

저전력 광대역 무선 네트워크를 위한 포화 트리 기반 다중 홉 통신 방식의 에너지 소비량 분석 연구

이정욱, 김용훈, 김기선

광주과학기술원

{julee1017, mizpah, kskim}@gist.ac.kr

Energy consumption analysis of LPWANs with multi-hop perfect tree architecture for IoT applications

Junguk Lee, Yonghun Kim and Kiseon Kim

Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

요약

사물인터넷(Internet-of-Things, IoT)을 통한 해상 무선 네트워크 구축의 필요성에 따라 저전력 광대역 네트워크(Low Power Wide Area Networks, LPWANs) 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 본 논문에서는 포화 트리 기반의 무선 네트워크 환경에서 대표적인 해상 전파 모델인 2-RAY 모델을 고려하고, 거리 별 에너지 소비량 및 통신 방식별 에너지 소비량에 대해 비교 분석한다. 모의실험 결과, 거리가 멀어질수록 다중 홉 방식의 에너지 소비량 감소가 두드러졌으며, 광대역 네트워크 상황($d_{max} = 25 \text{ km}$)에서 다중 홉 통신 방식이 단일 홉 통신 방식에 비해 상당히 낮은 에너지 소비량을 보였다. 이를 통해 해상 무선 네트워크 상황에서 다중 홉 통신 방식을 통해 에너지 소비량의 효율성이 개선된 LPWANs 을 구성할 수 있다.

I. 서론

최근 해양 어업에서 생산성 증대 및 효율적인 어구 관리를 위하여 사물인터넷(Internet-of-Things, IoT) 기반의 저전력 광대역 네트워크(Low Power Wide Area Networks, LPWANs) 기술이 크게 주목받고 있다 [1], [2]. 그러나 LPWANs 기술은 단일 홉 통신 방식을 사용함으로써, 광대역 통신이 요구되는 해상 무선 네트워크 상황에서 에너지 불균형을 초래할 수 있다. 배터리로 동작하는 노드의 특성상 상향 통신 상황에서 기지국으로부터 보다 멀리 떨어진 노드는 근거리에 있는 노드보다 과도한 에너지를 소비하게 되고, 결과적으로 노드의 수명이 줄어, 전체적인 네트워크의 수명이 단축된다. 이에 논문 [3]에서는 다중 홉 통신을 이용해 과도한 에너지 소비를 줄이는 방안을 제시하였다. 본 논문에서는 에너지 소비를 줄이기 위해, 포화 트리 기반의 광대역 무선 네트워크 구조의 상향 통신 상황에서 단일 홉 대신 에너지 불균형을 줄일 수 있는 다중 홉 통신 방식을 사용하고, 이를 에너지 소비량의 관점에서 비교 분석하고자 한다. 또한, 다중 홉 통신이 해상 네트워크 환경에 미치는 영향 분석을 통해, 효율적인 에너지 소비 방안을 고찰한다.

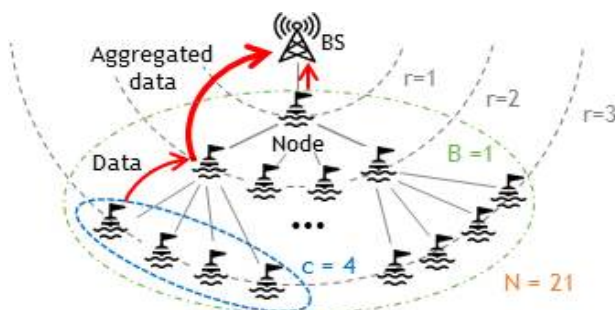


그림 1. 사물인터넷 기반 포화 트리 무선 네트워크 시나리오

II. 무선 네트워크 구성을 위한 구조 및 전파 모델

포화 트리 기반 무선 네트워크를 구성하기 위해 그림 1과 같은 네트워크 구조를 사용하였다 [3]. 노드는 기지국을 중심으로 균일한 거리의 링 형태의 분포로 배치된다. 노드의 연결은 포화 트리 구조로써, 이전 링에서 다음 링까지의 연결은 자식의 수에 따라 결정된다. 네트워크를 구성하는 링의 수 R 과 자식의 수 c 는 노드의 총 개수 N 과 연관이 있으며, 트리 구조의 수 B 와 함께 다음 수식을 만족하도록 그 값을 다음과 같이 결정한다 [3]:

$$N = B \sum_{r=1}^R c^{r-1} \quad (1).$$

본 연구에서는 전파 모델로서, 논문 [3] 의 802.11ah pico/hot zone 모델과 달리, 해상 환경을 위해 해상 무선 네트워크에서 통상적으로 25 km 까지 사용되는 2-RAY 모델을 고려하였다 [4]. 특히, 모의실험의 단순화를 위하여 다양한 해상 요인의 영향은 거의 없으며, 해수면에서 반사되는 신호의 영향만 있다고 가정하였다. 2-RAY 모델의 수식은 다음과 같다:

$$L_{2-ray} = -10 \log_{10} \left\{ \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left[2 \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \right]^2 \right\} \quad (2).$$

