

무선 통신 자원 효율화에 관한 인공지능 기술 동향

권도현, 윤성환*
울산과학기술원

kwun1105@unist.ac.kr, *shyoon8@unist.ac.kr

A Survey on AI Technologies for Efficient Utilization of Wireless Communication Resources

Dohyun Kwun, Sung Whan Yoon *
Ulsan National Institute of Science and Technology

요약

본 논문은 6G 네트워크에서 무선 통신 자원의 효율적 사용을 위한 기술들을 다룬다. NOMA, 적응형 변조 및 코딩, 동적 스펙트럼 공유 등의 기술을 소개하며, 인공지능(AI)을 활용한 자원 최적화 방법을 강조한다. AI 기반 접근법은 자원 할당의 효율성을 높여 통신 성능을 향상시킨다.

I. 서론

무선 통신의 급속한 발전은 다양한 응용 분야와 서비스에서 요구되는 데이터 전송량과 속도를 크게 증가시켰다. 특히 5G 이후의 차세대 이동통신 기술인 6G는 초고속, 초저지연, 초대용량 네트워크를 목표로 하며, 이전 세대와 비교할 수 없을 정도로 높은 성능을 요구할 것으로 기대된다. 6G는 IoT, 확장현실(XR), 자율주행차, 스마트 시티 등 다양한 혁신적 응용의 급속한 증가로 인해 통신 밀도가 기하급수적으로 증가할 것으로 예상되며, 이로 인해 무선 통신 자원, 특히 주파수와 시간 자원의 효율적인 사용이 중요한 연구 과제가 되고 있다.

제한된 주파수 대역을 사용하는 사용자와 서비스는 지속적으로 증가하고 있으며, 무선 통신 시스템은 더 높은 스펙트럼 효율성을 달성해야 한다. 이에 따라 주파수 재사용, 동적 스펙트럼 할당, 인공지능(AI) 기반 자원 최적화 등 다양한 기술들이 제안되고 있으며, 이러한 기술들은 미래의 6G 네트워크에서 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

본 논문에서는 무선 통신 자원의 효율적인 사용을 위해 제안된 다양한 기술을 소개하고, 자원 관리 전략의 현재 동향과 향후 연구 방향을 논의하고자 한다.

II. 본론

인공지능의 발전으로 인해 무선 통신에서도 인공지능을 활용하는 연구가 이어지고 있다. 본 문단에서는 무선 통신의 효율적인 사용을 위한 기술들과 인공지능으로 개선된 기술들을 소개한다.

A. NOMA

NOMA(non-orthogonal multiple access)[1]는 기존 OMA(Orthogonal Multiple Access) 방식에 대한 한계를 극복하기 위해 개발되었다. OMA는 주파수, 시간 등의

자원을 각각의 사용자에게 독립적으로 할당하여 간섭을 줄이는 방식으로 자원 효율성 면에서 한계가 존재하였다. NOMA는 동일한 시간과 주파수 자원을 사용해 여러 사용자에게 서로 다른 전력 수준으로 신호를 동시에 전송하는 방식이다. 수신 단말에서는 SIC(successive interference cancellation) 기법으로 높은 전력 신호를 제거하고 나머지 신호를 복원한다. 다만 NOMA는 채널 상태 정보(CSI)를 정확하게 알아야 하며 SIC 기술 또한 복잡한 수신기법에 해당한다. 또한 주로 사용자 간 채널 상태 차이가 클 때 효과적이라는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 인공지능 기술이 도입되었는데 [2]는 SIC가 불완전한 상황에서 딥러닝을 활용한 전력 할당 기법을 통해 NOMA 시스템에서의 sum-rate를 극대화하였다. [3]에서는 NOMA 시스템에서 NP-hard에 해당하는 채널 및 전력을 사용자에게 최적으로 할당하는 문제를 해결하기 위해 Attention 기반 신경망을 이용한 심층 강화학습 프레임워크를 제안하였고, 채널 할당 문제를 순차적 의사결정 문제로 변환하여 학습하고, 최적의 채널 할당 및 전력 할당을 도출하였다.

