

# UAV 전력 기반 무선 센서 네트워크의 성능 최적화

최 현 호\*

## On the Performance Optimization for UAV-Powered Wireless Sensor Networks

Hyun-Ho Choi\*

### 요 약

본 논문에서는 unmanned aerial vehicle (UAV)가 전송하는 무선 에너지를 하베스팅 한 센서 노드들이 센싱 데이터를 UAV에게 반송하는 UAV 전력 기반 무선 센서 네트워크를 고려한다. 이러한 UAV-powered 센서 네트워크의 성능이 UAV의 고도 및 탑재된 안테나의 빔폭과 관련되어 있음을 확인하고 UAV가 모든 센싱 정보를 수집하는데 걸리는 시간을 최소화하기 위한 최적의 고도와 빔폭을 분석한다. 모의실험 결과는 도출한 최적의 고도와 빔폭 값을 적용할 때 UAV-powered 센서 네트워크의 성능이 향상됨을 보여준다.

**Key Words** : UAV communication, wireless power transfer, wireless sensor network, optimization.

### ABSTRACT

In this letter, we consider an unmanned aerial vehicle (UAV)-powered wireless sensor network (WSN) in which sensor nodes harvest energy from the UAV's signal and transmit sensing data to it using the harvested energy. Considering that the performance of UAV-power WSN is related to the altitude and antenna beamwidth of UAV, we jointly optimize the altitude and beamwidth to collect

sensing data from all sensor nodes as quickly as possible. The simulation result shows that the derived optimal altitude and beamwidth maximize the performance of UAV-powered WSN systems.

### 1. 서 론

Unmanned aerial vehicle (UAV)은 자유롭게 이동하여 단말 근처에서 서비스할 수 있어 무선 통신을 위한 이동 기지국뿐만 아니라 무선 에너지를 공급하는 에너지 소스로 활용 가능하다<sup>[1]</sup>. 이러한 hybrid access point (HAP) 역할을 수행하는 UAV는 최적의 위치에서 센서 노드를 서비스함으로써 데이터 및 에너지 전송 효율을 높일 수 있다.

최근 UAV 기반의 무선 전력 전송 시스템이 널리 연구되고 있으며, 지상의 센서 노드들이 하베스팅하는 에너지량을 최대화하기 위한 UAV의 위치 및 이동 경로를 최적화하는 연구가 주로 진행되었다<sup>[2]</sup>. 이러한 연구는 무선 전력 통신 네트워크로 확장되어 에너지 전송뿐만 아니라 데이터 정보를 수신하는데 UAV를 사용하게 되었고, 이러한 환경에서 UAV의 이동 경로와 함께 송수신을 위한 자원 최적화가 이루어졌다. 아울러, 간섭 채널, 릴레이 채널, 비직교 다중 접속 환경에서도 관련 연구가 진행되었다<sup>[3]</sup>.

하지만 기존 대부분의 연구에서는 UAV가 무지향성 안테나를 사용하거나 빔폭(beamwidth)을 조절할 수 없는 상황을 고려하였다<sup>[2,3]</sup>. 최신 안테나 기술이 빔폭을 자유롭게 가변시킬 수 있음을 감안할 때 UAV는 빔폭과 고도를 조절하여 보다 나은 서비스를 제공할 수 있다<sup>[4]</sup>. 예를 들어, 고도를 낮추고 빔폭을 줄임으로써 전송 효율을 높이거나, 고도를 높이고 빔폭을 늘림으로써 커버리지를 넓힐 수 있다. 이러한 전송 효율과 커버리지 성능은 UAV의 빔폭 및 고도에 따라 트레이드오프 관계를 가지므로 네트워크 성능을 최대화하기 위해서는 적절한 UAV의 고도와 빔폭 값을 사용해야 한다.

