

## 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：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760268

研究課題名（和文）次世代移動通信システムのための情報理論に基づく多元接続方式の研究

研究課題名（英文）Multiple access scheme based on information theory for next-generation mobile communication systems

研究代表者

須山 聡 (SUYAMA SATOSHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70334505

研究成果の概要（和文）：将来の移動通信システムに向けて、高速伝送を実現しつつ、限られた周波数資源を複数ユーザで極めて効率的に利用できる多元接続方式について研究を行った。情報理論の観点から、低符号化率の誤り訂正符号とユーザ個別のインターリーブによりユーザ分離を行うインターリーブ分割多元接続(IDMA)方式について着目した。広帯域化のため、OFDMとIDMAを組み合わせ、高能率伝送技術の確立、送受信機構成の最適化、システム要求条件の明確化を行い、当初の研究目標はほぼ達成された。

研究成果の概要（英文）：A multiple access scheme that achieves high bit rate transmission and shares limited frequency resource by multiple users quite efficiently has been investigated for future mobile communication systems. From the viewpoint of information theory, the study mainly focused on interleave division multiple access (IDMA) that separates the users by exploiting both low-rate channel code and individual interleaver. For the wider bandwidth, IDMA is combined with OFDM, and the study performed establishment of highly efficient transmission technique, optimization of transmitter and receiver structures, and clarification of system requirements. The research has almost achieved the original goals.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			0
年度			0
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

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：移動通信，無線通信，多元接続，情報理論，インターリーブ分割多元接続，誤り訂正符号，OFDM

## 1. 研究開始当初の背景

近年、携帯電話に代表される移動通信の普

及は目覚ましく、マルチメディア化に伴って、データ、画像、動画等を扱える高速信号伝送

に移行しつつある。さらに、次世代移動通信システムでは、更なる高速信号伝送を実現しつつ、限られた周波数資源を複数のユーザで極めて効率的に利用するため、高度な多元接続方式が必要となる。

従来、移動通信における多元接続方式として、周波数分割多元接続 (FDMA)、時間分割多元接続 (TDMA)、符号分割多元接続 (CDMA) が実用化されている。また、第4世代の移動通信システムでは、直交周波数分割多元接続 (OFDMA) が検討されている。FDMA, TDMA, OFDMA では、時間や周波数における直交リソースを各ユーザに割り当てるのに対し、CDMAでは直交 (非直交) の拡散符号を各ユーザに割り当てる。理論的には、非直交の CDMA でも全ユーザの信号に対し結合的に検出処理を行うことで、FDMA や TDMA より優れた通信容量が実現できることが知られている。

一方、低符号化率の誤り訂正符号とユーザ個別のインターリーブの縦続接続でユーザ分離を行うインターリーブ分割多元接続 (IDMA) が検討されている。ユーザ間の直接的な直交性はないが、伝搬特性のランダム化、低符号化率の誤り訂正符号とインターリーブ、およびそれらの相乗的な擬似直交性を引き出すターボ受信により、各ユーザの信号を効率良く分離できる。

しかしながら、従来の IDMA に関する研究では、(1) 情報理論に基づいた誤り訂正符号およびインターリーブの最適設計、(2) 移動通信特有のマルチパス遅延波を克服する等化技術や、複数の送受信アンテナから作り出される空間的なパスを有効利用する高能率変復調技術との最適な組み合わせ、(3) それらを実現する送受信機の構成や性能評価および実験による実証、(4) 実際のシステムを想定したマルチセル環境での評価や、最適なユーザ選択やリソース割り当て、適応変調などの回線制御を含めたシステム上の要求条件、に関して十分な検討が行われていなかった。

## 2. 研究の目的

将来の移動通信システムに向けて、高度な多元接続方式が必要となる。しかしながら、上述したように、従来の IDMA に関する研究では、十分な検討が行われていない。そこで、本研究では、情報理論の観点から優れた性能が期待できる IDMA に基づいて、新しい多元接続方式を確立するため、以下の項目について研究する。

(1) 情報理論に基づく IDMA の性能限界の追求：情報理論に基づいて複数の低符号化率の誤り訂正符号と複数のインターリーブの比較検討を行い、通信容量の観点で移動通信における最適な組み合わせについて明らかにし、IDMAの限界性能を追求する。

