

6G 이동형 안테나 시스템의 하드웨어 제약 요인 분석 및 미래 연구 방향

윤석현
인천대학교

seokhyun@inu.ac.kr

Analysis of Hardware Constraints and Future Research Directions for 6G Movable Antenna Systems

Seok-Hyun Yoon
Incheon National University

요약

6G 무선 통신에서는 더욱 극대화된 스펙트럼 효율과 신뢰성이 요구되며, 이를 달성하기 위해 안테나의 위치를 물리적으로 조정하여 무선 채널의 공간 자유도(Spatial DoF)를 활용하는 이동형 안테나(Movable Antenna, MA) 시스템이 주목받고 있다. MA 시스템은 채널 이득 향상, 간섭 제어, 유연한 빔포밍을 통한 센싱 정확도 개선 등 다양한 이점을 제공하지만, 실제 구현 시 기계적 구동에 따른 하드웨어적 제약 사항이 존재한다. 본 논문에서는 6G MA 시스템의 주요 기술 동향과 장점을 간략히 살펴보고, 모터 구동 기반의 하드웨어 구조에서 발생하는 문제점을 분석한다. 나아가, 이러한 제약을 극복하기 위한 불완전한 CSI 기반의 강인한 설계, 이동 지연을 고려한 케도 최적화, 그리고 효율적인 MA 아키텍처 등 미래 연구 방향을 제시한다.

I. 서론

차세대 6G 통신 시스템은 5G 통신과 비교하여 더욱 향상된 초고속, 초저지연, 초연결을 목표로 하며, 이를 위해 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 기술은 더욱 고도화되고 있다. 그러나 기존의 고정형 안테나(Fixed-Position Antenna, FPA) 시스템은 안테나 위치가 고정되어 있어, 주어진 무선 채널 환경의 공간적 변동성을 능동적으로 활용하는 데 한계가 있다. 이에 대한 해결책으로 제안된 이동형 안테나(MA) 시스템은 안테나 소자를 2 차원 또는 3 차원 영역 내에서 이동시킴으로써 채널 상태를 능동적으로 재구성할 수 있는 기술이다. 하지만 MA 시스템의 이론적 이점을 불구하고, 실제 하드웨어 구현 시 발생하는 기계적 복잡도와 에너지 소비 문제는 큰 걸림돌이 되고 있다. 본 논문에서는 MA 시스템의 하드웨어적 제약 요인을 분석하고, 이를 해결하기 위한 실질적인 미래 연구 방향을 논의하고자 한다.

II. 본론

A. 이동형 안테나의 개념 및 장점

이동형 안테나(Movable Antenna, MA) 시스템은 안테나 소자를 제한된 송수신 영역(Transmit/Receive Region) 내에서 이동시켜 무선 채널의 공간적 자유도를 극대화하는 기술이다 [1]. 기존 고정형 안테나(Fixed Position Antenna, FPA)와 달리, MA는 채널의 소규모 폐이딩(Small-scale fading)을 능동적으로 활용하여 다음과 같은 획기적인 성능 향상을 제공한다.

첫째, 채널 전력 이득 및 용량 증대이다. MA는 다중 경로 성분의 위상을 정렬하도록 위치를 조정하여 채널 전력 이득을 극대화한다. 이를 통해, 단일 안테나 MA 시스템(SISO-MA)은 훨씬 적은 수의 RF 채인을 사용함에도 불구하고 고정형 다중 안테나(FPA-SIMO)

시스템에 근접한 성능을 달성할 수 있다. 또한, MIMO-MA 시스템에서는 eigenchannel 이득을 높이고 condition number 를 감소시켜 기존 MIMO-FPA 시스템 대비 채널 용량을 비약적으로 향상시킬 수 있다.

둘째, 간섭 제어 및 빔포밍 유연성 확보이다. 다중 사용자 환경(MU-MIMO)에서 MA는 사용자 간 채널 상관도를 낮추는 위치로 이동함으로써 간섭을 효과적으로 억제하며 기존 FPA 시스템 대비 전송 전력이 절감하고, 전송률을 개선할 수 있다. 또한, 안테나 위치 최적화를 통해 array steering vector 간의 상관관계를 동적으로 조절하여 빔 널링, 다중 빔 형성, 광대역 커버리지 등 유연한 빔포밍 설계가 가능하다.

