

無線通信技術のたゆまぬ発展

安達 文幸

東北大学大学院 工学研究科 通信工学専攻

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 移動無線ネットワークは第1世代の誕生(1979年12月)からおよそ35年をかけて第4世代ネットワークまで発展してきた。第1~2世代の重要課題は、電波の届かないエリアの解消を目指したカバレッジの拡大であった。第1~2世代では音声通信が中心であったが、第3世代では高速データ通信(2Mbps)を目指すことに舵が切られた。第3世代以降、動画配信サービスなどがポピュラーになってきた。そして第3.9世代と言われるLong-Term Evolution(LTE)および第4世代と呼ばれるLTE-Advanced(LTE-A)では、より高精細な動画配信や1Gbpsに近いデータ通信がポピュラーになってきた。このため、利用可能な周波数帯域幅に限られた移動無線通信では、面的スペクトル利用効率(bps/Hz/km²)のより一層の向上が大変重要な課題になっている。さらに次の第5世代になると、より高速なデータ通信(>1Gbps/ユーザ)や超多数の無線デバイスとの接続も予想され、無線データトラフィックが急増すると見られている。無線データトラフィック量に比例して無線エネルギー消費も増えることから、無線エネルギー利用効率(bits/Joule)さらにはネットワーク全体のエネルギー利用効率の向上も重要な課題になる。本稿では、その誕生から35年余にわたる移動無線通信技術のたゆまぬ発展の歴史を振り返り、これから研究開発が活発化する第5世代ネットワークの実現に向けた技術課題について述べる。そして、カバレッジを確保しつつ面的スペクトル利用効率とエネルギー利用効率の同時向上を図ることができると期待されている分散アンテナ協調無線伝送技術について述べる。

キーワード 移動無線通信, 携帯電話, LTE/LTE-A, 第5世代移動通信システム, 小セルネットワーク, 分散アンテナ

Continuous Evolution of Mobile Communications Technology

Fumiyuki ADACHI

Dept. of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

6-6-05 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

E-mail: adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Mobile communications network has evolved into the 4th generation (4G) after 35 years from its birth in December of 1979. We witnessed the new generation every 10 years. From 1G to 2G, the coverage extension was the most important concern. Between 2G and 3G, there was a big leap in the radio transmission data rate. The major communication service was the voice in 1G and 2G networks. In 3G mobile communications, high speed data communications of up to 2Mbps was targeted. Since the start of 3G services, video communications have been getting popular. In 3.9G LTE and 4G LTE-A, much higher quality video communications and close-to-1Gbps broadband data services will become more and more popular. Therefore, the area spectrum efficiency (bps/Hz/km²) is a paramount concern. The mobile data traffic volume in 2020 is expected to reach about 1000 times of 2010. In 5G, much broader data services (>1Gbps/user) and massive device connections services are expected. Hence, not only the radio energy efficiency (bits/Joule) but also the network energy efficiency becomes an important concern. In this paper, we overview the evolution of mobile communications technology over the past 35 years and discuss about the technical issues toward 5G. Finally, we will introduce the distributed antenna cooperative wireless signal transmission techniques which improve simultaneously the spectrum and energy efficiencies while providing seamless connection.

Keyword Mobile radio communication, personal mobile communication, LTE/LTE-A, 5G mobile communications system, small-cell network, distributed antenna

1. まえがき

移動無線通信ネットワークの発展が現代社会に与えた影響は計り知れない。今から36年ほど前の1979年12月に、アナログ技術を用いた第1世代ネットワーク(第1世代の初期は自動車電話とも呼ばれていた)による通信サービスが

我が国で始まった。その後、デジタル技術を用いた第2世代、そして第3世代を経て、長期発展システム(LTE)[1]と呼ばれる第3.9世代(これを第4世代と呼ぶことも多いようである)による通信サービスが始まったのが2010年末、そしてLTE-Advanced(LTE-A)と呼ばれる第4世代による通信サ

ービスが始まったのが 2015 年 3 月のことである[2]. このように第 1 世代から第 4 世代へと、ほぼ 10 年ごとの世代交代を経て発展してきた(図 1). 今では、ほぼすべての人が移動無線通信ネットワークにつながり、様々な情報を交換でき、世界に散らばっている多様なデータにいつでもどこからでもアクセスできるようになった.

