

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

변승규<sup>1,\*</sup> · 김종덕<sup>2</sup>

<sup>1</sup>신라대학교 · <sup>2</sup>부산대학교

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

Seunggyu Byeon<sup>1,\*</sup> · JongDeok Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Silla University · <sup>2</sup>Pusan National University

E-mail : sg0919@sillain.ac.kr / kimjd@pusan.ac.kr

### 요 약

LoRa는 처프 확산 스펙트럼과 대부모 트리 구조의 네트워크를 물리 계층에 도입하여 장거리 통신에서 신뢰성을 제공한다. 이 트리 네트워크에서 자식 노드는 여러 부모를 동시에 이용할 수 있기 때문에 네트워크에 동일 부하가 가해질 경우 게이트웨이의 수가 늘어날수록 패킷 전달률은 대수적으로 증가한다. 그러나 알로하와 흡사한 원시적 매체 접근 제어의 한계로 인해 이 환경에서도 부하가 증가할수록 네트워크의 이용률은 유사하게 하락한다. 본 논문에서는 같은 주파수를 같은 시간에 사용하는 공간 분할 다중 접근류의 접근 방식을 제안한다. 본 기법은 같은 시간, 다른 게이트웨이에서 서로 다른 패킷이 생존할 수 있도록 각 노드의 송신 전력을 수신 신호 세기의 분포에 기반하여 조절한다. 이른바 포획 효과의 의도적 활용은 자원에 배고픈 저 전력 광역 네트워크의 수용력을 향상시켰다. 전형적인 완전 배제적 무충돌 제어 접근과 비교해 타임 슬롯의 소모를 30-35% 절감하였다. 또한, 전력 제어의 효과로 인해 20-40%의 에너지 소모량이 절약됨을 확인하였다.

### ABSTRACT

LoRa is a physical layer technology that is designed to provide a reliable long-range communication with introducing CSS and with introducing a *loco parentis* tree network. Since a leaf can utilize multiple parents at the same time with a single transmission, PDR increases logarithmically as the number of gateways increases. Because of the ALOHA-like MAC of LoRa, however, the PDR degrades even under the *loco parentis* tree topology similarly to the single-gateway environment. Our proposed method is aimed to achieve SDMA approach to reuse the same frequency in different areas. For that purpose, it elaborately controls each TxPower of the senders for each message in concurrent transmission to survive the collision at each different gateway. The gain from this so-called capture effect increases the capacity of resource-hungry LPWAN. Compared to a typical collision-free controlled-access scheme, our method outperforms by 10-35% from the perspective of the total count of the consumed time slots. Also, due to the power control mechanism in our method, the energy consumption reduced by 20-40%.

### 키워드

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

### 1. 서 론

저 전력 광역 네트워크(LPWAN: Low-Power and Wide-Area Networks)는 수~수십km의 긴 거리에서 낮은 송신 전력, 낮은 데이터율로 통신할 수 있는

기술로 물류 추적과 스마트 시티, 도시 단위 계층 시스템과 같은 대규모 사물인터넷(Massive Internet of Things)의 청사진을 현실화할 유망 기술로 평가 받아왔다. LoRa는 장거리 통신을 위한 물리 계층 기술로, 처프 확산 스펙트럼(CSS: Chirp Spread Spectrum)과 대부모 트리(*loco parentis* Tree) 네트워크를 사용하여 사물인터넷 장치가 장거리에서

\* speaker

신뢰성 있는 통신을 할 수 있게 한다.

LoRa/LoRaWAN(LoRa Wide Area Networks)의 특수한 트리 구조는 모든 게이트웨이가 수신 또는 도청(Overhearing)한 메시지를 서버로 전달하여 패킷 전달률(PDR: Packet Delivery Ratio)을 향상시킬 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고 알로하와 유사한 MAC은 서비스 대상 노드의 수가 증가하면 네트워크의 이용률 측면에서 여전히 원시적인 수준을 벗어나지 못하게 한다[1, 2]. 최근에는 이 점을 착안하여 이용률(Utilization), 굿풋(Goodput), 심지어는 PDR과 전송 범위에까지 다양한 성능지표에서의 문제를 제기하는 연구들이 등장하고 있다[3-8].