셋째, 센싱 정확도 및 ISAC 성능 향상이다. MA는 배열의 구경 (Aperture)을 최적화하여 그레이팅 로브(Grating lobe)에 의한 모호성을 제거하고 메인 빔 폭을 좁힐 수 있어, 도래각 추정의 MSE(Mean Squared Error)를 획기적으로 낮춘다. 나아가 통신과 센싱을 동시에 수행하는 통합 센싱 및 통신 시스템에서는 통신 성능과 센싱 정확도 간의 trade-off region 을 개선하는 데 핵심적인 역할을 한다.

B. 이동형 안테나 하드웨어 구조 및 문제점

현재 연구되고 있는 MA 시스템은 이론적 우수성에도 불구하고, 실제 구현 단계에서 기계적 구동 방식에 의존함에 따라 다양한 하드웨어적 제약을 갖는다. 대표적인 기계식 슬라이드 기반 MA 시스템의 구조적 특징과 이로 인한 문제점은 다음과 같다 [2].

첫째, 하드웨어 구조의 복잡성 및 공간 제약이다. 전형적인 MA 시스템은 안테나 소자 외에도 위치 제어를 위한 모터, 슬라이드 트랙 그리고 CPU 제어 모듈이 결합된 형태를 띤다. 이러한 기계적 구동부는 시스템의 전체 부피와 무게를 증가시키며, 높은 기계적 복잡도를 유발한다. 이는 소형화가 필수적인 모바일 단말이나 IoT 기기에 탑재하는 데 큰 걸림돌이 되며, 지속적인 모터 구동에 따른 마모 및 유지보수 문제를 야기한다.

둘째, 기계적 구동에 따른 재구성 지연 문제이다. 전자적으로 범을 조향하는 위상 배열 안테나와 달리, MA는 물리적으로 안테나를 이동시켜야 하므로 필연적으로 시간이 소요된다. 현재 기술 수준에서 모터 기반의 위치 제어는 수 cm에서 수십 cm 범위를 이동하는 데 있어 cm/s 수준의 속도 한계를 갖는다. 이러한 이동 지연은 통신 및 센싱을 위해 할당된 유효 시간을 감소시키며, 급격하게 변하는 채널 환경이나 고속 이동체 환경에서 실시간으로 최적 위치를 추적하는 것을 어렵게 만든다.

셋째, 추가적인 전력 소비 및 에너지 효율 저하이다. 기존 FPA 시스템은 RF 전송 전력만을 고려하면 되었으나, MA 시스템은 안테나를 이동시키는 기계적 전력 소모가 무시할 수 없는 수준으로 발생한다. 특히 최적 위치가 현재 위치에서 멀리 떨어져 있을수록 모터 구동 시간이 길어지고 에너지 소비가 급증한다.

넷째, 하드웨어 결합 및 위치 제어 오차이다. 이상적인 시뮬레이션 환경과 달리, 실제 하드웨어에서는 모터의 구동 정밀도 한계로 인해 안테나가 의도한 좌표에 정확히 도달하지 못하는 위치 오차가 발생한다. 또한, RF 제인의 비선형성과 액추에이터의 부정확성은 실제 채널 정보와 추정된 모델 간의 불일치를 유발하여, 범포밍 성능을 심각하게 저하시키는 원인이 된다.

C. 하드웨어 제약 극복을 위한 미래 연구 방향

MA 시스템의 상용화를 위해서는 앞서 언급한 하드웨어 제약을 극복하고, 다양한 통신 시나리오에 적용하기 위한 다음의 심화 연구가 필수적이다.

