

무선 센서 네트워크를 위한 하이브리드 Slotted-ALOHA

권형준*, 정동근^o

Hybrid Slotted-ALOHA for Wireless Sensor Networks

Hyung Jun Kwon*, Dong Geun Jeong^o

요약

Slotted-ALOHA(S-ALOHA)와 그 변형들은 무선 센서 네트워크의 채널 액세스 방식으로 널리 사용되고 있다. S-ALOHA의 성능은 전송 충돌 해소 방식에 크게 좌우된다. 기존의 이진 지수 백오프 기법을 사용하는 S-ALOHA는 부하가 적을 때는 우수한 성능을 나타내는데 반해, 강화학습이 적용된 ALOHA-Q는 과부하 상황에서 안정적인 서비스를 제공한다. 본 연구에서는 두 방식의 장점을 모두 이용하는 하이브리드 기법을 제안한다. 제안된 기법에서는 동적으로 변화하는 네트워크의 부하에 따라 두 기법 중 하나가 적절하게 선택, 사용된다. 시뮬레이션을 통하여 제안하는 기법이 전체 부하 범위에서 최적의 동작을 수행함을 보인다.

Key Words : Wireless sensor networks, Slotted-ALOHA, exponential backoff, Q-Learning, reinforcement learning
ABSTRACT

The Slotted-ALOHA (S-ALOHA) and its variants have been widely used as the channel access protocol for the wireless sensor networks. The performance of the S-ALOHA systems depends largely on the collision resolution scheme. The S-ALOHA with the conventional binary exponential backoff scheme well operates in underload condition, while the ALOHA-Q being applied the reinforcement learning provides a

good performance in heavy load condition. In this letter, we propose a hybrid scheme that dynamically selects the operation mode between above two schemes according to the load level. The simulation results show that the proposed scheme provides best performance in overall load range.

1. 서론

최근 군사, 산업, 환경, 의료 등 다양한 분야에서 응용되고 있는 무선 센서 네트워크(WSN: Wireless Sensor Network)는 주위의 이벤트를 감지하여 정보를 얻는 다수의 센서 노드와 센서 노드들로부터 정보를 수집하여 클라우드로 전달하는 싱크 노드(또는 게이트웨이)로 구성된다. 일반적인 센서 노드는 자체 배터리로 전력을 공급받는 초소형 기기이기 때문에 정보의 처리 및 저장 등에 제약이 있더라도 에너지 효율이 높아야한다. 따라서 WSN의 통신 채널 액세스 프로토콜로는, 단순하면서도 에너지 절감에 적합한 ALOHA나 Slotted-ALOHA(S-ALOHA) 및 그 변형들이 NB-IoT, Sigfox, LoRa, Weightless 등 여러 시스템에서 널리 사용되고 있다^[1].

S-ALOHA의 성능은 전송 충돌 해소 방식에 크게 좌우된다. 기존의 S-ALOHA는 재전송을 위해 이진 지수 백오프(BEB: Binary Exponential Backoff)^[2] 기법을 사용한다. 본 연구에서는 이러한 S-ALOHA를 ALOHA-BEB라 칭한다. ALOHA-BEB 시스템은 부하가 적을 때는 전송 지연(delay)이 짧은 우수한 성능을 나타낸다. 그러나 수십 개 이상의 다수의 센서 노드들로 구성된 특정한 종류의 WSN에서는 주기적으로 과부하 상황이 연출될 수 있고, 이 경우 전송 충돌이 증가하여 심각한 성능저하가 발생한다.

이 문제를 해결하기 위해, 최근에는 S-ALOHA에 기계학습을 적용하는 방안이 활발히 연구되고 있다. 그 예로서, 지도학습을 이용하여 구한 최적의 경쟁 윈도우 크기를 사용하는 백오프 기법을 적용한 S-ALOHA^[3]나, 강화학습 알고리즘인 큐러닝(Q-Learning)을 적용하여 과부하 상황에서 WSN의 성능을 크게 향상시킨 ALOHA-Q^[4]를 들 수 있다.

