

研究成果報告書

研 究 題 目		SD-SM 伝送を用いた 高効率マルチアンテナ通信の創出		実 施 年 度
				2023～2024 年度
代 表 研 究 者	所 属	山口大学 大学院創成科学研究科 システム・デザイン工学系専攻		
	氏 名	井田 悠太		印
1. 研究の目的・背景				
近年, Society5.0 などの社会的要求を実現する多様なサービス/アプリケーションを創出する基盤技術は必須となっている. この様な要求に応える基盤技術を実現するために, 無線通信の世界では, 第 5 世代移動体通信 (5th Generation; 5G) 以降の規格で積極的に研究されている. 特に, IoT (Internet of Things) の様に, 複数のアンテナや端末, 基地局を協調させる技術を用いて, 低電力かつ高品質な通信を実現できるシステムが求められている. これは, 電気エネルギーの削減とも強い関わりがある. 本研究では, 複数の送受信アンテナを協調させる MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) を取り扱う. MIMO は, 各送信アンテナに信号を割り当て送信する手法である伝送方式が重要である. 伝送方式の例として, これまでに空間分割多重 (Space Division Multiplexing; SD) や空間変調 (Spatial Modulation; SM) など手法が提案されている. SD 伝送では, 各送信アンテナに異なる信号を割り当てることで, 送信レートを向上できる. しかし, 受信機での信号分離が必須である. 一方で, SM 伝送は送信アンテナ番号と信号パターンを対応させるマッピングテーブルを用いることで, 任意の送信アンテナにのみ信号を割り当てることができ, 受信機での信号分離が不要, もしくは軽減される. しかし, SD 伝送と比較し送信レートが劣化する. 結果, これらの手法の間には, 送信レートや信号分離, 演算量などとの間にトレード・オフの問題が存在する. そこで, これらを組み合わせた SD-SM 伝送が提案されている. SD-SM 伝送は任意の 1 本の送信アンテナに SM 伝送の信号, その他の送信アンテナに SD 伝送の信号を割り当てることで, SD 伝送と比較し最大送信レートを劣化させず, 通信品質の向上を実現できる. しかし, これまでの SD-SM-MIMO はシングルキャリア伝送の簡素な通信システムでの評価に留まっていた. それ故, 本研究は SD-SM 伝送を用いた MIMO システムにおける高効率マルチアンテナ通信の検討を行った. 本研究では, 大容量化を実現するためにマルチキャリア伝送方式の直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing; OFDM) や収容アンテナ数増加によるシステムの拡張, そして人工知能 (Artificial Intelligence; AI) などにも使われる機械学習の適用について計画し, 性能評価を行った.				

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

本研究では、【研究 1】収容アンテナ数増加によるシステムの拡張，【研究 2】OFDM による大容量化の実現，【研究 3】ディープニューラルネットワーク (Deep Neural Network; DNN) 等の適用について計画した。そして、これらの評価には、コンピュータシミュレーションを使用した。

従来の SD-SM-MIMO では、受信信号を元に戻す検波手法に QR 分解と最大尤度検波 (Maximum Likelihood Detection; MLD) を組み合わせた QRM-MLD を用いることでビット誤り率 (Bit Error Rate; BER) 特性の改善を実現した。そして、本研究は研究 3 の内容に関連し、QRM-MLD に DNN を適用する手法を実現した。この手法では、DNN の訓練/入力データに受信信号、チャネル状態情報、MLD の尤度誤差を与え、教師/出力データに送信信号候補を与えることで、雑音等の MLD の精度を劣化させる要因を考慮した。結果、更なる BER 特性の改善を確認した。この成果は 2023 IEEE 12th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2023) (査読付き国際会議) [成果 2] と電子情報通信学会ソサイエティ大会 [成果 4] で発表した。研究成果の番号は後述する「5. 成果の発表」に記載した番号に対応する。一方で、申請時の計画では、DNN の一種である LSTM (Long Short Term Memory) を適用した演算量の削減も計画したが、研究期間内に成果を出すことができなかった。この課題については、引き続き検討を行う。

次に、研究 2 では、OFDM の適用前に申請時では計画していなかった SD-SM 伝送のコンスタレーションの配置に着目した研究を行った。一般に、コンスタレーションの配置は等間隔にすることで閾値判定の精度を向上できる。しかし、本研究は SD 伝送に 8QAM (Quadrature Amplitude Modulation) のコンスタレーションを長方形型、十字型、八角形型という等間隔でない形で配置し、さらに SM 伝送に位相回転を考慮した OOK (On-Off-Keying) のコンスタレーションを組み合わせる手法を提案した。この手法は、受信機において異なる送信アンテナから送られた信号のコンスタレーションの重複を回避でき、結果、BER 特性の改善を確認した。そして、この成果は電子情報通信学会の英論文誌 B に採録され、掲載された [成果 1]。その後、計画していた OFDM の適用について検討し、各サブキャリアに SD-SM 伝送の信号を割り当てることで実現した。この手法は、従来の SD-SM-MIMO と同様に有効性を示し、その成果は電子情報通信学会コミュニケーションシステム研究会で発表した [成果 3]。