B. Adaptive Modulation and Coding

AMC(Adaptive Modulation and Coding)는 무선 통신 시스템에서 채널 상태에 따라 변조 방식과 코딩 속도를 조정해 데이터 전송 효율을 극대화하고 신뢰성을 높이는 기술이다. 특히, 6G 시대에서는 다양한 채널 환경과 고속 이동성, 다중 사용자 시나리오에서 AMC의 역할이 더욱 중요해질 것이다. 최근에는 인공지능, 특히 강화학습을 활용하여 AMC를 더욱 지능적이고 적응적으로 개선하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 따라, 강화학습을 적용한 AMC 기술들이 제안되고 있으며, 이러한 기술들은 기존의 정적인 AMC 방식보다 훨씬 높은 효율성과 적응성을 제공하고 있다.

[4]에서는 딥러닝 기반의 강화학습 알고리즘을 AMC에 적용한 DRLLA(Deep Reinforcement Learning for

Link Adaptation)를 제안하였다. 이 방법은 기존의 고정된 의사결정 경계에 의존하는 방식과 달리, 다양한 채널 상태를 실시간으로 학습하고 최적의 변조 및 코딩 방식을 결정한다. AWGN, NLOS 등의 다양한 채널 환경에서 DRLLA가 안정적인 성능을 제공하며, 특히 네트워크의 변화에 민감하게 반응하여 데이터 전송률을 높일 수 있다는 점이 특징이다.

[5]에서는 대규모 MIMO 환경에서 AMC를 최적화하기 위해 온라인 딥러닝 알고리즘을 제안하였다. 이 방법은 전통적인 Q-learning 방식과 비교하여 딥러닝을 통해 사용자 속도와 채널 상태의 변화를 예측하여 적응한다. 이를 통해 OLLA(outer loop link adaptation) 방식보다 최대 20%의 사용자 처리량 향상을 달성하였으며, 특히 사용자 간의 이동성이 큰 상황에서도 높은 성능을 유지할 수 있다.

[6]는 Q-learning 기반의 강화학습을 활용하여 5G 네트워크에서 AMC를 최적화하는 방식을 제안하였다. 이 논문은 Q-learning을 통해 채널 품질 지표(CQI)를 바탕으로 최적의 MCS(변조 및 코딩 방식)를 선택하며, 전통적인 고정 테이블 방식과 OLLA 방식보다 향상된 성능을 제공하였다. 특히, 5G 네트워크에서 사용자 이동성으로 인한 빔과 채널 경로의 불일치 문제를 해결하기 위한 새로운 접근 방식을 제안하고, 이를 통해 스펙트럼 효율과 블럭 오류율(BLER)을 최적화하였다.

C. Dynamic Spectrum Sharing

동적 스펙트럼 공유(Dynamic Spectrum Sharing, DSS)는 고정된 주파수 할당 방식을 벗어나, 네트워크 자원을 실시간으로 공유하고 동적으로 할당함으로써 주파수 자원의 활용도를 극대화하는 기술이다. 6G에서 DSS는 초고밀도 네트워크 환경에서 주파수 자원의 효율적인 활용을 위해 필수적인 요소로 떠오르고 있다. DSS는 네트워크의 트래픽 수요에 맞추어 유연하게 스펙트럼을 할당할 수 있으며, 이를 통해 다양한 서비스 간의 상호 간섭을 최소화하면서 자원의 효율성을 극대화할 수 있다.

[7]에서는 인공지능 기술 중 하나인 심층 강화학습(Deep Reinforcement Learning, DRL)을 이용하여 다중 자원 할당 문제를 해결하는 방법을 제안하였다. 이 연구에서는 심층 Q-네트워크(Deep Q-Network, DQN) 및 재귀 신경망 기반 Q-네트워크(Deep Recurrent Q-Network, DRQN)를 사용하여 보상을 극대화하고 충돌을 최소화하는 스펙트럼 공유 알고리즘을 개발하였다. 이러한 알고리즘은 다중 사용자 환경에서 약 30%의 성능 향상을 달성하였으며, 특히 복잡한 통신 환경에서도 안정적인 성능을 보여줬다.

