10年後の将来無線アクセスの要求条件と技術課題

Future Radio Access 10 Years Later: Technical Requirements and Challenges

中村武宏 Takehiro Nakamura[†] 岸山祥久 Yoshihisa Kishiyama[†] ベンジャブール・アナス Anass Benjebbour[†]

Summary

近年、スマートフォンのような高機能端末が一般層へ普及してきたことを起爆剤として、動画配信等のブロードバンドサービスを中心に無線ネットワークにおけるデータトラフィックが爆発的に増大している。本稿では、そのような背景の下、10年後の未来に向けて飛躍的な無線ネットワークの大容量化を実現する次世代の無線アクセス（将来無線アクセス）の要求条件を示すとともに、それを達成するための技術課題について、3GPP（3rd Generation Partnership Project）で標準化が行われているLTE（Long Term Evolution）及びLTE-Advancedの技術動向を考慮しつつ考察する。

Key words

LTE, LTE-Advanced, 要求条件, 将来無線アクセス

1 ま え が き

NTTドコモでは、2001年に「FOMA」（フォーマ）というブランド名で第3世代（3G）の移動通信システム規格であるW-CDMA（Wideband Code Division Multiple Access）の商用サービスを開始した。それから10年後の現在では、W-CDMAの高速データ通信規格であるHSPA（High Speed Packet Access）を搭載した端末が広く普及し、モバイルデータ通信のサービスを支えている。また、NTTドコモでは、更なる高速・大容量・低遅延の要求に応えるため、2010年12月から「Xi」（クロッシィ）という新しいブランドでLTE（Long Term Evolution）と呼ばれる新しい移動通信システム規格の商用サービスを開始した⁽¹⁾。LTEは3Gと同じ周波数スペクトルを用いて、第4世代（4G）の移動通信システムの無線アクセス技術をいち早く導入するSuper 3Gのコンセプト⁽²⁾に沿っており、世代的に4Gの一歩手前という意味で3.9Gとも呼ばれる。移動通信システムの国際標準化団体である3GPP（3rd Generation Partnership Project）において、2008年にLTE無線システム仕様の初期バージョンがRelease 8仕様として規定された^{(3)・(4)}。更に、LTE Release 8仕様を基本として、本格的な4Gともいえる、国際電気通信連合無線通信部門（ITU-R）におけるIMT（International Mobile Telecommunication）-Advancedの移動通信システム規格であるLTE-Advancedの標準化が行われている。LTE-Advancedは、3GPPにおいてLTE初期バージョン

のRelease 8からRelease 9, 10, 11, …と継続的にアップデートされているLTEの仕様のうち、Release 10とそれ以降を指す。なお、Release 9はRelease 8からの比較的軽微な機能追加である。Release 10までの仕様は既に完成し、IMT-Advancedの要求条件である広帯域幅化（40 MHz以上）や周波数利用効率の改善等⁽⁵⁾を実現するため、キャリアアグリゲーションや多アンテナMIMO（Multiple-Input Multiple-Output）送受信などの拡張技術が導入されている⁽⁶⁾。

一方、近年、スマートフォンを代表とする携帯形の高速データ通信端末が一般層へ普及してきたことを起爆剤として、動画配信等のブロードバンドサービスを中心に無線ネットワークにおけるデータトラフィックが爆発的に増大している。文献(9)において、Mobile Videoが2015年までに総トラフィックの66%程度の割合を占めると予測されている。また、将来的には、クラウドコンピューティングと呼ばれるユーザがインターネットの向こう側から様々なサービスを受ける形態も普及していく可能性があり、これに伴って位置情報やモビリティ等のモバイルネットワークの特徴を生かした通信サービスの需要も高まっていくことが予想される。更に、M2M（Machine-to-Machine）通信のような新しいアプリケーションによって、多数の多種多様な通信端末が世の中に普及していくことが予測されている。例えば、文献(7)では「50 Billion Connected Devices」というキーワードでそのような予測が示されている。このような背景の下、移動通信業界では、将来のモバイルトラフィックの伸びについて様々な予測が行われている^{(8)～(12)}。例えば、文献(8)では、

[†] (株)NTTドコモ 無線アクセス開発部、横須賀市
NTT DOCOMO, INC., Yokosuka-shi, 239-8536 Japan

2007～2017年の10年間でトラフィックが200倍に増大することが予測されている。NTTドコモでも、これまで“i-concier”や“BeeTV”といったモバイルコンテンツの普及によって、同様な傾向でトラフィックが伸びてきており⁽¹²⁾、今後は、スマートフォンを代表とする高速データ通信端末の普及やM2M等による通信端末数の増大によって、更にトラフィックの伸びが加速することが予想される。したがって、著者らは、文献(13)において、2010～2020年までの10年間でトラフィックが500～1,000倍(年率1.86～2.00倍)に増大することを想定し、更なる飛躍的な無線ネットワークの大容量化を実現する次世代の無線アクセス(将来無線アクセス)を確立していくことを目標として提案した。

本稿では、2010年代を支える移动通信の無線インタフェースであろうLTE及びLTE-Advancedの技術動向を基に、10年後の未来、すなわち2020年代に向けた将来無線アクセスの要求条件及びそれを達成するための技術課題について考察する。以降、まず2.において、将来無線アクセスの要求条件について考察を述べる。そして、3.でLTE及びLTE-Advancedにおける適用技術を振り返った後、4.において、将来無線アクセスにおける技術課題について考察する。最後に、5.に本稿のまとめを記す。

