

省スペースのアンテナでLTE-Advancedの品質向上をめざすSmart Vertical MIMO

LTE-Advancedの通信サービスにおいて、1Gbpsを超える通信速度を実現するには4ストリーム以上のMIMO伝送を行う必要があるが、アンテナ数の増加によるアンテナ設置場所の確保やコストの増加が課題であった。本稿では、アンテナ1本で4ストリームのMIMO伝送を実現するSmart Vertical MIMO技術について解説し、屋外での伝送実験の概要をその結果とともに解説する。

無線アクセス開発部

井上 祐樹 武田 大樹
 さいとう けいすけ かわむら てるお
 あんどう ひでひろ
 安藤 英浩

1. まえがき

3GPP (3rd Generation Partnership Project) において、一般にLTEと呼ばれる移動通信方式の無線インタフェース仕様LTE Release 8 (以下、LTE Rel.8) が完成し[1] [2]、日本では2010年12月より商用サービスが開始されている。今後一層増大することが予想されるトラフィックの需要に応えるため、3GPPでは、LTE Rel.8を拡張したLTE-Advanced (LTE Rel.10 and beyond) と呼ばれる無線インタフェース仕様の標準化が行われている[3] [4]。

LTE-Advancedの1つの特長は、LTEとの後方互換性（バックワードコンパチビリティ）を保ちながら、さらなる高速・大容量化が図られている点にある。下りリンクのMIMO (Multiple-Input Multiple-Output) *1

伝送に着目すると、LTE-Advancedでは、ユーザ間の干渉抑圧に適したユーザ固有の参照信号が導入され、複数のユーザで同時にMIMO空間多重を行うMU (Multi-User)-MIMO*2の性能向上を実現した。対応するMIMOのアンテナ数も、最大4アンテナから最大8アンテナへ拡張されている[5]。

現在3GPPでは、Elevation BF (Beam Forming) *3・FD (Full Dimension) -MIMO *4 と呼ばれる水平・垂直方向に配列したアンテナを用いて指向性ビームを制御する技術が検討される予定であり、その準備として、水平と垂直方向を考慮した伝搬モデルに関する検討が行われている[6]。

LTE-Advancedでは、下りリンクにおいて1Gbpsを超える通信速度の実現を想定している。図1に、

LTE-Advancedにおいて1Gbpsを超える通信速度を実現する基地局アンテナ構成を示す。1Gbpsを超える通信速度を実現するには少なくとも基地局側で4ストリーム*5のMIMO伝送に対応する必要がある。ところが、従来技術では偏波技術*6を用いた、アンテナ1本で最大2ストリームのMIMO伝送が限界であり、4ストリームのMIMO伝送を行うには少なくともアンテナ2本が必要であった。そこで、アンテナ数の増加によるアンテナ設置場所の確保やコストの増加が課題となる。

ドコモは、このアンテナ設置に関する課題を解決するアンテナ伝送技術として、携帯端末の通信品質に応じ適応的に垂直方向のアンテナ素子グループを使ってMIMO伝送を行うSmart Vertical MIMOを提案している[7] [8]。この技術を偏波技術と組

