

섹터기반 무선전력 센서 네트워크를 위한 최적 클러스터 헤드 선택 방법

Optimal Cluster Head Selection Method for Sectorized Wireless Powered Sensor Networks

Hyun-Ho Choi*

*Professor, School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579 Korea

ABSTRACT

In this paper, we consider a sectorized wireless powered sensor network (WPSN), wherein sensor nodes are clustered based on sectors and transmit data to the cluster head (CH) using energy harvested from a hybrid access point. We construct a system model for this sectorized WPSN and find optimal coordinates of CH that maximize the achievable transmission rate of sensing data. To obtain the optimal CH with low overhead, we perform an asymptotic geometric analysis (GA). Simulation results show that the proposed GA-based CH selection method is close to the optimal performance exhibited by exhaustive search with a low feedback overhead.

Keywords : Wireless powered sensor networks, Wireless energy transfer, Cluster head selection, Geometric analysis.

I. 서 론

무선전력전송 기술은 낮은 에너지 전달 효율로 인하여 저전력으로 동작 가능한 센서 노드에 주로 적용된다 [1]. 아울러 무선 센서 네트워크에서는 전송 효율을 높이기 위하여 계층적인 클러스터드(clustered) 네트워크 구조를 사용한다. 즉, 센서 노드들은 클러스터로 그룹지어져 있으며, 이 그룹 내의 한 노드가 클러스터 헤드(cluster head, CH) 역할을 수행한다. 클러스터 내 센서 노드들은

CH에게 센싱 데이터를 전송하고 CH는 수신받은 센싱 데이터를 모아서 한 번에 access point (AP)로 전송한다 [2]. 따라서 CH의 선택은 센서 네트워크의 성능에 지대한 영향을 미치며, 전체 성능을 극대화하기 위하여 최적의 CH를 선택하는 것이 필요하다. 기존에는 전수조사(exhaustive search, ES) 방식으로 모든 노드를 조사하거나 휴리스틱 한 k-means 클러스터링 방식을 사용했으나, 이런 방식들은 무선 네트워크 환경에서 많은 채널 피드백 오버헤드와 높은 계산 복잡도를 유발하여 실용적이지 않다 [3]. 따라서 낮은 오버헤드와 복잡도로 최적의 CH를 찾는 클러스터 헤드 선택 방식이 필요하다.

본 연구에서는 hybrid AP (HAP)가 셀 내에 무선 에너지를 방송하면, 이 무선 에너지를 하베스팅한 센서 노드가 센싱 데이터를 CH에게 전송하고 CH는 전달받은 센싱 정보들을 취합하여 한 번에 HAP에게 전달하는 무선 전력 센서 네트워크(wireless powered sensor network, WPSN)를 고려한다 [4]. 일반적으로 HAP는 무선 에너지 전송 효율을 높이기 위하여 빔포밍을 사용하므로 실제적인 셀 구조는 원형 보다는 sector 구조가 된다 [5]. 따라서 우리는 sectorized WPSN 구조에서 최적의 CH 선택을 고려한다. 이를 위하여 sectorized WPSN의 시스템 모델을 제시하고, 센싱 데이터 전송률을 최대화하는 최적 CH를 찾는 최적화 문제를 도출한다. 이 조합 최적화 문제를 낮은 복잡도로 해결하기 위하여 geometric analysis (GA)을 수행하여 최적의 CH 좌표를 찾는 문제로 근사화하고 섹터 내에서 최적의 CH 좌표를 수학적으로 도출한다. 이러한 GA 기반의 제안 CH 선택 방식은 이 최적 CH 좌표 근처에 존재하는 적은 수의 센서 노드들만을 조사함으로써 낮은 오버헤드와 복잡도로 최적의 CH를 선택할 수 있게 만든다. 다양한 모의실험을 통하여 제안하는 GA 기반의 CH 선택 방식이 기존 방식 대비 전송률 및 오버헤드 측면에서 우수함을 보인다.

