

Super 3G (LTE) の方式概要および実験結果

はらだ あつし おおふじ よしあき
原田 篤 / 大藤 義顕

おおくぼ なおと
大久保 尚人

NTTドコモ

Super 3G (LTE) の試作装置を用いた実験結果を中心にその有効性について解説します。

Super 3G (LTE) 無線方式概要

Super 3G試作装置の基本仕様を表に示します^{(1)~(3)}。これらの仕様は3GPP標準化におけるLTEの仕様と一致しています。無線アクセス方式として、下りリンクにはマルチパス干渉に対する耐性が高く、サブキャリア数を変更することで広範囲な周波数帯域幅に柔軟に対応ができるOFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) を用いています。また、上りリンクには移動端末 (UE: User Equipment) のピーク電力対

平均電力比 (PAPR: Peak-to-Average Power Ratio) ^{*1}の低減により低消費電力化が実現でき、ユーザ間の信号の直交化により干渉低減が図れるSC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) ^{*2}を用いています。以下に無線方式の概要について説明します。

■下りリンク無線アクセスOFDMA

直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) は、高速情報レートの広帯域信号を多数の低速シンボル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) に対して耐性の高い信号伝送が実現できます。さらに、OFDMは狭帯域幅のサブキャリア信号を用いるために、サブキャリア数を変更することにより広範囲な信号帯域幅のスペクトルに柔軟に対応できます。OFDMでは、各OFDMシンボルの先頭にサイクリックプレフィックス (CP: Cyclic Prefix) と呼ばれるガード区間を設けることにより、前シンボルの遅延波が次のOFDMシンボルに及ぼすシンボル干渉およびサブキャリア間の直交性の崩れに起因するサブキャリア間干渉を除去できます (図1)。Super 3G (LTE) では、このCPを用いるOFDMベースの無線アクセス (OFDMA) をベースラインにしています。

以下ではSuper 3G (LTE) に新たに適用された主な容量改善技術について説明します。

(1) 周波数スケジューリング

広帯域伝送では、マルチパスにより

*1 ピーク電力対平均電力比 (PAPR): ピーク時の送信電力の大きさを示す指標であり、変調信号の最大送信電力と平均送信電力の比。PAPRを下げることにより、移動機の低消費電力化が図れます。

*2 SC-FDMA: 同一周波数帯域内において、複数ユーザに対し、ユーザごとに連続した周波数帯域を割り当てることで、複数のユーザアクセスを可能とする方式。

表 Super 3G試作装置の基本仕様

周波数	1.7 GHz帯	
アクセス方式	上り	SC-FDMA
	下り	OFDMA
帯域幅	5, 10, 15, 20 MHz	
サブフレーム長	1 ms	
サブキャリア間隔	15 kHz	
ガード区間	ショート	4.7 μ s
	ロング	16.7 μ s
変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM*	
チャンネル符号化	ターボ符号	
マルチアンテナ	1×2, 2×2 (4×2) MIMO, 4×4 MIMO	

*上りリンクではオプション

周波数領域の受信レベルが変動する周波数選択性フェージングの影響をいかに低減し、有効に利用するかが鍵となります。Super 3G (LTE) ではデータチャンネルの伝送方法として、周波数領域の伝搬路の変動を利用した周波数領域パケットスケジューリングが適用されています。UEは定められた周波数単位ごとに下りチャンネルの受信品質を示す指示子であるCQI (Channel Quality Indicator) を測定し、測定したCQI情報を上りリンクの制御チャンネルにより、基地局であるeNB (evolved Node B) に報告します。eNBは、複数ユーザから通知された

CQI情報を基に、無線リソースブロック (RB: Resource Block) *3を選択したユーザに割り当てます (図2)。各ユーザのCQIに応じて受信信号レベルの高い周波数ブロックを各々のユーザに対して最適に割り当てることにより、ユーザ間のダイバーシチ効果 (マルチユーザダイバーシチ) を得ることができ、ユーザスループットおよびセル当りのスループット向上が可能となります。

