

클러스터드 WPCN에서 전송률 최대화를 위한 협력적 SWIPT 기법

최 현 호*

Cooperative SWIPT Scheme for Maximizing Rate in Clustered WPCN

Hyun-Ho Choi*

요 약

본 논문에서는 클러스터드 무선전력 통신 네트워크에서 멤버 노드의 데이터 전송하면서 동시에 남은 에너지를 클러스터 헤드에게 전달하는 협력적 SWIPT 방안을 제안한다. SWIPT의 사용유무에 따른 네트워크의 전송률을 계산하고, 전송률 최대화를 위한 SWIPT비율 및 클러스터 헤드 선택 방법을 제시한다. 모의실험을 통하여 SWIPT를 사용하고 최적의 클러스터 헤드를 선택하는 경우에 전송률이 개선됨을 확인하였다.

Key Words : Wireless-powered communication network, SWIPT, energy harvesting, cooperation

ABSTRACT

In this letter, we propose a cooperative simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) scheme in a clustered wireless powered communication networks (WPCN) in which member nodes transfer their remaining energy to the cluster head (CH) while transmitting data. We calculate the achievable rate in network when SWIPT is used, and present the optimal SWIPT ratio and the optimal CH selection method. Simulation results show that the use of SWIPT and the optimal CH selection improve

performance significantly.

I. 서 론

무선전력전송 기술은 크게 wireless powered communication network (WPCN)과 simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT)로 나뉘어 연구되고 있다. WPCN은 hybrid access point (HAP)에서 RF 에너지를 송신하고 이를 수신한 노드들이 하베스팅 에너지를 이용하여 HAP로 데이터를 전송하는 셀 기반 시스템이고^[1], SWIPT는 power splitting 또는 time switching 기법을 사용하여 에너지와 데이터 동시에 전송하는 기술이다^[2]. 지금까지 WPCN은 단말과 HAP가 직접 통신하는 플랫(flat) 네트워크 환경을 주로 고려하였고, SWIPT 기술을 직접적으로 적용하기에는 적합하지 않았다.

무선전력전송 기술의 낮은 효율을 고려할 때 단말은 저전력으로 동작하는 센서 노드가 될 것이다. 센서 네트워크에서는 에너지 효율을 고려하여 계층적인 클러스터드(clustered) 네트워크 구조를 적용하고 있다. 즉, 센서 노드들은 클러스터로 그룹핑이 되어 있으며 이 그룹 내에 한 노드가 클러스터 헤드(cluster head, CH) 역할을 수행한다. 클러스터 내 센서 노드들은 CH에게 센싱 데이터를 전송하고 CH는 수신 받은 센싱 데이터를 모아서 한번에 HAP로 전송한다^[3]. 따라서 CH는 다른 센서 노드에 비하여 수신, 프로세싱, 원거리 송신을 해야 하므로 더 많은 에너지를 필요로 한다. 아울러 센서 네트워크의 모든 센서 노드들이 동일한 센싱 임무를 수행할 때 네트워크에서 수집 가능한 센싱 데이터 양은 가장 전송률이 낮은 노드에 의해 제한된다^[4].

이와 같이 클러스터드 센서 네트워크에서 센싱 데이터의 전송률 제약과 CH의 에너지 제약을 고려하여, 본 연구에서는 모든 노드의 전송률을 이 최소 전송률에 맞추고 남은 에너지를 데이터 전송시 SWIPT를 통하여 CH에게 전달하는 협력적 SWIPT 방안을 제안한다. 클러스터드 WPCN 구조에서 SWIPT의 사용유무에 따른 네트워크의 전송률을 계산하고, 전송률 최대화를 위한 SWIPT의 power splitting 비율 및 CH 선택 방법을 제시한다. 모의실험을 통하여 SWIPT를 사용하고 최적의 CH를 선택하는 경우에 전송률이 크게

* 이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2C4070466).

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

논문번호 : 201908-153-A-LU, Received August 12, 2019; Revised September 3, 2019; Accepted September 4, 2019

향상됨을 확인하였다.

