

# 6G 이동통신 시스템을 위한 이동형 안테나 시스템 연구 동향

이예림, 백주영, 정방철  
충남대학교

## 요약

본고에서는 6G 이동통신 시스템을 위한 다중 안테나 시스템 중 이동형 안테나 시스템의 시스템 모델과 다양한 최신 연구 동향에 대해 살펴본다. 먼저 1차원 이동형 안테나 시스템인 유체 안테나 시스템 (fluid antenna system, FAS)에 대한 기술 동향을 분석하고, 이어서 차원을 확장할 수 있는 2차원 다중 안테나 시스템인 이동형 안테나 시스템 (movable antenna system, MAS)의 기술 동향을 소개한다. 또한, 정확한 시스템 분석을 위한 수학적 연구가 필요함을 시사한다.

## I. 서론

6G 무선통신 시스템이 발전함에 따라 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷 (Internet-of-things, IoT) 등 다양한 무선 서비스가 등장하게 되었다. 이로 인해 데이터 트래픽에 대한 수요가 급격히 증가하고 있으며, 국제전기통신연합 (ITU)에 따르면 <그림 1>에서와 같이 2030년까지 전 세계 모바일 데이터 트래픽이 최대 5 제타바이트 (ZB)까지 이를 것으로 예상된다[1]. 이러한 모바일 트래픽의 기하급수적인 증가로 인해 빠르고 안정적인 네트

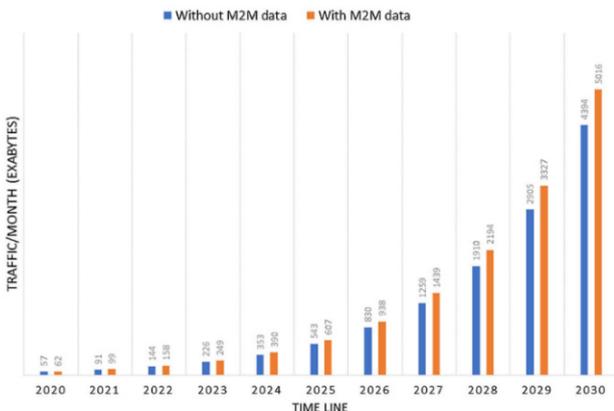


그림 1. 2030년까지 전 세계 모바일 데이터 트래픽 증가 예측[1]

워크 연결을 제공해야 하는 필요성에 따라 다양한 통신 프로토콜 기술 및 안테나가 개발되고 있다.

예를 들어, 더 높은 주파수 대역을 활용하여 대역폭을 확장하는 방법이 있다[2]. 이를 통해 더 많은 데이터를 동시에 전송할 수 있고, 사용자들에게 더 빠른 데이터 전송 속도를 제공할 수 있다. 그러나, 넓은 지역에 적합한 대역에서는 주파수가 부족하기 때문에 주파수 효율을 높이는 데 중점을 두어야 한다는 문제가 있다.

이때, 다중 안테나를 활용하여 더 높은 전송률과 안정성을 제공하는 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 기술이 등장하였다[3]. MIMO 기술은 다수의 안테나를 사용하여 신호를 동시에 전송하고 수신함으로써 전송 효율을 높이는 기술로, 이를 활용하여 네트워크 성능을 향상시키는 것이 가능하다. 또한, 빔포밍 기술과 함께 사용하여 주변 사용자 간의 간섭을 줄이는 동시에 처리량을 크게 향상시킬 수 있다.

4G/5G 이동통신에서 주파수 효율을 높이기 위해 많이 사용되었던 다중 안테나 기술은 6G에서도 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 6G에서는 안테나 수가 크게 증가하고 THz 등 높은 주파수 대역을 사용함에 따라 조밀한 기지국 배치를 통해 근거리 (near-field) 영역이 확장될 것이다. 따라서 <그림 2>의 다중 MIMO (massive MIMO)[5], 초대형 다중 MIMO (Extremely large-scale massive MIMO, XL-MIMO)[6] 등과 같은 매우 큰 안테나 어레이를 가진 MIMO 시스템이 주목을 받고 있다.

하지만, 다중 안테나 시스템의 구현에는 각 안테나에 대한 RF

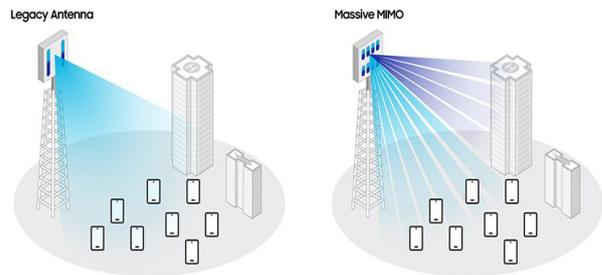


그림 2. 다중 MIMO 시스템[4]

체인의 하드웨어 비용이 포함되어 있으며, 안테나의 수가 많아질수록 비용이 증가한다. 또한, 제한된 공간 내에 많은 수의 안테나를 배치하는 것은 물리적인 제약이 따른다. 따라서 초대형 다중 MIMO 시스템을 현재의 기술과 자원으로 구현하는 것은 어려운 문제이다.

