5Gの高度化に向けたミリ波帯基地局連携技術による高速移動環境での通信性能向上

現在，5Gの商用サービスが提供されていますが，将来の多様な需要に応じるためには，5Gのさらなる高度化が必要です．その検討の一環として，高速で移動する複数端末への広範囲でのミリ波帯高速通信の提供が考えられています．高速移動環境では，複数の基地局を連携させることによる広範囲でのエリア構築が必要です．さらに，複数端末との同時通信を実現するには，各端末に送信した信号がお互いに干渉しないように，干渉を抑圧する必要もあります．そこで，デジタル信号処理でビームを生成・制御するデジタルビームフォーミングを基地局に適用することで，端末間の干渉を抑圧しながら複数の基地局を連携させるミリ波帯基地局連携技術を考案し，屋外伝送実験により広範囲において高い通信速度が実現できることを明らかにしました．

奥山（おくやま）　達樹（たつき）　須山（すやま）　聡（さとし）
野中（のなか）　信秀（のぶひで）　浅井（あさい）　孝浩（たかひろ）
NTTドコモ

まえがき

第5世代移動通信システム（5G）では，6 GHz以下の周波数帯や，28 GHzといったミリ波*1帯を用いた高速通信の実現が進められています．ミリ波のような高周波数帯の大きな伝搬損失*2を補償するため，Massive MIMO（Multiple Input Multiple Output）*3を用いたビームフォーミング（BF：BeamForming）*4技術が5G無線アクセス技術として研究されてきました．

NTTドコモでは，3.7，4.5，28 GHz帯を用いて5Gの商用サービスを展開しています．ここで，28 GHz帯は利用可能な帯域幅が3.7，4.5 GHz帯よりも広く，高速通信が期待できる一方で，直進性の強さや伝搬損失の大きさから，広いエリアにおいて安定的に高速通信を提供するうえでは技術的な課題が存在します．しかし，今後5Gのさらなる高度化を図るためには，ミリ波帯の活用が重要となります(1)．

本稿では，デジタル信号処理によりBFを行うデジタルBFを実装した複数の28 GHz帯実験用基地局装置を利用し，高速移動する複数の端末に対して，端末間で発生する干渉を抑圧しながら，基地局を連携させることで，広範囲に高速通信を提供できることを屋外伝送実験により実証したので，その実験結果について解説します．

デジタルBFによるミリ波帯基地局連携技術を搭載した実験装置の概要

■高速移動環境へのデジタルBFと基地局連携の適用効果

ミリ波帯の活用による，さらなる高速通信の実現に対しては，解決すべき次のような課題があります．

① 同時に複数の端末と通信する（マルチユーザMIMOを実現する）ことで，基地局当りの通信速度の向上が期待できるが，端末間で発生する干渉の抑圧が必要となる．

② 例えば，時速100 kmで高速道路などを移動中の車両内の端末に

＊本特集は「NTT DOCOMOテクニカル・ジャーナル」（Vol.29 No. 2, 2021年7月）に掲載された内容を編集したものです．

＊1 ミリ波：周波数帯域の区分の1つ．30 GHzから300 GHzの周波数であり，5Gで使用される28 GHz帯を含めて慣習的にミリ波と呼びます．

＊2 伝搬損失：送信局から放射された電波の電力が受信点に到達するまでに減衰する量．

＊3 Massive MIMO：送信と受信にそれぞれ複数素子のアンテナを用いることで無線信号を空間的に多重して伝送するMIMO伝送方式において，より多くのアンテナ素子で構成される超多素子アンテナの採用により，高周波数帯使用時の電波伝搬損失補償を可能とする鋭い電波ビームの形成や，より多くのストリームの同時伝送を実現する技術．これらにより，所望のサービスエリアを確保しつつ，高速なデータ通信を実現します．

＊4 ビームフォーミング（BF）：送信信号に指向性を持たせることで，特定方向の信号電力を増加・低下させる技術．複数のアンテナ素子（RF装置）の位相制御により指向性を形成するアナログビームフォーミングと，ベースバンド部において位相制御するデジタルビームフォーミングが存在します．