(2) MIMO多重伝送を用いる高速信号伝送

MIMO (Multi-Input Multi-Output) 多重伝送は、複数の送受信アンテナを用いて、同一の周波数、時間に

おいて異なる信号を同時に送受信することにより高速伝送を実現し、ユーザ・セルスループットを向上させることができます。移動端末では送信アンテナごとのアンテナ間直交参照シンボル*4を用いて測定したチャンネル変動値を基に送信信号分離を行います。OFDMAは、DS-CDMA (Direct Sequence -Code Division Multiple Access) *5などのシングルキャリアベースの無線アクセスと異なり、他の送信アンテナ信号との信号分離をマルチパス干渉の影響を受けることなく高精度に実現できるため、MIMO多重伝送との親和性に優れており高速信号伝送に適しています。また、受信状況において、送信ストリーム数を制御するランクアダプテーションが適用されています (図3)。この制御は、受信レベルが低いところ、あるいはチャンネルの相関が高いところでは、ランク数 (送信ストリーム数) を小さくして品質の改善を行い、受信レベルが高くチャンネルの相関が低いところでは、複数のストリームを同時に送信することにより高速伝送を実現します。

■上りリンク無線アクセス

SC-FDMA

上りリンクは下りリンクと異なり、移動端末の低消費電力化が非常に重

- *3 無線リソースブロック (RB): 周波数スケジューリングを行う無線リソースの最小単位。
- *4 直交参照シンボル: セルのレベル検出や復調時のチャンネル推定に用いる参照シンボルであり、本参照シンボルは複数のアンテナ間で直交しています。
- *5 DS-CDMA: ユーザごとに異なる符号を用いて信号系列を直接拡散することで、同一周波数帯域内において複数のユーザのアクセスを可能とする方式。W-CDMA方式に採用されています。

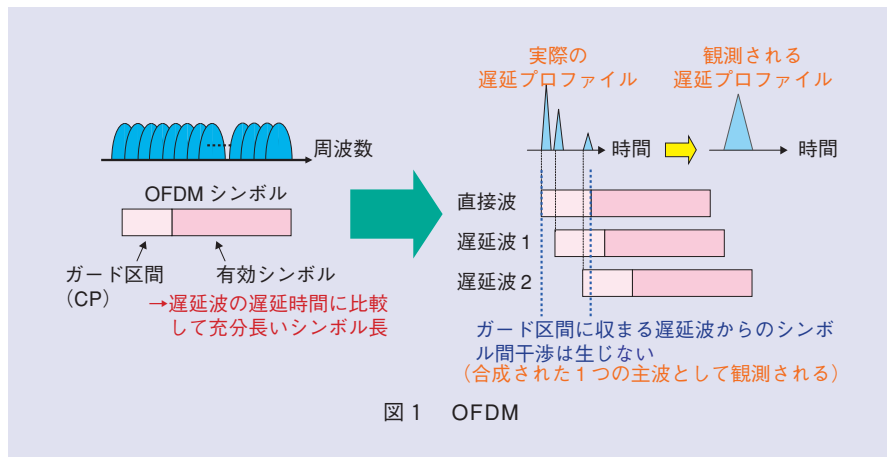


図1 OFDM

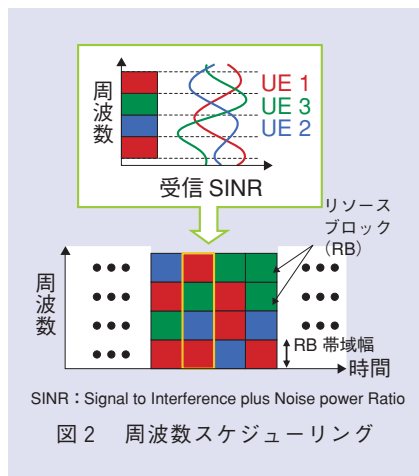


図2 周波数スケジューリング

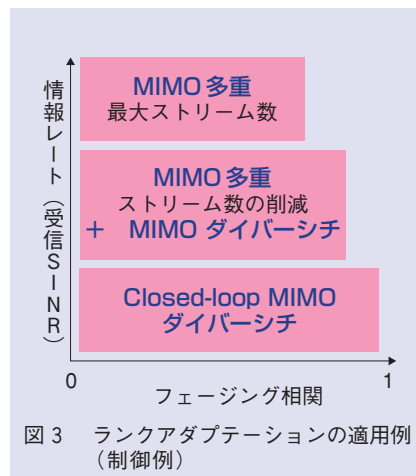


図3 ランクアダプテーションの適用例 (制御例)