©2014 NTT DOCOMO, INC.
 本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

*1 MIMO：複数の送受信アンテナを用いて、同一時間・周波数において信号伝送を行い、通信品質あるいは周波数利用効率の向上を実現する信号伝送技術。

*2 MU-MIMO：複数の携帯端末（ユーザ）に対し、同一時間・周波数においてMIMOを用いて伝送する技術。

*3 Elevation BF：水平・垂直方向に配列したアンテナ（8アンテナポート以下）を用いて指向性（*9参照）ビームを制御する技術。

*4 FD-MIMO：水平・垂直方向に配列したアンテナ（8アンテナポートを超える）を用いて指向性（*9参照）ビームを制御する技術。

*5 ストリーム：MIMOに用いられる伝搬路のチャンネルに送信されるデータ列。

*6 偏波技術：垂直および水平あるいは±45°方向で直交する偏波を用いてアンテナ2本相当の送受信を実現するアンテナ技術。

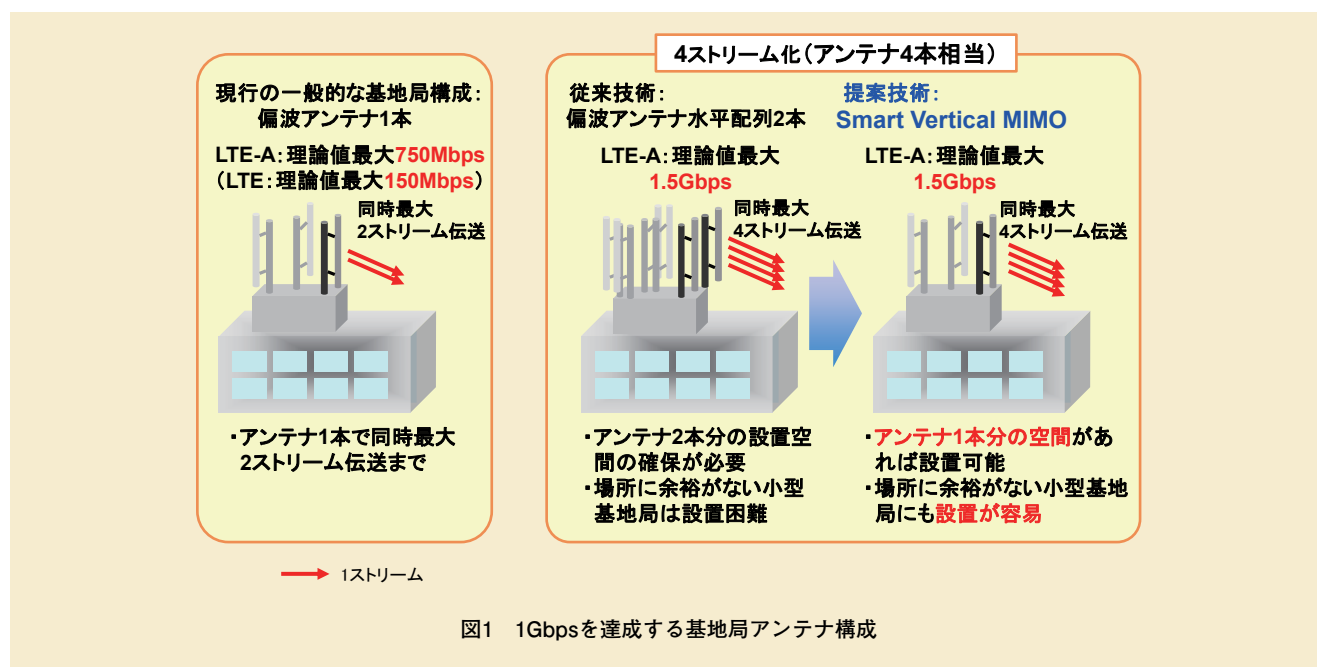


図1 1Gbpsを達成する基地局アンテナ構成

み合わせることで、アンテナ1本分のサイズで最大4ストリームのMIMO伝送が可能となる。Smart Vertical MIMOは主にシミュレーションによる検証が行われてきたが、実伝搬における特性検証は行われていなかった。

本稿では、このSmart Vertical MIMO技術について解説し、屋外での伝送実験の概要をその結果とともに解説する。

2. Smart Vertical MIMOの概要

図2にSmart Vertical MIMOの各モードの概念図（アンテナ構成と送信ビームおよびストリームの構成）について示す。Smart Vertical MIMOは、携帯端末の通信品質に対して適応的にアンテナ素子の垂直方向のグ

ループ化を行うことで、アンテナサイズを変えずに、LTE-Advancedに対応したより高速な通信環境を提供する。

(1) Mode B

電波の受信品質の良い携帯端末に対しては、1本のアンテナを上下2つのグループに分割し、さらに偏波技術を用いることで最大4ストリームの伝送を実現する。以下では、この送信モードをMode Bとする。

Mode Bを用いることで、携帯端末に対し同一の時間・周波数リソースを用いて多くの送信ストリームを空間多重することができ、周波数利用効率^{*7}およびスループット^{*8}の向上を実現する。しかしMode Bでは、アンテナをグループに分割することで、アンテナ1本分の品質が低下する。これはアンテナ長が短

くなることで指向性^{*9}ビームが広がり、セル端付近のアンテナ利得^{*10}が低下するためである。

(2) Mode A

電波の受信品質の悪い携帯端末に対してはグループ分割を解除し、アンテナ利得を優先し最大2ストリームの伝送を行う。以下では、この送信モードをMode Aとする。Mode Aを用いることにより、従来のLTEと同等のカパレージが確保される。また、エリア内のすべての携帯端末への報知を目的とする制御信号や、LTEのみに対応した携帯端末にも、Mode Aを用いる。

