

# Cell-Free Massive MIMO의 Pilot Contamination에 관한 연구 동향 조사

송치현, 이동현, 오준석, 허동현, 백정엽, 김의직\*, 조성래

중앙대학교, \*한림대학교

{chsong, dhlee, jsch, dhhur}@uclab.re.kr, jpaek@cau.ac.kr, \*ejkim32@hallym.ac.kr, srcho@cau.ac.kr,

## A Study on Pilot Contamination in Cell-Free Massive MIMO

Chihyun Song, Donghyun Lee, Junsuk Oh, Donghyeon Hur,

Jeongyeup Paek, Euijik Kim\*, and Sungrae Cho

Chung-Ang Univ., \*Hallym University

### 요약

Cell-Free Massive MIMO는 매우 많은 수의 AP가 같은 시간 및 주파수 자원을 사용하여 사용자에게 서비스를 제공하는 기술임. 이를 통해 웨도우 페이딩을 줄임으로써 간섭 제어와 셀 경계에 위치한 사용자에게 대한 균일한 서비스 보장하며 더 높은 커버리지 확률을 제공함. 그러나 CF mMIMO 시스템은 사용자가 많고 사용 가능한 파일럿의 수가 적을 때, 일부 사용자가 동일한 파일럿을 사용하게 되어 파일럿 오염(Pilot contamination 현상을 겪으며, 채널 추정의 정확도가 낮아 서비스 품질이 저하됨. 본 논문에서는 이러한 파일럿 오염 현상을 해결하기 위한 Cell-Free Massive MIMO 연구의 최신 동향을 조사함.

### I. 서론

다수의 AP(access point)가 동일한 시간, 주파수 자원에서 다수의 사용자에게 동시에 서비스를 제공하는 CF mMIMO는 더 높은 공정성, 신뢰성 및 주파수 효율성을 제공할 수 있는 기술이다. AP가 광범위한 지역에 분산 배치되어 훨씬 적은 수의 사용자에게 서비스를 제공함. 셀룰러 네트워크와 다르게 셀의 경계가 존재하지 않으며 사용자와 기지국의 일대일 통신이 아닌 여러 기지국이 동시에 사용자에게 서비스를 지원함으로써 간섭 관리를 용이하게 하며 셀룰러 시스템에 비해 기지국과 거리가 먼 사용자도 주변의 다른 기지국이 서비스를 지원해줌으로써 기존의 방식에 비해 공정성 측면에서도 뛰어난 기술임[1]. 모든 AP는 fronthaul 링크를 통해 CPU와 연결되어 서비스 지원에 필요한 정보를 교환하며, CPU에서 모든 사용자와 기지국 간 채널 추정을 통해 채널 정보를 얻음. 이에 CF mMIMO는 셀룰러 네트워크 이후의 차세대 네트워크 인프라로서 6G 통신에서 많은 연구가 진행되고 있음. 그러나 사용자 서비스할 AP를 결정하는 user association 문제, 파일럿 오염 문제, 프론트홀 제약 문제 등 해결할 문제가 남아 있음. 특히, 파일럿 오염 문제는 이전의 massive MIMO에서부터 많이 연구되어왔으나 다항 시간 내에 최적 솔루션을 찾는 것은 어려운 문제임. 따라서 본 논문에서는 Cell-Free mMIMO 시스템에서 파일럿 오염에 관한 최신 연구 동향을 조사하였음.

### 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]. 이는 저복잡도, 높은 처리량, 초신뢰성 및 저지연을 특징으로 하는 6G 환경에서 중요한 구성요소가 될 가능성이 있으며, MIMO와 같이 Channel

