

6G를 위한 지능형 반사 표면 기반 전송률-분할 다중 접속: 구조 및 연구 동향

박희재, 송승엽, 박래혁

서울과학기술대학교 컴퓨터공학과

{prkhj98, thdtmdduqdhk, lhpark}@seoultech.ac.kr

Reconfigurable Intelligent Surface-assisted Rate-Splitting Multiple Access for 6G: Architecture and Research Trends

Heejae Park, Seungyeop Song, Laihyuk Park

Department of Computer Science and Engineering
Seoul National University of Science and Technology

요약

전송률-분할 다중 접속(RSMA, Rate-Splitting Multiple Access)과 지능형 반사 표면(RIS, Reconfigurable Intelligent Surface)은 6세대 이동통신(6G)의 높은 전송률을 달성하기 위한 유망한 기술로 주목받고 있다. 본 논문은 RSMA와 RIS의 구조 및 최신 연구 동향을 알아보았으며 향후 연구 방향에 대해 논하였다.

I. 서론

전송률-분할 다중 접속(RSMA, Rate-Splitting Multiple Access)은 6세대 이동통신(6G)의 높은 전송률을 달성하기 위한 유망한 기술로 주목받고 있다. RSMA는 유연하게 간섭을 제어함으로써 신호의 전달 효율을 높일 수 있지만 6G는 높은 주파수 대역을 사용하기 때문에 높은 경로 감쇠와 장애물에 의한 차단 등의 문제를 겪는다. 이를 해결하기 위해 지능형 반사 표면(RIS, Reconfigurable Intelligent Surface)이 활용될 수 있다. RIS를 활용하여 신호를 반사시켜 Virtual Line of Sight(LoS) 경로를 생성한다면 장애물의 영향을 줄여 RSMA의 성능을 높일 수 있게 된다. 이로 인해 최근에는 RSMA와 RIS를 함께 사용하는 연구가 진행되고 있다. 본 논문은 RIS와 RSMA의 구조 및 RIS 기반 RSMA 통신 기법 연구 동향에 대해 조사하였다.

II. 본론

A. RIS 구조

RIS는 다수의 수동 반사 소자로 이루어진 2차원 메타 표면체로, 각 수동 반사 소자의 위상을 인위적으로 조절하여 입사되는 전파의 방향, 진폭, 위상 등을 제어할 수 있다 [1]. 또한 기존의 중계기와는 달리 Radio Frequency(RF) Chain이 요구되지 않기 때문에 저전력 및 저비용의 특징을 가진다 [2].

B. RSMA 구조

그림 1은 전송률-분할 다중 접속의 구조를 보여준다. 각 사용자의 메시지는 공통 메시지와 개인 메시지로 분할되며(사용자 1의 경우 $W_{c,1}$, $W_{p,1}$), 모든 사용자의 공통 메시지는 하나의 공통 스트림(s_0)으로 인코딩되고, 각 사용자의 개인 메시지는 독립적인 스트림(s_1, s_2)으로 인코딩된다 [3]. 각 수신기에서는 공통 스트림이 순차적 간섭 제거(SIC,

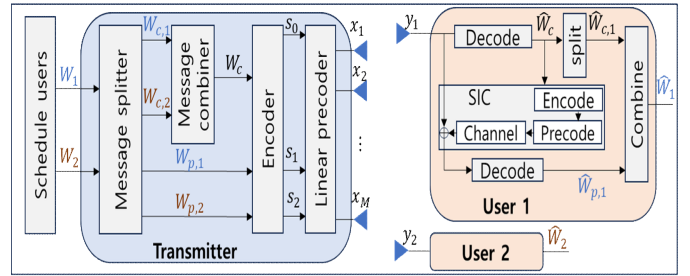


그림 1. 전송률 분할 다중 접속 구조

Fig 1. The architecture of RSMA

Successive Interference Cancellation)를 통해 디코딩되며, 이를 제거한 후에 개인 스트림이 디코딩된다.

앞서 언급했듯이 RIS는 RF Chain이 없기 때문에 정확한 채널 추정 어렵다. 하지만 RSMA는 송신기가 불완전한 채널 정보를 가지더라도 견고하게 작동하므로 RIS를 보완하기 위해 RSMA를 활용할 수 있다 [3].

