

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14734

研究課題名（和文）低解像度ADCを用いたミリ波・大規模MIMO信号検出のための確率伝搬法の設計

研究課題名（英文）Design of Belief Propagation for mmWave Large MIMO Detection with Low-Precision ADCs

研究代表者

高橋 拓海 (Takahashi, Takumi)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40844204

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：上り回線のミリ波・大規模マルチユーザMIMO伝送技術は、限られた時間・周波数リソース上で多数の無線通信端末を同時に収容するための物理層中核技術の一つである。その潜在能力を十分に引き出すことを目的に、本研究課題では受信機設計に着目し、ベイズ推論に基づく低演算量かつ高精度な信号検出アルゴリズムを開発した。具体的には、基地局の低コスト化を目的とした低分解能ADCの利用を想定し、非線形の量子化ひずみを補償しつつ高精度検出を実現する手法や、受信デジタルビームフォーミングを前提に、ミリ波通信路の統計的性質を利用した次元縮小法を開発し、検出精度を劣化させることなく大幅な低演算量化を実現する手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

内閣府が提唱するSociety 5.0では、仮想世界（サイバー空間）と現実世界（フィジカル空間）を高度に接続することで、新たな価値やサービスを創造する未来社会が描かれており、その実現が、現在日本が直面している様々な社会問題の解決への糸口となっている。二つの世界（空間）の高度かつ柔軟な接続を可能とする主たる担い手として無線通信システムがあり、特に、現実世界の情報を仮想世界へ伝送・集約する上り回線の無線通信技術の発展が急務となっている。上り回線の無線物理層技術の高度化に貢献する本研究成果は、将来の無線通信システム、ひいては未来社会を支える重要な情報基盤技術へとつながるものである。

研究成果の概要（英文）：Millimeter-wave massive multi-user MIMO is one of the essential technologies in physical layer of wireless communications for accommodating a large number of uplink wireless devices simultaneously over the limited time-frequency resources. In order to fully exploit its potential, in this project we focused on the receiver design and proposed low-complexity and high-accuracy signal detection algorithms based on Bayesian inference. Specifically, assuming the use of low-resolution ADCs to reduce the cost of base stations, we considered a message-passing de-quantization method that achieves highly accurate signal detection while compensating for non-linear quantization distortion. Assuming the use of receive digital beamforming, we also devised a dimensionality reduction method that takes advantage of the sparse property found in millimeter-wave channels in the angular-domain to achieve significantly lower computational complexity without degrading signal detection accuracy.

研究分野：無線通信システム・信号処理

キーワード：大規模MIMO ミリ波通信 確率伝搬法 低分解能ADC 量子化 通信路符号化 信号検出 通信路推定

1. 研究開始当初の背景

第5世代移動通信システム(5G)では、基地局から無線端末へ(下り回線)の通信速度の向上を担う中核技術として、ミリ波・大規模マルチユーザ MIMO (Multi-Input Multi-Output) の実用化が進められている。基地局に数十から数百規模の受信アンテナ素子を用意することで、情報ストリームの空間多重度の増加による飛躍的なスループット向上と、鋭い送信ビーム形成による干渉制御が可能となる。一方、5Gの次の世代、すなわち5G Advancedや6Gでは、大量の無線端末から基地局へ(上り回線)の大規模同時接続通信も重要な役割を担う。

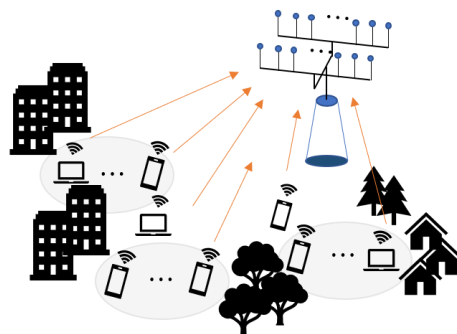


図1 マルチユーザ MIMO 模式図

内閣府の第5期科学技術基本計画で提唱された Society 5.0の実現には、サイバー・フィジカル融合システムを下支えする超多数の無線端末を収容可能な情報基盤が必要不可欠であり、大規模データの集約を目的とした無線通信の上り回線の高度化が期待される。この期待に応えるため、既存の基地局アンテナ素子を用いて大量の無線端末との空間多重接続を確立する、上り回線のミリ波・大規模マルチユーザ MIMO の通信形態が注目を集めている(図1)。しかし、その実現には空間多重された信号を分離(検出)するためのフルデジタルの大規模マルチユーザ検出(MUD: Multi-User Detection)が必要であり、検出処理にかかる演算量の増加とRF(Radio-Frequency)回路の消費電力の増大が、その実現に際しての大きな障壁となっていた。

