

딥러닝 기반 OFDM 신호에서의 LFM 레이더 간섭 제거

정석현, 남해운

한양대학교

{jshyun0905, hnam}@hanyang.ac.kr

Deep Learning-Based LFM Radar Interference Cancellation in OFDM Signals

Sukhyun Jung, Haewoon Nam

Hanyang Univ.

요약

본 논문은 직교 주파수 분할 다중(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) 기반 무선 통신 시스템에 Linear Frequency Modulation (LFM) 기반 레이더 시스템이 간섭(Interference)을 일으키는 상황에서 LFM 레이더 신호를 제거하여 무선 통신의 품질을 향상시키는 것을 목표로 한다. 기존의 필터링 기반 간섭 제거 기법의 한계를 극복하기 위해 시간-주파수 분석(Time-Frequency Analysis, TFA)과 딥러닝(Deep Learning)을 활용한 간섭 제거 기법을 제안한다. -20dB ~ 0dB의 신호 대 잡음비(Signal-to-Interference Ratio, SIR)의 환경에서 시뮬레이션을 진행한 결과, -17dB 이상의 신호 대 잡음비(Signal-to-Interference Ratio, SIR) 환경에서 10^{-1} 이하의 비트 오류율(Bit Error Rate, BER)이 나타나며 우수한 성능이 입증되었다.

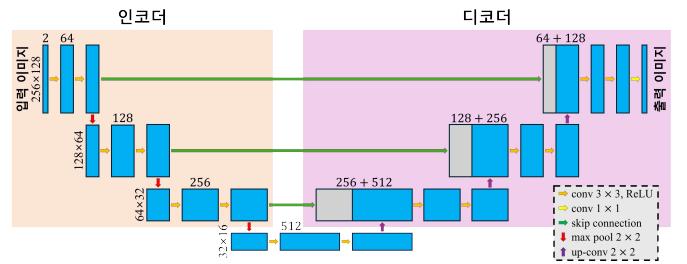
I. 서론

직교 주파수 분할 다중(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM)은 5G와 Wi-Fi 같은 무선 통신 시스템에서 높은 스펙트럼(Spectrum) 효율성과 다중 경로 페이딩(Multipath Fading)에 대한 강인성으로 인해 널리 사용된다[1]. 무선 통신 기술의 발전으로 인해 주파수(Frequency) 자원이 한정되면서[2], OFDM 기반 무선 통신 시스템과 레이더(Radar) 시스템이 동일한 주파수 대역에서 공존하는 상황이 증가하고 있다. 주파수 공존 환경에서 Linear Frequency Modulation (LFM) 레이더 신호는 주파수가 시간에 따라 선형적으로 변화하는 Chirp 형태를 가지고 있기 때문에 OFDM 신호에 간섭(Interference)을 일으켜 통신 품질을 저하시킬 수 있다. 기존의 필터링 기반 간섭 제거 기법은 LFM 신호의 동적 주파수 특성으로 인해 효과가 제한적이다[3]. 본 논문은 기존 방식의 한계를 극복하기 위해 시간-주파수 분석(Time-Frequency Analysis, TFA)을 통해 얻어낸 시간-주파수 이미지(Time-Frequency Image, TFI)와 딥러닝(Deep Learning)을 활용한 간섭 제거 기법을 제안한다. 본 논문에서는 -20dB ~ 0dB의 신호 대 잡음비(Signal-to-Interference Ratio, SIR)에서 비트 오류율(Bit Error Rate, BER)을 평가함으로써 스펙트럼 공유 효율성을 높이는 것을 목표로 한다.

II. 간섭 제거를 위해 사용된 시간-주파수 분석 기법

본 논문에서는 LFM 레이더 간섭을 받는 OFDM 신호의 시간-주파수 특성을 분석하여 간섭을 제거하기 위한 TFI를 생성하기 위해 단시간 푸리에 변환(Short-Time Fourier Transform, STFT)을 사용하였다. STFT는 시간 도메인 신호를 고정된 길이의 윈도우로 분할하고, 각 윈도우에 대해 푸리에 변환을 수행하여 시간-주파수 도메인의 2차원 표현을 생성한다[4]. 수신된 OFDM 신호의 In-phase and Quadrature-phase (I/Q) 데이터 $x(t)$ 에 대해 STFT는 다음과 같이 정의된다.