2 将来無線アクセスの要求条件

表1に10年後を想定した将来無線アクセスの要求条件⁽¹³⁾を示す。まず、システム性能改善の観点からは、今後のモバイルトラフィックの伸び(前述のとおり500～1,000倍を想定)をサポートするための無線ネットワーク容量を確保することが必須である。どのようなアプローチでこれを実現するかについての考察は後述する。また、将来予測されるブロードバンドサービスを固定網に匹敵する高速なデータレートで提供するため、データレートの高速化も要求される。IMT-Advancedにおけるデータレートの目標値⁽¹⁴⁾が広域エリアで100 Mbit/s、ローカルエリア環境などで達成できるピーク値で1 Gbit/sだったことを考慮すると、次世代ではその10倍、すなわち、広域エリアで1 Gbit/s、ピークで10 Gbit/s以上を達成することが目標になり得ると考えられる⁽¹⁵⁾。一方で、近年ブロードバンド通信サービスにおいて、ユーザの体感品質を意味するQoE(Quality of Experience)という言葉がよ

表1 将来無線アクセスの要求条件

改善内容	詳細
システム性能の改善	無線ネットワーク容量の飛躍的な増大(500～1,000倍のトラフィック増大を想定)
	固定網に匹敵するデータレート的高速化(広域エリアで1 Gbit/s、ピークで10 Gbit/s以上が目標)
ユーザ体感品質(QoE)の改善	ユーザスループットの公平化
	低遅延化
	様々なサービスの要求品質や通信形態に対するシステムの柔軟性
オペレータのシステム運用面からの改善	ネットワークコスト(CAPEX/OPEX)の低減
	省エネルギー化
	災害等に対するシステムの堅牢性の向上

く用いられている⁽¹⁶⁾。システム性能の改善をQoEの改善に生かすための要求条件としては、ユーザスループットの公平化や低遅延化などが挙げられる。特にLTEでは、ピークと平均やセル端の周波数利用効率との間に大きな隔たりがあり、このギャップを埋めていく観点からも、ユーザスループットの公平化は重要な要求条件である。また、M2M通信等によって端末やサービス形態が多様化していくことを想定すると、様々なサービス品質(データレートや遅延等の要求条件)や通信形態(例えばDevice-to-Device通信)をサポートするためのシステムの柔軟性がより重要になってくるものと考えられる。更に、オペレータにおけるシステム運用の観点からは、定額制のパケット通信サービスが主流となってきたこともあり、システム性能の改善と同時にCAPEX(Capital Expenditure)及びOPEX(Operating Expenditure)といったネットワークコストを低減することが非常に重要な要求条件である。また、省エネルギー化(Energy Saving)も近年注目されている重要な要求条件であり、世界的に盛んに検討されている^{(17)・(18)}。更に、災害等におけるライフラインとしての無線ネットワークの有効性も見直されつつあり、故障等に対してより堅牢性の高い無線ネットワークの確立も重要である。このため、マクロセルを更に大ゾーンのエリアの基地局でカバーし災害時に備えること等、様々な取組みが検討されている⁽¹⁹⁾。

前述した500～1,000倍といった過去にない急激なトラフィックの伸びをサポートするためには、周波数利用効率の改善や広帯域化といった従来形のアプローチだけでは不足する。したがって、基地局間協調やネットワークの階層化も考慮したネットワークの高密度化、トラフィックオフロードといった複数のアプローチの組合せを考慮

表 2 無線ネットワーク容量の増大に必要なアプローチと要求値の例

アプローチ	要求値 (例)
周波数利用効率 (bit/(s・Hz・cell)) の改善	3 倍 (LTE Release 10 比) → HSPA 比で約 24 倍
広帯域化 (Spectrum Extension)	2 倍以上
トラヒックオフロード	1.5 倍
ネットワークの高密度化 (cell/m ²)	7 ~ 14 倍
合 計	500 ~ 1,000 倍

する必要がある。表 2 に各アプローチで実現すべき利得の要求値の例を示す。

周波数利用効率は、現在の無線ネットワークで広く用いられている HSPA からの累積利得で考える。LTE (Release 8) では新しい無線インタフェースを導入し、HSPA (Release 6) に比較して約 3 倍の周波数利用効率 (bit/(s・Hz・cell)) を達成した。更に、LTE-Advanced (Release 10) では、要素技術の拡張により、LTE (Release 8) に比較して更に 1.3 倍程度の周波数利用効率を達成できる評価結果が示されている⁽²⁰⁾。したがって、将来無線アクセスでは、HSPA が LTE に進化したのと同様な周波数利用効率の増大を実現することを目標とし、LTE-Advanced (Release 10) と比較して、更に 3 倍の周波数利用効率を要求値とした。周波数利用効率は無線アクセス技術の改善に加えて、送受信アンテナ数を増やすことによっても増大できるが、平均的な周波数利用効率を考慮する場合、最も広く普及するユーザ端末 (スマートフォン) の形態を考慮する必要がある。したがって、端末の受信アンテナ数として、現状が HSPA でサポートされ、LTE のベースラインでもある 2 本とし、LTE-Advanced を経て 10 年後の将来無線アクセスまでには倍の 4 本がベースラインになるものとした。以上より、HSPA から周波数利用効率の利得を累積すると 24 倍程度と見積もることができる。

広帯域化は大容量化を実現しつつビット当りのコストを低減できるアプローチであり、データレートの高速化にも必須である。例えば、100 MHz 帯域幅で送受信アンテナ 12 本の MIMO を適用することにより、5 Gbit/s のスループットを達成できることが示されている⁽²¹⁾。したがって、特に広域エリアで 1 Gbit/s、ピークで 10 Gbit/s といった非常に高いデータレートの要求条件を達成するためには、少なくとも 200 MHz 以上の広帯域化が望ましいと考えられる。ただし、ネットワーク容量を考慮する場合は、ユーザ当りの通信帯域幅ではなく、システム全体での合計周波数スペクトルに着目する必要がある。し

