

밀집된 LoRa 네트워크의 전송지연 및 전송효율 성능 검증

황 건 하*, 신 경 섭^o

Measurement of Delay and Transmission Efficiency in a Densely Deployed LoRa Network

Geon-ha Hwang*, Kyung-seop Shin^o

요 약

현대 산업에서는 IoT가 기술의 발전과 함께 필수적인 요소로 자리잡고 있다. 그 중에서도 Low Power Wide Area Network으로서 각광받고 있는 LoRa는 저렴한 단말 비용, 비면허 대역 사용, 넓은 커버리지 등의 장점으로 많은 관심을 받고 있다. 그러나 LoRa 단말의 증가는 통신 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 밀집된 LoRa 통신환경을 구성하여 단말의 증가와 전송 데이터의 증가가 실제 통신환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 이 연구를 통해 실제 환경을 반영하여 단말의 증가로 인해 통신 성능이 감소한다는 사실을 입증하였으며, 이는 향후 혼잡한 IoT 환경에 관한 연구에 근거 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다

키워드 : 사물인터넷, 패킷 전달 비율, 처리율, 지연시간, LoRa

Key Words : Internet of Things , Packet Delivery Ratio, Throughput, Latency, LoRa

ABSTRACT

In the modern industrial landscape, IoT has become an essential element, driven by technological advancements. Among various IoT technologies, LoRa, a prominent Low Power Wide Area Network solution, has gained significant attention due to its cost-effective terminals, utilization of the unlicensed band, and wide coverage. However, the proliferation of LoRa terminals may potentially have adverse effects on the communication environment. This paper presents a quantitative analysis of the impact of increased terminals and data transmission on the actual communication performance in dense LoRa networks. By constructing a densely populated LoRa communication environment, we empirically demonstrate that the growth of terminals leads to a degradation in communication performance. This research provides empirical evidence that can serve as a foundation for future studies on highly congested IoT environments.

* 본 연구는 2022학년도 상명대학교 교내연구비를 지원받아 수행하였습니다.

• First Author : Sangmyung University Department of Computer Science, cromany@naver.com, 학생회원

o Corresponding Author : Sangmyung University Department of Computer Science, ksshin@smu.ac.kr, 정회원

논문번호 : 202306-124-B-RN, Received July 20, 2023; Revised August 28, 2023; Accepted September 6, 2023

I. 서 론

현대 산업에서 IoT는 기술의 발전과 함께 필수적인 요소로 자리 잡고 있다. IoT는 기계 및 장비를 연결하여 생산성을 높이고, 자동화된 생산 프로세스를 구현 함으로써 생산성과 효율성을 증대시킨다. 또한, IoT는 산업에서의 모니터링 및 제어 작업을 보다 간단하게 만들어 준다. IoT 센서를 사용하여, 데이터를 수집하고 이를 실시간으로 분석하면, 장비의 이상 징후를 미리 감지하고, 그에 따른 조치를 취할 수 있다^[1].

이러한 IoT의 기능들은 산업 분야에서 점점 더 중요해지고 있으며, 특히 스마트 팩토리(smart factory)와 같은 새로운 생산 패러다임을 구현하기 위해 필수적이다. IoT를 적용함으로써, 산업 생산성을 향상시키고, 제조 및 생산 과정에서 발생할 수 있는 문제를 미리 예측하고 예방할 수 있다^[2]. 또한, IoT를 통해 생산된 데이터는 인공지능 및 빅데이터 분석에 사용될 수 있으며^[3], 이는 산업의 발전과 더불어 새로운 비즈니스 모델의 탄생을 이끌어내는 중요한 역할을 한다. 따라서, IoT는 현대 산업에서 필수적인 기술로 자리 잡고 있으며, IoT 기술의 지속적인 발전과 응용은 산업 분야의 성장과 발전에 큰 기여를 할 것이다.

