

Fluid Antenna System 기반 다중접속 기술의 연구 동향

이동현, 오준석, 송치현, 김재민, 김주영, 이승찬, Thanh Phung Truong, 조성래

중앙대학교 컴퓨터공학과

{dhlee, jsch, chsong, jmkim, jykim, sclee, tptruong}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

A Survey on Research Trends in Multiple Access Technology Based on Fluid Antenna Systems

Donghyun Lee, Junsuk Oh, Chihyun Song, Jaemin Kim, Juyoung Kim, Seungchan Lee,

Thanh Phung Truong, and Sungrae Cho

School of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University

요약

본 조사는 Fluid Antenna System (FAS)의 기본 개념과 이를 기반으로 한 다중접속 기법인 fluid antenna multiple access (FAMA)의 연구 동향을 정리한다. FAS는 제한된 공간에서 안테나 위치를 재구성함으로써 공간 페이딩을 활용하고, 복잡한 CSI 기반 프리코딩 없이도 간섭 완화와 성능 향상을 가능하게 한다. 본 조사에서는 FAS/FAMA의 핵심 원리와 성능 분석 결과를 요약하고, 직교다중접속/비직교다중접속 결합, Distributed Artificial Scattering Surfaces 및 셀프리 네트워크, XL-MIMO 확장 사례를 중심으로 최근 연구 흐름을 체계적으로 정리한다.

I. 서론

6G 이동통신은 mMTC, eMBB, URLLC를 동시에 만족해야 하며 [1], 이에 따라 물리계층에서는 대규모 MIMO/XL-MIMO, RIS, non-orthogonal multiple access (NOMA), rate splitting multiple access (RSMA) 등 다양한 기술이 병렬적으로 발전해왔다. 그러나 이들 접근은 공통적으로 (i) 채널상태정보(CSI) 획득 및 피드백 오버헤드, (ii) 고차원 프리코딩 및 자원할당 최적화 복잡도, (iii) 사용자단 간섭 제거 등 부담이 누적되면서 대규모 연결 시나리오에서 확장성의 병목으로 작용한다. Cell-free 및 XL-MIMO와 같이 시스템 스케일이 커질수록 RF chain, 전력 소모, 채널 추정 오버헤드가 장애 요인으로 강조되는 점 또한 같은 맥락이다 [3].

이러한 배경에서 fluid antenna system (FAS)은 안테나 개수 증가나 고도 신호처리 대신, 제한된 공간 내에서 안테나 위치를 가변적으로 선택함으로써 채널 페이딩의 공간적 변동을 적극 활용하는 새로운 자유도 (DoF)를 제공한다. 특히 FAS는 단말 또는 기지국이 방사 소자를 공간적으로 이동(또는 포트 선택)하여 신호 및 간섭의 envelope 변동을 탐색함으로써 성능 이득을 얻는다는 관점에서 정의되며, 이러한 위치-가변성은 추가적인 spatial DoF로 해석된다 [4].

더 나아가 FAS는 다중접속 환경에서 기지국 프리코딩이나 단말의 복잡한 다중사용자 검출 없이, 각 사용자(UE)가 간섭이 깊은 페이딩을 겪는 포트를 선택해 간섭이 자연스럽게 약화되는 공간 위치를 찾는 방식을 가능하게 한다. 이는 fluid antenna multiple access (FAMA)로 정식화되며, 간섭 처리 중심이었던 기존 다중접속 관점을 공간 회피 중심으로 전환한다 [5]. 본 논문은 (1) FAS의 개념 및 모델링 요소를 정리하고, (2) FAMA 및 관련 다중접속 응용 연구들을 범주화하여 정리하며, (3) 대규모 네트워크·초대형 배열 확장 및 향후 연구 과제를 논의한다.

II. Fluid Antenna System의 기본 개념 및 모델링 관점

1) Fluid Antenna의 정의와 구현 관점

FAS는 소프트웨어 제어를 통해 안테나의 위치(또는 형상)를 변화시킬

수 있는 재구성형 안테나 개념을 포괄하며, 액체 기반 안테나 및 RF 픽셀 기반 안테나 등 다양한 구현을 포함한다. position-flexible/shape-flexible 안테나로서의 FAS 정의는 특히 단말/기지국이 제한된 공간에서 방사 소자를 전환하여 페이딩 envelope의 변동을 활용한다는 점을 강조한다 [4].

2) 포트 상관성과 분석의 난점

FAS는 다수의 포트를 제한된 물리 공간에 배치하므로, 포트 간 채널이 강한 공간 상관성을 갖는 것이 일반적이다. 따라서 FAS 성능 분석에서는 독립 페이딩 기반의 단순한 선택 다이버시티 모델이 그대로 적용되기 어렵고, 상관 구조를 반영한 outage/ergodic 성능 분석 및 tractable approximation이 중요 이슈로 부각된다 [6].

