

무선전력 센서 네트워크를 위한 Slotted ALOHA 기반의 랜덤 접속 프로토콜

최현호

국립한경대학교 전기전자제어공학과

Slotted ALOHA-based Random Access Protocol for Wireless-Powered Sensor Networks

Hyun-Ho Choi

Dept. of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University

E-mail : hhchoi@hknu.ac.kr

요 약

본 논문에서는 무선전력 센서 네트워크에서 다수의 센서 노드가 하베스팅한 에너지를 이용하여 데이터를 기지국으로 전송하고자 할 때, slotted ALOHA 기반의 랜덤 접속 프로토콜을 제안하고 채널 처리율을 최대화하는 최적의 랜덤 슬롯의 개수를 도출한다. 수학적 분석을 통하여 처리율이 랜덤 슬롯 개수에 따라 concavity를 가짐을 밝히고 최적의 슬롯 개수를 구한다. 시뮬레이션을 통하여 고려하는 무선전력 센서 네트워크에서 제안하는 slotted ALOHA 기반의 랜덤 접속 프로토콜이 최적 랜덤 슬롯 개수를 사용할 때 처리율이 최대화됨을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a slotted-ALOHA-based random access protocol and derive the optimal number of random slots that maximize channel throughput when multiple energy harvesting sensor devices perform random access in wireless-powered sensor networks (WPSN). Throughput numerical analysis, we prove that the throughput has a concavity with respect to the number of random slots and obtain the optimal number of slots. Simulation results show that the throughput of the proposed slotted ALOHA-based random access protocol is maximize when the derived optimal number of slots is employed in the considered WPSN.

키워드

Wireless-powered sensor networks, Energy harvesting, Slotted ALOHA, Random access protocol, Optimization

1. 서 론

무선전력 센서 네트워크(wireless-powered sensor network, WPSN)는 무선 접속점(access point)리에서 무선으로 센서 노드에게 송수신에 필요한 에너지를 공급하여 무선 센서 노드의 배터리 문제를 해결하는 새로운 네트워킹 기술이다 [1]. 에너지 하베스팅(energy harvesting, EH) 효율을 개선하여 배터리 교체에 비용이 많이 드는 대규모 사물 인터넷

넷 환경에서 효과적으로 사용될 수 있다. 기존 WPSN 연구에서는 센서 노드에게 할당되는 에너지 및 데이터 전송 구간을 중앙 집중형 방식으로 계산하여 결정하였다 [1],[2]. 하지만 센서 노드의 수가 증가하고 사물 인터넷 환경이 분산화 됨에 따라 랜덤 접속 기반의 WPSN에 관한 연구의 필요성이 증대되었다.

본 연구에서는 WPSN에서 하베스팅한 에너지를 가지고 다수의 센서 노드가 랜덤 접속을 수행하기

위한 slotted-ALOHA 기반의 프로토콜을 제안하고 이 프로토콜의 처리율(throughput)을 최대화 하는 최적의 랜덤 슬롯의 개수를 구한다. 슬롯의 개수가 너무 적으면 충돌이 많이 발생하여 처리율이 낮아지며, 슬롯의 개수가 너무 많으면 충돌은 줄어드나 사용되지 않는 슬롯이 증가하여 처리율이 낮아진다. 관련하여 무선전력 전송이 없는 기존 slotted ALOHA 시스템의 경우 랜덤 슬롯의 개수가 접속 단말의 수와 같을 때 처리율이 최대가 됨이 밝혀져 있다. 따라서 지금까지의 WPSN 연구에서도 랜덤 접속시에는 기존 slotted ALOHA와 같이 단순히 랜덤 슬롯의 개수를 접속 노드의 개수와 동일하게 설정해왔다 [3],[4].

