IoT 보안 에너지 효율 최대화를 위한 UAV 기반 SWIPT 시스템 디자인

하대한, 강진규*
한국과학기술원, *명지대학교

coremerom@kaist.ac.kr, *jkkang@mju.ac.kr

Design for Secure IoT Energy Efficiency Maximization for UAV-based SWIPT

Dae Han Ha, Jin Kyu Kang*
Korea Advanced Institute of Science & Technology (KAIST), *Myongji Univ.

요 약

본 논문에서는 IoT 단말들을 위한 SWIPT(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer)시스템에서 SEE(Secrecy Energy Efficiency)를 극대화하기 위해 보안 무인항공기(UAV)의 도움을 기반한 시스템 디자인을 제안한다. 이를 위해 기지국과 UAV 의 전송 전력, 배터리 제한 IoT 단말의 EH(Energy Harvesting) 전력 분할 비율, UAV 의 궤적을 공동 최적화하는 SEE 최대화 문제를 공식화하고 솔루션을 제안하며 그 타당성과 효율성은 시뮬레이션 결과를 통해 확인된다.

Ⅰ. 서 론

최근 무인항공기(UAV)는 높은 이동성, 저렴한 설치 비용, 배터리 제한이 있는 스마트 기기가 널리 보급된 배포 유연성 덕분에 사물 인터넷(IoT) 네트워크에 주목받고 있다 [1]. 특히, UAV 는 운용 능력 하에 자유롭게 비행할 수 있으므로 헬퍼 노드로서 물리 계층 보안성 향상에 적합하다. 이러한 이유로 UAV 는 물리 계층 보안을 향상시키기 위해 도우미 노드 [2] 및 방해 전파 [3]로 활발히 연구되었다. 또한, 에너지 제약이 있는 IoT 장치의 경우 무선 전력 전송(WPT) 기술이 효과적이고 매력적인 솔루션이 되며 UAV 및 송신기의 무선 신호를 통해 에너지를 수확하는 UAV 지원 IoT 네트워크에서 이점이 더욱 두드러진다. UAV 기반 SWIPT(Wireless Information and Power Transfer) 통신은 비상 대응을 위한 IoT 네트워크를 구성하기 위해 [4]에서 제안된다. 이전 작업 [4]은 EE 관점이 아니라 UAV 의 에너지 예산에서 사용자의 처리량 또는 보안률에 중점을 둔다.

이전 연구의 한계에 자극을 받아 기지국(Alice 또는 A)이 UAV 를 헬퍼 노드로 사용하여 지상의 에너지 제약 IoT 장치(Bob 또는 B)를 지원하고 수동 Eve 가 존재하는 네트워크를 고려한다. 이를 위해 네트워크 장치의 기능적 제약 조건(예: 최대 속도, 평균)에서 Alice 의 전송 전력, UAV 의 전송 전력, Bob 의 EH(Energy Harvesting) 전력 분할 비율 및 UAV 의 궤적을 공동으로 최적화하여 SEE 최대화 문제를 공식화한다. 전력 및 피크 전력. 공식화된 문제를 해결하기 위해 SCA(연속 볼록 근사) 및 Dinkelbach 의 알고리즘을 기반으로 원래의 비볼록 문제의 로컬 최소값으로 수렴하도록 보장된 효율적인 반복 알고리즘을 개발하고 시뮬레이션 결과를 통해 검증한다.

