

I/Q-FFT 이중 표현을 활용한 ParallelCNN 기반 광대역 스펙트럼 센싱 모델 성능 분석

권순영, 김형남*

*부산대학교

y sk1680@pusan.ac.kr, *h nkim@pusan.ac.kr

Performance Analysis of ParallelCNN-Based Wideband Spectrum Sensing Model Using I/Q-FFT Dual Representation

Soon-Young Kwon, Hyoungh-Nam Kim*

*Pusan National University

요약

본 논문은 광대역 스펙트럼 센싱의 저지연·고정확도 요구를 충족하기 위해, I/Q 데이터와 FFT 주파수 데이터를 이중 표현(dual-representation)으로 동시에 활용하는 ParallelCNN 기반 모델을 제안한다. 제안한 모델에서, I/Q 데이터 특징과 FFT 데이터 특징을 결합(concatenate)하여 두 특징의 상호보완성을 극대화하였다. 제안한 모델을 기존 모델(DeepSense, ParallelCNN)과 비교한 결과, 모든 SNR 구간에서 F1-score가 개선되었고, 특히 낮은 SNR에서 격차가 확대되는 경향을 보였다. 또한, 낮은 복잡도를 유지하면서도 낮은 SNR 구간에서 견고한 탐지 성능을 보여, 실시간 스펙트럼 센싱 적용에 적합함을 확인하였다.

I. 서론

라디오 주파수(radio frequency, RF) 스펙트럼은 무선통신의 핵심 자원이며, 5G·사물인터넷(internet of things, IoT) 등 신규 서비스의 확산과 더불어 희소성이 빠르게 심화되고 있다. 이러한 환경에서 인지 무선(cognitive radio, CR)은 주파수·시간 영역의 비활성 구간을 감지해 2차 사용자(secondary user, SU)가 기회적으로 접속하는 메커니즘을 제공하며, 그 출발점이자 핵심 구성요소가 스펙트럼 센싱이다. 스펙트럼 센싱은 1차 사용자(primary user, PU)의 도움 없이 채널의 점유 상태를 신뢰성 있게 판별해야 하고, 특히 광대역 환경에서는 높은 정확도와 짧은 지연(latency)을 동시에 만족해야 한다[1].

광대역 스펙트럼 센싱에는 전통적으로 두 계열의 접근이 존재한다. 나이퀴스트 기반 방식은 광대역을 여러 서브밴드로 분할해 순차적으로 혹은 동시에 탐지하지만, 지연이 증가하거나 구현 복잡도가 증가한다는 단점이 있다. 서브나이퀴스트/압축 센싱 기반 방식은 관측 축소로 하드웨어 부담을 줄이는 대신, 비선형 재구성 단계가 추가되어 지연·복잡도·성능 열화가 발생할 수 있다. 이러한 제약은 실환경 적용에서 실시간성·경량성·정확도 간 균형을 어렵게 만든다[2].

최근 딥러닝 기반 스펙트럼 센싱이 전통 알고리즘 대비 견고한 성능을 보여 주목받고 있으나, 많은 연구가 협대역 문제 설정에 머물거나 모델·전처리 복잡도가 커 실시간 처리에 불리하다는 한계가 있었다. 이를 보완하기 위해 제안된 DeepSense 모델은 원시 I/Q 데이터를 입력으로 받아 다중 서브밴드를 한 번에 판별함으로써 지연을 낮추었으나, 낮은 SNR 구간에서 정확도 저하와 샘플 길이 증가에 따른

복잡도 상승 문제가 존재한다[3]. 이에 비해 ParallelCNN 모델은 입력 I/Q를 절반으로 분할해 두 개의 CNN 분기로 병렬 처리하고, 분기 출력을 더해 정확도·지연·모델 크기의 균형을 개선한 바 있다[4].

