DBpia

논문 18-43-08-13 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '18-08 Vol.43 No.08
https://doi.org/10.7840/kics.2018.43.8.1337

실내 콘크리트 격실에서 위치에 따른 LoRa 성능 분석

임 준 영◆, 김 동 현*, 김 종 덕°

Performance Analysis of LoRa According to the Location in Indoor Concrete Compartment

Jun-yeong Lim◆, Dong-hyun Kim*, Jong-deok Kim°

요 약

LPWAN(Low Power Wide Area Network)은 사물인터넷을 위한 M2M(Machine to Machine) 네트워킹 기술로서, 소물인터넷에 최적화되어 있다. 이 기술은 소량의 데이터를 저전력, 장거리 통신 및 저비용을 목표로 하며, 대표적으로 LoRaWAN(Long Range Wide Area Network)이 있다. LoRaWAN은 현재 도심이나, 해양, 오지와 같은 실외 환경에서 M2M 서비스 구축에 이용되고 있으며, 물리 계층의 성능 연구도 LoS(Line of Sight)와 NLoS(Non Line of Sight) 환경을 구분하여 활발하게 진행되고 있다. 그러나 스마트 팩토리, 빌딩 같은 실내 서비스 수요가 증가함에도 불구하고 실내 통신 성능 연구는 미흡하다. 특히 실내에서 무선 통신의 안정성은 벽 또는 층의 재질, 수에 따라 다른 특성을 갖는다. 본 논문은 LoRaWAN의 물리 계층 기술인 LoRa의 성능 모니터링/ 분석 시스템을 구축하고 실내 환경에서의 실증적인 실험 기반의 통신 성능을 분석하고자 한다. 실험 환경은 주변에서 흔히 볼 수 있는 콘크리트 건물로 제한하고, 격실 재질에 따른 벽, 층의 수를 고려한다. 성능은 LoRa 인자와 실내 환경에 따른 Packet RSSI(Received Signal Strength Indication), PDR(Packet Delivery Ratio)로 평가 및 분석한다.

Key Words : LPWAN, M2M, Indoor Communication, LoRa, Performance, Monitoring & Analysis System

ABSTRACT

LPWAN(Low Power Wide Area Network) is an M2M(Machine to Machine) networking technology for the Internet of things, and it is optimized for the Internet of Small Things. It aims to transmit a small amount of data at low-power, long distance and low cost, and of a small amount of data, there is typically LoRaWAN(Long Range Wide Area Network). LoRaWAN is currently being used to build M2M services in outdoor environments such as urban areas, ocean, and remote areas. Also, the performance research of physical layer is actively performed by classifying LoS(Line of Sight) and NLoS(Non Line of Sight). However, despite the increasing demand for indoor services such as smart factories and buildings, research on indoor communication performance is insufficient. Especially, indoor wireless communication stability has different characteristics depending on the material and number of walls or layers. In this paper, we construct LoRa performance monitoring and analysis system, which is a physical layer technology of LoRaWAN, and we analyze communication performance based on empirical experiment in indoor environment. The experimental environment

※ 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.
◆ First Author : Pusan National University, Department of Electrical and Computer Engineering, wnsdud1249@mobile.re.kr, 학생회원
° Corresponding Author : Pusan National University, Department of Electrical and Computer Engineering, kimjd@pusan.ac.kr, 종신회원
* Pusan National University, Department of Electrical and Computer Engineering, dhkim1106@mobile.re.kr, 정회원
논문번호 : 201806-A-133-SE, Received May 20, 2018; Revised June 20, 2018; Accepted July 15, 2018

www.dbpia.co.kr

is limited to the concrete buildings commonly seen in the surrounding area, and the number of walls and floors according to the compartment materials is considered. This paper evaluates and analyzes the performance by LoRa factor, Packet RSSI(Received Signal Strength Indication) and PDR(Packet Delivery Ratio) according to the indoor environment.

Ⅰ. 서 론

LPWAN[1]은 사물인터넷을 위한 M2M 네트워킹 기술로서, 소물인터넷에 최적화되어 있으며 특징으로 장거리 통신, 낮은 단말 가격, 낮은 인프라 구축비용 그리고 다수의 단말기 접속을 목표로 한다. 소물인터넷은 사물인터넷의 하위 개념으로 소량의 데이터를 저전력으로 연결하는 기술이다. 그래서 단말은 기지국으로부터 수십 km 떨어진 도심, 해양 그리고 오지에서 소량의 정보를 수집하고 장기간 동안 데이터 전송이 가능하다.

LoRaWAN[2]은 LPWAN 기술 중의 하나로서 물리 통신 기술은 LoRa[3]를 사용한다. 이것은 단말, 게이트웨이, 네트워크 서버로 구성되며, 단말과 게이트웨이는 성형 구조 기반의 Aloha 프로토콜 방식을 따른다. 그리고 네트워크 서버는 단말과 게이트웨이의 인증 및 트래픽 관리를 수행한다. LoRa는 ISM(Industrial, Scientific and Medical) 대역의 1GHz 이하의 주파수 대역을 사용한다. 낮은 주파수는 직진성이 약해 속도는 느리나, 파장이 길어 외부 장애물에 유연하다. 또한 시퀀스 대역확산 및 첩 변조 방식을 사용하여 음영지역이나 다중경로에서 발생하는 음영손실 및 페이딩을 완화한다.

현재 LoRa는 도심이나 오지 같은 실외 환경에서 안정적인 M2M 서비스 제공을 위한 성능 연구가 활발하다. 특히 통신의 안정성을 위해 LoS, NLoS 환경을 구분하여 거리, 패킷의 길이에 따른 채널의 특성 연구[5-9]가 진행되고 있다. 그러나 스마트 팩토리, 빌딩 같은 실내 서비스 수요가 증가함에도 불구하고 실내 통신 성능 연구는 미흡하다. 실내에서 무선 통신 안정성은 주파수 및 변/복조 방식에 따라 다르고 실내 환경에서 장애물에 대한 전파의 반사, 산란, 회절의 특성도 다르다. 그러므로 실내 환경에서 장애물의 특성을 고려한 실증적인 실험 기반의 성능 연구가 필요하다.