II. 시스템 모델

그림 1은 고려하는 클러스터드 WPCN을 보여준다. HAP는 P 의 파워로 셀 내에 wireless energy transfer (WET)를 수행한다. 임의의 클러스터 내의 N 개의 노드들은 이를 하베스팅하여 CH로 선택된 노드 i 에게 wireless information transmission (WIT)를 수행한다. 이때 CH i 를 제외한 센서 노드 j 들은 SWIPT를 수행하여 CH에게 데이터를 전송하면서 남은 에너지를 같이 줄 수 있다. CH는 HAP로부터 하베스팅한 에너지와 각 멤버 노드들로부터 추가적으로 제공받은 에너지를 모두 이용하여 수신한 센싱 정보를 데이터 퓨전 (fusion)을 통하여 하나로 만들어 HAP에게 전송한다. 이때 채널 reciprocity가 존재한다고 가정하여 HAP와 노드간 채널 파워 이득은 h_i 로 나타내고 노드 i 와 j 간의 채널 파워 이득은 g_{ij} 로 나타낸다.

그림 2는 제안 방안의 동작을 위한 프레임 구조를 보여준다. 센서 노드들의 전송은 사전에 스케줄링 되어 충돌 없이 TDMA 기반으로 이루어진다. HAP는 초기에 비콘 슬롯에서 스케줄링 정보가 방송한 후 WET 슬롯에서 셀 내 노드들에게 에너지를 전송한다. 다음으로 제공되는 SWIPT 슬롯에서 각 노드들은 자신의 CH에게 센싱 데이터와 남은 에너지를 동시에 전송한다. 데이터와 에너지를 수신 받은 CH는 마지막에 제공되는 WIT 슬롯에서 HAP에게 병합한 데이터를 전송한다. WET 슬롯의 길이는 T_e 로 주어지며,

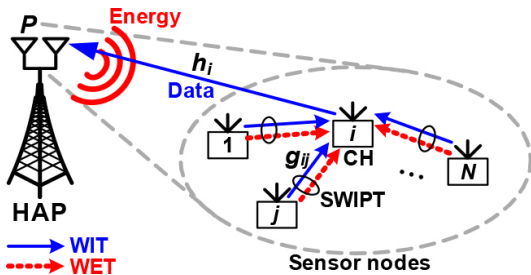


그림 1. 클러스터드 WPCN의 시스템 모델
Fig. 1. System model of clustered WPCN

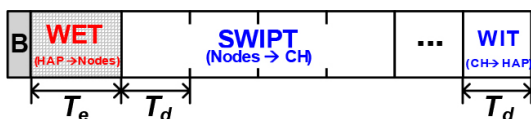


그림 2. 제안 방안을 위한 프레임 구조
Fig. 2. Frame structure for proposed scheme

CH가 데이터 퓨전을 통하여 수신한 센싱 데이터들을 같은 크기로 병합한다고 가정하여 SWIPT와 WIT 슬롯의 길이는 T_d 로 설정된다.

III. 제안하는 협력적 SWIPT 기법

노드 j 가 HAP로부터 하베스팅하는 에너지는 다음과 같다.

$$E_j^{har} = \zeta_j h_j P T_e, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

여기에서 ζ_j 는 노드 j 의 하베스팅 효율을 나타낸다. SWIPT 슬롯에서 센싱 데이터를 CH에게 전송할 때 사용하는 노드 j 의 송신 파워는 다음과 같다.

$$P_j = \frac{\eta_j E_j^{har}}{T_d} = \frac{\eta_j \zeta_j h_j P T_e}{T_d}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

여기에서 η_j 은 하베스팅한 에너지가 센싱, 프로세싱, 수신 등을 제외한 데이터 전송에만 쓰이는 비율이다. 노드 j 에서 CH i 로의 데이터 전송률은 다음과 같다.

$$R_{ij} = \log_2 \left(1 + \frac{G g_{ij} P_j}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

여기에서 G 는 노드간 안테나 이득을 나타내며, σ^2 은 수신단에서의 잡음 전력을 나타낸다.