2. 研究の目的

本研究課題では、ベイズ推論に基づく統計的信号処理を用いた受信機設計により、上記の障壁を乗り越えるための新たな MUD アルゴリズムを開発することを目的とする。具体的には、多数の上り回線端末を収容するミリ波・大規模マルチユーザ MIMO 通信において、従来の MUD 技術よりも高い信号検出精度、低い演算量を有する MUD アルゴリズムを提案することで、未来社会を下支えする情報基盤技術としての次世代無線通信システムの実現に貢献する。

3. 研究の方法

前述の目的の達成のため、本研究課題では、研究代表者が得意とするグラフィカルモデルに基づくベイズ推論アプローチを軸に、新たな MUD アルゴリズムを設計する。以降、本報告書では、主要成果のうち、(1)低分解能 ADC (Analog-to-Digital Converter) を用いた大規模マルチユーザ MIMO システムのための確率伝搬法(BP: Belief Propagation)に基づく MUD アルゴリズムの開発と、(2)ビーム領域局所線形フィルタ出力に基づくミリ波・大規模 MIMO 検出の低演算量化の、二つの研究成果に焦点を当てて報告を行う。

4. 研究成果

(1) 低分解能 ADC を用いた大規模 MIMO システムのための低演算量な BP 検出器の開発

背景で述べた通り、フルデジタルかつ高い分解能を有する大規模 MIMO アレイの実現は困難であり、RF 回路における消費電力とハードウェアコストの増大が問題となる。特に上り回線においては、各アンテナ素子に具備された ADC における消費電力が、量子化ビット数に対して指数関数的に増加するため、同相成分・直交成分(I軸Q軸)をそれぞれ1-3ビット程度で量子化する低分解能 ADC の活用がミリ波通信を中心に検討されている。しかし、低分解能 ADC 出力に基づく MUD では、観測信号の深刻な量子化ひずみによる信号検出精度の低下が避けられず、従来の MUD 手法を適用することはできない。

量子化ひずみを考慮した MUD には、Bussgang の定理に基づく BMMSE (Bussgang Minimum Mean Square Error) 検出が提案されている。定理から導かれる Bussgang 分解を用いると、量子化後の信号を量子化前の信号成分と、それとは独立な量子化ひずみに分解することができ、非線形な量子化処理を扱いやすい線形表現へ変換することが可能となる。こうして得られた多次元の線形回帰モデルに基づいて線形検出を行うことにより、低処理量かつ高精度な量子化 MUD を実現する。しかし、BMMSE をはじめとする線形の量子化 MUD が十分に動作するのは、同時接続端末数が受信アンテナ数に対してずっと少ない場合のみであり、同時接続性の向上を目的とした場合には量子化 MUD が依然としてボトルネックとなる。また、従来の線形 MUD と同様、通信路次元に応じた行列演算が必要となるため、処理演算量や受信機回路規模の増大も問題となる。

高負荷（同時接続端末数が多い）な MIMO 構成のための量子化 MUD としては、MPDQ（Message Passing De-Quantization）に基づく繰り返し検出が有効である。特に、一般化近似メッセージ伝搬法（GAMP: Generalized Approximate Message Passing）の枠組みで設計された MPDQ は非常に低い演算量で動作する。しかし、GAMP はその導出過程において大システム極限近似を多用しており、現実の有限サイズの MIMO 検出においては、信号のモデル誤差に対して脆い傾向がある。事実、量子化ビット数が極端に少ない場合には、繰り返し収束特性が劣化してしまう。

この問題に対し本研究では、Bussgang 分解から得られた線形回帰モデルに基づいて、ガウス信念伝搬法（GaBP: Gaussian Belief Propagation）による MPDQ 手法を設計した。GAMP の（大システム極限近似を施す前の）導出元として知られる GaBP は、大システム近似に対する依存性が小さいため、繰り返し処理間を伝搬するメッセージのモデル誤差や信号ひずみに対してより強い堅牢性を有する。提案法は、ベイズ統計に基づく 2 段階推論の構造により、ユーザ間干渉と量子化ひずみを同時に抑圧し、高負荷な MIMO システムの MUD においても、高い信号再構成・検出性能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た。

