

무선 전력 통신 네트워크에서 Slotted ALOHA 기반 에너지 하베스팅 랜덤 접속 프로토콜

최현호*, 신원재*

Energy Harvesting Random Access Protocol Based on Slotted ALOHA in Wireless Powered Communication Networks

Hyun-Ho Choi*, Wonjae Shin*

요약

본 논문에서는 대규모 단말 수를 갖는 무선 전력 통신 네트워크를 고려하여 slotted ALOHA 기반의 에너지 하베스팅 랜덤 접속 프로토콜을 제안한다. 제안하는 harvest-or-access (HOA) 프로토콜은 slotted ALOHA의 낭비되는 idle 슬롯에서 무선 에너지 전송이 가능하도록 만들어 단말은 각 슬롯에서 에너지를 하베스팅 하거나 랜덤 접속을 수행할 수 있다. 제안 HOA 프로토콜의 처리율을 최대화하기 위하여 최적의 랜덤 접속 슬롯 개수를 수학적으로 구하였다.

Key Words : Wireless-powered communication network, energy harvesting, random access, slotted ALOHA

ABSTRACT

In this letter, we propose an energy harvesting random access protocol based on slotted ALOHA in a wireless-powered communication network with a large number of wireless devices (WDs). The proposed harvest-or-access (HOA) protocol enables wireless energy transfer in the idle slots of slotted

ALOHA so that WDs can harvest energy or perform random access in each slot. The optimal number of random access slots is mathematically derived to maximize throughput.

I. 서론

무선 전력 통신 네트워크(wireless powered communication network, WPCN)는 access point (AP)에 무선전력 전송 기술을 결합한 통신 네트워크로, hybrid AP (HAP)는 셀 내에 에너지를 전송하고 단말들(wireless device, WD)은 이를 하베스팅하여 HAP에게 데이터를 전송하는데 사용한다. 기존 대부분의 WPCN은 에너지 전송량 및 단말 별 데이터 전송 자원을 HAP가 스케줄링 하는 중앙 집중형 방식을 사용한다. 이들은 harvest-then-transmit (HTT) 기반의 프로토콜을 사용하여 단말들은 프레임의 앞쪽에서 일정시간 동안 에너지를 하베스팅 한 후 남은 프레임 기간 동안 할당 받은 무선 자원 영역에서 순서대로 데이터를 전송한다^[1].

현재 무선전력전송 기술은 10 m 내에서 수십 μ w 수준의 전력을 전송하는 수준으로 WPCN은 센서 네트워크, machine-to-machine, RFID와 같은 저전력 단말을 사용하는 응용에 적합하다. 하지만 이와 같은 응용은 매우 많은 단말들이 밀집 분포되어 있어 HTT 기반의 중앙제어 방식은 최적화를 위해 많은 채널 피드백 오버헤드와 높은 계산 복잡도를 필요로 한다. 따라서 실제 환경에 WPCN을 적용하기 위해서는 적은 오버헤드와 낮은 복잡도를 갖는 분산 제어 프로토콜의 설계가 필요하다^[2].

Slotted ALOHA는 간단한 랜덤 접속 프로토콜로 대규모의 단말의 접속을 낮은 오버헤드와 복잡도로 지원하여 RFID, NB-IoT, LoRa, Sigfox와 같은 massive IoT 시스템의 기본적인 medium access control (MAC) 프로토콜로 사용되고 있다^[3]. 따라서 본 논문에서는 이러한 slotted ALOHA를 WPCN에 효과적으로 적용한 harvest-or-access (HOA) 프로토콜을 제안한다.