그림 1. 부산대학교 콘크리트 건물
Fig. 1. Pusan National University Concrete Building

본 논문은 LoRa의 성능 모니터링/분석 시스템을 구축하고 실증적인 실험 기반의 실내 성능을 분석하고자 한다. 성능 모니터링/분석 시스템은 다중 단말의 스케줄링을 지원하고 사용자 실험 편의를 위한 플랫폼을 제공한다. 이것은 Linux C/C++ , R 언어 기반으로 동작하며 실험 설정 및 결과 정보는 JSON(Java Script Object Notation) 형태로 제공되어 다양한 그래프로 가시화된다. 실험 환경은 그림 1과 같이 주변에서 흔히 볼 수 있는 콘크리트 건물로 제한하고, 단말과 게이트웨이 사이의 격실 재질에 따른 벽, 층의 수를 고려한다. 성능은 LoRa 인자 및 실내 환경에 따른 Packet RSSI(Received Signal Strength Indication), PDR(Packet Delivery Ratio)을 평가 및 분석한다.

Ⅱ. 기존연구 사례

2.1 콘크리트 건물 복도의 LoRa 성능 시각화

"Indoor Signal Propagation LoRa Technology"는 콘크리트 건물에서 LoRa의 Packet RSSI를 측정하며 실험은 옥상과 지하에 게이트웨이를 설치하고 단말을 실내 복도의 일정 간격으로 층마다 설치하여 진행한다.[10] 이 연구는 측정 결과를 특정 임계치의 %비율로 구분하고 색상지도로 시각화한 것이 특징이다. 실험결과는 송신과 수신 사이의 거리나 층이 멀어질수록 패킷에 대한 신호 감쇄가 증가하는 이상적인 결과를 보였다. 그러나 무선통신은 거리뿐만 아니라 실내 장애물의 간섭영향도 크다. 특히 저자가 구성한 실내 LoS 환경인 단거리 복도의 신호 감쇄율은 거리뿐만 아니라, 특정 위치에 대한 구조 환경이나 주변 장애물에 따라 영향을 받는 것을 확인하였다. 그리고 거리가 증가되더라도 신호 감쇄율이 줄어드는 현상도 관찰하였다. 즉, 실내 건물의 단거리 환경에서는 다중경로 페이딩에 의한 신호 감쇄 영향도 존재하며, 실험 환경을 세부적으로 다룰 필요가 있다.

www.dbpia.co.kr

2.2 실내 경로 손실 모델과 실험 기반의 LoRa 성능 비교

"Empirical Propagation Performance Evaluation of LoRa for Indoor Environment"은 무선 통신의 실내 경로 손실 모델과 실험 기반의 LoRa 성능을 비교한 연구이다.[11] 실내 경로 손실 모델은 송신과 수신 사이의 거리와 환경에 따른 송신 신호 손실량을 이론적으로 모델링 한 것이며 실험 기반의 경험적 환경 상수 및 수식을 포함한다. 그러므로 기존의 실내 경로 손실 모델들과의 LoRa 성능 비교 연구는 분석의 관점에서 중요한 지표가 될 수 있다. 연구 결과로서, 기존의 실내 경로 손실 모델은 ITU, log-distance, Multi-Wall, ray tracing 모델이 사용되었다. 그리고 Multi-Wall, ray tracing 모델이 LoRa 성능과 가장 유사한 것으로 확인되었으며, 이것은 서비스 제공자가 LoRa의 효율적인 논리적 토폴로지를 구성하기 위한 중요한 지표가 될 수 있다. 그러나 실증적으로 연구결과를 활용하려면, 실험환경에 대한 세부적인 설명이 필요하다.

Ⅲ. LoRa(Long Range)

LoRa는 Long Range의 줄임말로서 장거리에 특화된 통신 기술이다. 또한, 송신과 수신 전력이 적고 칩셋이 저렴하여 사물인터넷을 위한 M2M 네트워킹에 많이 사용된다. 특히 통신 거리가 LOS에서 최대 21km이고 단말 배터리 수명이 장기간 유지되기 때문에 중간에 릴레이 노드나 증폭기가 필요 없다. 그래서 기존의 3G, 4G와 같은 셀룰러 네트워크나 Wi-Fi에 비해 인프라 구축비용이 적으며 높은 확장 가능성 및 비용 효율성을 가진다. 무선 칩셋으로는 주파수나 성능 및 목적에 따라 다양한 SX12xx 모델들이 존재한다. 이것은 Semtech사에서 생산되며, 사용 국가마다 주파수가 다르고 1GHz 이하의 주파수를 사용한다. 국내는 915MHz 대역의 주파수를 사용하는데 저 대역 특성상 직진성은 약하지만, 외부 장애물에 유리한 특성이 있다.

첩 대역확산은 LoRa의 변조 기술이며 1940년대 레이더 추적에 주로 사용되었다. 이것은 시간에 따라 주파수를 서서히 높이거나(증가 첩) 낮추어서 전송(감소 첩)하며 사용 주파수 대역을 확산시킨다. 특징은 다중경로와 음영지역 등에서 발생하는 산란, 반사, 굴절의 신호 왜곡 및 감쇄를 완화시키며 장거리 통신 및 저전력 통신을 가능하게 한다. LoRa의 첩 대역확산은 그림 2와 같이 증가 첩을 사용하며 전송 데이터는 심볼

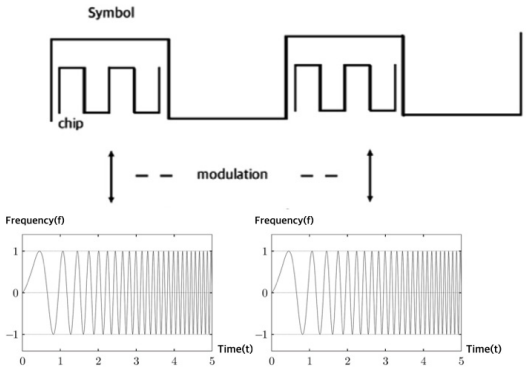

그림 2. 첩 대역확산(증가 첩)
Fig. 2. Chirp Spread Spectrum(Up Chirp)

당 단위 비트의 칩을 두어 첩 신호에 실어 보낸다.