무선 인터페이스의 설계는 안테나 설계에 크게 좌우되기 때문에 안테나는 통신 시스템에서 매우 중요하다. 그러나 기존 통신 시스템은 고정된 위치에 배치된 안테나의 형태로 인해 송신단 또는 수신단이 존재하는 영역에서 공간 자유도 (degree of freedom, DoF)를 완전히 활용할 수 없다. DoF는 통신 시스템에서 전송되는 신호의 자유도를 나타내며, 이를 최대한 활용하여 효율적인 통신을 하는 것이 중요하다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근 이동형 안테나 (movable antenna, MA)가 도입되어 지정된 영역 내에서 송신/수신 안테나의 이동이 가능하게 되었다[7].

이동형 안테나를 사용하면 안테나 간의 상관 관계를 효과적으로 조절할 수 있다. 이는 무선 채널의 고유한 특성을 활용하는 것으로, 주변 환경이나 사용자의 위치에 따라 최적화된 안테나 패턴을 형성하여 통신 성능을 최대화할 수 있다. 또한, 안테나 간의 상관 관계를 적절히 조절하여 간섭을 줄이고 품질을 향상시킬 수 있다.

본 고에서는 6G 이동통신 시스템을 위한 다양한 이동형 안테나 시스템에 대해 살펴보고 더 나아가 실제로 연구되고 있는 최신 연구 동향에 대해 알아본다.

## II. 1차원 이동형 안테나 시스템

기존의 안테나는 주로 단단한 금속으로 만들어지며 전기적 특성으로 인해 좋은 성능을 제공한다. 그러나 이러한 안테나는 기계적 유연성이 부족하다. 최근에는 유연한 소재를 사용하여 안테나를 제작하는 연구가 활발히 진행되고 있다[8]. 유연한 안테나는 <그림 3>과 같이 다양한 형태로 구부러지거나 접힐 수 있어서 휴대성이나 다양한 환경에서의 사용에 적합하다.

대표적으로 액체 금속 안테나는 유연하고 재구성 가능한 안테나를 만들기 위해 1990년대에 도입되었다[10]. 수은과 갈륨, 주석의 합금을 사용하여 유연하고 재구성 가능한 안테나를 만드는 것이 가능하며, 이러한 안테나는 기존의 금속 안테나보다 유연성과 안정성 면에서 우수한 성능을 보인다.

특히, 갈륨인듐합금 (EGaIn)은 기계적 안정성과 증발에 강한 특징을 가지고 있어 안테나의 성능을 향상시키는 데 도움이 된다. 최근에는 그래핀이 뛰어난 전기적 특성과 기계적 강도, 유연

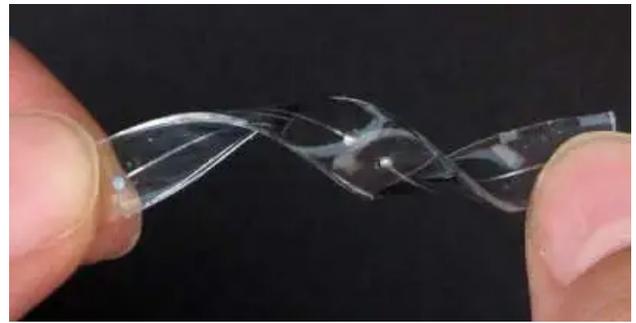


그림 3. 유연한 소재로 만든 안테나[9]

성을 갖고 있어 기존의 구리 금속 안테나보다 훨씬 더 나은 성능을 발휘할 수 있는 유망한 재료로 주목받고 있다.

액체 금속 안테나와 이동형 안테나에 대한 연구가 활발해지고, 하드웨어의 발전으로 안테나가 소형화되면서 한정된 공간 내에 다중 안테나 시스템을 구현하는 것이 가능해졌다. 특히, 최근에는 유체 안테나 (fluid antenna, FA) 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다[11]. 유체 안테나는 유동성을 가진 물질을 사용하여 만들어진 안테나를 말한다. 유연성을 가지며 다중 안테나 시스템을 구현하는 데 유용하게 활용될 수 있다.

본 장에서는 1차원 이동형 안테나 시스템인 유체 안테나 시스템에 대해 살펴보고, 최신 연구 동향을 살펴본다.

### 1. 유체 안테나 시스템 (Fluid antenna system)

유체 안테나 시스템은 소프트웨어로 조절이 가능한, 기계적으로 유연한 안테나를 의미한다. 안테나 내부에 작은 유체를 이용하여 안테나의 특성을 조절하는 방식으로 동작한다.

보다 자세히 설명하자면, <그림 4>와 같이 선형으로 된 단일 안테나 내부에는 소프트웨어로 조절이 가능한 작은 유체가 존재한다. 이 작은 유체는 안테나 내부에 미리 정의된 N개의 포트에 위치할 수 있다. 소프트웨어나 알고리즘을 통해 유체를 각 포트 로 이동시키면서 채널을 형성한다.