* 이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2019R1A2C4070466)과 2018학년도 부산대학교 신입교수연구 정착금 지원으로 이루어졌음

* First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6785-2596)Hankyong National University, Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, hhchoi@hknu.ac.kr, 정회원

* (ORCID:0000-0001-6513-1237)Pusan National University, Department of Electronics Engineering, wjshin@pusan.ac.kr, 종신회원
논문번호 : 201908-152-B-LU, Received August 12, 2019; Revised August 13, 2019; Accepted August 13, 2019

II. 제안하는 에너지 하베스팅 랜덤 접속 프로토콜

그림 1은 제안하는 HOA 프로토콜의 프레임 구조 및 동작을 보여준다. 먼저 프레임의 맨 앞에 비콘을 전송하여 프레임 동기를 맞추고 프레임 당 random access (RA) 슬롯 개수 및 ACK와 같은 제어 정보를 방송한다. 이후 제공되는 RA 슬롯들은 단말들이 데이터를 전송하거나 에너지를 하베스팅 하는데 사용된다.

Slotted ALOHA는 중앙제어 없이 단말이 랜덤하게 접속을 시도하기 때문에 평균적으로 전체 RA 슬롯의 1/3정도가 사용되지 않은 idle 슬롯이 된다^[4]. 제안 방식은 이러한 idle 슬롯을 인지하여 HAP는 에너지를 전송하고 단말은 에너지를 하베스팅 할 수 있도록 만든다. 이를 위해 HAP는 각 RA 슬롯의 초기 일정 시간 동안 수신 신호가 검출되지 않으면 이를 idle 슬롯으로 판단하고 바로 wireless energy transfer (WET)를 수행한다. 전파 시간 (T_{prop}), 센싱 시간 (T_{sens}), tx/rx 스위칭 시간 (T_{txrx})을 고려할 때 한 idle 슬롯에서 사용 가능한 WET 시간은 $T_{WET} = T_{slot} - 2T_{prop} - T_{sens} - T_{txrx}$ 로 결정되며, 현실적인 시간 범주를 고려할 때 $T_{slot} = 1\text{ms}$ 에서 0.98ms 이상의 T_{WET} 을 가질 수 있다. 단말들은 랜덤하게 선택한 RA 슬롯에서 wireless information transfer (WIT)를 수행하고 이외의 슬롯에서는 HAP로부터 에

너지가 전송되는 경우에는 필요한 에너지를 하베스팅한다. 따라서 기존 slotted ALOHA와는 달리 제안하는 HOA 프로토콜에서는 모든 슬롯이 단말들의 접속 또는 에너지 하베스팅에 사용된다.

III. 최적의 랜덤 슬롯 개수 분석

제안하는 HOA 프로토콜에서도 2개 이상의 단말이 같은 RA 슬롯 번호를 선택하면 충돌이 발생한다. 따라서 처리율을 최대화하려면 단말 수(K)에 따른 프레임당 최적의 RA 슬롯 개수(m^*)를 결정해야 한다. 먼저 전송에 성공한 단말 i 의 전송률은 다음과 같이 구해진다.

$$R_i = \log_2 \left(1 + \frac{g_i P_i}{\sigma^2} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{g_i \eta_i h_i P \rho N_{idle}}{\sigma^2} \right) = \log_2 (1 + \gamma_i N_{idle}) \quad (1)$$

여기에서 g_i 는 단말 i 에서 HAP로 채널 파워 이득, h_i 는 HAP에서 단말 i 로의 채널 파워 이득, η_i 는 하베스팅 효율, P 는 HAP의 전송 파워, ρ 는 한 슬롯에서 WET의 사용 가능 비율, N_{idle} 은 idle 슬롯의 평균 발생 개수, σ^2 은 노이즈 파워를 나타낸다. 또한 $\gamma_i = \frac{g_i \eta_i h_i P \rho}{\sigma^2}$ 로 정의되며 i 번째 단말이 한 개의 슬롯에서만 하베스팅 한 에너지를 이용하여 전송할 때 HAP에서의 수신 SNR을 나타낸다.