LoRa 인자는 확산인자, 대역폭, 부호화율로 구성된다. 각 인자는 가변적으로 조절 가능하며 조절 값에 따라 전력 소모량, 전송속도 및 범위가 다르다. LoRa 인자에 따른 전송률은 식 1과 같다. 확산인자는 1개의 심볼로 구성된 칩의 개수로서 이것이 많을수록 최대 허용수신 감도 성능이 높아진다. 그 이유는 수신 데이터 심볼에 구성된 칩의 개수가 많을수록 신호의 왜곡 또는 손실로부터 강인하기 때문이다. 특히 수신 단은 수신 신호로부터 손실 또는 왜곡된 칩과 그 외에 칩의 비율을 판단하여 복조한다. 그러나 칩의 개수에 비례하여 전송 소요시간이 길어지기 때문에 전송속도 및 전력 소모량의 성능은 낮아진다. 그리고 다른 확산인자의 신호는 그림 3과 같이 주파수 변화 패턴이 다르기 때문에 직교성을 가진다. 대역폭은 초당 한 번에 전송할 수 있는 데이터의 크기를 의미한다. 즉, 대역폭이 클수록 전송속도가 증가하나 최대 허용수신 감도 성능은 떨어진다. 부호화율은 정보 비트와 전진 에러수정 비트 간의 비율로서 전진 에러수정 비트 비율이 높을수록 통신의 안정성은 보장된다. 그러나 전송 소요시간이 길어지고 전력 소모량이 많아지는 단점이 있다. 결론적으로, LoRa 인자들은 서로 간의 trade-off가

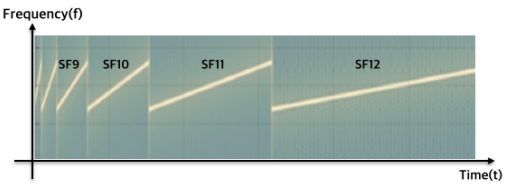

그림 3. 확산인자에 따른 주파수 변화율
Fig. 3. Rate of change of frequency with Spreading Factor

www.dbpia.co.kr

존재하기 때문에 성능의 초점에 따라 조절해야 한다.

$$\text{전송률} = \frac{\text{확산인자} \bullet \text{부호화율}}{2^{\text{확산인자}}/\text{대역폭}} \text{비트/초} \quad (1)$$

Ⅳ. 성능 모니터링 & 분석 시스템

4.1 성능 모니터링 시스템

4.1.1 하드웨어

LoRa 모듈은 Semtech 사의 SX1272 칩셋이 내장된 libelium사의 제품을 사용한다.[4] 칩셋의 사용 주파수 대역은 915MHz 대역으로서 2.16MHz 대역폭의 12개 채널로 구성된다. 송신 출력은 0, 7, 14dBm으로 조절 가능하며 최대허용수신감도는 LoRa 인자에 따라서 -114 ~ -137dBm이다. LoRa 인자는 확산인자 7~12, 대역폭은 125, 250, 500kHz 부호화율은 4/5~8로 구성된다.

성능 모니터링 시스템에 사용된 임베디드 보드는 Wi-Fi모듈이 내장된 라즈베리파이3 이다. 자체 내장된 Wi-Fi 모듈은 AP역할을 하며 사용자 제어 목적으로 SSH(Secure Shell)를 접근 용도로 사용한다. 그리고 LoRa 모듈과 보드 사이에 중간 실드가 부착되어 있으며 IP-TIME사의 802.11 b, g, n을 지원하는 Wi-Fi 모듈을 추가 설치했다. 라즈베리파이 자체 Wi-Fi 모듈은 사용자와 보드 간의 통신 목적이라면, 추가 Wi-Fi 모듈은 보드와 보드 간의 통신을 위함이다.

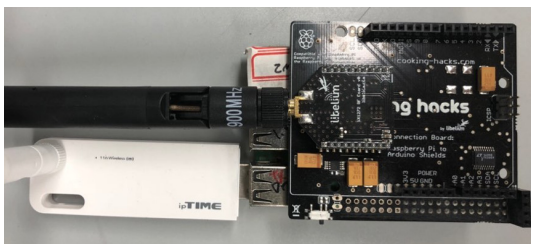

그림 4. LoRa, Wi-Fi 모듈 및 라즈베리파이
Fig. 4. LoRa, Wi-Fi Module and Raspberry Pi

4.1.2 시스템 설계

그림 5는 성능 모니터링 시스템의 구조이며 라즈베리파이3 기반의 컨트롤러와 게이트웨이 그리고 단말로 구성된다. 이것들은 사용자 접근과 장비 접근을 위한 Wi-Fi 모듈 및 실험 정보 설정을 위한 웹 서버가 공통적으로 존재한다. 컨트롤러는 NTP(Network Time Protocol)서버가 동작되며 Station으로 연결된 단말과 게이트웨이의 시간 동기화를 수행한다. 단말과

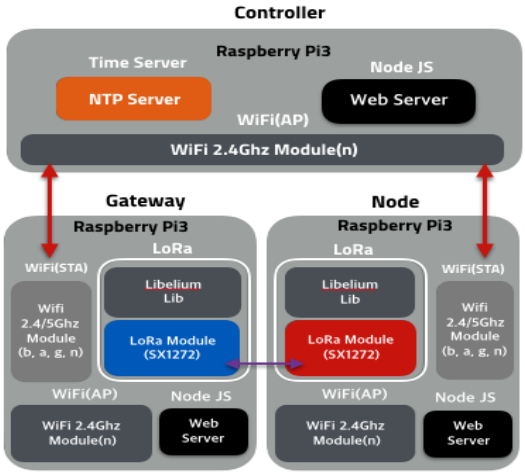

그림 5. 시스템 구조
Fig. 5. System Architecture

게이트웨이는 컨트롤러와 통신을 수행하는 별도의 Wi-Fi 모듈과 통신 실험을 위한 LoRa 모듈이 존재한다.

