

2020年のサービス実現に向けた5G技術特集

5Gマルチアンテナ技術

ドコモは超高速・超大容量な無線通信サービスの実現に向けて、次世代移動通信システムである「5G」の研究開発に取り組んでいる。5Gでは既存周波数帯よりも高い周波数帯を利用することで、信号のさらなる広帯域化をめざしている。しかしながら、高周波数帯では電波伝搬損失が増大するため、5Gのマルチアンテナ技術では超多素子アンテナを用いてアンテナ指向性を適応的に制御することで伝搬損失を補償する。本稿では、5Gマルチアンテナ技術について概説し、10Gbpsを超える超高速通信の実現性について明らかにする。

先進技術研究所 5G推進室

すやま	さとし	おくやま	たつき
須山	聡	奥山	達樹
いのうえ	ゆうき	きしやま	よしひさ
井上	祐樹	岸山	祥久

1. まえがき

ドコモは超高速・超大容量な無線通信サービスの実現に向けて、「5G」の研究開発に取り組んでいる[1] [2]。5Gでは既存周波数帯よりも高い周波数帯を利用し、信号帯域幅を広帯域化することで通信速度のさらなる向上をめざしている。しかしながら、高周波数帯では電波伝搬損失が増大するため、100素子以上のアンテナ素子により構成される超多素子アンテナの適用が、5Gマルチアンテナ技術として検討されている[1]～[5]。超

多素子アンテナでは、アンテナ指向性^{*1}を適応的に制御することで電波伝搬損失を補償し、また、信号を空間多重することで通信速度を向上させることができる。本稿では、ドコモが世界的に先行して技術検討および伝送実験を進めている[6]、5Gマルチアンテナ技術における超多素子アンテナの動作と効果、高周波数帯における超多素子アンテナの技術課題と実現に向けた取組みについて概説し、最後に、超多素子アンテナを用いる計算機シミュレーション結果を示し、超高速通信の実現性を明らかにする。

かにする。

2. 超多素子アンテナの動作と効果

2.1 ファントムセルにおける超多素子アンテナの導入

(1)ファントムセルによるC/U分離

5Gの基本的なアーキテクチャとして図1に示すファントムセルコンセプトが提案されている[2]。ファントムセルコンセプトでは、従来のマクロセル^{*2}に新たにスモールセル^{*3}（あるいは準マクロセル）をオーバ

©2016 NTT DOCOMO, INC.
本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

^{*1} アンテナ指向性：アンテナからの放射強度（あるいは受信感度）の方向特性。

^{*2} マクロセル：1つの基地局がカバーする半径数百メートルから数十キロメートルの通信可能エリア。

^{*3} スモールセル：送信電力が小さく、マクロセルに比較して小さいエリアをカバーするセルの総称。

レイ^{*4}配置する。マクロセルでは既存システムが用いる周波数（UHF：Ultra High Frequency）帯（0.3～3GHz）を用い、オーバーレイしたセルではより高い周波数である低SHF（Super High Frequency）帯（3～6GHz）、高SHF帯（6～30GHz）およびEHF（Extremely High Frequency）帯（30～300GHz）を用いる。さらに、マクロセルにより制御信号（C-Plane：Control Plane^{*5}）の接続リンクを確立し、オーバーレイしたセルによりユーザデータ（U-Plane：User Plane^{*6}）に特化した接続リンクを確立することでC/U分離接続を実現する。マクロセルにおいては、UHF帯を用いることでサービスエリアを確保する一方、オーバ

レイしたセルにおいては高周波数帯を用いることで信号を広帯域化し、超高速通信を実現する。

(2) 超多素子アンテナの高周波数帯セルへの導入

10Gbpsを超える超高速通信を実現するためには、数100MHzの帯域幅が必要である。そのため、高周波数帯の利用が検討されているが、周波数が高くなるにつれて電波伝搬損失が増大するという課題があり、それを解決するため、超多素子アンテナを高周波数帯のセルに導入する。このような構成により、超多素子アンテナで電波伝搬損失を抑えることで高周波数帯の利用が可能となる。また、超多素子アンテナをマクロセルでアシストとして動作させること

も可能である。

2.2 超多素子アンテナによるBF効果

(1) 超多素子アンテナによるBF

図2に示すように、20GHz帯の超多素子アンテナとして、アンテナ間隔が一般的な平面アレーを用いた際には、アンテナ素子間隔を0.5波長（7.5mm）とすると、約12cm四方に256素子を搭載可能であり、波長が短い高周波数帯では同一面積当りの素子数を大幅に増やすことができる。超多素子アンテナでは、各素子から送信（受信）される信号の振幅と位相を制御することで、鋭いビーム（アンテナ指向性）を生成することができる。この処理はビームフォー

