

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630159

研究課題名(和文)大規模MIMOシステムのための低演算検出アルゴリズムの研究

研究課題名(英文)Low-Complexity Symbol Detection Algorithms for Large-Scale MIMO Systems

研究代表者

落合 秀樹(OCHIAI, HIDEKI)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20334576

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文):限られた周波数資源のもとで無線通信システムの大容量化を加速させる大規模MIMOシステムの実現には、低演算でかつ優れた特性を達成する信号検出アルゴリズムの考案が必須である。そこで本研究では、MIMO空間多重システムにおける新たな信号検出手法を考案した。主要な成果として(1)符号化MIMOシステムにおいて演算量と特性の優れたトレードオフを達成する新たなシンボル検出アルゴリズムの提案、(2)信号点分布近似に基づくMIMO信号検出法に対するChaseアルゴリズムを用いた誤り率特性の改善手法の提案、が挙げられる。

研究成果の概要(英文):Spatial multiplexing based on large-scale MIMO systems has been considered as a promising approach for future broadband wireless systems, but the optimal detection of multiplexed symbols is challenging due to its extremely high computational complexity. Therefore, its feasibility depends on the development of low-complexity algorithms for symbol detection. In this work, we have developed (1) a new symbol detection algorithm based on extension of parallel candidate adding approach for coded MIMO systems, and (2) a new modified algorithm based on symbol distribution approximation that enhances the symbol detection performance without significant increase of computational complexity at the receiver.

研究分野：通信工学

キーワード：無線通信システム MIMO 信号検出

1. 研究開始当初の背景

高速データ通信機能を有するスマートフォンやタブレット端末の爆発的な普及に鑑み、今後も増加し続けるモバイル端末に対してより大容量なサービスを提供できる無線通信技術の研究開発が急務である。限られた周波数資源のもとでこれを実現する手法として、送受信端末間で複数のアンテナを用いることで空間的自由度を拡張することにより、使用周波数帯域を広げることなく通信路容量をアンテナ数倍に向上させる MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 空間多重方式が注目されている。MIMO 技術は、今後のモバイル通信の高速化の鍵を握る技術として広く研究開発がすすめられているが、とりわけ膨大なアンテナ数を伴う大規模 MIMO は、通信路容量の増大のみでなく、フェーディング環境下でも安定した通信が確立できることが知られている。しかしながら大規模 MIMO 通信の実現には課題が多く、なかでも最も重要な課題の一つが、受信機における簡易な演算のみでいかにして信号を分離できるかである。

一般に、変調信号点数を M 、送信アンテナ数を N_t とすると、最も優れた特性が得られる最尤検出 (MLD: Maximum-Likelihood Detection) に基づく信号分離を用いる場合、必要な演算量のオーダは $O(M^{N_t})$ となる。つまり、アンテナ数が所要演算量を指数関数的に増加させるため、大容量通信の条件、つまり M および N_t の増加は、受信回路規模の著しい増大を招く。一方、最小平均二乗誤差 (MMSE: Minimum Mean Square Error) 基準に基づく線形検出を用いる場合、演算量のオーダは $O(M)$ で抑えられるが、最尤検出と比べて誤り率特性が大幅に劣化するため、特に伝搬路特性の変化の激しい移動通信環境下では十分な伝送容量の改善効果は期待できない。また、Bell Laboratories Layer Space-Time (BLAST) に代表される逐次干渉除去処理型の受信機は、処理遅延が大きいいため、アンテナ数が増加するとリアルタイム性の確保が困難になる。

以上の背景により、最新の無線 LAN (Local Area Network) の標準規格等においても MIMO 空間多重方式はオプションとして採用されるにとどまっており、特に大規模 MIMO システムの真の実用化には、信号分離アルゴリズムにおけるブレイクスルーが必要不可欠である。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究は大規模なアンテナ数を伴う MIMO 空間多重技術の実用化、およびそれによる通信システムの大容量化に貢献する、簡易な信号分離アルゴリズムを考案することを目的とする。具体的には、送信アンテナ数の増加や送信信号の多値数に依存することなく、高度な信号分離を可能とするアルゴリズムを考案し、逼迫した周波数

環境において移動無線通信技術のさらなる大容量化に資する基盤技術の創出に貢献することにある。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、本研究課題においては主として以下の方法により MIMO 信号検出に関する研究を行った。

- (1) 符号化 MIMO システムにおいて演算量と特性の優れたトレードオフを達成する新たなシンボル検出アルゴリズムの提案
- (2) 信号点分布近似に基づく MIMO 信号検出法に対する Chase アルゴリズムを用いた誤り率特性の改善手法の提案

4. 研究成果

上で述べた簡易な MIMO 信号検出に関する主要成果を以下に述べる。

- (1) 符号化 MIMO における新たなシンボル検出アルゴリズムの提案 (鋸木、落合)

ここでは木構造を用いることで計算量を削減する手法について考える。まず伝搬路行列を受信側で QR 分解 (QRD) することにより、シンボル判定に用いる木構造を生成する。一般にアンテナ数 N_t 、変調点数 M の判定木は、 M^{N_t} 個の葉をもつ。最尤検出法では、このすべての葉の尤度を計算することになり、特に大規模な MIMO システムでは現実的でない。最尤検出における葉の探索数を削減する代表的な手法として、Sphere Decoding (SD) が知られている。SD は、探索範囲を絞りつつ尤度計算を逐次行う手法であり、検出までに必要となる計算量が一定とならない問題がある。これに対し、準最適な誤り率特性を有するが演算量を一定とする代表的な手法として、枝の数がある値 M を超えた時点で、 M 本のみを残して子ノードの探索を続ける M アルゴリズムを用いる QRD-M と、SD の探索手法を簡易化する Fixed Complexity SD (FSD) が挙げられる。FSD は、最初の N_t レイヤ (最も影響の大きい最初のアンテナ N_t 本に相当) のみ、親ノードから全ての子ノードを生成する (FE: Full Enumeration) が、残りのレイヤにおいては 1 本の枝のみを残す (SE: Single Enumeration) ことで、探索に要する演算量を一定とする手法である (図 1 にその木構造の一例を示す)。

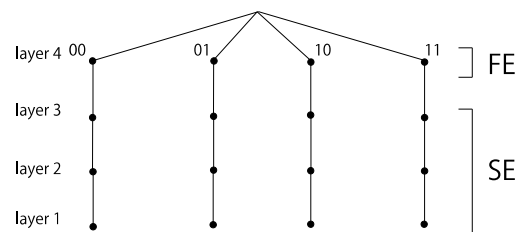


図 1: FSD における木構造 (送受信アンテナ数 4 本、2 ビット/アンテナの例)

一般に、送信側で 2 元誤り訂正符号化されたシンボルは、受信側で各ビットに対する対数尤度比 (LLR: Log Likelihood Ratio) を算出することで、効果的な復号が可能である。この場合、各ビット位置に対して、0 および 1 に相当するシンボルの尤度を計算する必要がある。しかしながら FSD ではノードの候補が下のレイヤでは 1 本に削られるため、受信側で各ビット位置に対する尤度を計算する際に必要となる枝が残っていない場合には、適切な LLR 値を算出することができない。そこで提案された手法が、Parallel Candidate Adding (PCA) である。PCA は、FSD により候補点を絞り込むと同時に、適切な LLR 値が得られるように、並列的にビットの異なる候補枝を追加する手法である。図 2 に送信アンテナが 4 本であり、各アンテナから 2 ビットのシンボルを送信する場合の PCA の木構造の一例を示す。図において、丸で囲まれたノードは各レイヤにおいて部分尤度が最も大きいノードを表している。点線で囲まれたノードは FSD と比較して PCA で追加される枝およびノードを表す。

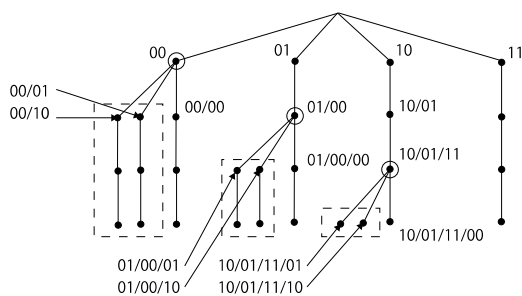


図 2: PCA における木構造 (送受信アンテナ数 4 本、2 ビット/アンテナの例)

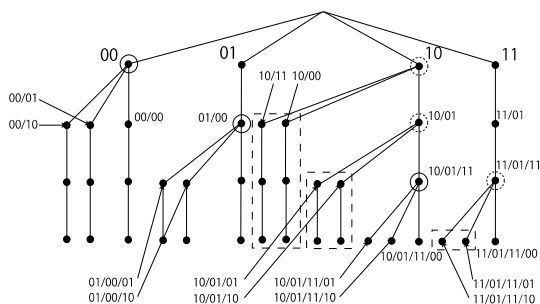


図 3: EPCA における木構造 (送受信アンテナ数 4 本、2 ビット/アンテナの例、P=2)

PCA では、各レイヤにおいて部分尤度が最も大きいノードのみに対して枝の追加がなされるため、その改善効果は限定的であった。そこで本研究では、PCA において枝を追加する際に、部分尤度が最も大きいものから P 個まで拡張したノードに対して枝を追加する EPCA (Extended PCA) を提案した。図 3 に、図 2 の木に対して P=2 とした場合の EPCA の木構造を示す。これにより効果的に