要な要求条件です。特に送信部の電力増幅器は、移動端末の消費電力で大きな割合を占めるため、電力効率の高い増幅器の利用に適したアクセス方式の適用が必須となります。また、同じ最大送信電力の電力増幅器を仮定した場合、PAPRが低いアクセス方式ほど同じ受信性能を実現できるカバレッジエリアを増大することができます。このためSuper 3G (LTE) ではSC-FDMAが採用されています。以下、SC-FDMA無線アクセスの特長について述べます。

(1) 可変帯域SC-FDMA

上りリンクにおいては、前述のように移動端末の低消費電力化の観点から、送信すべきトラフィックの情報レートに応じた最小の送信電力でデータチャンネルを送信します。送信信号帯域幅を広くすると周波数領域の伝搬路変動を平均化する周波数ダイバーシチ効果は増大します。しかしながら、必要以上に送信信号帯域幅を拡大すると無線伝搬路の推定に必要な参照信号の電力密度が低減するため、無線伝搬路の推定精度の劣化に起因して受信特性が劣化します。したがって、送信トラフィックの情報レートに応じた可変帯域幅のSC-FDMA無線アクセスが用いられます(図4)。上りリンクにおいて下りリンクと異なる点は、シングルキャリアの送信のみを許容する点であり、シングルキャリアの性質を維持するため、割り当てる周波数帯域は離散的ではなく連続する周波数帯域(連続するRB)を周波数スケジューリングによって割り当てる必要があります。また、サブフレーム内あるいはサブフレー