※ This work was supported by Hankuk University of Foreign Studies Research Fund of 2020 and by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2019R1F1A1062597).

• First Author : (ORCID:0000-0001-9007-5871)Department of Electronics Engineering and Applied Communications Research Center, Hankuk University of Foreign Studies, hjkwon91@hufs.ac.kr, 학생(석사과정), 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-7515-7422)Department of Electronics Engineering and Applied Communications Research Center, Hankuk University of Foreign Studies, dgejong@hufs.ac.kr, 정교수, 종신회원

논문번호 : 202008-192-B-LU, Received August 11, 2020; Revised September 9, 2020; Accepted September 10, 2020

ALOHA-Q는 프레임을 기반으로 동작한다. 각 센서 노드는 한 프레임 시간 동안 하나의 슬롯에서만 전송을 시도한다. 따라서 트래픽이 간헐적으로 발생하거나 또는 하나의 센서 노드에서만 다량의 데이터가 생성되는 경우, 프레임 내 많은 슬롯이 낭비될 수 있다. 이러한 전송 지연은 신속한 전달이 요구되는 event-driven 데이터를 처리할 때 큰 단점이 된다.

본 연구에서는 ALOHA-BEB와 ALOHA-Q의 장점을 함께 취하기 위한 하이브리드 기법을 제안하고, 그 성능을 평가한다.

II. WSN의 S-ALOHA 통신 모델

편의상 N 개의 센서 노드와 하나의 싱크 노드로 구성된 단일 홉 WSN을 고려한다. 각 센서 노드는 한 슬롯 동안 하나의 패킷을 전송하며, 패킷이 생성되면 자신의 송신큐에 저장해두었다가 차례대로 전송한다. 전송 실패는 채널 불량 등과 같이 여러 원인에 의해 발생할 수 있으나, WSN 환경을 감안하면 채널 액세스 방식의 설계에 있어서는 모든 전송 실패를 충돌의 결과로 간주하여도 큰 무리가 없다. 각 슬롯에서의 전송 결과는 전송을 시도한 노드의 수에 따라, 하나일 때는 성공(S: Success), 둘 이상일 때는 충돌(C: Collision), 전송한 노드가 없을 때는 휴면(I: Idle)으로 분류된다. 각 센서 노드는 충돌이 발생한 패킷의 재전송을 시도하나, 최대 재전송 허용 횟수를 초과하면 패킷을 폐기한다.

본 연구에서 고려하는 ALOHA-BEB 기법에서 각 센서 노드는 자신만의 경쟁 윈도우(CW: Contention Window)의 크기를 관리하며, 그 범위 내에서 임의로 선택된 백오프 시간만큼 기다렸다가 패킷을 전송한다. 패킷 전송 후 충돌이 발생할 때마다 CW의 크기를 두 배로 증가시켜서 충돌확률을 낮추며, 전송에 성공하면 최소 경쟁 윈도우(CW_{min})로 감소시킨다.

한편, ALOHA-Q는 프레임 기반으로 동작하며, 하나의 프레임은 다수의 슬롯으로 구성된다. 각 센서 노드는 한 프레임 당 하나의 슬롯을 선택하여 전송을 시도한다. 또한, 한 프레임 내의 각 슬롯에 대해 별도의 신호도 Q 를 가진다. $Q_t(n,i)$ 가 t 번째 프레임에서 슬롯 i 에 대한 센서 노드 n 의 신호도를 나타낸다고 하자. 모든 Q 값은 초기값 0으로 시작해 매 전송마다 다음과 같은 강화학습 알고리즘에 의해 업데이트된다^[4].

$$Q_{t+1}(n,i) = Q_t(n,i) + \rho(r - Q_t(n,i)) \quad (1)$$

여기에서 $\rho(0 < \rho < 1)$ 는 학습률(learning rate)을 나타내며, r 은 전송 결과에 대한 보상 또는 불이익을 나타낸다. 본 연구에서는 r 의 값으로 전송 성공 시 +1, 충돌 시 -1을 사용한다. 각 센서 노드는 Q 값이 가장 높은 슬롯을 선택하여 전송을 시도하며, 최대 Q 값을 가진 슬롯이 둘 이상 존재하는 경우에는 임의로 한 슬롯을 선택하여 전송한다. 프레임 크기가 N 슬롯보다 클 경우, 학습이 완료된 후에는 모든 노드가 경쟁 없는 각자의 전용 슬롯을 찾아서 무선자원을 안정적으로 사용하게 된다.

III. 제안하는 하이브리드 기법

본 연구에서는 저부하에서는 ALOHA-BEB 방식으로 동작하며, 고부하에서는 ALOHA-Q 방식으로 동작함으로써 두 방식의 장점을 모두 이용하는 하이브리드 기법을 제안한다. 이후 이 두 방식의 동작모드를 각각 ‘BEB 모드’ 및 ‘Q 모드’라 칭한다.

그림 1에서 보듯이 제안한 기법에서 기본적인 시간 단위는 동작모드와 상관없이 하나의 패킷이 전송되는 슬롯 시간이다. 이에 덧붙여, Q 모드의 동작에서는 다수의 슬롯이 하나의 프레임을 이룬다. BEB 모드로 동

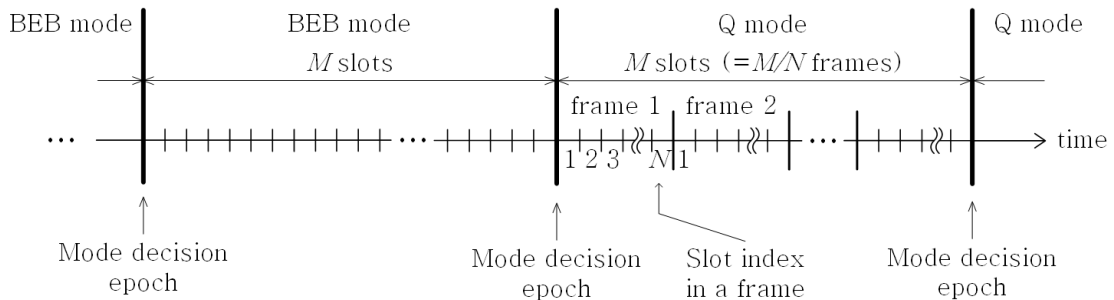


그림 1. 제안하는 기법의 시간 구조
Fig. 1. Time structure of proposed scheme

작하는 동안에는 프레임 구조가 없다. 한편, 모드결정 주기라 칭하는 M 슬롯 길이의 일정주기마다 측정된 부하의 강도에 따라 BEB 모드와 Q 모드 중 하나의 동작모드가 선택되어 다음 주기 동안 선택된 모드로 동작한다.

이를 위해 싱크 노드는 매 주기마다 시스템 부하를 추정한다. n_A 를 한 주기 내에서 전송 결과가 A ($\in \{S, C, I\}$)인 슬롯의 개수라 할 때, 시스템의 상태는 벡터 (n_S, n_C, n_I) 로 나타낼 수 있으며 이에 대응하는 트래픽 강도(intensity)를 다음과 같이 정의한다.

$$T(n_S, n_C, n_I) = \frac{n_S + n_C - n_I}{M} \quad (2)$$

싱크 노드가 BEB 및 Q 등 두 동작모드 사이의 전환을 판단하며, 선택된 모드를 센서 노드들에게 통보한다. 모드전환을 설계함에 있어서 주의할 것은 두 모드에서 전송 충돌의 의미와 빈도가 서로 다르다는 점이다. 이를 반영하여, 두 개의 임계값(threshold)을 사용한다. BEB 모드로 동작하던 중 한 주기 동안 측정된 트래픽 강도가 사전에 정해진 Th_1 보다 높은 경우, 다음 주기의 동작모드를 Q 모드로 전환한다. 반면 Q 모드로 동작하던 중 트래픽 강도가 Th_2 보다 낮은 경우, BEB 모드로 전환한다.

