



LTE-Advanced — LTE のさらなる進化形— 無線伝送実験

近年、スマートフォンやタブレット端末の普及により、 無線のデータトラフィックが急増している。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対応すべく、 LTEのさらなる進化形であるLTE-Advancedの標準化が行 われている。本稿では、LTE-Advancedで採用される無線 アクセス技術の実証を行うために試作した実験装置につい て概説し、その無線伝送実験結果について解説する。

無線アクセス開発部	川村 輝雄	岸山 祥久
	^{かきしま ゆういち} 柿島 佑一	ゃすかわ しんぺい 安川 真平
	^{さいとう けいすけ} 齊藤 敬佑	
ドコモ欧州研究所	たぉゕ ひでかず 田岡 秀和	

かわむら てるお

きしやま よしひさ

1. まえがき

2010年12月よりサービスを開始 した [Xi] (クロッシィ) は, FOMA と比較して高速・大容量・低遅延の 無線通信を実現するLTE規格[1]に 準拠した移動通信サービスである. LTE(最初のリリースとなる Release 8仕様)では、セル内直交多元接続 方式(下りリンクOFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)^{*1}, 上りリンクSC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access)^{*2}), 周波数領域ス ケジューリング^{*3},および下りリン クにおける MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)^{*4}伝送などの無線ア クセス技術が採用された[2].

ドコモでは,動画などの大容量コ ンテンツサービスの普及により,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タイムリーに対 応すべく. 無線アクセスネットワー クのさらなるシステム性能の向上を 目指し、LTEのさらなる進化形であ るLTE-Advancedの標準化を推進し ている.標準化においてLTE規格 は、Release 8から継続的にアップデ ートされており. LTE-Advanced は LTE規格のうち Release 10 以降を指 す[3]. LTE-Advancedの無線インタ フェースは、すでに Release 10 仕様 の標準化が完了し、現在 Release 11 仕様の標準化作業が行われている. LTE-Advancedでは、LTE (Release 8/9) とのバックワードコンパチビリ ティを保証することを前提条件とし て. IMT (International Mobile Telecommunication)-Advancedの要求 条件[4]を満たす必要がある. その ため,最大100MHz程度までの広帯 域化をサポートするキャリアアグリ ゲーション (CA: Carrier Aggregation)^{*5}[5],および上りリンクにおけ る MIMO伝送の適用,下りリンク における MIMO伝送の拡張 (マル チユーザ (MU: Multi User)-MIMO ^{*6}など),セル間協調 (CoMP: Coordinated Multi-Point)送受信^{*7}な どの高度化マルチアンテナ技術が採 用されている[6][7].

著者らはこれまで,Release 10仕 様に基づくLTE-Advancedのリアル タイム無線伝送実験装置を試作し, LTE-Advancedにおける無線アクセ ス技術の実証実験を行ってきた[8]-[15].本稿では,試作した無線伝送 実験装置について概説し,本実験装 置を用いた屋外および屋内実伝搬環 境における実験結果について解説す

© 2012 NTT DOCOMO, INC. 本誌掲載記事の無断転載を禁じます.

- *1 OFDMA: 直交周波数分割多重(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 低速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(遅延波からの干渉)に対す る耐性の高い高品質伝送を実現する方式.
- *2 SC-FDMA: 単一ユーザの信号をシング ルキャリア伝送しつつ, 異なるユーザの 信号は, 異なる周波数を割り当てること

により多元接続する無線アクセス方式.

- *3 周波数領域スケジューリング:周波数領域の伝搬路の変動を利用して、各ユーザに割り当てる無線リソースのスケジューリングを行い、ユーザ間のダイバーシチ効果を得る技術。
- *4 MIMO:同一時間・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.

る.

2. 本実験装置で実装した LTE-Advanced 無線 アクセス技術

本実験装置は、周波数分割複信 (FDD: Frequency Division Duplex)*8 における上下非対称帯域幅のペアバ ンドそれぞれについて、連続した帯 域を用いて広帯域化を行うCA(下 りリンク100MHz. 上りリンク 40MHz)を基本機能としてサポート する. さらに, 上りリンク2×2シ ングルユーザ (SU: Single User)-MIMO(空間多重およびプリコーデ ィングによる閉ループ型送信ダイバ ーシチ*9),下りリンク4×2 MU-MIMO、および光張り出しの基地局 アンテナ(RRE: Remote Radio Equipment) を用いる下りリンク CoMP送信といった高度化マルチア ンテナ技術をサポートする.

2.1 CA

LTE-AdvancedにおけるCAの概念 を図1に示す、CAはLTE (Release 8/9) とのバックワードコンパチビ リティを確保しつつ,広帯域化を実 現する技術であり、LTE 端末が接続 可能な最大20MHzの周波数ブロッ ク (CC: Component Carrier) を 基本単位として、5CCを用いて最大 100MHz程度までの広帯域化をサポ ートできる仕様となっている. 連続 の周波数帯を用いるCAだけでなく、 不連続の周波数帯を用いるCAや,

- *5 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.
- *6 MU-MIMO: 複数ユーザの信号をMIMO 多重伝送することにより, 周波数利用効 率を向上させる技術.
- セル間協調 (CoMP) 送受信:あるユーザ に対して, 複数のセクタあるいはセルと

常に大きいパケット型サービスに適

していると考えられる.本実験装置

では、連続した帯域を用いる上下非

対称CA(下りリンクは5CCで

100MHz, 上りリンクは2CCで

LTE-Advanced において, 適応変

調・チャネル符号化(AMC: Adaptive Modulation and Coding) *10 および

ハイブリッド自動再送要求 (HARQ:

Hybrid Automatic Repeat reQuest)^{*11}

は.LTEと同様に各CCの送信スト

リームごとに行われる.上下非対称

CAにおいて、下りリンクにおける

AMCおよびHARQを柔軟にサポー

トするため、CQI (Channel Quality

Indicator)^{*12}およびACK (Acknowl-

edgement) /NACK (Negative ACK)

40MHzの広帯域化)を実装した.

