

이중 CNN의 도메인 깊이 확장에 의한 MIMO-OFDM 채널 추정 성능 분석

조은우, 박호성

전남대학교 지능전자컴퓨터공학과

jjonoo@jnu.ac.kr, hpark1@jnu.ac.kr

Analysis on MIMO-OFDM Channel Estimation Performance by Expanding Domain Depths of Dual CNN

Eunwoo Jo, Hosung Park

Chonnam National Univ.

요약

본 논문은 MIMO-OFDM 시스템에서 CNN 기반 채널 추정 기법의 구조적 확장에 따른 성능 특성을 분석한다. 기존 Dual CNN 기반 채널 추정 구조는 공간-주파수(SF) 도메인과 각도-지연(AD) 도메인의 상호 보완적인 채널 특성을 동시에 활용하여 낮은 복잡도에서 우수한 성능을 달성한 바 있다. 본 연구에서는 합성곱 필터 수를 줄여서 (i) SF 도메인 은닉층을 확장한 구조, (ii) AD 도메인 은닉층을 확장한 구조, (iii) SF 및 AD 도메인을 모두 확장한 구조를 제안하고 성능을 분석한다. 시뮬레이션 결과, AD 도메인 중심 확장이 높은 SNR에서 가장 우수한 성능을 보였으며 두 도메인을 동일하게 확장한 구조는 낮은 SNR에서 안정적인 성능 개선을 달성함을 확인하였다.

I. 서론

MIMO-OFDM 시스템에서 정확한 채널 추정은 수신 성능을 결정하는 핵심 요소이다. 기존의 최소 자승(LS) 및 선형 최소 평균 오차(LMMSE) 기반 채널 추정 기법은 낮은 SNR 환경에서 성능이 크게 떨어지거나 대규모 MIMO 시스템에서 높은 연산 복잡도를 갖는 한계가 있다.

최근 딥러닝을 활용하는 채널 추정 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 합성곱 신경망(CNN)을 활용한 채널 추정은 채널 행렬을 2차원 이미지로 간주하여 인접 안테나 및 서브캐리어 간 상관성을 효과적으로 학습하여, 완전연결 신경망 대비 낮은 복잡도로 우수한 성능을 달성할 수 있다[1, 2].

이와 관련하여, 공간 - 주파수(SF) 도메인과 각도 - 지연(AD) 도메인의 상호 보완적인 특성을 동시에 활용하는 Dual CNN 기반 채널 추정 기법이 제안되었다[3]. SF 도메인은 잡음 및 간섭에 개인화 반면, AD 도메인은 채널의 회소성을 효과적으로 표현할 수 있으며, Dual CNN은 이러한 두 도메인의 장점을 결합하여 적은 복잡도로 우수한 채널 추정 성능을 달성한다.

본 논문에서는 합성곱 필터 수를 줄인 경량 Dual CNN 구조를 고려하고, SF 도메인과 AD 도메인에서의 은닉층 확장 방식에 따른 채널 추정 성능 변화를 분석한다. 도메인별 특성을 강화한 구조 확장을 통해 각 도메인의 역할이 성능에 미치는 영향을 비교하고, 경량 Dual CNN 기반 채널 추정 기법의 효율적인 구조 설계에 대한 시사점을 제시한다.

II. 본론

2.1 기존 Dual CNN 구조

Dual CNN 구조는 LS 기반 채널 추정 결과를 입력으로 받아 SF 도메인 CNN과 AD 도메인 기반 CNN을 순차적으로 적용한다. SF 도메인에서는 인접한 서브캐리어 및 안테나 간 상관성을 학습하며, AD 도메인에서는 회소한 채널 구조를 활용하여 잡음을 제거한다. 두 도메인에서 CNN은 잔차 연결(skip connection)을 통해 성능을 향상시킨다. 두 도메인 간 변환

은 이산 푸리에 변환(DFT)을 기반으로 수행된다. 주파수 도메인은 역 이산 푸리에 변환(IDFT)을 통해 지연 도메인으로 변환될 수 있으며, 공간 도메인은 DFT를 통해 각도 도메인으로 변환될 수 있다. 이에 따라 각도-지연 도메인 채널은 아래 식과 같이 표현된다. D_K 는 $K \times K$ 크기의 DFT 행렬이며, D_M 는 $M \times M$ 크기의 DFT 행렬이다.

$$H_{AD} = D_M H_{SF} D_K^*$$
 (1)

2.2 Dual CNN의 구조 확장 방식

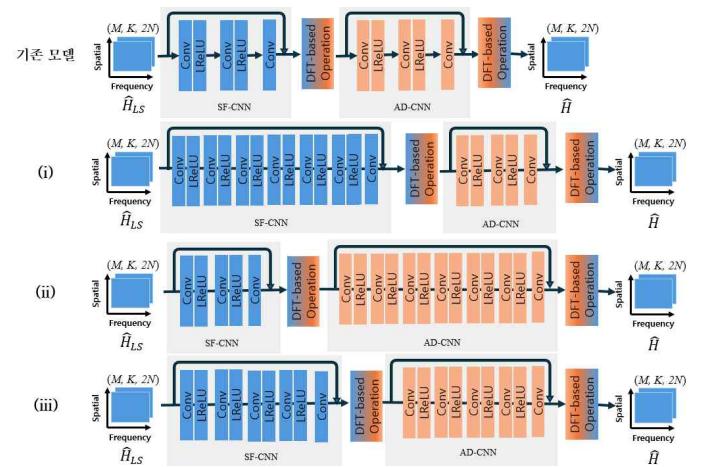


그림 1. Dual CNN의 구조 확장

본 연구에서는 기존 Dual CNN을 기준으로 다음과 같은 세 가지 구조로 확장한다. 기존 모델은 각 도메인에서 (CNN+Leaky ReLU) 블록 두 개와 Convolution layer 하나를 갖는 구조이며 잔차 연결을 통해 안정적으로

