

6G 이동형 안테나 시스템: 주요 동향과 미래 연구 방향

윤석현
인천대학교

seokhyun@inu.ac.kr

6G Movable Antenna Systems: Key Trends and Future Research Directions

Seok-Hyun Yoon
Incheon National University

요약

이동형 안테나 (Movable Antenna, MA)는 안테나의 움직임을 통해 무선 통신 및 센싱 성능을 향상시키는 혁신적 기술로, 6G 를 비롯한 차세대 통신 시스템의 핵심 요소로 주목받고 있다. 본 논문에서는 MA 기반 무선 네트워크의 최신 기술 동향을 종합적으로 분석하고, 향후 연구 방향을 제시한다. 우선, 안테나 위치에 따른 무선 채널의 연속적인 변화를 모델링하기 위한 필드 응답 채널 모델을 살펴본다. 이어서 MA 구현을 위한 최신 아키텍처를 검토하고 실제 제약 조건을 논의한다. 이어서, 다양한 통신 및 센싱 시스템에서 안테나 움직임의 공간 자유도를 최대한 활용하기 위한 일반적인 최적화 프레임워크를 공식화하며, 사용된 기법들을 살펴본다. 더 나아가 MA 시스템에서의 채널 획득 문제를 다루어 송신기 및 수신기 영역 내 임의의 안테나 위치들 간 채널 매핑을 재구성하기 위한 기술들을 검토한다. 마지막으로 MA 설계의 확장 가능성 및 다른 기술과의 융합 가능성을 논의하고, 향후 연구 방향을 제시한다.

I. 서론

최근 무선 통신 기술은 다중 안테나 (MIMO)와 같은 혁신적인 기술을 통해 괄목한 발전을 이루었지만, 주파수 부족과 급증하는 하드웨어 비용으로 인해 성능 향상에 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제에 대한 해결책으로 이동형 안테나 (Movable Antenna, MA) 기술이 새로운 대안으로 떠오르며, 기존 고정형 안테나 (Fixed Antenna, FA)의 제한적인 공간 자유도를 극복하고 더욱 유연하고 효율적인 차세대 통신 네트워크를 구축하는 데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다 [1]. MA는 기존의 FA 와 달리, 안테나를 물리적으로 움직여 신호 세기, 간섭 회피, 빔 형성 등 다양한 무선 통신 파라미터들을 능동적으로 제어할 수 있다. 이러한 움직임은 전송 또는 수신 성능을 최적화하고, 에너지 효율성을 높이며, 다양한 무선 환경에 적응하는 데 필수적인 요소이다. 기존 FA 시스템의 하드웨어 복잡성 및 전력 소비 문제를 해결하면서, MA 기술은 통신 시스템의 유연성과 적응성을 향상시키는 동시에 새로운 설계 및 최적화 기회를 제공한다.

본 논문에서는 MA의 채널 모델 및 하드웨어 아키텍처를 제시하여 MA 무선 시스템의 이론적 토대를 구축한다. 이어서, MA 시스템의 주요 설계 문제인 안테나 움직임 최적화 프레임워크와 사용된 최근 기법과 채널 획득 방법에 대한 최근 연구 동향을 살펴본다. 마지막으로, MA 시스템의 확장 가능성 및 다른 기술과의 융합 가능성을 논의하고, 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 본론

A. MA 시스템의 필드 응답 채널 모델

단일 입력 단일 출력 (Single-input Single-output, SISO) MA 시스템에서의 필드 응답 채널 모델을 설명한다 [2]. 기본적인 필드 응답 채널 모델은 안테나의 위치에 따른 채널 변화를 설명하기 위해

제시되었으며, 송신 안테나의 위치를 $t = [x_t, y_t, z_t]^T \in \mathbb{R}^3$ 로, 수신 안테나의 위치를 $r = [x_r, y_r, z_r]^T \in \mathbb{R}^3$ 로 나타낸다. 송신 안테나에서 j 번째 송신 경로 ($1 \leq j \leq L_t$)의 wave vector 를 $\mathbf{k}_{t,j}$ 라고 정의하면, 송신 안테나 위치 t 에 대한 필드 응답 벡터 (Field Response vector, FRV)는 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{g}(t) = [e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_{t,1}^T t}, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_{t,2}^T t}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_{t,L_t}^T t}] \in \mathbb{C}^{L_t \times 1}, \quad (1)$$

