

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 5 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420382

研究課題名(和文) 誤り訂正符号を用いた過負荷MIMOシステムの低演算量信号分離法の研究

研究課題名(英文) Research on Low Computational Complexity Signal De-multiplexing Schemes for Overloaded MIMO Systems

研究代表者

眞田 幸俊 (Yukitoshi, Sanada)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：90293042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、誤り訂正符号を用いた過負荷MIMO-OFDM伝送方式を検討した。検討の結果、提案方式は誤り訂正符号にブロック符号を用いた場合、誤り率特性を維持しながら統合最尤復号の復号演算量を1/40に低減した。さらに誤り訂正符号にTrellis符号を用い、スループットを維持したまま特性を改善するシステムも提案し、受信信号電力が高い領域で特性を維持しつつ計算量を約1/16に低減した。また非直交多元接続システムにおいて統合最尤復調により信号分離処理を行うシステムを検討した。基地局近傍端末および基地局から遠方の端末両方において統合最尤復調を適用することによって全体のスループットが改善した。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on an overloaded multi-input multi-output (MIMO) orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system. One of the problems in the overloaded MIMO-OFDM system is the performance degradation due to spatial signal multiplexing. In the conventional MIMO system, antenna diversity in a receiver suppresses the performance degradation. Instead, a proposed overloaded MIMO system applies forward error correction coding. With the use of coding, frequency diversity can be realized and it suppresses the performance degradation owing to spatial signal multiplexing. The problem of the use of coding is that the complexity of joint maximum likelihood decoding (MLD) increases exponentially with the number of signal streams. Thus, this research proposes the complexity reduction schemes in the overloaded MIMO-OFDM systems. Furthermore, the joint MLD is applied to user terminals in a non-orthogonal multiple access system for improving the throughput of a NOMA downlink.

研究分野：無線通信

キーワード：過負荷MIMO 非直交多元接続 OFDM 最尤推定復号

1. 研究開始当初の背景

近年スマートフォンの急激な普及や動画配信の一般化により、移動体通信システムのトラフィック量は毎年指数関数的に増加している。ITU-R のレポートによれば今後 10 年間で 500 倍から 1000 倍に増加することが見込まれている。

従来周波数利用効率の改善においては図 1 に示すような、送受信に複数のアンテナ素子を用いる MIMO-OFDM 伝送方式が検討されてきた。しかしこの方式ではスマートフォンのような筐体の物理的な大きさが制限される場合には、受信アンテナ数が限られ伝送レートに限界が生じる。そこで受信側アンテナ数が限定された(過負荷状態) MIMO システムが検討されているが、信号分離後の誤り率特性の劣化が指摘されている。

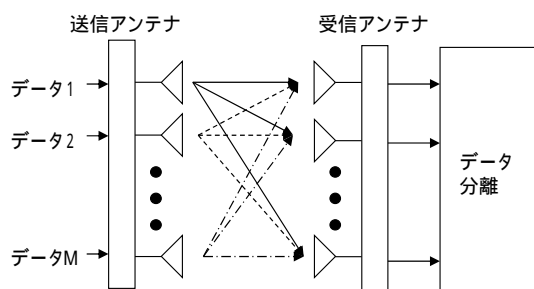


図 1 従来型 MIMO 伝送の概念図

2. 研究の目的

本研究では受信側アンテナ数を 1 に制限し、複数のシンボルに渡って受信信号を観察することによって信号を分離する過負荷 MIMO-OFDM システムを検討する。図 2 がその概念図である。複数の受信シンボルを用いて信号分離するためにはシンボル間に関連性が必要になる。そこで誤り訂正符号によって複数シンボル間に関連性を持たせ、誤り訂正復号器内のメモリの状態遷移の尤度を複数の信号ストリームに対して同時に計算する。そして状態遷移の組み合わせのうち最も確からしい遷移を選び、その組み合わせから信号分離を行う。これにより正確な信号分離が実現し、誤り率特性が改善する。

この方式における問題は計算量が受信信号数に対して指数関数的に増加することである。本研究ではこの問題を解決するために、過負荷 MIMO-OFDM システム用誤り訂正符号およびその復号法を検討する。