학습할 수 있다. (i)에서는 SF 도메인 (CNN+Leaky ReLU) 블록 수를 3배 늘리고, (ii)에서는 AD 도메인에서 블록 수를 3배로 늘린다. (iii) 구조에서는 각 도메인에서 블록 수를 2배로 늘려 세 방식의 총 파라미터 수(18,576) 및 FLOPs(0.0379 G)가 같도록 설계하였다. 기존 모델은 각 레이어에서 3×3 필터를 8개 사용하지만 제안하는 구조에서는 3×3 필터를 4개만 사용하여 기존 모델 대비 복잡도를 33% 의 파라미터 수 및 연산 복잡도를 감소하였다.

III. 모의실험

모의실험은 4명의 사용자를 갖는 MIMO-OFDM 시스템을 고려하였으며 서브캐리어 수(M)와 안테나 수(K)는 각각 32로 설정하였다. 채널 모델과 파일럿 구조는 참고문헌 [3]을 따른다. 훈련 데이터셋, 검증 데이터셋, 그리고 시험 데이터셋은 각 6000, 2000, 2000개를 사용하였다. 기존 모델과 제안하는 세 가지 모델의 SNR에 따른 NMSE [dB] 비교는 표1과 같이 나타난다.

SF 도메인을 확장한 구조는 낮은 SNR 영역에서 기존 모델과 유사한 성능을 보이거나 제한된 성능 개선이 나타난다. 이는 복잡도가 감소한 상황에서 SF 도메인에서 채널의 상관성 학습이 충분히 이루어지지 않아 잡음 제거 향상으로 이어지지 못했기 때문이다.

반면, AD 도메인 은닉층을 확장한 구조는 높은 SNR 영역에서 가장 우수한 채널 추정 성능을 보인다. 특히 SNR이 증가함에 따라 기존 모델 대비 NMSE가 뚜렷하게 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 이는 채널 에너지가 제한된 영역에 집중되는 AD 도메인에서 깊이 확장이 채널 성분 분리와 잡음 제거에 효과적으로 작용했기 때문이다. 이러한 결과는 경량 CNN 환경에서도 AD 도메인의 희소성 활용이 채널 추정 성능 향상에 핵심적인 역할임을 보여준다.

SF 및 AD 도메인을 모두 확장한 구조는 모든 SNR 영역에서 기존 대비 일관된 성능 개선을 보인다. 특정 도메인에 편중되지 않은 구조는 낮은 SNR 환경에서는 SF 도메인의 강인성을, 높은 SNR 환경에서는 AD 도메인의 구조적 특성을 동시에 반영할 수 있어 안정적인 성능을 제공한다. 종합하면, 경량 Dual CNN 구조에서는 AD 도메인 중심의 은닉층 확장이 높은 SNR 환경에서 가장 효과적인 성능 향상을 제공하며, 두 도메인을 균형 있게 확장한 구조는 다양한 SNR 조건에서 안정적인 채널 추정 성능을 보인다.

SNR	0	5	10	15
기존 모델	-13.83	-20.18	-25.06	-27.67
(i)	-13.31	-19.83	-24.8	-27.75
(ii)	-13.71	-20.55	-25.49	-28.66
(iii)	-13.83	-20.38	-25.25	-28.42

표 1. SNR에 따른 NMSE 성능

IV. 결론

본 논문에서는 MIMO-OFDM 시스템에서 Dual CNN 기반 채널 추정 구조를 대상으로, 경량화한 Dual CNN을 기반으로 도메인별 은닉층 확장이 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 모의실험 결과, 합성곱 필터 수를 줄인 경량 환경에서도 AD 도메인 은닉층 확장은 높은 SNR 영역에서 가장 우수한 성능 향상을 제공함을 확인하였다. 또한 SF 및 AD 도메인을 균형 있게 확장한 구조는 전체적인 SNR 영역에서 안정적인 성능 개선을 달성하였다. 이는 두 도메인을 고려하여 채널 추정 기법을 설계할 때, 단순한

모델 규모 확장보다는 도메인별 채널 특성을 고려한 구조 설계가 중요함을 시사한다.

향후 연구에서는 다양한 채널 환경 및 안테나 구성에 대한 일반화 성능을 분석하고, 도메인별 구조를 적응적으로 조절하는 방법을 고려할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 정보통신기획평가원(IITP)의 지역지능화 혁신 인재 양성 사업(IITP-2025-RS-2022-00156287, 30%)과 한국연구재단의 지원(No. RS-2025-16070801)을 받아 수행되었으며, 2025년도 정부(교육부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2025-25398164)의 연구 결과이다.

참 고 문 헌

- [1] M. Soltani, V. Pourahmadi, A. Mirzaei, and H. Sheikhzadeh, “Deep learning-based channel estimation,” IEEE Communications Letters, vol. 23, no. 4, pp. 652 - 655, Apr. 2019.
- [2] P. Dong, H. Zhang, G. Y. Li, I. S. Gaspar, and N. NaderiAlizadeh, “Deep CNN-based channel estimation for mmWave massive MIMO systems,” IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 13, no. 5, pp. 989 - 1002, Sept. 2019.
- [3] P. Jiang, C.-K. Wen, S. Jin, and G. Y. Li, “Dual CNN-Based Channel Estimation for MIMO-OFDM Systems,” IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 9, pp. 5859 - 5872, Sept. 2021.