

Cell Free massive MIMO 기술 동향

이민지, 김중헌
고려대학교

lminji@korea.ac.kr, joongheon@korea.ac.kr

Cell Free massive MIMO Technology Trends

Lee Min Ji, Kim Joong Heon
Korea Univ.

요 약

본 논문은 CF-mMIMO (cell free massive multiple input multiple output)의 기술 동향을 정리한다. CF-mMIMO 는 분산된 AP (access point)가 TDD (time division duplex) 상호성을 기반으로 사용자 중심 클러스터를 형성하여 전통적인 셀 경계를 제거함으로써 균일한 서비스 품질과 높은 스펙트럼-에너지 효율을 제공한다. 최근 연구에서는 O-RAN (open radio access network) 구조와의 적합성, 분산 처리의 이점, 동적 프론트홀 라우팅과 양자화, 정확한 채널 추정, 동기 및 상호성 보정, 전력 제어와 스케줄링, 대규모 기기 접속 지원, 하드웨어 비선형 왜곡 보정 등이 주요 과제로 다루어진다. 특히 초밀집 환경에서는 간섭 억제와 함께 조밀화 붕괴를 방지하는 것이 필수적이며, 사용자 중심 DCC (dynamic cooperation clustering)와 MMSE (minimum mean square error) 기반 기법이 유력한 대안으로 제시된다. 본 논문은 이러한 기술적 진전과 산업 구현 사례를 종합하여 CF-mMIMO 실용화를 위한 로드맵을 제시한다.

I. 서론

6G (6th generation mobile network)가 추구하는 어디서나 연결은 1 km²당 10⁸대 수준의 초고밀도 단말 접속을 전제로 하며 이는 자율주행 차량과 대규모 IoT (internet of things) 센서 네트워크 그리고 확장현실 단말을 포함한 방대한 기기가 동시에 접속하는 초밀집 환경을 의미한다. 이러한 조건에서는 단순히 기지국이나 AP (access point)를 촘촘히 배치하는 방식만으로는 요구를 충족하기 어렵고 밀집이 심화될수록 간섭이 지배적인 요인으로 전환되어 이를 제어하지 못하면 네트워크 용량이 붕괴되는 현상이 발생한다. 따라서 간섭을 억제하면서 동시에 협력 전송을 수행할 수 있는 새로운 물리계층 구조의 필요성이 대두된다.

이와 같은 요구에 부합하는 대표적인 기술이 CF-mMIMO (cell free massive multiple input multiple output)로 이는 셀 경계를 제거하고 분산된 AP 들이 사용자별로 동적으로 협력 클러스터를 형성하여 신호를 전달하는 구조를 가진다. 이러한 방식은 셀 경계에서 발생하는 성능 저하와 빈번한 핸드오버 문제를 근본적으로 해소하며 TDD (time division duplex) 기반의 Uplink 채널 추정을 이용해 Downlink 빔포밍을 수행한다. 또한 총 서비스 안테나 수가 동시 전송 스트림 수보다 충분히 많은 과구성을 핵심 원칙으로 하여 간섭 억제와 다중화 이득을 동시에 확보한다. 결과적으로 CF-mMIMO 는 6G 초밀집 네트워크에서 균일한 품질과 높은 효율을 제공할 수 있는 가장 유력한 물리계층 후보로 평가된다.

