

Technology Reports

4×4 MIMO

256QAM

高度化C-RAN

受信時最大682Mbpsを実現する 4×4 MIMO, 256QAM対応の 無線基地局装置と移動端末の開発

無線アクセス開発部

しげふじ たかふみ
重藤 隆文
ふるた たかゆき
古田 敬幸

とば りんたろう
鳥羽 倫太郎

たきぐち たかひろ
瀧口 貴啓

いそがわ たかゆき
五十川 貴之

移動機開発部

ドコモでは、2015年3月にPREMIUM 4Gとして受信時最大225Mbps、2016年5月にキャリアアグリゲーション技術を拡張し受信時最大375Mbps、同年6月には3.5GHz帯のTDD方式を利用し受信時最大370Mbpsの通信サービスを開始した。今回、さらなる受信速度の向上として、4×4 MIMO技術と256QAM技術に対応した無線基地局装置と移動端末を開発し、導入済のキャリアアグリゲーション技術と組み合わせることで受信時最大682Mbpsとなる通信サービスを2017年3月より開始した。本稿では、4×4 MIMO技術と256QAM技術について解説するとともに、受信時最大682Mbpsを実現する無線基地局装置と移動端末について解説する。

1. まえがき

スマートフォンの普及と、スマートフォンで利用可能な大容量コンテンツサービスの普及とともに、モバイルネットワークの高速化が求められている。

ドコモでは、2015年3月にPREMIUM 4Gとして受信時最大225Mbps、2016年5月にキャリアアグリゲーション（CA：Carrier Aggregation）^{*1}技術を拡張した受信時最大375Mbps、同年6月には3.5GHz帯TDD（Time Division Duplex）^{*2}方式を利用した受信時最大370Mbpsの通信サービスを開始した [1]。

さらに、飛躍的に通信速度が向上する4×4 MIMO（Multiple Input Multiple Output）^{*3}技術と256QAM（Quadrature Amplitude Modulation）^{*4}技術に対応した無線基地局装置と移動端末を開発し、導入済のCA技術と組み合わせることにより、PREMIUM 4G開始時と比較して約3倍となる受信時最大682Mbpsを実現する通信サービスを、2017年3月より開始した。

ドコモはPREMIUM 4Gの展開および高速化を、高度化C-RAN（Centralized Radio Access Network）^{*5}アーキテクチャ [2] を用いて効率的に行ってきたが、これまで高度化C-RANアーキテクチャを構成

©2017 NTT DOCOMO, INC.
本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

^{*1} キャリアアグリゲーション（CA）：複数のキャリアを用いて同時に送受信することにより、既存のLTEとのバックワードコンパチビリティを保ちながら広帯域化を行い、高速伝送を実現する技術。

^{*2} TDD：上りリンクと下りリンクで、同じキャリア周波数、周波数帯域を用いて時間スロットで分割して信号伝送を行う方式。

^{*3} MIMO：複数のアンテナから、異なる信号を、同時に送信することで高速化伝送を実現する技術。

する無線基地局装置を将来的な機能拡張を見据えて開発してきたことにより、今回の通信サービス提供にあたっては展開済の無線基地局装置のソフトウェアに対する機能追加のみで4×4 MIMO、256QAMに対応した。これにより、経済的かつ早期に受信時最大682Mbpsに対応するエリアの展開が可能となった。

本稿では、4×4 MIMO技術と256QAM技術について解説するとともに、受信時最大682Mbpsを実現する無線基地局装置と移動端末について解説する。

2. 高速化技術

2.1 4×4 MIMO

MIMO技術の高度化を実施することで最大通信速度の向上が可能となる。これまでドコモでは2本のアンテナを用いる2×2 MIMOを使用していたが、4本のアンテナを用いる4×4 MIMO機能を新たに開発した。本機能に関して詳細を以下に解説する。

(1) 4ストリーム送信

① 概要

MIMO多重送信において同時に送信するデータ列の数はストリーム数と呼ばれ、2×2 MIMOでは最大2ストリームまでの送信しかできなかった。しかし、4×4 MIMOでは最大4ストリーム送信を行うことで一度に約2倍のデータを送信することができ、最大通信速度が向上する。LTEの標準仕様には4×4 MIMOを実現できる通信方式(TM: Transmission Mode)が複数規定されている。LTE標準仕様Release 8(以下、LTE Rel.8)から規定されているTM3およびTM4では、4アンテナ分のCell-specific RS (Reference Signal)^{*6}を用いることで最大4ストリームでの送信に対応している。また、LTE Rel.10で規定されたTM9およびLTE Rel.11で規定されたTM10では、柔軟なプリコーディング

やマルチユーザMIMO^{*7}をサポートするためにCell-specific RSに加えてCSI (Channel State Information)-RS^{*8}およびUE (User Equipment)-specific RS^{*9}が追加され、TM3/4と同様に4ストリームの送信を行う[3]。TM3/4ではCell-specific RSのみを用いて、接続性にかかわる通信品質の測定や送信データにかかわる通信品質の測定、下り送信データの復調を行っている一方、TM9/10では接続性にかかわる通信品質の測定にはCell-specific RS、送信データに関わる通信品質の測定にはCSI-RS、下り送信データの復調にはUE-specific RSを用いる(図1)。