본 논문은 ParallelCNN 모델의 경량·저지연 장점을 유지하면서, 광대역·저 SNR 환경에서의 탐지 성능을 추가로 향상시키는 것을 목표로 하였다. 구체적으로, 시간영역 I/Q 데이터와 주파수영역 FFT(fast Fourier transform) 데이터를 두 분기로 병렬 처리하되, 분기 간 정보를 더하는(add) 것이 아니라 결합(concatenate)함으로써, 각 표현이 담고 있는 상이한 특성이 소실되지 않고 최종 분류기에 전달되도록 설계하였다.

II. 본론

그림 1은 제안하는 기법의 모델 구조를 나타낸 그림이다. 모델의 경량화를 위해, 길이가 N 인 I/Q 데이터 $x \in \mathbb{R}^{2 \times N}$ 를 시간 축으로 절반씩 분할하여($x_1 \in \mathbb{R}^{2 \times N/2}$, $x_2 \in \mathbb{R}^{2 \times N/2}$) 시간 축 분기의 두 입력으로 사용한다. 그리고 I/Q 데이터에 FFT(fast Fourier transform)를 수행하여 주파수 축 분기의 입력으로 사용한다($X \in \mathbb{R}^{2 \times N}$). 각 입력은 각 CNN(convolutional neural network) 계층을 통과하며, $C_i(i = 1, \dots, 8)$ 는 1D CNN을 의미한다. $M_i(i = 1, \dots, 6)$ 는 1D 맥스 풀링(max pooling) 계층을 의미하며, F_1, F_2 는 완전 연결(fully connected) 계층을 의미한다.

기존의 ParallelCNN 모델은 두 분기의 출력을 더해

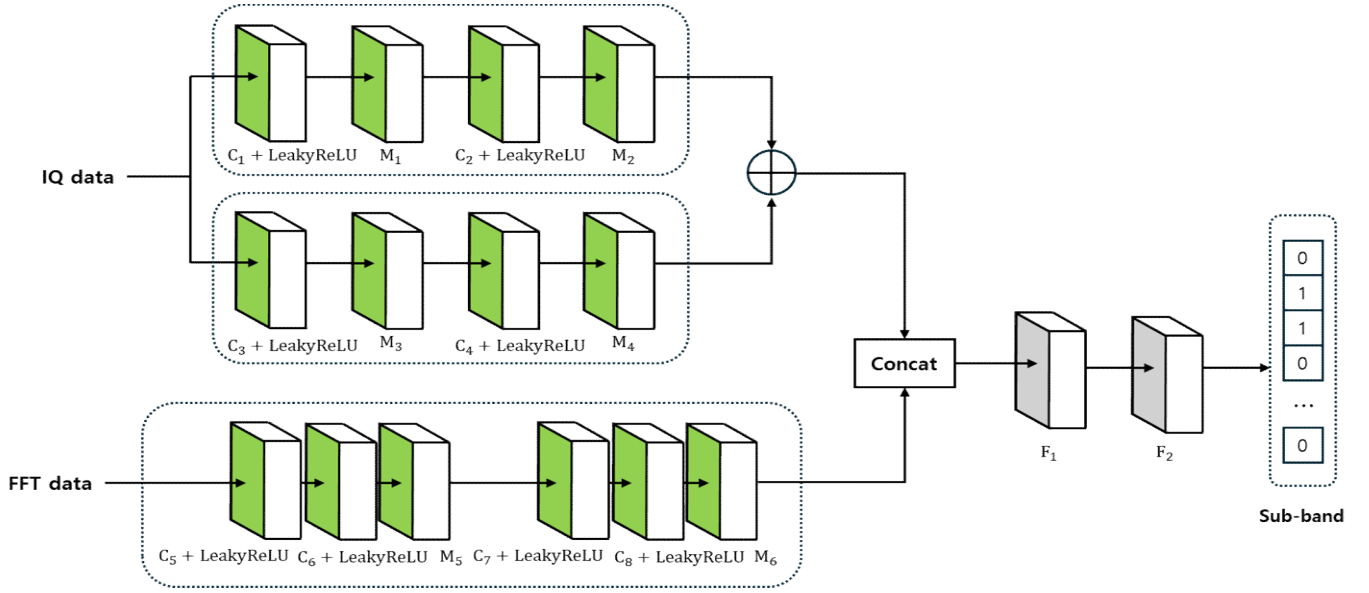


그림 2. 제안하는 신경망 모델.