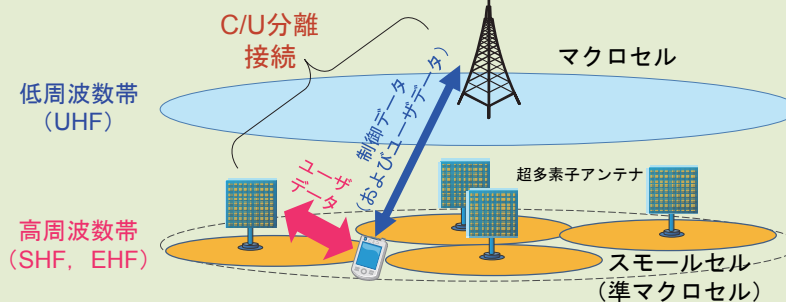


図1 ファントムセルコンセプトとMassive MIMOの組合せ

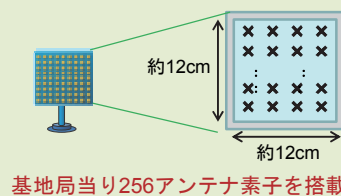


図2 Massive MIMOの導入効果

*4 オーバレイ：マクロセルのエリア上に、スモールセルなどエリアの狭いセルを重ねて配置すること。

*5 C-Plane：制御プレーン。通信の確立などをするためにやりとりされる、一連の制御処理を指す。

*6 U-Plane：ユーザプレーン。ユーザデータの送受信処理を指す。

ミング（BF：BeamForming）と呼ばれ、その効果により電波伝搬損失を補償することが可能となる。

(2)BF効果

全アンテナ素子で合計した送信電力を33dBm^{*7}としたとき、3.5、10、20GHz帯におけるBFの効果を図3に示す。それぞれの周波数帯で超多素子アンテナの大きさを20、40、80cm四方としたときのビームの到達距離を示している。素子数を同じで比較すると周波数が高くなるにつれて到達距離は短くなるものの、アンテナが同サイズであれば20GHzにおいても到達距離が大きくは減少しないことが分かる。しかし10GHz帯において100（＝10×10）素子のアンテナで490mまで飛ぶのに対し、20GHz帯アンテナでは、同サイズで同程度の到達距離を実現するためには400（＝20×20）素子以上が必要となる。そのため、周波数が高くなると素子

数が増えてコスト増となるので、超多素子アンテナにおけるコスト対策は、5Gマルチアンテナ技術の課題の1つである。

2.3 超多素子アンテナによるユーザ多重・空間多重

(1)超多素子アンテナによるMassive MIMOの効果

超多素子アンテナを用いるMIMO（Multiple-Input Multiple-Output）^{*8}伝送はMassive MIMOと呼ばれている[7] [8]。図4のように、Massive MIMOでは超多素子アンテナを制御することで伝搬損失補償により通信可能なエリアを拡大できることに加えて、各ユーザに異なるビームを向けることで多数ユーザを同時接続させるユーザ多重により、高周波数帯セルのシステム容量を増大させることも可能である[9]。また、各ユーザに対して複数のストリーム^{*9}を空間

多重することで通信速度を向上させることも可能である。

ただし、これらを実現するためには、ユーザ間あるいはストリーム間で干渉が発生しないように送信機においてプリコーディング^{*10}処理を行う必要がある。さらに、高精度なプリコーディングには、電波伝搬路の情報であるチャネル情報（CSI：Channel State Information）^{*11}が送信機において必要であり、端末で推定されたCSIを基地局にフィードバックしなければならない。なお、このCSIとTDD（Time Division Duplex）^{*12}のチャネル相反性^{*13}によって得られるCSIを併用する方法も考えられる[7]。

