

NOMA 시스템의 과제와 진화: 전통적 해법의 한계를 넘는 AI 기반 접근 고찰

이종혁[°], 서효운
성균대학교

leejonghyuk@skku.edu, hyowoonseo@skku.edu

Challenges and Evolution of NOMA Systems: A Survey on AI-Based Approaches Beyond Traditional Methods

Jonghyuk Lee, Hyowoon Seo
Sungkyunkwan University.

요약

본 논문은 NOMA 시스템이 차세대 통신 환경에서 유망한 다중접속 기술임을 강조하고, 그 실현 과정에서 발생하는 다양한 기술적 과제를 다루었다. 특히 자원 분배와 간섭 제거의 복잡성을 해결하기 위해 AI 기반 최적화 접근이 효과적인 대안이 될 수 있음을 논의했다.

I. 서론

NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access)는 차세대 이동통신 시스템에서 유력한 다중접속 기술로 주목받고 있다. 전통적인 OMA(Orthogonal Multiple Access) 방식이 사용자별로 시간 또는 주파수 자원을 분리하여 사용하는 반면, NOMA는 동일한 무선 자원을 복수의 사용자가 동시에 공유함으로써 신호가 중첩되는 구조를 갖는다. 이러한 특성 덕분에 통신 자원 분할 없이도 효율적인 자원 활용이 가능하며, 동일한 자원대비 더 높은 수용력을 제공한다. 비록 사용자간 간섭이 있으나 NOMA는 연속 간섭 제거(Successive Interference Cancellation) 수신기를 통해 중첩된 신호를 효과적으로 분리할 수 있다. 이는 신호 강도 차이를 기반으로 우선 강한 신호를 복호하고, 그 영향을 제거한 후 약한 신호를 처리하는 방식이다. 이처럼 자원 활용 효율이 높은 NOMA는 통신 자원이 제한적인 차세대 통신에 적합한 기술로 평가받지만, 실제 구현 과정에서는 여전히 해결해야 할 기술적 과제들이 존재한다.

II. 본론

불확실한 채널 상태 정보가 제공되는 상황, 그리고 연속 간섭 제거(SIC) 과정에서 발생하는 복호 오류가 점차 다음 단계 사용자에게 연쇄적으로 전파되는 현상 때문에, 잔여 간섭이 완전히 사라지지 않고 시스템 내부에 고스란히 남아 성능을 저하시키는 일이 빈번히 벌어진다. 초기 단계에서 제거되지 못한 간섭은 채널 추정 오차와 같이 누적되며, 결국 비트 오류율을 급격히 끌어올리고 데이터 전송 속도를 떨어뜨려 전체 셀 용량을 낮춘다. 이러한 문제를 극복하려면 사용자별 수신 신호 세기에 충분한 격차가 존재하도록 정교한 전력 분배를 수행해야 하고, 동시에 서비스 품질 공정성을 해치지 않으려면 복잡한 다목적 최적화를 풀어야 한다.

전력 할당 문제는 다수의 비선형 제약식을 포함하는 고차원 비볼록 형태이므로, 전통적인 폐쇄형 해법으로는 해 공간을 빠르게 탐색하기 어렵다. 뿐만 아니라 고속 이동 환경에서는 채널 상태가 빈번히 변동하므로 실시간으로 전력을 재조정하고 SIC 복호 순서를 재편성해야 하는데, 이 과정이 시스템 계산 복잡도를 기하급수적으로 증가시킨다.

이 같은 문제를 극복하기 위해, 연구자들은 전력 제어, 사용자 클러스터링, 복호 순서 재배치 등 다양한 간섭 완화 기법을 고안해 왔다. 초기에는 수학적 모델링을 기반으로 한 전통적인 최적화 알고리즘들에 의존했으나, 복잡도가 크게 증가하는 실제 채널 조건을 완전히 반영하기에는 한계가 있었다.

