

NTT DOCOMO

テクニカル・ジャーナル

T e c h n i c a l J o u r n a l

Vol.26 No.1 | Apr. 2018

DOCOMO Today

- 挑む！5G時代のデバイス

Technology Reports (特集)

5Gの実現に向けた新技術の実証実験

- スマートフォンサイズのNOMA対応チップセットによる周波数利用効率向上の実証実験
- 5G高信頼・低遅延通信(URLLC)の屋外実験
- ミリ波を用いた超高速・長距離伝送の5G屋外実験

Technology Reports

- オペレータ間連携によるGSMA3.1準拠IoT/M2M向けeSIM商用化システムの構築

挑む! 5G時代のデバイス



移動機開発部 部長

ふたかた としゆき
二方 敏之

現在、2020年の第5世代移動通信システム（5G）商用化に向けてドコモは全社一丸となって開発に取り組んでいます。私が所属する移動機開発部でも無線通信の開発に加えて、5G時代のデバイス・サービスはどのようなものになるのか、日夜検討を進めています。

私が移動機開発部に着任してから10年以上経ちます。これまで各世代の無線通信システムにおけるドコモのファースト端末の開発を担当してきました。初めて担当したのはW-CDMA HSDPA方式に対応した、いわゆる携帯電話で、形状は折りたたみ型のハードキーのついているものです。続いて、LTE方式に対応したUSB dongle型のデータ通信端末や、現在主流となっているスマートフォンと呼ばれる大画面のタッチパネルを搭載した端末の開発を行ってきました。その後も無線通信システムの進化に向けて開発を続けておりますが、デバイスの形態としてはしばらく、スマートフォンから大きく変化はありません。5Gでは、どのような形態になっていくのでしょうか？

5Gの特徴としてはよく言われるように、高速・大容量、低遅延、多数端末接続など、現在商用化されている技術のエンハンスメントが多々ありますが、その中でも見逃せないのがUp Link通信の高速化と、モノのインターネット（IoT）向けデバイス接続を想定したネットワークの進化と省電力化ではないかと考えています。

Up Link通信の高速化は、これまで情報を受けることがメインだったデバイスが、動画をはじめとする大容量の情報を発信することに繋がると考えられ、コミュニケーションの在り方も現在と変わってくると期待されています。これはドコモR&Dが掲げる、「あらゆる“つながり”を追求し、新たな未来を創り続ける」にも大きく関わることを考えています。ただし、それに伴い増加する消費

電力への対策、高度化が要求されるアンテナ性能、そしてUX（User Experience）の向上など、デバイス側の課題が多く、端末開発を担う我々がこれまで培った技術やノウハウを活かし、全力で取り組んでいるところです。

また、モノのインターネットと叫ばれて久しいですが、5GはまさにIoTのためにあると言っても過言ではないほど、IoTに適したものとなっています。これまでも通信機能が具備されたモノはさまざまに、かつ数多く世の中に出回っていますが、ネットワーク容量制限、バッテリーライフ、コスト面の課題もあり、ありとあらゆるものというわけにはいかなかったのが実情です。しかし、5Gではそれらの問題点を解決することができ、本格的にIoTが普及することになります。そこでも我々は、これまで携帯電話やスマートフォン開発で培った技術に、日進月歩生み出されるテクノロジーを掛け合わせて、さまざまな利用シーンやニーズに合ったデバイスを開発していきます。

ところで、私がデバイス開発に関与してきたこの10数年間で開発の進め方は大きく変化してきました。もともとドコモは実装面に至る詳細な共通仕様を策定し、ベンダ各社はそれに沿った開発をしていましたが、2010年にサービスを開始したLTE方式を導入したところが、その転換期になっているかと思います。通信モデムは各社独自のものから、主に海外ベンダ開発のプラットフォームが共通的に使われるようになり、端末形態もフィーチャーフォンからスマートフォンになり、差別化領域はハードからソフト、中でもアプリケーションなど上位レイヤにシフトしていきました。ドコモとしての規定も実装仕様から、要求条件などサービス面の内容が変わってきています。この傾向はさらに加速していると考えられ、特に5G時代はこれまでのデバイスの進化とは異なり、現状のスマートフォンやタブレットの延長線上にはない新たなタイプのものが世の中に数多く出てくると考えられますし、我々も自ら生み出そうとしています。端末のプラットフォームについては、かつての国内ベンダに製造を委託する時代から、海外ベンダのそれを活用する時代へ変化してきましたが、今後はデバイス・サービスも国内・海外問わず、業界の枠に囚われない自由な発想で開発をしていく時代が来ると考えています。すなわち、ドコモ中期戦略2020「beyond宣言」の「“ボーダーレスな”パートナーとの価値・協創の時代」の到来だと考えています。

第4次産業革命とも言われるこの機会に、5G導入とともに、国内・海外の多種多様なパートナーの皆様とともに新たな歴史を創るべく、5G時代のデバイス開発を通じて、お客様への新たな価値創造に挑み続けます。

[Contents]



DOCOMO Today

挑む! 5G時代のデバイス 二方 敏之 1



特別寄稿

報酬は面白い仕事をもう一度やる機会 稲村 浩 4

Technology Reports (特集)

5Gの実現に向けた新技術の実証実験

スマートフォンサイズのNOMA対応チップセットによる
周波数利用効率向上の実証実験 06

5G

NOMA

実証実験



(P.16)

5G高信頼・低遅延通信 (URLLC) の屋外実験 16

5G

高信頼・低遅延通信

実証実験



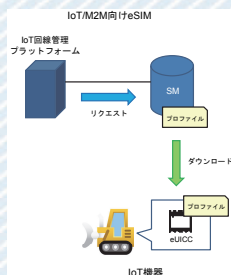
(P.25)

ミリ波を用いた超高速・長距離伝送の5G屋外実験 25

5G

ミリ波

長距離屋外伝送実験



(P.33)



(P.42)

Technology Reports

オペレータ間連携によるGSMA3.1準拠
IoT/M2M向けeSIM商用化システムの構築

33

IoT/M2M

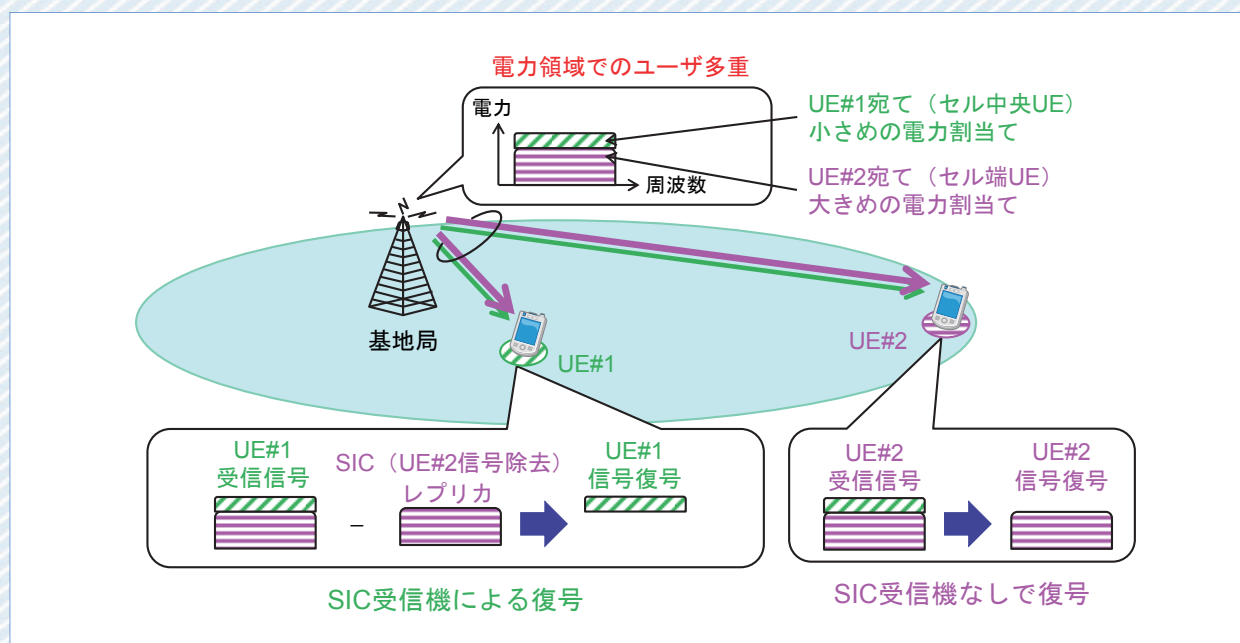
eSIM

SM

News

国際会議：IEEE GLOBECOM 2017「Best Paper Award」受賞

42



Technology Reports (特集) スマートフォンサイズのNOMA対応チップセットによる周波数利用効率向上の実証実験 (P.6)
下りリンクNOMA基本原理

報酬は面白い仕事をもう一度やる機会

公立はこだて未来大学 システム情報科学部 情報アーキテクチャ学科 教授 ^{いなむら}稲村 ^{ひろし}浩さん

旧聞になりますが2013年のComputer Science Education Weekでオバマ大統領が語った「すべての人にプログラミングを学んで欲しい」というビデオメッセージが話題となりました。情報科学という学術分野が米国社会の価値観に組み込まれつつあると感じます。情報技術が社会に浸透していく点で、日本ではドコモを含むICT企業の貢献がある一方で、この分野の人手不足から人材供給の重要性が増しています。

2016年にお世話になったドコモから公立はこだて未来大学に移りました。本学は開学当初からプロジェクト学習（PBL：Project Based Learning）への参加を3年次学生に義務付けており、同じメンバで一年間をかけて何かを作ったり考えたりすることが特色です。4年次の卒業研究では個人としての成果が問われますが、PBLはチームとしての活動とそこで得られる学びが目的です。

PBLには巨大イカロボットの開発維持とか街おこしや文化的体験とかさまざまなプロジェクトがありますが [1]～[3]、私が指導を担当しているプロジェクトはソフトウェア開発を主体としています。昨今は学外を含めてプログラミングスキルを求められる場も多いため、自力でちょっと大きなシステムを構築できる学生もいますが、現実のソフトウェアシステムは例えて言えば向こうの端がどうなっているか判らないくらい巨大です。授業の課題のコードが手のひらサイズだとすれば、両手で抱えるくらいの一段階スケールアップしたソフトウェアを団体戦で構築してもらおうという趣旨です。

PBLでは学生は、学外の企業の方やプロジェクトのOBを含むアドバイザー達から温かい指導を受けて、自主的にさまざまな開発手法を投入してみるものの、ドキュメントはいつもコードの後追いになってしまうことを実体験したり、教員同士も事前に調整などしないので互いに矛盾するコメントを出すことも多々あるため、言われたことを鵜呑みにしてはいけ

ないとか、そういった主体性のありようからリーダーシップを学んでいくことになります。失敗からも学んで糧とできるのが教育機関の良いところだと感じています。

ただ、だいたい毎年なにかしら作り終わるところでプロジェクトが終了するので、指導をしている私としては、自分で作ったものを自分で使うという dog fooding [4] が足りないなあと思ったのですが、何故自分はそう思ったのか？ 教える立場になると時々、自分の知識や経験の棚卸しをしたくなります。曲がりなりにも指導めいたことを始めてから折々に思い返したのは私の米国留学の経験でした。

入社がNTTの通信研究所だった私は、新人としての最初の研究テーマの仕事が終わってしばらくした頃に、当時の上司と慶應大学の徳田英幸先生の紹介で、ピッツバーグにあるカーネギーメロン大学計算機科学部のSatya教授のCodaプロジェクトに訪問研究員として一年間参加させていただくことになりました。Codaプロジェクトは今から思えば研究の進め方を学ぶのと同じくらい、現実的なソフトウェア開発を学ぶのに理想的な環境だったと思います。dog foodingは徹底していて、毎日の生活環境として開発しているプロダクトのベータ版を利用していました。自分達で開発している分散ファイルシステムCoda上に全員がホームディレクトリをもっていて、メールのやりとりや論文書きなどの日常業務をすべてそこで行います。

プロジェクト名称にもなっているCodaはモバイル向けの分散ファイルシステムで、クライアントのラップトップPCとサーバとの間の無線接続が切れても稼動し、回線が復帰すればサーバ上のファイルとの再同期を自動的に行ってくれます。その同期を行う複製制御された3台のメインファイルサーバは、ホスト名がそれぞれRossini, Puccini, Scarlattiとなっていて内輪でthree Italiansと呼ばれていました。出勤しログインして最初のチャットメッセージが



Profile

1990年慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話㈱入社。1998年よりNTTドコモ。2016年より公立はこだて未来大学 教授。博士（工学）。モバイルネットワーク、スマートデバイスのシステムソフトウェアに関する研究開発に従事。情報処理学会、電子情報通信学会、ACM、IEEE会員。

「Rossiniが死んでいる」で始まって、「かの音楽家はとっくの昔に亡くなっている筈だ」、と思わずに、「Italiansはまだ2人いるので今日は大丈夫だ」、と喜ばなければなりません。三重化されたシステムの頑健さに救われたことが何度かありました。

このシステムは約35万行の（better Cとしての）C++で記述されていて、5、6人の博士課程の学生が主体となって開発していました。私も彼らに混ざって、朝から晩まで自分の仕事のためにまとまった量のコードを常に読み書きするような生活を送りました。

それぞれがシステムの担当部分を日常的に変更しているので、システムの向こうの端がどうなっているか本当に判りません。何か知らない建物が建増しされていることもしばしばありました。こういった研究プロジェクトでは、ドキュメントはコードのコメントと論文と著者の頭の中にしかなく、後追いどころかそのまま書かれることもなかったりします。したがって、後から参加した私のようなメンバが全貌を把握するのはなかなか困難で、参加当初の進捗はもっぱらCodaのコードベースの学習に費やされていた記憶があります。

このように長い期間にわたって大きなシステムと格闘して、それなりに複雑なコードを書いて過したのは初めてで当時は大変な思いもしましたが、思えばもう20年以上も昔の話です。リリースエンジニアリングやコードの版管理から、継続的なインテグレーションとかバックアップ作業まで組織化された開発インフラは今となっては常識ですが、大学の研究室が外部にもユーザのついたプロダクトをもって、当時においてこのような開発環境を構築していたことはかなり先進的かつ実際のだったと思います。そこにあってソフトウェアは規模が増すと個人では太刀打ちできなくなる、よって団体戦の技法が必須であろう、といったことを感覚レベルで理解したことが1つの収穫でした。

さて、自分の経験とPBLの学生の活動を並べて思いだしたのが、成功した仕事の報酬は次のおもしろい仕事を最初からもう一度やる機会だ、というトレイシー・キダーの「超マシン誕生」[5]という本にある話です。経験によって人は形作られますが、自分がどう変化するのか知らずにまず始めてみなければなりません。経験を経て次の仕事がおもしろいと思えるようになることでそれに相応しい人になる、このような教化的なプロセスを通じてエンジニアはエンジニアになるのだと思います。面白そうだという噂を聞いて我々が担当しているPBLプロジェクトに参加する学生も、彼らがそこで何を本当に経験するかを前もって知ることはできません。私も留学前に考えていたのとはかなり違いましたが、貴重な経験をさせてもらいました。経験し変化してなお、またやりたいと思える学生が沢山いてくれればと思います。

私の留学も一年経ちピッツバーグの寒さも過ぎて、ようやく動けるようになったところで帰国となりました。Codaに関わってモバイルコンピューティングに興味をもつようになり、それをきっかけに移动通信のドコモに移り、次の新しく興味深い仕事に携わることができたことに感謝しております。

文 献

- [1] 公立はこだて未来大学：“プロジェクト学習。”
https://www.fun.ac.jp/edu_career/project_learning/
- [2] 公立はこだて未来大学：“IKABOの10年と、その先のこと 函館観光振興ロボットIKABOの進化論。”
<https://www.fun.ac.jp/funbox20141225/>
- [3] 公立はこだて未来大学：“北斗市からずーしーほっきー制作チームに感謝状が贈呈されました。”
<https://www.fun.ac.jp/news20140612/>
- [4] Wikipedia：“Eating your own dog food.”
https://en.wikipedia.org/wiki/Eating_your_own_dog_food
- [5] トレイシー・キダー（著）、糸川洋（翻訳）：“超マシン誕生 新訳・新装版。”日経BP社、2010。

スマートフォンサイズのNOMA 対応チップセットによる周波数 利用効率向上の実証実験

先進技術研究所 5G推進室 ベンジャブール アナス きしやま よしひさ おくむら ゆきひこ
岸山 祥久 奥村 幸彦

今後のさらなるユーザ体感品質の向上およびシステム性能改善に向けて、第5世代移動通信システム（5G）の標準化および実証実験が進められている。5Gの要求条件を実現する手段として、新たな周波数帯の開拓に加えて、既存周波数帯の周波数利用効率を向上させることが検討されている。ドコモは、周波数利用効率向上を実現する無線アクセス技術として、複数ユーザの信号を同一周波数を用いて同時に送信するNOMA技術を提案してきた。本稿では、NOMA技術のさらなる高度化をめざし、ドコモとMediaTekが共同で行った屋外実験について概説する。

1. まえがき

移動通信システムにおける無線通信方式は、1980年代に普及した第1世代（1G）のアナログ音声通話サービスからほぼ10年ごとに世代が移り変わり、LTEから現在の第4世代（4G）のLTE-Advancedへと進化してきた。第5世代移動通信システム（5G）では、①モバイルブロードバンドのさらなる高度化（eMBB：enhanced Mobile BroadBand）、②多数同時接続を実現するマシンタイプ通信（mMTC：massive

Machine Type Communications）、③高信頼・低遅延通信（URLLC：Ultra-Reliable and Low-Latency Communications）などさまざまな利用シナリオをサポートすることが要求されている [1] [2]。

