



Title	ベイズ双線形推論に基づくMIMO信号伝送方式に関する研究
Author(s)	伊藤, 賢太
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101666
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (伊藤 賢太)	
論文題名	ベイズ双線形推論に基づく MIMO信号伝送方式に関する研究
論文内容の要旨	
<p>本論文は、筆者が大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻在学中に行った、ベイズ双線形推論に基づくMIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 信号伝送方式に関する研究成果をまとめたものであり、以下の6章で構成される。</p> <p>第1章は序論であり、次世代無線通信システムにおいて超大容量通信・超多数端末接続可能な無線通信システムを実現する上での課題を示した。無線通信システムの発展に伴い急増する無線トラフィックを収容するためには、時間・周波数・空間などのあらゆる次元で信号を多重化する必要があるが、信号多重数の増加に伴い、通信路情報取得のためのパイロットオーバーヘッドが増加し伝送効率の低下が避けられない。本研究では、限られたパイロットオーバーヘッドで高精度な通信路推定およびデータ検出を達成するための方策として、通信路とデータの繰り返し同時推定 (JCDE: Joint Channel and Data Estimation) を検討した。これを実現するための理論として、統計物理分野で検討されてきたベイズ統計に基づく双線形推論 (BI: Bilinear Inference) について説明し、本研究で提案する双線形推論フレームワークの確立とその応用について述べ、本研究の位置づけを明確にした。</p> <p>第2章では、ベイズ統計に基づいた推論アルゴリズムの動作原理についての基礎的事項について述べ、既存のアルゴリズムの関係性について整理することで、提案する双線形推論の核となるアイデアを説明した。初めに、既存のBIアルゴリズムであるBiGAMP (Bilinear Generalized Approximate Message Passing) の導出過程を明らかにすることを目的に、より単純な線形推論 (LI: Linear Inference) 問題について説明し、BiGAMPの導出元でもあるGAMP (Sum Product Algorithm) から導出した。BiGAMPの欠点を解決するための手がかりとして、GaBP (Gaussian Belief Propagation) と呼ばれるアルゴリズムが、SPAからGAMPへの導出の中間段階として見出されることに着目し、その動作原理を GAMPと比較することで、アルゴリズム構造の違いを明らかにした。最後に、本論文で検討するBI問題が、LI問題と本質的に異なる困難性を有していることを明らかにした上で、GaBPをBI問題へ拡張することが本論文の理論的基礎となることを説明した。</p> <p>第3章では、空間多重伝送技術である MIMO伝送を用いた上り回線大規模マルチユーザMIMO (MU-MIMO: Multi-User MIMO) における信号検出問題を扱った。大規模MU-MIMOにおける JCDEが第2章で述べたBI問題として定式化できることに着目し、このJCDEを実現するための双線形推論アルゴリズムを検討した。第2章で示したGAMPとGaBPの関係性に着目し、GaBPをBIへ拡張したBiGaBP (Bilinear GaBP) を提案した。最後に、計算機シミュレーションにより、提案手法が最低限のパイロットオーバーヘッドで高精度なMU-MIMO信号検出が実現できることを示した。</p> <p>第4章では、高速移動体通信での適用が期待されている周波数・時間多重伝送技術として、OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) 伝送に着目し、その復調問題を扱った。OTFSにおけるJCDEが、BI問題の変形の一つであるパラメトリック双線形 (PBI: Parametric BI) 問題として定式化できることを明らかにし、このJCDEを実現するための双線形推論アルゴリズムを検討した。GaBPをPBIに拡張したPBiGaBP (Parametric BiGaBP) を設計し、これに基づくJCDEアルゴリズムを提案した。最後に、提案手法の有効性を計算機シミュレーションにより確認した。</p> <p>第5章では、第3章で扱ったシナリオのより現実的な問題設定として、ハードウェア不完全性が存在するMU-MIMO-OFDM (MU-MIMO Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) の上り回線における信号検出問題を扱った。第3章と第4章では、それぞれBIとPBIに基づいてアルゴリズムを設計したが、実際のシステムモデルが第2章で与えた双線形推論モデルにそのまま定式化できない場合も多い。第3章と第4章の知見を統合し、観測に対して非線形となる搬送波周波数オフセット (CFO: Carrier Frequency Offset) の推定手法を確立した上で、MU-MIMO-OFDMシステムにおけるJCCE (Joint Channel and CFO Estimation) アルゴリズムを提案し、推定精度と演算量の観点から有効性を確認した。</p> <p>第6章は、本論文の結論であり、本研究で得られた結果の総括を行った。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (伊 藤 賢 太)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	落合 秀樹
	副 査	教授	滝根 哲哉
	副 査	教授	丸田 章博
	副 査	教授	田中 雄一
	副 査	教授	宮地 充子
	副 査	教授	井上 恭
	副 査	教授	駒谷 和範
	副 査	准教授	高橋 拓海

