

論文内容の要旨

博士論文題目

Quantization and Attention-based Hierarchical Deep Learning Models for Beam Training in mmWave Massive MIMO Systems

(ミリ波大規模 MIMO システムのビームトレーニングのための量子化アテンション階層深層学習モデル)

氏 名

JIA HAOHUI

(論文内容の要旨)

Deep learning (DL) based beam training is the critical leverage in fifth/sixth generation (5G/6G) systems to preserve spectral efficiency with fast optimal beam selection. However, a unified DL structure hardly expresses the multiple subsets of rays/clusters for the millimeter wave (mmWave) massive multiple-input multiple-output (MIMO) systems. Moreover, a complex environment also incurs critical performance degradation for the continuous output. In practice, the high labeling and expertise cost is also inefficient and infeasible.

This study focuses on highly efficient, robust, and flexible beam training with intelligent proposals. We first explore a hierarchical DL paradigm based on frequency and spatial domain views. And then, we extend it to a novel contrastive learning framework working on a tiny fraction of the labeled channel state information (CSI) dataset. Specifically, we organize non-deterministic and autoregressive encoders for extracting the frequency information with the corrupt CSI. The proposed non-deterministic encoder converts the channel intensities into a binary representation, and the autoregressive encoder handles the interrelation of frequency and spatial domain. Benefiting from the transformer model, we apply a spatial attention encoder contributing to the optimal beam by scoring the relation between latent beam directions and generated beam gains. Leveraging the hierarchical DL paradigm, we further design a novel contrastive learning framework. We quantize the environmental components with a latent beam codebook to achieve robust representation. The proposed framework pre-trains by the contrastive information of the target user and others with the unlabeled CSI and then utilizes it as the initialization to fine-tune with negligible labeling cost.

Finally, experimental results show that this study outperforms existing DL-based schemes, obtaining higher capacity and highly reliable performance for mmWave massive MIMO systems. The proposed framework further enhances flexibility and breaks the limitation of the quantity of label information for practical beam training.

(論文審査結果の要旨)

第 5/6 世代移動通信システム (5G/6G) では、大容量通信を実現するためミリ波 (mmWave) Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) 技術が採用されている。しかし、massive MIMO システムにおいてビーム選択を最適かつ高速に行うためには、膨大な演算処理を行わなければならない、実装が困難である。この問題を解決する手法として、現在、ディープラーニング (DL) を用いたビーム選択が検討されている。しかし、従来の DL では、十分な性能を得られていないという問題があった。

この問題を解決するために、本論文では

1. 階層型 DL によるビームトレーニングの枠組み構築
2. 非決定論的量子化に基づくビームトレーニング法
3. 自己教師あり学習によるビームトレーニング手法

の3つの検討を行い、効果的にビーム選択を行う手法を確立している。まず、1 では、周波数領域と空間領域のビューに基づいて階層型 DL の枠組みを構築している。次に、2では、ラベル付きチャネル状態情報 (CSI) のうち、特に周波数領域情報を抽出するため、非決定論的自己回帰量子化器を組織する。この非決定性量子化器は伝搬路情報を二値データで表現し、周波数領域と空間領域の関係を学習させる。本学習結果により得られたビーム特性をスコアリングし、最適アテンションエンコーダを構成する新しい手法を提案している。最後に3では、階層的 DL パラダイムを活用し、新しい対照学習フレームワークを構築している。提案フレームワークは、ラベル付けされていない CSI を用いて、ターゲットユーザと他のユーザの対照的な情報を事前学習し、ラベル付けコストを無視できる程度に微調整するための初期化として利用するものであり、学習コストを削減し、現実的なシステムの構築が可能である。

これらの手法を適用した massive MIMO システムの性能を計算機シミュレーションにより評価した。その結果、本研究において提案された手法を用いることで、通信容量と通信の信頼性の高いシステムが構築できることを明らかにしており、今後の移動通信技術の発展に寄与する優れた研究成果である。

以上から、本論文は、博士(工学)の学位に値する優れた論文であると判定する。