国際標準化団体である3GPPでは、利用シナリオの実現に向け、LTE-Advanced無線通信方式の発展と並行してLTE-Advancedとの後方互換性の無い新しい無線通信方式（NR：New Radio）の検討を2016年3月から進めている。NRでは、セルラで用いられている既存の周波数帯からミリ波^{*1}を含む高い

周波数帯までをサポートでき、かつeMBBサービス^{*2}やURLLCサービス^{*3}といった多様なサービスを1つのシステムで実現できることが求められる。また、さらなるユーザ体感品質の向上およびシステム性能改善に向けて、LTE-Advancedの発展技術やNR無線インタフェースを周波数利用効率^{*4}向上に活用する必要がある。そのため、多素子アンテナを用いたMassive MIMO (Multiple Input Multiple Output)^{*5}や非直交多元接続 (NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access) が5Gにおける主要な要素技術として着目されてきた [3] [4]。中でもドコモから提案された新しい多元接続法であるNOMAは、国外のプロジェクトや国際会議においてキートピックとして扱われており、近年高い注目を集めている [5]。3GPPではLTE Release 14 (LTE-Advanced無線インタフェース) においてNOMAの標準仕様化を完了し、MUST (Multi-User Superposition Transmission) と称することとした [6]。なお、今後は新たな無線インタフェースであるNR上でのNOMAの導入に向けて送受信機の拡張・高度化などが期待されている。

これまでドコモは、NOMAの性能を実伝搬環境で確認するため、NOMAを開ループ^{*6} 2×2 SU (Single User) -MIMO^{*7}と組み合わせたときの屋内・屋外実験を行ってきた [7]。また、2015年11月からMediaTek Inc. (以下、MediaTek) と協力し、NOMAのさらなる高度化に向けた共同実験を開始した [8]。共同実験の目的として、NOMAを開ループ4×2 SU-MIMOと組み合わせるためのチップセットを開発し、MUSTと比較して無線インタフェース (フィードバック情報およびシグナリング情報など) および受信機の拡張・高度化により周波数利用効率の向上を図る。本共同実験では、NOMA対応チップセットを搭載したスマートフォンサイズの端末を開発し、NOMAを開ループ4×2 SU-MIMOと組み合

わせたときの性能を実伝搬環境において実証した。本稿では、2017年8～10月までにドコモとMediaTekが台湾・新竹市において共同で行った屋外実験結果について概説する。

2. 下りリンクNOMA技術

これまでの無線通信方式における多元接続法は、1GではFDMA (Frequency Division Multiple Access)^{*8}、2GではTDMA (Time Division Multiple Access)^{*9}、3GではCDMA (Code Division Multiple Access)^{*10}と進化してきた。4Gはさらにサブキャリア^{*11}間の直交性を利用したOFDMA (Orthogonal FDMA)^{*12}が用いられている。これに対し、NOMAは、下りリンクに適用する場合はセル内の複数のユーザ端末 (UE: User Equipment) への信号を基地局側で同一の無線リソース上に多重し、同時に送信する多元接続法である。これにより、さらなる周波数利用効率の向上が期待できる [9]。NOMAでは電力軸方向で複数ユーザ信号を意図的に非直交で多重させる。下りリンクNOMAの基本原則を図1に示す。

下りリンクを対象にセル内に存圏するUEのうち、基地局に近く受信品質の良いセル中央のUE (図1のUE #1) とセル端付近の受信品質の悪いUE (図1のUE #2) をペアとして選択し、それらに向けて同じ時刻の同じ周波数リソースを使って多重したものを基地局から送信する。ここで、UE #2宛ての信号に対しては、より多くの電力を割り当てるのに対し、UE #1宛ての信号には少ない電力を割り当てる。

受信側に着目すると、基地局に近いUE #1にはUE #1宛てとUE #2宛ての信号が多重されて届くためユーザ間干渉が生じるが、2つの受信信号の間に一定の電力差があれば簡易な干渉除去処理により信

^{*2} eMBBサービス: モバイルブロードバンドの拡張 (超高速・大容量化) を要求するサービス。

^{*3} URLLCサービス: 高信頼通信および低遅延通信を同時に要求するサービス。

^{*4} 周波数利用効率: 単位周波数当りに送信可能な最大情報量。単位はbps/Hz。

^{*5} Massive MIMO: 超多素子のアンテナを利用する大規模MIMOのこと。高い周波数帯ではアンテナ素子サイズを小さくすることができ、5Gでの実用化が期待されている。なお、MIMOとは、同一時間、同一周波数において複数の送受信アン

テナを用いて信号の伝送を行い、通信品質および周波数利用効率の向上を実現する信号伝送技術。

^{*6} 開ループ: 受信機からのフィードバック情報を送信機が用いない場合のこと。なお、閉ループは、受信機からのフィードバック情報を送信機が用いる場合のこと。

^{*7} SU-MIMO: 1ユーザを対象に基地局および端末間で複数のアンテナで複数の信号を送り、多重化して送信する技術。

^{*8} FDMA: 同一の無線アクセスシステム帯域内において、複数のユーザの信号を送信する際に互いに異なる周波数を用いて送信すること。

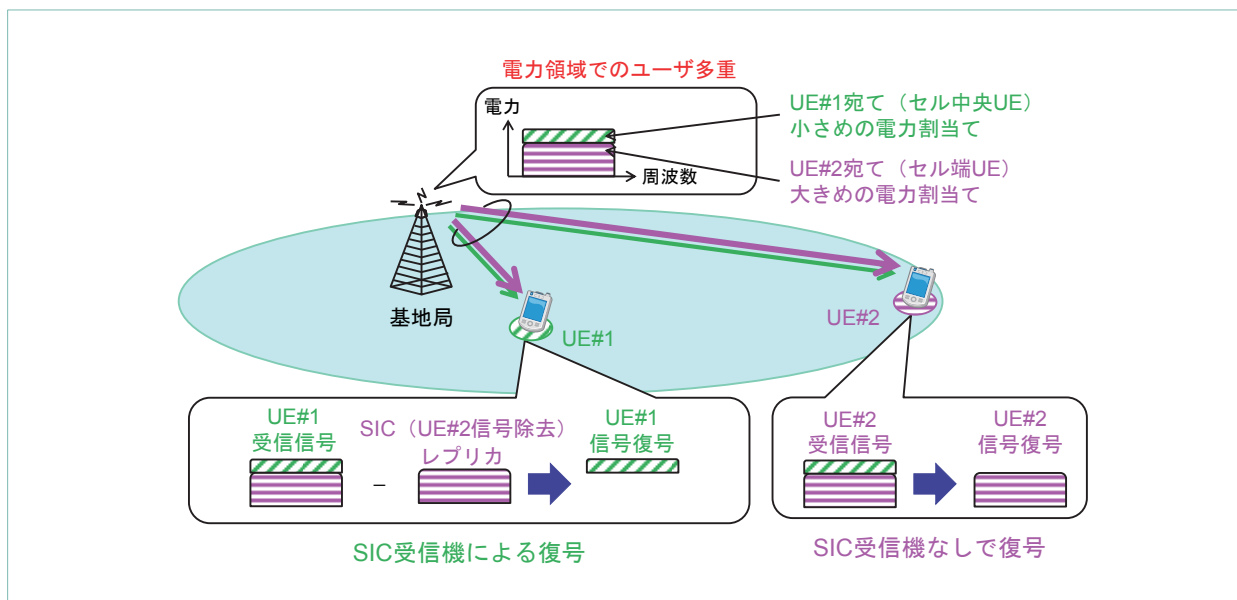


図1 下りリンクNOMA基本原理

号分離が可能となる。

この場合のUE#1とUE#2の受信側の処理を以下に解説する。

(1)UE#1の処理

基地局に近いUE#1は、干渉となる受信電力の強いUE#2宛ての信号のみをまず復号し、この復号した信号を用いてUE#2の信号の複製（レプリカ^{*13}）を作成し、受信信号から減算を行うことでUE#1宛ての信号を分離、復号することが可能となる。このような信号分離処理は逐次干渉キャンセル（SIC：Successive Interference Cancellation）^{*14}と呼ばれている。なお、SICにはシンボル^{*15}単位で行うものとコードワード^{*16}単位で行うもの（CWIC（Codeword level SIC）^{*17}）の2種類がある。シンボル単位で行う場合は、UE#2の干渉信号を除去するにあたり、干渉信号シンボル（UE#2）を復調し、復号を行わずに再度変調することでUE#2からの干渉信号シンボルのレプリカを生成し、受信信号から減算する。

CWICの場合は、UE#2の干渉信号を除去するにあたり、干渉信号シンボル（UE#2）を復調、復号して得られるビット系列^{*18}を再度ターボ符号化^{*19}、変調することでUE#2からの干渉信号のレプリカを生成し、受信信号から減算する。

このようなSIC信号分離処理は3Gから検討されてきたが、端末側で高度な処理能力が要求されるため実現が難しかった。しかしながら、昨今の端末性能の急速な向上に伴い、実用化が期待されている技術である。

(2)UE#2の処理

一方でUE#2に着目すると、干渉信号に当たるUE#1宛ての信号には低い送信電力が割り当てられているため、SICを適用せず直接UE#2宛ての信号を復号できる。

基地局は、スケジューラにおいてサブフレーム^{*20}単位で動的にNOMA適用可否を選択できるため、

^{*9} TDMA：同一の無線アクセスシステム帯域内において、複数ユーザの信号を送信する際に互いに異なる時間を用いて送信すること。

^{*10} CDMA：同一の無線アクセスシステム帯域内において、複数ユーザの信号を送信する際に互いに異なる拡散符号を用いて送信すること。

^{*11} サブキャリア：OFDMなどのマルチキャリア伝送において信号を伝送する個々の搬送波のことをいい、副搬送波とも呼ばれる。

^{*12} OFDMA：OFDMを用いた無線アクセス方式。OFDMは高速データレートの広帯域信号を多数の低データレートのマルチ

キャリア信号を用いて並列伝送することにより、マルチパス干渉に対する耐性の高い高品質伝送を実現する方式。

^{*13} レプリカ：特定された送信信号の推定値に対する受信信号を再生したもの。

^{*14} 逐次干渉キャンセル（SIC）：複数の信号が合成された受信信号から1つずつ信号を検出、キャンセルしながら信号分離を行う方法。

^{*15} シンボル：伝送するデータの単位であり、OFDMの場合は複数のサブキャリアから構成される。各シンボルの先頭にはCPが挿入される。

NOMAは既存のLTE/LTE-Advanced端末をサポートするネットワーク上においても実装可能である。また、LTE/LTE-Advancedで適用されているような技術との組合せも可能となる。例えば、LTE/LTE-Advancedで導入されているMIMOとNOMAを組み合わせることで、送信アンテナ数以上のデータストリーム^{*21}を多重することができ、システム性能を向上させることができる。そして、NOMAはLTE-Advancedの発展技術として位置付けることも可能であり、5Gの新たな無線インタフェース（NR）で利用することも考えられている。

3. 下りリンクNOMAとSU-MIMOの組合せ

基地局数が1、多重UE数が2のときの下りリンク

NOMAとSU-MIMOを組み合わせた場合の動作原理を図2に示す。各ビームは送信レイヤ^{*22}の違いを表している。2つのUEはパスロス差が大きいセル中央（基地局近傍）UE（UE#1）とセル端UE（UE#2）を想定する。基地局において、UEからフィードバックされたチャネル情報に基づいてプリコードを生成し、各UEへの送信信号に対してプリコードを適用（乗算）した後、異なる送信電力で非直交多重を行い送信する。各UEに対して複数レイヤで送信することを前提としているため、両UEの送信ランク^{*23}が共に2の場合、基地局が2送信アンテナを用いて2UEに対して最大4ストリームを送信することになる。

プリコードを用いるLTE TM（Transmission Mode）^{*24} 4閉ループSU-MIMOでは、UEからのフィードバック情報に基づいてプリコードが決定される。一方で、NOMAにプリコードを用いるSU-MIMOを

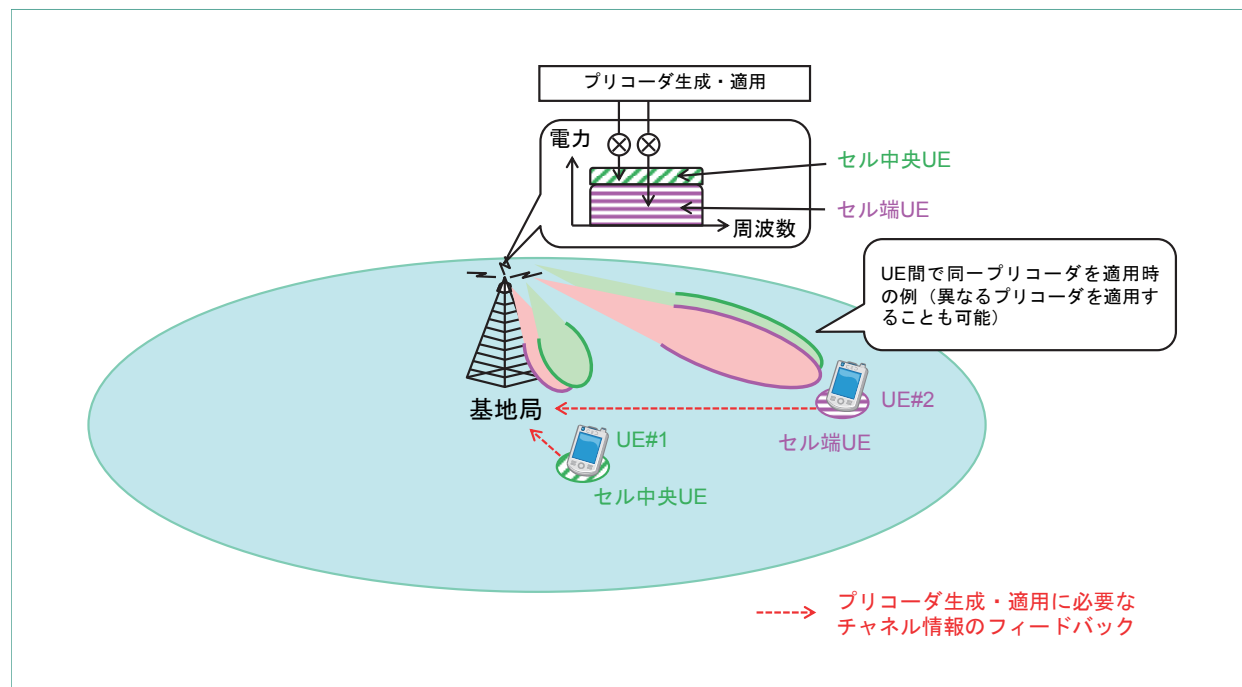


図2 下りリンクNOMAにSU-MIMOを組み合わせた場合の動作原理

*16 コードワード：誤り訂正符号化の単位であり、MIMO多重伝送適用時、1または複数コードワードの伝送を行う。
 *17 CWIC：干渉ユーザの信号を復号して干渉レプリカ信号を生成し、コードワード単位で干渉除去処理を行う方法。
 *18 ビット系列：Word（ワード）と呼ばれる情報ビット系列。Wordは情報の最小単位である1bit（ビット）を複数個束ねた1語のこと。
 *19 ターボ符号化：誤り訂正符号化技術の1つ。復号結果の信頼度情報を用いて、繰返し復号することにより、強力な誤り訂正能力が得られる。

*20 サブフレーム：時間領域の無線リソースの単位であり、複数のOFDMシンボル（LTEでは14OFDMシンボル）から構成される。
 *21 データストリーム：MIMO送信において送信されるデータ系列。
 *22 レイヤ：MIMOにおける空間ストリーム。
 *23 送信ランク：MIMOにおいて同時に送信するレイヤ（空間ストリーム）の数。
 *24 LTE TM：LTEで規定されているMIMO送信モード（TM）。

組み合わせた場合、適用するプリコードの組合せによって、非直交多重するユーザ間の同一ストリーム間の干渉量が異なる。ユーザ間に同一プリコードを適用した場合、ユーザ間干渉量は多重電力比に一致する。このとき、UEからのフィードバックに基づくものとは異なるプリコードが適用される場合もあるため、プリコーディング*25利得*26が減少する可能性がある。一方、ユーザ間に異なるプリコードを適用する場合、UEからのフィードバック情報に基づいてプリコードを適用することが可能となるため、所望信号に対するプリコーディング利得を最大化することが可能となる。しかしながら、SICを適用するUE#1に着目すると、UE#2の送信プリコードはUE#1のチャネルに対して最適とは限らない。そのため、UE#1に対するUE#2のプリコーディング利得が減少し、ユーザ間干渉が小さくなる可能性がある一方で、UE#1におけるSIC適用時のUE#2の信

号レプリカ生成精度が劣化する可能性もある。

4. NOMA実験概要

2014年4月～2015年7月にドコモが単独で行った実験では、NOMAにより端末2台の信号を非直交多重し、下りリンク2×2開ループSU-MIMO (TM3)を適用した場合の屋内・屋外実伝搬環境におけるスループット特性を測定した [7]。そして、2015年11月からドコモはMediaTekと協力し、NOMAの高度化に向けた共同実験の取組みを開始した [8]。2017年8月から10月の間においては、スマートフォンサイズの端末にNOMA対応チップセットを搭載し、端末3台を用いて4×2閉ループSU-MIMO (TM8)を適用した場合のNOMAおよびSU-MIMOのスループット性能を屋外実伝搬環境において測定した。本伝送実験装置を写真1に示す。