たがってこの見積もりでは、ITU-R の世界無線通信会議 (WRC-07) で特定されている合計 750 MHz に対して、2 倍 (1,500 MHz) 以上の周波数スペクトルが将来無線アクセスにおいて利用できるものと見積もった。上記の見積もりは、例えば、4 オペレータで上下リンク 200 MHz ずつの帯域幅を割り当てた場合、合計 1,600 MHz の帯域幅となるため、前述のデータレートの観点からもそれなりに妥当なのではないかと考えられる。

現在ほとんどのスマートフォンが 3G と無線 LAN (Wi-Fi) のマルチモードをサポートしているように、インドア環境におけるデータトラヒックのオフロードは極めて有効かつ必須である。文献 (9) において、30 ~ 45% 程度の無線パケットトラヒックが自宅、それと同程度のトラヒックが屋内オフィスでのモバイルインターネットから発生している分析が示されており、そのようなデータからもオフロードの重要性はうかがえる。本稿では、将来増大する無線パケットトラヒックのうち、30% 程度は無線 LAN 等の他システムへオフロード可能と見積もった (容量で 1.5 倍相当の利得)。

以上のアプローチで足りない分のネットワーク容量は、ネットワークの高密度化 (面積当りのセル数 (cell/m²) の増大) で補っていく必要がある。累積で 500 ~ 1,000 倍のネットワーク容量を達成するには、高密度化によって 7 ~ 14 倍の利得が必要となる。しかしながら、要求条件を満たすためにはネットワークの高密度化が必要ではあるが、これを可能な限り低コストで実現することが重要である。したがって、将来無線アクセスでは、低送信電力のフェムトセルや RRE (Remote Radio Equipment)⁽²²⁾ などを用いる低コストなネットワーク構成で高密度化を実現することが、無線インタフェースの設計と同時に要求される技術課題である。以上より、前述の周波数利用効率 (bit/(s・Hz・cell)) の改善と合わせ、面積当りの周波数利用効率 (bit/(s・Hz・m²)) を低コストで飛躍的に増大することが将来無線アクセスにおいて重要な要求条件であると考えられる。具体的には、Release 10 に比較して 3 倍の周波数利用効率と高密度化による 7 ~ 14 倍の利得を乗算すると、面積当りの周波数利用効率では 21 ~ 42 倍の改善が要求されることになる。

3 LTE 及び LTE-Advanced における適用技術とこれからの発展

将来無線アクセスの要求条件を達成するためには、更なる無線アクセス技術の発展が必要であり、これに伴って新しい無線インタフェースの標準化が必要である。基地局や端末の実装に依存する技術は標準化対象になりにくいが、上りリンク SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) の周波数領域等化のように実効的に必須な技術もある。目標とする周波数利用効率の実現は、一つの大きな利得を持つ技術の大発明によって成し遂げられてもよいし、多数の要素技術による利得の累積によって成し遂げられてもよい。LTE 及び LTE-Advanced でも要求条件を達成するために様々な無線アクセス技術が適用されたが、中でも比較的大きな利得を与える技術はキー技術として考えることができ、将来無線アクセスにおいてもこのキー技術を見いだすことがまず重要である。そこで、本章では LTE 及び LTE-Advanced におけるキー技術について振り返り、将来無線アクセスにおける今後の発展の方向性を考察する。

HSPA は、回線交換を重視した W-CDMA の無線インタフェースに基づくパケットアクセスへの拡張である。これに対し、LTE の無線インタフェースは IMS (IP Multimedia Subsystem) 及び VoIP (Voice over IP) の普及を前提とし、システムのシンプル化とデータトラフィックの急増を考慮してパケットアクセスに最適化する形で設計された。更に、特性改善に必要なキー技術として、HSPA で適用されたターボ符号、ハイブリッド ARQ (Automatic Repeat reQuest), AMC (Adaptive Modulation and Coding) などに加えて、

- 下りリンク OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), 上りリンク SC-FDMA によるセル内直交多元接続方式
- 周波数選択性フェージングを利用する周波数領域スケジューリング
- 複数送受信アンテナを用いる MIMO 空間多重, 送信ダイバーシチ (下りリンク)

などがキー技術として適用された^{(3),(4)}。

図 1 に、LTE-Advanced (Release 10) で適用された無線アクセス技術を示す。LTE-Advanced では、LTE (Release 8) とのバックワードコンパチビリティ (LTE 端末の LTE-Advanced ネットワークへの接続性、及びその逆) を保証

図 1 LTE-Advanced における適用技術

することが必須であるという前提条件の下、上記の LTE で採用された技術に加えて、更に以下のようなキー技術が適用された⁽⁶⁾。

- キャリヤアグリゲーションによる広帯域化 (最大 100 MHz)
- MIMO 送受信の上りリンクにおける適用, 下りリンクにおける拡張 (マルチユーザ MIMO など)
- セル間干渉コーディネーション (eICIC: enhanced Inter-Cell Interference Coordination) 及びセル間協調 (CoMP: Coordinated Multi-Point) 送受信
- リレー伝送

このうち、eICIC や CoMP といった技術^{(23),(24)}は、LTE Release 8 の標準化が行われていた頃では想定されていなかった低送信電力のフェムトセルや RRE などを用いる階層形のセル構成 (ヘテロジニアスネットワーク) を考慮したキー技術として挙げられ、現在も 3GPP において、2012 年末頃完成予定の Release 11 仕様に向けての検討が進められている。

