

超多素子アンテナシステムでの マルチビーム空間多重・制御技術

西本 浩*
福井 範行**

Multi-beam Spatial Multiplexing and Beam Control Technologies on Massive-element Antenna Systems

Hiroshi Nishimoto, Noriyuki Fukui

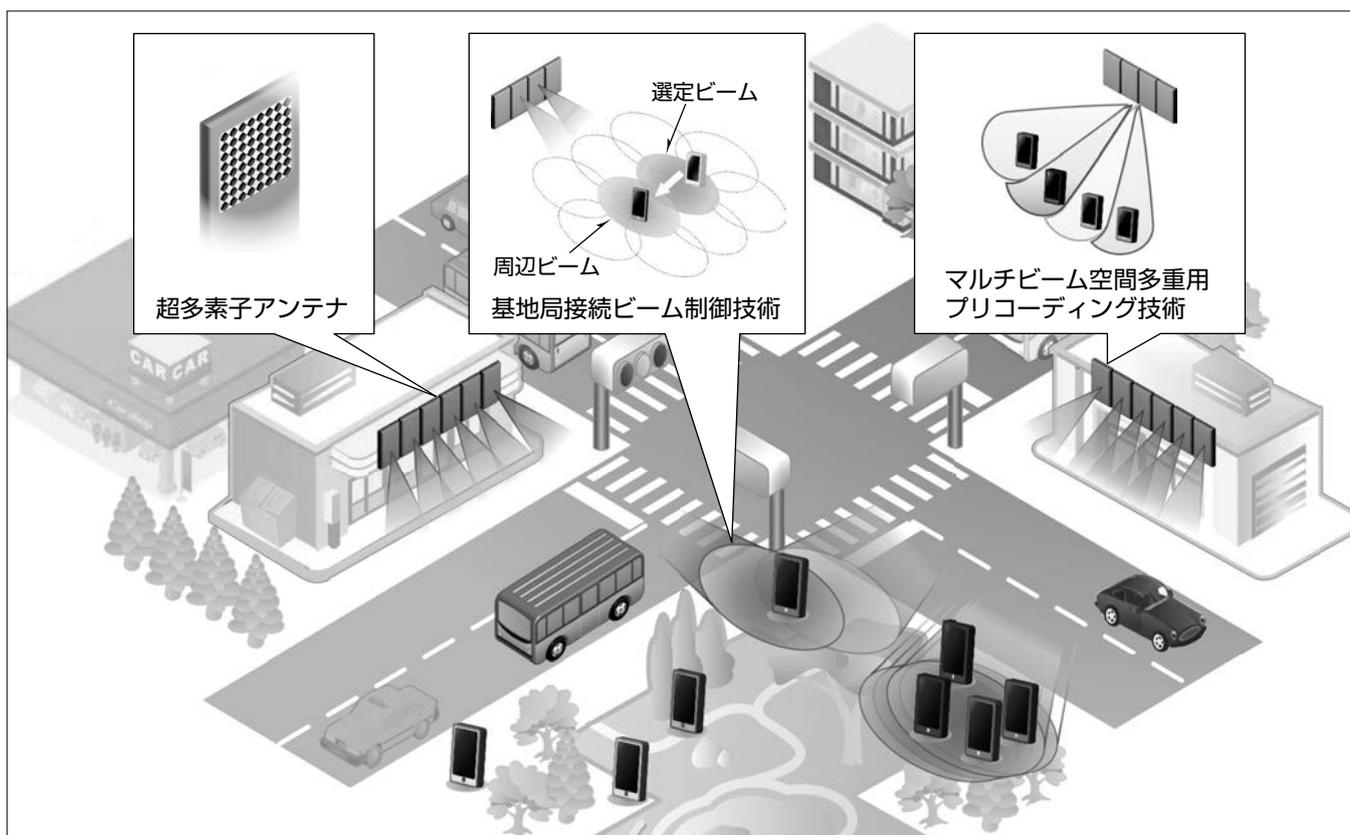
要 旨

移動通信トラフィックの急増に対応するため、第5世代移動通信システム(5G)が注目を集めている。

5Gは、①大容量通信、②超高信頼・低遅延通信、③大規模M2M(Machine-to-Machine)/IoT(Internet of Things)通信、を基本ユースシナリオとしている。これらを実現するために、5Gでは広帯域が確保しやすい高SHF(Super High Frequency)帯・EHF(Extremely High Frequency)帯の使用を視野に入れており、課題となる伝搬減衰に対して超多素子アンテナを用いたビームフォーミングによる利得で補償する。しかし、ビームフォーミングを適用した場合、ビーム間の干渉及び端末移動によるビームエリア外れが問題となる。

