

# 大規模同時接続を実現する無線信号処理の設計

工学研究科 電気電子情報通信工学専攻

准教授 高橋 拓海

Researchmap [https://researchmap.jp/takumi\\_takahashi](https://researchmap.jp/takumi_takahashi)



## 研究の概要

超多数の無線端末との同時接続を実現するマルチユーザ MIMO-OFDM [図1] の実現には、端末間の搬送波周波数オフセット (CFO) が大きな課題となる。CFO に起因するサブキャリア間干渉により通信路推定精度が低下し、高信頼な通信の確保が困難になるためである。本研究では、この問題に対して、通信路・CFO・データをまとめて推定するベイズ推論型受信機を提案する。時間領域通信路のスパース性(多く成分がゼロ付近に集中)と、CFO による位相回転の統計的特徴を事前情報としてアルゴリズムに組み込み、ベイジアンメッセージパッシングにより、短いパイロットでも安定して高精度な推定を実現する手法を考案した。

## 研究の背景と結果

Society 5.0 や 6G が想定する将来社会では、膨大な数の端末から実世界の情報をクラウド側に集約し、高信頼・低遅延で処理することが求められる [図2]。その中核となる上り回線技術として、周波数・空間次元で情報を多重化するマルチユーザ MIMO-OFDM 技術が注目されている。しかし、現実の端末はそれぞれ独立した発振器を持つため、搬送波周波数にわずかなずれ (CFO) が生じ、これが OFDM のサブキャリア間の直交性を崩してしまふ。その結果、通信路推定精度が低下し、通信品質の劣化を招くことが大きな課題となる。従来は、パイロット信号に基づいて CFO を推定し、その後通信路推定・データ検出を行う二段階方式が主流であったが、多数ユーザ・周波数選択性チャネル・短いパイロットといった条件下では十分に動作させることが難しく、安定した通信を実現できる受信機の開発が急務となっていた。

本研究では、マルチユーザ MIMO-OFDM の受信信号を「時間領域通信路」と「CFO による位相回転」という二種類の未知量を含む双線形モデルとして定式化し、これに基づいてベイズ推論型受信機を設計した。時間領域通信路については、遅延領域におけるスパース構造をベルヌーイガウスモデルで表現し、CFO による位相回転については、標準化で規定される CFO 許容範囲を組み込んだ混合ガウスモデルで記述することで、短いパイロットでも実行可能な効率的な推定を実現している。さらに、検出されたデータを用いて通信路と CFO を再推定する枠組みを導入し、推定精度を段階的に向上させる手法も提案した。図3は受信信号品質に対するビット誤り率 (BER) を示しており、提案法が従来手法を大幅に上回るだけでなく、通信路と CFO が理想的に既知である「Genie-aided」受信機に近い性能を達成していることが確認されている。

## 研究の意義と将来展望

従来の受信機は CFO 推定・通信路推定・データ検出を段階的に行うため、多ユーザかつ短いパイロットの条件下では誤差伝搬により性能が大幅に劣化する。本研究は、これらをベイズ推論フレームワークに統合し、限られたパイロットでも高い推定精度と安定した通信品質を実現できる受信機構造を示した点に意義がある。仮想デジタル空間と現実世界が高度に接続されるサイバーフィジカル融合社会では、超多数の IoT 端末から膨大な情報を無線回線を介して集約する必要があり、その実現を阻む主要課題の一つが CFO の補償である。提案手法は、大規模同時接続を現実的なパイロット量で成立させるための重要な技術であり、将来のセルフリー型・協調分散型ネットワークにおいて不可

欠となる機器間同期・機器同定を支える推定基盤としての応用も期待される。

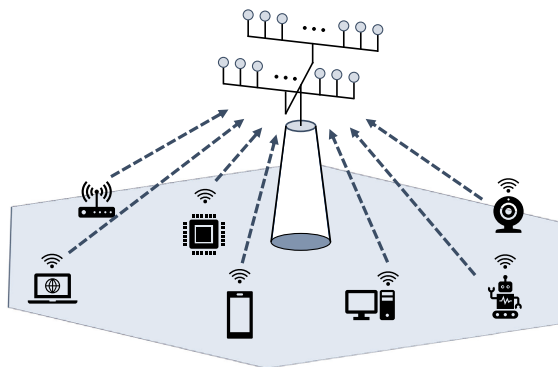


図1: MIMO-OFDMシステムの模式図

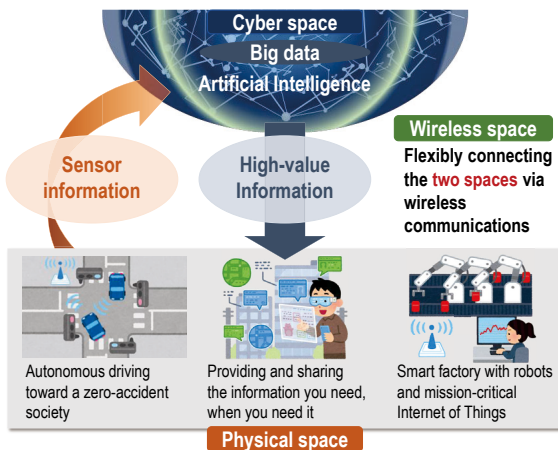


図2: サイバーフィジカル融合システム

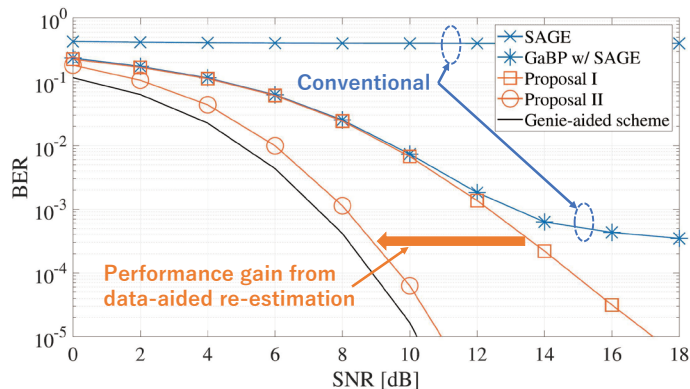


図3: 計算機シミュレーションによる性能比較

特許	
論文	Takahashi, Takumi; limori, Hiroki; Ishibashi, Koji et al. Bayesian bilinear inference for joint channel tracking and data detection in millimeter-wave MIMO systems. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2024, 23(9), 11136-11153. doi: 10.1109/TWC.2024.3379122 Ito, Kenta; Takahashi, Takumi; Ishibashi, Koji et al. Joint channel, CFO, and data estimation via Bayesian inference for multi-user MIMO-OFDM systems. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2025, 24(3), 1898-1915. doi: 10.1109/TWC.2024.3514210 Kobayashi, Fuga; Takahashi, Takumi; Ibi, Shinsuke et al. EXIT chart analysis of expectation propagation-based iterative detection and decoding. IEEE Open Journal of the Communications Society. 2025, 6, 5249-5268. doi: 10.1109/OJCOMS.2025.3578473
参考URL	<a href="http://www.2a.comm.eng.osaka-u.ac.jp/ochiaialab/">http://www.2a.comm.eng.osaka-u.ac.jp/ochiaialab/</a>
キーワード	無線通信、信号処理、ベイズ統計学、情報理論