사용자는 컨트롤러의 웹 서버로부터 그림 6과 같이 실험 정보를 구성한다. 그리고 이것은 JSON으로 가공되어 컨트롤러부터 연결된 다중 단말과 게이트웨이에게 웹 소켓 통신으로 전송된다. 실험군은 실험 이름으로 구성되며 단말과 게이트웨이의 스케줄링 정보 및 LoRa 인자 정보로 나뉜다. 스케줄링 정보는 단말 간의 패킷 전송 간격, 전송 패킷의 수, 전송 슬롯의 길이, 송/수신 주소 및 순서가 있으며 LoRa 인자정보는 대역폭, 확산인자, 부호화율의 조합으로 구성된 모드와 전송 출력과 채널이 있다. 실험 정보를 수신받은 단말과 게이트웨이는 LoRa 실험 프로세스를 동작하고 실험 시작 시간이 되면 자동으로 실험을 진행한다. 실험 결과로는 JSON 파일 형태의 패킷 실험 이름, 송/수신 및 완료 시간, 송신 단말의 주소, 순차 번호, 수신 성능 정보가 있다.

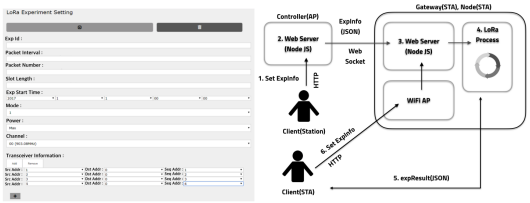

그림 6. 시스템 흐름도
Fig. 6. System Flow

4.1.3 단말 스케줄링

다수의 단말은 단일 게이트웨이에 전송할 때, 충돌

www.dbpia.co.kr

방지를 위한 시간 기반의 스케줄링이 필요하다. 단말은 사용자가 설정한 스케줄링 정보에 따라 동작되며 x번째 순서의 단말 전송시간은 식2와 같다. 그리고 사용자는 식 3을 고려하여 다음 실험군의 시작 시간을 정한다. 구현은 Linux C 기반의 Signal과 Timer를 이용 하였으며 단말은 평소에 잠들어 있다가 타이머 이내의 전송 시간이 될 때 시그널 호출을 받는다. 그 이후에 단말은 깨어나서 전송하고 다시 잠자기 상태로 유지한다.

4.2 R 기반의 성능 분석 시스템

그림 7은 R의 Shiny 패키지 기반의 성능 분석 시스템이다. R은 오픈 소스로 구현되며, 빅 데이터의 통계 분석과 시각화를 위한 언어이다. 이것은 무료이며, 객체지향기반의 언어로 사용자가 데이터를 가공하기 편리한 특징을 가진다. R의 패키지 중에 하나인 Shiny는 기존의 R을 확장하여 웹 애플리케이션을 만드는 기능을 제공한다. 그러므로 사용자 동작에 반응하는 동적인 환경을 제공하는 데 유용하다. 그리고 웹의 가장 큰 특징 중의 하나로서, 다수의 사용자는 인터넷만 연결되면 언제, 어디서나 웹 페이지를 통해 시스템을 이용할 수 있다.

분석 시스템은 성능 모니터링 시스템에서 추출한 JSON 형태의 실험 및 성능 정보 파일을 기반으로 가공 후 그래프, 표로 가시화한다. 특히, 실험 정보에 포함된 실험군에 따른 성능 정보는 사용자가 체크한 박스를 통해서 알 수 있다. 사용자는 원하는 실험군의 체크박스를 누르면, 가공된 성능 정보는 즉각적으로 선, 박스, 막대, 그리고 점 그래프 형태로 가시화되어 확인 가능하다. 성능 정보는 크게 수신 신호 세기, 패킷의 수신 신호 세기, 신호 대 잡음비, 수신 성공률이 있으며 평균, 표준편차, 사분위수, 백분율 등의 형태로 가공된다. 이것은 다중 단말에 대한 게이트웨이의 수신 성능을 직관적으로 평가할 수 있으며, 다양한 관점의 성능을 제공하는 플랫폼 역할을 한다.

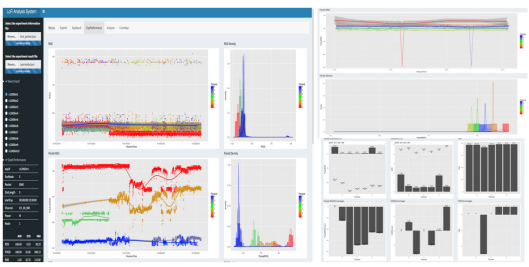

그림 7. 성능 분석 시스템
Fig. 7. Performance analysis system

V. 실험 시나리오

콘크리트 건물에서 환경적 요인과 LoRa 인자의 변화가 성능에 어떤 영향을 미치는지 평가하고 분석한다. 환경적 요인은 실내 층이나 벽의 유무, 재질, 벽의 수로 구성되며 LoRa 인자의 변화는 같은 환경에서 대역폭과 확인 인자의 증감이다. 실험환경은 분석의 목적에 맞게 구성하며 실증적 실험을 진행한다.

실험 환경은 콘크리트 건물의 실험1(지하1층 ~ 3층)과 실험2(4층)로 구성된다. 표1의 모드는 통신의 안정성과 속도에 따른 LoRa 인자 조합이다. 모드는 확산인자와 대역폭에 따라서 최대로 허용 가능한 수신감도와 전송속도가 다르다. 단말 게이트웨이는 전송출력 14dBm, 안테나 이득 4.5dBi, 중심 주파수 903.08MHz로 구성되며 실험1은 패킷 10000개와 모드 1을 기준으로 콘크리트 벽과 층의 수에 따른 성능 측정실험이다. 실험2는 실험1의 확장 실험으로서 3일간 진행되었으며 복도 실험을 비교군으로 벽의 수와 재질에 따른 성능측정 실험이다. 그리고 모드도 1~10까지 확장하여 대역폭과 확산인자의 증감에 대한 성능을 측정한다.

