

ミリ波×ヘテロジニアスネットワーク=5G

Millimeter-wave × Heterogeneous Network = 5G

阪口 啓



第5世代セルラネットワーク（5G）の目玉技術はミリ波の活用であろう。しかしながら2000年頃から始まったミリ波帯を用いたアクセス技術の研究が5Gへたどり着くまでの道のりはそう簡単なものではなかった。その扉は2012年頃に発表されたミリ波とヘテロジニアスネットワークの出会いによって開かれたのである。低周波（Sub 6 GHz）と高周波（ミリ波）、及びマクロセルと小セルを組み合わせるといふヘテロジニアスネットワークのアイデアがミリ波5Gを開花させたのである。本稿では、ミリ波帯開拓の歴史から、ヘテロジニアスネットワークとの出会い、そして5Gで展開される最新のミリ波技術まで、ミリ波5Gの生い立ちをひも解く。

キーワード：ミリ波，5G，ヘテロジニアスネットワーク，制御／データ分離通信，ユーザ指向

1. ミリ波帯開拓の歴史

ミリ波帯を用いた無線アクセスに関する研究の歴史は長く、例えば2000年にCRL（Communications Research Laboratory）（現NICT）は60 GHz帯を用いた無線アクセスの試作を行っており、当時最速の128 Mbit/sを達成していた⁽¹⁾。しかしながらミリ波帯は伝搬損失が大きいためにかバレージが小さく、接続性が悪いという大きな課題を抱えていた。またRF回路特性（特に位相雑音特性）も悪く、価格の面でも商用にはほど遠い状況であった。一方通信方式という観点では、2009年に標準化が完了した無線LAN規格であるIEEE802.15.3c⁽²⁾の役割は大きかった。60 GHz帯に2.16 GHzという超広帯域な通信チャネルを制定し、ミリ波超高速アクセスという道を開いた。その思想は2012年に標準化が完了したIEEE802.11ad（WiGig）規格⁽³⁾に継承され、例えば2017年にはWiGigを搭載したスマートフォンの販売が開始されている。WiGigチップセットの開発においてRF回路特性は大きく改善し、ミリ波無線アクセスが商用レベルに至ったと言える。

一方、ミリ波をセルラネットワークに用いる研究が始まったのは2011年頃である。その背景には2007年頃から販売が始まったスマートフォンの普及に伴うモバイルトラフィックの指数関数的増加があり、その問題の解決にミリ波帯の未使用周波数を活用したいというものであった。図1は300 MHz～300 GHzにおける日本の周波数割当の現状を示している。300 MHz～3 GHzは非常に混み合っているのに対して、30 GHz以上のミリ波周波数には多くの未使用帯域（白塗り）があり、これらの周波数を有効利用することが第5世代セルラネットワーク（5G）に対する研究開発の命題であった。

この命題に果敢にチャレンジしたのは、ニューヨーク大（NYU）、テキサス大オースティン校（UTA）、そして阪大と東工大である（文献(4)及びその参考文献）。NYUは、屋外環境において28, 38, 60, 73 GHz帯の伝搬特性の解析を行い、ミリ波帯を用いた屋外無線アクセスの可能性を示した。またUTAは、ミリ波帯を用いたマルチユーザMIMO（MU-MIMO）、すなわちMassive MIMOを提案し、無線LANでは全く議論されていなかった空間軸の有効利用という新たな活路を切り開いた。これに対して阪大と東工大のグループは、低周波（Sub 6 GHz）マクロセルと高周波（ミリ波）小セルを組み合わせるヘテロジニアスネットワークのアイデアを提案した⁽⁵⁾。すなわちカバレージの広いマクロ基地局が接続性（制御プレーン）を担保し、ミリ波小セル基地局

阪口 啓 正員：シニア会員 東京工業大学工学院電気電子系
E-mail sakaguchi@mobile.ee.titech.ac.jp
Kei SAKAGUCHI, Senior Member (School of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152-8552 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.101 No.11 pp.1111-1116 2018年11月
©電子情報通信学会 2018