(3) 送信モードの制御

携帯端末の品質によるモードの割当てには、携帯端末から基地局にフィードバックされる携帯端末の品質情報であるCQI（Channel Quality

*7 周波数利用効率：単位時間、単位周波数当たりで伝送できる情報ビット数。

*8 スループット：単位時間当たり、誤りなく伝送される実効的なデータ転送速度。

*9 指向性：アンテナの放射特性のひとつで、アンテナからの放射強度（あるいは受信感度）の方向特性のこと。

*10 アンテナ利得：アンテナの指向性の鋭さを示す尺度。一般に等方性のアンテナに対する放射電力の比で表される。

Indicator)^{*11}などを用いる。このような品質情報に基づき、Mode A、Bの各送信モードを基地局のベースバンド^{*12}部分で周波数および時間のリソースに対してダイナミックに割り当てる。ベースバンドの割り当てでモードを決定できるので、基地局アンテナ1本の中でモードの共存が可能となる。

このようにSmart Vertical MIMOは携帯端末の通信品質に対して適応的に最適な伝送モードを割り当てることで、アンテナの1本で最大4ストリーム実現できるため、省スペースかつ省コストでLTE-AdvancedにおけるMIMOに対応したエリア構築を可能とする技術である。

3. 屋外伝送実験

3.1 実験概要

表1に本実験装置の主要諸元を示す。伝送実験に用いた試作装置はLTE-Advanced (LTE Rel. 10)仕様に準拠し、Rel. 12に提案された携帯端末から基地局へのフィードバック送信方法に関する技術拡張を含む。下りリンクは3.9GHz帯を用いており、システム帯域幅は100MHzで連続する周波数帯域を用いる5コンポーネントキャリア (CC: Component Carrier)^{*13}のキャリアアグリゲーション (CA: Carrier Aggregation)^{*14}を適用している。Smart Vertical MIMOの適用が可能な基地局アンテナ1本と、携帯端末に相当する移動局を搭

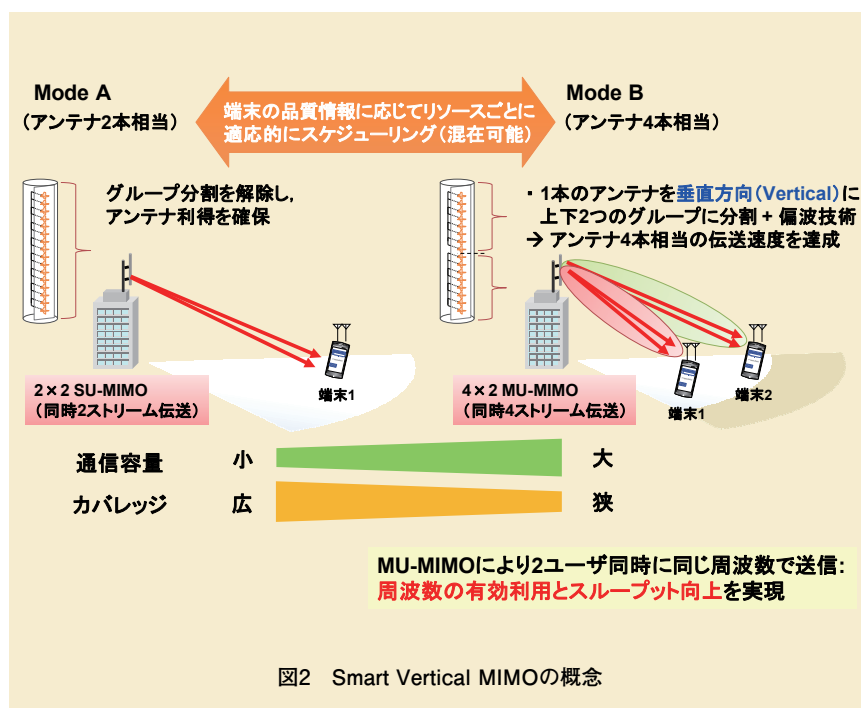


表1 実験装置主要諸元 (下りリンク)

無線アクセス	OFDMA
中心周波数	3.92625GHz
システム帯域幅	100 MHz (20MHz × 5CCs)
総送信電力	10W (40dBm)
アンテナポート数	BS: 4, MS: 2
移動局数	2
チャンネル符号/複号	ターボ符号/Max-Log-MAP復号
MIMO信号分離	MLD

載した測定車を2台使って屋外走行実験を実施した。測定は伝搬環境の異なる、神奈川県横須賀市の郊外と神奈川県相模原市の市街地において実施した。各環境における基地局アンテナの設置状況と基地局からの測定環境の景観および測定場所について、それぞれ図3、4に示す。