シミュレーション諸元は以下の通りである。パスロス・シャドウイングは、低速な送信電力制御により補償されると仮定した。変調方式はグレイ符号化 QPSK（Quadrature Phase-Shift Keying）を用い、通信路符号化は適用せず無符号化とし、MUD 性能を評価するために、理想的な仮定として、通信路は受信機で誤差なく推定されているものとした。また、量子化手法には量子化前後の平均二乗誤差（MSE: Mean Square Error）を最小にする Lloyd-Max 量子化器を使用している。

図 2 に、受信アンテナ数 N と送信アンテナ数 M について、 $(N, M) = (64, 16)$, $(64, 48)$ の二つの MIMO 構成において、送信シンボルの平均電力密度対雑音電力密度の関数として BER (Bit Error Rate) 特性を比較している。いずれも 1-3 ビットの低分解能 ADC 出力に基づく MUD としては、高い負荷率 $\xi = M/N$ である。参考特性として、量子化が行われていない場合の GaBP 検出器と線形 MMSE 検出器の特性「GaBP」, 「MMSE」を示す。

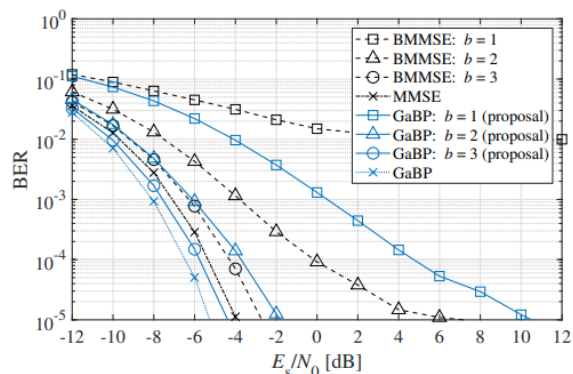
図 2(a) の負荷率 $\xi = 1/4$ の場合、「BMMSE ($b = 1$)」では深刻な量子化誤差により高精度な検出は不可能である。さらに、 $b = 2$ でも「MMSE」と比較して特性が劣化しており、 $b = 3$ でエラーフロアの抑圧が可能となる。これに対し提案手法では、 $b = 1$ でも BER = 10^{-5} を達成し、 $b = 2$ では BER = 10^{-4} において「MMSE」から 2.0 [dB]、「GaBP」から 3.0 [dB] の劣化にまで迫る。驚くべきことに、 $b = 3$ では「GaBP」に漸近することが確認できる。

図 2(b) の負荷率 $\xi = 3/4$ の場合、 $b = 1$ では ADC 出力に基づく信号検出は難しいことがわかる。「BMMSE」では $b = 3$ でも量子化誤差に起因するエラーフロアが避けられず、BER = 10^{-4} を達成することができない。これに対して、提案手法では $b = 2$ でも BER = 10^{-5} を達成し、 $b = 3$ では BER = 10^{-4} において限界特性である「GaBP」から 3.0 [dB] の劣化にまで迫る。

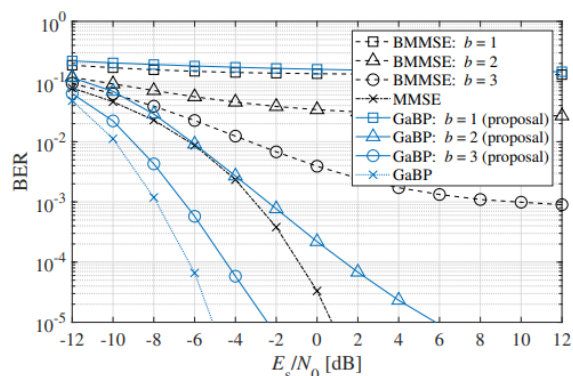
以上から、提案法は低分解能 ADC ($b \leq 3$) 出力に基づく MUD において、高負荷構成でも良好な特性を達成できることが確認できた。