およそ 35 年余をかけて移動無線通信は、数 kbps の狭帯域通信から数 Gbps の広帯域通信へと発展してきた. 第 1 世代と第 2 世代では固定レートの音声通信が主流であったが、第 3 世代以降は電子メール、電子商取引、Web ページ閲覧や動画像などの広帯域通信サービスが主流になった. 第 2 世代では、デジタル音声チャンネルを狭帯域にすることでスペクトル利用効率の向上を狙った狭帯域時分割マルチアクセス(TDMA)が採用されたが、第 3 世代ではピークレートの増大、多様なデータレートの通信サービスの提供と面的スペクトル利用効率の向上とを狙った広帯域符号分割マルチアクセス(W-CDMA)に変わった[3]. 第 4 世代 LTE-A では 1 基地局あたり 3Gbps 程度の高速度データサービスの提供が可能となった. 2020 年ころの導入を目指した第 5 世代移動無線通信では、1 ユーザ当たり 1Gbps を超える超広帯域無線通信への発展を狙っている.

現在、日本をはじめ世界中で第 5 世代移動無線通信技術の研究開発が活発に展開されている[4]. 日本では 2015 年 9 月より、第 5 世代移動通信システム実現に向けた総務省委託研究開発が開始された[5].

本稿では、その誕生から 35 年余にわたる移動無線通信のたゆまぬ発展の歴史を振り返り、第 5 世代ネットワークの実現に向けた技術課題について述べる. そして、カバレッジを確保しつつスペクトル利用効率とエネルギー利用効率の同時向上を図ることができる分散アンテナ協調無線伝送技術について述べる. なお、LTE に至る無線通信技術の進化の歴史について文献[6]で詳細に紹介している.

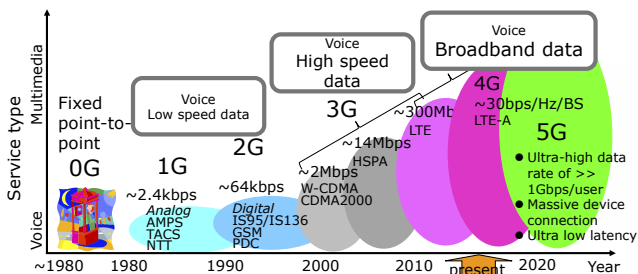


図 1 移動無線通信の世代交代

2. セルラー概念とマルチアクセスの変遷

2.1. セルラー概念

利用できる無線帯域幅は限られている. そこで、ユーザが全国各地に分散しているということを利用して、この問題の解決を図ったのが、広いサービスエリア内に多数の無線基地局を分散配置し、同じ無線帯域を異なる基地局で再利用すると言うセルラー概念である[7],[8]. 電波は減衰しながら伝搬する. ある程度の同一周波干渉を許容すれば、お互いが遠く離れた基地局で同じ無線帯域を再利用できる. これにより、利用できる無線帯域幅は限られていても、移動無線通信サービスの全国提供ができる.

電波の届かないエリアが生じないように各基地局が張る無線セル(生物の細胞に相当)を若干オーバーラップさせることで、ユーザが移動中であっても、次々と通信先の基地局

を切り替えるハンドオーバーにより途切れなく通信を継続できる. また、各ユーザは常に近傍の基地局を選択して通信する. これにより通信距離が短くなり、バッテリー駆動の携帯端末でも長時間通信を継続できる.

電波が減衰して伝搬するという欠点を利点として巧妙に利用したセルラー概念の重要性は今後も変わることがない.

2.2. マルチアクセスの変遷

第 4 世代までは半径が数 100m から数 km の無線セルが使われてきた. このため、大都会エリアでは各セル内に存在するユーザ数はかなり多く、基地局に割り当てられた無線帯域を多数のユーザが共有して通信しなければならない. このときに使われるのがマルチアクセスである. 4 世代に亘るマルチアクセス技術の変遷を示したのが図 2 である.

第 1 世代で使われたのが周波数分割マルチアクセス(FDMA)である. 第 2 世代になると時分割マルチアクセス(TDMA)に変わり、第 3 世代では符号分割マルチアクセス(CDMA)になった. 広帯域 CDMA(W-CDMA)では、全ての無線基地局で同一帯域(5MHz)を再利用でき、拡散率を柔軟に変えることで多様なレートのデータ通信を可能としている[3]. 第 3 世代の上りリンク(端末送信)/下りリンク(基地局送信)マルチアクセスに用いられている CDMA では時間領域等化である Rake 受信/合成が用いられている.

第 4 世代 LTE-A では、信号帯域幅は 100MHz 程度の広帯域になる. そうなると周波数選択性のかかなり強い無線チャンネルになり、時間領域 Rake 合成では十分な等化性能が得られない. そこで LTE/LTE-A の下りリンクでは、逆高速フーリエ変換(IFFT)を用いて多数の直交サブキャリアを生成し、要求データレートに対応して複数の直交サブキャリアを同時に割り当てる並列伝送が行えること、単純なゼロフォーシング型周波数領域等化(ZF-FDE)により周波数選択性フェージングチャンネルを等化可能であること、各ユーザのチャンネル状態に応じたきめ細かなスケジューリング(リソース割り当て)によりマルチユーザダイバシティ利得が得られること、などの利点のある直交周波数分割マルチアクセス(OFDMA)が採用された.