対して基地局が通信を行うとき，通信を広範囲に提供するためには複数基地局の連携が必要となる．

端末間干渉を抑圧する方法にはさまざまな手法があり，例えば，異なる端末への信号をそれぞれ異なるビームを用いて送信する方法があります．しかし，当然ながらビームどうしの干渉も発生するため，干渉が適切に抑圧されるとは限りません．また，ミリ波帯は伝搬損失が大きいため基地局当りのサービスエリアを拡げにくく，端末が高速移動する環境では，端末がそのエリア内に存在する時間が短くなるため，基地局の切替りが頻発します．

以上のことから，高速移動する複数端末に対して高速通信を提供するためには，端末間干渉を抑圧しつつ，基地局の切替り時においても安定して高速通信を維持していくことが重要です．そこで，本稿では，基地局の機能としてアナログ回路によるBF（アナログBF）を実装するのではなく，デジタルBFをミリ波帯で利用するMassive MIMO実験装置を開発しました．

一般的には，アナログBFの動作は，あらかじめ定められたビーム候補から利用するビームを基地局が選択します．そのため，ビーム方向の情報のみがあれば良く，装置構造を簡単化できるというメリットがある一方，電波伝搬状況に最適化されているわけではないという課題があります．

それに対してデジタルBFでは，電波伝搬状況に応じて最適なビーム形状（数や方向）を算出して通信を行います．そのため，通信品質の向上が期待できる一方で，伝搬路情報の推定が必要であり，端末が高速移動する環境では電波伝搬状況の変動が激しく，それへの追従が難しいという課題があります．ただし，デジタルBFでは，デジタル信号処理で実現されるため，ビームの生成・制御において，端末間の干渉抑圧を組み込むことや，複数端末が存在する環境で最適なBFを行うことも可能であり，今後，通信性能を向上していくうえでは重要な技術です．

また，基地局連携として，デジタルBFのために利用する伝搬路情報から得られる情報（受信電力や送信可能な空間多重数など）を活用し，通信に利用する基地局を瞬時に切り替える，あるいは，複数の基地局から同時に送信するといった制御を行うことで，エリア内での安定的かつ高速な通信が実現できると考えられます．

■デジタルBFの概要

デジタルBFは，アナログBFと異なり，ビームをデジタル信号処理により生成・制御します．アナログBFでは，各アンテナ素子に接続された移相器*5と増幅器*6を活用し，各アンテナ素子から放射される電波の重ね合せにより，特定方向に強い電波の指向性を形成します．ただし，電波の重ね合せであるために，ある方向のビーム形状は常に同一となります．一方，デジタルBFでは，基地局と端末間の伝搬路情報を利用し，もっとも受信電力が高くなるような重み係数を算出し，それを送信する信号にデジタル信号処理で乗算することでビームを形成します．そのため，デジタルBFでは端末が静止していたとしても，端末の周辺環境が変動した場合には，その変動に応じて最適なビームを再形成することができます．また，デジタル信号処理であるため，複数の信号のMIMO多重や，端末間の干渉抑圧も高精度に実現可能です．

ただし，デジタルBFを実現するためには，基地局と端末間の伝搬路情報を詳細に把握する必要があります．この伝搬路情報は伝搬路行列から推定されます．伝搬路行列は，行数が端末のアンテナ素子数（素子数），列数が基地局の素子数です．5Gでは基地局は超多素子アンテナとなるため，膨大なサイズの行列を推定することが求められます．加えて，端末やその周辺環境の時間変動が穏やかであれば，伝搬路情報の推定も可能であると考えられますが，高速移動環境などの時間変動が激しい場合には，推定した時点と実際に信号を送信する時点での伝搬路情報にかい離が生じ，必ずしも最適なビームを形成できるとは限りません．

