

무선전력 통신 네트워크에서 랜덤 접속을 위한 최적 자원 할당

최 현 호*

Optimal Resource Allocation for Random Access in Wireless-Powered Communication Networks

Hyun-Ho Choi*

요 약

본 논문에서는 무선전력 통신 네트워크에서 하베스팅 에너지를 이용하여 다수의 단말이 랜덤 접속을 수행할 때 채널 처리율을 최대화하는 최적의 랜덤 슬롯의 개수를 도출한다. 수학적 분석을 통하여 처리율이 랜덤 슬롯 개수에 따라 concavity를 가짐을 밝히고 최적의 슬롯 개수를 구한다. 모의실험 결과 랜덤 접속 기반의 무선전력 통신 네트워크에서 제시한 최적 랜덤 슬롯 개수를 사용할 때 처리율이 최대화됨을 보여준다.

Key Words : Wireless-powered communication networks, energy harvesting, random access, resource allocation.

ABSTRACT

In this letter, we derive the optimal number of random slots that maximize channel throughput when multiple energy harvesting devices perform random access in wireless-powered communication networks (WPCN). 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. Results show that the throughput is maximized when the derived optimal number of slots

is employed in the random access-based WPCN.

I. 서 론

무선전력 통신 네트워크(wireless-powered communication network, WPCN)는 원거리에서 무선으로 단말에게 송수신에 필요한 에너지를 공급하여 이동 무선 단말의 배터리 문제를 해결하는 새로운 네트워킹 기술이다^[1]. 에너지 하베스팅(energy harvesting, EH) 효율을 개선하여 배터리 교체에 비용이 많이 드는 대규모 사물 인터넷 환경에서 효과적으로 사용될 수 있다. 기존 WPCN 연구에서는 단말에게 할당되는 에너지 및 데이터 전송 구간을 중앙 집중형 방식으로 계산하여 결정하였다^[1,2]. 하지만 단말의 수가 증가하고 사물 인터넷 환경이 분산화 됨에 따라 랜덤 접속 기반의 WPCN에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 WPCN에서 하베스팅한 에너지를 가지고 다수의 단말이 랜덤 접속을 수행할 때 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. 지금까지의 WPCN 연구에서도 랜덤 접속 시에는 기존 slotted ALOHA와 같이 단순히 랜덤 슬롯의 개수를 접속 단말의 개수와 동일하게 설정해왔다^[3,4].

하지만 WPCN에서는 랜덤 슬롯의 개수가 증가할수록 단말이 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 WPCN에서도 최적의 처리율을 제공하는 적절한 랜덤 슬롯의 개수가 존재한다. 본 논문에서는 WPCN에서 랜덤 접속 단말 수와 랜덤 슬롯의 개수 사이의 tradeoff 관계를 밝히고 처리율을 최대화하는 최적 슬롯 개수를 도출한다.

* 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1C1B1016261)

• First Author : Hankyong National University, Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, and Institute for Information Technology Convergence, hhchoi@hknu.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2017-09-243, Received September 8, 2017; Reviewed September 22, 2017; Accepted September 22, 2017

II. 시스템 모델

그림 1은 고려하는 시스템 모델을 보여준다. 단일 셀 WPCN에서 하나의 hybrid-access point (H-AP)와 N 개의 사용자 단말이 존재한다. H-AP는 full-duplex를 가정하여 상하향링크 데이터 송수신을 수행하면서 동시에 무선으로 전력을 전달한다^[1,2]. 단말은 half-duplex를 가정하여 데이터를 송수신하지 않을 때 무선 에너지 하베스팅을 수행한다.

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 단말들이 EH를 수행하도록 해준다. 마지막으로 m 개의 랜덤 접속 슬롯이 존재하여 하여 N 개의 단말들이 랜덤하게 하나를 선택하여 상향링크 데이터 전송을 할 수 있다^[3].

