

동적 메타표면 안테나 기반 무선 이동통신 연구 동향에 대한 조사

이동현, 오준석, 송치현, 최성진, 김주영, 이승찬, 홍성훈, Thanh Phung Truong, 조성래

중앙대학교 컴퓨터공학과

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

A Survey on Research Trends in Wireless Mobile Communications based on Dynamic Metasurface Antennas

Donghyun Lee, Junsuk Oh, Chihyun Song, Seongjin Choi, Juyoung Kim, Seungchan Lee,

Seonghun Hong, Thanh Phung Truong, and Sungrae Cho

School of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University

요약

본 조사는 차세대 이동통신 시대의 동적 메타 표면 안테나(Dynamic Metasurface Antenna, DMA)의 참조와 기반 홀로그래픽 합성 원리와 저전력·저복잡도 급전 구조를 개관하고, DMA기반 무선 이동통신에서 상·하향 대규모 MIMO에서의 시스템 모델과 성능 한계에 대해 간명히 정리한다. 상향링크 측면에선 메타원소 결합·주파수 특성을 포함한 모델을 바탕으로 정보이론적 합율에 근접하는 설계 흐름을 정리하고, 다운링크 측면에선 Lorentzian 제약을 보존한 빔포밍을 중심으로 정리한다. 또한 에너지 효율 극대화를 위해 송신 공분산과 DMA 가중치를 순시·통계 채널 상태 정보 관점에서 공동 설계하는 접근(분수계획, Dinkelbach, 결정적 등가)을 종합한다. 전반적으로 DMA는 적은 RF 체인으로도 다사용자·광대역·저분해능 조건에서 성능-복잡도 균형을 달성할 수 있음을 최근 문헌이 시사한다.

I. 서론

초고주파 대역과 대량 연결로 확장되는 6G 시대에는, 대면적 개구를 이용한 높은 이득과 민첩한 빔 제어가 필수적이다 [1]. 그러나 전통적인 능동 배열은 다수의 RF 체인과 대규모 위상천이기 네트워크를 요구해 전력·비용·보정(calibration) 부담이 크고, 수동 RIS는 위상 중심 제어로 인해 진폭 테이퍼링이나 빠른 패턴 전환에 제약이 있다 [2]. 이러한 한계를 보완하기 위해, 최근 동적 메타 표면 안테나(Dynamic Metasurface Antenna, DMA)가 간단한 급전 구조와 저전력 소자 구동을 바탕으로 빔 조향과 패턴 재구성을 동시에 달성하는 대안으로 부상하고 있다.

DMA의 핵심 아이디어는 도파관(Waveguide) 또는 마이크로스트립(Microstrip)마다 한 개의 RF-chain을 연결하고 참조파(Reference Wave)를 인가하여, 도파관 내부를 따라 진행하는 참조파가 상부 금속면에 패터닝된 다수의 메타물질 소자를 차례로 여기시키고, 각 소자가 이 에너지를 자유공간으로 누설·방사하도록 만드는 것이다 [3]. 소자는 파장이 충분히 큰 조건에서 자기 쌍극자로 근사되며, 대표적으로 CELC·슬롯과 같은 complementary 구조가 사용된다. 설계자는 소자의 기하, 주변 유전체, 바랙터 및 다이오드 등 간단한 집중소자를 통해 공진 특성과 손실을 조절함으로써 전압 기반 동적 재구성을 구현한다. 이때 소자의 유효 분극률이 로렌츠(Lorentzian) 특성을 따르기 때문에 진폭과 위상이 본질적으로 연동되는 제약이 발생한다. 즉, 위상을 크게 회전하면 진폭이 함께 감소하는 경향이 있어, 전통적 배열처럼 위상·진폭을 독립적으로 다루기 어렵고, 위상을 크게 회전하면 진폭이 감소한다는 제약이 발생한다 [4].

이러한 물리 제약은 DMA의 설계 관점을 규정한다. DMA는 홀로그래픽 합성(Holographic Synthesis) 틀에서, 참조파의 진행 위상과 각 위치의 소자 가중치(분극률)를 결합해 목표 파면을 만든다. 실제 구현에서는 (i) 연속 진폭 테이퍼링만으로도 주빔 형성이 가능하고, (ii) 하드웨어 단순화

를 위해 소자를 켜고 끄는 on/off 이진 가중치로도 충분한 방향성을 확보할 수 있다(단, 이 경우 사이드로브 상승이라는 트레이드오프가 존재한다). 더불어, 소자들이 방사·손실을 유발하면서 참조파는 길이 방향으로 점차 감쇠하므로, 이론상의 전체 길이보다 유효 개구 길이가 빔폭과 직진성을 사실상 좌우한다. 따라서 DMA 설계는 소자 선택·튜닝, 가중치 분포 합성, 참조파 감쇠 관리의 세 축에서 균형을 찾는 문제가 된다.

