

혼잡도 히트맵 기반 LoRaWAN ADR 파라미터 재할당 방법

윤정현, 박성우, 김승구*
충북대학교

thera9234@chungbuk.ac.kr, psw209@cbnu.ac.kr *kimsk@cbnu.ac.kr

A Congestion Heatmap-based LoRaWAN ADR Parameter Reallocation Method

Yoon Jeong Hyeon, Park Seong Woo, Kim Seung Ku*
Chungbuk National Univ.

요 약

본 논문은 대규모 LoRaWAN 환경에서 표준 ADR(Adaptive Data Rate)이 개별 링크 품질 중심으로 동작함에 따라 전체 네트워크 품질을 충분히 반영하지 못해 PDR 및 처리량이 저하되는 문제를 다룬다. 이를 해결하기 위해 네트워크 서버가 수집한 업링크 관측치로부터 시간-SF-채널 축의 혼잡도 히트맵을 구성하고, 혼잡이 임계치를 초과하는 구간에서 혼잡 기여도가 큰 단말을 선별하여 ADR 파라미터를 재할당하는 혼잡 인지 기반 제어 기법을 제안한다. 제안 기법은 링크 마진 조건을 유지하는 범위에서 혼잡이 낮은 자원으로 부하를 분산시켜 충돌을 완화하도록 설계되었다. ns-3 기반 시뮬레이션을 통해 대규모 환경을 조성하고 제안 기법이 표준 ADR 대비 성능 개선 가능성을 보임을 확인한다.

I. 서 론

사물인터넷 서비스가 적극적으로 도입되면서 적재는 수천대에서 많게는 수만대의 단말이 넓은 영역에 분산 배치되는 대규모 환경에서는 저전력, 장거리, 저비용을 동시에 만족하는 무선통신 기술의 중요성이 더욱더 부각된다[1]. 특히 센서 데이터 수집, 계량, 스마트 시티, 농업 모니터링과 같이 단말당 데이터 전송량은 작지만 장기간 배터리 구동이 요구되는 응용에서는 전통적인 셀룰러 기반 통신보다 LPWA(Low-Power Wide-Area) 기술이 실용적인 대안으로 널리 활용된다. 대표적인 LPWA 기술 중 하나인 LoRa 는 비면허 대역에서 동작하는 무선 통신 기술로, Chirp Spread Spectrum 변조를 이용해 낮은 수신 신호 품질에서도 통신을 가능하게 하며, 비교적 긴 통신거리와 높은 커버리지를 제공한다. LoRa 의 물리계층 파라미터는 주로 Spreading Factor(SF), 대역폭(BW), 코딩률(CR), 송신 전력 등으로 구성되며, SF 가 증가할수록 수신감도는 향상되나 airtime 이 증가하여 동일 시간 동안 수용 가능한 트래픽이 감소한다. LoRa 는 “star-of-stars” 구조에서 게이트웨이(GW)가 단말의 업링크를 수신하고 네트워크 서버(NS)가 이를 취합 및 관리하는 구조를 갖기 때문에, NS 관점에서 단말들의 전송 파라미터를 조정하는 방식이 자연스럽다. 이를 위해 LoRa 에서는 ADR(Adaptive Data Rate) 알고리즘을 통해 단말의 데이터 속도와 송신전력을 조정한다. 기존 ADR 은 기본적으로 링크 품질을 기반으로 동작하며, 네트워크 서버가 최근 수신된 업링크의 SNR 여유(margin)를 계산해 목표 링크 마진을 만족하도록 데이터 속도를 높이거나 송신전력을 낮추어 airtime 과 에너지 소모를 줄이는 방향으로 제어한다.

하지만 이 방식은 단말별 링크 예산을 개선하고 불필요한 고 SF 의 사용을 줄인다는 점에서는 효과적이거나 대규모 혹은 고밀집 환경에서는 다음과 같은 한계를 가진다. 첫째, 개별 링크 중심(link-centric) 최적화로 인해 네트워크 전체 혼잡도를 직접 반영하지 못한다[2]. 단말이 많아질수록 동일 SF·동일 채널로 트래픽이 집중될 수 있으며, 이는 충돌 증가로 이어져 전체 네트워크의 PDR 및 처리량을 저하시킨다. 둘째, ADR 은 통상 일정 기간의 수신 통계를 기반으로 파라미터를 조정하므로, 트래픽 패턴 변화나 특정 구역 및 셀의 국소 혼잡에 대해 반응이 느리거나 불균형한 자원 사용이 발생할 수 있다.