Uplink Control Information) は、あら かじめ割り当てた1つのCCから送 信する、これにより、SC-FDMAに 基づく上りリンクにおいて、ピーク 対平均電力比(PAPR: Peak-to-Average Power Ratio)^{*13}を増大すること なく, UCIを送信できる. 本実験装 置において、UCIは下りリンクの全 送信ストリームおよび全CCの情報 を一括で符号化し、上りリンク物理 共有チャネル (PUSCH: Physical

2.2 上りリンク SU-MIMO

Uplink Shared Channel) にマッピン

グして送信するものとした.

LTE-Advancedの上りリンクでは、 15bit/s/Hzという高いピーク周波数 利用効率の目標値を実現するため、 最大4ストリーム送信のMIMO空間 多重がサポートされている。また、 複数の送信アンテナを用いた閉ルー プ型送信ダイバーシチもサポートさ れている、送信ダイバーシチでは、 コードブック^{*14}に基づくプリコー



- 信号の送受信を行う技術. 複数のセルが 協調して送受信を行うことにより、他セ ル干渉低減および所望信号電力の増大を 実現する
- *8 周波数分割複信(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. **閉ループ型送信ダイバーシチ**:送信アン
- テナ間のチャネル変動の違いを利用して ダイバーシチ利得を得て,通信品質を向

上させる技術. そのうち, 受信側からの フィードバック情報を用いる方法.

*10 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(*16参 照)を選択することによって,データレ ートを適応制御する方法.

ディングを適用し. 低PAPRを維持 するため、割り当てられた連続する リソースブロック (RB: Resource Block)^{*15}で共通のプリコーディング ウェイトを用いる,広帯域プリコー ディングを採用している. 上りリン クSU-MIMO伝送の概念を図2に示 す. 移動局 (MS: Mobile Station) は送信アンテナごとにチャネル品 質測定用参照信号(SRS: Sounding Reference Signal) を周期的に 送信する. 基地局 (BS: Base Station)では受信したSRSを用いて MIMOチャネル伝搬路を推定し、そ の推定結果に基づき適応無線リンク 制御 (Rank数, プリコーディング ウェイト,変調方式・チャネル符号 化率 (MCS: Modulation and Coding Scheme)*¹⁶の決定)を行う. そし て.決定されたパラメータに基づ き. データ信号を生成して送信す る、本実験装置において、Rank数 は瞬時のフェージング変動に追従す る高速な切り替え制御は行わず、 2×2のアンテナ構成を用い. Rank 1の場合はプリコーディングを用い る閉ループ型送信ダイバーシチ, Rank 2の場合は各アンテナからそれ ぞれ独立に符号化したストリームを 送信するMIMO空間多重の評価を 行う.

本実験装置における上りリンクの サブフレーム構成を図3に示す. SRSの送信帯域は,帯域全体にわた って受信品質を測定するため,デー タ信号の帯域によらず,CC当たり

- *11 ハイブリッド自動再送要求(HARQ): 自動再送要求(ARQ)と誤り訂正符号を 組み合わせることにより,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,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.
- *12 CQI:移動局で測定された下りリンクの 伝搬路状況を表す受信品質指標.

96RB(17.28MHz)とした.また, 1msec長のサブフレームは14 SC-FDMAシンボル^{*17}から構成され, SRSは最後(先頭から14番目)のシ ンボルに多重し, T_{srs} サブフレーム の間隔で周期的に送信する.また, 各送信アンテナからのSRSの多重に は,同一RS(Reference Signal)系列 の巡回シフトによる符号分割多重 (CDM:Code Division Multiplexing)^{*18}を適用する.データ復調のた めのチャネル推定^{*19}に用いる参照 信号 (DM-RS: Demodulation RS) は,データ信号と同一の帯域を用 い,各サブフレームの先頭から4お よび11番目のシンボルに多重する. MIMO空間多重を適用する場合,2 ストリーム間のDM-RSの多重には, SRSと同様に,巡回シフトによる CDMを適用する.

2.3 下りリンク MU-MIMO LTE-Advanced において,下りリ ンク MU-MIMOは, IMT-Advanced



図2 上りリンク SU-MIMO 伝送の概念



*13 ビーク対平均電力比(PAPR):送信波形のピークの大きさを表す指標であり、最大電力と平均電力の比で定義される.これが大きいと、信号至みを避けるために送信側のパワーアンプのバックオフを大きくする必要があり、特に移動端末において問題となる.

リコーディングウェイト行列の候補.