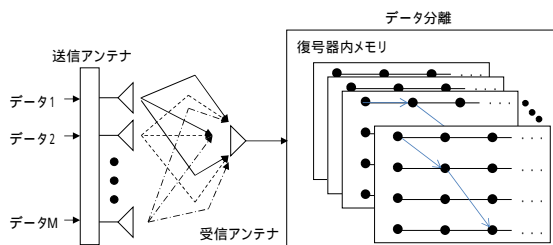


図 2 提案する MIMO 伝送の概念図

本研究では期間内に以下のような項目に関して検討する。

- (1) トレリス符号化多値変調およびチャネル行列の QR 分解と組み合わせることによって、シンボル組み合わせ候補を低計算量で削除する。
- (2) 通信路状態がよく信頼性の高い信号ストリームから復号し、受信信号から除去することによって信号分離の計算量を低減する復調方式を検討する。
- (3) 状態遷移の尤度を限定された受信シンボル数で計算し、その処理を逐次的に繰り返すことにより計算範囲を広げる復調方式を検討する。この方式より信号分離の計算量を低減する。
- (4) 上記のアルゴリズムの有効性を検証するため信号発生器とソフトウェア無線受信機を用いて異なる通信路を想定した実験を行う。

以上の検討を通して過負荷 MIMO-OFDM システムにおける周波数利用効率の改善効果を検証する。

3. 研究の方法

研究は計算機シミュレーションおよび高周波信号を使った有線実験により行う。まず計算機シミュレーションによりベースバンドモデルにおける提案アルゴリズムの信号分離・復号特性を評価し、その有効性を確認した。計算機シミュレーションでは無線チャネルを典型的な統計的モデル (Rayleigh 分布) により表現するが、屋内伝搬環境では必ずしも典型的な性質を示さない。そこで実験システムを用いて屋内実伝搬環境における通信路容量の改善度の限界を検討した。また汎用プロセッサを用いたソフトウェア無線プラットフォーム上に信号分離・復号アルゴリズムを実装することにより、提案アルゴリズムによる計算量削減効果を実証した。特にどのような伝搬環境で信号分離・復調に必要な計算量が増加するか、計算機シミュレーションおよびソフトウェア無線プラットフォームを用いて明らかにした。

図 3 は実験システムの構成である。2 送信アンテナを想定して高周波任意波形発生器 (既存設備) 2 台を同期させながら 2 系統の高周波信号を出力する。受信側は 1 アンテナで受信しダウンコンバータに入力する。ソフトウェア無線プラットフォームは高周波信号をベースバンド信号に変換し、アナログ-デジタル (A/D) 変換器によりデジタル信号化され、メモリ内に格納される。パーソナルコンピュータ内の汎用プロセッサは PCI バスを通じてソフトウェア無線プラットフォーム内のメモリにアクセスし、信号分離・復調処理をリアルタイムに実行する。計算機シミュレーションも図 3 と同様の構成をプログラムに実装し、無線チャネルとして Rayleigh フェージングモデルを用いて評価する。

