

MIMO 시스템의 발전과 병목 문제: AI 융합을 통한 6G 대응 가능성 고찰

이종혁*, 서효운
성균대학교

leejonghyuk@skku.edu, hyowoonseo@skku.edu

Evolution and Bottlenecks of MIMO Systems: Exploring AI-Integrated Solutions for 6G

Jonghyuk Lee, Hyowoon Seo
Sungkyunkwan University.

요약

본 논문은 MIMO 기술이 SISO 구조의 한계를 극복하며 MU-MIMO, Massive MIMO로 진화해 온 과정을 고찰하고, 여전히 존재하는 병목 현상을 해결하기 위한 AI 기반 최적화 접근의 가능성을 조망하였다. 특히 MIMO는 단순한 안테나 증설을 넘어 무선 채널을 능동적으로 제어하는 방향으로 발전해왔으며, 6G 시대에는 AI와의 결합을 통해 지능형, 자율형 통신 인프라로 자리매김할 것으로 전망된다.

I. 서론

초기 이동통신 시스템(예: 2G, 3G)은 하드웨어 복잡성과 비용 문제로 인해 대부분 단일 안테나(SISO, Single Input Single Output) 시스템을 사용하는 구조였다. 그러나 SISO 시스템은 다중경로 페이딩(Multipath fading)에 취약하여 데이터 전송 품질 및 신뢰성 저하 문제를 초래했다. 이를 극복하기 위해 여러 안테나를 활용한 MIMO(Multi input Multi Output) 기술이 등장했으며, 이는 공간 다중화(Spatial multiplexing)를 통해 데이터 전송 속도를 획기적으로 증가시키고 공간 다이버시티(Spatial diversity)를 통해 통신 신뢰성을 크게 개선했다.

II. 본론

초기 MIMO 연구는 Rayleigh가 제안한 OFDM과 결합하여 주파수 선택적 페이딩 환경에서 더욱 실용성 있게 발전했으며, 실현 가능성을 입증함으로써 MIMO 기술 상용화에 대한 초석을 마련했다. 한편 Zheng과 Tes는 다중화와 다이버시티 간의 트레이드 오프 최적화 연구를 통해 통신 효율과 연결안정성을 동시에 확보하는 연구를 보이며 상용화를 가속시켰다.

MIMO 기술은 처음엔 하나의 사용자에게 집중하여 데이터 전송 속도와 통신의 안정성을 높이는 데 초점을 맞췄다. 하지만 네트워크 자원의 효율적인 활용과 전체 시스템 성능 향상이 요구되면서, 여러 사용자가 동시에 통신을 할 수 있는 MU-MIMO 방식으로 진화하게 되었다. 이를 효과적으로 구현하기 위해서는 사용자 간 간섭을 최소화할 수 있는 프리코딩 기술과 실시간 채널 상태 정보 확보가 필수 요소로 부각되었으며, 이에 따라 다양한 선형, 비선형 프리코딩 기법이 활발히 연구되었다.

2010년 이후, Marzetta는 Massive MIMO라는 개념을 처음으로 이론적으로 제시하면서, TDD 방식에서 간단한 선형 처리를 통해 고차원의 다중 사용자 통신을 실현할 수 있음을 보였다. 특히 안테나 수가 많아지면 페이딩과 잡음의 영향이 사라진다는 이론적 결과는 대규모 안테나 시스템 연구의 중요한 출발점이 되었다 [1]. 그러나 Massive MIMO 시스템의 구조상 파일럿 오염(pilot contamination) 문제는 더욱 치명적인 문제로 부각됐고 최소화하기 위한 연구가 현재까지도 중요한 연구 주제로 자리잡았다.

최근 MIMO 연구는 단순히 안테나 수를 늘리는 수준을 넘어 공간 자원의 능동적 제어와 환경 중심적 설계를 지향하고 있다. 특히 RIS(Reconfigurable Intelligent Surface)는 벽이나 건물 표면을 반사체로 사용하여 무선 신호의 경로를 능동적으로 제어할 수 있도록 함으로써 무선 환경 자체를 제어 가능한 자원으로 변화시키는 새로운 패러다임을 제시하였다 [2].