본 논문에서는 UAV가 전송하는 무선 에너지를 하베스팅하여 데이터를 전송하는 UAV-powered 무선 센서 네트워크(wireless sensor network, WSN) 환경에서 데이터 수집 시간을 최소화하기 위한 최적의 UAV 고도와 빔폭을 분석한다. 모의실험을 통해 도출

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

• First Author : (ORCID:0000-0002-6785-2596) Hankyong National University, School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, hhchoi@hknu.ac.kr, 정교수, 종신회원

논문번호 : 202112-328-A-LU, Received December 4, 2021; Revised December 23, 2021; Accepted December 29, 2021

된 최적의 고도와 빔폭을 사용하는 경우 센싱 데이터 수집 시간의 향상 정도를 살펴본다.

### II. 시스템 모델

그림 1은 고려하는 UAV-powered WSN의 시스템 모델을 보여준다. HAP 기능을 수행하는 UAV는 고도  $H$  m에서 전체 면적  $A$  m<sup>2</sup>에 존재하는  $N$ 개의 센서에 무선으로 에너지를 공급하고 센싱 데이터를 수집한다. UAV는 반전력(half-power) 빔폭이  $\theta$ 인 지향성 안테나를 사용하며 빔의 방위각과 고도각은 각각  $\theta$ 와  $\phi$ 로 주어진다. 이때 방향  $(\theta, \phi)$ 에서의 안테나 이득은 다음과 같다.

$$G(\theta) = \begin{cases} \frac{G_0}{\theta^2}, & -\theta \leq \theta \leq \theta, -\theta \leq \phi \leq \theta \\ g \approx 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기에서 상수  $G_0 = \frac{30000}{2^2} \left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \approx 2.2846$ 으로 주어지며, 가능한  $\theta$ 의 범위는  $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ 이다. 또한, 실제 환경에서  $g$  값은  $0 < g \ll \frac{G_0}{\theta^2}$ 를 만족하여 간단히  $g=0$ 을 가정한다.

그림 1에서 보듯이 UAV가 커버하는 셀의 반지름은  $R = H \tan \theta$ 로 결정된다. 셀 중심과 UAV의 수평 거리를  $r$  ( $0 \leq r \leq R$ )이라 할 때 UAV와 센서 간의 채널 파워 이득은 다음과 같이 주어진다.

$$h(r) = \beta (\sqrt{H^2 + r^2})^{-\alpha} = \beta (H^2 + r^2)^{-\alpha/2} \quad (2)$$

여기에서  $\alpha$ 는 경로 감쇄 지수이며,  $\beta$ 는 기준 거리 1m에서의 채널 파워 이득을 나타낸다. 또한, 각 셀의

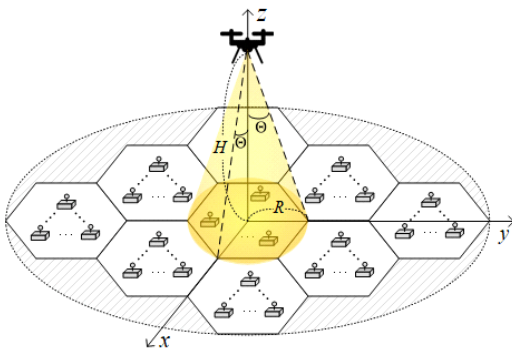


그림 1. UAV-powered WSN의 시스템 모델  
Fig. 1. System model for UAV-powered WSN.

면적( $A_c$ )과 전체 네트워크 내의 셀 수( $N_c$ )는 다음과 같이 구해진다.

$$A_c = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} H^2 \tan^2 \theta \quad (3)$$

$$N_c = \frac{A}{A_c} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{A}{H^2 \tan^2 \theta} \quad (4)$$

UAV는  $N_c$ 개의 셀을 돌아다니며 셀마다  $T_p$ 의 시간 동안 RF 에너지를 방송하고,  $T_d$ 의 시간 동안 센서 노드들로부터 데이터를 수신한다고 가정한다. 분석의 용이성을 위하여 UAV의 셀 방문 순서는 사전에 정해져 있다고 가정하고, 센서 노드들은 LoRa 시스템과 같이 CDMA 방식을 사용하여 충돌 없이 동시에 센싱 데이터를 UAV에게 전달한다고 가정한다<sup>5)</sup>.

### III. UAV 고도와 빔폭의 통합 최적화

UAV는 에너지 소비를 최소화하면서 시간에 민감한 센싱 이벤트를 신속하게 알아채기 위하여 네트워크의 모든 센서 노드들로부터 센싱 데이터를 수집하는데 걸리는 시간을 최소화하고자 한다. 따라서 UAV의 고도와 빔폭에 따른 데이터 수집 시간을 수학적으로 분석하고 이를 최소화하는 최적의 UAV의 고도와 빔폭 값을 도출한다.

각 셀의 수평 거리  $r$ 에 위치한 센서가 UAV로부터 하베스팅하는 에너지량은 다음과 같이 표현된다.

$$E(r) = \zeta P G(\theta) h(r) T_p \quad (5)$$

여기에서  $\zeta$ 는 에너지 하베스팅 효율이며,  $P$ 는 UAV의 송신 파워를 나타낸다. 이 에너지를 이용할 때 센서 노드의 송신 파워는 다음과 같이 결정된다.

$$Q(r) = \frac{\eta E(r)}{T_d} = \frac{\eta \zeta P G(\theta) h(r) T_p}{T_d} \quad (6)$$

여기에서  $\eta$ 는 전체 하베스팅 한 에너지 중 다른 프로세싱을 제외한 데이터 전송에만 사용되는 에너지 비율을 나타낸다<sup>6)</sup>. 또한, Shannon 용량 공식에 의해 수평 거리  $r$ 인 센서 노드의 전송률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 C(r) &= W \log_2 \left( 1 + \frac{Q(r)G(\theta)h(r)}{\sigma^2 W} \right) \\
 &= W \log_2 \left( 1 + \frac{\eta \zeta P G(\theta)^2 h(r)^2 T_p}{T_d \sigma^2 W} \right) \\
 &= W \log_2 \left( 1 + \frac{\eta \zeta P T_p G_0^2 \beta^2 (H^2 + r^2)^{-\alpha}}{T_d \sigma^2 W \Theta^4} \right) \\
 &= W \log_2 \left( 1 + \frac{\Gamma}{\Theta^4 (H^2 + r^2)^\alpha} \right) \quad [bits/s]
 \end{aligned} \tag{7}$$

여기에서  $W$ 는 사용 대역폭,  $\sigma^2$ 은 잡음 전력이며 상수  $\Gamma = \frac{\eta \zeta P T_p G_0^2 \beta^2}{T_d \sigma^2 W}$ 가 정의된다.

$C(r)$ 은  $r$ 에 대한 감소함수이므로  $r=R$ 일 때 최소값  $C(R)$ 이 된다. 따라서, 각 셀의 모든 센서 노드가 전송을 마치는데 걸리는 시간의 상한값은  $C(R)$ 에 의해 결정된다. 따라서, 모든 노드가 크기  $D$  비트인 센싱 데이터를 전송한다고 할 때 필요한 전송 횟수는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 N_{tx} &= \frac{D}{T_d C(R)} = \frac{D}{T_d W \log_2 \left( 1 + \frac{\Gamma}{\Theta^4 (H^2 + R^2)^\alpha} \right)} \\
 &= \frac{D}{T_d W \log_2 \left( 1 + \frac{\Gamma \cos^{2\alpha} \Theta}{\Theta^4 H^{2\alpha}} \right)}
 \end{aligned} \tag{8}$$

따라서 UAV가 한 셀에서 서비스하는 시간은  $T_{serv} = N_{tx}(T_p + T_d)$ 가 되며, 전체 셀 수  $N_c$ 를 고려하면 네트워크 상의 모든 센서 노드로부터 데이터를 수집하는데 걸리는 총 시간은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 T_{collect} &= N_c \times T_{serv} = N_c N_{tx} (T_p + T_d) \\
 &= \frac{2AD(T_p + T_d)}{3\sqrt{3} T_d W} \frac{1}{H^2 \tan^2 \Theta \log_2 \left( 1 + \frac{\Gamma \cos^{2\alpha} \Theta}{\Theta^4 H^{2\alpha}} \right)} \\
 &= K \frac{1}{f(H, \Theta)}
 \end{aligned} \tag{9}$$

여기에서  $K = \frac{2AD(T_p + T_d)}{3\sqrt{3} T_d W}$ 는 상수이며,  $H$ 와  $\Theta$ 의 함수  $f(H, \Theta) = H^2 \tan^2 \Theta \log_2 \left( 1 + \frac{\Gamma \cos^{2\alpha} \Theta}{\Theta^4 H^{2\alpha}} \right)$ 가 정의된다. 따라서, 데이터 수집 시간  $T_{collect}$ 를 최소화하기 위해서는 함수  $f(H, \Theta)$ 를 최대화하면 된다.

우리는  $f(H, \Theta)$ 가  $H$ 와  $\Theta$ 에 따라 concave 함수임을 분석과 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 따라서  $f$ 를 최대화하는 최적  $H^*$ 는  $\frac{\partial f}{\partial H} = 0$ 의 조건으로부터 다음과 같이 closed-form으로 구해진다.

$$H^* = \left( \frac{\cos^{2\alpha} \Theta}{\Theta^4} \frac{\Gamma}{W_0(-\alpha e^{-\alpha}) - 1} \right)^{1/2\alpha} \tag{10}$$

여기에서  $W_0$ 은 Lambert W 함수를 나타낸다. 또한, 최적  $\Theta^*$ 는  $\frac{\partial f}{\partial \Theta} = 0$ 의 조건으로부터 다음 방정식의 해로 구해진다.

$$\ln \left( 1 + \frac{\Gamma \cos^{2\alpha} \Theta}{\Theta^4 H^{2\alpha}} \right) = \frac{\alpha \sin^2 \Theta + \frac{\sin 2\Theta}{\Theta}}{1 + \frac{\Theta^4 H^{2\alpha}}{\Gamma \cos^{2\alpha} \Theta}} \tag{10}$$

#### IV. 실험 결과

모의실험을 위하여 사용한 파라미터는 표 1과 같다. 실험 환경 구성을 위하여  $A$  면적의 정사각형에  $N$ 개의 센서 노드를 랜덤하게 분포시키고, UAV는 고도와 빔폭에 따라 결정된 커버리지 안에 존재하는 센서 노드들을 서비스한다. UAV 통신은 주로 line-of-sight 환경에서 이루어져 fast fading은 없다고 가정하여 단순히 거리 기반으로 감쇄하는  $h = \beta d^{-\alpha}$ 의 채널 모델을 사용하였다<sup>5)</sup>. 경로 감쇄 지수  $\alpha=3$ 과 에너지 하베스팅 효율  $\zeta=0.5$ 를 기본값으로 설정하였으며 이들 값을 변경하면서 성능 변화를 살펴보았다.

그림 2는  $\alpha=3$ 과  $\zeta=0.5$ 일 때 UAV의 고도  $H$ 와  $\Theta$ 에 따른 함수  $f(H, \Theta)$  값의 변화를 보여준다. 보는 바와 같이  $f(H, \Theta)$ 는  $H$ 와  $\Theta$ 의 변화에 따라 concave 형

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameters.

Description	Notation	Value
Total number of sensor nodes	$N$	$10^6$
Total area of WSN	$A$	1 km <sup>2</sup>
Transmission power of UAV	$P$	23 dBm
Energy harvesting efficiency	$\zeta$	0.5
Portion of energy used for data transmission	$\eta$	0.5
Channel power gain at the reference distance	$\beta$	-30 dB
Path loss exponent	$\alpha$	3
Channel bandwidth	$W$	100 kHz
Noise spectral density	$\sigma^2$	-165 dBm/Hz
Sensing data size	$D$	100 kbits
Duration of power transmission	$T_p$	1 s
Duration of data transmission	$T_d$	0.1 s

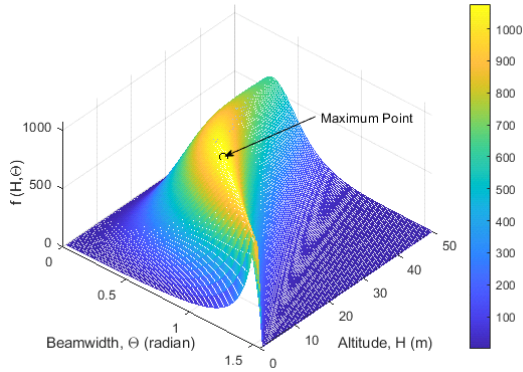


그림 2.  $H$ 와  $\theta$ 에 따른  $f(H, \theta)$ 의 변화 ( $\alpha=3, \zeta=0.5$ )  
 Fig. 2.  $f(H, \theta)$  vs.  $H$  and  $\theta$  when  $\alpha=3$  and  $\zeta=0.5$ .