3) XL-MIMO 및 공간 비정상성

FAS는 다수의 포트를 제한된 물리 공간에 배치하므로, 포트 간 채널이 강한 공간 상관성을 갖는 것이 일반적이다. 따라서 FAS 성능 분석에서는 “독립 페이딩” 기반의 단순한 선택 다이버시티 모델이 그대로 적용되기 어렵고, 상관 구조를 반영한 outage/ergodic 성능 분석 및 tractable approximation이 중요 이슈로 부각된다 [6].

III. Fluid Antenna 기반 다중접속: FAMA와 결합 연구

1) Fluid Antenna Multiple Access

FAMA의 핵심은 각 UE가 자신의 FAS 포트를 선택하여 수신 SINR을 극대화함으로써, 기지국 측 프리코딩 없이도 다중사용자 간섭을 완화하는 데 있다. 이는 multi-user (MU) MIMO처럼 BS에서 정교한 프리코딩을 설계할 필요가 없고, NOMA처럼 UE에서 간섭 제거 수신기를 전제하지 않는다는 점에서 구조적으로 구별된다 [5].

또한 FAMA는 포트 스위칭 주기에 따라 크게 두 가지로 구분된다. (i) fast FAMA는 심볼 단위로 포트를 바꾸어 간섭 null을 더 적극적으로 탐색하는 형태이며, (ii) slow FAMA는 채널이 변할 때에만 포트를 갱신하여 구현 복잡도를 낮추는 형태이다. 두 방식의 차이는 곧 성능/구현 간 트레이드오프(스위칭 지연/오버헤드 vs 간섭 회피 능력)의 핵심 축으로 해

석된다 [3].

2) 대규모 연결 관점의 의미

FAMA의 흥미로운 지점은, 특정 조건(예: 충분한 산란·무작위화된 채널 조건)이 갖춰질 때 사용자 수 증가가 반드시 간섭 회피를 더 어렵게 만들지 않는다는 관찰이다. 예를 들어, distributed artificial scattering surfaces (DASS) 기반 프레임워크에서 fast FAMA는 사용자 수에 따라 multiplexing gain이 선형적으로 증가하는 경향을 보고하며, UE=100 수준에서도 높은 multiplexing gain이 관찰되었다 [7]. 이는 간섭은 고도화된 프리코딩으로 해결해야 한다는 전통적 전제를 약화시키고, 조건부이긴 하나 공간 선택 기반 간섭 회피가 massive connectivity를 지원하는 또 하나의 축이 될 수 있음을 시사한다.

3) FAS와 기존 OMA/NOMA와의 결합

FAS는 FAMA와 같은 새로운 다중접속뿐 아니라 기존 OMA/NOMA에도 결합되어, 포트 선택 및 전력 할당을 통한 sum-rate 향상을 달성하는 방향으로도 연구되고 있다. 대표적으로 OMA/NOMA 환경에서 최적 포트 선택과 전력 할당을 통해 sum-rate를 최대화하는 설정이 제안되며, 단편형태 해를 통해 비교 가능한 평가 프레임워크가 구축되었다 [8].

특히 주목할 결과는, CSIT가 없는 FAS가 CSIT를 사용하는 최적 TAS를 상회할 수 있음이 수치적으로 관찰된다는 점이다. 이는 FAS가 공간 도메인에서 더 유리한 채널을 선택할 수 있는 자유도를 제공하기 때문이며, 결과적으로 CSIT 획득·피드백 오버헤드가 큰 환경에서 매력적인 대안으로 해석된다 [8].

4) FAS와 기존 OMA/NOMA와의 결합

다중접속 채널(MAC) 관점에서는 FAS-assisted MAC의 용량을 직접 최대화하는 문제 설정이 제안되며, alternating optimization을 통해 성능 개선 및 벤치마크 대비 우수성이 보고된다 [9]. 또한 업링크에서 기지국과 사용자 양단 모두 FAS를 갖는 시나리오로 확장하여, 송신 전력 및 양단 안테나 위치를 공동 최적화해 용량을 극대화하는 연구도 진행되었다. 이때 FAS는 massive connectivity 요구를 더 적은 안테나 및 RF chain으로 만족시키려는 동기에서 출발하며, 페이딩 envelope 변동을 활용하는 추가 DoF로 일관되게 설명된다 [4].