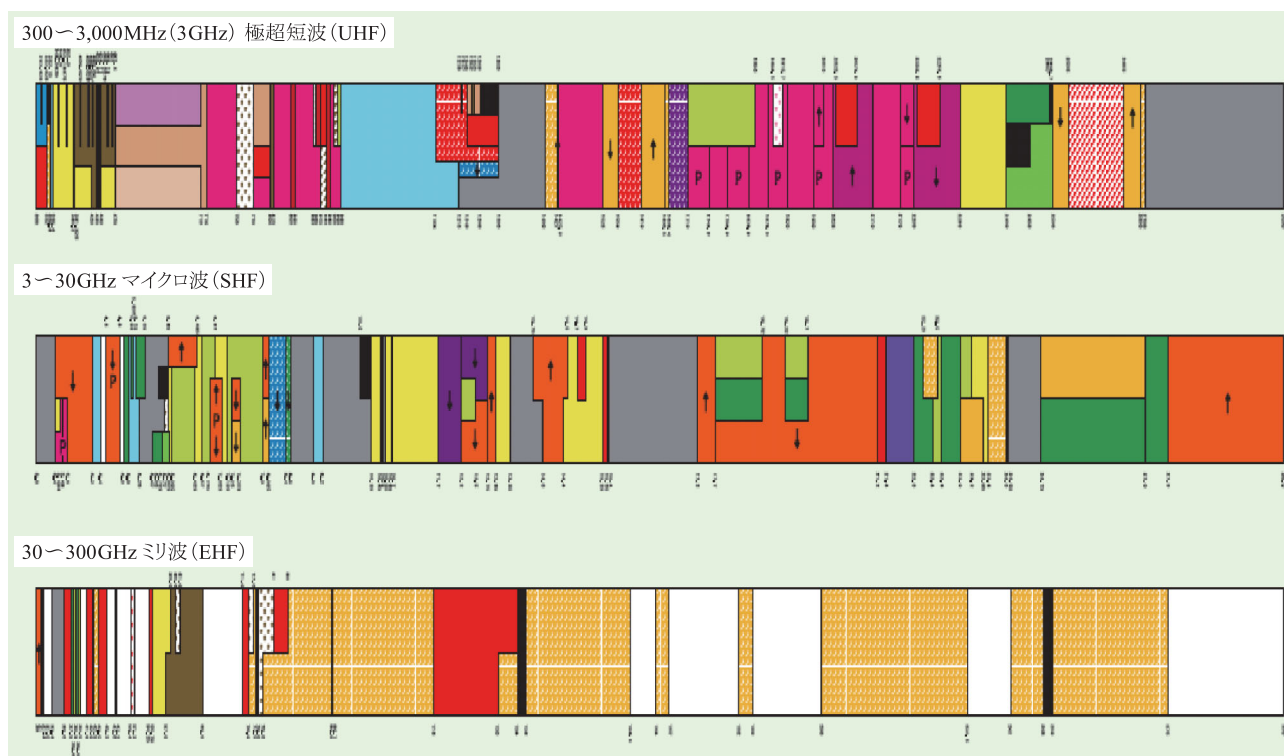


図1 日本の周波数割当 (2016年12月現在)

表1 3GPP Rel. 15で規定されたミリ波周波数帯

5G NR バンド	UL バンド (GHz)	DL バンド (GHz)	デュプレクス
n257	26.5~29.5	26.5~29.5	TDD
n258	24.75~27.5	24.75~27.5	TDD
n259	31.8~33.4	31.8~33.4	TDD
n260	37~40	37~40	TDD

がトラフィックが集中するホットスポットのデータプレーンを担当するという制御とデータの役割分担を導入することで、ミリ波帯のカバレッジの問題を解消し、ミリ波を用いたセルラネットワークの実用性を向上したのである。その後日欧共同研究プロジェクト (MiWEBA) が、ミリ波を用いた第5世代セルラネットワーク (5G) を推進し、2015年に開催された WRC-15⁽⁶⁾においてミリ波周波数帯 (24.25~27.5, 31.8~33.4, 37.0~40.5, 40.5~42.5, 42.5~43.5, 45.5~47.0, 47.0~47.2, 47.2~50.2, 50.4~52.6, 66.0~76.0, 81.0~86.0) が5Gを実現する候補として選定された原動力となった。その後2016年から3GPPにおいて5Gの標準化作業が開始され、2018年6月に標準化が完了したリリース15 (5G Phase 1) においては表1に示すミリ波周波数帯が5G NR (New Radio) の周波数バンドとして選定されている⁽⁷⁾。今後は3GPP リリース16以降 (5G Phase 2) において他のミリ波周波数バンドを含めた更なる議論が進められ、