최근 인공지능을 활용한 접근이 기존 알고리즘으로는 해결할 수 없었던 복잡한 현상을 최소화하는 돌파구로 각광받기 시작했다. [1]은 다중 에이전트 심층 강화학습 알고리즘을 통해 사용자 간 자원 할당 및 전력 분배를 실시간으로 최적화함으로써 간섭을 효과적으로 억제하고 전체 셀 용량을 크게 향상시킬 수 있음을 입증하였다.

한편 [2]에서는 합성곱 신경망(CNN)을 SIC 수신기에 직접 결합하여, 간섭이 심한 환경에서도 신호 패턴을 스스로 학습하고 복호 성능을 극대화하는 새로운 수신 방식을 제안하였다. 해당 기법은 정형화되지 않은 간섭 환경에서도 높은 정확도의 복호가 가능하게 해주며, SIC 과정에서 발생하는 오류 전파 문제를 완화시키는 데에도 긍정적인 영향을 미친다. 이와 같은 AI 기반 수신 기법은 채널 상태 정보가 불완전하거나 실시간으로 변하는 채널 상태에 빠르게 대응하여 계산 복잡도에 대해 전통적 한계를 상당부분 해결할 수 있었다.

III. 결론

AI 기반 접근은 여전히 일반화의 한계, 학습 안정성, 계산 지연 및 오버헤드와 같은 해결해야 할 기술적

과제들을 안고 있지만, 그 잠재력만큼은 분명하다. 특히, 통신 환경이 점점 더 복잡해지고 실시간 대응의 중요성이 커지는 상황에서, AI는 기존 방법론으로는 탈성하기 어려운 수준의 자율적 자원 관리와 고도화된 수신 전략을 가능하게 함으로써, NOMA 시스템의 실현 가능성을 한층 끌어올릴 수 있는 유망한 방향으로 주목받고 있다.

NOMA는 채널 상태의 차이와 전력 제어 기술을 활용하여, 동일 통신 자원을 다중 사용자에게 효율적으로 분배하는 것을 핵심 원리를 기반으로 한다. 이러한 구조적 특징은 네트워크의 전체 용량을 향상시키며, 셀 가장자리나 전파 환경이 열악한 사용자들에게도 상대적으로 안정적인 통신 서비스를 제공할 수 있게 해준다. 더욱이, 단말 밀도가 극단적으로 높고, 자원 제약이 심각한 환경 예를 들어 위성 통신, UAV 기반 네트워크, 또는 해상 및 재난 상황과 같은 특수 시나리오에서는 이러한 NOMA의 장점이 더욱 극대화된다.[3][4]

무엇보다, 기하급수적으로 증가하는 연결 요구와 초저지연, 초고신뢰 통신이 요구되는 6G 초연결 시대에는, 주파수 및 자원 활용의 효율성이 그 어느 때보다 중요해질 것이다. 이러한 미래 지향적 통신 환경에 대응하기 위해서는, 기존의 고정된 자원 분배 방식에서 벗어나, 환경 변화에 능동적으로 반응하고 자율적으로 최적화를 수행할 수 있는 AI 기반 접근이 필수불가결한 요소로 자리잡게 될 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단을 통해 과학기술정보통신부의 「한-핀란드 공동연구사업」의 지원을 받아 수행되었음(RS-2024-00464570)

참 고 문 헌

- [1] S. Wang, T. Lv and X. Zhang, "Multi-Agent Reinforcement Learning-Based User Pairing in Multi-Carrier NOMA Systems," 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops
- [2] L. Chuan, C. Qing and L. Xianxu, "Uplink NOMA signal transmission with convolutional neural networks approach," in Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 31, no. 5, pp. 890–898, Oct. 2020
- [3] H. Shiri, H. Seo, J. Park and M. Bennis, "Attention-based communication and control for multi-UAV path planning," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 11, no. 7, pp. 1409–1413, Jul., 2022
- [4] I. Baek, H. Seo and W. Choi, "Predicting Link Failures With Online Meta-Learning Under Time-Varying Blockage Dynamics," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 13, no. 12, pp. 3688–3692, Dec. 2024,