II. 시스템 모델 및 문제 정의

Received 6 December 2021, Revised 13 December 2021, Accepted 4 January 2022

* Corresponding Author Hyun-Ho Choi(E-mail: hhchoi@hknu.ac.kr, Tel:+82-31-670-5297)

Professor, School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.1.176>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

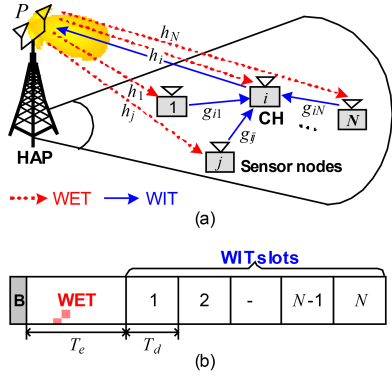


Fig. 1 Sectorized WPSN: (a) system model and (b) frame structure.

그림 1은 고려하는 sectorized WPSN의 시스템 모델과 프레임 구조를 보여준다. HAP는 P 의 파워로 섹터 내에 wireless energy transfer (WET)를 수행한다. 섹터 내 N 개의 센서 노드들은 이 에너지를 하베스팅하여 CH로 선택된 노드 i 에게 wireless information transmission (WIT)를 수행한다. CH는 하베스팅 한 에너지를 이용하여 수신한 센싱 정보를 병합하여 HAP에게 전송한다. 채널 reciprocity가 존재한다고 가정하며, HAP와 노드간 채널 파워 이득은 h_i 로 노드 i 와 j 간의 채널 파워 이득은 g_{ij} 로 나타낸다.

센서 노드들의 전송은 사전에 스케줄링 되어 충돌 없이 TDMA 기반으로 이루어진다 [6]. HAP는 초기에 비컨 슬롯에서 스케줄링 정보를 방송한 후 WET 슬롯에서 섹터 내 노드들에게 에너지를 전송한다. 다음으로 이어지는 WIT 슬롯에서 각 노드는 CH에게 자신의 센싱 데이터를 전송한다. 데이터를 수신받은 CH는 마지막 WIT 슬롯에서 HAP에게 모든 센싱 데이터를 병합하여 전송한다. 여기에서 WET와 WIT 슬롯의 길이는 각각 T_e 와 T_d 로 설정된다.

노드 j 가 HAP로부터 하베스팅하는 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$E_j = \zeta G_1 h_j P T_e \text{ [Joule]}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

여기에서 ζ 는 하베스팅 효율, G_1 은 HAP의 안테나 이득을 나타낸다. 따라서, 노드 j 가 WIT 슬롯에서 데이터를 전송할 때 사용하는 송신 파워는 다음과 같이 결정된다.

$$P_j = \frac{\eta E_j}{T_d} = \frac{\eta \zeta G_1 h_j P T_e}{T_d} \quad (2)$$

여기에서 η 은 하베스팅 한 에너지 중 센싱, 프로세싱,

섹터기반 무선전력 센서 네트워크를 위한 최적 클러스터 헤드 선택 방법

수신 등을 제외한 데이터 전송에만 쓰이는 에너지의 비율이다. 또한, 노드 j 에서 CH i 로의 데이터 전송률은 다음과 같다.

$$R_{ij} = \log_2 \left(1 + \frac{G_2 g_{ij} P_j}{\sigma^2} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{\eta \zeta G_1 G_2 g_{ij} h_j P T_e}{\sigma^2 T_d} \right) \quad (3)$$

여기에서 G_2 는 센서 노드의 안테나 이득, σ^2 은 잡음 전력을 나타낸다. 비슷하게 CH i 에서 HAP로의 데이터 전송률은 다음과 같이 구해진다.

$$R_i = \log_2 \left(1 + \frac{G_2 h_i P_i}{\sigma^2} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{\eta \zeta G_1 G_2 h_i^2 P T_e}{\sigma^2 T_d} \right) \quad (4)$$

센서 네트워크에서 수집할 수 있는 센싱 데이터의 최대 전송률은 모든 전송 링크의 전송률의 최소값에 의해 제한된다 [1]. 따라서, 고려하는 WPSN에서 얻을 수 있는 센싱 데이터의 전송률은 다음과 같이 결정된다.

$$R = \min [\min_j \{R_{ij}\}, R_i] \quad (5)$$

따라서, 센싱 데이터 전송률을 최대화하는 최적의 CH i^* 는 다음과 같은 최적화 문제의 해로 결정된다.