2019年のWRC-19において5Gに使用する周波数帯が制定される予定である。

2. ミリ波×ヘテロジニアスネットワーク

ここでは5Gの目玉技術であるミリ波ヘテロジニアスネットワークの特徴をまとめる。ミリ波ヘテロジニアスネットワークは図2に示すように、①ミリ波小セルアクセス、②制御／データ分離通信、③クラウドRAN (Radio Access Network)、④ユーザ指向制御の四つの機能から構成される。

- ① ミリ波小セルアクセスは、例えば28 GHzのミリ波帯で運用される5Gオリジナルのアクセス技術である。そのピークユーザレートは5Gの要求条件である20 Gbit/sを達成するように設計される。ミリ波小セル基地局は現状のマクロセル内のホットスポットに複数導入され、そのエリアにおいて大容量アプリケーションの実行を可能とする。
- ② 制御／データ分離通信は、ミリ波ヘテロジニアスネットワークの接続性を担保するために導入される技術であり、カバレッジの広いマクロ基地局が制御プレーンと小容量のデータプレーンを担当し、ミリ波小セル基地局が大容量のデータプレーンを担当する。マクロ基地局はカバレッジの広い制御プレーンを用いてユーザ位置などのコンテキスト情報を把握

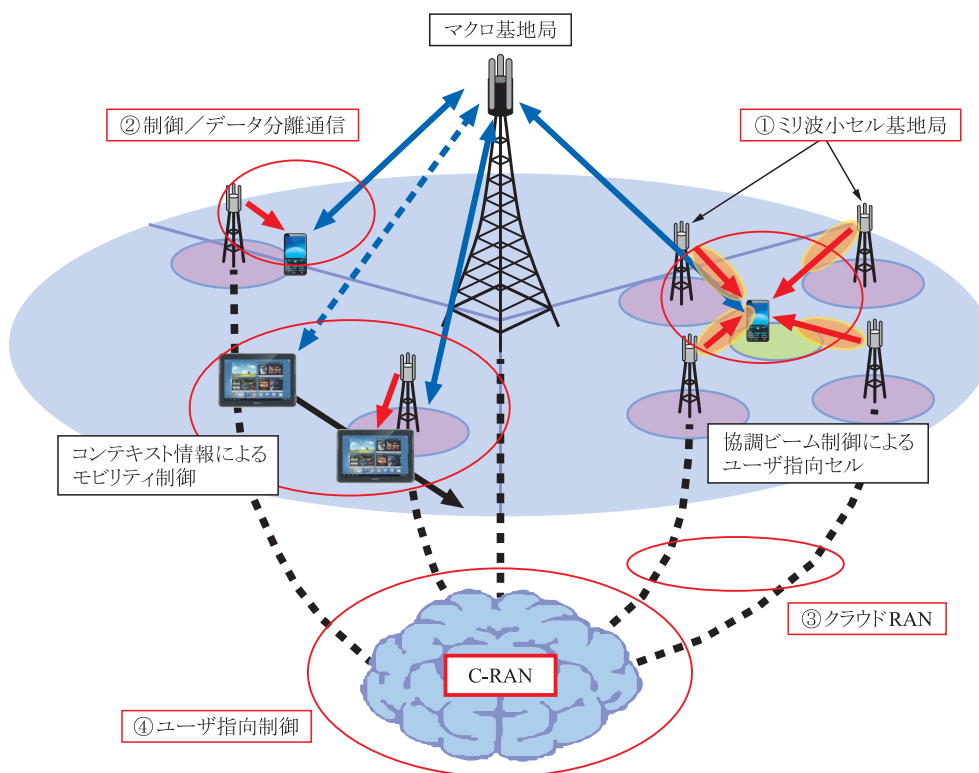


図2 ミリ波ヘテロジニアスネットワーク

することが可能であり、その情報を利用してカバレッジの小さいミリ波小セルを有効利用するものである。

- ③ クラウド RAN は、マクロ基地局とミリ波小セル基地局が中央制御局を介して密に接続されたネットワークである。このようなネットワークアーキテクチャを採用することにより、制御プレーンを担当しているマクロ基地局が司令塔となって、マクロセル内の全ての小セル基地局と全てのユーザを制御することが可能となる。小セル基地局を中央制御局のアンテナだと考え直すと、このネットワークアーキテクチャは分散 MIMO と同様であると考えられることもできる。また後述するがマクロ基地局（ミリ波ゲートウェイ）と各ミリ波小セル基地局間をミリ波バックホール（メッシュネットワーク）で接続することも可能である。またこれも後述するが各ミリ波小セル基地局に MEC（モバイルエッジコンピューティング）を導入すると、バックホールには低容量のネットワークを再利用することも可能となる。