시분할 다중 접근 방식(TDMA: Time Division Multiple Access)과 같은 제어 접근은 지정된 시간에 지정된 노드만 매체를 이용할 수 있기 때문에 높은 PDR을 보장할 수 있다. 그러나 PDR을 극대화하기 위해 노드 사이에 타임 슬롯을 배제적으로 할당할수록 공교롭게도 장거리 통신에 강인한 LoRa의 특성 때문에 노드가 휴면(Dormant) 상태로 보내야할 시간이 길어진다. 또한, 낮은 데이터율로 인한 신호의 긴 체공 시간(ToA: Time-on-air) 때문에 제어 접근의 기초적인 형태를 그대로 적용하면 네트워크는 자원 부족에 시달리게 된다.

본 논문에서는 제어 접근 방식에 송신 전력(TxPower) 제어를 적용하여 신뢰성을 떨어뜨리지 않으면서 이용률을 높이는 기법을 제안한다. 본 기법의 전력 제어 방법은 포획효과를 이용한다. 포획효과는 수신기에서 충돌하는 여러 신호 중 가장 강한 것이 살아남은 충돌의 특별한 사례이다. 또한, 본 기법은 포획 효과를 여러 게이트웨이에서 동시에 발생시킨다. 즉, 단일 채널에서 두 개 이상의 신호가 동시시간대에 전송될 때 각 게이트웨이에서 다른 신호가 살아남게 한다. 정리하면, 본 연구의 기여는 LoRa/LoRaWAN의 대부모 트리 구조를 위한 시공간 분할 다중 접근(STDMA: Space-Time Division Multiple Access)의 제안이다.

## II. LoRa/LoRaWAN의 기술적 특성

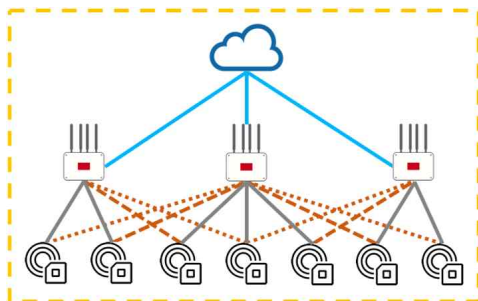


그림 1. LoRa의 대부모 트리 구조

트리란, 뿌리(Root) 노드를 제외한 모든 노드가 하나의 부모(Parent) 노드를 갖는 것을 말한다. 그

러나 LoRa / LoRaWAN(이하 LoRa)의 망구조는 일반적인 계층적 트리와는 달리 둘 이상의 게이트웨이가 동일한 노드로부터 동일한 데이터를 수신하여도 상위 노드로 전달할 수 있다. 그림 1은 LoRa의 트리구조를 나타낸다. 센서 장치, 게이트웨이, 서버는 각각 잎(Leaf), 부모, 뿌리 노드의 역할을 한다. 트리 구조에서는 센서에서 발생한 데이터를 서버로 전달하는 것이 실선으로 연결된 게이트웨이이지만, LoRa에서는 점선으로 연결된 부모의 형태도 메시지를 수신하여 서버로 중계하는 투명한 브릿지(Trans-parent Bridge)의 역할을 한다. 이러한 트리 구조를 여러 중간 노드가 부모 노드의 역할을 한다하여 대부모 트리라 명명한다.

LoRa CSS는 약한 송신 전력으로 최대 20km의 장거리를 전송할 수 있는 기술이다. 13 dBm의 낮은 송신 전력을 사용하여도 300MHz~1GHz 초극단파(UHF) 대역의 특성으로 원거리 통신이 가능하다. 또한, 시간에 따라 주파수가 선형으로 증가하는 처프는 장거리에 강인하여 주파수 변화율의 결정 인자인 확산 인자(SF: Spreading Factor)와 대역폭(BW: Band-Width)의 조합에 따라 수신 감도를 최저 -139dBm까지 지원할 수 있게 한다.

장거리의 강인한 특성은 바꿔 말하면 LoRa 신호는 도리어 광범위한 간섭을 유발할 수 있다는 의미이기도 하다. 혼잡 또는 포화 상태에 다다른 네트워크라면 아무리 대부모 트리 구조라고 해도 게이트웨이 근처에 위치한 노드의 강한 신호를 제외하고는 대부분의 수신에 불가능하다[4 - 9].