以上より、10 年後の将来無線アクセスでは、要求条件を満たすための新しいキー技術を導入しつつ、最初から LTE-Advanced のような広帯域化や階層形セル構成を前提条件として、無線インタフェースを設計することが発展の方向性になると考えられる。

4 将来無線アクセスにおける技術課題

4. では、将来無線アクセスにおける多元接続方式、セル展開方式、及びパケットアクセスの制御方式の発展という観点から、それぞれ技術課題について考察する。

4.1 多元接続方式の発展

(1) 温故知新的な考察

一対一通信 (point-to-point communication) の場合、有限の送信電力では、シャノン式の帯域幅と信号電力のトレードオフとなり、電力密度を稼ぐよりも、帯域幅を広げる方が理論上高効率であることはよく知られている⁽¹⁵⁾。しかしながら、移動通信の多元接続方式における問題は、限られたシステム帯域幅の中で、基地局が複数の移動局に対して、どのように電力・周波数及び時間・空間 (アンテナ) といった領域の無線リソースを割り当ててるのか、ということである。

表3に、これまでの各世代 (1～4G) の多元接続方式と将来無線アクセスにおいて考えられる方式の比較を示す。初期 (1G 及び 2G) の無線アクセス方式では、時間または周波数領域で分割する方式、及び周波数繰返しの適用により、同一チャネル干渉を低減し、情報伝送に必要な受信 SINR (Signal-to-Interference and Noise power Ratio) を確保していた。これに対し、3G の W-CDMA 及び HSPA では、畳込み符号やターボ符号を代表とするチャネル符号化技術の進歩もあり、シャノン式上からも理にかなっている広帯域送信を適用した。具体的には、拡散・符号化の利得により 1 セル周波数繰返しを実現し、システム帯域幅を全て使って高速送信電力制御という無線リソース制御を伴う符号分割多重により受信 SINR を確保する多元接続方式である。しかしながら、広帯域化によって発生するマルチパス干渉の影響を受

ける信号波形であり、更にマルチパス環境では多元接続によるユーザ間の干渉の影響も受けることからシステム容量が制限されるデメリットがあった。この劣化は電力密度の低いチャネルを多数多重する回線交換形のアクセスではさほど目立たない。しかしながら、パケットスケジューリングにより、瞬間的にはある程度少数のユーザに集中して送信電力を割り当て、多値変調を多用するパケットアクセスでは、マルチパス干渉及び多元接続によるユーザ間干渉の影響が顕著に現れスループット特性が劣化する⁽²⁵⁾。

したがって、LTE では、最初からパケットアクセスに適した無線インタフェースを設計することが前提となった。具体的には、マルチパス干渉への耐性に優れ、MIMO 送受信技術との親和性も高い OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ベースの信号波形を採用し、ダイナミックな時間・周波数のリソースブロック (RB: Resource Block) 割当を行うセル内直交多元接続方式を採用した。かつ、3G の長所でもあった拡散・符号化利得による 1 セル周波数繰返しの概念を OFDM に適用し、全システム帯域幅を使った広帯域送信が可能な無線インタフェースを実現した。ただし、特に下りリンクでは基本的に RB 当りの送信電力密度は一定であり (Release 10 で規定されたユーザ固有の復調用参照信号 (DM-RS: Demodulation Reference Signal) を用いる場合はある程度柔軟な送信電力制御を行うことも可能)、3G と比較して、送信電力制御の柔軟性は失っている。また、LTE はハードハンドオーバーを基本とするセル内の多元接続方式の最適化を原点としているため、後に (Release 10 以降)、CoMP 送受信や階層形セル構成における eICIC 技術に対応する無線インタフェースの拡張が行われたものの、バックワードコンパチビリティを確保するため適用可能な技術にも制限がある。

以上の考察を踏まえて、将来無線アクセスの多元接続方式について、LTE 及び LTE-Advanced の長所を残しつつ、前提条件の違いや技術・デバイスの進歩を考慮した発展の可能性を検討したものを以下に挙げる。

【主な残すべき長所】

- ・広帯域化に伴うマルチパス干渉への耐性、無線リソース制御の柔軟性、MIMO 送受信技術との親和性といった OFDM ベースの信号波形が持つ特性
- ・広帯域送信が可能であること (拡散・符号化利得に

表3 各世代のマルチアクセス方式と将来無線アクセスの比較

	Narrow-band system (1G/2G)	W-CDMA/HSPA (3G/3.5G)	LTE (Rel-8/9) (3.9G)	LTE-Advanced (4G)	将来無線アクセス (検討中)
マルチパス干渉	なし (狭帯域)	非直交 (広帯域 Rake 受信)	直交 (OFDM ベースの Cyclic prefix)		直交 (OFDM ベースの Cyclic prefix またはその拡張)
セル内無線リソース割当	直交 (FDMA/TDMA)	非直交 (CDMA)	直交 (FDMA/TDMA/SDMA)		直交 (FDMA/TDMA/SDMA) + 非直交
セル間無線リソース割当	周波数繰返し	1 セル繰返し	1 セル繰返し	1 セル繰返し + eICIC/CoMP	1 セル繰返し + eICIC/CoMP の高度化
無線リソース制御	直交割当	高速送信電力制御	周波数スケジューリング		高度化無線リソース制御 (電力・周波数・時間・空間)

より 1 セル周波数繰返しが可能であること)

【発展の可能性があるところ】

- ・階層形セル構成を含む多対多（マルチセル対マルチユーザ）の通信環境や幅広い周波数帯域の利用（不連続なスペクトル利用など）を前提とした無線リソース制御技術の更なる高度化
- ・多元接続におけるユーザ間干渉の除去処理を前提とした非直交多元接続^{(26), (27)}の適用