(2) IDMAの伝送速度を更に向上する高能率伝送技術の確立：IDMAに対し、マルチパス遅延波を克服する等化技術であるOFDMやシングルキャリア周波数領域等化 (SC-FDE) との組み合わせや、複数の送受信アンテナを用いて信号を空間多重するMIMO技術や複数基地局が連携する協調マルチポイント送受信 (CoMP) との組み合わせを検討し、移動通信における新しい多元接続方式を確立し、無線伝搬環境に応じた設計法について示す。

(3) 性能と計算量の観点での送受信機構成の最適化と実験による実証：上記の方式を実現する送信機および受信機の構成、およびチャネル推定等の周辺技術を含めた検討を行い、複数の構成において性能の評価と計算量の試算を行い、最適な構成を検討する。また、それらをハードウェアに実装し、その実現性や性能を評価する。

(4) システム性能の評価と実現のための要求条件の明確化：実際のシステムを想定したマルチセル環境での評価を行う。また、フィードバック情報に基づいた最適なユーザ選択やリソース割り当て、適応変調および送信電力制御などの回線制御の効果について検討し、システム上の要求条件に明らかにする。

## 3. 研究の方法

以下のように研究を行った。

(1) 情報理論に基づく IDMA の性能限界の追求：IDMAにおける低符号化率の誤り訂正符号とインターリーブに関して、IDMAへの適用例がない複数の低符号化率の誤り訂正符号やインターリーブに対し、情報理論に基づく理論解析と計算機シミュレーションにより比較検討を行う。その際、移動通信特有のフェージング環境を想定し、通信容量の観点で最適な組み合わせについて明らかにすることでIDMAの限界性能を追求する。

(2) IDMAの伝送速度を更に向上する高能率伝送技術の確立：IDMAと、マルチパス遅延波を克服でき、高能率な伝送が実現できるOFDMを組み合わせたOFDM-IDMAに関して理論とシミュレーションにより検討を行う。また、等化技術であるSC-FDEとの組み合わせについても同様に検討し、比較を行う。さらに、送信機で行う送信プリコーディングについても検討を行い、移動通信特有のマルチパス遅延波対策を考慮に入れた新しい多元接続方式を検討する。

検討をさらに推し進め、IDMA と、複数の送受信アンテナを用いて信号を空間多重するMIMO技術やMIMO送信プリコーディング、複数基地局が連携するCoMPとの組み合わせを

理論とシミュレーションにより検討し、移動通信における新しい多元接続方式を確立する。また、その方式の無線伝搬環境に応じたパラメータ設計法についても明らかにする。

(3) 性能と計算量の観点での送受信機構成の最適化と実験による実証：(2)で検討した新しい多元接続方式を実現するための送信機および受信機の構成についてシミュレーションにより検討する。複数の構成において性能の評価と計算量の試算を行い、性能と計算量の観点で最適な構成を明らかにする。また、チャンネル推定等の周辺技術を含めた検討をシミュレーションにより行う。

送受信機の最適構成について、ハードウェアに実装し、その実現性について実験により検証する。具体的には、ハードウェアとしてプログラム可能な集積回路であるFPGAを用いて回路を設計し、回路規模や動作速度、性能について検証を進める。また、移動通信特有のマルチパス伝搬路も回路上でエミュレートすることで、伝送特性の評価を行い、その上で最終的な送受信機の最適構成を明らかにする。

(4) システム性能の評価と実現のための要求条件の明確化：実際のシステムを想定したマルチセル環境での評価を理論とシミュレーションにより行う。また、フィードバック情報に基づいた最適なユーザ選択やリソース割り当て、適応変調および送信電力制御などの回線制御の効果について検討し、システム上の要求条件に明らかにする。

#### 4. 研究成果

以下のように成果が、理論、計算機シミュレーション、実験により得られた。

(1) 情報理論に基づくIDMAの限界性能の追求：IDMAにおける低符号化率の誤り訂正符号において、複数の符号について情報理論に基づく解析手法を導入し、収束特性を比較することで様々な環境下で最も優れた特性を実現する符号を明らかにした。また、通信容量を最大化するように、各ユーザに符号を割り当てる方法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認し、IDMAの限界性能について追求した。

(2) IDMAの伝送速度を更に向上する高能率伝送技術の確立：インターリーブのみが異なるIDMAストリームを多重するインターリーブ分割多重 (IDM) と、適応周波数リソース割り当てを適用した直交周波数分割多重 (OFDM) IDMAを提案した。提案方法では、送信機において、移動通信特有のマルチパス遅延波を考慮に入れて、受信レベルの高いサブキャリアのみを各ユーザが使用するサブキャリアとして適

