

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2012

課題番号：20560347

研究課題名（和文） 移動通信における最適クロスレイヤー技術の研究

研究課題名（英文） Study on Cross Layer Optimization Techniques for Mobile Communications

研究代表者

府川 和彦（FUKAWA KAZUHIKO）

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00323775

研究成果の概要（和文）：

複数の送受信アンテナを用いて空間多重伝送を行う MIMO 伝送と、マルチパス環境下でも良好な伝送特性を維持できる直交周波数分割多重（OFDM）とを組合わせた MIMO-OFDM 無線通信において、マルチユーザ検出(MUD)を前提とするチャネル割当を行い、周波数利用効率の高いランダムアクセス技術を確立した。具体的には、(1) 異なるインターリーブを用いて信号を多重するインターリーブ分割多重、(2) 同一時間・周波数で多重されたパケットを MUD で分離し、再送されたパケットを合成する再送制御、等を検討した。

研究成果の概要（英文）：

This study focuses on MIMO-OFDM wireless communications in which MIMO spatially multiplexes signals by multiple transmit and receive antennas, and OFDM stands for orthogonal frequency division multiplexing to maintain good transmission performance even under multipath conditions. For the MIMO-OFDM wireless communication, we have developed random access techniques that can improve spectrum efficiency by channel assignment with multiuser detection (MUD). Especially, (1) interleave division multiplexing to assign different interleavers to individual signals, (2) packet retransmission schemes that separate packets multiplexed in the same time and frequency channel by MUD and then combine retransmitted packets, and so on have been investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：通信方式（無線、有線、衛星、光、移動）

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、携帯電話に代表される移動通信の普及にはめざましいものがあり、サービスのさらなる向上が期待されていた。従来、音声信号伝送が中心であった携帯電話も、マルチメディア化に伴って、データ、画像などの大量のデジタル信号伝送に対する技術的要求が高まってきていた。さらに、固定網と変わらないシームレスなインターネット品質を実現するためには、パケットを基本とする無線におけるランダムアクセス技術を高速伝送技術と一体で確立する必要があった。このような信号伝送には高信頼性と高速性が必要となり、加えて加入者数増大に伴う大量のデータ伝送に対応するためには、現行の 2GHz 以下の周波数より高い周波数帯、例えばマイクロ波帯(3-8GHz 帯)を開拓し、周波数資源のより一層の有効利用を図る必要がある。これらの要求条件に応えるための移動通信技術の研究は非常に有意義である。

## 2. 研究の目的

本研究は、高信頼の高速伝送が可能で、かつ周波数利用効率の高いランダムアクセス移動通信方式の実現を目指して、クロスレイヤー技術を中心とする新しい技術体系の確立を目的としている。

## 3. 研究の方法

具体的には、複数の送受信アンテナを用いて空間多重伝送を行う MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 伝送と、無線 LAN 等で標準化されている直交周波数分割多重 (OFDM) 方式とを組合わせた MIMO-OFDM 無線通信において、マルチユーザ検出を前提とするスケジューリングを行い、周波数利用効率の高いランダムアクセス技術を確立する。さらに、適応変調及びハイブリッド ARQ (Auto Repeat Request) 技術を応用することにより、マイクロ波帯における 2Gb/s 程度の高速・高信頼ランダムアクセス方式を実現する。

## 4. 研究成果

### (1) MIMO-OFDM IDMA

移動通信の上り回線において、インターリーブ分割多重 (IDM) と適応リソース割り当てを適用した MIMO-OFDM インターリーブ分割多元接続 (IDMA) を提案した。提案方法では、全サブキャリアを複数のリソースブロック (RB) に分割し、IDM は同一の RB にインターリーブのみが異なるストリームを多重する。この IDM を各ユーザに対して適用することで、伝送レートを一定としたまま使用する RB 数を減らすことができる。また、適応リソース割り当てにより、各ユーザの SINR を向上させ、高スループット化を目指す。この適応リソース割り当ては、まず、他

ユーザからの干渉を考慮せず SNR 基準で各ユーザに RB を割り当て、その後、他ユーザがどの RB を使用するかを考慮して SINR 基準のリソース割り当てを繰り返し行う。