이 과정에서 각 포트에서 만들어진 채널 중 가장 큰 채널을 가

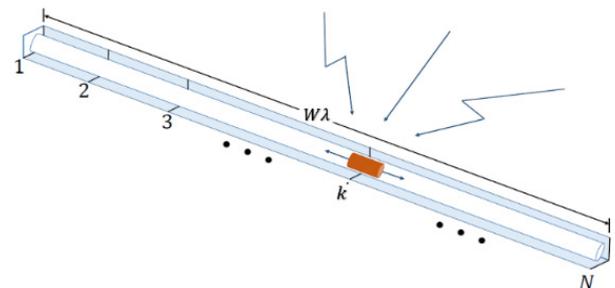


그림 4. 유체 안테나[10]

진 포트가 활성화되어 통신이 이루어진다.

유체 안테나를 이용한 다중 안테나 통신 시스템은 다음과 같은 이점을 가지고 있다.

- 페이딩 없는 통신: 하나의 유체 안테나가 수많은 고정 안테나와 동일한 다이버시티 효과를 제공한다. 따라서 간섭에 따른 문제를 최소화하여 안정적인 통신을 가능하게 한다.
- 간섭 없는 통신: 다중 사용자 통신을 위한 공간 다중화에서 유체 안테나는 공간 내에서 가장 유리한 위치 (또는 포트)로 조정될 수 있다. 이는 복잡한 조정이나 신호 처리 없이도 간섭이나 뎁 페이드와 같은 문제를 최소화하고 최적의 통신 환경을 구성할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 다중 사용자 환경에서도 효율적인 통신을 가능하게 한다.

## 2. 1차원 이동형 안테나 시스템 최신 연구 동향

유체 안테나 시스템의 최신 연구들은 일반적으로 최적의 포트를 선택하는 기법과 알고리즘, 유체 안테나를 통한 새로운 다중 안테나 시스템의 구현 등이 있다.

### 가. 최적 안테나 포트 선택 기법

다수의 포트를 가진 유체 안테나 시스템에서 최적의 포트 선택은 매우 중요한 문제이다. 포트 수가 많아질수록 전환 시간과 시스템 복잡성이 증가하며, 이는 구현 가능한 범위를 넘어설 수 있다.

[12]에서 소개된 포트 선택 알고리즘은 다수의 포트 중에서 몇 개의 포트의 SNR 정보만을 사용하여 최적의 포트 선택을 가능하게 한다. [13]은 두 사용자가 있는 환경에서 다중 액세스 (multiple access)를 위해 한 사용자가 신호를 수신할 때, 다른 사용자는 뎁 페이드인 상태의 위치로 안테나를 전환한다. 결과적으로 신호 대 간섭 비 (SIR)가 최대화되는 포트를 선택함으로써 사용자 간 간섭을 방지하는 유체 안테나 다중 액세스 (FAMA)를 제안하였다. FAMA는 다양한 형태로 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 대표적인 기술들이 <표 1>에 제시되어 있다.

표 1. 유체 안테나 다중 액세스 기술

	기술	설명
[14]	Slow FAMA	몇 명의 사용자만 동일한 채널을 사용
[15]	Fast FAMA	다수의 사용자가 동일한 시간-주파수 채널을 사용
[16]	Opportunistic FAMA	기회적 스케줄링을 통해 안테나 포트 수를 완화

### 나. 유체 안테나 어레이를 활용한 시스템

유체 안테나 어레이를 사용하면 안테나의 수와 동일한 회로를 많이 필요로 하지 않아 비용이 저렴하고, 무선 통신 시스템의 크

기 및 에너지 소비를 줄이는 데 도움이 된다.

유체 안테나 어레이 AirComp 시스템은 다중 액세스 채널의 중첩 속성 활용, 고속 데이터 집계, 그리고 효율적인 리소스 활용 등의 장점을 제공하여 대규모 무선 네트워크에서 데이터 처리 및 응집을 위한 효과적인 솔루션으로 기대된다[17]. 공중 컴퓨팅 (over-the-air computing, AirComp)은 무선 다중 액세스 채널의 중첩 속성을 활용하여 여러 장치로부터 동시에 전송되는 데이터를 효과적으로 수집하여 처리한다. 통신과 계산을 효율적으로 통합하여 초고속 데이터 집계를 가능하게 함으로써 네트워크 성능을 향상시키고 데이터 처리 과정을 최적화할 수 있을 것이다.

### 다. 유체 안테나 기반 MIMO 시스템

유체 안테나 기반 MIMO 시스템은 최근 많은 연구와 관심을 받고 있는 기술 중 하나이다. 기존 MIMO 시스템은 다수의 안테나를 사용하여 다이버시티와 다중 경로 환경에서의 성능을 향상시켰지만, 설치 공간과 하드웨어 비용 등의 문제가 있었다. 유체 안테나를 사용함으로써 이러한 문제들을 극복할 수 있어 많은 연구와 발전이 이루어지고 있다.