② 標準化への取組み

TM9/10においては初期の標準仕様に2つの課題があった。そこでドコモは標準仕様の改善を検討・提案して通信速度の向上に貢献した。

・1つめの課題は、同期信号の送信タイミングにおけるデータ送信リソースの必要以上の制限である。同期信号が送信される周波数リソース(RB: Resource Block)では同期信号送信によって復号に必要なUE-specific RSを送信できないため、前述のRBをTM9/10のデータ送信には使用できない。また、無線基地局装置は、移動端末に対してどのRBを用いてデータを送信するのかをRB単位では指定できず、数RBをまとめたRB groupという単位で指示する必要がある。当初の標準仕様ではTM9/10において同期信号が送信されるRBだけでなく、そのRBが含まれるRB group全体でデータ送信が行えず、不必要にデータ送信リソースが制限されるという課題があった。本課題に対して、同期信号を含むRB groupのうち、同期信号が送信されないRBについてはデータ送信に使用できるように標準仕様の変更を行った(図2)。

*4 QAM: QAM(直交振幅変調)とは、変調方式の1つであり、振幅と位相の双方を利用して変調する方式。

*5 高度化C-RAN: CA技術を活用し、マクロセルとスモールセルを協調させるドコモが提唱するネットワークアーキテクチャ。

*6 Cell-specific RS: 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。

*7 マルチユーザMIMO: 同一時間周波数において、複数ユーザに対してMIMO伝送を行う技術。

*8 CSI-RS: 無線チャネルの状態を測定するためにアンテナごとに送信される参照信号。

*9 UE-specific RS: 下りリンクのデータ信号の復調に用いられるUE固有の参照信号。

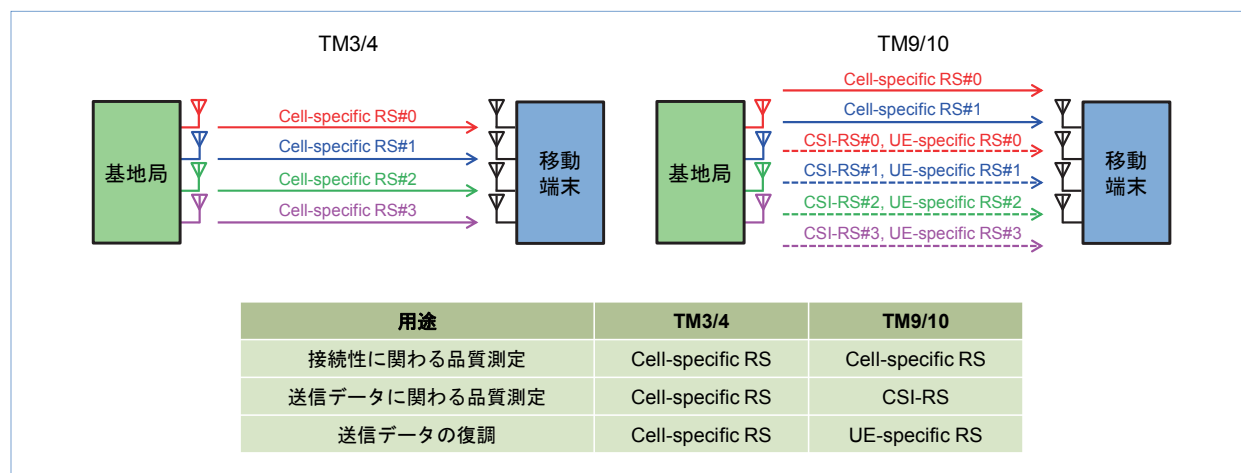


図1 各TMで用いられるRS種別

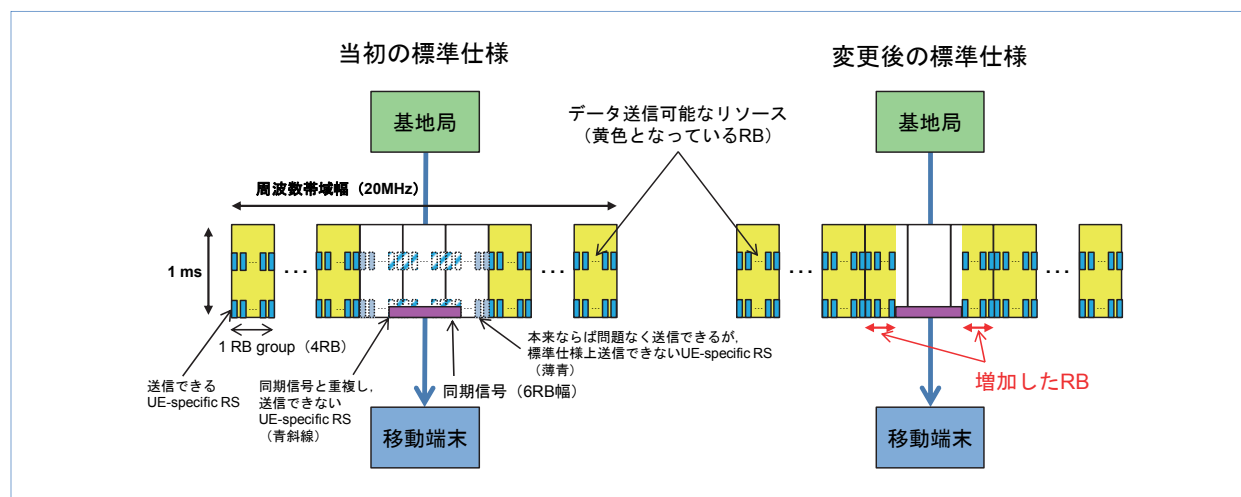


図2 同期信号送信タイミングにおけるリソースの有効活用

・2つめの課題は、当初の標準仕様ではTM9/10で追加されたRSのオーバーヘッド^{*10}によって、仕様で規定されている最大のデータ量を送信できないことである。標準仕様では無線通信区間で一度に送信できるデータ量が数パターン決められている。ところがTM9/10では、RSオーバーヘッドの影響で最大通信速度を実現できるパターンのデータ量を送信することができず、1段階少ないデータ量のパターンを

