

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

6G-IOWN推進部

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

現在5Gでは商用サービスが提供されているが、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ある。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る。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ある。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る。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た。

1. まえがき

第5世代移動通信システム（5G）では、6GHz以下の周波数帯や、28GHz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る。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た。

ドコモでは、3.7、4.5、28GHz帯を用いて5Gの商用サービスを展開している。ここで、28GHz帯は利用可能な帯域幅が3.7、4.5GHz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上では技術的な課題が存在する。しかしながら、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である [1]。

本稿では、デジタル信号処理によりBFを行うデ

©2021 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

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

*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。

デジタルBFを実装した複数の28GHz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する。

2. 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

2.1 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る。

- 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100kmで高速道路などを移動中の車両内の端末に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る。しかし、当然ながらビーム同士の干渉も発生するため、干渉が適切に抑圧されとは限らない。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広く、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する。

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ある。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（以下、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する。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る。

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う。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る。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上では重要な技術である。

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る。

2.2 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・制御する。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する。ただし、電波の重ね合せであるために、

*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する。
*4 ビームフォーミング（BF）：送信信号に指向性をもたせることで、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する。

ある方向のビーム形状は常に同一となる。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、最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する。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る。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ある。デジタルBFの干渉抑圧のイメージを図1に示す。アナログBFでは、図1(a)のように特定方向にビームを向けた場合、そのビーム形状は常に固定パターンである。そのため、環境によっては端末間で干渉が発生し、その影響が大きい場合には通信性能が大きく劣化する。一方、デジタルBFの場合、周辺環境に応じてビーム形状を適正化できる。図1(b)のイメージでは、端末間の干渉を抑圧できるようなビーム形状を形成することで、干渉抑圧しない場合と比較して通信品質の向上が可能である。

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る。

この伝搬路情報は伝搬路行列から推定される。伝搬路行列は、行数が端末のアンテナ素子数（以下、素子数）、列数が基地局の素子数である。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る。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るが、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らない。

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た [2]。このようにすることで、推定す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る。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

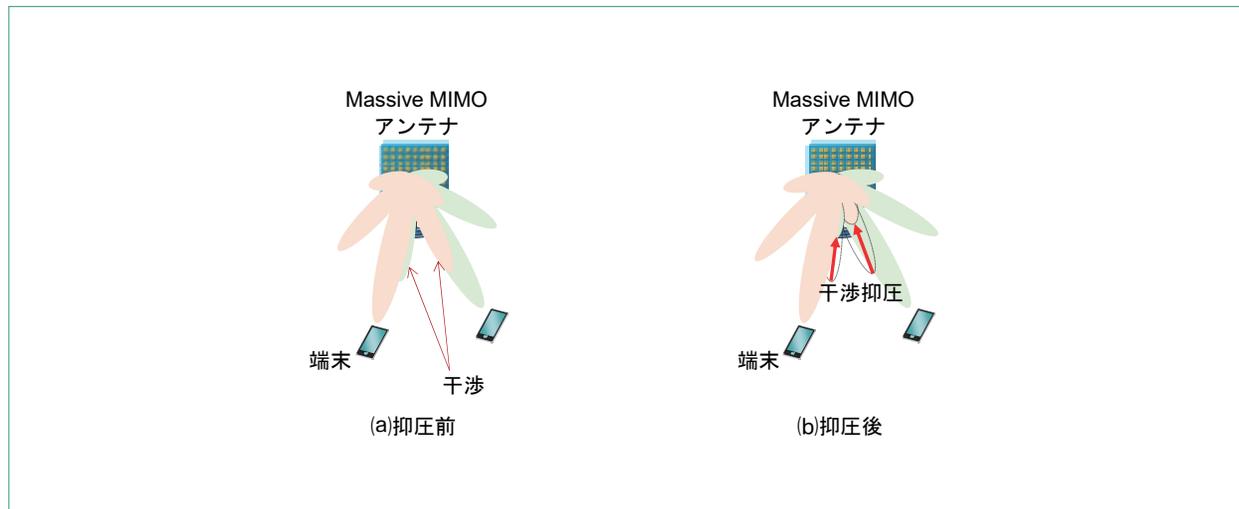


図1 デジタルBFによる干渉抑圧イメージ

- *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す。
- *6 増幅器：信号を増幅させる回路のことを指す。

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た。

2.3 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写真1に、主要諸元を表1に示す。

基地局は、240素子のMassive MIMOアンテナがベースバンドユニット（BBU：BaseBand Unit）*7に接続される。このBBUにおいて、デジタルBFのウェイト計算が行われる。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る。

端末については、縦15素子のアンテナアレー*9を4枚有する。4枚のうち、参照信号*10の送信には2枚のみの30素子を利用するが、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ある。これらのアンテナアレーは無線部*11を経てBBUに接続される。