하지만 WPSN에서는 랜덤 슬롯의 개수가 증가할수록 센서 노드가 더 늦게 전송할 수 있어 더 많은 에너지를 하베스팅 할 수 있으므로 처리율이 증가될 수 있다. 하지만 이 경우에도 랜덤 슬롯 개수가 너무 많아지면 사용되지 않는 슬롯이 증가하여 처리율이 감소하게 된다. 따라서 랜덤 접속 기반의 WPSN에서도 최적의 처리율을 제공하는 적절한 랜덤 슬롯의 개수가 존재한다. 본 논문에서는 slotted-ALOHA 기반의 랜덤 접속 프로토콜을 제시하고 WPSN에서 랜덤 접속 노드 수와 랜덤 슬롯의 개수 사이의 tradeoff 관계를 밝히고 처리율을 최대화하는 최적 슬롯 개수를 도출한다.

II. Slotted-ALOHA 기반 랜덤 접속 프로토콜

그림 1은 고려하는 WPSN 환경을 보여준다. 단일셀 WPSN에서 하나의 hybrid-access point (H-AP)와 N개의 센서 노드가 존재함을 가정한다. H-AP는 full-duplex를 가정하여 상/하향링크 데이터 송수신을 수행하면서 동시에 무선으로 전력을 전달한다 [5]. 각 노드는 half-duplex를 가정하여 데이터를 송수신하지 하지 않을 때 무선 에너지 하베스팅을 수행한다.

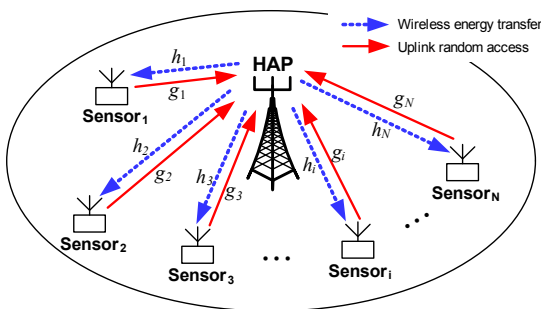


그림 1. 고려하는 WPSN 네트워크 환경

그림 2는 제안하는 slotted-ALOHA 기반 랜덤 접속 프로토콜을 보여준다. 각 프레임은 맨 앞에 일정 길이의 방송 슬롯이 존재하여 프레임 동기화를

위한 시그니처 및 랜덤 접속 슬롯 개수와 같은 프레임 구성 정보를 전송하고, 다음에 초기 에너지 하베스팅(initial EH) 슬롯이 존재하여 초기 일정시간 동안 모든 노드들이 EH를 수행하도록 해준다. 마지막으로 m개의 랜덤 접속 슬롯이 존재하여 하여 N개의 노드들이 랜덤하게 하나를 선택하여 상향링크 데이터 전송을 할 수 있다 [3].

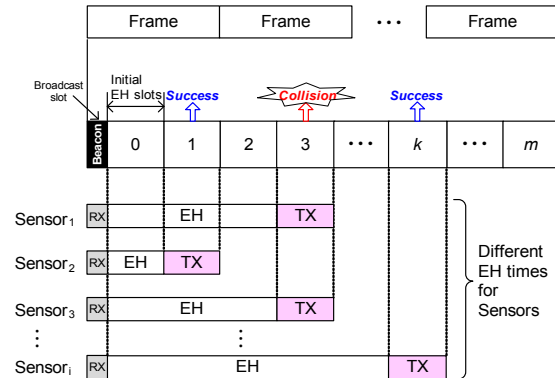


그림 2. Slotted ALOHA 기반 랜덤 접속 프로토콜

낮은 EH 수준과 저전력 센서 노드를 고려하여 각 노드는 평소에는 sleep 모드로 존재하다가 이벤트가 발생하면 깨어나 H-AP로부터 방송 슬롯 정보를 듣고 동기화한 후 initial EH 슬롯부터 H-AP가 공급하는 무선 에너지를 하베스팅하기 시작한다. 동시에 각 노드는 m개의 랜덤 슬롯 중에서 하나를 무작위로 고르고 이 슬롯의 시작 시간 전까지 하베스팅 한 에너지를 이용하여 선택한 슬롯에서 센싱 데이터를 전송한다. 이 후 센서 노드는 에너지 소비를 줄이기 위하여 다시 sleep 모드로 전환하고 다음 이벤트 발생을 기다린다. 랜덤 접속시 두 개 이상의 노드가 같은 슬롯을 선택하면 충돌이 발생하여 데이터 전송에 실패하고, 오직 하나의 노드만이 한 슬롯에 접속했을 때 데이터 전송에 성공한다 [6].

III. 최적 랜덤 슬롯 개수

임의의 노드 n이 i번째 슬롯에서 전송할 때 하베스팅한 에너지량은 다음과 같이 계산된다.

$$E_n^i = \zeta_n P h_n \sum_{k=0}^{i-1} t_k = \zeta_n P h_n \left(\alpha t + \sum_{k=1}^{i-1} t \right) = \zeta_n P h_n (\alpha + i - 1)t \quad (2)$$

여기에서 P는 H-AP의 송신 파워, h_n 은 하향링크 채널 값, ζ_n 은 하베스팅 효율, t_0 는 initial EH 슬롯의 길이, t_i 는 i번째 랜덤 슬롯의 길이를 나타낸다. 여기에서 $t_0 = \alpha t$ ($\alpha \geq 1$) 및 $t_i = t \forall i$ 를 가정한다. 또한, 노드 n이 i번째 슬롯에서 전송시 사용하는 송신 파워 값은 다음과 같다.

$$P_n^i = \frac{\eta_n E_n^i}{t} = \eta_n \zeta_n P h_n (\alpha + i - 1), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

여기에서 η_n 은 하베스팅한 에너지가 데이터 전송에 쓰이는 비율로 $0 < \eta_n \leq 1$ 의 범위를 갖는다.

접속 성공시에 슬롯 i 에서 노드 n 의 전송률은 다음과 같이 계산된다.

$$R_n^i = \log_2 \left(1 + \frac{g_n P_n^i}{\Gamma \sigma^2} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{g_n \eta_n \zeta_n P h_n (\alpha - 1 + i)}{\Gamma \sigma^2} \right) \quad (4)$$

여기에서 Γ 는 SNR gap, g_n 은 상향링크 채널 값을 나타낸다. 단순히 $\alpha=1$ 을 가정하면 식 (4)는 다음과 같이 주어진다.

$$R_n^i = \log_2 \left(1 + \frac{\eta_n \zeta_n P h_n g_n i}{\Gamma \sigma^2} \right) = \log_2 (1 + \gamma_n i) \quad (5)$$

여기에서 노드 n 에게 주어지는 상수 $\gamma_n = \frac{\eta_n \zeta_n P h_n g_n}{\Gamma \sigma^2}$ 로 정의된다.

m 개의 노드가 N 개의 슬롯 중 랜덤하게 하나를 선택할 때 한 슬롯에 하나만 접속하여 전송에 성공할 확률은 다음과 같이 계산된다.

$$p_s = \left(\frac{1}{m} \right) \left(1 - \frac{1}{m} \right)^{N-1} \quad (6)$$

따라서 채널의 처리율은 다음과 같이 구해진다.

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^N p_s R_n^i}{m} = \frac{1}{m^2} \left(1 - \frac{1}{m} \right)^{N-1} \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^N \log_2 (1 + \gamma_n i) \quad (7)$$

이는 high SNR 환경에서 $\gamma_n i \gg 1$ 임을 가정하여 다음과 같이 근사화 된다.

$$\begin{aligned} \tilde{S}(m) &= \frac{1}{m^2} e^{-\frac{N}{m}} \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^N \log_2 (\gamma_n i) \quad (8) \\ &= \frac{1}{m^2} e^{-\frac{N}{m}} \frac{1}{\ln 2} \left(m \sum_{n=1}^N \ln \gamma_n + N \sum_{i=1}^m \ln i \right) \\ &= \frac{N}{\ln 2} e^{-\frac{N}{m}} \left\{ \frac{1}{m} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln \gamma_n + \frac{1}{m^2} \ln \left(\prod_{i=1}^m i \right) \right\} \\ &= \frac{N}{\ln 2} e^{-\frac{N}{m}} \left\{ \frac{\bar{\gamma}}{m} + \frac{\ln(m!)}{m^2} \right\} \end{aligned}$$