낮은 EH 수준을 고려하여 단말은 저전력 센서 노드로 고려된다. 각 단말은 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 단말은 m 개의 랜덤 슬롯 중에서 하나를 무작위로 고르고 이 슬롯의 시작 시간 전까지 하베스팅한 에너지를 이용하여 선택한 슬롯에서 센싱 데이터를 전송한다. 이 후 단말은 에너지 소비를 줄이기 위하여 다시 sleep 모드로 전환하고 다음 이벤트 발생을 기다린다. 랜덤 접속 시 두 개 이상의 단말이 같은 슬롯을 선택하면 충돌이 발생하여 데이터 전송에 실패

패하고, 오직 하나의 단말만이 한 슬롯에 접속했을 때 데이터 전송에 성공한다.

III. 제한하는 최적 자원 할당

임의의 노드 n 이 i 번째 슬롯에서 전송할 때 하베스팅한 에너지 양은 다음과 같이 계산된다.

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

여기에서 P 는 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 i 번째 랜덤 슬롯의 길이를 나타낸다. 여기에서 $t_0 = \alpha t$ ($\alpha \geq 1$) 및 $t_i = t \forall i$ 를 가정한다. 또한, 노드 n 이 i 번째 슬롯에서 전송 시 사용하는 송신 파워 값은 다음과 같다.

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

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

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

$$R_n^i = \log_2 \left(1 + \frac{g_n P_n^i}{\Gamma \sigma^2} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{g_n \eta_n \zeta_n P h_n (\alpha - 1 + i)}{\Gamma \sigma^2} \right) \quad (3)$$

여기에서 Γ 는 SNR gap, g_n 은 상향링크 채널 값을 나타낸다. 단순히 $\alpha = 1$ 을 가정하면 식 (3)은 다음과 같이 변환된다.

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

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

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

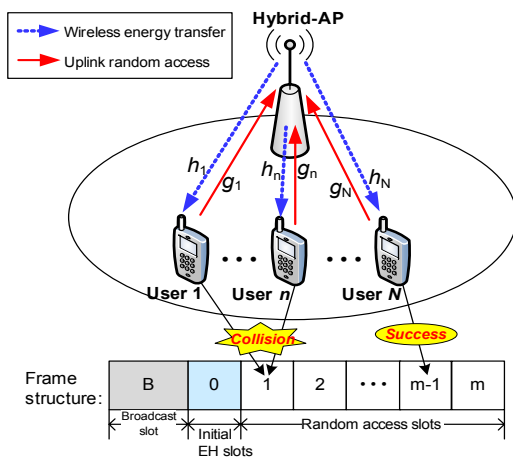


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

$$p_s = \left(\frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{1}{m}\right)^{N-1} \quad (5)$$

따라서 채널의 처리율은 다음과 같이 구해진다.

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^N p_s R_n^i}{m} = \frac{1}{m^2} \left(1 - \frac{1}{m}\right)^{N-1} \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^N \log_2(1 + \gamma_n i) \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} \tilde{S}(m) &= \frac{1}{m^2} e^{-\frac{N}{m}} \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^N \log_2(\gamma_n i) \\ &= \frac{1}{m^2} e^{-\frac{N}{m}} \frac{1}{\ln 2} \left(m \sum_{n=1}^N \ln \gamma_n + N \sum_{i=1}^m \ln i \right) \\ &= \frac{N}{\ln 2} e^{-\frac{N}{m}} \left\{ \frac{1}{m} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln \gamma_n + \frac{1}{m^2} \ln \left(\prod_{i=1}^m i \right) \right\} \\ &= \frac{N}{\ln 2} e^{-\frac{N}{m}} \left\{ \frac{\bar{\gamma}}{m} + \frac{\ln(m!)}{m^2} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 $\bar{\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln \gamma_n$ 로 정의된다. 식 (7)을 m 에 대하여 1차 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d\tilde{S}}{dm} = \frac{N}{\ln 2} e^{-\frac{N}{m}} \left\{ \frac{N \ln(m!)}{m^4} + \frac{N\bar{\gamma} - 2 \ln(m!)}{m^3} + \frac{\ln(m) - \bar{\gamma}}{m^2} \right\} \quad (8)$$

또한 m 에 대하여 2차 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2\tilde{S}}{dm^2} = \frac{N}{\ln 2} e^{-\frac{N}{m}} \left\{ \gamma \left(\frac{N^2 - 4Nm + 2m^2}{m^5} \right) + \frac{\ln(m!)(N^2 - 6Nm + 6m^2) + \ln(m)(2Nm - 4m^3) + m^3}{m^6} \right\} \quad (9)$$