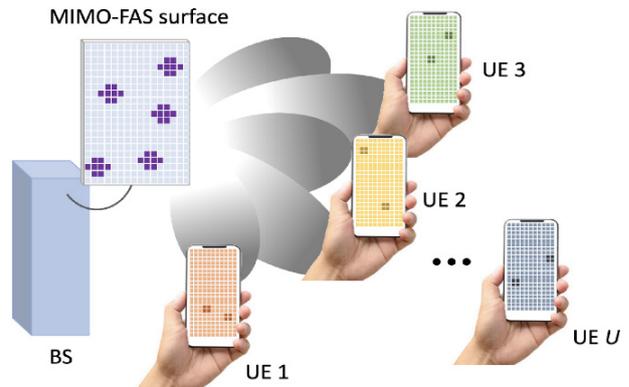


그림 5. 유체 안테나 기반 MIMO 시스템[18]

대부분의 이전 연구들은 수신단에서 유체 안테나를 사용하여 네트워크 성능을 증가시키고 좋은 수신 전력을 얻었다. [19]에서는 사용자가 유체 안테나를 장착한 다중 입력 단일 출력 (multiple-input single output, MISO) 다운링크 통신 시스템을 제안해 전송 전력을 최소화하였다. [20]에서는 중계 시스템에서 유체 안테나를 릴레이 역할로 사용하며, 여러 장애물이 있는 경우 통신 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

### 라. 에너지 및 스펙트럼 효율성 향상 기술

소프트웨어로 컨트롤해야 하는 유체 안테나의 특성으로 인해, 시스템의 전력 소비를 줄이고자 에너지 효율성 향상을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한, 주파수 부족 문제 및 동적

으로 움직이는 이동형 안테나 시스템의 채널 특성으로 인해 스펙트럼 효율성에 대한 관심이 대두되고 있다.

비직교 다중 액세스 (Non-orthogonal multiple access, NOMA)는 기존의 다중 접속 기술에 비해 더 높은 스펙트럼 효율 (spectrum efficiency, SE), 에너지 효율 및 네트워크 용량을 증가시킬 수 있는 다중화 방식이다. 특히, 유체 안테나 기반의 협력 NOMA 및 전이중 (full-duplex, FD) 통신[21-22]은 사용자 간 간섭을 최소화하고 통신 범위를 확장할 수 있으며, 동시에 송수신이 가능하여 SE를 증가시킬 수 있는 솔루션으로 많은 관심을 끌고 있다.

인덱스 변조 (index modulation, IM)는 RF 체인 수를 줄임으로써 하드웨어 비용을 절감하고, 동시에 안테나, 부반송파, 타임 슬롯, 채널 상태의 인덱스를 활용하여 추가 정보를 전달함으로써 SE를 향상시키는 기술이다. [23]에서 제안하는 인덱스 변조 기반 유체 안테나 시스템 (IM-FA)은 안테나 선택 기반 다중 안테나 시스템에 비해 훨씬 적은 수의 안테나로 동일한 공간 다이버시티를 획득할 수 있다. 또한, 별도의 하드웨어 비용 없이 인덱스 비트를 도입하여 SE를 향상시킬 수 있어 효율적인 통신이 가능하다.

유체 안테나 시스템은 이산화된 안테나 포트를 기반으로 한 채널 모델이기 때문에, 연속적인 영역에서 무선 채널의 공간적 다양성과 특성을 이용할 수 없다는 문제가 존재한다. 따라서 액체의 연속적인 특성에 따른 연속적인 유체 안테나 시스템도 연구되고 있다[24].

### III. 2차원 이동형 안테나 시스템

이동형 안테나 (movable antenna, MA) 시스템은 FA 시스템을 개선한다[25]. 이를 통해 공간 DoF를 완전히 활용할 수 있는 MA 시스템은 주요 장애물로 여겨졌던 하드웨어적 문제들이 미세전자기계 시스템 (micro-electromechanical systems, MEMS)을 통해 해결되면서, 높은 정밀도, 낮은 전력 소비, 그리고 높은 이동성을 갖춘 유망한 기술로 떠올랐다[26]. 이러한 MA 기술은 주로 레이더 시스템에 적용되어 왔지만, 최근에는 통신

시스템에도 이를 적용하고자 하는 새로운 시도들이 증가하고 있다[25]-[32].

#### 1. 2차원 이동형 안테나 시스템 모델

[27]에서 제안된 MA 기반 단일-입력 단일-출력(single-input single-output, SISO) 시스템 아키텍처는 과 같다. 이 시스템에서는 MA의 위치를 기계적으로 조정할 수 있으며, 제안된 MA 시스템의 채널 응답은 안테나 위치에 따라 변화한다.

