

高速かつ安全な 5G のための圧縮センシングを用いた空間変調 Massive MIMO の研究

Research of Massive MIMO System with Spatial Modulation Using Compressive Sensing for Fast and Secure 5G



高山 茂 (Shigeru TAKAYAMA, Ph. D.)

立命館大学 理工学部 電気電子工学科

(Professor, Department of Electrical and Electronic Engineering,
College of Science and Engineering, Ritsumeikan University)

IEEE, 計測自動制御学会, 電子通信情報学会

受賞: IEEE Best Paper Award at 2017 IEEE Joint Academic Forum,

IMEKO Best Paper Award (2015 年),

Distinguished Scientist by Institute of Measurement Science,

Slovakia Academy of Science(2007 年) 他

研究専門分野: 計測工学, 移動場の動解析, 遠隔計測システム, ハイブリッド・センシング・ネットワークの基礎研究と応用展開

あらまし

近年の無線端末の増大や通信需要の増大により、次世代の移動体通信においては、高速かつ安全な通信システムの実現が求められている。そこで、本研究では超多数のアンテナを用いる Massive MIMO の性能向上のため、空間変調を組み合わせたシステムに関して研究を行う。具体的には、Massive MIMO で課題となるパイロット汚染に着目し、非直交であるパイロット系列の設計による干渉抑制、電力効率を考慮したビームフォーミング設計による通信時の干渉抑制手法の検討を行った。最後に空間変調の特性である送信信号のスパース性を利用し、圧縮センシングアルゴリズムを用いて、空間変調のための高性能かつ低演算量なアクティブアンテナ判定及び信号復号機的设计を行った。各提案手法については、シミュレーションにより理論解析を行い、空間変調 Massive MIMO システムの性能を示した

1. 研究の目的

通信の安全性を担保しつつ、通信品質を飛躍的に向

上させることを目的として、空間変調 Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) の研究を行う。特に、パイロット汚染の影響抑制手法を提案するとともに、空間変調を用いることによる空間変調信号のスパース性を利用し、圧縮センシングアルゴリズムを用いて、低演算量かつ正確な信号推定が可能なシステムの実現を目指す。

2. 研究の背景

近年、モノのインターネット (IoT: Internet of Things) の台頭や高品質なストリーミングサービスの普及などにより、移動体通信におけるトラフィック量が爆発的に増大している。そのため、第5世代移動体通信システム (5G: 5th Generation) では、大容量かつ高速なデータ伝送速度を満たすことが要求されている。現在、これらの要求条件を達成するため、多数のアンテナを用いた Massive MIMO 通信の産業利用の検討が活発に行われている。

Massive MIMO 通信は、近年のハードウェアコストの低減や、ミリ波帯の利用によるアンテナサイズの縮小により、無線機器端末にも複数のアンテナの具備が可能となったことから、注目されている通信方式である。Massive MIMO システムは、基地局に超多数のアンテナを具備し、ユーザ端末を空間的に分割し多重化することで、周波数利用効率を大きく向上させることが可能である。しかしながら、Massive MIMO の実現には、依然として多くの課題が残されている。Massive MIMO においては、超多数のアンテナを使用するため、通信効率やコヒーレント時間の観点から、アンテナごとの通信路状態情報 (CSI: Channel State Information) の推定は現実的ではない。そこで、通信路の双対性を利用し、各ユーザ端末が同時にパイロット信号*1を送信することで、基地局で各アンテナとユーザ間の CSI 推定が行われる。各ユーザ端末のパイロット信号を分離するため、パイロット系列には通常、直交系列が用いられる。しかしながら、直交系列長は系列数に比例することから有限である。そのため、セルごとに直交パイロット系列を再利用する必要性が生じ、パイロット汚染と呼ばれる現象が発生する。また、

高速かつ安全な 5G のための圧縮センシングを用いた空間変調 Massive MIMO の研究

Research of Massive MIMO System with Spatial Modulation Using Compressive Sensing for Fast and Secure 5G

パイロット汚染の影響は、通信に用いるアンテナ数とともに推定誤差の影響も大きくなる。そのため、アンテナ数とともに線形的に向上するとされてきた Massive MIMO の性能が、大幅に制限されることが理論的に明らかとなり、これは実験によって確かめられた[1]。そのため、パイロット汚染の影響抑制は、高速な通信を実現する上で必要不可欠である。

