

철도 IoT 센서 네트워크를 위한 LoRaWAN 링크 가용성 및 전송 듀티사이클 분석

전용태*

*우송대학교

202110364@live.wsu.ac.kr

Analysis of LoRaWAN Link Availability Duty-Cycle for Self-Powered Railway IoT Sensor Nodes

Jeon Yong Tae*

*Woosong Univ.

요약

본 논문은 철도 IoT의 전원 문제를 해결하기 위해, 주행 진동을 활용한 자가 발전형 센서 노드의 통신 가용성을 분석하였다. 실제 진동데이터와 LoRaWAN Class A 에너지 모델을 매핑하여 전송 주기를 확인해본 결과, 고속 주행 시 분당 수 회 이상의 데이터 전송이 가능함을 확인하였다. 이를 통해 배터리가 없는 환경에서도 상태 모니터링에 필요한 통신 서비스 품질을 만족시킬수 있음을 입증하였다.

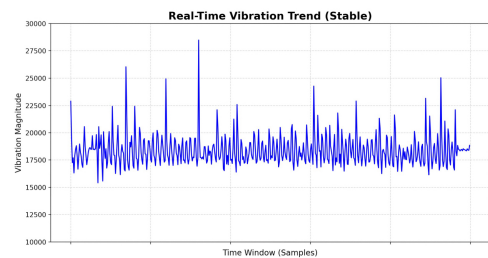
I. 서론

본 논문에서는 최근 철도 산업에서 안전성 확보를 위해 도입이 가속화되고 있는 상태 기반 유지보수 시스템을 위한 무선 센서 네트워크의 전원 문제를 다룬다. 베어링 온도, 차축 진동 등을 실시간으로 감시하는 센서 노드에 유선 전원을 공급하거나 배터리를 주기적으로 교체하는 것은 막대한 유지보수 비용을 초래한다[1]. 이를 해결하기 위해 진동 에너지 하베스팅 기술이 대안으로 제시되었으나, 불규칙한 진동 에너지 발생 특성과 순간적인 고전력을 요구하는 무선 통신 모듈 간의 에너지 수급 불균형 문제가 존재한다. 이는 통신 링크의 단절을 야기하여 모니터링 시스템의 신뢰성을 저하시키는 주요 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 철도 진동 데이터를 바탕으로 LoRaWAN 통신 링크의 에너지 예산을 수립하고, 다양한 주행 속도 조건에서 시스템이 지속 가능한 데이터 전송 주기를 분석하여 자가 발전형 센서 노드의 실질적인 운용가능성을 검증하는데 초점이 맞춰져 있다.

II. 본론

본 논문에서는 먼저 철도 주행 환경의 복합적인 진동 특성을 정밀하게 반영하기 위해 MPU6050 6축 모션 센서를 이용하여 100Hz 샘플링 레이트로 주행 데이터를 수집하였다[2]. 단순 가속도뿐만 아니라 6축 센싱을 통해 차축의 회전 성분과 3차원 진동을 모두 분석한 결과, 열차 속도가 증가함에 따라 진동 가속도의 크기와 에너지 밀도가 비례하여 증가하는 경향을 확인하였으며 이는 고속 구간에서 통신을 위한 가용 전력량이 증가함을 의미한다. 이를 기반으로 저전력 장거리 통신 기술인 LoRaWAN Class A 프로토콜을 적용한 에너지 소비 모델을 수립하였다. 철도 환경의 높은 경로 손실을 고려하여 송신 출력을 +17dBm(58mA)으로 설정하고, 확산 계수(SF) 7을 기준으로 1회 패킷 전송 시간(ToA)을 약 0.1초로 가정했을 때, 1회 전송에 필요한 에너지는 약 19.14mJ로 산출되었다[3]. 수집

된 전력이 커패시터에 저장되어 패킷에 도달하는 시간을 ‘충전 대기 시간’으로 정의하고 통신 가능 주기를 계산한 결과, 40km/h 미만의 저속 구간에서는 전송 주기가 평균 60초 내외로 나타났으나, 80km/h이상의 고속 구간에서는 10초 이내로 급격히 단축됨을 확인하였다. 이는 고속 주행 시 베어링 과열 등 긴급한 상태 정보를 지연 없이 관제 센터로 전송할 수 있음을 보여주며, 별도의 외부 전원 없이도 하베스팅 에너지만으로 안정적인 링크 연결을 유지할 수 있음을 보여준다.



[그림1] 실제 열차 주행 환경에서 MPU6050 센서를 통해 계속된 3축 진동 가속도의 합성 크기 변화

[그림1]은 실제 운행 중인 열차 객차 내에서 MPU6050 6축 모션 센서를 이용해 취득한 진동 가속도의 실시간 파형이다. Y축은 3축(x,y,z) 가속도 성분의 벡터 합인 진동 크기를 나타내며, x축은 시간 경과에 따른 샘플링 구간을 의미한다. 계속 데이터를 분석한 결과, 열차의 주행 진동은 일정한 사인파 형태가 아닌, 선로의 이음매와 차륜의 상호작용으로 인한 Impulse 성 스파이크가 혼재된 불규칙한 패턴임을 확인할 수 있다. 그래프에서 관측되는 약 20,000~25,000 사이의 높은 진폭 구간은 에너지 하베스팅 소자에 강한 응력을 가해 순간적으로 높은 전압을 유도할 수 있는 구간이다. 본 연구에서는 이러한 간헐적인 고에너지 유도구간이 커패시터를 급속 충전시키는 버스트 에너지원의 역할을 수행함을 확인하였으며, 이를 통해

앞서 계산된 LoRaWAN 통신 에너지를 주기적으로 확보할 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

III. 결론

본 논문에서는 철도 환경에 특화된 자가 발전형 IoT 센서 노드의 통신 서비스 가용성을 정량적으로 분석하였다. 단순한 에너지 수집량 측정을 넘어, MPU6050 기반의 실제 진동 계측 데이터와 LoRaWAN의 소비 전력 모델을 결합하여 ‘데이터 전송 주기’라는 유의미한 통신 품질 지표를 도출하였다. 결과적으로, 열차의 주행 속도가 증가함에 따라 통신 가용성이 향상되어 실시간 모니터링 서비스가 충분히 가능함을 확인하였다. 향후 연구에서는 터널 및 교량 등 철도 특수 환경에서의 전파 감쇄 모델을 추가로 반영하고, 수집된 전력량에 따라 확산계수를 능동적으로 조절하는 적응형 전송 알고리즘에 대해 연구하여 고도화할 것이다. 본 연구 결과는 배터리 없는 철도 IoT 시스템 설계 및 링크 버짓(Link Budget) 최적화를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] M. Gao, P. Wang, Y. Cao, R. Chen, and D. Cai, "Self-powered ZigBee wireless sensor nodes for railway condition monitoring," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 19, no. 3, pp. 900–909, Mar. 2018.
- [2] Z. Hadas et al., "Kinetic electromagnetic energy harvester for railway applications—Development and test with wireless sensor," Sensors, vol. 22, no. 3, p. 905, Jan. 2022.
- [3] Semtech Corporation, "SX1276/77/78/79 – 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver," Datasheet Rev. 7, Aug. 2020.