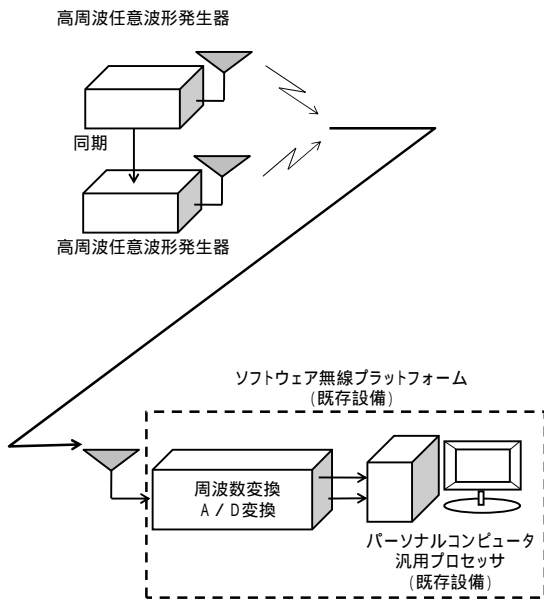


図3 実験システムの構成

4. 研究成果

(1) 実験システム

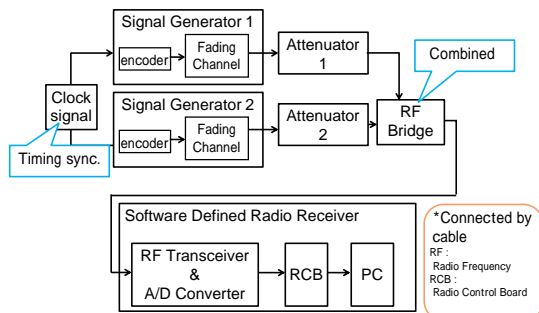


図4 実験システムの詳細

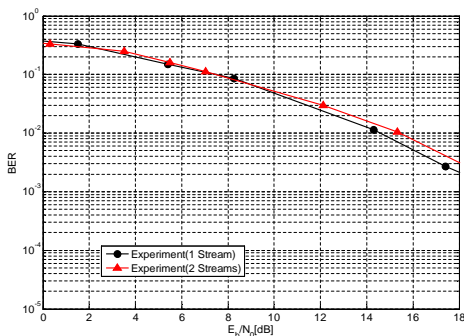


図5 実験結果 (Indoor Residential A)

図4に実験システムの詳細を示す。信号発生器2台から帯域幅 20MHz, データサブキャリア数 48 の OFDM 信号およびフェージングを生成する。送信信号は符号化率 4/8 の Hamming 符号化する。信号発生器の出力を合成し、ソフトウェア無線受信機に入力する。受信側では最尤推定復号処理を適用し、情報信号を取り出す。

図5は実験によって得られたビット誤り率 (BER) と E_b/N_0 特性である。チャンネルモデルに Indoor Residential A モデルを想定している。図より信号ストリームが2の場合も1ストリームとほぼ同様の特性で復号できていることがわかる。これは誤り訂正符号の周波数ダイバーシチ効果により、空間信号多重により特性劣化を提言しているためである。以上から強力な誤り訂正符号を用いることによって受信アンテナ数を低減することが可能であることが示された。

(2) ブロック符号の低演算量復号方式

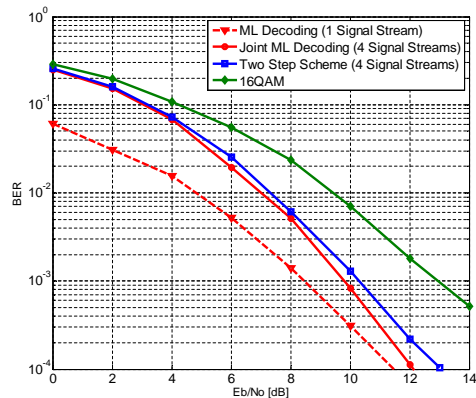


図6 BER 特性 (Indoor Residential A)

ブロック符号の最尤推定復号の計算量は候補符号語数の信号ストリーム数乗で増加する。そこで2段階復号により候補符号語を最初に削減する方式を提案した。図6は Indoor Residential A チャンネルモデルにおける BER 特性である。提案方式の計算量は約 1/40 に削減している。提案方式 (Two Step Scheme) は Joint ML Decoding に近い BER 特性を示している。

(3) Trellis 符号化

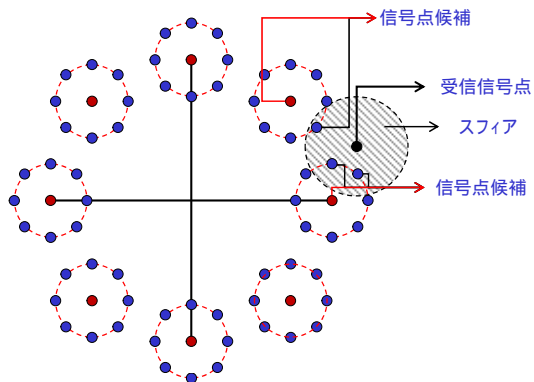


図7 スフィア復号

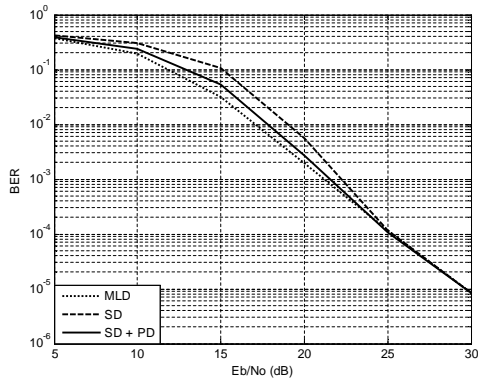


図 8 BER 特性 (Indoor Residential A)