D. RAN Coexistence

[8]에서는 RAN 간의 공존 가능성에 대한 아이디어가 제시되었다. BMR(Blind Modulation Recognition)을 통해 서로 다른 RAN이 서로의 내재된 정보를 인식하면 서로의 통신을 고려하여 공존이 가능할 것이라는 아이디어이다. 서로 다른 RAN이 동일 자원을 효과적으로 공유할 수 있다면, 스펙트럼 효율이 크게 향상될 것이다. 이러한 공존 방식은 AI 기반 간섭 관리 기술과 결합하여, RAN 간의 신호 충돌을 최소화하면서도 각 네트워크의 성능을 유지할 수 있을 것이다.

III. 결론

본 논문에서는 6G 시대의 무선 통신 자원의 효율적 사용을 위한 다양한 기술들과 그에 대한 인공지능 기반 개선 방안 및 새로 제시된 아이디어를 살펴보았다. 6G는 목표를 충족하기 위해 주파수와 시간 자원의 효율적 관

리가 필수적이다. 소개한 기술들은 각각 자원 활용도를 극대화하고 통신 효율을 높이는 데 중요한 역할을 하며, 인공지능의 도입으로 더욱 진화하고 있다. 특히, 심층 강화학습과 같은 AI 기술은 기존의 자원 관리 한계를 극복하고, 더욱 정교하고 적응적인 자원 배분을 가능하게 한다. 향후 연구에서는 기존 기술들의 확장과 더불어, RAN-Coexistence와 같은 기술을 통해 자원 효율이 더욱 높아질 것으로 기대된다. 이를 통해 6G 통신 환경에서 요구되는 고도화된 성능을 달성하는 데 기여할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Institute of Information & Communications Technology Planning & evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2021-0-02201, Federated Learning for Privacy Preserving Video Caching Networks).

참고 문헌

- [1] Y. Saito, et al., "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access," in Veh. Technol. Conf. (VTC Spring), pp. 1-5, Dresden, Germany, Jun. 2013.
- [2] W. Saetan and S. Thipchaksurat, "Power Allocation for Sum Rate Maximization in 5G NOMA System with Imperfect SIC: A Deep Learning Approach," 2019 4th International Conference on Information Technology (InCIT), Bangkok, Thailand, 2019, pp. 195-198.
- [3] C. He, Y. Hu, Y. Chen and B. Zeng, "Joint Power Allocation and Channel Assignment for NOMA With Deep Reinforcement Learning," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 37, no. 10, pp. 2200-2210, Oct. 2019.
- [4] Geiser, F.; Wessel, D.; Hummert, M.; Weber, A.; Wübben, D.; Dekorsy, A.; Viseras, A. DRLLA: Deep Reinforcement Learning for Link Adaptation. *Telecom 2022*, 3, 692-705.
- [5] E. Bobrov, D. Kropotov, H. Lu and D. Zaev, "Massive MIMO Adaptive Modulation and Coding Using Online Deep Learning Algorithm," in IEEE Communications Letters, vol. 26, no. 4, pp. 818-822, April 2022.
- [6] M. P. Mota, D. C. Araujo, F. H. Costa Neto, A. L. F. de Almeida and F. R. Cavalcanti, "Adaptive Modulation and Coding Based on Reinforcement Learning for 5G Networks," 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Waikoloa, HI, USA, 2019
- [7] Dong, L., Qian, Y. & Xing, Y. Dynamic spectrum access and sharing through actor-critic deep reinforcement learning. *J Wireless Com Network* 2022, 48 (2022).
- [8] D. Kurmantayev, D. Kwun, H. Kim and S. W. Yoon, "RiSi: Spectro-temporal RAN-agnostic Modulation Identification for OFDMA Signals," 2024 IEEE 25th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), Perth, Australia, 2024, pp. 202-208