OFDMA では送信信号波形のピーク対平均電力比(PAPR)が大きい. このため、同じ平均電力であってもピーク電力が高い線形電力増幅器が必要になり、バッテリー駆動の端末にとって消費電力の観点から好ましくない. そこで、LTE/LTE-A の上りリンク(端末送信)では低 PAPR のシングルキャリア FDMA(SC-FDMA)[9]が採用されている. SC-FDMA では、割り当てられたリソースブロック全体(12 サブキャリア)に各送信データシンボル成分が広がるため、単純な ZF-FDE ではなく、最小平均二乗誤差規範 FDE(MMSE-FDE)[10],[11]が採用されている. これにより、周波数選択性フェージングの欠点を利点に変換し、周波数ダイバシティ利得を得ることができ、OFDMA に劣らないほどの伝送特性を達成できる. 余談ではあるが、もし MMSE-FDE がもっと早く提案されていたなら W-CDMA の高速データ通信品質は飛躍的に向上していただろうと思う.

第 3 世代までのマルチアクセスでは、割り当てられた通信チャンネルを 1 人のユーザが通信開始から終了まで占有する. ユーザが通信中に移動していれば、無線チャンネル状態が時々刻々変動する. このことを積極的に利用して、チャンネル状態の良い無線資源(周波数と時間の 2 次元リソースブロック)を適応的に割り当てつつ、多数のユーザに通信の機会を与えるスケジューリングが第 3.9 世代 LTE に登場した.

干渉を避けつつ通信機会の公平性をできるだけ保つよう設計されたスケジューリングは新しいタイプのマルチアクセスである。1つのチャンネルを通信開始から終了まで占有する静的マルチアクセスに比べて通信品質を向上できるし、より多くのユーザに同時通信の機会を与えることができる。

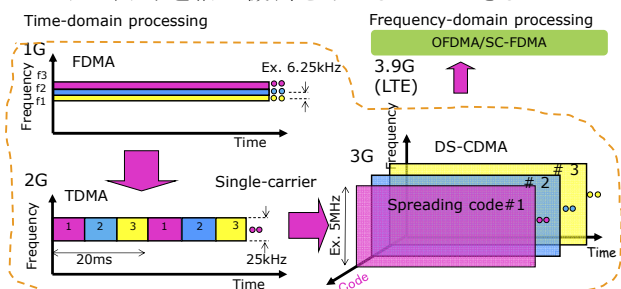


図2 マルチアクセス技術の変遷

3. 第5世代実現に向けた技術課題と小セル化

3.1. 技術課題

第4世代 LTE-A までの基地局・端末間通信距離は数100m から数 km である。通信速度と所要送信電力は比例関係にあるから、同じ送信電力のままでは、データ通信速度が高速になれば無線セル端に存在するユーザの通信品質が劣化(スループットの低下)してしまう。その結果、高速データ通信が可能になるのは基地局の近傍に限られてしまう。そこで、LTE-A では、セル端に近い無線端末の通信品質向上を狙って、周辺基地局が協調する複局協調送受信 (CoMP: Coordinated Multi-Point) が使われる[12](図3)。しかし、この CoMP でも第5世代に期待される1ユーザ当たり数 Gbps の超高速データ通信の提供には無理がある。

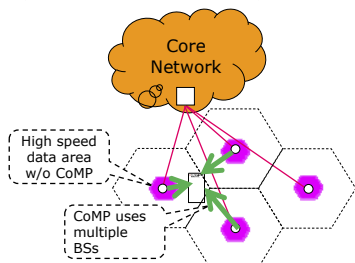


図3 複局協調送受信 (CoMP)

第3世代以降、毎年2倍近くの勢いでデータトラフィック量が増加している。データ通信の高速化が進むと共にデータ通信を行う端末数が増加しているからである。第5世代の登場が期待される2020年頃には、2010年のデータトラフィック量の1000倍近くにもなると予測されている(図4)。

