

無線通信のための統計的信号処理の設計

工学研究科 電気電子情報通信工学専攻

助教 高橋 拓海

Researchmap https://researchmap.jp/takumi_takahashi



研究の概要

多数の端末から送信された情報を同一の時間・周波数リソース上で空間的に多重して通信を行う大規模マルチユーザ MIMO (Multi-Input Multi-Output) 技術 (図1) は、増大し続ける無線端末を収容するための物理層中核技術である。しかしその実現には、多重された信号を基地局受信機側で分離 (検出) する必要があり、そのための信号検出アルゴリズムの高度化が重要となる。本研究では、端末の空間的配置に応じた通信路長期統計に基づくビームフォーミング設計と、ビームフォーミング後のビーム領域で動作する確率伝搬法に基づく信号検出アルゴリズムを設計し、既存の高精度検出手法に漸近する性能をその数パーセントの処理量で達成できることを示した。

研究の背景と結果

Society 5.0が提唱する未来社会像において、無線通信は実世界と仮想世界を高度に接続する情報基盤に位置付けられる。特に実世界情報を無数の端末から集約する上り回線の高度化が肝要であり、超多数の無線端末を同時収容しなければならない。このとき、従来のような各端末への排他的な無線リソース割り当てには限界があり、次世代無線通信システム (6G) では、干渉を許容した非直交多元接続が重要となる。その成功の鍵を握るのは、非直交干渉を効率的に取り除き、システム性能を最大限引き出すための受信機設計である。

本研究では、超多素子アンテナを具備した受信機が、多数端末と同時に空間多重接続を確立する大規模マルチユーザ MIMO に着目をした。その実現には、何よりも受信された多次元信号を低処理量で一括検出するための高度な大規模信号処理が求められる。その有力な候補として、物理・(熱) 統計力学を背景に開発された確率伝搬法が注目を集めているが、これらの手法が良好な特性を達成できるのは、観測の無相関性や無限に迫るシステムサイズといった理想条件を満たす場合に限定される。このような理想条件を現実の無線通信システムで作り上げることは困難であり、実用化に際しての大きな障害となっていた。

本研究の貢献は、この精巧な理学的アルゴリズムを大規模 MIMO 検出という工学的問題に落とし込み、非理想条件下でも実用に耐えうるアルゴリズム構造を提案し、6G以降の物理層技術として活用できる道を拓いたことにある。具体的には、デジタルビームフォーミングにより次元削減されたビーム領域通信路の構造に応じて階層型の信念伝搬法を適切に設計し、フェージング空間相関下における大規模 MIMO 検出を低処理量で実現することに成功した。計算機シミュレーションによる性能評価では、既存の高精度検出手法に漸近する性能を数パーセントの処理量で達成できることを示した (図3)。

研究の意義と将来展望

サイバー空間 (仮想世界) とフィジカル空間 (実世界) を接続し、集約されたビッグデータに基づく効率化・最適配分・未来予測によって、貧困や飢餓などのあらゆる社会問題を解決するための情報基盤を提供する未来システムとして、サイバーフィジカル融合がある (図2)。このとき、二つの空間を高度に接続する担い手となるのが、実世界に存在する超多数のセンサ・無線端末を収容可能な無線通信技術であり、本研究はその基盤を創造するものである。提案した枠組みはベイズ推論を基礎とし、AI (Artificial Intelligence) 関連技術で得られた事前知識の活用や、学習技術のアルゴリズムへの埋め込みについても相性が良く、現在、機械学習との融合についても検討を進めている。

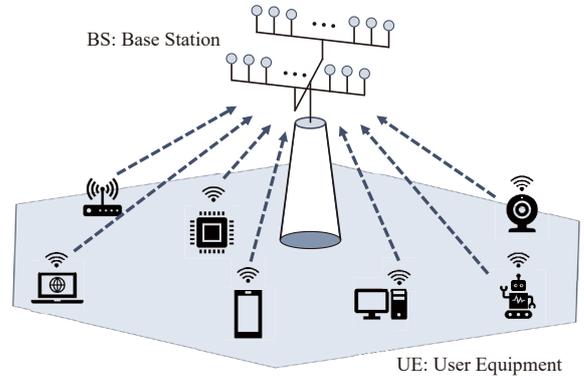


図1: マルチユーザ MIMO 模式図

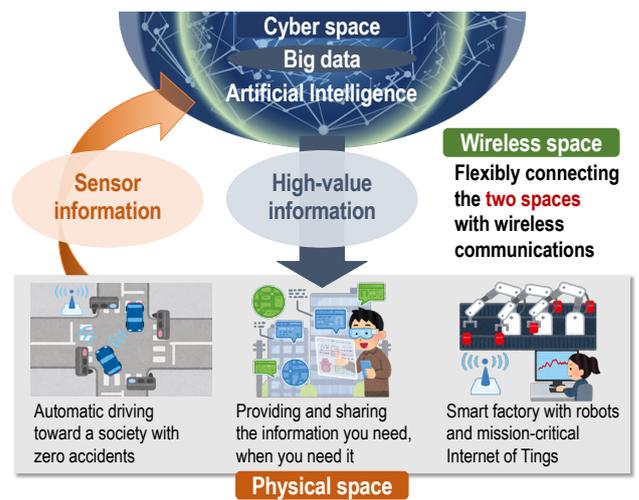


図2: サイバーフィジカル融合システム

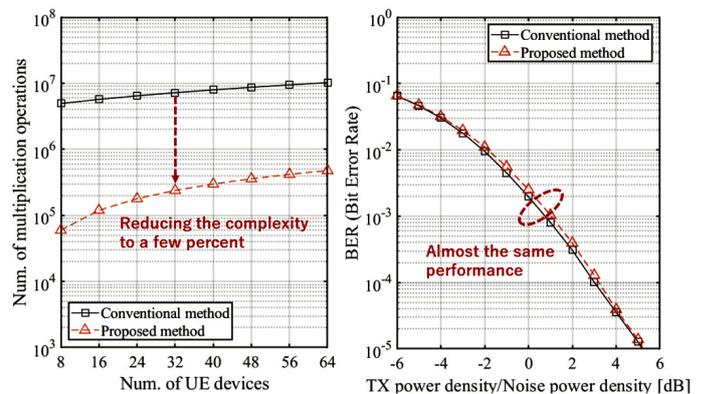


図3: 性能と計算量の比較

特許	特開2023-037446、特開2022-163465、特開2021-170696、特開2021-170697
論文	Takahashi, Takumi; Tölli, Antti; Ibi, Shinsuke et al. Low-complexity large MIMO detection via layered belief propagation in beam domain, in IEEE Transactions on Wireless Communications. 2022, 21(1), 234-249. doi: 10.1109/TWC.2021.3094970 Takahashi, Takumi; Iimori, Hiroki; Ando, Keigo et al. Bayesian receiver design via bilinear inference for cell-free massive MIMO with low-resolution ADCs, in IEEE Transactions on Wireless Communications. 2023, 22(7), 4756-4772. doi: 10.1109/TWC.2022.3228326 Shirase, Daichi; Takahashi, Takumi; Ibi, Shinsuke et al. Deep unfolding-aided gaussian belief propagation for correlated large MIMO detection, in Proc. IEEE Global Communications Conference, Taipei, Taiwan. 2020, 1-6. doi: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9348087
参考URL	http://www2a.comm.eng.osaka-u.ac.jp/
キーワード	無線通信、信号処理、ベイズ統計学、符号理論、情報理論