

2020年のサービス実現に向けた5G技術特集

5G無線アクセス技術

スマートフォンの普及に伴い、データをより高速で低遅延かつ高効率に提供することができるLTEサービスが急速な広がりを遂げ、また、LTEをさらに発展させたLTE-Advancedの世界的な展開が開始されている。しかし、今後もさらなるユーザ体感品質の向上およびシステム性能改善が必要であり、次世代移動通信システム「5G」の検討が開始されている。本稿では5Gの無線アクセス技術について、技術発展の方向性および有望と考えられる要素技術を概説する。

先進技術研究所 5G推進室

ベンジャブール アナス

さいとう けいすけ さいとう ゆうや
齊藤 敬佑 齋藤 祐也きしやま よしひさ
岸山 祥久

1. まえがき

移動通信システムにおける無線通信方式は、1980年代に普及した第1世代（1G）のアナログ音声通話サービスからほぼ10年ごとに世代が移り変わり、現在の第4世代（4G）のLTE/LTE-Advancedへと進化してきた（図1）。また各世代を代表する技術があり、3Gおよび4GにはCDMA（Code Division Multiple Access）^{*1}、およびOFDMA（Orthogonal Frequency Division Multiple Access）^{*2}、MIMO（Multiple Input Multiple Output）^{*3}、などがあった。し

かし、「5G」はこれまでの世代と違って、技術先行ではなく、超高速、超大容量、超低遅延、超多数端末接続および低消費電力化といった要求が先にある。また、無線アクセス技術が成熟しつつある中、これらの要求条件を満たすには複数の要素技術をいかにうまく組み合わせるかが重要となる。本稿では、5G無線アクセス技術の発展の方向性を、またモバイルブロードバンド（MBB：Mobile Broad Band）の拡張およびIoT（Internet of Things）^{*4}時代に向けた5G無線アクセスの要素技術について概説する。

2. 5Gへの無線アクセス技術の発展

2.1 超高速・超大容量化のアプローチ

5Gの具体的な要求条件としてLTEのサービスを開始した2010年と比較して、100倍の超高速化や1,000倍の超大容量化といった飛躍的な性能改善が求められる[1]。このうち、大容量化に対するソリューションとして図2に示すように周波数利用効率^{*5}を向上させる技術（図2①）、さまざまな周波数帯における広い周波数帯域幅を有効活用する技術

^{*1} **CDMA**：同一の無線アクセスシステム帯域内において、複数ユーザの信号を送信する際に互いに異なる拡散符号を用いて送信すること。

^{*2} **OFDMA**：OFDMを用いた無線アクセス方式。OFDMは高速データレートの広帯域信号を多数の低データレートのマルチキャリア信号を用いて並列伝送することにより、

マルチパス干渉に対する耐性の高い高品質伝送を実現する方式。

^{*3} **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。

(図2②), および高密度にスモールセルを運用するための技術を組み合わせる(図2③)アプローチが考えられる。これにより、例えばセル当り

の周波数利用効率 (bps/Hz/cell) (図2①), 周波数帯域幅 (Hz) (図2②), 単位面積当りのセル数 (cell/km²) (図2③) をそれぞれ10倍に向上す

ることができれば, 単位面積当りの無線通信容量 (bps/km²) を1,000倍にできる計算になる(図2の“キューブ”の体積に相当)。また, 無線LAN

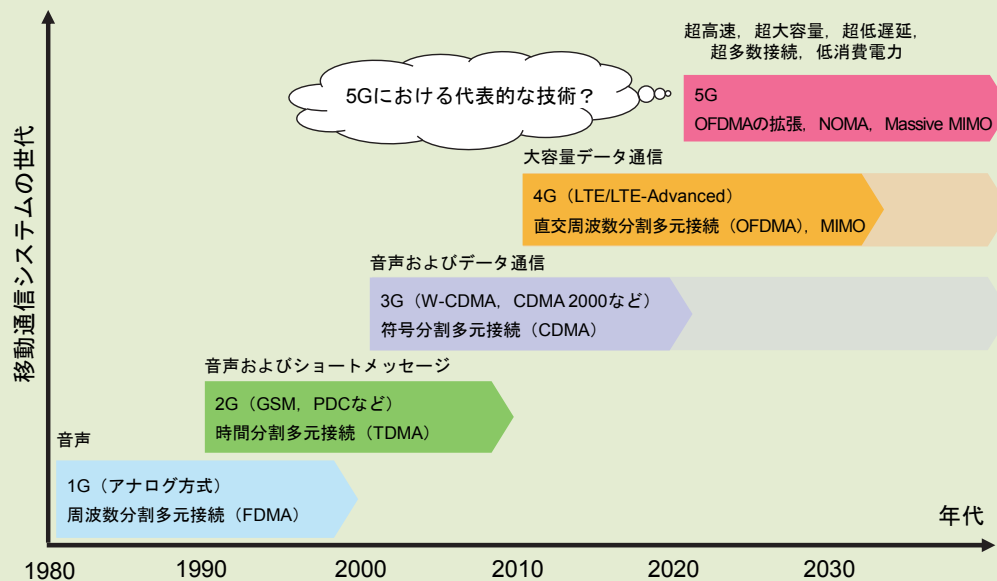


図1 移動通信システムの進化および各世代における代表的な技術

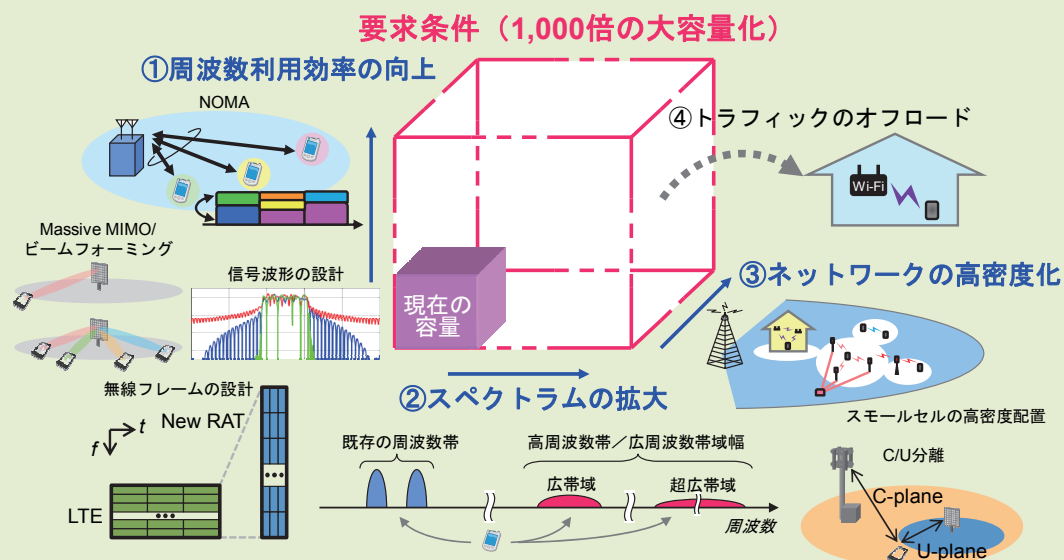


図2 5G無線アクセス技術の発展方向性

*4 IoT: さまざまな「モノ」がインターネットやクラウドに接続され, 制御・情報通信される形態の総称。

*5 周波数利用効率: 単位周波数当りに送信可能な最大情報量。単位はbps/Hz。

などへの高効率なオフロードなども大容量化には有効なアプローチであり、相互補完的に導入することが考えられる（図2④）。

しかしながら、次世代の移动通信システムにおいて周波数帯域幅をさらに拡張して有効的に活用するためには、3Gや4Gで用いられている既存の周波数帯に加えて、より高い周波数帯を開拓していく必要があります、また、セル数の増大はネットワークのコストや消費電力の増大を招くので、より効率的な構築および運用が求められる。加えて、上記の通り周波数利用効率をさらに向上させる必要もあり、5Gでは創意工夫によってこれらの目標を達成していく必要がある。