(2)Massive MIMOの最適動作

Massive MIMOのアンテナ素子数は、BFとユーザ多重・空間多重に振り分けられて活用されるため、アンテナ素子数が一定の場合には、ユー

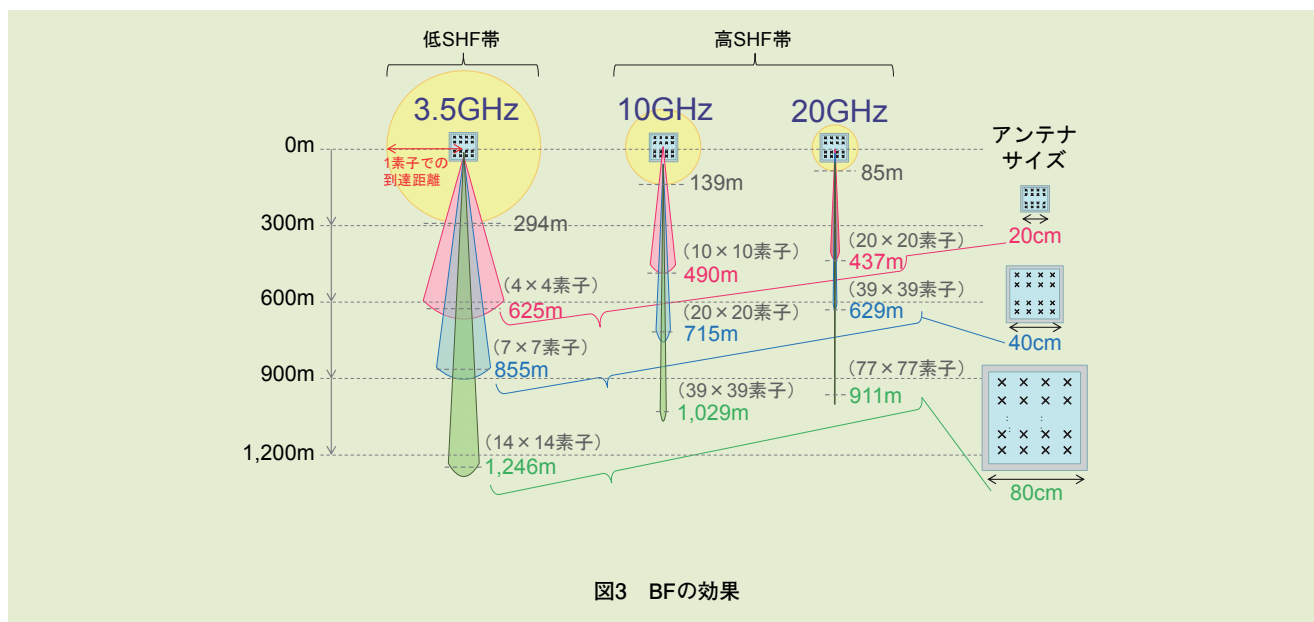


図3 BFの効果

^{*7} dBm：電力P [mW] とすると $10\log(P)$ とした時の値。1mWを基準としたときの相対値（1mW=0dBm）。

^{*8} MIMO：同一時間、同一周波数において、複数の送受信アンテナを用いて信号の伝送を行い、通信品質および周波数利用効率の向上を実現する信号伝送技術。

^{*9} ストリーム：MIMOに用いられる伝搬路の

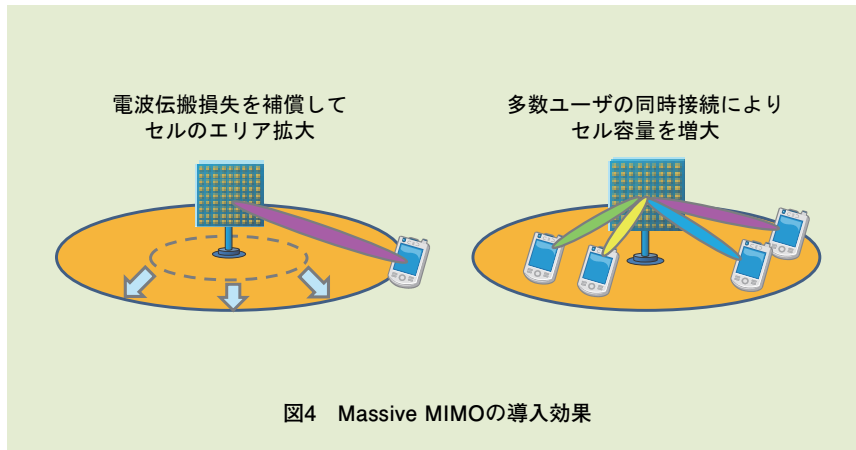
チャンネルに送信されるデータ列。

^{*10} プリコーディング：MIMOにおいて、送信する前の信号に無線伝搬路に応じた重みをあらかじめ乗算することで、受信品質を向上させる処理。

^{*11} チャネル情報（CSI）：送受信間の無線伝搬路を通過する際に送信信号が受ける減衰、位相回転および遅延を表すパラメータ。

^{*12} TDD：双方向の送受信方式の1つ。上りリンクと下りリンクに同一の周波数帯を利用し、異なる伝送時刻を割り当てることにより双方向通信を可能とする。

^{*13} チャネル相反性：双方向通信において、上下リンクの受信信号が同一のチャネル変動の影響を受けること。



ザ多重・空間多重の数を増やすとBF効果は低下する。そのため、CSIに合わせて適切にMassive MIMOを動作させる必要がある。なお、ユーザ多重・空間多重の数を減らす（BFに振り分けるアンテナ素子数を増やす）ことでBF効果（到達距離）を向上させ、図1のように準マクロセルを実現することも可能である。それにより広域エリアをカバーすることで、郊外などにおいても効率の良いエリア構築が可能である。

3. 高周波数帯Massive MIMOの技術課題と実現に向けての取組み

3.1 高周波数帯Massive MIMOの技術課題

前述の通り、5Gにおいてシステム容量および通信速度の大幅な向上を実現するには、高周波数帯の利用が必要となる。しかしながら、高周波数帯においてMassive MIMOを導入するためには以下のように技術課題も多い。

- ・超多素子アンテナの使用を前提

としたときの高周波数帯の電波伝搬路の空間特性は十分に明らかになっていない[10]。また、高周波数帯では伝搬損失に加えて、障害物による遮蔽損失も低周波数帯と比較して大きくなるため、携帯電話を持つときの人体による遮蔽損失の影響も考慮する必要がある[10]。

- ・Massive MIMOを低コストで装置化するためには、高周波数帯の無線周波数（RF：Radio Frequency）^{*14}回路およびベースバンド（BB：BaseBand）^{*15}処理回路を、シリコンCMOS（CMOS：Complementary Metal Oxide Semiconductor）^{*16}集積回路（IC：Integrated Circuit）などを用いて、できるだけ1チップ化する必要がある。ただし、最近ではEHF帯RF回路もシリコンCMOSで実装できるようになっており、高周波数帯を利用するための回路的な条件は整いつつある。
- ・高周波数帯における電力増幅器の高利得化は技術的に難しいが、

- Massive MIMOはアンテナごとに電力増幅器を持ち、電力増幅器当りに必要とされる送信電力を非常に低くすることができるため問題にならない。一方、周波数シンセサイザ^{*17}は位相雑音^{*18}レベルが比較的高いため、その影響を考慮して5Gではサブキャリア^{*19}間隔などの無線パラメータを決定する必要がある。
- ・アンテナ素子数分の超多数のRF回路を用意する必要があるため、小型化も重要な課題であり、アンテナとフィルタの一体化などについても検討が行われている[11]。加えて、デバイスが小さくなることにより高い加工精度が要求されるという課題もある。Massive MIMOでは超高密度に回路を組み上げ・配線する技術も必要であり、超高密度化によりアンテナおよびデバイス間の相互結合の影響が大きくなるため、これを低減し、アンテナ素子間の特性を一致させるためのキャリブレーション^{*20}も必要となる。
- ・数十素子程度のアレーアンテナ^{*21}は、すでにアダプティブアレーアンテナ^{*22}やアクティブアンテナシステム（AAS：Active Antenna System）^{*23}などの実現例もあるが、5Gでは高周波数帯Massive MIMO基地局を多数配置するため、従来と比較して大幅な低コスト化を実現する必要がある。

*14 無線周波数（RF）：無線信号の搬送波に使用される周波数。

*15 ベースバンド（BB）：搬送波への変調前、もしくは復調後の信号帯域のこと。

*16 CMOS：半導体回路の一種で、定常状態では電流がほとんど流れないため低消費電力である。

*17 シンセサイザ：周波数や波形を変調して出

力する装置。

*18 位相雑音：局部発振信号における搬送周波数以外の周波数成分によって発生する位相変動。

*19 サブキャリア：OFDMなどのマルチキャリア伝送において信号を伝送する個々の搬送波のことをいい、副搬送波とも呼ばれる。

*20 キャリブレーション：適切に電波を放射す

るために、複数のアンテナ素子を配置することなどによるアンテナごとの特性の偏りをあらかじめ補正すること。

*21 アレーアンテナ：複数の素子を配列したアンテナのこと。

3.2 低SHF帯Massive MIMOの実現に向けて

(1)分散Massive MIMO

Massive MIMOでは超多素子アンテナの利用を前提としている。低SHF帯では、100素子以上のアンテナ素子を1カ所に集中して配置すると、図3のようになりかなり大きいサイズとなる。そのため、高SHF帯超多素子アンテナと同等のサイズになるように、小型の低SHF帯多素子アンテナを複数の場所に分散して配置する分散Massive MIMOも実現方法の1つとして考えられる。