Hardening과 Favor Propagation으로 인해 높은 스펙트럼 효율성을 얻음과 동시에 셀 경계의 사용자에게 대한 다수 AP의 서비스 지원을 통해 공정성 또한 제공함. 하지만 사용자 수가 많아질수록 CPU에 가해지는 부하가 커지고 동시에 파일럿 오염의 영향이 커져 Scalable 가능성은 최근 Cell-Free 시스템에서 많은 연구가 진행되고 있음. 기존의 massive MIMO 환경에서는 [3],[4]과 같이 pilot 신호와 data 신호 전력 할당의 동시 최적화 및 프리 코딩을 통해 파일럿 오염을 제거하는 데 초점을 두었음. [3]에서 저자들은 상향 링크 MIMO 시스템에서 파일럿 및 데이터 신호의 전력 할당 알고리즘을 제안하였음. 이는 파일럿 시퀀스의 최적 길이, 불완전한 채널 추정에 의한 성능 저하를 고려하여 전력 최적값을 도출하였으며 데이터 신호의 전력만 최적화하는 것이 아닌 데이터 신호 및 파일럿 신호의 공동 최적화가 더 나은 성능을 보임을 증명하였음. massive MIMO 시스템에서 지상 사용자와 UAV가 공존하는 네트워크 시스템의 경우 UAV와 AP 사이의 LoS 채널의 존재로 인해 커버리지 범위가 늘어남. 이에 [5]에서는 커버리지 범위 증가에 따라 증가하는 파일럿 오염의 영향에 대해 조사하고 AP와 UAV의 각도에 따른 LoS 채널을 고려한 저복잡도 분산 파일럿 오염 제거 알고리즘을 제안하였음. CF mMIMO에서는 다중 셀 환경에서 발생하는 셀 간 간섭을 고려하지 않고 [6]과 같이 상향 링크에서의 채널 추정치를 사용하여 데이터 신호를 프리 코딩할 경우 파일럿 오염의 영향을 줄이기 위해 채널 추정의 MSE를 최소화하는 파일럿 전력 할당 알고리즘을 제안함. 이는 sequential convex approximation을 통해 근사하여 해결되며 상향 링크와 다운 링크 모두에 대한 표현식을 제시함. [7]에서 저자들은 CF mMIMO 시스템의 상향 링크에서 매칭 알고리즘을 통한 파일럿 할당과 파일럿 전력 제어 알고리즘을 제안함. 이는 유전 알고리즘을 활용하여 최적의 파일럿 할당을 제안하고 이를 이용하여 채널 추정의 MSE를 최소화하는 헝가리안 알고리즘 기반 파일럿 전력 할

당 기법을 제안하였음. 상향 링크의 신호감지와 하향 링크에서의 프리코딩 설계를 위해 채널 상태 정보의 정확한 추정에는 CF mMIMO 시스템에서 중요한 과제로 볼 수 있음. 이에 따라 [8]에서 저자들은 파일럿 오염에 의한 채널 추정 오류를 최소화하기 위해, 위치 기반 파일럿 할당 알고리즘을 제안하였음. 이는 사용자 수를 기반으로 커버리지 영역을 분할하여, 직교 파일럿 신호를 최대한 활용하는 다항 시간 내에 계산 가능하며, 네트워크 내의 모든 사용자에게 높은 스펙트럼 효율성을 제공하는 것을 보임.

### III. 결론

본 논문에서는 Cell-Free mMIMO 시스템에서 다수의 사용자가 존재할 경우, 일부 사용자가 동일한 파일럿을 사용하게 되어 생기는 파일럿 오염 문제를 해결하기 위한 최신 연구 동향을 조사하였으며, 시스템의 성능을 측정하는 다양한 연구 동향을 조사하였음.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터 육성지원사업 (IITP-2024-RS-2022-00156353) 및 2022년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022R1A4A5034130).

## 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] H. V. Cheng, E. Björnson and E. G. Larsson, "Optimal Pilot and Payload Power Control in Single-Cell Massive MIMO Systems," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, no. 9, pp. 2363-2378, 1 May1, 2017, doi: 10.1109/TSP.2016.2641381.
- [4] A. Ashikhmin and T. Marzetta, "Pilot contamination precoding in multi-cell large scale antenna systems," 2012 *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, Cambridge, MA, USA, 2012, pp. 1137-1141, doi: 10.1109/ISIT.2012.6283031.
- [5] R. Lu, Q. Wu and R. Zhang, "Pilot Decontamination for Massive MIMO Network With UAVs," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 11, pp. 1830-1834, Nov. 2020, doi: 10.1109/LWC.2020.3004914.
- [6] T. C. Mai, H. Q. Ngo, M. Egan and T. Q. Duong, "Pilot Power Control for Cell-Free Massive MIMO," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 11, pp. 11264-11268, Nov. 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2867606.
- [7] Al Ayidh, A., Sambo, Y. & Imran, M.A. Mitigation pilot contamination based on matching technique for uplink cell-free massive MIMO systems. *Sci Rep* 12, 16893 (2022).

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-21241-0>

- [8] Tien Hoa Nguyen, Lam Tung Phan, Trinh Van Chien, An efficient location-based pilot assignment in Cell-Free Massive MIMO, *ICT Express*, vol 9, no 5, pp. 795-802, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.icte.2022.09.005>.