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) w(t - \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$



[그림 1] U-Net의 구성도

여기서 $w(t)$ 는 윈도우 함수이며, t 와 f 는 각각 시간과 주파수이다. TFI에서 간섭이 제거된 후, 원래의 I/Q 형태로 신호를 복원하기 위해 역 단시간 푸리에 변환(Inverse Short-Time Fourier Transform, ISTFT)을 사용하였다. ISTFT는 STFT로 생성된 시간-주파수 도메인 신호 $X(t, f)$ 를 다시 시간 축 신호로 변환하며, 다음과 같이 표현된다.

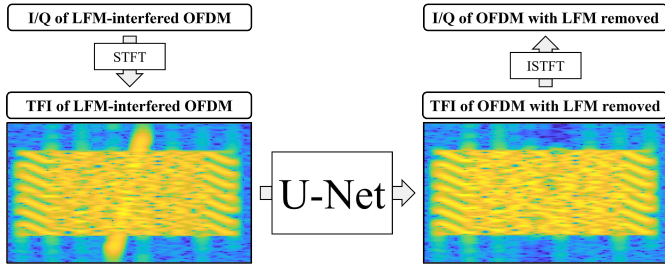
$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} X(\tau, f) w(t - \tau) e^{j2\pi f\tau} df d\tau \quad (2)$$

ISTFT는 신호의 손실을 최소화하기 위해 STFT의 윈도우와 동일한 설정을 사용한다.

III. 간섭 제거를 위해 사용된 딥러닝 모델

본 논문에서는 LFM 레이더 간섭이 포함된 OFDM 신호의 TFI를 간섭이 제거된 TFI로 복원하기 위해 U-Net을 활용하였다. U-Net은 의료 영상 처리에서 처음 제안된 합성곱 신경망(Convolutional Neural Network, CNN) 기반 모델로, 인코더-디코더 구조를 통해 입력 이미지의 세부 특징을 효과적으로 학습하여 목표 이미지로 복원한다[5]. OFDM 신호의 TFI는 2차원 이미지로 표현되므로, U-Net은 TFI 내 LFM 신호의 동적 주파수 패턴을 학습하여 이를 제거하는 데 적합하다.

본 논문에서 제안하는 U-Net 모델은 그림 1과 같다. 인코더는 TFI에서 LFM Chirp의 선형 패턴과 같은 고수준 특징(High-Level Feature)을 추



[그림 2] U-Net 기반 간섭 제거 알고리즘

출하고, 디코더는 이를 기반으로 간섭이 제거된 TFI를 재구성한다. 스킵 연결(Skip Connection)은 인코더와 디코더 간 세부 정보를 전달하여 복원 품질을 향상시킨다. 본 논문에서 사용한 U-Net 모델은 256×128 크기의 TFI를 입력으로 받아 동일한 크기의 출력 TFI를 생성한다.

IV. 제안하는 간섭 제거 알고리즘

본 논문에서 제안하는 간섭 제거 알고리즘은 그림 2와 같다. 먼저, LFM 레이더 신호의 간섭을 받는 OFDM 신호의 I/Q 데이터에 STFT를 적용하여 LFM 레이더 신호의 간섭 형태가 보이는 OFDM 신호의 TFI를 얻는다. 다음으로 앞 과정에서 얻어낸 TFI를 사전에 학습한 U-Net 모델에 통과하여 LFM 레이더 신호의 간섭이 제거된 OFDM 신호의 TFI를 얻는다. 마지막으로 앞 과정에서 얻어낸 TFI에 ISTFT를 적용하여 LFM 레이더 신호의 간섭이 제거된 OFDM 신호의 I/Q 데이터를 얻는다.