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する。その推定結果からデジタルBFウェイトの生成を行い、最大で端末当たり2ストリームの信号を送信する。端末は、2ストリーム合計で最大705Mbpsのスルー

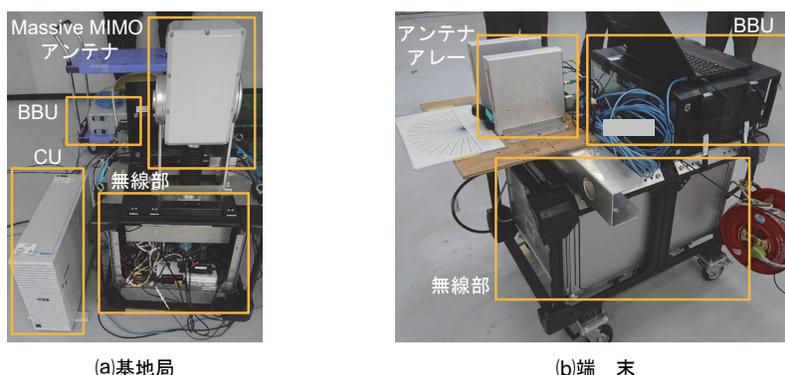


写真1 実験装置

表1 実験装置諸元

中心周波数	27.6GHz
帯域幅	100MHz (100MHz×1CC)
基地局素子数	240 (垂直15×水平16)
端末素子数	60 (垂直15×水平4) ※送信時は30素子
ストリーム数	2
基地局最大送信電力	27dBm
端末最大送信電力	18dBm
端末最大レート	705Mbps

*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。

プットを達成できる。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する。

3. ミリ波帯屋外伝送実験の概要と結果

3.1 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た [3]。その実験模様を

写真2に示す。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台の車両に設置した。このとき、基地局と端末のアンテナ高はどちらも2.2mである。

実験構成を図2に示す。2台の端末は時速90kmで等速移動し、3台の基地局の横を通過する。3台の基地局はそれぞれ0, 200, 400mの位置に設置した。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上で、さらに、各ストリームを異なる基地局から送信する分散MIMO技術を適用した。具体