(2) ビーム領域局所線形フィルタ出力に基づくミリ波・大規模 MIMO 信号検出の低演算量化

大規模 MIMO 信号検出の低演算量化のための方策として、基地局受信機でのフルデジタルビームフォーミングを前提とした、ビーム領域通信路の次元縮小が提案されている。一般にユーザ端末は基地局周辺の地形地物に応じてセル内に分布しており、各端末からの受信信号の到来角度広がり、端末周辺の錯乱体により制限されている。つまり、特定端末からの受信信号は一部のビームで主に受信され、サイドローブ減衰によりそれ以外のビームではほとんど受信されないため、ビーム領域通信路にはスパース性が生じる。この統計的性質は、直進性が高く、回折・散乱現象が生じないミリ波通信路においては特に顕著にみられる。この知見を最大限活用するため、一様線形アレイ (ULA: Uniform Linear Array) において、各ユーザからの信号電力が一部の連続した受信ビーム内に集中することを利用し、ユーザ端末ごとに対応するビーム出力を集めたビームブロックに基づいてデータ検出を行う局所的線形 MMSE (LLMMSE: Local Linear MMSE) が提案されている。シュア補行列を用いてビームブロックごとの精度行列を逐次計算



(a) $(N, M) = (64, 16)$: $\xi = M/N = 1/4$ MIMO 構成



(b) $(N, M) = (64, 48)$: $\xi = M/N = 3/4$ MIMO 構成

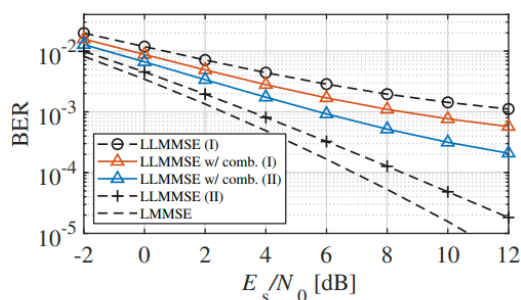
図 2 BER 特性の比較

することで、LLMSE 検出と比較して大幅な演算量低減を実現できる。ただし、演算量の低減を優先してブロックサイズを小さく設定しすぎると情報損失を招き、検出精度の深刻な低下が避けられない。また、ブロックサイズが小さくなるほど LLMSE フィルタの干渉抑圧能力は劣化するため、同時収容するユーザ端末数が増えるほどこの問題は深刻となる。

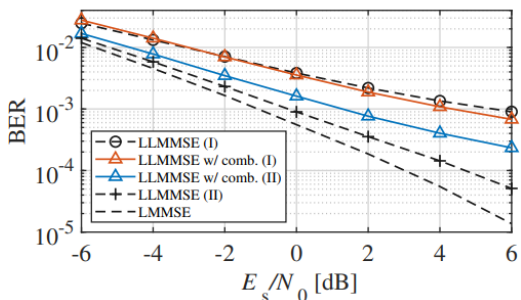
そこで本研究では、小さなブロックサイズでも LLMSE 検出精度を維持するために、各ユーザ端末に対して連続する複数のビームブロックを選択し、それぞれから算出された所望送信シンボルに関する尤度情報を適切に合成する手法を提案した。尤度合成にあたり最も重要な点は、各ビームブロックから算出された尤度情報間の相関性の影響をいかに抑制するかにある。所望シンボルに関する情報を可能な限り漏れなくかき集めるためには、角度位置の近い連続するビームブロックを選択する必要がある。しかし、この場合、各ブロックを構成する大部分のビームはブロック間で重複しているため、対応する LLMSE フィルタから算出される尤度情報間の相関が非常に高くなる。独立性を仮定した安易な合成は雑音強調を招き、特に通信路符号化を前提とした符号化システムではほとんど性能改善が望めない。これは、相関性を考慮せず合成された尤度情報に基づいて対数尤度比 (LLR: Log-Likelihood Ratio) を算出した場合、その等価雑音成分の統計的振る舞いが、軟判定復号器が想定する確率モデルから大きく乖離し、誤り訂正能力を十分に発揮できないためである。

