

Cell-Free Massive MIMO 에서의 자원 할당 및 사용자 스케줄링 기법 동향

최성진, 이동현, 오준석, 김가현, 조성래
중앙대학교 컴퓨터공학과

{sjchoi, dhlee, jsch, ghkim}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

A Survey on Resource Allocation and User Scheduling Techniques in Cell-Free Massive MIMO

Seongjin Choi, Donghyun Lee, Junsuk Oh, Gahyun Kim, and Sungrae Cho
Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University

요 약

본 논문은 Cell-Free Massive MIMO(CF-mMIMO) 시스템에서의 자원 할당 및 사용자 스케줄링 기법을 세 가지 범주로 분류하여 분석하였다. 파일럿 할당 및 간섭 최소화, 사용자 스케줄링 및 클러스터링, 전력 제어 최적화 분야에서의 대표 연구들을 소개하고 각 기법의 구조와 성능 개선 효과를 비교하였다.

I. 서론

차세대 무선 통신 시스템에서는 급증하는 사용자 수요와 데이터 트래픽을 효과적으로 처리하면서 광범위한 서비스 영역과 초신뢰성, 초저지연을 동시에 만족시키는 네트워크 구조가 요구된다. 이러한 요구에 부합하는 기술로 Cell-Free Massive MIMO (CF-mMIMO) 가 주목받고 있다. CF-mMIMO 는 수백 개 이상의 분산된 Access Point (AP) 가 협력하여 셀 경계 없이 사용자들에게 동일한 시간-주파수 자원 상에서 서비스를 제공하는 아키텍처이다 [1].

CF-mMIMO 는 cell-less 구조를 통해 기존에 방식에서 발생하던 셀 경계에서의 신호 품질 저하 및 간섭 문제를 극복하며, cell-edge 사용자들에게도 균일한 서비스 품질을 제공하고, 전반적인 스펙트럼 및 에너지 효율을 향상시킬 수 있다. 특히 user-centric CF 구조는 각 사용자가 주변의 일부 AP 클러스터에게만 서비스를 받도록 하여 scalability, 간섭 제어, 연산 부담 감소 등의 이점을 동시에 제공한다 [2].

무선 네트워크의 복잡한 자원 관리 문제를 해결하기 위해 강화학습 및 딥러닝 기반의 지능형 기법과 [3] 분산 최적화 알고리즘도 연구되고 있다 [5]. 특히 강화학습 기반의 지능형 기법이 주목받고 있다. 사용자 QoE 를 고려한 스케줄링 및 품질 최적화 기법[6], 차량 네트워크에서 강화학습 기반 적응형 스트리밍 기법[7], 다수의 에이전트를 활용한 분산 제어 구조[8] 등이 있다.

본 논문에서는 위와 같은 배경을 바탕으로, Cell-Free Massive MIMO 환경에서 자원 할당 및 사용자 스케줄링 기법의 최신 연구들을 체계적으로 분류하고 분석한다. 이를 통해 향후 CF-mMIMO 기반 무선 네트워크 설계를 위한 기술적 통찰과 연구 방향을 제시하고자 한다.

II. 본론

II-1. 파일럿 할당 및 간섭 최소화

CF-mMIMO 시스템에서는 파일럿의 수보다 사용자의 수가 많을 때가 많아 파일럿 재사용이 불가피하다. 이로 인해 발생하는 Pilot Contamination 은 채널 추정 정확도를 낮추고 SINR 저하 및 시스템 용량 제한을 초래한다.

[3]의 저자는 DNN 기반 통합 자원 제어 방식을 제안한다. CNN 모델을 사용해서 사용자의 위치 및 채널 통계를 입력으로 받아 전력 제어 및 파일럿 할당을 동시에 수행하고, Multi-task loss 를 설계하여 두가지를 동시에 학습한다. 이 방식은 지도 학습 없이도 높은 성능을 보이며 계산 복잡도를 감소시켰다.

[4]의 저자는 사용자 간 간섭을 고려한 weighted graph 를 구성하고, 간섭 유사도가 높은 사용자 간 파일럿이 중복되지 않도록 Max-k-Cut 문제로 모델링한다. 제안된 기법은 Heuristic 기반 알고리즘을 통해 간단한 구조로 성능을 개선시켰다.

II-2. 사용자 스케줄링 및 클러스터링

CF-mMIMO 시스템에서는 모든 access point (AP) 가 모든 사용자를 동시에 서빙하면 fronthaul 의 과부하, 비효율적인 자원 사용 및 높은 계산 복잡도가 발생한다. 사용자와 AP 간 동적 연결을 효율적으로 관리하려면 스케줄링 및 클러스터링 최적화가 필수적이다.

