Technology Reports

5G

ミリ波

長距離屋外伝送実験

特集 5Gの実現に向けた新技術の実証実験

ミリ波を用いた超高速・長距離伝送の 5G屋外実験

先進技術研究所 5G推進室 岸山 祥久 原田 篤 余 波
ベンジャブール アナス 奥村 幸彦

ドコモは2020年のサービス提供開始をめざして、第5世代移動通信システム (5G) の研究開発を進めている。5Gでは、従来の周波数帯に加え、「ミリ波帯」と呼ばれる高周波数帯も利用し、飛躍的に高速・大容量な通信を実現することできる。本稿では、超高利得なビームフォーミング送信技術によって、電波の距離減衰が大きく、遠くに飛ばすことが困難なミリ波を用いて、1kmを超えるような長距離での高速伝送に挑戦する、5G屋外実験を東武鉄道およびファーウェイと共同で行ったので、その概要を解説する。

1. まえがき

2010年代の移動通信のトラフィック量は年率1.6 倍以上で増加されてきており [1], そのままいくと 2020年代の情報社会ではLTEが導入された2010年と比較して1,000倍以上に増大すると予測されてきた. 5Gは, このような激増するトラフィックに応えるネットワークシステムの大容量化を可能な限り低コスト・低消費電力で実現することを目標とし,加えて, 10Gbpsを超えるような超高速通信やさら

なる低遅延化、IoT (Internet of Things) の普及な どに伴う多数端末との接続への対応といったさまざ まな高性能化を実現する移動通信システムである.

5Gの大きな特徴として、現在の移動通信で利用されている周波数帯(4GHz以下)に加え、「ミリ波帯」(30GHz以上)*も利用し、飛躍的な高速・大容量通信を実現することが挙げられる。しかしながら、ミリ波のような高周波数帯は、その特性として電波の距離減衰が大きく、遠くに伝搬させることが困難であるという問題がある。そこで、ドコモではこの

^{©2018} NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます.

[※]移動通信業界では、5Gで有望な周波数帯である28GHz帯も含めて 慣習的にミリ波と呼ばれており、本稿ではこれもミリ波とする。

ような高い周波数帯と、広範囲なカバレッジに適した低い周波数帯を組み合わせて使うことで、高周波数帯を用いることによる高速・大容量化と通信の安定性の両立を実現する5Gの技術コンセプト(ファントムセル*1/Dual Connectivity*2)を提案してきた[2].一方で、都市部だけではなく地方、郊外、山間部など、より多様な環境で超高速な通信を提供することを考慮すると、ミリ波のような高周波数帯といえども可能な限り広いカバレッジを提供することが重要である。

本稿では、このようなミリ波の移動通信への応用に関する技術課題に対して、超高利得なビームフォーミング*3送信技術によって、1kmを超えるようなマクロセル*4環境での長距離・高速伝送をミリ波を用いて実現する、5G無線アクセスの屋外実験

を東武鉄道およびファーウェイと共同で行ったので その概要を解説する.

2. 28GHz帯を用いた東京スカイツリー・ 浅草間での5G長距離伝送実験

2017年12月に5Gの実用化に向けて有望な周波数帯の1つである28GHz帯を用いて、東京スカイツリー®*5の展望台から浅草地区への1kmを超える長距離伝送実験を東武鉄道およびファーウェイと行った「3].

2.1 実験の概要

本実験環境を**図1**に示す. 本実験は, ドコモが東 武鉄道㈱の協力により構築した「5Gトライアルサ



図1 実験環境(東京スカイツリー周辺)

- *1 ファントムセル: ドコモが提唱する高度化スモールセルシステムのこと
- *2 Dual Connectivity:マスターとスレープ2つの基地局に接続し、それらの基地局でサポートされる複数のコンポーネントキャリアを用いて送受信することで、広帯域化を実現する技術.
- *3 ビームフォーミング:複数のアンテナの位相の制御によって アンテナに指向性パターンを形成し、特定方向に対するアンテナ利得を増加/減少させる技術.
- *4 マクロセル: セルとは移動通信システムにおいて、1つの基地 局アンテナがカバーするエリアであり、マクロセルはカバーさ れるエリアが比較的広いセル(半径500m程度以上)のこと.