使用せざるを得ない。このように一度に送信できるデータ量が制限されるために、TM9/10で通信を行う無線基地局装置および移動端末ではTM9/10における無線リソースを最大限利用した最大通信速度が実現不可能であった。本課題に対してTM9/10で追加されたRSのオーバーヘッドを考慮した上で、無線リソースを最大限利用できるデータ量のパターンを新たに標準仕様として定義し、TM9/10で通信

^{*10} オーバヘッド：ユーザーデータの送受信を行うために必要な制御情報や、受信品質測定に必要な参照信号など、ユーザーデータの送信以外に用いられる無線リソース。

を行う無線基地局装置および移動端末でより高い最大通信速度を実現可能とした(図3)。

(2)フィードバック情報に基づくビームフォーミング

移動端末からのフィードバック情報に基づいて無線基地局装置が各移動端末に最適なビームを形成するビームフォーミングを行うことで、最大通信速度の向上だけでなく受信品質の向上も可能となる。ビームフォーミングとは、複数のアンテナの振幅および位相の制御によって送信側で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／減少させる技術である。4×4 MIMOでは4本のアンテナを用いることで、2×2 MIMOよりも電力を集中したビームを形成することができる。移動端末は受信したRSを利用して伝搬路を推定し、適切なビームパターンをPMI (Precoding Matrix Indicator)^{*11}として無線基地局装置に報告する。PMIは移動端末からのフィードバック情報として、チャネル品質情報 (CQI: Channel Quality Indicator)^{*12}や最適な送信ストリーム情報 (RI: Rank Indicator)^{*13}とともに送信される。無線基地局装置はPMIを参考にして移動端末に送信する信号のプリコーディングウェイト^{*14}を決定する。移動端末はTM3/4では無

線基地局装置から通知されたプリコーディング情報、TM9/10では送信データと同じプリコーディングを掛けたUE-specific RSを参照してデータ信号の復号を行う。

(3)最適な送信ストリームとビームフォーミングの組合せ決定

送信ストリーム数とビームフォーミング効果にはトレードオフの関係があり、多ストリーム送信を行うとビームフォーミング効果は減少する。そのため、無線基地局装置は移動端末から報告されたフィードバック情報や送信するデータ量などをもとにして、最適な送信ストリーム数とビームフォーミングに使用するプリコーディングを決定する。送信ストリーム数とビームフォーミングを適切に組み合わせることで、基地局近傍の高品質な領域では多送信ストリームによる最大通信速度の向上、セル端などの低品質な領域ではビームフォーミングによる受信品質の向上が可能となる(図4)。