横須賀の測定環境は、基地局と移

動局がほぼ見通し内の周辺が開けた環境であり、遅延広がり^{*15}の標準偏差は0.11 μ sと比較的遅延広がりが小さい環境である。

相模原の測定環境は、基地局と移動局の間に建物が立ち並び、基地局と移動局が見通し内と見通し外が混在する環境で、測定コース内の遅延広がりの標準偏差は0.17 μ sである。

*11 CQI: 移動局で測定された下りリンクの伝搬状況を表す受信品質指標。

*12 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。

*13 コンポーネントキャリア (CC): LTEの端末が接続可能な最大20MHzのシステム帯域幅を持つ周波数ブロック単位。

*14 キャリアアグリゲーション (CA): 複数のコンポーネントキャリアを用いて同時に送受信することで、LTEとの後方互換性を保

ちながら広帯域化を実現する技術。

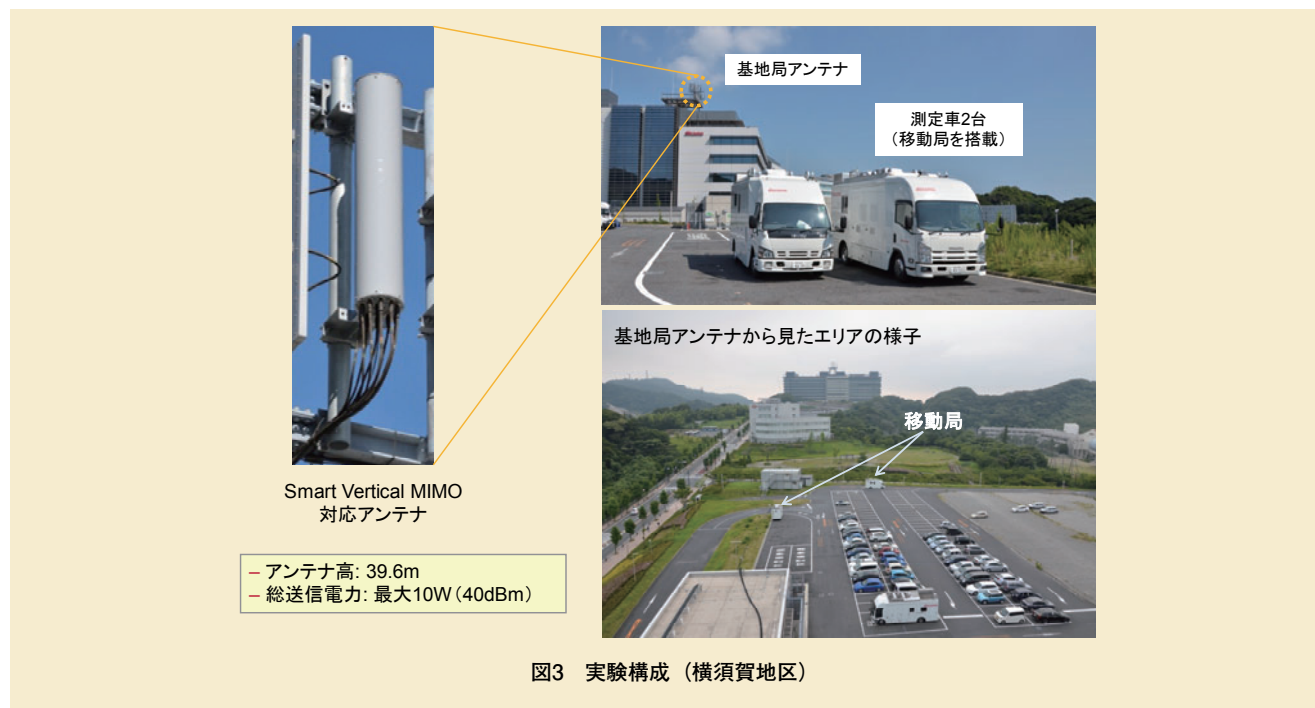
*15 遅延広がり: 建物などからの反射・回折により遅延して到来する電波の遅延時間の広がり。

3.2 送受信機構成

図5に実験装置の送受信機構成を示す。基地局送信機では、ターボ符号^{*16}化後、QPSK (Quadrature Phase

Shift Keying)^{*17}, 16QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation)^{*18}または64QAM (64 Quadrature Amplitude Modulation)^{*19}のデータ変調を