실험1은 건물의 가로 72.3m, 세로 35.4m, 높이 12m의 지하 1층 ~ 3층에서 진행된다. 그림 8은 콘크

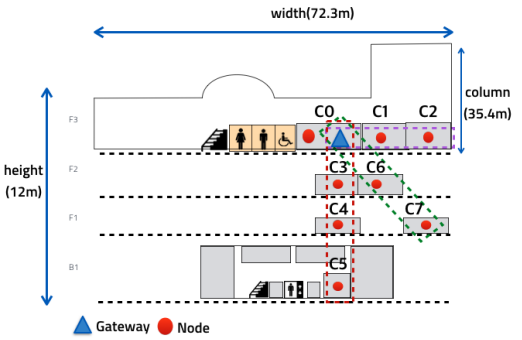

그림 8. 콘크리트 층, 벽의 수에 따른 실험
Fig. 8. Experiment according to number of Concrete Layer and Wall

$$\text{x번째의 단말 전송시간(s)} = (x-1) \cdot (\text{전송 슬롯의 길이} + \text{전송 간격}) + random(0, \text{전송 슬롯의 길이}) \quad (2)$$

$$\text{전체 단말의 x번 전송시간(s)} = x \cdot ((\text{전송 슬롯의 길이} + \text{전송 간격}) \cdot \text{패킷의개수} \cdot \text{단말의개수}) \quad (3)$$

www.dbpia.co.kr

표 1. 실험 인자 및 적용
Table 1. Experimental Factors and Application

Mode	Bandwidth (kHz)	Coding Rate	Spreading Factor	Sensitivity (dBm)	Transmission Time(ms) for a 100 byte packet Sent	Comment (ranges, data rate)	floor of Building
1	125	4/5	12	-134	4245	max, slow	B1~F3, F4
2	250	4/5	12	-131	2193	-	F4
3	125	4/5	10	-129	1206	-	
4	500	4/5	12	-128	1167	-	
5	250	4/5	10	-126	674	-	
6	500	4/5	11	-125.5	715	-	
7	250	4/5	9	-123	428	-	
8	500	4/5	9	-120	284	-	
9	500	4/5	8	-117	220	-	
10	500	4/5	7	-114	186	min, fast	

리트 격실 1개를 기준으로 같은 재질의 층과 벽의 개수에 따른 구성이다. 그리고 C0~C7은 격실의 번호를 의미하며 층과 벽의 유무에 따라서 수평, 수직, 대각선 실험으로 구성된다. 그리고 게이트웨이는 수신이고 단말은 송신 단의 역할을 하며 실험은 단말 1개를 기준으로 위치를 바꿔가면서 진행하였다.

실험2는 실험1의 수평 확장 실험으로 동일 건물 4층에서 진행되었다. 실험은 격실과 단말, 게이트웨이의 수를 늘리고 재질과 거리에 따른 구성이다. 격실의 요소는 콘크리트 벽, 철벽, 창문으로 구성된다. 그리고 실험은 그림 9와 같이 중앙 복도(H0)의 게이트웨이를 중심으로 서로 다른 시간대의 격실 실험(C1~C9)과 복도 실험(H1~H9)으로 나뉜다. 또한 실험1과 다르게 다수의 단말과 게이트웨이를 구성하여 시간 기반의 스케줄링 방식으로 진행된다.

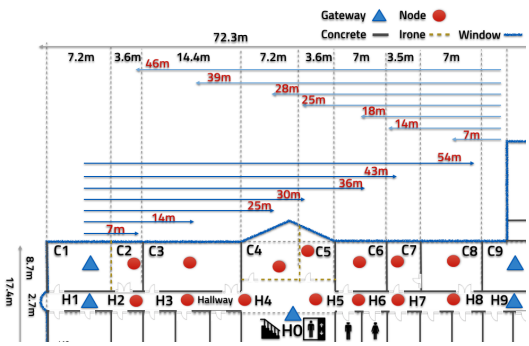

그림 9. 벽의 유무, 재질, 수에 따른 실험
Fig. 9. Experiment according to presence of Walls, Material, Number

Ⅵ. 실험 결과 & 성능 분석

6.1 실험1(지하 1층 ~ 3층)

표 2와 그림 10은 실험 1에 대한 LoRa 통신의 Packet RSSI와 PDR 성능 결과이다. 평균 Packet RSSI는 같은 격실의 단말, 게이트웨이를 기준으로 중간의 벽이나 층이 증가할수록 성능이 저하되며, 1개의 격실에서 순차번호에 따른 그래프들도 엄격하게 구분된다. 그리고 위치에 따른 성능은 벽, 층 증가에 따른 감쇄 정도가 다르며 대각선 < 수평 < 수직 차이를 보인다. 이것은 감쇄 정도가 벽과 층 이외의 실내 환경에 영향을 충분히 받으며, 전방향성 안테나 기반의 900MHz LoRa 신호 특성을 보여준다. 그리고 PDR은 Packet RSSI 성능과 무관하게 100%이다. 결과적으로 모드 1에서 LoRa 통신은 벽과 층의 수가 2개 또는 3개에서 안정적이다. 그러나 본 실험 환경의 실험군은 실내 건물에서 LoRa 성능을 파악하기에는 부족하다. 그러므로 실내 콘크리트에서 LoRa 성능을 파악하기 위해서는 단말과 게이트웨이 사이의 벽과 층의 수를 확장하고 벽 재질, 거리, 성능 인자에 대한 실험군 및

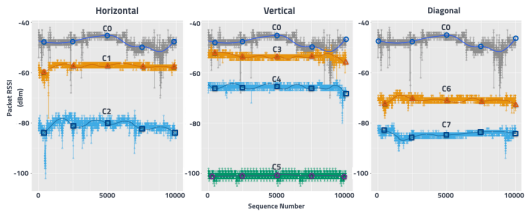

그림 10. 실험1의 Packet RSSI 그래프
Fig. 10. Packet RSSI graph of Experiment 1

www.dbpia.co.kr

표 2. 수평, 수직, 대각선 위치의 성능(Packet RSSI, PDR)
Table 2. Performance in Horizontal, Vertical, and Diagonal locations

Experiment Result		Packet RSSI		PDR(%)
		Average(dBm)	Standard Deviation(dB)	
default	C0	-47.96	2.36	100
Horizontal	C1	-57.44	1.17	
	C2	-80.73	2.1	
Vertical	C3	-53.42	0.85	
	C4	-65.57	0.96	
	C5	-100.77	0.9	
Diagonal	C6	-70.63	1	
	C7	-84.35	1.11	

성능 분석이 필요하다.