기존방식과 같이 SWIPT를 사용하지 않는다면 CH는 HAP로부터 하베스팅한 에너지만을 전송에 사용하므로 CH의 전송률은 다음과 같이 계산된다.

$$R_i = \log_2 \left(1 + \frac{G h_i P_j}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

센서 네트워크에서 수집할 수 있는 센싱 데이터의 최대 전송률은 모든 전송 링크의 전송률의 최소값에 의해 제한된다^[4]. 따라서 SWIPT를 사용하지 않을 때 얻을 수 있는 최대 전송률은 다음과 같이 결정된다.

$$R^{w/o\text{swipt}} = \min [\min_j R_{ij}, R_i] \quad (5)$$

위와 같이 센싱 데이터 전송률은 최소 링크 전송률에 의해 결정되므로 높은 R_{ij} 를 갖는 센서 노드들이 이 최소 전송률을 만족시키는데 필요한 에너지만을

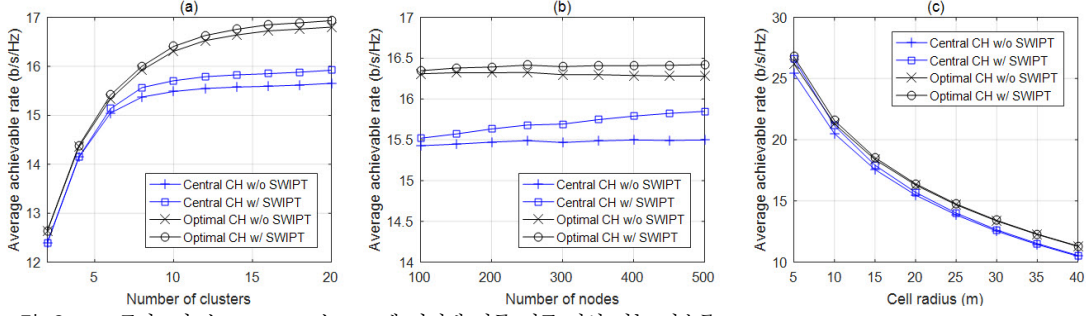


그림 3. (a) 클러스터 수, (b) 노드 수, (c) 셀 반경에 따른 평균 달성 가능 전송률
Fig. 3. Average achievable rate vs. (a) number of clusters, (b) number of nodes, and (c) cell radius

소비하고 나머지 남는 에너지는 SWIPT를 사용하여 CH에게 줄 수 있다. 일반적인 power splitting 방식을 적용할 때 $\alpha_j P_j$ 의 파워를 WIT에 사용하고, 나머지 $(1-\alpha_j)P_j$ 의 파워를 WET에 사용한다^[2]. 이때 노드 j 에서 CH i 로의 전송률은 다음과 같다.

$$R_{ij}^{swipt} = \log_2 \left(1 + \frac{G\eta_j \alpha_j P_j}{\sigma^2} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{G\eta_j \zeta_j g_{ij} h_j \alpha_j P T_c}{\sigma^2 T_d} \right) \quad (6)$$

반면 CH i 가 SWIPT를 통하여 추가적으로 얻는 에너지량은 다음과 같다.

$$E_i^{add} = \sum_{j=1, j \neq i}^N G\eta_i g_{ij} (1-\alpha_j) P_j T_d \quad (7)$$

따라서 SWIPT 사용시 CH i 가 사용가능한 송신 파워는 다음과 같이 갱신된다.

$$P_i^{swipt} = \frac{\eta_j (E_i^{har} + E_i^{add})}{T_d} \quad (8)$$

또한 CH i 에서 HAP로의 전송률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} R_i^{swipt} &= \log_2 \left(1 + \frac{G h_i P_i^{swipt}}{\sigma^2} \right) \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{G \eta_i h_i (E_i^{har} + E_i^{add})}{\sigma^2 T_d} \right) \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{G \eta_i \zeta_i h_i P T_c (h_i + \sum_{j \neq i} \eta_j \zeta_j (1-\alpha_j) g_{ij} h_j)}{\sigma^2 T_d} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 SWIPT를 사용할 때 클러스터에서 얻을 수 있는 최대 전송률은 다음과 같이 결정된다.

$$R^{swipt} = \min [\min_j R_{ij}^{swipt}, R_i^{swipt}] \quad (10)$$

CH가 노드 i 로 주어졌을 때, R^{swipt} 를 최대화하는 최적의 SWIPT 비율은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{\alpha}^* = \arg_{\vec{\alpha}} \max \min [\min_j R_{ij}^{swipt}, R_i^{swipt}] \quad (11)$$

여기에서 $\vec{\alpha} = \{\alpha_j, j=1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N\}$ 로 노드 j 의 SWIPT 비율 벡터를 나타낸다. 식 (6)과 (9)로부터 $\vec{\alpha}$ 가 증가하면 R_{ij}^{swipt} 는 증가하나 반대로 R_i^{swipt} 는 감소함을 알 수 있다. 따라서 둘 사이에는 tradeoff 관계가 존재한다. 이러한 경우 max-min 문제의 최적해는 $\min_j \{R_{ij}^{swipt}\} = R_i^{swipt}$ 인 경우에 구해진다. 이 조건을 만족시키는 최적의 $\vec{\alpha}$ 를 구하기 위하여 다음과 같은 반복 알고리즘을 사용한다.