ここで、OFDM ベースの信号波形というのは上りリンクで採用された DFT (Discrete Fourier Transform)-Spread OFDM⁽²⁸⁾ や拡散 OFDM などを含む広い意味で用いており、現状では、抜本的に OFDM に代わる候補を見いだすことは難しい。しかしながら、特に上りリンクでは PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) を低く抑えなければいけない要求条件もあり、OFDM 的な信号処理をベースに最適な信号波形を追及していくアプローチも考えられる⁽²⁹⁾。

以降では、発展の可能性として挙げた無線リソース制御の高度化と非直交多元接続について詳しく述べる。

(2) 無線リソース制御技術の高度化と非直交多元接続

多元接続方式には W-CDMA における高速送信電力制御、LTE 及び LTE-Advanced における周波数領域スケジューリングのような無線リソース制御のキー技術がセットで存在する。将来無線アクセスでは、分散ネットワーク⁽³⁰⁾とも呼ばれる不連続なスペクトル割当を伴う広帯域化や階層形セル構成などを新しい前提条件とした、無線リソース（電力・周波数・時間・空間といった領域）の制御技術の最適化によって、周波数利用効率を改善することができると考えられる。特にユーザスループットの公平性といった要求条件を考慮すると、LTE と比較して、送信電力制御の高度化がより重要になるものと予想される。また、これらの無線リソース制御技術に、干渉キャンセラおよび周波数・時間・空間といった領域の自由度を有効利用する干渉アラインメントのような技術^{(31) ~ (33)}を併用することで更に特性を改善できる可能性もある。

非直交多元接続は、将来的には受信信号処理（例えばシリアル干渉キャンセラ）により特定のユーザ間干渉は除去できる前提下で、同一の無線リソース（例えば周波数）に複数のユーザを割り当てることで、ユーザ当りの無線リソース（帯域幅）がユーザ分の 1 になる直交アクセス

に比較して周波数利用効率を増大するアプローチである。下りリンクでは、複数ユーザへのブロードキャストチャンネルとなるため、重畳符号化 (Superposition Coding) や階層変調 (Hierarchical Modulation) を用いた送信法ともいえる。同一の周波数・時間に複数ユーザを多重する観点ではマルチユーザ MIMO と似ているが、空間領域の自由度を消費していない点で異なる。

図 2 に、下りリンクにおいて、柔軟な無線リソース（電力・周波数）割当、及び非直交多元接続により容量を改善できる簡単な例を示す。周波数選択性フェージングを考慮しない場合、LTE (Release 8) のような直交多元接続では、図 2 (a) のように、各ユーザに公平に帯域幅を割り当てる (Proportional Fairness 基準)。したがって、受信 SNR (Signal-to-Noise power Ratio) が 20 dB (セル近傍) と 0 dB (セル端) の 2 ユーザが存在した場合、シャノン式に基づいて周波数利用効率を計算すると、2 ユーザ合計で約 3.8 bit/(s・Hz) となる (ユーザ 1 が 3.3 bit/(s・Hz), ユーザ 2 が 0.5 bit/(s・Hz))。一方、帯域幅に加えて送信電力を柔軟に制御できる場合、例えば、図 2 (b) のようにセル近傍ユーザに比較してセル端ユーザの帯域幅を狭く、送信電力密度を高く制御することにより、2 ユーザ合計の周波数

図 2 柔軟な無線リソース割当及び非直交マルチアクセスの簡単な例

利用効率を約 $4.3 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ (ユーザ 1 が $3.8 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, ユーザ 2 が $0.5 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$) に増大できる. 更に非直交多元接続では, 例えば, 図 2 (c) のような送信電力制御を行うことで, 2 ユーザ合計の周波数利用効率を約 $5.3 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ (ユーザ 1 が $4.7 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, ユーザ 2 が $0.6 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$) まで増大できる. ここで, セル近傍のユーザ 1 はセル端のユーザ 2 への送信信号を復調・除去できるものとし, 干渉として考慮しない前提がある. 仮に非直交多元接続で干渉除去を行わないものとする, 2 ユーザ合計の周波数利用効率は約 $1.0 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ (ユーザ 1 が $0.4 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, ユーザ 2 が $0.6 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$) まで下がってしまう.

以上の例のように, 無線リソース制御の高度化及び非直交多元接続は, 特にユーザ間に大きなパスロス差が存在するマルチセル環境において, ユーザ間の公平性を保持しつつ容量を増大することができる. すなわち, LTE が周波数スケジューリングというキー技術によりフェージング変動の有効利用を試みたのと比較して, 将来無線アクセスではユーザ間のパスロスのばらつきを有効利用して利得を出す試みが重要になってくると捉えることもできる.

このような非直交多元接続や無線リソース制御の高度化を実現するためには, LTE の後継リリースになるのか, 全く別の無線インタフェースになるのかという議論は別として, 新たに無線インタフェースの標準化が必要である. 逆に, 既存の無線インタフェースで実現できてしまう技術は標準化対象にはならない. 無線インタフェースの設計には様々な要素が関連し, 3GPP でも同じ目的を実現するために実に様々な無線インタフェースのアイデアが提案される. したがって, 現時点で最適解を述べることは困難であるが, 大枠としては, 図 3 のような

図 3 直交と非直交を組み合わせた無線インタフェースの一例（無線リソースの色の違いがユーザの違いを表す）

直交化と非直交化を組み合わせた無線インタフェース設計が考えられる. 非直交多元接続では, 複数のユーザに同一の無線リソース（周波数・時間・空間など）を割り当てるため, 当該無線リソース内で干渉除去を高効率に行うために最適化された無線インタフェース（参照信号, 制御信号の規定など）が必要だと考えられる. 一方, 異なる無線リソースを割り当てるユーザ間（及び送信ストリーム間）では, 柔軟な無線リソース制御をサポートする無線インタフェース（制御信号や符号化・再送の単位であるトランスポートブロックの割当に関する規定など）が必要だと考えられる.

