Beyond 5G/6Gの研究開発動向と実用化に向けた取組み

株式会社KDDI総合研究所　先端技術研究所 無線部門　山崎（やまざき）　浩輔（こうすけ）

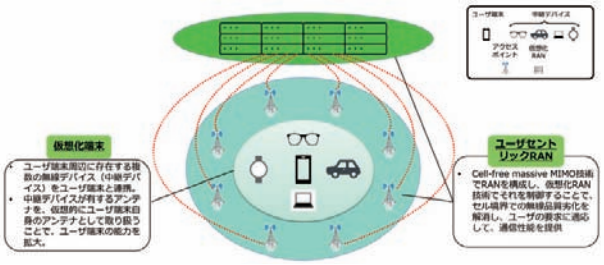
1. Beyond 5G/6G時代向けた無線アクセスネットワーク ―ユーザセントリックアーキテクチャー―

5Gの商用サービスが我が国でも2020年3月に開始されたが、世界中では早くもその次の世代の通信システム（Beyond 5G/6G）の実用化に向けた議論がスタートしている。標準化団体であるITU-Tは、「ネットワーク2030」に向けたギャップや課題を特定するため、「FG NET-2030：ITU-T Focus Group on Technologies for Network 2030」を立ち上げ、ビジョン、要件、アーキテクチャ、新しいユースケース、評価方法など、Network 2030のあらゆる側面が整理された[1]。これを受けてITU-Rでは、現在、WP5D（Working Party 5D）において、Beyond 5G時代のキーテクノロジーを技術動向報告書の発行に向けて取りまとめを進めている。Trend Reportの発行は2023年ごろを予定しており、その後、3GPPなどで議論が進むものと思われる。

欧州では、フィンランドのオウル大学による6Genesisプロジェクトが、北米では、Beyond 5G/6Gに向けた取組みとして、ATIS（Alliance for Telecommunications Industry Solutions）によりNEXT G Allianceが2020年10月に設立され、Apple、AT&T、Google他多数の企業が参加し、Beyond 5G/6Gのロードマップを策定している。

日本でも、総務省によりBeyond 5G推進戦略懇談会が2020年に設置され、2030年代の社会において通信インフラに期待される事項や、Beyond 5G/6Gによりこれを実現するために必要な技術などの議論が開始され、ロードマップが提示されている[2]。Beyond 5Gでは、仮想空間と現実世界を切れ目なく接続するCPS（Cyber-Physical-Synchronization）のより一層の深化が期待されており、ユースケースも数多く議論されているところである。

CPSを具現化するためには、フィジカル空間とサイバー空間の間を切れ目なく大量のデータをやり取りできる必要があることから、下りリンクだけでなく、上りリンクも含めて、Beyond 5G/6Gで求められる各要件を達成することが必須となる。そのため、筆者らは、Beyond 5G/6Gに向けた新しいネットワークアーキテクチャとして、ユーザを取り巻く通信環境や、それぞれのユーザの通信要求に適応して、ユーザが存在するあらゆる場所で高い通信性能を提供し続ける、ユーザ中心の「ユーザセントリックアーキテクチャ」の実現を目指している[3] [4]。



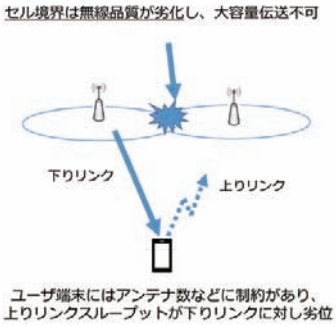
■図1.　ユーザセントリックアーキテクチャ

2. ユーザセントリックアーキテクチャの実現に向けた技術的課題と取組み

本章では、Beyond 5G/6Gに向けた新たな無線アクセスネットワークとして検討を進めているユーザセントリックアーキテクチャにおいて、解決すべき技術課題と具体的な取組みについて紹介する。

2.1　技術的課題

5Gまでは、基地局の最適配置によってサービスエリアを提供するセルラーアーキテクチャが採用されている。この場合、基地局からの距離やユーザの場所によって、通信品質が大きく左右され、あらゆる場所で高い無線品質を提供できないという課題がある。例えば、セル境界では基地局間の干渉によって、ユーザの無線品質が低下することがこれまでも指摘されてきた。一方、ユーザが利用する端末に



