

# AV&ICTソリューションを支える第5世代移動通信システム

5th-Generation Mobile Communication Systems empowering AV&ICT Solutions

岡坂昌蔵  
Shozo Okasaka

山本哲矢  
Tetsuya Yamamoto

齋藤昭裕  
Akihiro Saito

星野正幸  
Masayuki Hoshino

外山隆行  
Takayuki Sotoyama

中尾正悟  
Seigo Nakao

## 要 旨

2020年以降の導入を目指す第5世代移動通信システム（5G：5th-Generation Mobile Communication Systems）の検討が国内外で盛り上がりを見せている。第5世代移動通信システムは、信頼性、高速性、大容量性、低遅延性、低消費電力などの数値でIMT-Advancedを越える大きな目標を掲げる一方で、一度に全ての要件を網羅せず無線利用用途に応じて好みの無線アクセス方式としてアレンジできることを目指そうとしている。当社ではこのような柔軟な無線システムが高度化するスマート社会を実現するうえで重要な基盤であると位置づけ開発を進めている。本稿では、このような5Gの多様性を収容できるヘテロジニアスネットワークの構成技術、および、重要な用途の1つであるIoT（Internet of Things）を効率的に実現するためのMTC（Machine Type Communication）カバレッジ拡張技術について説明する。

## Abstract

5th-generation mobile communication systems (5G) to be commercialized in 2020 and beyond have been attracting more and more attention both in Japan and overseas. The concept development for 5G includes capabilities that go beyond those for IMT-Advanced, e.g., reliability, data rates, capacity per area, user plane latency and energy saving. However it is less cost effective to achieve all those capabilities at the same time, with a single set of system configurations. Therefore one of the major features of 5G to be introduced is configurability of a radio access scheme focusing on particular capabilities that are friendly to targeted use case scenarios. The Company has been working on developing those kinds of flexible radio access technologies, as an important framework to realize a smart society. In this paper, several 5G-related activities are introduced, namely a) key technologies to realize heterogeneous network architecture with the aim of supporting multiple capabilities, and b) coverage enhancement techniques for Machine Type Communication to realize effective deployment for the Internet of Things.

## 1. はじめに

場所を問わずネットワークへの接続を実現するモバイル通信システムは、インターネットおよびクラウド技術を活用したサービス提供のために不可欠な社会基盤である。近年のモバイルブロードバンドを利用したサービスの普及に伴い、モバイル通信におけるデータトラフィックは指数関数的に増加を続けており[1]、将来に向けてシステム容量の拡大が急務となっている。また、今後はあらゆる「モノ」がインターネットを介してつながるIoTの飛躍的な発展が期待されているが、IoTによる接続デバイス数の増加およびサービスの多様化を支えるには、データ伝送容量だけではなく通信エリア（以後、カバレッジと記す）や低遅延性などさまざまな要件について、飛躍的な高度化が求められる。こうした背景を受けて、次世代のモバイル通信システムとして、2020年以降の導入を目指した第5世代移動通信システム（5G）の検討が国内外で開始されている[2]-[4]。

当社では、5Gを将来のAV&ICTソリューション提供のための重要基盤と位置づけ、モバイル通信システムの国際標準化団体である3GPP（3rd Generation Partnership

Project）、RAN WG1（Radio Access Network Working Group 1）およびRAN WG2（Working Group 2）において、無線アクセス・制御技術の開発および標準化活動に取り組んでいる。また、総務省および欧州連合の下で実施されている、日欧合同研究プロジェクトMiWEBA（Millimeter-Wave Evolution for Backhaul and Access）[2]に参画し、5G無線アクセス技術の開発および実証実験を推進している。