*15 リソースブロック(RB):無線リソース

を割り当てるスケジューリングを行う際 の時間・周波数の最小割り当て単位. *16 MCS: AMC(*10参照)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み合せ.
- *17 シンボル:伝送するデータの単位であり、 OFDMの場合は複数のサプキャリア(*21 参照)から構成される.各シンボルの先 頭にはCP(*36参照)が挿入される.

の周波数利用効率の要求条件を満た すために必要な技術として仕様化さ れた[4]. 本実験装置では、IMT-Advanced の評価条件と同じBS送信 アンテナ数4. MS受信アンテナ数2 (MS当たり最大2ストリーム送信) を適用し、MS数を2として特性評 価を行う.また、2MSに対して合計 4ストリームを同時に送信すること で合計1Gbit/s程度のピークスルー プットの実現を目標とする。本実験 装置における下りリンク MU-MIMO 伝送の概念を図4に示す. BSは送信 アンテナごとに伝搬路状態情報 (CSI: Channel State Information)^{*20} の推定に用いる参照信号 (CSI-RS) を周期的に送信する. 各MSは受信 したCSI-RSを基に推定したCSIを BSにフィードバックする. BSでは、 これらCSIフィードバックを用いて MS間の相互干渉を抑圧する送信プ リコーディングウェイトを生成し. 各データストリームおよびデータ復 調のためのチャネル推定に用いる参 照信号 (DM-RS) に乗算することで 送信ビームフォーミングを行い、信 号を送信する.

本実験装置のMU-MIMO構成のよ うに,BSにおいてMSの受信アンテ ナ数以上のデータストリームを空間 多重して伝送する場合,MS間の送 信ストリームの相互干渉を抑圧する ための送信プリコーディングウェイ ト生成(送信ビームフォーミング) には,非常に高精度なCSIフィード バックが必要となる.そこで,本実

- *18 符号分割多重(CDM):同一の無線シス テム帯域内において,複数個の信号系列 を送信する際に,互いに異なる拡散系列 を用いて多重すること.
- *19 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.
- * 20 CSI:信号が経由した無線チャネルの状態を表す情報.

験装置では以下に説明するような, LTE-Advancedではまだ仕様化され ていないサブバンド単位の高精度な CSIフィードバックを実装した.

本実験装置における下りリンクの サブフレーム構成を図5に示す.各 CCは複数のサブバンド(CSIフィー ドバックおよび共通のプリコーディ ングを適用する周波数単位)から構 成され,サブバンドサイズ (F_{csl}) は,12サブキャリア^{*21} (180kHz) で構成される RBの倍数として定義 する.一方,1msec長のサブフレー ムは14 OFDM シンボルから構成さ れ,CSI-RS は先頭から11番目のシ ンボルに多重し, T_{csl} サブフレーム の間隔 (CSIフィードバックおよび プリコーディングウェイト更新の時





*21 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. 間単位)で周期的に送信する。ま た、各送信アンテナからのCSI-RSの 多重には、周波数分割多重 (FDM: Frequency Division Multiplexing)*²²を適用し、送信アンテナ 当たり6サブキャリアの間隔でマッ ピングする、DM-RSは、各サブフレ ームにおいて、1RB内に送信ストリ ーム当たり 12RE (Resource Element)の密度でマッピングし、デー タ信号と同一のプリコーディングを 乗算して送信する. Rank-4 MU-MIMOの場合,同一MSに対する2 ストリーム間のDM-RSはCDM, 異 なる MS 間の DM-RS は FDM を適用 する.

本実験装置ではCSIとして、CSI-RSを用いて推定したMIMOチャネ ル行列*23に対する共分散行列*24の 固有値分解により得られる固有値お よび固有ベクトル,受信 SINR (Signal-to-Interference plus Noise power Ratio)^{*25}をBSへフィードバックす る. 各サブバンドに対して、固有べ クトルは各ストリームの送信アンテ ナごとにStar型のマッピングを用い て最大13ビット(振幅6ビット,位 相7ビット),固有値および受信 SINRはストリームごとにそれぞれ5 および7ビットで各成分を量子化*26 した. BSでは2MSからのCSIフィ ードバック情報を基に、サブバンド ごとにMMSE (Minimum Mean Square Error) 規範^{*27}に基づくプリ コーディングウェイトを算出し,対 応するデータストリームに乗算して

- *22 周波数分割多重(FDM):同一の無線シ ステム帯域内において、複数個の信号系 列を送信する際に、互いに異なる周波数 を用いて多重すること。
- *23 チャネル行列:各送信アンテナと受信ア ンテナ間の無線チャネルの振幅および位 相の変動量で構成される行列.
- *24 共分散行列:各変数の分散を対角成分と し、その他の要素はそれぞれ2つの変数 の変動方向(正・負)の相関を表す行列.

送信する.

2.4 下りリンクCoMP送信 本実験装置では、前述の下りリン クMU-MIMOにおいて、BS送信ア ンテナ(RRE)を複数地点に分散配 置することでCoMP MU-JT(Multi-User Joint Transmission)*²⁸の検証を 行う機能を実装している(図6)、今 後,室内および屋外実伝搬環境にお いて実証実験を行う予定である。

3. LTE-Advanced 伝送実験装置の構成

本実験装置の基本仕様を表1に, BSおよびMSの送受信機構成を図7 にそれぞれ示す.