III. 노드의 에너지 소비량

노드의 총 에너지 소비량을 구하기 전에 계산의 단순화를 위해 몇 가지 가정을 하였다. 통신 방식은 이상적인 TDMA를 가정하며, 통신대기 및 채널 접속에 따른 에너지 소비량은 없다고 가정한다. 패킷을 중계할 때는 패킷 취합이 가능하며 이를 사용한다. 마지막으로 네트워크 경로는 정적으로 결정되며 경로 계산에 따른 에너지 소비는 없다. 이러한 가정에 의해 노드의 총 에너지 소비량은 송신 에너지 소비와 수신 에너지 소비의 합으로

로 구할 수 있다 [3]. r 번째 링에 위치한 노드의 송신 상태에서 패킷 길이가 L_{DP} 인 패킷을 n_{DP}^{tx} 개 송신할 때 소비되는 에너지는 다음과 같다:

$$e_{tx}(r) = \left(n_{DP}^{tx} \frac{L_{DP}}{s_{tx}} \right) I_{tx}(s) V_{DD} \quad (3).$$

이때 s_{tx} 는 패킷 전송 속도, $I_{tx}(s)$ 는 패킷 전송 속도에 따른 전류 소모량, V_{DD} 는 노드의 전압을 나타낸다. 이 때 n_{DP}^{tx} 의 값은 수신 받은 데이터와 노드에서 생성된 데이터를 취합하여 패킷화 하였을 때의 개수이다. 수신 상황에서는 경로에 따라 노드에 수신되는 패킷의 양이 다르다. 따라서 경로에 따른 수신 패킷의 양을 계산하고 이를 통해 수신 에너지를 구해야 한다 [3]. 노드가 r 링에 위치하였을 때 수신에 사용되는 에너지는 아래와 같다:

$$e_{rx}(r) = \left(\sum_{i=r}^{R-1} A_{(r,i+1)} c^{(i-r+1)} n_{DP}^{tx}(i+1) \frac{L_{DP}}{s_{tx}(i+1)} \right) I_{rx} V_{DD} \quad (4).$$

여기서 A 는 $A = \{A_{ij}\}_{i \in \{1, R\}, j \in \{1, R\}}$ 행렬이며, 경로에 따른 데이터 수신 여부를 나타낸다. $n_{DP}^{tx}(i+1)$ 는 $i+1$ 번째 링에서 r 번째 링으로 패킷을 전송할 때의 패킷의 수이며, A 와 c 값과 함께 사용하여 총 수신되는 패킷의 양을 계산할 수 있다. $s_{tx}(i+1)$ 는 $i+1$ 번째 링에서의 패킷 전송 속도이며 I_{rx} 는 수신 상황에서 노드의 전류 소모 값이다. 최종적으로 r 번째 링 상의 노드의 총 에너지 소비량은 다음과 같이 계산한다:

$$e(r) = e_{tx}(r) + e_{rx}(r) \quad (5).$$

IV. 모의실험을 위한 포화 트리 구조의 환경 설정

모의실험을 위한 환경 변수의 값들은 다음과 같다: $B = 1$, $h_t = 2.5 m$, $h_r = 30 m$, $d_{max} \in \{10 \leq d_{max} \leq 28\} km$, $(R, c) \in \{(3, 10), (4, 5), (5, 3)\}$. (R, c) 의 값은 노드의 수가 최소 100 이상인 경우로 정하였다. 통신 프로토콜은 LoRa 통신 기술을 사용하였으며, 이에 따라 주파수는 국내 LoRa 주파수 대역 중 하나인 922.1MHz 값을 사용하였다. 하드웨어는 LoRa 기술이 사용 가능한 SX1276의 송수신기 사양을 사용하였으며[5], 값은 다음과 같다: $V_{DD} = 3.3 V$, $I_{tx} \in \{20, 28, 90\} mA$, $I_{rx} = 10.3 mA$, $L_{DP} = 65 bytes$, $s_{tx} \in \{293, 537, 977, 1758, 3125, 5469, 9375\} bps$. 각 노드는 일정한 15bytes의 데이터를 생성한다.