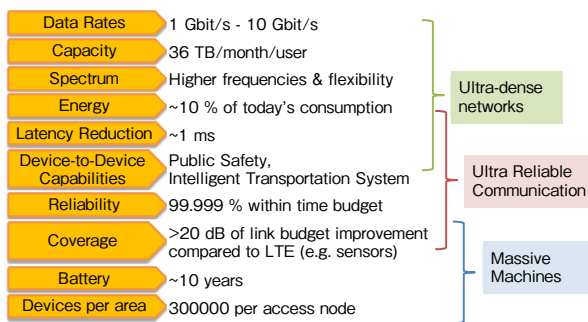
本稿では、5Gの技術要件を解説し、筆者らが5Gに向け開発に取り組んできた技術のうち特に、システム容量の拡大のため多数のスマートセルを一体的に運用するヘテロジニアスネットワーク技術、および、IoT/M2M（Machine to Machine）を対象としてカバレッジを拡張するRepetition技術について述べる。

## 2. 第5世代移動通信システム

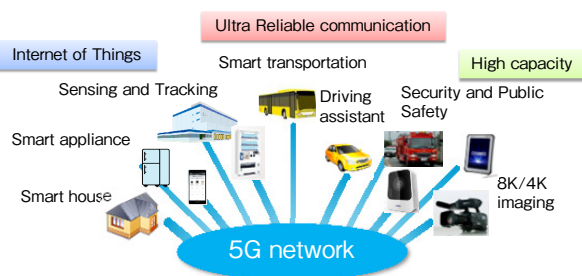
国際電気通信連合（ITU）は、第4世代移動通信システム（4G）であるIMT-Advancedに準拠する無線アクセス技術として、3GPPにより標準化されたLTE（Long Term Evolution）の後継規格であるLTE-Advancedを2010年に承

認した。LTEは2009年から、LTE-Advancedについては2013年からそれぞれ現在までに世界各国で商用モバイル通信サービスが開始されている。一方、モバイル通信におけるトラフィック量は近年指数関数的に増加を続けており、今後10年で500~1000倍に増加するとも予測されている[1][3]。さらに、モバイル通信の活用はスマートフォンなどの情報端末だけではなく、車、住宅、家電、センサなどあらゆる分野へと広がるのが想定され、モバイル通信の大幅な性能および機能の向上が不可欠である。

そこで、2020年以降の導入を目指す5Gでは、4Gに対しシステム容量を大幅に拡大するのと合わせ、第1図の例にある5G向けに検討されている要件を、第2図に示す多様なユースケースに柔軟にひも付けることが求められる。



第1図 5Gの要求条件[4]  
Fig. 1 5G requirements[4]



第2図 5Gを活用するユースケース  
Fig. 2 5G usage scenarios

5Gではシステム容量拡大のため、従来セルラー向けに利用されてきた主に700 MHz~3.5 GHz帯などの周波数帯に加えて、広帯域が確保可能な6 GHz以上の高周波数帯が活用される見込みであり[3]、その一部では周波数が共用利用されることで帯域が解放され利用が促進されることも期待されている。また、5Gは単独の無線アクセス技術で全ての要件を満たすものではなく、IMT-Advanced無線アクセス技術との後方互換性を保ちつつ継続的に発展させた無線アクセス技術と、IMT-Advancedとは必ずしも後方互換性をもたない新しい無線アクセス技術との連

携によって実現されると考えられている[3]。

当社では、5GをAV&ICTソリューション提供のための重要な無線インフラとして注目し、技術開発に取り組んでいる。ユースケースごとに異なる複数の要件に対し、周波数帯、セル半径または無線アクセスの異なる複数のセルを連携させるヘテロジニアネットワーク (HetNet: Heterogeneous Networks) を構築することによって、柔軟に対応することを考えている。本稿では、第3章にて、筆者らが5Gに向けて開発に取り組んでいる技術のうち、マクロセルの下層に大容量のsmallセルを高密度に配置して一体運用するHetNet技術について説明する。続く第4章で、IoTの要件に応じるべく、セルのカバレッジを拡大し多くのセンシングデバイスなどのM2Mデバイスの収容を可能にするとともに、M2Mデバイスの消費電力を削減する、MTCカバレッジ拡張技術について説明する。

