

Massive MIMO 시스템의 Fixed Point Network 알고리즘 연구 동향

송치현, 김재민, 조성래

중앙대학교 컴퓨터공학과

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

Recent Advances in the Massive MIMO based Fixed Point Network Algorithms

Chihyun Song, Jaemin Kim, and Sungrae Cho

Dept. of Computer Science and Engineering

Chung-Ang Univ.

요약

기존의 딥러닝 알고리즘은 무선 통신 시스템에서 채널 추정, 신호 검출, 소스 코딩 등 다양한 통신 분야에서 뛰어난 성능을 보여주었으나, 이론적 보장과 확장성 측면에서 한계가 존재함. 또한, massive MIMO 환경에서는 채널의 차원이 극도로 커지고 특성이 복잡해져, 전통적 반복 알고리즘은 높은 계산량을 요구하며 실시간 적용이 어려움. 이를 극복하기 위해 반복 알고리즘의 각 iteration을 신경망 네트워크로 표현하는 algorithm unrolling 기법이 제안되었으나, 레이어 수에 비례하는 높은 메모리/연산 복잡도와 알고리즘의 수렴 보장을 위한 레이어 수를 일반적으로 결정할 수 없으므로 인해 초대규모 시스템에서의 활용성에는 한계가 있음. Fixed point network는 반복 알고리즘의 수렴 과정을 fixed point iteration으로 해석하여, 이를 신경망 기반 contraction mapping으로 모델링함으로써 안정적이고 빠른 수렴을 보장함. 본 논문은 fixed point network의 원리와 이를 기반으로 한 massive MIMO 시스템 연구 동향에 대해 조사하였음.

I. 서론

기존의 딥러닝 알고리즘은 무선 통신 시스템에서 채널 추정, 신호 검출, 소스 코딩 등 다양한 통신 분야에서 뛰어난 성능을 보여주었으나, 이론적 보장과 확장성 측면에서 한계가 존재함. 또한, massive MIMO 환경에서는 채널의 차원이 극도로 커지고 특성이 복잡해져, 기존의 모델 기반 알고리즘은 높은 계산량을 요구하며 실시간 적용이 어려움[1-3]. 이를 극복하기 위해 반복 알고리즘의 각 iteration을 신경망 네트워크로 표현하는 algorithm unrolling 기법이 제안되었으나, 레이어 수에 비례하는 높은 메모리/연산 복잡도와 알고리즘의 수렴 보장을 위한 레이어 수를 일반적으로 결정할 수 없으므로 인해 초대규모 시스템에서의 활용성에는 한계가 있음.

이러한 한계를 보완하기 위해 fixed point network (FPN)가 연구되고 있음. FPN은 반복 알고리즘의 수렴 과정을 fixed point iteration로 해석하여, 이를 신경망 기반 contraction mapping으로 모델링함으로써 안정적이고 빠른 수렴을 보장함. Banach 고정점 정리에 기반하여 유일 해로 수렴이 보장되며, 학습 및 추론 과정에서 중간 상태 저장이 필요하지 않다는 장점이 존재함[4]. 이러한 특성 덕분에 FPN은 XL-MIMO 채널 추정[5] 등 많은 연구가 진행 중이며, 본 논문에서는 FPN의 기본 원리와 이를 기반으로 한 massive MIMO 시스템 연구 동향에 대해 조사하였음.

II. 본론

반복 알고리즘에서 갱신 구조는 일반적으로 $x^{t+1} = g(x^t, \theta^t)$,

$t \in \{1, \dots, T\}$ 로 표현됨. 여기서 x^t 는 t -번째 반복에서의 변수이고, $g(\cdot; \cdot)$ 는 반복 함수이며, θ^t 는 파라미터이다. Algorithm unrolling의 핵심 아이디어는 반복 과정을 여러 개의 DNN 계층으로 분리하고, 각 반복 함수 $g(\cdot; \cdot)$ 는 하나의 DNN 계층에 매핑하는 것이며, 업데이트 룰은 고정된 수의 DNN 연산으로 변환됨[6]. 파라미터 θ^t 는 DNN 학습 과정에서 역전파를 통해 손실 함수를 최소화함으로써 학습될 수 있음.