一般手的に誤り訂正符号は情報ビットのスループットを冗長度により低下させる．そこで Trellis 符号化を用いて信号の空間多重化の影響を低減すること (MLD) を検討した．またスフィア復号法を用いて復号計算量を低減する方式 (SD) も検討した．スフィア復号法は図 7 のように候補信号点を削減することで復号計算量を低減する．ただ削減しすぎてしまうと復号に用いる尤度が得られない場合がある．そこで仮の距離 (PD) を導入し尤度の近似値を与える方式を提案した．

図 8 は Indoor Residential A チャンネルモデルにおける BER 特性である．最尤推定復号に対して SD および SD + PD のいずれも高い E_b/N_0 値ではほぼ同じ特性になった．このときの計算量は MLD に対して約 1/16 である．また提案する SD + PD 方式は 15 - 20dB の E_b/N_0 において SD だけの場合よりも良い特性を示した．

(4) 非直交多元接続への適用

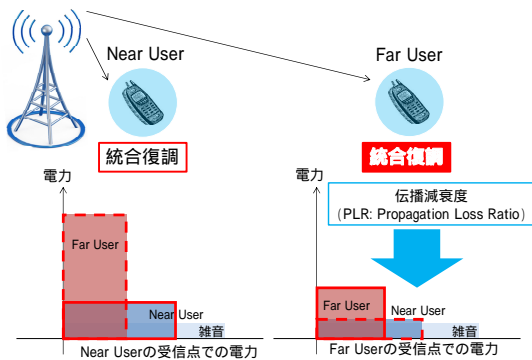


図 9 非直交多元接続モデル

統合最尤復号演算量を低減することによって、端末において過負荷 MIMO を実装することができる．特に第 5 世代移動通信システムにおいては同一周波数ブロックで複数のユーザに対して信号を重畳して送信する．このとき伝搬損失の異なる基地局近傍の端末と基地局から遠方の端末を組み合わせる必要がある．受信側で統合最尤復調を行うことによって全体のスループットが改善する．

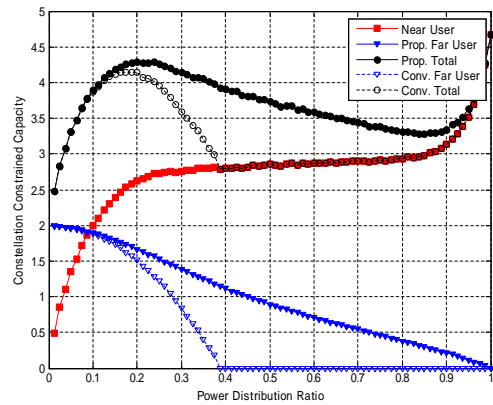


図 10 スループット特性

図 10 は基地局近傍の端末のみ統合最尤推定復調した場合とスループットと基地局から遠方の端末も統合最尤推定復調した場合のスループット特性の比較である．すべての端末で統合最尤推定復調することによって干渉信号を低減し、全体のスループットを改善することができるが示された．

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 6 件)

T. Yazaki and Y. Sanada, "Effect of Signal Cancellation in Far User on Non-orthogonal Multiple Access Downlink," Wireless Personal Communications, published on line in 2016, 査読有

DOI: 10.1007/s11277-016-3312-y

I. Shubhi and Y. Sanada, "Pseudo Distance for Trellis Coded Modulation in Overloaded MIMO OFDM With Sphere Decoding," 査読有, IEICE Trans. on Communications, vol. E99-B, no. 3, 2016, pp. 723-731

DOI: 10.1587/transcom.2015EBP3218

Y. Doi and Y. Sanada, "Codeword Metric Calculation Scheme for Outer Code in Overloaded MIMO-OFDM System," 査読有, IEICE Trans. on Communications, vol. E98-B, no. 8, 2015, pp. 1598-1605