이러한 MIMO 기술의 발전에도 불구하고, 다양한 채널 추정 알고리즘과 프리코딩 알고리즘이 지속적으로 연구되었지만 여전히 치명적인 병목 현상이 존재한다. 이 문제를 극복하기 위해 최근 딥러닝이나 강화학습 등의 AI 기법이 MIMO 시스템 최적화에 적극 도입되고 있다.

[3]의 연구에서는 비지도 딥러닝 기반으로 대규모 MIMO 하이브리드 빔포밍을 최적화하는 기법을 제안했다. 이는 채널 정보 없이 수집된 수신 세기(RSSI)만으로도 신경망을 학습시켜 기존 최적화 알고리즘에 필적하는 빔포밍 성능을 낮은 계산 복잡도로 달성했다.

III. 결론

초기 MIMO 기술은 멀티패스 환경에서 발생하는 간섭을 회피하는 수준을 넘어, 이를 하나의 통신 자원으로 적극 활용함으로써 데이터 전송의 효율성과 안정성을 극대화하려는 시도에서 출발했다. 이후

Massive MIMO, MU-MIMO, 그리고 최근의 RIS 기술에 이르기까지 MIMO 는 단순히 안테나 개수를 늘리는 차원을 넘어서 무선 채널 자체를 제어하는 능동적 기술로 진화해왔다.

6G 환경에서는 이러한 기술적 진보가 AI 기술과 결합되며 더욱 지능적이고 자율적인 통신 시스템 구축으로 이어질 것으로 보인다[4]. 특히 End-to-End 기반의 신경망 통합 구조는 송수신, 채널 추정, 빔포밍, 프리코딩 등 기존에 분리되어 있던 블록 단위 프로세스를 통합함으로써, 실시간 채널 환경 변화에 적응하고 최적화된 통신 경로를 자동으로 선택할 수 있는 능력을 제공한다.

또한 MIMO 기술의 진화는 단순한 속도 향상을 넘어 통신 인프라 패러다임을 바꾸고 산업 생태계를 재편할 잠재력이 있다. 예컨대 지능형 교통 시스템, 몰입형 메타버스, 초정밀 원격 의료 같은 6G 기반 서비스는 고신뢰, 초고속, 초저지연 통신을 필요로 하며, 이를 위해서는 대규모, 고도화된 MIMO 기반 빔포밍이 핵심적 토대가 된다. 다만 URLLC 달성을 위해서는 MIMO 에 더해 모바일 엣지 컴퓨팅, AI 기반 스케줄링, 네트워크 슬라이싱 등과의 유기적 결합이 필수적이다. 앞으로는 에너지 효율, 비용 절감, 환경 친화적 설계를 동시에 만족시키는 기술 발전이 병행되어야 하며, 이러한 혁신이 이뤄질 때 MIMO 는 6G 시대의 초고속, 초저지연, 초연결 네트워크를 가능하게 하는 핵심 인프라로 자리매김할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단을 통해 과학기술정보통신 부의 「한-핀란드 공동연구사업」의 지원을 받아 수행되었음(RS-2024-00464570)

참 고 문 헌

- [1] T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, November 2010
- [2] J. Lee, H. Seo and W. Choi, "Computation-Efficient Reflection Coefficient Design for Graphene-based RIS in Wireless Communications," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 73, no. 3 pp. 3663-3677, Mar., 2024
- [3] H. Hojatian, J. Nadal, J.-F. Frigon and F. Leduc-Primeau, "Unsupervised Deep Learning for Massive MIMO Hybrid Beamforming," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 11, pp. 7086-7099, Nov. 2021.
- [4] J. Seon, S. Lee, J. Kim, S. H. Kim, Y. G. Sun, H. Seo, D. I. Kim, and J. Y. Kim, "Deep Reinforced Segment Selection

and Equalization for Task-Oriented Semantic

Communication," in IEEE Communications Letters, vol. 28, no. 8, pp. 1865-1869, Aug., 2024