

Cell-Free mMIMO 시스템의 DRL 기반 최적화 알고리즘에 관한 연구 동향

송치현, 이동현, 오준석, 허동현, 서정택*, 경연웅**, 조성래

{chsong, dhlee, jsch, dhur}@uclab.re.kr, seojt@gachon.ac.kr, ywkyung@kongju.ac.kr, srcho@cau.ac.kr

Study on DRL based Optimization Algorithm for Cell-Free Massive MIMO System

Chihyun Song, Donghyun Lee, Junsuk Oh,

Donghyeon Hur, Jungtaek Seo*, Yeunwoong Kyung**, and Sungrae Cho

Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University

*Department of Computer Engineering, Gachon University

** Division of Information & Communication Engineering, Kongju University

요약

Cell-Free mMIMO는 셀의 경계가 존재하지 않으며 커버리지 영역 내의 매우 많은 수의 AP가 분산되어 있는 시스템으로 많은 수의 AP를 통해 동일 시간 및 주파수 자원을 사용하여 사용자에게 서비스를 제공하는 기술임. 이때 기지국에는 하나 이상의 안테나가 존재하며 다량의 AP 안테나가 존재할 경우 channel hardening 및 favorable propagation 효과를 통해 수신기에서의 신호 처리에 의한 간섭제거, 선택도우 페이딩 완화. 셀 경계에 위치한 사용자에 대한 균일한 서비스 보장이 가능한 기술임. 그러나 Cell-Free mMIMO는 파일럿 할당, AP-UE 연결성 관리, 빔포밍 최적화, 전력 할당 등 고려해야 할 자원들이 많으며 본 논문에서는 Cell-Free mMIMO 환경에서 최적 성능을 달성하기 위해서 DRL 기반 최적화 기법에 관한 연구 동향을 조사하였음.

I. 서론

Cell-Free mMIMO 시스템은 셀의 경계를 구분짓지 않고 커버리지 영역 내에 많은 수의 AP가 분포되어 channel hardening과 favorable propagation 효과를 통해 간단하게 상향링크의 프리코딩 및 하향링크의 결합 벡터의 신호 처리가 가능하며 높은 처리량, 신뢰성 및 에너지 효율성을 제공할 수 있는 기술임. 모든 AP는 backhaul 네트워크와 연결되어 있는 CPU를 통해 채널 상태를 주고 받으며 TDD 프로토콜로 동일 시간-주파수 자원 상에서 모든 사용자를 서비스함[1]. 하나의 AP가 사용자와 통신하는 것이 아닌 여러 기지국이 동시에 서비스를 지원함으로써 다양한 장점이 존재하지만, 많은 수의 사용자가 존재하는 경우 및 RIS, UAV, 위성 등 다양한 토폴로지를 고려해야 하는 경우 기존의 셀룰러 네트워크에 비해 ergodic achievable rate을 공식화하기는 매우 어려움. 또한, 이러한 복잡한 시스템의 경우 수식의 특성으로 인해 전통적인 convex optimization 적용이 어려워 heuristic 알고리즘 또는 기계학습, 강화학습에 의한 최적화 기법에 관한 연구가 많이 진행되고 있음. 따라서 본 논문에서는 Cell-Free mMIMO 환경에서 DRL 기반 최적화 알고리즘에 대한 연구 동향 조사 및 각각의 시스템에서의 제약조건 위배 문제 및 강화학습 기법에 대해 조사함.

II. 본론

무선 네트워크는 AP의 수 및 사용자 수에 따라 증가하는 셀 간 간섭에 의해 셀룰러 네트워크에서 성능이 제한됨에 따라, 간섭에 대한 처리와 추가적인 다이버시티를 가지는 CF mMIMO로 패러다임이 변하고 있음[2]. Cell-Free Massive MIMO 시스템의 최적화는 대표적으로 Pilot

Contamination을 줄이기 위한 파일럿 할당 및 AP-UE 연결성 관리, 간섭 제어 및 커버리지 증대를 위한 빔포밍 및 전력 할당 최적화 등이 있음. 파일럿 할당 및 연결성 관리는 대표적인 조합 최적화 문제로 Greedy[3], Tabu search[4], Graph Coloring[5] 등의 최적화 기법이 제안되었음. 그러나 이러한 규칙 기반 기법은 솔루션 집합이 매우 크며, 채널 상태가 변화하면 다시 계산해야 한다는 단점이 있음. [6]에서는 기존의 Whale Swarm Optimization 기반의 AP-UE 연결성 관리 기법을 제안함. WOA의 여러 에이전트를 활용하여 서비스되는 모든 사용자의 협력 클러스터를 탐색하고 강화학습을 통해 각 에이전트의 검색 효율성을 향상시킴. 시뮬레이션 결과는 제안 기법이 기존 기법 대비 시스템 성능을 증가시킴을 보임. [7]에서는 많은 사용자에게 낮은 복잡성으로 동시에 서비스를 제공하기 위해 고전적인 파일럿 할당 기법을 사용하는 것은 어렵기 때문에 확장 가능하고 분산된 파일럿 할당 기법을 제안함. 파일럿 할당을 다중 에이전트 DRL로 공식화하여, Pilot Contamination의 영향을 줄이기 위한 2단계 계층 학습 알고리즘을 개발하였으며 이는 먼저 각 에이전트가 파일럿 할당을 학습하며, 그 다음 분산 방식으로 가장 적절한 할당 정책을 자동으로 결정하는 구조임. 시뮬레이션 결과는 제안 알고리즘이 스펙트럼 효율 측면에서 더 좋은 성능을 보임. 빔포밍 및 전력 할당 최적화는 bisection 기법[1], fractional programming[7], ADMM[8] 등이 제안되었음. 그러나 대부분의 최적화 문제는 non convex 형태를 가지며 이는 convex relaxation을 통해 해결함. 그러나 RIS, NOMA, RSMA, UAV 등 시스템 복잡성이 추가될 경우 relaxation 기법을 적용하는 것은 매우 어려움[9]. 이러한 복잡성은 채널 추정에 따른 목적함수의 변경에 의한 것이며 [10]에서는