## III. 연구 동기

### 3.1. LoRa MAC의 성능과 포획 효과

LoRa MAC의 성능은 대부모 트리에서도 원시적인 수준을 벗어나지 못한다. 노드와 게이트웨이 수의 변화에 따른 처리율의 변화를 측정하기 위해 노드의 수를 100에서 2,000개까지 게이트웨이의 수를 최대 24개까지 늘려가며 실험을 진행하였다. 실험 공간에서 노드는 무작위로 배치되며 게이트웨이는 3개의 경우 삼각형, 나머지의 경우는 격자 형태로 배치하였다. 나머지 매개변수는 표 1과 같다.

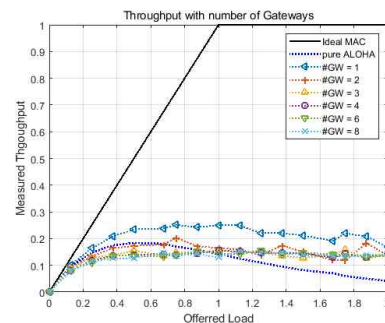


그림 2. LoRa MAC의 성능

노드 수와 게이트웨이 수가 증가함에 따라 높은 PDR이 관찰된다. 그러나 이를 처리율로 환산하면 그림 2에 나타난 바와 같이 다중 게이트웨이 환경에서 LoRa MAC은 알로하의 이론적 최대 성능 18.39%를 넘어서지 못한다. 주목해야 할 것은, 단일 게이트웨이일 때 더 높은 성능을 보이는 것이다. 관찰 결과 일부 충돌로 손실되어야 하는 패킷 중 일부가 포획 효과로 살아남는 것이 발견되었다. [1, 2]에 따르면 그 차는 6dB이며 프리앰블과 싱크 워드에 의한 동기화가 일어나기 전이어야 한다.

표 1. 처리율 측정을 위한 실험 환경변수 설정

TxPower	SF	BW	패킷 발생률	패킷 ToA
13dBm	12	125kHz	각 노드에서 초당 1개	1318.91ms

3.2. 포획 효과 극대화를 위한 제어 접근의 사용

신뢰성과 처리율을 동시에 제공할 수 있는 가장 간단한 방법은 TDMA를 사용하여 중앙의 서버가 하위 장치들의 접근 시간을 결정하는 것이다. 그러면 모든 게이트웨이로의 PDR이 낮은 장치를 다른 장치와 배제된 시간에 할당하여 다중 충돌로부터 지켜낼 수 있다. 이러한 배제적인 제어 접근 방식을 대부분 트리 환경에 그대로 적용할 경우 빠른 자원의 고갈을 유발한다. 그림 3은 이에 관한 예제이다. 가로축의 원형은 노드, 세로축의 삼각형은 게이트웨이, 사각형의 실선은 높은 PDR, 사각형의 점선은 낮은 PDR을 나타낸다. 노드 2와 3과 같이 게이트웨이를 유희(Idle) 상태에 있게 하거나 노드 4와 같이 시간 자원을 오래 점유하면서도 일부 게이트웨이를 유희 상태로 만든다.

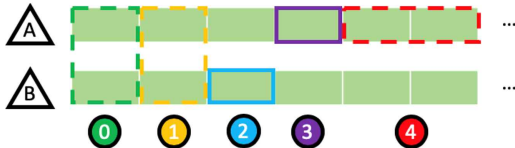


그림 3. 완전 배제 제어 접근의 예  
 동시 전송 가능한 상태의 노드를 같은 시간대에 할당하면 자원의 고갈 속도를 늦출 수 있다. 그림 3의 노드 2와 3의 전송은 상호 배제적이어서 동시에 전송해도 문제가 없다. 여기에 노드 0, 1과 같은 장치를 동시에 전송하는 방법을 고려할 수 있다. 예를 들어, 노드 0의 신호는 게이트웨이 A에서, 노드 1의 신호는 게이트웨이 B에서 포획 효과로 인해 수신되면 같은 시간에 두 노드를 할당할 수 있다. 이 중 게이트웨이 A에서의 수신 조건은 수식 (1)과 같이 표현된다.

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

$P_{rx_{ia}}$ 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 복조될 수 있다. 수식 (1)의 변수 중  $P_{rx}$ 는 송신 전력  $P_{tx}$ 와 경로

손실에 종속적이고 경로 손실은 노드의 위치에 종속적이므로  $P_{tx}$ 을 정교히 조절하면 게이트웨이에서 각기 다른 신호의 수신이 가능해진다.