この問題を解決するため、全観測ベクトルに基づく検出シンボルの尤度関数を、選択されたビームブロックに基づく検出シンボルの尤度関数を用いて表現できるまで、段階的に近似することにより、相関性を考慮した尤度合成手法を導き出した。その結果として、各ビームブロックに対応する尤度情報の総和から重複部分に対応する尤度情報の総和を差し引くことで、尤度情報間の相関性を考慮した結合情報を算出できることを明らかにした。提案法で必要となる尤度情報の算出では、各 LLMSE フィルタが達成する MSE の理論値の計算にかかる演算量が支配的となるが、従来法においてもフィルタ選択のために MSE を計算する必要があるため、追加の処理量は非常に少なく済む。さらに、提案法を確率的データ結合 (PDA: Probabilistic Data Association) に基づく繰り返し信号検出へ拡張することで、同時接続ユーザ端末数が多い高負荷な通信シナリオにおいても、符号化 MIMO システムにおいて低処理量かつ高精度な MUD を実現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た。

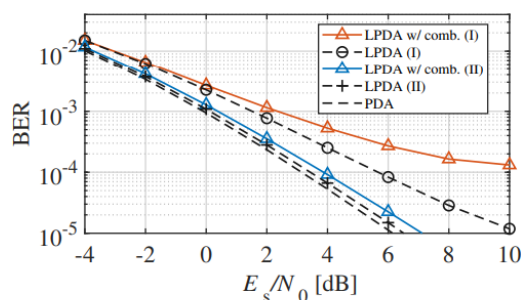
シミュレーション諸元は以下の通りである。受信アンテナ数 $N = 128$ 、同時接続ユーザ数 $M = 64$ の大規模マルチユーザ MIMO を想定し、基地局アンテナは 120 度解放のセクタアンテナ、各ユーザ端末は範囲内に等分割配置した。各ユーザ端末からの受信角度広がり度は 3 度とし、グレイ符号化 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) を用いた。符号化時には、符号化率 2/3、符号長 1944 ビットの低密度パリティ検査 (LDPC: Low-Density Parity-Check) 符号を用いた。



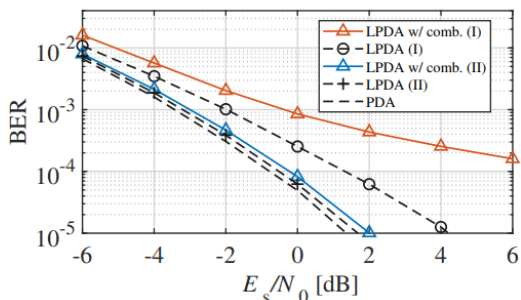
(a) 無符号化システム



(b) 符号化システム



(a) 無符号化システム



(b) 符号化システム

図3 繰り返しなしの BER 特性の比較

図4 繰り返しありの BER 特性の比較

図3に繰り返し処理なしの場合、図4に繰り返し処理ありの場合 (繰り返し $T = 2$ 回) の BER 特性を送信シンボルの平均電力密度対雑音電力密度の関数としてそれぞれ示す。図3では典型的な LLMSE 検出、図4では PDA に基づく繰り返し検出の特性を参考特性として加え、提案した尤度合成式の有効性を明確にするために以下の4つの LLMSE に基づく検出手法を比較した。

- ・ (I) : フィルタ出力の合成を行わない従来の LMMSE 検出.
- ・ (II) : 演算量の増加を考慮せず, 選択した L 個のビームブロックを逆行列演算により合成した場合の特性. 提案法の性能下界を与える.
- ・ w/ comb. (I) : 相関性を考慮せず, 選択した L 個のビームブロックから算出された尤度情報を単純に和合成した場合の特性.
- ・ w/ comb. (II) : 提案した尤度合成式を用いて, 選択した L 個のビームブロックから算出された尤度情報を合成した場合の特性.

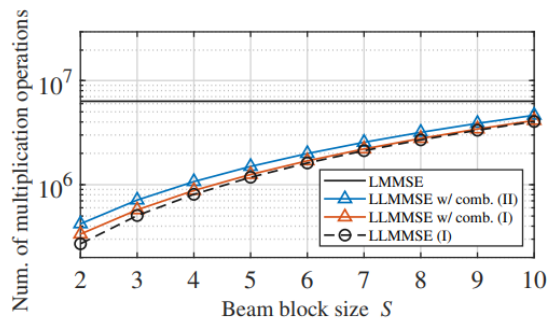
また, 一つあたりの LMMSE フィルタのサイズであるビームブロックサイズを $S = 6$, 尤度情報の合成数を $L = 15$ と設定した. LMMSE 検出を PDA に拡張したものを LPDA と呼称する.

