

平成 30 年 5 月 9 日現在

機関番号：13904
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2015～2017
課題番号：15K13987
研究課題名(和文)大規模MIMOのためのブラインド通信路推定法の構築

研究課題名(英文)Blind Channel Estimation for Massive MIMO

研究代表者

竹内 啓悟 (Takeuchi, Keigo)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30549697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：大規模MIMOとは、ユーザ数に比べて多数のアンテナを基地局に備えることで高速通信を実現するシステムである。大規模MIMOの性能を劣化させる要因として、ユーザから基地局に情報を伝送する上り回線における通信路推定で、パイロット汚染問題が生じることが指摘されていた。この問題を解決するために、圧縮センシングの分野で提案された近似的メッセージ伝播法に基づいて、ブラインド反復通信路推定法を構築した。初期化方法を工夫することで、システムの負荷が高い場合にも同反復法の収束特性を改善することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Massive multiple-input multiple-output (MIMO) is a system to realize high-speed data transmission by using more antennas at the base station (BS) than the number of users. As a main factor to degrade the performance of massive MIMO, pilot contamination was pointed out in uplink channel estimation. To solve this issue, we have constructed an iterative method of blind channel estimation based on approximate message passing proposed in the field of compressed sensing. Use of an appropriate initialization can improve the convergence property of the proposed method even in highly loaded systems.

研究分野：情報通信工学

キーワード：情報通信工学 情報理論 大規模MIMO 通信路推定 圧縮センシング

1. 研究開始当初の背景

大規模 MIMO とは、ユーザ数に比べて多数のアンテナを基地局に備えることで高速通信を実現するシステムで、2020年代の実現を目指す第五世代移動通信(5G)の有力候補となっている。大規模 MIMO の性能を劣化させる主要因として、ユーザから基地局に情報を伝送する上り回線における通信路推定で、パイロット汚染が生じることが指摘されていた。パイロット汚染問題とは、通信路推定用にユーザが送る直交パイロット系列の総数に限りがあるため、異なる基地局に属する二人のユーザに同一の系列が割り当てられてしまうことで、基地局で同ユーザに関する通信路を分離・推定することが困難になる問題である。

大規模 MIMO では上り回線での通信路推定結果を逆方向の下り回線での情報伝送に利用することを想定しているため、パイロット汚染は上り回線だけでなく、下り回線での情報伝送にも支障をきたす。基地局間協調により解決を図る付け焼き刃的な解決策は、制御回線を圧迫するだけでなく、災害時やオリンピック等の非常時に見込まれるユーザ数の急増への対応が困難なため、パイロット汚染の根本的な解決策が求められていた。

2. 研究の目的

パイロット汚染の解決策は、究極的にはパイロット信号を送らずに基地局で通信路をブラインド推定することである。符号長の長い誤り訂正符号の復号結果を利用できる場合、ブラインド通信路推定法はすでに確立されていた。しかし、大規模 MIMO では通信路推定結果を下り回線での情報伝送に利用するため、復号結果を通信路推定に利用する時間的余裕はない。そこで、復号結果を利用しない場合の通信路推定と圧縮センシングとの類似点に着目し、以下の通りブラインド通信路推定法を確立することを目的とした。

- (1) 大規模 MIMO では、ユーザ数よりも基地局での受信アンテナ数の方が多いため低負荷領域が通常想定される。この領域において、圧縮センシングの方法論に基づいて、ブラインド通信路推定法及びそれに適した変調方式を構築する。
- (2) アンテナ数よりもユーザ数の方が多いため高負荷領域でも動作するように、ブラインド通信路推定法及びそれに適した変調方式を構築する。
- (3) 低負荷領域と高負荷領域の両方で、提案手法の性能は既存手法のそれに勝り、最良なブラインド通信路推定法の性能に基づく理論限界にも接近することを明らかにする。

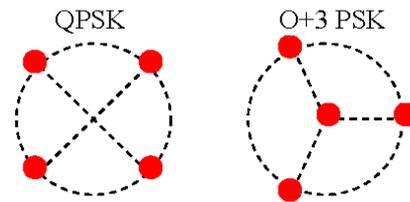
3. 研究の方法

- (1) 通信路推定と圧縮センシングとの類似性に着目し、ブラインド通信路推定法を構築した。圧縮センシングとは、原信号

のスパース性を利用して、信号の次元(長さ)よりも小さい次元に圧縮された観測信号から、原信号を一意にかつ効率的に推定する方法論である。圧縮センシングでの観測信号、原信号、観測行列は、それぞれ通信路推定での受信信号、全ユーザの送信信号、ユーザと基地局との間の通信路特性を表す通信路行列に対応する。スパース性の本質は離散性にあるため、デジタル信号を使用する通信の問題に圧縮センシングの方法論を応用することができる。

通信路行列が未知の場合に、圧縮センシングの分野で提案された近似的メッセージ伝播法(AMP)に基づくブラインド反復通信路推定法を導出した。AMPとは、システムが十分に大きいときに誤差が生じないように、確率伝播法(BP)を近似して得られるメッセージ伝播法である。