IV. 프로토콜 설계

4.1. Expected Slot Count (ESX)

두 개 노드 이상의 동시 전송이 얼마만큼 이득이 있는지를 판단하기 위한 척도(Metric)는 존재하지 않는다. 기존의 PDR이나 기대 전송 횟수(ETX: Expected Transmission Count), 기대 전송 시간(ETT: Expected Transmission Time)는 단일 노드가 전송하는 패킷에 관한 척도일 뿐 두 노드 이상의 전송에 관한 내용은 담을 수 없다. 이에 우리는 기대 타임 슬롯 수(ESX: Expected timeSlot Count)를 새로운 척도로 정의한다. 이 척도는 동시에 전송하는 노드 집합의 구성 노드가 각각 하나의 패킷을 전송하기 위해 평균 몇 개의 타임 슬롯을 소모하는지를 의미한다.

여러 노드의 동시 전송에 관한 ESX를 정의하기 위해서는 개별 전송과 동시 전송에 관해 PDR을 구분할 필요가 있다. 개별 전송에 관한 Combined PDR(CPDR)은 하나의 노드로부터 여러 게이트웨이로의 PDR을 결합한 확률로 정의한다. 이 경우 그림 4(a)와 같이 노드 X와 Y가 완전히 상호 배제적인 전송을 하므로 각 노드의 ETX는 1/CPDR로 나타낼 수 있고, 따라서 두 노드의 ESX는 수식 (2)로 정의할 수 있다.

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

$$= \frac{1}{1 - \prod_{i=1}^N (1 - pdr_{xi})} + \frac{1}{1 - \prod_{i=1}^N (1 - pdr_{yi})} + \dots \quad (2)$$

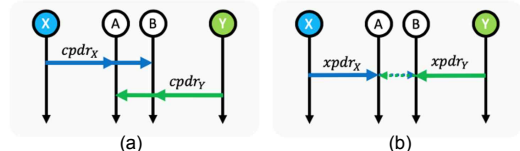


그림 4. 동시 전송의 PDR: (a)CPDR; (b)XPDR

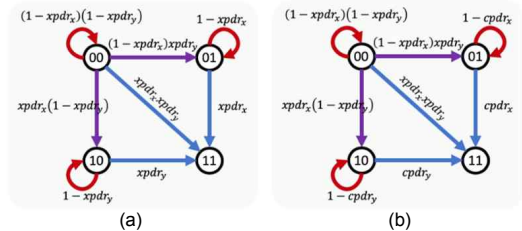


그림 5. 동시 전송의 상태전이 마르코프 체인: (a) no-ACK; (b) ACK

동시 전송에 관한 Crossed PDR(XPDR)은 노드 X와 Y가 동시 전송할 경우를 결합한 확률이다. 그림 4(b)와 같이 두 노드가 전송한 신호가 서로 간

접하므로 수식 (1)의 조건을 확률로 나타낸 것과 같다. 이 경우의 ESX는 CPDR의 것과는 동일한 관점에서 해석하기가 힘들다. 확률적 모델을 근거로 한 정확한 ESX의 유도를 위해서 마르코프 체인(Markov Chain)과 위상 유형 분포(DPTD: Discrete Phase-Type Distribution)[12]를 이용하여 상태 사이의 평균 전이 횟수를 구해야 한다. 패킷 수신 상태는 표 2와 같이 정의한다.

표 2. 두 노드가 동시 전송할 경우 상태 정의

상태	설명
00	X와 Y의 패킷을 모두 수신하지 않음
01	Y의 패킷만 수신한 상태
10	X의 패킷만 수신한 상태
11	X와 Y의 패킷을 모두 수신한 상태

두 개의 노드로 이루어진 집합에서 최초 상태는 00이다. 두 노드는 타임슬롯의 시작지점마다 패킷을 전송하고 각자의 패킷이 전달될 때까지 재전송한다. 그러나 둘 중 어느 쪽의 패킷이 전달되더라도 ACK가 없어 결과를 알 수 없다면 두 노드는 재전송을 할 것이다. 이 경우는 그림 5(a)로 표현되며 [12]를 이용하여 구한 ESX는 수식 (3)과 같다.

$$ESX_{\langle x, y \rangle} = \frac{1}{1 - (1 - XPDR_x)(1 - XPDR_y)} \times \left\{ 1 + \frac{(1 - XPDR_x)XPDR_y}{XPDR_x} + \frac{XPDR_x(1 - XPDR_y)}{XPDR_y} \right\} \quad (3)$$