パイロット汚染による Massive MIMO 通信への影響が問題となる一方で、 M 本のアンテナを使用した MIMO システムのダイバーシティ利得が、 M 本中 N 本のアンテナを選択した場合と等価であることが理論的に示されている[2]。さらに、MIMO システムにおいて一部のアンテナを選択し、その組み合わせによって情報伝送を行う空間変調が考案されている[3]。すなわち、空間変調と Massive MIMO を組み合わせることにより、その性能を最大限発揮することが可能である。また、空間変調 Massive MIMO システムは、パイロット汚染の影響抑制だけではなく、物理的に安全性を担保できる通信システムを作ることにも可能であると言える[4]。実際、ミリ波通信などで見られる安定な通信路下では、送信側と受信側とが独立に通信路を持つことで、その CSI 自体が情報を守る鍵となり、他者がその情報を盗むことが極めて難しくなる。したがって、空間変調を用い、各ユーザにアンテナを割り当てることで、空間変調による情報伝達は本質的にセキュリティ性能の高いものとなる。

そこで、本研究では、空間変調を用いることで、通信の安全性を担保しつつ、パイロット汚染の影響を抑制し、Massive MIMO の性能を最大限発揮することを目的として、空間変調 Massive MIMO システムの理論的設計を行った。また、図 1 で示すような空間変調 Massive MIMO システムでは、送信側で選択されたアンテナを判別するため、正確な CSI 情報を取得することが必要不可欠である。また、使用されたアンテナの判定、信号復号を同時に行う必要があるため、超多数のアンテナを使用する空間変調 Massive MIMO システムでは、復号が極めて複雑になるといった課題がある。

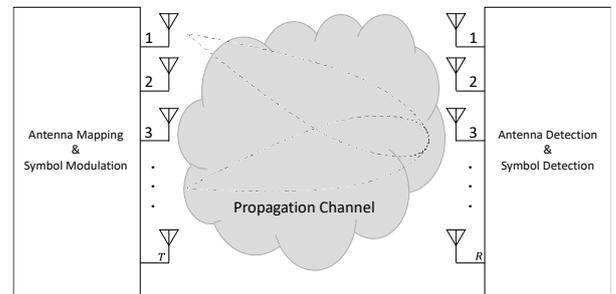


図 1 空間変調 Massive MIMO システム

3. 研究の方法

このような課題を解決し、空間変調 Massive MIMO システムを実現するため、本研究では、以下の提案を行った。

- CSI 推定時の干渉抑制を目的とした非直交パイロット系列の設計方式
- 信号伝送時における干渉抑制を目的とした、ビームフォーミング設計方式
- 電力効率及び符号化利得に寄与する空間変調のための時空間符号設計
- 大多数アンテナを使用する空間変調システムのための、圧縮センシングアルゴリズムを用いた復号方式

3.1 CSI 推定のための非直交パイロット設計方式

空間変調においては、CSI を利用したアクティブアンテナ判定を行うため、高い精度の CSI 推定が必要不可欠である。しかしながら、CSI 推定に使用可能な直交パイロット系列数は、コヒーレント時間によって制限される。そのため、無線端末やセル数の増大によってパイロット系列数が不足し、パイロット系列の再利用が必要となる。その結果、図 2 に示すような、パイロット汚染と呼ばれる干渉が発生し、CSI の推定精度が著しく劣化するため、空間変調 Massive MIMO システムの性能に限界が生じる。そこで、上り通信での通信路推定時におけるパイロット汚染の影響抑制を目的とした、非直交パイロット系列の設計を行った。

高速かつ安全な 5G のための圧縮センシングを用いた空間変調 Massive MIMO の研究

Research of Massive MIMO System with Spatial Modulation Using Compressive Sensing for Fast and Secure 5G