写真1 基地局装置（左）および移動局装置（右）の外観

*25 プリコーディング：MIMOにおいて、送信する前の信号に送信機から受信機までの無線伝搬路に応じた重みをあらかじめ乗算することで、受信品質を向上させる処理。

*26 利得：アンテナの放射特性の1つで、アンテナの最大放射方向の放射強度が基準アンテナの何倍あるかを示す指標。

(1)実験構成

フレーム構成はLTE Release 8下りリンクをベースとし [10], 1msのサブフレーム内にチャネル推定^{*27}に用いるセル固有参照信号 (CRS: Cell-specific Reference Signal)^{*28}, データチャネルなどがマッピングされる。基地局とUEの諸元を表1に示す。基地局の最大総送信電力は500mW, アンテナ高は基地局が約10m, UEが約1.5mであり, 基地局側は同一偏波^{*29}の4送信アンテナでアンテナ間隔を1.5波長とした。また, UE側は2受信アンテナを用いた。送信信号の帯域幅が10MHzで, 中心のキャリア周波数^{*30}としては3.5GHzを使用した。端末の最大総送信電力は200mWとして市販のMediaTek Helio[®]^{*31}

チップセットのNOMA試験版を搭載した。同時多重UE数は最大3とし, データ信号はUEごと独立にターボ符号化, データ変調およびプリコーディングを適用し, ビーム (レイヤ) ごとに最大2台までを非直交多重し, MIMO送信にはLTE TM8 [3] に基づく4×2閉ループSU-MIMOを適用する。ユーザあたりのレイヤ数は最大2とした。また, 非直交多重を適用するユーザ間のプリコードとして同一のものを適用した。プリコードのフィードバック情報に関して送信ランクを2に固定した想定で, 本実験の目的で設計した12個のPMI (Precoding Matrix Indicator)^{*32}をフィードバック可能な, TM8の改良版を用いた。フィードバック周期は10msとした。

表1 NOMA屋外実験装置諸元

項 目	値
キャリア周波数	3.5GHz
帯域幅	10MHz
アンテナ高さ	基地局: 10m, UE: 1.5m
UE送信電力	最大200mW
基地局送信電力	最大500mW
デュプレックス	TDD
サブキャリア間隔	15kHz
サブフレーム長	1ms
UE数	最大3台
基地局送受信機数	4
UE送受信機数	2
MIMOモード	TM8の改良版 (24個のPMIのフィードバックに拡張)
フィードバック情報の周期	10ms
レイヤ数	最大2レイヤ (UE当り)
受信機	CWICなど

^{*27} チャネル推定: 信号が無線チャネルを経由した際に受けた減衰量および位相回転量などを推定すること。得られた推定値 (チャネル情報) は, 受信側でMIMOの信号分離やデータ復調およびフィードバックするチャネル情報の算出などに用いられる。

^{*28} セル固有参照信号 (CRS): 下りリンクの受信品質測定などに用いられる各セル固有の参照信号。

^{*29} 偏波: 電界の振動する方向。電界が地面に対して垂直な面内で振動する場合を垂直偏波, 水平な面内で振動する場合を水平偏波という。

^{*30} キャリア周波数: 搬送波周波数。搬送波とは情報を伝達するために変調される電波。

^{*31} MediaTek Helio[®]: 台湾MediaTek Inc.の登録商標。

^{*32} PMI: 好適な下りリンクプリコードを指定するために移動端末からフィードバックされる情報。コードブック内から選択される項番として通知される。

(2)実験環境

実験環境を図3に示す。本実験を台湾・新竹市にある、ITRI (Industrial Technology Research Institute) のキャンパスで行った。2つの道路で複数測定ポイントにUEを配置し、ユーザスループットが最大となるプリコーダや、変調方式および符号化率 (MCS: Modulation and Coding Scheme)*33を適応的に選択し、ユーザスループットを測定した。また、NOMAとMIMOを組み合わせる際、MIMOの送信レイヤ数 (送信ランク) の組合せ ($R_1: R_2: R_3$) を任意に設定可能として、各ユーザの受信品質に柔軟に対応させた。非直交多重ユーザ間で適用する多重電力比はレイヤごとに異なるものを設定可能とした。

(3)評価シナリオ

本実験で主に評価したシナリオを図4に示す。図4に示すようにNOMA適用時 (右) は3つのUEが10MHz帯域幅を同時に利用する。ここで、UE3台

の合計スループットが最大となるMCSおよび多重電力比の組合せを適用した。また、近傍UE (UE #1) の送信ランクは2, 遠方UE (UE #2, UE #3) の送信ランクは1とした。SU-MIMO適用時 (左) は10MHz帯域幅を時間分割することにより近傍UEと遠方UE間のリソース配分を行った。

受信機では、受信信号に対して基地局近傍UE (UE #1) ではCWIC受信機を適用し、セル端UE (UE #2, UE #3) ではSICを適用せずに所望信号を検出した。UE #1におけるMIMOストリーム分離やUE #2, UE #3におけるユーザ間干渉除去に関してはR-ML (Reduced Maximum Likelihood Detection) 規範*34のMIMO信号検出 [11] を適用した。

5. NOMA実験結果

本試作装置を用いた屋外実電波環境における実験結果を表2に示す。UEの受信SNR (Signal to Noise

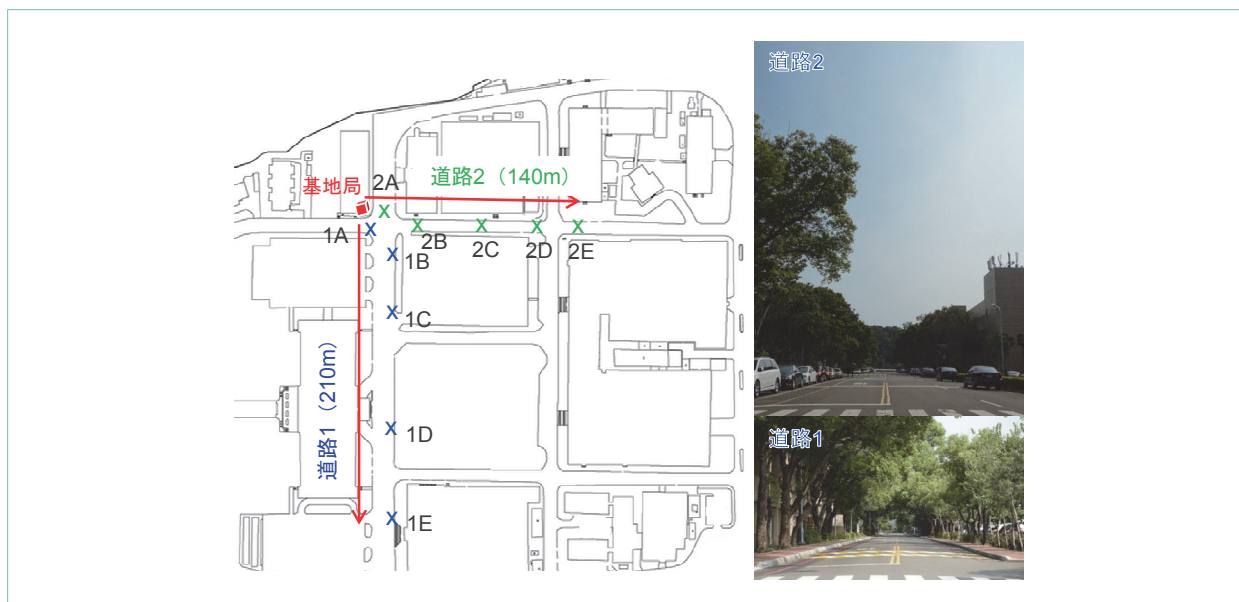


図3 実験環境 (台湾・新竹市, ITRIキャンパス)

*33 変調方式および符号化率 (MCS): 適用変調を行う際にあらかじめ決めておく変調方式と符号化率の組合せ。

*34 R-ML規範: 従来の最尤検出 (MLD: Maximum Likelihood Detection) の膨大な演算処理量を低減した最尤検出規範。

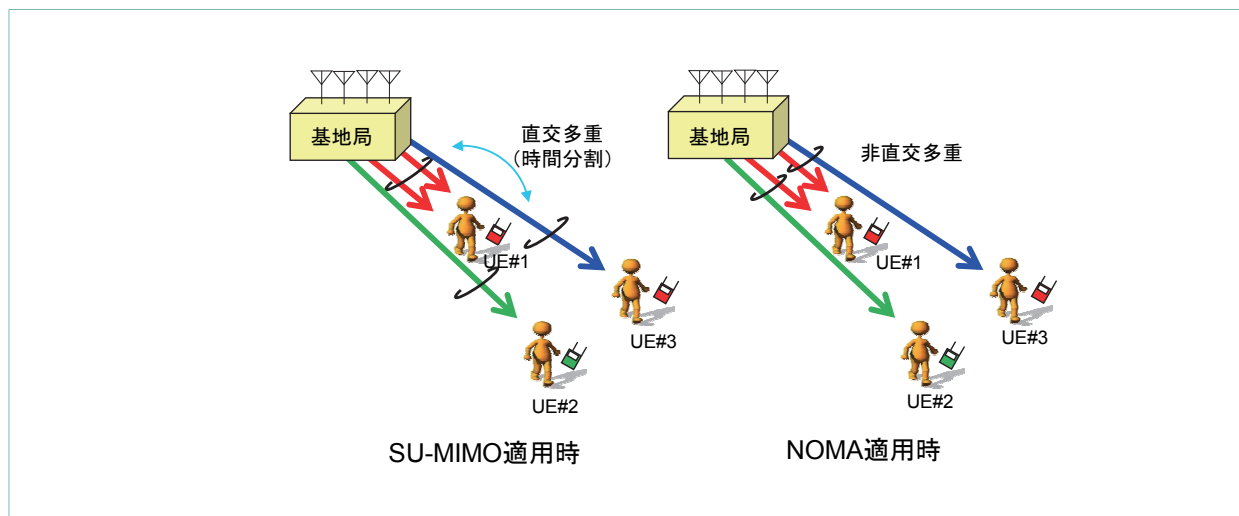


図4 評価シナリオ

表2 SU-MIMOと比較したNOMAのスループット改善量

UE配置場所		UE #1 (2A)	UE #2 (2D)	UE #3 (2D)
	受信SNR (dB)	30	7	7
SU-MIMO	ユーザスループット (Mbps)	16.3	2.63	1.53
NOMA	ユーザスループット (Mbps)	39.9	5.1	3.6
NOMA 対 SU-MIMO	ユーザスループットのゲイン	+144.79%	+93.92%	+135.29%
	ユーザスループット合計のゲイン	+137.54%		
	ユーザスループット積のゲイン	11.17倍		

Ratio)^{*35}はCRSを用いて算出した。本実験結果は、近傍UEの1台を30dB（測定ポイント2A）で、遠方UEの2台を7dB（測定ポイント2D）で配置した条件で測定されたものである。また、セル中央ユーザ（UE #1）およびセル端ユーザ（UE #2, UE #3）の送信ランクの組合せ（ $R_1 : R_2 : R_3$ ）は2 : 1 : 1とし、SU-MIMOおよびNOMA適用時のスループットを測定した。表2ではユーザスループット、システムスループット（3台の合計スループット）およびユーザスループットの積について、NOMAを用い

ることによる改善量を併せて示している。なお、ユーザスループットの積は公平性を表す指標であり、プロポーショナルフェアネス^{*36}を示す指標として利用可能である。

表1に示す結果より、NOMAはSU-MIMOと比較して全UEのスループットを向上できている。また、NOMA適用時はSU-MIMO適用時と比較してシステムスループットが2.3倍改善し、ユーザスループット乗算値については、11倍の改善が確認できた。

*35 受信SNR：受信信号のうち、雑音の電力に対する所望波の電力の比。

*36 プロポーショナルフェアネス：システム容量とフェアネスのバランスを最大化する指標。

6. NOMA関連標準化

3GPPでは、2015年4月よりLTE Release 13のSI (Study Item)^{*37}としてMUSTの性能について検討が開始され、LTE Release 14のWI (Work Item)^{*38}で仕様化された [6] [12]～[14].

なお、3GPPではmMTCへのNOMAの適用が着目されている。mMTCの例として大量のセンサーによるスモールパケットの送信が挙げられる。mMTCの場合、カバレッジ拡大や非同期通信をサポートできる信号波形の設計に加えて、同時接続端末数向上のため制御チャンネル容量の増加を可能とする上りリンクのNOMA [15] や、制御情報を不要とする制御チャンネルの設計 (例えば、データ送信の際に事前許可を不要とするチャンネルアクセス方法 (Grant free access^{*39}) など) が重要となる。3GPPでは上りリンクNOMAを含めて16個以上の多くの上りリンクアクセス方式が主要会社から提案され検討が進められている。

7. あとがき

本稿では、NOMAと4×2 SU-MIMOの組合せによる、NOMA対応チップセット搭載の端末を用いた屋外伝送実験の結果について解説した。NOMAの高度化により、より高い周波数利用効率を実現することが可能となる。本実験においては、NOMAにより端末3台を非直交多重することにより、SU-MIMOと比較してシステムスループットにおける周波数利用効率を最大2.3倍まで改善できることを確認した。また、スマートフォンサイズのNOMA対応チップセット搭載端末を用いた実証実験により、NOMAが必要とする干渉キャンセル技術の実現性を明らかにした。今後は5Gの発展技術として3GPPに

おけるNOMA高度化技術の標準化をめざしていく。

文 献

- [1] アナス, ほか: “ITU-RにおけるIMT-2020無線インタフェース標準化動向,” 本誌, Vol.25, No.3, pp.50-58, Oct. 2017.
- [2] 岸山, ほか: “ドコモの5Gに向けた取組み—2020年での5Gサービス実現に向けて—,” 本誌, Vol.23, No.4, pp.6-17, Jan. 2016.
- [3] 須山, ほか: “5Gマルチアンテナ技術,” 本誌, Vol.23, No.4, pp.30-39, Jan. 2016.
- [4] A. Benjebbour, A. Li, Y. Kishiyama, J. Huiling and T. Nakamura: “System-level Evaluations of SU-MIMO Combined With NOMA,” IEEE Globecom, Dec. 2014.
- [5] K. Higuchi and A. Benjebbour: “Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) with Successive Interference Cancellation for Future Radio Access,” IEICE Trans. Commun., Jan. 2015.
- [6] 3GPP TR36.859 V13.0.0: “Study on Downlink Multiuser Superposition Transmission (MUST) for LTE (Release 13),” Dec. 2015.
- [7] 齊藤 敬佑, ベンジャブール アナス, 岸山 祥久, 奥村 幸彦, 中村 武宏: “下りリンク非直交多元接続 (NOMA) に2-by-2開ループSU-MIMOを組み合わせた場合の屋外実験,” 信学技報, Vol.115, No.288, RCS2015-213, pp.139-144, Nov. 2015.
- [8] NTTドコモ報道発表: “MediaTekとの5G共同実験ならびに技術開発に合意,” Feb. 2016.
https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/notice/2016/02/22_00.html
- [9] A. Benjebbour, K. Saito, A. Li, Y. Kishiyama and T. Nakamura: “Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): Concept and Design,” Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations, pp.143-168, Aug. 2016.
- [10] 3GPP TS36.213 V8.8.0: “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 8),” Sep. 2009.
- [11] Y. Sano, K. Takeda, S. Nagata, T. Nakamura, X. Chen, A. Li, X. Zhang, J. Huiling, and K. Fukawa: “Investigation on Non-Orthogonal Multiple Access with Reduced Complexity Maximum Likelihood Receiver and Dynamic

^{*37} SI: 「実現性の検討および仕様化すべき機能の大まかな特定」作業のこと。

^{*38} WI: 「仕様化すべき機能の決定および機能の詳細仕様化」作業のこと。

^{*39} Grant free access: データ送信する前に基地局側からの事前許可を不要とする無線チャンネルへのアクセス方法。これよりいつでも端末が基地局に対してデータ送信が可能となる。

- Resource Allocation," IEICE Trans. Commun., Aug. 2017.
- [12] 3GPP RP-150496: "New SI Proposal: Study on Down-link Multiuser Superposition Transmission for LTE," Mar. 2015.
- [13] 3GPP R1-152493: "Candidate schemes for superposition transmission," May 2015.
- [14] 3GPP R1-1613802: "Summary of RAN1 Agreements for Rel-14 DL MUST," Nov. 2016.
- [15] X. Chen, A. Benjebbour, A. Li and A. Harada: "Multi-User Proportional Fair Scheduling for Uplink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)," IEEE VTC2014-Spring, May 2014.