論文審査の結果の要旨

本論文は、大容量無線通信システムの空間多重技術である MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 信号伝送方式を応用先とした、ベイズ双線形推論に基づく推定アルゴリズムに関する一連の研究成果をまとめたものである。

一般に無線通信システムの MIMO 信号検出においては、高精度な通信路推定が必須であり、そのためには膨大なパイロット信号を送信する必要があるが、これはシステムの周波数効率を著しく低下させる。そこで本論文では、通信路推定精度を維持しつつ、パイロットオーバーヘッドを大幅に削減する方策として、通信路とデータの繰り返し同時推定 (JCDE: Joint Channel and Data Estimation) 手法に着目をし、その必要性、および従来の JCDE 手法における問題点を論じている。続いて JCDE 問題の根底をなす線形推論 (LI: Linear Inference) 問題と双線形推論 (BI: Bilinear Inference) 問題、およびその拡張であるパラメトリック双線形推論 (PBI: Parametric Bilinear Inference) 問題を定式化している。その上で、これらを解くための従来のベイズ統計に基づく推論アルゴリズムである和積アルゴリズム (SPA: Sum-Product Algorithm) および一般化近似メッセージパッシング (GAMP: Generalized Approximate Message Passing) の基本原理を解説するとともに、それらの背後にある基礎理論を整理することで、相互のアルゴリズムの関係性を明確化している。

そして、上記を踏まえ、本論文では以下の 3 つの主要な貢献が示されている。

- 1) マルチユーザ MIMO システムにおける非直交パイロット信号を用いた JCDE 問題に対し、従来のガウス近似に基づく信念伝搬法 (GaBP : Gaussian Belief Propagation) を BI 問題へ適用した BiGaBP を提案している。これに基づき導出された JCDE アルゴリズムが、演算量の増加を抑制しつつ高い推定精度を達成できることを計算機シミュレーションにより明らかにしている。さらに BiGaBP を大システム極限に基づいて近似することにより、GAMP を BI 問題へ拡張した従来アルゴリズムである BiGAMP が導出できることを示すことで、提案アルゴリズムの理論的な位置付けを明確にしている。
- 2) 高速移動体通信で観測される時間・周波数の二重選択性フェージング通信路において OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) 伝送を行う際の JCDE 問題に対し、GaBP を PBI 問題へ拡張した PBiGaBP を提案するとともに、これに基づいた JCDE アルゴリズムを導出している。提案手法が、推定に要する演算量を大幅に増加させることなく高い推定精度を達成できることを計算機シミュレーションにより明らかにしている。また、提案 PBiGaBP を大システム極限に基づいて近似することにより、従来の PBiGAMP アルゴリズムが導出できることを示し、提案アルゴリズムの位置付けを明確にしている。
- 3) 現在、広く実用化されているマルチユーザ MIMO-OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) システムにおけるハードウェア不完全性問題に着目し、その代表的な例として搬送波周波数オフセット (CFO: Carrier Frequency Offset) 存在下において通信路と CFO を同時推定する JCCE (Joint Channel and CFO Estimation) 手法を提案している。CFO に起因した位相変動の統計的性質を混合ガウス (GM: Gaussian-Mixture) 分布により表現す

ることで、高精度な推定が可能であることを示すとともに、推定精度と演算量の観点から提案手法の有効性を計算機シミュレーションにより明らかにしている。

以上のように、本論文は、従来の線形推論問題および双線形推論問題に対する、ベイズ統計に基づく従来のアルゴリズムを理論的枠組みから包括的に俯瞰している点で、極めて高い学術的意義が認められる。また、本論文の各章で理論導出された提案推論アルゴリズムが、低オーバーヘッドながら演算量を大幅に増加させることなく高い推定精度を達成できることから、今後の無線通信システムのさらなる大容量化・多数端末化の実現に貢献するものと期待できる。よって本論文を博士論文として価値あるものと認める。