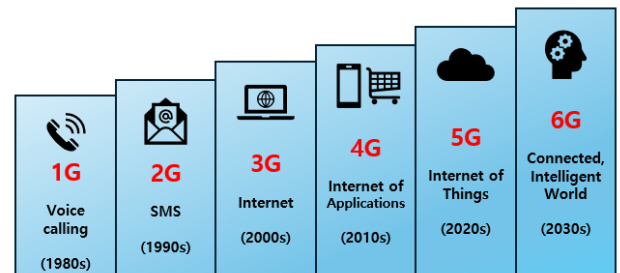


그림 1. 모바일 네트워크의 진화와 패러다임 전환

II. 기술 개요와 구조

CF-mMIMO 는 처음에는 모든 AP 가 모든 사용자를 동시에 처리하는 이상적인 모델에서 출발한다. 하지만 실제로는 이렇게 하면 복잡도가 너무 크기 때문에, 현실에서는 사용자 중심 클러스터링이라는 방법을 쓴다. 즉, 각 사용자는 자기 신호를 잘 받을 수 있는 소수의 AP 만 선택하고, 그 AP 들과만 신호를 주고받는다. 이렇게 하면 불필요한 간섭을 줄이고, 셀 경계 문제도 완화할 수 있다. 신호 처리 방식에는 크게 두 가지가 있다. 하나는 중앙집중형으로 모든 데이터를 한 곳에서 모아 처리하는 방법이고, 다른 하나는 국소 처리형으로 각 클러스터 수준에서 나눠서 처리하는 방법이다. 특히 기기가 아주 많아지는 초밀집 환경에서는 국소 처리 방식이 효율적이다. 이 구조는 최근 주목받는 O-RAN (open radio access network) 표준과도 잘 맞는다. 예를

들어, O-RAN에서는 무선 신호를 처리하는 장치인 O-RU (o ran radio unit)와 그보다 복잡한 처리를 담당하는 장치인 O-DU (o ran distributed unit)를 분리한다. 또, 중앙에서 모든 것을 제어하지 않고 RIC (radio intelligent controller)와 SMO (service management and orchestration)라는 개방형 플랫폼을 통해 유연하게 관리한다. 다만, 아직 O-DU 들 사이의 협력 방법은 표준화가 부족해 개선이 필요하다. 또 하나 중요한 점은 프론트홀 연결 방식이다. 단순히 무선 신호를 그대로 전송하는 것보다, 사용자 정보 비트만 전달하고 부호화, 변조, 빔포밍 같은 나머지는 AP에서 처리하는 방식이 더 효율적이다. 이렇게 하면 전송에 필요한 대역폭을 크게 줄일 수 있다.

III. 초밀집 환경

CF-mMIMO의 강점은 초밀집 환경에서 발휘된다. 여러 AP가 동시에 한 사용자를 도와야 성능이 좋아지기 때문이다. 하지만 기기와 AP가 너무 많아지면 간섭이 잡음보다 더 큰 문제가 되는 구간이 온다. 이 상황을 제대로 제어하지 못하면 네트워크 전체 용량이 무너지는 조밀화 붕괴(densification collapse)가 발생한다. CF-mMIMO는 방향성 빔포밍과 AP 협력 전송을 통해 이 문제를 피할 수 있는 대표적인 기술이다. 반대로, 아직 네트워크 밀집도가 낮은 단계라면 단순히 셀을 더 촘촘히 나누는 것만으로도 효과가 크다. 따라서 환경에 따라 셀 분할과 협력 전송을 병행 설계하는 것이 중요하다.

IV. 산업 구현 사례

산업계에서는 이미 여러 방식으로 CF-mMIMO를 구현하고 있다. 첫 번째로, Radio Stripes (Ericsson)은 안테나, 기저대역 처리, 전송선을 하나의 스트립 형태로 직렬 연결한 구조다. 이 스트립은 양 끝에서 신호를 모아 처리한다. 업링크는 순차적으로 MMSE (minimum mean square error) 알고리즘을 적용해 중앙집중 처리와 동일한 성능을 낸다. 다운링크는 TMMSE (team minimum mean square error)라는 근사 최적 알고리즘을 사용한다. 장점은 프론트홀이 AP 수가 아니라 활성 사용자 수에 비례하므로 전송 요구가 줄어든다는 점이다. 저주파 대역에서는 이더넷 PoE (power over ethernet) 수준의 연결로 충분하지만, 고주파 대역은 광 기반 연결이 필요하다. APU (antenna processing unit)는 스트립에 직렬로 통합된 베이스밴드 칩으로, 안테나 요소 제어와 신호 처리를 담당한다. 공유 커넥터는 전원 공급, 동기화, 데이터 전송 기능을 동시에 제공한다.