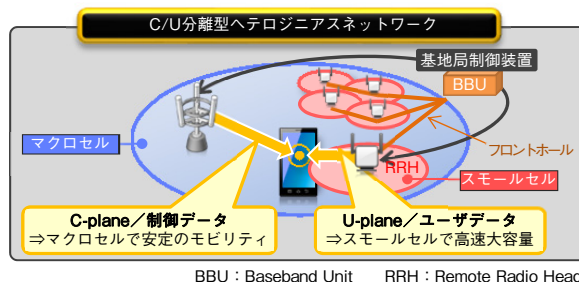
### 3. ヘテロジニアネットワーク

#### 3.1 ヘテロジニアネットワークの概要

4Gに対し大幅な高速大容量化を実現するため、5Gでは次に示す複数のアプローチを併用する。

- ・単位周波数あたりの伝送可能ビット数の増大
- ・利用周波数帯域幅の拡張
- ・高密度セル配置による周波数再利用距離の短縮

エリアあたりのトラフィック需要は場所により異なるため、全てのエリアで一様にセルを高密度化するのではなく、基本的なカバレッジはマクロセルで提供し、トラフィック需要の高い場所にセル半径の小さいsmallセルを重畳して配置するHetNetが有効である。smallセルを高密度に配置すれば、周波数再利用距離の短縮により面積あたりのトラフィック容量は増加するが、移動ユーザーにとってはsmallセル間遷移に起因するハンドオーバーの頻発が課題となり得る。そこで当社では第3図に示すように、マクロセルが基本的なカバレッジを提供してモビリティなどの制御データ (Control-plane) を



第3図 C/U分離型ヘテロジニアネットワーク  
Fig. 3 C/U-split heterogeneous networks

伝送し、スモールセルが高速にユーザデータ (User-plane) を伝送することで、ユーザモビリティと大容量通信を両立する、いわゆるC/U分離型HetNetに着目して技術開発を行ってきた[5].

### 3.2 C-RANフロントホール

スモールセルを高密度に配置するには多数の基地局が必要となり、設置運用コストの増大を招く。そこで、基地局の機能のうち伝送制御やベースバンド信号処理を行うBBU (Baseband Unit) を集約し、アンテナおよび高周波信号処理を行うRRH (Remote Radio Head) を分散配置するC-RAN (Centralized Radio Access Network) 型のアーキテクチャが活用されている。C-RANでは機能集約によるコスト低減が期待できるだけでなく、BBUで無線リソースを集中的に管理できるため、C/U分離HetNetやスモールセル間の干渉制御、不感知対策などが容易となる。

一方、BBUとRRHとを接続するフロントホールでは、ベースバンド信号波形をデジタル化したI/Qデータを伝送するため、大容量の伝送帯域が必要となる。例えば光ファイバフロントホール規格であるCPRI (Common Public Radio Interface) に基づいてLTEの10 MHz帯域幅×2アンテナ分のI/Qデータを伝送する場合には、1.23 Gbit/sが所要伝送レートとなる。無線伝送容量の拡大のため周波数帯幅や送受信アンテナ数、設置セル数を増やしてゆくと所要伝送レートは線形に増加し、光ファイバ敷設数増加などのコスト増加要因となる。

そこで、CPRIを基に策定されたORI (Open Radio Equipment Interface) において、I/Qデータを圧縮することでフロントホールの所要帯域を削減する技術が標準化された[7]。当社では、このI/Qデータ圧縮技術を実装し、圧縮パラメータの最適化および性能評価を行った。

### 3.3 フロントホールI/Qデータ圧縮技術

ORIにおけるI/Qデータ圧縮の要求条件を次に示す[6].

