

高効率多次元適応パケット無線インタフェース技術

北京研究所では IMT-Advanced および将来の移動通信システムに向けた研究を行っており、無線伝送技術については適応パケット無線伝送プロジェクトによる多次元適応パケット無線インタフェース技術を中心に研究を行っている。

北京研究所 ジャン ジャヌ カヤマ ヒデトシ
張 戦 加山 英俊

1. まえがき

サービス／アプリケーションの多様化に伴って、将来の移動通信システムでは、伝送速度や信頼性の向上がより一層要求されている。移動通信には、固定通信と異なり「移動性」、「同報性と干渉」および「チャネル（伝搬路）変動のランダム性」といった特長がある。このうち移動性と同報性はユーザに移動通信の利便性をもたらすが、干渉とチャネル変動のランダム性は移動通信システムの設計において、特に考慮すべき要因となる。無線伝送方式はこれら無線特有の問題と直接関係し、その技術は伝送速度や信頼性といった伝送特性のみならず、コストにも大きな影響を与える。

無線伝送で考慮されるべき要素は周波数、時間、空間、電力、コードなど多次元にわたっており、チャネル変動成分や干渉をいかに正確に把握し、これらに多次元の伝送要素を最適に適応させるかが高効率化のポイントの1つといえる。北京研究所の適応パケット無線伝送（APRT：Adaptive Packet Radio Transmission）プロジェクトでは、これら多次元の伝送要素を最適に適応させる、多次元適応パケット無線インタフェース技術について研究開発を行っており、その成果が現在、国際電気通信連合（ITU：International Telecommunication Union）において標準化が行われている IMT-Advanced およびその発展システムに寄与できるところを目指している。

本稿では、多次元適応パケット無線インタフェース技術について、その概要と課題および本プロジェクトが開発した MIMO（Multiple Input Multiple Output）^{*1}-OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing）^{*2} テストベッドについて解説する。

2. 将来システムの要求条件とキーテクノロジー

現在、3GPP（3rd Generation Partnership Project）において議論されている LTE（Long Term Evolution）-Advanced ^{*3}[1]に要求される最大周波数効率¹は、下りリンクで 30bit/s/Hz、上りリンクで 15bit/s/Hz である。また、1セル当りの平均周波数効率は下りリンクで最大 3.7bit/s/Hz/cell、

*1 MIMO：複数の送受信アンテナを用いて信号の空間多重を行い、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。

*2 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。

*3 LTE-Advanced：3GPPにおける IMT-Advanced の名称。IMT-Advanced は第3世代移動通信システムである IMT-2000 の後継システム。

上りリンクで最大2.0bit/s/Hz/cellと規定されている。さらにセル端のユーザスループットについては、下りリンクで0.12bit/s/Hz/cell/user, 上りリンクで最大0.07bit/s/Hz/cell/userとなっている(いずれも3GPP Case 1モデルでの値)。LTE-Advancedでは、主に最大アンテナ数をLTEに比べ2~4倍に増やすことで、これらの実現をねらっている。さらに周波数帯域幅を最大100MHzまで拡大することで、最大レートを1Gbit/s以上まで向上させることを目指している。一方、モビリティに対してはLTEと同様に350km/hまでのサポートが求められている。これらを達成するために、ドコモではLayered OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)^{*4}などの技術方策を提案している[2]。北京研究所ではこれらを踏まえ、主に次の4項目に焦点を当てた研究を行っている。

①MIMOの高度化と低演算量信号検出技術

周波数効率の向上にはMIMOのアンテナ数の増加が不可欠であるが、これは同時に信号検出の演算量増大をもたらす。そのため、より低演算量かつ高効率な信号検出技術の確立が極めて重要となる。またMIMO伝送のさらなる高効率化のためには、ダイバーシチやマルチユーザ多重を実現するプレコーディング^{*5}をチャネ

ル状況に応じて最適化することが効果的であり、さらに多くの研究を通してシステムの性能を高めていく必要がある。

②マルチユーザへの適応無線リソース割当て

空間および周波数領域内には、チャネル状況の良い部分と悪い部分および干渉を受けている部分が偏在しており、これに十分適応した伝送を行うことが周波数効率向上の鍵となる。また、チャネルや干渉状況はユーザごとに異なること、アプリケーションごとに要求されるQoS (Quality of Service)^{*6}条件が異なることから、それぞれのユーザの要求を満足しつつ、同時にシステム全体としていかに効率を上げるかということが重要な課題となる。