図 3(a) の無符号化システムにおける BER 特性では, 従来の ``LMMSE (I)`` の特性が次元縮小による情報損失に起因して ``LMMSE`` から大幅に劣化している一方, 複数フィルタ出力の尤度情報を合成した ``LMMSE w/ comb. (I)`` および ``LMMSE w/ comb. (II)`` では一定の特性の改善効果が見られる. 特に, 提案法では $BER = 10^{-3}$ において ``LMMSE (I)`` に対して約 6 [dB] の利得が確認できる. 続いて, 図 3(b) の符号化システムにおける BER 特性では, 相関性を考慮せずに尤度情報を合成した ``LMMSE w/ comb. (I)`` はほとんど特性を改善できない. これに対し, ``LMMSE w/ comb. (II)`` では無符号化システムで見られた改善に応じた利得が確認でき, 提案合成法では後段の復号器による誤り訂正が十分に機能していることが確認できる. ただし, $S = 6$ の LMMSE フィルタの干渉抑圧能力はそれほど高くないため, 今回のように同時接続ユーザ端末数 M が大きいシナリオでは, 一度のフィルタリング処理で ``LMMSE (II)`` や ``LMMSE`` の特性に漸近させることは困難である.

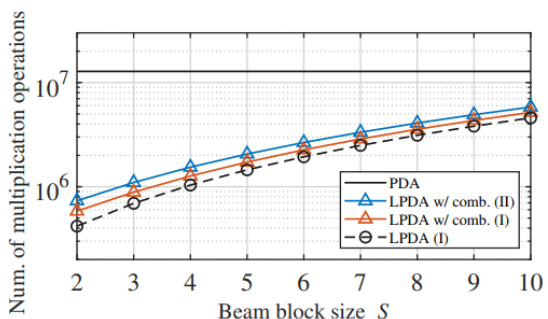
続いて, 図 4 の繰り返し信号検出へ拡張したときの特性に着目する. ``LPDA w/ comb. (I)`` の特性より, 相関性を考慮せずに合成を行った場合にはその不整合が繰り返し間を伝搬し性能が著しく低下することが分かる. これに対し, 提案手法である ``LPDA w/ comb. (II)`` は非常に良好な性能を達成しており, $T = 2$ 回と極めて少ない繰り返し回数にも関わらず, 無符号化・符号化システムの両方で性能下界である ``LPDA (II)`` に漸近する. また, 全アンテナ領域で動作する従来の ``PDA`` に対しても, $BER = 10^{-5}$ において 1 [dB] 未満の性能劣化に留まっている. 符号化システムの結果から, LLR の等価雑音成分が, 軟判定復号器が想定する一貫性条件を満たしたガウス性の雑音となっていることが推察できる.

最後に, 先のシミュレーションで評価した MUD にかかる演算量を積演算回数で評価した. 図 5(a) の ``LMMSE w/ comb. (I)`` は $S = 6$ において ``LMMSE (I)`` とほぼ同程度の演算量で動作している. また, ``LMMSE w/ comb. (II)`` でも ``LMMSE (I)`` に対して約 20 % の演算量増加で動作し, 従来の ``LMMSE`` に対して約 30 % の演算量で動作する. 図 5(b) の ``LPDA w/ comb. (II)`` は $S = 6$ において, ``LPDA (I)`` に対して約 40 % の演算量増加で動作し, 従来の ``PDA`` に対して約 20 % の演算量で動作する. いずれの結果も, 提案法が従来法と比較して, 大幅な処理演算量の低減を実現していることを示している.

さらに, 図 3 と図 4 の信号検出精度の結果を踏まえて評価すると, 提案法は非常に低い演算量で高い検出性能を達成できていることが分かる. 以上の結果は, 無符号化システムと符号化システムの両方において, ビーム領域で統計的信号処理を行う利点と, 提案合成法の正当性を示すものであり, 基地局受信機に多数のアンテナを具備するミリ波・大規模マルチユーザ MIMO システムの上り回線における信号検出手法として, 提案手法が有効であることを示している.