만약 매 수신마다 ACK를 회신할 수 있다면 그림 5(b)와 같이 그림 5(a)를 수정할 수 있을 것이다. 이의 차이점은 ACK로 인해 10과 01의 상태에서 한 쪽이 재전송을 중지하면 다른 한 쪽은 간섭 없는 전송을 할 수 있는 것이다. 이 상태 그래프에서의 ESX는 수식 (4)와 같다.

$$ESX_{\langle x, y \rangle} = \frac{1}{1 - (1 - XPDR_x)(1 - XPDR_y)} \times \left\{ 1 + \frac{(1 - XPDR_x)XPDR_y}{CPDR_x} + \frac{XPDR_x(1 - XPDR_y)}{CPDR_y} \right\} \quad (4)$$

4.2. ESX 최적화를 위한 송신 전력 제어

ESX의 수치에서 가장 큰 비중을 차지하는 것은 XPDR이고 XPDR은 2.2절에서 언급한 바와 같이 송신 전력에 크게 종속적이다. 게이트웨이가 두 개, 노드가 두 개인 2x2 환경에서는 간단하게 패킷 하나씩을 성공시킬 수 있는 송신 전력 쌍을 찾으려 한다. 경로 손실 값이 모두 가우시안 분포의 변동 폭을 갖는다고 가정하면 두 XPDR의 합에 관한 함수 f는 수식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$f = Q\left(\frac{P_{th} - P_{rxXA} + P_{rxYA}}{\sqrt{\sigma_{XA}^2 + \sigma_{YA}^2}}\right) + Q\left(\frac{P_{th} - P_{rxXB} + P_{rxXB}}{\sqrt{\sigma_{XB}^2 + \sigma_{YB}^2}}\right) \quad (5)$$

수식 (5)에 대한 최적 해를 송신 전력 제어에 활용하기 위해서는 해가  $P_{tx} - P_{txy}$ 로 표현되어야 한다.  $P_{rx}$ 를  $P_{tx}$ 와 경로 손실, 가우시안 함수로 치환하면,  $P_{tx} - P_{txy}$ 의 값을 구할 수 있으며 유전 알고리즘을 이용하여 모든 노드와 전체 네트워크에 대해 전역 최적 해를 찾아낸다.

V. 실험 및 평가

5.1. 실험 환경과 성능 척도

제안 기법의 성능을 ESX와 에너지 관점에서 분석한다. 성능 평가 시나리오는 크게 워밍업 구간, 평가 구간으로 나눈다. 전자 구간에서는 네트워크 서버가 각 노드에게 비콘 신호를 보내게 하여 게이트웨이까지의 경로 손실 분포를 얻고, 후자 구간에서는 실제 소모된 타임슬롯과 책정된 송신 전력을 측정한다.

실험 환경은 최대 3kmx3km의 시뮬레이션 환경으로 (1/3, 1/2)과 (2/3, 1/2)의 위치에 게이트웨이를 배치하고 각 게이트웨이를 중심으로 가우시안 분포를 이루는 환경이다. LoRa CSS의 설정은 SF12, BW125이고 패킷의 페이로드는 32바이트로 패킷의 ToA가 1810.432ms가 된다.

실험의 단순화를 위해 하나의 타임슬롯을 2s로 설정하고 [13]의 방법을 이용하여 ACK 집계(Aggregation)이 가능하다고 가정한다. 송신 전력의 설정 구간은 실제로는 정수만을 사용할 수 있고 기본 값으로 0 dBm, 7 dBm, 14 dBm을 Low, High, Maximum으로 제공하지만 본 실험에서는 0 dBm에서 14 dBm까지 0.2 dB 단위의 값을 사용할 수 있다고 가정한다. 그래야만 전력 제어로 인한 효율성을 극대화할 수 있기 때문이다.

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

노드 수를 100개로 고정하고 시뮬레이션 공간의 크기를 100m x 100m에서 3,000m x 3,000m까지 늘려가며 실험을 진행하였다. 해당 환경에서의 실험 결과는 그림 6과 같다. 결과, 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 얻을 수 있었다.