③チャネル推定の高精度化

MIMO伝送では受信側の信号分離において、チャネル推定精度が伝送特性に大きな影響を与える。また、一般にチャネル推定のためのパイロットシンボル^{*7}は時間、空間および周波数において離散的に配置されており、中間に存在するデータシンボルに対しては前後のパイロットシンボルにおいて推定された値から内挿法^{*8}により求められる。このため、特に高速移動時ではチャネル変動の増大に伴って推定値と実

際の値とのかい離が生じ、伝送特性の劣化を招く要因となる。

よって、チャネル推定の高精度化および高速移動対応は、伝送特性全般に影響を与える重要な課題の1つといえる。

④セル間協調技術

IMT-Advancedで高いシステム容量を実現するためには周波数の1セル繰返しを適用することが望ましい。しかし、周波数の1セル繰返しにおいては、システム容量は干渉により制限を受ける。このような環境下では、セル間の干渉を効率的に抑圧することが必須であり、このためにはセル間の分散制御あるいは集中制御により、セル間の干渉を回避するセル間協調技術の適用が有効と考えられる。またセル間協調技術は、複数セルからの同時送信を行うことによって、セル端ユーザの通信品質を向上させるのにも有効である。

3. 研究項目の概要

本プロジェクトでは、キーテクノロジーについてこれまでに次の5つの技術を確立した。

3.1 DSFDMA 概要

DSFDMA (Dynamic Space and Frequency Division Multiple Access) [3]は多次元パラメータの一括最適化による動的空間周波数分割多重方

*4 Layered OFDMA: ドコモの提唱するLTE-Advanced無線アクセスのコンセプト。移動端末能力に応じた伝送帯域幅の割当て、それに応じた制御信号フォーマットおよび無線環境に応じた適応アクセスを提供する方式。

*5 プレコーディング: MIMOの各データストリームに対し、受信側の情報に基づいて送信側で線形処理または非線形処理を行い、受信性能を高める方法。

*6 QoS: サービスごとに設定されるネットワーク上の品質、使用帯域の制御により遅延量や廃棄率などの制御が行われる。

*7 パイロットシンボル: あらかじめ送受信間で定められたパターンの信号で、受信側ではその受信信号からチャネル(減衰および位相回転量)の推定などを行う。

*8 内挿法: 測定などによって得られた離散データから、その中間における値を推定すること。補間ともよばれる。

法である。

マルチユーザへの最適な無線リソース割当てとセル間干渉の管理は、周波数効率と信頼性向上の面で極めて重要な技術である。この設計においては、今日の広帯域無線伝送を特徴付ける次の2点に留意する必要がある。1点目は伝送単位のフラグメント化である。個々の無線チャネルの伝送品質は送受信局の場所、周波数、時間と密接な関係があり、これらが異なる場合、無線チャネルは全く異なる特性を有する。このため、伝送単位をこれら3次元でフラグメント化し、品質の良い部分のみを組み合わせて使うことで、周波数効率を上げることができる。2点目はアプリケーションの多様化である。伝送レート、パケット廃棄率、遅延/ジッタなどに関する個別の要求(QoS)を満足させると同時に、ユーザ間の公平性についても考慮する必要がある。

これらを考慮し、DSFDMAでは上り空間・周波数リソースのマルチユーザ割当てに関して、次の特長を有する。

- ・各ユーザに対し、周波数、帯域幅、空間(ビーム)および送信電力を動的に割り当てる
- ・これらの要素は順番に決めていくのではなく、各要素をパラメータとした1つの目標関数^{*9}を設定し、これらを同時に最適化する
- ・目標関数は、ユーザごとの伝送

容量とQoSに基づく優先度の積をすべてのユーザについて加算することで得られる。このとき各ユーザの最大送信電力とアンテナ数を制約条件として個別に設定できる

- ・最適化は多ステップの反復勾配法^{*10}により高速かつ安定的に行われる

シミュレーション評価の結果、従来の最適化法より良い特性が得られることが明らかになり、将来の上りMU(Multi-User)-MIMOへの応用が期待できる。

3.2 DOM概要

DOM(Dynamic Ordering M-paths MIMO detection)[4]は動的複数パス選択を用いた逐次干渉キャンセラ型MIMO信号検出法である。

