

딥러닝 기반 채널 피드백 기술 동향

김나현, 김가영, 심성훈, 장석빈, 이병주
인천대학교

{nhkim, gykim7, tjdgns169, todghkfsla, bjlee}@inu.ac.kr

Recent Trends of Deep Learning based Channel Feedback Techniques

Nahyun Kim, Gayeong Kim, Sunghoon Shim, Sukbin Jang, Byungju Lee
Incheon National University

요약

5G가 상용화되고 차세대 통신 시스템에 대한 연구가 진행됨에 따라 밀리미터파(mmWave) 및 테라헤르츠 (THz)와 같은 고주파 대역을 사용하는 무선 통신 시스템이 주목받고 있다. 고주파 대역에서 대규모 다중 입출력(massive MIMO) 안테나 배열을 활용하는 빔포밍 기술이 주로 사용되는데, 빔포밍 기술의 잠재적 이득을 달성하기 위해서는 피드백 과정을 통한 정확한 채널 상태 정보(CSI) 획득이 필수적이다. CSI 피드백의 주요 이슈는 안테나 수에 비례하는 상당한 양자화에러 및 피드백 오버헤드이다. 최근, CSI 피드백 오버헤드 이슈를 해결하기 위해 딥러닝 기반 채널 피드백 기술들이 활발히 연구되고 있다. 본 논문에서는 딥러닝 기반 CSI 피드백 기술 동향 및 향후 연구 방향에 대해 살펴본다.

I. 서론

차세대 통신 시스템에서는 높은 데이터 처리량을 충족하기 위해 밀리미터파(mmWave) 및 테라헤르츠(THz)와 같은 고주파 대역을 활용하는 무선 통신 시스템이 많은 관심을 얻고 있다. 이러한 고주파 대역은 넓은 대역폭과 대규모 다중 입출력(Massive MIMO) 안테나 배열을 사용하는 빔포밍 기술을 통해 시스템 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 그러나 안테나 수에 비례하는 채널 상태 정보(Channel state information, CSI) 피드백 정보량으로 인해 피드백 오버헤드가 기하급수적으로 증가하여 시스템 성능이 저하될 수 있다.

국제 표준화 단체(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)의 Release 18은 인공지능(Artificial intelligence, AI) 및 머신러닝(Machine learning, ML)을 활용하는 AI 기반 무선 인터페이스 연구 내용을 포함한다 [1]. 구체적으로, CSI 피드백 및 빔 관리를 포함한 대표적인 사용 사례에서 기존 기법과 비교하여 AI 기반 무선 인터페이스의 성능을 평가한다. 본 논문에서는 CSI 피드백 성능 향상에 초점을 맞추어 기존 CSI 피드백 기법과 딥러닝 기반 CSI 피드백 기술의 동향을 살펴본다.

II. CSI 피드백 기술 동향

2.1 코드북 및 압축 센싱 기반 CSI 피드백

기존 통신 시스템의 CSI 피드백 기술로 코드북 기반 방식과 압축 센싱(Compressed sensing, CS) 기반 방식이 주로 사용된다. 본 절에서는 각 CSI 피드백 기술의 이점 및 한계점을 살펴본다.

코드북 기반 CSI 피드백 기술은 단말이 추정된 채널과 코드북에서 가장 유사한 코드워드를 선택하여 해당하는 인덱스를 기지국으로 피드백 하는 방식이다. 기지국은 수신된 코드워드 인덱스를 통해 채널을

복원할 수 있다. 5G New Radio(NR)에서는 가시선 성분이 우세한 경우 Type I 코드북에서 지향성 빔을 선택하며, 여러 산란자가 있는 경우에는 Type II 코드북을 사용하여 여러 방향성 빔의 선형 조합을 생성한다. 이러한 코드북 기반 CSI 피드백은 피드백 비트수가 증가함에 따라 성능이 향상되지만 시스템 복잡도가 상당히 증가하게 되는 한계점이 존재한다.