(2)利用環境による集中配置と分散配置の組合せ

集中配置する低SHF帯Massive MIMOでは、超多素子アンテナはビルの屋上などに設置され、比較的高い所から各ユーザに対して鋭いビームを形成する。一方、分散Massive MIMOでは、遮蔽物の多いような環境において、複数の小型多素子アンテナから電波を放射することで遮蔽の影響を緩和することができる。それぞれの利用環境としては、郊外や比較的大きい広場などでは集中配置するMassive MIMOを、ショッピングモールやビル街などでは分散Massive MIMOを用いることが考えられる。実際には、これらの集中配置と分散配置を柔軟に組み合わせてサービスエリアを構築する必要がある。それを実現する仕組みが重要である。

集中配置するMassive MIMOの技術検証として、図5に示す128素子

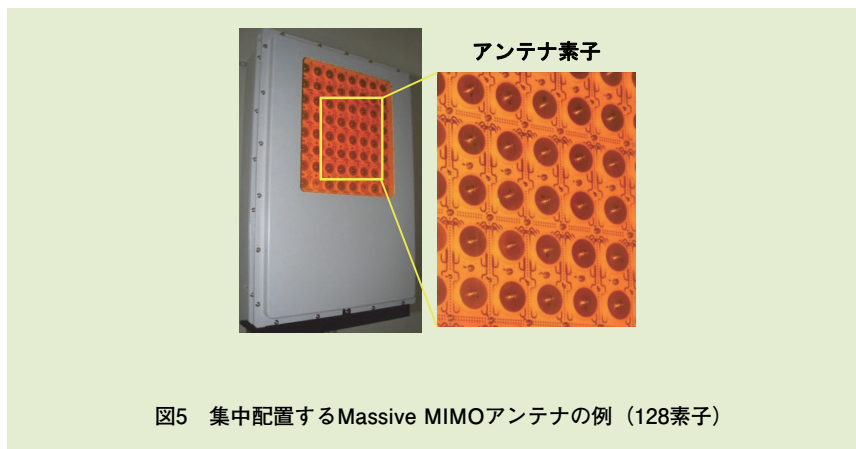


図5 集中配置するMassive MIMOアンテナの例（128素子）

の超多素子アンテナを用いた基礎伝送実験を進めている[12]。また、分散Massive MIMOの技術検証として、図6に示すように柔軟なアンテナ構成を可能とする小型の多素子アンテナを、高密度に分散設置し、互いに協調させる基礎伝送実験を進めている[13]。

3.3 高SHF帯・EHF帯Massive MIMOの実現に向けて

高SHF帯・EHF帯Massive MIMOでは、低SHF帯と比較して、信号がさらに広帯域化され、アンテナ素子数も増大する。低コスト化のためには、Massive MIMOを実現する無線機構成において工夫が必要になる。

(1)フルデジタルMassive MIMO

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)^{*24}を用いる一般的なMassive MIMO送信機の構成を図7に示す。送信アンテナ素子数と同数のデジタル・アナログ変換器(DAC: Digital to Analog Converter)やアップコンバータが必要とな

る。また、BB処理回路内の信号処理として実現される逆高速フーリエ変換(IFFT: Inverse Fast Fourier Transform)^{*25}やサイクリックプレフィクス(CP: Cyclic Prefix)^{*26}を信号へ付与する処理も送信アンテナ数だけ必要となる。この構成では、周波数領域^{*27}においてCSIを用いてデジタルプリコーディング処理が可能となるため、フルデジタルMassive MIMOと呼ばれ、優れた性能を有する。ただし、高SHF帯・EHF帯では、信号の広帯域化に対応した高価でかつ消費電力が比較的高いDACやADC(Analog to Digital Converter)、高性能化が難しい超多数の無線回路が必要になるという問題がある。

(2)ハイブリッドBF

BFは電波の放射(到来)方向にビームを向けることから、ある程度の性能劣化を許容したうえで全帯域においてBFを共通化することも考えられる。その際には、BF処理を全サブキャリアで共通化することでIFFT後にBF処理を移行することが可能となり、デジタルプリコーディ

*22 アダプティブアレーアンテナ: 複数素子の位相を制御することで電波の到来方向に指向性を持たせることが可能なアンテナ構成である。

*23 アクティブアンテナシステム(AAS): 従来独立していたアンテナ素子と無線装置を一体化したシステム。一体化することで、従来型と比較して高効率なシステムを提供

可能となる。

*24 OFDM: 複数の搬送波にデータを分割し、搬送波を互いに直交させて並列伝送する技術。

*25 逆高速フーリエ変換(IFFT): 離散化された周波数領域(*27参照)の信号を離散化された時間領域(*28参照)の信号に変換する逆離散フーリエ変換を高速に処理する計算手法。離散フーリエ変換に対応する高

速処理が高速フーリエ変換(FFT)であり、その逆変換。

*26 サイクリックプレフィクス(CP): 送信機から放射された電波は建物などで反射するため、受信機は複数の経路を経由した電波を受信する(マルチパス)。CPはこのマルチパスによる信号の干渉の影響を緩和する。

