

전송률 분할 다중접속 기반의 무선 자원 관리 기술 동향

김동현, 유병하, 이인호*, 정해준

경희대학교, *한경대학교

dhkim3988@khu.ac.kr, syeon2513@khu.ac.kr, *ihlee@hknu.ac.kr, haejoonjung@khu.ac.kr

A Review on Rate Splitting Multiple Access-based Radio Resource Management

Donghyeon Kim, Byungha You, In-Ho Lee*, Haejoon Jung

Kyung Hee Univ., *Hankyong National Univ.

요약

본 논문에서는 기존 다중접속 기술 대비 채널 추정 오류나 간섭 관리에 있어서 효과적인 전송률 분할 다중접속 기술을 이용한 기계 학습 기반의 무선 자원 관리 기법들에 대한 동향을 논의한다. 다양한 전송률 분할 다중접속 기술들에 대해서 소개하고, 그에 따른 다양한 자원 관리 기법들에 대해서 소개하고 특성과 장점에 대해서 분석한다.

I. 서론

전송률 분할 다중접속 (rate splitting multiple access, RSMA) 기술은 전송률 분할 (rate splitting, RS) 개념을 기반으로 해서 비직교 전송을 가능하게 하고, 6G의 물리계층에서 간섭 관리를 효율적으로 할 수 있다는 점으로 주목받고 있다 [1],[2]. RSMA는 기존의 다중접속 기술들과 달리 메시지를 공유 메시지(common message)와 개인 메시지(private message)로 분할한 이후 메시지들을 중첩 코딩(superposition coding, SC)해서 전송하는 특징을 갖고, 수신자는 순차적 간섭 제거 기법 (successive interference cancellation, SIC) 기법을 통해서 공유 메시지의 스트림을 디코딩하고 자신의 개인 메시지의 스트림을 디코딩해서 자신이 전송했던 메시지를 얻을 수 있다. 위와 같은 SC전송과 SIC 기반의 수신 방식에 의해서 RSMA는 동일한 주파수와 시간 자원을 공유하면서 신호를 송수신 할 수 있고, 메시지의 분할을 사용하는 특성에 의해서 채널 추정 오류에도 높은 강인성(robustness)을 가진다.

위와 같은 장점들을 기반으로 다양한 RSMA의 연구가 시도되고 있다. 특히, RSMA는 메시지 인코딩(encoding)과 프리코딩(preceding) 방식에 따라서 1-layer RS, 2-layer hierarchical RS (2-layer HRS), generalized RS, RS and common message decoding (RS-CMD)와 같은 방식으로 분리된다. 본 논문에서는 다양한 RSMA 기반 전송 기법들 중 가장 많이 이용되고 실용적인 1-layer RS 기술에서 제안된 무선 자원 관리 기법들의 동향에 대해서 살펴본다.

II. 본론

본 논문에서는 다양한 RSMA 기법들 중 가장 활발하게 연구되고 있는 1-layer RS에서 사용되는 무선 자원 관리 기법들을 소개한다. 그림 1에서는 1-layer RS의 송수신기 구조에 대해서 자세히 설명되고, 송신단에서 SC를 사용해서 각 수신자에 대한 메시지의 스트림을 전송하고 수신단에서 1번의 SIC 과정을 수행해 각 사용자가 자신의 메시지를 수신하는 과정을 보여준다. 이 때, 1-layer RS는 송신단에서 사용자들의 메시지를 공유 메시지 1개와 개인 메시지 1개로 분할하고, 수신단에서 단 1번의 SIC 과정만 거치는 낮은 복잡성의 송수신기의 구조를 갖는 동시에 기존 다중접속 기술 대비해서 성능을 크게 향상시킬 수 있어 다양한 무선 자원 관리 기법들에 적용되었다.