3.1 下りリンク送受信機構成

OFDMAを用いる下りリンクで は、システム帯域幅100MHz(占有 信号帯域幅90MHz)、サブキャリア 数6,000(サブキャリア間隔15kHz) とし、5CC(CC当たりの信号帯域 幅は18MHz)のCAを適用する.

下りリンク送受信機の構成を図 7(a)に示す。BS送信機では、2値 の情報ビット系列をチャネル符号 化率*29R. 拘束長*304ビットのター ボ符号^{* 31}化後, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) * 32, 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation)^{*33}, または64QAM^{*34} のデータ変調を行う. データ変調後 の系列にDM-RSを多重し、各MSか らのCSIフィードバックより算出し たプリコーディングウェイトを,対 応するデータストリームおよびDM-RSに乗算し、4送信アンテナ分の信 号を生成する、本評価では、CSIフ ィードバックのサブバンドサイズは F_{CST} =5RB (900kHz), CSI-RS送信周 期(CSIフィードバック周期)は $T_{cer} = 5msec とした.$ 各送信アンテ ナに対してCSI-RSを多重した系列 を、8,192ポイントのIFFT (Inverse Fast Fourier Transform)*35により時 間領域信号に変換し、サイクリッ クプレフィックス (CP: Cyclic Prefix)^{*36}を挿入する. 生成した



- *25 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.
- *26 量子化:デジタル通信において,アナロ グデータの振幅および位相量を離散的な デジタルの値で近似すること。
- * 27 MMSE規範:平均二乗誤差を最小とする 信号を求める方法.
- *28 CoMP MU-JT:複数のセクタあるいはセ

ルから、複数ユーザの信号を同時に送信 してMIMO多重伝送することにより、周 波数利用効率を向上させる技術。

- *29 チャネル符号化率:情報ビット数に対す る誤り訂正符号化後のビット数の比.
- *30 拘束長:出力を得るのに必要な過去の入 カビット数を表す.拘束長を大きくする と誤り訂正能力が高くなる.

OFDMA信号は, D/A変換および直 交変調を行い, 3.92625GHzのキャリ ア周波数にアップコンバートして送 信する.

MS受信機では、2ブランチのア ンテナダイバーシチ受信を適用す る.各ブランチの受信信号は、中間 周波数にダウンコンバート後、約 50dBのダイナミックレンジのAGC (Automatic Gain Control)^{*37}増幅器に よる線形増幅および直交検波を行 い、同相/直交チャネルの信号を14 ビットでA/D変換する.受信デジタ ル信号に対して、CPを除去し、FFT (Fast Fourier Transform)^{*38}により周 波数領域信号に変換した後、受信し たDM-RSを用いてチャネル推定値^{*39} を求め、データ信号の同期検波復調 を行う. MIMO多重におけるデータ ストリーム間の信号分離には, MLD (Maximum Likelihood Detection)^{*40}を適用する. MU-MIMOで

表1 実験装置基本仕様

	下りリンク	上りリンク
無線アクセス	OFDMA	SC-FDMA
キャリア周波数	3.92625GHz	3.67125GHz
システム帯域幅	100MHz	40MHz
送信電力	屋外:10W(40dBm) 屋内:100mW(20dBm)	200mW (23dBm)
送受信アンテナ数	BS:4/MS:2	
CC数	5	2
サブキャリア数	6,000	2,400
サブキャリア間隔	15kHz	
サブフレーム長	1msec	
シンボル長	66.67 μ sec + CP 4.69 μ sec	
データ変調	QPSK, 16QAM, 64QAM	
チャネル符号/復号	ターボ符号(<i>R</i> =0.38~0.92)/Max-Log-MAP復号	
MIMO信号分離	MLD	MMSE



- *31 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,繰り返 し復号することにより,強力な誤り訂正 能力が得られる.
- * 32 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2ビットの情報を送信可能.
- *33 16QAM:デジタル変調方式の1つ.振幅 と位相の異なる16通りの信号を組み合わ せることにより,同時に4ビットの情報
- を送信可能.
- *34 64QAM:デジタル変調方式の1つ. 位相 と振幅の異なる64通りの信号を組み合わ せることにより,同時に6ビットの情報 を送信可能.
- *35 IFFT:逆高速フーリエ変換のことで、入 力された周波数成分(離散データ)に対 する時間信号系列を効率的に計算する方 法。
- *36 サイクリックプレフィックス(CP):

OFDM信号などにおいて、マルチパスな どに起因する前後シンボル間の干渉を抑 圧するために、シンボル間に設けられた ガードタイム.

- *37 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.
- *38 FFT:時間領域の信号の中に含まれる周 波数成分を抽出する処理を高速に計算す る手法.

はMLD信号分離前に,他ユーザに 対する干渉波成分のランダム化を行 うための干渉白色化フィルタ[18]を 適用する.分離後の信号から,軟判 定ターボ復号のためのビットごとの 対数尤度比(LLR:Log Likelihood Ratio)を計算し,Max-Log-MAP^{*41} アルゴリズムによるターボ復号を行 い,送信信号系列を再生する.ま た,MSは受信したCSI-RSを用いて CSIを計算し,BSへフィードバック する.

3.2 上りリンク送受信機構成 DFT (Discrete Fourier Trans-

form) -Spread OFDM^{*42}[19]を用い る SC-FDMAに基づく上りリンクで は,2CC (CC当たりの信号帯域幅 は18MHz)のCAを適用する.シス テム帯域幅は40MHz (占有信号帯 域幅は36MHz),サブキャリア数は 2,400 (サブキャリア間隔15kHz)で ある.