V. 모의실험 결과

먼저 최대 통신거리에 따른 다중 홉의 성능을 비교 분석하기 위해, 최대 통신거리에 따른 통신 방식별 노드의 에너지 소모량을 비교하였다. 그림 2를 통하여 거리가 16 km 이하인 경우에는 두 방식에 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 그러나 통신거리가 16 km를 넘어가는 경우부터 단일 홉 방식과 다중 홉 방식의 E_{bt} 값에서 작은 차이(0.5204mJ)를 볼 수 있으며, 20 km를 넘어가는 경우 다중 홉을 사용할 때 최소 8.12% 이상 개선된 에너지 소비량을 보임을 확인할 수 있다. 다음으로 R 과 c 값의 변화에 따른 에너지 소모량을 비교 분석하기 위해, 거리를 고정함($d_{max} = 25 km$) 상황에서 (R, c) 값에 따른 통신 방식별 노드의 에너지 소모량을 비교하였다. 주어진 구조에서 최대 에너지를 소모하는 노드의 총 에너지 소모량(E_{bt})과 그에 따른 링 번호(r^*)는 다음과 같이 계산하였다.

$$E_{bt} = \max_r e(r) \quad (6)$$

$$r^* = \operatorname{argmax}_r e(r) \quad (7)$$

모의실험 결과는 그림 3과 같이 나타난다. $R = 3$, $c = 10$ 인 상황에서 다

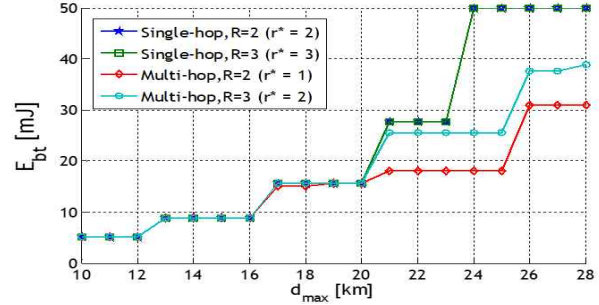


그림 2. 거리별 최대 에너지를 소모하는 노드의 총 에너지 소모량

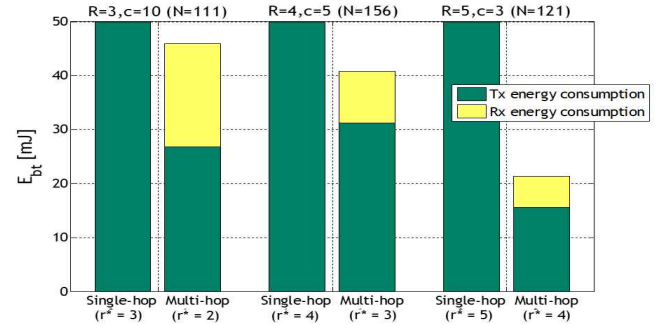


그림 3. 구조별 최대 에너지를 소모하는 노드의 총 에너지 소모량

중 홉이 단일 홉에 비해 E_{bt} 의 값이 8.07% 감소한 것을 볼 수 있다. $R = 4$, $c = 5$ 인 경우에는 18.30%, $R = 5$, $c = 3$ 인 경우에는 57.24% 감소된 에너지 소비량을 보였으며, 그림 3을 통해 그 경향성을 확인할 수 있다. 이를 통해 $d_{max} = 25 km$ 인 광대역 통신 상황에서는 다중 홉 통신 방식을 사용하는 것이 에너지 소비량 관점에서 효율적이라는 것을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 광대역 무선 네트워크의 상향 통신 환경에서 포화 트리 기반의 단일 홉 통신과 다중 홉 통신 방식 별 에너지 소비량을 비교하였다. 기지국으로부터 통신 거리가 먼 광대역 무선 네트워크 상황에서는 다중 홉 통신 방식을 사용하는 것이 에너지 소비량 관점에서 효율적이다. 그러나 보다 현실적인 해상 무선 네트워크 환경 구축을 위해, 임의의 위치에 분포되어 있는 해상 노드를 고려한 다중 홉 통신 방식의 에너지 소비량을 비교 분석하는 확장 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2017년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(어구 자동식별 모니터링 시스템 개발).

참고 문헌

- [1] Hao Wang et al., "Big data and industrial Internet of Things for the maritime industry in Northwestern Norway," in *Proc. IEEE Region 10 Conference*, 2015.
- [2] Anum Ali et al., "Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 83, 2017.
- [3] S. Barrachina-Munoz et al., "Multi-hop communication in the uplink for LPWANs," *Computer Networks*, vol. 123, 2017.
- [4] Sumayya Balkees P.A. et al., "A survey based analysis of propagation models over the sea," in *Proc. Advances in Computing, Communications and Informatics*, 2015.
- [5] "SX1276/77/78/79 - 137MHz to 1020MHz Low Power Long Range Transceiver," Semtech Corporation, Rev.4, 2015.