6.2 실험2(4층)

6.2.1 LoRa 인자에 따른 분석

그림 11은 복도 H0~H9의 위치에서 실험된 모드에 따른 평균 Packet RSSI 성능이다. 게이트웨이는 3대, 단말은 7대이며 환경 변화에 따른 성능 오차를 최소화하기 위해서 인적이 드문 22:30~07:30 시간에 진행하였다. 충돌 방지를 위한 단말 간의 전송 간격은 에어타임을 고려해서 5초로 하였다. 특히 H1~H9에 위치한 단말로부터 수신한 게이트웨이들의 Packet RSSI는 동일 모드에 대해서 전체 단말들의 평균 값을 이용하였다. 그 이유는 단말들의 위치가 다르더라도 동일 모드의 게이트웨이 Packet RSSI 그래프 증감 추세는 모두 동일하였기 때문이다. 그리고 아래 그래프와 같이 게이트웨이의 위치가 다르더라도 모드에 따른 Packet RSSI 증감 추세는 동일하다. 모드에 따른 송신 패킷 수는 단말 당 80개, 총 560개이다. 그리고 게이트웨이들의 수신 패킷 수는 560개이므로, PDR은 100%다. 게이트웨이는 위치에 따라서 3~4dB의 Packet RSSI 성능 차이가 나며 게이트웨이 1과 2번은 대칭 위치임에도 불구하고 H9에 위치한 2번 성능이 더 높다. 그러므로 기지국과 단말을 설치 할 때, 수신 방향에 대한 주변 환경을 고려해야 한다. 성능 인자에 따른 Packet RSSI 그래프를 살펴보면 성능의 초점이 반대인 모드 1과 10의 차이가 약 3~5dB차이가 난다. 그리고 그래프의 세로 선은 확산인자, 대역폭 고정 및 증가에 따른 모드에 대해서 점선, 긴 파선, 파선으로 분류되는데, 점선은 확산인자 고정, 대역폭의 증가 인자들이며 긴 파선은 대역폭 고정, 확산인자 감소로 이뤄진 인자들이다. 그리고 파선은 확산인자 고정 및 대역폭 증가, 대역폭 고정 및 확산인자 증가를 동시에 확인하기 위한 인자들이다. 3가지 선을 살펴보면 대역폭은 증가하고 확산인자는 감소할 때, Packet RSSI가 증가한다. 그러나 각 모드에 대한 최대허용수신감도가 다르며 이것에 대한 Packet RSSI의 상대적인 차이로 성능을 판단해야 한다.

6.2.2 벽의 유무, 재질에 따른 분석

표 3은 모드 1에서 단말과 게이트웨이 사이의 벽 유무에 대한 성능이다. 그리고 벽 존재 시, 재질(콘크리트, 철)에 따른 성능도 포함한다. 전송 패킷 수는 무벽 실험 80개와 격벽 실험 58개이며 모드에 따라 4dB의 편차가 존재한다. 실험 결과는 단말과 게이트웨이

표 3. 벽의 유무에 따른 성능(Packet RSSI, PDR)
Table 3. Performance with and without walls(Packet RSSI, PDR)

Mode	Wall material					
1	None(H0,H1)		Wall(C9,C8)		Iron(C1,C2)	
	Mean Packet RSSI(dBm)	PDR(%)	Mean Packet RSSI(dBm)	PDR(%)	Mean Packet RSSI(dBm)	PDR(%)
	-40.39	100	-46.8	100	-57.87	100

www.dbpia.co.kr

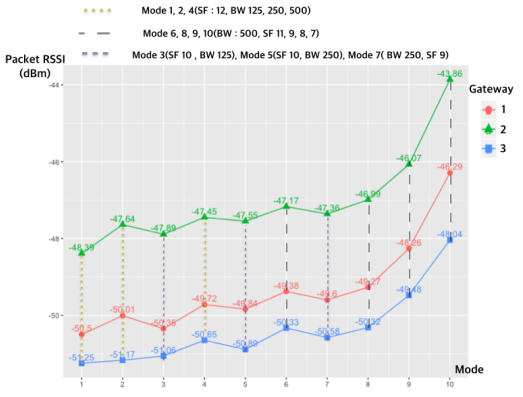

그림 11. LoRa 모드에 따른 평균 Packet RSSI 성능 (H2~H8)
Fig. 11. Average Packet RSSI Performance with LoRa Mode(H2~H8)

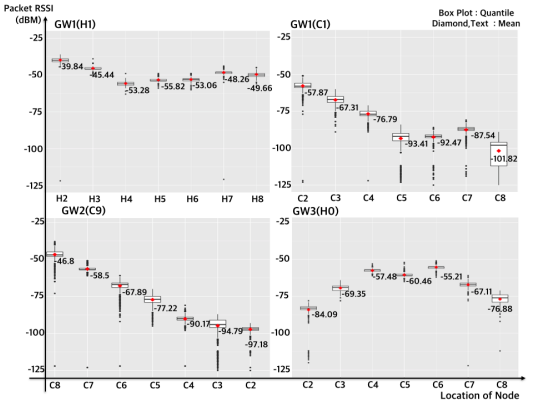

그림 12. 격실에 따른 평균 Packet RSSI 성능
Fig. 12. Average Packet RSSI Performance by Compartment

사이의 콘크리트와 철벽의 유무에 따라 약 5dB/17dB의 신호 감쇄를 일으킨다. 실험결과는 도체인 철벽이 콘크리트보다 반사가 잘 일어나고 투과율이 12dB 낮다는 것을 보여준다.