슬롯 개수가 m 개로 주어졌을 때 평균 채널 처리율은 다음과 같이 계산된다.

$$S(m) = \frac{1}{m} \left(1 - \frac{1}{m} \right)^{K-1} \sum_{i=1}^K \left(1 + \gamma_i m \left(1 - \frac{1}{m} \right)^K \right) \quad (2)$$

이를 높은 SNR 환경을 가정하여 근사화하면 다음과 같이 주어진다.

$$\tilde{S}(m) = \frac{K}{\ln 2} \frac{e^{-K/m}}{m} \left(\bar{\gamma} + \ln m - \frac{K}{m} \right) \quad (3)$$

식 (3)을 m 에 대하여 미분하면 최적 슬롯 개수는 다음 식을 만족하는 m^* 로 결정된다^[2].

$$\frac{m^* + K}{m^* - K} + \frac{K}{m^*} - \ln m^* = \bar{\gamma} \quad (4)$$

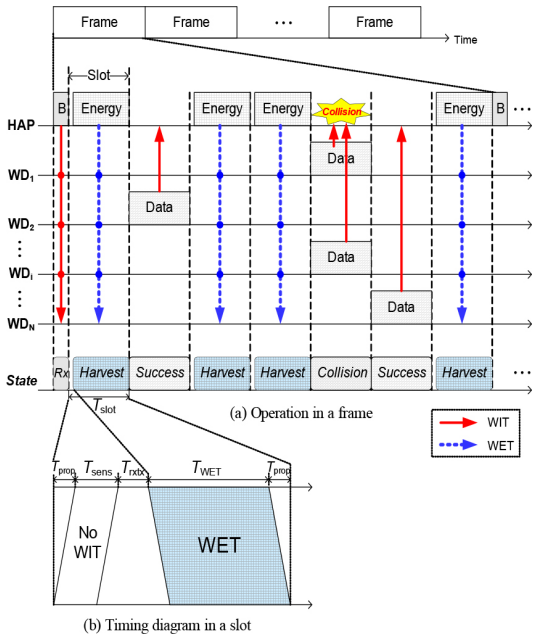


그림 1. 제안하는 harvest-or-access 프로토콜의 동작
Fig. 1. Operation of proposed harvest-or-access protocol

여기에서 $\bar{\gamma} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \ln \gamma_i$ 로 정의되며, γ_i 의 로그 단위의 평균값에 해당한다. 따라서 제안하는 HOA 프로토콜은 기존의 중앙 집중형의 HTT 프로토콜과는 달리 처리율 최대화하기 위하여 γ_i 값을 알면 되며, 이는 수 프레임에 걸쳐 성공적으로 접속한 단말의 수신 SNR 값을 가지고 추정 가능하다. 따라서 제안 HOA는 별도의 채널 피드백 오버헤드가 존재하지 않으며 최적화를 위한 복잡도도 매우 낮다.

IV. 성능 결과 및 고찰

HAP의 송신 파워는 $P=40$ dBm, 에너지 하베스팅 효율 $\eta_i=0.5$, 한 idle 슬롯 당 이용 가능한 WET 시간 비율 $\rho=0.98$, WPCN 셀 반경은 25 m, path-loss exponent $n=2\sim 3$ 으로 조절하였으며 기본 값으로 $n=2.5$ 를 사용하였다^{1,2}.

그림 2는 단말 수에 따른 최적 RA 슬롯 개수(m^*)와 평균 처리율을 보여준다. m^* 는 단말 수의 증가에 선형적으로 증가하며, 에너지 하베스팅 시간이 길수록 송신 파워가 증가하므로 slotted ALOHA와는 달리 $m^* \geq K$ 의 결과를 보여준다. 또한 path-loss가 심할수록 전송을 위해 더 긴 하베스팅 시간을 필요로 하여 n 값이 커질수록 m^* 는 증가한다. 아울러 n 값이 커질수록 분석에서 사용한 높은 SNR 근사화로 인하여 exact m^* 값과 approx m^* 값에 오차가 발생한다. 평균 처리율은 최적의 m^* 를 사용하였을 때 고정 m 값을 사용한 경우의 최대치를 따라가며 가장 높은 성능을 갖는다. 기존 slotted ALOHA 방식의 최적 값인