LoRa 기술은 IoT를 위한 기술 중 하나로 데이터를 저비용으로 장거리 전송이 가능하다는 특징이 있다. 기존의 무선 통신 기술과 달리, LoRa는 저전력 장치에서 광범위한 지역에서 데이터를 전송할 수 있으며^[4], 이는 센서 네트워크 및 기타 무선 IoT 응용 프로그램에서 특히 유용하다. 또한, LoRa의 장거리 통신 기능은 기존의 저전력 기반의 무선 기술로는 어려운 산업 및 농업 분야에서도 사용이 가능하게끔 해준다^[5].

또한, LoRa는 높은 보안성과 안정성을 제공하여, IoT 기술의 발전에 큰 기여를 하고 있다. 이러한 기능들은 LoRa를 IoT 시스템에서 중요한 역할을 하게끔 만들어 주고, 다양한 응용 분야에서 사용이 가능하게 해주며, 이로 인해 IoT 시장에서 LoRa의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라, LoRa의 필요성은 점점 더 커지고 있으며, 이러한 중요성은 IoT 분야의 연구 및 발전을 지속적으로 이끌어 나갈 것이다.

IoT 및 LoRa 단말기의 수 증가는 막대한 양의 데이터를 처리하고 통신할 필요가 있는 네트워크에 대한 성능 저하 문제를 초래한다^[6]. 이에 따라, 통신에 참여하는 단말의 개수 증가에 따른 네트워크의 성능을 정량적으로 평가하여 문제를 식별하고 해결할 수 있는 성능 측정의 중요성이 대두된다. 이를 위해 데이터 전송 속도, 신뢰성 및 전력 소비와 같은 성능 지표를 평가하고,

발생 가능한 문제를 미리 파악하여 대처할 필요가 있다. 따라서 이러한 성능평가는 네트워크의 성능 향상 및 안정성을 향상시키는 데 중요한 역할을 할 것이다.

기존 연구들은 LoRa의 정량적인 분석을 위해 실제 LoRa 단말의 성능을 실험을 통해 분석하는 대신, 시뮬레이터를 활용하여 이론적인 성능을 평가하는 방식을 택하였다^[7]. 또한, 전송 파라미터의 변경 또는 전송 거리^[8]에 따른 LoRa의 성능 변화를 평가하는 내용을 다루는 연구 등이 있었으나, 본 연구에서는 주로 사용되는 LoRa의 전송 파라미터를 사용하여 단말 개수의 증가에 따른 성능 분석에 초점을 두었다.

본 논문에서는 장거리 통신을 위해 설계된 LoRa 모듈이 서로 가까운 위치에서 다수의 모듈이 전송을 하는 즉, 밀집된 같은 네트워크 내에서 통신에 참여하는 단말의 개수 증가 즉, 네트워크 혼잡(Congestion)에 따른 통신 환경의 영향을 전송 Byte 별 처리량(Throughput), PDR(Packet Delivery Ratio), 전송지연(Latency) 측면에서 분석하기 위해 실제 LoRa 단말을 이용해 Tx, Rx를 각각 구현하고 실험을 진행하여 살펴 보기로 한다.

II. 본 론

LoRa 통신에서의 전송 Throughput, Latency, PDR(Packet Delivery Ratio)에 대한 실험을 수행하기 위해 동일한 네트워크 환경에서 송신기(Tx) 단말 개수에 따른 측정을 위한 실험 환경을 구성하였다. 단말기로는 Semtech사의 SX1272와 STMicroelectronics사의 NUCLEO-F446RE STM32 Nucleo-64 개발 보드를 결합한 개발 모듈을 사용하였으며, LoRaWAN 기능은 C++ 기반의 mbed SDK^[9]를 활용하여 구현하였다.

실험에는 그림 1에 나와있는 두 개의 LoRa 모듈이 사용되었다. 전원은 전원 선을 통해 공급되는 방식으로 구성되어 혼잡도가 중요한 실험에 적합하도록 설계되었다. Throughput 측정을 위해 최대 4개의 Tx와 1개의 수신기(Rx) 단말기를 사용하여 혼잡도를 다르게 부여

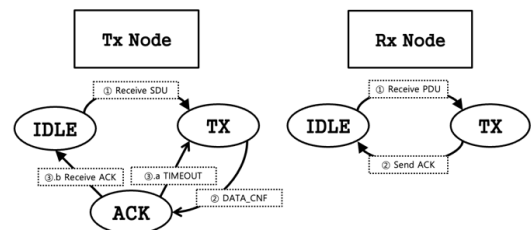


그림 1. Tx/Rx 상태 전이도
Fig. 1. Tx/Rx state transition diagram

하였고, 또한 Latency와 PDR 측정을 위해 4개의 Tx/Rx 쌍을 사용하였다.