本方式は比較的低演算なSIC(Successive Interference Cancellation)^{*11}による信号分離検出をベースに、レイヤごとに受信信号の信頼度が高いアンテナを選択し、かつ信頼度の高い上位複数個のシンボルを生き残りシンボルとし、検索を行っていく方法である。本方式はMLD(Maximum Likelihood Detection)^{*12}よりも低演算でありながら、MLDに近い検出性能を有することが評価により明らかになった。また、アンテナ数や複雑度などの多様な要求に対しても容易に対応でき、かつパイプライン構造^{*13}によりハードウェア実

装が容易である点においても優れており、特に処理能力の小さな移動端末への応用に適している。なお、象限判定にASESS(Adaptive SElection of Surviving Symbol replica candidates based on the maximum reliability)^{*14}[5]を併用することで、演算量のさらなる低減が見込まれる。本方式の詳細については本特集の別稿[6]にて解説する。

3.3 2D-EDFTI概要

2D-EDFTは、2次元DFT(Discrete Fourier Transform)補間を用いたチャネル推定法を実システムに適用するために拡張した方式である。一般にチャネル推定はチャネル上の減衰と位相回転量を推定するものであり、さらに干渉信号とノイズ特性がこれに含まれる場合もある。チャネル推定の精度は変調信号の検出精度に直接影響を与えるが、特にMLDやSICを用いたMIMO信号検出では、互いのアンテナの検出結果も影響し合うことから、より精度の高いチャネル推定が要求される。

2章で述べたように、データシンボルに適用されるチャネル推定値は内挿法により求められるが、DFTI(Discrete Fourier Transformation Interpolation)^{*15}では、無線チャネルを特徴付けるインパルス応答およびドップラー偏移の情報を保存した形で補間を行うことができ、単純な線形補間と比較して、特に高速移動環境で顕著な改善を実現することがで

^{*9} 目標関数：複数のパラメータを最適化する場合に、その最適化の目標量(通信容量、コストなど)を表す関数。最適化はこれを最大あるいは最小にするパラメータを求めることにより行われる。

^{*10} 反復勾配法：最適化を行う数値計算アルゴリズムの1つ。ある初期値から目標関数が小さく、または大きくなる方向に繰り返し計算を行い、その最小値または最大値を与えるパラメータ値を求める。

^{*11} SIC：MIMOの信号分離法の1つで、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。ZF(*24参照)やMMSE(Minimum Mean Square Error)による検出法よりも高い性能を有する。

^{*12} 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。

もっとも高い性能を有する反面、演算が複雑となる。

^{*13} パイプライン構造：プロセッサユニットの有効利用のため、クロックごとに次々と各ユニットに命令を投入し、並列実行できるようにした構造。これによりハードウェアリソースの効率化と処理速度向上を実現できる。

きる。ただし、信号にIFFT (Inverse Fast Fourier Transform) ^{*16} および FFT (Fast Fourier Transform) ^{*17} をかけるため、時間および周波数領域に不連続性があると、エッジ効果による誤差が生じてしまうという問題があった。2D-EDFTIでは外挿法^{*18}を用いて不連続性を解消し、DFTIを実システムへ適用できるようにした[7]。本方式の詳細については本特集の別稿[8]にて解説する。

3.4 高効率バーストフレーム同期技術概要

無線LANのように短バーストを用いたランダムアクセス型の通信方式は、離散的かつランダムに発生する短いデータを扱う通信の高効率化に有効であり、セルラと無線LANの融合などに伴って、ますますその重要性が高まってくるものと予想される。短バーストの受信においては、バースト先頭のプリアンブル^{*19}においてバースト検出、タイミング同期、周波数オフセット補償^{*20}までを完了する必要がある。その技術的要求は非常に高い。同期方式の設計においては、次の点を考慮する必要がある。

- ・短いプリアンブルでの高精度のタイミング同期／周波数オフセット補償
- ・実現可能な演算量
- ・十分低いプリアンブル PAPR (Peak to Average Power Ratio) ^{*21}
- ・ユーザ間での同期信号間の干渉

回避

- ・プリアンブルを用いたチャネル推定およびSNR (Signal to Noise Ratio) の測定

本プロジェクトではこれらの設計方針に基づき、遅延相関と対称相関を組み合わせた新しい同期方法を開発した[9]。さらに、テストベッドに実装して実験を行い、その実現性と効果について検証を行った。本方式の詳細については本特集の別稿[10]にて解説する。