行う。データ変調後のデータ系列に復調用参照信号 (DM-RS : Demodulation Reference Signal)^{*20}を多重した後、2つの移動局から基地局へ



^{*16} ターボ符号：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。

^{*17} QPSK：デジタル変調方式の1つ。位相の異なる4つの信号を組み合わせることにより、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} 復調用参照信号 (DM-RS)：データ復調に用いるフェージングチャネルを推定するためのユーザ個別の、基地局と移動局で既知の参照信号 (パイロット信号) のこと。

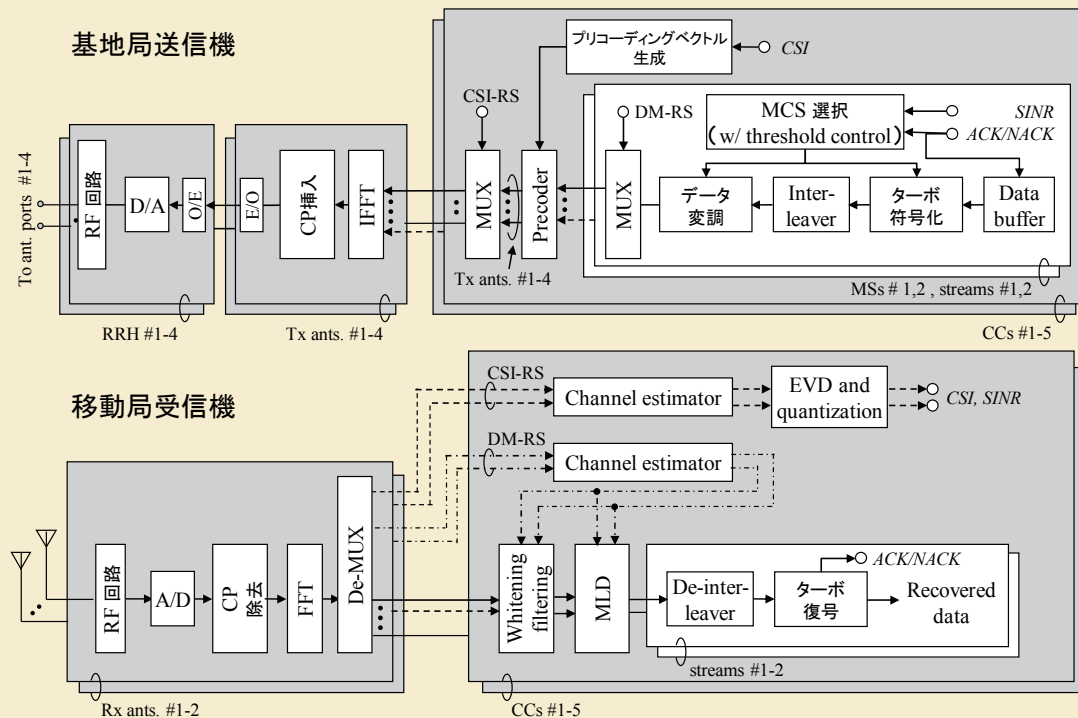


図5 送受信機構成

のフィードバック情報を基に生成したプリコーディングベクトル^{*21}を乗算する。プリコーディングベクトルはSB（SubBand）^{*22}ごとに、MMSE（Minimum Mean Square Error）^{*23}規範により算出する。さらに送信アンテナに対応するチャンネル状態情報推定用参照信号（CSI-RS：Channel State Information Reference Signal）^{*24}を多重し、D/A変換後、直交変調を行い、RFキャリア周波数にアップコンバートして送信する。

移動局受信機では、受信したRF信号^{*25}をIF（Intermediate Frequency）^{*26}信号にダウンコンバートした後、AGC（Automatic Gain Con-

trol）^{*27}増幅器（RF回路内）による線形増幅、直交検波を行い、同相／直交チャネルの信号を14ビットでA/D変換する。受信した各送信アンテナのCSI-RSを用いてMU-MIMO伝送のためのフィードバック情報を生成する。所望ユーザの2ストリームに対するMIMO信号分離には、MLD（Maximum Likelihood Detection）^{*28}を適用する。Max-Log-MAP（Maximum A Posteriori）^{*29}アルゴリズムによる軟判定^{*30}ターボ復号を行い、送信ビット系列を再生する。