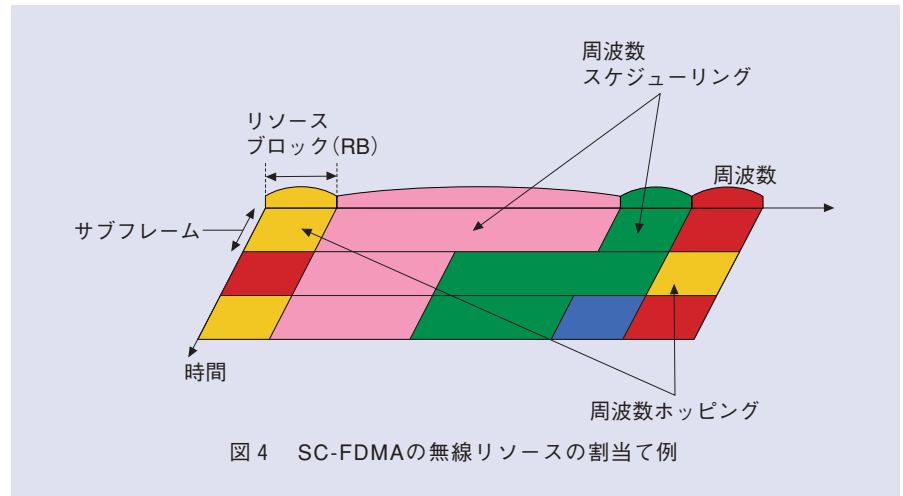


図4 SC-FDMAの無線リソースの割当て例

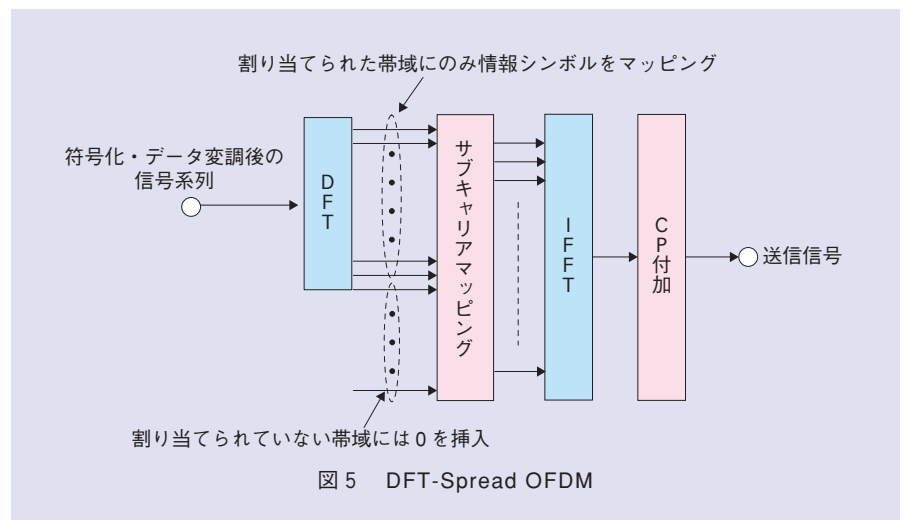


図5 DFT-Spread OFDM

ム間で異なる周波数帯域を割り当てる周波数ホッピングを適用することで、周波数ダイバーシチ効果を得ることができるため高品質受信を実現することが可能となります。

(2) 周波数領域のSC-FDMA信号生成法

上りリンクのSC-FDMA無線アクセスでは、下りリンクと同様に、周波数スケジューリングにより各UEにシステム帯域の一部の周波数帯域を割り当てます。SC-FDMA信号の周波数領域での生成法としてDFT (Discrete

Fourier Transform) -Spread OFDMが用いられています。DFT-Spread OFDMの送信ブロック構成を図5に示します。DFT-Spread OFDMでは、UEはまず変調後の情報シンボル系列をDFT処理し、DFT処理後の情報シンボルを自分に割り当てられている周波数帯域にのみマッピングし、それ以外の周波数帯域は0をマッピングした系列に対して、逆高速フーリエ変換 (IFFT: Inverse Fast Fourier Transform)^{*6}処理を用いることにより送信信号を生成します。DFT-

Spread OFDMを用いることにより、下りリンクのOFDMAと同一のクロック周波数、サブキャリア間隔を実現できるという特長を持っています。

(3) CPを用いる周波数等化の適用

SC-FDMA無線アクセスでは、自チャネルの遅延波からの干渉（マルチパス干渉）を抑圧する等化器が必要になります。周波数領域の等化処理は、時間領域処理に比較して演算処理量を小さくできるため実用に適しています。この等化処理は、ブロック単位で時間領域信号を周波数領域の信号に変換する必要があるため、ブロック間干渉の影響をなくするためにCPをFFT（Fast Fourier Transform）ブロックごとに設けています。

(4) Fractional送信電力制御

前述のように、SC-FDMAでは周波数領域において、ユーザ間の直交化が実現できるため、同一セル（セクタ）内ではCDMAのような干渉は生じません。このため、ユーザごとに送信電力制御の目標値を制御するFractional TPC（Transmission Power Control）が適用されます。

Fractional TPCでは基地局に近いユーザの目標値を高く設定することにより、スループットの増大を実現し、セル端に近いユーザの目標値を低く設定することにより他セルへの干渉の低減を実現することでセル全体のスループットを向上させます（図6）。