2.2 C/U分離（ファントムセル）

ドコモは、異なる周波数帯やRAT（Radio Access Technology）^{*6}を連携させるファントムセルのコンセプトを提案している[2]。これは、例え

ば図3に示すように、異なる周波数帯を適用したマクロセル^{*7}とスモールセル^{*8}との間において、制御信号（C-Plane：Control Plane）^{*9}とデータ信号（U-Plane：User Plane）^{*10}を分離するC/U分離を用いるネットワーク構成である。

このファントムセルは、LTE-Advancedのキャリアアグリゲーション（CA：Carrier Aggregation）^{*11}の技術をベースとした高度化C-RAN（Centralized Radio Access Network）^{*12}[3]アーキテクチャと同様に、ハンドオーバー^{*13}などによるモビリティ管理制御を複雑化することなく、比較的高い周波数帯へも容易にセル展開可能である。さらに、高度化C-RANにはない点として、分散型の基地局構成も含めてC/U分離を実現する技術、すなわち異なる基地局間でのCA技術への拡張も可能としている。

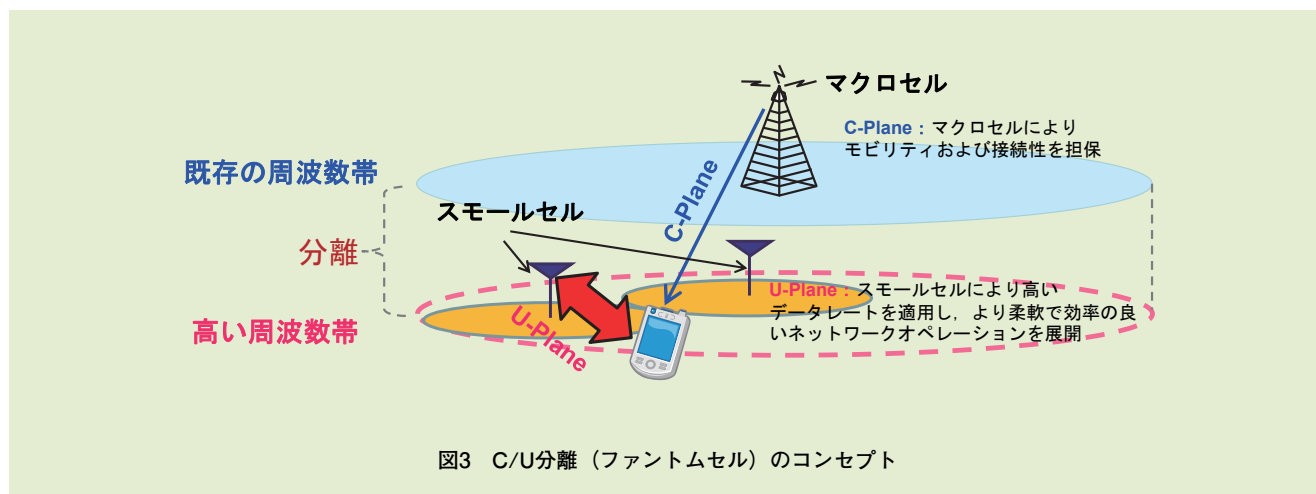
また、ファントムセルには、高い周波数帯のスモールセルにおいて物理的なセルID^{*14}を不要としながらセ

ルIDを仮想化するバーチャルセル技術や、端末が高周波数帯のスモールセルを高効率に発見（ディスカバリ）する技術など、既存のLTE/LTE-Advancedと比較して、より高度な機能拡張が考慮されている[4]。これらのファントムセルに関連する要素技術は、LTE-Advancedにおけるスモールセルの拡張技術として、すでに3GPP（3rd Generation Partnership Project）ではDC（Dual Connectivity）という名称で標準仕様が完了している。このファントムセルは低い周波数帯と高い周波数帯をeLTE（enhanced LTE）とNew RATの組合せによってサポートする5G無線アクセスのコンセプトにおいても基本となる考えである。

2.3 New RATの設計

(1)柔軟な無線パラメータのサポート

5GではNew RATの導入により、LTEとの非互換性を許容したうえで、性能の大幅な向上が求められる。特に、10Gbps以上の伝送レート実



^{*6} RAT：LTE、3G、GSMなどの無線アクセス技術のこと。

^{*7} マクロセル：主に屋外を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。通常、鉄塔上やビルの屋上などにアンテナが設置される。

^{*8} 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。

^{*9} 制御信号（C-Plane）：制御信号を扱うコントロールプレーンのこと。

^{*10} データ信号（U-Plane）：ユーザデータを扱うユーザプレーンのこと。

^{*11} キャリアアグリゲーション（CA）：複数のコンポーネントキャリアを用いて同時に送受信することで、LTEとの後方互換性を保

ちながら広帯域化を実現する技術。

^{*12} 高度化C-RAN：マクロセルとスモールセルを高度に連携させ、周波数利用効率を高める技術。

^{*13} ハンドオーバー：通信中端末が移動に伴いセルを跨る際、通信を継続させながら基地局を切り替える技術。

現のため、数百MHzから1GHz以上の広帯域化に加えて高い周波数帯のサポートが求められる。しかし高い周波数帯では、位相雑音^{*15}の影響が顕著となるため、無線パラメータの最適化などにより位相雑音に対する耐性を高める必要がある。例えば、LTEではサブキャリア^{*16}間隔が15kHzのOFDMを信号波形として適用しているが、図4のように高周波数帯ではサブキャリア間隔を広げる(OFDMシンボル^{*17}長を短くする)ことで、位相雑音に起因するサブキャリア間の干渉の影響を小さくすることができ、位相雑音への耐性を