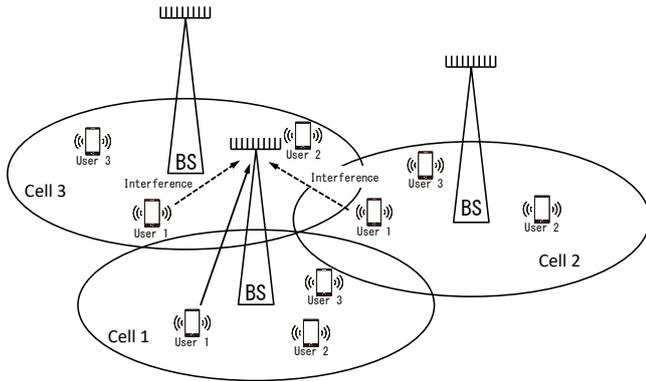


図 2 セル間干渉によるパイロット汚染

基地局全体でパイロット系列を共有していることを仮定し、ユーザの電力制約を満たしながら、推定 CSI の平均二乗誤差 (MSE : Mean Square Error) を最小化するような問題を考えると、以下の最適化問題が得られる。

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{X}_j, \forall j}{\text{minimize}} && \sum_{j=1}^L \text{MSE}_j \\ & \text{subject to} && \mathbf{X}_j^H \mathbf{X}_j \leq P_{\max} \mathbf{I}_K, \forall j \end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{X}_j はパイロット系列を表し、 L はセル数、 j はセルを示す添字、 P_{\max} は各送信機の最大電力である。この問題は、目的関数が非凸関数であることから、非線形計画問題となり、NP 困難である。

文献[5]では、このような問題に対し凸近似を行い、各基地局において個別に最適化を行う半正定値反復アルゴリズムが提案されている。しかしながら、上記問題の凸近似を行う過程で、テイラー展開による線形近似を用いているため、近似誤差がパイロット設計精度に致命的な影響を与える。そこで、本研究では、分数行列の二次下界を用いた近似による、新規凸化方式を提案し、上記のユーザ電力制約付き MSE 最小化問題をより高精度で近似することを可能とした。

近似式に基づき、集中制御型のネットワーク構成のための反復パイロット系列設計アルゴリズムを提案した。本提案手法については、モンテカルロ法を用いた計算機シミュレーションにより、その性能を評価した。このとき、4 個のセルが存在し、各セルの中心には 100 本のアンテナを具備した基地局が配置される。また、

各セルには単一のアンテナを具備した 20 台のユーザ端末が存在すると仮定した。

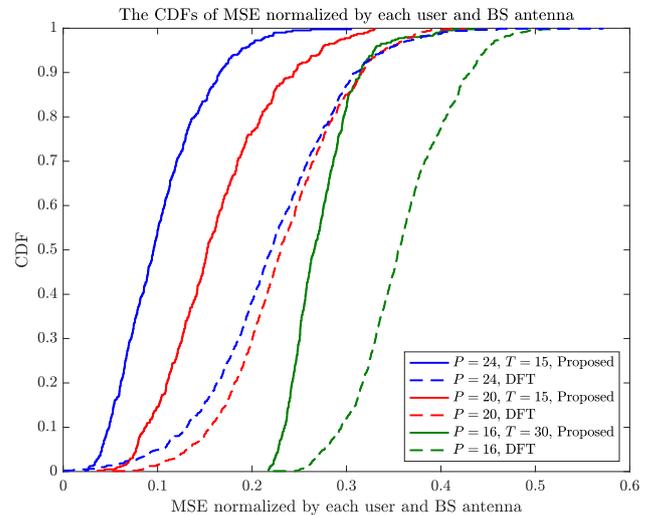


図 3 基地局アンテナ数で正規化された推定 CSI の MSE 比較 (DFT)

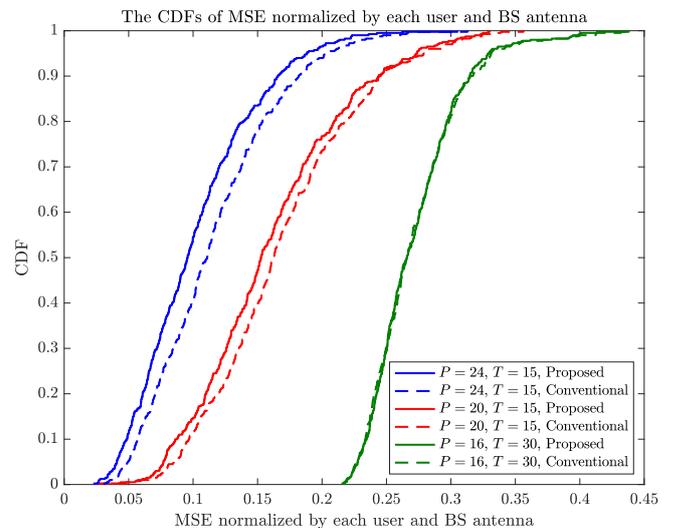


図 4 基地局アンテナ数で正規化された推定 CSI の MSE 比較 (従来手法)