FPN은 반복 알고리즘을 학습 가능한 contraction mapping의 fixed point iteration으로 구성함. 이는 최적화 기반 반복 알고리즘이 무한 반복 시 얻어지는 평형 상태가 문제의 해와 일치한다는 성질을 가진다는 점에서 착안하였음. 따라서 문제의 최적해, 즉, fixed point 자체를 딥러닝 기반 mapping 함수의 학습 대상으로 설정함. 이때, contraction mapping이 Lipschitz constant < 1 조건을 만족하도록 설계되면, Banach 고정점 정리에 의해 반복 적용 시 유일한 고정점으로 수렴함이 보장됨[4]. 따라서 N 번의 반복을 N 개의 신경망 레이어로 구성하는 unrolling과 달리 안정적 수렴 및 추론 단계에서 계산량 조절이 가능함.

채널 추정은 대규모 안테나 시스템에서 간섭 관리 및 스펙트럼 효율 증가에 필수적이며, 기존의 LS, MMSE 기반 추정 방식은 안테나 수를 늘릴수록 고차원 행렬 연산을 수행해야 하므로 massive MIMO 환경에서는 연산량이 급격히 증가함. 이는 모델 기반 추정 방법이 coherence 시간 내에 신뢰할 수 있는 NMSE를 얻으면서 낮은 복잡성을 유지하기 어렵게 만듦. 이러한 한계를 극복하기 위해 제안된 FPN 기반 채널 추정 방식은 고전적 반복 알고리즘을 fixed point iteration으로 해석하여 신경망 구조를

설계함. Yu 등 [7]은 THz 초대규모 MIMO 시스템에서 발생하는 하이브리드 원거리 - 근거리 채널 추정 문제를 해결하기 위해 FPN-OAMP 방식을 제안함. 제안 기법은 기존 OAMP 알고리즘의 선형 추정 모듈을 유지하면서, 비선형 추정 모듈을 CNN으로 대체하고 이를 contractive mapping으로 설계함으로써 채널을 추정함. 학습 단계에서 수렴을 보장하며 추론 단계에서는 원하는 정확도에 따라 반복 횟수를 조정할 수 있어 복잡도와 성능의 트레이드오프를 제어 가능함. 시뮬레이션 결과, FPN-OAMP는 기존 OAMP 대비 약 15 dB의 NMSE 성능 향상을 달성하였으며, ISTA-Net+와 같은 unrolling 기반 접근법보다 빠르고 안정적인 수렴 특성을 보임.

III. 결론

FPN은 반복 알고리즘의 안정적 수렴과 딥러닝을 결합하여, massive MIMO 시스템 최적화에 높은 성능을 보이며, 향후 연구는 이를 더 복잡한 네트워크 아키텍처와 실제 배치 시나리오로 확장하는 방향으로 진행될 것임.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the IITP (Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation) - ITRC (Information Technology Research Center) (IITP-2025-RS-2022-00156353, 50% / IITP-2025-RS-2023-00258639, 50%) grants funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT).

참 고 문 헌

- [1] W. Yu, Y. Ma, H. He, S. Song, J. Zhang and K. B. Letaief, "Deep Learning for Near-Field XL-MIMO Transceiver Design: Principles and Techniques," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 63, no. 1, pp. 52-58, January 2025, doi: 10.1109/MCOM.001.2300829.
- [2] M. C. Ho, A.-T. Tran, D. Lee, J. Paek, W. Noh, and S. Cho, "A DDPG-based Energy Efficient Federated Learning Algorithm with SWIPT and MC-NOMA," *ICT Express*, vol. 10, no. 3, pp. 600-607, Jun. 2024.
- [3] W. J. Yun et al., "Cooperative Multiagent Deep Reinforcement Learning for Reliable Surveillance via Autonomous Multi-UAV Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 10, pp. 7086-7096, Oct. 2022.
- [4] H. H. Bauschke and P. L. Combettes, *Convex analysis and monotone operator theory in Hilbert spaces* (2nd edition). Springer, 2019.
- [5] W. Yu, Y. Shen, H. He, X. Yu, J. Zhang and K. B. Letaief, "Hybrid Far- and Near-Field Channel Estimation for THz Ultra-Massive MIMO via Fixed Point Networks," *GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, 2022, pp. 5384-5389, doi: 10.1109/GLOBECOM48099.2022.10001564.
- [6] J. Yang et al., "Deep Learning-Based Near-Field Wideband Channel Estimation: A Joint LISTA-CP Approach," in *IEEE*

Transactions on Vehicular Technology, doi: 10.1109/TVT.2025.3561798.

- [7] W. Yu, Y. Shen, H. He, X. Yu, J. Zhang and K. B. Letaief, "Hybrid Far- and Near-Field Channel Estimation for THz Ultra-Massive MIMO via Fixed Point Networks," *GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, 2022, pp. 5384-5389, doi: 10.1109/GLOBECOM48099.2022.10001564.