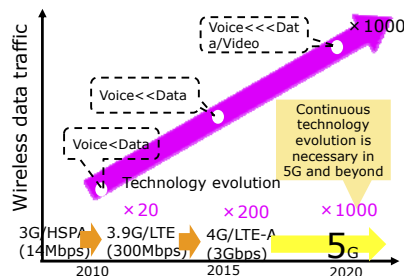


図4 モバイルデータ通信トラフィック予測

移動無線通信の設計は、ある程度の同一周波干渉を許容して同一無線帯域を再利用することで面的スペクトル利

用効率 (bps/Hz/km²) の向上を図るセルラー概念に基づいている。面的スペクトル利用効率の向上は、私たち無線研究技術者にとって永遠の課題であり、第5世代ではその画期的な向上が求められている。最近はこれに加え、無線エネルギー問題が加わった。データ通信速度の高速化とトラフィックの増大は無線エネルギーの消費量増大につながるからである。特に、バッテリー駆動の無線端末にとって深刻な問題である。第5世代では、無線エネルギー利用効率 (bits/Joule) の一層の向上が求められている。

ところで最近、モノのインターネット (IoT: Internet of Things) が注目されていて、第5世代では極多数のデバイスの無線接続が期待されている。そこで第5世代では、カバレッジの確保、面的スペクトル利用効率と無線エネルギー利用効率の同時向上もさることながら効率的な無線資源管理も重要な課題になる(図5)。

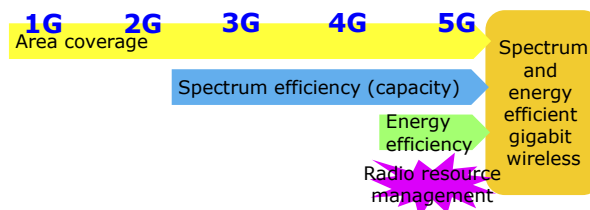


図5 第5世代実現に向けた技術課題

3.2. 小セル化

面的スペクトル利用効率と無線エネルギー利用効率の同時向上に有望な方策は、無線セルをさらに縮小する小セル化である。小セル化により、同一無線帯域をより近くで再利用できるから面的スペクトル利用効率を向上できる。より近距離の通信になるから更に低い送信電力で高速通信でき、無線エネルギー利用効率も同時に向上できる。与えられたセル半径のもとでは、面的スペクトル利用効率と無線エネルギー利用効率とはトレードオフの関係にある。両方を同時に向上できるのはセル半径の短縮、つまり小セル化である[13]。小セル化は第5世代の実現に極めて有望である。

また、小セル化により、スケジューリングの対象となる無線セル内のユーザをもっと絞り込むことができ、複雑なスケジューリングを回避できる。究極はセル内ユーザ数を1人とするくらいの極小セル化であろう。しかし、セルサイズを単純にマクロセルから小セルへと縮小すると、ユーザの移動によりハンドオーバーが頻繁に発生してしまう。この問題を避けるためには、データ通信リンクと制御リンクを分離し、小セル基地局が高速データ通信を提供し、従来のマクロセル基地局が通信制御を行うファントムセル[14],[15]が有望であろう。

また、膨大な数の小セル基地局が必要になることから、基地局の飛躍的な低消費電力化もさることながらネットワーク全体の飛躍的な低消費電力化が求められる。つまり、無線エネルギー利用効率だけではなく、ネットワークエネルギー利用効率の向上が求められる。

3.3. 小セル化への2つのアプローチ

セルサイズを単純にマクロセルから小セルへと縮小することの他に、有望な小セル化への2つのアプローチがある[16](図6)。一つは、従来のマクロセル基地局に超多数アンテナを集中配置する Massive MIMO の適用である[17]。集中型 Massive MIMO では極細ビームにより、従来のマクロセル内に超多数の仮想小セルを形成する。もう一つは、多数のアンテナを従来のマクロセル内に分散配置させて小セルを

形成する。これらの分散アンテナがまとまって一つの仮想マクロセルを形成する。このような無線ネットワークを筆者らは分散アンテナネットワーク(DAN)[18],[19],[20]と呼んでいるが、分散型 Massive MIMO と呼べるかも知れない。無線端末近傍のいくつかのアンテナを選択することでシャドウイングの影響を軽減できるから、多数アンテナの一方所集中配置に比べマクロセル全体で通信品質を向上できる。

極短距離通信(集中型 Massive MIMO ではアンテナ利得増大により伝搬損失を相殺)になるので上りリンク送信電力を低減でき、バッテリー駆動の無線端末にとっては朗報になる。極短距離通信になれば、より広い帯域幅の利用が可能なセンチ波帯やミリ波帯などの周波数帯を利用できる。これらの周波数帯は伝搬損失が大きいので、通信距離が数 100m から数 km となるような第 4 世代までは利用できなかった。ミリ波帯では 100MHz を超える帯域幅が利用可能になるかも知れない。アンテナ当たりの同時接続ユーザ数は数人程度であろうからユーザ当たりの通信帯域幅を広くでき、データ通信速度の格段の高速化が期待できる。