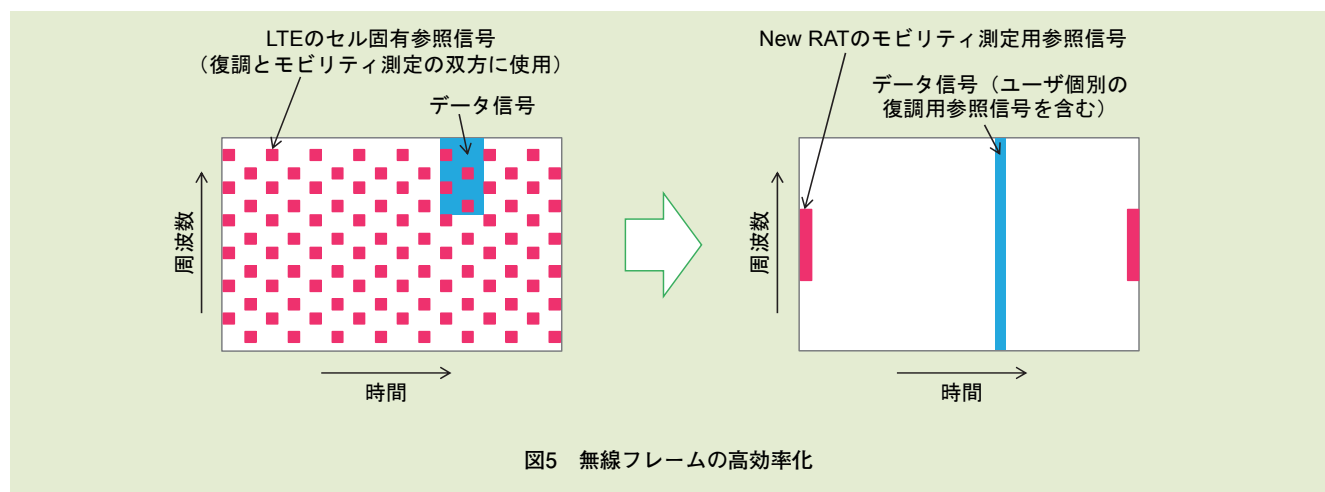
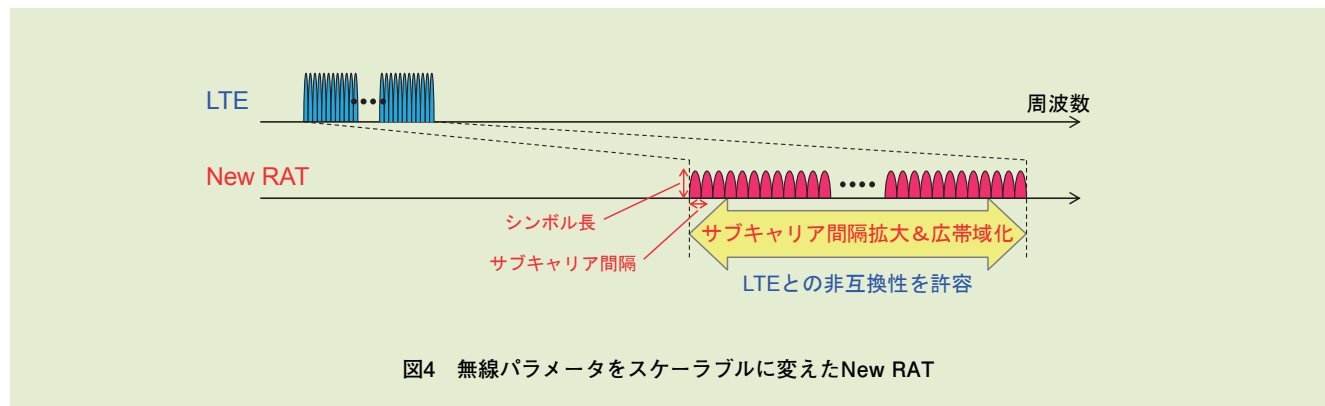
高めることができる。

このような高い周波数帯向けの無線パラメータの実現方法として、使用する周波数帯によってスケラブルに変えたものを用いる設計も有力である。そのメリットとして、LTEとNew RATの双方に対応する(Dual mode)端末や、低い周波数帯と高い周波数帯の双方へ同時接続する(DC)端末の実装が比較的容易となることなどが挙げられる。また、OFDMシンボル長の短縮によりパケット伝送の送信区間(TTI: Transmission Time Interval^{*18})も同時に短縮することができ(図2左下)、無

線アクセス区間の遅延を低減することも可能である。

(2)高効率な無線フレーム構成

New RATでは、高効率な無線フレーム構成が必要とされている。例えば、図5に示すように、LTEでは時間および周波数軸に幅広く分散的にマッピングされたセル固有参照信号(CRS: Cell-specific Reference Signal)を用いてデータの復調およびモビリティのための測定が行われる。しかしながら、CRSは基地局が送信するデータトラフィックがない時にも常時送信されるため、エネルギーの無駄になるとともに、都市部のよ



*14 セルID: セルごとに付与される識別情報。

*15 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。

*16 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送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。

*17 OFDMシンボル: 伝送するデータの単位で

あり、OFDMの場合は複数のサブキャリアから構成される。各シンボルの先頭にはCPが挿入される。

*18 TTI: トランスポートチャネルで伝送される1データ当りの伝送時間。

うに多数のセルが高密度に存在する環境では他セルへ与える干渉にもなる。

そこで、New RATでは、モビリティ測定に必要な最低限の参照信号を、比較的長周期かつ局所的に送信することで、データトラフィックがない場合には無送信になるような高効率な無線フレーム構成が検討されている。この際、復調に用いる参照信号は、ユーザ個別にデータ信号の中に多重される。また、TTI長の短縮により、データ信号をより短時間で送信することができ、消費電力を抑える効果も期待される。

また、将来的にNew RATを用いて多様なシナリオ（端末間通信（D2D：Device-to-Device）^{*19}、無線バックホール^{*20}、マルチホップ通信^{*21}など）をサポートすることを考慮すると、上下リンク間で対称性の高い無線フレーム構成が望ましいと考えられる。

3. 5G無線アクセスの要素技術

5Gにおける有力な無線アクセスの要素技術について以下に概説する。なお、Massive MIMO^{*22}技術については本特集号の別記事で紹介するため本稿では割愛する。

3.1 信号波形

信号波形観点では、5Gシステムでは図6のようにMBBおよびIoT関連シナリオがターゲットになっており、MBB向けにはマクロセルにおけるカバレッジ拡張や伝搬遅延への対策、高周波数帯への拡張、高速移動環境における伝搬チャネル変動に対するロバスト性が、IoT向けにはマシンタイプコミュニケーション（MTC：Machine Type Communications）^{*23}におけるショートパケット伝送や非同期アクセスのサポートが

要求される。

また、図7のように5Gでは周波数帯および周波数帯域幅や適用環境に応じて異なる無線パラメータや信号波形を適用するアプローチが有力であると考えられる。例えば5Gでは、OFDMをベースとしたマルチキャリア伝送^{*24}が有力な信号波形の候補であり、可変的な無線パラメータの適用によって幅広い周波数帯をサポートすることができるものと考えられる。しかしながら、ミリ波（30GHz以上）のような非常に高い周波数帯では超広帯域化（数GHz程度の帯域幅など）をサポートする観点からOFDMと比較してカバレッジの観点で優れるシングルキャリア伝送^{*25}なども候補になると考えられる。5Gでベースと考えられるOFDM伝送は、MIMOとの親和性が高く、広帯域伝送におけるマルチパス^{*26}環境で高い周波数利用効率を実現可能であり、