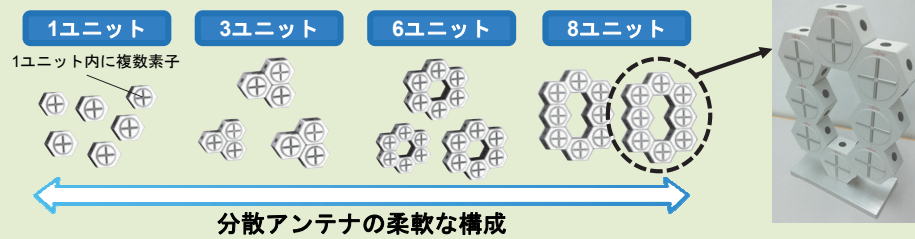


図6 小型多素子アンテナの分散配置構成

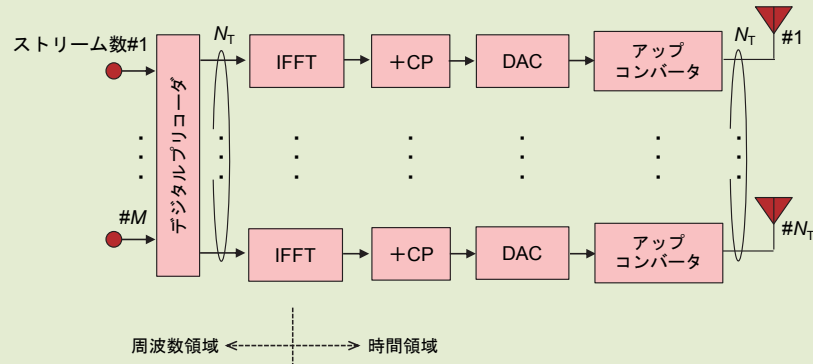


図7 OFDMを用いる一般的なMassive MIMOの送信機構成（フルデジタルMassive MIMO）

ングにおけるBF処理のみを時間領域^{*28}に移行することができる。

Massive MIMO送信機を低コストで実現するため、図8および図9のように、デジタルプリコーディングとアナログBFを組み合わせたハイブリッドBFの構成が検討されている[14] [15]。これはフルデジタル構成においてBF処理のみを時間領域に移行し、さらに、それをRF回路内の可変移相器^{*29}で実現するアナログBFに置き換えた構成である。ハイブリッドBFでは、DACやアップコンバータをビーム数 L 分だけ用意すればよく、IFFTの数も減らす

ことができる。

ハイブリッドBFには、図8に示す全アンテナ素子を用いるフルアレー型と、図9に示す一部のアンテナ素子を用いるサブアレー型の構成が考えられる。フルアレー型の方が加算器^{*30}とより多くの可変移相器が必要となるが、その分性能は高い。

(3)アナログBFのみの構成

最も簡単な構成として、アナログBFのみを用いる方法もある。アナログBFのみであれば、デジタルプリコーディングが不要となるため、BB処理回路を簡略できるというメリットがある。ただし、アナログ

BFで生成されるビーム間が直交するように狭ビームを生成しないとビーム間干渉を低減できないため、ビームを減らし、各ビームを生成するアンテナ素子数を増やす必要がある。高SHF帯・EHF帯のアナログBFの可能性については、伝送実験により検証を進めている[16] [17]。

(4)ハイブリッドBFを動作させる

FBCPアルゴリズム

数100MHzの帯域幅で10Gbpsを超える超高速通信を実現するためには、複数ビームを用いてストリームを空間多重する必要がある。このような条件では、コスト面からハイブリッ

