

Near-field 기반 Extremely Large MIMO 시스템 연구 동향 조사

송치현, 이동현, 오준석, 이운성, 김재민, 조성래
중앙대학교 컴퓨터공학과

{chsong, dhlee, jsch, yslee, jmkim}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

Recent Advances in the near-field Extremely Large MIMO Systems

Chihyun Song, Donghyun Lee, Junsuk Oh,

Yunseong Lee, Jaemin Kim, and Sungrae Cho

Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang Univ.

요약

초대규모 MIMO(XL-MIMO) 기술은 수백 개 이상의 안테나를 활용하여 공간 자원 효율을 높일 수 있으나, 안테나 수의 증가에 따라 레일리 거리가 수백 미터로 확장되면서, 사용자와 산란체가 근거리 영역에 위치하게 됨. 이러한 환경에서는 전파가 구면파 형태로 도달하며, 기존의 평면파 기반 원거리 모델은 더 이상 유효하지 않으며, 이로 인해 채널 모델링, 추정, 빔트레이닝 등 다양한 측면에서 기존 접근 방식의 성능이 저하됨. 이를 극복하기 위해 각도와 거리 정보를 함께 고려하는 극좌표 기반 코드북 모델, 근거리 특성을 반영한 채널 추정 기법, 빔 트레이닝, 위치 추정 기술 등이 연구되고 있으며, 본 논문에서는 이러한 근거리 XL-MIMO 통신 환경에서의 최신 연구 동향을 조사하였음

I. 서론

massive MIMO 기술은 다수의 안테나를 기지국에 배치하여 빔포밍과 다중화를 통해 주파수 효율을 높일 수 있음. 향후 6G 통신 기술에서는 더 높은 주파수 효율을 얻기 위해 더 많은 안테나를 장착할 것으로 예상되며, 이를 extremely large MIMO (XL MIMO) 기술로 정의함. 그러나 안테나 갯수에 비례하여 RF chain이 필요하며 이에 따른 전력 소비가 늘어나 하이브리드 빔포밍 구조 적용이 필수적임. 이때, XL MIMO의 높은 차원에 따라 채널 추정에 사용되는 파일럿 오버헤드가 커지고 compressive sensing(CS) 기반의 채널 추정이 대안으로 연구되고 있음. 기존의 CS 기반 채널 추정 기법은 신호 전파의 평면파 가정 하에 각도 도메인 채널의 희소성을 이용하여 수신 신호를 orthogonal matching pursuit(OMP) 알고리즘으로 채널 정보를 복원하였음. 그러나 massive MIMO에서 XL MIMO의 전환은 단순히 안테나 배열의 증가만 의미하는 것이 아니라 신호 전파 특성도 변하게 됨[1]. 신호 전파는 근거리에서는 구면파로 가정되며 일정 거리 이상 멀어지면 평면파로 도달한다고 가정됨. 이를 구분하는 기준은 레일리 거리로 결정되며, 이는 안테나 구경에 비례함. 따라서, 안테나 배열이 증가할수록 레일리 거리가 증가하여 mmWave, THz 통신의 경우 수백미터에 이르게 되어 사용자 및 산란체들이 근거리 영역에 위치하게 되며 전파가 구면파 특성을 보이게 됨. 이러한 근거리 전파 환경에서는 채널의 에너지가 특정 각도에 집중되지 않고 분산되는 에너지 스프레드 효과가 발생하고, 각도 영역의 채널 희소성이 붕괴됨. 이에 따라 근거리 채널의 추정은 각도 및 위치를 모두 고려한 polar domain sparsity를 이용하게 됨[2]. 이때, 극좌표 기반의 코드북 사용으로 인해 기존 채널 추정이나 빔트레이닝 기법의 성능이 저하되는 문제가 발생함. 본 논문에서는 구면파 특성을 반영한 통신 시스템 설계 및 이에 따른 빔트레이닝, 위치 추

정 기술의 최신 연구 동향을 조사하였음.

II. 본론

기존 MIMO 채널에서는 통계적 채널 모델을 통해 채널을 표현하였음[3]. XL-MIMO에서는 안테나 수의 증가와 고주파수 대역 사용으로 인해 송수신 간 거리가 근거리 영역에 해당하는 경우가 많아짐. 이러한 문제를 해결하기 위해 각도와 거리 정보를 함께 반영하는 극좌표 기반 모델 또는 Green 함수 기반의 물리적 채널 모델을 채택하고 있음[4].