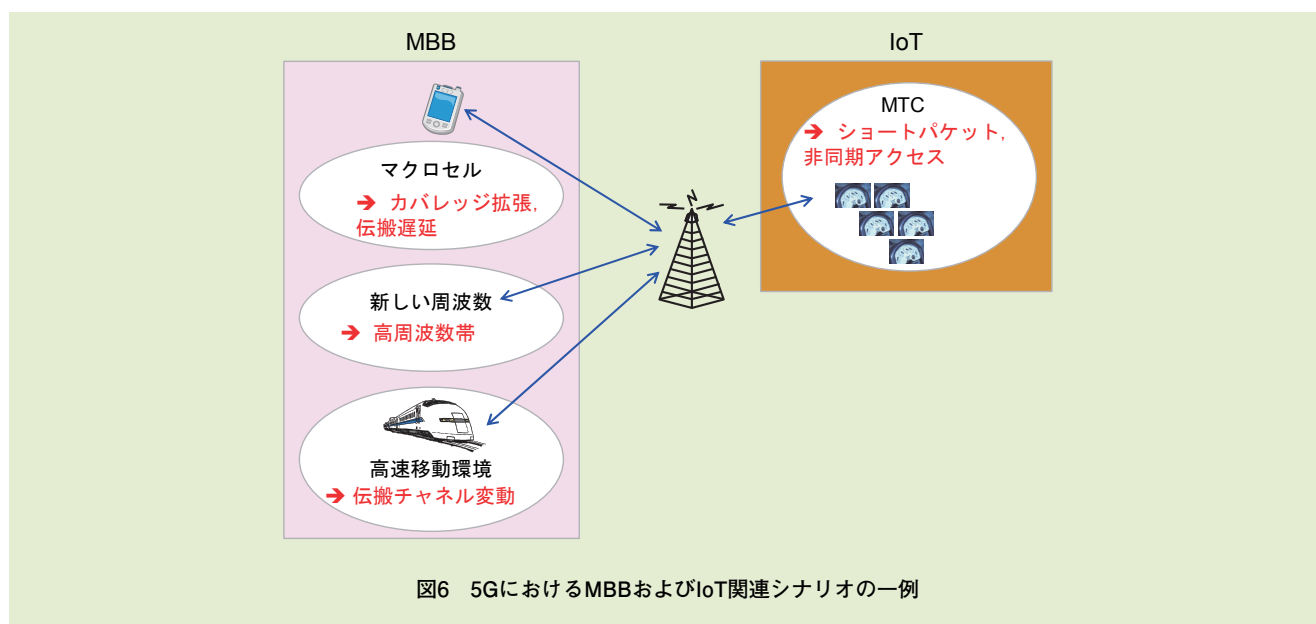


図6 5GにおけるMBBおよびIoT関連シナリオの一例

^{*19} 端末間通信（D2D）：端末どうしが基地局を介さずに直接データのやりとりを行う通信方法。

^{*20} 無線バックホール：基地局間の通信を無線リンクにより実現すること。

^{*21} マルチホップ通信：2台の端末が直接通信できない場合に、他の端末を中継器として機能させて通信を行うこと。

^{*22} Massive MIMO：超多素子のアンテナを利用する大規模MIMOのこと。高い周波数帯ではアンテナ素子サイズを小さくすることができるため、5Gでの実用化が期待されている。

^{*23} マシンタイプコミュニケーション（MTC）：マシン型通信。人間による通信操作を介しない機械通信の3GPPにおける総称。

^{*24} マルチキャリア伝送：複数の搬送波に複数のデータを変調して送信する伝送方式。LTEおよびLTE-AdvancedではOFDM方式が用いられる。

^{*25} シングルキャリア伝送：データなどの信号を送信する際、1つの搬送波に変調して伝送する方式。

OFDM, もしくはOFDMをベースとした新たな信号波形によりさまざまなサービスをサポートすることが有望視されている。そのため、信号波形には、「高い周波数利用効率」「周波数／時間領域波形の高い局在性（送信信号の帯域外／時間外への広がり）の抑圧によるガードバンド低減」「サブキャリア間の高い直交性（チャネル推定^{*27}方法やMIMOのような他の技術との親和性など）」が要求される。この要件を実現するた

め、OFDM信号にフィルタを適用する新たな信号波形が検討されている。以下では5Gに向けた新たな信号波形候補である、FBMC (Filter Bank Multicarrier), UF-OFDM (Universal Filtered OFDM), F-OFDM (Filtered OFDM) に関して概説する。図8に、LTEの下りリンクですでに導入されている、サイクリックプレフィクス (CP: Cyclic Prefix)^{*28}を適用するCP-OFDM, および5Gの新たな信号波形候補の周波数／時間

領域の波形を示す。

①FBMC

FBMCは、サブキャリア単位でフィルタを適用する。サブキャリア間の直交性を保持するために急峻な周波数特性を有するフィルタを適用するが、帯域外輻射^{*29}は他の信号波形と比較して小さい。一方で、時間領域では信号波形が広がるためショートパケット適用時のオーバーヘッド増大や遅延時間の増大が懸念される。

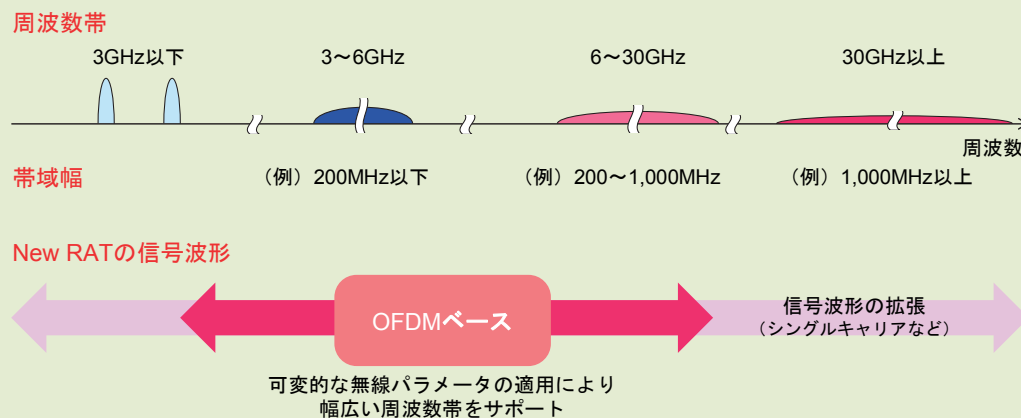


図7 各周波数帯における候補信号波形の一例

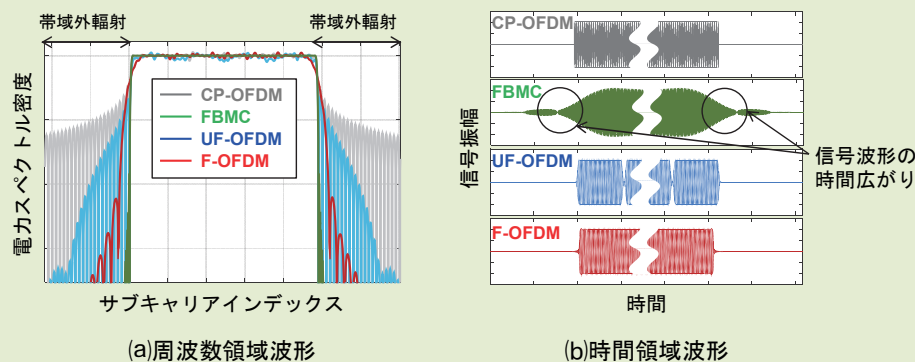


図8 各信号波形の時間／周波数波形

^{*26} マルチパス：送信機から送信された電波が、建物や地形などの障害物によって反射・回折し、複数の経路を通じて受信機に到達する現象。

^{*27} チャネル推定：信号が無線チャネルを経由した際に受けた減衰量および位相回転量などを推定すること。得られた推定値（チャネル情報）は、受信側でMIMOの信号分離