5G高信頼・低遅延通信（URLLC） の屋外実験

先進技術研究所 5G推進室

 いわぶち まさし
 岩瀨 匡史
 きしやま よしひさ
 岸山 祥久

 ベンジャブール アナス
 おくむら ゆきひこ
 奥村 幸彦

第5世代移动通信システム（5G）の実現に向けて、標準化議論や実証実験が進められている。自動運転や遠隔制御を実現するために必要となる高信頼・低遅延通信（URLLC）も5Gにおいて期待されている利用シナリオの1つである。ドコモではURLLCの実現に向けて屋外実験を行ってきた。本稿では、URLLCの概要について解説するとともに、ファークウェイとの共同により約1kmを含むさまざまな通信距離でURLLCを実証した屋外実験を取り上げ、最新の実験成果を紹介する。

1. まえがき

移动通信における爆発的なトラフィックの増大やサービスの多様化への対応として、第5世代移动通信システム（5G）の導入が期待されている。5Gの導入に向けては、3GPPなどでの標準化議論や、各国の主要団体および企業による実証実験が進められている。ドコモにおいても、2010年頃から5Gの実現に向けた活動を開始し、技術コンセプトの提案、伝送実験、標準化議論を主導してきた。

5Gの代表的な利用シナリオには、①モバイルブ

ロードバンドのさらなる高度化（eMBB：enhanced Mobile BroadBand）、②多数同時接続を実現するマシンタイプ通信（mMTC：massive Machine Type Communications）、③高信頼・低遅延通信（URLLC：Ultra-Reliable and Low-Latency Communications）が挙げられている [1]。特に、URLLCは将来の新たなユースケース（自動運転、触覚通信、遠隔医療など）を実現する利用シナリオとして注目されている。今回ドコモはファークウェイと共同で、URLLCにおいて要求されている「高信頼」と「低遅延」を、屋外実験によって同時に実現することに世界で初めて

成功した。本稿では、URLLCの概要と屋外実験について解説する。

2. URLLCの概要

5Gのユースケースやそれらを実現するための技術的要件は、国内外の業界団体において議論されてきた [1]～[3]。eMBBでは、4Gまでと同様に高速・大容量化の延長として要件などが規定された。一方で、mMTCやURLLCでは、IoT（Internet of Things）に対する産業界における期待の高まりを受け、自動車、ロボット、センサなどの移動通信以外の業界との連携を見据えて要件などが規定された。

2.1 URLLCのユースケース

URLLCでは、高信頼と低遅延の両方を要求する交通制御や遠隔制御などのサービスを主なターゲットとしており、代表的な例として以下のユースケースが挙げられている [3]。

(1)自動運転制御および交通制御

交通事故の低減、交通効率の改善および緊急車両の移動をサポートするために、車車間、路車間のみならず、歩行者などに対しても警告信号を送信するといったユースケースが挙げられている。

(2)ロボット制御およびドローンなどとの3次元接続

スマートファクトリーなど、ロボットによる製造業の自動化や運送業の自動化が期待されており、5Gを用いてそれらを制御するユースケースが挙げられている。また、地上だけでなく空中もカバレッジとし、空中を飛行するドローンなどに対して遠隔制御することも想定されている。

(3)遠隔手術

遠隔手術は光通信などの固定のネットワークを用いることにより実現可能であるが、災害地や危険地帯への適用が困難である。そのような地域においても5Gを用いて遠隔手術を実現するユースケースが

挙げられている。

上記のユースケースではいずれも高信頼および低遅延が要求され、また、そこで使用される無線システムは主に制御信号のやり取りに用いることが想定されている。そのため5Gでは、URLLCに対して高い伝送速度や多端末接続を要求しない代わりに、信頼性、低遅延およびモビリティに厳しい条件を求めている。

2.2 URLLCの要件と課題

URLLCの要件はコアネットワークを含むEnd-to-Endの目標値も議論されているが、本稿では無線アクセスネットワークにおけるURLLCの要件について解説する。

(1)URLLCの要件

URLLCの要件の定義は業界団体によってさまざまではあるが、例えば3GPPでは「 X bytesのパケットを一定時間以下の遅延で受信に成功する確率」としている [4]。ここで遅延とは、送信側における無線のプロトコルレイヤ^{*1}2（もしくは3）のサービスデータユニット^{*2}の処理開始から、受信側においてパケットを正常に受信するまでに要した時間であり、無線区間遅延（またはユーザプレーン^{*3}遅延）と呼ばれる。無線区間遅延の定義を図1に示す。無線区間遅延はパケットの受信成功までに要する片道の遅延であり、パケット受信に失敗した場合には1回以上の再送に要する時間を含む。以上よりURLLCを実現するためには、一定以上のパケット受信成功確率（高信頼）を満足しながら、同時に一定以下の無線区間遅延（低遅延）も達成しなければならない。また、URLLCについて具体的な目標値も掲げられている。3GPPにおいては、「32bytesのパケット送信時に1ms以下の無線区間遅延かつ99.999%以上のパケット受信成功確率の達成」を目標値としている。

*1 プロトコルレイヤ：ネットワーク構造の設計指針であるOSI参照モデルにて定義される通信プロトコルの層。プロトコルレイヤ2はデータリンク層、プロトコルレイヤ3はネットワーク層を指す。

*2 サービスデータユニット：ヘッダなどが付加されていないデータのこと。

*3 ユーザプレーン：通信で送受信される信号のうち、ユーザが送受信するデータの部分。

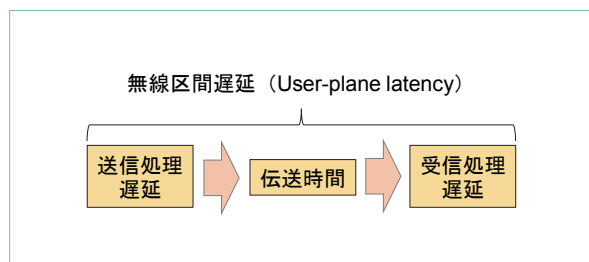


図1 無線区間遅延の定義

(2)要件達成に向けた課題

低遅延化の観点からURLLCの要件達成のためには、①無線信号の伝送時間の短縮、②再送に要する時間の短縮、が必要である。また、高信頼化の観点からは、③パケット受信成功確率の改善、が必要である。これらについて以下に詳述する。

①無線信号の伝送時間の短縮

信号の送信単位であるスロット長が長い場合、無線信号の伝送時間も長くなる。例えば、第4世代移動通信システム（4G）であるLTE-Advancedでは、無線信号を伝送するだけで無線区間遅延が1msを超えてしまう。すでに述べた通り、無線区間遅延は送信および受信の信号処理遅延を含むため、スロット長を短くすることが望ましい。

②再送に要する時間の短縮

信号の再送によりパケット受信成功確率を高めることができるが、再送の手順においては下りリンクおよび上りリンクの信号のやり取りが発生するため遅延が生じる。下りリンクを例に説明すると、移動局が下りリンクの信号を正しく受信できなかった場合もしくは一定時間内に下りリンクの信号を受信できなかった場合、上りリンクチャネルによりNACK（Negative Acknowledgement）信号^{*4}をフィードバックする。基地局はNACK信号を受信した後、下りリンクチャネルを用いて再送信号を送信する。これによりパケット受信成功確率を改善するこ

とができるが、その分無線区間遅延は長くなってしまう。そのため、高信頼と低遅延を同時に達成するには、再送に要する時間を短くすることが重要である。

③パケット受信成功確率の改善

低遅延を達成しつつパケット受信成功確率を高めるためには、できる限り再送を行うことなく1度の送信で受信成功できることが望ましい。特に、マルチパス環境^{*5}下ではフェージング^{*6}の発生により無線チャネルが劣化しやすく、パケット受信成功確率も低下しやすい。そのような環境下でも高いパケット受信成功確率を維持する必要がある。

3. URLLCを実現する技術

高信頼化および低遅延化を実現するために、新たな無線フレーム構成、再送方式、Grant-freeアクセス^{*7}のような新しい送信方式について議論がされている。ここでは、屋外実験で適用した技術を中心に、URLLCを実現する技術について解説する。なお、本実験ではTDD（Time Division Duplex）^{*8}方式を前提とする。

3.1 伝送時間を短縮する無線フレーム構成

(1)NRとして検討されている無線フレーム構成

3GPPにおける5Gの議論では、LTE-Advanced無線通信方式と後方互換性のない、新たな無線通信方式（NR：New Radio）の検討も行われている。NRでは、高い周波数帯までのサポートなどさまざまな要求条件に対応するために、複数の異なるOFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing）^{*9}サブキャリア^{*10}間隔（15, 30, 60, 120kHz）が採用される[5]。120kHzなどの広いOFDMサブキャリア間隔を用いることによりサブキャリア当りの周波数帯域幅が広くなり、短い時間で同じ情報量を伝

^{*4} NACK信号：データを正常に受信できなかった場合に、そのことを送信側に知らせるために通知される信号。なお、データを正常に受信した場合は、ACKと呼ばれる信号が通知される。

^{*5} マルチパス環境：送信側からの直接波とビルなどに反射して到来した波が多重して受信される環境のこと。

^{*6} フェージング：移動局の移動や時間の経過によって受信レベル

が変動する現象のこと。

^{*7} Grant-freeアクセス：移動局が送信するときに、あらかじめ基地局に送信許可（Grant）を受けることなく送信が可能な方式。

^{*8} TDD：下りリンクと上りリンクの通信を時間で区切り、送信と受信を切り替えながら通信を行う方式。

送することができる。結果として、無線信号の伝送時間を短くすることができるため、遅延を低減することができる。ただし、サブキャリア数は少なくなるため、オーバーヘッドを無視すれば一定時間に送信できる情報量は変わらない。他にも、OFDMサブキャリア間隔を従来通りの15kHzとした上で、Mini-slot^{*11}と呼ばれるスロットの導入によるアプローチも提案されている [6]。また、下りリンクと上りリンクの送信を素早く切り替えられるように無線フレームを設計することにより、再送に要する時間を短くすることができる。本実験では、広いOFDMサブキャリア間隔を適用するアプローチを採用し、新たに無線フレームを設計することにより低遅延化を図る。

(2)本実験における無線フレーム構成

本実験で導入した無線フレーム構成を図2に示す。

本無線フレーム構成では60kHzのサブキャリア間隔を採用しており、OFDMシンボル^{*12}長は、サブキャリア間隔の逆数で定義されるため $16.67\mu\text{s}$ であり、さらに $1.56\mu\text{s}$ の長さをもつCP (Cyclic Prefix)^{*13}が付加されている。また、本無線フレーム構成は特別スロットと通常スロットで構成されている。通常スロットは、上下リンクにそれぞれ6OFDMシンボルと2OFDMシンボル分のガードタイム^{*14}を設けている。そのため、上下リンクそれぞれで0.125ms、合計で0.25msのスロット長となる。これにより、伝送時間を短縮することができる。なお、特別スロットは、通常フレームよりも多くの制御信号を含むため、データ信号および繰返し信号のためのOFDMシンボル数も通常スロットの2倍とし、上下リンクを合計したスロット長が0.5msとなるように設計されている。特別スロットは、無線フレームごとに1つ含まれる。

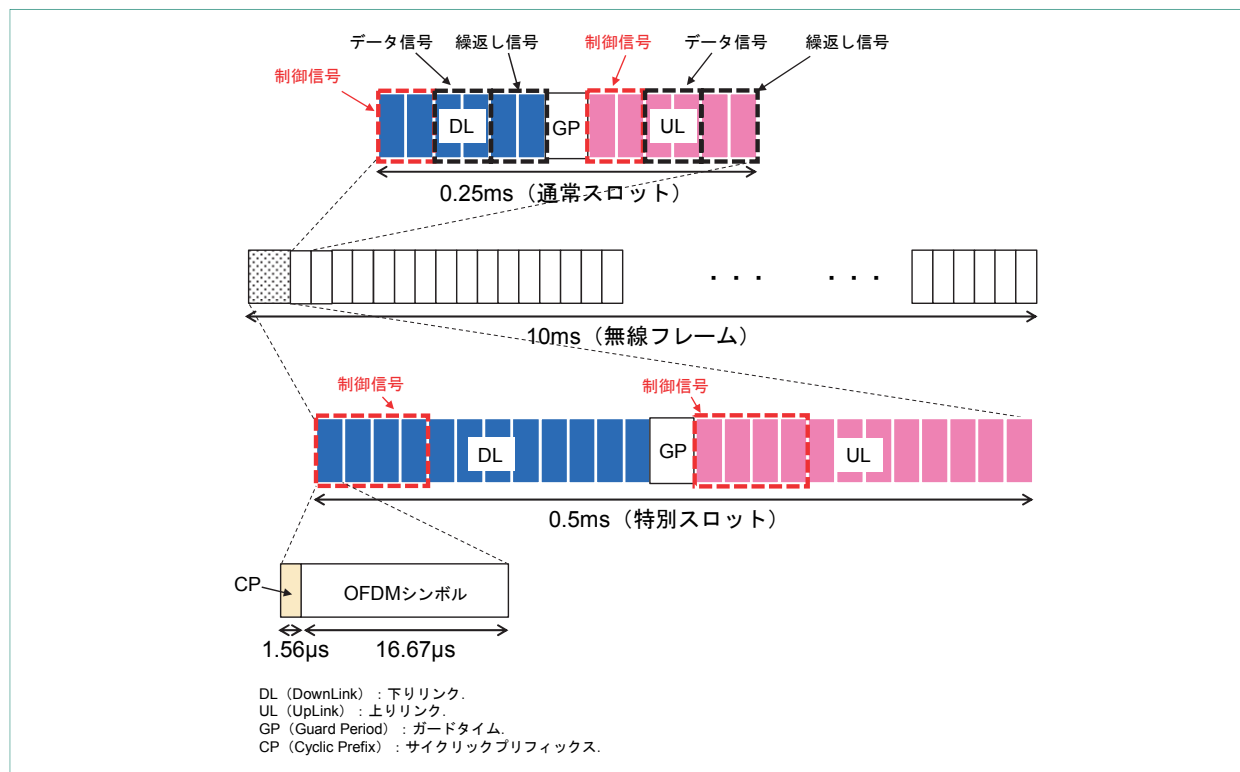


図2 本実験で用いた無線フレーム構成

*9 OFDM：狭帯域の直交サブキャリアを用いて伝送を行うマルチキャリア伝送方式。LTE-Advanced、Wi-Fi[®]などの多くの無線通信システムに用いられる。Wi-FiはWi-Fi Allianceの登録商標。

*10 サブキャリア：OFDMなどのマルチキャリア伝送において信号を伝送する個々の搬送波。

*11 Mini-slot：通常よりも短いスロット長となるように定義された

スロット。

*12 OFDMシンボル：伝送するデータの単位であり、OFDMの場合は複数のサブキャリアから構成される。各シンボルの先頭にはCPが挿入される。

また、本無線フレーム構成ではTDD方式を採用した。本無線フレーム構成を用いることにより、0.125msごとに下りリンクと上りリンクが切り替わるためACK/NACKなどのフィードバック信号を早いタイミングで送信することができ、再送に要する時間を短縮している。LTE-AdvancedのTDD方式においては、信号を送信してから再送までに約10～11msを要するが、本無線フレーム構成を用いた場合は約0.75～1msまで短縮することができる。

3.2 繰返し信号の送信

前述のように、再送によりパケット受信成功確率を改善することができるが無線区間遅延が長くなってしまふ。そこで、NACKなどのフィードバック信号を送信する前にあらかじめ繰返し信号を送信することによってもパケット受信成功確率を改善することが可能である。同じ信号を複数回送信するため伝送効率は低下してしまふが、無線区間遅延が増加することなくパケット受信成功確率を改善することができる。本実験で用いた無線フレーム構成では、下りリンクおよび上りリンクの最初の2OFDMシンボルを制御信号、次の2OFDMシンボルをデータ信号のために用いる。そして、データ信号の次の2OFDMシンボルは繰返し信号の送信のために用いる。

3.3 マルチアンテナによるダイバーシチ技術

マルチアンテナを用いたダイバーシチ技術^{*15}もパケット受信成功確率を改善する手段の1つである。ダイバーシチ技術を適用することにより、マルチパス環境下でのパケット受信成功確率の低下を抑えることができる。本実験では、基地局では8本、移動局では2本のアンテナを用いた送信アンテナダイバーシチ技術を適用している。送信アンテナダイバーシチ技術として、2本のアンテナによる構成のSFBC（Space Frequency Block Coding）^{*16}と呼ばれる方式〔7〕を適用した。なお、基地局では、SFBCにより出力された2つの信号をそれぞれ異なる4本のアンテナで送信し、合計8本のアンテナを用いた。

4. URLLCの屋外実験

ドコモでは、URLLCに関する屋外実験をファウエイと共同で進めてきた。その実験概要と結果について解説する。

4.1 実験概要

本実験は横浜みなとみらい21地区にて実施した。

実験装置の外観を図3に示す。基地局のRF（Radio frequency）^{*17}ユニット、IF（Inter frequency）^{*18}

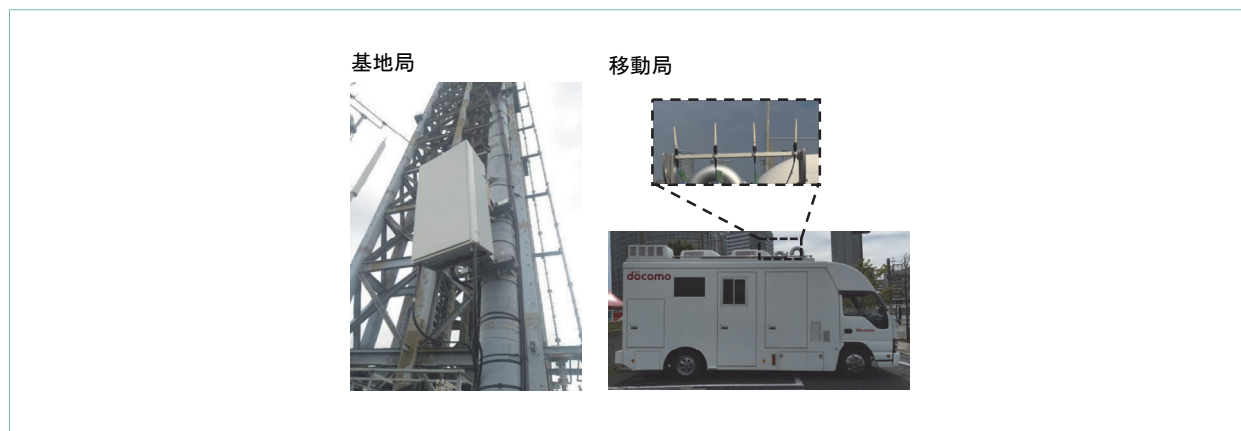


図3 実験装置の外観

^{*13} CP：OFDMシンボルの先頭に設けられるガード区間。前のOFDMシンボルの遅延波およびサブキャリア間の直交性崩れに起因するシンボル間干渉の影響を低減することができる。

^{*14} ガードタイム：TDD方式を用いる場合に設けられる時間。伝搬遅延により下り信号と上り信号が衝突してしまうことを防止する。

^{*15} ダイバーシチ技術：複数の互いに相関の低い受信波を合成また

は選択することにより、フェージングによる受信レベルの落込みを低減する技術。

^{*16} SFBC：送信ダイバーシチ技術の1つで、2つの送信アンテナの隣接するサブキャリア間でAlamouti符号化を用いて、周波数およびアンテナ間の符号化を行うことにより、最大比合成に相当するダイバーシチ利得を得る方式。