- ・ 圧縮によるEVM (Error Vector Magnitude) 劣化が3%以下であること
- ・ 少なくとも50%までデータを圧縮すること
- ・ 圧縮および伸張過程による処理遅延が100  $\mu$ s未満であること (I/QデータがLTE信号の場合)

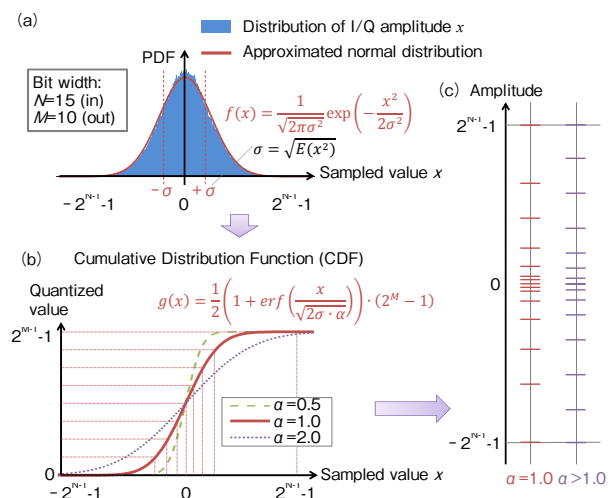
上述の要求条件を満足するため、ORIではLTE信号の特徴を生かした2段階の圧縮過程を規定している。

まず第1段階として3/4ダウンサンプリングを行うことにより、ビットレートを元の3/4に削減する。例えばLTEシステム帯域幅が10 MHzの場合、I/Qデータのサンプリングレートは15.36 MHzであるが、これを3/4の11.52 MHzにダウンサンプルする。これにより高周波成分が失われ

るが、システム帯域幅が10 MHzの場合の伝送信号帯域幅は9.02 MHzであるため、サンプリングレート変換フィルタを適切に設計することで無線伝送に必要な信号成分を維持することができる。

続いて第2段階として量子化ビット数を15 bitから10 bitへと2/3に削減する再量子化により、第1段階と併せてデータ量を50%に圧縮する。量子化ビット数の削減においては、第4図に示すようにLTE信号の振幅分布が正規分布関数 $f(x)$ で近似可能であることに着目し、正規分布の累積分布関数 $g(x)$ を用いた非線形量子化を適用する[7]。すなわち、生起確率の低い振幅における量子化誤差は大きくなるものの、生起確率の高い振幅における量子化誤差は小さくなるよう量子化することで、EVM劣化を抑える。累積分布関数 $g(x)$ の広がりやを規定する標準偏差 $\sigma$ については、無線リソースの割り当て状況および伝搬環境によって時変動するため、圧縮過程に入力されるI/Qデータに応じた調整が必要となる。

ここで、入力されるI/Qデータの標準偏差 $\sigma$ を直接 $g(x)$ の規定に用いると(すなわち、第4図の $g(x)$ において $a=1.0$ とすると)、I/Qデータの値域のうち振幅が大きい領域での量子化誤差が過大となり、EVM劣化を引き起こす。そこで筆者らは、I/Qデータから観測される標準偏差に補正係数 $a$ をかけた値を、 $g(x)$ を定める $\sigma$ として用いる方式を考案し、生起確率の高い振幅領域の量子化誤差を十分に小さくしつつ、生起確率の低い振幅領域の量子化誤差が過大とならないよう $a$ を最適化することによってEVM劣化を抑えられることを明らかにした[8]。具体的には、LTE信号では補正係数 $a=1.6$ 付近を設定し量子化誤差の最大値を $a=1.0$ の場合より小さくすることで、平均のEVMを $a=1.0$ の場合より小さくできることを確認した。