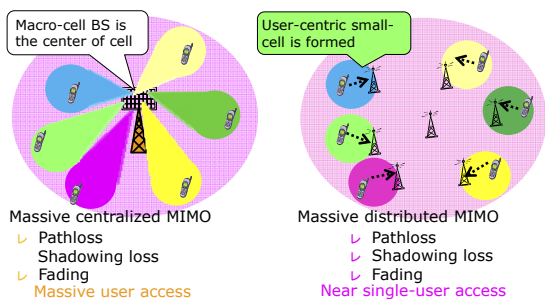


図 6 小セル化への 2 つのアプローチ

4. 分散アンテナ協調信号伝送

4.1. 仮想マクロセル

信号処理機能や無線資源管理機能を 1 カ所(従来のマクロセル基地局)に集中させ、分散アンテナで仮想マクロセルを構成する(図 7)。

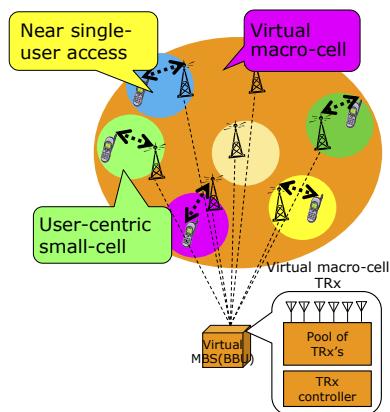


図 7 分散アンテナを用いる仮想マクロセル

無線端末近傍の分散アンテナをいくつか選択し、それらを協調させて信号伝送する。これは LTE-A における CoMP の発展形と見做せる。本稿では、筆者らが第 5 世代移動無線通信向けに検討している時空間符号化ダイバーシチおよびマルチユーザ MIMO 多重(MU-MIMO)について紹介する。ところで、集中型 Massive MIMO と同様にスケジューリン

グを仮想マクロセル基地局で集中して行うことで、ハンドオーバー問題をアンテナ選択問題に置き換ええる。しかし、無線端末数が膨大になれば、集中型スケジューリングでは対応できなくなる恐れがある。このような場合、自律分散アルゴリズムに基づく無線資源管理[21]の導入が必要になるかも知れない。

4.2. 周波数領域等化と TDD

100MHz を超える広帯域チャネルを用いる第 5 世代の無線伝搬路は周波数選択性がかかなり強くなる(図 8)。このため、強力なチャネル等化の採用が必須である。第 5 世代でも、LTE/LTE-A で導入された FDE が用いられるだろう。チャネル等化のためには無線伝搬路の構造を表す情報(チャネル情報)が必要で、高精度なチャネル推定が要求される。送受信に同じ搬送波周波数を用いる時分割複信(TDD)を用いれば、上りリンク(端末→ネットワーク側)のチャネル推定結果を下りリンク(ネットワーク側→端末)送信に再利用できる。このことから、チャネル等化などの複雑な信号処理で必要になる各ユーザのチャネル情報を仮想マクロセル基地局に集約して持たせることができる。TDD は第 5 世代移動無線通信の複信方式として大変魅力的である(図 9)。

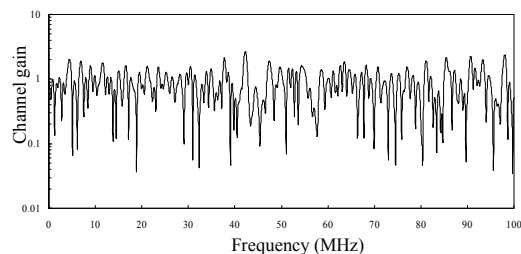


図 8 周波数選択性チャネルの伝達関数 (100ns 間隔の 16 パスで構成されたチャネル)

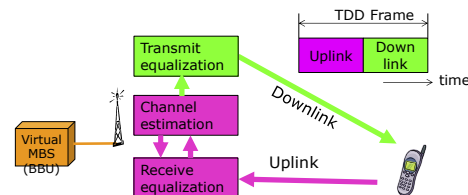


図 9 TDD

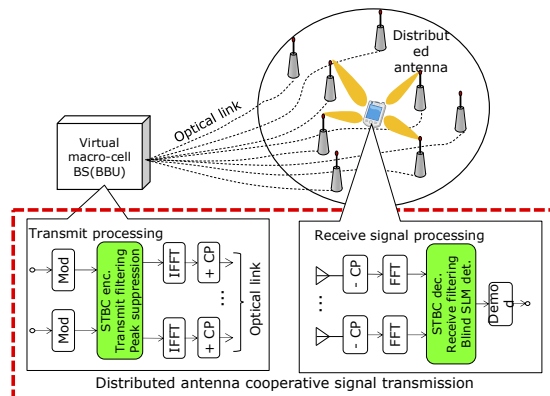


図 10 分散アンテナ協調信号伝送

筆者らの研究グループが分散アンテナを用いた仮想マクロセル用に検討している分散アンテナ協調信号伝送(時空間符号化(STBC)ダイバーシチ, MU-MIMO 送受信協調フ