MA의 위치를 묘사하기 위해, 송수신 영역인  $C_t$ 와  $C_r$ 에서 데카르트 좌표계  $x_t - O_t - y_t$ 와  $x_r - O_r - y_r$ 를 설계했다. 송수신 경로의 수는 각각  $L_t$ 와  $L_r$ 개로 가정하였으며,  $i \in \{1, 2, \dots, L_t\}$  째 송신 경로의 출발 각도 (angle of departure, AoD)의 고도각과 방위각을 각각  $\theta_{t,i} \in [-\pi/2, \pi/2]$ ,  $\phi_{t,i} \in [-\pi/2, \pi/2]$ 로,  $j \in \{1, 2, \dots, L_r\}$  째 수신 경로의 AoD와 AOA의 고도각과 방위각을 각각  $\theta_{r,i} \in [-\pi/2, \pi/2]$ ,  $\phi_{r,i} \in [-\pi/2, \pi/2]$ 로 나타냈다. 이때, 수신기에서 수신된 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(\mathbf{A}_t, \mathbf{A}_r) = h(\mathbf{A}_t, \mathbf{A}_r) \sqrt{p} s + n, \mathbf{A}_t \in C_t, \mathbf{A}_r \in C_r$$

여기서  $\mathbf{A}_t = [x_t, y_t]^T$ 와  $\mathbf{A}_r = [x_r, y_r]^T$ 은 각각 송수신 MA의 좌표를 나타내며,  $h(\mathbf{A}_t, \mathbf{A}_r)$ ,  $p$ ,  $s$ , 그리고  $n$ 은 각각 무선 채널, 송신 전력, 송신 신호 그리고 수신단에서 발생하는 열잡음을 의미한다. 제안된 모델에서는 평면파 모델을 사용하여 송수신 MA 영역 간의 응답 필드를 형성했다. 따라서, AoD, AoA, 그리고 진폭은 MA의 위치에 따라 변하지 않는다. 대신, 다중 경로 채널의 위상만이 MA의 위치에 따라 변하게 된다.

송신 기준 위치  $\mathbf{A}_{t,0} = (0, 0)$ 에서 수신 기준 위치  $\mathbf{A}_{r,0} = (0, 0)$ 까지의 응답을 나타내기 위해 경로 응답 행렬 (path-response matrix)  $\Sigma \in \mathbb{C}^{L_r \times L_t}$ 을 정의한다. 따라서,  $\mathbf{t}_0$ 와  $\mathbf{r}_0$ 에 위치한 두 안테나 사이의 채널은 다음과 같이 주어진다.

$$h(\mathbf{A}_{t,0}, \mathbf{A}_{r,0}) = \mathbf{1}_{L_r}^T \Sigma \mathbf{1}_{L_t}$$

모든 송수신 경로에서 위상 차이를 고려하기 위해 송수신 영역의 필드-응답 벡터 (field-response vector)는 다음과 같이 정의된다.

표 2. 이동형 안테나 기반 통신 시스템의 최신 연구 동향 요약

	연구 기관(학술지, 연도)	시스템설정	안테나차원	성능 지표
[28]	싱가포르 Singapore대학(IEEE Trans. Wireless Commun., 2023)	MIMO	2D	Achievable rate(bps/Hz)
[29]	싱가포르 Singapore 대학(IEEE Trans. Wireless Commun., 2023)	SiMO	3D	Total transmit power(dBm)
[30]	미국 UT Austin 대학(IEEE Signal Process. Lett., 2024)	MISO	1D	Secrecy Rate(bits/s/Hz)
[31]	중국 Peking 대학(IEEE Trans. Wireless Commun., 2024)	SISO	2D	MMSE
[32]	싱가포르 Singapore 대학(IEEE Commun. Lett., 2023)	SISO	2D	NMSE

$$\mathbf{f}_s(\mathbf{A}_s) = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(x_s \cos \theta_{s,1} \sin \phi_{s,1} + y_s \sin \theta_{s,1})} \\ \vdots \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(x_s \cos \theta_{s,L_s} \sin \phi_{s,L_s} + y_s \sin \theta_{s,L_s})} \end{bmatrix},$$

여기서  $s \in \{t, r\}$ 는 송수신 필드를 의미하는 인덱스이다. 결론적으로, 임의의 좌표  $\mathbf{A}_t$ 와  $\mathbf{A}_r$ 에 위치한 두 송수신 MA 사이의 채널은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h(\mathbf{A}_t, \mathbf{A}_r) = \mathbf{f}_t(\mathbf{A}_t)^H \Sigma \mathbf{f}_r(\mathbf{A}_r)$$

## 2. 2차원 이동형 안테나 시스템 최신 연구 동향

MA시스템은 기계장치를 이용하여 3차원 구동이 가능하기 때문에 FA 시스템보다 높은 DoF를 얻을 수 있다. 최근에는 이러한 특성을 활용하여 안테나 가중 벡터 (antenna weight vector, AWW)와 안테나 위치 벡터 (antenna position vector, APV)를 최적화하여 시스템 성능을 극대화하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

[28]에서는 채널 용량을 최대화하기 위해 송수신단의 MA 위치와 전송 신호의 공분산 행렬을 함께 최적화하는 연구가 이루어졌다. 이 연구에서는 비볼록 (non-convex) 문제를 해결하기 위해 송수신 MA의 위치와 송신 공분산 중 하나의 변수를 번갈아가며 고정하고 다른 변수를 최적화하는 교대 최적화 알고리즘을 개발했다.