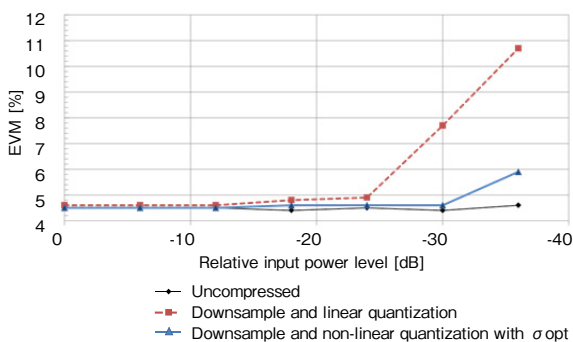
第4図 非線形量子化パラメータの導出過程 [8]

Fig. 4 Optimizing process of non-linear quantizer [8]

### 3.4 LTE C-RAN実験基地局を用いた性能評価

前述したI/Qデータ圧縮技術を実験基地局に実装し、LTEのUplink変調信号を入力して性能を評価した。キャリア周波数は3.315 GHz、システム帯域幅は10 MHzを用いた。圧縮伸張過程による処理遅延を測定したところ、要求条件を満足する0.41  $\mu$ sであった。次に、伝搬路変動などに伴う信号電力変動への耐性を確認するため、I/Qデータの平均電力レベルを基準値 (0 dB) から-36 dBまで変化させてEVMを評価した。評価結果を第5図に示す。なお、3.3節で述べた非線形量子化の効果を確認するため、次に示す3通りについて評価した。

- ・ 非圧縮 (I/Qデータ圧縮技術の適用無し)
  - ・ 3/4ダウンサンプリングと15-to-10 bits線形量子化
  - ・ 3/4ダウンサンプリングと15-to-10 bits非線形量子化
- 電力レベルを基準の-30 dBに下げると、線形量子化を用いた場合は非圧縮に対し3.3 %のEVM劣化が生じるが、非線形量子化を用いた場合は0.2 %のEVM劣化にとどまり、圧縮対象のI/Qデータの電力レベルが変動により低くなった場合においても要求条件を満足することを確認した。なお、本節ではLTEの10 MHzシステム帯域幅での評価を行ったが、本技術は10 MHz以上の広帯域の信号に対しても同様に適用可能である。



第5図 I/Qデータ圧縮の評価結果

Fig. 5 Evaluation result of I/Q data compression

## 4. MTCカバレッジ拡張

前述した5Gの要件条件でも示すように、5GではM2Mなど新たなユースケースに対応した要件が求められる。ユーザーが移動しながら利用することが多いハンドセット端末と異なり、スマートメータなどほとんど移動のない端末ではカバレッジの確保がサービス提供のうえで絶対に必要な条件となる。また、センサ端末では、消費電力の削減による長寿命化の実現や低コスト化が必要である。

3GPPでは、LTE-AdvancedのRelease 13 (Rel.13) 規格において、MTCと呼ぶM2M向けのセルラネットワーク

高度化の標準化が行われており[9]、低コスト化、消費電力削減およびカバレッジ拡張を要求条件として仕様検討を進めている。当社は、MTC向け技術開発を行い、その規格化に貢献している。本章では、要求条件の1つであるカバレッジ拡張のための技術について述べる。

Rel.13 MTCでは、同一の信号を複数回に渡って繰り返し送信し、受信側でそれらを合成することで、受信信号電力を向上し、カバレッジを拡張するRepetitionを検討している。さらに、カバレッジ拡張の必要なMTC端末はほとんど移動がなく、チャンネル変動のない環境を想定していることに着目したチャンネル推定精度向上技術、およびMTC端末が低コスト化実現のため1.4 MHzの周波数帯域幅しかサポートしないことから端末が送信する1.4 MHzの周波数帯域をシステム帯域内で一定サブフレームごとにホッピングさせる周波数ホッピングが導入される[10]。さらに筆者らは、Repetitionに加えて、符号拡散および符号多重を適用することにより、カバレッジ拡張と周波数利用効率の改善を同時に実現する手法を開発した[11]。周波数利用効率の改善は、5Gの要求条件にある同時接続端末数の増加に寄与できる。