■図2.　5Gにおける技術課題

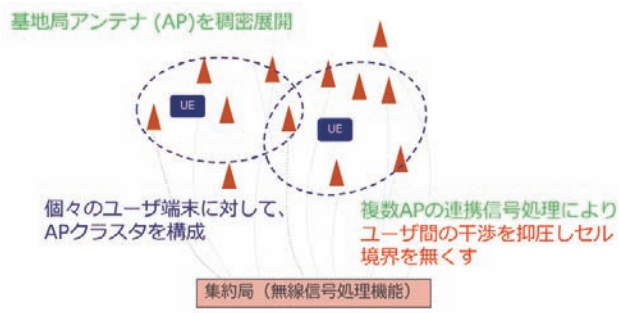
おいても、そのサイズや電力などの制限があり、特に上り回線において、十分な容量が得られないなどの課題もある。ユーザセントリックアーキテクチャには、5Gでは対応が困難であった、これら「無線エリア品質の均一化」と「ユーザ端末制約の緩和」への対応が求められる。

2.2　無線ネットワーク展開技術

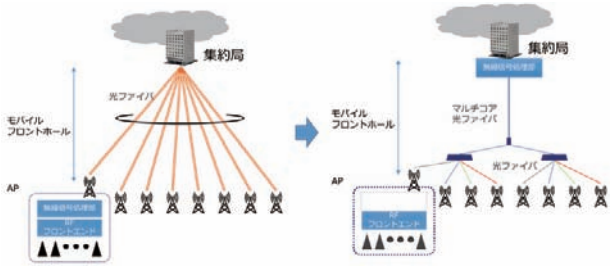
まず、無線エリア品質の均一化に向けた無線ネットワーク展開技術として、多数の基地局アンテナ（以下、APと記載）を分散配置し、これらのアンテナを連携させることで、干渉や遮蔽による影響を抑えることができるCell-Free massive MIMO技術（以下、CF-mMIMOと記載）と、より少ないファイバ数で効率よくAPを収容できるインフラ構成手法について研究開発を進めている。CF-mMIMOは、2010年代後半から研究されている技術であり、分散MIMO技術とmassive MIMO技術を組み合わせたものと位置付けられる[5][6]。個々のユーザに対して複数のAPを連携させ、集約局においてmassive MIMO技術を適用することにより、ユーザ間の干渉が抑圧され、ユーザにとって無線品質の均一化を実現することが可能となる。

CF-mMIMO技術の効果は、信号が一括して処理されるAPをどの程度分散させて配置するかに大きく依存する。筆者らは、AP数と各APに設置するアンテナ数を一定とした場合の周波数利用効率を計算機シミュレーションにより評価し、各APに複数のアンテナを設置した場合でも、完全に分散した場合に比べて、周波数利用効率を維持可能であることを確認している[7]。

CF-mMIMOの実展開に向けては、分散配置されたAPと集約局間の回線（モバイルフロントホール、以下、MFH）の敷設方法も重要な課題である。筆者らは、MFHに光ファイバ無線技術であるIntermediate Frequency-over-Fiber（以下、IFoF）方式を適用し、AP間の連携効果を検証する実証実験に世界で初めて成功した[8]。5G基地局シミュレータと分散配置した複数のAP間を1本のマルチコア光ファイバで接続し、それぞれのAPで送受信される無線信号をIFoF方式で伝送するMFHを介してミリ波帯（28GHz）の無線通信環境を構築し、また、商用5G端末との通信試験を通じ、分散配置したアンテナの連携によりミリ波を用いた場合でも障害物を回避しつつエリア均一化が可能であることを確認した。



■図3.　CF-mMIMO技術



■図4.　光ファイバ無線技術による基地局展開

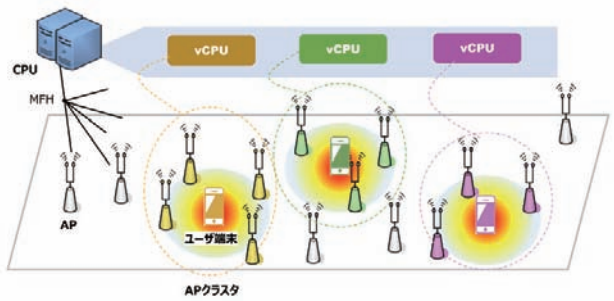
今回適用したIFoF方式は、無線信号をデジタル化せずアナログ波形のまま伝送する方式であり、デジタル化に伴うMFH区間の大容量化の課題を解消することが可能となり、コア多重・波長多重・IF周波数多重と様々な粒度で複数のアンテナ向けの無線信号を1本の光ファイバに集約してアンテナ付近まで伝送することで所要光ファイバ数・光ファイバ長を大きく削減することが期待される。また、アナログ波形伝送では無線信号処理を集約局側に集中することで基地局アンテナ処理を軽減できることから、多数のアンテナの分散設置が必要なCF-mMIMOにおけるアンテナ側装置の省電力化に寄与することも期待できる。

2.3　ユーザセントリックRAN制御技術

ユーザセントリックに対応したRANアーキテクチャでは、CF-mMIMOによるセルフリーな無線環境をユーザごとに提供するため、仮想化技術を活用して、さらに柔軟な制御ができるアーキテクチャが必要となる。ユーザセントリックRANの概要を図2に示す。