- (2) 過負荷の場合に対応できるように、送信信号をスパース化することを検討した。具体的には、ユーザ間干渉を軽減する目的で、一定の頻度で信号を送信しないというスパース変調方式を考察した。この方式は通常の変調とスパース変調の例を示す。図：信号点配置の例(左：通常の変調、



右：スパース変調)

信号を送信しないタイミングを送受信側で共有することは受信方式の簡素化につながるものの、伝送レートが低下してしまうという欠点がある。伝送レートの低下を軽減する目的で、どのタイミングで信号を送信しないかにも情報を載せるインデックス変調を検討した。ブラインド通信路推定とインデックス変調とを同時に考察することで問題が過度に複雑化するのを防ぐために、本質的に同一の問題である空間変調の伝送レートを情報理論的に解析することとした。

- (3) AMPに基づくブラインド反復通信路推定法の性能を理論的に評価することを最終目標として、第一段階として通信路行列か送信行列のどちらか一方が既知の場合を検討した。通信路推定の問題を含むより広い枠組みで問題を取り扱えるように、状態発展法に基づく既存の手法よりも弱い仮定の下で理論解析を実施した。状態発展法とは、ユーザ数と基地局のアンテナ数との比を一定に保って両者を無限大とした大システム極限を仮定した上で、反復推定の収束特性を理

論的に解析するための手法である。

4. 研究成果

- (1) AMP に基づくブラインド反復通信路推定法は、AMP の元となっている BP に基づく自然な初期化方法では良好な収束特性を示さないことが判明した。収束特性が悪化する原因として、通信路推定で得られた結果を利用してデータ推定の精度を改善する処理に注目した。推定されたデータはパイロット信号として通信路推定精度の改善に利用されるため、この処理はブラインド通信路推定の要となる処理である。

通信路推定において反復を行ったことによるデータ推定への悪影響を除去する目的で、AMP に基づくデータ推定では、オンサーガ項と呼ばれる推定値の補正項が備わっている。しかしながら、初回のデータ推定に限り、このオンサーガ項がデータ推定の精度に悪影響を与えていることを数値実験により発見した。オンサーガ項の悪影響が及ばないように、初回のデータ推定の初期化を工夫した結果、AMP に基づくブラインド反復通信路推定法は良好な収束特性を示すことを数値実験により確認した。研究開始当初の予想とは異なり、この結果はシステムの負荷の高低にあまり依存しなかった。そのため、当初は負荷の領域に応じて研究目的を設定していたが、負荷の領域をあまり意識せずに研究を進めることとなった。

観測行列が未知の場合に相当する本研究の意義は、圧縮センシングでも解法が確立されていない最先端の問題設定となっている点にある。圧縮センシングでは原信号に手を加える余地はないのに対して、通信路推定では自由に信号を加工できる。信号の加工可能性を推定の手がかりにしてブラインド反復通信路推定法を確立したという点で、本研究は未知の観測行列に対する圧縮センシングの解法を確立する糸口を与えたという意義がある。

- (2) 通信路行列が既知の場合に、空間変調 MIMO の情報理論的なエネルギー効率の評価を行った結果、空間変調のエネルギー効率は 2 次最適であることを明らかにした。2 次最適とは、低信号対雑音比 (SNR) 領域で空間変調の達成可能レートを SNR に関して 2 次まで展開した結果が、通信路容量の 2 次までの展開結果と一致していることを意味している。言い換えれば、空間変調は伝送レートが低い場合には情報理論的に最適な変調方式であると結論づけられる。

通信路行列が未知の場合や一般化空間変調の場合に、上記の結果を拡張することにも成功した。この成果をブラインド

通信路推定の問題と結びつけると、ユーザが低レートで伝送する限り、一定の頻度でユーザが信号を伝送しないというスパース変調方式を採用しても、情報理論的な意味でのデータ推定の性能劣化はないと言える。

ただし、AMP に基づくブラインド反復通信路推定の数値実験を行った結果、確かにデータ推定の精度に問題は生じないものの、通信路推定の精度は悪化してしまうことがわかった。これは信号を送らないことによって最終的に通信路推定に利用できる既知の信号の量が減ってしまうためである。

本研究で想定したように、逆方向の情報伝送に通信路推定結果を利用する場合には、スパース変調を使用するのは得策ではない。ただし、スパース変調は過負荷な領域で威力を発揮するため、多数のユーザが低い伝送レートで情報伝送を行うアプリケーションにスパース変調は適している。このようなアプリケーションの代表例として、あらゆるものがインターネットにつながる IoT があげられる。

- (3) 通信路行列が既知であることとユニタリ不変であることを仮定して、メッセージ伝播法に基づく反復データ推定法の厳密な理論解析を行った。当該理論を確立する難易度は、統計物理学における 1977 年以來の未解決問題の難易度に匹敵する。

