

LoRaWAN 에서 LoRa 기반 Integrated Sensing and Communication 의 가능성 분석

임재형¹, 장원우², 이원준²

¹고려대학교 사이버국방학과

²고려대학교 정보보호대학원

ljh00719@korea.ac.kr, wwjang@korea.ac.kr, wlee@korea.ac.kr

LoRa-Based Integrated Sensing and Communication Feasibility Analysis in LoRaWAN

Jaehyeong Lim¹, Wonwoo Jang², Wonjun Lee²

¹Dept. of Cyber Defense, Korea University

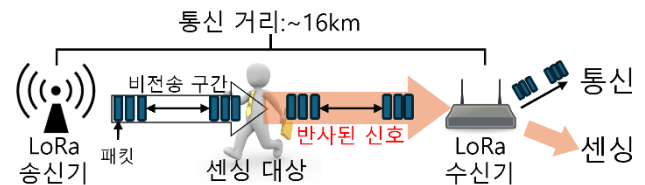
²School of Cybersecurity, Korea University

요 약

Integrated Sensing and Communication(ISAC)은 통신과 센싱을 하나의 인프라에서 통합해 수행할 수 있는 기술이다. LoRa 는 저전력, 장거리 통신을 가능하게 하여, 이를 이용해 넓은 범위에서 ISAC를 가능하게 하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 LoRa 의 상위 계층을 정의하는 LoRaWAN 에서는 듀티 사이클로 인해 실제 통신에서는 센싱에 필요한 샘플링 속도보다 낮은 패킷 전송 속도를 보인다. 이로 인해 센싱에 필요한 신호를 충분히 수집하지 못해 센싱 성능이 저하되는 문제가 발생할 수 있다. 본 연구는 LoRaWAN 기반 네트워크에서 ISAC 시스템을 구축하기 위해 실제 패킷 전송 속도와 샘플링 속도 간의 차이를 분석하고 이를 해결하기 위한 인자 조절 방안을 제시한다. 이러한 접근은 패킷의 채널 점유 시간을 최적화함으로써, 센싱 성능을 향상시킬 수 있다.

1. 서론

Integrated Sensing and Communication(ISAC)은 통신과 센싱을 통합하여 하나의 인프라에서 두 가지 기능을 동시에 수행하는 기술로 스마트 팩토리, 스마트 트랙픽 모니터링, 침입자 탐지 등 다양한 분야에서 적용될 수 있다. LoRa 는 저전력, 장거리 통신이 가능하기 때문에 이것을 이용하여 넓은 범위에서 ISAC 를 하기 위해 연구가 진행되고 있다. 하지만 기존의 LoRa 센싱 연구[1]에서는 LoRaWAN 을 고려하지 않고 신호를 전송하기 때문에 실제 통신 환경에서는 센싱에 요구되는 패킷 전송 속도(Packet Rate)를 충족하지 못한다. 또한, 실제 통신에선 안정성을 위해 흐름 제어와 혼잡 제어, CSMA/CA 등의 방법이 적용되는데 이는 실제 패킷 전송 속도의 추가적인 감소를 야기할 수 있다. 그로 인해 센싱 성능이 제한될 수 있다. 따라서 통신과 센싱의 중요도에 따라 인자의 크기를 조절하는 방법이 필요하다. 그림 1 은 LoRaWAN 에서 ISAC 시스템이다. LoRa 송신기에서 패킷을 담아 전송한 신호는 센싱 대상에 반사되어 LoRa 수신기에 전달된다. 이 패킷을 통해 통신이 가능하고, 반사된 신호는 원래



(그림 1) LoRaWAN 에서 ISAC 시스템. 듀티 사이클로 인해 발생하는 비전송 구간이 센싱 성능을 저하시킴.

신호와 비교했을 때 전송 시간이나 위상 등에 변화가 생기는데 이를 이용해서 센싱이 가능하다. 여기서, 패킷 전송 시간을 감소시켜 제한된 시간 내에 더 많은 패킷을 전송함으로써 센싱 성능을 향상시킬 수 있다.

2. 배경

LoRa 는 라이선스가 필요 없는 Industrial, Scientific, and Medical(ISM) 대역에서 동작하는 물리 계층 기술로 Chirp Spread Spectrum(CSS) 변조 방식을 사용한다. 각 심볼은 중심 주파수 f_0 를 기준으로 신호의 대역폭 Bandwidth(BW)에 대해 주파수 $f_0 - \frac{BW}{2}$ 에서 $f_0 + \frac{BW}{2}$ 까지 선형적으로 증가하거나 감소하는 형태로 표현된다.

Spreading Factor(SF)는 하나의 심볼에 담을 수 있는 비트의 수를 결정하는 인자로 7 부터 12 까지 선택 가능하다. SF 가 1 이면 1 비트, 2 면 2 비트를 한 심볼에 담을 수 있어 심볼이 담을 수 있는 데이터양은 2^{SF} 가 된다. 따라서 심볼의 길이, 즉 한 심볼을 전송하는데 걸리는 시간은 $\frac{2^{SF}}{BW}$ 가 된다. SF 가 1 증가하면 심볼의 길이는 2 배로 증가한다.

LoRaWAN 는 LoRa Alliance®가 관리하는 Low Power, Wide Area Networking(LPWAN) 표준으로 주로 게이트 웨이와 종단 장치 간의 통신을 관리한다[2]. LoRaWAN 통신에서 에어 타임(Airtime)은 단일 엔드 디바이스가 하나의 패킷을 송수신하는 데 소요되는 시간을 의미하고 패킷의 크기, SF, BW 에 의해 영향을 받는다. 최대 패킷의 크기는 SF 와 BW 에 의해 결정된다.

