

불완전한 채널 상태 정보 환경에서 동시 전송 및 반사 재구성 가능 지능형 표면 지원 무선 다중 접속에 관한 조사

이동현, 송치현, 오준석, 원동욱, 허동현, 홍성훈, 노승환*, 조성래

중앙대학교, *공주대학교

{dhlee, chsong jsch, dwwon, dhur, shong}@uclab.re.kr, *rosh@kongju.ac.kr srcho@cau.ac.kr

An Investigation of Simultaneously Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surfaces aided Multiple Access systems Under Imperfect Channel State Information

Lee Donghyun, Song Chihyun, Oh Junsuk, Won Dongwook, Hur Donghyeon,

Hong Seonghun, Soong Hwan Ro*, Sungrae Cho

Chung-Ang Univ., *Kongju National Univ.

요약

재구성 가능한 지능형 표면(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS) 지원 무선 다중 접속 시스템에서는 RIS가 감지 또는 데이터 처리 기능 없이 수동 요소로 구성되기 때문에 제어 기지국(BS)과 같이 동일 위치에 있지 않은 장치를 통해 채널을 간접적으로 추정해야 함. 또한, 동시 전송 및 반사(Simultaneously Transmitting and Reflecting, STAR) RIS는 기존 RIS보다 더 넓은 적용 범위와 더 나은 유연성을 제공하지만, RIS와 STAR-RIS 모두 기지국-RIS 링크와 RIS-사용자 링크의 소규모 페이딩이 발생하는 이중 페이딩 효과로 인해 채널 추정이 더욱 어렵고, 수신 전력이 떨어짐. 따라서 본 논문에서는 채널의 통계적 특성을 이용하여 SINR(Signal-to-Interference-Noise Ratio)을 도출하고, 에르고딕 속도의 대략적인 분석식과 성능을 분석한 연구들을 조사한다.

I. 서론

동시 전송 및 반사(Simultaneously Transmitting and Reflecting, STAR) 재구성 가능한 지능형 표면(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)은 메타표면 요소들을 배열한 것으로 무선 다중접속 시스템의 커버리지에 배치되어 무선 신호를 수신받아 나누어 표면 공간의 양쪽으로 통과 및 반사시켜 시스템의 추가적인 공간 자유도를 제공한다 [1]. STAR의 기본 신호 모델을 기반으로 STAR-RIS의 각 요소의 작동 방식에 따라 시간 전환(Time Switching, TS), 모드 전환(Mode Switching, MS) 및 에너지 분할(Energy Splitting, ES)의 세 가지 프로토콜로 나뉘어진다 [2]. 이러한 RIS는 기지국-RIS 링크와 RIS-사용자 링크의 소규모 페이딩이 발생하는 이중 페이딩 효과로 인해 채널 추정이 더욱 어렵고, 수신 전력이 떨어진다 [3]. 따라서 본 논문에서는 채널의 통계적 특성을 이용하여 SINR(Signal-to-Interference-Noise Ratio)을 도출하고, 에르고딕 속도의 대략적인 분석식과 성능을 분석한 연구들을 조사한다.

본 논문의 본문에서는 무선 다중 접속 시스템에서 채널의 통계적 특성을 이용하여 에르고딕 속도의 대략적인 분석식과 성능을 분석한 연구들을 조사하여 분석하며, 결론에서는 미래의 연구방향을 토론하며 한계점을 분석하여 마무리한다.

II. 본론

[4]의 저자들은 STAR-RIS 지원 비직교 다중 접속(Non-orthogonal Multiple Access, NOMA) 다운링크 통신 시스템을 고려했다. [4]에서 링

크는 기지국에서 사용자까지의 직접 링크와 기지국에서 STAR-RIS, STAR-RIS에서 사용자까지의 이중 페이딩 효과가 나타나는 두 개의 링크를 고려했다. 채널의 통계적 특성을 고려하여 SINR 통계표현을 활용하여 에르고딕 속도의 대략적인 분석식을 도출하고 점근적 성능을 분석했다. 시뮬레이션 결과 기지국의 안테나 수가 많을수록, RIS 요소 수가 많을수록 에르고딕 속도가 증가했으며, TS, MS 및 ES의 세 가지 프로토콜 중 RIS를 가장 유연하게 최적화할 수 있는 ES의 성능이 좋게 나타났다.

[5]의 저자들은 [4]와 같은 시스템을 기반으로 사용자 전력 할당 및 RIS 요소의 진폭 계수에 대한 공동 최적화 설계를 다뤘다. 채널의 통계적 특성을 통해 이론적 에르고딕 속도를 도출하기 위해 근사 표현을 사용했으며, 에르고딕 속도의 상한선을 도출했다. 또한, 에르고딕 속도 최대화하기 위해 전력 할당문제를 다차원 최적화 문제로 공식화하고, 계산 복잡도를 위해 2차원 문제로 치환하여 에르고딕 속도를 최대화했다. 하지만, [5]에서는 STAR-RIS에서 투과를 통해 서비스받는 사용자와 반사를 통해 서비스받는 사용자의 공정성을 보증하지 못한다.