$$\begin{aligned} i^* &= \arg, \max R = \arg, \max \min [\min_j \{R_{ij}\}, R_i] \\ &= \arg, \max \min \left[\min_j \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{\eta \zeta G_1 G_2 g_{ij} h_j P T_e}{\sigma^2 T_d} \right) \right\}, \right. \\ &\quad \left. \log_2 \left(1 + \frac{\eta \zeta G_1 G_2 h_i^2 P T_e}{\sigma^2 T_d} \right) \right] \\ &= \arg, \max \min [\min_j \{g_{ij} h_j\}, h_i^2] \end{aligned} \quad (6)$$

III. 클러스터 헤드의 최적 위치 분석

(6)은 조합 최적화 문제로 전수조사 방식을 사용할 경우 모든 채널 정보 h_i 와 g_{ij} 를 알아야 한다. 이는 전체 노드 수 N 이 증가함에 따라 매우 큰 피드백 오버헤드와 계산 복잡도를 유발하기 때문에, 탐색 공간을 줄이기 위한 방법으로 다수의 노드가 섹터 내에 균등하게 분포한다고 가정하여 근사적인 GA를 수행한다.

그림 2는 GA를 위한 시스템 모델을 보여준다. 노드 i 와 j 사이의 거리를 d_{ij} , HAP와 노드 j 사이의 거리를 d_j 로 나타내고, 채널 페이딩은 시간 평균화에 의해 무시된다고 가정할 때 채널 파워 이득을 간단히 $g_{ij} = \beta d_{ij}^{-\alpha}$, $h_i = \beta d_j^{-\alpha}$ 로 나타낼 수 있다. 여기에서 β 는 기본거리 1m에서의 평균 파워 감쇄량이고, α 는 경로 감쇄 지수이다. 이 채널 파워 이득을 (6)에 대입하면 최적화 문제는 다음과 같이 min-max 문제로 변형된다.

$$i^* = \arg \min_i \max_j \{d_{ij}, d_j^2\} \quad (7)$$

먼저 특정한 CH i 에 대해서 하위문제 $\max_j \{d_{ij}, d_j^2\}$ 만을 다룬다. 극좌표계를 사용하면 $i = r_i \angle \theta_i$, $j = r_j \angle \theta_j$, $d_{ij} = \sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\theta_i - \theta_j)}$, $d_j = r_j$ 로 표현되며, 이를 반영하면 $\max_j \{d_{ij}, d_j^2\}$ 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\max_j \{d_{ij}, d_j^2\} = \max_{r_j, \theta_j} \{r_j \sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\theta_i - \theta_j)}\} \quad (8)$$

$$s.t. \quad R_{\min} \leq r_j \leq R_{\max},$$

$$0 \leq \theta_j \leq \Theta$$

여기에서 R_{\min} 과 R_{\max} 는 섹터의 최소 및 최대 반지름이며, Θ 는 섹터의 각도를 나타낸다. 최적화 문제 (8)을 풀기 위하여 Lagrangian을 구하면 다음과 같다.

$$\mathcal{L}(r_j, \theta_j, \mu) = r_j \sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\theta_i - \theta_j)} + \mu_1 (r_j - R_{\min}) + \mu_2 (R_{\max} - r_j) + \mu_3 \theta_j + \mu_4 (\Theta - \theta_j) \quad (9)$$

이 Lagrangian의 편미분 값은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial r_j} = \sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\theta_i - \theta_j)} + \frac{r_j (r_j - r_i \cos(\theta_i - \theta_j))}{\sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\theta_i - \theta_j)}} + \mu_1 - \mu_2 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_j} = -\frac{r_i r_j^2 \sin(\theta_i - \theta_j)}{\sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\theta_i - \theta_j)}} + \mu_3 - \mu_4 \quad (11)$$

Karush-Kuhn-Tucker 조건과 함께 $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial r_j} = 0$, $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_j} = 0$ 로부터 실현 가능한 해를 구하면 $r_j = R_{\max}$, $\theta_j = 0$ 또는 $r_j = R_{\max}$, $\theta_j = \Theta$ 일 때 $\max_j \{d_{ij}, d_j^2\}$ 는 최대가 된다. 해가 대칭적으로 나타나는 것을 고려하면 최적의 θ_i 는 $\theta_i^* = \frac{\Theta}{2}$ 가 되며, 이들 값을 적용하면 $\max_j \{d_{ij}, d_j^2\}$ 의 최대 값은 $R_{\max} \sqrt{r_i^2 + R_{\max}^2 - 2r_i R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2}}$ 가 된다. 이를 원래 문제 (7)에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$\min_{r_i} \max \left[R_{\max} \sqrt{r_i^2 + R_{\max}^2 - 2r_i R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2}}, r_i^2 \right] \quad (12)$$