ユーザセントリックRANでは、CF-mMIMOに基づく無線通信システムをCPU（Central Processing Unit）とAPで構築する。また、無線資源と計算機資源を柔軟に制御するユーザセントリックなRAN管理により、ユーザの位置に応じた無線環境を提供する。

ユーザセントリックRANのコンセプトは、仮想化RAN（vRAN）技術に基づき、物理インフラ上にUEごとの論理



■図5. ユーザセントリックRAN

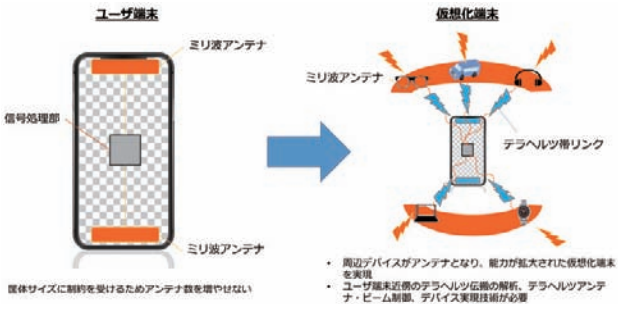
ネットワークを構築することである。各論理ネットワークは、仮想化された基地局のCPU（vCPU）機能とAPを組み合わせ、送受信の連携を図ることで構築・最適化される。vCPUはセントラルサイトとエッジサイトに汎用サーバから配置される。協調送受信を行うAPを選択し、選択されたAPの集合を「APクラスタ」と呼ぶ。無線品質は、選択されたAPの数が直接影響するため、vCPUの配置によって変化する。つまり、ユーザが求める高い無線品質を確保するためには、vCPUの配置とAPの選択、すなわちAPクラスタの形成の最適化が重要である。このような構造に基づくユーザ中心のRANを実現するためには、大規模RANを考慮したRAN管理手法が重要である[9]。

CF-mMIMOにAP Cluster化技術を適用し、サーバと端末でIPレベルのE2E通信を行う実証実験で確認した。本実証では、無線信号処理を行うサーバに分散配置した4つのAPを接続し、それぞれの基地局アンテナで送受信される無線信号をサーバで一括処理を行うことで、端末に対してAP間で連携してデータ通信を行う無線通信環境を構築した。この環境において、端末ごとにその位置に応じて連携する3つの基地局アンテナ群（AP Cluster）を選択して評価を行った。評価の結果、選択したAP Cluster内の基地局アンテナだけと無線信号の送受信を行うAP Cluster化技術を用いても、すべての4つの基地局アンテナを連携させた場合と同程度のスループットが得られることを確認した[10]。

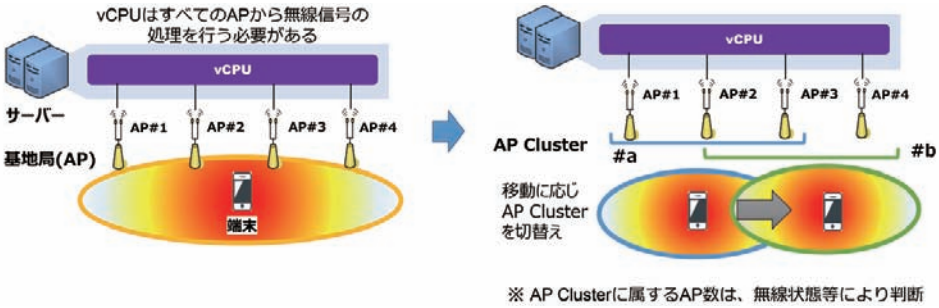
2.4 仮想化端末

前述のとおり、ユーザ端末のサイズや重量などのハードウェア制約から、特に上り通信品質の拡張に向けた、搭載アンテナ数の拡張や送信電力の拡大には限界がある。そこで、ユーザ端末外部にあるアンテナや電池などを、仮想的にユーザ端末内部にあるアンテナや電池とみなすことで、ユーザ端末のサイズや重量制約にかかわらず、搭載アンテナ数や送信電力における制約を緩和することを検討している。このようにして構成される端末を「仮想化端末」と呼ぶ。例えば、**図3**に示すように、無線インタフェースを備えたメガネや時計などの周辺機器のアンテナをユーザ端末のアンテナとして扱うことで、端末が利用できるアンテナ数を拡張し、5Gで課題であった上り回線の空間多重数を拡張することができる[11]。

ここで、周辺機器とユーザ端末との接続は、通信距離が短くても超高速・大容量・超低遅延である無線リンクで構築することが望ましい。すなわち、このような要求には、超広帯域、例えばテラヘルツ帯の利用が非常に適している。しかし、テラヘルツ帯を利用するためには、基礎研究、伝