やデータ復調およびフィードバックするチャネル情報の算出などに用いられる。

^{*28} サイクリックプレフィクス (CP)：OFDM信号などにおいて、マルチパスなどに起因する前後シンボル間の干渉を抑圧するために、シンボル間に設けられたガードタイム。

^{*29} 帯域外輻射：通信のために割り当てられた周波数帯域の外部への電力の放射。

②UF-OFDM

UF-OFDMは、サブバンド^{*30}単位でフィルタを適用する。各シンボルにCPは挿入せず、代わりにガード区間（無送信区間）を挿入することでシンボル間干渉を回避する。FBMCと比較して帯域外輻射は増大するが、時間波形の広がり小さく、ショートパケットや非同期アクセスへの適用、遅延時間の短縮に有効である。

③F-OFDM

F-OFDMは、CPを保持したままサブバンド単位でフィルタを適用する。CPを挿入するため無送信区間は不要であり、UF-OFDMと比較してフィルタ長の長いフィルタが適用可能となるが、FBMCと比較して時間波形の広がり小さくすることができる。フィルタ端がCP区間を超えるためにシンボル間干渉が発生するが、適切なフィルタを選択することでその影響は小さく抑えることが可能となるため、UF-OFDMと同様にショートパケットや非同期アクセスへの適用、遅延時間短縮に有効である。

ドコモでは、2020年の5Gサービス提供をめざし、標準化および商用開発を迅速に進めるために世界の主要ベンダ13社と協力して5Gの検討を精力的に進めており[5]、新しい信号波形の検討として、アルカテル・ルーセントとはFBMCやUF-OFDM、ファウウェイとはF-OFDMに関する検討および実証実験を共同で実施

している。また、ドコモ欧州研究所と、信号波形の比較評価やMIMOとの親和性などの詳細な検討を共同で進めている[6]。

3.2 ダイナミックTDDとフレキシブル・デュプレクス

4Gまでの移動通信システムは、基本的に上下リンクを周波数領域で分割するFDD（Frequency Division Duplex）^{*31}方式もしくは時間領域で分割するTDD（Time Division Duplex）^{*32}方式のいずれかが適用されるシステムであった。しかしながら、5Gで想定される幅広い周波数帯を用いる移動通信では、異なる複信（デュプレクス）方式が各周波数帯に適用される可能性があり、より柔軟に両方式をサポートする「フレキシブル・デュプレクス」の実現が要求されるものと考えられる。このため、TDDにおいて上りサブフレームと下りサブフレームとの構成（DL/UL configuration）を動的に変化させるダイナミックTDDへの拡張や異なる周波数帯でC/U分離を行うファントムセルのコンセプトを複信方式の差異によらず柔軟にサポートできることが望ましい。従って、FDD、TDD、もしくはTDD DL onlyやTDD UL only（片方向下りリンクまたは上りリンクのみ）といった通信リンクの柔軟な選択や同時接続に加え、電波免許不要な周波数帯（Unlicensed band）を含む周波数帯の適応的な選択やCA/DCを実現し

ていく技術、それらに伴い課題となる上下リンク間の干渉対策技術などが、5Gにおける「フレキシブル・デュプレクス」の要素技術として考えられる。

3.3 NOMA

(1)概要

これまでの移動通信システムにおける多元接続法は、1GではFDMA（Frequency Division Multiple Access）^{*33}、2GではTDMA（Time Division Multiple Access）^{*34}、3GではCDMAと進化してきた。4Gはさらにサブキャリア間の直交性を利用したOFDMAが用いられている。これに対し、5Gで検討されている非直交多元接続（NOMA：Non-Orthogonal Multiple Access）は、下りリンクに適用する場合はセル内の複数のユーザへの信号を基地局側で同一の無線リソース上に多重し、同時に送信する多元接続法である。これにより、さらなる周波数利用効率の向上が期待でき、LTE-Advancedや5Gの要素技術として有望視されている[7]。NOMAではOFDMAにおける隣接する周波数軸方向のリソースと直交性を保ちつつ、さらに新たな電力軸方向でユーザを意図的に非直交で多重させる。

(2)基本原理

図9にNOMAの基本原理を示す。下りリンクを対象にセル内に存圏するユーザ（UE：User Equipment）のうち、基地局に近く受信品質の良いセル中央ユーザの端末（図9のUE₁）