フィルタリングとブラインド選択マッピング (SLM)) について以下で紹介する (図 10). また, マルチセル環境, マクロセル内に 7 本の分散アンテナを分散配置, 各マクロセル内に 2 本のアンテナを搭載しているユーザ端末 (UE) が 2 台存在し, 各 UE は自マクロセル内の 4 本の分散アンテナを瞬時受信電力規範で選択する場合について, 下りリンク容量を計算機シミュレーションにより求めた結果を図 11 に, PAPR 低減効果を図 12 に示す.

4.3. STBC ダイバーシチ

Alamouti 符号化 [22] に代表される時空間符号化 (STBC) ダイバーシチを用いることを考えている. 下りリンクに STBC と送信 FDE を, 上りリンクに STBC と受信 FDE を用いれば, UE に搭載するアンテナ本数を 6 本までに抑え, 任意の本数の分散アンテナ (DA) をネットワーク側に用いて, DA 本数 \times UE アンテナ本数に等しい次数の空間ダイバーシチ利得を得ることができる [23]. 送信/受信 FDE ではチャンネル情報が必要であり, 高速移動環境ではチャンネル推定精度が低下してしまう. 筆者らの研究グループは最近, STBC 符号語内のチャンネルの周波数変動を考慮して, MMSE 規範に基づいて複数の FDE 重みを同時決定する, 高速移動環境に強い受信 FDE を提案した [24]. 分散アンテナを用いる STBC ダイバーシチは, 7 本のアンテナを集中配置した従来のマクロセルに比べて低ビットレートに落ち込んでしまうアウテージ確率を大幅に低減できる (図 11). 利用する分散アンテナの選択および UE スケジューリングなどが今後の検討課題である.

4.4. MU-MIMO 送受信協調フィルタリング

MU-MIMO 伝送では, 同時通信する UE 間で発生するユーザ間干渉 (IUI) と UE 内のアンテナ間で発生するアンテナ間干渉 (IAI) の抑圧に加え, 周波数選択性フェージングに起因する符号間干渉 (ISI) の同時抑圧が必要である. IUI/IAI/ISI の同時抑圧を狙った周波数領域ブロック最尤検出 [25] や特異値分解 (SVD) を用いる固有モード伝送 [26] などが検討されてきた. 筆者らの研究グループは, ブロック対角化 (BD) した後に SVD を適用する BD-SVD と BD を用いずに SVD を適用する MMSE-SVD と呼ぶ送受信協調フィルタリングを提案した [27], [28]. 分散アンテナを用いる送受信協調フィルタリングは, 高いデータレートを達成できる確率を 7 本のアンテナを集中配置した従来のマクロセルに比べて向上できる (図 11). 強く干渉し合う端末群とその近傍の分散アンテナ群とをマクロセル境界を越えてグルーピングする動的グルーピングと高精度チャンネル推定などが今後の課題である.

4.5. ブラインド SLM

分散アンテナ協調信号伝送を行うと, 送信信号波形のピークが増加する. したがって, 短距離通信になっても依然として, バッテリー駆動無線端末の増幅器電力消費の削減は重要課題である. そこで, 面的スペクトル利用効率の向上と共に, 無線エネルギー利用効率向上の観点から分散アンテナ協調信号伝送時の PAPR の低減が必要になる. 送信信号に位相回転系列を時間領域又は周波数領域で乗算する SLM を適用することで, 送信信号波形のピークを抑圧できる [29-30]. 筆者らの研究グループは最近, 位相回転系列を表すサイド情報を不要とするブラインド位相回転系列推定 & データ検出 (ブラインド SLM) を提案した [30]. ブラインド SLM は, 送受信機間で位相回転系列情報の共有が不

要であることから, サイド情報伝送に起因するスペクトル効率の低下を招かないという利点を有している. ブラインド SLM は, サイド情報有のときからの伝送特性のわずかな劣化に抑えつつ, 送信信号の PAPR を約 3dB 低減 (ロールオフファクタ 0 の送信フィルタを用いる SC 伝送に比べ) できる (図 12). ブラインド SLM の演算量低減が今後の課題である.