V. 시뮬레이션

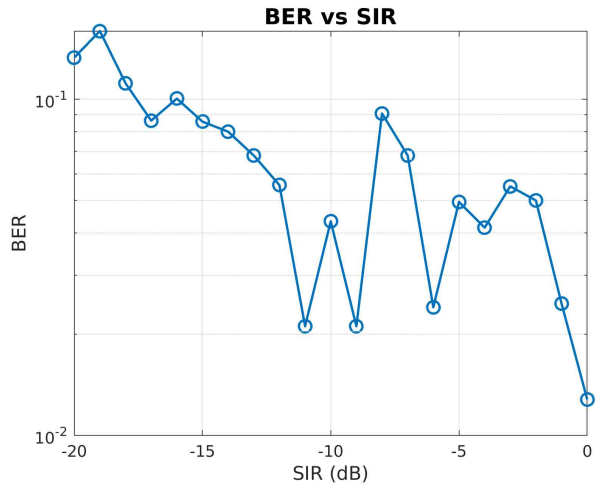
본 논문에서는 OFDM 신호에 LFM 레이더 신호가 간섭을 일으키는 상황을 시뮬레이션을 통해 구현하였다. 본 논문에서 사용한 실험 환경 및 OFDM, LFM의 Parameter는 표 1과 같고, 해당 표에서의 f_c 는 OFDM 신호의 중심 주파수를 의미한다. U-Net 모델의 학습, 검증, 테스트를 위해 각 SIR별로 80개, 20개, 9개의 OFDM Burst를 사용하였다. 본 논문에서 제안하는 간섭 제거 알고리즘의 성능 평가를 위해 테스트 결과 데이터를 복조하여 SIR별로 BER을 계산하였고, 그림 3과 같다.

VI. 결론

본 논문은 OFDM 기반 무선 통신 시스템에서 LFM 레이더 간섭을 제거하기 위해 STFT, U-Net, ISTFT를 결합한 딥러닝 기반 알고리즘을 제안하였다. 해당 알고리즘은 수신된 I/Q 데이터를 STFT를 통해 TFI로 변환하고, U-Net을 통해 LFM 신호의 동적 주파수 패턴을 효과적으로 제거한 후, ISTFT를 통해 간섭이 제거된 OFDM 신호를 복원하는 것이다. -20dB ~ 0dB 범위의 SIR 환경에서 1dB 간격으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 제안하는 알고리즘은 -17dB 이상의 SIR 환경에서 10^{-1} 이하의 BER을 달성함으로써 우수한 간섭 제거 성능을 입증하였다. 이는 스펙트럼 공유 환경에서 통신-레이더 공존을 촉진하고 스펙트럼 효율성을 높이는 데 기여한다. 다만, U-Net의 높은 계산 복잡도로 인해 제안하는 알고리즘의 실시간 구현에는 제약이 있고, 본 논문의 시뮬레이션에서는 다중 경로 페이딩을 고려하지 않았다. 따라서 향후 연구에서는 실시간 신호 처리를 위한 경량화된 모델을 개발하고, 다중 경로 페이딩이 존재하는 환경을 추가적으로 고려하여 성능을 평가할 예정이다.

[표 1] 실험 환경 및 OFDM, LFM의 Parameter

| | | | |
|-----------------|---------------|----------------------|-----|
| 실험 환경 | Sampling Rate | 1.92MHz | |
| | SNR | 10dB | |
| | SIR | -20dB ~ 0dB (1dB 간격) | |
| OFDM의 Parameter | Modulation | QPSK | |
| | Subcarrier 개수 | 활성(데이터 전송) | 72개 |
| | | 비활성(Guard Band) | 56개 |
| | Bandwidth | 1.92MHz | |
| | 심볼 개수 | 7개 | |
| | Symbol Length | 72 μ s | |
| | Burst Length | 504 μ s | |
| LFM의 Parameter | ZC 심볼 Number | #1, #7 | |
| | 시작 주파수 | $f_c - 800$ kHz | |
| | 끝 주파수 | $f_c + 800$ kHz | |
| | Pulse Width | 72.92 μ s | |



[그림 3] 복원된 OFDM 신호의 SIR별 BER

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2025-RS-2023-00258639)

참 고 문 헌

- [1] L. Cimini, "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing," IEEE Trans. Commun., vol. 33, no. 7, pp. 665-675, Jul. 1985.
- [2] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," IEEE journal on selected areas in communications, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [3] M. Carrick, J. H. Reed and C. M. Spooner, "Mitigating linear-frequency-modulated pulsed radar interference to OFDM," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 55, no. 3, pp. 1146-1159, Jun. 2019.
- [4] J. B. Allen and L. R. Rabiner, "A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis," Proceedings of the IEEE, vol. 65, no. 11, pp. 1558-1564, Nov. 1977.
- [5] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation," in Proc. Int. Conf. Med. Image Comput. Comput.-Assist. Intervent., pp. 234-241, Nov. 2015.