そこで，推定する行列サイズを縮小しつつデジタルBFの利点を得ることを目的に，多素子アンテナであらかじめ定めた方向に複数のビームを形成しておき，その複数のビームと端末との間の伝搬路情報を推定する技術を採用しました[(2)]．このようにすることで，推定するべき行列のサイズを，端末素子数×基地局素子数から，端末素子数×ビーム数にまで削減することができます．端末素子数×ビーム数の行列を用いてデジタル信号処理を行うことで，全素子を利用する場合からの品質劣化を最小限にしつつ，短時間での伝搬路情報の推定，およびビーム形成・制御や端末間の干渉抑圧などのデジタル信号処理を可能とし，高速移動環境であってもデジタルBFによる伝送を実現しました．

■実験装置の概要

開発した実験装置の基地局と端末の外観を**図1**に示します．

基地局は，240素子のMassive MIMO

*5　移相器：アンテナにおいては，各アンテナ素子に掛けられる位相を変える回路のことを指します．
*6　増幅器：信号を増幅させる回路のことを指します．

アンテナがベースバンドユニット（BBU：BaseBand Unit）*7に接続されます．このBBUにおいて，デジタルBFのウェイト計算が行われます．また，集約装置（CU：Central Unit）*8には複数のBBUが接続され，CUが複数基地局の連携における制御機能を担っています．

端末については，縦15素子のアンテナアレー*9を4枚有します．4枚のうち，参照信号*10の送信には2枚のみの30素子を利用しますが，受信時には4枚利用することで受信利得を向上させることが可能です．これらのアンテナアレーは無線部*11を経てBBUに接続されます．

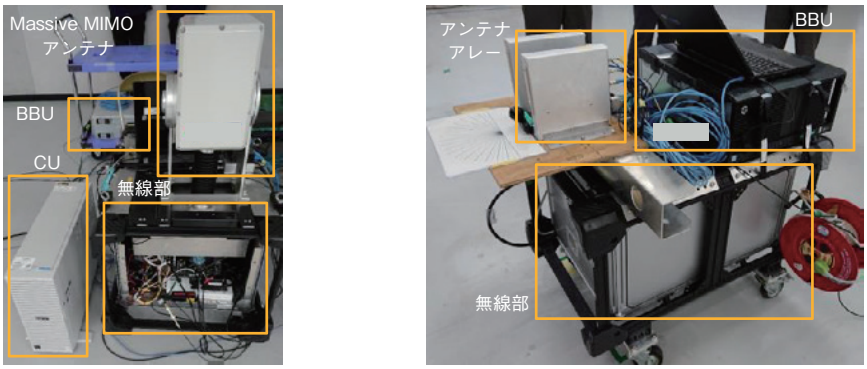
本実験装置では，端末が定期的に送信する参照信号を活用し，基地局において伝搬路情報を推定します．その推定結果からデジタルBFウェイトの生成を行い，最大で端末当り2ストリームの信号を送信します．端末は，2ストリーム合計で最大705 Mbit/sのスループットを達成できます．また，端末は，ストリームを受信したらBBUにおいて受信フィルタ*12を計算し，送信された信号を検出してスループットの測定を実施します．

ミリ波帯屋外伝送実験の概要と結果

■実験環境

複数端末が高速で移動する屋外環境において，複数基地局を連携させた場合のスループットを評価するための伝送実験を実施しました[(3)]．その実験模様を**図2**に示します．3台の基地局を利用し，各基地局はトラックの荷台部分に仮設しました．また，端末は合計2台を用い，高速移動させるため，1端末をそれぞれ1台の車両に設置しました．このとき，基地局と端末のアンテナ高はどちらも2.2 mです．

実験構成を**図3**に示します．2台の端末は時速90 kmで等速移動し，3台の基地局の横を通過します．3台の基地局はそれぞれ0，200，400 mの位置に設置しました．このとき，各端末へは2ストリームずつ送信するものとしたうえで，さらに，各ストリームを異