마찬가지로 수신 안테나에서 i 번째 수신 경로 ($1 \leq i \leq L_r$)의 wave vector 를 $\mathbf{k}_{r,i}$ 라고 정의하면 수신 안테나 위치 r 에 대한 필드 응답 벡터는 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{f}(r) = [e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_{r,1}^T r}, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_{r,2}^T r}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_{r,L_r}^T r}] \in \mathbb{C}^{L_r \times 1}, \quad (2)$$

마지막으로, 경로 응답 행렬 (Path Response Matrix, PRM) Σ 의 i 행 j 열 요소는 j 번째 송신 경로와 i 번째 수신 경로 사이의 응답 계수를 나타낸다. 이를 바탕으로 송신 안테나와 수신 안테나 간의 채널 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{h}(t, r) = \mathbf{f}(r)^H \Sigma \mathbf{g}(t), \quad (3)$$

MA 기반 시스템에서의 채널은 식 (3)과 같이 송수신 안테나의 위치에 따라 결정되는 함수로 표현할 수 있으며, 안테나 위치 최적화를 통해 FA 시스템 대비 우수한 성능을 기대할 수 있게 된다. 더 나아가, SISO MA 시스템의 채널 모델을 확장하여 다중 입출력 (Multi-input Multi-output, MIMO) MA 시스템, 광대역 MA 시스템, 그리고 근거리장 MA 시스템의 채널 특성을 효과적으로 모델링도 할 수 있다.

B. MA 시스템의 하드웨어 아키텍처

MA 시스템의 하드웨어 아키텍처는 소자 수준과 안테나 어레이 수준의 움직임을 구현하는 다양한 방식으로 나뉜다 [3]. 소자 수준 움직임은 모터, MEMS, 액체 기반 구동 기술 등을 활용하여 개별 안테나 소자의 위치 또는 방향을 정밀하게 제어한다. 반면, 안테나 어레이 수준 움직임은 슬라이드 어레이, 회전 어레이, 폴더블 어레이 등을 통해 서브 어레이 또는 전체

어레이의 기하학적 구조를 재구성한다. 각 아키텍처는 움직임의 유연성, 속도, 범위, 하드웨어 비용 및 에너지 소비 측면에서 상반된 특징을 가지므로, 특정 시스템 요구 사항 및 작동 환경에 따라 최적의 아키텍처를 선택해야 한다. 최근에는 기계적 움직임 없이 전자적으로 재구성 가능한 안테나를 활용하여 유사한 효과를 얻는 연구도 활발히 진행되고 있다.

C. MA 시스템의 안테나 움직임 최적화 프레임워크

MA 시스템의 성능을 극대화하기 위해서는 안테나 위치와 통신 및 센싱 자원 할당을 동시에 최적화하는 일반적인 최적화 프레임워크가 필요하며, 이는 다음의 문제로 공식화될 수 있다.

$$\max_{\mathbf{t}, \mathbf{r}, \mathbf{c}} U(\mathbf{t}, \mathbf{r}, \mathbf{c}) \quad (4a)$$

$$\text{s.t. } f_i(\mathbf{t}, \mathbf{r}, \mathbf{c}) \geq 0, 1 \leq i \leq I_1, \quad (4b)$$

$$g_i(\mathbf{c}) \geq 0, 1 \leq i \leq I_2, \quad (4c)$$

$$q_i(\mathbf{t}, \mathbf{r}, \mathbf{c}) \geq 0, 1 \leq i \leq I_3. \quad (4d)$$

여기서 \mathbf{t}, \mathbf{r} 은 안테나 움직임 변수, \mathbf{c} 는 통신 및 센싱 자원 변수 집합, $U(\cdot)$ 는 효용 함수 (예: 전송률, 에너지 효율), $f_i(\cdot)$ 는 안테나 움직임 제약 조건 (예: 이동 범위), $g_i(\cdot)$ 는 통신 및 센싱 자원 제약 조건 (예: 전력 제한), $q_i(\cdot)$ 는 안테나 움직임 및 자원 간의 결합 제약 조건 (예: 최소 SINR, 최대 CRB)을 나타낸다. 즉, MA 시스템 설계는 효용 함수, 제약 조건 및 시스템 설정을 종합적으로 고려해야 한다.

최근 학계에서는 MA 기반 SISO, MISO/SIMO, MIMO, 다중 사용자 시스템, ISAC 시스템, 그리고 희소 배열 시스템 등 다양한 시스템의 최적화 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구에서는 시스템 유형에 따라 다양한 최적화 기법이 활용되는데, 구체적으로 (1) SISO 시스템에서는 경사 상승/하강법, (2) MISO/SIMO 시스템에서는 ZF 빔포밍, 순차적 APV (Antenna Position Vector) 구성법, (3) MIMO 와 다중 사용자 시스템에서는 확률적 최적화 기법, 입자 군집 최적화 기법 등이 주로 사용되었다. 따라서, 시스템 설정 및 제약 조건을 고려하여 적절한 최적화 기법을 선택하는 것이 중요하다.