(a) 繰り返し処理なし ($T = 1$)



(b) 繰り返し処理あり ($T = 2$)

図 5 S の変化に対する積演算回数の変化

以上の二つの研究成果から得られる知見を組み合わせることで, 前述の本研究課題の目的・目標を達成することが可能であると考えられる. さらに, 研究成果(1)については通信路推定も含めた枠組みへの拡張が完了している他, ミリ波通信路のフェージング係数間の空間相関性を考慮した BP 検出器の設計方法や, LLR の算出方法等についても研究成果が出ている. これらの詳細については発表論文リストを参照されたい. 研究成果の大半は, 著名な国際会議において発表済みであり, その一部は既にトップジャーナルに採択されている.

最後に, 本研究課題の結果は, 計算機シミュレーションおよび理論解析に基づく机上の研究成果であり, 実用化に向けては, さらなる研究, 検討が必要である.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Atsunori Shimamura , Takumi Takahashi , Shinsuke Ibi , Seiichi Sampei	4. 巻 11
2. 論文標題 Uplink Signal Detection via Look-Up Table-Based AMP for Massive MIMO Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 13044-13057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3242610	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Atsunori Shimamura , Takumi Takahashi , Shinsuke Ibi , Seiichi Sampei	4. 巻 -
2. 論文標題 Referential Approximate Message Passing for Quantized Large MIMO Detection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE GLOBECOM '22	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/globecom48099.2022.10001099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takumi Takahashi, Hiroki Iimori, Kengo Ando, Koji Ishibashi, Shinsuke Ibi, Giuseppe Thadeu Freitas De Abreu	4. 巻 Early Access
2. 論文標題 Bayesian Receiver Design via Bilinear Inference for Cell-Free Massive MIMO with Low-Resolution ADCs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TWC.2022.3228326	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Itsuki Watanabe, Takumi Takahashi, Shinsuke Ibi, Antti Tölli, Seiichi Sampei	4. 巻 -
2. 論文標題 Gaussian Belief Propagation for mmWave Large MIMO Detection with Low-Resolution ADCs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE SPAWC '22	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SPAWC51304.2022.9833951	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Daiki Wakumoto, Takumi Takahashi, Shinsuke Ibi, Seiichi Sampei	4. 巻 -
2. 論文標題 Phase-Noise-Aware LLR Calculation for mmWave MIMO Systems with High-Order Modulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE VTC '22-Spring	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860497	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryota Tamaki, Kenta Ito, Takumi Takahashi, Shinsuke Ibi, Seiichi Sampei	4. 巻 -
2. 論文標題 Suppression of Self-Noise Feedback in GAMP for Highly Correlated Large MIMO Detection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE ICC '22	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/icc45855.2022.9839253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takumi Yoshida, Daichi Shirase, Takumi Takahashi, Shinsuke Ibi, Seiichi Sampei	4. 巻 -
2. 論文標題 Low-Complexity Large MIMO Detection Based on Beam-Domain Local LMMSE Filters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE ICC '22	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICC45855.2022.9838343	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Takumi, Tolli Antti, Ibi Shinsuke, Sampei Seiichi	4. 巻 21
2. 論文標題 Low-Complexity Large MIMO Detection via Layered Belief Propagation in Beam Domain	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 234-249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/twc.2021.3094970	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shirase Daichi, Takahashi Takumi, Ibi Shinsuke, Muraoka Kazushi, Ishii Naoto, Sampei Seiichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Negentropy-Aware Loss Function for Trainable Belief Propagation in Coded MIMO Detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE GLOBECOM '21	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/globecom46510.2021.9685863	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ito Kenta, Takahashi Takumi, Ibi Shinsuke, Sampei Seiichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Bayesian Joint Channel and Data Estimation for Correlated Large MIMO with Non-orthogonal Pilots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE ICC '21	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/icc42927.2021.9500313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Ito, T. Takahashi, S. Ibi, S. Sampei	4. 巻 -
2. 論文標題 Bilinear Gaussian Belief Propagation for Large MIMO Channel and Data Estimation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of GLOBECOM '20	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9347952	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 吉田 拓実, 高橋 拓海, 衣斐 信介, 三瓶 政一