6.2.3 벽의 개수와 재질에 따른 분석

그림 12는 복도실험(H1, H2~H8)과 격실 실험 1(C1, C2~C8), 2(C9, C8~C2) 그리고 중앙 복도 기준의 격실 실험 3(H0, C2~C8)으로 구성되며 모드 전체의 평균 Packet RSSI의 성능 그래프다. 가로축은 게이트웨이에 대한 단말의 위치를 의미하며 세로축은 Packet RSSI이다. 격실 실험은 3일간 진행되었으며 단말 간의 전송 간격은 5초 패킷 수는 격실 실험 6960개와 복도실험 80개로 구성된다. 그리고 박스 그래프는 사분위수를 의미하고 텍스트와 다이아몬드 마크는 평균을 의미한다. 사분위수의 중앙값과 평균의 편차는 거의 동일한 것을 알 수 있다. Packet RSSI의 평균을 살펴보면 직선거리의 복도 실험과 격실 실험 1과 2는 약 7dB~50dB까지 차이가 난다. 이것은 벽의 존재 시 개수와 재질에 따른 차이를 의미한다.

복도실험의 Packet RSSI는 H1의 게이트웨이를 기준으로 전송 단말의 거리가 H2~H8로 증가할 때, 그래프 추세가 감소 후 증가한다. 거리 증가에 따른 감소는 H1과 동일한 환경의 H2~H4에서 나타나며 통로가 넓은 중앙 복도와 계단을 거치면서 거리에 따라 성능이 증가하는 추세다. 이것은 약 50m의 단거리에서 실험된 결과이며 Packet RSSI는 LOS가 보장되더라도 단거리에서는 다중경로의 영향이 크다는 것을 말한다.

격실 실험1과 2는 C1과 C9 위치의 대칭 게이트웨이를 기준으로 중간 격실의 C2~C8에서 단말이 존재한다. 그림 9를 보면 C1과 C2의 게이트웨이는 위치가 다르므로 전송 단말 신호의 통과 벽의 수, 재질과 거리가 다르다. 그러므로 그림 12의 GW1(C1)과 GW2(C9)는 벽의 개수가 동일하더라도 그래프 증가 추세가 다른 것을 볼 수 있다. 중앙복도 H0의 위치의 게이트웨이도 동일하므로 표 4.와 같이 송/수신 환경을 구분하여 분석할 필요가 있다.

표 4는 그림 12의 C1, C9, H0에 위치한 게이트웨이와 C2~C8의 단말 사이의 벽의 수, 재질, 거리를 나타낸다. 그리고 이것에 따른 모드 총합의 평균 Packet RSSI 및 PDR 성능을 보여준다. 표 4의 C와 I는 단말, 게이트웨이 사이의 철벽 및 콘크리트 벽의 수이며 D는 거리이다. 먼저 재질에 대한 벽 1개의 유무 성능은 모드 1 기준의 복도 실험과 비교하여 표3에 나타내었다. 다음은 벽의 수와 재질을 복합적으로 고려한 성능 분석을 다룬다. 이것은 철벽 수가 0, 1, 2일 때 콘크리트 벽 수의 증가에 따른 성능 분석이다. 그리고 같은 수, 재질의 벽을 기준으로 거리에 따른 성능 분석도 다룬다. 성능 분석 대상의 비교 실험군은 표4의 동일 색상으로 표시하였다.

A. 격실 실험 1의 C8~C5와 B. 격실 실험 1과 2의 C2~C4, C. 격실 실험 1의 C5~C8은 철벽 0, 1, 2개를 고정으로 콘크리트 벽의 수를 증가시킨 실험이다. Packet RSSI는 벽의 수가 1개씩 증가할 때 A는 약 1±10dB, B는 약 2±11dB, 1±3 편차로 감소한다. 그러나 C의 Packet RSSI는 A와 B가 다르게 C8 위치의 단말을 제외하고는 증가한다. 이것은 C의 성능 변화가 벽보다는 다중경로의 영향이 크다는 것을 의미한다. 그 이유는 C와 그림 9의 복도 실험(H1, H5~H8)

www.dbpia.co.kr

표 4. 벽의 수, 재질, 거리에 따른 성능(Packet RSSI, PDR)
Table 4. Performance by number of walls, material, distance(Packet RSSI, PDR)

Performance	Gateway														
Node	1) C1					2) C9					3) H0				
	C/I	D (m)	P.RSSI (dBM)	PDR (%)	PER (%)	C/I	D (m)	P.RSSI (dBM)	PDR (%)	PER (%)	C/I	D(m)	P.RSSI (dBM)	PDR (%)	PER (%)
C2	0/1	7	-57.87	95.12	4.88	6/1	46	-97.18	95.38	4.62	2/0	18	-84.09	88.18	11.82
C3	1/1	14	-67.31	97.84	2.16	5/1	39	-94.79	98.36	1.64	1/0	11	-69.35	93.79	6.21
C4	2/1	25	-76.79	98.31	1.69	4/1	28	-90.17	99.05	0.95	0/1	6	-57.48	94	6
C5	2/2	30	-93.41	98.62	1.38	4/0	25	-77.22	99	1	0/1	7	-60.46	93.83	6.17
C6	3/2	36	-92.47	98.44	1.56	3/0	18	-67.89	99	1	1/0	9	-55.21	93.79	6.21
C7	4/2	43	-87.54	98.66	1.34	2/0	14	-58.5	99.43	0.57	2/0	11	-67.11	94.48	5.52
C8	5/2	54	-101.82	92.19	7.81	1/0	7	-46.8	97.02	2.98	3/0	14	-76.88	91.98	8.02

은 동일한 구성이며 그래프 증감 추세가 유사하기 때문이다. 그리고 콘크리트 벽이 2개 일 때, 철벽의 0, 1, 2개에 따른 신호 감쇄는 약 1±17dB로서 6.2.1의 철벽 유무에 따른 신호 감쇄와 유사하다.

실험3은 같은 수, 재질의 벽을 기준으로 거리가 다른 실험군을 구성한다. 같은 색상의 실험군은 1m, 2m, 7m 차이가 난다. 본 실험 결과는 실험군의 거리가 멀수록 Packet RSSI가 낮으며 실험 1, 2, 3의 콘크리트 벽은 철벽보다 거리에 따른 신호 감쇄 편차가 크다.