2.2 256QAM

1シンボル^{*15}でより多くのビット数を送信できる多値変調^{*16}方式を採用することにより、高速化が

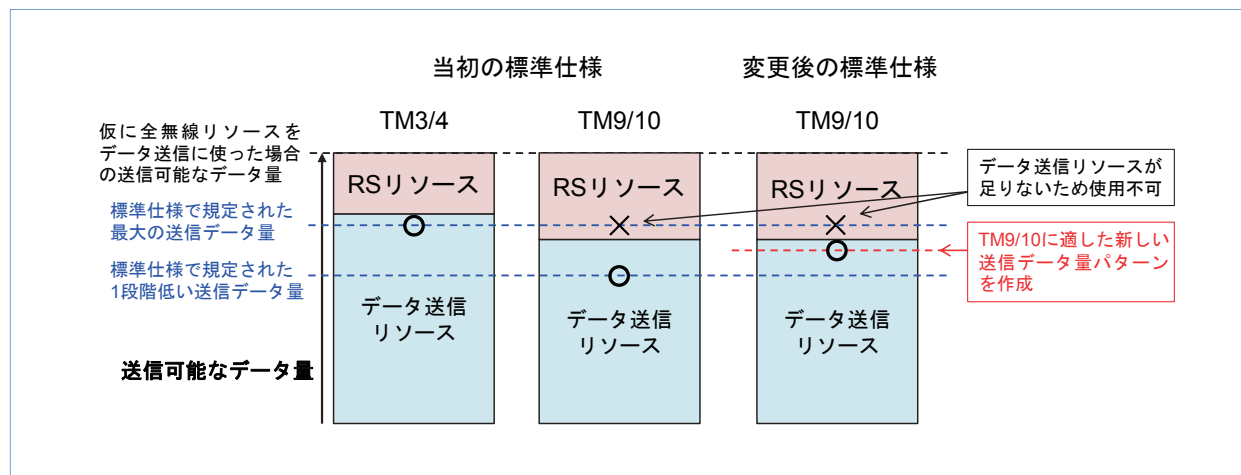


図3 RSオーバーヘッドを考慮した新しい送信データ量パターンの作成

^{*11} PMI: 下りリンクの最適であると想定されるプリコードについての、移動端末からフィードバックされる情報。

^{*12} チャネル品質情報 (CQI): 下りリンクの受信品質についての、移動端末からフィードバックされる情報。

^{*13} 送信ストリーム情報 (RI): 下りリンクの最適であると想定される送信ストリーム数についての、移動端末からフィードバックされる情報。

^{*14} プリコーディングウェイト: ビームフォーミングを行う際に、

各送信アンテナに掛ける位相差。

^{*15} シンボル: 伝送するデータの単位であり、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) の場合は複数のサブキャリアから構成される。各サブキャリアには複数のビット (例えばQPSK (Quadrature Phase Shift Keying) なら2ビット) がマッピングされる。

^{*16} 多値変調: 1つの信号に2ビット以上の情報を含める変調方式。QPSKや16QAMなどの種類がある。

実現可能であり、ドコモは新たに256QAMに対応した。256QAMはLTE Rel.12で規定された多値変調方式で、1シンボル当り最大8ビットを送信することができ、64QAMに対して約1.3倍の高速化が期待できる（図5）。

256QAMのような多値数の大きい変調方式を使用するためには、より高品質な（SINR（Signal-to-

Noise plus Interference Ratio）^{*17}の高い）無線通信環境が必要となる。したがってすべての移動端末が常に256QAMを使用できるとは限らないため、無線基地局装置は移動端末から報告されるCQI indexに基づいて使用する多値変調方式を決定する。高いCQI indexを報告した移動端末に対して256QAMを使用することで最大通信速度の向上が可能となる。

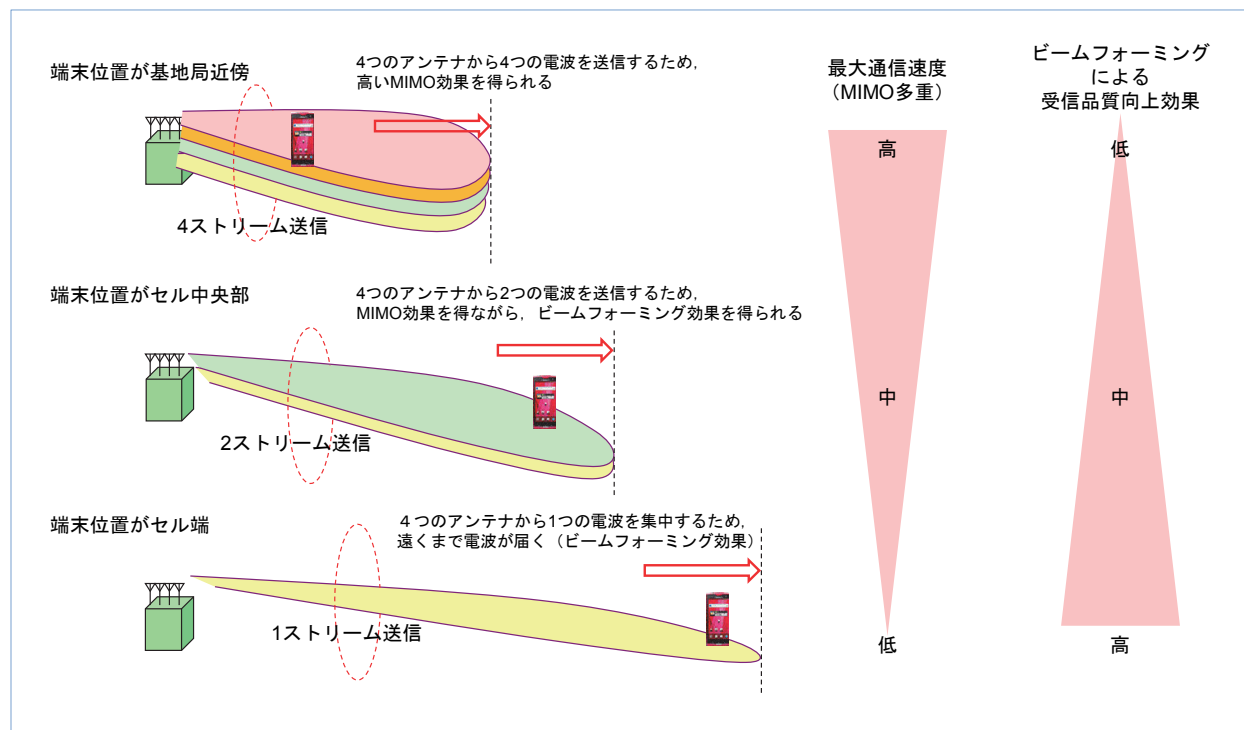


図4 送信ストリームとビームフォーミング効果

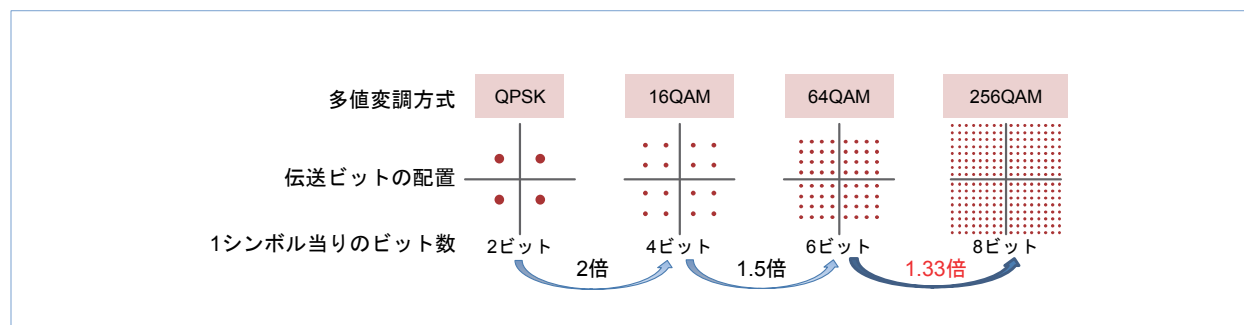


図5 256QAM

^{*17} SINR：受信信号のうち、所望信号の電力と所望信号以外（他セル／他セクタからの干渉波および熱雑音）の電力の比を表す。

LTE Rel.12では、256QAM導入の際に、CQI index 数増大を避け、既存のCQI tableの一部indexを256QAMに対応するCQI indexに置き換えたtableを新たに規定した[4] (図6)。無線基地局装置および移動端末は既存の256QAM非対応のCQI tableと、256QAMに対応したCQI tableを保持しており、どちらのtableを用いるかは移動端末の能力を考慮して無線基地局装置から移動端末に指示する。

3. 無線基地局装置の4×4 MIMO, 256QAM開発

2.1節で述べたように、4×4 MIMO対応にあたり、アンテナを2本から4本に増やす必要がある。3.5GHz帯は、周波数が高くアンテナの小型化が可能であること、また利用可能な帯域幅が40MHzであり高速化の効果が高いことから、ドコモでは3.5GHz帯で4×4 MIMOを導入した。

4×4 MIMO, 256QAM対応時のNW構成を図7に

示す。TDD方式を用いた帯域幅40MHzの3.5GHz帯と、FDD (Frequency Division Duplex) *18方式を用いた帯域幅20MHzの他の周波数帯を組み合わせたCA構成において、3.5GHz帯に4×4 MIMOと256QAMを、他周波数帯に256QAMをそれぞれ適用することにより受信時最大682Mbpsを実現する。3.5GHz帯に対応したスモールセル用のSRE (low power Small optical remote Radio Equipment) *19は、4×4 MIMO対応を見据えて1台当りの送受信系統数を4として開発したことから、導入済みのSREをそのまま使用して4送受信基地局装置として動作する。また、3.5GHz帯に対応したマクロセル用のRRE (Remote Radio Equipment) *20は、2×2 MIMO展開時の装置サイズを考慮して1台当りの送受信系統数を2とし、2台をカスケード接続して4送受信基地局装置として動作するよう設計している。そのため、マクロセルの4×4 MIMO対応は、展開済の1台のRREにもう1台のRREを追加し、カスケード接続することにより対応する。いずれもBDE (Base station

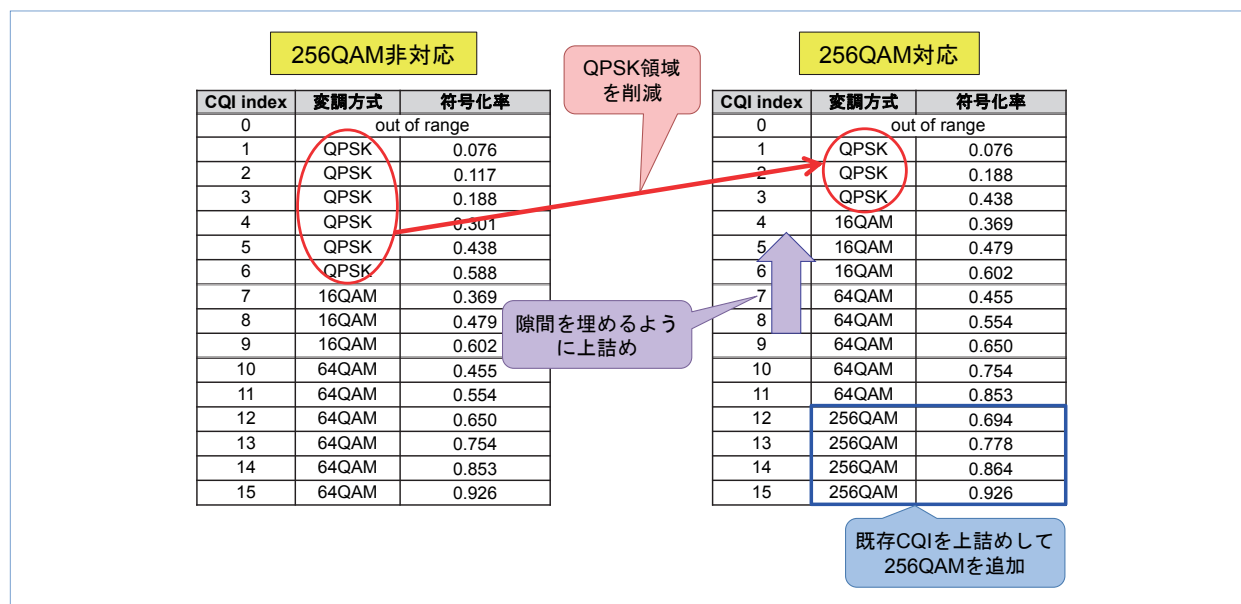


図6 256QAM非対応／対応のCQIテーブル

*18 FDD：上りリンクと下りリンクで、異なるキャリア周波数、周波数帯域を用いて信号伝送を行う方式。

*19 SRE：光ファイバなどを使ってBDE (*21参照) から離れた場所に設置したスモールセル用の基地局無線装置。

*20 RRE：光ファイバなどを使ってBDE (*21参照) から離れた場所に設置した基地局無線装置。

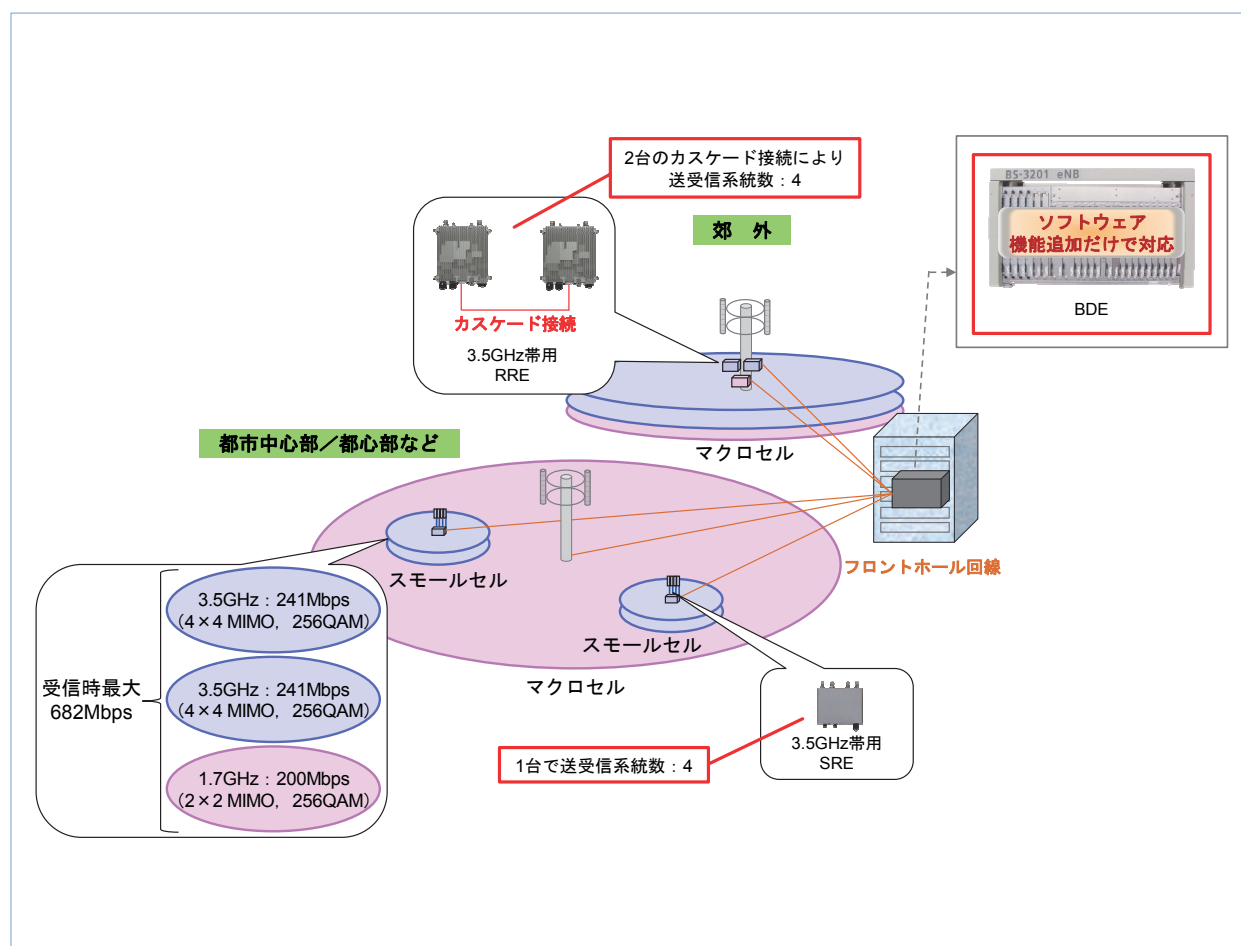


図7 4×4 MIMO, 256QAM対応時のNW構成

Digital processing Equipment)*²¹とSRE, RRE本体のソフトウェアに対する機能追加のみで4×4 MIMOを実現する。

また、4×4 MIMO対応にあたり、2×2 MIMOで通信を行う従来の移動端末についても、無線基地局装置の2アンテナ分の信号を4アンテナで送信することにより、合計送信電力を向上し、移動端末における受信レベルの向上を実現している。

一方、256QAMの機能追加については、BDEのソフトウェアに対する機能追加により、FDD/TDD方式によらずすべての既存の無線基地局装置のエリ

アで256QAM対応とする事が可能となる。

4. 4×4 MIMO, 256QAM対応移動端末の開発

4.1 概要

移動端末の外観を写真1に示す。今回開発した移動端末は、3.5GHz帯において4×4 MIMOで動作し、256QAMに対応している。無線基地局装置と同様に、帯域幅40MHzの3.5GHz帯と、帯域幅20MHzの他の周波数帯を組み合わせたCA構成および4×4

*²¹ BDE：LTEシステムにおける無線基地局装置のデジタル信号処理部分。ベースバンド処理部や保守監視機能を備えている。

MIMO、256QAMを同時に機能させることで最大受信速度682Mbpsを達成する。

4.2 アンテナ構成

本移動端末のアンテナの配置を図8に示す。4つのアンテナのうち1つはメインアンテナとして動作し、送信および受信用として機能する。他の3つはサブアンテナとして動作し、受信専用となる。また、

メインアンテナおよび、サブアンテナは3.5GHz帯だけではなく他のセルラ向けの周波数帯（2GHz、1.7GHzなど）のアンテナとしても動作する。

セルラアンテナ周辺にはWi-Fiアンテナやバッテリー、ディスプレイ、各種デバイスが配置された基板などの金属部品が存在するため、セルラアンテナの性能に影響を与える。移動端末のサイズを62×98×13.6mmとコンパクトに保ちつつ、アンテナと他の金



写真1 4×4 MIMO対応移動端末の外觀

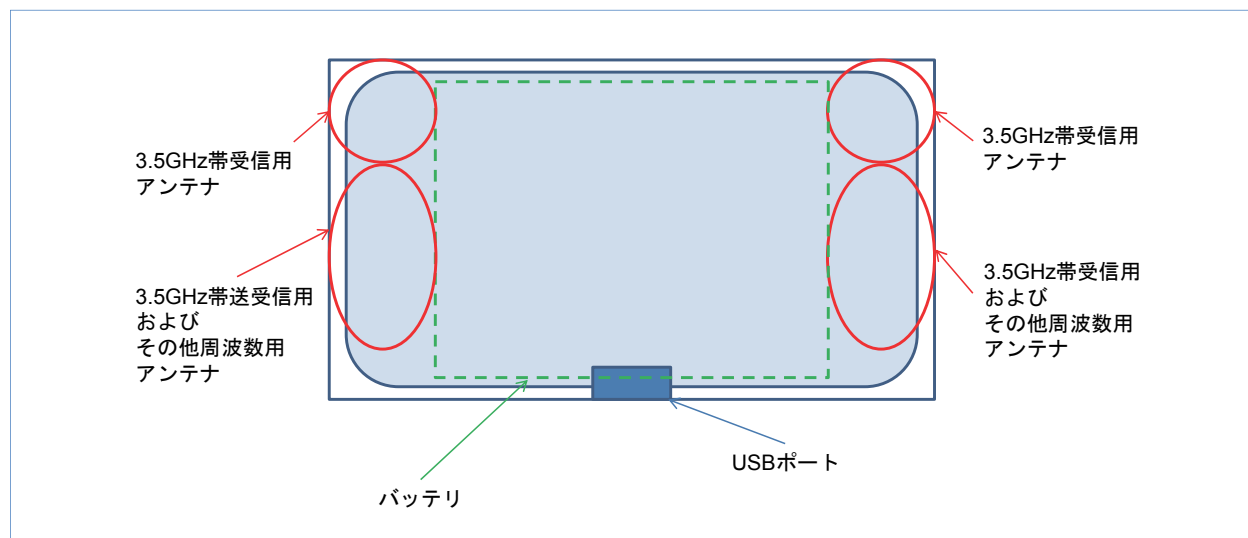


図8 4×4 MIMO対応移動端末のアンテナ配置イメージ図

属部品の距離を確保しアンテナ性能を維持することが必要である。

一方、3.5GHz帯の2組のアンテナにおいて近接配置となり、アンテナ間の相関^{*22}が高くなることが懸念された。アンテナ相関が高くなるとMIMOの性能を十分発揮できなくなり通信速度低下を招くため、複数の周波数を搭載するアンテナの小型化技術を用いるとともに、近接配置においてもアンテナ相関を低く保つ工夫を施した。

また、無線通信速度向上に伴い移動端末の外部インタフェースの通信速度も向上させる必要があり、USB3.0を採用した。しかし、通信速度が高速となるため、USB使用時にセルラ通信周波数帯に影響を与えるノイズが増加し、受信性能へ悪影響をもたらす。そこで、受信性能劣化を低減するノイズ対策として、USBコネクタ部の金属シールドの強化や、ノイズ除去用フィルタの追加、コネクタ、アンテナ

間の配置の最適化を図り、USBテザリング^{*23}時における通信速度低下を招くことがないように対策している。

4.3 アンテナの性能評価

移動端末の4×4 MIMOアンテナ測定系を図9に示す。FDD周波数+3.5GHz+3.5GHz（3.5GHz帯が4×4 MIMO）の下り3CA時の構成図である。本測定系にて無線基地局装置から移動端末への下り通信速度の評価を行う。図中の反響チャンバーにより、無線基地局装置からの信号がさまざまな方向から被測定物に到来するフェージング^{*24}環境を構築している。

LTE信号はコンポーネントキャリア（CC：Component Carrier）^{*25}ごとに生成されるため、4×4 MIMO信号のSCC（Secondary CC）^{*26}1の信号1（SCC1 p1）とSCC2の信号1（SCC2 p1）を電力合成器（Combiner）で合成し1つのアンテナから送信