### (2) 再送制御

移動通信における上り回線 OFDMA パケット伝送のスループットを改善するため、複数の移動局のパケットを同一時間・周波数に多重し、再送されたパケットを合成しながら、多重されたパケットを分離するマルチユーザ検出 (MUD) が検討されている。さらなるスループット改善のため、最大事後確率 (MAP) 推定に基づき、復号器の出力であるビット対数尤度比 (LLR) を用いることで MLD を MAP 検出に拡張したターボマルチユーザ検出 (T-MUD) を提案した。また、スループットをさらに改善するため、初送のとき以外、多重されるパケット数を増加させる適応多重制御を導入した。

### (3) 切替中継方式

OFDM 移動通信における中継システムとして、i) 雑音が加わったアナログ信号を再送する AF (Amplify-and-Forward) と、ii) 復号して再送する DF (Decode-and-Forward) を切替える方式を検討した。中継局において、CRC 復号による判定誤りが検出された場合は AF を行い、誤りが検出されない場合には、DF を行う。さらに送信側とは異なる符号化を行い HARQ (Hybrid ARQ) と同様の高信頼化を図る。また、受信側で直接受信と中継局経由の受信信号の合成メトリックを求め、復号に必要なビット LLR を算出するために、まずプリアンブル信号を用いてチャネル推定とレプリカ誤差の平均電力推定を行い、合成メトリックの重み係数をレプリカ誤差の平均電力値から求める方法を提案した。

### (4) プリコーディング技術

#### ①固有モード MIMO-OFDM 伝送におけるピーク対平均電力比 (PAPR) 低減法

移動通信における固有モード MIMO-OFDM 伝送において、線形プリコーディングの効果を保持したまま、PAPR を低減する方法を提案した。固有モード MIMO-OFDM 伝送は、チャネル情報 (CSI) を用いて送信信号に線形プリコーディングを施し、優れた伝送特性を実現できる。しかしながら、OFDM に起因して、PAPR が高くなるという問題を依然として有する。この PAPR を低減するために、OFDM のピーク低減手法である選択マッピング (SLM) や部分系列伝送 (PTS) を拡張した。これらの拡張方式は、線形プリコーディングの効果を損なわずに固

有モードMIMO-OFDM伝送へ適用できる。

## ②最小BER規範送信プリコーディングと空間フィルタを用いる最尤受信

同一チャネル干渉条件下でのMIMO-OFDM移動通信・下り回線において、基地局で最小BER規範プリコーディングを行い、移動局で干渉を抑圧する空間フィルタと最尤検出を用いる伝送方式を想定し、プリアンブルとしてZadoff-Chu系列を用いたチャネル推定法を検討した。上記の伝送方式では、干渉を抑圧するために干渉及び雑音の自己相関行列の情報が必要となる。この自己相関行列の推定精度を高めるため、直交性が優れたZadoff-Chu系列を所望基地局および干渉基地局のプリアンブルとして用い、干渉局のプリアンブルを用いて推定されたチャネル・インパルス応答から干渉及び雑音の自己相関行列を求める方法を検討した。

## ③アナログ・フィードバック方式

送信プリコーディングを行う MIMO-OFDM 移動通信システムでは一般的に、チャネル情報をデジタル方式で移動局から基地局へフィードバックしているが、より少ないシンボル数でフィードバックできるアナログ方式を検討した。提案するアナログ・フィードバック方式は、移動局で推定した下り回線のチャネル周波数応答を、従来のアナログ・フィードバック方式と異なり、(i)多重せずにアナログ信号として送信する。さらに(ii)推定精度を向上させるためlog圧縮を導入し、(iii)送信プリコーディングに必要な SNR も合わせてフィードバックする。基地局では、まず上り回線のパイロット信号を用いて上り回線のチャネル・インパルス応答を最小 2 乗法で推定し、この推定値とフィードバック信号から下り回線のチャネル・インパルス応答と SNR を最小 2 乗推定する。

## ④チャネルの2次統計量を用いるブロック対角化近似

マルチユーザ MIMO において、CSI のフィードバックを必要とせず、パスの到来角の平均値と分散からチャネルの2次統計量を推定し、これを用いてブロック対角化 (BD) 近似を行う方法を提案した。具体的にはFDD方式においても上り回線のパスの到来角分布と下り回線のパスの放射角分布は一致すると仮定し上り回線の到来角の平均値と分散を上り回線の受信信号から求め、2次統計量である下り回線チャネルの自己相関行列を推定する。この自己相関行列を用いるために、従来の BD がチャネル行列を特異値分解するのに対し、チャネルの自己相関行列を固有値分解する。本提案方式の特性を評価するため計算機シミュレーションを行い、図1に示すように、CSI