DOI: 10.1587/transcom.E98.B.1598

Y. Tanaka, M. Inamori, and Y. Sanada, "Two Step Timing Synchronization Scheme for OFDM Signal in General Purpose Processor Based Software Defined Radio Receiver," 査読有, Wireless Personal Communications, vol. 79, issue 1, 2014, pp. 363-374

DOI: 10.1007/s11277-014-1860-6

Y. Doi, M. Inamori, and Y. Sanada, "Complexity Reduction in Joint Decoding of Block Coded Signals in Overloaded

MIMO-OFDM System," 査読有, IEICE Trans. on Communications, vol. E97-B, no. 4, 2014, pp. 905-914
DOI: 10.1587/transcom.E97.B.905
T. Yabe, M. Inamori, and Y. Sanada, "Experimental Investigation of Joint Decoding in Overloaded MIMO-OFDM System," IEICE Trans. on Communications, 査読有, vol. E96-B, no. 12, 2013, pp. 3101-3107
DOI: 10.1587/transcom.E96.B.3101

[学会発表](計 26 件)

Y. Sanada, "Joint ML Detection for Overloaded MIMO and Its Application to Non-orthogonal Multiple Access," SmartComm 2016, 2016 年 5 月 16 日, Oulu (Finland)
柏葉夏実, 矢崎貴大, 眞田幸俊, "ヘテロジニアスネットワークにおける統合復調を用いた非直交多元接続の検討," 電子情報通信学会技術報告, 2016 年 4 月 22 日, 星と森のロマンピア(青森県・弘前市)
池内尚史, 松岡 暉, 眞田幸俊, "加減算メトリックの回転座標を用いた計算量削減法," 電子情報通信学会総合ティ大会, 2016 年 3 月 16 日, 九州大学(福岡県・福岡市)
矢崎貴大, 眞田幸俊, "準直交および非直交多元接続における統合復調方式のスループット特性," 電子情報通信学会技術報告, 2016 年 3 月 4 日, 東京工業大学(東京都・目黒区)
青木貴孔, 眞田幸俊, "ビットシフトを用いた近似尤度計算の低演算量の検討," 電子情報通信学会技術報告, 2016 年 3 月 4 日, 東京工業大学(東京都・目黒区)
池内尚史, 松岡 暉, 眞田幸俊, "低演算量メトリックを用いた過負荷 MIMO システムの統合最尤復号特性," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015 年 9 月 9 日, 東北大学(宮城県・仙台市)
K. Ando and Y. Sanada, "Joint Maximum Likelihood Detection in Far User of Non-orthogonal Multiple Access," IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium 2015, 2015 年 8 月 20 日, Singapore (Singapore)
矢崎貴大, 眞田幸俊, "遠方ユーザに統合復調を用いた非直交多元接続のスループット特性," 電子情報通信学会技術報告, 2015 年 5 月 22 日, 機械振興会館(東京都・港区)
Y. Doi and Y. Sanada, "Codeword Metric Calculation Scheme for Outer Code in Overloaded MIMO-OFDM System," the 81th IEEE Vehicular Technology Conference 2015 Spring, 2015 年 5 月 12 日, Glasgow (United Kingdom)
DOI: 10.1109/VTCSpring.2015.7145748