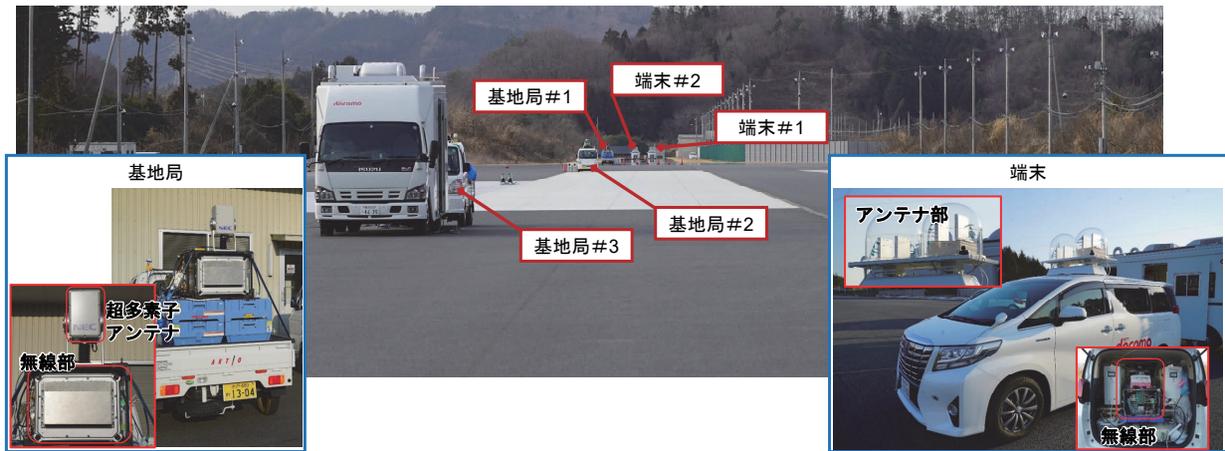


写真2 実験模様

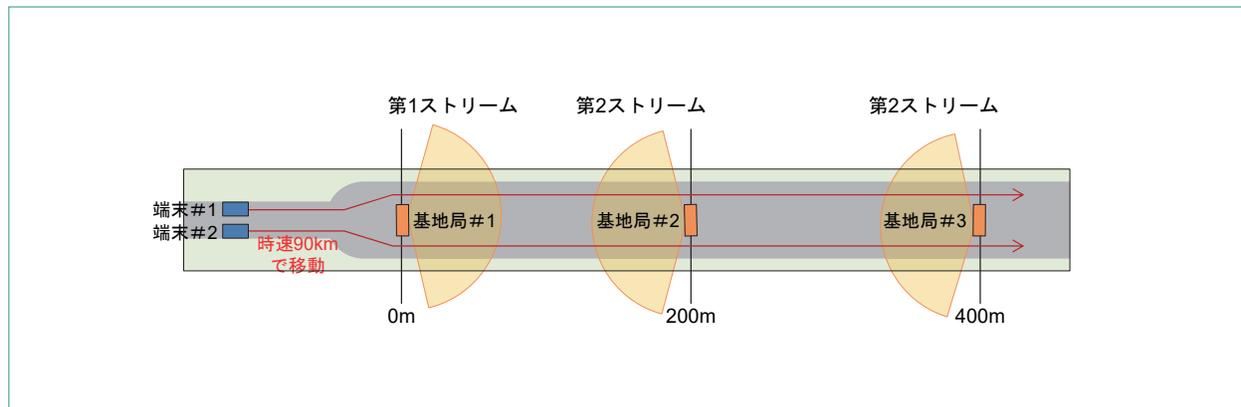


図2 実験構成

*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る。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。

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ストリームを送信する。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る。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た。本実験では、端末が時速90km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た。

3.2 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2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）場合とを比較した。基地局連携の効果のみを見るため、本実験では端末#2のみを利用し、それを時速90kmで移動させた。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た。

端末位置が0~400mにおけるスループットを図3に示す。同図から、基地局連携を行わない場合、100mの位置で大きくスループットが劣化しているが、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る。これは、基地局#2が200m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ある。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4に示す。基地局#2のアンテナアレーは図2の左方向を向いているため、端末は200m付近で基地局#2から基地局#3へ切り替え

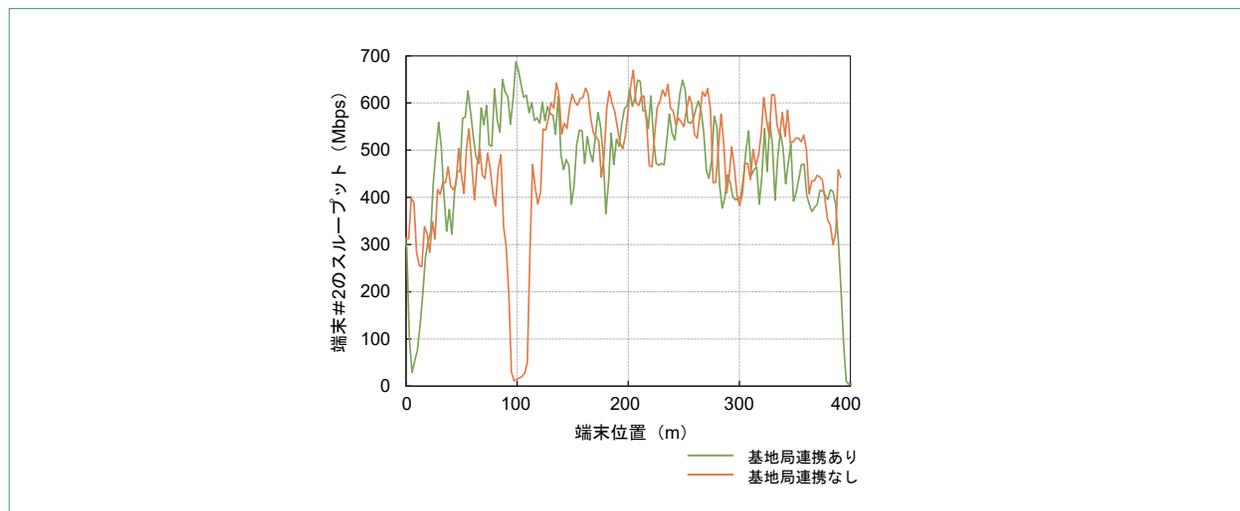


図3 基地局連携の効果

ていると考えられる。そこで、200m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見られず、比較的安定して基地局の切替えが実現できている。

以上の結果から、2台の端末が時速90km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る。
(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のスループットを図5に示す。基本的な条件は図4と同じであるが、第2ストリームの送信に関して、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る。