- ④ ユーザ指向制御は、マクロ基地局が担当する制御プレーンから得られるユーザのコンテキスト情報（ユーザ位置、要求トラフィックなど）を用いて全ての小セル基地局とユーザの無線リソースをユーザの指向に応じてダイナミックに制御する最適化手法で

ある。最適化は、ユーザの接続基地局をダイナミックに選択するだけでなく、ビームフォーミングや基地局連携を用いてユーザのトラフィック要求に応じたユーザ指向セルを形成することも可能であり、またトラフィック要求に応じて基地局をダイナミックにオンオフ制御することも可能となる。また小セル基地局間のバックホールにメッシュネットワークを採用する場合は、バックホールのルートをダイナミックに形成することも可能となる。更に小セル基地局に MEC を導入する場合はユーザ位置に応じたプリフェッチ／キャッシング機能も実現可能となる。

最後にミリ波ヘテロジニアスネットワークのシステム容量特性として文献(7)に掲載の数値解析による結果を図3に示す。数値解析の条件などの詳細は文献(7)を参照されたい。図3の横軸は、図2のマクロセルに導入されるミリ波小セル基地局の数を表しており、一方縦軸は、マクロ基地局（LTE）のみの場合に対するミリ波ヘテロジニアスネットワークのシステムレートの利得を表している。図中黒線は 60 GHz のミリ波帯を小セルアクセスに用いた場合の特性を示しており、一方グレー点線は比較として 3.5 GHz のマイクロ波を小セルに用いた場合を示している。また四角マーカと丸マーカはそれぞれ 2010 年と 2020 年のトラフィックを想定した結果を示している。図からミリ波ヘテロジニアスネットワークを用いた場合は、マクロセル当たり約 30 台の小セル基地局

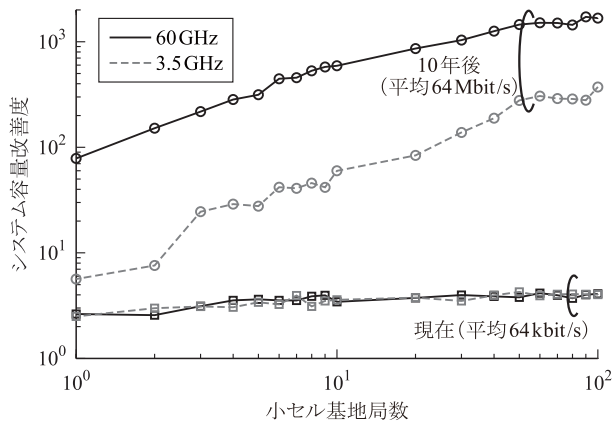


図3 ミリ波5Gで実現されるシステム容量

を導入することで従来 (4G LTE) に比べて約 1,000 倍のシステム容量を達成しており、5G の要求条件を満足していることが分かる。なおここでは 60 GHz 帯のミリ波アクセスを想定したが、28 GHz 帯においても 20 Gbit/s のピークユーザレートを想定すると解析結果に大きな差異はない。