三菱電機はこの問題に対し、端末が密集する環境でも、ビーム利得を損なうことなく干渉抑圧されたビームを少ない演算量で形成できる、非線形ブロック多重対角化法によるマルチビーム空間多重用プリコーディング技術、及び端末が基地局へ接続要求している間に隣接するビームエリアへ移動しても確実に接続を確保するために、複数ビームを利用する基地局接続ビーム制御技術を開発した。

計算機シミュレーションで評価した結果、マルチビーム空間多重用プリコーディング技術によって5Gの要求条件である伝送速度20Gbpsを確保できる領域が拡大し、基地局接続ビーム制御技術によって基地局切替え時の接続を確保する領域が拡大することを確認した。



5G超多素子アンテナシステム向けマルチビーム空間多重・制御技術

マルチビーム空間多重用プリコーディング技術は、ビーム利得を損なうことなく干渉抑圧されたビームを少ない演算量で形成できる非線形ブロック多重対角化法によって、密集環境に存在する端末の高スループットを維持する。基地局接続ビーム制御技術は、端末が基地局へ接続要求する際に複数ビームを利用して接続制御用信号送受信を行うことで、端末移動によるビームエリア外れを防止する。

1. ま え が き

スマートフォンを始めとする多様なアプリケーションの普及に伴う通信トラフィック急増への対応として、第5世代移動通信システム(5G)が注目を集めている。5Gでは、①更なる大容量通信、②重要インフラへ適用可能な超高信頼・低遅延通信、③大規模なM2M/IoT通信の三つを基本ユースシナリオと定義している。また、これらの具体的なサービス・アプリケーションとして、トラフィックが集中する大規模イベント中の通信、マルチアングル/リアルタイム映像伝送、4K/8Kデジタルサイネージ、自動運転、M2M機器連携などが想定されている。

ITU-R(International Telecommunication Union Radio communications sector)では、5Gの要求条件として最大伝送速度20Gbps等の8種の指標を示している⁽¹⁾。周波数の観点で見ると5Gの運用周波数帯は、6GHz以下の低SHF帯と6GHz以上の高SHF帯・EHF帯に大別され、後者は広帯域を確保しやすい特長があり、大容量通信に適している。

5Gでは、移動通信標準化団体3GPP(3rd Generation Partnership Project)を中心にして新しい通信技術が検討されている。その中でも、数百以上のアンテナ素子を用いて大容量通信を実現するMassive MIMO(Multiple Input Multiple Output)技術、同時多数接続を実現する無線アクセス技術が盛んに検討されている。日本を含め主要な先進国では、これらの技術をいち早く実用化して2020年のサービスインを実現するため精力的に研究開発に取り組んでいる。

本稿では、5G無線アクセス技術として当社が開発したマルチビーム空間多重・制御技術について述べる。

2. ハイブリッド型Massive MIMO構成

5Gでは以前よりも高い周波数が使用される見込みであるが電波の伝搬減衰が大きくなるという課題がある。この課題に対しては、端末の方向に電波を集中させて放射するビームフォーミングによって電波の伝搬減衰を補償できる。さらに端末方向以外への不要な電波放射を抑制でき、異なる角度に存在する他の端末に向けて別のビームを同時形成するマルチビーム空間多重が可能となる。

高SHF帯・EHF帯でマルチビーム空間多重を実現する基地局アンテナシステム構成として、アナログビームフォーミングとデジタルMIMO信号処理を組み合わせたハイブリッド型Massive MIMO構成が注目されている⁽²⁾。図1にハイブリッド型Massive MIMO構成を示す。Massive MIMOは、数百以上のアンテナ素子を制御することによって、電子的にビームを各端末方向に形成し、同時に多数の端末との通信を実現する技術である。ハイブリッド