ユニットはビルの屋上に設置され、基地局アンテナ高は約108mである。基地局のベースバンド^{*19}ユニットなどはビル内に設置され、光ファイバを用いてIFユニットに接続している。一方、移動局のアンテナは電波測定車の上に設置され、アンテナ高は約3.2mである。その他の移動局装置は電波測定車内に設置した。

実験装置諸元を表1に示す。本実験は、4.5GHz帯の20MHz幅を用いて実施し、パケットサイズに応じて異なる変調符号化方式（MCS：Modulation and Coding Scheme）^{*20}を設定して測定を行った。測定するパケットサイズは32, 50, 100, 200bytes

とした。

基地局から見た実験環境を図4に示す。実験は電波測定車を静止して行う試験と、移動しながら行う試験を行った。静止試験は図4の通信距離が異なる地点A, B, C, および基地局から電波測定車までの見通しが得られない（見通し外）の地点Dで実施した。また、移動試験で使用した走行コースも併せて図4に示す。試験時の移動は時速25kmとした。

4.2 実験結果

本実験では、3GPPにおけるURLLCの要件を達成した最大のパケットサイズを評価した。実験結果を

表1 実験装置諸元

主要諸元	基地局	移動局
中心周波数	4.66GHz	
システム帯域幅	20MHz	
信号波形	Filtered-OFDM	
OFDMサブキャリア間隔	60kHz	
OFDMシンボル長	16.67 μ s	
スロット長	0.125ms	
ガードタイム	31.25 μ s	
CP長	1.56 μ s	
チャネル符号化	Polar符号	
MIMOモード	SFBC	
MIMOストリーム数	1	
アンテナ素子数	8	2
アンテナチルト角	16.4°	0°
アンテナ設置高	108m	3.2m
最大送信電力	46dBm	23dBm
トラフィックモデル	同一サイズのパケットを一定間隔で送信	
パケットサイズ	32, 50, 100, 200bytes	

Polar符号：通信路に対する反復的な操作により生じる通信路分極を利用した通信路符号化方式。

^{*17} RF：無線通信の搬送波に用いられる周波数の信号および電波のこと。

^{*18} IF：送信機または受信機において搬送波の周波数帯に変換する際の中間周波数のこと。

^{*19} ベースバンド：無線信号の搬送波への変調前や復調後の信号帯域。

^{*20} 変調符号化方式（MCS）：適応変調を行う際にあらかじめ決めておく変調方式と符号化率の組合せ。



図4 実験環境

表2にまとめる。

(1) 静止試験（見通し内）

静止試験では、通信距離が約0.33kmの地点Aおよび約0.8kmの地点Bにおいて、下りリンクおよび上りリンク共に200bytesのパケットを1ms以下の無線区間遅延を満足しながら伝送し、99.999%以上のパケット受信成功確率を達成できた。さらに、通信距離が約1.0kmの地点Cにおいては、100bytesのパケットで同様にURLLCの要件を達成した。このように、広範囲にわたって「高信頼」かつ「低遅延」な通信を実現可能なことを実証することができた。

なお、地点Cにおいて200bytesによる要件達成ができなかった要因はSNR（Signal to Noise Ratio）^{*21}が十分に得られなかったためである。本無線フレーム構成では、1つのパケットを1つのスロットで送信し

なければ無線区間遅延が1ms以下とならない。ところが、地点Cにおいて200bytesのパケットを1つのスロットで送信するために必要なMCSを用いた場合、SNRが十分でないためにパケット受信成功確率が低下した。一方、パケット受信成功確率が低下しないMCSを設定した場合には、200bytesのパケットを複数のスロットで送信しなければならず、その結果、無線区間遅延が1msを超えてしまった。このように、URLLCにおいてはSNRとパケットサイズを考慮してMCSを選択する必要がある。多くの無線システムには、SNRに応じて適応的にMCSを切り替えるリンクアダプテーション技術^{*22}が採用されている。しかし、URLLCにおいて適応的にMCSを切り替える場合には、従来とは異なり、SNRだけでなくパケットサイズなども考慮して

*21 SNR：雑音の電力に対する所望信号の電力の比。

*22 リンクアダプテーション技術：無線環境に応じてMCSを選択する機能。良好な場合は高い伝送レートとなるMCSを、劣悪な場合は低い伝送レートとなるMCSを選択する。

表2 実験結果

端末条件	基地局からの距離	送信したパケットデータ量 (最大値)	無線区間遅延時間	送信成功率
静止 (見通し内)	約0.33km	200bytes	0.5~0.7ms	99.999~100%
	約0.8km	200bytes		
	約1.0km	100bytes		
静止 (見通し外)	約0.35km	下り：200bytes 上り：100bytes		
移動 (時速25km)	約0.3~0.6km	100bytes		

MCSを選択しなければならない。このように、URLLCの特性向上のためにはMCSの選択アルゴリズムの改良が必要である。加えて、無線フレーム構成の改良も必要である。

(2)静止試験（見通し外）

見通し外でマルチパスが観測された環境の地点Dにおいても下りリンクで200bytes、上りリンクで100bytesのパケットを送信することにより、URLLCの要件を達成することができた。上りリンクにおいては、下りリンクよりも送信電力が小さかったことやマルチパスの影響によるSNRの変動により、200bytesのパケットを用いてURLLCの要件が達成できなかったと考えられ、無線環境によってURLLCとして送信可能な情報量が制限されることが分かった。今後、URLLCを用いるサービスを面的に展開することを想定すると、送信可能な情報量の上限やカバレッジを明らかにしていくことがサービス提供に向けて重要になると考えられる。

(3)移動試験

移動試験では街路樹などによる遮蔽や走行方向の変化があったにも関わらず、下りリンクおよび上りリンクともに100bytesのパケットを用いてURLLC

の要件を達成することができた。本実験により、街中を自動車などで走行する場合でもURLLCを実現できることを実証し、自動運転などへの適用可能性を示すことができた。

5. あとがき

本稿では、5Gのユースケースの1つであるURLLCの概要およびドコモが行ってきた屋外実験について解説した。本実験により、URLLCに要求される「高信頼」と「低遅延」を同時に実現できることを実証した。しかし、URLLCを安定して提供するためには、さらなる無線フレーム構成や制御アルゴリズムなどの改良が必要である。また、将来のサービスに、柔軟に対応していくためには、より大きな情報量をURLLCの要件を満足しながら伝送できることが望ましい。さらに、伝送可能なカバレッジについても明らかにしていく必要もある。今後は、今回の屋外実験の結果を踏まえてこれらの課題を解決し、URLLCの実現とURLLCを用いた新たなサービスの創出をめざしていきたい。

文 献

- [1] Recommendation ITU-R M.2083-0: "IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," Sep. 2015.
- [2] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus and M. Fallgren: "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project," IEEE Communication Magazine, Vol.52, Issue 5, pp.26-35, May 2014.
- [3] NGMN: "5G White Paper," Feb. 2015.
- [4] 3GPP TR 38.913: "Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (Release 14)", Oct. 2016.
- [5] 武田, ほか: "5Gにおける物理レイヤ要素技術と高周波数帯利用に関する検討状況," 本誌, Vol.25, No.3, Oct. 2017.
- [6] 3GPP R1-1609664: "Comparison of slot and mini-slot based approaches for URLLC," Oct. 2016.
- [7] M. Torabi, S. Aissa and M. R. Soleymani: "On the BER performance of Space-Frequency Block Coded OFDM systems in fading channels," IEEE Transaction on Wireless Communications, Vol.6, Issue 4, Apr. 2007.

ミリ波を用いた超高速・長距離伝送の5G屋外実験

先進技術研究所

5G推進室

岸山 祥久

原田 篤

余

波

ベンジャブール アナス

奥村

幸彦

ドコモは2020年のサービス提供開始をめざして、第5世代移動通信システム（5G）の研究開発を進めている。5Gでは、従来の周波数帯に加え、「ミリ波帯」と呼ばれる高周波数帯も利用し、飛躍的に高速・大容量な通信を実現することができる。本稿では、超高利得なビームフォーミング送信技術によって、電波の距離減衰が大きく、遠くに飛ばすことが困難なミリ波を用いて、1kmを超えるような長距離での高速伝送に挑戦する、5G屋外実験を東武鉄道およびファアウェイと共同で行ったので、その概要を解説する。

1. まえがき

2010年代の移動通信のトラフィック量は年率1.6倍以上で増加されてきており [1]、そのままいくと2020年代の情報社会ではLTEが導入された2010年と比較して1,000倍以上に増大すると予測されてきた。5Gは、このような激増するトラフィックに応えるネットワークシステムの大容量化を可能な限り低コスト・低消費電力で実現することを目標とし、加えて、10Gbpsを超えるような超高速通信やさら

なる低遅延化、IoT（Internet of Things）の普及などに伴う多数端末との接続への対応といったさまざまな高性能化を実現する移動通信システムである。

5Gの大きな特徴として、現在の移動通信で利用されている周波数帯（4GHz以下）に加え、「ミリ波帯」（30GHz以上）※も利用し、飛躍的な高速・大容量通信を実現することが挙げられる。しかしながら、ミリ波のような高周波数帯は、その特性として電波の距離減衰が大きく、遠くに伝搬させることが困難であるという問題がある。そこで、ドコモではこの

ような高い周波数帯と、広範囲なカバレッジに適した低い周波数帯を組み合わせることで、高周波数帯を用いることによる高速・大容量化と通信の安定性の両立を実現する5Gの技術コンセプト（ファントムセル^{*1}／Dual Connectivity^{*2}）を提案してきた [2]。一方で、都市部だけではなく地方、郊外、山間部など、より多様な環境で超高速な通信を提供することを考えると、ミリ波のような高周波数帯といえども可能な限り広いカバレッジを提供することが重要である。

本稿では、このようなミリ波の移動通信への応用に関する技術課題に対して、超高利得なビームフォーミング^{*3}送信技術によって、1kmを超えるようなマクロセル^{*4}環境での長距離・高速伝送をミリ波を用いて実現する、5G無線アクセスの屋外実験

を東武鉄道およびファーウェイと共同で行ったのでその概要を解説する。

2. 28GHz帯を用いた東京スカイツリー・浅草間での5G長距離伝送実験

2017年12月に5Gの実用化に向けて有望な周波数帯の1つである28GHz帯を用いて、東京スカイツリー[®]^{*5}の展望台から浅草地区への1kmを超える長距離伝送実験を東武鉄道およびファーウェイと行った [3]。

2.1 実験の概要

本実験環境を図1に示す。本実験は、ドコモが東武鉄道(株)の協力により構築した「5Gトライアルサ

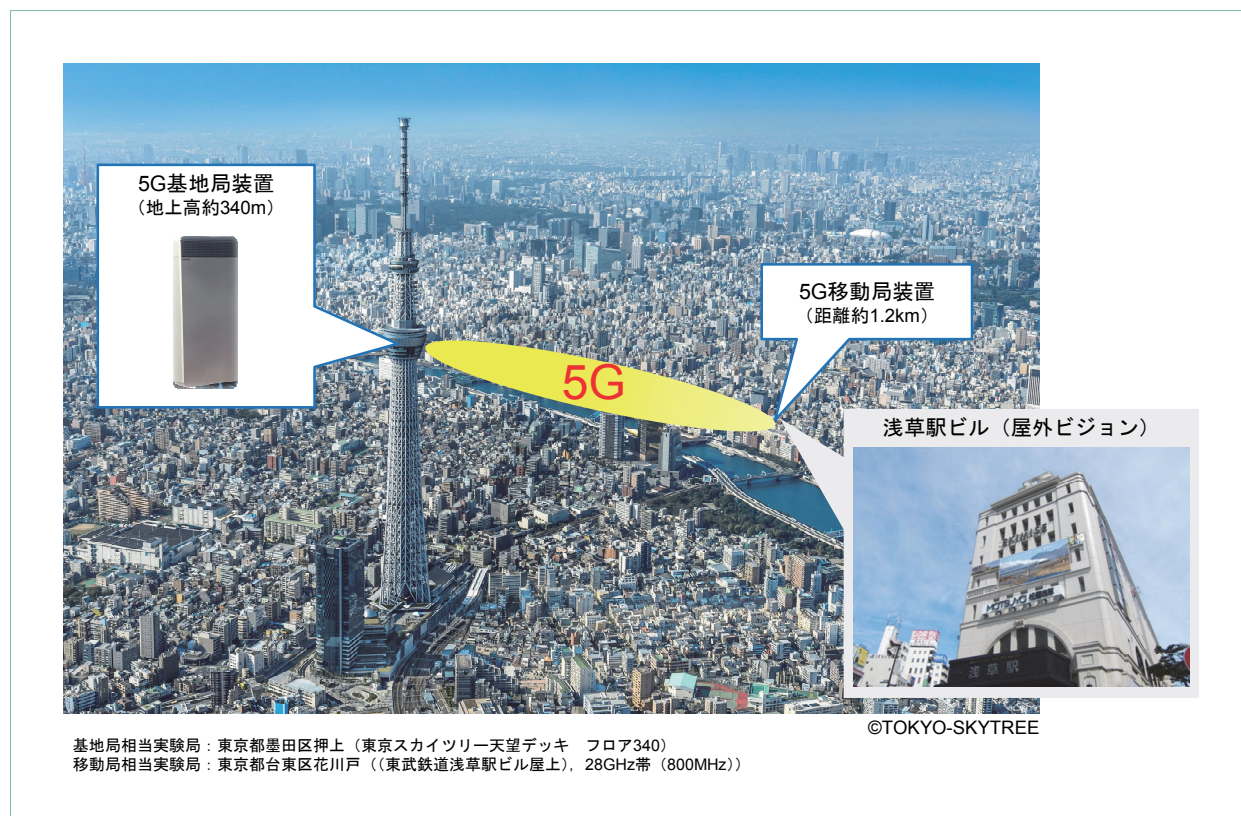


図1 実験環境（東京スカイツリー周辺）

^{*1} ファントムセル：ドコモが提唱する高度化スモールセルシステムのこと。
^{*2} Dual Connectivity：マスターとスレーブ2つの基地局に接続し、それらの基地局でサポートされる複数のコンポーネントキャリアを用いて送受信することで、広帯域化を実現する技術。

^{*3} ビームフォーミング：複数のアンテナの位相の制御によってアンテナに指向性パターンを形成し、特定方向に対するアンテナ利得を増加／減少させる技術。
^{*4} マクロセル：セルとは移動通信システムにおいて、1つの基地局アンテナがカバーするエリアであり、マクロセルはカバーされるエリアが比較的広いセル（半径500m程度以上）のこと。

イト」で行ったもので、東京スカイツリー天望デッキ®フロア340に設置した実験用無線基地局（写真1(a)）と、基地局から約1.2km離れた東武鉄道浅草駅の駅ビル屋上に設置した携帯電話端末に相当する移動局装置（写真1(b)）との間で上下リンクの通信を行った。

本実験の中心周波数は27.9GHzとした。OFDM

(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*6 信号のサブキャリア*7間隔は60kHzで、システム帯域幅として700MHz（100MHz/CC（Component Carrier）*8×7）を適用した。

今回の実験では、5Gのキー技術の1つである多数のアンテナ素子を用いるMassive MIMO（Multiple



写真1(a) 5G基地局装置（東京スカイツリー天望デッキ）



写真1(b) 5G移動局装置（東武鉄道浅草駅ビル屋上）

- *5 東京スカイツリー®：「東京スカイツリー」「東京スカイツリー天望デッキ」「東京スカイツリータウン」は、東武鉄道(株)、東武タワースカイツリー(株)の登録商標。
- *6 OFDM：デジタル変調方式の1つで、情報を複数の直交する搬送波に分割して並列伝送する方式。高い周波数利用効率での伝送が可能。

- *7 サブキャリア：複数の搬送波で情報ビットを並列伝送するマルチキャリア変調方式におけるそれぞれの搬送波。
- *8 CC：キャリアアグリゲーションにおいて束ねられるキャリアを表す用語。

Input Multiple Output) によって、東京スカイツリーから浅草駅方向に向けてのビームフォーミングを行った。Massive MIMOとは、高周波数帯を用いる5Gにおいて、100素子を超えるような多数のアンテナ素子を用いて鋭いビームを形成し、電波の強度を移動局の方向に向けて強めることができる技術である。

2.2 実験結果とデモンストレーション

本実験では、下りリンク（基地局から移動局方向）および上りリンク（移動局から基地局方向）それぞれについて、最適な時分割複信（TDD：Time Division Duplex）^{*9}のロット比率を適用し、移動局装置は静止させた条件でスループット特性の測定を行った。結果として図2に示すように、28GHz帯という高周波数帯であるにもかかわらず、基地局から約1.2km離れた地点において、下りリンクで受信時最大4.52Gbps、上りリンクで受信時最大1.55Gbpsの通信速度を達成した。

また本実験は、2017年12月8～10日に東京ソラマチ^{*10} 5階 スペース634で開催したイベント「docomo 5G Trial Site」（主催：ドコモ）、および、12月8日夜に東京スカイツリー天望デッキで開催された「東

京スカイツリークリスマスラブソングライブ」の様子を浅草駅ビル屋外ビジョンに中継（主催：東武鉄道）するデモンストレーションに合わせて実施した。

「docomo 5G Trial Site」のイベントでは写真2のように、東京スカイツリータウン[®]のイベント会場から離れた浅草駅の駅ビル内にいる人物をAR（Augmented Reality）^{*11}技術を用いてヘッドマウントディスプレイを通して椅子の上に浮かび上がらせ、実際には目の前にはいない人物があたかもその場に存在し、低遅延でリアルタイムに会話することができるという、将来の新しいコミュニケーションを想定したデモンストレーションを行った。また、12月8日夜のイベントでは、雨天の影響により、写真3のように浅草側からはスカイツリーの展望台から上部がほとんど見えないような状況であったにもかかわらず、途切れることなく3Gbps以上の通信速度を達成し、浅草駅ビル屋外ビジョンへの中継デモを成功させた。

3. 39GHz帯を用いた横浜みなとみらい地区での5G長距離伝送実験

ファウエイとの本共同実験では、2020年以降の5Gの継続的な発展も考慮し、さらに高い周波数帯



下りリンク



上りリンク

図2 達成した通信速度（下りリンク／上りリンク）

^{*9} TDD：双方向の送受信方式の1つ。上りリンクと下りリンクに同一の周波数帯を使用し、異なる時間を割り当てることにより双方向通信が可能。

^{*10} 東京ソラマチ：東武鉄道株の登録商標。

^{*11} AR：現実世界を写した映像に、電子的な情報を実際にそこにあるかのように重ねて、ユーザに提示する技術。



写真2 5Gイベントでのデモンストレーションの様子



写真3 雨天での実験風景（浅草駅ビル屋上）

である39GHz帯を用いた5Gの長距離伝送に挑戦した [4].