이 구조적 특성 덕분에 DMA는 저전력·저복잡도라는 장점을 갖는다. 하나의 도파관 또는 마이크로스트립에 한 개의 RF 체인이 연결되어 하나의 파이프가 긴 개구를 자연스럽게 급전하므로 다수의 RF 체인이나 대규모 phase shifter 네트워크가 불필요하고, 보드 면적·부품 수·발열·보정 부담이 크게 줄어든다. 또한 PCB 기반의 박막·평면형 구조로 대면적 제작과 모듈 타일링이 용이하며, 전압 기반 제어 변수를 사용하므로 제조 편차를 가중치 재하중/보정으로 흡수하기 쉽다. 결과적으로 DMA는 멀티빔, 빔 스위칭, 프리셋 전환 등 빔 민첩성(beam agility)이 요구되는 통신·레이더 통합(ISAC) 시나리오에서 높은 활용 가치를 지닌다.

본 연구는 DMA가 지니는 저전력·저복잡도 및 높은 재구성 능력에 주목하여, 무선 이동통신을 중심으로 한 관련 학술 문헌을 체계적으로 조사하고, 최근 성과와 한계를 정리한다.

II. 본론

1. 연구 동향

차세대 무선 이동통신에서 대규모 안테나 배열의 전력·비용·보정 부담을 줄이면서도 대역폭·다중접속 성능을 확보하기 위한 대안으로 DMA가 주목받고 있다. DMA 위에 배치된 다수의 메타물질 소자를 전자적으로 조절해 아날로그 결합·압축·빔형성을 하드웨어 수준에서 구현하는 구조로, 동일 개구에서 RF 체인 수를 현저히 줄이면서도 대규모 배열에 준하

는 성능을 목표로 대규모 상향링크 시나리오에서 DMA의 수학적 모델과 한계(주파수 선택성·소자 상호결합)를 체계화하고, 기본 성능 한계(정보이론적 한계)에 근접하는 설계 알고리즘이 [5]에서 제시되었다. [5]에서는 특히 주파수 평탄 채널에서 소자 주파수 응답이 동일할 때 이상적 배열과 유사한 합율이 가능함을 수치로 입증하였다.

저해상도 양자화 수신기와 결합도 활발하다. [6]에서 MIMO-OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) 상향링크에서 DMA의 주파수 선택적 가중 프로파일을 모델에 반영하고, 태스크 기반 양자화 (Task-based Quantization) 틀로 DMA 가중치, 아날로그-디지털 변환기 (Analog-to-Digital Converter, ADC)의 동적범위·디지털 처리를 공동 최적화하는 방법을 제안하였다. 적절한 스펙트럼 다이버시티 활용 시, 기존 하이브리드 구조 대비 OFDM 심볼 복원 정확도와 BER (Bit Error Rate)에서 의미 있는 개선이 보고되며, DMA가 추가 아날로그 전치 하드웨어 없이 저비트 ADC 환경을 견인할 수 있음을 보였다 [6].

다운링크에서는 Lorentzian 제약을 반영한 빔포밍이 핵심 이슈다. 단일 사용자에서는 폐형식(단원형) 해를 갖는 최적 소자 가중치가 도출되고, 다 사용자 환경에서는 가중합율(WSR) 최대화를 위해 교대 최적화 (Alternating Optimization, AO)로 디지털 프리코딩과 DMA 가중치를 번갈아 갱신하는 알고리즘이 제시되었다 [7]. [7]에서는 특히 Lorentzian 제약을 두 부분으로 분할하는 해석 기법을 통해 성능열화 없이 난이도를 낮추는 점이 특징이다. 이후 연구는 동일 문제에서 Riemannian 최적화의 시간·복잡도 한계를 지적하고, 투영 경사하강으로 대체한 AO-PGD (AO-Projected Gradient Descent, AO-PGD)와, 이산 위상 상태를 직접 다루는 교차엔트로피 최적화(AO-Cross-Entropy Optimization, AO-CEO)를 제안하였다 [8]. AO-PGD는 WSR 성능을 유지하면서 계산량을 크게 줄였고, AO-CEO는 저해상도 위상에서도 벤치마크를 상회하는 WSR을 달성하였다 [8].