3.5 適応MIMOプレコーディング概要

適応変調符号化や送信電力制御などのリンクアダプテーション^{*22}技術は、チャネル効率を向上させる方法として、すでに多くの無線システムで用いられている。MIMO伝送では、さらにプレコーディング方式を適応的に変化させることで、チャネル状況に応じた高効率な伝送が可能となる。

一般に適応伝送には、受信側からのフィードバック情報が必要である。そのためシステムの設計にあたっては、次の点を十分考慮する必要がある。

- ・フィードバック量と伝送特性のトレードオフ
- ・フィードバック遅延とチャネル変動の補償
- ・チャネル推定誤差および干渉に対する耐力

- ・リソース割当て最小単位と割当て制御メッセージ量とのバランス
- ・デュープレックス^{*23}方式（時分割多重（TDD：Time Division Duplex）／周波数分割多重（FDD：Frequency Division Duplex））との整合性

本分野に関してこれまでに、空間多重とダイバーシチの割合を連続的に変化させることができる適応時空間コードを用いたランクアダプテーション方法[11]、リソースブロックをユーザに割り当てた後、FFT行列などを用いてそのリソースブロック間で送信信号の回転変換を行い、時間または周波数領域のダイバーシチ効果を高めた方法[12]、および下りMU-MIMOにZF (Zero Forcing) ^{*24}プレコーディングを適用する場合のフィードバック信号の最適化[13]などについて提案を行った。

4. MIMO-OFDM テストベッド概要

前述の提案方式に関し、理論解析と計算機シミュレーションによる評価に加え、DOM、2D-EDFTIおよび高性能バーストフレーム同期技術については、テストベッド上でリアルタイムに動作させ、技術の実現性とその効果に関する検証を行っている。

テストベッドによる実験では、実際により近い環境において評価ができるため、技術の信頼度を高められ

^{*14} AESS：ドコモが開発した、象限検出を利用したMIMO信号分離の処理演算量低減方法。QRM-MLDの演算量を約1/4に低減することができる。

^{*15} DFTI：離散データの間に0挿入を行い、離散フーリエ変換(DFT)を行うことで間値を求める方法。

^{*16} IFFT：高速逆フーリエ変換。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高速アルゴリズム。

^{*17} FFT：高速フーリエ変換。時間領域の離散データを周波数領域の離散データに変換する高速アルゴリズム。

^{*18} 外挿法：測定などによって得られた離散データから、その外側における値を推定すること。

^{*19} プリアンブル：パケットの先頭に配置された固定パターンの信号。受信側では、これを用いてパケットの検出、ゲイン制御、フレームの同期、周波数同期などを

行い、データ部の受信に備える。

^{*20} 周波数オフセット補償：通信機器のクロックのばらつきおよび高速移動によるドップラシフトなどによって生じる基準周波数からのずれを修正する処理。

^{*21} PAPR：最大電力と平均電力の比。これが大きいと、信号歪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。

る。また、計算機シミュレーションよりもスピーディに評価結果を得られるため、より多くの実験データからアルゴリズムのさらなる改善に向けた貴重な手がかりを得ることが可能となる。さらにハードウェアへの実装を行うことで、提案アルゴリズムの複雑度がハードウェアに与えるインパクトについて、ある程度予測することが可能となる。