격실의 전반적인 Packet RSSI는 실험3 > 실험2 > 실험 과 같으나, PDR은 실험2 > 실험1 > 실험3과 같다. 실험3은 상대적으로 실험1, 2보다 관통되는 벽의 수가 적으므로 수신 성공한 Packet RSSI의 성능은 높다. 그러나, 실험 3은 복도 환경이므로, 실험1, 2보다 건물의 구조나 시간에 따른 보행자의 수에 영향을 많이 받는다. 이것은 좀 더 복잡한 다중 경로, 페이딩을 초래하는 결과를 보이며, PDR과 직결된다. 또한 각 격실 실험1, 2, 3의 C8, C2와 같이 특정 Packet RSSI에서 급격하게 PER이 증가 된 것으로 확인되었다. 이것은 재질에 따른 벽의 수를 증가시킬 때, 특정 Packet RSSI의 임계치를 기준으로 PDR이 급격하게 감소하는 가능성을 보여준다.

Ⅶ. 결론 및 향후계획

본 논문은 실내 건물에서 환경 요인과 인자에 따른 LoRa의 물리적인 신호 성능을 평가하고 분석하였다. 환경요인은 층과 벽의 재질, 수, 거리로 정의하였으며 LoRa 인자는 대역폭, 확산인자, 부호화율로 구성하였다. 본 논문은 성능 평가 및 분석을 위해 다중 단말을 고려한 성능 모니터링 및 분석 시스템을 개발했으며 이것을 바탕으로 다양한 실험군을 분류하고 실증적인 실험을 진행하였다. 실험 1은 모드 1에서 단말과 게이트웨이 사이의 층, 벽이 수평, 수직, 대각선 위치의 실험으로 구성하였다. 그리고 실험2는 실험1의 수평 실험을 확장하여 복도 실험 바탕의 인자에 따른 성능과 콘크리트, 철 재질의 벽 증가, 거리에 따른 실험으로 구성하였다. 실험1과 2를 통해 환경 요인과 인자에 따른 경험적 감쇄 계수들을 나타내며 성능 분석을 진행하였다. 이것을 통해 저자가 구성한 실내 환경에서 LoRa가 사물인터넷 서비스를 수행하기에 충분하다는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 정제되지 않은 실험 환경으로 LoRa의 성능 결과에 대한 원인 설명이 미흡한 점이 있으나, 본 논문은 실내에서 LoRa 통신이 지니는 가능성을 보여주고 있다.

향후 연구로는 실험 데이터 기반의 LoRa 경로 손실 모델 연구이다. 이것은 LoRa 통신망 구축이나 논리적 토폴로지를 구성할 때, 최소의 게이트웨이로 통신의 안정성 보장을 기대할 수 있다. 그러나 본 실험 데이터는 1개 건물의 특정 위치에서 다루기 때문에 일반화하기 어렵다. 그러므로 환경 변수가 존재하는 건물이 아니라 밀폐된 콘크리트와 철, 창문 블록 실험을 구성하여 블록 기반의 경로 손실 모델 연구를 진행하고자 한다. 그리고 정제된 환경 속에서 각 재질에 대한 다중경로, 페이딩 효과를 분석하고 경로 손실 모델을 제안하고자 한다.

www.dbpia.co.kr

References

[1] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 19, no. 2, Jan. 2017.

[2] LoRa Aliance, *LoRaWAN Specification*(2016), Retrieved Apr. 04, 2018, from https://www.lora-alliance.org.

[3] SEMTECH, *An1200.22 LoRa Modulation Basic*(2015), Retrieved Apr., 05, 2018, from http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf.

[4] Libelium, *Waspmote LoRa 868MHz 915Mhz SX1272 Networking Guide*(2017), Retrieved Apr. 5, 2018, from http://www.libelium.com/development/waspmote/documentation/waspmote-lora-868mhz-915mhz-sx1272-networking-guide

[5] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, and T. Hanninen, "On the coverage of LPWANs: Range evaluation and channel attenuation model for lora technology," in *14th ITST Int. Conf.*, pp. 55-59, Copenhagen, Denmark, Dec. 2015.

[6] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, M. Pettissalo, J. Janhunen, and J. Iinatti, "Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 13, no. 3, pp. 1-16, Mar. 2017.

[7] K. Mikhaylov, J. Petajajarvi, and T. Hänninen, "Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology," *Eur. Wireless 2016*, pp. 119-124, Oulu, Finland, May 2016.

[8] J. Lim, J. Lee, D. Kim, and J. Kim, "Performance analysis of LoRa(Long Range) according to the distances in indoor and outdoor spaces," *J. KIISE*, vol. 44, no. 7, pp. 733-741, Jul. 2017.

[9] D. Yi and S. Kim, "Analysis of computer simulated and field experimental results of LoRa considering path loss under LoS and NLoS environment," *J. KICS*, vol. 42, no. 2, pp. 444-452, Feb. 2017.

[10] L. Gregora, L. Vojtech, and M. Neruda, "Indoor signal propagation of LoRa technology," in *17th Int. Conf. Mechatronics-Mechatronika*, pp. 1-4, Prague, Czech, Dec. 2016.

[11] S. Hosseinzadeh, H. Larijani, and K. Curis, "Empirical propagation performance evaluation of LoRa for indoor environment," in *INDIN*, pp. 26-31, Emden, Germany, Nov. 2017.

임 준 영 (Jun-yeong Lim)

2016년 : 부산대학교 정보컴퓨터공학부 졸업(학사)
2016년~현재 : 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 무선통신/네트워크, 사물인터넷, 머신러닝, 인공지능

김 동 현 (Dong-hyun Kim)

1998년 : 동의대학교 전자통신공학과 졸업(학사)
2004년 : 동의대학교 정보통신공학과 졸업(석사)
2013년 : 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 졸업(박사)
2018년~현재 : 부산대학교 Grand ICT 연구센터 연구교수
<관심분야> 무선통신/네트워크, 사물인터넷, 멀티미디어, 머신러닝, 인공지능

김 종 덕 (Jong-deok Kim)

1994년 : 서울대학교 계산통계학과 졸업(학사)
1996년 : 전산학과 졸업(석사)
2003년 : 컴퓨터공학과 졸업(박사)
2004년~현재 : 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 교수
<관심분야> 무선통신/네트워크, 사물인터넷, 멀티미디어, 머신러닝, 인공지능

www.dbpia.co.kr