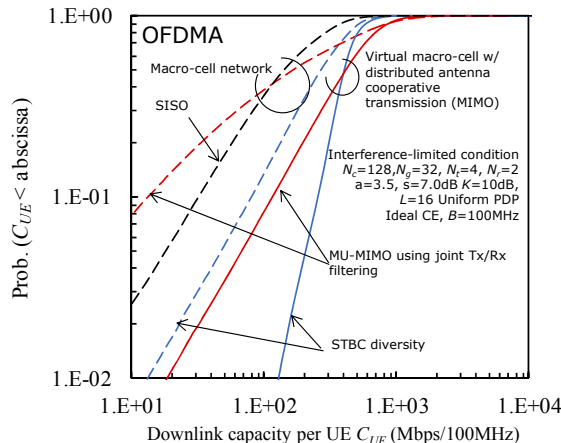


図 11 分散アンテナ協調信号伝送特性

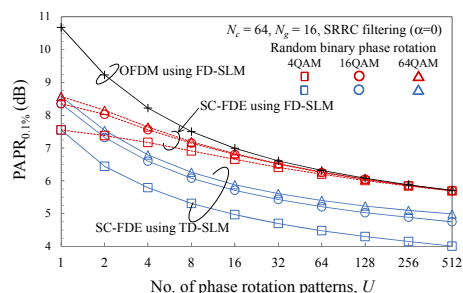


図 12 ブラインド SLM による送信信号波形ピークの抑圧

5. むすび

移動無線通信は, およそ 35 年をかけて第 1 世代から第 4 世代 LTE-A へと発展し, 現代社会を大きく変えてきた. 第 5 世代の登場が期待されている 2020 年のモバイルデータ通信トラフィックは, 動画系を中心にした広帯域データ通信の広がりによって 2010 年の 1000 倍近くにも達すると予測されている. 面的スペクトルおよびエネルギー利用効率をより一層向上できる第 5 世代ネットワークの実現が望まれる. 第 5 世代システムの実現に有望なアプローチは, 分散アンテナ通信技術による仮想マクロセルではないだろうか.

本稿では, これまでの移動無線通信技術の発展の歴史を振り返り, 面的スペクトルおよびエネルギー利用効率の同時向上を狙える小セルネットワークへの期待を述べた. 次いで, 分散アンテナを利用した分散アンテナ協調信号伝送について述べた.

移動無線通信技術の目標は, 無線帯域幅と送信電力の制約のもとで, ある程度の同一周波干渉を許容して, できるだけ高速のデータ通信を実現することであり, 今後またゆまぬ挑戦が求められている. 第 5 世代ネットワーク実現の鍵は空間次元の高度利用であり, 分散アンテナが無線資源の一つになる. 限られた周波数, 時間, 信号電力およびアンテナ資源を膨大な数の無線端末で共有するスケジューリ