ここでは、MU-MIMOのプリコーディングベクトル生成に用いるCSIフィードバックのSBサイズを900kHz、

CSI-RSの送信周期を5msとした。また、適応変調・チャネル符号化（AMC：Adaptive Modulation and Coding）^{*31}およびハイブリッド自動再送要求（HARQ：Hybrid Automatic Repeat reQuest）^{*32}を適用した場合のスループットを評価した。AMCでは12種類の変調方式および符号化率（MCS：Modulation and Coding Scheme）^{*33}を用い、MCS選択は移動局からフィードバックされる瞬時受信SINR（Signal-to-Interference plus Noise power Ratio）^{*34}に基づいて行う。

AMCおよびプリコーディングの制御遅延はともに10msである。

^{*21} プリコーディングベクトル：MIMOにおける送信前の信号に乗算される位相・振幅を含むベクトル。

^{*22} SB：周波数帯域全体を分割した周波数単位。この周波数単位ごとにCSI-RS（^{*24}参照）のフィードバックおよび共通のプリコーディングを適用する。

^{*23} MMSE：平均二乗誤差を最小とする信号を求める方法。

^{*24} チャンネル状態情報推定用参照信号（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既知の信号。

^{*25} RF信号：無線周波数帯の信号。

^{*26} IF：高周波信号を復調処理が可能な周波数に変換した周波数。中間周波数ともいう。

^{*27} AGC：出力信号の振幅が一定となるように受信のパワーアンプの増幅率を自動調整する機能。

^{*28} MLD：MIMOの信号分離法の1つで、送信信号として取り得るすべての組合せパター

ンのうち、受信信号のパターンにもっとも近い組合せを見つけ出す方法。

^{*29} Max-Log-MAP：チャネル復号アルゴリズムの1つ。最適な復号アルゴリズムである最大事後確率（MAP）アルゴリズムと比較して、事後確率の計算において近似を用いることで演算量を大幅に削減しながらほぼ同等の特性を実現可能。

3.3 基地局および 移動局アンテナ構成

図6に基地局アンテナの構成を示す。アンテナ部分は偏波共用アンテナを垂直方向に2分割可能な構成となっており、この実験ではモードの割当ては固定的に行う構成となっている。

偏波共用アンテナは垂直偏波(V)および水平偏波(H)から構成される。基地局アンテナの総送信電力は最大10W (40dBm^{*35})で評価した。基地局アンテナ高は、横須賀および相模原でそれぞれ、39.6m、56.5mである。移動局では、水平面内に無指向性の偏波アンテナを用い

た。移動局アンテナは測定車の天井部(アンテナ高3.1m)に設置した。

3.4 実験結果

屋外伝送実験は、2013年7月に横須賀、2013年11月に相模原で実施した。MU-MIMOの評価は一方の移動局(MS#1)を時速5~10kmで移動させ、他方の移動局(MS#2)を静止させてMode Bでスループットを測定した。横須賀、相模原それぞれの環境において、MS#2は基地局からの距離約100m・俯角約16°、基地局からの距離約300m・俯角約11°方向の見通しのある各地点に静止した。MS#1は基地局からの距離約50

~150m・俯角約12~30°、基地局からの距離約200~500m・俯角約6~15°の範囲で走行した。

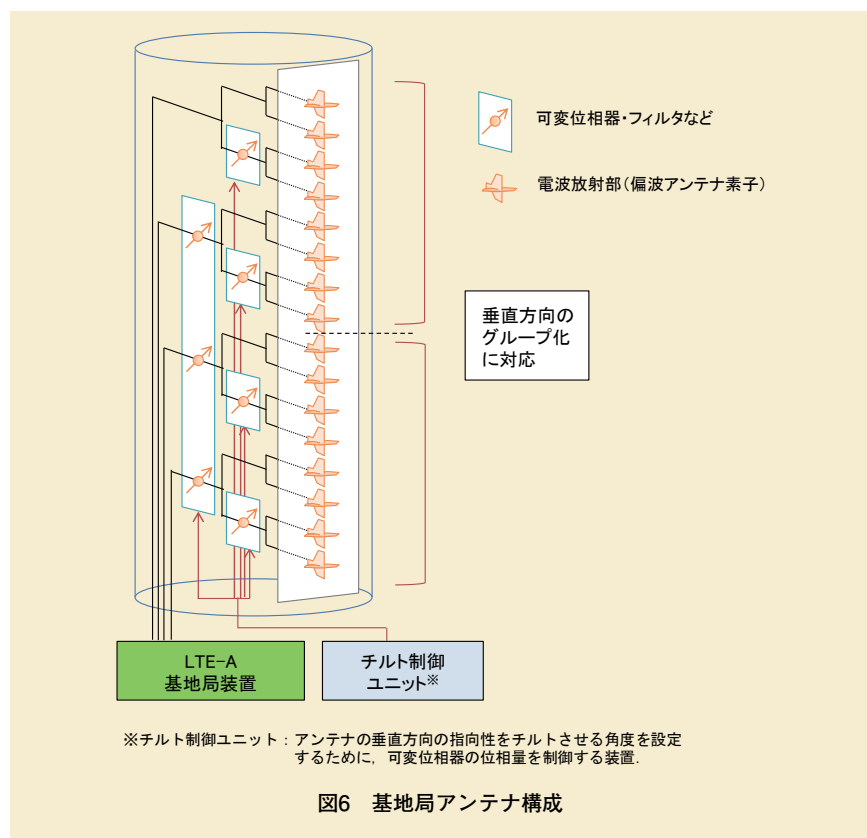
その結果、横須賀、相模原それぞれの環境において、基地局アンテナ1本で2台の移動局に対して、合計1.2Gbpsを超える通信速度のMIMO伝送に成功した。図7に横須賀の郊外環境での測定結果を示す。