本章では、4.1節において、Repetition、チャンネル推定精度向上技術および周波数ホッピング技術について概説する。4.2節で、符号拡散および符号多重技術を説明し、4.3節でシミュレーションによりその効果を検証する。

### 4.1 MTCカバレッジ拡張技術

本節で述べるMTCカバレッジ拡張技術は、基本的にはLTEの各チャンネルへの適用が可能であるが、上りリンク共有チャンネル (PUSCH: Physical Uplink Shared Channel) を例に説明する。PUSCHは、サブフレームと呼ばれる時間単位で各端末に無線リソースが割り当てられる。Repetitionでは、端末は連続した $N_{Rep}$ サブフレームにおいて同一の信号を送信する。基地局では、 $N_{Rep}$ サブフレーム分の受信信号を合成することで受信信号電力を向上できる。このとき、復調前の受信信号を同相合成することで、基地局が端末からのデータ信号を復調するために用いる参照信号の受信信号電力も改善できる。カバレッジ拡張の必要なMTC端末はほとんど移動がなく、チャンネル変動の少ない環境を想定しているため、チャンネル推定精度の向上が期待できる。また、サブフレームごとに復調処理を行う必要がないため、受信処理を簡易にできる。しかしながら、チャンネル変動はほとんどなくとも、端末と基地局間の周波数差の影響があるため、Repetition回数が多い場合、 $N_{Rep}$ サブフレーム分の受信信号を同相合成することは困難である。そこで、チャンネル推定精度の向上効果が十分に得られる $X$  ( $X \leq N_{Rep}$ ) サブフレームごと



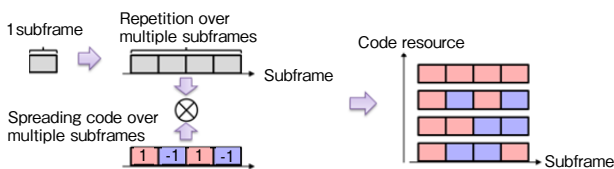
に復調前の受信信号を同相合成し、復調後に $N_{Rep}/X$ 個の受信信号を合成する。

周波数ホッピングは、一定時間ごとに信号を送信する周波数リソースを変更する送信方法であり、周波数領域でチャネル変動がある場合、周波数ダイバーシチ利得が得られる。Rel.13 MTCがサポートする1.4 MHzの内の周波数ホッピングでは、十分な周波数ダイバーシチ利得の獲得は期待できない。そのため、端末が送受信する1.4 MHzの周波数帯域をシステム帯域（例えば20 MHz）内で一定サブフレーム（Yサブフレーム）ごとにホッピングさせる。このとき、上述した同相合成のためのXサブフレーム中は同一リソースで送信する必要がある（ $Y \geq X$ ）。

4.2 符号拡散および符号多重技術

Repetitionでは、同一信号が複数（ $N_{Rep}$ ）サブフレームを占有するため、周波数利用効率が $1/N_{Rep}$ に低下する。今後のIoTによる接続デバイス数の増加を考えると、周波数利用効率低下を軽減することが望ましい。そこで当社は、サブフレーム間符号拡散および符号多重を適用することで周波数利用効率の低下を軽減する手法を開発した。

第6図に示すように、複数サブフレームに渡るRepetition信号に対し、拡散符号系列を複数サブフレームに渡って乗算する。端末ごとに、異なるサブフレーム間拡散符号系列を割り当て、符号多重することで、拡散率SFの符号系列を用いると同一時間周波数リソースに対し最大でSF台の端末を直交多重することができ、周波数利用効率低下の影響を軽減できる。受信側では、符号多重された受信信号に同じ拡散符号系列を乗算する逆拡散を行う。拡散率SF=Xの場合、逆拡散処理は、上述した同相合成とほぼ同じ処理であるため容易に実現できる。また、周波数ホッピング周期の間で符号間の直交性を保つこともでき、前節で述べたカバレッジ拡張技術との相性も良い。