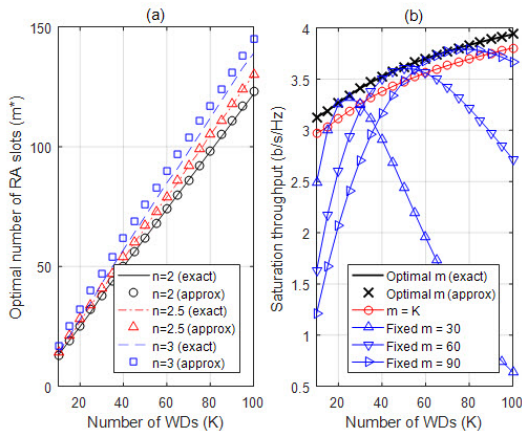


그림 2. 단말 수에 따른 최적 RA 슬롯 개수(a)와 평균 처리율(b)
 Fig. 2. (a) optimal number of RA slots and (b) average throughput vs. number of WDs

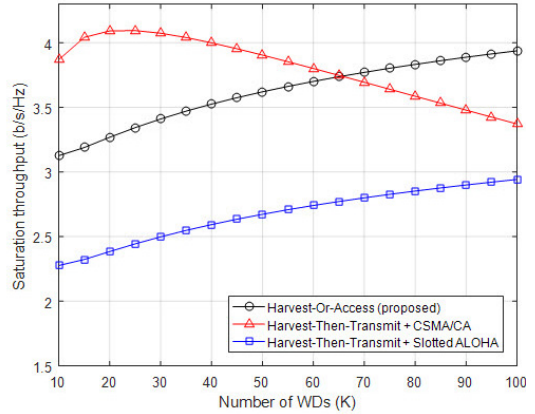


그림 3. 단말 수에 따른 처리율 비교
 Fig. 3. Throughput comparison vs. number of WDs

$m=K$ 를 사용한 경우에도 m^* 를 사용한 경우 보다 낮은 처리율을 갖는다.

그림 3은 제안 HOA 프로토콜과 기존 HTT 프로토콜의 단말 수에 따른 처리율을 보여준다. 고려하는 HTT 프로토콜은 프레임 초기 일정 구간에서 에너지를 하베스팅 한 후 CSMA/CA 또는 slotted ALOHA를 사용하여 랜덤 접속을 수행한다. HTT+slotted ALOHA 방식은 별도의 하베스팅 구간을 사용하며 충돌이 발생하여 매우 낮은 효율을 보여준다. HTT+CSMA/CA 방식은 단말 수가 적을 때에는 충돌이 적어 효율이 좋지만, 단말이 많아질수록 충돌 및 백오프로 인한 idle 구간이 증가하여 효율이 낮아진다. 제안하는 HOA의 경우 단말 수가 증가함에 따라 HTT보다 더 높은 처리율을 보여준다.

V. 결론

제안 HOA 프로토콜은 slotted ALOHA의 idle 슬롯을 에너지 하베스팅에 활용하여 무선 자원의 낭비를 막으면서, 기존 HTT와 같이 별도의 하베스팅 구간을 할당하지 않아 더 높은 처리율을 제공한다. 또한 수학적 분석을 통해 최적의 RA 슬롯 개수를 도출하고, 이는 단말들의 수신 SNR의 로그 평균값에만 의존함을 보였다. 따라서 HOA 프로토콜은 대규모 단말이 존재하는 WPCN 환경에서 적은 오버헤드와 낮은 복잡도로 동작하는 분산 MAC 프로토콜로 활용 가능하다.

References

- [1] H. Ju and R. Zhang, "Throughput maximization in wireless powered communication networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 418- 428, Jan. 2014.
- [2] H.-H. Choi and W. Shin, "Harvest-or-access: energy harvesting random access protocol for wireless powered communication networks," in *Proc. KICS Conf.*, Jeju, Korea, Jun. 2019.
- [3] U. Raza, et al., "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 19, no. 2, pp. 855-873, Jan. 2017.
- [4] Q. Tong, et al., "Bayesian estimation in dynamic framed slotted ALOHA algorithm for RFID system," *Comput. & Math. with Appl.*, vol. 64, no. 5, pp. 1179-1186, Sep. 2012.