フィードバックが不要にもかかわらず、CSI 既知の従来の BD に比べ、通信路容量の劣化が小さいことを明らかにした。

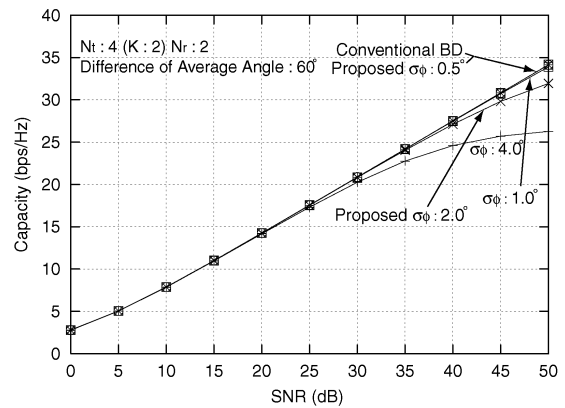


図1 平均到来角度差60度の通信路容量 (送信アンテナ数4, 端末数2, 受信アンテナ数2)

## (5) MIMO 通信における準最適信号検出

MIMO通信における準最適信号検出の一つとして、MMSEの検出結果を起点にMMSEの雑音強調の方向へ信号候補を多次元探索する方法が提案されている。しかしながら、MIMOチャネルに非常に強い空間相関がある場合、ビット誤り率特性が著しく劣化するという問題があった。そこで、多次元探索で求めた信号候補を量子化する際、ラティス・リダクションを用いて空間相関による劣化を軽減する方法を提案した。計算機シミュレーションにより、提案方式は非常に強い空間相関を有するMIMOチャネルにおいても、良好なビット誤り率特性を維持できることを明らかにした。

## (6)ファクターグラフに基づくチャネル推定を用いた逐次 MAP 受信

### ①サブキャリア・リムービング

OFDM 移動通信では従来、チャネル推定の追従性能を高めるため、カルマンフィルタでチャネル推定を行い、インパルス応答の時間微分を含む微分モデルを生成過程として用いる方法が検討されてきた。このチャネル推定は、EM アルゴリズムに基づき、チャネル推定と信号検出を交互に逐次的に行う MAP 受信へ適用されている。この MAP 受信の伝送路への追従特性をさらに改善するため、ファクターグラフ上でのメッセージ・パッシングアルゴリズムを考察することで、サブキャリア・リムービング処理を行うチャネル推定を導出した。サブキャリア・リムービング処

理では、該当するサブキャリアを除く全てのサブキャリアにおける検出信号を用いて伝送路の周波数応答を推定し、信頼度が低い検出信号をチャンネル推定に繰り返し使用することを避ける。計算機シミュレーションにより、提案方式は高速フェージング環境下での平均パケット誤り率(PER)を大幅に改善できることを明らかにした。この平均パケット誤り率を図2に示す。

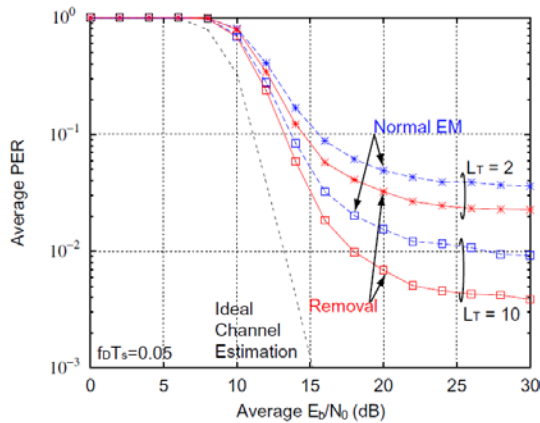


図2 平均パケット誤り率(PER)特性

## ②空間リムーバル

OFDM 受信機に複数の受信アンテナを備えた SIMO 伝送を対象として、EM アルゴリズムを用いてチャンネル推定と信号検出を繰り返す逐次処理が検討されている。この処理に対し、ファクターグラフの観点から、逐次処理に適した信号検出である空間リムーバルを提案した。空間リムーバルは、信頼度の低い受信信号が信号検出、チャンネル推定に繰り返し使用されることを回避した信号検出である。さらに、リムーバルの効果と空間ダイバーシチ効果を両立することを目的とし、空間リムーバルの適用方法を検討した。計算機シミュレーションにより、空間リムーバルを適切な回数行うことで、高速フェージング環境下でのエラーフロアを改善できることを示した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