4.2 セル展開方式の発展

図 4 に各世代におけるセル展開方式を示す. セル間は 1G 及び 2G における固定の周波数繰返しから, W-CDMA 及び LTE において, 各セルで同一の周波数帯域を用いる 1 セル周波数繰返しへと発展した. これに対し LTE-Advanced では, 1 セル周波数繰返しをベースとしつつ, 高送信電力の基地局が形成するマクロセルと低送信電力の基地局や RRE が形成する複数のピコセルが重畳した階層形のセル構成が新しいセル展開シナリオとして考慮され, マクロセルとピコセルとの間の適応的な無線リソース割当技術 (eICIC) が導入された⁽²³⁾. 現在も 3GPP において, 基本的に準静的な制御速度である eICIC に比較し

図 4 セル展開方式の発展

て、より動的で高速なセル間の無線リソース割当制御を行う CoMP 送受信技術⁽²⁴⁾の検討が行われている。

将来無線アクセスでも、LTE-Advanced の流れを継いだセル間干渉に対するチャレンジは、ネットワークの高密度化と合わせて、面積当りの周波数利用効率の飛躍的な増大を実現するためのキーであると考えられる。一方、下りリンクの CoMP 送受信技術等で大容量化を実現するためには、複数セルに対する CSI (Channel State Information) のフィードバックが必要であり、利得とオーバーヘッドを注意深く検討する必要がある⁽³⁴⁾。したがって、セル間干渉を低減するために、基地局の送信処理 (プリコーディング) とユーザ端末における受信処理 (干渉キャンセラ) の両方を活用するアプローチ (例えば干渉アラインメント⁽³¹⁾、⁽³²⁾) が、現実的な制御情報量で周波数利用効率を改善するのに有望なアプローチとなる可能性がある。

このような従来のシングルセル対マルチユーザ通信か

ら、マルチセル対マルチユーザ通信への拡張を考慮すると、無線インタフェースにおける「セル」の定義について、再検討が必要になってくると思われる。例えば、複数のセルを包含するスーパーセルのようなものを定義するとか、あるいは、物理レイヤの観点からはセルの概念自体をなくしてしまう等が可能性として考えられる。実際に、3GPP の LTE-Advanced においても、CoMP の議論が進捗する中で、セルの定義を再検討しようという傾向の議論が見られる。図 5 に既に仕様が終了した LTE (Release 8)、LTE-Advanced (Release 10) 及び現在議論中の Release 11 におけるセルと物理チャンネルの関係の変化を示す。Release 8 では、基本的にユーザ端末は接続する一つのセル (サービングセル) から、全ての物理レイヤの信号・チャンネルを受信する。一方、Release 10 では、複数セルにわたる CoMP 送信を行う場合、共有データチャンネルにユーザ固有の DM-RS を適用し、実際に信号を送信するセルに依存せず、ユーザ端末が共有データチャネ

図5 LTE 及び LTE-Advanced におけるセルと物理チャンネルの関係の変化

図6 セル間無線リソース制御のためのネットワーク構成の例

ルを復調可能な無線インタフェースがサポートされた。しかしながら、制御チャネルを含むその他の信号・チャネルはやはりサービングセルに依存する仕様である。

これに対し、現在 3GPP で議論されている Release 11 では、未決定ではあるが、制御チャネルを含めたマルチセル送信も可能な無線インタフェースが検討されている^{(35), (36)}。図 6 (a) に示すように、RRE を用いたセル構成において、複数の送信地点に同一のセル ID を適用し、共有データチャネルと同様、DM-RS を用いて復調可能な制御チャネルを新たに規定して、ビームフォーミングやマルチセル送信を適用する。これは前述した複数セルを包含するスーパーセルを定義するのと近い考え方であり、ハンドオーバーなどの処理は個々の送信地点ではなくスーパーセルの単位で行うため、ハンドオーバー処理の頻度を減らすメリットもある。しかしながら、同一ネットワークで旧リリース (Release 8 ~ 10) のユーザ端末をサポートする場合、それら旧リリースのユーザ端末は複数ある送信地点の違いを認識できないため、システム全体では特性劣化を招く懸念もある。したがって、スーパーセルのような新しいセルの概念が本格的に導入され、効果を発揮するのは、将来リリースに特化した新規周波数帯導入時、若しくは次世代の無線通信システム以降になるかもしれない。

将来無線アクセスでは前述のようにネットワークの高密度化が予想され、スーパーセルのような拡張されたセルの概念に沿ったネットワーク構成の検討も近年盛んに行われている^{(37), (38)}。特に、セルという概念は周波数領域のキャリアにも拡張することができ、実際、3GPP 仕様におけるセルは周波数キャリア一つ一つのことを表す。LTE-Advanced におけるキャリアアグリゲーションによる広帯域化は仕様上、周波数の異なる複数セルへの同時接続に近いといえる。そこで、図 6 (b) のように、スーパーセルの境界をキャリア間でずらすことにより、セル間無線リソース制御の恩恵が得られない境界を減らすようなネットワーク構成も検討されている⁽³⁴⁾。なお、図 6 (b) において、直線が基地局と RRE を結ぶ光ファイバを表しており、周波数キャリアごとに色を変えている (3 色で 3 周波数キャリアを表している)。図中央の基地局から太線で結ばれた三つの RRE によって、破線で示されているスーパーセルがそれぞれ形成されている。