두 번째로, pCell (personal cell) 즉 Artemis은 완전한 중앙집중형 CRAN (centralized radio access network) 구조로, 각 사용자에게 개인 전용 빔을 합성해 제공한다. 이 방식은 고대역폭 이득을 달성하지만, 매우 정확한 채널 상태 정보 CSI (channel state information)와 시간 동기화가 필요하다. 특히 이동하는 사용자를 지원하는 것이 가장 큰 과제다. LTE (long term evolution)와 5G NR (5th generation new radio)과 호환성을 유지하기 위해 TDD, Uplink 파일럿, 디지털 프리코딩을 사용한다.

마지막으로, RadioWeaves는 건물 벽이나 가구에 안테나 패널을 아예 내장해, 넓은 개구면을 확보하는 방식이다. 이 구조는 근거리(near-field) 환경에서 극단적 공간 다중화를 실현할 수 있다. CF-mMIMO 이론을 그대로 적용할 수 있지만, 여전히 막대한 데이터 처리량, 분산 동기화, 기기 초기 접속 및 웨이크업 절차, 에너지 효율 문제가 해결 과제로 남아 있다.

V. 결론 및 연구 방향

CF-mMIMO는 셀 경계를 없애고 여러 AP가 협력하며, 충분히 많은 안테나를 사용하는 방식으로 6G 초밀집 환경에서도 안정적인 품질과 높은 효율을 보장할 수 있는 현실적인 해법이다. 기술은 이미 성숙 단계에 도달했으며, 앞으로는 국소 처리와 클러스터 결합, 효율적인 프론트홀 라우팅과 데이터 압축(양자화), 분산 전력 제어가 핵심이 될 것이다. 다만, 아직 남아 있는 과제로는 경제적 및 규제적 장벽과 O-RAN에서의 실제 협력 인터페이스 부족이 있다. 산업계에서는 이미 여러 접근법을 시험하고 있다. 예를 들어, Ericsson의 Radio Stripes, Artemis의 pCell, 그리고 RadioWeaves가 대표적이다. CF-mMIMO는 한 번 네트워크가 구축되면 장기적으로 자산이 쌓이는 구조라 시간이 지날수록 활용 가치가 커질 가능성이 높다. 따라서 연구, 표준화, 실제 배치가 연결되는 지점에서는 프론트홀 연산 최적화, 완벽한 채널 하드닝이 어려운 환경에서의 성능 예측, 운영 절차의 고도화가 우선적으로 필요하다. 이러한 기반이 마련되면 CF-mMIMO는 6G 시대의 핵심 접속 기술로 자리할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] H. Q. Ngo, G. Interdonato, E. G. Larsson, G. Caire, and J. G. Andrews, "Ultradense cell free massive MIMO for 6G: Technical overview and open questions," in *Proc. IEEE*, vol. 112, no. 7, pp. 805–830, July. 2024.
- [2] Ö. T. Demir, E. Björnson, and L. Sanguinetti, "Foundations of User-Centric Cell-Free Massive MIMO," *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 14, nos. 3–4, pp. 162–472, January 2021.
- [3] A. Ali, A. Ijaz, M. Asghar, M. Shafiq, and M. A. Imran, "A survey on cell-free massive MIMO system with hardware impairments," *Physical Communication*, vol. 66, 101969, March 2025.
- [4] M. Ajmal, M. A. A. Sadiq, M. A. Imran, and Q. H. Abbasi, "Cell-free massive multiple-input multiple-output: Challenges and research survey," *ICT Express*, vol. 10, no. 2, pp. 145–156, April 2024.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2022-0-00907, (2세부) AI Bots 협업 플랫폼 및 자기조직 인공지능 기술개발). 본 논문의 교신 저자는 김중헌임.