에너지 효율(Energy Efficiency, EE) 관점에서도 DMA의 이점이 보고된다. [9]에서 상향링크 다중사용자 시스템에서 Dinkelbach 변환, AO 및 결정적 등가(Deterministic Equivalent, DE) 기반의 틀로, 순시·통계 CSI 각각에 대해 송신 공분산과 DMA 가중치를 공동 설계하여 EE를 극대화하였다. 특히 통계 CSI 설정에서 최적 송신 방향의 폐형식과 에르고딕 SE의 DE 근사로 실용 복잡도를 낮추면서도 EE 이득을 달성한다 [9]. 또한 다운링크 다사용자 시스템에 대해 분수계획(EE 최대화) 하에서 Lorentzian-phase와 전력 제약을 포함한 AO, 다양체 최적화(Manifold Optimization, MO) 및 순차적 볼록 근사(Successive Convex Approximation, SCA) 기반 설계가 제안되었고, 제안 해법의 EE 우수성이 수치적으로 검증되었다.

III. 결론

본 조사는 DMA가 참조와 기반 홀로그래픽 합성과 로렌츠 제약 하의 소자 가중치 설계를 통해 적은 RF 체인으로도 대규모 배열에 준하는 성능-복잡도 균형을 제공함을 정리했다. 상향 링크에서는 메타원소의 주파수 선택성·상호결합을 반영한 현실적 모델 위에서 합율 한계에 근접하는 수신 구조가 가능함을 보였고, 광대역 환경에서는 저비트 ADC를 쓰는 MIMO-OFDM 수신기와 결합을 통해 아날로그 전치-양자화-디지털 복원의 공동 최적화가 효과적임을 확인했다. 다운링크 다사용자에서는 로렌츠 제약을 보존한 AO를 중심으로, 계산량을 낮춘 알고리즘을 통해 이산 가중을 직접 다루는 가중합율 성능을 유지·상회할 수 있음을 입증했다. 아울러 에너지 효율(EE) 측면에서는 분수계획(Dinkelbach)과 DE를 결합

한 송수신 공동 설계가 순시·통계 채널 상태 정보 모두에서 유효함을 보였다. 종합하면 DMA는 다사용자·광대역·저분해능 조건에서 전력·비용·보정 부담을 완화하면서 목표 성능(합율·BER·EE)을 균형 있게 달성할 수 있는 차세대 무선 이동통신의 유력 안테나 아키텍처다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2022-00156353, 50%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2023-00209125)을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] D. Kwon, J. Jeon, S. Park, J. Kim and S. Cho, "Multiagent DDPG-Based Deep Learning for Smart Ocean Federated Learning IoT Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 10, pp. 9895-9903, Oct. 2020.
- [2] C. Song, D. Lee, Y. Lee, W. Noh, and S. Cho, "Deep Learning based Energy-Efficient Transmission Control for STAR-RIS aided Cell-Free Massive MIMO Networks," *ICT Express*, vol. 11, no. 2, pp.341-347, April 2025.
- [3] Smith, D. R., Yurduseven, O., Mancera, L. P., Bowen, P., and Kundtz, N. B., "Analysis of a waveguide-fed metasurface antenna," *Physical Review Applied*, vol. 8, no. 5, pp. 054048, Nov. 2017.
- [4] N. Shlezinger, G. C. Alexandropoulos, M. F. Imani, Y. C. Eldar, and D. R. Smith, "Dynamic Metasurface Antennas for 6G Extreme Massive MIMO Communications," *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 2, pp. 106-113, April 2021.
- [5] N. Shlezinger, O. Dicker, Y. C. Eldar, I. Yoo, M. F. Imani, and D. R. Smith, "Dynamic Metasurface Antennas for Uplink Massive MIMO Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 10, pp. 6829-6843, Oct. 2019.
- [6] Wang, H., Shlezinger, N., Eldar, Y. C., Jin, S., Imani, M. F., Yoo, I., and Smith, D. R., "Dynamic Metasurface Antennas for MIMO-OFDM Receivers With Bit-Limited ADCs," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 4, pp. 2643-2659, April 2021.
- [7] S. F. Kimaryo and K. Lee, "Downlink Beamforming for Dynamic Metasurface Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 7, pp. 4745-4755, July 2023.
- [8] J. C. Chen and C. H. Hsu, "Beamforming Design for Dynamic Metasurface Antennas-Based Massive Multiuser MISO Downlink Systems," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 1387-1398, 2024.
- [9] L. You, J. Xu, G. C. Alexandropoulos, J. Wang, W. Wang, and X. Gao, "Energy Efficiency Maximization of Massive MIMO Communications With Dynamic Metasurface Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 393-407, Jan. 2023.