第6図 サブフレーム間符号拡散および符号多重  
Fig. 6 Inter-subframe code spreading and multiplexing

4.3 シミュレーション結果

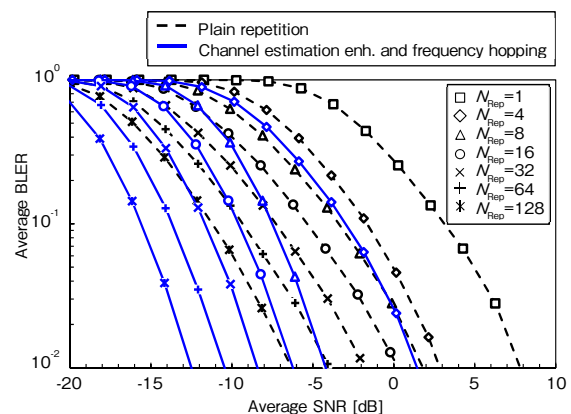
本節では、上述したカバレッジ拡張技術、サブフレーム間符号拡散および符号多重の効果を検証する。

評価に用いたシミュレーションの諸元を第1表に示す。

評価は、 $N_{Rep}$ サブフレームごとにデータ信号ブロックをランダムに発生させて送信し、基地局において、ブロック誤り率（BLER：Block Error Rate）を取得した。PUSCHにチャネル推定精度向上技術、周波数ホッピングを適用した場合の特性を第7図に示す。比較のため、単純にRepetitionのみを適用した場合の特性も示している。ここでは $X=Y=4$ とした。チャネル推定精度向上技術および周波数ホッピングを用いることで、目標BLER=10%を達成する所要SNR（Signal-to-Noise Ratio）を、単純なRepetitionに比べて5 dB~5.5 dB改善できる。Rel.13 MTCでは最大で18 dBのカバレッジ拡張が要求されている。単純なRepetitionの場合、 $N_{Rep}=1$ に比べて、所要SNRを15 dB改善するのに必要なRepetition回数が128以上であるのに対し、チャネル推定の拡張および周波数ホッピングを適用した場合、64程度まで削減できる。

第1表 シミュレーション諸元  
Table 1 Simulation parameters

Parameters	Value
Number of antennas	1x2 with low correlation
Channel model	Extended Pedestrian A (Doppler frequency, $f_D=1$ Hz)
Modulation and Coding Scheme	MCS 5 (QPSK)
Carrier frequency	2 GHz
System bandwidth	10 MHz
Residual frequency offset	20 Hz

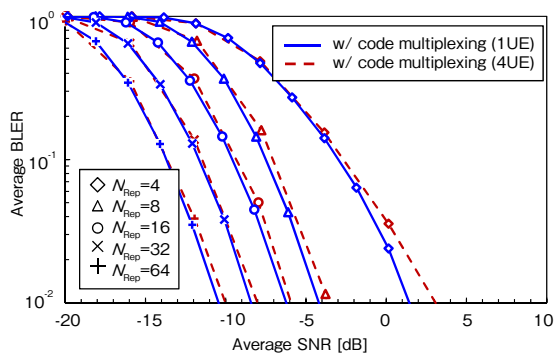


第7図 PUSCH repetitionのBLER特性  
Fig. 7 BLER performance of PUSCH repetition

第8図に、サブフレーム間符号拡散および符号多重を適用した場合のBLER特性を示す。サブフレーム間符号拡散および符号多重により4端末を同一リソースに符号多重したRepetitionは、1端末多重の場合と同等の性能が得られる。従って、カバレッジ拡張の効果を保ちつつ、Repetitionによる周波数利用効率の低下を軽減できる。