応に選択する。さらに、その際に各ユーザのSINRも考慮に入れることで高能率化を図る。また、選択したサブキャリアに対してIDMを適用することで、さらに伝送効率を向上させる。シミュレーションにより提案方法の有効性を確認し、IDMAの高能率伝送技術について明らかにした。

さらに、IDMA と、複数の送受信アンテナを用いて信号を空間多重する MIMO 技術を組み合わせた MIMO-IDMA 伝送において、IDM を導入する新しい多元接続方式を確立し、シミュレーションにより有効性を確認した。また、その方式の無線伝搬環境に応じたパラメータ設計法についても明らかにし、高能率伝送を実現するための空間多重および IDM ストリーム数を明らかにした。また、複数基地局が連携する CoMP との組み合わせについても検討した。

(3) 性能と計算量の観点での送受信機構成の最適化と実験による実証：上記で検討した新しい多元接続方式を実現するための受信機の構成について、チャンネル推定器を繰り返し処理に加える構成をシミュレーションにより検討し、複数の構成において性能の評価と計算量の試算を行い、性能と計算量の観点で最適な受信機構成を明らかにした。また、IDMAにおいてパケットを再送する際の送信機構成・制御についても検討し、再送制御を行う際の受信機について新しい構成を提案した。

上記で検討した送受信機の最適構成について、ハードウェアに実装し、その実現性について実験により検討した。具体的には、ハードウェアとして FPGA を用いて広帯域 MIMO-IDMA の伝送実験を行い、回路規模や動作速度、性能について評価を行った。また、移動通信特有のマルチパス伝搬路も回路上でエミュレートすることで伝送特性の評価を行い、FPGA で実現する上での課題も含めて送受信機の最適構成について総合的な観点で検討した。

(4) システム性能の評価と実現のための要求条件の明確化：各ユーザからチャンネル情報がフィードバックされた際に、最適なユーザ選択、リソース割り当て、IDMの多重数などの回線制御の効果について計算機シミュレーションで評価を行い、セルスループットの観点で各伝送パラメータ設定値におけるシステム要求条件について明らかにした。また、複数のチャンネル推定用プリアンブルを設計し、それらにおける特性比較により、プリアンブルに対する要求条件を示した。実システムに近い環境としてマルチセルを想定した特性評価も行い、要求条件を明確化した。

## 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 25 件)

- [1] S. Suyama, H. Fukuda, H. Suzuki, and K. Fukawa, "10 Gbps 8x8 MIMO-OFDM broadband experimental system for 11 GHz band super high bit-rate mobile communications," Inter. OFDM Workshop, pp. 115-120, Aug. 2012, 査読有.
- [2] K. Muraoka, K. Fukawa, H. Suzuki, and S. Suyama, "Iterative MAP channel estimation based on factor graph for OFDM mobile communications," IEEE Vehic. Tech. Conf., vol. 1, pp. 1-5, May 2012, 査読有, DOI: 10.1109/VETECS.2012.6239957
- [3] S. Suyama, H. Fukuda, H. Suzuki, and K. Fukawa, "11 GHz band 4x4 MIMO-OFDM broadband experimental system for 5 Gbps super high bit-rate mobile communications," IEEE Vehic. Tech. Conf., vol. 1, pp. 1-5, May 2012, 査読有, DOI:10.1109/VETECS.2012.6240266
- [4] 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 Commun., vol. E95-B, no. 5, pp. 1770-1783, May 2012, 査読有, DOI:10.1587/transcom.E95.B.1770
- [5] L. Chang, K. Fukawa, H. Suzuki, and S. Suyama, "Precoding scheme robust to imperfect CSI in downlink multiuser MIMO-OFDM system," IEICE Trans. on Commun., vol. E94-B, no. 12, pp. 3515-3524, Dec. 2011, 査読有, DOI:10.1587/transcom.E94.B.3515
- [6] 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 Commun., vol. E94-B, no. 8, pp. 2346-2356, Aug. 2011, 査読有, DOI: 10.1587/transcom.E94.B.2346
- [7] 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 Commun., vol. E94-B, no. 2, pp. 533-545, Feb. 2011, 査読有, DOI: 10.1587/transcom.E94.B.533
- [8] L. Zheng, J. Woo, K. Fukawa, H. Suzuki, and S. Suyama, "Low-complexity

algorithm for log likelihood ratio in coded MIMO-OFDM communications," IEICE Trans. on Commun., vol. E94-B, no. 1, pp. 183-193, Jan 2011, 査読有, DOI: 10.1587/transcom.E94.B.183