候補点数を増やすことで、計算量と誤り率特性の点でよりよいトレードオフの関係を達成できる。なお EPCA において P=1 とした場合、PCA と同じである。

図 4 に、符号長 3072、符号化率 1/2 の低密度パリティ検査 (LDPC) 符号を適用した場合の 4x4 の MIMO 通信路において、各アンテナから 64-QAM を送信した場合に達成できるフレーム誤り率 (FER) 特性の比較を示す。同図より、EPCA により PCA の特性がさらに改善されることがわかる。特に P=4 の EPCA が QRD-M の M=64 の場合とほぼ同等の優れた FER 特性を示している。なお、表 1 にこれらのアルゴリズムに要する演算量の比較結果を示す。同表より、P=4 の EPCA においては PCA より若干の演算量の増大が見られるが、同等の FER 特性を示す M=64 の QRD-M よりは大幅に演算量が抑えられていることがわかる。したがって EPCA が特性と計算量の点で QRD-M と比べてもよりよいトレードオフ関係を達成できているといえる。

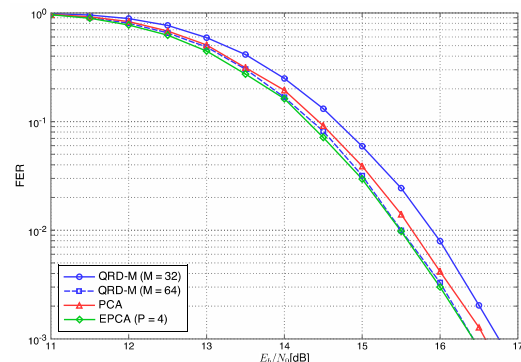


図 4: 各アルゴリズムによる FER 特性 (4x4 MIMO、64-QAM)

表 1: 各アルゴリズムに必要な演算回数の比較 (4x4 MIMO、64-QAM)

アルゴリズム	乗算	加算	比較
QRD-M (M=32)	4088	4080	8000
QRD-M (M=64)	8024	8016	18432
PCA	3548	3021	2126
EPCA (P=4)	4736	4164	3636

(2) シンボル近似に基づく MIMO シンボル検出法の Chase アルゴリズムを用いた特性改善 (吉澤、落合)

本研究代表者らは引用文献において、離散点の集合からなる送信シンボルの形状を連続関数で近似することにより判定シンボル候補数を大幅に削減する、新しいシンボル近似検出手法 (SDA: Symbol Distribution Approximation) を提案している。本手法は、特に送信シンボルが円状の場合 (例えば多値 PSK) に高い性能を発揮することを同文献で示している。計算量の削減効果は、送信アンテナ数 N_t に対して最尤検出法の $O(M^{N_t})$ から $O(M^{N_t-1})$ へと少なくともアンテナ 1 本分を低

減できるが、その誤り率特性は最尤検出法に匹敵するダイバーシティ効果を有することが示された。特に送信アンテナ数が2本であれば、線形オーダで最尤検出法に近いシンボル検出が可能である。

しかしながら提案手法と最尤検出法との間には未だ誤り率特性のギャップがみられる。そこで本研究では、演算量を著しく増加させることなく、このギャップを縮める手法を提案した。具体的には、シンボル近似法により得られた硬判定結果を基準とし、これを誤り訂正符号の Chase 復号に似た要領で1ビット毎にシンボルを変化させて候補点を増やし、受信点とのユークリッド距離を求めることで、より最尤検出法に近いシンボル判定を行う。これにより、候補数を効果的かつ適応的に増加させることで、計算量と誤り率特性のよりよいトレードオフを達成することが期待できる。

図5に、最尤検出法(MLD)、QRD-M(M=4および6)、SDA、および提案の修正SDAのビット誤り率(BER)特性の計算機シミュレーション結果を示す。(参考のため、最も簡易な線形検出法の代表としてMMSE法の結果も示した。)同図より、修正SDAが従来のSDAよりも優れ、またMLDに最も近接した特性を示していることがわかる。特にQRD-Mのダイバーシティ効果が高い信号対雑音電力比(SNR)において劣化するのに対し、修正SDAではダイバーシティオーダの点でもMLDと比べて劣化が見られない点は注目に値する。また、各アルゴリズムの計算量の比較として、1シンボルの検出に要する実乗算数を算出した。その結果、MLDが5120にあるのに対し、QRD-Mでは752(M=4)および1072(M=6)であった。一方、従来のSDAでは656であるのに対し、提案の修正SDAでは716に留まった。つまり修正SDAはQRD-MのM=4とほぼ同等の演算量であるが、BER特性ではより複雑なM=6のQRD-Mよりもはるかに優れている。以上より、提案修正SDAの有効性は明らかであるといえる。