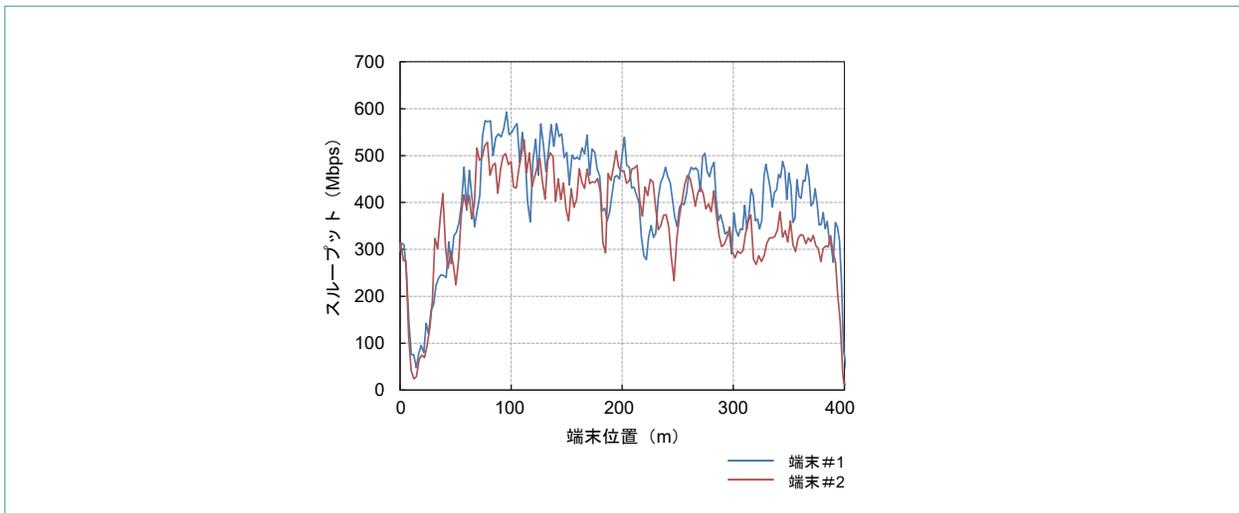


図4 時速90kmでの基地局高速切替え時のユーザスループット

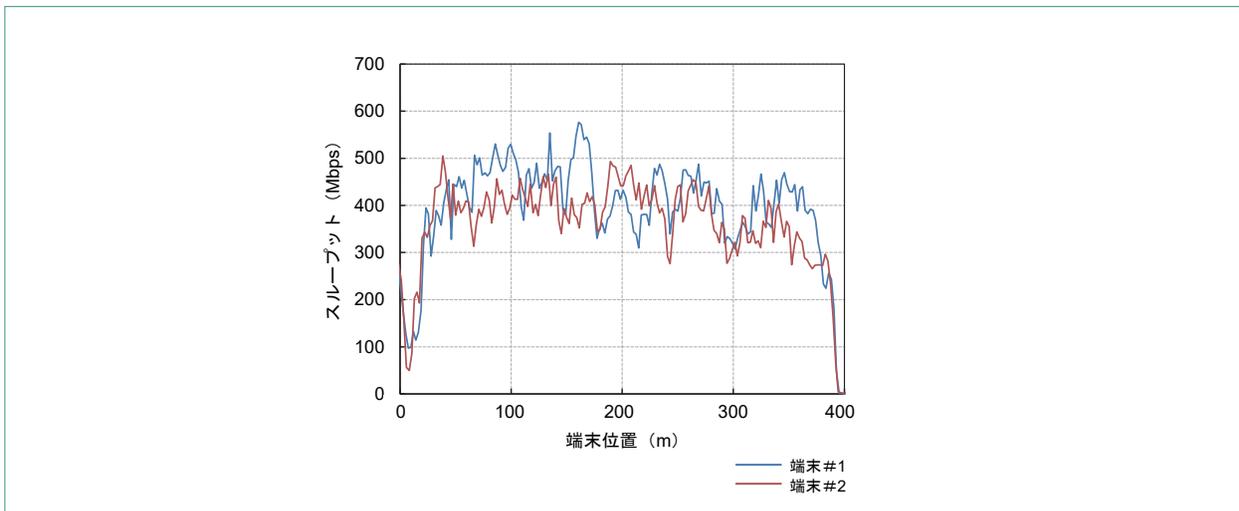


図5 時速90kmでの基地局同時送信時のユーザスループット

結果から、0~200m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る。さらに、図4の場合と比較すると、例えば0~50m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いることが確認できる。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る。ただし、50mから200mの位置では、図5のスループットは必ずしも図4のスループットよりも高い値を維持していない。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ある。しかしながら、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る。

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た。

4. 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目指した研究開発について解説した。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90km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、基地局間的高速切替え、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ある。

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る。

文 献

- [1] NTTドコモ：“ホワイトペーパー：5Gの高度化と6G.”
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, Aug. 2019.
- [3] NTTドコモ：“時速90km以上の高速で走行する複数の車両に搭載した通信端末でミリ波を用いて安定的な高速5G通信実験に成功,” May 2021.
https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_210330_00.pdf
(実験動画URL：<https://youtu.be/q86dRrs0rSw>)