[5]의 저자는 사용자와 AP 간 연결 상태를 DU-based 와 CU-based 의 두 가지 모델로 설계했는데, Block Coordinate Descent 와 Fractional Programming 을 사용해 각 노드별 자원 할당을 최적화했다. 이 방식은 중앙 네트워크에서 모든 정보를 수집하지 않아도 QoS 기반 사용자 스케줄링이 가능하다는 장점이 있다.

III-3. 전력 제어

CF-mMIMO 시스템에서 발생하는 간섭이 다수 사용자 간의 전력 균형을 무너뜨릴 수 있다. 특히 UAV 나

URLLC의 사용자의 경우 latency와 reliability 제약으로 인해 고정적인 전력 제어 정책이 불충분하다.

[9]의 저자는 finite blocklength 모델을 기반으로 rate 하한선을 제시한다. 이는 UAV 사용자와 지상 사용자 간의 채널 차이를 반영하는 방식으로 모델링하고, 전력 제어 문제를 SCO-ICBA, SCO-IIA 기법으로 근사화하여 최적화한다.

[10]의 저자는 사용자 간 간섭 관계에 따라 사용자를 그룹화하며, 각 그룹별 전력 및 주파수 자원을 비중첩 할당한다. 그 후 SCA를 활용해 총 전송률을 극대화 시켰다.

III. 결론

본 논문에서는 CF-mMIMO 시스템에서 자원 할당 및 사용자 스케줄링 문제를 해결하기 위한 연구들을 분류 및 분석하였다.

[11]의 저자는 사용자 이동성을 고려한 CF-mMIMO의 실제 적용을 위한 핵심 과제로 예측 기반 안테나 설계, 분산 제어 구조의 필요성 등을 강조하였으며, 이를 차세대 이동통신 환경에서 실현 가능한 방향으로 제시하였다.

향후 연구에서는 단순 알고리즘 성능 개선을 넘어 실제 네트워크 환경에서 적용 가능한 경량화, 분산화 및 자율화된 자원 제어 방식의 개발이 필요할 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2022-00156353, 50% / IITP-2025-RS-2023-00258639, 50%)

참 고 문 헌

- [1] S. Elhoushy, M. Ibrahim and W. Hamouda, "Cell-Free Massive MIMO: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 1, pp. 492-523, Firstquarter 2022.
- [2] H. A. Ammar, R. Adve, S. Shahbazpanahi, G. Boudreau and K. V. Srinivas, "User-Centric Cell-Free Massive MIMO Networks: A Survey of Opportunities, Challenges and Solutions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 1, pp. 611-652, Firstquarter 2022.
- [3] M. Usman Khan, E. Testi, M. Chiani and E. Paolini, "Joint Power Control and Pilot Assignment in Cell-Free Massive MIMO Using Deep Learning," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 5260-5275, 2024.
- [4] W. Zeng, Y. He, B. Li and S. Wang, "Pilot Assignment for Cell Free Massive MIMO Systems Using a Weighted Graphic Framework," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 6, pp. 6190-6194, June 2021.
- [5] H. A. Ammar, R. Adve, S. Shahbazpanahi, G. Boudreau and K. V. Srinivas, "Distributed Resource Allocation Optimization for User-Centric Cell-Free MIMO Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 5, pp. 3099-3115, May 2022.
- [6] M. Choi, J. Kim and J. Moon, "Wireless Video Caching and Dynamic Streaming Under Differentiated Quality Requirements," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 6, pp. 1245-1257, June 2018.
- [7] W. J. Yun, D. Kwon, M. Choi, J. Kim, G. Caire and A. F. Molisch, "Quality-Aware Deep Reinforcement Learning for Streaming in Infrastructure-Assisted Connected Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 2, pp. 2002-2017, Feb. 2022.
- [8] W. J. Yun, S. Park, J. Kim, M. Shin, S. Jung, D. A. Mohaisen, J. Kim., "Cooperative Multiagent Deep Reinforcement Learning for Reliable Surveillance via Autonomous Multi-UAV Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 10, pp. 7086-7096, Oct. 2022.
- [9] M. Elwekeil, A. Zappone and S. Buzzi, "Power Control in Cell-Free Massive MIMO Networks for UAVs URLLC Under the Finite Blocklength Regime," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 2, pp. 1126-1140, Feb. 2023.
- [10] J. Denis and M. Assaad, "Improving Cell-Free Massive MIMO Networks Performance: A User Scheduling Approach," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 11, pp. 7360-7374, Nov. 2021.
- [11] J. Zheng, Z. Zhang, H. Du, D. Niyato, B. Ai, M. Debbah, and K. B. Letaief., "Mobile Cell-Free Massive MIMO: Challenges, Solutions, and Future Directions," *IEEE Wireless Communications*, vol. 31, no. 3, pp. 140-147, June 2024.