실증 실험을 위해 그림 2에서는 Tx 및 Rx 노드의 동작 상태 전이를 시각적으로 나타내고 있다. 상태 전이는 대기 상태(IDLE), 전송 상태(TX), 그리고 ACK를 기다리는 상태(ACK) 총 3개의 상태로 이루어져 있다. 먼저, 대기 상태(IDLE)는 단말기가 데이터 전송을 기다리며 수신을 위해 준비되어 있는 상태로 주파수 대역을 모니터링하고 외부 데이터를 수집할 준비를 하는 상태를 의미한다. 다음으로, 전송 상태(TX)는 단말기가 데이터를 전송하는 상태로 미리 설정된 전송 파라미터를 사용하여 데이터를 패킷으로 변환하고, 패킷을 전송한다. 마지막으로, ACK를 기다리는 상태(ACK)는 전송된 데이터에 대한 확인 응답(ACK)을 기다리는 상태로 데이터의 성공적인 전송 여부를 확인한다.

Tx는 ① IDLE 상태에서 전송 데이터인 SDU가 생기면 ② TX상태로 전환하며 Rx에게 패킷 전송을 시도한 후 ACK 상태로 전환하여 Rx의 ACK를 기다린다. ③.a ACK 상태에서 정해진 delay가 도달했음에도 ACK가 도착하지 않으면 Tx는 재전송을 시도한다. ③.b ACK를 정상적으로 수신한다면 다시 초기 상태인 IDLE 상태로 전환한다. Rx는 ① IDLE 상태에서 Tx가 전송한 PDU를 수신하면 ② TX 상태로 전환하여 ACK를 Tx에게 전송하고 IDLE 상태로 다시 전환한다.

위 내용에 따라 mbed SDK에서 제공하는 기본적인 LoRaWAN 계층의 스케레톤 코드를 사용하여 각 실험별 Tx, Rx를 구현하였고, 기본 코드에서 제공하는 PHY/MAC 레이어의 변경 없이 응용 계층에서 대상 단말의 설정 및 패킷의 전송 시점 및 duration 조절을 통해 실험을 수행하였으며, 패킷의 전송 성공 유무, 측정된 Latency, 집계된 성능을 응용계층 레벨에서 측정하여 Serial 통신을 통해 PC에서 PuTTY 프로그램으로 접속하여 확인하였다.

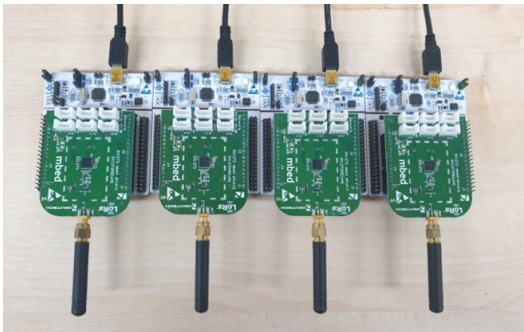


그림 2. LoRa 단말 모듈
Fig. 2. LoRa modules

2.1 Throughput 측정

Throughput은 IoT 단말기의 매우 중요한 성능 지표다. 따라서 본 논문에서는 네트워크에 참여하는 단말기의 증가에 따른 Throughput 변화를 직접 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 실험은 1개의 Rx와 Tx로 시작하여 최대 4개의 Tx가 동시에 통신에 참여하는 상황에서, 각 Tx의 전송 데이터 크기가 5~20 Byte로 변화하는 경우의 Throughput 변화를 측정하였다.