3. ユーザ指向セル×協調ビームフォーミング

ここからはミリ波ヘテロジニアスネットワークの発展系を幾つか紹介する。まずはユーザ指向セルと協調ビームフォーミングの組合せである。ミリ波ヘテロジニアスネットワークでは、マクロ基地局が制御プレーンを担っているため、ミリ波小セルの形状はユーザのニーズ（またはオペレータのニーズ）に応じて自由に形成可能である。図4はそのようなユーザ指向セルの最も簡単な例であり、ユーザが密集しているホットスポット周辺の小セル基地局のみをオン状態とすることでユーザ指向セルを形成し、一方でそれ以外的小セル基地局をオフ状態とすることでネットワーク全体の消費電力を削減している⁽⁸⁾。なおホットスポット以外にもユーザは存在しているが、ホットスポットに比べると密度が低いためマクロ基地局がそのトラフィックをさばいている。

一方図5は複数小セル基地局が協調ビームフォーミングを行うことでユーザ指向セルを形成している⁽⁹⁾。ホットスポット内のユーザ密度が非常に高い場合は、ホットスポット直近の小セル基地局だけでなくその周辺の小セル基地局をオン状態とし、更に周辺基地局のアンテナビームを向けることでホットスポットにエネルギーを集約し、更に基地局間で協調した MU-MIMO 通信を行うことで複数ユーザ多重も可能となる。なおこのようなシステムを分散 MIMO と呼ぶ場合もあり、クラウド RAN と制御／データ分離通信を組み合わせることで実現可能となる。

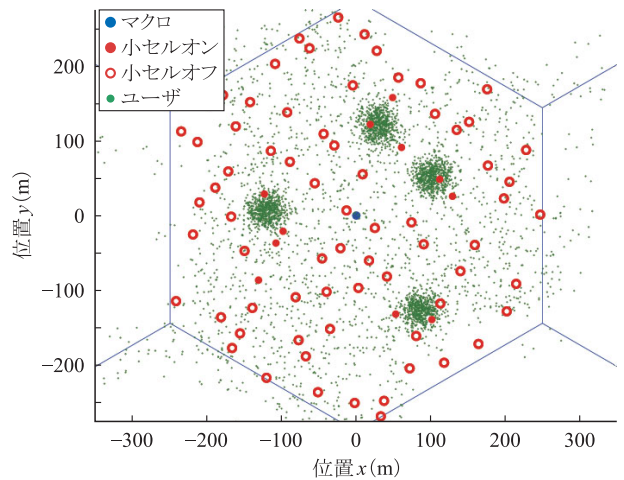


図4 ダイナミックオンオフ制御によるユーザ指向セル形成

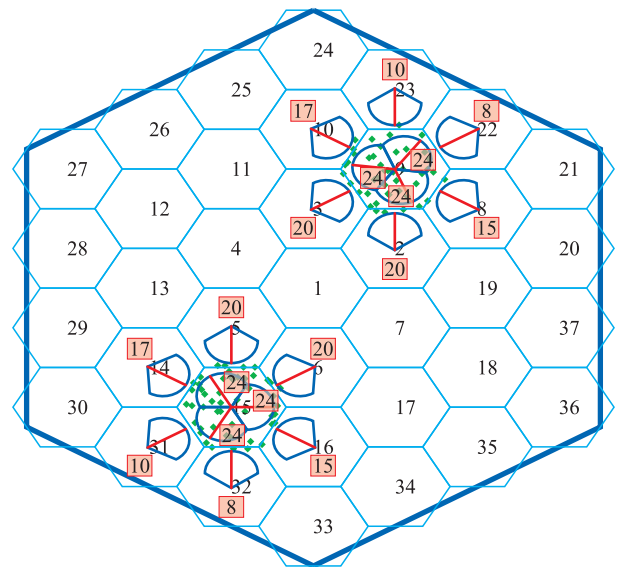


図5 協調ビームフォーミングによるユーザ指向セル形成

4. ミリ波小セル×プリフェッチング

ここではミリ波ヘテロジニアスネットワークの更なる発展系として、図6に示すミリ波小セルとプリフェッチ／キャッシングの組合せ（ミリ波エッジクラウド）を紹介する⁽⁴⁾。ミリ波エッジクラウドでは、各ミリ波小セル基地局にストレージやアプリケーションを含む仮想マシンを導入し、ユーザが小セル基地局に到達する前に、そのユーザのデータやアプリケーションをその基地局の仮想マシンにプリフェッチング（先読み送信）するものである。プリフェッチングを行うことにより、エンドツーエンドの通信遅延を短縮できるだけでなく、バックホール容量に対する要求条件を大幅に削減し、ミリ波アクセスの高速通信を最大限に活用できることとなる。図7は文献(10)に示すミリ波ヘテロジニアスネットワーク