C. RIS 기반 RSMA 통신 기법 연구 동향

연구 [4]에서는 RIS 기반 RSMA 다중링크 환경에서 에너지 효율성을 최대화하는 연구를 진행했다. 저자들은 송신기의 송신 전력, Quality of Service(QoS), 에너지 하베스팅 제약을 고려한 최적화 문제를 정의하였고, 최적화 변수는 기지국의 Beamforming Matrix, RIS의 위상, 공통 메시지 전송률, 에너지 하베스팅 비율로 설정했다. Non-Convex 문제를 해결하기 위해 심층 강화학습 프레임워크인 Proximal Policy Optimization(PPO)를 사용했다.

연구 [5]는 기지국과 사용자 사이에 장애물이 없는 업링크 환경에서 합산 정보 전달율을 최대화하였다. 기지국의 Beamforming Matrix, 송신 전력, RIS의 위상을 최적화하기 위해 심층 강화학습 프레임워크인 Deep Deterministic Policy Gradient(DDPG)를 활용한 알고리즘을 제안하였다. 저자들은 Safe Action Shaping Process를 통해 모델의 결과를 조정하는

작업을 거쳐 기존의 DDPG 모델보다 우수한 성능을 보였다.

연구 [6]에서는 다수의 RIS가 존재하는 네트워크에서 에너지 효율성을 최대화하는 연구를 진행했다. 기지국의 Beamforming Matrix와 RIS의 위상을 최적화하기 위해 Successive Convex Approximation (SCA) 알고리즘을 활용하였다. 저자들은 RSMA가 비직교 다중 접속 (NOMA, Non-Orthogonal Multiple Access) 와 직교 주파수 분할 다중 접속 (OFDMA, Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)에 비해 더 높은 에너지 효율을 달성한다는 것을 보였다.

연구 [7]은 기지국의 Beamforming Matrix와 RIS의 위상을 최적화함으로써 Minimum User Rate을 최대화하는 문제를 정의했다. Non-Convex 문제를 해결하기 위해 Block Coordinate Descent (BCD) 알고리즘을 제안하였고, 이는 기존의 Semi-Definite Relaxation (SDR) 알고리즘과 달리 공통 메시지 벡터의 공분산 행렬의 Rank가 1이어야 한다는 제약이 없다.

III. 결론

RSMA와 RIS는 6G의 높은 전송률과 효율적인 자원 할당을 달성하기 위한 주요 후보 기술이다. RSMA는 유연하게 간섭을 제어함으로써 신호의 전달 효율을 높일 수 있고, RIS를 RSMA 네트워크에 사용하면 장애물의 영향을 줄여 RSMA의 성능을 높일 수 있게 된다. 본 논문에서는 RIS와 RSMA의 구조 및 RIS 기반 RSMA 통신 기법의 최신 연구 동향들에 대해 살펴보았으며, 향후 연구에서는 RSMA 기반 네트워크에서 무인 항공기를 활용하여 RIS의 위치를 최적화하는 연구를 진행해볼 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원 사업의 연구결과로 수행되었음 (No. 2021R1F1A1062881, IITP-2024-RS-2022-00156353)

참고 문헌

[1] H. Park, T. -H. Nguyen and L. Park, "Federated Deep Learning for RIS-assisted UAV-enabled Wireless Communications," 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, pp. 831-833, Nov. 2022.

[2] T. -H. Nguyen, H. Park and L. Park, "Recent Studies on Deep Reinforcement Learning in RIS-UAV Communication Networks," 2023 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC), Bali, Indonesia, pp. 378-381, Mar. 2023.

[3] H. Li, Y. Mao, O. Dizdar and B. Clerckx, "Rate-Splitting Multiple Access for 6G-Part III: Interplay With Reconfigurable Intelligent Surfaces," in IEEE Communications Letters, vol. 26, no. 10, pp. 2242-2246, Oct. 2022.

[4] R. Zhang, K. Xiong, Y. Lu, P. Fan, D. W. K. Ng and K. B. Letaief, "Energy Efficiency Maximization in RIS-Assisted SWIPT Networks With RSMA: A PPO-Based Approach," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 41, no. 5, pp. 1413-1430, May

2023.

[5] D. -T. Hua, Q. T. Do, N. -N. Dao, T. -V. Nguyen, D. Shumeye Lakew and S. Cho, "Learning-Based Reconfigurable-Intelligent-Surface-Aided Rate-Splitting Multiple Access Networks," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 20, pp. 17603-17619, Oct. 2023.

[6] Z. Yang, J. Shi, Z. Li, M. Chen, W. Xu and M. Shikh-Bahaei, "Energy Efficient Rate Splitting Multiple Access (RSMA) with Reconfigurable Intelligent Surface," 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Dublin, Ireland, pp. 1-6, Jul. 2020.

[7] T. Zhang and S. Mao, "Joint Beamforming Design in Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Rate Splitting Networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications.