

LoRa CSS 확산 인자의 준직교 특성을 고려한 수신응답의 다중 게이트웨이 조화 전송 기법

변승규*

Harmonic ACK Transmissions from Multiple Gateway considering the Quasi-Orthogonal Characteristic of LoRa CSS Spreading Factors

Seunggyu Byeon *

*Assistant Professor, Department of Artificial Intelligence, Silla University, Busan, 46958 Korea

요 약

본 논문에서는 LoRa 네트워크의 신뢰성과 처리율을 향상시킬 수 있는 다중 게이트웨이의 수신 응답 조화 전송 기법 HAT-LoRa를 제안한다. LoRa 네트워크는 알로하류의 매체 접근 제어를 사용하여 충돌에 매우 취약한데, 데이터 패킷은 여러 게이트웨이가 수신하여 전달률을 일정 부분 보장할 수 있지만 수신응답 패킷은 단일 게이트웨이를 통해서만 이루어진다. HAT-LoRa는 LoRaWAN의 여러 확산 인자로 동시에 패킷을 수신할 수 있는 특성을 이용하여 다중 게이트웨이가 다른 논리채널을 이용해 수신응답을 동시에 전송하여 증가된 수신 기회를 제공한다. 제안 기법은 단일 게이트웨이와 이중 게이트웨이 환경에서 수신 응답의 기대 전송 시간이 각각 최대 55%와 60%, 평균 35%와 40% 줄어드는 결과를 보인다. 특히, 단말과 여러 게이트웨이와의 거리가 비슷한 환경에서 높은 성능을 나타낸다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a novel MAC protocol based on the harmonic transmission of ACK, called HAT-LoRa, for improving the reliability and the utilization in multiple gateway LoRa Networks. LoRa is basically vulnerable to collision due to the primitive pure ALOHA-like MAC. Whereas data frame delivery can be guaranteed by the transparent bridge of multiple receiving gateways, ACK is still transmitted by a single gateway in LoRa Network. HAT-LoRa provides the augmented reception opportunity of ACK via the simultaneous transmissions of identical ACK in multiple spreading factors. The proposed method reduces the expected transmission times of ACK double gateway environment as well as single gateway environment, by 55 and 60% in maximum, by 35% and 40% in average, in a single- and double-gateway environment, respectively. Especially, it outperforms under the environment where the distance between end device and gateways are similar to each other.

키워드 : 사물인터넷, 저 전력 광역 네트워크, 로라/로라 광역 네트워크, 수신응답 제어

Keywords : Internet of Things, Low-power and Wide-area Networks, LoRa/LoRaWAN, Acknowledgement Control

Received 16 May 2022, Revised 19 May 2022, Accepted 5 June 2022

* Corresponding Author Seunggyu Byeon(E-mail: sg0919@sillain.ac.kr, Tel: +82-51-999-5529)
Assistant Professor, Department of Artificial Intelligence, Silla University, Busan, 46958 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.6.897>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

인터넷에 연결된 사물의 수가 증가함에 따라 사물인터넷 (IoT: Internet of Things) 네트워크의 신뢰성이 점차적으로 떨어지는 것이 큰 문제가 되고 있다. 현대의 사물인터넷의 유형은 크게 치명적 사물인터넷 (Critical IoT)과 대규모 사물인터넷 (Massive IoT)로 구분되는데 [1], 두 유형 모두에서 늘어나는 무선 장치의 수는 네트워크의 신뢰성을 저해하는 가장 큰 요인이 된다. 대규모 사물인터넷을 위한 장치는 제작과 설치에 적은 비용 (Low cost) 이 들면서도 오랜 기간 동작을 (Here to-stay) 요구하는데 [2], 더욱이 낮은 신뢰성의 통신 기술은 두 요구사항 모두에게 치명적인 요인이 된다.

저 전력 광역 네트워크 (LPWA: Low-Power and Wide-Area Networks)는 낮은 송신 전력 (TxPower)으로 먼 거리에 메시지를 전송할 수 있어 근 십년간 주목을 받아왔다. 시스코 사의 연간 보고 [3]와 Transforma Insights 사의 연구 [4]에 따르면, 저 전력 광역 네트워크 장치의 수는 2023년에는 약 20억 개, 2030년에는 40억 개에 이를 것으로 추정된다. 적은 에너지를 소모하지만 수~수십 km의 장거리에 강인 (Robustness in Long Range)하여 네트워크 구조를 단순화 할 수 있다. 즉, 단일 홉으로 게이트웨이에 도달할 수 있어 복잡한 매체 접근 제어를 필요로 하지 않는다. 또한, 장거리 특성으로 인해 Wi-Fi 또는 지그비와 같은 근거리 네트워크 (LAN: Local Area Networks)에 비해 상대적으로 적은 수의 게이트웨이를 필요로 하는 것이 큰 이유이다.

대표적인 저 전력 광역 네트워크 기술로 LoRa/LoRaWAN이 손꼽힌다. Sub-GHz의 ISM (Industrial, Scientific, and Medical) 대역의 주파수를 사용하여 전파사용에 비용이 들지 않으며, 초프 확산 스펙트럼 (CSS: Chirp Spread Spectrum)을 사용하여 간섭과 장거리 통신에 강인하다. 또한, 상호보완적 (Tradeoff) 특성을 갖는 다중 확산 인자를 지원한다. 즉, 확산 인자 (SF: Spreading Factor)가 클수록 장거리에 강인하고, 확산 인자가 작을수록 높은 데이터 율을 사용할 수 있게 한다. 뿐만 아니라 서로 다른 데이터 율 사이에는 서로 간섭하지 않아 일반적인 확산 인자 방식에 비해 주파수 재사용성 (Frequency Reusability)이 높다.

