

대부모 트리 구조의 저 전력 광역 네트워크를 위한 전력 제어 기반의 공간 재사용 기회 향상 기법

변승규¹ · 김종덕^{2*}

Exploiting Spatial Reuse Opportunity with Power Control in loco parentis Tree Topology of Low-power and Wide-area Networks

Seunggyu Byeon¹ · Jong Deok Kim^{2*}

¹Assistant Professor, Department of Artificial Intelligence, Silla University, Busan, 46958 Korea

^{2*}Professor, School of Computer Science and Engineering, Pusan National University, Busan, 46241 Korea

요 약

LoRa는 네트워크에 대부모 트리 구조와 처프 확산 스펙트럼을 도입한 물리 계층 기술로 높은 신뢰도의 장거리 통신을 제공한다. LoRa의 트리 네트워크에서 자식 노드는 단일 부모가 아닌 여러 노드에게 동시에 메시지를 전송할 수 있기 때문에 동일 부하가 네트워크에 가해진다면 패킷 전달률은 게이트웨이의 수의 증가에 따라 증가한다. 하지만 알로하류의 원시적 매체 접근 제어의 한계 때문에 이러한 트리 환경에서도 부하의 증가에 따라 네트워크의 이용률은 하락한다. 본 논문에서는 동일 주파수를 동일 시간대, 동일 지역에서 사용하는 공간 분할 다중 접근 방식을 제안한다. 본 기법은 수집된 신호 세기의 분포로부터 송신 전력을 도출하여 같은 시간, 다른 게이트웨이에서 각기 다른 패킷이 수신되도록 제어한다. 즉, 포획 효과를 의도적으로 활용하여 저전력 광역 네트워크의 노드 수용력을 향상시킨다.

ABSTRACT

LoRa is a physical layer technology designed to secure highly reliable long-range communication with introducing *loco parentis* tree network and chirp spreading spectrum. Since since a leaf can send message to more than one parents simultaneously with a single transmission in a region, packet delivery ratio increases logarithmically as the number of gateways increases. The delivery ratio, however, dramatically collapses even under *loco parentis* tree topology due to the limitations of ALOHA-like primitive MAC. The proposed method is intended to exploit SDMA approach to reuse frequency in an area. With the view, TxPower of each sender for each message in a concurrent transmission is elaborately controlled to survive the collision at different gateway. Thus, the gain from the capture effect improves the capacity of resource-hungry Low Power and Wide Area Networks.

키워드 : 사물인터넷, 저전력 광역 네트워크, LoRa/LoRaWAN, 망형상 제어, 전력 제어

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

Received 26 November 2021, Revised 24 December 2021, Accepted 25 December 2021

* Corresponding Author Jong Deok Kim (E-mail: kimjd@pusan.ac.kr, Tel:+82-51-510-3519)

Professor, School of Computer Science and Engineering, Pusan National University, Busan, 46241 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.2.239>

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

저 전력 광역 네트워크(LPWAN: Low-Power and Wide-Area Networks)는 낮은 송신 전력, 낮은 데이터율로 수~수십km의 장거리 통신을 제공하는 기술로 대도시 계층 시스템과 물류 추적, 스마트 시티와 같은 대규모 사물인터넷(Massive Internet of Things)의 청사진을 실현시킬 기술로 유망하게 평가받고 있다. LoRa(Long Range)는 이에 해당하는 물리 계층 기술 중 하나로, 대부모트리(loco parentis Tree) 네트워크와 초프 확산 스펙트럼(CSS: Chirp Spread Spectrum)을 사용하여 사물(Thing)이 먼 거리까지도 신뢰성 있는 데이터 전달을 제공한다.

LoRa/LoRaWAN(LoRa Wide Area Networks)의 특수한 트리 구조에서 동작하는 게이트웨이는 수신(Receiving) 또는 우연히 수신(Overhearing)한 메시지를 중앙으로 전달하며 이로 인해 패킷 전달률(PDR: Packet Delivery Ratio)은 크게 향상될 수 있다. 그러나 알고리즘과 유사한 MAC은 서비스 대상의 수가 늘어나면 네트워크의 이용률 측면에서 여전히 원시적인 수준에 머무른다[1, 2]. 최근에 들어서는 이러한 문제점에 착안하여 자원 이용률/처리율(Utilization), 굿풋(Goodput), 심지어는 PDR과 전송 범위에 이르기까지 다양한 성능 지표에서 의문을 제기한다[3-8].

시분할 다중 접근 방식(TDMA: Time Division Multiple Access) 기반의 제어 접근(Controlled Access)기법은 특정 시간에 지정된 노드에게만 매체를 이용할 권한을 부여하므로 높은 신뢰성을 제공할 수 있다. 하지만 PDR을 극대화하기 위해 각각의 노드에 더 많은 타임 슬롯을 상호배제적으로 할당할수록 노드를 더 긴 시간 동안 비활

성(Dormant) 상태로 설정해야 한다. 또한, 저데이터율로 인한 긴 체공 시간(ToA: Time-on-air)로 인해 원시적 제어 접근을 수정 없이 사용하면 네트워크는 자원 부족을 겪게 된다.

본 논문에서는 전력(TxPower) 제어를 제어 접근 방식에 적용하여 신뢰성을 유지하면서 자원 이용률을 높이는 새로운 기법을 제안한다. 본 연구의 전력 제어 방법은 포획효과를 의도적으로 발생시킨다. 포획 효과는 수신기에서 여러 신호가 충돌할 때 가장 강한 것이 살아남은 특별한 충돌의 한 경우이다. 또한, 포획 효과를 여러 게이트웨이에서 동시에 발생시키며 각기 다른 노드의 신호가 생존하게 한다. 정리하면, LoRa의 대부모 트리 구조에 특화된 시공간 분할 다중 접근(STDMA: Space-Time Division Multiple Access)의 제안이 본 논문의 기여이다.

II. LoRa/LoRaWAN의 기술적 특성

2.1. 특수한 트리 구조 네트워크

트리란, 뿌리(Root) 노드를 제외한 모든 노드가 하나의 부모(Parent) 노드를 가지는 것을 일컫는다. 그림 1(a)와 그림 1(b)는 각각 일반적인 트리 구조와 LoRa의 트리 구조를 나타낸다. 그림에서 센서 장치와 게이트웨이, 서버는 각각 잎(Leaf)과 부모, 뿌리 노드의 역할을 한다. 일반적인 트리 구조에서는 그림 1(a)와 같이 센서 노드는 단일 게이트웨이에 연결되고 게이트웨이는 단일 서버에 데이터를 전송한다.