① K. Fukawa, H. Suzuki, and Y. Tateishi, "Packet-error-rate analysis using Markov models of signal-to-interference ratio for mobile packet systems," *IEEE Trans. on Vehic. Technol.*, 査読有, vol. 61, no. 6, pp. 2517-2530, July 2012.  
<http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2012.2197>

231

② K. Muraoka, K. Fukawa, H. Suzuki, and S. Suyama, "Iterative MAP receiver employing forward channel estimation via message passing for OFDM over fast fading channels," *IEICE Trans. on Communi.*, 査読有, vol. E95-B, no. 5, pp. 1770-1783, May 2012.

DOI: 10.1587/transcom.E95.B.1770

③ L. Chang, K. Fukawa, H. Suzuki, and S. Suyama, "Precoding scheme robust to imperfect CSI in downlink multiuser MIMO-OFDM system," *IEICE Trans on Communi.*, 査読有, vol. E94-B, no. 12, pp. 3515-3524, Dec. 2011.

DOI: 10.1587/transcom.E94.B.3515

④ L. Zheng, K. Fukawa, H. Suzuki, and S. Suyama, "Near-optimal signal detection based on the MMSE detection using multi-dimensional search for correlated MIMO channels," *IEICE Trans on Communi.*, 査読有, vol. E94-B, no. 08, pp. 2346-2356, Aug. 2011.

DOI: 10.1587/transcom.E94.B.2346

⑤ K. Muraoka, K. Fukawa, H. Suzuki, and S. Suyama, "Joint signal detection and channel estimation using differential models via EM algorithm for OFDM mobile communications," *IEICE Trans on Communi.*, 査読有, vol. E94-B, no. 02, pp. 533-545, Feb. 2011.

DOI: 10.1587/transcom.E94.B.533

⑥ S. Suyama, H. Suzuki, K. Fukawa, and J. Izumi, "Iterative receiver employing phase noise compensation and channel estimation for millimeter-wave OFDM systems," *IEEE Journ. on Selct. Areas in Communi.*, 査読有, vol. 27, no. 8, pp. 1358-1366, Oct. 2009.

<http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2009.091006>

⑦ B. Pitakdumrongkija, K. Fukawa, S. Suyama, H. Suzuki, and A. Umi, "Precoding technique for minimizing BER of MIMO-OFDM system employing MLD under multicell co-channel interference," *IEICE Trans. Communi.*, 査読有, vol. E92-B, no. 5, pp. 1573-1581, May 2009.

DOI: 10.1587/transcom.E92.B.1573

⑧ S. Suyama, H. Suzuki, K. Fukawa, and L. Zhang, "Iterative multiuser detection with soft decision-directed channel estimation for MC-IDMA and performance

comparison with chip-interleaved MC-CDMA,  
"IEICE Trans. Commun.", 査読有, vol. E92-B,  
no. 5, pp. 1495-1503, May 2009.

DOI: 10.1587/transcom.E92.B.1495

⑨ B. Pitakdumrongkija, K. Fukawa, and H. Suzuki, "MIMO-OFDM precoding technique for minimizing BER upper bound of MLD," IEICE Trans. on Communi., 査読有, vol. E91-B, no. 7, pp. 2287-2298, July 2008.  
<http://dx.doi.org/10.1093/ietcom/e91-b.7.2287>

⑩ B. Pitakdumrongkija, K. Fukawa, and H. Suzuki, "MIMO-OFDM precoding technique for minimizing BER upper bound of MLD under imperfect CSI," IEICE Trans. on Communi., 査読有, vol. E91-B, no. 5, pp. 1490-1501, May 2008.

<http://dx.doi.org/10.1093/ietcom/e91-b.5.1490>

[学会発表] (計 12 件)

① K. Muraoka, K. Fukawa, H. Suzuki, and S. Suyama, "Iterative MAP channel estimation based on factor graph for OFDM mobile communications," *IEEE 75th Vehic. Tech. Conf.* 査読有, pp. 1-5, Yokohama, Japan. May 9, 2012.