4.3 パケットアクセス制御方式の発展

前述した多対多の通信環境や幅広い周波数帯域の利用、更に多様化する無線ネットワークの端末やアプリケーションを考慮すると、セルサーチ、ランダムアクセス、CSI フィードバック、パケットスケジューリングといった基本的な無線パケットアクセスの制御方式についても発展の可能性があるものと考えられる。

まず、幅広い周波数帯域の利用、特に不連続な多数の周波数スペクトルを用いて広帯域化する場合、高効率なセルサーチ法及びキャリア (スペクトル) アグリゲーションを確立するまでの制御法が技術課題として挙げられる。例えば、初期セルサーチを行う周波数キャリアはできるだけ限定した方が効率が良いので、図 7 に示すように、初期セルサーチで検出するキャリア (プライマリーキャリア) を足掛かりとし、そこから受信した制御情報をもとに、アグリゲーションが可能なデータの送受信に特化したキャリア (例えば、3GPP において検討されているエクステンションキャリア⁽³⁹⁾) に接続するというプロセスなどが考えられる。また、多対多の通信環境、特に前述した階層形セル構成を考慮すると、複数のオーバーラップしたセルを高精度に検出できる同期信号が要求される。例えば、セル間であらかじめ直交した同期信号を規定するようなアプローチが考えられ、LTE-Advanced でもセル間で同期信号を含むサブフレームのタイミングをオフセットすることで、擬似的に直交化を行うことが検討されている⁽³⁶⁾。

図 7 エクステンションキャリアを用いるキャリアアグリゲーションの拡張

また、パケットアクセスにおける QoE の向上において低遅延化は重要な要求条件である。セルラシステムを前提とした LTE では基地局がスケジューリングにより多数のユーザに無線リソースを割り当てるため、伝送遅延を短縮するためには、時間領域のパケットの送信単位である TTI (Transmission Time Interval) 長やハイブリッド ARQ における再送間隔を短縮することに加えて、CSI

の高効率なフィードバックやスケジューリングに要する遅延の短縮もトラヒックによっては非常に重要である。更に、上りリンクでは衝突形とスケジュール形の packets アクセス方法があるが、今後の無線ネットワークの高密度化、階層化、多様化を考慮すると、LTE のようなスケジュール形よりも無線 LAN 的な衝突形 (ランダム) アクセスの方が適するデータ量の少ない packets トラヒックが増してくる可能性もある⁽⁴⁰⁾。したがって、例えば、衝突形の packets アクセスに用いる無線リソースを従来よりも効率良く (例えば動的に) 制御する方法や、適応再送などを用いて衝突形からスケジュール形へスムーズに移行可能な packets 制御技術などが検討課題として考えられる。

5 む す び

本稿では、2010 年代を支える移動通信の無線インタフェースであろう LTE 及び LTE-Advanced の技術動向を基に、10 年後の未来、すなわち 2020 年代に向けた将来無線アクセスの要求条件と技術課題について考察した。要求条件については、今後のトラヒックの伸び (500 ~ 1,000 倍を想定) をサポートするための無線ネットワーク容量をできるだけ低コストで実現することが最も重要であり、これを、周波数利用率の改善や広帯域化といった従来のアプローチに加え、基地局間協調やネットワークの階層化も考慮したネットワークの高密度化、非ライセンスバンドへのトラヒックオフロードといった複数のアプローチの組合せで実現していく必要があることを述べた。技術課題については、多元接続方式は、LTE 及び LTE-Advanced の良いところを残しつつ、無線リソース制御の更なる高度化や非直交多元接続の適用などの発展の可能性について考察した。空間・周波数領域へのセル展開方式も進化しており、今後は標準化に関係する無線インタフェースと、その前提となるネットワーク構成の両方が重要な検討課題であることを述べた。また、多様化する無線ネットワークの端末やアプリケーションを考慮すると、無線 packets アクセスの制御方式についても発展の可能性があると述べた。

文 献

- (1) <http://www.nttdocomo.com/pr/2010/001494.html>
- (2) S. Onoe, T. Nakamura, and K. Higuchi, "3G evolution scenario toward 4G: Super 3G concept," *Wireless Commun. Mobile Comput.*, vol. 7, no. 8, pp. 1013-1019, Oct. 2007.
- (3) E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, and P. Beming, *3G Evolution-HSPA and LTE for Mobile Broadband*, Second ed., Academic Press, 2008.
- (4) S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE-The UMTS Long Term Evolution from Theory to Practice*, Wiley, 2009.
- (5) ITU-R Report M.2134, "Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)," Dec. 2008.
- (6) A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Tomas, "LTE-Advanced: next generation wireless broadband technology," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 10-22, June 2010.
- (7) Ericsson, "Radio Implications of serving 50 Billion Connected Devices," APCC2011 Seminar on Future Wireless Technol., Nov. 2010.
- (8) 総務省 情報通信審議会 情報通信技術分科会, "携帯電話等周波数有効利用方策委員会," IMT-2000 高度化作業班 (第 8 回) 資料, Oct. 2003.
- (9) Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2010-2015, Feb. 2011.
- (10) "Mobile traffic forecasts 2010-2020" UMTS Forum, Jan. 2011.
- (11) http://www.ericsson.com/thinkingahead/idea/100810_data_growth_750744728_c
- (12) S. Onoe, "LTE launch and services for the next decade," ITU-R Regional Workshop on 'IMT for the Next Decade', March 2011.
- (13) 中村武宏, 岸山祥久, B. アナス, "LTE の発展と将来無線技術," *信学技報*, RCS2010-148, pp. 35-43, Nov. 2010.
- (14) ITU-R Reco. M.1645, June, 2003.
- (15) 庄木祐樹, 田邊康彦, "無線通信はどこまで高速化できるか?," *信学通誌*, no. 11, pp. 12-22, Dec. 2009.
- (16) ITU-T Rec. P.10/G.100 Amendment 1: New Appendix I - Definition of Quality of Experience (QoE), Jan. 2007.
- (17) <https://www.ict-earth.eu/>
- (18) <http://www.greentouch.org/>
- (19) http://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ir/binary/pdf/library/presentation/110428/notice_110428-2.pdf
- (20) 永田聡, 西川大祐, 阿部哲士, 岸山祥久, 中村武宏, "LTE/LTE-Advanced のシステム性能評価," *信学技報*, RCS2010-5, pp. 25-30, April 2010.
- (21) H. Taoka, K. Dai, K. Higuchi, and M. Sawahashi, "Field experiments on MIMO multiplexing with peak frequency