Super 3G試作装置および実験結果

今回開発したSuper 3G試作装置は3 GPP標準仕様に準拠したものであ

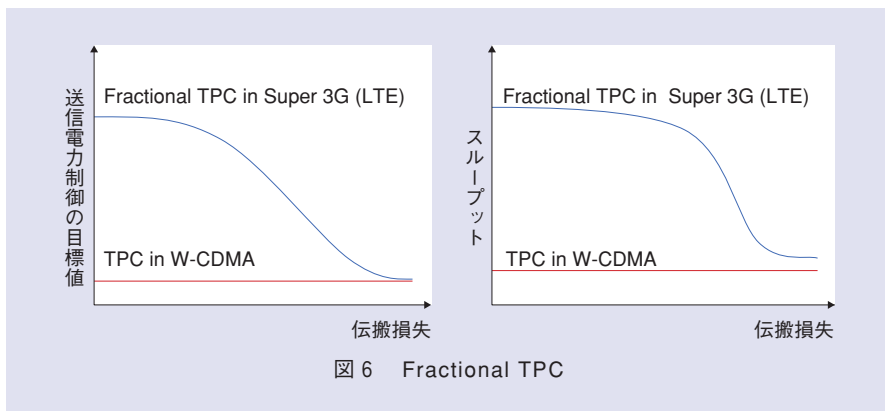


図6 Fractional TPC

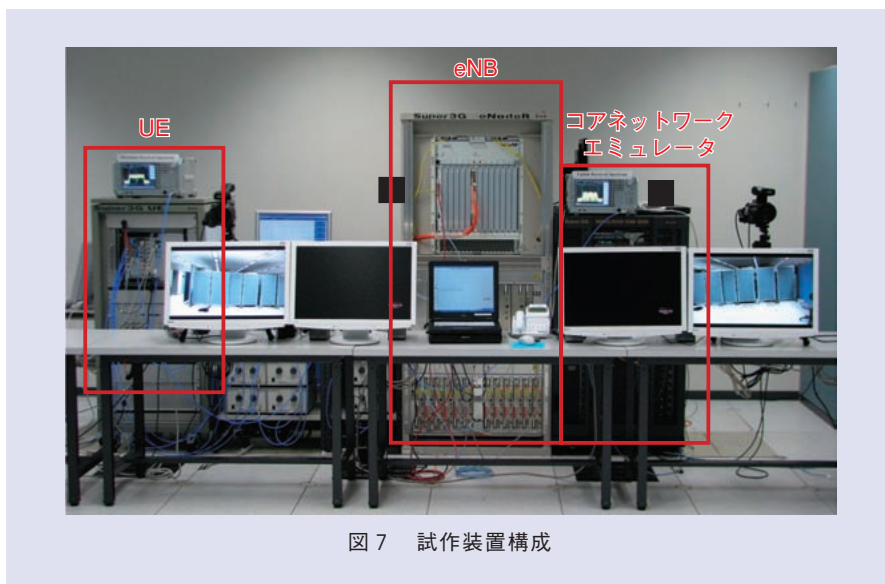


図7 試作装置構成

り、前項に記載の機能が盛り込まれています。ここでは、Super 3G試作装置の概要、および無線伝送実験結果について解説します。

■試作装置構成

室内試作装置構成を図7に示します。eNB、UE、コアネットワークエミュレータから構成され、無線伝搬路を模擬するためにフェージングシミュレータを適用しました。コアネットワークエミュレータから転送されてきたデータは、eNBにおいて無線制御用のヘッダなどと多重された後、コードワード

(Codeword)^{*7}ごとの系列に直並列変換されます。ここで、コードワードはH-ARQ（Hybrid Automatic Repeat and reQuest）^{*8}の再送単位のブロックであり、最大2です。その後、コードワードごとに、直並列変

*6 逆高速フーリエ変換（IFFT）：時間領域の信号の中に含まれる周波数成分とその割合を抽出する処理を高速に計算する手法である高速フーリエ変換（FFT）の逆変換。周波数領域の信号から時間領域の信号に変換する処理であり、FFTと同一の計算手法で実現できます。
*7 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います。

換後の情報ビット系列をチャンネル符号化し、データ変調マッピングを行い、プリコーディング行列を乗積して各アンテナの送信信号を生成します。チャンネル符号化としては、拘束長4、符号化率 $R=0.16\sim 0.89$ のターボ符号を適用し、データ変調にはQPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) および64QAMを適用しました。ここで最大送信アンテナブランチ数は4です。