압축 센싱 기반 CSI 피드백은 채널 정보가 가지는 각도, 시간 영역에서의 희소성을 활용하여 단말이 피드백하고자 하는 원본 신호를 압축하여 기지국으로 전송하고, 기지국은 압축된 신호를 원본 신호로 재구성하는 기술이다. 압축을 통해 CSI 오버헤드를 줄일 수 있다는 이점이 있지만, 채널이 희소하지 않은 경우 압축 센싱 기법 적용 시 성능이 상당히 저하될 수 있다. 또한, 압축 센싱 기법은 무작위 투영으로 인해 채널 구조를 완전히 활용하기 어렵고, 반복적인 재구성 알고리즘으로 실제 시스템의 실시간 요구사항을 충족하기 어렵다는 단점이 있다.

이와 같은 기존 기술들의 한계점을 극복하며, 정확도와 복잡도 측면에서 더 나은 성능을 달성하기 위해 CSI 피드백에 딥러닝 기술을 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 2.2-2.4 절에서는 주요 딥러닝 기반 CSI 피드백 기술의 특징을 살펴본다.

2.2 CsiNet

CsiNet 아키텍처는 송신단 인코더에서 훈련 데이터를 활용하여 채널 구조를 학습함으로써 코드워드를 생성한다. 생성된 코드워드를 수신단으로 전송하게 되면, 수신단은 인코더와 대응되는 디코더를 사용하여 CSI를 복원한다 [2]. CsiNet은 CNN(Convolutional Neural Network)을 통해 공간적 로컬 상관관계를 활용할 수 있어 무작위 투영 기반 압축 센싱 기법보다 우수한 CSI 복원 성능을 보인다. 이를 통해 낮은 압축 비율에서도 우수한 복원 성능을 달성하며, 압축 센싱

기반 CSI 피드백보다 52~163 배 더 적은 실행시간을 보여준다.

2.3 CsiNet-LSTM

CSI 의 시간적 특성을 고려하기 위해 LSTM(Long Short Term Memory)을 CSI 피드백에 활용하는 연구가 진행되었다 [3]. CsiNet-LSTM 은 각 시간마다 이전 입력과의 시간 상관관계를 학습하여 현재 입력과 결합하기 때문에 낮은 압축비율에서도 CsiNet 보다 높은 재구성 해상도를 보인다. 또한, 압축 센싱 기법보다 낮은 복잡도 성능을 달성하여 대규모 다중 입출력 안테나 배열에 보다 적합하다.

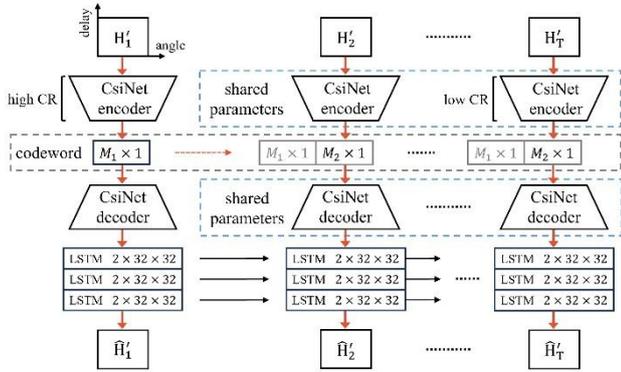


그림 1. CsiNet-LSTM 구조 [3]

2.4 TransNet

최근 트랜스포머 구조를 CSI 피드백에 적용하여 모든 압축비율에서 CNN 기반 CsiNet 보다 나은 복원 성능을 달성하는 기술이 제안되었다 [4]. 그러나 단일 계층 트랜스포머 구조의 사용으로 CsiNet 대비 근소한 성능 향상을 보여, 이후 더 강력한 이중 계층 트랜스포머 구조를 사용하여 피드백 성능을 대폭 향상시킨 TransNet 이 제안되었다 [5]. 또한, TransNet 은 전처리 과정 없이 인코더의 Attention 레이어에 CSI 를 입력하여 압축된 CSI 의 복원 정확도를 높일 수 있다.