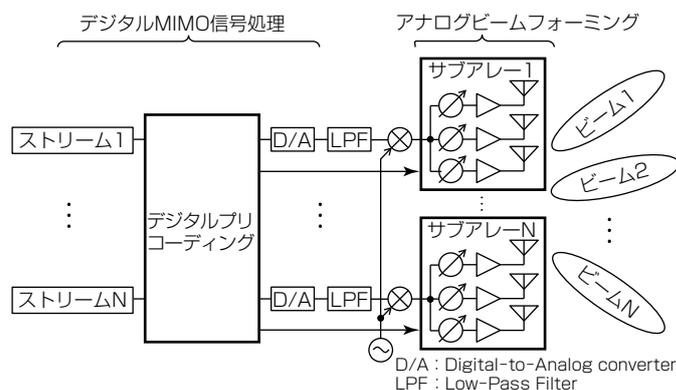


図1. ハイブリッド型Massive MIMO構成

型Massive MIMO構成では、一つのサブアレーが1本のビームを形成し、N個のサブアレーを用意することによって同時にN本の独立なビームを形成する。サブアレーとしては人工衛星などで実績があるフェーズドアレーアンテナが有効である。サブアレーはアナログ処理によって容易にビームフォーミングが可能であるが、他端末に対してアナログ特有のサイドローブ干渉が生じる。この干渉を抑圧するため、デジタルプリコーディングを導入して干渉方向へヌルを形成する。これによってN本の独立なビームを空間多重することができる。この構成でのデジタルプリコーディングは、各アンテナ素子ではなくビーム空間多重するストリームに対して適用されるため、多数のアンテナ素子が想定される高SHF帯・EHF帯のシステムに適している。

3. マルチビーム空間多重用プリコーディング技術

2章で述べたデジタルプリコーディングの一手法として、線形型のブロック対角化法(Block Diagonalization: BD)がある。この手法は端末同士の位置が離れている場合に高いスループットを実現できる。しかし大規模イベントや繁華街などの端末が密集する環境ではビーム同士が重なり干渉が発生する。BDでは干渉となる信号電力を下げることによって干渉を低減可能だが、電力が下がるとスループットが低下するという問題がある。BDに代わり、非線形演算によって干渉を事前減算して送信する非線形プリコーディングを適用することで、ビーム間干渉を効率的に除去でき、端末が密集する環境でも高いスループットを維持可能である。しかし従来の非線形プリコーディングは端末数の二乗に比例して演算規模が大きくなるという課題があった。

そこで、当社は、鋭いビーム形成が可能なMassive MIMOの利点を活用した非線形ブロック多重対角化法(Non-Linear Block Multi-Diagonalization: NL-BMD)を開発した⁽³⁾。図2にNL-BMDのイメージを示す。この手法ではブロック多重対角化(BMD)演算と非線形演算という二つの信号処理を組み合わせている。BMD演算では隣接端末に干渉を与えることを許容して所望端末に対して強いビームを形成する。しかし、そのままでは隣接端末が干渉

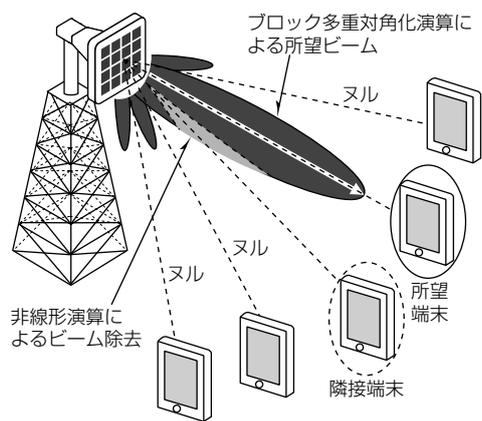


図2. 非線形ブロック多重対角化法のイメージ

を受けてしまう。そこで、非線形演算で余分なビームをあらかじめ除去する。非線形演算は音響分野のノイズキャンセリング技術と同様の原理であり、干渉信号を基地局側で事前に減算しておく手法である。BMD演算と組み合わせることで、非線形演算の適用範囲を隣接端末だけに限定でき、従来の非線形プリコーディングに比べ演算規模を1/4に削減できる。これによって、開発したNL-BMDでは、端末が近接してビームが重なるケースでも演算量を抑えつつ高スループットを確保できる。

シミュレーションによって開発手法の効果を評価した。表1のパラメータに従い、端末8台をマルチビーム空間多重した場合の信号対干渉雑音電力比(Signal to Interference and Noise power Ratio : SINR)のヒートマップ例を図3に示す。図中、(x, y) = (0 m, 0 m)に基地局アンテナが高さ10mで設置されており、端末8台が1.5m間隔で格子状に稠密(ちゅうみつ)配置されている。従来のBDは近接した端末間の干渉を抑圧するためビーム利得が大きく低下し、所望端末位置のSINRが著しく劣化する。一方、開発したNL-BMDは強いビームを維持するため、所望端末位置でSINRを確保しながらほかの端末に干渉を与えていないことが分かる。