上りリンク送受信機の構成を図 7(b)に示す.MS送信機において,2 値の情報ビット系列は,チャネル符 号化率R,拘束長4ビットのターボ 符号化後,QPSK,16QAM,または 64QAMのデータ変調を行う.デー タ変調後の系列はDFTにより周波 数領域信号に変換後,Rank1の場 合,BSから通知されたプリコーデ ィングウェイトを対応するデータス トリームおよびDM-RSに乗算し,2 送信アンテナ分の信号を生成する. DM-RSおよびSRSは図3のように,

*39 **チャネル推定値**:パケットフレームに多 重した参照信号などを用いて計算する, 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の変動推 定量,

*40 MLD: MIMOの信号分離法の1つ. 受信 した信号と受信される可能性のある信号 の系列すべてを比較し,受信信号のパタ ーンに最も近い組み合せを見つけだす方 法. それぞれ対応するシンボルに多重す る.本評価において,SRS送信周期 は T_{SRS} =5msecとした.各送信アン テナの信号は4,096ポイントのIFFT により時間領域信号に変換後,各シ ンボルの先頭にCPを挿入する.生 成したSC-FDMA信号は,D/A変換 および直交変調を行い,3.67125GHz のキャリア周波数にアップコンバー トして送信する.

BS受信機では、2ブランチのアン テナダイバーシチ受信を適用する. 各ブランチの受信信号は、AGC増幅 器による線形増幅および直交検波を 行い、A/D変換する.受信デジタル 信号に対して、CPを除去し、FFT により各周波数信号成分に分離した データ信号に対して、Rank 1の場合 はMMSE規範に基づく周波数領域 等化、Rank 2の場合はMIMO空間 多重における送信ストリーム間の信 号分離を行う.等化および信号分離 に用いるチャネル推定および雑音電 力推定は、受信した各ストリームの DM-RSを用いて計算する.等化後 の信号はIDFT (Inverse DFT)^{*43}に より時間領域信号に変換した後,軟 判定ターボ復号のためのビットごと のLLRを計算し,ターボ復号により 送信信号系列を再生する.また,BS は受信したSRSを用いてMCSおよ びプリコーディングウェイトを決定 し,MSへ通知する.

4. CAおよび2×2SU-MIMOの 屋外実伝搬実験

4.1 屋外実験の測定コース概要

屋外実験は神奈川県の横須賀市の YRP地区(図8(a))および相模原市 の市街地(図8(b))の2つのエリア で行った.YRP地区における測定コ ースは,BSからの距離が120~ 350m程度の見通し内(LOS:Line-Of-Sight)環境のコース#1,および 350~470m程度の見通し外 (NLOS:NonLOS)環境のコース #2を用いた.BSのアンテナ高は 39.6mである.相模原市街地におけ



- *41 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.
- *42 DFT-Spread OFDM: DFT処理を用いて, SC-FDMA(*2参照) 信号を周波数領域 で生成する方法. DFT以降の信号処理は OFDMと共通点が多い.
- *43 IDFT:離散逆フーリエ変換. 周波数領域 の離散データを時間領域の離散データに 変換すること。

る測定コース#3は,BSからの距離 が400~820m程度で,周囲に高層 のオフィスビルやマンションが建ち 並ぶLOSとNLOSが混在する環境で ある.BSのアンテナ高は56.6mであ る.BSアンテナは水平面方向の 3dBビーム幅が約90°,アンテナ利 得約18dBiの2ブランチの送受信ア ンテナを用い,送信電力は10W (40dBm)とした.

屋外実験においてMSのアンテナ は電波測定車の天井部に設置し,ア ンテナ高は3.1m,水平面方向に無指 向性,アンテナ利得約2dBiの2ブラ ンチの送受信アンテナを用い,送信 電力は200mW(23dBm)とした. MS装置を搭載した電波測定車は, 各測定コース上を時速約10または 30kmで走行した.図13の評価を除 き,BS,MSともに,距離を離して 設定した2つの垂直偏波アンテナを 用いた.また,図13では,ひとつの 筐体内に垂直偏波と水平偏波の2つ のアンテナを搭載する交差偏波アン テナを用いた. 図9に各測定コースの下りリンク で観測される電力遅延プロファイ ル*44の一例を示す.縦軸の受信信 号電力は,信号パスが存在しない雑 音レベルにより正規化した.図よ り,コース#1は直接波と受信電力 の大きい遅延波の2パスが支配的な 伝搬環境であることがわかる.一 方,コース#2は最大遅延が1µsec程 度の遅延広がりの小さいマルチパス 環境である.コース#3は概して最 大遅延が2~3µsec程度であり,パ ス数が多く,遅延広がりが比較的大 きい環境であることがわかる.