本テストベッドは次のような特長をもつ。

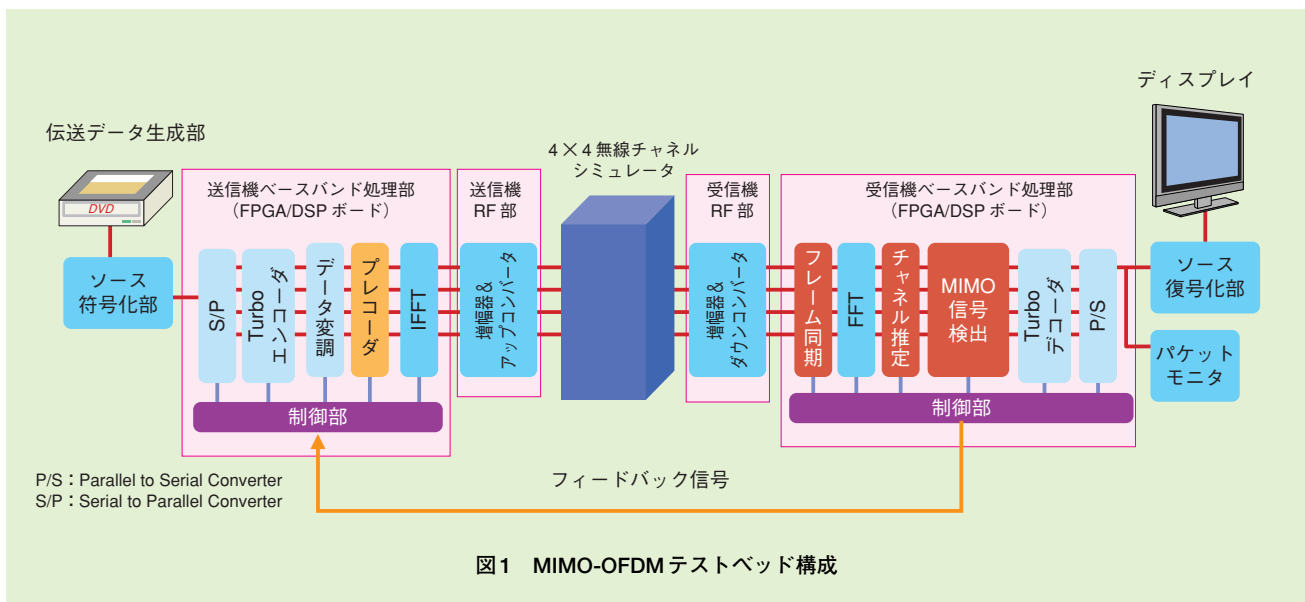
- ①ベースバンドには汎用のFPGA (Field Programmable Gate Array)^{*25}/DSP (Digital Signal Processor)^{*26} ボードを用いており、ソフトウェア無線技術により信号処理部の自由な設計・変更が可能である。また、開発環境がWindows[®]^{*27} 上で整っており、PC上で設計したファイル

をボードにダウンロードすることで、送受信方式を即座に切り替える。

- ②PC上の開発環境では従来のハードウェア記述言語に加え、ライブラリーの整ったGUI (Graphical User Interface) ベースの設計ツールを採用しており、要求される機能や開発者のスキルに応じてモジュールの設計を効率よく行う。
- ③制御パラメータをオンラインでリアルタイムに変更することができ、かつ信号処理の各段階における中間処理結果をリアルタイムでPC上および測定機器上に表示し、同時にハードディスク上に記録する。

本テストベッドの基本構成を図1に示す。送信部は伝送データ生成

部、ソース符号化部、送信機ベースバンド処理部、送信機RF (Radio Frequency) 部からなる。また、受信部は受信機RF部、受信機ベースバンド処理部、ソース復号化部、パケットモニタ (受信信号の解析・品質測定用) およびディスプレイからなり、両者の間はチャンネルシミュレータ^{*28} を介して、6パスの4×4 MIMOチャンネルが模擬できようになっている。ベースバンドの信号処理部の開発のほかに、受信信号のコンスタレーション^{*29}、SNRおよび誤り率などをリアルタイムで測定・表示する機能、動画伝送のデモ用にDVD動画のリアルタイム圧縮符号化処理機能などを別途開発した。また、多数のボード間が接続されているデータバス上で、高速大容量のデータ・制御信号の交換が同期して行えるよう、専用のデータ交換



*22 リンクアダプテーション：無線チャンネルの状況に応じて、変調多値数、コーディングレート、電力、MIMOプレコーディングなどの送信パラメータを適応的に変化させる技術。
 *23 デュプレックス：双方向通信を行うための通信路。多重方法によってTDD、FDDなどの方式がある。
 *24 ZF：無線チャンネル応答を $H(s)$ とした場合、受信信号に $1/H(s)$ をかけて等価を行

う方法。
 *25 FPGA：ロジックを自由に設計することのできるLSI。
 *26 DSP：信号処理のためのマイクロプロセッサ。演算処理に向く。
 *27 Windows[®]：米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標または商標。

*28 チャンネルシミュレータ：無線周波数帯において、マルチパス無線チャンネルをリアルタイムで模擬することのできる装置。
 *29 コンスタレーション：X軸を同相 (Inphase) 成分、Y軸を直交 (Quadrature phase) 成分として、受信信号を2次元平面上に投影したもの。