그럼에도 불구하고 LoRa/LoRaWAN은 해결해야 하는 도전 과제들이 상당수 남아있다. 대표적으로, 첫째,

데이터와 수신 응답 (ACK: Acknowledgement)을 제한 시간 내에 주고받아야 하지만 하나의 게이트웨이는 서로 다른 데이터 율의 메시지를 같은 시간에 전송할 수 없다. 둘째, 게이트웨이의 송신 시간 동안에 메시지를 수신할 수 없다 [5]. 셋째, 서로 다른 확산 인자 사이의 직교성은 불완전하여 서로 간섭한다 [6].

본 논문에서는 여러 게이트웨이가 서로 다른 데이터 율의 확산 인자를 선택하여 동시에 수신 응답을 전송하는 HAT-LoRa (HAT: Harmonic ACK Transmission)를 제안한다. HAT-LoRa의 기여는 다중 게이트웨이 환경에서 LoRaWAN의 패킷 구조를 해치지 않으면서 단일 단말에 다중 수신응답을 동시에 송신하는 모델에 제시함에 있다. 다중 게이트웨이가 단일 단말에 수신 응답을 동시에 전송할 때 수신 신호의 확률 분포에 기반을 두어 확산 인자 사이에 충돌을 일으키지 않으면서 수신 확률을 높이는 수학적 모델을 제시한다.

이후 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장에서는 LoRa를 소개한다. 제 3장에서는 문제와 관련 연구를, 제 4장에서는 HAT-LoRa의 문제 모델과 접근 방법에 관해 기술한다. 제 5장에서는 HAT-LoRa를 몇 가지 관점에서 평가하며, 제 6장에서는 결론을 기술한다.

II. LoRa/LoRaWAN 개요

2.1. LoRa 물리 계층

LoRa 물리 계층은 변복조 기술로 확산 스펙트럼을 사용하는데, 확산 인자 SF와 대역폭 (BW: BandWidth) BW를 주요 설정 인자로 사용하여 물리 계층의 동작을 결정한다. SF는 7에서 12의 값을 기본적으로 지원하며 BW는 125kHz, 250kHz, 500kHz의 세 가지 설정 값을 지원한다. CSS의 심벌은 2^{SF} 개의 칩으로 구성된다. 각 칩은 설정된 무선 주파수의 중심 주파수 f_c 를 기준으로 $f_c - BW/2$ 에서 $f_c + BW/2$ 까지의 영역을 2^{SF} 개로 분할하여 그 중 하나의 주파수 영역을 사용한다.

LoRa CSS의 시간에 따라 신호를 구성하는 주파수가 증가하는 선형 상승 초프를 사용하며 다음의 특성들을 갖는다. 그림 1는 LoRa CSS에서의 심벌의 예시들을 나타낸다. 그림 1(a)와 그림 1(b) 모두에서 원형, 사각형, 화살표형의 마커로부터 다음 마커 직전까지가 CSS 심벌을 나타낸다. 시작 칩의 위치가 다른 것은 이의 주파

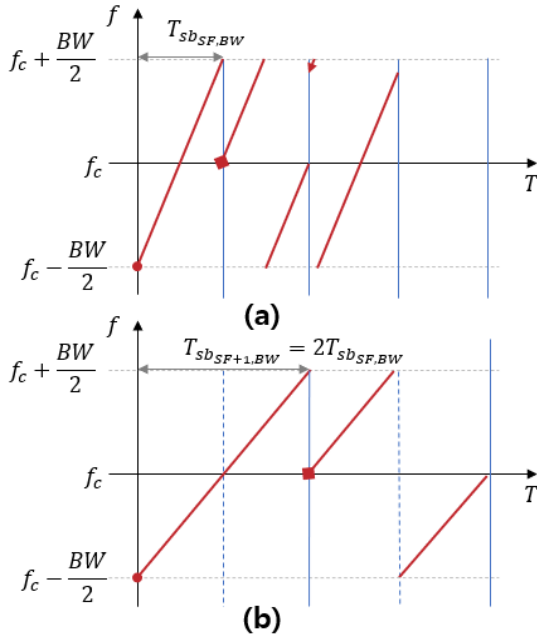


Fig. 1 LoRa CSS Symbols depending on configuration; (a) Spreading Factor 7 and (b) Spreading Factor 8

수에 따라 심벌의 페이로드가 결정되기 때문이다. 예를 들어, 그림 1(a)에서 원형 마커로부터 시작된 심벌은 가장 낮은 주파수를 시작 주소로 하므로 SF가 7이라고 하면 페이로드는 0x00000000이고 그림 1(b)에서의 SF는 8이 되어 페이로드는 0x00000000이 된다. 중심주파수로부터 시작되는 사각 마커의 심벌은 7비트 2진수 중 중간 숫자를 나타내므로 각각 0x10000000과 0x10000000을 페이로드로 한다.

심벌 전송 시간도 확산 인자 SF가 클수록 길어진다. 그림 1(a)에서 SF 7일 때 심벌 시간이 1이었다고 하면 그림 1(b)에서 SF 8이면 심벌 시간은 2가 된다. 즉, SF가 1 증가하면 전송 칩의 수는 2배로 증가한다. 즉, 대역폭이 같을 경우 확산 인자가 1 커질 때 심벌 전송에 걸리는 시간은 두 배로 증가한다. 대역폭은 초당 전송 칩의 수이다. 즉, 대역폭 BW가 두 배로 커지면 심벌을 전송하는데 걸리는 시간은 1/2이 된다. 이를 정리하면 SF와 BW에 따른 심벌의 비트율 br_{sb} 은 수식 (1)과 같이 정리할 수 있다.

$$br_{sb} = \frac{SF}{2^{SF}/BW} \text{ bps} \quad (1)$$

또한, 심벌들 사이에는 시간에 따른 주파수의 변화율이 다를 경우 동시에 변조될 수 있는데, BW가 1/2배가 되면 심벌 시간이 2배, SF가 1 늘어나면 심벌 시간이 2배가 되므로 간섭하는 두 심벌에 대해서는 수식 (2)에 의해 충돌 여부를 판단할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{are Collision}(SF_1, BW_1, SF_2, BW_2) \quad (2) \\ & = \begin{cases} \text{True, if } 2^{SF_2 - SF_1} = \frac{BW_2^2}{BW_1^2} \\ \text{False, otherwise} \end{cases} \end{aligned}$$