イト」で行ったもので、東京スカイツリー天望デッキ®フロア340に設置した実験用無線基地局(**写真1**(a))と、基地局から約1.2km離れた東武鉄道浅草駅の駅ビル屋上に設置した携帯電話端末に相当する移動局装置(写真1(b))との間で上下リンクの通信を行った、本実験の中心周波数は27.9GHzとした。OFDM

(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*6 信号のサブキャリア*7間隔は60kHzで、システム帯域幅として700MHz(100MHz/CC(Component Carrier)*8×7)を適用した。

今回の実験では、5Gのキー技術の1つである多数 のアンテナ素子を用いるMassive MIMO (Multiple



写真1(a) 5G基地局装置 (東京スカイツリー天望デッキ)



写真1(b) 5G移動局装置 (東武鉄道浅草駅ビル屋上)

- *5 東京スカイツリー®:「東京スカイツリー」「東京スカイツリー 天望デッキ」「東京スカイツリータウン」は、東武鉄道㈱、東 武タワースカイツリー㈱の登録商標.
- *6 OFDM: デジタル変調方式の1つで, 情報を複数の直交する搬送波に分割して並列伝送する方式. 高い周波数利用効率での伝送が可能.
- *7 サブキャリア:複数の搬送波で情報ビットを並列伝送するマルチキャリア変調方式におけるそれぞれの搬送波。
 - *8 CC:キャリアアグリゲーションにおいて東ねられるキャリア を表す用語.

Input Multiple Output)によって、東京スカイツリーから浅草駅方向に向けてのビームフォーミングを行った。Massive MIMOとは、高周波数帯を用いる5Gにおいて、100素子を超えるような多数のアンテナ素子を用いて鋭いビームを形成し、電波の強度を移動局の方向に向けて強めることができる技術である。

2.2 実験結果とデモンストレーション

本実験では、下りリンク(基地局から移動局方向)および上りリンク(移動局から基地局方向)それぞれについて、最適な時分割複信(TDD: Time Division Duplex)*9のスロット比率を適用し、移動局装置は静止させた条件でスループット特性の測定を行った。結果として図2に示すように、28GHz帯という高周波数帯であるにもかかわらず、基地局から約1.2km離れた地点において、下りリンクで受信時最大4.52Gbps、上りリンクで受信時最大1.55Gbpsの通信速度を達成した。

また本実験は、2017年12月8~10日に東京ソラマチ ***10 5階 スペース634で開催したイベント「docomo 5G Trial Site」(主催:ドコモ)、および、12月8日夜に東京スカイツリー天望デッキで開催された「東

京スカイツリークリスマスラブソングライブ」の様子を浅草駅ビル屋外ビジョンに中継(主催:東武鉄道)するデモンストレーションに合わせて実施した.

「docomo 5G Trial Site」のイベントでは写真2のように、東京スカイツリータウン®のイベント会場から離れた浅草駅の駅ビル内にいる人物をAR(Augmented Reality)***1技術を用いてヘッドマウントディスプレイを通して椅子の上に浮かび上がらせ、実際には目の前にはいない人物があたかもその場に存在し、低遅延でリアルタイムに会話することができるという、将来の新しいコミュニケーションを想定したデモンストレーションを行った。また、12月8日夜のイベントでは、雨天の影響により、写真3のように浅草側からはスカイツリーの展望台から上部がほとんど見えないような状況であったにもかかわらず、途切れることなく3Gbps以上の通信速度を達成し、浅草駅ビル屋外ビジョンへの中継デモを成功させた。

3. 39GHz帯を用いた横浜みなとみらい 地区での5G長距離伝送実験

ファーウェイとの本共同実験では、2020年以降の 5Gの継続的な発展も考慮し、さらに高い周波数帯



下りリンク



上りリンク

図2 達成した通信速度(下りリンク/上りリンク)

^{*9} 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使用し、異なる時間を割り当てることにより 双方向通信が可能.

^{*10} 東京ソラマチ:東武鉄道㈱の登録商標.

^{*11} AR: 現実世界を写した映像に, 電子的な情報を実際にそこに あるかのように重ねて, ユーザに提示する技術.



写真2 5Gイベントでのデモンストレーションの様子



写真3 雨天での実験風景 (浅草駅ビル屋上)

である39GHz帯を用いた5Gの長距離伝送に挑戦した [4].

3.1 適用技術の概要

本実験の周波数帯は39.5GHzから40.9GHzとした. OFDM信号のサブキャリア間隔は120kHzで、シス テム帯域幅として1,400MHz (200MHz/CC×7) を 適用した.