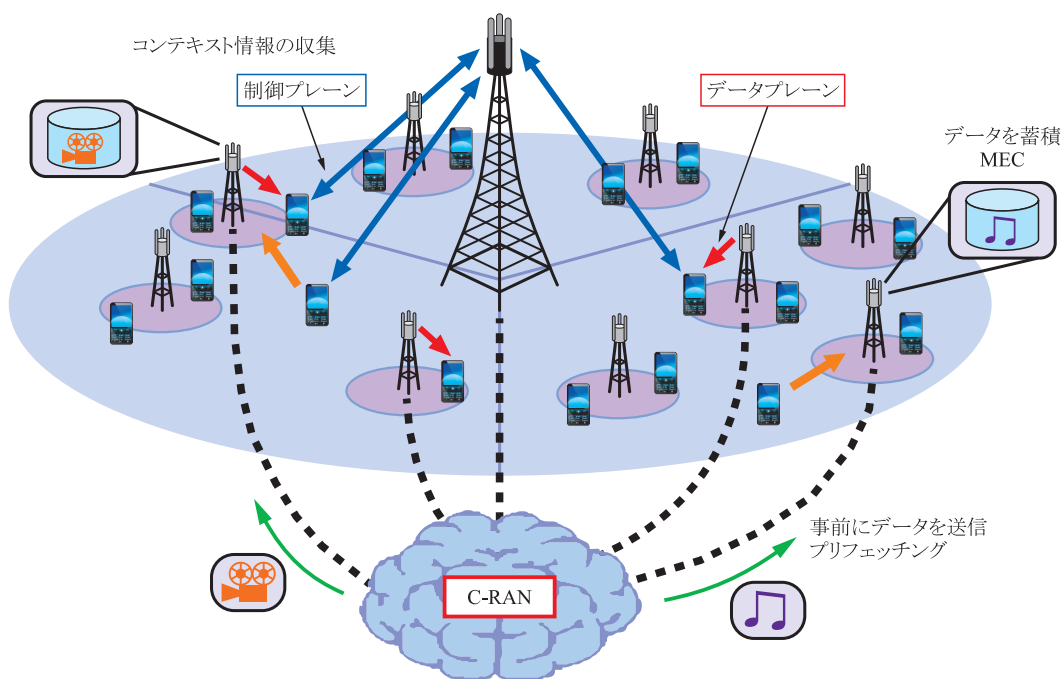


図6 ミリ波エッジクラウド

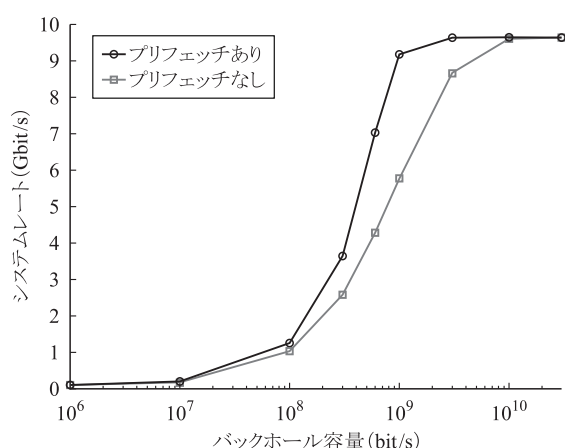


図7 ミリ波ヘテロジニアスネットワークのバックホール容量に対するシステム容量特性

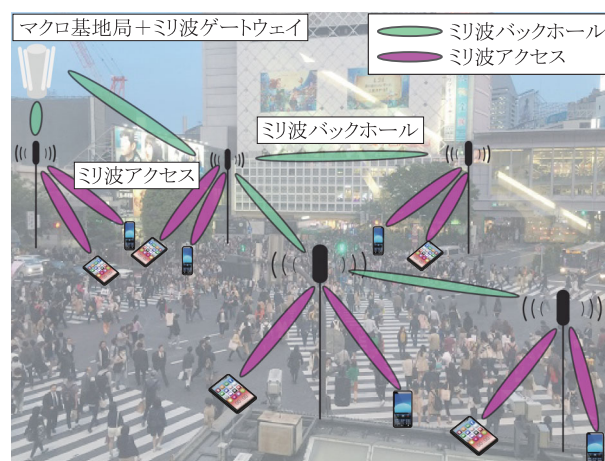


図8 屋外ミリ波メッシュネットワーク

においてバックホール容量を変数としてシステム容量特性を解析した結果である。図中バックホール容量を1 Mbit/sとした場合(左端)はマクロ基地局のみが稼動している状態に近く、一方バックホール容量を20 Gbit/sとした場合(右端)は全ての小セル基地局がバックホール容量を気にすることなくフルに稼動できる状態である。図からプリフェッチングを導入することでバックホール容量を例えば1 Gbit/sとしてもシステム容量特性の劣化を5%程度に抑えられていることが分かる。これは低容量のバックホールを再利用してもミリ波アクセスの性能を損なわないことを示しており、ミリ波5Gの導入を促進する重要な技術と言える。

5. ミリ波メッシュネットワーク×SDN

最後にミリ波ヘテロジニアスネットワークを安価に新規構築する方法として、無線アクセスとバックホールを統合設計するミリ波メッシュネットワークとそのSDN (Software Defined Network) 制御を紹介する⁽⁴⁾。図8はミリ波ヘテロジニアスネットワークを屋外ホットスポットに導入したイメージを示している。図中左上に位置する従来のマクロ基地局がカバーするエリアに、複数のミリ波小セル基地局が導入され、更にミリ波小セル基地局間をミリ波メッシュバックホールネットワークで接続することで安価なクラウドRANを構築している。マクロ基地局には大容量なバックホールが敷設されている