2.2. LoRa 망구조

LoRa 네트워크는 단말로부터의 메시지를 다수의 게이트웨이가 서버로 전달하는 중첩 성형 구조를 갖는다. 이 중첩 성형 구조에서 게이트웨이는 일반적인 Wi-Fi의 액세스 포인트 (AP)나 셀룰러의 기지국과 같이 단일 개체만이 서버로 전송할 권한을 갖는 것이 아니라, 다수가 같은 메시지를 수신하더라도 모두 중앙의 네트워크 서버로 전송한다. 이 때, 서버로 전달하는 패킷에 수신 신호 강도 (RSS: Received Signal Strength) 등의 정보를 첨부하여 수신 응답을 전송할 게이트웨이를 네트워크 서버가 결정할 수 있게 돕는다.

이와 같은 특성으로 인해 LoRa는 장거리 전송에 강인하다. 전송 범위가 넓기 때문에 출발지 (Source) 노드로부터의 메시지가 다수의 게이트웨이에 도달할 가능성이 높은 데에다, 이 중 하나가 다른 메시지와 충돌을 일으키더라도 다른 게이트웨이가 이 메시지를 들을 수 있어 공간 재사용성 (Spatial Reusability)이 높다.

2.3. LoRa 매체 접근 제어

LoRaWAN에서는 Class A, Class B, Class C의 세 가지 매체 접근 제어를 제공한다. Class A는 단말 주도의 양방향 통신, Class B는 네트워크 서버 주도의 양방향 통신, Class C는 단말, 네트워크 서버 모두 주도가 가능한 양방향 통신을 위한 것이다.

그림 2는 그 중 Class A와 Class B를 도식화한 것이다. Class A는 단말 주도의 양방향 통신으로 하나의 송신 (Tx) 슬롯과 두 개의 수신 (Rx) 슬롯을 갖는다. 전송 슬롯은 하나이지만 공간 재사용 기회가 많은데 비해 수신 슬롯은 하나의 슬롯으로는 하나의 기회만을 제공할 수 있기 때문이다. 이 이외의 시간은 유휴 (Dormant) 상

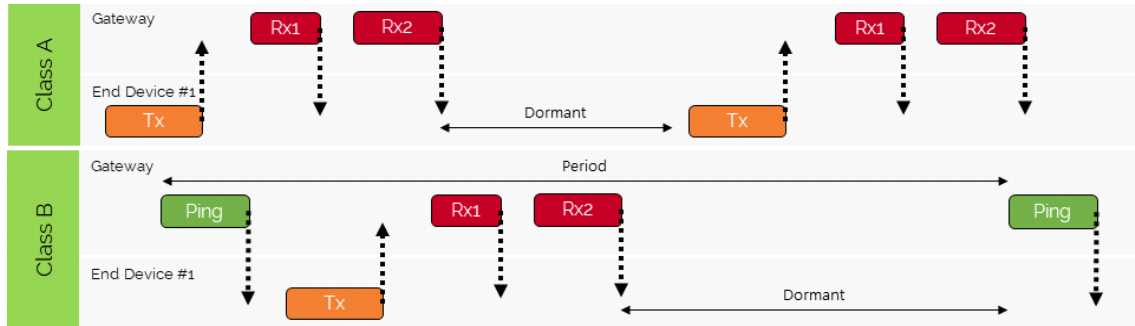


Fig. 2 Class-A and Class-B of LoRa MACs

태에 들어간다. Class B에서 게이트웨이는 주기적으로 Ping 메시지를 발송한다. Class B의 네트워크에 소속된 단말들은 Ping 메시지를 기준으로 게이트웨이가 지정한 시간에 깨어나 (Active) 송신 슬롯과 수신슬롯을 사용하게 된다. Class C는 단말과 네트워크가 원하는 임의의 시간에 송신할 수 있다. 나머지 시간은 모두 수신 슬롯으로 취급된다. 단, 전 이중 통신 (Full Duplex)을 지원하지는 않는다.

III. 문제와 관련 연구

3.1. LoRa 알로하 매체 접근 제어의 취약성

단일 게이트웨이 LoRa/LoRaWAN 환경에서 순수 알로하 기반의 임의 접근 (RA: Random Access)은 충돌에 매우 취약하다 [7, 8]. 네트워크의 모든 노드가 40 바이트 응용 계층 페이로드 패킷을 가장 안정성이 높은 설정인 SF12, BW125로 평균 10분에 1회 전송하면 패킷의 체공 시간 (ToA: Time-on-Air)은 2,1388.11ms로 2초가 넘는 시간을 소모한다. 그러나 순수 알로하의 처리율은 널리 알려진 바와 같이 18.39%이다. 이 두 가지를 조합하면 10초에 하나의 패킷만을 전달할 수 있다는 결론에 이른다. 결론적으로, 이 설정의 채널에서 수용할 수 있는 단말의 수는 고작 51개에 불과하다. 물론, 게이트웨이 하나 당 8개의 물리 채널을 허용하므로 약 400개의 노드를 수용할 수 있으나 해당 사물 네트워크의 대규모성을 주장하기에는 무리가 있는 수용량이다.

다중 게이트웨이 환경에서도 충돌에 관한 취약성은 동일하다 [7-12]. 두 개 이상의 게이트웨이가 투명한 브리지 (Transparent Bridge)를 형성하는 망 구조적 솔루션에서 게이트웨이 수의 증가에 따라 수용 노드의 수는 선

형 또는 지수적 증가가 아닌 대수적인 증가 추세를 보이며 이를 처리율로 환산하면 단일 게이트웨이 환경보다 오히려 떨어진다 [12]. [8]의 연구에서 주목해야 할 것은 데이터 패킷과 수신 응답 패킷의 송신 전력을 비대칭적으로 사용하는 환경에서도 수신 응답의 손실로 인한 자원의 낭비가 심각하다는 점이다.

3.2. 알로하를 배제한 채널 할당과 자원 할당

알로하 류의 한계를 채널 자원 할당으로 해결하는 연구들이 제안되었다. 대표적으로 EXPLoRa [13]는 알로하를 사용하면서 접근하는 확산 인자만을 서버가 할당하게 하여 처리율을 각 확산 인자에 공평하게 분배하도록 한다. 그럼에도 불구하고, 부하가 증가할수록 처리율이 떨어지는 알로하의 문제점이 극복되지는 않는다.

[14-16]의 연구는 확산 인자 사이의 불완전한 직교성 문제와 채널 할당 문제를 함께 고려한다. 이 연구들 또한 공통적으로 알로하류 매체 접근 제어의 한계를 명시하고 있다. 이에 더해 다른 확산 인자 사이의 간섭까지 고려하면 [7, 8]과 같은 LoRa의 성능에 관한 연구들이 완전한 직교성을 고려하고 도출했던 결과보다 더욱 처참한 결론을 내리지 않을 수 없다.

3.3. 수신 응답 전송의 효율화

최근에 들어서는 수신 응답을 집적하여 네트워크의 성능을 높이는 연구가 매우 활발하다. [17-19]의 연구는 단일 게이트웨이 환경에서 하나의 다운 링크 패킷에 두 개 단말로의 수신 응답을 집적하는 수신 응답 집적 (ACK Aggregation)을 제안한다. 이들은 공통적으로 확산 인자의 할당은 고려하지 않는다.

[20, 21]은 다중 게이트웨이 환경에서 군집 수신 응답 (GACK: Group Acknowledgement)의 기법을 제안한다.

이들은 확산 인자를 고려한 논리 채널 프레임 구조를 먼저 제시하고 단말과 게이트웨이 사이의 거리에 따라 게이트웨이가 확산인자가 결정되도록 한다. [20]에서는 업 링크와 다운 링크의 서브프레임 구분이 없어 이전 연구들에서 제시된 충돌 문제가 여전히 드러난다. 이 점에 착안하여 DG-LoRa [21]는 이에 관한 서브 프레임을 정의하고 시작 지점에 비콘 신호를 보내게 하여 상호 충돌을 방지한다.

IV. HAT-LoRa 모델과 접근 방법

HAT-LoRa는 다수의 게이트웨이로부터 단일 단말로의 군집 수신 응답을 정의한다. 수신응답의 조화 전송이란, 같은 단말로 전송된 여러 게이트웨이로부터의 수신응답이 다른 설정인자의 선택에 의해 충돌하지 않아 동시에 복조되는 것으로 정의한다. 이를 위해 만족해야 하는 조건은 아래와 같다.

4.1. 수신 응답과 간섭

물리 계층 프로토콜 데이터 유닛 (PPDU: Physical Layer Protocol Data Unit)을 구성하는 심벌의 수 n_{sb} 는 수식 (3)과 같다.

$$n_{sb} = n_{pr} + 4.25 + n_{sw} + \max\left(\text{ceil}\left(\frac{8pl - 4sf + 44}{sf}\right) \times \frac{1}{cr}, 0\right) \quad (3)$$

n_{pr} 은 프리앰블 수 심벌 수, 4.25는 프리앰블의 종료를 알리는 다운 처프의 수, n_{sw} 는 동기화를 위한 싱크 워드의 심벌 수, cr 은 전방 오류 정정 즉, CRC를 위한 부호화율이다. 여기서 심벌 하나 당 채공 시간은 확산 인자 SF 7, 대역폭 BW 500kHz의 $T_{7,500}=1.024\text{ms}$ 를 기준으로 수식 (4)의 관계가 성립한다.

$$T_{sb} = 2^{sf-7} \frac{500}{bw} \times 1.024 \text{ ms} \quad (4)$$

또한, 수신응답은 최소 13bytes의 페이로드를 갖는데, 수식 (3)과 (4)를 기준으로 수신 응답의 채공 시간을 계산하면 표 1과 같이 정리할 수 있다. 이들 역시 대역폭이 2배로 늘어날 때 또는 확산 인자가 1 줄어들 때 패킷의 시간도 거의 1/2씩 감소된다.

Table. 1 Packet-ToA of the ACK depending on setting

SF \ BW	500 kHz	250 kHz	125 kHz
7	46.34 ms	23.17 ms	11.58 ms
8	82.43 ms	41.22 ms	20.61 ms
9	164.86 ms	82.43 ms	41.22 ms
10	288.77 ms	144.38 ms	72.19 ms
11	577.54 ms	288.77 ms	144.38 ms
12	1,155.07 ms	577.54 ms	288.77 ms

LoRa의 데이터 율은 실제로는 서로 간섭하며 [14-16], 표 2와 같이 정리할 수 있다. 표에서 열은 간섭 신호의 SF, 행은 기준 신호를 나타낸다. 예를 들어, 기준 신호가 (500, 7)의 설정을 사용할 때, (250, 7)의 설정을 사용하는 신호의 세기가 11 dB 이상 강하면 영향을 받는다. 또한, (500, 9)의 설정을 사용할 때 설정 (250, 7)의 신호 세기가 6 dB 이상 강하면 간섭을 받으므로 충돌을 일으킨다. 따라서 다수의 수신응답이 동시에 수신되기 위해서는 수식 (5)를 만족해야 한다.

$$\bigwedge_{i,j \in S} -IS_{j,i} > P_{rx_i} - P_{rx_j} > IS_{i,j} \quad (5)$$

수식에서 $IS_{A,B}$ 는 표 2의 간섭 민감도, P_{rx} 는 임의의 게이트웨이로부터 단말이 수신한 신호의 세기를 의미한다. 음영 표시된 셀은 심벌 주파수 변화율이 같아 간섭을 일으키는 설정 인자를 의미한다. 뿐만 아니라, 수신된 신호는 설정 인자의 수신 민감도 (RxSens: Receiver Sensitivity)를 만족해야 하므로 수식 (6)을 만족해야 수신 가능하다.

$$P_{rx_r} > S_{sf_r,bw_r} \bigwedge_{i \in S} -IS_{i,r} > P_{rx_r} - P_{rx_i} > IS_{r,i} \quad (6)$$

$S_{sf,bw}$ 는 확산인자를 sf , 대역폭을 bw 로 설정할 때의 수신 민감도를, r 은 기준 신호, i 는 간섭 신호를 나타낸다.