*30 サブバンド：周波数帯域全体を分割した周波数単位。

*31 FDD：上りリンクと下りリンクで、異なるキャリア周波数、周波数帯域を用いて信号伝送を行う方式。

*32 TDD：上りリンクと下りリンクで、同じキャリア周波数、周波数帯域を用いて時間スロットで分割して信号伝送を行う方式。

*33 FDMA：同一の無線アクセスシステム帯域内において、複数ユーザの信号を送信する際に互いに異なる周波数を用いて送信すること。

*34 TDMA：同一の無線アクセスシステム帯域内において、複数ユーザの信号を送信する際に互いに異なる時間を用いて送信すること。

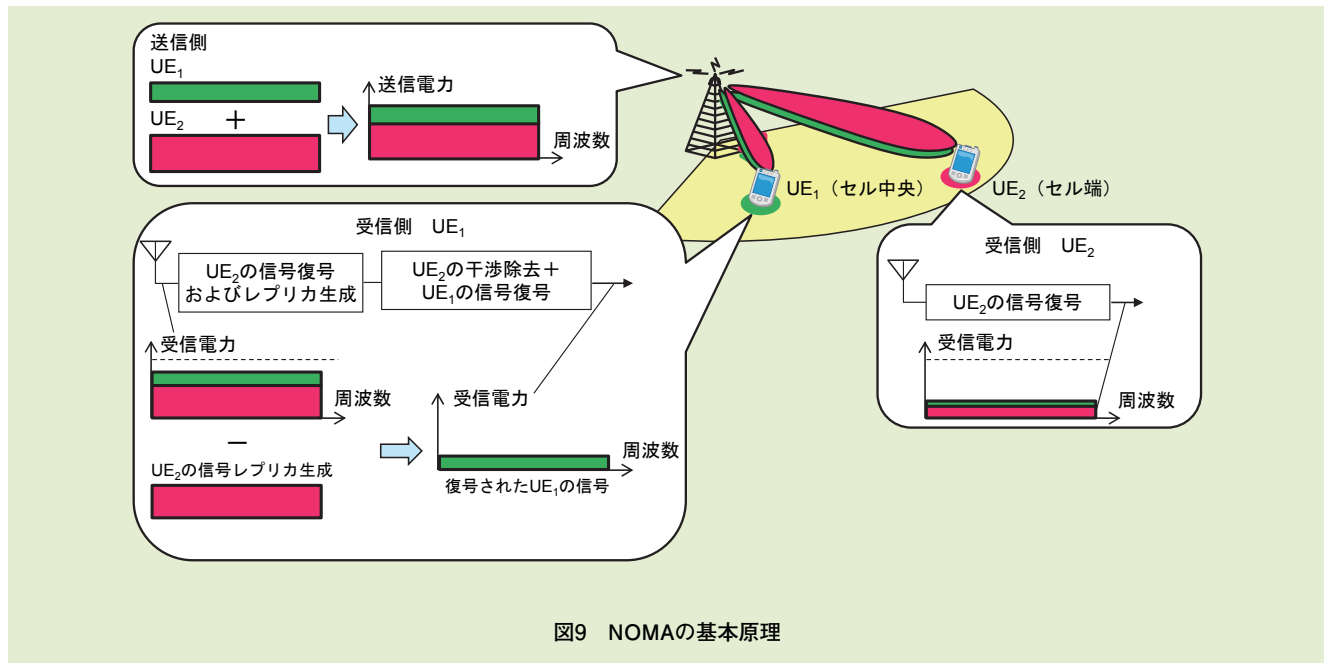


図9 NOMAの基本原理

とセル端付近の受信品質の悪いユーザの端末 (図9のUE₂) をペアとして選択し、同じ時刻の同じ周波数リソースを使って多重して基地局から送信する。ここで、UE₂宛ての信号に対しては、より多くの電力を割り当てるのに対し、UE₁宛ての信号には少ない電力を割り当てる。

受信側に着目すると、基地局に近いUE₁にはUE₁宛てとUE₂宛ての信号が多重されて届くためユーザ間干渉が生じるが、2つの受信信号の間に一定の電力差があれば簡易な干渉除去処理により信号分離が可能となる。

①例えば、基地局に近いUE₁において受信電力の強いUE₂宛ての信号のみをまず復号し、この復号した信号を用いてUE₂の信号の複製 (レプリカ^{*35}) を作成し、受信信号から差し引くこと

でUE₁宛ての信号を分離、復号することが可能となる。

このような信号分離処理は逐次干渉キャンセル (SIC: Successive Interference Cancellation)^{*36}と呼ばれ、3Gから検討されてきたが端末側で高度な処理能力が要求されるため実現が難しかった。しかしながら、昨今の端末性能の急速な向上に伴い、実用化が期待されている技術である。

②一方でUE₂に着目すると、干渉信号に当たるUE₁宛ての信号には低い送信電力が割り当てられているため、SICを適用せず直接UE₂宛ての信号を復号できる。

また、NOMAは基地局のスケジューラにおいてサブフレーム^{*37}単位で動的にNOMA適用可否を選択できるため、既存の

LTE/LTE-Advanced端末をサポートするネットワーク上での共存も可能である。また、LTEで適用されているような技術との組合せも可能となる。例えば、LTEで導入されているMIMOとNOMAを組み合わせることで、送信アンテナ数以上のデータストリーム^{*38}数を多重することができ、システム性能を向上させることができる。

(3)シミュレーション評価および伝送実験

NOMAに関して、ドコモはその有効性を明らかにすることを目的に、シミュレーション評価や試作した実験装置を用いた伝送実験を実施してきた[8]~[11]。本研究では無線フレーム構成はLTE Release 8をベースとしており、ユーザのプリコーディング行列^{*39}を基地局側へとフィード

*35 レプリカ：特定された送信信号の推定値に対する受信信号を再生したもの。

*36 逐次干渉キャンセル (SIC)：複数の信号が合成された受信信号から1つずつ信号を検出、キャンセルしながら信号分離を行う方法。

*37 サブフレーム：時間領域の無線リソースの単位であり、複数のOFDMシンボル (LTEでは14 OFDMシンボル) から構成される。

*38 データストリーム：MIMO伝送などの並列伝送を行う場合の個々のデータ系列。例えば、2×2MIMO適用時の最大データストリーム数は2となる。

*39 プリコーディング行列：送信信号の位相や振幅を制御するためのプリコーディングウェイトに基づく行列。

バックしないTM3 (Transmission Mode 3) とフィードバックするTM 4 (Transmission Mode 4) について評価する。

①シミュレーション評価

図10にCWIC (CodeWord level SIC)^{*40}受信機を適用した場合における、セル中央ユーザの多重電力比 (P_1) に対してCWICを適用するセル中央ユーザのブロック誤り率 (BLER: BLock Error Ratio) が 10^{-1} を満たす所要SNR (Signal to Noise Ratio)^{*41}を示す。多重ユーザ数を2とし、LTE TM3[12]に基づく2-by-2開ループ (ユーザ端末からのフィードバック情報が不要な) SU (Single User)-MIMO^{*42}を適用した。各ユーザの変調方式および符号化率 (MCS: Modula-

tion and Coding Scheme)^{*43}は、セル中央ユーザは64QAM (Quadrature Amplitude Modulation)^{*44} (符号化率: $R=0.5$)、セル端ユーザはQPSK (Quadrature Phase Shift Keying)^{*45} ($R=0.49$) とした。また、NOMAとMIMOを組み合わせるために各ユーザに対する受信品質に応じて決定されるMIMOの送信ストリーム数 (送信ランク) の組合せが複数存在する。本研究ではセル中央ユーザおよびセル端ユーザのランクの組合せである ($R_1: R_2$) は1:1, 2:1, 2:2の3種類とした。また、比較対象としてLTEで適用されているOMA (Orthogonal Multiple Access)^{*46}を適用した場合の特性を示す。結果より、 P_1 が0.4より大

きい領域においてユーザ間干渉の影響が増大し所要SNRの増大が見られるが、NOMA多重時に適用される確率が高い多重電力比である P_1 が0.2から0.4の範囲ではOMA適用時とほぼ同等の所要SNRを実現しており、CWICが高い干渉除去性能を有していることがわかる。

②NOMAのシステムレベル評価

表1に、OMAと比較したNOMAのスループット増大効果のシステムレベル評価結果を示す。多重ユーザ数を2、アンテナ構成を2-by-2とし、LTE TM3およびTM4[12]を適用した。なお、ユーザ間干渉は理想的に除去できることを仮定し、リソース割当ておよびMCS選択をサブバンド単位で行うサブ