Ⅱ. 시스템 모델 및 최적화 문제

본논문은 UAV 지원 보안 SWIPT 시스템을 고려한다. 이때, Alice 는 UAV 의 도움으로 Bob 에게 기밀 정보를 전송하고 수동적인 Eve 는 도청을 시도한다. 미터 단위로 좌표를 측정하는 3 차원 데카르트 좌표계를 사용 한다. Alice, Bob, Eve 가 각각 $i \in \{A,B,E\}$인 $L_i = [x_i, y_i, 0]^T$ 위치에 있다고 가정한다. 반면에 UAV 는 고도가 H 고 비행 기간이 T 로 충분히 작은 시간 $t_s = T/N$ (s) 으로 N 개의 시간 슬롯으로 이산화된다고 가정한다. 이때, 궤적은 $L_U[n] = [x_U[n], y_U[n], H]^T,\ n = 1, \dots, N$,로 표현된다. 또한, 초기 및 최종 위치, 최대 속도는 각각 $L_{U,I} = [x_{U,I}, y_{U,I}, H]^T$ 와 $L_{U,F} = [x_{U,F}, y_{U,F}, H]^T$, v_{max} 로 표현된다. 이를 통해, UAV 의 이동성 제약 조건은 아래와 같다.

$$||L_U[n] - L_U[n-1]|| \le v_{max} t_s,\ n = 1, \dots, N \quad (1)$$

$$L_U[0] = L_{U,I},\ L_U[N] = L_{U,F}, \quad (2)$$

UAV 는 Alice 가 UAV 에 보안 메시지 전송을 TDD(Time Division Duplex) 방식으로 작동한다고 가정한다. 이를 통해, UAV 는 Bob 의 EH 동작을 지원하면서 보안률을 향상시키려는 시도와 함께 디코딩된 메시지를 Bob 에게 전달한다. 여기서 [6]의 SWIPT 프로토콜 설계에 따라 Bob 에서 수신된 신호 전력은 데이터 통신을 위한 전력의 일부 w 와 EH 를 위한 나머지 부분 $(1-w)$로 두 가지 유형의 전력 스트림으로 분할된다.

UAV 와 지상 노드 사이 채널, 즉 UAV 와 Alice, Bob 및 Eve 는 가시선(LOS) 링크로 가정한다. 이때, n 번째 슬롯에서 채널 UAV 와 노드 사이의 이득은 $h_{Uj}[n] = \rho_0 d_{Uj}[n]^{-2} = \rho_0/(||L_U[n] - L_j||^2 + H^2)$, $j \in \{A,B,E\}$ 이다. 여기서 $d_{ij}[n]$은 각 노드 i 와 j 사이의 거리이고 ρ_0 는 기준 거리 $d_0 = 1m$ 에서 채널의 이득을 나타냅니다. Alice 에서 Bob 및 Eve 사이의 지상 채널은 $g_{Aj}[n] = \rho_0 d_{Aj}^{-2} \zeta_j$ 의해 정의된다. 여기서, ζ_j는 exponential 분포를 갖는 랜덤 변수이다. t_s는 채널의 일관성 시간보다 훨씬 작은 것으로 가정되므로 채널은 각 시간 슬롯 내에서 고정되고 에르고딕하다고 가정한다.

시간 슬롯 n 에서 속도 $v[n]$을 갖는 UAV 에 대한 주울(J) 단위의 블레이드 프로파일, 유도 및 기생 전력으로 구성된 추진 에너지 소비 $E_P[n]$은 다음과 같이 모델링 될 수 있다.

$$E_P[n] = t_s(P_0 \phi[n] + P_i \psi^{\frac{1}{2}}[n] + \frac{1}{2} d_0 \rho s A v^3[n]) \quad (3)$$

여기서, $\phi[n] = 1 + 3v^2[n]/U_{tip}^2$, $\psi[n] = (1 + v^4[n]/4v_0^4)^{1/2} - v^2[n]/2v_0^2$; P_0, P_i, v_0, U_{tip} 는 각각 블레이드 프로파일 전력, 유도 전력, UAV 가 공중에 떠 있을 때의

평균 rotor 속도, UAV rotor 블레이드의 팁 속도를 나타낸다. 더하여서, 통신 에너지 소비는 추진 에너지보다 훨씬 작기 때문에 SEE 계산을 위한 통신 에너지 소비를 무시한다고 가정한다.