- [9] 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., pp. 1-5, May 2010, 査読有, DOI: 10.1109/VETECS.2010.5493885

他 16 件

[学会発表] (計 21 件)

- [1] 須山聡, シンキユン, 小田恭弘, 鈴木博, 府川和彦, "10 Gbps超高速ビットレート移動通信を実現するための屋外伝送実験," 電子情報通信学会総合大会, B-5-110, 2013年3月22日, 岐阜大学.
- [2] 福田裕之, 須山聡, 鈴木博, 府川和彦, "10 Gbps超高速ビットレート移動通信を実現するための屋内伝送実験," 電子情報通信学会総合大会, B-5-109, 2013年3月22日, 岐阜大学.
- [3] 市原光, 須山聡, 鈴木博, 府川和彦, "超高速ビットレート移動通信における簡略化ターボ検出器のFPGA設計," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-31, 2012年9月11日, 富山大学.
- [4] 高橋満, 須山聡, 鈴木博, 府川和彦, "超高速ビットレート移動通信用 10 Gbps 8x8 MIMO-OFDM送信処理のFPGA設計," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-30, 2012年9月11日, 富山大学.
- [5] 須山聡, 福田裕之, 鈴木博, 府川和彦, "超高速ビットレート移動通信用 11 GHz帯 10 Gbps 8x8 MIMO-OFDM伝送実験系," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-29, 2012年9月11日, 富山大学.
- [6] 須山聡, 鈴木博, 府川和彦, "超高速ビットレート移動通信用広帯域MIMO伝送系," 電子情報通信学会技術報告, RCS2011-215, 2011年11月17日, 名古屋国際会議場.
- [7] 須山聡, 福田裕之, 鈴木博, 府川和彦, "超高速ビットレート移動通信用伝送実験系のソフトウェア無線機構成," 電子情報通信学会技術報告, SR2011-34, 2011年7月28日, 横須賀リサーチパーク.
- [8] 府川和彦, 鄭黎明, 鈴木博, 須山聡, "[招待講演] MIMO通信における準最適信号検出," 電子情報通信学会技術報告, RCS2011-53, 2011年6月23日, 琉球大学.
- [9] 式田潤, 須山聡, 鈴木博, 府川和彦, "インターリーブ分割多重と適応リソース割り当てを用いるMIMO-OFDM IDMA," 電子情報通信学会技術報告, RCS2010-310,

2011年3月4日, 横須賀リサーチパーク.  
 [10] J. Shikida, S. Suyama, H. Suzuki, and K. Fukawa, "Iterative receiver employing multiuser detection and soft decision-directed channel estimation for MIMO-OFDM IDMA," Inter. Workshop on Milli. Wave Wireless Tech. and Appli., Dec. 6, 2010, Tokyo Institute of Technology.  
 [11] 式田潤, 須山聡, 鈴木博, 府川和彦, "OFDM-IDMAにおけるユーザ数と畳み込み符号の拘束長との関係," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-54, 2010年9月14日, 大阪府立大学.

他 10 件

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

[1] 名称: 無線受信装置および無線受信方法  
 発明者: 松本知子, 小西聡, 畑川養幸, 須山聡, 鈴木博, 府川和彦  
 権利者: 国立大学法人東京工業大学, KDDI 株式会社  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2012-232236  
 取得年月日: 2012年10月19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  
 取得年月日: 2011年8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  
 取得年月日: 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, 鈴木博, 府川和彦, 須山聡  
 権利者: シヤープ株式会社, 国立大学法人東京工業大学  
 種類: 特許  
 番号: PCT/JP2010/058802  
 出願年月日: 2010年5月25日  
 国内外の別: 国外

[その他]

ホームページ

[http://www.radio.ss.titech.ac.jp/prof\\_s](http://www.radio.ss.titech.ac.jp/prof_s)

[uzuki\\_\\_thesis/thesis-j.html](uzuki__thesis/thesis-j.html)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
 須山 聡 (SUYAMA SATOSHI)  
 東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
 研究者番号: 70334505
- (2) 研究分担者  
 なし
- (3) 連携研究者  
 なし