2. 発表標題 符号化大規模MIMO検出のためのビーム領域局所的LMMSE出力の尤度情報合成に関する一検討
3. 学会等名 第45回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 わく本 大輝, 高橋 拓海, 衣斐 信介, 三瓶 政一
2. 発表標題 離散ベクトル再構成のための t 分布に基づく denoiser 設計
3. 学会等名 第45回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 宰佑, 高橋 拓海, 伊藤 賢太, 衣斐 信介, 三瓶 政一
2. 発表標題 ベルヌーイガウス信念伝搬法に基づくパラメトリック双線形推論に関する一検討
3. 学会等名 第45回情報理論とその応用シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西 祐耶, 高橋拓海, 飯盛寛貴, アブレウ ジュゼッペ, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 時系列情報を用いたCD-SMDS法に基づく屋内位置推定に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田拓実, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 ミリ波大規模MIMO検出におけるビーム領域Local LMMSE検出のためのLLR合成手法に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古田健悟, 伊藤賢太, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 OTFS伝送のためのパラメトリック双線形推論に基づく通信路とデータの同時推定に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林卓守, 高橋拓海, 伊藤賢太, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 符号化・過負荷大規模MIMO検出のための期待値伝搬法に基づく繰り返し信号検出に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 メッセージ伝搬アルゴリズムに基づく多次元信号処理
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡部樹, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 低分解能ADCを用いた大規模MIMO検出のための量子化ひずみを考慮したガウス信念伝搬法に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 島村篤典, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 量子化AMPによる多次元信号検出のための 深層展開を用いた量子化しきい値の学習最適化に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 玉置凌太, 伊藤賢太, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 有相関MIMO検出のためのガウス信念伝搬法と一般化近似メッセージ伝搬法における自己雑音伝搬の抑制原理に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 わく本大輝, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 高多値QAMを用いたミリ波MIMO通信のための位相雑音存在下におけるLLR導出に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田拓実, 白瀬大地, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 ビーム領域Local LMMSEフィルタ出力に基づく大規模MIMO検出の低演算量化に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白瀬大地, 高橋拓海, 衣斐信介, 村岡一志, 土井隆暢, 石井直人, 三瓶政一
2. 発表標題 信念伝搬法による符号化MIMO検出のためのネグトロピーに基づく深層展開に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋拓海, 飯盛寛貴, 安藤研吾, 石橋功至, 衣斐信介, アブレウ ジュゼッペ
2. 発表標題 スケラブルセルフリー大規模MIMOのための双線形推論に基づくベイジアン受信機設計に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 大規模マルチユーザMIMO検出のための信念伝搬法と深層学習の融合
3. 学会等名 電子情報通信学会 情報理論研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 島村篤典, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 有相関大規模MIMO検出のための離散分布追跡に基づくロバストな参照型AMPに関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉置凌太, 伊藤賢太, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 有相關大規模MIMOのための深層展開を利用した双線形推論に基づくベイジアン受信機設計に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤賢太, 高橋拓海, 五十嵐浩司, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 ミリ波大規模MIMOのための到来角度推定を利用した双線形推論に基づくベイジアン受信機設計に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤賢太, 高橋拓海, 五十嵐浩司, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 ガウス信念伝搬法に基づくパラメトリック双線形推論に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村優香, 島村篤典, 渡部樹, 白瀬大地, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 低分解能ADCを用いた有相關大規模MIMO検出のための 深層展開 深層展開を利用したガウス信念伝搬法に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡部樹, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 低分解能ADCを用いた大規模MIMO検出のためのBussgang分解に基づくガウス信念伝搬法に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 越智雄市, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 大規模マルチユーザMIMOのための統計ビーム選択に基づくパイロット割当の最適化に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤賢太, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 信念伝搬法に基づく有相関大規模MIMO通信路とデータの繰り返し同時推定に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤賢太, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 有相関大規模MIMOのための通信路とデータの繰り返し同時推定に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤賢太, 高橋拓海, 衣斐信介, 三瓶政一
2. 発表標題 ガウス信念伝搬法に基づく大規模MIMO通信路とデータの繰り返し同時推定に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究者詳細 - 高橋 拓海 - 研究者総覧 - Osaka University
<https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/fa1d55ac9d43f693.html>
 高橋 拓海 (Takumi Takahashi) - マイポータル - researchmap
https://researchmap.jp/takumi_takahashi

6. 研究組織			
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フィンランド	University of Oulu			
ドイツ	Jacobs University Bremen			