$$s.t. \quad R_{\min} \leq r_i \leq R_{\max}$$

(12)는 이제 r_i 에 관한 최적화 문제가 되며, 이를 풀기 위하여 $f = R_{\max} \sqrt{r_i^2 + R_{\max}^2 - 2r_i R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2}}$ 라 놓고 $\frac{\partial f}{\partial r_i}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial r_i} = 2R_{\max} \frac{r_i - R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2}}{\sqrt{r_i^2 + R_{\max}^2 - 2r_i R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2}}} \quad (13)$$

이 $\frac{\partial f}{\partial r_i}$ 는 $r_i < R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2}$ 일 때 음수가 되고, $r_i > R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2}$ 일 때 양수가 되므로 식 f 는 $r_i = R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2}$ 에서 최소값을 갖는다. 따라서 $f > r_i^2$ 인 경우 최적 r_i 는 $r_i^* = R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2}$ 가 된다. 반면 $f > r_i^2$ 가 성립하지 않는 경우, 또 다른 최소값은 $f = r_i^2$ 의 조건으로부터 구할 수 있다. 따라서, 다음과 같이 주어지는 r_i 에 관한 방정식으로부터 최적 r_i^* 값을 계산할 수 있다.

$$R_{\max} \sqrt{r_i^2 + R_{\max}^2 - 2r_i R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2}} = r_i^2 \quad (14)$$

$$\Leftrightarrow r_i^4 - R_{\max}^2 r_i^2 + 2R_{\max}^3 \cos \frac{\Theta}{2} r_i - R_{\max}^4 = 0$$

위의 두 해를 종합하면 CH의 최적 좌표는 다음과 같이 표현된다.

$$i^* = \begin{cases} r_i^* \angle \frac{\Theta}{2}, & \text{if } r_i^* < R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2} \\ R_{\max} \cos \frac{\Theta}{2} \angle \frac{\Theta}{2}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

여기에서 r_i^* 는 (14)의 해가 된다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위하여 $P=46$ dBm, $\zeta=0.5$, $\eta=0.9$, $\beta=-30$ dB, $\alpha=2.7$, $G_1=20$ dB, $G_2=3$ dB, $T_c=5$ s, $T_d=0.1$ s, $R_{\min}=10$ m, $R_{\max}=50$ m를 사용하였다 [1]. 섹터 각도는 $10\sim 60^\circ$ 에서 변화시키고, 센서 노드들은 섹터 내에 균등하게 분포된다고 가정한다. 성능 비교를 위하여 모든 노드를 전수조사하여 최적의 CH를 찾는 ES 방식과 대표적인 클러스터링 프로토콜인 low-energy adaptive clustering hierarchy (LEACH) 및 셀 중앙 위치에 가장 가까이 있는 노드를 CH로 선택하는 CENTER 방식을 고려하였다 [7]. 제안하는 CH 선택 방식은 GA를 통해 구한 최적 CH 좌표에서 가장 가까운 k 개의 센서 노드만을 검색하는 GA- k 프로토콜을 사용하였다.

그림 2는 섹터 각도가 30° 와 $\Theta=60^\circ$ 일 때 ES, CENTER, GA 방식으로 찾은 CH의 위치를 보여준다. 섹터 각도에 따라 ES로 찾은 최적의 CH는 섹터 중심(CENTER)보다 GA를 통해 찾은 최적 CH 좌표 근처에 위치함을 알 수 있다. 따라서, 제안하는 GA는 섹터 각도에 따라 최적의 CH 위치를 잘 결정하고 있음을 알 수 있다.

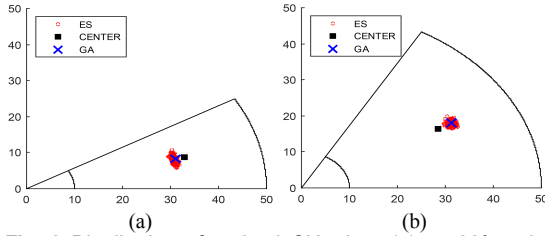


Fig. 2 Distribution of optimal CH when (a) $\theta=30^\circ$ and (b) $\theta=60^\circ$.