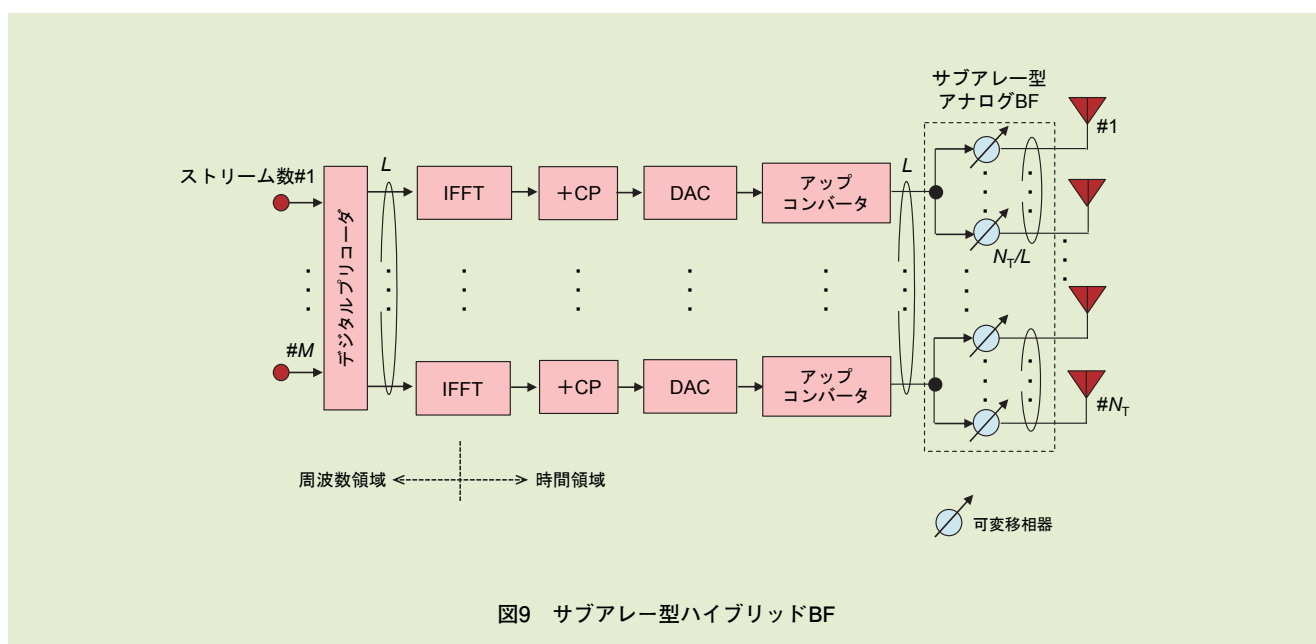
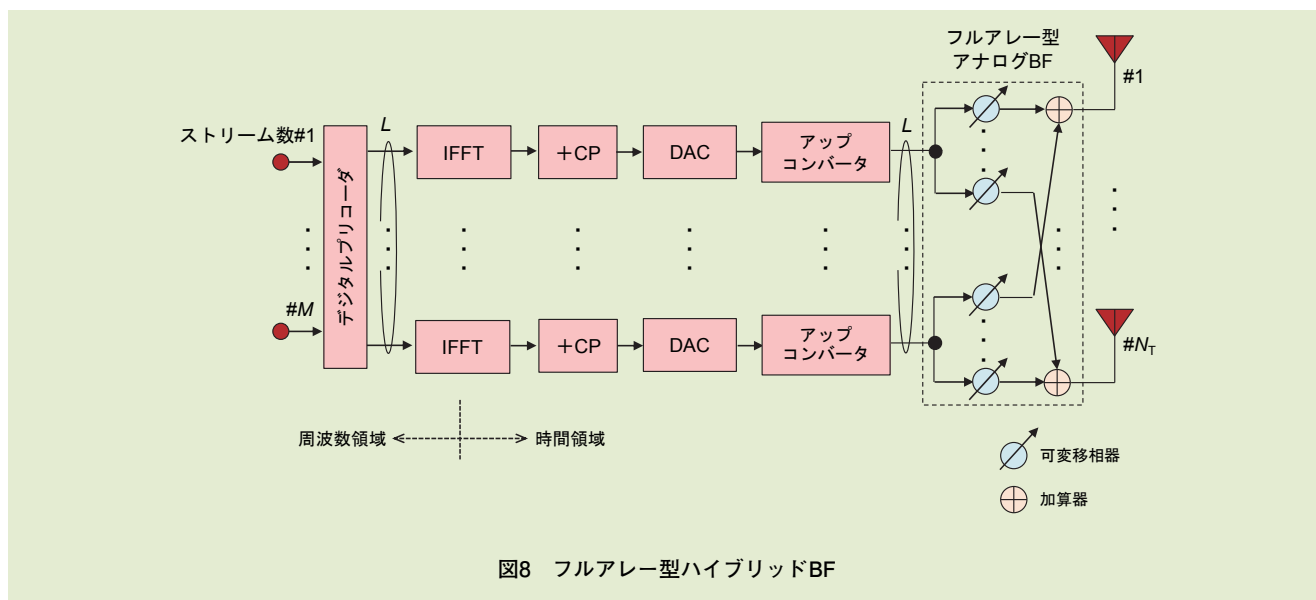
*27 周波数領域：信号などの解析において、その信号が各周波数においてどのくらいの成分を持っているかを示すのに用いられる。周波数領域の信号を逆フーリエ変換することで時間領域の信号に変換することができる。

*28 時間領域：信号などの解析において、その信号が各時間においてどのくらいの成分を

持っているかを示すのに用いられる。時間領域の信号をフーリエ変換することで周波数領域の信号に変換することができる。

*29 可変移相器：電波の位相を特定の位相に変化させるための機器。

*30 加算器：複数の電気信号を加算し出力するための機器。



ドBF構成が適していると考えられ、その具体的な動作アルゴリズムとして、FBCP（Fixed analog BF and CSI-based Precoding）を提案している[18]。以下にアルゴリズムを示す。

①角度で固定されたアナログBFにより空間的にビームを走査し、

端末において受信電力が高い順に L 個のビーム候補を選択。

②選択されたアナログBFで生成されたビームを用いて参照信号を送信し、端末でCSIを推定。

③CSIを基地局にフィードバックし、それを用いてデジタルプリコー

ディングを実施し、通信を行う。

上記のように空間的に走査するビーム候補のすべてで参照信号を送信するのではなく、選択されたビームで参照信号を送信することで、参照信号の挿入損を抑えることができる。

4. 高SHF帯Massive MIMOによる超高速通信の実現性評価

高SHF帯Massive MIMOによる超高速通信の実現性について、計算機シミュレーションにより定量的に明らかにする。シミュレーションでは、20GHz帯256素子のアンテナによるフルデジタルMassive MIMOと2種類のハイブリッドBFの特性を比較し、ハイブリッドBFではFBCPを用いる。

シミュレーション諸元を表1に示す。受信アンテナ数は全ユーザで等しく、総送信ストリーム数を16に固定し、マルチユーザ（MU：Multi User）環境では各ユーザに均等に割り当てる。各ユーザは図10に示すように、シングルユーザ（SU：Single User）環境では基地局の正

面に、MU環境ではユーザ数 $N_U=4$ とし、基地局の正面方向に 20° 間隔で配置する。また、表1に示す変調方式と符号化率^{*31}の組合せにおいて適応変調符号化（AMC：Adaptive Modulation and Coding）^{*32}を適用し、256QAM（256 Quadrature Amplitude Modulation）^{*33}、符号化率 $R=3/4$ のとき、16ストリームMIMO空間多重により最大31.4Gbpsの伝送レートが実現できる。

4.1 フルデジタルと2種類のハイブリッドBFの特性比較

$L=N_T=256$ のフルデジタルMassive MIMOと、2種類のアナログBF構成を用いるハイブリッドBFのスループット特性を図11に示す。なお、ハイブリッドBFではユーザ数 $N_U=1$ および $N_U=4$ の両方において選択す

るビーム数 $L=32$ とし、 $N_U=4$ では全ユーザの合計スループットを示す。

図より、フルデジタルと2種類のハイブリッドBFは、平均SNR（Signal to Noise Ratio）^{*34}が16dB以上において20Gbps以上のスループットを達成できることが確認できる。特に、全ユーザ合計のスループットは $N_U=1$ と比較してより低い平均SNRで20Gbpsを達成できることがわかる。これは、MU環境において、ユーザ間の干渉を適切に低減し複数ユーザに到来する強度の強い電波を活用するためである。また、フルアレー型はサブアレー型より優れた特性を達成しており、特に $N_U=4$ で顕著である。これは、フルアレー型における1ビーム形成に利用されるアンテナ素子数が、サブアレー型より多くビームが狭くなるためMU環境においてユーザ間干渉の影響が小