Rx가 보낸 wake-up 신호를 수신한 Tx는 랜덤한 지연시간을 가진 후, 할당된 지연시간과 데이터를 담은 패킷을 전송한다. Rx는 모든 Tx가 전송을 시작한 이후, 60초 동안 각 Tx로부터 받은 지연시간을 Tx ID별로 기록하여 전체 통신에서 소요된 지연시간과 전송에 소요된 시간의 합과 전송에 성공한 데이터 양을 구하여 Throughput을 계산한다. 이를 계산하는 수식은 (1)과 같다.

$$Throughput = \frac{C_s * Bytes}{60s - D_d - D_t} \quad (1)$$

전송에 성공한 패킷의 개수 C_s 와 Tx가 패킷에 포함된 Payload의 크기인 Bytes를 곱한 값에 전체 Throughput 측정 시간인 60s에서 전송 성공 전까지 사용된 경쟁시간 D_d 과 랜덤 전송 지연시간 D_t 를 뺀 값으로 나누어 구한다. 이때, D_t 는 LoRa의 Tx/Rx 전환 시간을 고려하여 100~500ms의 범위를 가지는 랜덤한 값으로 설정하였다.

2.2 Latency, PDR 측정

Latency와 PDR의 영향을 분석하기 위해 Tx/Rx 쌍의 증가에 따른 실험을 수행하였다. Throughput 측정과는 달리, Latency를 측정하기 위해 전송 지연시간과 ACK 상태 지연시간, 즉 두 가지의 랜덤 지연시간을 사용하였다. ACK 상태 지연시간은 ACK 도착 시간을 고려하기 위해 300~600ms의 범위를 가지는 값으로 설정하였다. Latency는 Tx에서 Rx로 패킷이 전송된 이후 ACK 패킷이 송신기로 반환될 때까지 소요된 평균 시간인 Average RTT(Round Trip Time)를 측정하였다. 또한, PDR은 각 Tx에서 계산되며, 수식 (2)를 기반으로 계산된다.

$$PDR = \frac{C_s}{C_s + C_f} \quad (2)$$

전송에 성공한 패킷의 개수 C_s 와 전송에 실패한 패킷

의 개수 C_r 의 합에서 C_s 가 차지하는 비율을 계산한다.

실험에서는 각 Tx가 1 Byte의 전송 데이터를 할당된 Rx로 전송하고 타이머를 활성화한다. ACK를 수신한 후 데이터 전송부터 ACK 수신까지 소요된 평균 RTT를 계산하고, 전송을 반복한다. 이때 ACK 상태 지연시간이 모두 소모되어 Timeout 이벤트가 발생하면, Tx는 재전송을 시도한다. 실험은 모든 Tx가 Rx로부터 100개의 ACK를 수신할 때까지 수행되었다.

III. 실험

실험에서는 Throughput, Latency 그리고 PDR을 측정하기 위해 Tx와 Rx 각각의 LoRa 단말기에 대한 통신 매개변수를 설정하였다. LoRa Spectrum 확산계수는 SF7로 설정되었으며, 전송 전력은 14dB, 대역폭은 125KHz로 설정하였고, 주파수 대역은 915MHz로 설정되었다. 실험에서 사용된 기타 세부 설정 변수들은 표 1과 동일하게 구성하였다. 모든 실험은 몇 번의 실험을 거쳐 평균값을 기반으로 성능이 측정되었다.

표 1. LoRa 전송 파라미터
Table 1. LoRa parameters

Parameter	Value
Nodes	2 ~ 8
Spreading Factors	SF7
Transmission Power	14dB
Coding Rate	4/5
Frequency Band	915 MHz
Uplink Channel Bandwidth	125 kHz
Preamble Length	8 symbols

3.1 Throughput 측정 결과

그림 3은 Tx 단말기의 증가와 전송 데이터 크기의 증가에 따른 Throughput 변화를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 앞서 2.1절에서 설명한 방법을 활용하여 실험하였고, 다양한 전송 데이터 크기와 LoRa 단말기의 개수에 대해 개별적으로 진행되었다. 실험 결과, 단일 Tx 대비 2개의 Tx가 동시에 전송을 시도할 때, 평균 처리량이 약 12% 감소함을 확인하였고, 4개의 Tx가 동시에 전송을 할 때는 평균 처리량이 약 68% 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 처리량 감소는 주로 충돌로 인한 현상으로 해석할 수 있다. 여러 개의 Tx 단말기가 동시에 전송을 시도하면, 데이터 패킷들이 물리적인 충돌을 일으키고 데이터의 손실 및 재전송을 초래하여 전체적인 처리량이 감소한다.