UE受信では、4受信アンテナブランチで受信した受信信号をAGC (Automatic Gain Control) 増幅器による線形増幅および直交検波後、I/Qチャンネルの信号を受信デジタル信号へとA/D変換を行います。受信OFDMシンボルタイミングは、FFT前の受信信号とフレーム内に多重した直交参照信号の相互相関を基に検出、更新します。検出した受信OFDMシンボルタイミングを基に、受信デジタル信号のガード区間を除去し、FFTにより各サブキャリアの信号成分に分離します。参照信号を用いて各送受信アンテナブランチ間のチャンネル推定値を求め、チャンネル推定値を用いて信号分離部においてQRM-MLD (Maximum Likelihood Detection with QR decomposition and M-algorithm) with ASESS (Adaptive SElection of Surviving Symbol replica) 法⁽⁴⁾を用いて信号検出を行い、対数尤度比 (LLR: Log Likelihood Ratio) 計算部において、軟判定ターボ復号のためのビットごとのLLRを計算します。最後に、ビットごとの

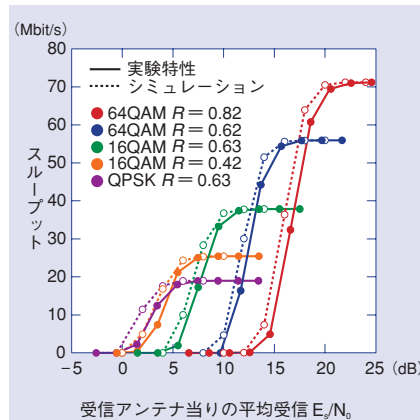


図8 下りリンクスループット特性 (1アンテナ送信)

LLRをターボ復号器 (Max-Log-MAP復号) に入力し、各送信アンテナブランチに対応する復号データを並列変換して、送信信号系列を再生します。

■屋内実験特性

(1) 下りリンクスループット特性

1アンテナ送信時のMCS (Modulation and channel Coding Scheme)^{*9}をパラメータとしたときの1受信アンテナ、1情報シンボル当りの平均受信信号電力対雑音電力密度比 (E_s/N_0 : Signal energy per symbol-to-noise power spectrum density ratio) に対するスループット特性の実験結果を図8に示します。ここで、帯域幅はSuper 3G (LTE) の最大帯域幅である20 MHzを用い、チャンネルモデルとしてはExtended Vehicular A 3 km/h^{*10}を用いました。また比較のため、同一のチャンネルモデルを用いた場合の計算機シミュレーション結果を併せて示します。図8より、シミュレーションに対し、実験結果における同一スループットを実

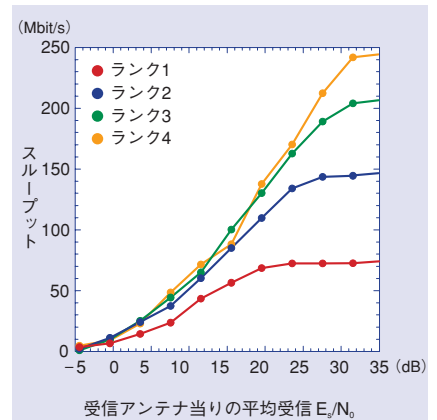


図9 下りリンクスループット特性 (複数アンテナ送信 (MIMO))

現する所要平均受信 E_s/N_0 の劣化は1 dB程度であり、シミュレーション結果とほぼ一致した妥当な実験結果が得られています。

複数アンテナ送信 (MIMO) を用いた場合のスループット特性を図9に示します。ここで、送受信アンテナ数はそれぞれ4つとし、ランク数をパラメータとしました。チャンネルモデルとしては、時速3 km/hで、平均受信電力がパスごとに2 dBずつ減衰する6パスの指数減衰モデルを用いました。また、受信レベルに応じて最適な変調方式、符号化率を選択する適応変調 (AMC: Adaptive Modulation and channel Coding) およびパケット誤りに再送を行い、受信側で合成するH-ARQを適用しました。H-ARQ方式としては再送時に誤り訂正能力を向上さ

*8 H-ARQ: 誤り訂正符号化 (FEC: Forward Error Correction) と自動再送要求 (ARQ: Automatic Repeat reQuest) を組み合わせたパケット再送制御技術。