ングが重要な技術課題になる。

文 献

- [1] D. Astély, et al., "LTE: The evolution of mobile broadband," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 47, No. 4, pp. 44-51, April 2009.
- [2] NTTDOCOMO 技術ジャーナル, Vol.23, No.2, July 2015. および W.C. Jakes, Jr. (Ed.), *Microwave Mobile Communications*, Wiley, New York, 1974.
- [3] F. Adachi, M. Sawahashi and H. Suda : "Wideband DS-CDMA for next generation mobile communications systems," *IEEE Commun. Mag.*, Vol.36, No.9, pp.56-69, Sep. 1998.
- [4] C.-X. Wang, et al., "Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 52, Issue 2, pp. 122-130, Feb. 2014.
- [5] 平成 27 年度における電波資源拡大のための研究開発 http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000169.html.
- [6] 安達文幸, "セルラー通信技術の歴史と将来展望," [招待講演] 信学技報, Vol. RCS2013-157, pp.85-90, Oct. 2013.
- [7] K. Araki : "Fundamental problems of nationwide mobile radio-telephone system," *NTT Rev. Elec. Comm. Lab.*, Vol.16, pp.357-373, May/Jun. 1968.
- [8] R. H. Frenkiel : "A high-capacity mobile radiotelephone system model using a coordinated small-zone approach," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol.19, No.2, pp.173-177, May 1970.
- [9] H. G. Myung, J. Lim, and D. J. Goodman, "Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Vol. 1, No. 3, pp. 30-38, Sep. 2006.
- [10] D. Falconer, S. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar, and B. Eidson, "Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 4, pp. 58-66, April, 2002.
- [11] F. Adachi, T. Sao, and T. Itagaki, "Performance of multicode DS-CDMA using frequency domain equalization in a frequency selective fading channel," *IEE Electronics Letters*, vol. 39, No.2, pp. 239-241, Jan. 2003. および F. Adachi, Kazuki Takeda, and H. Tomeba, "Introduction of frequency-domain signal processing to broadband single-carrier transmissions in a wireless channel," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E92-B, No.09, pp.2789-2808, Sep. 2009.
- [12] M. Sawahashi, et al., "Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced [coordinated and distributed MIMO]," *IEEE Wireless Commun.*, Vol. 17, Issue 3, pp.26-34, June 2010.
- [13] F. Adachi, "Wireless optical convergence enables spectrum-energy efficient wireless networks," *Proc. 2014 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) and the 2014 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP)*, pp. 3 - 8, Sapporo, Japan, 20-23 Oct. 2014. Doi:10.1109/MWP.2014.6994475.
- [14] H. Ishii, Y. Kishiyama, H. Takahashi, "A novel architecture for LTE-B: C-plane/U-plane split and Phantom Cell concept," *Proc. 2012 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 624 - 630, Anaheim, California. 3-7 Dec. 2012.
- [15] T. Nakamura, et al., "Trends in Small Cell Enhancements in LTE Advanced," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 98-105, Feb. 2013.
- [16] 安達文幸, "スペクトルおよびエネルギー効率に優れた移動無線ネットワークの構築に向けた挑戦," [特別招待講演] 信学技報, Vol. 115, No. 123, CS2015-19, p. 55, 2015 年 7 月
- [17] NTTドコモ: "ドコモ 5G ホワイトペーパー: 2020 年以降の 5G 無線アクセスにおける要求条件と技術コンセプト," Sep. 2014 (https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_5g/).
- [18] F. Adachi, K. Takeda, T. Obara, T. Yamamoto, and H. Matsuda, "Recent advances in single-carrier frequency-domain equalization and distributed antenna network," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E93-A, No.11, pp.2201-2211, Nov. 2010.
- [19] F. Adachi, K. Takeda, T. Yamamoto, R. Matsukawa, and S. Kumagai, "Recent advances in dingle-carrier distributed antenna network," *Wireless Commun. and Mobile Computing*, Volume 11, Issue 12, pp. 1551-1563, Dec. 2011, doi: 10.1002/wcm.1212.
- [20] F. Adachi, W. Peng, T. Obara, T. Yamamoto, R. Matsukawa and M. Nakada, "Distributed antenna network for gigabit wireless access," *International Journal of Electronics and Communications (AEUE)*, Vol. 66, Issue 6, pp.605-612, 2012.
- [21] F. Adachi, A. Mehdodniya, R. Sugai, and R. Yoneya, "Decentralized radio resource management for dense heterogeneous networks," *Proc. 2015 IEEE 12nd Vehicular Technology Society Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS2015)*, Singapore, 21-23 Aug. 2015.
- [22] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 16, No. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [23] R. Matsukawa, T. Obara, K. Takeda, and F. Adachi, "Downlink throughput performance of distributed antenna network using transmit/receive diversity," *Proc. 2011 IEEE 74th Veh. Technol. Conf. (VTC2011-Fall)*, San Francisco, United States, 5-8 Sep. 2011.
- [24] H. Miyazaki and F. Adachi, "Robust frequency-domain equalization against doubly selective fading for single-carrier STBC time-division duplex transmission," *Proc. the 10th International Wireless Communication and Mobile Computing Conference (IWCMC2014)*, Nicosia, Cyprus, 4-8 Aug. 2014
- [25] T. Yamamoto, K. Takeda, and F. Adachi, "Training sequence-aided QRM-MLD block signal detection for single-carrier MIMO spatial multiplexing," *Proc. Int. Conf. on Commun. (ICC 2011)*, Kyoto, Japan, 5-9 June 2011.
- [26] K. Ozaki, A. Nakajima, and F. Adachi, "Frequency-domain eigenbeam-SDM and equalization for single-carrier transmissions," *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E91-B, No.5, pp.1521-1530, May, 2008.
- [27] 熊谷, 安達, "下りリンクシングルキャリア MU-MIMO のための送受信協調 MMSE フィルタリング," 信学技報, RCS2015-176, pp.101-106, 2015 年 10 月.
- [28] S. Kumagai and F. Adachi, "Joint Tx/Rx MMSE filtering for single-carrier MU-MIMO uplink," *Proc. 2015 IEEE 12nd Vehicular Technology Society Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS 2015)*, Singapore, 19-21 Aug. 2015.
- [29] A. Boonkajay and F. Adachi, "Low-PAPR joint transmit/received SC-FDE transmission using time-domain selected mapping," *Proc. Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2014)*, Pattaya, Thailand, 1-3 Oct. 2014.
- [30] A. Boonkajay and F. Adachi, "A blind selected mapping technique for low-PAPR single-carrier signal transmission," to be presented at *Int. Conf. Info. Commun. and Signal Proc. (ICICS 2015)*, Singapore, 2-4 Dec. 2015.