[29]에서는 단일 MA를 가지는 사용자와 고정 배열 안테나를 가지는 기지국이 존재하는 MA 기반 상향링크 NOMA 시스템 모델을 고려하였다. 이 시스템은 [27]의 채널 모델을 기반으로 상향링크에서 각 사용자의 최소 달성 가능한 전송률 (achievable-rate)을 고려하여 사용자의 총 전송 전력을 최소화하기 위한 최적화 문제를 정의하였다. 이를 위해 MA의 위치와 사용자들의 송신 전력, 기지국의 수신 결합 행렬을 함께 최적화했다.

해당 연구에서는 이러한 비선형 문제를 해결하기 위해 제로포싱 (zero-forcing)과 최소 제곱 오차 (minimum mean square error, MMSE)를 결합한 알고리즘을 개발하여 사용하였다.

기존 물리 계층 보안(physical-layer security, PLS) 시스템에서는 빔포밍이 원치 않는 방향에서 수신되는 신호의 수신 품질을 저하시켜 통신 보안 성능을 향상시키기도 하지만, 안테나 배열의 조향 벡터가 특정 각도에 대해 고정이므로 고유한 공간 상관관계에 의해 빔포밍 이득이 저하될 수 있다. 그에 반해, MA는 모든 안테나의 위치를 유연하게 조정하여 다양한 각도에 해당하는 조향 벡터를 변경함으로써 보안 성능을 극대화할 수 있다.

[30]에서는 배열 MA를 가지는 엘리스와 단일 안테나를 가지는 밥 사이에 다수의 단일 안테나를 가진 도청자가 존재하는 환경에서 달성 가능한 비밀율 (secrecy rate)을 최대화하기 위해 엘

리스의 전송 빔포밍 벡터와 안테나 위치를 공동으로 최적화하는 문제를 정의하였다. 이를 위해 비볼록 문제를 해결하기 위한 투영된 경사 상승법 (projected gradient ascent, PGA)과 교차 최적화 알고리즘을 개발했다.

## 3. 2차원 이동형 안테나 시스템 채널 추정 기법

MA 시스템은 최적화를 통해 수신 신호 세기 증가, 간섭 완화, 공간 다중화 등의 측면에서 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다 [25]. 그러나, MA의 위치 최적화는 전체 송수신 영역 사이의 완전한 채널 상태 정보 (channel state information, CSI)에 의존하기 때문에, 고정형 안테나 시스템에 비해 매우 큰 CSI 정보가 요구된다. 송수신 영역의 모든 위치를 통해 채널 응답을 측정하면 매우 높은 파일럿 오버헤드와 시간 소비를 초래하여 실제로는 추정이 불가능하다. 따라서, 송수신 영역의 일부 위치에서 채널 측정을 수행하고, 이를 바탕으로 전체 송수신 영역의 완전한 CSI를 재구성할 수 있는 새로운 기법의 필요성이 대두되고 있다 [32].

[32]에서는 각도 도메인에서 채널 경로 정보의 희소성을 활용하여 다중 경로 구성 요소 (multi-path component, MPC)의 AoD, AoA 등의 정보를 복원하고, 이를 기반으로 한 채널 추정 기법을 제안했다. 또한, [27]에서 제안된 필드 응답 채널 모델을 활용하면 공간 도메인에서 송수신 안테나 위치에 대한 무한 채널 응답을 각도 도메인에서 유한한 수의 MPC의 중첩된 응답으로 나타낼 수 있다.

송수신 영역의 제한된 크기로 인해 채널 경로의 각도 해상도가 제한되므로, AoD/AoA가 유사한 채널 경로는 단일 유효 채널 경로로 간주할 수 있으므로 각도 도메인에서 채널 희소성을 보장한다. 따라서, MPC 정보는 희소 신호 복구 기법인 압축 센싱 (compressed sensing)을 통해 복구할 수 있으며, 이를 통해 전체 송수신 영역 사이의 완전한 CSI 정보를 재구성할 수 있다. 이렇게 각도 도메인의 희소성을 활용한 CSI 획득 기법을 사용하면 파일럿 오버헤드를 크게 줄일 수 있다.