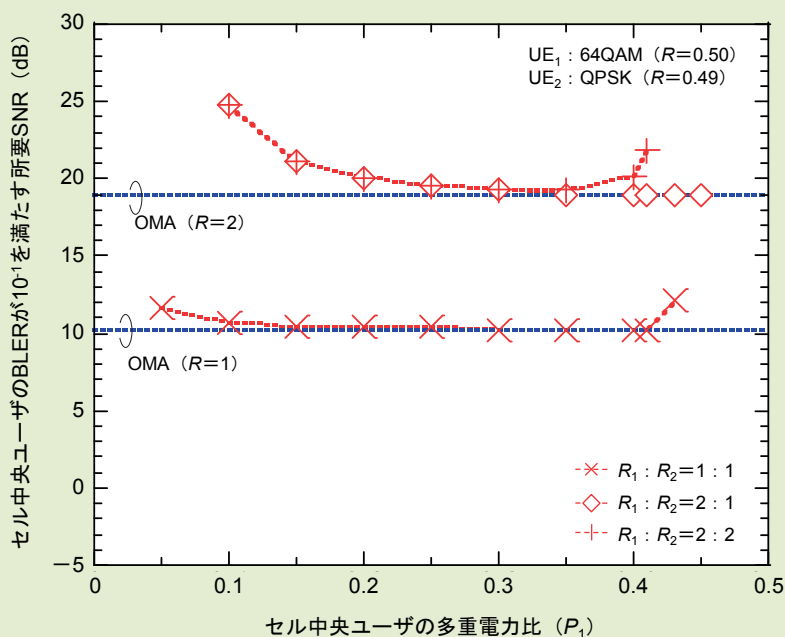


図10 NOMAのリンクレベルシミュレーション評価結果

^{*40} CWIC: 干渉ユーザの信号を復号して干渉レプリカ信号を生成し、干渉除去処理を適用するSIC受信機。

^{*41} 所要SNR: あらかじめ定められた誤り率以下でMIMO信号分離を行うのに必要なSNR (信号対雑音比) の最小値。

^{*42} SU-MIMO: 1ユーザを対象に基地局および端末間で複数のアンテナで複数の信号系統

を送り、多重化して送信する技術。

^{*43} 変調方式および符号化率 (MCS): 適用変調を行う際にあらかじめ決めておく変調方式と符号化率の組合せ。

^{*44} 64QAM: デジタル変調方式の1つ。位相と振幅の異なる64通りの信号を組み合わせることにより、同時に6ビットの情報を送信可能。

^{*45} QPSK: 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。

^{*46} OMA: 直交多元接続。隣接する時間・周波数軸上のリソースがお互い干渉しあわない多元接続のこと。周波数軸上での直交多元接続はOFDMAとなる。

バンドスケジューリング^{*47}および全帯域を使って行うワイドバンドスケジューリング^{*48}を適用した場合の結果をそれぞれ示す。結果より、いずれの場合においてもOMAと比較したNOMAゲインが得られており、TM3およびCase 3を適用した場合では、セルスループットで30.6%，セル端スループットで34.2%の改善が見られ、NOMAがユーザスループットの改善に有効であることがわかる。

③伝送実験装置を用いた測定結果
次に、試作装置を用いた屋内実電波環境における実験結果を示す。図11(a)にNOMA伝送実験装置を、図11(b)に測定結果を示す。図11(a)に示す通り基地局近傍にUE₁，基地局から50m程度離れた地点にUE₂（図外右奥）を静止させ、2-by-2 SU-MIMOを適用した場合のスループット特性を評価しており、結果よりOFDMAと比較してNOMA適用により約80%のゲインが得ら

れることが分かる。

このような非直交性を用いた新しい多元接続法は、国外のプロジェクトや国際会議においてキートピックとして扱われており、近年高い注目を集めている[13]。特に国際標準化団体である3GPPでは、2015年4月よりLTE Release 13のSI（Study Item）^{*49}として検討が開始されている[14] [15]。また、ドコモ北京研究所と、NOMAの下りリンクに加えて

表1 NOMAのシステムレベル評価結果

		2×2 MIMO, TM3			2×2 MIMO, TM4		
		OMA	NOMA	ゲイン	OMA	NOMA	ゲイン
Case 1：サブバンドスケジューリングおよびサブバンドMCS選択	セルスループット	21.375	27.053	26.56%	21.97	27.866	26.84%
	セル端ユーザスループット	0.472	0.633	34.11%	0.544	0.777	42.83%
Case 2：サブバンドスケジューリングおよびワイドバンドMCS選択	セルスループット	21.59	26.29	21.77%	22.291	27.499	23.36%
	セル端ユーザスループット	0.476	0.62	30.25%	0.552	0.769	39.31%
Case 3：ワイドバンドスケジューリングおよびワイドバンドMCS選択	セルスループット	19.068	24.894	30.55%	19.577	25.515	30.33%
	セル端ユーザスループット	0.401	0.538	34.16%	0.451	0.649	43.90%