Y. Doi and Y. Sanada, "Candidate Codeword Selection Scheme with Bit Flipping for Outer Code in Overloaded MIMO-OFDM System," International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems 2014, 2014 年 12 月 4 日, Kuching (Malaysia)
DOI: 10.1109/ISPACS.2014.7024476
土井寿人, 眞田幸俊, "過負荷 MIMO システムにおける外符号のための符号語メトリック計算法," 電子情報通信学会技術報告, 2014 年 11 月 7 日, 北こぶし(北海道・斜里郡)
Y. Chida and Y. Sanada, "LLR Calculation based on Interference Cancellation with Channel Estimation Error for Non-orthogonal Multiple Access," the 80th IEEE Vehicular Technology Conference 2014 Fall, 2014 年 9 月 17 日, Vancouver (Canada)
DOI: 10.1109/VTCFall.2014.6966038
土井寿人, 眞田幸俊, "過負荷 MIMO システムにおける外符号のためのビット反転を用いた符号語選択法," 電子情報通信学会技術報告, 2014 年 8 月 1 日, 京都テルサ(京都府・京都市)
矢部達郎, 眞田幸俊, "見通し環境における過負荷 MIMO-OFDM システムのブロック符号化信号統合復号のための相関低減プレコーディング," 電子情報通信学会技術報告, 2014 年 8 月 1 日, 京都テルサ(京都府・京都市)
矢崎貴大, 眞田幸俊, "非直交多元接続における統合復調に関する検討," 電子情報通信学会技術報告, 2014 年 6 月 18 日, 沖縄青年会館(沖縄県・那覇市)
Y. Chida and Y. Sanada, "LLR Calculation based on Interference Cancellation for Non-orthogonal Multiple Access," the 79th IEEE Vehicular Technology Conference 2014 Spring, 2014 年 5 月 20 日, Seoul (Korea)
DOI: 10.1109/VTCSpring.2014.7022974
イルミワン シュビヒ, 眞田幸俊, "過負荷 MIMO におけるトレリス符号化変調信号のスフィア復号と疑似距離を用いた統合復号方式," 電子情報通信学会技術報告, 2013 年 12 月 20 日, 高松市文化芸術ホール(香川県・高松市)
Y. Sanada, "Performance of Joint Maximum-Likelihood Decoding for Block Coded Signal Streams in Overloaded MIMO-OFDM System," in Proc. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems 2013, 2013 年 11 月 15 日, 自治会館(沖縄県・那覇市)
DOI: 10.1109/ISPACS.2013.6704654
Y. Doi, M. Inamori, and Y. Sanada,

"Complexity Reduction in Joint Decoding of Block Coded Signals in Overloaded MIMO-OFDM System," in Proc. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems 2013, 2013年11月14日, 自治会館(沖縄県・那覇市)

DOI: 10.1109/ISPACS.2013.6704619

T. Yabe, M. Inamori, and Y. Sanada, "Experimental Investigation of Joint Decoding in Overloaded MIMO-OFDM System," in Proc. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems 2013, 2013年11月14日, 自治会館(沖縄県・那覇市)

DOI: 10.1109/ISPACS.2013.6704618

I. Shubhi and Y. Sanada, "Trellis Coded Modulation with Pseudo Distance in Overloaded MIMO OFDM with Sphere Decoding," in Proc. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems 2013, 2013年11月14日, 自治会館(沖縄県・那覇市)

DOI: 10.1109/ISPACS.2013.6704617

⑲ R. Takai, S. Uchida, A. Sato, M. Inamori, and Y. Sanada, "Experimental Investigation of Signal Sensing with Overlapped FFT based Energy Detection," in Proc. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems 2013, 2013年11月13日, 自治会館(沖縄県・那覇市)

DOI: 10.1109/ISPACS.2013.6704551

⑳ Y. Sanada "Joint Maximum Likelihood Decoding with Limited Number of Receive Antennas in Overloaded MIMO-OFDM System," the 2013 International Conference on Advanced Technologies for Communications, 2013年10月17日, Hochiminh City (Vietnam)

DOI: 10.1109/ATC.2013.6698130

㉑ Ilmiawan Shubhi, 眞田幸俊, "Trellis Coded Modulation with Pseudo Distance in Overloaded MIMO OFDM System with Sphere Decoding," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013年9月17日, 福岡工業大学(福岡県・福岡市)

㉒ 土井寿人, 稲森真美子, 眞田幸俊, "過負荷 MIMO-OFDM システムにおけるブロック符号化信号の統合復号時計算量削減法," 電子情報通信学会技術報告, 2013年6月20日, 北海道大学(北海道・札幌市).

㉓ 矢部達郎, 稲森真美子, 眞田幸俊, "過負荷 MIMO-OFDM システムのブロック符号化信号の統合復号に関する実験的検討," 電子情報通信学会技術報告, 2013年6月20日, 北海道大学(北海道・札幌市).

㉔ 千田悠司, 稲森真美子, 眞田幸俊, "干渉

キャンセラと LLR 重み付けを用いた LDPC 符号化信号の非直交多元接続の検討," 電子情報通信学会技術報告, 2013年6月20日, 北海道大学(北海道・札幌市).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

眞田 幸俊 (Yukitoshi Sanada)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号: 90293042