図4に16ビーム空間多重時のシステムスループットの累積分布特性を示す。各端末に対し互いに直交する2偏波のビームによって2ストリームを伝送した。端末配置条件として、端末8台が分散配置された場合と、直径5mのスポット内に稠密配置された場合の特性を示している。分散配置の場合は、アナログビームフォーミングによって端末間の干渉を低減できるため、BD, NL-BMDともに平均30Gbps前後の高いスループットが得られておりプリコーディング手法による顕著な差が見られない。一方、端末同士が近接する稠密配置の場合は、ビーム同士が重なるため従来のBD適用時にはスループットが大きく低下するのに対し、開発したNL-BMDを適用した場合はビーム利得を損なうことなく端末間の干渉を抑圧できることからスループット20Gbpsを確保できる領域を拡大できた。

表1. シミュレーション評価のパラメータ

項目	パラメータ
周波数	28GHz
周波数帯域幅	500MHz
基地局アンテナ高	10m
基地局サブアレー数	16
サブアレー当たり素子数	64
基地局ビーム半値角	±6°
サイト半径	20m
端末数	8

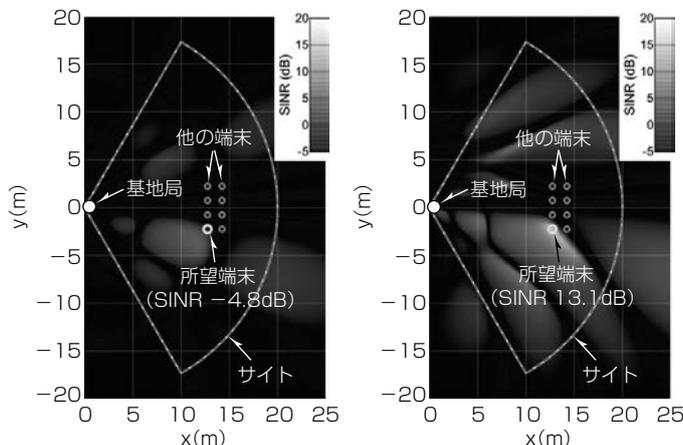


図3. 端末周辺の受信SINRヒートマップ例

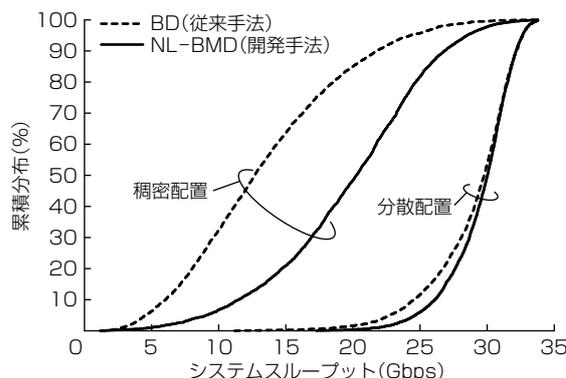


図4. システムスループットの累積分布特性

4. 基地局接続ビーム制御技術

5G基地局はデータ通信時だけでなく、端末の接続要求に伴う制御動作時でもビームを用いる⁽⁴⁾。また現在の移动通信システムであるLTE(Long Term Evolution)と同様に、端末がマスタ基地局とセカンダリ基地局の両方に接続するDual Connectivity構成が一般的な使用シナリオの一つとして考えられている⁽⁵⁾。このような場合、端末がセカンダリ基地局を追加接続する(初期通路確立)、又はセカンダリ基地局を切り替える(基地局切替え)際に次のような課題が発生する。端末は接続するセカンダリ基地局を選定した後に、通信移行までに、このセカンダリ基地局が形成するビームの中で最適な方向のビームを選定する必要がある。そのため端末の通信移行までの時間は従来システムに比べて長くなる。このとき、1本のビーム幅が狭いため、