## IV. 결론 및 시사점

본고에서는 6G 이동통신 시스템을 위한 다중 안테나 시스템 중 이동형 안테나 시스템과 최신 연구 동향에 대해 살펴보았다. 많은 수의 안테나를 사용하여 공간 다이버시티를 얻는 기존의 MIMO 시스템과 달리, 이동형 안테나 시스템은 안테나 수에 따른 하드웨어 비용을 줄이고, 한정된 공간 내에 MIMO 시스템을 구현할 수 있는 기술이다. 이동형 안테나 시스템의 최신 연구 동향들에 대해서도 알아보았으며, 다양한 6G 이동통신 시스템에

이동형 안테나를 적용해 통신 성능을 향상시킬 수 있으며, 에너지 및 스펙트럼 효율성도 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

추가적으로, 이동형 안테나 시스템은 작은 공간 내에 많은 안테나들로 인해 상관 관계가 생기게 되는데, 안테나 간의 상관 관계를 모두 고려하는 것이 복잡하고 어려운 문제이다. 이로 인해 다양한 채널 모델 분석에 관한 연구들이 진행되었다[33-36]. 하지만, 이해가 쉽고 닫힌 수식으로 유도된 채널 분석 수식이 없고, 정확히 모든 채널 사이의 상관 관계를 고려한 채널 분석에 관한 연구가 부족한 상황이다. 따라서 추후 이동형 안테나 시스템을 수학적으로 분석하기 위해 상관관계를 정확히 고려한 채널 모델의 수식을 닫힌 수식으로 유도하는 연구를 진행할 수 있음을 파악하였다.

## Acknowledgement

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABCMIMO: 증강 빔 라우팅기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 및 한국연구재단의 지원(No. NRF2022R1I1A3073740)을 받아 수행된 연구임.

## 참고 문헌

- [1] Davies R. W. "The Data Encryption standard in perspective," *Computer Security and the Data Encryption Standard*, pp. 129-IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 24, no. 2, pp. 1072-1116, 2nd Quart. 2022.
- [2] D. Moltchanov, E. Sopin, V. Begishev, A. Samuylov, Y. Koucheryavy, and K. Samouylov, "A Tutorial on Mathematical Modeling of 5G/6G Millimeter Wave and Terahertz Cellular Systems," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 2, pp. 1072-1116, 2nd Quart. 2022.
- [3] A. J. PAULRAJ, D. A. GORE, R. U. NABAR, and H. BOLCSKEI, "An overview of MIMO communications - a key to gigabit wireless," *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 198-218, Feb. 2004.
- [4] "Samsung Shares Massive MIMO Roadmap in New Whitepaper," *Samsung Newsroom*, Dec. 2020 (<https://news.samsung.com/global/samsung-shares-massive-mimo-roadmap-in-new-whitepaper>).
- [5] E. Björnson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO is a reality—What is next? Five promising research directions for antenna arrays," *Digital Signal Processing*, vol. 94, pp. 3-20, Nov. 2019.
- [6] Z. Wang, J. Zhang, H. Du, W. E. I. Sha, B. Ai, D. Niyato, and M. Debbah, "Extremely large-scale MIMO: Fundamentals, challenges, solutions, and future directions," *IEEE Wireless Commun.*, early access, Apr. 2023.
- [7] L. Zhu, W. Ma, and R. Zhang, "Modeling and performance analysis for movable antenna enabled wireless communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, early access, Nov. 2023.
- [8] J.-H. So, J. Thelen, A. Qusba, G. J. Hayes, G. Lazzi, and M. D. Dickey, "Reversibly deformable and mechanically tunable fluidic antennas," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 19, no. 22, pp. 3632-3637, Nov. 2009.
- [9] "Researchers develop microfluidic liquid antenna," *EE Times*, Dec. 2009 (<https://www.eetimes.com/researchers-develop-microfluidic-liquid-antenna/>).
- [10] S. Dash, C. Psomas, and I. Krikidis, "Selection of metallic liquid in sub-6 GHz antenna design for 6G networks," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, pp. 20551, Nov. 2023.
- [11] K. K. Wong, A. Shojaeifard, K. F. Tong, and Y. Zhang, "Fluid antenna systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 1950-1962, Mar. 2021.
- [12] Z. Chai, K. -K. Wong, K. -F. Tong, Y. Chen, and Y. Zhang, "Port Selection for Fluid Antenna Systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, no. 5, pp. 1180-1184, May 2022.
- [13] K. -K. Wong and K. -F. Tong, "Fluid Antenna Multiple Access," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 7, pp. 4801-4815, Jul. 2022.
- [14] K. -K. Wong, D. Morales-Jimenez, K. -F. Tong, and C. -B. Chae, "Slow Fluid Antenna Multiple Access," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 71, no. 5, pp. 2831-2846, May 2023.
- [15] K. -K. Wong, K. -F. Tong, Y. Chen, and Y. Zhang, "Fast fluid antenna multiple access enabling massive