表1 シミュレーション諸元

中心周波数	20GHz
帯域幅	400MHz
有効サブキャリア	パイロット：32、データ：2,000
アンテナ素子数	$N_T=256$ 、 $N_R=16$
ユーザ数	$N_U=1, 4$
総ストリーム数	$M=16$
総ビーム数	$L=16, 32, 64, 128$
変調方式	QPSK ^{*1} 、16QAM、64QAM、256QAM（w/AMC）
チャンネル符号化	ターボ符号 ^{*2} 符号化率 $R=1/2, 2/3, 3/4$ （w/AMC）
フェージング ^{*3}	16パス 仲上・ライスフェージング ^{*4} （ $K=10$ dB）

※1 QPSK（Quadrature Phase Shift Keying）：デジタル変調方式の1つ。位相の異なる4つの信号を組み合わせることにより、同時に2ビットの情報を送信可能。

※2 ターボ符号：誤り訂正符号化技術の1つ。復号結果の信頼度情報を用いて、繰返し復号することにより、強力な誤り訂正能力が得られる。

※3 フェージング：端末の移動やマルチパスなどにより、電波の受信レベルが変動すること。

※4 仲上・ライスフェージング：マルチパスにおいて、基地局から直接（反射を経ないで）到来する電波が存在する（電波強度が強い）環境をモデル化したもの。

※31 符号化率：情報ビット数と、その情報ビットを誤り訂正符号化した後のビット数との比。例として、符号化率が $3/4$ の場合は、情報ビット数3に対し、誤り訂正符号化により4ビットを生成する。

※32 適応変調符号化（AMC）：変調方式と符号化率の組合せを、伝搬環境に応じて適応的に変更することで、伝送効率を高める方法。

※33 256QAM：QAM（直交振幅変調）とは、変調方式の1つであり、振幅と位相の双方を利用して変調する方式。256QAMの場合は256（2の8乗）種類のシンボルが存在するため、一度に8ビットを伝送可能である。

※34 SNR：雑音の電力に対する所望信号の電力の比。

さくなり、比較的少ないビーム数でもユーザ間の干渉低減効果が得られるためであると考えられる。

なお、 $N_U=1$ ではフルアレー型ハイブリッドBFとフルデジタルの特性が同等程度であることから、ハイブリッドBFは送信機のコストを抑えつつ、フルデジタルに近いスループットを実現できることがわかる。

4.2 ハイブリッドBFに

おけるビーム数 L の影響

前節で述べたように、ハイブリッドBFではスループットがビーム数 L に依存しており、 L を増やすことで特性が改善する一方、低コスト化のためには L は減らす方がよい。そこで、ビーム数 L に対するユーザの合計スループットを図12に示す。ユーザ数は $N_U=1, 4$ とし、平均SNRは15dBに固定した。なお、フルデジタルはアナログBFを行わないため、 L と関係なく一定値を示す。また、 $L=128$ は低コスト化の観点では現実的な値ではないが、ハイブリッドBFがフルデジタルの特性に近づくことを確認するために評価した。

図より、ハイブリッドBFは L の増加に伴いフルデジタルに近い特性となる。特に、MU環境では L をBFとユーザ多重に割り振るため、 $N_U=4$ では、 $L=16$ に比べて $L=32$ で特性が大きく向上しており、今回の環境では $L=32$ 程度で適切にユーザ間干渉を低減できる。なお、 $N_U=1$ において $L=128$ ではフルアレー型

のハイブリッドBFがフルデジタルより高い特性を示しているが、これは本評価において、環境に応じて受

信品質を制御することを行っていないためと考えられ、制御した場合はフルデジタルが最も高いスループット

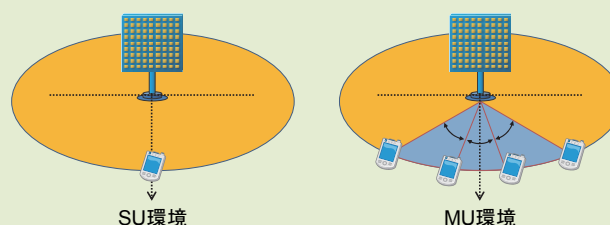


図10 ユーザ配置

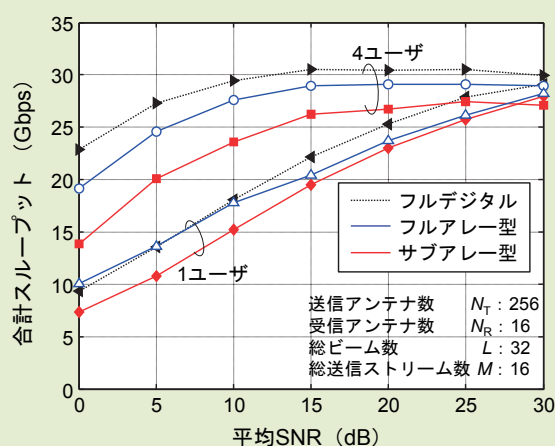


図11 平均SNRに対するユーザの合計スループット

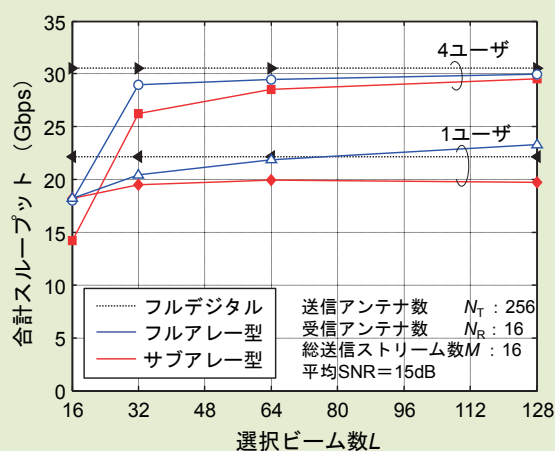


図12 アナログBFの選択ビーム数に対するユーザの合計スループット

トを実現する。

以上より、超多素子アンテナを用いたとき、20GHz帯において超高速通信の実現性を明らかにし、パラメータを適切に設定したハイブリッドBFがフルデジタルに近い特性を実現できることを示した。