Table. 2 Interference Sensitivity between SFs [dB]

SF	7	8	9	10	11	12
7	0	-11	-12	-13	-14	-14
8	-13	0	-13	-15	-16	-17
9	-16	-16	0	-16	-18	-19
10	-19	-19	-19	0	-19	-21
11	-21	-21	-21	-22	0	-22
12	-24	-24	-24	-24	-25	0

4.2. 수신 응답의 최소시간 전송

단일 게이트웨이가 단일 단말에게 메시지를 전송할 때 전달 확률을 높이는 가장 간단한 방법은 송신 전력의 강도를 높이는 것이다. LoRa/ LoRaWAN의 지역 설정 파라미터 [22]에 따르면, 한국 KR920 정의에는 게이트웨이의 최대 실효 등방 방사 전력 (EIRP: Effective Isotropically Radiated Power) 값을 23 dBm으로 단말의 10-13 dBm 에 비해 크게 정의하고 있다. 그러면 최저 수신 민감도와 수신 전력 세기 (RxPower: Received Power)의 차 (Margin)가 많이 확보되어 Tx에 슬롯에 사용한 것보다 덜 민감한 설정 인자를 사용해도 높은 전달률을 사용할 수 있다. 그럼에도 불구하고 매체 접근 제어의 설정은 TX와 RX1에서 같은 설정 인자만을 허용한다. HAT-LoRa에서는 장거리 통신에 적합하지 않은 것으로 알려진 대역폭 500 kHz를 제외하고 수식 (7)을 만족하는 설정 인자를 허용한다.

$$isAllowable(sf,bw) = \begin{cases} True, & \Pr(P_{rx} \geq RxSens_{sf,bw}) \geq \rho \\ False, & Otherwise \end{cases} \quad (7)$$

P_{rx} 는 수신 신호 강도를 나타내며, ρ 는 기준 수신신호 세기로 본 모델에서는 0.95를 사용한다.

전달 확률을 높이는 두 번째 방법은 동일 메시지를 수차례 전송하는 것이다. 메시지의 전달률이 평균 p 일 때 메시지가 하나라도 전달되면 되므로 n 회 전송 시의 전달률은 $q=1-(1-p)^n$ 로 정의된다. 또한, 기준 전달률을 ρ 를 만족하는 전송 횟수 n 은 수식 (8)과 같다.

$$n_{sf,bw} = ceil\left(\frac{\log 1 - \rho}{\log 1 - p_{sf,bw}}\right) \quad (8)$$

n 과 p 는 확산인자와 대역폭에 관한 함수로 $n_{sf,bw}$ 과 $p_{sf,bw}$ 는 각각 확산인자 sf 와 대역폭 bw 를 사용할 때의 평균 전달 횟수와 전달률을 나타낸다. 이를 단일 게이트웨이에 관해 최적화 모델을 수식 (9)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} minimize \quad & T_{ACK} = \sum_{i \in CFG} n_{cf_{g_i}} T_{SF_i} \\ subject \quad & to \quad n_{cf_{g_i}} \geq 0, \\ & 1 - \prod_{i \in CFG} (1 - p_{cf_{g_i}})^{n_{set_i}} > \rho \end{aligned} \quad (9)$$

CFG는 단말과 게이트웨이가 사용한 설정 인자이다. 단말에서 게이트웨이의 신호에 대한 평균 수신 강도가 -130 dBm, 표준 편차는 [7]에서의 경로 손실 모델에

따라 3.57이라고 가정하자. 단일 설정 인자를 사용할 경우, 아래와 같이 최적 수신 응답 시간 T_{ack} 을 구할 수 있다. 수식 (7)과 (8)에 따라 p 와 n 을 구하고, n 과 표 1의 단일 수신 응답 전송시간을 각각 곱하면 T_{ack} 는 표 3과 같이 정리할 수 있다. 표 3의 예시에서 최적의 전송시간을 나타내는 것은 확산인자 10이며, T_{ack} 는 216.57ms이다.

Table. 3 Total ACK ToA depending on SF - Example

SF	7	8	9	10	11	12
RxSens (dBm)	-124	-127	-130	-133	-135	-137
$p(\%)$	2.94	14.69	41.70	73.59	88.31	96.00
n	101	19	6	3	2	1
T_{ack} (ms)	1,169.58	391.51	247.32	216.57	288.77	288.77

4.3. 수신 응답의 조화 전송

둘 이상의 게이트웨이가 단일 단말에게 메시지를 전송할 때에는 수신 응답의 동시 전달을 위해 송신 전력의 강도를 조절하는 것이 필요하다. 수식 (9)와 표 2를 조합하면 수식 (11)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} minimize \quad & T_{HAT} = \max\{T_{ACK_i}\} \text{ for } i \in GW \\ subject \quad & to \quad T_{ACK_i} = \sum_{i \in CFG} n_{cf_{g_i}} T_{SF_i} \\ & 1 - \prod_{i \in CFG} (1 - p'_{cf_{g_i}})^{n_{set_i}} > \rho \\ & p'_{cf_{g_i}} = \Pr\left(\begin{array}{l} P_{rx_i} \geq RxSens_{cf_{g_i}} \\ \bigwedge_{j \in S}^{i \neq j} P_{rx_i} - P_{rx_j} \geq IS_{i,j} \end{array} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

해당 문제는 최대극소화 (minimax) 문제로 본 연구에서는 유전 알고리즘을 이용하여 최적 해를 찾는다.