*9 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。

*10 Extended Vehicular A 3 km/h: 3 GPPで定義している移動環境を模擬したパスモデルの1つ。

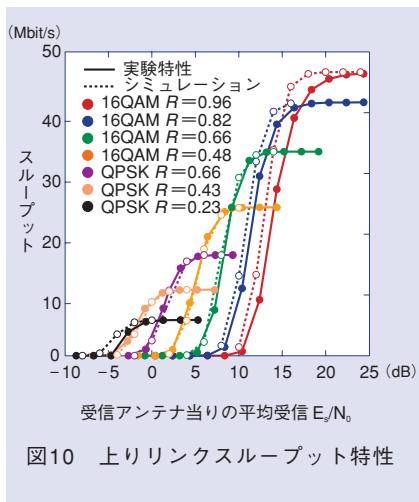


図10 上りリンクスループット特性

せるために異なる冗長ビットを送るIR (Incremental Redundancy) を用いました。その他の条件は図8と同じであり、アンテナ間のフェージング相関は0としました。図9より平均 $E_s/N_0=18$ dBにおいて、ランク2で100 Mbit/sを実現できていることが確認できます。また、ランク4ではフェージング環境下において、最大240 Mbit/sのスループットが達成できていることが確認できます。

(2) 上りリンクスループット特性

MCSをパラメータとした時の平均受信 E_s/N_0 に対する上りリンクスループット特性の実験結果を図10に示します。ここで、帯域幅はSuper 3G (LTE) の最大帯域である20 MHzを用い、下り同様チャンネルモデルとしてはExtended Vehicular A 3 km/hを用いました。また比較のため、同一のチャンネルモデルを用いた場合の計算機シミュレーション結果を併せて示します。図10より、実験結果のシミュレーションからの同一スループットを実現する所要平均受信 E_s/N_0 の劣化は1

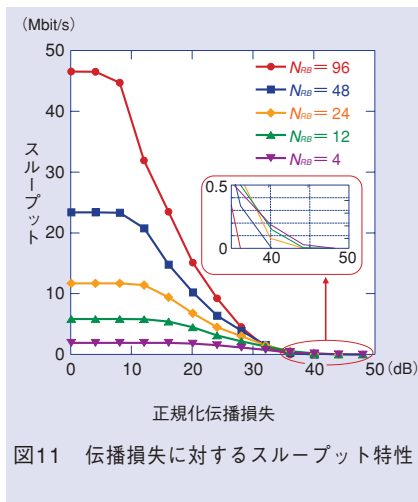


図11 伝播損失に対するスループット特性

dB程度であり、シミュレーション結果とほぼ一致した妥当な実験結果が得られています。

eNBからの正規化伝播損失に対するスループット特性を図11に示します。本実験ではeNBからの距離に対する正規化伝播損失を奥村一泰式を用いて計算し、信号減衰レベルを調整することによりeNBからの距離を等価的にパラメータとしてスループット特性を評価しました。図11では、eNBからの距離が35 mの地点における伝播損失を0 dBとなるように正規化した値を用いました。ここで、UEの最大送信電力は24 dBmとし、使用するRB数(割り当て帯域幅)をパラメータ N_{RB} としました。また、送信電力制御には前述のFractional TPCを用いて、伝播損失に応じた送信電力を行い、さらに下りリンク同様、AMC、H-ARQを適用しました。図11によりセル近傍においては $N_{RB}=96$ (17.2 MHz) の帯域を用いることにより、約50 Mbit/sのスループットを実現できていることが確認できます。また、セル端のユーザは