또한, XL-MIMO 시스템에서는 채널의 파라미터 수가 증가하고, 안테나 수 대비 RF 체인의 수가 제한되기 때문에, 효율적인 채널 추정이 더욱 중요해짐. 이에 따라 기존의 DFT 기반 압축 센싱 기법은 polar domain 변환을 통해 확장되었고, hybrid-field 환경에서는 각 필드의 경계에 따라 적응적으로 코드북을 선택하기 어려워 이를 추정하는 dictionary learning 기법이 제안됨[5]. [6]에서는 사전 위치 정보나 구조적 제약을 활용한 저차원 복원 기법을 제안하였으며, 이는 LoS 환경에서 효율적인 계산을 가능하게 함. [7]에서는 안테나에 장착된 전력 센서를 통해 사용자 위치를 추정한 후, 이를 기반으로 센싱 기반으로 채널을 추정하는 기법을 제안함.

XL-MIMO에서 빔포커싱은 단일 방향이 아닌 공간 상 특정 위치에 에너지를 집중하는 방식으로 변화함. [8]에서는 서버어레이 기반 빔포커싱 분석이 수행되었고, 그레이팅 로브로 인한 간섭 문제를 해결하기 위한 사용자 그룹핑 기반 스케줄링 기법을 제안함. [9]에서 기존 빔트레이닝 기법이 근거리와 원거리 모두를 포괄하는 hybrid-field 빔트레이닝으로 확장되었으며, 각도-거리 이중 추정기(TPBE)와 계층적 서버어레이 기반 트레이닝(SCH)기법을 통해 낮은 계산 복잡도와 채널 추정을 동시에 달성함.

추가적으로 빔포커싱을 통해 통신 뿐만 아니라 정밀한 사용자 위치 추정

및 환경 인식에도 활용될 수 있음. 구면파 전파 특성을 활용하면 각도와 거리의 자유도를 활용한 위치 추정이 가능해지며, MUSIC, ESPRIT 등 고전적인 파라메트릭 추정 기법이 확장되어 사용됨[10]. 대규모 어레이 구조에서의 근거리 L&S(Localization and Sensing)는 전통적인 레이더 방식보다 높은 정확도와 적응성을 제공하며, 향후 통신-센싱 통합 시스템의 핵심이 될 것으로 기대됨.

III. 결론

본 논문에서는 XL-MIMO 시스템에서 레일리 거리의 증가에 따른 신호 전파 특성을 반영한 채널 모델, 추정 기법, 빔 포커싱, 위치 추정기법에 대한 최근 연구 동향을 조사하였음.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획지원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2022-00156353, 50% / IITP-2025-RS-2023-00258639, 50%).

참 고 문 헌

- [1] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Power Scaling Laws and Near-Field Behaviors of Massive MIMO and Intelligent Reflecting Surfaces," in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 1, pp. 1306-1324, 2020
- [2] H. Wu, L. Lu and Z. Wang, "Near-Field Channel Estimation in Dual-Band XL-MIMO With Side Information-Assisted Compressed Sensing," in IEEE Transactions on Communications, vol. 73, no. 2, pp. 1353-1366, Feb. 2025
- [3] M. Choi, J. Kim and J. Moon, "Wireless Video Caching and Dynamic Streaming Under Differentiated Quality Requirements," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 36, no. 6, pp. 1245-1257, June 2018
- [4] Z. Wang et al., "Analytical Framework for Effective Degrees of Freedom in Near-Field XL-MIMO," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 24, no. 4, pp. 3465-3482, April 2025
- [5] B. Chen, L. Lu, Y. Dong and Z. Wang, "Unified Block-Sparse Hybrid-Field Channel Estimation for XL-MIMO Systems," in IEEE Transactions on Vehicular Technology
- [6] Y. Guo, X. Guo and Y. Wang, "Channel Estimation for Near-Field Line-of-Sight XL-MIMO Communications Using Geometric Prior," in IEEE Communications Letters, vol. 29, no. 4, pp. 779-783, April 2025
- [7] S. Liu, X. Yu, Z. Gao, J. Xu, D. W. K. Ng and S. Cui, "Sensing-Enhanced Channel Estimation for Near-Field XL-MIMO Systems," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 43, no. 3, pp. 628-643, March 2025
- [8] X. Li, Z. Dong, Y. Zeng, S. Jin and R. Zhang, "Multi-User Modular

- XL-MIMO Communications: Near-Field Beam Focusing Pattern and User Grouping," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 23, no. 10, pp. 13766-13781, Oct. 2024
- [9] Y. Chen, C. Han and E. Björnson, "Can Far-Field Beam Training Be Deployed for Cross-Field Beam Alignment in Terahertz UM-MIMO Communications?," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 23, no. 10, pp. 14972-14987, Oct. 2024
- [10] Z. Wang, P. Ramezani, Y. Liu and E. Björnson, "Near-Field Localization and Sensing With Large-Aperture Arrays: From signal modeling to processing," in IEEE Signal Processing Magazine, vol. 42, no. 1, pp. 74-87, Jan. 2025