方式を設計した。

MIMO-OFDMテストベッドの外観を写真1に示す。本テストベッド上では、これまでに16QAM (Quadrature Amplitude Modulation)^{*30}による4×4 MIMO-OFDM伝送を実現した(このときの最大周波数効率は14bit/s/Hz)。また、3章で述べたDOM, 2D-EDFTIおよび高効率バーストフレーム同期技術コーディングを実装し、これらの技術の検証を行うとともに、新たな問題点の発見

とアルゴリズムのさらなる改良にも活かすことができた。

5. あとがき

IMT-Advancedをはじめとする、将来の移动通信システムにおける無線インタフェースの設計には、多くの解決すべき課題がある。このうち、北京研究所ではMIMOの高度化と低演算信号検出技術、マルチユーザへの無線リソース割当技術、高精度チャンネル推定技術およびセル間

協調技術に重点をおいて研究を行ってきた。また、4×4 MIMO-OFDM伝送が可能なテストベッドを開発し、MIMO信号検出、チャンネル推定および同期技術に関するオリジナル技術について、実証実験を行った。

今後も引き続きテストベッドの開発を継続し、閉ループ型MIMOプレコーディング技術、MU-MIMO、基地局間協調MIMO^{*31}技術の検証など、多種多様なMIMO技術の検証を行い、将来の移动通信システム



写真1 テストベッドの外観

* 30 16QAM：デジタル変調方式の1つ。位相と振幅の16通りのパターンで定義されるシンボル単位で信号伝送を行う。

* 31 基地局間協調MIMO：異なる基地局のアンテナを複数連動させてMIMO伝送を行う方法。特にセル端のユーザに対する通信品質を向上させることができる。

に寄与し得る技術の確立を目指す。

文 献

- [1] 3GPP TR 36.913 V8.0.0 (2008-06) Technical Report : “3rd Generation Partnership Project ; Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced).”
- [2] M Tanno, Y. Kishiyama, H. Taoka, N. Miki, K. Higuchi and M. Sawahashi : “Layered OFDMA Radio Access for IMT-Advanced,” in Proc. IEEE VTC2008-Fall, Sep. 2008.
- [3] Z. Zhang, J. Chen and H. Kayama : “Dynamic MIMO Multiple-Carrier Multiple-Access: Adaptive Radio-Resource Allocation Under Realistic Constraints,” in Proc. IEEE VTC2008-Fall, Sep. 2008.
- [4] J. Chen, Z. Zhang and H. Kayama : “A Dynamic Layer Ordering M-paths MIMO Detection Algorithm and its Implementation,” in Proc. APCC 2008.
- [5] 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 GLOBECOM 2004, Nov. 2004.
- [6] 陳, ほか : “動的複数パス検索を用いた逐次干渉キャンセラ型MIMO信号検出法,” 本誌, Vol.16, No.4, pp.14-19, Jan. 2009.
- [7] X. Hou, Z. Zhang and H. Kayama : “Doubly-selective channel estimation for packet OFDM systems with virtual subcarriers,” in Proc. IEEE VTC’ 08-Fall, Sep. 2008.
- [8] 侯, ほか : “高速移動環境に対応した拡張2次元DFT補間によるチャネル推定,” 本誌, Vol.16, No.4, pp.20-26, Jan. 2009.
- [9] E. Zhou, X.L. Hou, Z. Zhang and H. Kayama : “A Preamble Structure and Synchronization Method based on Central-Symmetric Sequence for OFDM Systems,” in Proc. IEEE VTC 2008-Spring, May 2008.
- [10] 周, ほか : “バーストMIMO-OFDM伝送のための高精度タイミング同期アルゴリズム,” 本誌, Vol.16, No.4, pp.27-33, Jan. 2009.
- [11] C. Yan, Z. Zhang and H. Kayama : “An AM-STC (Adaptive Modulation & Space-Time Coding) Scheme for Future MIMO Systems,” in Proc. PIMRC 2006.
- [12] W. Wang, C. Yan, Z. Zhang and H. Kayama : “Space-frequency precoding scheme for multiuser MIMO-OFDM systems,” in Proc. IWCMC 2007.
- [13] W. Wang, Z. Zhang and H. Kayama : “Limited Feedback Zero Forcing Precoding Scheme for MIMO-Broadcast channel,” in Proc. PIMRC 2008.