

디지털 트윈 기반 FHSS 신호 자동 생성 기법과 SIGINT용 AI 신호 탐지 성능 향상

정진우, 박준범, 한혜경, 윤상범

LIG넥스원

jinwoo.jeong@lignex1.com, junbeom.park@lignex1.com, hyekyung.han@lignex1.com, sangbom.yun@lignex1.com

Digital Twin-Based FHSS Signal Generation for Improved AI-Based SIGINT Detection

Jeong Jin Woo, Park Jun Beom, Han Hye Kyung, Yun Sang Bom

LIG Nex1

요약

주파수 도약(Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) 신호는 저피탐 특성으로 인해 신호 정보(SIGINT) 관점에서 탐지 및 식별이 어려운 대표적인 신호 유형이다. 최근 인공지능(AI)을 활용한 FHSS 신호 자동 탐지 기법이 제안되고 있으나, 실제 운용 환경에서 확보 가능한 학습 데이터의 양과 다양성에는 한계가 존재한다. 본 논문에서는 SIGINT 분석을 목적으로 디지털 트윈 개념을 적용한 FHSS 신호 자동 생성 기법을 제안한다. 제안 기법은 도약 파라미터, 전파 채널 및 간섭 환경을 확률적으로 모델링하여 실제 수집 신호와 통계적으로 유사한 가상 데이터를 대규모로 생성한다. 실험 결과, 디지털 트윈 기반 데이터셋을 활용한 경우 저 SNR 환경에서 FHSS 신호 탐지 정확도와 ROC 성능이 유의미하게 향상됨을 확인하였다.

I. 서론

현대 무선 통신 환경에서는 항재밍 및 저피탐 특성을 확보하기 위해 FHSS 기반 통신 기법이 널리 사용되고 있다. 이러한 신호는 짧은 체류 시간과 불연속적인 주파수 특성으로 인해 기존 에너지 검출 기반 SIGINT 시스템에서 탐지 난이도가 높다.[1]

AI 기반 신호 인식 기법은 이러한 문제를 완화할 수 있는 대안으로 주목받고 있으나, 실제 SIGINT 환경에서 수집 가능한 FHSS 데이터는 제한적이며 특정 장비나 환경에 편중되는 문제가 있다.[2] 본 논문은 디지털 트윈 기반 FHSS 신호 자동 생성 기법을 통해 이러한 데이터 부족 문제를 해결하고, SIGINT용 AI 탐지 성능 향상을 검증한다.

II. 본론

운용 환경을 모사한다. 생성된 신호는 SIGINT 관점에서 관측 가능한 형태로 출력되며, AI 기반 신호 탐지 모델의 학습 데이터로 활용된다.[3]

제안하는 디지털 트윈 기반 FHSS 신호 생성 기법은 이상적인 통신 가정을 전제로 하지 않고, 실제 SIGINT 관측 환경에서 나타나는 특성을 반영하도록 설계되었다. 특히 주파수 도약 파라미터는 고정된 시퀀스가 아닌 확률 분포 기반으로 생성되어, 균일 도약뿐 아니라 비균일 도약 특성도 함께 모사할 수 있다. 이를 통해 실제 비협조(non-cooperative) 신호 환경에서 관측되는 다양한 스펙트럼 점유 양상을 재현할 수 있다.

또한 전파 채널 모델과 간섭 모델은 독립적으로 구성되어 페이딩 강도, 잡음 전력, 간섭 밀도 등을 개별적으로 제어할 수 있다. 이러한 모듈화 구조를 통해 제한된 실제 수집 데이터에 의존하지 않고도 다양한 운용 시나리오를 반영한 학습 데이터셋을 생성할 수 있으며, 이는 SIGINT 분석 환경에서 요구되는 데이터 다양성 확보 측면에서 효과적인 접근 방식이다.

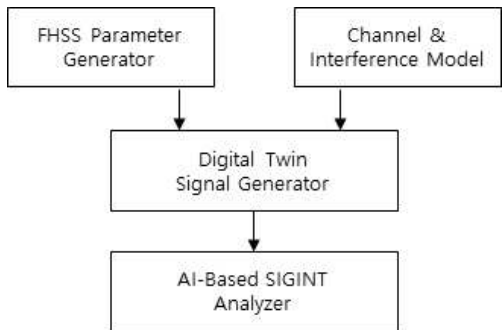


그림 1 디지털 트윈 기반 FHSS SIGINT 시스템 구조

그림 1은 제안하는 디지털 트윈 기반 FHSS 신호 생성 시스템의 전체 구조를 나타낸다. FHSS 신호 파라미터(도약 대역폭, 도약률, 변조 방식)는 확률 모델을 통해 생성되며, 전파 채널 및 간섭 모델이 결합되어 실제 운

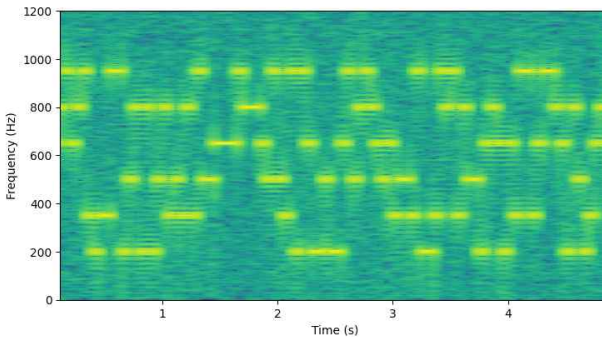


그림 2 디지털 트윈기반으로 생성된 FHSS 신호의 예

그림 2는 생성된 FHSS 신호의 스펙트로그램 예시로, 실제 FHSS 신호와 유사한 시간-주파수 특성을 확인할 수 있다.