IV. 대규모 네트워크 및 구조 확장

1. DASS 기반 massive connectivity

FAS 연구의 또 다른 축은 RIS를 정교하게 최적화해야 하는 표면이 아니라, 채널을 충분히 무작위화하여 다중접속 조건을 형성하는 분산 산란 구조(DASS)로 재해석하는 방향이다. 이 프레임워크에서는 direct link가 존재하지 않는 경우, BS precoding 최적화가 UE 간 분리(separation)에 본질적으로 도움이 되지 않을 수 있음을 논의하며, 반대로 FAMA가 inter-user interference를 UE 측 포트 선택으로 처리할 수 있음을 강조한다 [7]. 또한 DASS 수 증가가 UE 채널 무작위화를 통해 FAMA의 다중접속 성능을 뒷받침한다는 결론이 제시된다.

2) Cell-free FAMA 네트워크

Cell-free 관점에서는, massive MIMO/XL-MIMO의 RF chain 증가와 채널 추정 오버헤드가 주요 장애 요인이라는 문제의식 아래, 기지국 부담을 줄이기 위한 대안으로 FAS/FAMA가 논의된다. 이는 네트워크가 점점 복잡해질수록 단말의 공간 재구성 능력으로 일부 부담을 이전한다는 설계 철학과 맞닿아 있다 [3].

3) XL-MIMO 및 공간 비정상성

XL-MIMO에서는 사용자마다 배열의 일부만 보이는 visibility region

(VR) 현상이 나타나며, 채널 통계가 배열 전체에서 균일하다는 가정이 깨진다. 이러한 공간 비정상성 하에서 fluid antenna/MA 개념은 VR 정보를 이용한 안테나 할당 및 위치 최적화로 확장될 수 있으며, 이는 FAS가 대규모 배열 환경과 결합될 수 있는 구체적 경로를 제공한다 [9].

V. 결론

FAS는 제한된 물리 공간에서 안테나 위치를 재구성함으로써 페이딩 envelope 변동을 활용하는 추가 DoF를 제공하며, 특히 다중접속 관점에서 FAMA는 BS precoding이나 UE 간섭 제거 수신기에 대한 의존도를 낮추는 새로운 방향을 제시한다. 또한 FAS는 기존 OMA/NOMA에서도 유의미한 성능 향상을 보이며, 특정 조건에서는 CSIT 부재에도 불구하고 CSIT 기반 TAS를 상회할 가능성을 보여 CSI 오버헤드 병목을 완화하는 유망한 기제로 해석된다. 최근에는 DASS, cell-free, XL-MIMO 등으로 확장이 진행되면서, FAS가 단말 수준 기법을 넘어 네트워크 구조 설계 및 다중접속 패러다임 전환과 연결될 수 있음이 드러나고 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2026-RS-2022-00156353, 50% / IITP-2026-RS-2023-00258639, 50%)

참 고 문 헌

- [1] S. Park, H. Baek and J. Kim, "Spatio-Temporal Multi-Metaverse Dynamic Streaming for Hybrid Quantum-Classical Systems," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 32, no. 6, pp. 5279-5294, Dec. 2024.
- [2] 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, Jun. 2018.
- [3] T. Han, Y. Zhu, K.-K. Wong, G. Zheng and H. Shin, "Cell-Free Fluid Antenna Multiple Access Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communication*, vol. 24, no. 9, pp. 7237-7251, Sept. 2025.
- [4] H. Xu, K.-K. Wong, W. K. New, F. R. Ghadi, G. Zhou, R. Murch, C.-B. Chae, Y. Zhu, and S. Jin, "Capacity Maximization for FAS-Assisted Multiple Access Channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 73, no. 7, pp. 4713-4731, Jul. 2025.
- [5] K.-K. Wong, W. K. New, X. Hao, K.-F. Tong and C.-B. Chae, "Fluid Antenna System-Part I: Preliminaries," *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 8, pp. 1919-1923, Aug. 2023.
- [6] H. Zhao and D. Slock, "Analytical Insights Into Outage Probability and Ergodic Capacity of Fluid Antenna Systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 14, no. 5, pp. 1581-1585, May 2025.
- [7] K.-K. Wong, K.-F. Tong and C.-B. Chae, "Fluid Antenna System-Part III: A New Paradigm of Distributed Artificial Scattering Surfaces for Massive Connectivity," *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 8, pp. 1929-1933, Aug. 2023.
- [8] W. K. New, K.-K. Wong, H. Xu, K.-F. Tong, C.-B. Chae and Y. Zhang, "Fluid Antenna System Enhancing Orthogonal and Non-Orthogonal Multiple Access," *IEEE Communications Letters*, vol. 28, no. 1, pp. 218-222, Jan. 2024.
- [9] C. Zhang, J. Wang, L. You, C.-B. Chae and K.-K. Wong, "Fluid XL-MIMO: Multiuser Antenna Allocation Exploiting the Visibility Region Information," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 15, pp. 520-524, 2026.