LoRa/LoRaWAN(이하 LoRa)의 망구조는 둘 이상의 게이트웨이가 동일 노드로부터의 데이터를 상위 노드

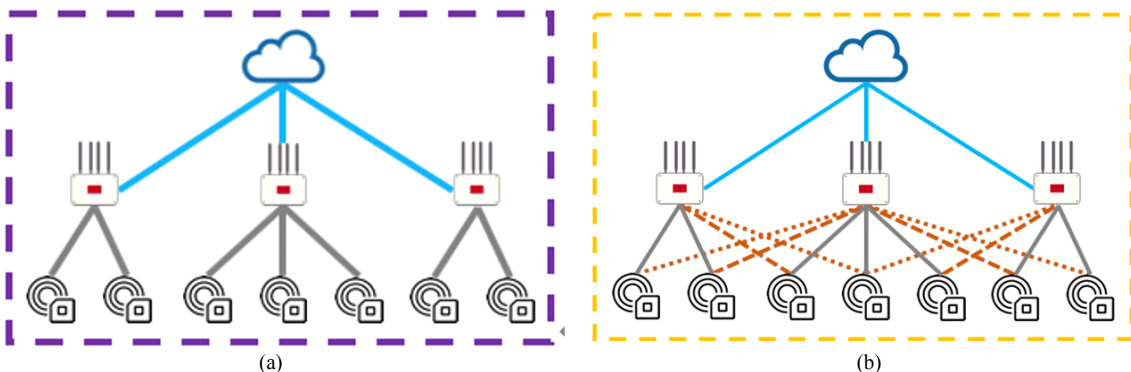


Fig. 1 Tree Network Topology: (a) a typical star-of-stars topology and (b) a loco parentis tree topology

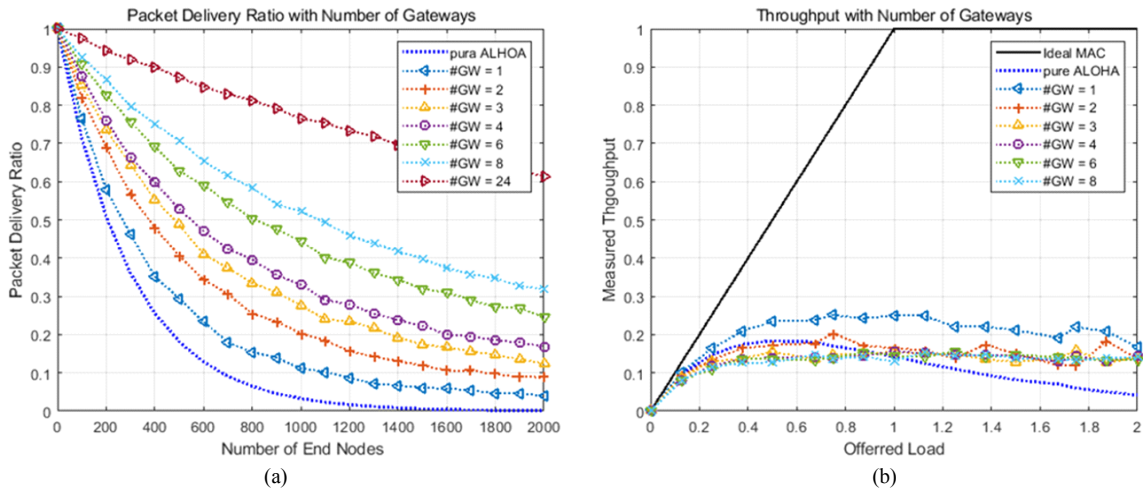


Fig. 2 Performance of LoRa's ALOHA MAC in loco parentis tree network: (a) PDR and (b) Throughput

로 전달할 수 있다. 그림 1(b)는 LoRa의 트리구조를 나타내는데, 점선으로 연결된 부모 뿐 아니라 부모의 형제 노드도 같은 메시지를 서버로 중계 전달하는 투명 브리지(Transparent Bridge)가 형성된다. 이 트리 구조에서 여러 중간 노드가 같은 부모 노드로써의 역할을 하므로 대부모 트리라 한다.

2.2. 장거리 통신에서의 강인함

LoRa CSS의 신호는 시간에 따라 주파수가 선형으로 변화하는 단순한 특성으로 인해 잡음 층(Noise Floor) 이하의 매우 낮은 수신 신호 세기에서도 복조가 가능하다. 뿐만 아니라, 300MHz ~ 1GHz의 극초단파(UHF: Ultra High Frequency) 대역 특성으로 수 km의 장거리를 주파한 신호도 감쇄 폭이 매우 작은 편이다.

장거리에 강인한 특성은 LoRa 신호는 광범위한 간섭을 유발할 수 있다는 의미이기도 하다. 즉, 혼잡 상태에 다른 네트워크는 비록 대부모 트리 구조라고 해도 게이트웨이와 가까이 위치한 노드의 강력한 신호를 제외하면 대부분 전달되지 않는다[4 - 9].

III. 연구 동기

3.1. LoRa 매체 접근 제어의 취약성

대부모 트리 환경에서도 LoRa MAC의 성능은 원시적인 수준이다. 먼저, 우리는 노드 및 게이트웨이 수의

변화에 따른 PDR과 처리율(Throughput)의 변화를 측정하였다. 노드의 수를 100개에서 2,000개까지, 게이트웨이의 수를 2개에서 24개까지 늘려가며 송신된 패킷의 수와 수신된 패킷의 비율을 측정하였다. 실험 공간에서 노드는 무작위로 배치되며 게이트웨이는 3개의 경우 삼각형, 나머지의 경우는 격자 형태로 배치하였다. 기타 매개변수는 표 1과 같이 정리하였다.

노드 수와 게이트웨이 수가 증가함에 따라 그림 2(a)와 같이 PDR이 관찰된다. 게이트웨이의 숫자가 많을수록 동일 노드 수에서 더 높은 PDR을 기록한다. 그러나 동일 노드 수에서 게이트웨이 수에 따른 PDR의 증가세는 선형이 아니다. 그림 2(a)의 PDR을 처리율로 환산하면 그림 2(b)와 같이 표현된다. 즉, LoRa의 MAC은 대부모 트리 구조에서 알로하의 최대 성능인 18.39%를 대부분 극복하지 못한 것으로 드러난다.

다음의 두 가지에 주목해야 한다. 첫째, 패킷의 중복 수신으로 인해 처리율이 저하한다. 게이트웨이의 수가 N 이라면 네트워크가 처리할 수 있는 서로 다른 패킷의 수는 N 이지만 대부분 N 미만의 값이 나타난다. 둘째, 단일 게이트웨이일 때 더 높은 성능을 보이는 것이다. 관찰 결과를 살펴보면 충돌로 손실되어야 하는 패킷 중 일부가 포획 효과로 인해 정상적으로 수신되는 것이 관찰되었다. [1, 2]의 연구에 따르면 프리앰블과 싱크워드 에 의한 동기화가 일어나기 전 전력차가 6dB 이상일 경우 이와 같은 현상이 발생한다.

Table. 1 Parameter setting for Throughput Experiment

TxPower	SF	BW	Generation Rate	Packet ToA
13dBm	12	125kHz	a single packet per second at each node	1318.91ms

3.2. 자원 이용률의 극대화를 위한 제어 접근의 사용

신뢰성을 확보할 수 있는 방법 중 하나는 중앙 조정자가 분산 장치들의 접근 시간을 조정하는 TDMA를 사용하는 것이다. 그러면 모든 게이트웨이에게 패킷을 거의 전달하지 못하는 장치를 다른 장치들과 상호 배제된 시간에 할당하여 다중 충돌로부터 지켜낼 수 있다. 하지만 신뢰성과 처리율은 교환(Tradeoff) 관계에 있어 이러한 배제적인 제어 접근 방식을 대부분 트리 환경에 그대로 사용할 경우 자원의 빠른 고갈을 유발한다. 그림 3은 이를 나타내는 예시이다. 가로축의 원형은 노드, 세로축의 삼각형은 게이트웨이, 사각형의 실선은 높은 PDR, 사각형의 점선은 낮은 PDR을 나타낸다. 노드 2, 3과 같이 게이트웨이를 공회전(Idle) 상태에 있게 하거나 노드 4처럼 자원을 오래 점유하면서 일부 게이트웨이를 유향 상태로 만든다.

동시 전송 가능한 상태의 노드를 같은 시간대에 할당하면 자원의 소모 속도를 완화할 수 있다. 그림 3의 노드 2, 3의 전송은 상호배제적이므로 동시 전송해도 충돌은 발생하지 않는다. 여기에 노드 0, 1과 같은 장치들은 동시에 전송하는 것도 가능하다. 예를 들면, 노드 0의 신호

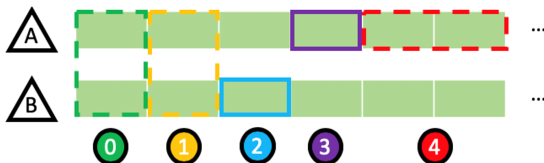
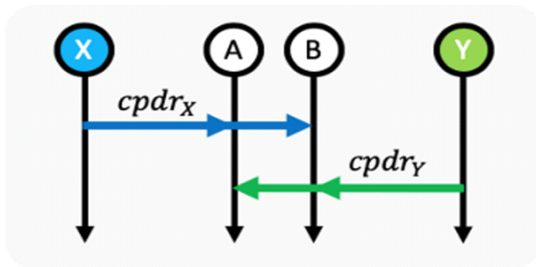
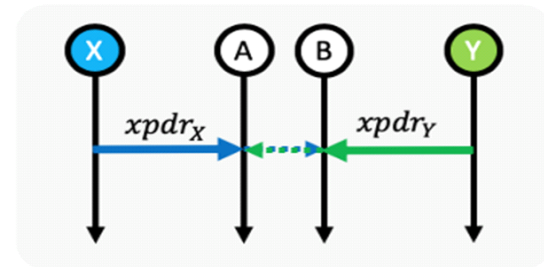


Fig. 3 Example of Mutually Exclusive Controlled Access



(a)



(b)

Fig. 4 Proposed PDRs for more than One Node in a loco parentis Tree Network: (a) CPDR; (b) XPDR

는 게이트웨이 A에서, 노드 1의 신호는 게이트웨이 B에서 포획 효과를 일으킨다. 그러면 동일 시간에 두 노드를 동시에 할당할 수 있다. 이 중 게이트웨이 A에서의 포획 조건은 수식 (1)과 같이 표현된다.

$$P_{rx_{ia}} > Sens_a \wedge P_{rx_{ia}} - P_{rx_{ja}} > P_{Th} \quad (1)$$

$P_{rx_{ia}}$ 는 노드 i 가 전송한 신호가 게이트웨이 a 에서 수신되었을 때의 RSS, $Sens_a$ 는 a 의 수신감도, P_{Th} 는 포획효과 발생을 위한 RSS차의 역치이다. 게이트웨이 b 에서 노드 j 의 신호 또한 수신 가능하다. 수식 (1)의 변수 중 P_{rx} 는 송신 전력 P_{tx} 와 경로 손실에 종속적이고 경로 손실은 노드의 위치에 종속적이므로 P_{tx} 을 적절히 조절하면 게이트웨이에서 각기 다른 신호의 수신이 가능해진다.

3.3. 대부분 트리 환경을 위한 패킷 전달률과 처리율

두 개 노드 이상의 동시 전송이 얼마만큼 이득이 있는지를 판단하기 위한 척도 (Metric)를 정의할 필요가 있다. 기존의 PDR이나 기대 전송 횟수 (ETX: Expected Transmission Count), 기대 전송 시간 (ETT: Expected Transmission Time)은 하나의 노드가 전송하는 패킷에 관한 척도이며 두 노드 이상의 동시 전송에 관한 내용은 표현할 수 없기 때문이다.

단일 노드와 단일 게이트웨이 사이의 PDR은 전형적으로 수식 (2)과 같이 정의한다. i 는 노드, g 는 게이트웨이를, $P_{rx_{ig}}$ 는 i 에서 송신된 신호를 g 가 수신했을 때의 신호 세기를 의미하며 $Sens_g$ 는 게이트웨이 g 의 수신 감도를 의미한다.

$$pdr_{ig} = \Pr(P_{rx_{ig}} > Sens_g) \quad (2)$$

그러나 수식 (2)의 전통적인 형태의 PDR은 대부분 트리 네트워크에서 다수의 게이트웨이로 다수 노드가 동시에 전송할 경우의 척도(Metric)로써의 가치가 매우 낮다. 이에 우리는 두 가지 형태의 새로운 PDR을 제안하며 이에 관한 개념을 그림 4의 (a)와 (b)로 나타낸다.

우선, 단일 노드의 메시지를 다수 게이트웨이가 수신하는 경우를 고려한다. 그림 4(a)와 같이 다른 노드와는 독립적인 시간대에 송신하므로 PDR을 수식 (3)과 같이 정의할 수 있다. 이 수식은 하나의 노드로부터 여러 게이트웨이로 링크 중 하나의 링크에서만 수신이 성공해도 패킷은 서버로 전달됨을 의미한다. 즉, 모든 링크에서 메시지 수신을 실패하지 않음을 나타내는데, 여러 링크를 하나로 결합하는 것과 동치인 표현을 나타내므로 이를 결합 PDR (CPDR: Combined PDR)이라 명명한다.

$$cpdr_i = 1 - \prod_{g \in GW} (1 - pdr_{ig}) \quad (3)$$

두 번째로, 그림 4(b)와 같이 단일 노드의 메시지를 다수 게이트웨이가 수신하면서 각 게이트웨이에 다른 신호의 간섭이 있는 경우를 고려한다. 이 때 포획효과 발생을 위한 신호 세기의 차와 물리 계층의 동기화를 고려해야 하면 수식 (4)와 같이 PDR을 정의할 수 있다. S 는 노드 i 와 동시간대에 함께 전송하는 노드의 집합을 의미한다. $s(j, g)$ 는 노드 j 와 게이트웨이 g 의 동기화 여부를 나타내며 LoRa는 동기화에 프리앰블(Preamble)을 구성하는 8개의 심벌 중 5개의 수신을 필요로 한다 [1-3]. 이를 결합 PDR과 구분하여 교차 PDR(XPDR: Crossed PDR)이라 명명한다.

이 수식은 수식 (1)을 만족하면서, 메시지 수신을 위한 물리 계층의 동기화가 이루어지지 않아야 하는 조건을 동시에 만족해야 노드로부터의 메시지 전달이 성공함을 의미한다. 다른 노드와 동기화가 진행 중이라면, 프리앰블 5개의 수신이 완료되기 전에 노드 i 의 신호가 P_{Th} 보다 더 강하여 동기화 되지 못하도록 포획해버리면 이후는 노드 i 의 전송이 성공할 수 있다.

수식 (4)를 바탕으로 노드 집합 S 의 전원이 패킷을 전송할 경우의 전달률을 정의할 수 있다. 이를 우리는 집합 PDR(APDR: Assembled PDR)이라 명명하며 수식(5)로 나타낸다. XPDR과 APDR은 수식 (1)에 따라 송신 전력에 의해 변동될 수 있다.

$$xpdr_i^S = 1 - \prod_{g \in GW} \left\{ 1 - \Pr \left(P_{rx_{ig}} > Sens_g \right. \right. \\ \left. \left. \wedge P_{rx_{ig}} - \sum_{j=1, i \neq j}^{nS} P_{rx_{jg}} > P_{Th} \right. \right. \\ \left. \left. \wedge \bigwedge_{\substack{j \in S \\ \text{but } i \neq j}} \neg s(j, g) \right) \right\} \quad (4)$$

$$apdr_S = \sum_{i \in S} xpdr_i^S \quad (5)$$

3.4. 전력 제어를 이용한 전달률의 극대화

ADPR의 구성요소인 XPDR은 포획 효과의 발생 역치를 넘어설 확률을 내포하므로 송신전력을 조절함으로써 이를 극대화할 수 있다. 이를 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

우선, 크기 (6000, 6000)의 시뮬레이션 공간에 게이트웨이 A 와 B 를 (1500, 3000)과 (4500, 3000)에, 노드 X 를 (3000, 3000)에 고정시키고 노드 Y 를 (0, 0)에서 (6000, 6000)까지 이동시키며 측정된 APDR을 등고선 그래프로 나타내면 그림 5(a)와 같다. 결과, Y 가 어느 게이트웨이에 가깝게 배치될 경우에 한해 APDR이 1에 가까워진다. 즉, X 의 어중간한 위치에 의해 대부분의 X 의 메시지는 대부분 전달되지 않는다. 이 중 Y 가 (1800, 3000)에 배치될 때의 XPDR 그래프를 그리면 그림 5(b)와 같이 표현된다. 정리하면 동시에 전송하는 노드 집합의 원소 중 어중간한 위치 즉, 어떠한 게이트웨이와도 가깝지 않은 곳에 위치한 노드의 전송은 높은 확률로 충돌로 인해 사라지거나 포획당하여 전달될 확률이 거의 사라진다.

그 다음으로, 그림 5와 같은 악조건 하에서 전력 제어에 의한 APDR의 상승폭이 어느 정도인지 확인할 수 있다. 수신 신호 세기는 수식 (6)과 같이 모델링할 수 있다. 수식에서 GL 는 송신자와 수신자 사이의 안테나 이득, 케이블 손실 등을 포괄한 수치이고, d_0 , $\overline{L_{PL}(d_0)}$, γ 는 각각 경로 손실 모델의 기준거리, 경로 손실 모델의 기준거리 d_0 에서의 기준 경로 손실 값, 경로 손실 지수를 나타낸다. X_σ 는 경로 손실의 무작위성을 표현하는 평균은 0, 표준편차를 σ 의 정규 분포이다.

$$P_{rx} = P_{tx} + GL - \overline{L_{PL}(d_0)} - 10\gamma \log \frac{d}{d_0} + X_\sigma \quad (6)$$

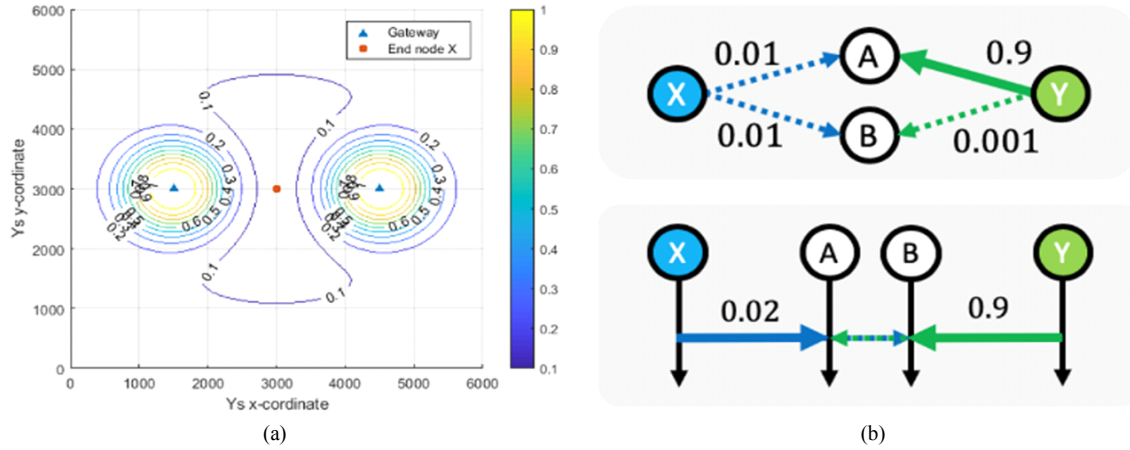


Fig. 5 Relation between the sum of XPDR and the locations of end nodes: (a) Contour maps when node X is located at (3000, 3000); (b) topology diagram for X(3000, 3000) and Y(1800, 3000).

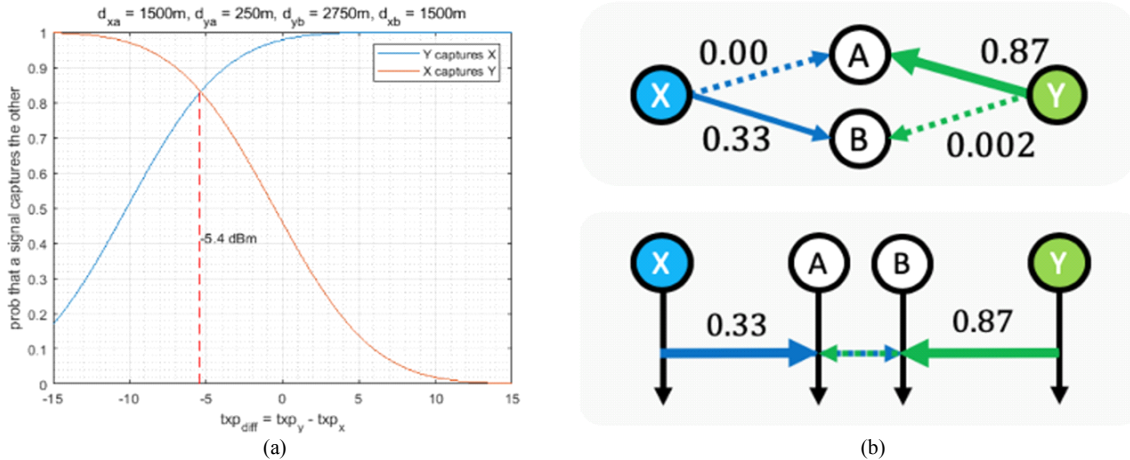


Fig. 6 (a) Relationship between the difference of TxPowers and the occurrence of capture effect; (b) Maximized XPDRs by the Power Control

이로부터 포획효과의 발생 조건을 수식 (7)과 같이 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} & |P_{rx_{XA}} - P_{rx_{YA}}| \\ &= \left| P_{tx_A} - P_{tx_B} - 10\gamma \log \frac{d_{XA}}{d_{YA}} + X_{\sigma\sqrt{2}} \right| > P_{Th} \end{aligned} \quad (7)$$

그림 6(a)는 송신 전력 차에 따른 노드 X와 Y의 신호가 포획 효과를 발생시킬 확률을 나타내는 그래프이다. x축은 송신 전력 차를, y축은 포획 효과가 발생할 확률을 나타낸다. x축에서 오른쪽으로 갈수록 Y의 송신 전력이 더 강해지고 왼쪽으로 갈수록 X의 송신 전력이 더

욱 강해진다. 그림에서 나타난 바와 같이 두 확률은 상호 보완적 관계를 보인다. 그 중 교차가 발생하는 지점을 살펴보면 그 차가 -5.4dB로 X의 그림 5에서 X가 -5.4dB 만큼 더 강하게 송신하면 게이트웨이 B에서 Y의 신호를 포획할 수 있게 된다는 의미이다.

그림 6(a)의 교차 지점의 XPDR 다이어그램을 그리면 그림 6(b)로 표현된다. 노드 Y에서 게이트웨이 A로의 XPDR에는 크게 영향이 없지만은 0.01에서 0.33까지 개선된 것을 확인할 수 있다. 따라서 APDR 역시 0.92에서 1.1까지 개선됨을 확인할 수 있다.

IV. 프로토콜 설계

4.1. 요약

제안 프로토콜은 중앙의 서버에 의해 네트워크가 제어되는 LoRa Class B 기반의 제어 접근 기법이다. 알로하를 기반으로 하는 Class A와는 달리 서버 또는 게이트웨이와 같은 포인트 조정자 (Point Coordinator)의 지시 없이는 전송을 시작하지 않으며 노드는 예약 시간이 되면 깨어나 매체가 유힤유상태가 될 때까지 대기한다. 서버는 특정 시간에 지정된 노드들에게 동시 전송의 신호를 전송하며 모든 노드가 전송이 완료될 때까지 이 작업은 반복된다.

제안 기법을 사용하는 LoRa 네트워크에서 노드는 서버가 링크 품질을 측정할 수 있도록 예약 시간을 갖는다. 이 정보를 이용하여 동시 전송의 기대 소모 타임 슬롯 수를 계산하고 동시 전송할 노드들을 결정한다. 어떤 두 노드가 패킷을 동시에 전송할 때의 확률은 수식 (7)과 같이 정의되지만 예상 소모 시간은 단순하게 정의하기 힘들다.

두 노드가 동시 송신할 경우 패킷 수신 성공의 수는 (성공, 성공), (성공, 실패), (실패, 성공), (실패, 실패)로 네 가지가 존재한다. 동시 전송은 모든 노드의 패킷이 성공할 때까지 반복된다. 단, 패킷 전달에 성공한 노드는 전송을 중지한다. 그러나 동시 전송이 항상 더 효과적인 것은 아니다. 따라서 기대 타임 소모 슬롯의 수는 동시 전송이 더 효율적이라면 우리의 새로운 척도로 결정되며 그렇지 않다면 개별 ETX의 합으로 표현된다.

4.2. 기대 소모 슬롯 수

기대 타임 슬롯 수 (ESX: Expected timeSlot Count)를 새롭게 정의한다. APDR이 1회 전송으로 얻을 수 있는 패킷 수의 기댓값을 의미한다면, 이 척도는 ETX와 유사하게 동시 전송하는 노드 집합의 원소 노드가 각각 하나의 패킷을 전송하기 위해 소모되는 평균 타임 슬롯수를 의미한다.

ESX를 측정하기 위해서는 우선 개별 전송하는 경우와 동시 전송하는 경우에 관해 PDR을 구분할 필요가 있다. 개별 전송에 관한 결합 PDR은 하나의 노드로부터 여러 게이트웨이로의 PDR을 결합한 확률로 정의한다. 이 때, 그림 4(a)와 같이 노드 X, Y가 상호 배제하므로 각 노드의 ETX는 $1/CPDR$ 로 나타내고, 따라서 두 노드의 ESX는 수식 (8)로 정의된다.

$$ESX_{[X,Y,\dots]} = \frac{1}{cpdr_x} + \frac{1}{cpdr_y} + \dots \quad (8)$$

$$= \frac{1}{1 - \prod_{i=1}^N (1 - pdr_{xi})} + \frac{1}{1 - \prod_{i=1}^N (1 - pdr_{yi})} + \dots$$

동시 전송에 관한 교차 PDR (XPDR: Crossed PDR)은 노드 X가 전송할 때 간섭자가 있는 경우를 고려한다. 이 경우 ESX는 CPDR의 것과는 다른 관점에서 해석해야 한다. 마르코프 체인(Markov Chain)에서 위상 유형 분포(DPTD: Discrete Phase-Type Distribution)[10]를 이용하여 시작 상태와 종료 상태 사이의 평균 전이 횟수

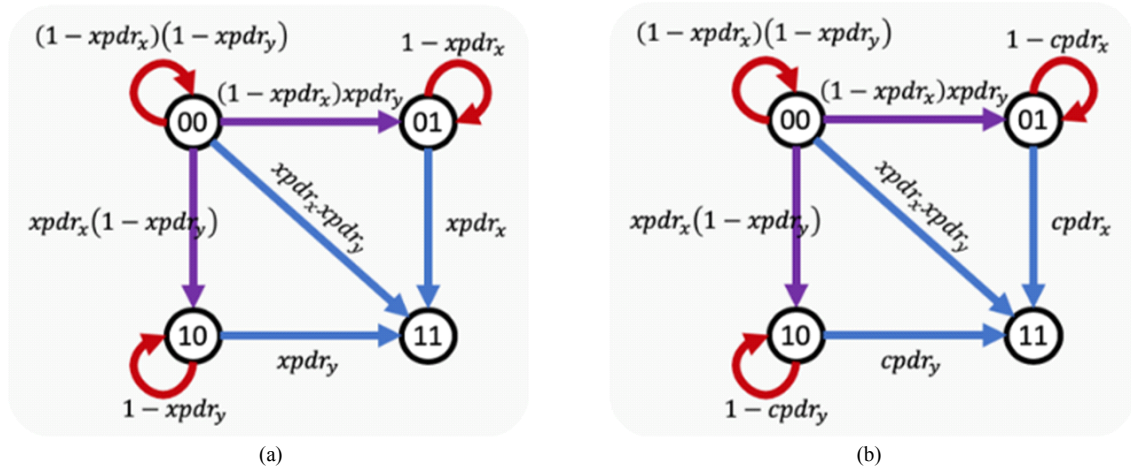


Fig. 7 State Transition Diagram for Concurrent Transmission : (a) without ACK; (b) with ACK

를 구할 수 있다. 그러면 확률적 모델을 근거로 한 정확한 ESX의를 유도할 수 있으며, 패킷 수신 상태는 표 2와 같이 정의한다.

