

트랜스포머 기반 대규모 다중 안테나 시스템 채널 파라미터 예측 기법

정석현, 심병호
서울대학교

{shjeong, bshim}@islab.snu.ac.kr

요약

밀리미터파(mmWave) 대규모 다중 입력 다중 출력(MIMO) 시스템은 고품질 데이터 서비스를 제공할 수 있는 핵심 기술이다. 대규모 MIMO 시스템의 성공을 위해서는 정확한 채널 정보의 획득이 필수적이다. 본 논문에서는 이전 채널 시퀀스로부터 다운링크 채널의 다중 경로 구성 요소를 획득하는 새로운 채널 추정 기술을 제안한다. 구체적으로, 제안된 기술은 Transformer 기반 프레임워크를 활용하여 시공간 상관 관계를 학습하여 다음 프레임의 채널을 예측한다. 수치 결과를 통해, 제안된 기술이 채널 오차 측면에서 기존 채널 획득 기술을 능가함을 보여준다.

I. 서론

밀리미터파(mmWave) 시스템은 XR 장치와 같은 데이터 집약적 서비스를 위해 높은 데이터 전송률을 제공하는 유망한 기술로 간주된다. 이러한 시스템은 높은 지향성과 경로 손실로 인해 차단에 취약하다는 단점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위해 대규모 MIMO 를 활용한 빔포밍 기술이 필수적이며, 효과적인 빔포밍을 위해서는 정확한 채널 상태 정보(CSI)의 획득이 필요하다 [1]. 기존의 코드북 기반 피드백은 상당한 오버헤드를 초래하여 다양한 딥러닝 기반 다운링크 채널 획득 기술이 제안되었다.

하지만, 이러한 연구들은 사용자의 모빌리티가 높은 상황에서 피드백 시점의 채널과 다운링크 데이터 전송 시점의 채널 간의 괴리가 생긴다. 본 연구에서는 트랜스포머 기반의 채널 예측 기법(Transformer-based Parametric Predictive Channel Estimation; T-PaCE)을 제안하여, 고속 이동하는 환경에서도 효과적으로 다운링크 채널을 추정한다.

II. 본론

본 논문에서는 다운링크 FDD OFDM 대규모 MIMO 시스템을 고려하며, 기저국(BS)은 N_t 개의 송신 안테나를 갖추고 사용자 장치(UE)는 N_r 개의 수신 안테나를 갖춘다. 시간 변화하는 채널에서 UE 의 s 번째 서브캐리어에 대한 수신 신호는 주어진 식을 통해 모델링된다. 기하학적 다중 경로 채널 모델을 사용하여, 시간 도메인 채널 응답과 주파수 도메인 채널을 유도한다.

T-PaCE 는 채널 시퀀스로부터 다운링크 채널의 매개 변수를 추출하기 위해 Transformer 의 어텐션 메커니즘을 활용한다. 이를 통해 공간적, 시간적 상관 관계를 갖는 채널 요소를 효과적으로 파악하고 추정한다. 특히 트랜스포머를 이용하면 인접한 채널뿐만 아니라 그 이전 채널까지 같이 고려함으로써, 급작스러운 장애물에 의해 인접 채널과 해당 시점 채널의 상관관계가 적은 상황에서도 다른 시점의 채널을 활용하여 정확한 채널 예측을 할 수 있다.

또한, T-PaCE 는 채널 경로의 계인 α , 시간 지연 τ , 발사각 θ 등의 파라미터가 채널 자체에 비해 일정한 변화를 가진다는 점에 주목하여, 이전 채널을 통하여 다운링크 채널의 파라미터 P 를 먼저 예측하고, 다음 식에 따라 다운링크 채널 H 를 형성한다.

$$P = \{\alpha_i, \tau_i, \theta_i\}_{i=1}^L$$
$$H_{mn} = \sum_i \alpha_i e^{-j(m-1)2\pi f \tau_i} e^{-j(n-1)2\pi \frac{d}{\lambda} \theta_i}$$

이때 H_{mn} 은 채널 행렬의 (m, n) 번째 원소이다.

트랜스포머의 손실 함수는 다운링크 채널과 예측한 채널 사이의 normalized mean square error (NMSE)로 설계하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$L = \frac{\|H - \hat{H}\|_2^2}{\|H\|_2^2}$$

제안된 T-PaCE 기법은 기존 angular reciprocity 를 사용한 최신 모델 [2]과 비교하였을 때 NMSE 측면에서 우수한 성능을 보여준다. T-PaCE 는 트랜스포머 기반 프레임워크를 이용하여 다운링크 채널의 파라미터를

효과적으로 추정한다. 특히, 이동성이 높은 환경 (108km/h) 에서도 T-PaCE 는 기존 방법보다 낮은 NMSE 를 달성하여, 높은 신뢰성을 입증한다.

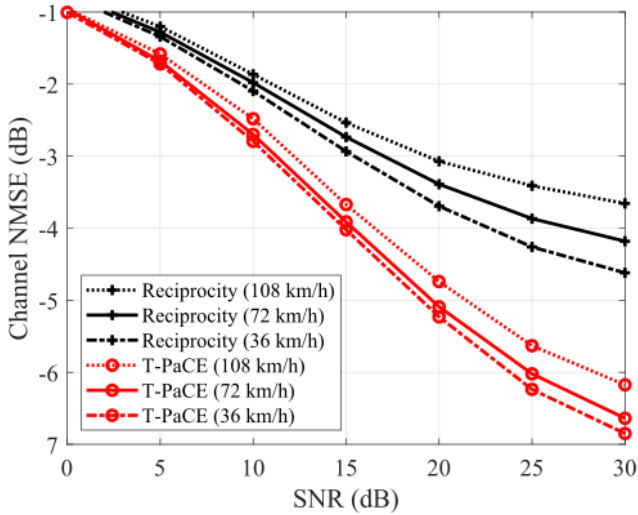


Fig 1. SNR 에 따른 채널 NMSE 그래프

III. 결론

본 논문에서는 mmWave 대규모 MIMO 시스템을 위한 트랜스포머 기반 채널 예측 기법을 제안한다. mmWave 채널을 소수의 채널 매개변수로 표현할 수 있는 특성을 활용하며, 변환기 기반 프레임워크를 통해 복잡한 채널 매개변수 간의 관계를 학습함으로써 실제 시나리오에서 효과적인 채널 획득을 달성한다. 수치 결과는 제안된 T-PaCE 가 기존 방법들에 비해 NMSE 측면에서 유의미한 성능 향상을 보여준다는 것을 입증한다. 이러한 결과는 T-PaCE 가 mmWave 시스템에서의 효과적인 채널 정보 획득에 크게 기여할 것임을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022R1A5A1027646).

참 고 문 헌

- [1] H. Ji, S. Park, J. Yeo, Y. Kim, J. Lee, and B. Shim, "Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: Physical layer aspects," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 25, no. 3, pp. 124–130, 2018.
- [2] Y. Han, Q. Liu, C.-K. Wen, M. Matthaiou, and X. Ma, "Tracking FDD massive MIMO downlink channels by exploiting delay and angular reciprocity," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 13, no. 5, pp. 1062–1076, 2019.