

論文内容の要旨

申請者氏名 浦上 大世

Reconfigurable intelligent surface (RIS) is a promising technology developed for improving signal coverage and capacity for the fifth and sixth generation (5G/6G) wireless systems. RIS reflects the incident signal intelligently in the desired direction using software controllable phase shift with low extra costs. However, existing RISs have the following limitations. For deep learning (DL) based beamforming schemes, the effect of imperfect channel state information (CSI), imbalanced computing resources of federated learning (FL), relay-based single-task training of split learning (SL), and high labeling costs with annotation are still bottlenecks. For metasurface design, it concerns its narrow reflection phase range and bandwidth, insufficient reflection direction range, and unchangeable reflector shape. We first consider the DL algorithm design in RIS-aided wireless communication systems. We then first propose a robust centralized machine learning (CML) approach, named hybrid convolutional neural network (CNN) encoder-based Transformer (HCNT). This approach can represent the continuous channel expression as binary sequences by leaky integrated-and-fire (LIF) mechanism to significantly eliminate the effects of the channel estimation error. Then, we extend this CML approach into the collaborative learning framework, named self-enhanced multi-task and split federated learning (SM-SFL) for RIS-aided cell-free (CF) systems. The proposed SM-SFL simultaneously tackles channel semantic reconstruction and beamforming with shared knowledge. The proposed SM-SFL splits large model into multiple lightweight parts friendly with local devices with limited computation ability and trains local and global models parallelly with the Federated server. Moreover, the SM-SFL pre-trains by predicting and distinguishing the target CSI and others without annotation, and then we fine-tune the local and global models with limited labeled CSI. Simulation results show that these proposed approaches can achieve a high spectral efficiency (SE) with imperfect CSI, multi-device cooperation, and negligible labeling overhead. Next, we do the study on metasurface design. We first propose the interdigital and multi-via structures to obtain a wide reflection phase range. Specifically, the interdigital structure provides a wide reflection phase range by changing the depth of the interdigital fingers. The multi-via structure provides higher positive reflection phases near $+180^\circ$. Then, we propose a novel varactor diode mounted large-via and multi-via mushroom-type (VDLM/VDMM) structures to realize the variable multi-band reflector with controllable direction. Two varactor diodes for controlling the reflection direction and frequency band are mounted on the unit cell of the proposed VDLM/VDMM structures. Furthermore, we propose a convex-type multi-beam RIS to obtain a wide reflection direction range. In this study, a multi-beam reflector is bent at the center as a convex-shape, and the aperture angle can be mechanically changed for realizing the adaptive reflection direction control. A conformal RIS (CRIS) with a flexible printed circuit (FPC) substrate is also proposed to control the reflection direction and reflector shape. Adapting the FPC to a conformal reflector allows the reflector shape to be changed arbitrarily, thus relaxing the installation conditions of the reflector. Measurement and simulation results show that the proposed RISs can control the reflected beam in the desired direction with high efficiency and flexibility.

論文審査結果の要旨

申請者氏名 浦上 大世

本論文は、再構成可能なインテリジェント サーフェス (RIS) の設計とその第 5 世代および第 6 世代 (5G/6G) ワイヤレスシステムへの応用について論じたものである。RIS は、移動通信システムの信号カバレッジと容量を改善することが期待される有望な技術である。しかし、既存の RIS には、いくつかの課題が存在する。ひとつは機械学習アルゴリズムによる制御手法の精度が従来手法では十分ではないこと、もうひとつは、RIS の基礎となるメタサーフェスの自由度が高い設計が難しいことである。本論文では、これらの問題の解決法を示している。まず、RIS 支援ワイヤレス通信システムにおける DL (Deep Learning) アルゴリズムについていくつかの提案を行っている。

ハイブリッド CNN エンコーダー ベーストランスフォーマー (HCNT) と呼ばれる堅牢な集中型機械学習 (CML) アプローチを提案する。このアプローチでは、リーク積分発火 (LIF) メカニズムによって連続チャネル表現をバイナリシーケンスとして表すため、チャネル推定エラーの影響を大幅に排除できる。

さらに、この CML アプローチを、RIS 支援セルフフリー (CF) システム用の自己強化マルチタスクおよび分割フェデレーテッドラーニング (SM-SFL) という協調学習フレームワークに拡張する。提案された SM-SFL は、共有知識を使用してチャネルセマンティック再構築とビームフォーミングを同時に処理する。SM-SFL は、計算能力が限られたローカルデバイスに適した複数の軽量パーツに大規模モデルを分割し、フェデレーテッドサーバーを使用してローカルモデルとグローバルモデルを並列にトレーニングする。また、SM-SFL は、アノテーションなしでターゲット CSI とその他を予測および区別することで事前トレーニングし、次にラベル付き CSI が制限されたローカルモデルとグローバルモデルを微調整する。シミュレーション結果は、これらの提案されたアプローチが、不完全な CSI、マルチデバイス協力、および無視できるラベル付けオーバーヘッドで高いスペクトル効率 (SE) を達成できることを示している。

もうひとつのメタサーフェス設計手法として、広い反射位相範囲を得るために、インターデジタル構造とマルチビーム構造を提案している。インターデジタル構造は、インターデジタルフィンガーの深さを変えることによって広い反射位相範囲を提供する。マルチビーム構造は、 $+180^\circ$ 付近でより高い正の反射位相を提供する。また、方向を制御できる可変マルチバンド反射器を実現するために、新しいバラクタダイオードを搭載したラージビームとマルチビームマッシュルーム型 (VDLM / VDMM) 構造を提案する。反射方向と周波数帯域を制御するための 2 つのバラクタダイオードが、提案された VDLM / VDMM 構造のユニットセルに搭載されている。

さらに、広い反射方向範囲を得るために、凸型マルチビーム RIS を提案する。本研究では、マルチビーム反射器を中央で凸形状に曲げ、開口角を機械的に変更して適応的な反射方向制御を実現する。フレキシブルプリント回路 (FPC) 基板を備えたコンフォーマル RIS (CRIS) も提案されており、反射方向と反射器の形状を制御する。FPC をコンフォーマル反射器に適合させることで、反射器の形状を任意に変更できるようになり、反射器の設置条件が緩和される。測定およびシミュレーションの結果から、提案された RIS は、高効率かつ柔軟に、反射ビームを目的の方向に制御できることが示されている。

以上のように、本論文は、RIS を実際の 5G/6G ワイヤレス通信システムに適用するための制御アルゴリズムの検討と、基盤技術であるメタサーフェスの設計手法の両面から研究を行ったものであり、学術的資料としての価値が高いものであるとともに、社会実装に向けても大きく寄与する優れた研究成果であると認められる。したがって、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。