본 논문은 이러한 문제의식에서 출발하여, 네트워크 서버 관점에서 네트워크 전체의 혼잡을 인지하고 이에 맞추어 자원을 할당하는 아이디어를 제안한다. 핵심은 NS 가 수집한 업링크 관측치로부터 시간, SF, 채널 정보를 분석하여 혼잡도 요약 정보를 구성하고, 특정 구간에서 혼잡이 임계치를 초과하면 혼잡에 크게 기여하는 단말들을 선별하여 전송 파라미터를 재조정함으로써 충돌을 완화하는 것이다. 즉, 기존 ADR 의 링크 품질 기반 조정을 유지하되, 네트워크 레벨에서 혼잡 분산을 함께 고려하여 대규모 환경에서의 PDR, 처리량 개선을 목표로 한다. 이후 본론에서는 제안 기법의 동작 절차와 설계 요소를 설명하고, 시뮬레이션을 통해 기존 ADR 대비 성능 개선 가능성을 보인다.

II. 본론

ED 는 비동기 ALOHA 방식으로 업링크 패킷을 전송하며, GW 이를 수신해 NS 로 전달한다. NS 는 수신된 업링크의 시간 정보, 사용 SF 및 CH, 수신 성공 혹은 실패 여부, 수신 품질 등을 관측할 수 있으므로 개별 링크 관점의 제어뿐 아니라 네트워크 전역 관점에서

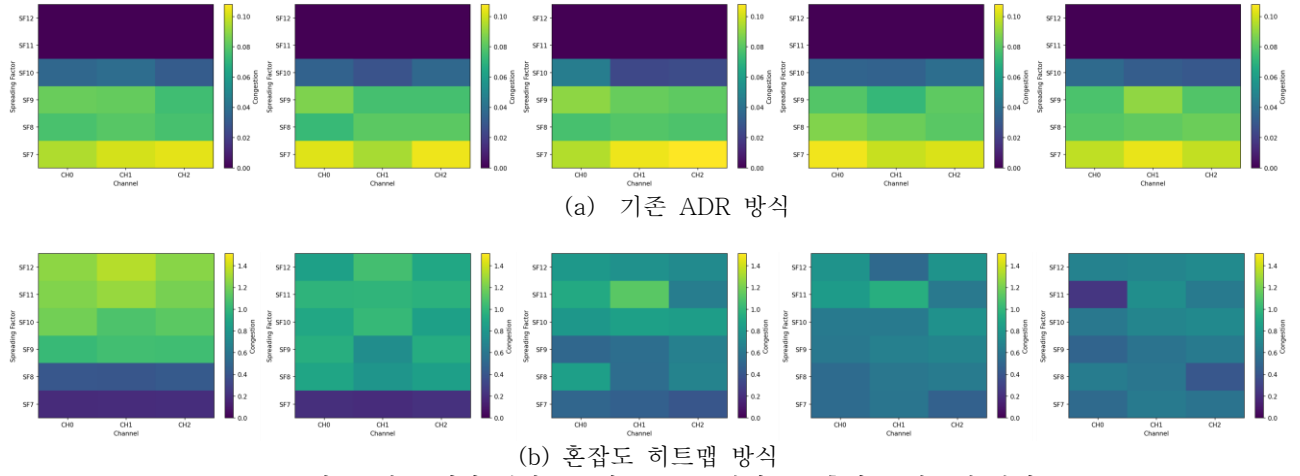


그림 1. 성능 평가 결과 (a) 기존 ADR 방식 (b) 혼잡도 히트맵 방식

혼잡을 추정하고 자원을 재할당할 수 있다. 이러한 사실을 기반으로 본 논문에서 제안하고자 하는 기법은 NS 가 업링크 관측치로부터 시간 구간 Δt 마다 구성된 혼잡도 요약 정보를 활용한다. NS 는 각 구간 t 와 자원 조합 (SF, CH) 에 대해 전송 시도 수 $N_{tx}(t, s, c)$ 및 충돌 혹은 실패로 판정된 수 $N_{fail}(t, s, c)$ 를 집계하여 혼잡도 $H(t, s, c)$ 를 계산한다. 혼잡도의 정의는 다양할 수 있으나 본 논문에서 다음과 같은 명확한 형태의 수식 (1) 을 사용한다.

$$tH(t, s, c) = \frac{N_{fail}(t, s, c)}{N_{tx}(t, s, c) + \epsilon} \quad (1)$$

여기서 ϵ 는 0 을 나누는 경우를 방지하기 위해 삽입한 매우 작은 상수를 나타내며, 결과적으로 $H(t, s, c)$ 는 측정 시간 구간에 특정 SF 및 CH 조합을 할당받은 ED 가 얼마만큼 트래픽을 발생시키고 있는지를 나타내는 히트맵 형태의 요약 정보로 해석하는 것이 가능하다.