- efficiency of 50 bit/second/Hz using MLD based signal detection for OFDM high-speed packet access,” IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 26, no. 6, pp. 845-856, Aug. 2008.
- (22) 3GPP, R1-083688, NTT DOCOMO, “Application of remote radio equipment to LTE-Advanced,” Sept. 2008.
- (23) 鹿倉義一, “3GPP におけるヘテロジニアスネットワークに関する標準化動向,” 信学技報, RCS2010-277, pp. 167-172, March 2011.
- (24) M. Sawahashi, Y. Kishiyama, A. Morimoto, D. Nishikawa, and M. Tanno, “Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-Advanced,” IEEE Trans. Wireless Commun. Mag., vol. 17, no. 3, pp. 26-34, June 2010.
- (25) 川村輝雄, 岸山祥久, 後藤喜和, 新博行, 佐和橋衛, “下りリンクマルチセル環境のブロードバンドチャネルにおける OFDM と DS-CDMA 無線アクセスのスループット特性比較,” 信学技報, RCS2005-14, pp. 43-48, April 2005.
- (26) D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication, fourth printing, Cambridge University Press, 2008.
- (27) 岸山祥久, B. アナス, 中村武宏 “将来無線アクセスに向けた非直交マルチアクセスを用いる無線インターフェースについての初期検討,” 信学技報, RCS2011-81, pp. 37-42, July 2011.
- (28) D. Falconer, S. L. Ariyavisitkul, A. Benyamin-Seeyar, and B. Eidson, “Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless access,” IEEE Commun. Mag., vol. 40, no. 4, pp. 58-66, April 2002.
- (29) 安達文幸, “拡散シングルキャリア・ブロックマルチアクセス,” 信学総大, BP-1-1, March 2010.
- (30) 三瓶政一 “無線分散ネットワークに基づくユビキタスネットワークワーキングの展望,” 信学総大, BP-1-2, March 2010.
- (31) V. R. Cadambe and S. A. Jafar, “Interference alignment and degrees of freedom of the K-user interference channel,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 54, no. 8, pp. 3425-3441, Aug. 2008.
- (32) C. Wang, H. C. Papadopoulos, S. A. Ramprasad, and G. Caire, “Design and operation of blind interference alignment in cellular and cluster-based systems,” Information Theory and Applications (ITA) Workshop, Feb. 2011.
- (33) D. Tse, “Feedback in networks: learn from the past, don’t predict the future,” Information Theory and Applications (ITA) Workshop, Feb. 2011.
- (34) S. A. Ramprasad, H. C. Papadopoulos, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, N. Jindal, and G. Caire, “Cooperative cellular networks using multi-user MIMO: tradeoffs, overheads, and interference control across architectures,” IEEE Wireless Commun. Mag. vol. 49, no. 5, pp. 70-77, May 2011.
- (35) 3GPP, R1-110649, Ericsson, ST-Ericsson, “Aspects on distributed RRUs with shared cell-id for heterogeneous deployments,” Feb. 2011.
- (36) 3GPP, R1-110867, NTT DOCOMO, “CoMP with lower Tx power RRH in heterogeneous network,” Feb. 2011.
- (37) http://www.future-forum.org/en/ac_list.asp?id=79
- (38) <http://www.ict-futon.eu/>
- (39) 3GPP, R1-100313, Nokia, Nokia Siemens Networks “On the need of extension carriers,” Jan. 2010.
- (40) 鈴木博, “移動通信における信号処理とマルチプルアクセス技術” 信学総大, BP-1-3, March 2010.

(平成 23 年 4 月 19 日受付, 7 月 23 日再受付)

中村武宏 (正員)

平 2 横浜国大大学院修士課程修了。同年, (株) NTT 入社。平 4 から, (株) NTT ドコモにて移動通信方式の研究開発及び標準化に従事。現在, 高度無線通信研究委員会 IMT-Partnership 部会長, 3GPP TSG-RAN 議長。

岸山祥久 (正員)

平 12 北大大学院工学研究科修士課程了。同年, (株) NTT ドコモ入社。以来, ブロードバンド無線アクセスの研究開発及び LTE/LTE-Advanced の 3GPP 標準化に従事。平 16 本会奨励賞受賞。博士 (工学)。

ベンジャブール・アナス (正員)

平 11 京大・工・電気電子卒。平 13 同大学院情報学研究科修士課程了。平 16 同博士課程了。同年, (株) NTT ドコモ入社。以来, 将来無線アクセス技術の研究開発及び LTE-Advanced の 3GPP 標準化に従事。平 18 本会奨励賞受賞。博士 (工学)。