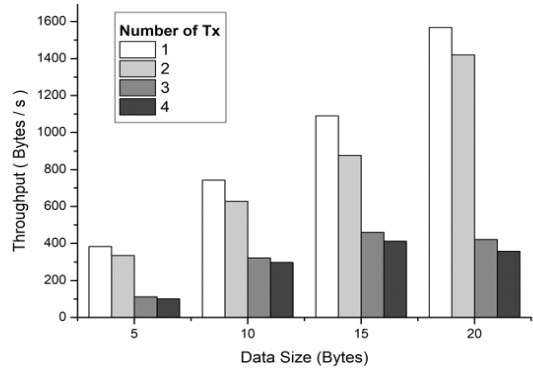


그림 3. 처리량 실험 결과
Fig 3. Throughput experiment result

전송 데이터의 크기 변화에 따른 영향도 확인할 수 있었다. Tx가 1개인 경우와 2개인 경우 데이터 크기와 Throughput의 증가폭이 비례적으로 증가하는 경향을 관찰할 수 있었으나, Tx가 3개와 4개인 경우 데이터가 증가함에 따른 Throughput의 증가폭이 감소하고 전송 데이터가 20Byte인 경우 잦은 충돌로 인하여 오히려 Throughput이 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 충돌로 인한 데이터 분산으로 인해 대역폭을 더 효율적으로 활용할 수 없기 때문으로 추론할 수 있다.

Throughput은 단말기의 증가와 함께 감소하는 경향을 보였고, 이는 네트워크 환경의 혼잡도가 증가함에 따라 데이터 처리량이 분산되고 통신의 효율성이 감소되는 결과로 해석할 수 있었다.

3.2 Latency 및 PDR 측정 결과

그림 4는 Tx와 Rx 쌍 개수의 증가에 따른 Latency와 PDR 변화를 보이고 있다. 실험은 2.2절에서 설명한 방법을 활용하였고, Tx, Rx 쌍 개수 별로 진행되었다. 실험

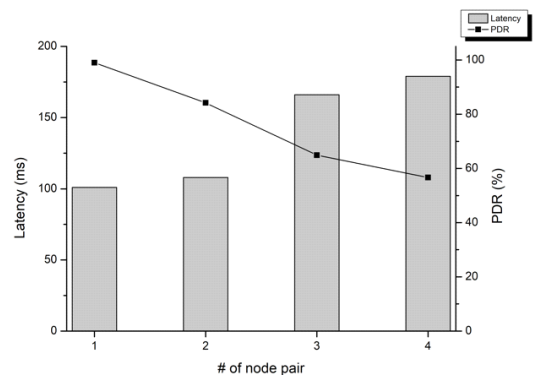


그림 4. Latency, PDR 실험결과
Fig. 4. Latency, PDR experiment result

험 결과, 단일 쌍 대비 2개의 쌍이 동시에 통신을 할 때는 평균 Latency는 7ms 증가, 평균 PDR은 15% 감소하는 것을 확인하였고 4개의 쌍이 동시에 통신을 할 때 평균 Latency는 78ms 증가하는 한편 평균 PDR이 42% 감소하는 것을 관찰하였다. 이는 Latency와 PDR 또한 통신에 참여하는 단말기의 수 증가에 따라 성능이 저하되는 것을 명확히 보여주고 있다.

IV. 결 론

현대의 통신 산업에서 IoT의 대중화로 인하여 혼잡도는 앞으로 급격하게 증가할 전망이다. 본 논문에서는 LoRa 단말기를 이용하여 통신에 참여하는 단말의 개수 증가에 따른 Throughput, Latency, PDR의 성능 변화를 실제 보드에 구현된 실험을 통해 정량적으로 보여주었다. 실험이 소규모로 진행되었음에도 불구하고 단말 개수와 전송 데이터 크기에 따른 성능 변화 추세를 의미 있는 값을 확인하였다.