Table. 2 State Definitions of Concurrent Transmissions of two Nodes

State	Description
00	No Packet is received from either node X or Y.
01	Only the packet from Y is received.
10	Only the packet from X is received.
11	Both Packets from X and Y are received.

두 개가 하나의 집합을 형성할 때 최초 상태는 00이다. 노드는 타임 슬롯의 시작지점마다 패킷을 전송할 수 있으며 각각의 패킷이 전달될 때까지 재전송한다. 그러나 둘 중 어느 쪽의 패킷이 전달되더라도 ACK가 없어 결과를 알 수 없다면 두 노드는 주어진 시간이 다할 때까지 재전송을 할 것이다. 이 경우는 그림 7(a)로 표현되며 [10]를 이용하여 구한 ESX는 수식 (9)와 같다.

$$ESX_{\langle X, Y \rangle} = \frac{1}{1 - (1 - XPDR_X)(1 - XPDR_Y)} \times \left\{ 1 + \frac{(1 - XPDR_X)XPDR_Y}{XPDR_X} \right\} + \frac{XPDR_X(1 - XPDR_Y)}{XPDR_Y} \quad (9)$$

만약 매 전송마다 서버가 ACK를 송신한다면 그림 7(b)와 같이 그림 7(a)를 수정할 수 있을 것이다. ACK로 인해 10과 01의 상태에서 한 쪽이 재전송을 중지하면 다른 한 쪽은 간섭 없는 전송을 할 수 있는 것이 차이이다. 이 상태 그래프에서의 ESX는 수식 (10)과 같다.

$$ESX_{\langle X, Y \rangle} = \frac{1}{1 - (1 - XPDR_X)(1 - XPDR_Y)} \times \left\{ 1 + \frac{(1 - XPDR_X)XPDR_Y}{CPDR_X} \right\} + \frac{XPDR_X(1 - XPDR_Y)}{CPDR_Y} \quad (10)$$

4.3. 기대 소모 슬롯의 최적화를 위한 송신 전력 제어

ESX의 수치에서 결정적인 영향을 미치는 것은 간섭 즉, XPDR이고 이는 송신 전력에 종속적이다. 게이트웨이가 두 개, 노드가 두 개인 2×2 환경에서는 간단하게

패킷 하나씩을 성공시킬 수 있는 송신 전력 쌍을 찾으려 된다. 경로 손실 값이 모두 가우시안 분포의 변동 폭을 가질 때 두 XPDR의 합에 관한 함수 f 는 수식 (11)과 같이 정리된다.

$$f = Q \left(\frac{P_{Th} - P_{rx_{XA}} + P_{rx_{YA}}}{\sqrt{\sigma_{XA}^2 + \sigma_{YA}^2}} \right) + Q \left(\frac{P_{Th} - P_{rx_{YB}} + P_{rx_{XB}}}{\sqrt{\sigma_{XB}^2 + \sigma_{YB}^2}} \right) \quad (11)$$

수식 (11)에 대한 최적 해를 송신 전력 제어에 활용하기 위해서는 해가 $P_{tx_X} - P_{tx_Y}$ 로 표현되어야 한다. P_{rx} 를 P_{tx} 와 경로 손실, 가우시안 함수로 치환하면, $P_{tx_X} - P_{tx_Y}$ 의 값을 구할 수 있으며 $\frac{\partial f}{\partial P_{tx_X} - P_{tx_Y}} = 0$ 의 값은 σ 값이 모두 같을 경우 수식 (12)와 같이 정리할 수 있다. 수식 (12)를 만족할 경우 APDR과 ESX는 최적화되며 ESX 역시 최소화된다.

$$P_{tx_X} - P_{tx_Y} = 5\gamma \log \frac{d_{XA}d_{XB}}{d_{YA}d_{YB}} \quad (12)$$

4.4. 노드 집합 선정 알고리즘

게이트웨이의 수와 위치, 노드의 수와 위치가 주어졌을 때 전체 네트워크의 소모 시간을 최소화하는 문제는 초 그래프(Hyper Graph) 상에서 집합 시스템을 이용하여 단일 가장자리가 두 개 이상의 정점(Vertex)을 연결할 수 있을 때 해결할 수 있는 최소 비용 가장자리 문제 (Minimum Cost Edge Problem)와 동일 선상에서 해석할 수 있고 이 문제는 NP-hard로 알려져 있다.

이 문제에서 최적해를 찾아내기 위해 완전 탐색 (Exhaustive Search) 알고리즘인 BestComb를 표 3과 같이 정의한다. 우선, 해당 알고리즘은 가용 송신 전력의 집합이 한정되어 있을 때 가능한 모든 집합의 경우의 수에 대해 전력 제어로 얻을 수 있는 이득(Gain)을 도출한다. 그 다음으로, 그 중 최소 이득을 K로 정의하고 K보다 낮은 이득을 갖는 노드 집합은 개별 전송으로, K보다 높은 노드 집합은 동시 전송을 할당한다. 마지막으로, 전역 탐색을 통해 전체 네트워크에서 요구하는 ESX가 최소가 되는 집합의 조합을 찾아낸다. 이득 G 는 수식 (13)과 같이 정의한다.

$$G = \frac{xpdr_X}{cpdr_X} + \frac{xpdr_Y}{cpdr_Y} \quad (13)$$

이득 G 는 $1 \leq G < 2$ 의 범위에 존재한다.

Table. 3 Algorithm BestComb

function [combs, txp] = bestComb(dist)
1: // combs: the combinations of the sets, nGW×k m
2: // txp: TxPowers of each node, #EN × 1 vector
3: // dist: Distances between ENs and GWs, nEN×nGW
4: for i from 1 to nEN
5: for j from 1 to nEN
6: txp_X, txp_Y β find TxP Difference by (12)
7: $esx(i, j)$ β find ESX with ACK by (7)
8: $g(i, j)$ β calculate G value with original XPDR by (10)
9: $g_pc(i, j)$ β calculate G value
10: with power controlled XPDR by (10)
11: $g_ratio(i, j)$ β $g_pc(i, j) / g(i, j)$
12: end
13: end
14: combs β make a complete node combination sorted by G
15: for i β 1 to size(sets)
16: if seqs(i)'s $K < 1$
17: delete the line of i from seqs
18: end
19: for j β from size(seqs) to i + 1 by decreasing order
20: if sets(j) has the same number as either of seqs(i)'s element
21: delete the line of j from seqs
22: end
23: end
24: end
25: comb β seqs (1 to end, 3:4)
26: txps β TxPowers of seqs

V. 실험 및 평가

5.1 실험 환경과 성능 척도

ESX와 에너지의 관점에서 제안 기법의 성능을 분석한다. 그림 8과 같이 워밍업 구간, 평가 구간으로 나누어 성능 평가 시나리오를 구성한다. 1차 구간에서는 네트워크 서버가 각 게이트웨이에게 비콘 신호를 송신하게 하여 게이트웨이까지의 경로 손실 분포를 추정하게 하고, 2차 구간에서는 실제 소모된 타임 슬롯과 책정된 송신 전력을 측정한다.

실험 환경은 최대 $3\text{km} \times 3\text{km}$ 의 시뮬레이션 환경을 사용한다. 게이트웨이와 노드는 그림 9(a), 9(b)와 같이

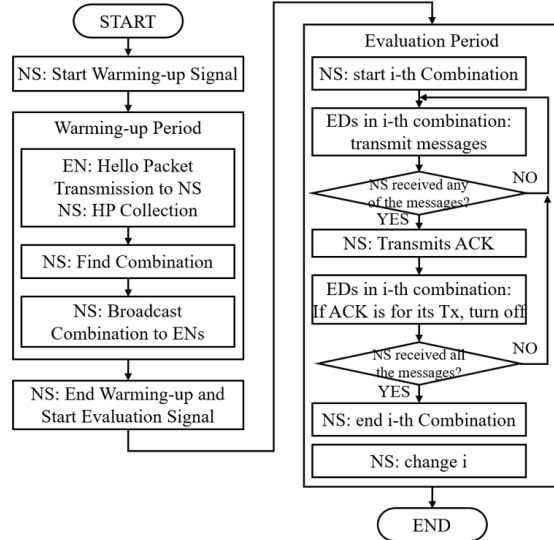


Fig. 8 Flowchart of the Evaluation Scenario

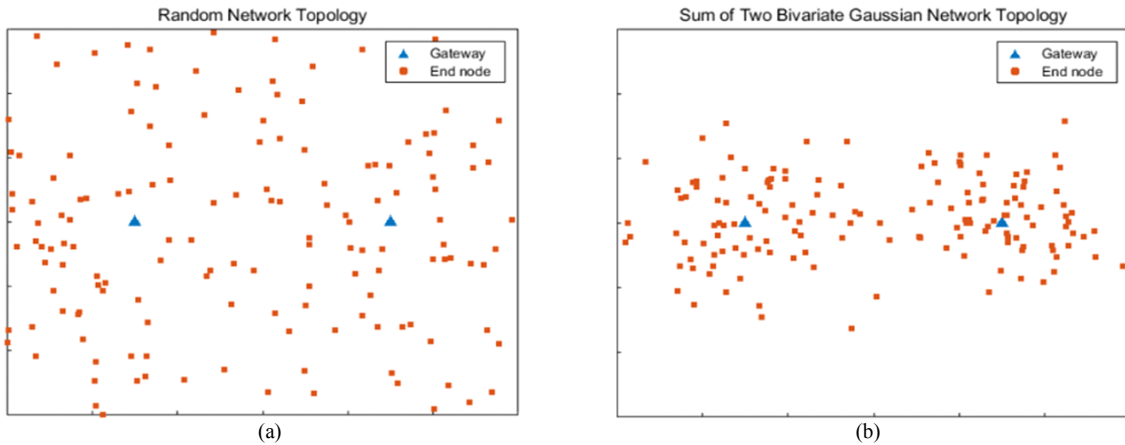


Fig. 9 Topology in the simulation: (a) Uniform Random Network; (b) Sum of Two Bivariate Gaussian Random Network

배치하는데, (1000, 1500)과 (2000, 1500)의 위치에 게이트웨이를 배치하는 것은 동일하다. 여기에 시뮬레이션 공간에 무작위로 노드를 분포시키는 균등 랜덤 분포 (URN: Uniform Random Network)와 두 게이트웨이를 중심으로 가우시안 분포를 이루는 (TBGRN: sum of Two Bivariate Gaussian Network) 환경을 사용한다. LoRa의 CSS 설정은 SF12, BW125로 고정, 패킷의 페이로드는 32바이트로 패킷 ToA는 1810.432ms이다.

하나의 타임슬롯을 2s로 설정하여 실험의 단순화한다. 두 개의 노드에게 동시에 ACK를 전송하기 위해 [11]를 기반으로 ACK 집적(Aggregation)이 가능하다고 가정한다. LoRa 장치에서 송신 전력의 설정 구간은 실제로 정수만을 사용할 수 있고 0 dBm, 7 dBm, 14 dBm을 Low (L), High (H), Maximum (M)을 기본 값으로 제공한다[12-13]. 하지만 본 실험에서는 전력 제어로 인한 효율성을 살펴보기 위해 0 dBm에서 14 dBm까지 0.2 dB 단위의 값을 사용할 수 있다고 가정한다.

실험에는 CA, CA-ACK, CA-ACK-PC, CA-ACK-PC-ALG으로 완전 배제적 제어 접근 기법, ACK를 사용하는 제안 기법, ACK와 전력 제어를 사용한 제안 기법, ACK와 전력 제어, 전역 최적화를 모두 사용한 제안 기법을 각각 의미한다.

5.2. 시간 효율 평가

본 실험에서는 노드 수를 100개로 고정하고 시뮬레이션 공간의 크기를 100m×100m에서 3,000m×3,000m까지 늘리며 실험을 진행하였다. 본 환경에서의 실험 결과는 그림 10과 같다. 결과, URN에서 최저 7%, 최대

15%의 타임 슬롯을, TBGRN에서 최저 30%, 최대 40%의 타임 슬롯을 절감할 수 있음을 확인하였다. 먼저 ACK를 사용하는 것만으로도 노드 쌍의 소모 시간은 극적으로 줄어들며 전력 제어와 전역최적화로 5%의 추가 이득을 얻은 것으로 확인된다.

현실적인 상황을 고려하면 무선 통신 서비스를 받기 위해 게이트웨이가 근접한 지역인지 아닌지를 판단하고 게이트웨이 주변에 노드를 배치하는 것이 일반적이지 서비스 가능 여부도 확실하지 않은 지역에 노드를 설치하는 것은 매우 이례적인 상황일 것이다. 따라서 TBGRN에서의 결과를 놓고 보면 제안 기법은 시간 자원 소모를 줄이고 서비스 대상 노드 수를 늘리는데 크게 기여할 것이라 판단한다.

5.3. 에너지 효율 평가

본 실험에서는 5.2절의 실험과 마찬가지로 노드 수를 100개로 고정하고 시뮬레이션 공간의 크기를 100m×100m에서 3,000m×3,000m까지 늘린다. 실험 결과 그림 11과 같은 송신 전력의 분포를 보인다. 그림 11(a)를 살펴보면 URN에서 10%의 노드가 최소 6 dB 낮은 송신 전력을, 20%가 최소 2 dB 낮은 송신 전력을 사용하도록 설정된 것을 확인할 수 있다. 그림 11(b)를 살펴보면 TBGRN에서 약 10%의 노드가 6 dBm 이하의 송신 전력을 사용한 것으로 기록이 되는데, 이들은 최대치인 14 dBm과 비교하여 최소 85%의 에너지 절감 효과를 갖게 된다. 뿐만 아니라 나머지 40% 노드도 20-85%의 에너지 절감 효과를 얻는다.