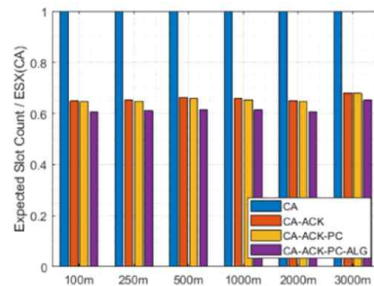


그림 6. 시간 효율 실험 결과

### 5.3. 에너지 효율 평가

본 실험에서도 4.2절의 실험과 마찬가지로 노드 수를 100개로 고정하고 시뮬레이션 공간의 크기를  $100\text{m} \times 100\text{m}$ 에서  $3,000\text{m} \times 3,000\text{m}$ 까지 늘려간다. 실험 결과 그림 7과 같은 송신 전력의 분포를 보인다. 자세히 살펴보면 10%의 노드가 6dBm 이하의 송신 전력을 사용한 것으로 기록이 되는데, 이들은 최대치인 14dBm에 비해 최소 85%의 에너지 절감 효과를 갖게 된다. 뿐만 아니라 나머지 40% 노드도 20-85%의 에너지 절감 효과를 얻는다.

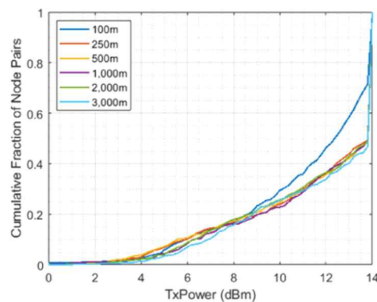


그림 7. 전력 제어 실험 결과

## VI. 결론

본 논문에서는 제어 접근과 STDMA에 기반하여 시간 효율과 에너지 효율을 동시에 달성할 수 있는 LoRa 네트워크의 공간 재사용 기법 향상을 제안하였다. 본 연구진은 LoRa 환경에서 네트워크 자원이 중복 패킷과 충돌로 인해 낭비되는 것을 인지하였고 특히 동일 패킷이 여러 게이트웨이에서 다중 충돌하는 것을 전력 제어를 통해 방지하여 대부분 트리 구조의 특성을 크게 살릴 수 있었다.

## References

- [1] Bor, Martin; Voigt, Thimo; Alonso, Juan M. "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, 2016
- [2] Bor, Martin, John Vidler, and Utz 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, 2016.
- [3] Pop, Alexandru-Ioan; Raza, Usman; Kulkarni, Parag; Sooriyabandara, Mahesh. Does bidirectional traffic do more harm than good in LoRaWAN based LPWA networks?. In: *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, 2017, 1-6.
- [4] Vejlgard, Benny; Lauridsen, Mads; Nguyen, Huan; Kovacs, Istvan Z.; Mogensen, Preben; Sorensen, Mads. Interference impact on coverage and capacity for low power wide area IoT networks. In: *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017 IEEE*, 2017, 1-6.
- [5] Georgiou, Orestis; Raza, Usman. Low power wide area network analysis: Can LoRa scale?. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2017, 6(2), 162-165.
- [6] Augustin, Aloys; Yi, Jiazi; Clausen, Thomas; Townsley, William Mark. A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, 2016, 16(9), 1466.
- [7] Petajarvi, Juha; Mikhaylov, Konstantin; Roivainen, Antti; Hanninen, Tuomo; Pettissalo, Marko. On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. In: *ITS Telecommunications (ITST), 2015 14th International Conference on*. IEEE, 2015, 55-59.
- [8] Voigt, Thimo; Bor, Martin; Roedig, Utz; Alonso, Juan. Mitigating inter-network interference in lora networks. *arXiv preprint arXiv:1611.00688*, 2016.
- [9] Croce, D., Gucciardo, M., Mangione, S., Santaromita, G., & Tinnirello, I. (2018). Impact of LoRa imperfect orthogonality: Analysis of link-level performance. *IEEE Communications Letters*, 22(4), 796-799.
- [10] LoRa. Available online: <https://lora-alliance.org/>. (accessed on 7th January 2019)
- [11] SEMTECH. Available online: <https://www.semtech.com/>. (accessed on 7th January 2019)
- [12] Isensee, Claudia; Horton, Graham. Approximation of discrete phase-type distributions. In: *Simulation Symposium, 2005. Proceedings. 38th Annual*. IEEE, 2005. 99-106.
- [13] Hasegawa, Y., & Suzuki, K. (2019, May). A Multi-User ACK-Aggregation Method for Large-Scale Reliable LoRaWAN Service. In *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-7). IEEE