D. MA 시스템의 채널 추정 연구

MA 시스템에서 정확한 채널 정보 획득은 성능 최적화를 위한 필수 조건이나, 안테나 위치 또는 방향에 따라 채널 특성이 지속적으로 변하므로 기존 방식으로는 한계가 있다. 이는 고정된 안테나를 사용하는 전통적인 시스템과 대조적이다. 기존 시스템에서는 특정 안테나 구성에 대한 채널 상태 정보(CSI)만 필요하지만, MA 시스템에서는 안테나의 모든 가능한 위치/방향에 대한 정보를 알아야 하므로 채널 획득 과정이 복잡하고 어렵다. 즉, MA는 기존 시스템보다 훨씬 많은 상태에 대해 안테나 위치/방향과 채널 이득 간의 관계를 파악해야 한다 [4].

이러한 어려움을 해결하기 위해 채널의 통계적 특성 또는 기하학적 구조를 활용하는 모델 기반 방식과 채널 모델에 대한 사전 지식 없이 직접 채널을 측정하는 모델 프리 방식이 연구되고 있다. 모델 기반 방식은 채널 모델을 단순화하고 측정량을 줄일 수 있지만, 모델링 오류에 취약하다. 반면, 모델 프리 방식은 채널 모델링 오류에 강하지만, 채널 측정에 많은 자원이 소모된다. 따라서 제한된 피드백(limited feedback), 훈련 시퀀스 설계, 신호 처리 기법 등을 통해 채널 획득 오버헤드를 줄이면서 정확도를 높이는 연구가 활발히 진행되고 있다.

E. MA 시스템의 향후 연구 방향 제시

안테나의 위치를 능동적으로 조정함으로써 무선 채널의 공간적 자유도를 극대화하는 MA 기술은 기존 통신 시스템의 패러다임을 근본적으로 변화시킬 잠재력을 지니고 있다. 특히, MA 기술은 위성·공중·지상 통합 네트워크, 모바일 엣지 컴퓨팅, 물리 계층 보안, 무선 전력 전송, 그리고 재구성 가능한 반사 표면과의 융합으로 확장되는 방향으로 발전할 것으로 전망된다. 또한, 고주파 대역에서의 MA 기반 빔포밍 및 근거리장 채널 모델링, 다중 MA 시스템 간 협력적 제어, 에너지 효율화 기술 등이 주요 향후 연구 과제로 제시된다. 아울러, 실제 구현 측면에서는 MA 구동의 물리적 제약, 제어 정밀도, 에너지 소비, 표준화 문제를 해결하기 위한 경량 하드웨어 설계 및 AI 기반 제어 기술이 요구된다. 이러한 흐름 속에서 MA는 단순한 안테나 재배치 기술을 넘어, 통합 센싱 및 통신 시스템과 공간적 지능화를 실현하는 핵심 인프라로서, 유연하고 자율적인 차세대 무선 통신 시스템의 토대를 구축할 것으로 기대된다.

III. 결론

본 논문에서는 MA 기반 무선 네트워크의 기본 원리와 최신 발전 동향에 대해 종합적으로 고찰하였다. 먼저, SISO MA 시스템에서 안테나 움직임에 따른 무선 채널의 연속적인 변화를 반영하는 기본적인 필드 응답 기반 채널 모델을 소개하였다. 이후 MA 시스템의 구현을 위한 최신 아키텍처를 검토하고, 이에 따른 실질적인 제약 요소들을 논의하였다. 또한, 안테나 이동이 제공하는 공간 자유도를 최대한 활용하기 위한 일반적인 최적화 프레임워크 및 최신 기법들을 살펴보았다. 아울러, 송신기와 수신기 영역 간의 채널 매핑을 복원하기 위한 채널 추정 기법들을 살펴보았다. 마지막으로, MA 기술의 다른 무선 통신 시스템으로의 확장 가능성과 차세대 무선 기술과의 융합 방향에 대해 논의하였다.

참고 문헌

- [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] L. Zhu, W. Ma, and R. Zhang, "Modeling and Performance Analysis for Movable Antenna Enabled Wireless Communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 6, pp. 6234–6250, Jun. 2024.
- [3] 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.
- [4] 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, Sep. 2024.