RIS-NOMA 지원 Cell-Free 환경에서의 RIS 위상, NOMA의 사용자 연결, 전력 할당의 공동 최적화를 DDPG 기법을 적용하여 해결함. 시뮬레이션 결과는 공동 최적화가 하향링크 속도를 개선함을 보임. 이러한 DRL 기반 최적화는 일반적으로 제약조건을 위반할 경우 보상을 0으로 설정하여 위반하는 경우를 최소화하도록 학습을 진행함. 하지만 이는 학습 속도를 느리게 하거나 수렴을 늦추는 경향이 있음. [11]에서는 제약조건 위반 문제를 액션을 정규화하거나 라그랑지안으로 변형하여 Penalty Method를 적용하여 해결하였음. 시뮬레이션 결과는 제안된 알고리즘이 QoS 제약 조건을 충족하면서 에너지 효율 측면에서 다른 벤치마크 알고리즘보다 성능이 뛰어날 수 있음을 보여줌.

III. 결론

본 논문에서는 Cell-Free mMIMO 환경에서 최적 성능을 달성하기 위해서 DRL 기반 최적화 기법에 관한 연구 동향을 조사하였음. 파일럿 할당, 사용자 연결성, 빔포밍, 전력 할당 최적화 등의 주제에 대해 DRL 기법 적용 방법 등을 알아보았으며 이는 기존 기법 대비 학습 시간 및 컴퓨팅 자원을 많이 요구하지만 실시간 계산 복잡성 감소 및 시스템 성능 증가를 보임.

ACKNOWLEDGMENT

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과와 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행되었음”
(IITP-2024-RS-2022-00156353, No. 2021-0-00493, 5G Massive 차세대 사이버공격 기반기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson and T. L. Marzetta, "Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, March 2017, doi: 10.1109/TWC.2017.2655515.
- [2] G. Interdonato, E. Björnson, H. Quoc Ngo, P. Frenger and E. G. Larsson, "Ubiquitous cell-free massive MIMO communications", *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2019, no. 1, pp. 197, Aug. 2019.
- [3] Y. Zhang, H. Cao, P. Zhong, C. Qi and L. Yang, "Location-Based Greedy Pilot Assignment for Cell-Free Massive MIMO Systems," 2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2018, pp. 392-396, doi: 10.1109/CompComm.2018.8780756.
- [4] H. Liu, J. Zhang, S. Jin and B. Ai, "Graph Coloring Based Pilot Assignment for Cell-Free Massive MIMO Systems," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 8, pp. 9180-9184, Aug. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3000496.
- [5] H. Liu, J. Zhang, X. Zhang, A. Kurniawan, T. Juhana and B. Ai, "Tabu-Search-Based Pilot Assignment for Cell-Free Massive MIMO Systems," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 2, pp. 2286-2290, Feb. 2020, doi: 10.1109/TVT.2019.2956217.
- [6] J. Jiang, J. Wang, H. Chu, Q. Gao and J. Zhang, "Whale Swarm Reinforcement Learning Based Dynamic Cooperation Clustering Method for Cell-Free Massive MIMO Systems," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 3, pp. 4114-4118, March 2023, doi: 10.1109/TVT.2022.3222756.
- [7] M. Rahmani, M. J. Dehghani, P. Xiao, M. Bashar and M. Debbah, "Multi-Agent Reinforcement Learning-Based Pilot Assignment for Cell-Free Massive MIMO Systems," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 120492-120502, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3221935.
- [8] W. Hao et al., "Max-Min Security Energy Efficiency Optimization For RIS-Aided Cell-Free Networks," *ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications, Rome, Italy, 2023*, pp. 5358-5363, doi: 10.1109/ICC45041.2023.10279092.
- [9] S. Chakraborty, Ö. T. Demir, E. Björnson and P. Giselsson, "Efficient Downlink Power Allocation Algorithms for Cell-Free Massive MIMO Systems," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 168-186, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.3044280.
- [10] X. -T. Dang, H. V. Nguyen and O. -S. Shin, "Optimization of IRS-NOMA-Assisted Cell-Free Massive MIMO Systems Using Deep Reinforcement Learning," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 94402-94414, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3310283.
- [11] Zhang, Q.; Zhu, L.; Chen, Y.; Jiang, S. Constrained DRL for Energy Efficiency Optimization in RSMA-Based Integrated Satellite Terrestrial Network. *Sensors* 2023, 23, 7859. <https://doi.org/10.3390/s23187859>