혼잡도가 구성되면 NS 는 혼잡 완화를 위한 재할당을 수행한다. 먼저 현재 구간 t 에서 $\max_{s,c} H(t, s, c)$ 가 임계치 H_{th} 를 초과하면 혼잡 트리거가 발생한 것으로 판단하고 혼잡도가 높은 셀에 최근 전송 이력이 있는 ED 중 혼잡 기여도가 큰 일부 ED 를 타겟으로 선택한다. 타겟 ED 선택은 구현 단순성을 위해 해당 셀에서의 전송 빈도 혹은 해당 셀에서의 실패 빈도가 가장 큰 ED 를 우선순위로 두는 방식으로 구성할 수 있다. 마지막으로 선택된 ED 들에 대해 혼잡도가 낮은 후보 자원 조합 (SH, CH) 을 사용하도록 하되 링크 안전성을 해치지 않도록 링크 마진 제약을 만족하는 후보만 허용한다.

제안 기법의 성능을 확인하기 위해 ns-3 기반 LoRaWAN 시뮬레이션을 수행하였다. 네트워크는 다수의 GW 와 ED 및 단일 NS 로 구성되며 ED 는 트래픽을 랜덤한 패턴으로 발생시켜 업링크 메시지를 생성한다. 성능 평가는 ED 의 수가 5000 개인 대규모 환경에서 혼잡 완화 효과를 직접적으로 보여줄 수 있는 혼잡도 히트맵 그림을 중심으로 수행하였다. 약 6 시간 동안의 시뮬레이션 실험 결과, ED 의 수가 증가할수록 표준 ADR 은 일부 (SF, CH) 조합에 트래픽이 집중되는 경향을 보였다. 이에 따라 충돌 확률 증가로 PDR 및 처리량이 급감하는 추세를 보였다. 반면 제안 기법은 혼잡 트리거 이후 과혼잡 셀에 기여하는 일부 ED 를 선별하여 상대적으로 덜 혼잡한 자원으로 재할당 함으로써 해당 셀의 혼잡도를 감소시키고 충돌을 완화하였다. 또한 혼잡도 히트맵 관점에서 표준 ADR 은 혼잡이 한 번

형성되면 동일 자원에 반복적으로 부하가 쌓이는 반면, 제안 기법은 혼잡 임계치 초과 시점마다 혼잡 셀의 부하를 다른 자원으로 분산시켜 병목을 완화하는 패턴을 보였다. 이는 개별 링크만을 고려하는 기존 ADR 만으로는 반영하기 어려운 전역 네트워크 품질 상태를 NS 관점의 간단한 재할당으로 완화할 수 있음을 시사한다.

III. 결론

본 논문은 대규모 LoRaWAN 환경에서 기존 ADR 이 개별 링크 품질 중심으로 동작함에 따라 혼잡한 SF, 채널, 시간 구간의 트래픽 집중과 충돌과 같은 네트워크의 전역적 상태를 충분히 반영하지 못하는 한계를 지적하고, 네트워크 서버가 수집한 업링크 관측치로 혼잡도 히트맵을 구성한 뒤 과혼잡 구간에서 기여도가 큰 단말을 선별해 ADR 파라미터를 재할당하는 혼잡 인지 기반 제어 방식을 제안하였다. 제안 기법은 링크 마진 조건을 유지하는 범위에서 혼잡이 낮은 자원으로 부하를 분산시켜 충돌을 완화하도록 설계되었으며, ns-3 시뮬레이션을 통해 5000 대의 단말이 배치된 대규모 고밀집 환경에서 표준 ADR 대비 성능 개선 가능성을 확인하였다. 향후 연구에서는 다중 게이트웨이 및 다양한 트래픽 패턴을 고려한 파라미터 자동 튜닝, 그리고 혼잡 예측을 결합한 선제적 재할당으로 확장하여 보다 안정적인 대규모 운용을 지원할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A5A8026986). 본 연구는 2026 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평화원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0020536, 산업혁신인재성장지원사업). 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업임(IITP-2025-RS-2020-II201462).

참고 문헌

- [1] M. C. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J. M. Alonso, "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?" in *Proc. 19th ACM Int. Conf. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, 2016, pp. 59-67, doi: 10.1145/2988287.2989163.
- [2] S. Kim, J. Lee, and S. Bahk, "Contention-Aware Adaptive Data Rate for Throughput Maximization in the LoRaWAN," *Sensors*, vol. 18, no. 6, p. 1716, 2018.