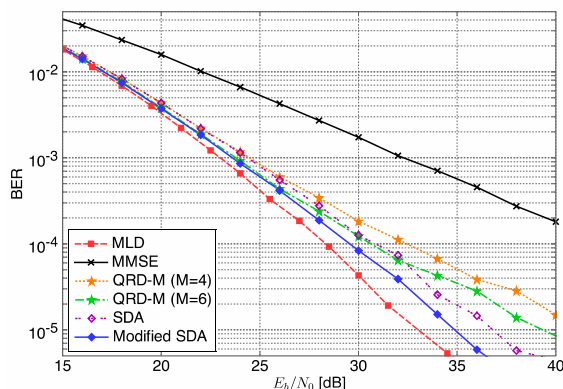


図5: 各アルゴリズムによるBER特性(2×2 MIMO、16-PSK)

<引用文献>

M. Tanahashi and H. Ochiai, "A new reduced-complexity conditional-mean based MIMO signal detection using symbol distribution approximation technique," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 11, pp. 5644-5651, November 2011.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

R. Yoshizawa and H. Ochiai, "Energy efficiency improvement of coded OFDM systems based on PAPR reduction," *IEEE Systems Journal*, 12 pages, September 2015 (online). (査読有)
DOI: 10.1109/JSYST.2015.2469783

[学会発表](計14件)

吉澤健人, 落合秀樹, "信号点分布近似に基づくMIMO信号検出法の特性改善に関する検討", 電子情報通信学会総合大会, B-5-181, 九州大, 2016年3月.

萩原慎也, 落合秀樹, "アップリンクMU-MIMOにおける適応符号化変調に関する一検討", 電子情報通信学会技術報告, vol. 115, no. 364, WBS2015-65, pp. 147-151, 沖縄, 2015年12月.

R. Yoshizawa and H. Ochiai, "Mutual information and coded BER analysis of PAPR reduced OFDM system with active constellation extension," in *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2015)*, San Diego, CA, December 2015. (査読有)

落合秀樹, "[チュートリアル講演] 格子の畳込み符号への応用: Signal Codes と Turbo Signal Codes", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, AT-1-1, 東北大, 2015年9月.

Y. Hori and H. Ochiai, "Bit error rate analysis of convolutionally coded BICM with specific interleaver structures," *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC 2015)*, pp. 4272-4277, London, UK, June 2015. (査読有)

吉澤健人, 落合秀樹, "3x3MIMO空間多重における信号点分布近似を用いた低演算信号検出に関する一検討", 電子情報通信学会技術報告, vol. 114, no. 395, RCS2014-298, pp. 169-174, 岡山大, 2015年1月.

吉澤健人, 落合秀樹, "3x3MIMOにおける信号点分布近似に基づく信号分離法の適用効果の検証", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-19-14, 徳島, 2014年9月.

K. Ikeda, F. Ono, H. Ochiai, and R. Miura, "A virtual MIMO relay system with

unmanned aircraft and multiple ground stations,” in Proceedings of 2014 IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC2014-Fall), Vancouver, BC, Canada, September 2014. (査読有)

落合秀樹, " [招待講演] 協調リレー通信における理論と実際", 電子情報通信学会技術報告, vol. 114, no. 30, RCS2014-24, pp. 29-32, 機械振興会館, 2014 年 5 月.

落合秀樹, "マルチユーザ MIMO 信号の瞬時電力分布に関する検討", 電子情報通信学会総合大会, ABS-1-3, 新潟大, 2014 年 3 月.

鏑木拓磨, 落合秀樹, "Parallel Candidate Adding に基づく符号化 MIMO 空間多重復号の演算量削減に関する検討", 電子情報通信学会技術報告, vol. 113, no. 456, RCS2013-382, pp. 457-462, 早稲田大, 2014 年 3 月.

鏑木拓磨, 落合秀樹, "符号化 MIMO 空間多重における追加信号候補の比較検討", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-7, 福岡工大, 2013 年 9 月.

F. Ono, T. Muramatsu, H. Ochiai, and R. Miura, "A signal constellation design for STBC with spatial and temporal modulation," in Proceedings of The 10th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2013), Ilmenau, Germany, August 2013. (査読有)

T. Tsubaki and H. Ochiai, "A new candidate adding algorithm for coded MIMO systems with fixed-complexity detection," in Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC 2013), pp. 4525-4529, Budapest, Hungary, June 2013. (査読有)

[その他]

ホームページ

<http://www.ochiailab.dnj.ynu.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

落合 秀樹 (OCHIAI, Hideki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号 : 20334576

(2) 研究協力者

吉沢 竜太 (YOSHIZAWA, Ryota)

鏑木 拓磨 (TSUBAKI, Takuma)

堀 勇太 (HORI, Yuta)

池田 憲介 (IKEDA, Kensuke)

吉澤 健人 (YOSHIZAWA, Kento)

萩原 慎也 (HAGIHARA, Shinya)