(add) 하나의 표현으로 압축한다. 반면, 제안하는 모델은 시간 축 데이터의 특징과 주파수 축 데이터의 특징을 결합(concatenate)하여 완전 연결 계층이 각 특징의 상호작용을 학습하도록 유도한다.

그림 2는 기존의 신경망 모델(DeepSense, ParallelCNN)과 제안하는 신경망 모델의 F1-score 성능 비교 결과이고, 표 1에는 모델별 복잡도를 나타내었다. ParallelCNN 모델은 DeepSense 모델을 경량화하였기 때문에, F1-score 성능이 약 1~2% 열화된 것을 확인할 수 있다. 반면, 제안한 모델은 ParallelCNN 모델을 개선하여 I/Q 데이터와 FFT 데이터를 모두 활용했기 때문에, ParallelCNN 모델과 복잡도는 유사하지만 모든 SNR 구간에서 F1-score 성능이 약 2~5% 우수한 것을 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 논문은 ParallelCNN 기반 구조에 I/Q - FFT 이중 표현을 도입하고 concat 결합을 적용하여, 낮은 SNR에서의 탐지 성능을 향상시키면서도 비교적 낮은 모델 복잡도를 유지하는 방법을 제시하였다. 모의실험 결과, 제안 모델은 DeepSense 및 ParallelCNN 대비 전 SNR 구간에서 F1-score 성능이 향상되었으며, 파라미터 수는 DeepSense 보다는 작고, ParallelCNN과 유사한 수준으로 나타나 실시간 구현을 위한 합리적 모델임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00557790)

표 1. 신경망 모델별 학습 파라미터 개수.

	Proposed	DeepSense	ParallelCNN
# parameters	20480	39472	20848

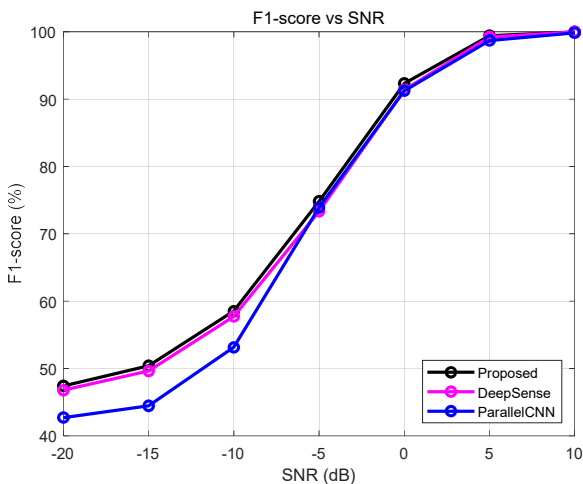


그림 1. SNR에 따른 신경망 모델별 F1-score 성능.

참 고 문 헌

- [1] W. Zhang, Y. Wang, X. Chen, Z. Cai and Z. Tian, "Spectrum Transformer: An Attention-Based Wideband Spectrum Detector," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 23, no. 9, pp. 12343-12353, Sept. 2024.
- [2] H. Sun, A. Nallanathan, C. -X. Wang and Y. Chen, "Wideband spectrum sensing for cognitive radio networks: a survey," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 2, pp. 74-81, April 2013.
- [3] D. Uvaydov, S. D'Oro, F. Restuccia and T. Melodia, "DeepSense: Fast Wideband Spectrum Sensing Through Real-Time In-the-Loop Deep Learning," *IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications*, Vancouver, BC, Canada, 2021, pp. 1-10.
- [4] R. Mei and Z. Wang, "Deep Learning-Based Wideband Spectrum Sensing: A Low Computational Complexity Approach," in *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 10, pp. 2633-2637, Oct. 2023.