[6]에서는 IoT 장치의 에너지 효율적인 연결을 목표로 후방 산란 통신(Back Scatter Communication, BAC)과 NOMA를 기반으로 시스템이 구성되었다. BAC를 사용하면 후방 산란 노드가 입사 무선 주파수 신호를 반산 및 변조하고 회로 작동을 위한 에너지를 수확할 수 있다. [6]에서는 STAR-RIS의 ES 프로토콜을 채택하여 통계적 채널 분포 기반 후방 산란 노드의 유효 용량을 폐쇄형 표현으로 도출했다. [6]의 시뮬레이션 결과 STAR-RIS 지원 NOMA IoT 시스템에서 STAR-RIS 미지원 시스템에 비해 기지국의 적은 전송 전력으로 에너지 수확 성능을 향상시킬 수 있음

을 보여주었다.

[7]에서 저자들은 안테나 높이를 고려하여 3차원 채널 모델을 활용한 RIS 지원 시스템의 에르고딕 속도를 조사했다. 구체적으로 RIS 지원 시스템을 위한 3차원 통계 채널을 제안했으며 에르고딕 속도의 상한 표현이 다양한 전파 환경에서 추론되었다. 채널 상태와 배치 위치가 용량 향상에 미치는 영향을 정량화하여 시뮬레이션을 통해 RIS 지원 시스템의 효율성과 3차원 구축 전략을 검증했다. 하지만 [7]에서는 전통적인 RIS를 사용하여 RIS 지원 시스템을 검증하여 3차원 STAR-RIS 지원 시스템의 구축 전략은 아직 조사되지 않았다.

III. 결론

본 논문에서는 채널 추정이 어려운 수동형 STAR-RIS 채널의 통계적 특성을 이용하여 SINR 식을 도출하고 에르고딕 속도의 상한 분석한 연구들을 조사했다. 본 논문에서는 전통적인 OMA 및 차세대 다중 접속으로 간주되는 NOMA를 기반으로 분석된 연구뿐만 아니라 차세대 네트워크에서 IoT 장치의 효율적인 연결을 목표로 BAC를 활용한 연구까지 광범위하게 조사되었다. 하지만 비공개 스트림과 공개 스트림을 활용하여 NOMA 및 OMA를 일반적으로 연결하여 공개 스트림 및 RIS와의 시너지를 통해 완전히 새로운 DoF (Degree of Freedom)을 제공할 수 있는 분할 비율 다중 접속(Rate-Splitting Multiple Access)을 활용하는 연구는 아직 초기단계에 있으며 추가적인 연구가 필요해 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

"본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2024-RS-2022-00156353, IITP-2024-RS-2023-00258639)

참고 문헌

- [1] M. Ahmed et al., "A Survey on STAR-RIS: Use Cases, Recent Advances, and Future Research Challenges," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 16, pp. 14689-14711, 15 Aug.15, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3279357.
- [2] X. Mu, Y. Liu, L. Guo, J. Lin and R. Schober, "Simultaneously Transmitting and Reflecting (STAR) RIS Aided Wireless Communications," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 5, pp. 3083-3098, May 2022, doi: 10.1109/TWC.2021.3118225.
- [3] A. L. Swindlehurst, G. Zhou, R. Liu, C. Pan and M. Li, "Channel Estimation With Reconfigurable Intelligent Surfaces? A General Framework," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 110, no. 9, pp. 1312-1338, Sept. 2022, doi: 10.1109/JPROC.2022.3170358.
- [4] B. Zhao, C. Zhang, W. Yi and Y. Liu, "Ergodic Rate Analysis of STAR-RIS Aided NOMA Systems," in *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 10, pp. 2297-2301, Oct. 2022, doi: 10.1109/LCOMM.2022.3194363.
- [5] W. Xu, J. Chen and X. Yu, "Joint Design of Power Allocation and Amplitude Coefficients for Ergodic Rate Optimization in STAR-RIS-Aided NOMA System," in *IEEE Systems Journal*, vol.

17, no. 4, pp. 5452-5463, Dec. 2023, doi: 10.1109/JSYST.2023.3314890.

- [6] S. Basharat, S. A. Hassan, H. Jung, A. Mahmood, Z. Ding and M. Gidlund, "On the Statistical Channel Distribution and Effective Capacity Analysis of STAR-RIS-Assisted BAC-NOMA Systems," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 4675-4690, May 2024, doi: 10.1109/TWC.2023.3321395.
- [7] B. Xu, T. Zhou, X. Tao, T. Xu and Y. Wang, "Ergodic Capacity Analysis for Relay-RIS System Under Three-Dimensional Channel Model," in *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 10, pp. 2292-2296, Oct. 2022, doi: 10.1109/LCOMM.2022.3190295.
- [8] Y. Mao, O. Dizdar, B. Clerckx, R. Schober, P. Popovski and H. V. Poor, "Rate-Splitting Multiple Access: Fundamentals, Survey, and Future Research Trends," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 4, pp. 2073-2126, Fourthquarter 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3191937.