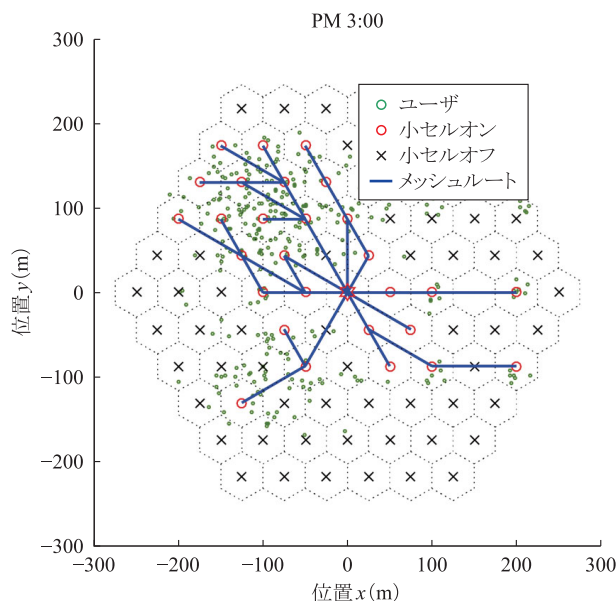


図9 ミリ波メッシュネットワークのルート（フロー）制御の例

として、ミリ波メッシュネットワークはユーザ指向に応じてバックホール容量を必要ときに必要な小セル基地局へ配信する役割を果たしている。

ミリ波ヘテロジニアスネットワークでは制御プレーンとデータプレーンが分離されているため、従来有線ネットワークで研究開発が進められてきたSDNの考え方を容易に適用可能である。すなわちミリ波小セル基地局を単なるアクセスのための基地局と考えるのではなく、ルーティング機能と仮想マシンを搭載するネットワークノードと捉え、その設定をマクロ基地局から送信される制御プレーンによりソフトウェア制御するわけである。このSDN制御により、ユーザ指向に応じたセル形成（オンオフ制御）、バックホールルート制御（ルート多重を含む）が可能となる。図9は文献(4)に示すルート制御法を用いた場合の、ミリ波メッシュネットワークの一例を示している。ユーザのトラフィックが集中するホットスポット近辺の小セル基地局とその基地局とマクロ基地局（ミリ波ゲートウェイ）間の基地局を赤丸のように起動させ、青線で示すミリ波バックホールを適応的に形成している。なお小セル基地局が起動されていないエリアのユーザトラフィックは比較的小さいためマクロ基地局で収容されていることに注意されたい。