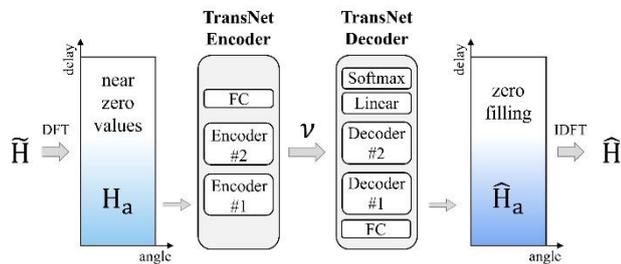


그림 2. TransNet 구조 [5]

III. 향후 연구 방향 및 이슈

차세대 통신 시스템은 비지상 네트워크로의 확장으로 지상-비지상 통합 네트워크 환경을 구축할 것으로 예상된다. 따라서 저궤도 위성, 무인 항공기 등을 이용하는 비지상 네트워크에 딥러닝 기반 CSI 피드백 기술을 적용하기 위한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 딥러닝 기반 CSI 피드백을 비지상 네트워크에서 적용하기 위해서는 고속 시나리오, 데이터 셋 구축, 성능과 복잡성의 균형 등 고려해야 할 다양한 이슈가 존재하며, 이는 표 1 과 같다.

표 1. 딥러닝 기반 CSI 피드백 기술 관련 이슈

이슈	세부 설명
데이터 셋 구축	현실적이고 다양한 환경 시나리오를 고려한 데이터 셋 구축이 필요하다.
고속 시나리오	빠른 이동성으로 인한 채널 에이징의 영향을 줄이며, 미래 CSI 예측을 위한 기법이 필요하다.
성능과 복잡성의 균형	일반적으로 딥러닝 기술의 성능이 향상될수록 복잡도가 증가하므로 이에 대한 고려가 필요하다 [6].
개인정보 보호	개인정보 보호를 위해 데이터 보안 위험을 평가하는 메커니즘이 요구된다.
딥러닝 기술 선택	다양한 환경에 따른 문제를 고려하여 적합한 딥러닝 기술 선택이 필요하다.

IV. 결론

본 논문에서는 기존 CSI 피드백 기술로 코드북 기반 방식과 압축 센싱 기반 방식에 대해 살펴보고, 최근 연구되고 있는 딥러닝 기반 CSI 피드백 기술의 동향을 살펴보았다. 비지상 네트워크로의 확장에 따라 다양한 통신 네트워크 환경에서 CSI 피드백 오버헤드를 줄이려는 연구가 큰 관심을 받고 있다. 다양한 이슈들에 대한 추가적인 연구를 통해 지상-비지상 통합 네트워크 및 AI 통합형 통신 네트워크 구현을 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-002524)

참고 문헌

- [1] 3GPP RP-213599, "New SI: Study on artificial intelligence (AI)/Machine Learning (ML) for NR air interface," Moderator(Qualcomm), Tech. Rep., Dec. 2021.
- [2] CK. Wen, WT. Shih, S. Jin, "Deep Learning for Massive MIMO CSI Feedback," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol.7, no. 5, Oct. 2018.
- [3] T. Wang, C. Wen, S. Jin, GY. Li, "Deep Learning-Based CSI Feedback Approach for Time-Varying Massive MIMO Channels," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol.8, no.2, Apr. 2019.
- [4] Y. Xu, M. Yuan, MO. Pun, "Transformer Empowered CSI Feedback for Massive MIMO Systems," *2021 30th Wirel. Opt. Commun. Conf. (WOCC)*, Oct. 2021.
- [5] Y. Cui, A. Guo and C. Song, "TransNet: Full Attention Network for CSI Feedback in FDD Massive MIMO System," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 11, no. 5, May. 2022.
- [6] J. Guo, CK. Wen, S. Jin, GY. Li, "Overview of Deep Learning-Based CSI Feedback in Massive MIMO Systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol.70, no.12, Dec. 2022.