여기에서 $\frac{N}{2 + \sqrt{2}} < m < \frac{N}{2 - \sqrt{2}}$ 구간에서 $N^2 - 4Nm + 2m^2 < 0$ 이고, $N < m < \frac{N}{2 - \sqrt{2}}$ 일 때 $\ln(m!)(N^2 - 6Nm + 6m^2) + \ln(m)(2Nm - 4m^3) + m^3 < 0$ 을 만족한다. 결국 $N < m < 1.7N$ 구간에서 $\frac{d^2\tilde{S}}{dm^2} < 0$ 을 만족하여 \tilde{S} 는 m 에 따라 concave 형태를 띈다.

따라서 $\frac{d\tilde{S}}{dm} = 0$ 을 만족시키는 m 이 최적 랜덤 슬롯

개수가 된다. 식 (8)에 Stirling's formular $m! \approx \sqrt{2\pi m} \left(\frac{m}{e}\right)^m$ 을 적용하여 정리하면 다음 식을 만족하는 m 을 최적 랜덤 슬롯 개수로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ln(m) \left\{ -m^2 + (N-1)m + \frac{1}{2}N \right\} + (2-\bar{\gamma})m^2 \\ + \{N\bar{\gamma} - N - \ln(2\pi)\}m + \frac{1}{2}\ln(2\pi)N = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

IV. 모의실험 결과 및 결론

모의실험을 위하여 단말을 [5, 50]m의 셀 반경 내에서 uniform하게 분포시키고, 각 단말에서 매 프레임마다 평균 1번의 이벤트가 발생한다고 가정하였다. 관련 파라미터로 $P=30$ dBm, $\zeta_n=1$, $\eta_n=1$, $L=9.8$ dB를 사용하였다¹¹. 그림 2는 단말 수(N)가 50과 100일 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 $m=63$ 이며, $N=100$ 인 경우에 최적 $m=123$ 으로 잘 일치함을 보여준다.

그림 3은 사용자 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 갖는다. 따라서 본 논문의 최적의 랜덤 슬롯 할당 방식은 WPCN에서 단말의 랜덤 접속 시 처리율을 최대화함을 알 수 있다.

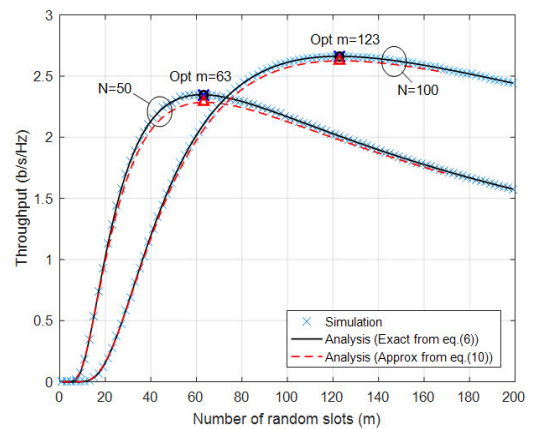


그림 2. 랜덤 채널 개수에 따른 처리율
Fig. 2. Throughput vs. number of random slots

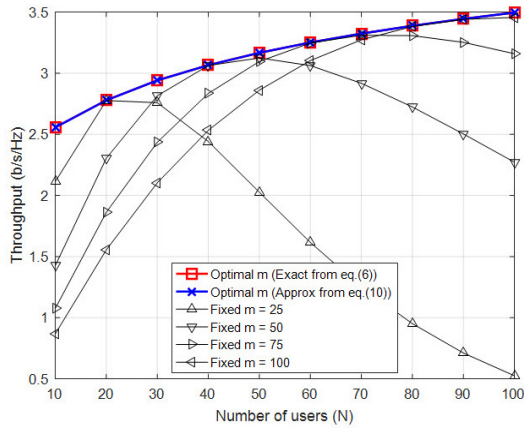


그림 3. 사용자 수에 따른 처리율
Fig. 3. Throughput vs. number of users

References

- [1] H. Ju and R. Zhang, "Optimal resource allocation in full-duplex wireless-powered communication network," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 10, pp. 3528-3540, Sept. 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, Jun. 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, Sept. 2012.