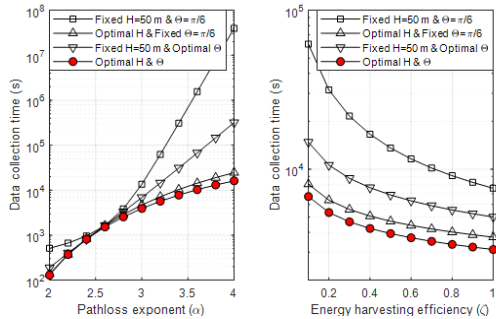


그림 3.  $\alpha$ 와  $\zeta$ 에 따른 데이터 수집 시간  
 Fig. 3. Data collection time vs.  $\alpha$  and  $\zeta$ .

태가 되어  $f(H, \theta)$ 를 최대화하는 최적의  $H$ 와  $\theta$ 가 유일하게 존재함을 보여준다.

그림 3은 경로 감쇄 지수( $\alpha$ )와 에너지 하베스팅 효율( $\zeta$ )에 따른 데이터 수집 시간을 보여준다. 비교를 위하여  $H$ 와  $\theta$ 가 모두 고정이거나 둘 중 하나가 고정인 방식을 사용하였다. 그림에서 보듯이  $\alpha$ 가 커질수록 그리고  $\zeta$ 가 작아질수록 에너지 및 데이터 전송 효율이 낮아져 데이터 수집 시간이 증가하게 된다. 명백하게 데이터 수집 시간은  $H$ 와  $\theta$ 가 모두 최적화되었을 때 가장 좋은 성능을 보여준다. 반면  $H$ 만 최적화되었을 때  $\theta$ 만 최적화된 경우보다 더 좋은 성능을 보여주는데, 이는 UAV의 고도( $H$ )가 빔폭( $\theta$ ) 보다 성능에 더 영향을 미치는 파라미터임을 의미한다.

### V. 결론

본 논문에서는 UAV-powered 센서 네트워크에서 센싱 정보 수집 시간을 최소화하기 위한 UAV의 최적 고도와 빔폭을 이론적으로 도출하였다. 모의실험 결과, 제안하는 UAV 고도 및 빔폭의 최적화 기법이

UAV-powered 센서 네트워크의 성능을 향상시키는데 기여하였다. 추후에는 다양한 UAV 채널 환경 및 특징 변수들을 고려하여 성능 분석 및 최적화를 진행할 계획이다.

### References

- [1] A. M. Le, et al., "Wireless power transfer near-field technologies for unmanned aerial vehicles (UAVs): A review," *Trans. Ind. Netw. and Intell. Syst.*, vol. 7, no. 22, pp. 1-18, Sep. 2020.
- [2] J. Xu, Y. Zeng, and R. Zhang, "UAV-enabled wireless power transfer: Trajectory design and energy optimization," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 8, pp. 5092-5106, Aug. 2018.
- [3] J. Park, H. Lee, S. Eom, and I. Lee, "UAV-aided wireless powered communication networks: Trajectory optimization and resource allocation for minimum throughput maximization," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 134978-134991, Sep. 2019.
- [4] H. He, et al., "Joint altitude and beamwidth optimization for UAV-enabled multiuser communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 2, pp. 344-347, Feb. 2018.
- [5] Z. Yang, et al., "Joint altitude, beamwidth, location, and bandwidth optimization for UAV-enabled communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 8, pp. 1716-1719, Aug. 2018.
- [6] H.-H. Choi, "Cooperative SWIPT scheme for maximizing rate in clustered WPCN," *J. KICS*, vol. 44, no. 10, pp. 1841-1844, Oct. 2019.