(a)　基地局　　(b)　端　末

図1　実験装置

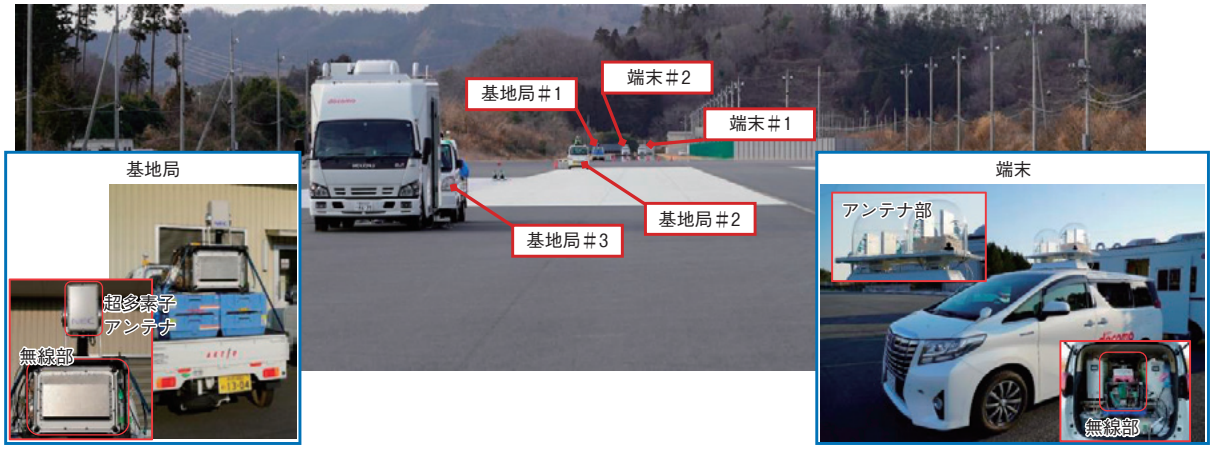


図2　実験模様

*7　ベースバンドユニット（BBU）：基地局を構成する装置の1つで，携帯端末との通信時に送受信される情報のデジタル信号処理を行う装置．
*8　集約装置（CU）：ベースバンドユニットと接続され，無線リソース制御を行う装置．
*9　アンテナアレー：複数のアンテナ素子やアンテナパネルを並べて配置したアンテナ群．
*10　参照信号：基地局から端末に設定される既知信号．
*11　無線部：フロントホールを介してベースバンドユニットと接続される無線装置．
*12　受信フィルタ：MIMO通信では，複数アンテナによる送受信により複数ストリームの送信や，所望信号の受信電力向上が可能となります．一方で，複数アンテナの送受信により，複数ストリームの情報は複雑に重なり合った状態で受信されるため，その重なりを緩和し所望信号の推定を行いやすくするために使用されるフィルタのこと．