この未解決問題は、2016 年のノーベル物理学賞を受賞した Thouless が天才的な物理的直感を駆使して提案した方程式が、彼の期待通りの特性を持っていることを示す問題である。前者の方程式が反復推定法に相当し、後者の特性解析問題が反復法の性能の理論解析手法を確立することに相当する。本研究では、2014 年に解決の糸口を与えた理論物理学者の Bolthausen の手法を応用して、反復法の厳密な理論解析に世界で初めて成功するという画期的な成果を得た。

上記の成果を AMP に基づくブラインド反復通信路推定法の性能解析に拡張することは、さらに難易度が高い。そこで、理論的に厳密な結果を証明する代わりに、上記の理論研究を通じて得られた経験に基づいて、状態発展法による解析結果の予想を提示することにとどめた。

ベイズ最適な推定法の性能を統計力学の手法を用いて解析した結果と上記の予想との比較から、反復推定法の収束点が唯一である限り、AMP に基づくブラインド反復通信路推定法はベイズ最適な性能を達成できることが示唆される。したがって、状態発展法の解析結果の予想が正しい限り、AMP に基づくブラインド

反復通信路推定法の性能は既存推定法の性能に劣ることはない結論づけられる。

AMP に基づくブラインド反復通信路推定法の数値実験結果と解析結果の予想とを定量的に比較することによって予想の信頼性に確証を得た上で、厳密な理論解析に挑戦することは、非常に難易度の高い今後の研究課題である。

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7件)

K. Takeuchi and C.-K. Wen, "Rigorous Dynamics of Expectation-Propagation Signal Detection via the Conjugate Gradient Method," in *Proc. 18th IEEE Int. Workshop Sig. Process. Advances Wirel. Commun.*, pp. 88-92, Jul. 2017. DOI: 10.1109/SPAWC.2017.8227654 (査読有)

S. Zhang, C.-K. Wen, K. Takeuchi, and S. Jin, "Orthogonal Approximate Message Passing for GFDM Detection," in *Proc. 18th IEEE Int. Workshop Sig. Process. Advances Wirel. Commun.*, pp. 695-699, Jul. 2017. DOI: 10.1109/SPAWC.2017.8227773 (査読有)

K. Takeuchi, "Rigorous Dynamics of Expectation-Propagation-Based Signal Recovery from Unitarily Invariant Measurements," in *Proc. 2017 IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, pp. 501-505, Jun. 2017. DOI: 10.1109/ISIT.2017.8006578 (査読有)

K. Takeuchi, "Asymptotic Optimality of QPSK Faster-than-Nyquist Signaling in Massive MIMO Systems," *IEICE Trans. Fundamentals.*, vol. E99-A, no. 12, pp. 2192-2201, Dec. 2016. DOI: 10.1587/transfun.E99.A.2192 (査読有)

K. Takeuchi, "Second-Order Optimality of Generalized Spatial Modulation for MIMO Channels with No CSI," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 4, no. 6, pp. 613-616, Dec. 2015. DOI: 10.1109/LWC.2015.2475742 (査読有)

K. Takeuchi, "Spatial Modulation Achieves Information-Theoretically Optimal Energy Efficiency," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 7, pp. 1133-1136, Jul. 2015. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2433271 (査読有)

K. Takeuchi, T. Tanaka, and T. Kawabata, "Performance Improvement of Iterative Multiuser Detection for Large Sparsely Spread CDMA Systems by

Spatial Coupling," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 4, pp. 1768-1794, Apr. 2015. DOI: 10.1109/TIT.2015.2400445 (査読有)

[学会発表](計7件)

K. Takeuchi and C.-K. Wen, "Rigorous Dynamics of Expectation-Propagation Signal Detection via the Conjugate Gradient Method," *18th IEEE Int. Workshop Sig. Process. Advances Wirel. Commun.*, Jul. 2017.

S. Zhang, C.-K. Wen, K. Takeuchi, and S. Jin, "Orthogonal Approximate Message Passing for GFDM Detection," *18th IEEE Int. Workshop Sig. Process. Advances Wirel. Commun.*, Jul. 2017.

K. Takeuchi, "Rigorous Dynamics of Expectation-Propagation-Based Signal Recovery from Unitarily Invariant Measurements," *2017 IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, Jun. 2017.

竹内啓悟, 「メッセージ伝播復調法の新展開:期待値伝播法」, 電子情報通信学会情報理論/信号処理/無線通信システム研究会, 2018年1月.

竹内啓悟, C.-K. Wen, 「近似的期待値伝播法による超ナイキストレート信号の反復等化」, 第39回情報理論とその応用シンポジウム, 2016年12月.

竹内啓悟, 「大規模MIMOに対する超ナイキストレートQPSK信号伝送の漸近最適性」, 第38回情報理論とその応用シンポジウム, 2015年11月.

小林裕和, 竹内啓悟, 「AMPアルゴリズムに基づく大規模MIMOのデータと通信路の反復推定」, 第38回情報理論とその応用シンポジウム, 2015年11月.

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹内 啓悟 (TAKEUCHI, Keigo)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30549697