4.2 屋外実験結果

下りリンク2×2 Rank-2 SU-MIMO の評価では、上りリンク2×2 Rank 2 SU-MIMOの場合と同様に、各ア ンテナからそれぞれ独立に符号化し たストリームを送信する MIMO空 間多重を適用する(プリコーディン グは適用しない)ものとした.図10 にコース#1および#2(YRP地区)に おいて5CCのCAおよび2×2 Rank-2 SU-MIMOを適用した場合の. MSで 測定した5CC平均の受信SINR. MCS 選択確率. および 5CC 合計の スループットの時変動特性の一例を 示す. MSの移動速度は時速10km. AMC および HARQ を適用し、平均 受信SINRおよびスループット値は. サブフレームごとに測定した瞬時値 を100msec区間で平均化して求め、 MCS選択確率は1秒ごとに統計し た、受信SINRに着目すると、コー ス#1はLOS環境であるため20dBを 超える受信 SINR が観測されており、 一方, コース#2はBSアンテナから の走行距離が増大するに従って受信 SINR が減少し、コース終盤のC地 点 (470m) 付近では約0dBとなって いることがわかる. これに伴い、コ ース#1では64QAMを用いる高速デ ータレートのMCSが主に選択され, コースのほぼ全域において 500Mbit/s以上のスループットを実 現している.また、コース#2では受 信SINRの減少に伴い適切にMCSが 切り替わり、コース終盤においても



*44 電力遅延プロファイル:受信点に到来す るパスの遅延時間を横軸に,その受信電 力を縦軸にプロットしたもの. 50~100Mbit/s程度のスループット が観測されている.

5CCのCAおよび2×2 Rank-2 SU-MIMOを適用した場合の。各測定コ ースにおける100msec区間で平均化 したスループットの累積分布特性 (CDF: Cumulative Distribution Function)*45を図11に示す。コース#1に おいて、時速30kmの特性は時速 10kmに比較して、主にチャネル推 定精度の劣化に起因してスループッ トが低下するものの、コース内場所 率の約90%で500Mbit/s以上のスル ープットを実現している. コース#2 において、時速30kmの特性は時速 10kmに比較して瞬時フェージング 変動に対するAMCの追従性の低下 に起因してMCS選択誤りが増大す るものの、HARQによりスループッ ト特性の劣化は小さく抑えられてい るものと考えられる.相模原市街地 のマルチパス環境であるコース#3 では、YRP地区の測定コースに比較 してBSアンテナからの距離が遠い ものの.BSのアンテナ高が高いこ ともあり、コース#2よりもスルー プットを改善しており、コース内場 所率の約30%で500Mbit/s以上のス ループットを実現していることがわ かる

次に,上りリンクSU-MIMO伝送 のスループット特性を示す.図12 に2CCのCAおよび2×2 Rank-2お よびRank-1 SU-MIMOを適用した場 合の,YRP地区の測定コース(コー ス#1とコース#2を併せたコース全





^{*45} 累積分布特性 (CDF) : 確率変数の分布 を累積して示したもの.

体)における100msec区間で平均化 したスループットのCDFを示す. AMCおよびHARQを適用し、MSの 移動速度は時速10kmとした.比較 のため、 1×2 SIMO (Single-Input Multiple-Output)^{*46}の特性を併せて 示す.図より, Rank 1の特性は, 1×2SIMOに比較してコース内のほ ぼ全域においてスループットを改善 (特に, CDFの20%値でスループッ トを約50%増大)しており、閉ルー プ型送信ダイバーシチのカバレッジ 拡大効果が確認できる.またRank 2 の適用により, コース内場所率の約 25%で140Mbit/s以上のスループッ ト (ピークでは約200Mbit/s) を実 現しており、屋外実伝搬環境におけ る上りリンクのMIMO空間多重の 有効性も確認できる.

図13に2CCのCAおよび2×2 Rank-1およびRank-2 SU-MIMOを 適用した場合の.相模原市街地のコ -ス#3における100msec区間で平均 化したスループットのCDFを示す。 本評価では、MS、BSともに交差偏 波アンテナを用い. AMC および HARQを適用した. MSの移動速度 は時速30kmとした.比較のため、 同一(垂直) 偏波アンテナを用いた 場合の特性を併せて示す(ただし、 同一偏波アンテナの特性は、すべて の偏波面が同一のため、受信電力が 高い場合の結果である).図より、 Rank 2に着目すると、同一偏波アン テナの場合, YRP地区での実験結果 (図12)と異なり、厳しいマルチパ

*46 SIMO: MIMOと対比して,ひとつの送 信アンテナと複数の受信アンテナを用い て信号伝送を行うこと。 ス干渉のため Rank 2が有効となるコ ース内場所率は3%程度, ピークス ループットも約170Mbit/sにとどま っていることがわかる.しかしなが ら,交差偏波アンテナを用いた場 合, Rank 2が有効となるコース内場 所率は大幅に改善し,約230Mbit/s のピークスループットを実現してい る.これは,異なる偏波面で受信さ れる信号の受信電力が小さくなるこ とに起因して,総受信電力(受信ダ イバーシチ利得)は減少するもの



図12 上りリンクSU-MIMOのスループット特性(横須賀市・YRP地区)



の,それ以上にMIMO空間多重に おけるストリーム間干渉を大幅に低 減できるためである.また,Rank1 の特性は1×2 SIMOに比較してコ ース内場所率の約45%においてス ループットを改善していることがわ かる.