3.1 適用技術の概要

本実験の周波数帯は39.5GHzから40.9GHzとした。OFDM信号のサブキャリア間隔は120kHzで、シス

テム帯域幅として1,400MHz（200MHz/CC×7）を適用した。

39GHz帯という高周波数帯で1kmを超える長距離伝送を実現するため、本実験ではメタマテリアル^{*12}を応用したレンズアンテナ^{*13}を用いて、無指向性アンテナの1,000倍以上に相当する超高利得なビームフォーミング（31dBi（decibel isotropic）^{*14}）を実現した。このレンズアンテナでは、メタマテリアルにより特定の誘電率の分布を形成し、より小型のアンテナでMassive MIMO同様にアンテナから出射される電波を特定の方向に集中させるビームフォーミングが実現できる。また、アンテナ内部に電波を放出する放射源を複数用意し、これを切り替えることでビームの送信方向を変更することができる。本実験では、図3に示すように、水平方向に8通り、垂直方向に8通りの全64個の候補ビームから最適なビームを選択する。各候補ビームの半値幅^{*15}は3.5°程度である。基地局および移動局における各ビームの組合せの受信品質を測定し、最も良いものを選択することにより、信号の受信品質を向上させることができる。

本実験で用いた無線フレーム^{*16}構成を図4に示す。本実験では、無線フレーム長は10msとし、スロット長は0.125msとしたため、1無線フレーム内には80スロットが含まれる。非常に短いスロット時間を用いる無線フレーム構成を採用することにより、基地局および移動局における最適ビーム探索に必要な時間を可能な限り短縮している。1無線フレーム内には以下の4種類のスロットが用いられる。

- ①DLビーム走査スロット（DownLink beam sweeping slot）：下りリンクの参照信号を用いて、ビームの探索が可能なスロットである（例：図4（Slot #0））。
- ②DLスロット（DL slot）：下りリンクのデータ送信に用いられるスロットであり、データ信号および制御信号が含まれる（例：図4（Slot #1））。

*12 メタマテリアル：電磁波に対して自然界の物質にはない振る舞いをする人工物質のこと。

*13 レンズアンテナ：光学で用いられるレンズのように特定方向に鋭く電波を集中させるアンテナのこと。レンズアンテナは放射器から広く放射された電波をうまく屈折させて位相揃えることにより、ある方向に鋭く電波を放射させることができる。

*14 dBi：仮想的な等方向性（アイソトロピック）アンテナを基準とした際のアンテナ利得を表す単位。

*15 半値幅：アンテナから放射されている電力がその最大値から半分になるまでの角度範囲。指向性の鋭さを表す。

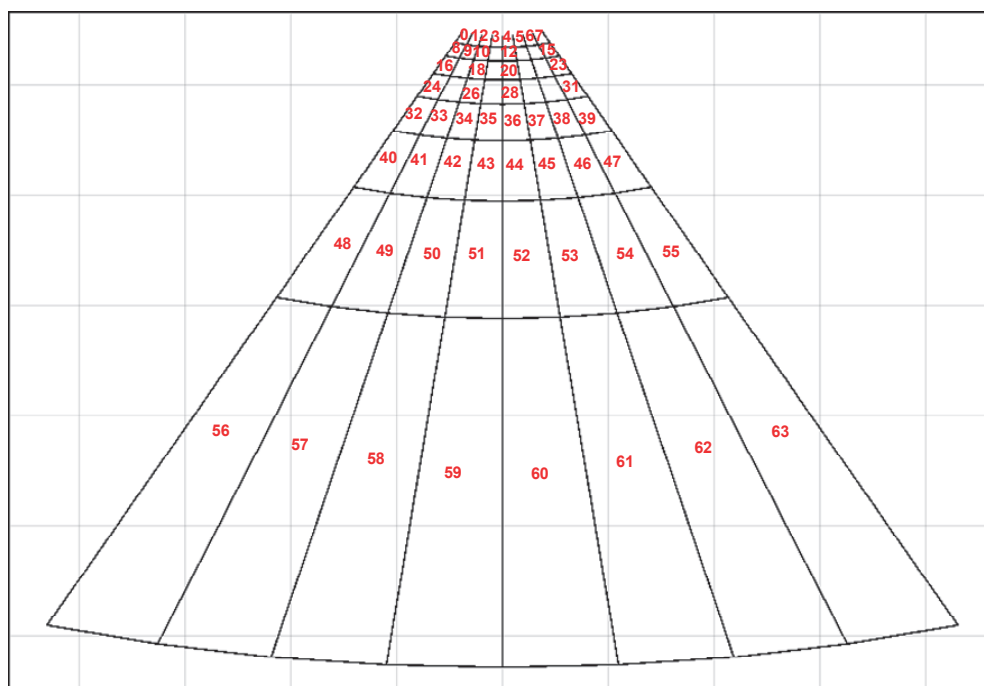


図3 全64個の候補ビーム

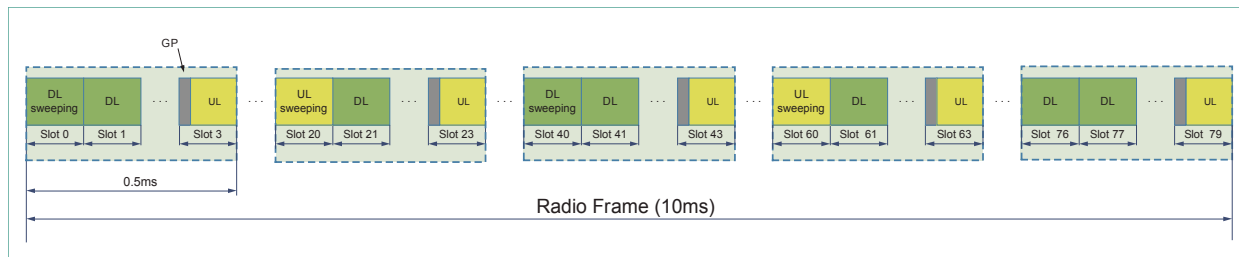


図4 無線フレーム構成

- ③ULスロット (UpLink slot)：上りリンクのデータ送信に用いられるスロットでありガード区間 (GP：Guard Period)、データ信号および制御信号が含まれる (例：図4 (Slot #3))。
- ④ULビーム走査スロット (UL beam sweeping slot)：上りリンクの参照信号を用いて、ビームの探索が可能なスロットである (例：図4 (Slot #20))。

ビーム探索および追従制御は、DLおよびULの Beam sweeping slotに含まれる参照信号を用いて各ビームの組合せごとの受信品質を測定する。ビーム走査スロットは2.5msごとに上下リンク交互に送信され、全ビームの組合せ (4,096通り=64通り (基地局側)×64通り (移動局側)) の探索を160msで行う設計となっている。これにより、基地局側および移動局側のそれぞれにおける送受信の最適な

*16 無線フレーム：信号処理 (符号化・復号化) を行う最小単位。
1個の無線フレームは、時間軸上で複数のスロット (またはサブフレーム) によって構成され、各スロットは時間軸上で複数のシンボルによって構成される。

ビームを、移動局の移動や無線チャネル変動に合わせてダイナミックに更新することができる。

本実験装置ではQPSK (Quadrature Phase Shift Keying)^{*17}、16QAM (Quadrature Amplitude Modulation)^{*18}、64QAM^{*19}をサポートし、適応変調を採用した。また、Large delay CDD (Cyclic Delay Diversity)^{*20}を適用し、垂直・水平偏波を用いた2×2

MIMO^{*21}伝送を行う。

3.2 実験結果

本実験を神奈川県横浜市みなとみらい地区で2017年11月に実施した。伝送実験装置の外観を写真4に、実験環境を図5に示す。

本実験装置を用いた屋外実電波環境において図5



5G基地局装置



5G移動局装置（測定車内）

写真4 基地局装置および移動局装置の外観

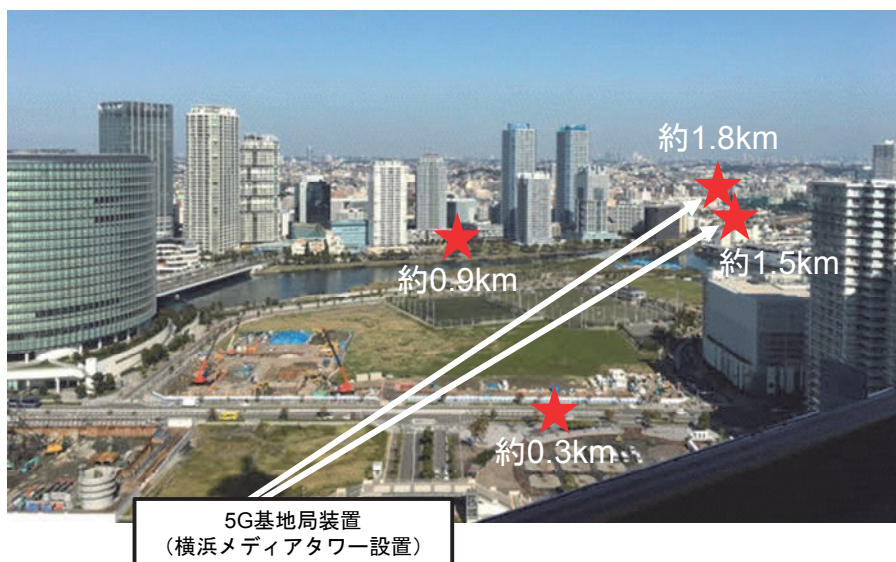


図5 実験環境（横浜メディアタワー周辺）

^{*17} QPSK：デジタル変調方式の1つで、4つの位相にそれぞれ1つの値を割り当てることにより、同時に2bitの情報を送信可能。

^{*18} 16QAM：デジタル変調方式の1つ。位相と振幅の異なる16通りの組合せに対してそれぞれ1つの値を割り当てることにより、同時に4bitの情報を送信可能な変調方式。

^{*19} 64QAM：デジタル変調方式の1つ。位相と振幅の異なる64通り

の組合せに対してそれぞれ1つの値を割り当てることにより、同時に6bitの情報を送信可能な変調方式。

^{*20} Large delay CDD：送信ダイバーシチ技術の1つで、送信アンテナ間で同一のデータ信号に異なる長い巡回遅延量を付与して送信することにより、シンボル間干渉を回避しながら、周波数ダイバーシチを得る方式。

表1 基地局装置からの距離対スループット特性

移動局装置の条件	基地局装置からの距離 (km)	スループット (最高値Gbps)
移動時 (時速約20km)	1.5	2.02
静止時	1.5	3.35
	1.8	2.14
	0.9	3.78
	0.3	5.63

に示す各測定条件の移動局におけるスループットの測定結果を表1に示す。結果より、横浜メディアタワーに設置したファウエイの5G基地局から約1.5km離れた地点において、移動時（時速約20km）で受信時最大2.02Gbps、静止時で受信時最大3.35Gbpsの超高速通信を達成した。また、5G基地局から約1.8km離れた距離でも、静止時で受信時最大2.14Gbpsを、また、5G基地局から約0.3km離れた距離では受信時最大5.63Gbpsの超高速通信を達成した。

一般に、ミリ波帯を移動通信や長距離伝送に用いるとカバレッジの確保が難しいとされているが、高速なビーム切替え・追従技術や高いビームフォーミングゲインを有する本伝送実験装置を用いて、1km以上のエリアにおいても、2Gbps以上のスループット特性を実現できることが確認できた。移動ありの場合、移動なしと比較してUEの移動によるスループット特性の劣化が見られたものの、2Gbps以上のスループットを維持することができた。

4. あとがき

本稿では、5G無線アクセスの伝送実験装置を用いたミリ波帯（28GHz帯および39GHz帯）における

屋外長距離伝送実験の概要および結果について報告した。結果、基地局から1km以上の伝送距離において数Gbpsの高いスループットを達成した。これらの成果により、電波の減衰が大きく、遠くに伝搬させることが困難だと考えられてきた高周波数帯の電波を、都市部に比較してより長距離伝送が必要とされる地方、郊外、山間部など、より多様な環境で利用することができる技術を実証することができた。今後は、見通し外などにおいてミリ波のカバレッジをより拡大していくための屋外実験を予定している。

文 献

- [1] Cisco Whitepaper: "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update," 2010 - 2015.
- [2] NTTドコモ: "ドコモ5Gホワイトペーパー," Sep. 2014.
https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_5g/index.html
- [3] NTTドコモ報道発表資料: "東京スカイツリーから浅草への28GHz帯を用いた5G長距離伝送実験に成功," Dec. 2017.
https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news_release/topics/topics_171207_00.pdf
- [4] NTTドコモ報道発表資料: "39GHz帯を用いる5G移動通信の長距離伝送実験に成功," Dec. 2017.
https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news_release/topics/topics_171211_00.pdf

*21 MIMO: 送信データをあらかじめ複数の信号（ストリーム）に分割し、送信機と受信機の双方で複数のアンテナを使い、それらを同じ周波数帯域で送受信する無線通信方式。

オペレータ間連携によるGSMA3.1準拠IoT/M2M向けeSIM商用化システムの構築

ソリューションサービス部 まきの こうじ きし だいichi
IoTビジネス部 牧野 弘治 岸 大智
べん ぐん 軍

ドコモは、IoT/M2M製品に関するグローバル化の流れを踏まえ、海外オペレータと連携してSIMの情報を柔軟に書き換えることができるマルチベンダeSIM連携システムを、世界で初めて構築した。

本稿では、IoT/M2M向けeSIMを実現するための仕組みについて解説する。

1. まえがき

ドコモと中国の通信事業者であるチャイナモバイル（China Mobile Communications Corporation）は、異なるベンダ間でのeSIM（embedded Subscriber Identity Module）^{*1}連携システムを2017年6月に開発完了した。本システムは、GSMA（GSM Association）^{*2}により策定された仕様「Remote Provisioning Architecture for Embedded UICC Technical Specification Version 3.1」（以下、GSMA3.1）に基づくものであり、商用環境における世界初のマルチベンダ間IoT（Internet of Things）^{*3}/M2M（Machine to Machine）^{*4}向けeSIM連携システムとなる [1]。

ドコモでは自動車や建機、産業機器などの海外展

開におけるBtoB（Business to Business）向けソリューションとして本技術の導入を行っている。

本稿では、GSMA3.1の標準仕様をベースとして構築したRemote Provisioning^{*5}のシステムの仕組みを解説する。

2. IoT/M2M向けeSIM

2.1 従来技術との違い

IoT/M2Mの世界では、小型化や部品点数削減による高耐久性の実現といった実装上の要件から、IoT/M2M製品に実装されているデバイス^{*6}に直接SIMを埋め込み、取外しができないような設計が主流になってきている。また、これらのIoT/M2Mにおけるビジネスはグローバル化の流れがあり、製品

*1 eSIM：一般的なSIMとは異なり、無線通信（OTA：Over-The-Air）によって遠隔から通信事業者の通信プロファイルの情報を書き換えることのできるSIMの総称。

*2 GSMA：モバイル通信事業における世界的な標準化団体。

を各国の現地キャリアの通信サービスで利用したいというニーズも高まっている。

しかしながら、従来の技術ではSIMに書き込まれているMNO（Mobile Network Operator）^{*7}の情報は固定されており、書換えを行うことは不可能であったため、海外利用では現地キャリアのSIMに差し替えるかローミング^{*8}などで対応せざるを得なかった。

製品に組み込まれたSIMの差替えを行わず、各国の現地キャリアの通信サービスを利用したいというニーズの高まりに伴い、書き込まれたMNOの情報を柔軟に変更する技術がGSMAで標準化された[2][3]。ドコモもアーキテクチャの検討に携わった事業者の1つである[4]。

2.2 コンシューマ向けeSIMとの違い

eSIMのサービスで用いられる技術としては、大

きく分けてコンシューマ向けとIoT/M2M向けの2つが存在している[5]。これらは用途および標準規定が異なっている。これらの比較を図1に示す。

コンシューマ向けeSIMの技術は、ユーザ自身による開通処理を、購入した端末の初回起動時における端末初期設定の中で簡易な端末操作のみで可能とする用途に用いられている。コンシューマ向けeSIMで用いられている技術もGSMAにて規定されている[6]～[9]。

IoT/M2M向けのeSIMの技術は、通信事業者の切替えを遠隔のサーバ側から起動する用途に用いられる。

図1に示す通り、コンシューマ向けeSIMでは端末操作によりプロフィール^{*9}のダウンロードが行われるが、IoT/M2M向けeSIMでは通信事業者がもつIoT回線管理プラットフォームからのリクエストによりプロフィールのダウンロードが行われる。