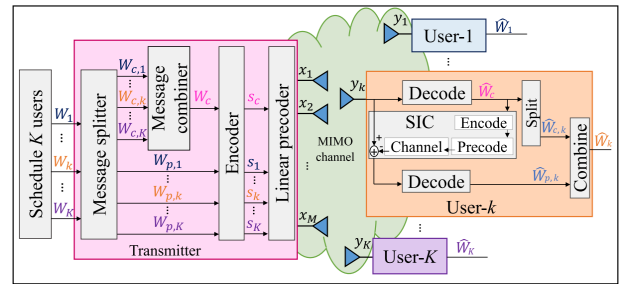


그림 1. M 개의 송신기와 K 명의 사용자가 있는 MISO 1-layer RS의 송수신기 구조 [1]

II-1. 다중 셀 기반의 RSMA

RSMA 기법은 셀 사이에서 RS 기법을 사용해 셀 내 간섭(intra-cell interference) 뿐만 아니라 셀 간 간섭(inter-cell interference)을 부분적으로 디코딩하고 부분적으로 잡음 취급하는 것이 가능하다. 특히, 셀 내 간섭에만 RS 기법을 사용하는 법과 셀 간 간섭에도 동시에 사용하는 기법들을 선택할 수 있고, 셀 간의 조정(coordination) 방식과 협력(cooperation) 방식을 선택할 수 있는 점 때문에 운용의 유용성 측면에서도 큰 장점을 갖는다. [3]과 [4]의 연구들에서는 다중 셀 RSMA 시스템에서 에너지 효율과 주파수 효율을 최대화 할 수 있는 프리코딩 벡터와 송신 전력 최적화 기법이 소개되었다. 해당 연구들을 통해서 RSMA 기술이 기존 공간 분할 다중접속(spatial division multiple access, SDMA)이나 비직교 다중접속(non-orthogonal multiple access, NOMA)에 비해서 더 높은 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

II-2. 물리 계층 보안을 위한 RSMA기반 통신

물리 계층 보안을 강화시키기 위한 방법 중 하나는 원하는 사용자에게만 성공적인 디코딩을 보장하고 도청자(eavesdropper)에게는 데이터의 디코딩을 방지해서 데이터 전송을 하는 법이다. 특히, [5]에서는 1-layer RS에서 공유 스트림 신호가 전송 속도를 향상시키는 것 뿐만 아니라 도청자에게 인위적인 소음으로 간주할 수 있어 물리 계층 보안에서도 유용하다는 것을 보였다. 또한, [6]에서는 잠재적 도청자에게 인공적 잡음을 생성하는 제밍(jamming)을 사용하는 RSMA 기반 통신 기법에 대한 연구를 진행했

참 고 문 헌

고, [7]에서는 협력 RS(cooperative RS)에 대한 연구를 진행했다. 해당 물리 계층 보안 관련 자원 할당 연구들을 통해서 RSMA가 SDMA와 같이 다른 다중접속 기법들에 비해서 보안을 및 전송률을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

II-3. RSMA기반 가시광 통신

400에서 789THz의 가시광 스펙트럼을 사용하는 가시광 통신(visible light communication, VLC)에서 RSMA를 적용하려는 연구가 활발하게 이뤄지고 있다 [8]. 기존 VLC 연구는 여러 발광 다이오드(light emitting diode, LED)들이 여러 사용자에게 동시에 서비스를 제공할 수 있도록 하는 multi user-multiple-input and multiple-output VLC (MU-MIMO VLC)기반으로 활발하게 연구됐으나, 다중 사용자의 간섭의 관리가 주요 병목 현상으로 문제가 되었다. 이러한 문제를 [4] 연구에서 RSMA의 효율적 간섭 관리 기반의 자원 할당의 기법으로 기존의 다중접속 기술들에 비해서 MU-MIMO VLC에서 높은 성능을 달성할 수 있음을 보였다.

II-4. 기계 학습을 활용한 RSMA 기반 통신

RSMA는 간섭 관리 측면에서 기존 다중접속 대비 높은 성능을 달성할 수 있는 이유로 주목받았으나, 공유 스트림의 데이터 전송률과 개인 스트림의 데이터 전송률을 동시에 최적화를 하는 방식 때문에 기존 자원 할당 대비 복잡성이 높은 점이 있다. 따라서, 복잡성 감소와 높은 성능을 동시에 달성하기 위해서 RSMA에서 다양한 기계 학습 기반의 자원 할당 기법들이 소개되었다 [9-11]. [9]와 [10]의 연구들에서는 비지도 학습 방식으로 전력 할당을 학습하는 방법을 소개했고, [11] 연구에서는 강화 학습 기반의 방식으로 최적의 전력 할당을 수행했다. 해당 연구들은 기계 학습 기반의 최적화가 RSMA의 효율적인 간섭 관리를 더 강화해 효과적인 자원 할당을 수행할 수 있는 것을 보였다. 또한, [9]와 [11] 연구들은 채널 추정 오류를 가정을 했고, 기계 학습 방식과 더불어 채널 오류에 강인한 RSMA 기법을 활용해서 추정 오류에 대한 성능의 감소를 최소화 했다.