1.2Gbpsを達成したのは、横須賀、相模原それぞれの環境において、MS#1が基地局からの距離約140m・俯角12°、基地局からの距離約500m・俯角7°の条件であり、移動局間の俯角の角度差はどちらの環境でも約4°である。さらに、この地点における、垂直アンテナブランチの間のフェージング相関^{*36}の測定値は、どちらの環境も約0.96となっており高い相関を持つことがわかる。

このように実伝搬環境において、Smart Vertical MIMOのMode Bでは高い相関を持つブランチを使って、約4°の俯角方向の角度差を有する移動局ペア間の干渉を低減し、1.2Gbpsを達成することが確認できた。

4. あとがき

本稿ではアンテナ1本で4ストリームのMIMO伝送を実現するSmart Vertical MIMO技術について解説し、屋外での伝送実験の概要をその結果とともに解説した。Smart Vertical MIMOが実用化すればアンテナ4本相当の高速・大容量のMIMO伝送を



※チルト制御ユニット：アンテナの垂直方向の指向性をチルトさせる角度を設定するために、可変位相器の位相量を制御する装置。

図6 基地局アンテナ構成

^{*30} 軟判定：受信シンボルに信頼度情報を付加して、これに基づいて受信信号の値そのものを利用して復号を行うこと。受信信号の値を0もしくは1に二値化して復号する硬判定と比較して、高い誤り訂正能力が得られる。

^{*31} 適応変調・チャネル符号化(AMC)：例えば、受信信号電力対干渉電力比などの受信品質に応じて、最適なMCS(^{*33}参照)を選択することによって、データレートに適応制御する方法。