なお、第2章で述べたように、5Gは既存の無線アクセ

ス技術であるIMT-Advancedとの後方互換性を維持しながら継続的に発展させる方向と、IMT-Advancedとは必ずしも後方互換性をもたない新しい無線アクセス技術で実現する方向がある。5GのMTCに向けては、どちらもより狭帯域の技術を規定して運用する考え方が検討されている。本節では、LTE-Advancedを高度化してMTCを実現する方向性を想定して方式評価を行ったが、提案手法は、LTE-Advanced規格に限らず5Gにおけるより狭帯域で運用されるMTCでも適用可能である。



第8図 符号多重の適用効果  
Fig. 8 Effect of code multiplexing

## 5. まとめ

5Gの実現に向けて、スモールセルを高密度に配置し集中制御するHetNetを構成するためフロントホール/Qデータ圧縮技術を開発し、実験基地局を用いて性能を確認した。また、IoTを効率的に実現するためのRepetitionによるカバレッジ拡張技術を開発し、計算機シミュレーションによりその効果を明らかにした。

今後は、5Gに向けた技術の開発検証および標準化提案活動を引き続き行い、超信頼性が要求される領域への取り組みなど豊かなスマート社会の実現に向けて特定用途の課題解決にも積極的に取り組んでゆく。

本研究の一部は、総務省の戦略的国際連携型研究開発推進事業である「ミリ波を活用するヘテロジニアスセルラネットワークの研究開発」の一環として行われた。

## 参考文献

- [1] MIC of Japan, "Mobile communication traffic in Japan," Data base of ICT statistics, Dec. 2013.
- [2] MiWEBA project website, <http://www.miweba.eu/>, 参照 23.Oct. 2015.
- [3] ARIB 2020 and Beyond Ad Hoc Group White Paper, "Mobile Communications Systems for 2020 and Beyond," Oct. 2014.

- [4] Afif Osseiran, "Mobile and Wireless Communications system for 2020 and beyond (5G)," ITU-R WP5D workshop on "Research views on IMT beyond 2020", Feb. 2014.
- [5] 中尾正悟 他, "5Gに向けたヘテロジニアスネットワークに関する取組," 信学技報 RCS2014-171, Oct. 2014.
- [6] ETSI, "Open Radio Equipment Interface (ORI): Requirements for Open Radio Equipment Interface (ORI) (Release 4)," Oct. 2014.
- [7] ETSI, "Open Radio Equipment Interface (ORI): interface Specification; Part 1: Low Layers (Release 4)," Oct. 2014.
- [8] 齋藤昭裕 他, "[MiWEBA] ORIフロントホール圧縮方式に関する一検討," 信学総大, B-17-16, Mar. 2015.
- [9] RP-141660, "New WI proposal: Further LTE Physical Layer Enhancements for MTC," Sept. 2014.
- [10] R1-150312, "Discussion and performance evaluation on PUSCH coverage enhancement," Feb. 2015.
- [11] R1-144108, "Multiple subframe code spreading for MTC UEs," Oct. 2014.

## 執筆者紹介



岡坂 昌蔵 Shozo Okasaka  
AVCネットワークス社 技術本部  
R&D Div., AVC Networks Company



山本 哲矢 Tetsuya Yamamoto  
AVCネットワークス社 技術本部  
R&D Div., AVC Networks Company  
博士 (工学)



齋藤 昭裕 Akihiro Saito  
AVCネットワークス社 技術本部  
R&D Div., AVC Networks Company



星野 正幸 Masayuki Hoshino  
AVCネットワークス社 技術本部  
R&D Div., AVC Networks Company  
博士 (工学)



外山 隆行 Takayuki Sotoyama  
AVCネットワークス社 技術本部  
R&D Div., AVC Networks Company



中尾 正悟 Seigo Nakao  
パナソニックR&Dセンターシンガポール  
Panasonic R&D Center Singapore  
博士 (情報学)