Th_1 와 Th_2 는 이론적으로 정할 수도 있고, 오프라인 실험이나 시뮬레이션을 통해 결정할 수도 있다. 예를 들어 동일한 부하를 ALOHA-BEB 시스템과 ALOHA-Q 시스템에 가하는 시뮬레이션을 낮은 부하에서 시작하여 부하를 높여가며 반복 수행하여, 처음으로 ALOHA-Q의 성능이 ALOHA-BEB보다 좋아질 때 ALOHA-BEB에서 측정된 $T(n_S, n_C, n_I)$ 의 값을 구한다. 위의 과정을 여러 차례 되풀이하여 얻어진 평균을 Th_1 로 사용할 수 있다. 이와 유사한 방법으로 Th_2 도 얻을 수 있다.

IV. 성능 평가

제안하는 기법의 성능 분석을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 ALOHA-Q의 프레임 크기를 N 으로 설정하였다(실제에서는 기존 방법^[5] 등 이용 가능). Th_1 와 Th_2 는 실험적 방법으로 구하였다. 시스템 부하가 λ (패킷/슬롯)인 경우, 각 센서 노드에서는 발생률이 λ/N 인 지수분포에 따라 패킷이 생성된다. 표 1은 시뮬레이션을 위한 파라미터를 나타낸다.

표 1. 성능 분석을 위한 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters for performance evaluation

Parameters	Values
The number of sensor nodes, N	50 or 200
ALOHA-Q frame size (slots)	50 or 200
Scheme selection period, M (slots)	10,000
ALOHA-Q learning rate, ρ	0.001
Minimum contention window size, CW_{min}	4
Retransmission limit	6
Pre-training time for Q (slots)	1,000,000
Performance measuring time (slots)	1,000,000

ALOHA-BEB, ALOHA-Q 및 제안된 기법 외에도, 일정한 전송확률로 패킷을 전송하는 가장 기본적인 S-ALOHA(ALOHA-FIX)의 성능도 함께 비교하였다. ALOHA-FIX는 ALOHA-BEB에서 경쟁 윈도우 크기를 특정 값으로 고정하는 방식에 해당된다(예컨대 경쟁 윈도우 크기 CW 는 전송확률 $1/CW$ 에 대응). 본 논

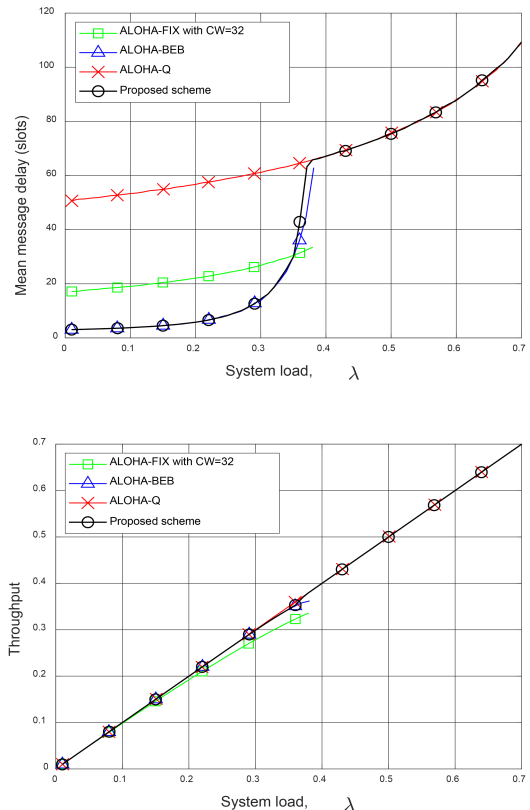


그림 2. $N=50$ (a) 전송 지연 (b) 시스템 처리량
Fig. 2. $N=50$ (a) transmission delay (b) system throughput

V. 결론

본 연구에서는 시스템 부하에 따라 BEB 모드와 Q 모드를 적절하게 선택하여 사용하는 하이브리드 S-ALOHA 기법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 보인 제안된 기법의 탁월한 성능은 다양한 응용 가능성을 시사한다. 다만 여러 가지 규모의 WSN에 실제로 적용하기 위해서는 센서 노드 규모(N)에 따른 적절한 모드 선택 주기(M)를 찾아야 한다. 한편, 전송 지연과 시스템 처리량 외에도, 채널 액세스 기법이 WSN의 다른 성능(예를 들어 센서 노드의 에너지 소모량 등)에 미치는 영향도 살펴볼 필요가 있다. 이러한 사항들은 후속 연구의 주제가 될 것이다.