여기에서 $\bar{\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln \gamma_n$ 로 정의된다. 식 (8)을

$\frac{d \ln(m!)}{dm} = \ln(m)$ 을 이용하여 m 에 대하여 1차 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d\tilde{S}}{dm} = \frac{N}{\ln 2} e^{-\frac{N}{m}} \left\{ \frac{N \ln(m!)}{m^4} + \frac{N \bar{\gamma} - 2 \ln(m!)}{m^3} + \frac{\ln(m) - \bar{\gamma}}{m^2} \right\} \quad (9)$$

또한 m 에 대하여 2차 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2 \tilde{S}}{dm^2} = \frac{N}{\ln 2} e^{-\frac{N}{m}} \left\{ \begin{aligned} &\bar{\gamma} \left(\frac{N^2 - 4Nm + 2m^2}{m^5} \right) \\ &+ \frac{\ln(m!)(N^2 - 6Nm + 6m^2) + \ln(m)(2Nm - 4m^3) + m^3}{m^6} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

여기에서 $\frac{N}{2 + \sqrt{2}} < m < \frac{N}{2 - \sqrt{2}}$ 일 때

$N^2 - 4Nm + 2m^2 < 0$ 이고, $N < m < \frac{N}{2 - \sqrt{2}}$ 일 때

$\ln(m!)(N^2 - 6Nm + 6m^2) + \ln(m)(2Nm - 4m^3) + m^3 < 0$

임을 만족하여, $N < m < 1.7N$ 구간에서 $\frac{d^2 \tilde{S}}{dm^2} < 0$ 으

로 $\tilde{S}(m)$ 는 m 값에 따라 concave 형태를 띤다. 따라서 $\frac{d\tilde{S}}{dm} = 0$ 을 만족시키는 m 을 최적 랜덤 슬롯 개수로 구할 수 있다. 식 (9)에 Stirling's formula $m! \approx \sqrt{2\pi m} \left(\frac{m}{e} \right)^m$ 을 적용하여 정리하면, 다음 식을 만족하는 m 을 최적 랜덤 슬롯 개수로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ln(m) \left\{ -m^2 + (N-1)m + \frac{1}{2}N \right\} + (2 - \bar{\gamma})m^2 \quad (11) \\ + \{N\bar{\gamma} - N - \ln(2\pi)\}m + \frac{1}{2} \ln(2\pi)N = 0 \end{aligned}$$

IV. 실험 결과

실험을 위하여 각 센서노드를 [5, 50]m의 셀 반경 내에서 uniform하게 분포시키고, 관련 파라미터로 $P=30$ dBm, $\zeta_n=1$, $\eta_n=1$, $\Gamma=9.8$ dB를 사용하였다 [5],[6]. 그림 3은 노드 수 $N=50, 100$ 일 때 랜덤 채널의 개수(m)에 따른 처리율의 변화를 보여준다. 랜덤 채널의 개수가 커짐에 따라 처리율이 증가하다가 감소하여 최대 처리율을 갖는 최적의 m 값이 존재함을 보여준다. 시뮬레이션 및 두 개의 분석 결과 모두 $N=50$ 인 경우에 최적 m 은 63이며, $N=100$ 인 경우에 최적 m 은 123로 잘 일치함을 보여준다.

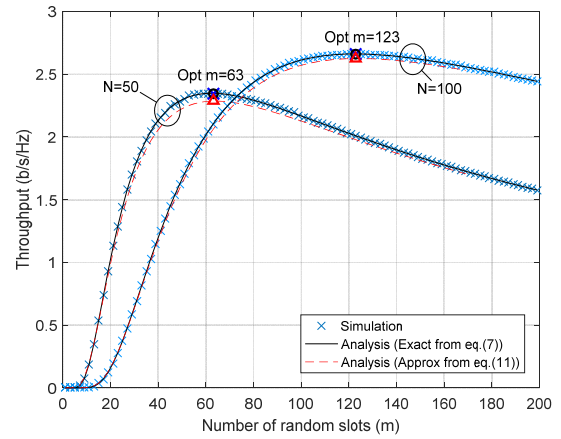


그림 3. 랜덤 채널 개수에 따른 처리율

그림 4는 노드 수에 따른 처리율을 보여준다. 기존과 같이 고정된 임의의 슬롯 개수 m 을 사용하는 경우에는 N 값이 증가함에 따라 처리율이 증가하다가 감소하게 된다. 하지만 제안하는 최적의 m 값을 사용하는 경우에는 각 고정 m 값의 그래프의 최고점을 따라 N 값에 관계없이 최대 처리율을 보여준다. 따라서 최적의 랜덤 슬롯 개수를 사용하는