LoRaWAN 은 주파수 대역의 효율적 사용과 배터리 절약, 전파 간섭 최소화를 위해서 듀티 사이클을 사용한다. 이것은 주어진 시간 동안 채널이 사용되는 비율을 나타내며 대부분의 지역에서 최대 1%로 제한된다[3]. 이는 하루 동안 해당 채널을 최대 864 초 동안 사용할 수 있다는 것을 의미한다.

3. 본론

3.1 문제 분석

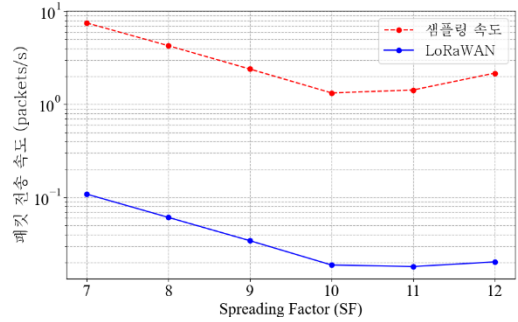
높은 센싱 정확도 달성을 위해 설정한 샘플링 속도(Sampling Rate)를 패킷 전송 속도로 변환하는 과정은 다음과 같다. 먼저, 한 심볼을 구성하는 샘플 수인 샘플링 속도 $\left(\frac{\text{samples}}{\text{second}}\right) \times \frac{2^{SF}}{BW} \left(\frac{\text{seconds}}{\text{symbol}}\right)$ 를 계산하여 심볼 전송 속도를 $\frac{\text{샘플링 속도} \left(\frac{\text{samples}}{\text{second}}\right)}{\text{한 심볼당 샘플 수} \left(\frac{\text{samples}}{\text{symbol}}\right)}$ 로 얻을 수 있다. 비트 단위의 데이터 전송 속도는 심볼 전송 속도 $\left(\frac{\text{symbols}}{\text{second}}\right) \times SF$ 로 구할 수 있고 여기에 패킷의 크기를 나누어 최종적으로 패킷 전송 속도를 도출할 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{패킷 전송 속도} &= \frac{\text{샘플링 속도}}{\text{샘플링 속도} \times \frac{2^{SF}}{BW}} \times SF \times \frac{1}{\text{패킷의 크기}} \\ &= \frac{BW \times SF}{2^{SF} \times \text{패킷의 크기}} \left(\frac{\text{packets}}{\text{second}}\right) \end{aligned}$$

따라서 패킷 전송 속도는 센싱을 위해 설정한 샘플링 속도에 관계없이 SF, BW 패킷의 크기에만 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 패킷 전송 속도의 역수는 에어 타임이다.

LoRaWAN 에서 실제 패킷 전송 속도는 듀티 사이클을 고려하여 $\frac{1 \text{ packet}}{\text{airtime (s)}} \times \text{duty cycle}$ 로 계산된다.

하지만 기존의 연구에서는 센싱 할 때 듀티 사이클을 고려하지 않고 연구를 진행하였다. 그림 2 는 BW 를 500 Hz 로 가정하고 듀티 사이클을 최댓값인 1%라 가정했을 때 SF 의 변화에 따른 샘플링 속도로부터 계산된 패킷 전송 속도와 LoRaWAN 의 패킷 전송 속도를 나타낸다. 패킷 전송 속도를 계산할 때 패킷은 프리앰블(Preamble)과 페이로드(Payload)로 구성되고 페이로드의 크기는 최대라 가정하고 계산하였다. 듀티 사이클로 인해 LoRaWAN 의 패킷 전송 속도와 샘플링 속도 사이에 큰 차이가 생긴다는 것을 확인할



(그림 2) 샘플링 속도와 LoRaWAN 의 패킷 전송 속도 비교. 센싱에 요구되는 속도가 LoRaWAN 에서의 속도보다 100 배 이상 높음.

수 있다. 또한, 실제 통신 환경에서는 안정성을 보장하기 위해 흐름 제어나 혼잡 제어와 같은 방법을 사용하므로 LoRaWAN 의 패킷 전송 속도는 더욱 감소할 수 있다. 이로 인해, 센싱에 필요한 신호를 충분히 수집하지 못해 센싱 성능이 저하될 수 있다.

3.2 개선 방안

사용자가 목적에 따라 SF, BW, 패킷 크기를 조절함으로써 문제를 해결할 수 있다. 만약 센싱이 목적이라면 SF=7, BW=500kHz 로 설정하고 페이로드 크기를 최소화하여 패킷이 채널을 점유하는 시간을 줄인다. 이를 통해 더 많은 패킷을 송수신할 수 있어 센싱의 효율성을 극대화할 수 있다.

4. 결론

LoRa 기반의 센싱 시스템에서 LoRaWAN 의 듀티 사이클 제한으로 인해 실제 패킷 전송 속도가 센싱에서 요구하는 전송 속도를 따라가지 못하면 센싱 성능이 감소할 수 있다. 이를 해결하기 위해 사용자의 목적에 맞게 여러 인자의 크기를 조정하는 방법을 제안하였다. 이러한 접근을 통해 실제 환경에서 센싱 성능의 저하를 최소화하고 성능을 목적에 맞게 최적화할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 2024 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2024-00338786) 과 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2023-00234719, (SW 스타랩) 서비스 연속형 지향 에지 Continuum SW 프레임워크)을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] D. Guo et al., "ILLOC: In-Hall Localization with Standard LoRaWAN Uplink Frames," in Proc. of ACM IMWUT, vol. 6, no. 13, pp.1-26, March 2022.
- [2] SEMTECH, "LoRaWAN® Standard," URL: <https://www.semtech.com/lora/lorawan-standard>
- [3] ETSI, "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW; Part 2: Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive," ETSI EN 300 220-2 V3.2.1, June 2018.