最後に、研究 1 の収容アンテナ数増加によるシステムの拡張については、研究期間内の実施を見合わせた。理由として、アンテナ数を増加させる程、SM 伝送の効果が薄れる問題があったためである。この解決策として、今後は、アンテナ数の増加でなく変調レベルの増加 (多値化) による拡張を検討する。また、本研究の SM 伝送で使用したマッピングテーブルは任意の 1 本の送信アンテナのみに対応していたが、2 本以上に割り当てる手法も検討する。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

本研究は、申請時の計画書に記載した通り、機械学習を含むコンピュータシミュレーションを用いて評価を行う必要があった。そのため、設備費として、これらの処理が可能な性能（Core i7、メモリ 64GB、GPU 12GB）を有するワークステーションを購入した。また、コンピュータシミュレーションを実施するソフトウェアに MATLAB を使用している。MATLAB は保守で年 1 回のライセンス更新が必要なため、その更新費に使用した。

旅費については、計画書に記載の通り、研究成果を発表するため、学会に参加するための参加費と出張のための出張費として使用した。加えて、本研究に関連する内容についても複数の成果が得られたため、学会旅費と参加費については、計画書の金額よりも多く使用した。一方で、研究協力者との打ち合わせについては、学会やオンライン等で会う機会があったため、旅費の使用はなかった。

その他に、本研究の成果は学術論文誌に採録され、掲載されたため、計画書に記載の通り掲載費に使用した。また、予算計画の都合、計画書へは記載しなかったが、文献調査のため、IEEE Xplore に掲載されている論文と電子情報通信学会の信学技報を閲覧するための資料費（ダウンロード権）を購入した。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

「2. 研究成果及び考察」で上述した様に、本研究は、MIMO システムにおいて伝送方式に SD-SM 伝送、検波方式に DNN を適用することで、システム特性の向上を実現した。SD-SM 伝送は、各送信アンテナに割り当てるコンスタレーションを不均等にするすることで、受信機でのコンスタレーションの重複を回避し、さらに検波方式に DNN を用いることで BER 特性の改善を示した。また、OFDM を適用することで、大容量化の可能性も示した。そして、今後の発展性として、新たなマッピングテーブルを作成することで、SD-SM 伝送を用いた収容アンテナ数の増加にともなうシステムの拡張を期待できる。実用化に向けては、実機での評価も必要になるため、ソフトウェア無線や Raspberry Pi を用いた実験を検討したい。

その他に、本研究で取り扱った MIMO はアンテナを協調させる技術であるが、異なる端末をネットワークで協調させることで、MIMO と同様の効果を得ることができる。例えば、本研究以外にも実施した関連する内容として、各端末間のチャネルの状態を基に協調伝送の最適化を実現する研究や、端末の位置を推定する研究なども行った。これらの成果は、IEEE GCCE 2024(査読付き国際会議)や電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会、コミュニケーションシステム研究会などで発表を行った。それ故、本研究の手法は、端末を協調させる技術に応用することも可能であり、MIMO システム以外の技術の発展にも十分に寄与できる。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

査読付き学術論文誌

- [1] Y. Ida, K. Maruta, Y. Ohira, S. Kuroda, T. Matsumoto, “Combination of Phase Rotation SM-00K and Rectangular, Cross, Octagonal SD-8QAMs for MIMO Systems,” IEICE Trans. on Commun., vol. E108-B, no. 3, pp. 282-293, March 2025.

査読付き国際会議

- [2] R. Yoshimura, Y. Ida, K. Maruta, Y. Ohira, S. Kuroda, T. Matsumoto, “Deep Neural Networks Based on QRM-MLD for SD-SM-MIMO,” Proc. of IEEE GCCE2023, pp. 174-175, October 2023.

研究会・全国大会

- [3] 清水, 井田, 大平, 黒田, 松元, “SDM-GSM 伝送を適用した MIMO/OFDM の検討,” 信学技報, CS2025-9, pp. 31-36, 2025 年 4 月.
- [4] 吉村, 井田, 丸田, 大平, 黒田, 松元, “QRM-MLD に基づく DNN を適用した SD-SM-MIMO の検討,” 信学ソ大, B-8-5, p. 100, 2023 年 9 月.