최적의 SWIPT 비율이 위와 같이 구해질 때 최적의 CH i 는 다음과 같이 결정된다.

$$i^* = \arg_i \max \min [\min_j R_{ij}^{swipt}, R_i^{swipt}] \quad (12)$$

클러스터 내 노드가 N 개 일 때, N 번의 완전 탐색을 통하여 R^{swipt} 을 최대화하는 최적의 CH i^* 를 찾을 수 있다.

Algorithm 1: SWIPT algorithm

- 1: Initialize $R_i^{tar} \leftarrow \min_j \{R_{ij}\}$
 - 2: repeat
 - 3: Decide $\alpha_j \leftarrow (2^{R_i^{tar}} - 1) \frac{\sigma^2 T_d}{G \eta_j \zeta_j g_{ij} h_j P T_c}$ from (6)
 - 4: Update E_i^{add} according to (7)
 - 5: Update R_i^{swipt} according to (9)
 - 6: $R_i^{tar} \leftarrow (R_i^{swipt} + R_i^{tar}) / 2$
 - 7: until $R_i^{swipt} \geq R_i^{tar}$
 - 8: Return α_j
-

IV. 실험 결과 및 결론

모의실험을 위하여 $P=46$ dBm, $\zeta_i=0.8$, $\eta_i=0.9$, $T_e=5$ s, $T_d=0.1$ s, $G=20$ dB, noise spectral density는 -160 dBm/Hz, noise figure는 9 dB, 채널 대역폭은 10 MHz를 사용하였다^[1]. 채널 파워 이득은 $h_i = \Gamma d_i^{-n}$ 와 $g_{ij} = \Gamma d_{ij}^{-n}$ 로 결정되며, 여기에서 Γ 은 1 m에서의 파워 감쇄 기준으로 -30 dB로 주어지며, d_i 는 HAP와 CH i 간 거리, d_{ij} 는 노드 j 와 CH i 간 거리, n 은 pathloss exponent 값으로 2.5 로 설정된다. HAP는 셀 중앙에 위치하며 센서 노드들은 셀 내에 랜덤하게 분포된다. 또한 널리 사용되는 K-means 클러스터링 알고리즘을 사용하여 K 개의 클러스터를 만들었다. 기본 값으로 클러스터 수는 10 , 셀 내 노드 수는 300 , 셀 반경은 20 m로 선정하고, 이 값들을 변화시키면서 성능 양상을 살펴보았다. 비교 방안으로 최적의 CH를 선택하지 않을 때는 클러스터의 가장 중심에 위치한 노드를 CH로 선택하였다.

그림 2는 파라미터 변화에 따른 각 클러스터에서 달성 가능한 전송률의 평균값을 보여준다. 모든 경우에서 SWIPT를 사용하는 경우에 성능이 향상되는 것을 볼 수 있으며, 기존처럼 클러스터 중심 노드를 CH로 선택하는 것보다 최적의 CH를 선택하는 것이 더 좋은 성능을 보여준다. 특히 클러스터 수가 증가할수록, 노드 수가 많은 수록, 셀 반경이 작을수록 SWIPT 효과가 커져 성능 이득이 증가함을 알 수 있다. 본 결과를 바탕으로 추후에는 클러스터링 기법을 추가로 고려한 전송률 최적화 문제를 연구할 계획이다.

References

- [1] H.-H. Choi, "Optimal resource allocation for random access in wireless-powered communication networks," *J. KICS*, vol. 42, no. 10, pp. 1951-1954, Oct. 2017.
- [2] X. Lu, et al., "Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 18, no. 2, pp. 1413-1452, Nov. 2015.
- [3] H. Chen, et al., "Adaptive data aggregation scheme in clustered wireless sensor networks," *Computer Commun.*, vol. 31, no. 15, pp. 3579-3585, Sep. 2008.
- [4] H.-H. Choi, "Construction of energy-efficient data aggregation tree in wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 41, no. 9, pp. 1057-1059, Sep. 2016.