② S. Suyama, H. Fukuda, H. Suzuki, and K. Fukawa, "11 GHz band 4 x 4 MIMO-OFDM broadband experimental system for 5 Gbps super high bit-rate mobile communications," *IEEE 75th Vehic. Tech. Conf.* 査読有, pp. 1-5, Yokohama, Japan. May 9, 2012.

③ L. Zheng, K. Fukawa, H. Suzuki, and S. Suyama, "Low-complexity signal detection by multi-dimensional search for correlated MIMO channels," *IEEE International Conference on Communications ICC 2011*, 査読有, pp. 1-5, Kyoto, Japan. June 7, 2011.

④ S. Umeda, S. Suyama, H. Suzuki, and K. Fukawa, "PAPR Reduction Method for Block Diagonalization in Multiuser MIMO-OFDM Systems," *IEEE Vehic. Tech. Conf.* 査読有, pp. 1-5, Taipei, Taiwan. May 17, 2010.

⑤ J. Shikida, S. Suyama, H. Suzuki, and K. Fukawa, "Iterative Receiver Employing Multiuser Detection and Channel Estimation for MIMO-OFDM IDMA," *IEEE Vehic. Tech. Conf.* 査読有, pp. 1-5, Taipei, Taiwan. May 18, 2010.

⑥ L. Zheng, J. Woo, K. Fukawa, and H.

Suzuki, "Low-complexity algorithm for log likelihood ratio in coded MIMO-OFDM communications," *IEEE Globecom 2009*, 査読有, Honolulu, USA. December 2, 2009.

⑦ S. Suyama, H. Adachi, H. Suzuki, and K. Fukawa, "PAPR reduction methods for eigenmode MIMO-OFDM transmission," *IEEE 69th Vehic. Tech. Conf.* 査読有, pp. 1-5, Barcelona, Spain. April 28, 2009.

[図書] (計 1 件)

① 府川 和彦 著, 「デジタル信号処理」, 培風館, 2009. 171 ページ.

[産業財産権]

○出願状況 (計 5 件)

①名称: MIMO 通信における準最適信号検出  
発明者: 府川和彦, 鈴木 博, 須山 聡, 山田良太, 加藤勝也, 吉本貴司  
権利者: 国立大学法人東京工業大学, シヤープ株式会社  
種類: 特許  
番号: 特願 2012-189135  
出願年月日: 2012 年 08 月 29 日  
国内外の別: 国内

②名称: 受信装置, 受信方法, 及び受信プログラム  
発明者: 府川和彦, 鈴木 博, 須山 聡, 山田良太, 吉本 貴司, 岡本 直樹  
権利者: 国立大学法人東京工業大学, シヤープ株式会社  
種類: 特許  
番号: 特願 2011-174700  
出願年月日: 2011 年 08 月 10 日  
国内外の別: 国内

③名称: 無線通信装置及び無線通信方法  
発明者: 三木信彦, 白壁将成, 須山 聡, 鈴木 博, 府川和彦  
権利者: 株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ, 国立大学法人東京工業大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2010-245408  
出願年月日: 2010 年 11 月 1 日  
国内外の別: 国内

④名称: 受信装置及び受信方法  
発明者: 山田良太, 加藤勝也, 吉本貴司, 府川和彦, 鈴木 博, 須山 聡  
権利者: 国立大学法人東京工業大学, シヤープ株式会社

種類：特許  
番号：PCT/JP2010/058802  
出願年月日：2010年05月25日  
国内外の別：国外

⑤名称：受信装置、受信方法及び通信システム

発明者：府川和彦，鈴木博，須山聡，山田良太，岡本直樹

権利者：国立大学法人東京工業大学，シャープ株式会社

種類：特許  
番号：特願2008-025604  
出願年月日：2008年2月5日  
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.radio.ss.titech.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

府川 和彦 (FUKAWA KAZUHIKO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：00323775

### (2) 研究分担者

鈴木 博 (SUZUKI HIROSHI)  
東京工業大学・理工学研究科・教授  
研究者番号：00282864  
須山 聡 (SUYAMA SATOSHI)  
東京工業大学・理工学研究科・助教  
研究者番号：70334505

### (3) 連携研究者

なし