III. 결 론

본 논문에서는 6G에서 새로운 간섭 관리의 패러다임으로 주목을 받는 RSMA의 자원 할당 기법들에 대해서 소개했다. 특히, 1-layer RS의 경우 다른 RS기법 대비 약간의 성능의 손실이 있으나, 송수신기의 메시지 분할 및 SIC 디코딩의 복잡성을 크게 감소시키는 것이 가능하고, 다른 다중접속 대비 높은 전송률 성능을 갖고, 채널 추정 오류에도 강인함을 보이기 때문에 다양한 자원할당 기법들이 연구되었다. 따라서, 간섭 관리의 중요성이 큰 다중 셀 기반 혹은 VLC 기반의 통신들에서 다양한 연구가 진행되었다. 또한, 메시지 분할하는 방식으로 신호를 전송하는 점에 의해서 도청자에게 혼란을 발생시켜 물리 계층 보안에도 강함을 보였다. 그리고, 간섭 관리의 기능을 더욱 강화시키기 위해서 기계 학습 기반의 최적화로 자원 관리의 성능을 향상 시키려는 시도가 다양하게 이뤄졌다. 위와 같이 RSMA는 강력한 간섭 관리의 장점 때문에 다양한 연구가 이뤄지고 있고, 6G 통신에서 물리계층과 낮은 매체 접근 제어 계층의 설계를 근본적으로 개혁할 것으로 논의된다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2022R1A2C1003388), and in part under the ITRC (Information Technology Research Center) support program (IITP-2021-0-02046).

- [1] 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.
- [2] Y. Mao, B. Clerckx, and V.O., Li, "Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA". J Wireless Com Network, vol. 133,, May 2018..
- [3] F. Xing, S. He, V. C. M. Leung and H. Yin, "Energy Efficiency Optimization for Rate-Splitting Multiple Access-Based Indoor Visible Light Communication Networks," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 40, no. 5, pp. 1706-1720, May 2022.
- [4] S. Tao, H. Yu, Q. Li, Y. Tang and D. Zhang, "One-Layer Rate-Splitting Multiple Access with Benefits over Power-Domain NOMA in Indoor Multi-Cell Visible Light Communication Networks," 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Dublin, Ireland, 2020, pp. 1-7.
- [5] H. Fu, S. Feng, W. Tang and D. W. K. Ng, "Robust Secure Beamforming Design for Two-User Downlink MISO Rate-Splitting Systems," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 12, pp. 8351-8365, Dec. 2020.
- [6] O. Dizdar and B. Clerckx, "Rate Splitting Multiple Access for Multi-Antenna Multi-Carrier Joint Communications and Jamming," 2021 Sensor Signal Processing for Defence Conference (SSPD), Edinburgh, United Kingdom, 2021, pp. 1-5.
- [7] P. Li, M. Chen, Y. Mao, Z. Yang, B. Clerckx and M. Shikh-Bahaei, "Cooperative Rate-Splitting for Secrecy Sum-Rate Enhancement in Multi-antenna Broadcast Channels," 2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, London, UK, 2020.
- [8] S. Naser et al., "Rate-Splitting Multiple Access: Unifying NOMA and SDMA in MISO VLC Channels," in IEEE Open Journal of Vehicular Technology, vol. 1, pp. 393-413, Oct. 2020.
- [9] M. Wu, Z. Wan, Y. Wang, S. Liu and Z. Gao, "Deep Learning-Based Rate-Splitting Multiple Access for Massive MIMO-OFDM Systems With Imperfect CSIT," 2022 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Hangzhou, China, 2022, pp. 1-6.
- [10] Y. Benatia, A. Savard, R. Negrel and E. V. Belmega, "Unsupervised deep learning to solve power allocation problems in cognitive relay networks," 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Seoul, Korea, Republic of, 2022, pp. 331-336.
- [11] N. Q. Hieu, D. T. Hoang, D. Niyato and D. I. Kim, "Optimal Power Allocation for Rate Splitting Communications With Deep Reinforcement Learning," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 12, pp. 2820-2823, Dec. 2021