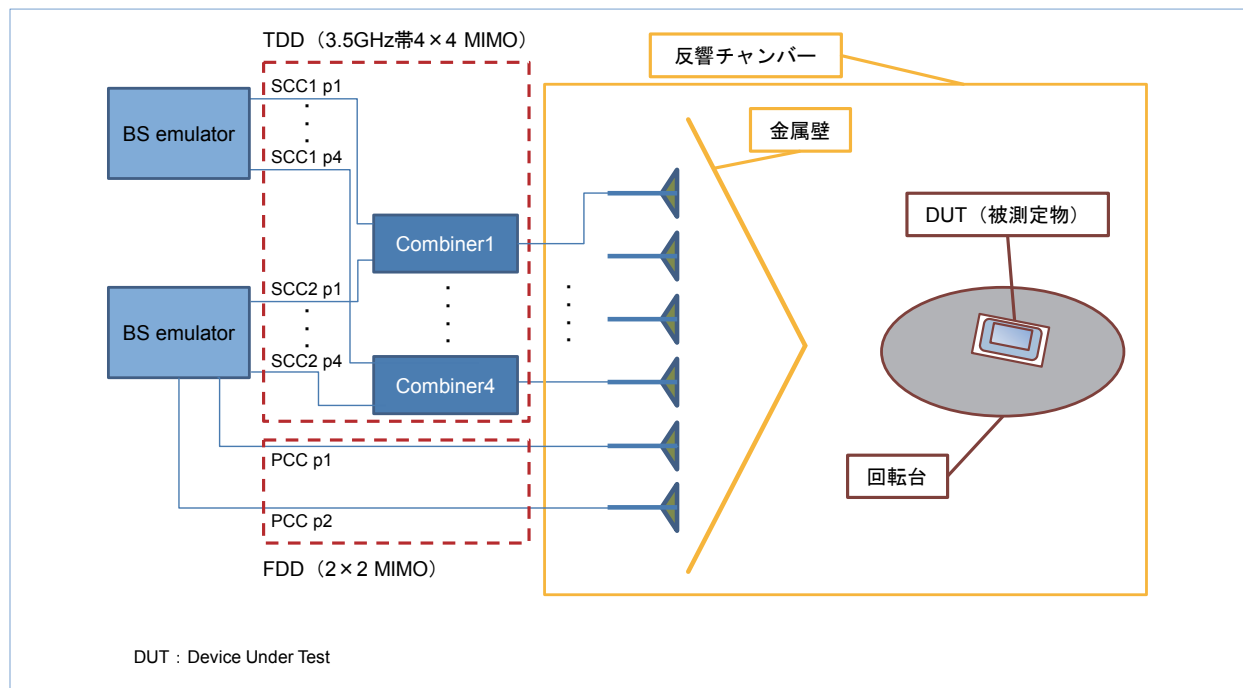


図9 4×4 MIMO+3DL CAスループット測定系

^{*22} 相関：異なる信号の類似性を示す指標。複素数で表され絶対値は0～1の値をとる。1に近いほど類似性が高く、受信側の信号の分離が困難となるため、MIMO通信においては通信速度が低下する。

^{*23} テザリング：スマートフォンを外部モデム（親機）として、ゲーム機器やパソコンなどのいろいろなWi-Fi対応機器（子機）を、親機が接続する携帯電話回線を通じてインターネットに接続させる機能。

^{*24} フェージング：無線通信において、反射などにより伝搬経路が異なる電波が時間差をもって到達することで、振幅や位相に影響を与える現象。

^{*25} コンポーネントキャリア（CC）：LTEで使用される搬送波を1つの周波数ブロックとしたもの、帯域幅は上りリンク、下りリンク共に最大20MHz。

^{*26} SCC：CAにおいてPCC（^{*27}参照）に加えて無線リソースを提供するキャリア。

する構成としている。SCCp2～p4の信号についても同様の構成で、PCC (Primary CC)^{*27}信号は別アンテナで送信する構成とし、下りFDD 2×2 MIMO + 3.5GHz帯4×4 MIMO + 3.5GHz帯4×4 MIMO信号を模擬している。

この系で被測定物の下り通信速度の評価を行い、4×4 MIMO, 256QAMかつ下り3CA時の682Mbpsの最大性能が保証されることを確認した。

5. あとがき

本稿では、PREMIUM 4Gの受信最大速度を向上する技術として、4×4 MIMO技術と256QAM技術について解説した。また、受信時最大682Mbpsを

実現する無線基地局装置と移動端末について解説した。今後も、PREMIUM 4Gサービスのさらなる高度化に向けた開発を進めていく。

文 献

- [1] 藤井, ほか: “3.5GHz帯TD-LTE導入に向けた基地局装置の開発,” 本誌, Vol.24, No.2, pp.8-13, Jul. 2016.
- [2] 吉原, ほか: “高度化C-RANアーキテクチャを実現する無線装置およびアンテナの開発,” 本誌, Vol.23, No.2, pp.19-24, Jul. 2015.
- [3] 3GPP TS36.211 V12.8.0: “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 12),” Dec. 2015.
- [4] 3GPP TS36.213 V12.11.0: “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 12),” Sep. 2016.

^{*27} PCC: CAにおいてUE-NW間の接続性を担保するキャリア。