39GHz帯という高周波数帯で1kmを超える長距離 伝送を実現するため、本実験ではメタマテリアル*12 を応用したレンズアンテナ*13を用いて、無指向性 アンテナの1.000倍以上に相当する超高利得なビー ムフォーミング (31dBi (deciBel isotropic)*14) を 実現した. このレンズアンテナでは. メタマテリア ルにより特定の誘電率の分布を形成し、より小型の アンテナでMassive MIMO同様にアンテナから出 射される電波を特定の方向に集中させるビーム フォーミングが実現できる. また. アンテナ内部に 電波を放出する放射源を複数用意し、これを切り替 えることでビームの送信方向を変更することができ る. 本実験では、図3に示すように、水平方向に8 通り、垂直方向に8通りの全64個の候補ビームから 最適なビームを選択する. 各候補ビームの半値幅*15 は3.5°程度である。基地局および移動局における 各ビームの組合せの受信品質を測定し、最も良いも のを選択することにより、信号の受信品質を向上さ せることができる.

本実験で用いた無線フレーム*16構成を図4に示す.本実験では、無線フレーム長は10msとし、スロット長は0.125msとしたため、1無線フレーム内には80スロットが含まれる。非常に短いスロット時間を用いる無線フレーム構成を採用することにより、基地局および移動局における最適ビーム探索に必要な時間を可能な限り短縮している。1無線フレーム内には以下の4種類のスロットが用いられる。

- ①DLビーム走査スロット (DownLink beam sweeping slot):下りリンクの参照信号を用いて、ビームの探索が可能なスロットである (例:図4 (Slot #0)).
- ②DLスロット (DL slot):下りリンクのデータ送信に用いられるスロットであり,データ信号および制御信号が含まれる (例:図4 (Slot #1)).

^{*12} メタマテリアル:電磁波に対して自然界の物質にはない振る舞いをする人工物質のこと.

^{*13} レンズアンテナ: 光学で用いられるレンズのように特定方向に 鋭く電波を集中させるアンテナのこと. レンズアンテナは放射 器から広く放射された電波をうまく屈折させて位相を揃えるこ とにより, ある方向に鋭く電波を放射させることができる.

^{*14} dBi: 仮想的な等方向性(アイソトロピック)アンテナを基準とした際のアンテナ利得を表す単位.

^{*15} 半値幅:アンテナから放射されている電力がその最大値から半分になるまでの角度範囲. 指向性の鋭さを表す.

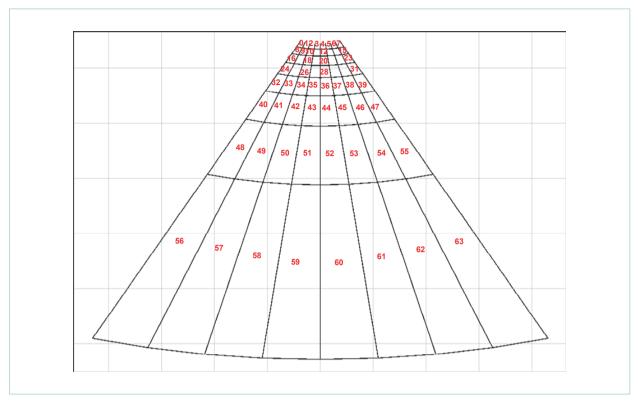


図3 全64個の候補ビーム

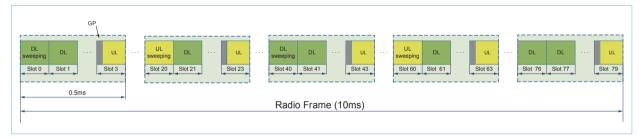


図4 無線フレーム構成

- ③ULスロット (UpLink slot): 上りリンクのデータ送信に用いられるスロットでありガード区間 (GP: Guard Period), データ信号および制御信号が含まれる (例: 図4 (Slot #3)).
- ④ULビーム走査スロット (UL beam sweeping slot):上りリンクの参照信号を用いて、ビームの探索が可能なスロットである (例:図4 (Slot #20)).

ビーム探索および追従制御は、DLおよびULのBeam sweeping slotに含まれる参照信号を用いて各ビームの組合せごとの受信品質を測定する。ビーム走査スロットは2.5msごとに上下リンク交互に送信され、全ビームの組合せ(4,096通り=64通り(基地局側)×64通り(移動局側)の探索を160msで行う設計となっている。これにより、基地局側および移動局側のそれぞれにおける送受信用の最適な

^{*16} 無線フレーム:信号処理(符号化・復号化)を行う最小単位. 1個の無線フレームは、時間軸上で複数のスロット(またはサブフレーム)によって構成され、各スロットは時間軸上で複数のシンボルによって構成される.

