

이동 차량 환경에서 기하학적 RIS 반사요소 그룹화를 통한 저복잡도 RIS 반사 패턴 최적화 기법

안지훈, 이종학, 배석현, 장현빈, 김채영, 정수민*
금오공과대학교

aj03041@naver.com, sumin.jeong@kumoh.ac.kr

Low-Complexity Optimization Algorithm of RIS Reflection Patterns Based on Geometric Grouping in Mobile Communication Systems

Jihun An, Jonghak Lee, Seokhyeon Bae, Hyunbin Jang, Chaeyoung Kim

and Sumin Jeong *

Kumoh National Institute of Technology.

요약

본 논문은 단일 사용자 환경에서 PDD 알고리즘을 기반으로 RIS 반사 소자 그룹화(Grouping) 기반 저복잡도 RIS 반사 패턴 최적화 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 그룹화 내 RIS 반사 요소의 수에 따른 평균 수신 전력과 계산 복잡도를 정량적으로 비교하며, 이를 통해 제안하는 저복잡도 RIS 최적화 알고리즘의 실용성과 효율성을 검증한다.

I. 서론

차세대 무선 통신 시스템에서는 급증하는 트래픽과 빠르게 변화하는 채널 환경에 대응하기 위해 지능형 반사 표면(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)의 활용이 제안되어 오고 있다 [1]. RIS는 저비용 수동 반사 소자들을 활용해 무선 채널을 능동적으로 제어하는 기술로 차세대 무선 통신의 핵심 기술로 주목받으나, 대규모 소자 제어에 의한 계산 복잡도와 실시간 최적화 한계는 여전히 주요 과제로 남아 있다 [2].

논문 [1]의 저자들은 효율적인 저복잡도 최적화 기법의 필요성을 강조하며 논문 [2]의 저자들은 대규모 RIS 환경에서 복잡도 부담이 통신 성능 향상의 걸림돌이 될 수 있음을 언급하였다. 논문 [3]의 저자들은 이동 통신 환경에서 빠르고 적응적인 RIS 반사 패턴 제어 기술이 필요함을 강조하였다. 논문 [3]에서는 이를 해결하기 위해 병렬 처리를 활용한 PDD (Penalty Dual Decomposition) 알고리즘을 통해 계산 복잡도를 줄인 RIS 반사 패턴 최적화 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서는 PDD 기반 저복잡도 최적화 프레임워크를 활용한 RIS 소자 그룹화 기반 RIS 반사 패턴 최적화 알고리즘을 제안한다. 해당 알고리즘의 계산 복잡도와 최적화 성능 사이의 상충 관계를 소개하며 최소 획득 가능한 최적화 성능에 대한 벤치마크를 제공한다.

II. 제안하는 논문

II-1. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 단일 사용자를 R 개의 요소를 가지는 RIS 기반 무선 통신 시스템을 보여준다. 송신 단말기 (AP)는 M 개의 안테나가 장비되어 있고 사

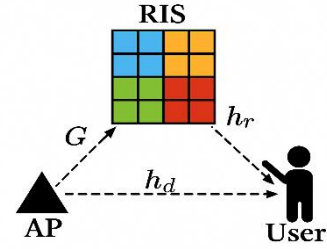


그림 1. RIS 기반 무선 통신 시스템의 구조

용자의 단말기에는 단일 안테나가 장비되어 있다. 따라서 사용자 단말기에서 수신된 신호는 다음과 같다:

$$\mathbf{y} = (\mathbf{h}_r^H \mathbf{\Theta} \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H) \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{h}_r \in \mathbb{C}^{R \times 1}$ 는 RIS와 사용자 간의 채널, $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{R \times M}$ 는 RIS와 AP 사이의 채널, $\mathbf{h}_d \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 AP와 사용자간의 직접 경로 채널, $\mathbf{\Theta} = \text{diag}\{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_R\}$ 은 RIS 반사 계수 행렬, $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 AP에서 송신하는 송신 심볼 벡터 그리고 $\mathbf{n} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ 은 가산 복소 백색 가우시안 잡음을 의미한다. RIS 반사 요소는 양자화된 위상으로 진폭 손실없는 이상적인 제어가 가능하며 반사 계수는 다음과 같이 정의된다:

$$\phi_n = e^{j\theta_n}, \text{ for } \theta_n \in \left\{0, \frac{2\pi}{L}, \frac{4\pi}{L}, \dots, \frac{2\pi(L-1)}{L}\right\}. \quad (2)$$

II-2. 그룹화 기반 제안하는 RIS 반사 패턴 최적화 알고리즘

RIS 소자의 수가 증가함에 따라 최적화 변수와 계산 복잡도도 기하급수적으로 증가한다. 이를 해결하기 위해 RIS 소자들을 공간적 위치에 따라 그룹화하고, 각 그룹은 동일한 반사 위상을 갖도록 설정하였다:

$$\theta_n = \theta_{g(n)}, \text{ for } n \in G_{(n)} \quad (3)$$

여기서 $G_{(n)}$ 은 RIS 요소 n 이 속한 그룹, $\theta_{g(n)}$ 은 해당 그룹의 공통 위상값을 의미한다. 이를 통해 최적화 RIS

반사 요소의 수는 기존 R 개에서 그룹 수 G 개로 감소하며, 계산 복잡도 감소 효과를 볼 수 있다.