slotted ALOHA 기반의 랜덤 접속 프로토콜은 WPSN에서 센서 노드의 랜덤 접속시 처리율을 최대화함을 확인 할 수 있다.

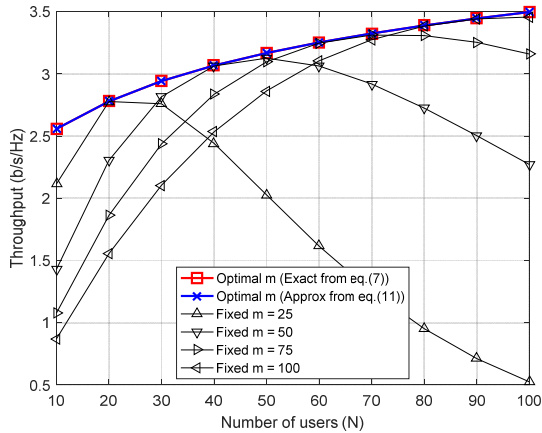


그림 4. 노드 수에 따른 처리율

V. 결 론

본 논문에서는 WPSN 환경에서 다수의 센서 노드가 하베스팅한 에너지를 이용하여 데이터를 기지국으로 전송하고자 할 때, slotted ALOHA 기반의 랜덤 접속 프로토콜을 제안하고 채널 처리율을 최대화하는 최적의 랜덤 슬롯의 개수를 도출하였다. 수학적 분석을 통하여 제안 프로토콜의 처리율이 랜덤 슬롯 개수에 따라 concavity를 가짐을 밝히고 최적의 슬롯 개수를 구하였다. 시뮬레이션 결과 제안 프로토콜은 랜덤 채널 개수에 따라 최적의 슬롯 개수를 가짐을 확인할 수 있었고, 최적의 랜덤 슬롯 개수를 사용할 때 제안 프로토콜의 처리율이 최대화 됨을 확인하였다. 제안하는 slotted ALOHA 기반의 랜덤 접속 프로토콜은 향후 배터리 교 없이 무선전력 전송을 통하여 데이터를 수집하는 차세대 IoT 네트워크에 활용 가능하리라 기대한다.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future (No. 2016R1C1B1016261).

References

[1] H. Ju and R. Zhang, "Optimal resource allocation in full-duplex wireless-powered communication network," IEEE Trans. Commun.

62(10), pp. 3528-3540, 2014.
 [2] T. P. Do, G. Sacarello, and Y. H. Kim, "Proportional fair resource allocation for a full-duplex wireless powered communication network," in Proc. KICS Int. Conf. Commun., pp. 1312-1313, Jeju, Korea, June 2016.
 [3] S. Wu, et al. "Analysis and performance evaluation of dynamic frame slotted-ALOHA in wireless machine-to-machine networks with energy harvesting," in Proc. IEEE Globecom, pp. 1081-1086, Austin, USA, Dec. 2014.
 [4] M. Moradian and F. Ashtiani, "Throughput analysis of a slotted aloha-based network with energy harvesting nodes," in Proc. IEEE PIMRC, pp. 351-356, Sydney, Australia, Sep. 2012.
 [5] 최현호, "무선전력 통신 네트워크에서 랜덤 접속을 위한 최적 자원 할당," 한국통신학회논문지, 42(10), pp. 1951-1954, 2017.
 [6] H.-H. Choi and W. Shin, "Slotted ALOHA for Wireless Powered Communication Networks," IEEE Access, 6(1), pp. 53342-53355, 2018.