■図7. 仮想化端末



■図6. APクラスタ化技術

搬モデル、RFフロントエンド装置やアンテナ、ベースバンド信号処理チップの開発などが依然として必要である。

なお、300GHz帯でのテラヘルツ帯通信の研究開発は、これまでユースケースとしては固定通信が想定され、移動通信への活用の検討はほとんどされていない。また、テラヘルツ帯自体の研究開発もまだ発展途上であり、基礎的な電波伝搬特性やRFコンポーネントレベルでの要素技術などの基礎研究が進められている状況である。そのため、テラヘルツ帯を移動通信へ活用した仮想化端末の実現に向けた研究開発には様々な課題があるが、以下に代表的な課題について紹介する。

●THz帯の人体近傍伝搬モデル化
- THz帯の人体及び人体近傍での散乱や回折、遮蔽の基本伝搬特性及びモデル化、そのための測定環境構築、無線通信評価のための環境に応じた伝搬損失及び時空間のチャネルモデル化

●THz帯アンテナ・ビーム制御技術
- 超広帯域、低損失で高利得かつ広い角度範囲にマルチビームを形成して操作可能なTHz帯アンテナ、超狭ビームをユーザ端末及び中継デバイスで相互に補足・追従可能なビーム連携制御技術

●THz帯フロントエンド・中継デバイス実現技術
- 低損失かつ高効率・高出力なTHz-FE、中継デバイスに張り出したRF機能の効率的な制御方式

●超広帯域ベースバンド信号処理・非線形歪み補償技術
- 超広帯域なベースバンド処理を実現する回路具現化、THzとミリ波の周波数変換に対応した無線波形、超広帯域RF-FE等で発生する非線形歪み補償

3. おわりに

本稿では、Beyond 5G/6Gに向けた新しいネットワークアーキテクチャである、ユーザセントリックアーキテクチャに関して、その技術的な課題と具体的な取組みについて紹介した。

謝辞

本研究成果は、国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究（採択番号00401）により得られたものです。

参考文献

[1] ITU-T FG-NET-2030, “Network 2030 A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond”, https://www.itu.int/en/ITU-/focusgroups/net2030/Documents/White_Paper.pdf

[2] The Ministry of Internal Affairs and Communications, “Beyond 5G Promoting Strategy”, https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/eng/presentation/pdf/200414_B5G_ENG_v01.pdf

[3] “KDDI Corporation, KDDI Research, Inc. “Beyond 5G/6G White Paper ver. 2.0.1”, https://www.kddi-research.jp/sites/default/files/kddi_whitepaper_en/pdf/KDDI_B5G6G_WhitePaperEN_2.0.1.pdf

[4] K. Yamazaki, T. Ohseki, Y. Amano, H. Shinbo, T. Murakami and Y. Kishi, “Proposal for a User-Centric Ran Architecture Towards Beyond 5G,” 2021 ITU Kaleidoscope：Connecting Physical and Virtual Worlds (ITU K), 2021, pp. 1-7, doi：10.23919/ITUK53220.2021.9690496.

[5] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson and T. L. Marzetta, “Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells,” in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, March 2017, doi：10.1109/TWC.2017.2655515.

[6] E. Björnson and L. Sanguinetti, “Making Cell-Free Massive MIMO Competitive With MMSE Processing and Centralized Implementation,” in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 1, pp. 77-90, Jan. 2020, doi：10.1109/TWC.2019.2941478.

[7] T. Choi, M. Ito, I. Kanno, T. Oseki, K. Yamazaki and A. F. Molisch, “Uplink Energy Efficiency of Cell-Free Massive MIMO With Transmit Power Control in Measured Propagation Channels,” 2d021 IEEE Workshop on Signal Processing Systems (SiPS), 2021, pp. 164-169, doi：10.1109/SiPS52927.2021.00037.

[8] KDDI総合研究所、“世界初 お客さま一人ひとりのニーズに応えるBeyond 5Gに向けた無線ネットワーク展開技術の実証に成功”、https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2021/100701.html、2021年10月

[9] 相原直紀、伊神皓生、村上隆秀、塚本優、新保宏之、“Beyond 5Gに向けたユーザのmobilityを考慮したユーザセントリックなAP cluster形成手法の特性評価”, 信学技報, vol. 121, no. 391, RCS2021-267, pp. 85-89, 2022年3月.

[10] KDDI総合研究所、“世界初 お客さま一人ひとりのニーズに応える無線通信環境の提供と基地局の消費電力低減を両立する実証実験に成功”、https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2022/013101.html、2022年1月

[11] 天野良晃、国澤良雄、長尾竜也、山崎浩輔、岸洋司、“Beyond 5Gに向けたテラヘルツ帯を活用する端末拡張のための仮想化端末技術に関する研究開発”、信学総大、2022年3月

（2022年 2月8日　ITU-R研究会より）