III. 실험 결과

실험에서는 CNN 기반 스펙트로그램 분류기를 사용하여 FHSS 신호 탐지 성능을 평가하였다. 실제 수집 데이터만 사용한 경우와 디지털 트윈 생성 데이터를 혼합하여 학습한 경우를 비교하였다.

성능 평가를 위해 신호 관측 시간은 수 초 단위로 설정하여 실제 SIGINT 감시 환경에서의 관측 시간을 모사하였다. 스펙트로그램 기반 특징 추출을 위해 단시간 푸리에 변환(STFT)을 적용하였으며, 생성된 시간-주파수 표현을 CNN 기반 신호 탐지기의 입력으로 사용하였다.

비교 실험의 공정성을 확보하기 위해 디지털 트윈 데이터 적용 여부와 관계없이 동일한 신경망 구조와 학습 파라미터를 사용하였다. 이러한 실험 설계를 통해 디지털 트윈 기반 합성 데이터가 FHSS 신호 탐지 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있다.[4]

그림 3은 SNR 변화에 따른 FHSS 신호 탐지 정확도를 나타낸다. 제안 기법을 적용한 경우 저 SNR 구간에서 탐지 성능이 크게 향상되었다.

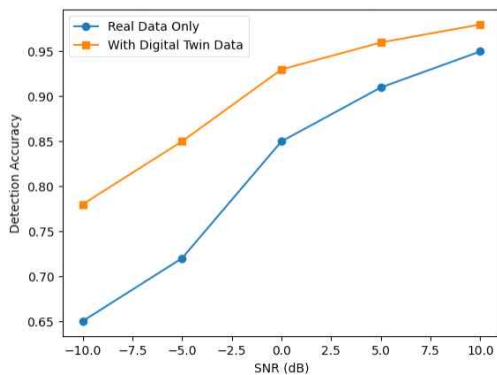


그림 3 SNR 변화에 따른 FHSS 신호 탐지 정확도

그림 4는 FHSS 신호 탐지에 대한 ROC 곡선을 나타내며, 디지털 트윈 데이터 적용 시 동일한 False Alarm Rate에서 더 높은 Detection Probability를 달성함을 확인할 수 있다.

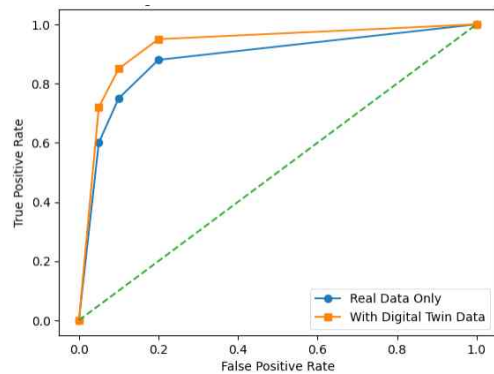


그림 4 FHSS 신호 탐지에 대한 ROC 곡선

ROC 곡선 결과에서 확인할 수 있듯이, 디지털 트윈 기반 데이터를 활용한 경우, 다양한 오경보율 조건에서 더 높은 탐지 확률을 유지한다. 이는 단순한 평균 정확도 향상뿐 아니라, 임계값 설정 변화에 따른 성능 안정성이 개선되었음을 의미한다. 이러한 특성은 오경보 증가가 분석가의 부담으로 직결되는 SIGINT 운용 환경에서 특히 중요한 요소로 작용한다.[5]

IV. 결론

본 논문에서는 SIGINT 분석을 위한 디지털 트윈 기반 FHSS 신호 자동 생성 기법을 제안하였다. 제안 기법은 제한된 실제 수집 데이터 환경에서도 AI 기반 FHSS 신호 탐지 성능을 효과적으로 향상시킴을 실험적으로 확인하였다. 향후 연구에서는 다양한 전파 위협 신호로 확장하여 적용 가능성을 검증할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

Put sponsor acknowledgments.

참 고 문 헌

- [1] S. Batuhan, İ. Kahraman, A. Görçin, H. A. Çırpan, and A. R. Ekti, "Measurement based FHSS-type drone controller detection at 2.4 GHz: An STFT approach," arXiv preprint arXiv:2003.03614, 2020.
- [2] Y. Zhang, J. Wang, and X. Li, "Detection of frequency-hopping signals based on deep neural networks," Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Monitoring Trends in Physical and Information Security (MTPIS), pp. 1 - 6, 2018.
- [3] J. Jeon, Y. Choi, and D. Yun, "Time - frequency rank vector approach for FHSS signal hop pattern estimation," Journal of Korean Institute of Information Technology, vol. 23, no. 8, pp. 127 - 135, Aug. 2025.
- [4] M. Aydin, "The fast and reliable detection of multiple narrowband frequency hopping signals," Sensors, vol. 24, no. 15, Article no. 4812, 2024.
- [5] Z. Lei, "Detection and frequency estimation of frequency hopping spread spectrum signals," Electronics, vol. 7, no. 9, Article no. 170, 2018.