1. 불완전한 CSI 및 하드웨어 결합을 고려한 강건한 설계

실제 환경에서는 안테나 이동 영역 전체에 대한 완벽한 CSI를 획득하기 어렵고, 모터 제어 오차 등 하드웨어적 결합이 불가피하다. 따라서, 위치 추정 오차를 고려한 강건한 최적화 기법이 요구된다. 특히 빠르게 변하는 채널 환경에 대응하기 위해, 안테나 위치는 통계적 CSI 기반으로 긴 주기로 갱신하고, 범포밍은 순시적 CSI 기반으로 짧은 주기로 갱신하는 Two-timescale 설계 기법이 필수적이다 [3].

2. 이동 지연 및 에너지 효율을 고려한 궤적 최적화

기계적 이동에 따른 지연 시간을 최소화하기 위해 단순 위치 최적화를 넘어, 이동 경로 자체를 최적화하는 연구가 필요하다 [4]. 안테나 간 충돌을 방지하면서 이동 시간을 줄이는 궤적 설계와 함께, 채널 추정 및 피드백 지연을 포함한 통합 지연 모델링이 요구된다. 또한, 모터 구동 전력을 포함한 정확한 전력 소비 모델을 수립하고, 이를 바탕으로 통신 성능과 에너지 소모 간의 균형을 맞추는 에너지 효율적 위치 제어 알고리즘이 개발되어야 한다.

3. 실용적인 MA 구조 및 채널 추정 기법

모든 소자가 독립적으로 이동하는 구조는 비용과 복잡도가 높으므로, 슬라이딩 어레이(Sliding Array), 서브 어레이(Sub-array), 교차 링크(Cross-link) 구조 등 비용 효율적인 MA 구조에 대한 연구가 진행되어야 한다. 아울러 전체 이동 영역의 채널을 효율적으로 획득하기 위해, 필드 응답 모델의 희소성을 활용한 압축 센싱 기법이나, 측정된 위치에서의 정보를 바탕으로 미측정 위치의 채널을 예측하는 딥러닝 기반 채널 추정 기술이 고도화되어야 한다 [5].

4. 6G 핵심 기술과의 융합 (Full-Duplex 및 위성 통신)

MA 기술은 6G의 다른 핵심 기술들과 결합하여 시너지를 낼 수 있다. 전이중(Full-Duplex) 시스템에서는 MA 위치 최적화를 통해 자기 간섭 채널을 능동적으로 재구성하여 잔여 간섭을 억제할 수 있다. 또한, 저궤도(LEO) 위성 통신에서는 위성의 움직임에 따라 안테나 배열 구조를 동적으로 변경하여 범 커버리지를 유지하고, 지상국에서는 다중 위성 간섭을 효과적으로 제어하는 연구로 확장될 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 6G 이동형 안테나 시스템의 동향을 살펴보고, 특히 하드웨어 구현 시 발생하는 기계적 복잡도, 지연 시간, 전력 소비 문제를 중점적으로 분석하였다. MA 시스템이 6G의 핵심 기술로 자리 잡기 위해서는 단순한 성능 이득 겹중을 넘어, 불완전한 CSI, 이동 지연, 에너지 효율 등 실제 하드웨어 제약 사항을 고려한 현실적인 최적화 연구가 선행되어야 한다. 향후 이러한 문제들이 해결된다면 MA 시스템은 6G 네트워크의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] L. Zhu, W. Ma, and R. Zhang, "Movable Antennas for Wireless Communications: Opportunities and Challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 62, no. 6, pp. 114-120, Jun. 2024.
- [2] B. Ning et al., "Movable antenna-enhanced wireless communications: General architectures and implementation methods," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 32, no. 5, pp. 108-116, Oct. 2025.
- [3] Z. Zheng et al., "Two-Timescale Design for Movable Antennas Enabled-Multiuser MIMO Systems," *IEEE Trans. Commun.*, early access.
- [4] Q. Li et al., "Trajectory Optimization for Minimizing Movement Delay in Movable Antenna Systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, early access.
- [5] Z. Xiao et al., "Channel Estimation for Movable Antenna Communication Systems: A Framework Based on Compressed Sensing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 9, pp. 11814-11830, Mar. 2024.