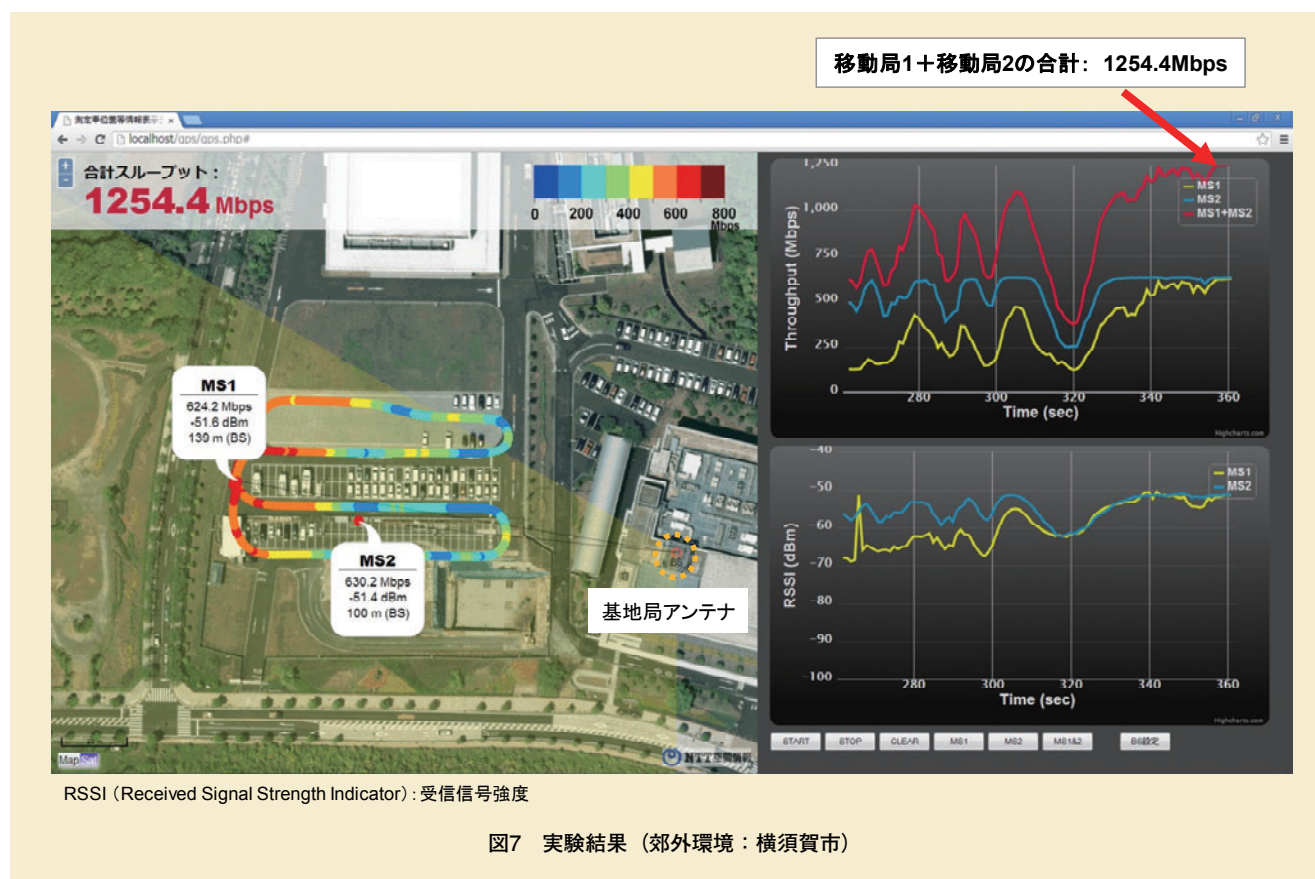
^{*32} HARQ：自動再送要求(ARQ)と誤り訂正符号を組み合わせたことにより、再送時に誤り訂正能力を向上させ再送回数を低減させる技術。基地局より再送されたデータと過去に受信したデータを合成することにより、受信品質の向上と効率の良い伝送を実現するパケット再送方法。

^{*33} MCS：AMCを行う際にあらかじめ決めておくデータ変調方式とチャネル符号化率の組合せ。

^{*34} 受信SINR：受信信号のうち、所望波の電力と、それ以外の同一セル内のユーザ間干渉および他セル/他セクタからの干渉波および熱雑音の電力和の比を表す。

^{*35} dBm：電力P[mW]とすると $10\log(P)$ とした時の値。1mWを基準としたときの相対値(1mW=0dBm)。

^{*36} フェージング相関：本稿では、MIMO伝送に用いる異なるアンテナ間のフェージング変動の相関を表す指標。



アンテナの1本で実現できるため、省スペースかつ省コストでエリア構築が可能となる。

今後の課題として、フィードバック方法に関する検証や、モード割当て方法の検証などが挙げられる。LTE-Advancedの提供開始後、早い段階で本技術を実用化させるために今後さらに開発を進めていく。

文 献

[1] M. Tanno, Y. Kishiyama, N. Miki, K. Higuchi and M. Sawahashi : "Evolved UTRA - physical layer overview," Proc.

of IEEE SPAWC 2007, pp. 1-8, Jun. 2007.

[2] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker : "LTE - The UMTS Long Term Evolution From Theory To Practice," WILEY, 2009.

[3] E. Dahlman, S. Parkvall and J. Sköld : "4G - LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband," Academic Press, 2011.

[4] NTT DOCOMO : "Requirements, Candidate Solutions & Technology Roadmap for LTE Rel-12 Onward," 3GPP RWS-120010, Jun. 2012.

[5] 3GPP TS36.211 V10.4.0 : "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Physical channels and mod-

ulation," Dec. 2011.

[6] 3GPP RP-130811 : "Study on 3D-channel model for Elevation Beamforming and FD-MIMO studies for LTE," Dec. 2012.

[7] Y. Inoue and K. Cho : "MIMO base station antenna employing Mode Selection in Vertically Sprit Array," Proc. of the 5th EuCAP2011, pp. 2751-2755, Apr. 2011.

[8] Y. Inoue and K. Cho : "Coverage evaluation of 4 by 4 MIMO base station antenna," Proc. of Wireless VITAE 2011, pp. 1-5, Mar. 2011.