図 3、4 は BS のアンテナ数で正規化した推定通信路状態の MSE の経験的累積分布関数 (CDF : Cumulative Distribution Function) である。それぞれ、提案アルゴリズムによるパイロット系列と直交系列である離散フーリエ変換 (DFT : Discrete Fourier Transform) 行列、従来手法[5]により設計されたパイロット系列との比較であり、 P はパイロット系列長を

高速かつ安全な 5G のための圧縮センシングを用いた空間変調 Massive MIMO の研究

Research of Massive MIMO System with Spatial Modulation Using Compressive Sensing for Fast and Secure 5G

示し、 T はアルゴリズムの反復回数である。図より、提案アルゴリズムによるパイロット系列を用いた CSI 推定精度は、DFT 行列及び従来手法に対し、優位性を示している。

また、提案方式は非直交パイロット系列を使用するため、系列長の制約に対してより柔軟なシステム構築が可能である。また、提案方式はユーザ・セル間における干渉の影響を低減するだけでなく、パイロット系列間の相互コヒーレンスも同時に低下させることができるため、CSI を辞書行列に用いた圧縮センシングアルゴリズムによる信号推定方式の性能向上が見込まれる。

3.2 ビームフォーミング設計

ユーザ間干渉及びパイロット汚染の影響抑制を目的として、基地局側ビームフォーミングを用いた干渉除去方式の提案を行った。これまで、和レートの最大化を目的とした送信ビームフォーミング設計が広く研究されてきたが、実際のシステムにおけるユーザ要求は、ユーザが利用しているアプリケーションが安定的に動くための通信レートを確保しつつ、送信電力量を最小化することであり、レート最大化を必要とする環境設定は真に現実的でない。そこで本節では、送信電力量を最小化しつつ、各ユーザの通信レート要求を満たす最適化問題に基づき、新規の送信ビームフォーミング設計について示す。このような最適化問題では、各ユーザのレート制約が非凸関数となるため、Massive MIMO のように送信信号ベクトルが多次元の場合、大域的最適解を得ることは NP 困難であるとされてきた。この問題を解決するため、分数計画法を用いた非凸関数の凸化方式を提案し、ユーザの通信レート要求を満たす電力最小化問題を解決した。空間変調では送信アンテナ数よりも少ない RF チェイン数での実装が可能であることから、従来の Massive MIMO システムと比較して低消費電力で高い周波数スペクトル効率を維持することが可能であり、この特性は空間変調の利点の中でも重要な位置にある。また、空間変調にビームフォーミングを盛り込んだ場合に、より高い利得を獲

得することが可能であることが示されている[6]。そのため、電力最小化問題を用いたビームフォーミング設計方式により、利得の改善を図るとともに送信電力の最適化が期待できる。

3.3 時空間符号設計及び圧縮センシングアルゴリズムを用いた復号方式

大容量かつ安定・安全な高効率通信を実現するため、高い電力効率や符号化利得を持つことで知られるゴールドン符号を基盤とし、空間変調のための時空間符号設計を試みた。また、空間変調の復号には、最尤 (ML: Maximum Likelihood) 推定復号器を用いることが、性能面において好ましい。しかしながら、計算複雑度が高く、アンテナ数の増減による計算量への影響が大きいことから、超多数のアンテナを使用する空間変調 Massive MIMO での使用は現実的ではない。そこで、送信側で使用されているアンテナの判定に対して、空間変調信号のスパース (疎) 性^{*2} を利用し、圧縮センシング^{*3} アルゴリズムを用いた空間変調信号の復号アルゴリズムを提案した。具体的には、高性能な圧縮センシングアルゴリズムである、学習可能型 ISTA 方式を採用し、復号性能の劣化を抑制しつつ、演算量の大幅な削減を実現した。