실험 결과, 단말기 개수가 증가함에 따라 Throughput이 감소하는 경향을 별도의 시뮬레이터나 추가적인 기술없이 실제 실험을 통해 확인하였으며, 또한 전송 데이터 크기의 변화에 따라 성능 변화도 관찰되었다. 더불어, 단말기 개수의 증가가 Latency와 PDR에도 영향을 미치는 것을 확인하였다. 앞으로 단말 개수가 증가하는 상황에서도 성능을 유지할 수 있는 방안에 대한 후속 연구를 진행하고 고안된 방안을 실험적으로 검증해 볼 예정이다.

References

[1] V. Chang and C. Martin, "An industrial IoT sensor system for high-temperature measurement," *Comput. and Electr. Eng.*, vol. 95, Oct. 2021. (<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107439>)

[2] W. Rong, G. T. Vanan, and M. Phillips, "The internet of things (IoT) and transformation of the smart factory," *2016 IES*, pp. 399-402, Denpasar, Indonesia, Sep. 2016. (<https://doi.org/10.1109/ELECSYM.2016.7861039>)

[3] R. Krishnamurthi, "An overview of IoT sensor data processing, fusion, and analysis techniques," *Sensors*, vol. 20, Oct. 2020.

(<https://doi.org/10.3390/s20216076>)

[4] S. Devalal and A. Karthikeyan, "LoRa Technology - an overview," *2018 Second ICECA*, pp. 284-290, Coimbatore, India, Mar. 2018. (<https://doi.org/10.1109/ICECA.2018.8474715>)

[5] H. Jo, H. H. Choi, D. Kim, and J. Lee, "Design and implementation of smart farm wireless network : loRa and IEEE 802.11 wireless backhaul network," *J. KICS*, vol. 43, no. 5, pp. 850-862, May 2018. (<https://doi.org/10.7840/kics.2018.43.5.850>)

[6] W. Xiao, M. Kaneko, N. El Rachkidy, and A. Guitton, "Integrating LoRa collision decoding and MAC protocols for enabling IoT massive connectivity," *IEEE Internet of Things Mag.*, vol. 5, no. 3, pp. 166-173, Sep. 2022. (<https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2200055>)

[7] T. Polonelli, D. Brunelli, A. Marzocchi, and L. Benini, "Slotted ALOHA on LoRaWAN-design, analysis, and deployment," *Sensors*, vol. 19, no. 4, 838, Feb. 2019 (<https://doi.org/10.3390/s19040838>)

[8] P. Weber, D. Jäckle, D. Rahusen, and A. Sikora, "IPv6 over LoRaWAN," *2016 3rd IDAACS-SWS*, pp. 75-79, Offenburg, Germany, Sep. 2016. (<https://doi.org/10.1109/IDAACS-SWS.2016.7805790>)

[9] ARM, *mbed studio documentation(2009)*, Retrieved June, 20, 2023, from <https://os.mbed.com/docs/mbed-studio/current/introduction/index.html>

황 건 하 (Geon-ha Hwang)



2022년 2월 : 상명대학교 컴퓨터과학과 졸업
 2022년 9월~현재 : 상명대학교 컴퓨터과학과 석사과정
 <관심분야> 통신공학, IoT 네트워크, 인공지능
 [ORCID:0009-0009-2353-2759]

신 경 섭 (Kyung-seop Shin)



2011년 1월 : KAIST 전기 및
전자공학과 석사

2015년 1월 : KAIST 전기 및
전자공학과 박사

2015년 2월~2017년 8월 : KT
융합기술원 인프라연구소
5G TF 선임연구원

2017년 9월~2020년 3월 : 세명대학교 컴퓨터학부 조
교수

2020년 3월~현재 : 상명대학교 컴퓨터과학과 조교수
<관심분야> 이동통신, IoT 네트워크, 인공지능

[ORCID:0000-0002-3867-1921]