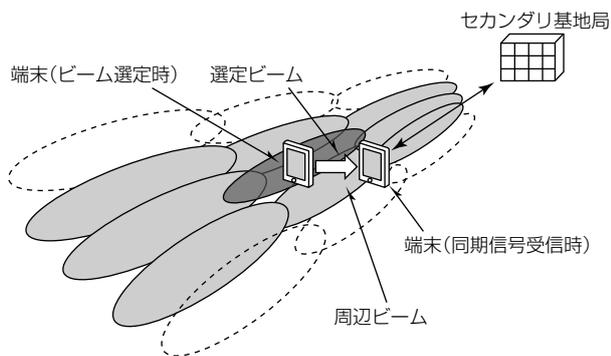


図5. 選定ビームと周辺ビーム同時使用による接続制御

端末の移動によって事前に選定したビームが通信移行時には最適でなくなり接続に失敗する可能性が高まる。

この問題に対し当社は、基地局が、端末によって事前に選定されたビームに加え、それに隣接する周辺ビームも同時に用いて同期信号とランダムアクセス信号の送受信を行うビーム制御技術を開発した⁽⁶⁾。この技術による動作は次のとおりである。セカンダリ基地局と初期通信路確立や基地局切替えを行う端末は、事前の周辺基地局サーチで接続候補のセカンダリ基地局を選定するとともにビームも同時に選定し、これらの情報をマスタ基地局へ通知する(接続要求)。マスタ基地局経由で接続要求の存在を通知されたセカンダリ基地局は同期信号送信を開始するが、このとき、選定ビームと周辺ビームを同時使用する。また、端末が送信するランダムアクセス信号を受信する際にもこのセカンダリ基地局は選定ビームと周辺ビームを使用する。図5は、セカンダリ基地局が接続制御の信号送受信に選定ビームと周辺ビームを用いている様子を表している。

図6は選定ビームと周辺ビームの合計9本のビームを用いた場合のセカンダリ基地局切替え失敗率をシミュレーションによって算出した結果である。比較として選定ビームだけを用いる従来手法(ビーム数1)での失敗率も示している。シミュレーションの条件を次に示す。エリア内に57局(=19サイト×3セクタ)のセカンダリ基地局を配置し、また端末を一様ランダム配置する。基地局が照射するビームエリア数は58とした。基地局切替えのハンドオーバーマージンは3dBで、通信中基地局の信号受信電力よりも周辺基地局の信号受信電力が3dB以上高い状態が160ms継続すると、端末はセカンダリ基地局切替えをマスタ基地局へ要求する。この要求からセカンダリ基地局が同期信号送信を開始するまでの遅延時間は200msとした。ほかの条件は表1と同じである。

図6に示すように端末側のビームフォーミングの有無によらず9本のビームを用いることで基地局切替え失敗率が改善している。特に端末の移動速度が速い場合に効果が大きい。このビーム制御技術によって、端末の基地局切替え時に発生する遅延時間内に端末がビームエリアを移動することに対し、接続を確保する領域を拡大できている。

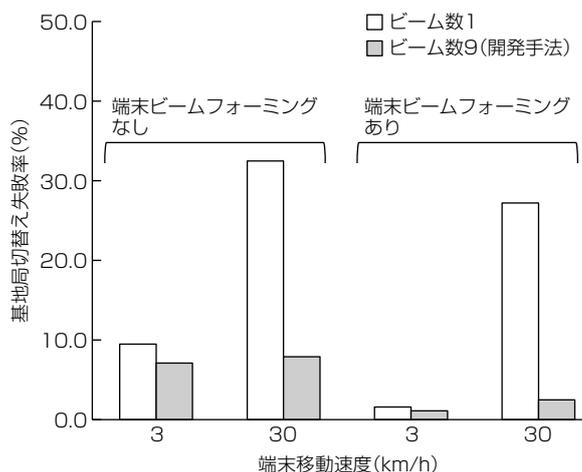


図6. セカンダリ基地局切替え失敗率の低減

5. む す び

第5世代移動通信システムの無線アクセス技術として開発した、端末が密集する条件でも快適な通信を提供するNL-BMD法によるマルチビーム空間多重用プリコーディング技術と、複数ビームを利用して確実に接続を実施する基地局接続ビーム制御技術を定量評価とともに述べた。今後も当社では、移動通信システムへ高まる様々な要求に対応した技術を開発していく。

この論文には総務省からの委託を受けて実施した“第5世代移動通信システム実現に向けた研究開発”の成果の一部が含まれている。

参 考 文 献

- (1) ITU-R : IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, Recommendation ITU-R M.2083-0 (2015)
- (2) Taira, A., et al. : A Hybrid Beamforming Architecture for High SHF Wide-band Massive MIMO in 5G, Proc. IEEE APWCS 2016, S3-3, 295~299 (2016)
- (3) Nishimoto, H., et al. : NL-BMD : Nonlinear Block Multi-diagonalization Precoding for High SHF Wide-band Massive MIMO in 5G, IEICE Trans. Commun., E100-B, No.8, 1215~1227 (2017)
- (4) 3GPP : Physical layer procedure for control, TS38.213 V15.0.0 (2017)
- (5) 3GPP : NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2, TS38.300 V15.0.0 (2017)
- (6) 福井 範行, ほか : 5Gにおける高SHF帯・広帯域 Massive MIMO無線アクセス向けビーム制御の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 116, No.147, RCS2016-127, 171~176 (2016)