V. 성능 평가

5.1. 실험 환경과 성능 척도

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 HAT-LoRa의 성능을 평가한다. 6km×6km의 실험 환경 내에 단말을 (0, 0)의 위치에서부터 (600, 600)까지 10m 단위로 위치를 이동시키며 성능을 측정한다. 게이트웨이는 1개와 2개의 경우 각각 (300, 300)에, (200, 300)과 (400, 300)에 배치한다.

제안 기법을 수신 응답의 기대 전송 시간(ETT: Expected Transmission Time)을 게이트웨이의 수, 단말의 위치에 따라 분석한다. 비교 대상은 LoRaWAN의 기본 설정을 거리에 따라 수차례 전송하게 한 것 (Multiple ACK)으로 단말과 게이트웨이 사이의 거리에 따라 단말이 사용하는 설정 인자와 게이트웨이가 결정되는 방식이다. 기준 전달률 ρ 는 0.95로 설정하고 전달률을 만족하기 위해 수차례 전송한다.

5.2. 단일 게이트웨이 환경의 기대 전송 시간

그림 3과 4는 단일 게이트웨이 환경에서의 게이트웨이와 단말 사이의 거리에 따른 기대 전송 시간과 이에 따른 확산 인자의 선택 결과를 나타낸다. LoRaWAN의 Multiple ACK의 경우 0m에서 2.1km 지점까지는, 수신 응답이 대부분 단일 전송으로도 전달되기 때문에 전송 시간이 표 1의 125 kHz 열에 따라 늘어난다. 2.1km 지점부터는 확산 인자 12를 사용하여 거리에 따라 2회, 2.9km 지점부터는 3회, 3.5km 지점부터는 4회, 3.9km 지점부터는 5회, 4.2km 지점부터는 6회로 계단 함수와 같이 전송해야 한다.

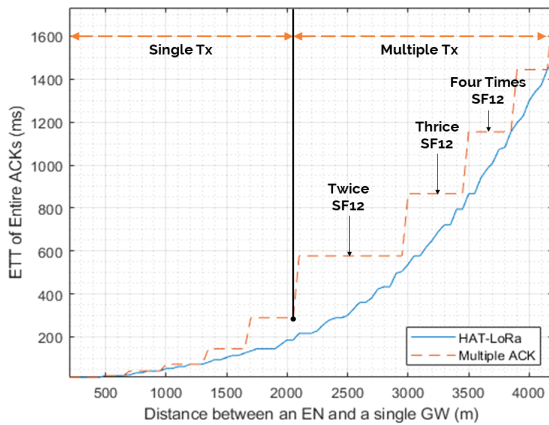


Fig. 3 Expected Transmission Time of ACK in Single-Gateway Environment

이에 반해 제안 기법은 전송 횟수가 복잡하게 결정된다. 그림 4는 거리에 따른 수신 응답의 확산 인자 선택과 전송 횟수를 나타낸다. 예를 들어 2km 지점의 단말로 수신응답을 전송한다면 SF9로 1회, SF10으로 2회 전송한다. 그림 4와 같이 수신 응답을 하나의 확산 인자에만 의지하지 않고 여러 확산 인자를 통해 분배하여 전송 시간을 줄인다. 따라서 제안 기법은 거리에 따라 기대 전송 시간이 지속적으로 증가한다.

게이트웨이가 수신 응답의 송신에 점유되는 시간을 줄여 수신에 이용할 수 있게 한다. 또한, LoRa 물리 계층은 복조 기술의 한계로 인해 장치가 선택한 확산 인자 설정보다 주파수 변화율이 높은 심벌은 복조할 수 없다. 제안 기법은 이 점을 위배하지 않는다. 0m에서 450m 지점까지는 7 이하의 확산 인자를, 1k0m 지점까지는 8 이하의 확산 인자를, 1.15km 지점까지는 9 이하의 확산 인자를, 1.15km 지점까지는 10 이하의 확산 인자를 선택한다. 따라서 수신될 수 있는 확산 인자만을 전송 후보로 한다. 따라서 평균 35%, 최대 55% 기대 전송 시간을 줄인다.

5.3. 다중 게이트웨이 환경의 기대 전송 시간

그림 5와 6은 게이트웨이 2개의 환경에서 시뮬레이션 공간 내 단말의 위치에 따른 기대 전송 시간을 등고선 그래프로 나타낸다. 두 그림에서 삼각형은 게이트웨이를 의미하며 시뮬레이션 공간 내의 어디라도 단말이 위치할 수 있다. 즉, 중심이 되는 두 게이트웨이에서 공간 내의 아무 점 P(x, y)까지 거리를 재면 그림 3을 기준으로 수신 응답의 기대 전송 시간을 계산할 수 있다.

LoRaWAN의 Multiple ACK는 단말에서 가장 가까운 게이트웨이가 수신 응답을 전송한다. HAT-LoRa는 두 가지 유형의 수신 응답 전송 방법을 사용할 수 있다. 첫 번째는 단일 게이트웨이 환경에서처럼 가까운 게이트웨이가 시간 자원을 독점하여 수신 응답을 여러 차례 전송하는 것이고, 두 번째는 서로 다른 확산 인자를 사용하여 수신 응답을 동시시간대에 전송한다.