5. あとがき

本稿では、ドコモが世界に先駆けて取り組んでいる5Gマルチアンテナ技術について、超多素子アンテナの動作と効果、高周波数帯における超多素子アンテナの技術課題と実現に向けての取組みを概説した。また、高周波数帯の超多素子アンテナを用いる超高速通信に関するシミュレーションによる評価結果を示し、その実現性について明らかにした。今後は、超多素子アンテナを用いた屋外伝送実験により超高速通信の可能性の評価を行っていく。

文 献

- [1] 岸山, ほか: “ドコモの5Gに向けた取組み—2020年での5Gサービス実現に向けて—,” 本誌, Vol.23, No.4, pp.6-17, Jan. 2016.
- [2] アナス, ほか: “5G無線アクセス技術,” 本誌, Vol.23, No.4, pp.18-29, Jan. 2016.
- [3] T. L. Marzetta: “Non-cooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas,” IEEE Trans. Wireless Commun., Vol.9, No.11, Nov. 2010.
- [4] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors and F. Tufvesson: “Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays,” IEEE Signal Processing Magazine, Vol.30, No.1, Jan. 2013.
- [5] 須山 聡, シン キュン, 小原 辰徳, 角 誠, 中島 光雅, 奥村 幸彦: “高周波数帯を用いた超高速Massive MIMO伝送の基本特性,” 信学技報, Vol.113, No.456, RCS2013-348, pp.253-258, Mar. 2014.
- [6] 原田, ほか: “世界主要ベンダとの5G伝送実験,” 本誌, Vol.23, No.4, pp.59-68, Jan. 2016.
- [7] 岸山 祥久, 永田 聡, ベンジャブール アナス, 中村 武宏: “5G将来無線アクセスにおける階層型マルチビームMassive MIMO,” 信学総大, ABS-1-8, Mar. 2014.
- [8] 須山 聡, シン キュン, 武田 和晃, 岸山 祥久, 奥村 幸彦: “将来無線アクセス・モバイル光ネットワークにおける超高速無線アクセス技術,” 信学技報, RCS2013-165, Oct. 2013.
- [9] 奥山 達樹, 須山 聡, 小原 辰徳, シン キュン, 奥村 幸彦: “高周波数帯超高速Massive MIMO伝送におけるマルチユーザ環境での特性評価,” 信学技報, Vol.114, No.490, RCS2014-340, pp.231-236, 2015.
- [10] 今井 哲朗, 北尾 光司郎, トラン ゴクハオ, 大巻 信貴, 奥村 幸彦, 佐々木 元晴, 山田 渉: “[依頼講演]第5世代移動通信システム設計に向けた伝搬特性の検討～800MHzから37GHz帯における伝搬損失の周波数特性～,” 信学技報, Vol.114, No.294, AP2014-149, pp.115-120, Nov. 2014.
- [11] 鈴木 恭宜, 佐藤 圭, 角 誠, 福田 敦史, 橋橋 祥一: “[依頼講演] Massive-MIMO基地局装置用RFフロントエンド,” 信学技報, Vol.115, No.227, MW2015-90, pp.19-23, Sep. 2015.
- [12] シン キュン, 須山 聡, 丸田 靖, 奥村 幸彦: “5GHz帯超多素子アンテナを用いた5G基礎伝送実験,” 信学総大, B-5-93, Mar. 2015.
- [13] 筒井 正文, 安藤 和明, 秋山 千代志, 伊達木 隆, 関 宏之, 箕輪 守彦, 奥山 達樹, 須山 聡, 奥村 幸彦: “5G超高密度分散アンテナシステムにおける広帯域MIMO伝送特性の屋内実験検証,” 信学技報, Vol.115, No.233, RCS2015-180, pp.125-130, Oct. 2015.
- [14] 須山 聡, 小原 辰徳, シン キュン, 奥村 幸彦: “高周波数帯ハイブリッドビームフォーミングを用いたMassive MIMOにおけるアナログビームフォーミング構成の影響,” 信学技報, Vol.114, No.490, RCS2014-337, pp.213-218, Mar. 2015.
- [15] 須山 聡, 小原 辰徳, 岡崎 彰浩, 中川 兼治, 井浦 裕貴, 平 明德, 奥村 幸彦, 岡村 敦, 石岡 和明: “5G超大容量マルチビーム多重伝送のための44GHz帯屋外基礎実験(1),” 信学ソ大, B-5-69, Sep. 2015.
- [16] T. Obara, T. Okuyama, Y. Aoki, S. Suyama, J. Lee and Y. Okumura: “Indoor and outdoor experimental trials in 28-GHz band for 5G wireless communication systems,” IEEE PIMRC2015, Sep. 2015.
- [17] 井上 祐樹, 岸山 祥久, 須山 聡, 奥村 幸彦: “屋内シールドルーム環境における5Gミリ波無線アクセスの下り伝送およびビーム追従特性の実験評価,” 信学技報, Vol.115, No.160, RCS2015-126, pp.151-156, Jul. 2015.
- [18] T. Obara, S. Suyama, J. Shen and Y. Okumura: “Joint processing of analog fixed beamforming and CSI-based precoding for super high bit rate Massive MIMO transmission using higher frequency bands,” IEICE Trans. Commun., Vol.E98-B, No.8, Aug. 2015.