5. 下りリンク4×2 MU-MIMOの 屋内実伝搬実験

5.1 屋内実験環境および 評価条件

屋内実験は、NTTドコモR&Dセ ンタ内の会議室で行った.会議室の 概観写真を図14に示す.会議室は 幅18.4m,奥行12.2m,高さ3.8mで あり,机40台と椅子80脚が設置さ れている.BSアンテナを会議室の 中央に配置し、MS#1はP地点付近 に静止させ、MS#2をPからQ地点 へ時速約1kmで移動させながら測定 を行った.コースの全長は14m程度 である.BSおよびMSのアンテナ高 は、それぞれ2.4および1.4mであり、 BS、MSともに水平面内に無指向 性、アンテナ利得約2dBiのダイポー ルアンテナを用いた.また、隣接す るアンテナ間隔は7.6cm(下りリン クキャリア周波数の1波長程度)で 線形配置し、BSの送信電力は 100mW (20dBm)とした.会議室は 送受信アンテナ間に遮蔽物のない LOS環境であり、受信したCSI-RS により求めたr.m.s. (root mean squared)遅延広がり^{*47}は0.05µsec 程度、隣接する送信および受信アン テナ間のフェージング相関^{*48}は、 それぞれ0.42および0.30であった.

本評価では、2MSを用いる下りリ ンク4×2 MU-MIMOおよび5CCの CA(100MHz帯域幅)を併用し、 AMCおよびHARQを適用した場合 のスループット特性を測定する. AMCにおけるMCS選択は、MSか ら周期的にフィードバックされる受 信 SINRに基づいて行われるが、



図14 屋内実験測定コース(ドコモR&Dセンタ・会議室)

MU-MIMOではMS間の相互干渉に 起因して受信SINRが大きく変動し, MCS選択誤りが増大することが考 えられる.そのため、本実験装置で は、このようなMCS選択誤りを低 減するため、MSからフィードバッ クされるACK/NACKに基づいて MCS選択しきい値を調整するアウ ターループしきい値制御*49[20]を実 装している.

5.2 屋内実験結果

はじめに、フェージングシミュレ ータを用いた室内実験における4× 2 Rank-4 MU-MIMOの基本特性を明 らかにする、本評価では、角度広が りが比較的小さくBSアンテナ高が 高いセルラ環境を想定したシナリオ (BSにおける2つの送信アンテナペ ア内の相関が0.99、送信アンテナペ ア間の相関が0.0、最大ドップラ周 波数10Hz(時速約3kmに相当). r.m.s.遅延広がり0.3 µ sec の6パスの 指数減衰チャネルモデル)を仮定し た. 平均受信 SNR (Signal-to-Noise power Ratio)^{*50}に対する2MS合計の スループット特性を図15に示す. また,各MCSにおけるスループッ ト特性を併せて示す. 図より、スト リーム#1 (64QAM, R=0.73) およ びストリーム#2 (64QAM, R=0.56)のMCSの組み合せを用いるこ とにより、およそ1Gbit/sのピーク スループットを実現していることが わかる. また, AMCを適用した場 合,瞬時受信 SINR に応じて適切な

*48 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. *49 アウターループしきい値制御:本稿では、 AMCにおけるMCS選択において、データの受信品質に応じてMCS選択しきい値を適応制御することを示す。

^{*47} r.m.s.遅延広がり:移動通信における電波 伝搬において,建物などからの反射・回 折により遅延して到来するすべての電波 の遅延時間の広がり.全到来波の遅延時 間について,受信電力による重み付け統 計処理により求められる標準偏差で定義 される.

^{*50} 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.

MCSが選択され,平均受信 SNRの 増大に伴いスループットを増大し, 同様に,およそ 1Gbit/sのピークス ループットを実現していることがわ かる.

図14に示す屋内実伝搬環境(会 議室) における. 4×2 Rank-4 MU-MIMOの各MSおよび2MS合計のス ループットに対する時変動特性を図 16に示す. スループットはサブフ レームごとに測定した瞬時値を 200msec区間で平均化することによ り求めた.図より、移動している MS#2だけでなく,静止している MS#1のスループットも時変動して いることがわかる、これは、MS#2 の移動に伴い. MS#1における周囲 の伝搬環境も変動し、これに応じて プリコーディングウェイトも更新さ れるためと考えられる.また、固有 値分解に基づくCSIフィードバック を用いる4×2 Rank-4 MU-MIMOの 適用により、2MS合計でおよそ 1Gbit/sのピークスループットの実 現が確認できる.また、測定コース 全体を通して、SU-MIMOで実現で きるスループット (600~700Mbit/s 程度)を超える特性を実現してお り、屋内実伝搬環境における MU-MIMOの有効性も確認できる.

あとがき

本稿では,LTE Release 10仕様 として完成したLTE-Advanced 無 線アクセス技術を検証するための 実験装置について概説した.本実 験装置はCA(下りリンク100MHz, 上りリンク40MHzの広帯域化)を 基本機能として実装し,上りリンク SU-MIMO,下りリンクMU-MIMO/CoMP送信などのLTE-Advancedにおける高度化マルチア ンテナ技術の実証実験が可能であ る.さらに、本実験装置を用いた屋 外および屋内実伝搬環境における伝 送実験結果について解説した。屋外 実験では、CAおよび2×2 Rank-2 SU-MIMOの適用により、下りリン



図15 下りリンク4×2 MU-MIMOのスループット特性(室内実験)



クで 600 Mbit/s, 上りリンクで 200 Mbit/s以上のピークスループッ トの実現を実証した.また,屋内実 験では,2MSを用いる下りリンク 4×2 Rank-4 MU-MIMOおよびCA (100 MHz帯域幅)の適用により 1Gbit/s程度のピークスループット の実現を実証した.