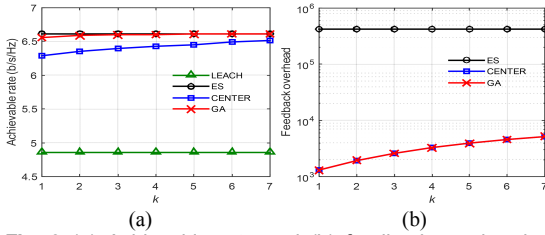


Fig. 3 (a) Achievable rate and (b) feedback overhead vs. number of search nodes (k).

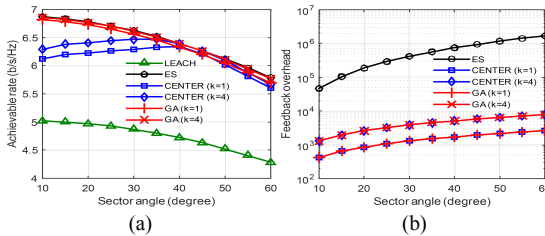


Fig. 4 (a) Achievable rate and (b) feedback overhead vs. sector angle (θ).

그림 3은 좌표 근처 탐색 노드 수 k 에 따른 센싱 데이터 전송률과 피드백 오버헤드를 보여준다. k 가 증가할수록 제안하는 GA 방식은 ES의 최적 성능에 근접하지만, CENTER 방식은 이보다 낮은 전송률을 갖는다. 피드백 오버헤드 측면에서 ES는 i, j 의 모든 조합 수 N^2 에 비례하여 높은 오버헤드를 갖지만, CENTER와 GA 방식은 kN 에 비례하여 낮은 오버헤드를 갖는다. 기존 LEACH 방식은 채널 정보를 고려하지 않고 무작위로 CH를 선택하기 때문에 채널 피드백 오버헤드는 없지만 상당히 낮은 전송률을 갖는다.

그림 4는 섹터 각도에 따른 센싱 데이터 전송률과 피드백 오버헤드를 보여준다. 섹터 각도에 관계없이 제안하는 GA 방식은 ES의 최적 성능에 항상 근접하지만, CENTER 방식의 경우 섹터 각도가 작아지거나 커짐에 따라 전송률이 낮아진다. 또한, 큰 k 값을 사용할수록 GA와 CENTER의 전송률은 높아지지만 그에 반하여 오버헤드가 증가함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 sectorized WPSN을 고려하여 센싱 데이터 전송률을 최대화하는 CH 선택 방식을 제안하였다. 낮은 오버헤드로 최적의 CH를 찾기 위하여 GA를 수행하여 최적의 CH 좌표를 수학적으로 구하고, 이 좌표 근처에 존재하는 일부 센서 노드들만 조사하는 방식으로 최적의 CH를 선택하였다. 모의실험 결과, 제안하는 GA 기반 CH 선택 방식이 피드백 오버헤드를 줄이면서 최적에 가까운 전송률을 달성하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2019R1A2C4070466).

REFERENCES

- [1] H. H. Choi and J. R. Lee, "Energy-neutral operation based on simultaneous wireless information and power transfer for wireless powered sensor networks," *Energies*, vol. 12, no. 20, pp. 3823, Oct. 2019.
- [2] S. Kosunalp, "MAC protocols for energy harvesting wireless sensor networks: Survey," *ETRI journal*, vol. 37, no. 4, pp. 804-812, Aug. 2015.
- [3] P. Sasikumar and K. Sibaram, "K-means clustering in wireless sensor networks," in *Proc. IEEE ICCICN*, Nov. 2012.
- [4] K. W. Choi, L. Ginting, A. A. Aziz, D. Setiawan, J. H. Park, S. I. Hwang, D. S. Kang, M. Y. Chung, and D. I. Kim, "Toward realization of long-range wireless-powered sensor networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 4, pp. 184-192, Aug. 2019.
- [5] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chua, "Multi-antenna wireless powered communication with energy beamforming," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 12, pp. 4349-4361, Dec. 2014.
- [6] H. H. Choi, "Prioritized Random Access Control for Fairness Improvement in Wireless-Powered Communication Networks," *Journal of Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 175-182, Jan. 2018.
- [7] S. K. Singh, P. Kumar, and J. P. Singh, "A survey on successors of LEACH protocol," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 4298-4328, Feb. 2017.