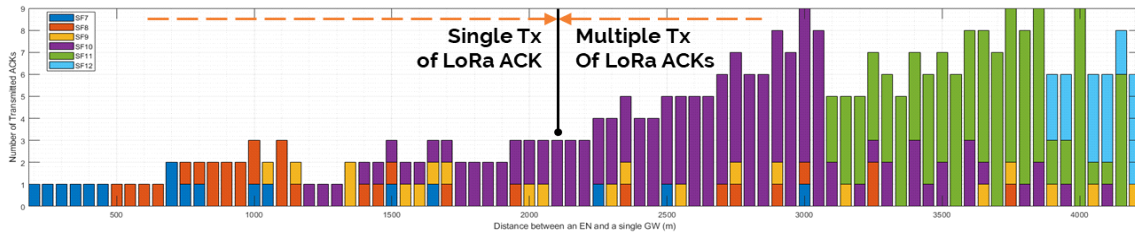


Fig. 4 Number of Selected SFs by Distance in a Single-Gateway Environment

그림 5는 두 게이트웨이 중 하나가 자원을 독점하여 다중 수신 응답을 연속적으로 전송하는 정책에 대한 결과를 나타낸다. 이 등고선 그래프는 $x=3\text{km}$ 을 중심으로 좌우 대칭되는 형태이며 좌우 각각이 그림 3을 등고선 그래프로 나타낸 것과 같다. 예를 들어, 좌표 (100, 300) 과 (0, 300)은 가장 가까운 게이트웨이로부터의 거리가 각각 1km, 2km에 해당하며 이에 따른 기대 전송 시간은 약 70ms와 약 170ms에 해당한다. 따라서 해당 지점에서의 기대 수신 응답 시간은 70ms가 된다.

이 방법의 장점은 게이트웨이의 전송에 소모되는 시간을 나머지 확산 인자를 통해 다른 단말로의 수신 응답을 전송할 수 있게 하는 것이다. 또한, 하나의 게이트웨이가 이미 다른 메시지를 수신하고 있거나 다른 단말에게 수신 응답을 전송하고 있을 때, 최적의 게이트웨이가 아니라도 주어진 게이트웨이에서 최선의 결과를 낼 수 있도록 한다는 것이다.

그림 6은 두 게이트웨이가 다른 확산 인자를 통해 수신 응답을 동시에 전달할 때 수신 응답의 기대 전송 시간을 나타낸다. 이 등고선 그래프는 $x=3\text{km}$ 을 중심으로 좌우 대칭되는 형태이며 그림 5와 흡사하다. 그러나 두 게이트웨이로부터의 거리가 비슷한 지점들에서는 등고선이 진하게 나타난다. 이것이 의미하는 바는 적은 시간으로 수신 응답의 전달률을 보장할 수 있는 범위가 게이트웨이 사이의 중간 영역으로 확대된다는 것이다. 수신 응답의 기대 전송시간의 절감 폭을 측정하면 단일 게이트웨이 환경에 비해 평균 40%, 최대 60%로 나타난다. 절감 폭이 최대가 되는 지점은 게이트웨이로부터 등 거리에 있는 $x=3\text{km}$ 의 상수 그래프 위와 주변이다.

본 방법은 단말과 두 게이트웨이 사이의 거리가 비슷할 때 기대 전송 시간을 줄인다. 만약 단말로부터 거리가 가까운 게이트웨이가 사용할 수 있는 최대 크기의 확산 인자를 선택해야 하는 상황에 있을 경우 먼 거리에 있는 게이트웨이는 LoRaWAN의 정책에 의해 선택할 수 있는 확산 인자가 없어지기 때문에 해당 조건에서는 그림 5와 흡사한 모양을 나타낸다. 대부분이 비슷한 결과를 나타내지만 두 게이트웨이로부터의 거리가 비슷한 영역 즉, 단말의 x 축 위치 2~4km 지점에서는 거리의 증가에 따른 기대 전송 시간의 상승폭이 적게 나타난다. 이는 게이트웨이 수가 더 많아 공통되는 영역이 많은 환경에서는 기대 전송 시간이 더 줄어들 수 있다는 잠재성을 드러낸다고 볼 수 있다.

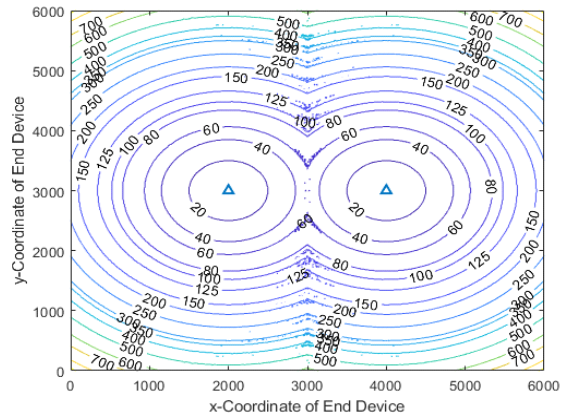


Fig. 5 Expected Transmission Time of ACK from Single-Gateway in Double-Gateway Environment

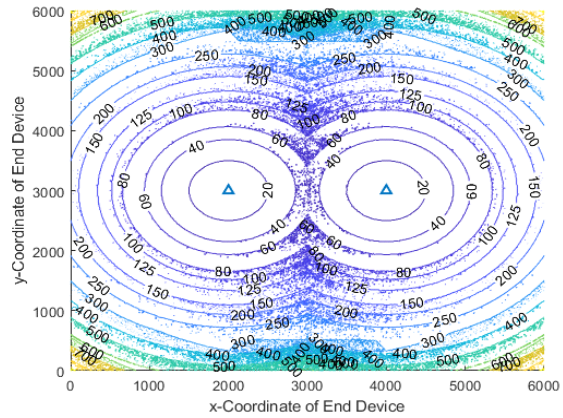


Fig. 6 Expected Transmission Time of ACK from Double-Gateway in Double-Gateway Environment

VI. 결 론

본 논문에서는 LoRa 네트워크의 신뢰성과 처리율을 향상시킬 수 있는 다중 게이트웨이의 수신응답 조화 전송 기법 HAT-LoRa를 제안하였다. HAT-LoRa는 알로하 매체 접근 제어로 데이터와 수신 응답 패킷 모두 충돌에 취약한 LoRa 환경에서 수신 응답의 기준 전달률을 만족하기 위해 서로 다른 게이트웨이가 서로 다른 확산 인자로 수회 전송하는 방법이다. 본 연구를 통해 기존의 수신 응답 전송 방법이 하나의 게이트웨이에서만 국한되었던 점을 극복할 수 있었고 여러 게이트웨이로부터 다중 확산 인자를 이용할 수 있는 거리에 있는 단말의

수신 응답의 신뢰성과 자원 점유 시간을 평균 40%, 최대 60% 절감할 수 있었다.