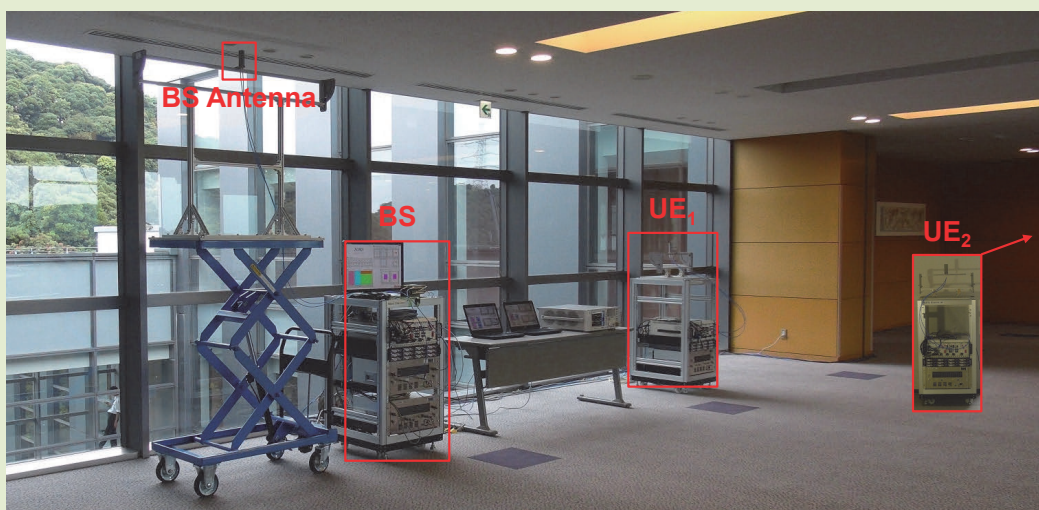


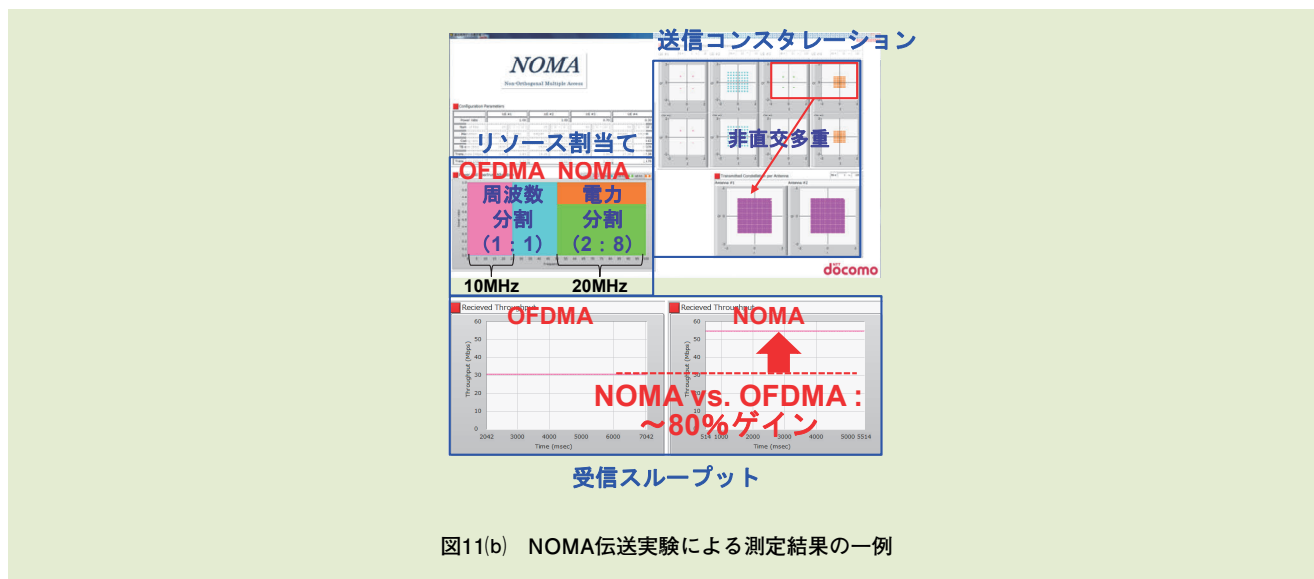
図11(a) NOMA伝送実験装置の外観（屋内実験環境）

^{*47} サブバンドスケジューリング：サブバンド単位での平均チャネル品質指標（CQI：Channel Quality Indicator）を基地局へフィードバックし、サブバンド単位で各ユーザのリソース割当てやMCSを選択をしてスケジューリングする方法。

^{*48} ワイドバンドスケジューリング：全帯域の平均CQIを基地局へフィードバックし、各

ユーザが全帯域を使用してユーザをスケジューリングする方法。

^{*49} SI：仕様作成における課題の検討作業。



上りリンクの評価を共同で進めている[7] [16].

3.4 IoT関連技術

5GではMBBに加えてIoTのサポートも重要となる。しかし、IoTは要求条件が異なるさまざまなカテゴリーが存在しており、それぞれのカテゴリーに応じた設計が必要となる。特に、IoTの主なカテゴリーとしてmMTC (massive Machine Type Communications) やURLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communications) が着目されている[13].

例えば、mMTCの例としてスマートパケットを送信するような大量のセンサが挙げられる。mMTCの場合、カバレッジ拡大や非同期通信をサポートできる信号波形の設計に加えて、同時接続端末数の向上のため制御チャンネル容量の向上を可能とする上りリンクのNOMA[16]や制御情報を不要とする制御チャンネルの設計

(例えば、データ送信の際に事前許可を不要とするチャンネルアクセス方法 (Grant free access)*50) が重要となる。また、URLCCの例として自動運転などのサービスが挙げられる。URLCCをサポートするには5GのNew RATによる低遅延化を十分に生かすための高速な上下リンクの切替えやモバイルエッジコンピューティングがキー技術となる[17]。なお、移動性が伴う自動車や電車などの場合は、グループモビリティやモバイルバックホールの実現が重要となる[18].

4. あとがき

本稿では、5G無線アクセス技術のコンセプトやそれを実現するための要素技術について概説した。5Gの技術コンセプトでは、既存の低い周波数帯からEHF (Extremely High Frequency) 帯*51までの幅広い周波数帯を効果的に組み合わせて用いる

ことにより、帯域幅を拡大しながらカバレッジ維持と容量向上を両立可能としている。5GのNew RATは既存周波数帯から高い周波数帯まで幅広い周波数帯に対応できるように設計される。今後は、周波数帯に応じたシステム性能を改善する技術や周波数帯によらず適用可能な技術について検討することにより、周波数利用効率の向上をめざしていきたい。

文 献

- [1] 岸山, ほか: “ドコモの5Gに向けた取り組み—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] H. Ishii, Y. Kishiyama and H. Takahashi: “A novel architecture for LTE-B: C-plane/U-plane split and Phantom cell concept,” Proc. of IEEE Globecom, Dec. 2012.
- [3] NTTドコモ報道発表資料: “通信集中エリアを快適にする「高度化C-RAN」の屋外用環境での検証に成功,” Feb. 2015.

*50 Grant free access: データ送信する前に基地局側からの事前許可を不要とする無線チャンネルへのアクセス方法。これよりいつでも端末が基地局に対してデータ送信が可能となる。

*51 EHF帯: 波長が1~10mm, 30~300GHzの周波数帯のこと。ミリ波とも呼ばれる。

- [4] 3GPP TR36.842 V0.2.0: "Study on Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN – Higher layer aspects," May 2015.
- [5] NTTドコモ報道発表資料: "世界主要ベンダーとの5G実験を拡大," Jul. 2015.
- [6] A. Benjebbour, Y. Kishiyama, K. Saito, P. Weitkemper and K. Kusume: "Study on candidate waveform designs for 5G," Proc. of IEICE Gen. Conf. '15, B-5-99, pp. 454, Mar. 2015.
- [7] A. Benjebbour, A. Li, Y. Kishiyama, J. Huiling and T. Nakamura: "System-level evaluations of SU-MIMO combined with NOMA," Proc. of IEEE Globecom, Dec. 2014.
- [8] Y. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama and T. Nakamura: "System-Level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)," Proc. of IEEE PIMRC 2013, Sep. 2013.
- [9] Y. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama and T. Nakamura: "System-Level Performance of Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) under Various Environments," Proc. of IEEE VTC 2015-Spring, May 2015.
- [10] K. Saito, A. Benjebbour, A. Harada, Y. Kishiyama and T. Nakamura: "Link-level Performance of Downlink NOMA with SIC Receiver Considering Error Vector Magnitude," Proc. of IEEE VTC 2015-Spring, May 2015.
- [11] K. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, Y. Okumura and T. Nakamura: "Performance and Design of SIC Receiver for Downlink NOMA with Open-Loop SU-MIMO," Proc. of IEEE ICC 2015, Jun. 2015.
- [12] 3GPP TS36.213 V8.8.0: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures (Release 8)," Sep. 2009.
- [13] METISホームページ.
<https://www.metis2020.com/>
- [14] 3GPP RP-150496: "New SI Proposal: Study on Downlink Multiuser Superposition Transmission for LTE," Mar. 2015.
- [15] 3GPP R1-152493: "Candidate Schemes for Superposition Transmission," May 2015.
- [16] X. Chen, A. Benjebbour, A. Li, and A. Harada, "Multi-User Proportional Fair Scheduling for Uplink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)," Proc. of IEEE VTC2014-Spring, May 2014.
- [17] 下城, ほか: "5G時代に向けた将来コアネットワーク," 本誌, Vol.23, No.4, pp.49-58, Jan. 2016.
- [18] 安田 浩人, シン キュン, 森広 芳文, 森岡 康史, 須山 聡, 奥村 幸彦: "5G無線アクセスネットワークにおけるグループモビリティの課題とその解決方法," 信学技報, Vol.114, No.180, RCS2014-144, pp.31-36, Aug. 2014.