動通信システムでは 100 GHz 近辺、90 GHz~300 GHz あたりを言うことが多い。
- (14) **Make-Before-Break (メークビフォアブレイク)**：スイッチングデバイスにおいて、前の接続がオープンになる前に新しい接続経路を確立すること。このことによって、スイッチされる経路が開放になることを避けることができる。

【発表情報】

本研究成果は 6 月 16 日 (現地時間) からハワイ (ホノルル) で開催された国際会議 2024

IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits の Session C9: Wireless Transceivers
において、「A 28GHz 4-Stream Time-Division MIMO Phased-Array Receiver Utilizing
Nyquist-Rate Fast Beam Switching for 5G and Beyond (Late News)」の講演タイトルで発
表された。

講演セッション：Session C9: Wireless Transceivers

講演時間：6月18日 17時5分（現地時間）

講演タイトル：A 28GHz 4-Stream Time-Division MIMO Phased-Array Receiver Utilizing
Nyquist-Rate Fast Beam Switching for 5G and Beyond (Late News)

会議 Web サイト：<https://www.vlssymposium.org/>

【問い合わせ先】

東京工業大学 工学院 電気電子系 教授

岡田 健一（おかだ けんいち）

Email: okada@ee.e.titech.ac.jp

TEL / FAX: 03-5734-3764

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報課

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661