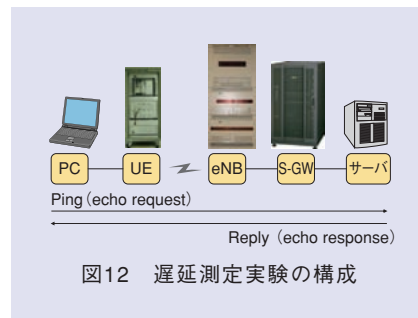


図12 遅延測定実験の構成



図13 遅延特性

割り当てるRB数を少なくすることによりカバレッジの増大が実現できていることが確認できます。

(3) 遅延特性

Super 3G (LTE) の重要な技術的要求の1つである伝送遅延の短縮を検証した際の、遅延測定実験の構成を図12に、pingコマンドを使って測定した往復伝送遅延を図13に示します。往復伝送遅延は約12~13 msであり、eNB~サーバ間の転送遅延やコアネットワークエミュレータ、サーバでの処理遅延を考慮するとSuper 3G (LTE) の目標値である片側伝送遅延5 msをほぼ満足していることが確認できます。

■屋外実験特性

2008年2月より屋外実験を開始しました。屋外実験は神奈川県横須賀市、山梨県甲府市(およびその近郊)の2地区で実施しています。横須賀地区の実験エリアを図14に示します。本エリアにおいて、実際の無線伝搬路

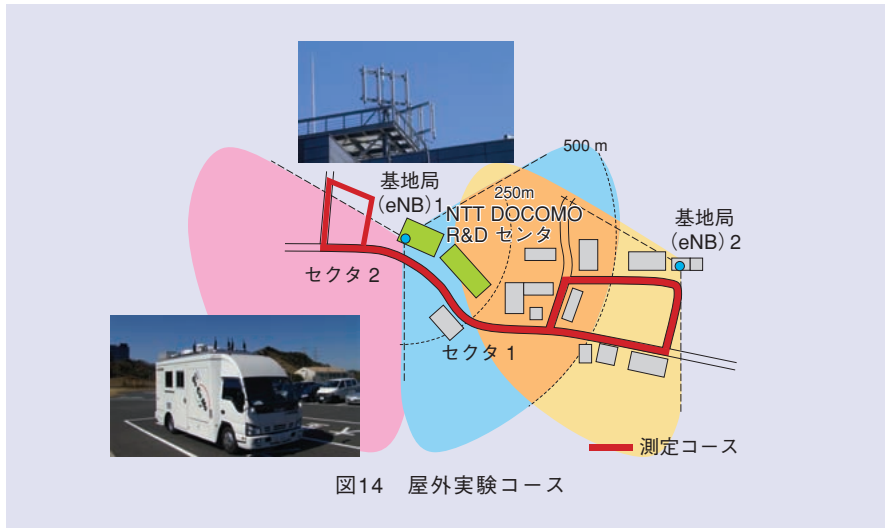


図14 屋外実験コース



図15 屋外実験特性例

における無線特性の検証を行っています。

また、屋外実験の特性例を図15に示します。図15はeNBより4アンテナ送信を行った場合の下りリンク受信特性を示しており、屋外環境においても約250 Mbit/sのスループットを実現できていることが確認できます。

今後の展開

Super 3G (LTE) の試作装置を用

いた伝送実験特性について説明し、その有効性を示しました。今後は、複数のユーザを同時に接続して行う周波数領域スケジューラ機能の検証、セクタ間およびセル間ハンドオーバ機能の検証などを行い、実用化に向けた検証、システムの最適化を図る予定です。

参考文献

- (1) 3GPP TS36.211: “ Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical Channels and Modulation,” 2007.
- (2) 3GPP TS36.212: “ Evolved Universal

Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Multiplexing and channel coding,” 2007.

- (3) 3GPP TS 36.213: “ Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical layer procedures,” 2007.
- (4) K. Higuchi, H. Kawai, N. Maeda, and M. Sawahashi: “Adaptive selection of surviving symbol replica candidates based on maximum reliability in QRM-MLD for OFCDM MIMO multiplexing,” in Proc. IEEE Globecom2004, Vol.4, pp.2480-2486, Nov. 2004.



(左から) 原田 篤/ 大藤 義顕/
大久保 尚人

Super 3Gの実現により、大容量コンテンツのダウンロードなどさまざまなサービスを展開できるようになります。今後も豊かなモバイルマルチメディア社会の実現に向けて、さらなる高速・大容量化の通信インフラの開発に積極的に取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTTドコモ
研究開発推進部
TEL 03-5156-1749
FAX 03-5156-0232