ビームを、移動局の移動や無線チャネル変動に合わせてダイナミックに更新することができる.

本実験装置ではQPSK (Quadrature Phase Shift Keying)*17, 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation)*18, 64QAM*19をサポートし、適応変調を採用した。また、Large delay CDD (Cyclic Delay Diversity)*20を適用し、垂直・水平偏波を用いた2×2

MIMO*²¹伝送を行う.

3.2 実験結果

本実験を神奈川県横浜市みなとみらい地区で2017 年11月に実施した. 伝送実験装置の外観を**写真4**に, 実験環境を図5に示す.

本実験装置を用いた屋外実電波環境において図5



5G基地局装置



5G移動局装置(測定車内)

写真4 基地局装置および移動局装置の外観



図5 実験環境 (横浜メディアタワー周辺)

- *17 QPSK: デジタル変調方式の1つで、4つの位相にそれぞれ1つの 値を割り当てることにより、同時に2bitの情報を送信可能.
- *18 16QAM: デジタル変調方式の1つ. 位相と振幅の異なる16通りの組合せに対してそれぞれ1つの値を割り当てることにより, 同時に4bitの情報を送信可能な変調方式.
- *19 64QAM: デジタル変調方式の1つ. 位相と振幅の異なる64通り
- の組合せに対してそれぞれ1つの値を割り当てることにより、 同時に6bitの情報を送信可能な変調方式.
- *20 Large delay CDD:送信ダイバーシチ技術の1つで、送信アンテナ間で同一のデータ信号に異なる長い巡回遅延量を付与して送信することにより、シンボル間干渉を回避しながら、周波数ダイバーシチを得る方式.

移動局装置の条件	基地局装置からの距離(km)	スループット(最高値Gbps)
移動時(時速約20km)	1.5	2.02
静止時		3.35
	1.8	2.14
	0.9	3.78
	0.3	5.63

表1 基地局装置からの距離対スループット特性

に示す各測定条件の移動局におけるスループットの 測定結果を**表1**に示す. 結果より, 横浜メディアタ ワーに設置したファーウェイの5G基地局から約1.5km 離れた地点において, 移動時(時速約20km)で受 信時最大2.02Gbps, 静止時で受信時最大3.35Gbpsの 超高速通信を達成した. また, 5G基地局から約1.8km 離れた距離でも, 静止時で受信時最大2.14Gbpsを, また, 5G基地局から約0.3km離れた距離では受信時 最大5.63Gbpsの超高速通信を達成した.

一般に、ミリ波帯を移動通信や長距離伝送に用いるとカバレッジの確保が難しいとされているが、高速なビーム切替え・追従技術や高いビームフォーミングゲインを有する本伝送実験装置を用いて、1km以上のエリアにおいても、2Gbps以上のスループット特性を実現できることが確認できた。移動ありの場合、移動なしと比較してUEの移動によるスループット特性の劣化が見られたものの、2Gbps以上のスループットを維持することができた。

4. あとがき

本稿では、5G無線アクセスの伝送実験装置を用いたミリ波帯(28GHz帯および39GHz帯)における

屋外長距離伝送実験の概要および結果について報告した.結果、基地局から1km以上の伝送距離において数Gbpsの高いスループットを達成した.これらの成果により、電波の減衰が大きく、遠くに伝搬させることが困難だと考えられてきた高周波数帯の電波を、都市部に比較してより長距離伝送が必要とされる地方、郊外、山間部など、より多様な環境で利用することができる技術を実証することができた.今後は、見通し外などにおいてミリ波のカバレッジをより拡大していくための屋外実験を予定している.

文 献

- [1] Cisco Whitepaper: "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update," 2010 2015.
- [2] NTTドコモ: "ドコモ5Gホワイトペーパー," Sep. 2014. https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_5g/index.html
- [3] NTTドコモ報道発表資料: "東京スカイツリーから浅草 への28GHz帯を用いた5G長距離伝送実験に成功," Dec. 2017
 - https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news_release/topics/topics_171207_00.pdf
- [4] NTTドコモ報道発表資料: "39GHz帯を用いる5G移動通信の長距離伝送実験に成功," Dec. 2017. https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news_release/topics/topics_171211_00.pdf

^{*21} MIMO:送信データをあらかじめ複数の信号(ストリーム)に 分割し、送信機と受信機の双方で複数のアンテナを使い、それ らを同じ周波数帯域で送受信する無線通信方式.