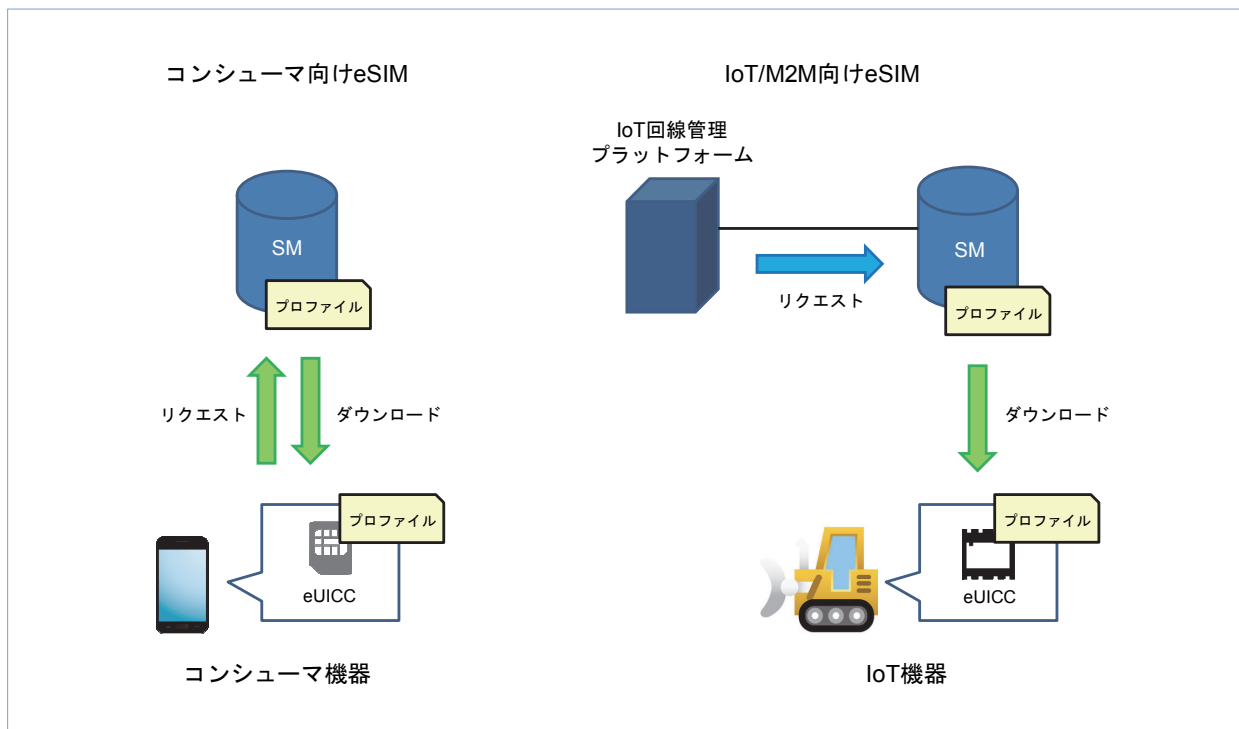


図1 コンシューマeSIMとIoT/M2M向けeSIMの違い

*3 IoT：あらゆる「モノ」がインターネットに接続されることで、これまで実現されていなかったさまざまな情報共有を行うことができる仕組み。
 *4 M2M：機器間での通信。
 *5 Remote Provisioning：OTAによって遠隔から通信プロフィールを書き換えること。

*6 デバイス：本稿ではM2Mモジュールなどのモバイル通信機能をもつ機器のことを指す。
 *7 MNO：移動通信事業者。
 *8 ローミング：利用者が契約している通信事業者のサービスエリア外でも、提携事業者のサービスエリア内であれば、契約している事業者と同様のサービスを利用できる仕組み。

2.3 ユーザエクスペリエンス

日本国内の工場で生産され、初期状態としてドコモ回線が設定された製品を日本国内からの輸出するケースを1例として、Remote Provisioningのユーザエクスペリエンス^{*10}について解説する。このような例はBtoB向けソリューションとして実際にニーズが生じている。

初めに、ユーザはドコモに対してeSIMの発行申請を行い、ドコモからeSIMを受領する。次に、ユーザ自身でeSIMを製品に組み込み、ドコモ回線としてアクティベートを行い通信可能な状態にした後に、日本国内にて製品の出荷試験などを行う。eSIMが組み込まれた製品の海外出荷後は、ドコモ回線としてローミングを開始する。その後、ユーザが移行したい回線と切替先キャリアを指定しトリガをかけることで、指定された回線のRemote Provisioningがローミング経由で行われる。それが完了すると、現地キャリアの回線として通信が可能な状態になり、その通信サービスが利用可能となる。

2.4 GSMA3.1対応による効果

GSMA3.1 [3] では以下の標準が規定されていて、理論上Remote Provisioning Architectureにおけるコンポーネント間でのマルチベンダによる接続が実現可能となっている。

- ・ eUICC (embedded Universal Integrated Circuit Card)^{*11}のアーキテクチャ
- ・ Remote Provisioning Architectureにおけるインタフェース
- ・ Remote Provisioning Architectureにおけるセキュリティ機能

GSMA3.1に対応することによるMNOのメリットとしては、SM (Subscription Manager)^{*12}とeUICCをマルチベンダでシステム構築可能な点が挙げられ、また、ユーザメリットとしてはRemote Provisioning

を実現するうえで機器に組み込むデバイスの条件が明確になり、今後の対応デバイスの増加が見込めることなどが挙げられる。

なお、現在、Remote Provisioning Architecture for Embedded UICC Technical Specificationのバージョン最新版は3.2となっている [10]。

3. IoT/M2M向けeSIMを実現する仕組み

3.1 構成および動作概要

ドコモがチャイナモバイルと構築したシステムでは、GSMA3.1で規定されている構成のうちの1つが採用されている。構成および動作概要を図2に示す。

SMはSM-DP (SM Data Preparation) とSM-SR (SM Secure Routing) の2つの機能に分離されている。それぞれの機能の概要は次の通りとなる。

- ・ SM-DP : MNOの通信プロファイルをセキュアに格納する
- ・ SM-SR : EIS (eUICC Information Set) を保有し、eUICCとの間のセキュアな通信を確立する

図2では、eUICCが最初に所属するMNOをMNO1 (例：ドコモ) とし、MNO1からMNO2 (例：チャイナモバイル) へと通信プロファイルを切り替える様子を示している。

図におけるMNO1とMNO2の通信プロファイルは、それぞれのSM-DPに格納されている。

本図の例のような構成の場合、Remote Provisioningは以下の手順で行われる。

- ・ SM-SR Change (図2①～⑥)
- ・ Profile DownloadとProfile Enable (図2⑦)

切替先の通信プロファイルのダウンロードを、切替先のMNOに所属しているSM-SRを経由して行う必要がある場合は、Remote Provisioningの手順上

^{*9} プロファイル：電話番号や加入者識別番号などの各種情報や、ネットワーク情報などを集約したデータ。

^{*10} ユーザエクスペリエンス：製品やサービスなどを使用・消費・所有した際に、ユーザが体験できる内容。

^{*11} eUICC：組込みUICC、またはRemote Provisioning可能なUICCのこと。本稿ではRemote Provisioningの仕組みの説明で

用いている。なお、UICCは加入者を特定するための固有のID番号が記録されたICカード、SIMカードと同義で使用している。

^{*12} SM：遠隔でeUICCの通信プロファイルを書き換えるサーバ。

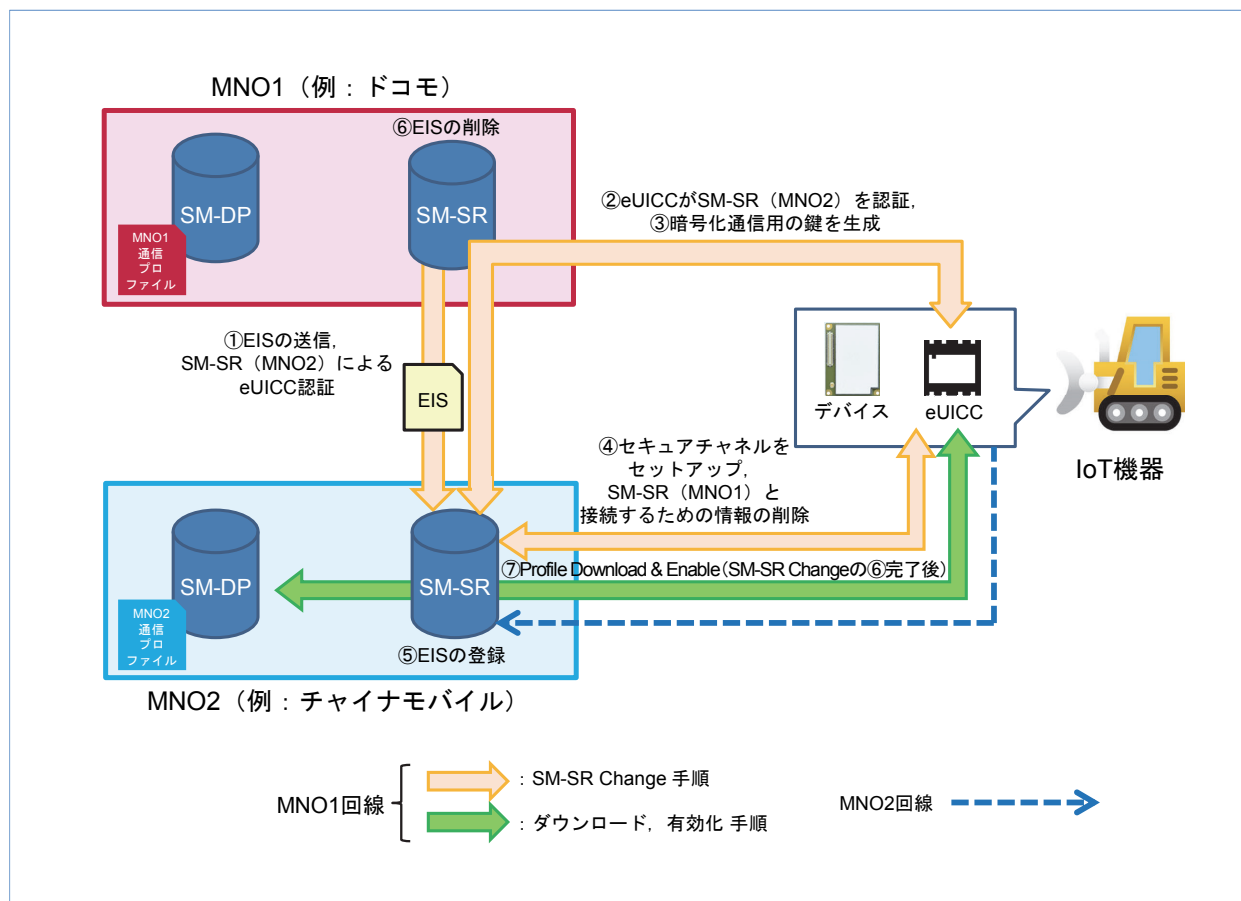


図2 構成および動作概要

SM-SR Changeの手順が必要となる。

なお、GSMA3.1の規定では、SM-DPとSM-SRは本図の例で示す構成に限定されているわけではないことを付記しておく。

3.2 SM-SR～eUICC間通信経路の概要

次にSM-SR～eUICC間の通信経路の一般的な構成例を解説する。

(1)通信経路の種別

SM-SR～eUICC間の通信経路を図3に示す。

GSMA3.1では、SM-SR～eUICC間においてSMSとパケット（HTTPS^{*13}）による通信手段が規定されている。

SMSはサイズの小さいRemote Provisioningのコマンド送受信で利用され、パケット（HTTPS）はサイズの大きいRemote Provisioningのコマンド送受信で利用される。

なお、パケット（HTTPS）については当該通信経路の確立の前段で、SM-SR側からeUICCに対して、プッシュ型のBIP channel（Bearer Independent Protocol channel）確立を指示するSMSを送信することにより、BIP channelがeUICCとデバイスの間で確立される。

(2)SM-SR～IoT回線管理プラットフォーム^{*14}間構成

SM-SRとMNOがもつIoT回線管理プラットフォームのコンポーネント間は次のように構成される。

^{*13} HTTPS：TLSのプロトコルを用いてHTTPの通信を行うことになりすまし・中間者攻撃・盗聴などの攻撃を防ぐ通信手法。GSMA3.1ではHTTPS以外にもCAT-TP（Card Application Toolkit Transport Protocol）によるパケット通信方法も規定されている。

^{*14} IoT回線管理プラットフォーム：IoT/M2Mの機器を管理し収容するプラットフォーム。

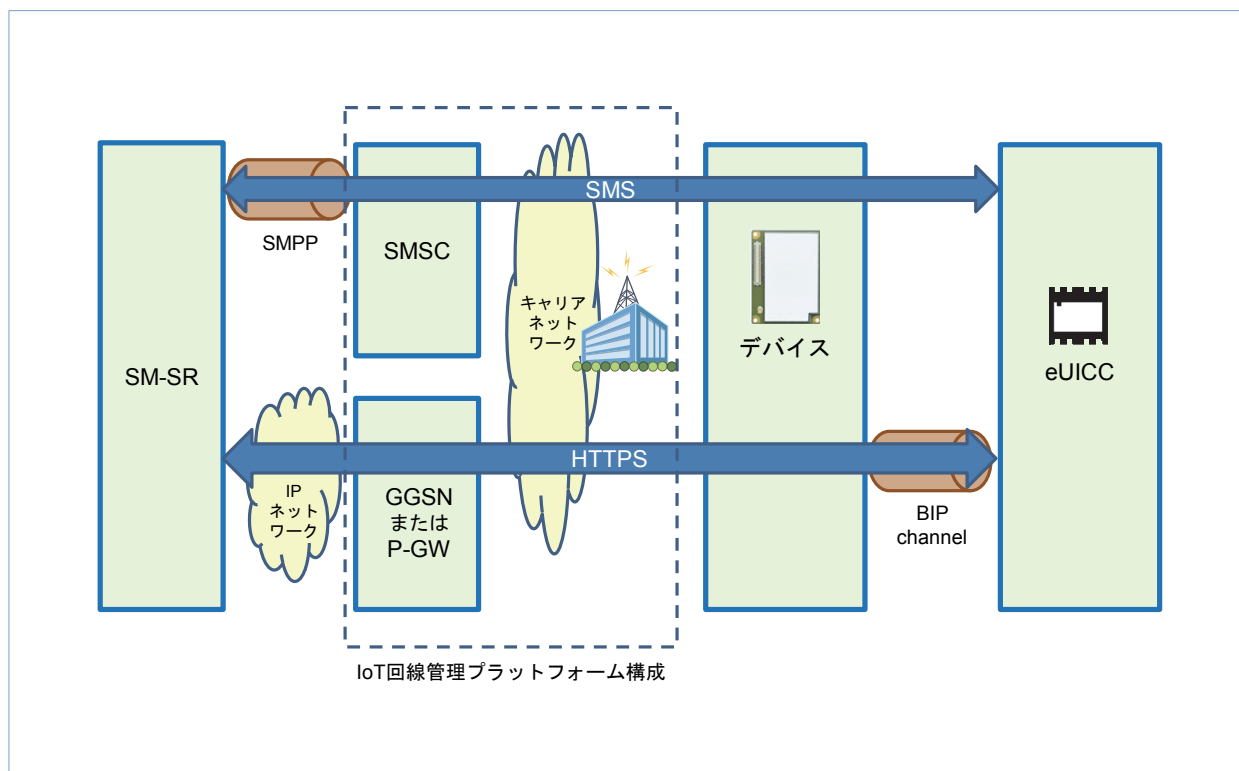


図3 SM-SR～eUICC間通信経路

- ・ SM-SRとeUICC間でSMSによるコマンドの送受信が可能となるようSM-SRとSMSC（SMS Center）^{*15}の間がSMPP（Short Message Peer to Peer Protocol）^{*16}で接続される。
 - ・ SM-SRとeUICC間でパケットによるコマンドの送受信が可能となるようSM-SRとパケット交換機（GGSN（Gateway GPRS Support Node）^{*17}またはP-GW（Packet Data Network-Gateway）^{*18}の間がIPで接続される。
- (3)IoT回線管理プラットフォーム～デバイス間構成
通常のGSM（Global System for Mobile communications）^{*19}/UMTS（Universal Mobile Telecommunications System）^{*20}/LTEによる構成となるため詳細の説明は割愛する。
- (4)デバイス～eUICC間構成
SM-SR～eUICC間におけるHTTPSの通信のため

に、デバイスとeUICCの間はBIP [11] [12] のプロトコルによる通信が必要となる。デバイス側ではBIP対応をはじめとするGSMA3.1 Annex G Device Requirementsに対応している必要がある。

3.3 Remote Provisioningシーケンス概要

(1)Remote Provisioningに必要な情報要素

Remote Provisioningの仕組みに必要な主な情報要素として以下が存在する。

- ・ EID（eUICC ID）：eUICCの製造番号。EIDにより対象となるeUICCを特定する。
- ・ EIS：eUICCの認証情報およびeUICCにアクセスするための情報の組合せで、SM-SRに格納される。対応するEISが登録されているSM-SRのみが当該eUICCに対してコマンドを発行できる。

^{*15} SMSC：SMSのセンタサーバ。SMSの蓄積、および再送を行う。

^{*16} SMPP：SMSのセンタサーバとSMS送受信用のアプリケーション間で利用される通信プロトコル。

^{*17} GGSN：PDNとの接続点であり、IPアドレスの割当てや、SGSNへのパケット転送などを行うゲートウェイ。

^{*18} P-GW：PDNとの接続点であり、IPアドレスの割当てや、S-GWへのパケット転送などを行うゲートウェイ。

^{*19} GSM：ヨーロッパやアジアを中心に世界中で広く利用されている、第2世代移动通信方式の1つ。

^{*20} UMTS：第3世代移动通信システム。ドコモ採用のW-CDMA方式のほか、TD（Time Division）-CDMA方式などがある。

(2) Remote Provisioningシーケンス

Remote Provisioningのシーケンスを図4および図5に示す。

SM-DP/SM-SRとeUICCは、互いに共通の認証局(CI: Certificate Issuer)^{*21}によって証明されている認証情報があらかじめ内部に設定されており、SM-SR Change手順およびProfile Download手順においてセキュアに相互認証が取れるよう設計されている。

eUICCにはISD-R (Issuer Security Domain Root) とISD-P (Issuer Security Domain Profile) の領域が規定されている。