今後,下りリンクMU-MIMO/CoMP 送信技術などに関して,室内および 屋外実伝搬環境における実証実験を 引き続き行う予定である.

文 献

- 3GPP TS36.300 V8.12.0 : "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2," Apr. 2010.
- [2] 大久保, ほか:"高速・大容量・低遅延 を実現する LTE の無線方式概要,"本 誌, Vol.19, No.1, pp.11-19, Apr. 2011.
- [3] 中村, ほか: "LTE-Advancedの概要および標準化動向,"本誌, Vol.18, No.2, pp.6-11, Jul. 2010.
- [4] 永田 聡,西川 大祐,阿部 哲士,岸山 祥 久,中村 武 宏: "LTE/LTE-Advancedのシステム性能評価," 信学 技報, Vol.110, No.19, RCS2010-5, pp.25-30, Apr. 2010.
- [5] M. Iwamura, K. Etemad, M. Fong, R. Nory and R. Love : "Carrier Aggregation Framework in 3GPP LTE-Advanced," IEEE Trans. Commun. Mag., Vol.48, No.8, pp.60-67, Aug. 2010.
- [6] 3GPP TS36.201 V10.0.0 : "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description," Dec. 2010.
- [7] E. Dahlman, S. Parkvall and J. Sköld :

"4G-LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband," Academic Press, 2011.

- [8] Y. Kakishima, T. Kawamura, Y. Kishiyama, H. Taoka and T. Nakamura : "Experimental Evaluation on Throughput Performance of Asymmetric Carrier Aggregation in LTE-Advanced," Proc. of IEEE VTC2011-Spring, May 2011.
- [9] S. Yasukawa, T. Kawamura, Y. Kishiyama, H. Taoka and T. Nakamura : "Experimental Evaluation on SU-MIMO Transmission with Closed-Loop Precoding in LTE-Advanced Uplink," Proc. of IEEE VTC2011-Spring, May 2011.
- [10] S. Yasukawa, T. Kawamura, Y. Kishiyama, H. Taoka and T. Nakamura : "Experiments on Throughput and Coverage for Closed-Loop SU-MIMO Transmission Combined with Carrier Aggregation in LTE-Advanced Uplink," Proc. of IEEE APWCS, Aug. 2011.
- [11] Y. Kakishima, K. Takeda, T. Kawamura, Y. Kishiyama, H. Taoka and T. Nakamura : "Experimental Evaluations on Carrier Aggregation and Multi-user MIMO Associated with EVD-based CSI Feedback for LTE-Advanced Downlink," Proc. of IEEE ISWCS, Nov. 2011.
- [12]K. Saito, Y. Kakishima, T. Kawamura, Y. Kishiyama, H. Taoka and H. Andoh : "Experimental Evaluation on 4-by-2 MU-MIMO Achieving 1 Gbps Throughput Using AMC with Outer-Loop Threshold Control for LTE-Advanced Downlink," Proc. of IEEE VTC2012-Spring, May 2012.
- [13] S. Yasukawa, T. Kawamura, Y. Kishiyama, H. Taoka and H. Andoh : "Field Experiments on Closed-Loop SU-MIMO Transmission Considering Effect of Antenna Configurations in LTE-Advanced Uplink," Proc. of IEEE VTC2012-Spring, May 2012.

- [14] Y. Kakishima, T. Kawamura, Y. Kishiyama, H. Taoka and H. Andoh : "Experiments on Downlink 4-by-2 MU-MIMO with Quantized CSI Feedback for LTE-Advanced Deployment Scenarios," Proc. of Future Network and Mobile Summit, Jul. 2012.
- [15] K. Saito, Y. Kakishima, T. Kawamura, Y. Kishiyama, H. Taoka and H. Andoh : "Field Experiments on Throughput Performance of Carrier Aggregation with Asymmetric Bandwidth in LTE-Advanced," Proc. of Future Network and Mobile Summit, Jul. 2012.
- [16] 丹野 元博,岸山 祥久,田岡 秀和,三 木 信彦,樋口 健一,佐和橋 衛:"LTE-Advanced の無線インタフェースの要 求条件および無線アクセス技術,"信学 技報, Vol.108, No.305 RCS2008-136, pp. 37-42, Nov. 2008.
- [17] M. Tanno, Y. Kishiyama, H. Taoka, N. Miki, K. Higuchi and M. Sawahashi : "Layered OFDMA Radio Access for IMT-Advanced," Proc. of IEEE VTC2008-Fall, Sep. 2008.
- [18] D. Tse and P. Viswanath : "Fundamentals of Wireless Communication," Cambridge University Press, pp. 356-362, 2005.
- [19] D. Galda, H. Rohling, E. Costa, H. Haas and E. Schulz : "A Low Complexity Transmitter Structure for OFDM-FDMA Uplink Systems," Proc. of IEEE VTC2002-Spring, pp.1737-1741, May 2002.
- [20] J. Lee, R. Arnott, K. Hamabe and N. Takano : "Adaptive Modulation Switching Level Control in High Speed Downlink Packet Access Transmission," 3G Mobile Communication Technologies, pp.156-159, May 2002.