



再構成可能なインテリジェントサーフェスによるユーザー中心の6Gネットワークの設計と最適化

メタデータ	言語: English 出版者: 公開日: 2025-06-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: JIALE, SHU メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/0002000341

氏名	JIALE SHU (ジャレ シュウ)
学位論文題目	Design and Optimization of User-centric 6G Networks with Reconfigurable Intelligent Surfaces (再構成可能なインテリジェントサーフェスによるユーザ中心の6Gネットワークの設計と最適化)
論文審査委員	主査 教授 太田 香 教授 董 冕雄 准教授 李 鶴 (株式会社安藤ハザマ 顧問) 谷口 智彦

論文内容の要旨

6G 通信の新しいパラダイムとして、再構成可能なインテリジェントサーフェス (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) は、電磁波を動的に制御できる優れた特性を備えており、産業界と学界の両方から大きな注目を集めています。さらに、ユーザー中心型ネットワークは、個々のモバイルデバイスの要件を満たすためにネットワークリソースを個別に割り当てることを重視しており、将来のモバイル通信および関連するサービス提供の方向性を示しています。この特性により、RIS はユーザー中心型 6G ネットワークシステムの進化において重要な役割を果たすことが期待されています。しかし、これらのシステムに RIS を組み込み、ユーザーの要件を満たすように調整することは、未解決の課題として残されています。したがって、本論文は、ユーザー中心型 6G ネットワークを RIS で実現するビジョンを提供することを目的としており、特にカスタマイズ可能で持続可能な通信をユーザー中心型 6G に提供する方法に焦点を当てています。

本論文では、さまざまな RIS 支援型ワイヤレス通信シナリオにおいて、3つの主要なタスクが提案されています。最初のタスクでは、ネットワークカバレッジを最大化し、さまざまな環境で一貫したユーザー体験を確保するために、RIS の配置を最適化することに焦点を当てています。RIS を戦略的に配置することで、カバレッジ率を向上させ、ユーザーの位置に関係なくシームレスな接続を提供できます。第2のタスクは、リソース利用効率を向上させるために、ユーザーの需要に基づいて RIS のビームフォーミング方向を最適化することを目的としています。リアルタイムのトラフィック予測を活用することで、RIS ユニットの構成を動的に調整し、静的および移動シナリオのユーザーに効率的でターゲットを絞った通信を提供します。最後に、第3のタスクは、適応的な RIS ビームフォーミングを通じて、モバイルユーザーのユーザー体験品質 (Quality of Experience, QoE) を最適化するという課題に取り組んでいます。このタスクは2つの部分に分かれています。第1の部分では、VR (仮

想現実) シナリオに焦点を当て、RIS を使用してビームフォーミングを動的に調整し、VR 環境内を移動するユーザーの高い QoE を維持します。第 2 の部分では、IoRT (Internet of Robotic Things) シナリオに焦点を当て、ロボットデバイスが複雑な環境を移動する際に信頼性の高い通信と効果的な制御を確保するために RIS を使用します。

ABSTRACT

As a new paradigm for 6G communications, reconfigurable intelligent surface (RIS) has admirable properties that enable the dynamic control of electromagnetic waves, thereby attracting significant attention from both industry and academia. Moreover, the user-centric network highlights the personalized allocation of network resources to meet the requirements of each individual mobile device, which sheds light on future mobile transmission and the corresponding service delivery. Due to this characteristic, RIS is expected to play a crucial role in the evolution of user-centric 6G network systems. However, tailoring RIS into these systems to meet user requirements is still an open challenge. Therefore, this dissertation aims to provide a vision of realizing user-centric 6G network with RIS, specifically focusing on how to provide customizable and sustainable communication for a user-centric 6G.

In this dissertation, three major tasks are proposed on the various RIS-assisted wireless communication scenarios. The first task focuses on optimizing RIS deployment to maximize network coverage and ensure a consistent user experience across various environments. By strategically placing RISs, we can enhance coverage rate and provide seamless connectivity to users regardless of their locations. The second task aims at optimizing RIS beamforming directions based on user demands to enhance resource utilization efficiency. By leveraging real-time traffic prediction, RIS units can dynamically adjust their configurations to match user needs, providing efficient and targeted communication for users in static and mobile scenarios. Finally, the third task addresses the challenge of user mobility by optimizing Quality of Experience (QoE) for mobile users through adaptive RIS beamforming. This task is divided into two parts. The first part focuses on virtual reality (VR) scenarios, where RIS is used to dynamically adjust beamforming to

maintain high QoE for users moving within VR environments. The second part focuses on the Internet of Robotic Things (IoRT) scenarios, where RIS is employed to ensure reliable communication and effective control of robotic devices as they navigate through complex environments.

論文審査結果の要旨

本研究では、室内環境において再構成可能なインテリジェントサーフェス (RIS) を配置し、ユーザ中心の6G無線通信ネットワークを構築する方法を探求した。ネットワーク構築のために、(1) RISの最適配置によるネットワークカバレッジの最大化、(2) ユーザのニーズに応じたビームフォーミング最適化によるリソース利用効率の向上、(3) ユーザの位置追跡による高品質な無線通信サービスの提供、の3つのステップを設定した。

第一ステップでは、RISの配置最適化に注目し、通信エリアの拡大とユーザ体験の向上を目指した。多スケール空間探索 (MSS) アルゴリズムを提案し、大規模なRISの配置と協調ビームフォーミングの最適化を実施した。また、階層型近距離コードブックとビームトレーニング手法を開発し、受信信号強度を最大化した。シミュレーション結果より、提案手法はネットワークカバレッジと受信信号強度を向上させることが確認された。

第二ステップでは、トラフィック予測と強化学習を活用し、RISのビーム方向を動的に調整する手法を導入した。LSTMネットワークを用いたユーザーニーズの予測と、DDPGアルゴリズムによるRISの位相調整最適化により、QoE (Quality of Experience) の向上を実現した。

第三ステップでは、移動ユーザ向けに複数のRISを活用したミリ波無線通信システムを提案した。RISを用いてミリ波通信のパスロスと遅延を低減し、ユーザの位置精度を向上させることで通信品質を向上させた。VRシナリオでは、最大尤度推定 (MLE) によるユーザ位置推定と、その情報を活用したビームフォーミング最適化を行い、通信遅延の低減を達成した。さらに、IoRT (Internet of Robotic Things) システムにおいて、RISを用いた統合センシング・コンピューティング・コミュニケーション (ISCC) システムを構築し、ブロック座標降下法 (BCD) と交互最適化 (AO) を組み合わせた手法で、計算速度、通信速度、センシング精度の向上を達成した。

本研究を通じて、RISを活用した6G無線通信におけるユーザ体験の向上、ネットワークカバレッジの最適化、リソース利用効率の向上、移動通信の性能改善の可能性を検証した。シミュレーション結果より、RISはQoE向上とシステム遅延低減に貢献し、VRやIoRTなどの応用にも適用可能であることが示された。本研究の成果は、RISの商用化に向けた理論的・実用的貢献を果たすものである。したがって、本論文は博士 (工学) 学位を授与する資格があると認定された。