6. ま と め

本稿では、第5世代セルラネットワークの目玉技術であるミリ波アクセスに関して、開拓の歴史、ヘテロジニアスネットワークとの出会い、そして5Gで展開される最新のミリ波技術までを紹介した。約20年を費やしたミリ波帯開拓の血と汗がついに5Gで実りを迎えるので

ある。

謝辞 本成果の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進事業「第5世代セルラネットワークを実現するミリ波エッジクラウドの研究開発」、及び総務省電波資源拡大のための研究開発「第5世代移動通信システムにおける無線アクセスシステムの相互接続機能に関する研究開発」によるものである。ここに記して感謝の意を表したい。

文 献

- (1) M. Inoue, G. Wu, Y. Hase, A. Sugitani, E. Kawakami, S. Shimizu, and K. Tokuda, "An IP-over-ethernet-based ultrahigh-speed wireless LAN prototype operating in the 60-GHz band," IEICE Trans. Commun., vol. E83-B, no. 8, pp. 1720-1730, Aug. 2000.
- (2) IEEE Standards Association, "IEEE standard for information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 15.3: Amendment 2: Millimeter-wave-based alternative physical layer extension," 802.15.3c-2009, IEEE, New York, NY, USA, 2009.
- (3) IEEE Standards Association, "IEEE standard for information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) Specifications amendment 3: Enhancements for very high throughput in the 60 GHz band," 802.11adTM-2012, IEEE, New York, NY, USA, 2012.
- (4) K. Sakaguchi, T. Haustein, S. Barbarossa, E.C. Strinati, A. Clemente, G. Destino, A. Pärssinen, I. Kim, H. Chung, J. Kim, W. Keusgen, R.J. Weiler, K. Takinami, E. Ceci, A. Sadri, L. Xian, A. Maltsev, G.K. Tran, H. Ogawa, K. Mahler, and R.W. Heath Jr., "Where, when, and how mmwave is used in 5G and beyond," IEICE Trans. Electron., vol. E100-C, no. 10, pp. 790-808, Oct. 2017.
- (5) K. Sakaguchi, G.K. Tran, H. Shimodaira, S. Nanba, T. Sakurai, K. Takinami, I. Siaud, E.C. Strinati, A. Capone, I. Karls, R. Arefi, and T. Haustein, "Millimeter-wave evolution for 5G cellular networks," IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no. 3, pp. 338-402, March 2015.
- (6) ITU-R, "Provisional final acts," World Radiocommunication Conference (WRC-15), p. 426, Nov. 2015.
- (7) <http://www.3gpp.org/release-15>
- (8) G.K. Tran, H. Shimodaira, and K. Sakaguchi, "User satisfaction constraint adaptive sleeping in 5G mmwave heterogeneous cellular network," IEICE Trans. Commun., vol. E101-B, no. 10, pp. 2120-2130, Oct. 2018.
- (9) R. Rezagah, G.K. Tran, K. Sakaguchi, K. Araki, and S. Konishi, "Large scale cooperation in cellular networks with non-uniform user distribution," IEICE Trans. Commun., vol. E97-B, no. 11, pp. 2512-2523, Nov. 2014.
- (10) H. Nishiuchi, G.K. Tran, and K. Sakaguchi, "Performance evaluation of 5G mmwave edge cloud with prefetching algorithm," Proc. IEEE VTC2018-Spring, June 2018.

(平成30年7月10日受付)



坂口 啓 (正員：シニア会員)

1998 東工大大学院修士課程了。東工大助手、助教、准教授を経て、2017 年から東工大教授。その間 2012 から 2016 まで阪大准教授、2015 から現在 Fraunhofer HHI シニア研究員、博士(学術)。セルラネットワーク、センサネットワーク、無線電力伝送、IoT などの研究に従事。IEEE 会員。著書「無線分散ネットワーク」「ソフトウェアで作る無線機的设计法」など。