References

- [1] A. Laya, et al., "Goodbye, ALOHA!," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2029-2044, Apr. 2016.
- [2] D. G. Jeong and W. S. Jeon, "Performance of an exponential backoff scheme for slotted-ALOHA protocol in local wireless environment," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 44, no. 3, pp. 470-479, Aug. 1995.
- [3] H. J. Kwon, J. H. Lee, and D. G. Jeong, "Machine learning based backoff scheme for Slotted-ALOHA," *J. KICS*, vol. 45, no. 1, pp. 34-37, Jan. 2020.
- [4] Y. Chu, et al., "Application of reinforcement learning to medium access control for wireless sensor networks," *Eng. Appl. Artificial Intell.*, vol. 46, pp. 23-32, Nov. 2015.
- [5] Y. Yan, et al., "Distributed frame size selection for a Q learning based slotted ALOHA protocol," in *Proc. ISWCS 2013*, pp. 1-5, Ilmenau, Germany, Aug. 2013.

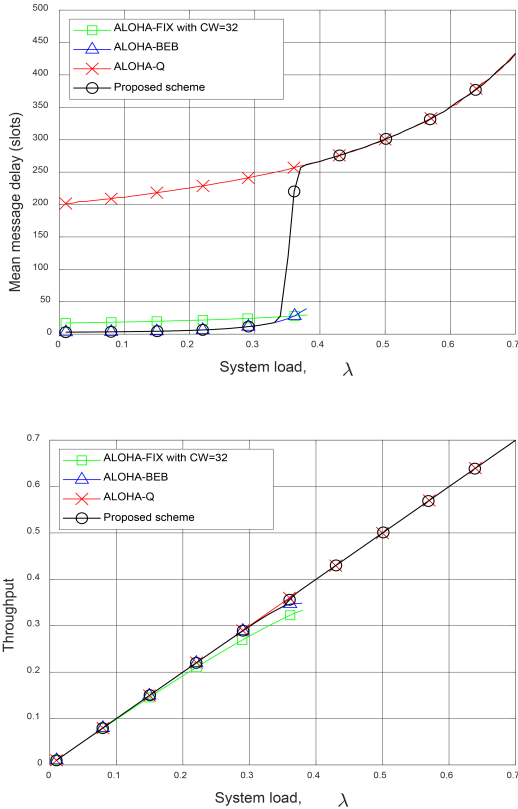


그림 3. $N=200$ (a) 전송 지연 (b) 시스템 처리량
 Fig. 3. $N=200$ (a) transmission delay (b) system throughput

문에서는 그래프의 혼잡을 피하기 위해, BEB에서 취할 수 있는 CW 범위의 중간 값인 CW=32에 대한 ALOHA-FIX의 결과만 포함하였다.

그림 2와 3은 각각 $N=50$, $N=200$ 일 때, 기존의 기법들과 제안된 기법의 전송 지연과 시스템 처리량 (throughput)을 비교한 그래프이다. 그림 2(b)와 3(b)에서도 쉽게 확인할 수 있듯이, N 이 충분히 큰 경우 ALOHA-BEB의 이론적인 최대 전송 효율은 $e^{-1} (\approx 0.368)$ 에 근접한다. 따라서 그림 2와 3의 부하 구간 $0.35 < \lambda$ 는 이미 과부하 상황이고, 그림 2(a)와 3(a)에서 이 구간에서 측정된 ALOHA-FIX와 ALOHA-BEB의 지연은 실질적 의미를 가지지 못한다. 정리하면, 제안된 기법이 모든 부하 범위에서 다른 기법보다 나은 성능을 나타낸다.