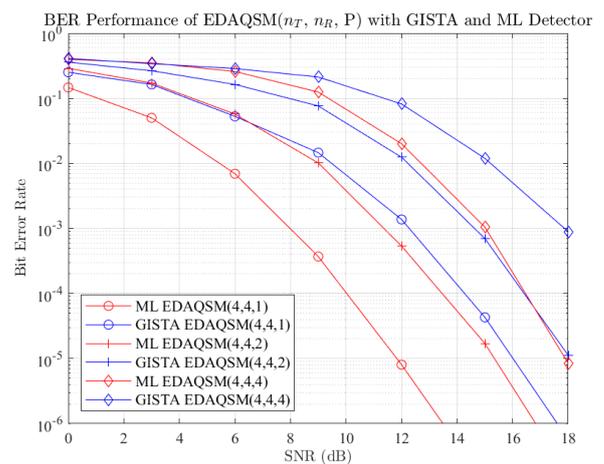


図5 空間変調における ISTA 方式及び ML による復号の BER 比較

本提案方式は、モンテカルロ法を用いた計算機シミュレーションによる評価結果を示す。

高速かつ安全な 5G のための圧縮センシングを用いた空間変調 Massive MIMO の研究

Research of Massive MIMO System with Spatial Modulation Using Compressive Sensing for Fast and Secure 5G

シミュレーションにより、理論解析を行った。図 5 に ML 推定復号器と提案方式のビット誤り率 (BER) を示す。ここで、 n_T は送信アンテナ数、 n_R は受信アンテナ数であり、 P は一度の伝送で送信されるシンボル数である。図 5 からわかるように、演算量を大幅に削減しつつ、ML 推定復号器からの性能劣化を抑制できていることがわかる。

以上の結果より、限られた通信路推定時間内であっても高精度な通信路推定が可能であり、その通信路情報と圧縮センシングを活用することにより、演算量を低減しつつ、十分な干渉抑制及び、アクティブアンテナ判定、信号推定が可能であることが示された。

4. 将来展望

本研究は、空間変調と Massive MIMO を組み合わせることにより、通信の安全性を担保しつつ、パイロット汚染の影響を抑制し、Massive MIMO の性能を最大限享受することを目的として行われた。本研究で提案された個別の手法は、Massive MIMO システムにおける課題であった CSI 推定及び通信時における干渉抑制、計算複雑度の低下に寄与するものである。今後は、理論解析にとどまらず、これらの手法を用いた空間変調 Massive MIMO システムの実現に発展させるとともに、高速かつ安全な通信への貢献が期待できる。

用語解説

*1 パイロット信号

通信路の推定を目的として、基地局及びユーザ端末で予め共有される既知信号。一般的に、他ユーザとの信号分離のため、直交系列が用いられる。

*2 スパース性

原信号の要素の多くがゼロであり、非ゼロの要素が僅かである性質。

*3 圧縮センシング

スパース性を持つ信号に対し、原信号の次数より、少数の観測結果より信号の再構成を行う仕組み。

- [1] H. Q. Ngo, T. L. Marzetta and E. G. Larsson: "Analysis of the Pilot Contamination Effect in Very Large Multicell Multiuser MIMO Systems for Physical Channel Models," IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 22-27 May, 2011.
- [2] M. Z. Win, R. K. Mallik and G. Chrisikos: "Higher Order Statistics of Antenna Subset Diversity," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.2, no.5, 2003.
- [3] M. D. Renzo, Harald Haas, A. Ghayeb, S. Sugiura and L. Hanzo: "Spatial Modulation for Generalized MIMO: Challenges, Opportunities, and Implementation," *Proceedings on the IEEE*, vol.102, no.1, 2014.
- [4] S. Severi, G. Abreu, G. Pasolini and D. Dardari: "A Secret Key Exchange Scheme for Near Field Communication," IEEE Wireless Communications and Networking Conference, (WCNC 2014), April 6-9, 2014.
- [5] H. Al-Salihi, T. Van Chien, T. A. Le, and M. R. Nakhai, "A successive optimization approach to pilot design for multi-cell massive MIMO systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 5, pp. 1086-1089, May 2018.
- [6] M. Yüzgeçcioğlu and E. Jorswieck, "Hybrid Beamforming with Spatial Modulation in Multi-user Massive MIMO mmWave Networks," 8-13 Oct. 2017.

この研究は、平成 29 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 30 ~ 令和 2 年度に実施されたものです。

参考文献