- ・ ISD-R: eUICC上で1つのみ存在し、SM-SRとコマンドの通信を行う。
- ・ ISD-P: プロファイルが格納される領域。eUICC上で複数存在し、SM-DPとコマンドの通信を行う。

ISD-R/ISD-P共に必要な認証情報へのアクセスが可能となっている。

(3) SM-SR change手順 (図4)

eUICCの製造時の段階では、最初にホストとなるSM-SRにEISが登録されており、eUICCにアクセス

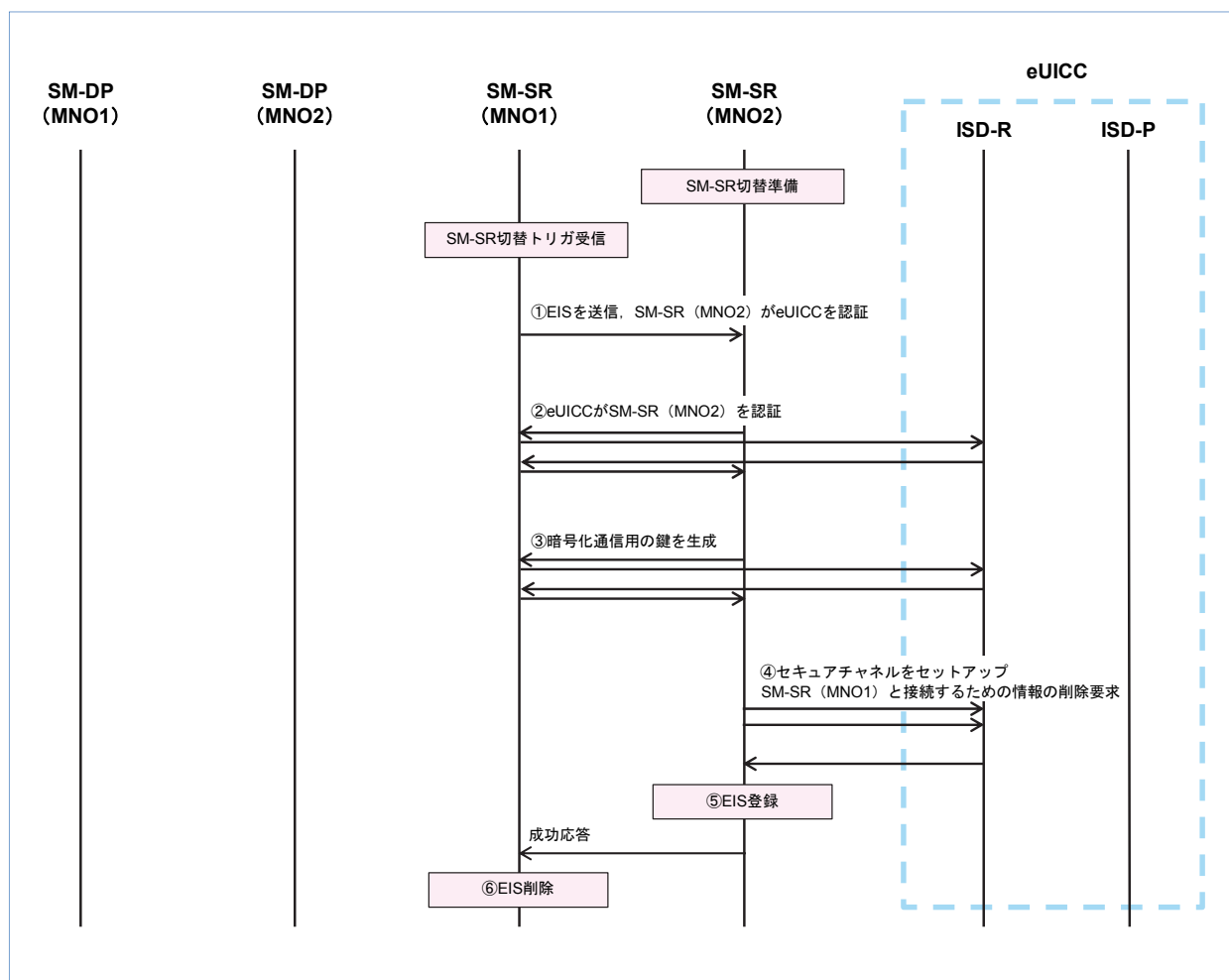


図4 SM-SR Change手順概要

^{*21} 認証局 (CI): セキュアなRemote Provisioningを実現するために必要な電子署名を発行する役割をもつ。

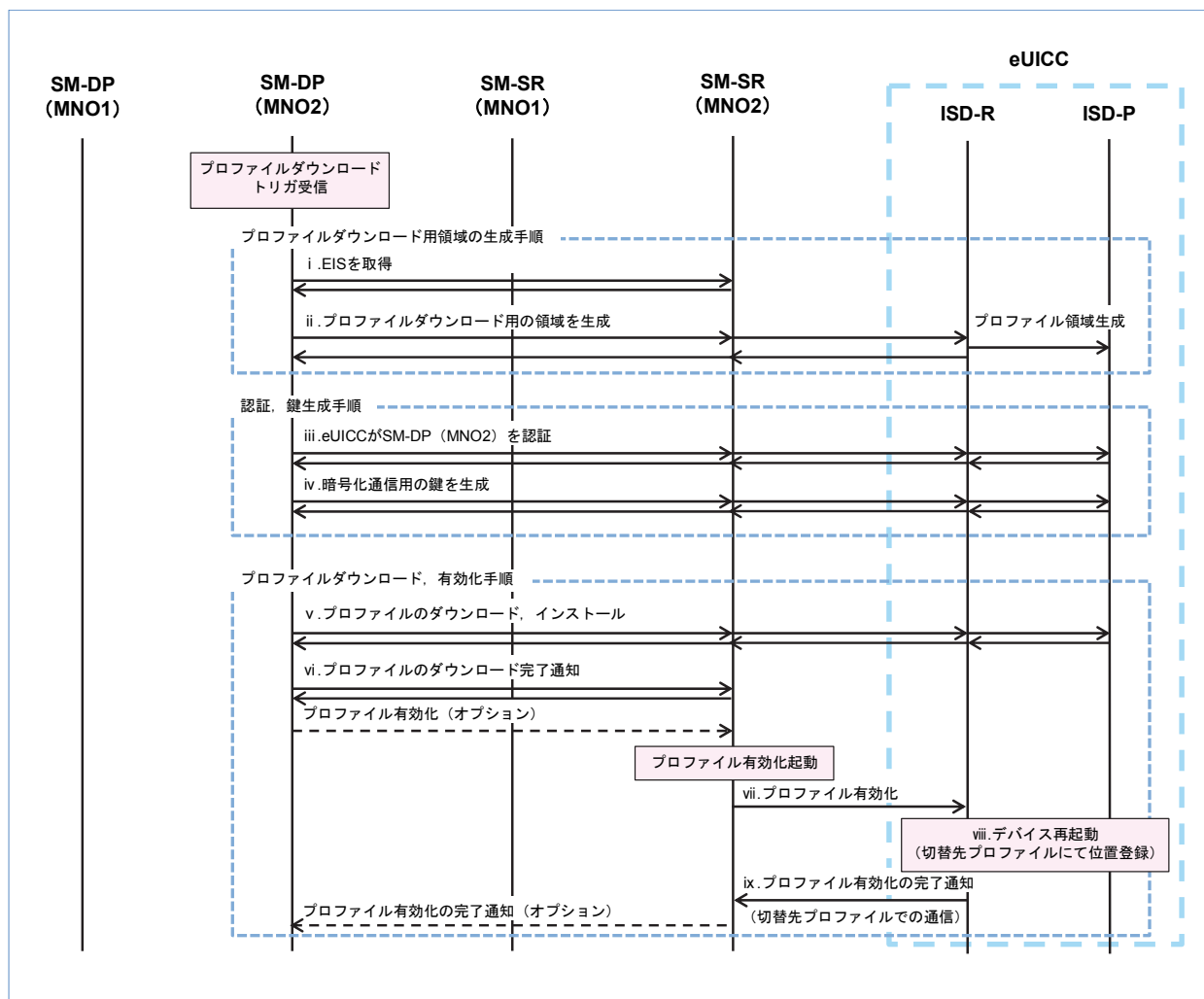


図5 Profile Download & Enable手順概要

するための管理権限をもっている。SM-SR Change 手順が実施されればEISの格納先のSM-SRが切り替わり管理権限が移る。

SM-SR changeの手順は、図4に示すようにSM-SR (MNO1) からSM-SR (MNO2) にeUICCとの通信の管理権限を移譲する手順であり、以下の順番で実行される。

- ①SM-SR (MNO1) がSM-SR切替トリガを受信後、SM-SR (MNO1) からSM-SR (MNO2) へEISが渡される。SM-SR (MNO2) がEISに基

づきeUICCの認証を行う。

- ②SM-SR (MNO1) を介しSM-SR (MNO2) とeUICCのISD-Rとの間で通信が行われ、eUICCがSM-SR (MNO2) を認証する。
- ③SM-SR (MNO1) を介しSM-SR (MNO2) とeUICCのISD-Rとの間で通信が行われ、SM-SR (MNO2) とeUICC間の暗号化通信用の鍵が生成される。
- ④SM-SR (MNO2) とeUICCのISD-Rとの間でセキュアチャンネルをセットアップ後、SM-SR

(MNO1)と接続するための鍵情報が削除される。

- ⑤SM-SR (MNO2)にてEISの登録が行われる(本時点からSM-SR (MNO2)に管理権限が移る)。
- ⑥SM-SR (MNO1)にてEISが削除される(SM-SR (MNO1)からはeUICCにアクセスできなくなる)。

(4)Profile Download & Enable手順概要(図5)

Profile Downloadの手順により切替先のMNOの通信プロファイルの情報がeUICCにダウンロードされる。その後、Profile Enableの手順により切替先のMNOの通信プロファイルへの切替えがeUICCに指示される。

図5に示す通りProfile Download & Enableは、通信Profileを切り替えるために以下の順番で実行される。

- i. SM-DP (MNO2)がプロファイルダウンロードトリガを受信後、SM-SR (MNO2)からEISを取得し、手順開始前の必要なチェックを行う。
- ii. SM-DP (MNO2)とeUICCとの間で通信が行われ、プロファイルダウンロード用の領域がeUICCのISD-Pとして生成される。
- iii. SM-DP (MNO2)とeUICCとの間で通信が行われ、eUICCがSM-DP (MNO2)を認証する。
- iv. SM-DP (MNO2)とeUICCとの間で通信が行われ、SM-DP (MNO2)とeUICC間の暗号化通信用の鍵が生成される。
- v. SM-DP (MNO2)とeUICCとの間で通信が行われ、プロファイルがダウンロードされISD-Pにインストールされる。
- vi. SM-DP (MNO2)からSM-SR (MNO2)に対して、プロファイルのダウンロード完了通知が送信される。
- vii. SM-SR (MNO2)とeUICC内のISD-Rとの間

で通信が行われ、ダウンロードしたプロファイル有効化のコマンドが送信される。

- viii. プロファイル有効化のコマンドを受信したISD-Rは、デバイスに対して再起動の指示を行い、デバイス再起動後はダウンロードした新しい通信プロファイルで位置登録が行われる。
- ix. 新しい通信プロファイルでの位置登録に成功した後、ISD-RはSM-SRに対しプロファイル有効化の完了通知を行う。

4. あとがき

本稿ではGSMA3.1の標準をベースとして構築したRemote Provisioningのシステムの仕組みを解説した。今回、商用のシステムにおいてGSMA3.1の標準に対応したSMを備えたNWサービスが提供できる環境を整え、システムの結合検証を行った。

GSMA3.1では理論上はマルチベンダでの接続が可能となっている。今回のシステムを構築するにあたり、マルチベンダによる実装上の解釈の違いといった課題も一部発生したが、ドコモとチャイナモバイル間で連携することで早期に解消を図り、GSMA3.1の標準仕様を適用した、マルチベンダによるeSIMシステムを世界で初めて実現した。

現時点においては、eSIMサービスを受けるために必要なGSMA3.1準拠のデバイスがまだ少ないことなど、eSIMサービスの本格的な普及に向けていくつか課題が存在する。また、実際に製品に組み込まれ商用導入を予定するデバイスとのシステム結合試験も必要となる。今後については、これらの課題に対し、継続して取組みを進めていく予定である。

文 献

- [1] NTTドコモ報道発表資料：“チャイナモバイルとドコモが世界初のIoT/M2M向けマルチベンダ間eSIM連携システムを開発,” Jun. 2017.

- https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2017/06/27_02.html
- [2] GSM Association: "Embedded SIM Remote Provisioning Architecture, Version 1.1," Dec. 2013.
 - [3] GSM Association: "Remote Provisioning Architecture for Embedded UICC Technical Specification, Version 3.1," May 2016.
 - [4] 鈴木, ほか: "Embedded UICC Remote Provisioningの標準化状況," 本誌, Vol.22, No.2, pp.36-41, Jul. 2014.
 - [5] 笹川, ほか: "利用シーンを拡大するコンシューマ機器向けeSIMの導入," 本誌, Vol.25, No.2, pp.6-13, Jul. 2017.
 - [6] GSM Association: "RSP Technical Specification, Version 2.2," Sep. 2017.
 - [7] GSM Association: "RSP Architecture, Version 2.0," Aug. 2016.
 - [8] GSM Association: "RSP Technical Specification, Version 1.1," Jun. 2016.
 - [9] GSM Association: "RSP Architecture Version1.0," Dec. 2015
 - [10] GSM Association: "Remote Provisioning Architecture for Embedded UICC Technical Specification, Version 3.2," Jun. 2017.
 - [11] ETSI TS 102 226 Release9: "Smart Cards; Remote APDU structure for UICC based applications," Jun. 2009.
 - [12] SIMalliance: "UICC Configuration for Mobile NFC Payments v1.0," Aug. 2014.

国際会議：IEEE GLOBECOM 2017 「Best Paper Award」受賞

DOCOMO Innovations, Inc.のChenwei Wang, 共同研究者University of Southern California大学のKiamari氏, Avestimehr氏は, 2017年12月4~8日にシンガポールで開催された国際会議 IEEE GLOBECOM 2017 (Institute of Electrical and Electronics Engineers Global Communications Conference 2017) において「Best Paper Award」を受賞しました。

IEEE GLOBECOMは, 世界最大の技術系学会米国IEEEの主要ソサイエティである通信ソサイエティが主催するICC (International Conference on Communications) と並ぶフラッグシップ会議であり, 1957年に第1回目の会合が開催されてから, 本会議は60周年を迎えました。近年では, 学術論文発表を行うテクニカルセッションに加えて Industry Programが追加され, 産業界の最新アイデア, テレコム, 製品イノベーションについて意見交換を促進しています。

本会議には2,630件が投稿され, 採録論文は1,026件 (39%), さらに各分野から特に業績が優れた論文15件に対し「Best Paper Award」が贈られました。今回受賞対象となった論文は, 通信理論分野で発表された「On Heterogeneous Coded Distributed Computing」です。

モバイルエッジコンピューティングは, クラウドよりユーザに対して非常に近い位置にコンピューティングリソースを実装することで, 低遅延の実現や単位面積当りの高スループットの達成をめざしています。本論文では, 5G/Beyond 5Gでの低遅延と高スループットを満たすための分散符号化技術に取り組んでいます。特にビッグデータ処理に広く使われているMapReduceフレームワークの下で分散符号化を活用することにより, 遅延性能の基本的な

限界を検討しました。具体的には, コンピューティングシステムの通信遅延を最適化するためのデータファイルの分割・割当て, 符号化法およびアルゴリズムの新しいアプローチを考案し解析しています。本技術は, 無線・有線ネットワークを問わず多くのアプリケーションに適用可能です。例えばIoT (Internet of Things) アプリケーションでは複数のセンサを使用してさまざまな情報を収集します。そこでこの新技术を適用することで, 各センサが個々の情報を個別に処理して通信時間の遅延を短縮するだけでなく, 分散符号化をすることによりシステム全体のセキュリティを強化することが可能となります。また自動運転走行へ適用することで, 非常に短い時間で車両センサが得た情報を異なる車両間で交換することにより, 各車両はより広範囲の交通情報を学習することができ, 緊急車両への敏速な対応また周辺事故などへの緊急応答速度 (例えば減速タイミング) を高めることができます。

本論文にて提案された分散処理アルゴリズムと分散符号化理論が高く評価され, 本受賞につながりました。モバイルエッジコンピューティングは, 現在まだ携帯電話システムにおいては実用化前の段階であり, 今後本研究により得られた理論的知見を, ドコモの5G/Beyond 5Gの発展・進化に寄与することが期待されています。



NTT DOCOMO
テクニカル・ジャーナル Vol.26 No.1

平成30年 4 月発行

企画編集 株式会社NTTドコモ R&D戦略部
〒100-6150
東京都千代田区永田町 2-11-1
山王パークタワー39階
TEL. 03-5156-1749

発行 一般社団法人 電気通信協会
〒101-0003
東京都千代田区一ツ橋 2-1-1
如水会ビルディング6階
TEL. 03-3288-0608

本誌掲載内容についてのご意見は
e-mail: dtj@nttdocomo.com宛

本誌に掲載されている会社名、商品名は、各社の商標または登録商標です。

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

© 2018 NTT DOCOMO, INC.