- connectivity," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 2, pp. 711-715, Feb. 2023.
- [16] K. -K. Wong, K. -F. Tong, Y. Chen, Y. Zhang, and C. -B. Chae, "Opportunistic Fluid Antenna Multiple Access," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 11, pp. 7819-7833, Nov. 2023.
- [17] D. Zhang, S. Ye, M. Xiao, K. Wang, M. Mi Renzo, and M. Skoglund, "Fluid antenna array enhanced over-the-air computation," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, Mar. 2024.
- [18] K. -K. Wong, K. -F. Tong and C. -B. Chae, "Fluid Antenna System—Part II: Research Opportunities," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 8, pp. 1924-1928, Aug. 2023.
- [19] H. Qin, W. Chen, Z. Li, Q. Wu, N. Cheng, and F. Chen, "Antenna Positioning and Beamforming Design for Fluid Antenna-Assisted Multi-User Downlink Communications," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 13, no. 4, pp. 1073-1077, Apr. 2024.
- [20] Xu, Ruopeng et al. "Fluid Antenna Relay Assisted Communication Systems Through Antenna Location Optimization," *arXiv preprint arXiv:2404.00628*, 2024.
- [21] L. Tlebaldiyeva, S. Arzykulov, T. A. Tsiftsis, and G. Nauryzbayev, "Full-Duplex Cooperative NOMA-based mmWave Networks with Fluid Antenna System (FAS) Receivers," in *Proc. International Balkan Conference on Communications and Networking (BalkanCom)*, pp. 1-6, Jun. 2023.
- [22] C. Skouroumounis and I. Krikidis, "Fluid Antenna-Aided Full Duplex Communications: A Macroscopic Point-of-View," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 41, no. 9, pp. 2879-2892, Sep. 2023.
- [23] J. Zhu, G. Chen, P. Gao, P. Xiao, Z. Lin, and A. Quddus, "Index Modulation for Fluid Antenna-Assisted MIMO Communications: System Design and Performance Analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, early access, Feb. 2024.
- [24] C. Psomas, P. J. Smith, H. A. Suraweera, and I. Krikidis, "Continuous fluid antenna systems: Modeling and analysis," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 12, Dec. 2023.
- [25] L. Zhu, W. Ma and R. Zhang, "Movable antennas for wireless communication: Opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, early access, Oct. 2023.
- [26] J. Zheng et al., "Flexible-position MIMO for wireless communications: Fundamentals, challenges, and future directions," *IEEE Wireless Commun.*, Mar. 2024 (early access).
- [27] L. Zhu, W. Ma and R. Zhang, "Modeling and performance analysis for movable antenna enabled wireless communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Nov. 2023 (early access).
- [28] W. Ma, L. Zhu and R. Zhang, "MIMO capacity characterization for movable antenna systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 4, pp. 3392-3407, Apr. 2024.
- [29] L. Zhu, W. Ma, B. Ning and R. Zhang, "Movable antenna enhanced multiuser communication via antenna position optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Dec. 2024 (early access).
- [30] G. Hu, Q. Wu, K. Xu, J. Si and N. Al-Dhahir, "Secure wireless communication via movable-antenna array," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 31, pp. 516-520, Jan. 2024.
- [31] Z. Xiao et al., "Channel estimation for movable antenna communication systems: A framework based on compressed sensing," *IEEE Trans. Wireless Commun.* Apr. 2024 (early access).
- [32] W. Ma, L. Zhu and R. Zhang, "Compressed sensing based channel estimation for movable antenna communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 10, pp. 2747-2751, Oct. 2023.
- [33] L. Zhu, W. Ma, and R. Zhang, "Modeling and performance analysis for movable antenna enabled wireless communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, early access, Nov. 2023.
- [34] M. Khammassi, A. Kammoun, and M.-S. Alouini, "A new analytical approximation of the fluid antenna system channel," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 12, pp. 8843-8858, Dec. 2023.
- [35] K. K. Wong, K. F., Tong, Y. Chen, and Y. Zhang, "Closed-form expressions for spatial correlation

parameters for performance analysis of fluid antenna systems,” *Elect. Lett.*, vol. 58, no. 11, pp. 454–457, Apr. 2022.

- [36] P. Ramirez-Espinosa, D. Morales-Jimenez, and K. K. Wong, “A new spatial block-correlation model for fluid antenna systems,” *arXiv preprint*, arXiv:2401.04513, 2024.

## 약 력



이 예 림

2022년 충남대학교 전자공학과 학사  
2022년~현재 충남대학교 전자공학과 석사  
관심분야: 무선통신, 이동형 안테나 시스템, 협력 중계  
프로토콜



백 주 영

2024년 충남대학교 전자공학과 학사  
2024년~현재 충남대학교 전자공학과 석사  
관심분야: 무선통신, 스케줄링 알고리즘



정 방 철

2002년 아주대학교 전자공학부 학사  
2004년 KAIST 전기전자공학과 석사  
2008년 KAIST 전기전자공학과 박사  
2008년~2009년 KAIST IT융합연구소 연수연구원  
2009년~2010년 KAIST IT융합연구소 연구교수  
2010년~2014년 경상국립대학교 정보통신공학과 조교수  
2014년~2015년 경상국립대학교 정보통신공학과 부교수  
2015년~현재 충남대학교 전자공학과 정교수  
관심분야: 무선통신, 통계적 신호 처리, 정보이론, 압축센싱,  
이동통신, 주파수 공유