그룹화된 RIS 에 대해 라그랑주 승수와 벌점 항을 활용해 반복적으로 최적화를 수행하는 PDD 알고리즘을 적용, 그룹별 반사 위상을 최적화한다:

$$\mathbf{v}^{\text{opt}} = \begin{cases} \mathbf{c}, & \text{for } \|\mathbf{c}\|_2 \leq \sqrt{N} \\ \frac{\mathbf{c}}{\|\mathbf{c}\|_2} \sqrt{N}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{c} 는 벌점 항과 라그랑주 승수를 반영한 중간 계산 결과로 RIS 반사 위상 벡터를 에너지 제약 하에 최적화 한다. $\|\cdot\|_2$ 은 유클리디안 놈을 의미한다.

시스템 성능 평가는 신호 대 잡음 비(SIR)과 달성가능한 속도(Achievable Rate)를 통해 수행한다:

$$SNR = \frac{|\mathbf{h}_r^H \mathbf{\Theta} \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H| \mathbf{w}|^2}{\sigma^2} \quad (5)$$

$$R = \log_2(1 + SNR) \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 전송 프리코딩 벡터를 의미한다.

III. 시뮬레이션 성능 분석

본 세션에서는 PDD 기반 다양한 그룹화 방식에서의 획득가능한 전송률을 실험적으로 평가하고 요구되는 계산 복잡도를 정량적으로 분석한다. 이를 위해 단일 사용자 환경을 가정, AP-RIS-User 간 경로 손실 및 채널 변수를 논문[3]의 조건과 동일하게 설정하였다.

그림 2 는 획득가능한 전송률 성능을 나타낸다. 그룹 당 RIS 반사 요소의 수가 적을수록 획득가능한 성능은 전체 RIS 를 개별적으로 최적화할 때와 비교하여 유사하게 도출된다. 그룹의 수가 적을수록 성능 열화가 발생하나 RIS 를 사용하지 않을 때 성능과 비교하여 유의미한 이득을 얻을 있다.

그림 3 은 RIS 요소 수(N)에 따른 계산 복잡도를 보인다. N 증가에 따라 전체 요소를 최적화하는 PDD 최적화 방법을 기준하였을 때, 그룹화를 통해 계산 복잡도를 유의미하게 줄일 수 있음을 볼 수 있다. 이를 통해 주어진 목표 조건에 따라 달성 가능한 전송률과 계산 복잡도 상충 관계를 고려하여 그룹 구성을 선택할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 이동 통신 시스템을 위한 PDD 및 RIS 그룹화 기반 저복잡도 RIS 반사 패턴 최적화 알고리즘을 제안하였다. 제안한 최적화 기법은 RIS 요소의 수를 크게 줄여 계산 복잡도를 효과적으로 감소시키면서도, 통신 성능 저하를 최소화하는 성과를 보였다. 시뮬레이션 결과는 그룹 안 요소 수 대비 얻을 수 있는 성능에 대한 벤치마크를 제공한다. 이는 실시간 처리와 하드웨어 구현에 필요한 정보를 제공하며, 차세대 무선 통신 시스템에서 RIS 기술의 실용적 적용 가능성을 높인다. 향후 연구에서는 다중 사용자 환경과 다양한 RIS 배열 구조에서 제안 기법의 확장성과 적용 가능성을 추가로 검토할 계획이다.

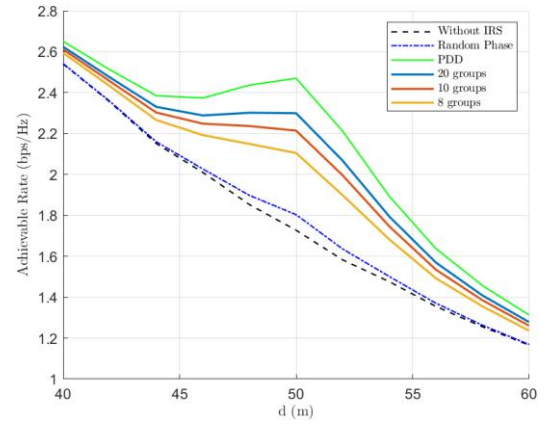


그림 2. 거리 대비 달성가능한 전송률 성능

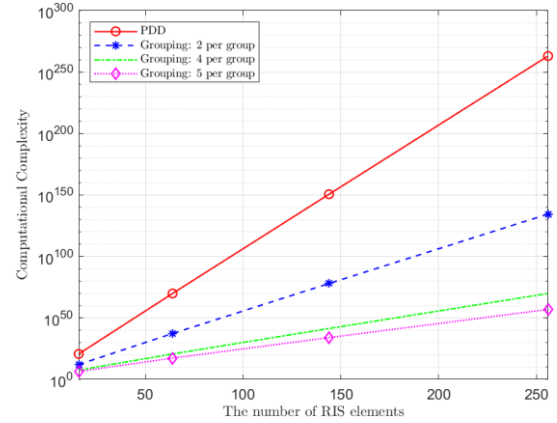


그림 3. RIS 반사 요소 수에 따른 계산 복잡도 요구량

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2020-II201612).

참 고 문 헌

- [1] Q. Wu et al., "Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: A Tutorial," IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 5, pp. 3313-3351, May 2021.
- [2] M. Di Renzo et al., "Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and Road Ahead," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, no. 11, pp. 2450-2525, Nov. 2020.
- [3] M.-M. Zhao, Q. Wu, M.-J. Zhao, and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Networks: Two-Timescale Beamforming Optimization," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 1, pp. 2-17, Jan. 2021.
- [4] X. Long, Y. Zhao, H. Wu, and C.-Z. Xu, "Deep Reinforcement Learning for Integrated Sensing and Communication in RIS-Assisted 6G V2X System," IEEE Internet of Things Journal, vol. 11, no. 24, pp. 39834-39849, 2024.