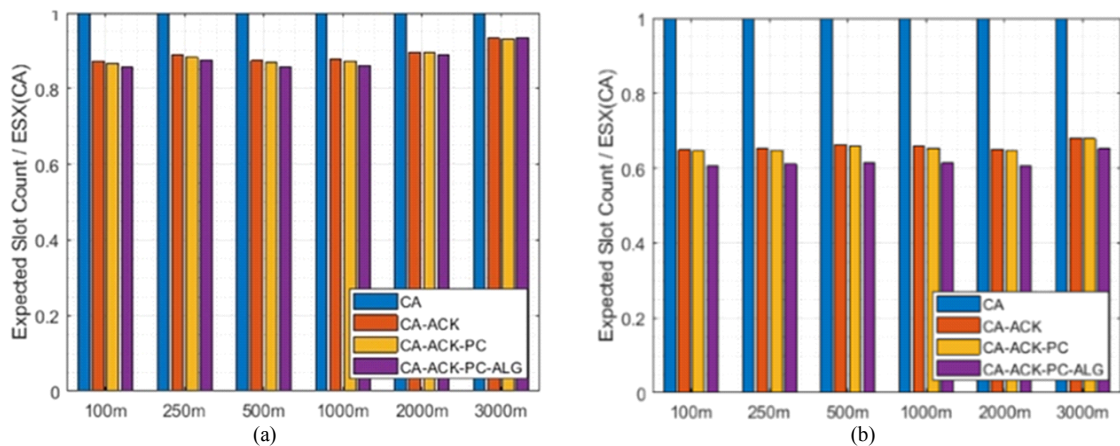


Fig. 10 Time Efficiency: (a) Uniform Random Network; (b) Sum of Two Bivariate Gaussian Network

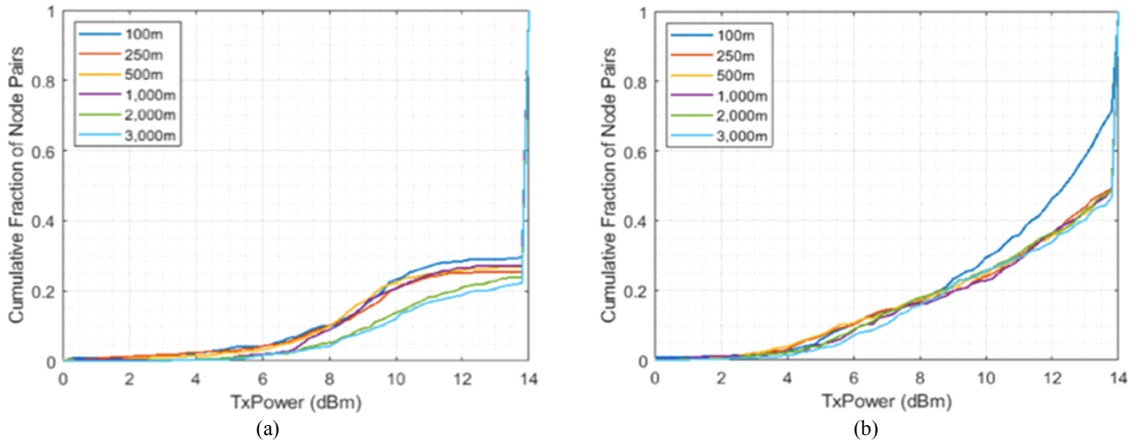


Fig. 11 Power Efficiency, Cumulative fraction of node pairs with CA-ACK-PC in the network topologies: (a) Uniform Random Network; (b) Sum of Two Bivariate Gaussian Network

VI. 결론

본 논문에서는 SDMA와 TDMA를 기반으로 LoRa 네트워크가 시간 효율과 에너지 효율을 동시에 제공할 수 있도록 하는 공간 재사용 기법 향상 기법을 제안하였다. LoRa 네트워크 환경에서는 자원이 중복 패킷과 충돌로 인해 크게 낭비되고 있으며 특히 같은 패킷들이 여러 게이트웨이에서 동시에 다중 충돌하는 확인하였는데 이 문제를 전력 제어를 통해 방지하여 대규모 트리 구조의 단점은 줄이고 장점은 활용할 수 있었다.

랜덤 접근 환경에서 포획 효과를 제어하는 것은 송수신자 사이에 동기화가 이루어지기 전에 강한 신호가 수신되어야 하므로 지난한 일이다. 반면, 제안 기법은 제어 접근을 도입하여 상대적으로 쉽게 포획효과를 제어한다. 또한, 원소가 두 개 이상인 노드 집합에 타임 슬롯을 부여하는 방법을 제안하여 기존의 완전 상호배제적인 제어접근의 한계를 극복할 수 있었다.

References

[1] M. C. Bor, T. Voigt, and J. M. Alonso, "Do LoRa low-power wide-area networks scale?," in *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, ACM*, Malta, pp. 59-67, Nov. 2016.

[2] M. C. Bor, J. Vidler, and U. Roedig, "LoRa for the Internet

of Things," in *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, Graz: Austria, pp. 361-366, Jan. 2016.

[3] A. I. Pop, U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Does bidirectional traffic do more harm than good in LoRaWAN based LPWA networks?," in *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*, Singapore, pp. 1-6, Dec. 2017.

[4] B. Vgaard, M. Lauridsen, H. Nguyen, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, and M. Sorensen, "Interference impact on coverage and capacity for low power wide area IoT networks," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, San Francisco: CA, pp. 1-6, Mar. 2017.

[5] O. Georgiou and U. Raza, "Low power wide area network analysis: Can LoRa scale?," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 162-165, Apr. 2017.

[6] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, "A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, pp. 1466, May. 2016.

[7] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," in *14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Copenhagen, pp. 55-59, Dec. 2015.

[8] T. Voigt, M. Bor, U. Roedig and J. Alonso, "Mitigating inter-network interference in LoRa networks," in *Proceedings of the 2017 International Conference on*

- Embedded Wireless Systems and Networks*, Uppsala, pp. 323-328. Feb. 2017.
- [9] 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.
- [10] C. Isensee and G. Horton, "Approximation of discrete phase-type distributions," in *Proceedings of IEEE 38th Annual Simulation Symposium*, San Diego: CA, pp. 99-106, Apr. 2005.
- [11] 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, pp. 1-7, May. 2019.
- [12] LoRa Alliance [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/>.
- [13] SEMTECH. LoRa End Devices and Indoor/Outdoor Gateway Specification and Parameters [Online]. Available: <https://www.semtech.com/>.



변승규(Seunggyu Byeon)

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



김종덕(Jong Deok Kim)

2003년 서울대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
2004년 ~ 현재 : 부산대학교 정보융합공학과 교수
※관심분야 : 무선통신, 사물인터넷, 무선 멀티미디어 방송 시스템, LPWAN