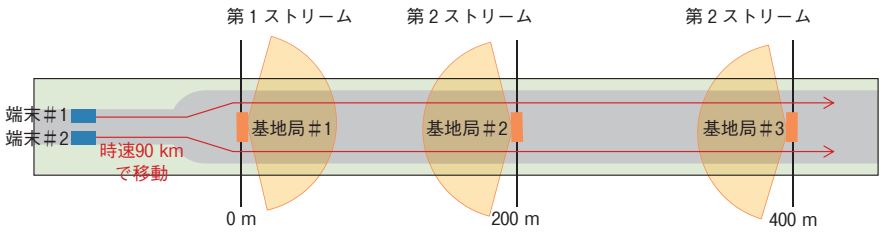


図３　実験構成

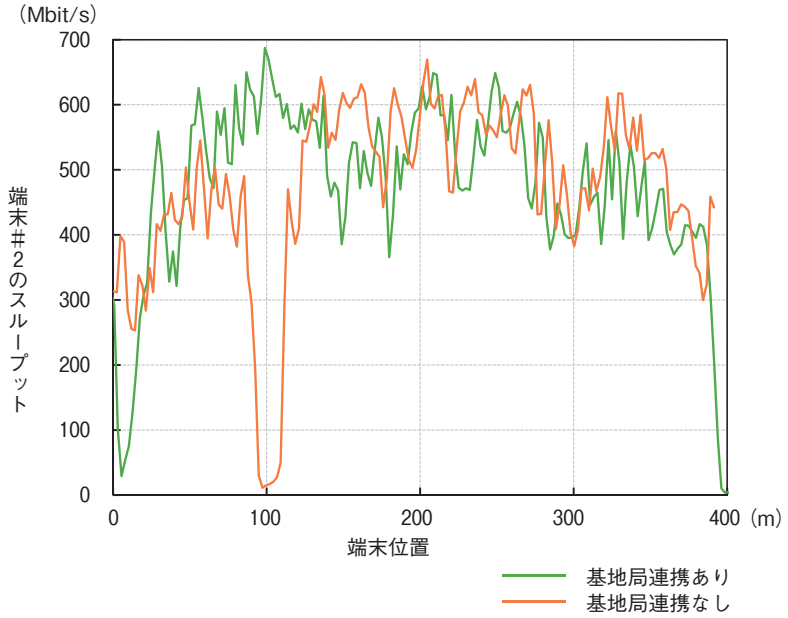


図４　基地局連携の効果

なる基地局から送信する分散MIMO技術を適用しました．具体的には，基地局＃１は常に各端末の第１ストリームを送信するものとし，基地局＃２と基地局＃３は第２ストリームを送信します．このように複数の基地局から異なるストリームを送信することで，各基地局からの伝搬路情報の相関が下げられ，MIMO空間多重されたストリームの分離が容易になります．さらに，基地局連携技術として，基地局＃２と基地局＃３を高速に切り替える，あるいは，基地局＃２と基地局＃３から同時に送信する，という２種類の方法を実装しました．本実験では，端末が時速90 kmで高速移動したときの下りリンクスループットを評価しました．

■実験結果

(1)　基地局連携の検証実験

基地局連携の効果を確認するため，図３における基地局＃２を利用しない（基地局連携しない）場合と，すべての基地局を利用する（基地局＃２と基地局＃３が連携する）場合とを比較しました．基地局連携の効果のみをみるため，本実験では端末＃２のみを利用し，それを時速90 kmで移動させました．また，基地局＃１は第１ストリームを，基地局＃２あるいは基地局＃３は第２ストリームをそれぞれ送信するものとし，基地局連携を行う場合は，基地局＃２と基地局＃３のうち，CUが伝搬路情報から通信品質を向上できると判断した基地局からストリームを送信するものとしました．

端末位置が０～400 mにおけるスループットを**図４**に示します．同図から，基地局連携を行わない場合，100 mの位置で大きくスループットが劣化していますが，基地局連携を行うことで劣化させずに通信できていることが分かります．これは，基地局＃２が200 mの位置に設置され，基地局連携（基地局高速切替え）を行ったことで，ある基地局の通信性能が劣化し得る環境や端末位置であっても，異なる基地局からの通信を行えた効果です．このように，基地局連携により，エリア内で広範囲に高速通信を実現できることが確認できました．

(2)　２端末多重時の基地局連携（基地局高速切替え）実験

基地局＃２と基地局＃３を通信品質に応じて高速に切り替えた場合の，２端末それぞれの２ストリーム合計のスループットを**図５**に示します．基地局＃２のアンテナアレーは図３の左方向を向いているため，端末は200 m付近で基地局＃２から基地局＃３へ切り替えていると考えられます．そこで，200 m付近のスループットを確認すると，端末＃1，端末＃２のどちらの場合も，スループットの大きな劣化はみられず，比較的安定して基地局の切替えが実現できています．

以上の結果から，２台の端末が時速90 kmで高速移動する環境であっても，デジタルBFにより端末間干渉を抑圧することで２台の端末との同時通信を実現しつつ，基地局切替えによりエリア内において安定して高いスループットを達成できることが分かります．