LoRa/LoRaWAN 환경에서 전송 범위가 겹치는 다중 게이트웨이는 사물인터넷 장치와 원시적인 매체 접근 제어로 인해 필수 요소가 되어가고 있다. 이러한 환경에서 단말의 동작 단순성을 유지하며 네트워크의 처리율을 높이는 것은 서버와 게이트웨이가 더 많은 일을 처리할 수 있도록 하는 것이다. 향후 연구로는 게이트웨이 수의 증가에 따른 다중 수신 응답 배치 방법, 여러 단말의 자원 접근에 대한 자원 할당 등을 꼽을 수 있겠다. 뿐만 아니라, 단말이 집적 정도와 위치에 따라 적절한 게이트웨이의 위치를 선정하는 것, 이미 게이트웨이가 존재하는 환경에서 음영지역을 줄이는 새로운 게이트웨이의 최적 위치를 선정하는 것 등을 향후 연구로 꼽을 수 있다.

References

- [1] Ericsson “Cellular Networks for Massive IoT,” Ericsson White Paper Uen 284, Report 23-3278, 2016.
- [2] D. Boswarthick, O. Elloumi, and O. Hersent, *M2M communications: a systems approach*, 1st ed. France, John Wiley & Sons, 2012.
- [3] Cisco Annual Internet Report (2018-2023) White Paper [Internet]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-cl11-741490.html>.
- [4] Transforma Insights. IoT connections in 2030: 44 billion LPWA, 468 million 5G (no-mMTC), and 4% of cellular using private networks [Internet]. Available: <https://transformainsights.com/news/>.
- [5] LoRa Alliance. LoRa/LoRaWAN Link Layer, Back-End Interfaces Standard, and LoRaWAN Regional Parameters [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/>
- [6] D. Croce, M. Gucciardo, S. Mangione, G. Santaromita, and I. Tinnirello, “Impact of LoRa imperfect orthogonality: Analysis of link-level performance,” *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 796-799, Jan. 2018.
- [7] M. C. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J. M. Alonso, “Do LoRa low-power wide-area networks scale?,” in *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, Malta, Malta, pp. 59-67, 2016.
- [8] A. I. Pop, U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Does bidirectional traffic do more harm than good in LoRaWAN based LPWA Networks?,” in *GLOBECOMM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*, Singapore, pp. 1-6, 2017.
- [9] T. Elshabrawy and J. Robert, “Analysis of BER and coverage performance of LoRa modulation under same spreading factor interference,” in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, Bologna, Italy, pp. 1-6, 2018.
- [10] B. Chaudhari and M. Zennaro, “LoRa Transmission over Rayleigh fading channels in presence of interference,” in *Innovations in Electronics and Communication Engineering*, Hyderabad, India, pp. 185-192, 2020.
- [11] T. Elshabrawy and J. Robert, “Closed-form approximation of LoRa modulation BER performance,” *IEEE Communications Letter*, vol. 22, no. 9, pp. 1778-1781, Sep. 2018.
- [12] S. Byeon and J. Kim, “PcLoRa: Point-coordinating LoRa with new Channel Structure for massive, reliable and low-latency IoT,” in *2020 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Barcelona, Spain, pp. 596-601, 2020.
- [13] F. Cuomo, M. Campo, A. Caponi, G. Bianchi, G. Rossini, and P. Pisani, “EXPLoRa: Extending the performance of LoRa by suitable spreading factor allocations,” in *2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Rome, Italy, pp. 1-8, 2017.
- [14] A. Waret, M. Kaneko, A. Guitton, and N. El Rachkidy, “LoRa throughput analysis with imperfect spreading factor orthogonality,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 408-411, Apr. 2018.
- [15] L. Amichi, M. Kaneko, N. E. Rachkidy, and A. Guitton, “Spreading factor allocation strategy for LoRa networks under imperfect orthogonality,” in *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Shanghai, China, pp. 1-7, 2019.
- [16] C. Caillouet, M. Heusse, and F. Rousseau, “Optimal SF allocation in LoRaWAN considering physical capture and imperfect orthogonality,” in *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Waikoloa, HI, USA, pp. 1-6, 2019.
- [17] Y. Hasegawa and K. Suzuki, “A multi-user ACK-aggregation method for large-scale reliable LoRaWAN service,” in *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Shanghai, China, pp. 1-7, May. 2019.

- [18] L. Leonardi, F. Battaglia, and L. L. Bello, "RT-LoRa: A Medium Access Strategy to Support Real-Time Flows Over LoRa-Based Networks for Industrial IoT Applications," *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 10812-10823, Jun. 2019.
- [19] D. Zorbas, K. Abdelfadeel, P. Kotzanikolaou, and D. Pesch, "TS-LoRa: Time-slotted LoRaWAN for the Industrial Internet of Things," *Computer Communications*, vol. 153, pp. 1-10, Mar. 2020.
- [20] K. Q. Abdelfadeel, D. Zorbas, V. Cionca, and D. Pesch, "FREE – Fine-Grained Scheduling for Reliable and Energy-Efficient Data Collection in LoRaWAN," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 669-683, Jul. 2019.
- [21] J. Lee, Y. S. Yoon, H. W. Oh, and K. R. Park, "DG-LoRa: Deterministic Group Acknowledgment Transmissions in LoRa Networks for Industrial IoT Applications," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1444, Feb. 2021.
- [22] LoRa Alliance. LoRa/LoRaWAN Link Layer, Back-End Interfaces Standard, and LoRaWAN Regional Parameters [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/>.



변승규(Seunggyu Byeon)

2020년 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 공학박사
2020년 ~ 현재 : 신라대학교 인공지능학과 조교수
※ 관심분야 : 무선통신, 사물인터넷, LPWAN, 실내측위