(3)　２端末多重時の基地局連携（基地局同時送信）実験

基地局＃２と基地局＃３を同時送信させた場合，第２ストリームの送信に

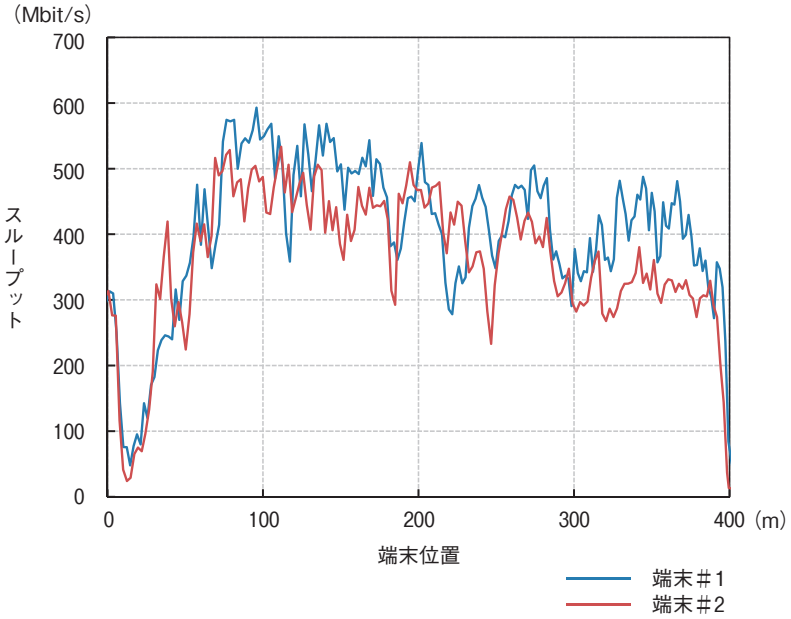


図 5　時速90 kmでの基地局高速切替え時のユーザスループット

関して，基地局＃2と基地局＃3が同時に同一信号を送信しているため，端末での受信電力の向上が期待できます．

測定結果から，0～200 mの範囲のスループットでは，同時送信は問題なく動作していることが確認できました．さらに，例えば0～50 m付近にかけてスループットが多少ではあるものの向上しており，これは，同時送信により受信電力が向上するとともに，周辺環境によって一方の基地局からの信号の通信品質が劣化したとしても，他方の基地局からの信号が存在するため，全体としての通信品質の劣化を抑えられたものと考えられます．ただし，50 mから200 mの位置では，スループットが高い値を維持していません．これは，本環境では見通し波が支配的ということもあり，基地局＃2と基地局＃3の信号が重畳されている電波が，互いに打ち消し合うような位置となることもあるためです．しかし，同時送信により高速移動環境でのスループットを安定化できていると考えられます．

以上の実験結果から，基地局連携として同時送信させる場合の有効性が実証されました．

あとがき

本稿では，5Gのさらなる高度化に向けて，ミリ波帯でのデジタルBFの適用により複数端末間の干渉抑圧を行いつつ，基地局連携技術の適用により広範囲で安定したスループットの提供をめざした研究開発について解説しました．デジタルBFによる基地局連携技術を実装したミリ波帯実験装置を開発し，屋外伝送実験により，時速90 kmで高速移動する2台の端末間の干渉を抑圧しつつ，3台の基地局を利用し，基地局間の高速切替え，あるいは，基地局の同時送信を行う基地局連携技術により，広い範囲で安定して高いスループットを提供できることを明らかにしました．今後は，さまざまな基地局の設置方法での基地局連携技術の効果を検証していく予定です．

本稿には，総務省からの委託を受けて実施した「電波資源拡大のための研究開発（JPJ000254）」の成果の一部が含まれています．

■参考文献

(1) https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/index.html
(2) S. Yoshioka, S. Suyama, T. Okuyama, J. Mashino, and Y. Okumura：“Digital Beamforming Algorithm for 5G Low-SHF Band Massive MIMO,” IEICE Trans. on Commun., Vol.E102-B, No.8, pp.1371-1381, August 2019.
(3) https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_210330_00.pdf
(実験動画URL：https://youtu.be/q86dRrs0rSw)

（上段左から）奥山 達樹／須山 聡
（下段左から）野中 信秀／浅井 孝浩

今回紹介した内容以外にも，より一層高速で移動する複数端末への安定した通信提供に向けた技術検討や，多様な環境に応じた基地局配置の検討等が必要です．今後も研究に力をそそぎ，快適な通信環境の構築をめざしていきます．

◆問い合わせ先
NTTドコモ
R&D戦略部
E-mail　dtj@nttdocomo.com