Eve 가 보안 정보를 가로채고 있다는 가정하에 Alice 와 Bob 사이의 보안 전송률 $R_s[n]$은 아래와 같이 표현될 수 있습니다. [6]

$$R_s[n] = [R_{AB}[n] - R_{AE}[n]]^+ \quad (4)$$

여기서, $[x]^+ \triangleq \max(x,0)$, $R_{AB}[n] = \log_2(1 + wg_{AB}P_A[n]/\sigma_B^2 + \min(h_{AU}[n]P_A[n]/\sigma_U^2, wh_{UB}[n]P_U[n]/\sigma_B^2))$, $R_{AE}[n] = \log_2(1 + g_{AE}P_A[n]/\sigma_E^2 + h_{UE}[n]P_U[n]/\sigma_E^2)$ 이다. 그리고, σ_B^2와 σ_U^2, σ_E^2 는 각각 Bob, UAV, Eve 의 잡음전력을 나타낸다.

본 논문의 목표는 Alice 와 UAV 의 전송 전력 제약 조건, Bob 의 수확 에너지 제약 조건, UAV 에 대한 비행 제약 조건을 만족하면서 SWIPT 시스템의 SEE 를 최대화하는 것이다. 이를 위해 (4)의 보안 전송률 $R_s[n]$과 (3)의 UAV 비행 에너지 소비 $E_P[n]$간 비율인 SEE 를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\mathrm{SEE}(\boldsymbol{P}_A, \boldsymbol{P}_U, w, \boldsymbol{L}_U) = \frac{B\sum_n R_s[n]}{\sum_n E_P[n]} \quad (\mathrm{bits/J}) \quad (5)$$

여기서, Alice 의 송신 전력 $\boldsymbol{P}_A \triangleq \{P_A[n]\}_{n=1}^N$, UAV 의 전력 $\boldsymbol{P}_U \triangleq \{P_U[n]\}_{n=1}^N$, 전력 분할 비율 w, UAV 의 궤적 $\boldsymbol{L}_U = \{L_U[n]\}_{n=1}^N$, 그리고 B는 시스템 대역폭을 나타낸다. 이를 기반으로 앞서 설명한 최적화 문제를 다음과 같이 공식화할 수 있다.

$$\max_{\boldsymbol{P}_A, \boldsymbol{P}_U, w, \boldsymbol{L}_U} \mathrm{SEE}(\boldsymbol{P}_A, \boldsymbol{P}_U, w, \boldsymbol{L}_U) \quad (6a)$$

$$\mathrm{s.t.} \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(g_{AB}P_A[n] + h_{UB}[n]P_U[n])(1-w)\eta \geq \varphi \quad (6b)$$

$$0 \leq \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} P_A[n] \leq P_A^{avg} \leq P_A^{max} \quad (6c)$$

$$0 \leq \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} P_U[n] \leq P_U^{avg} \leq P_U^{max} \quad (6d)$$

$$(1) \text{ and } (2) \quad (6e)$$

(6b)에서 η가 에너지 변환 효율이고 φ가 Bob 의 전력 임계값인 EH 제약 조건을 나타내고 (6c)와 (6d) 제약 조건은 각각 Alice 와 UAV 전송 전력의 평균 전력 및 최대 전력 제약 조건을 나타낸다. 문제(6)은 목적 함수(6a)가 최적화 변수에 대해 공동으로 non-convex 함수이다. 따라서, 이 문제를 해결하기 위해 효율적인 반복 알고리즘을 개발하여 로컬 최적 솔루션을 얻을 수 있다. 구체적으로, 제안된 알고리즘의 각 반복 마다 문제(6)를 세 개의 하위 문제로 나눌 수 있다. 즉, 1) 고정 w 및 $\boldsymbol{L}_U$로 $\boldsymbol{P}_A$및 $\boldsymbol{P}_U$를 최적화한다. 2) 고정된 $\boldsymbol{P}_A$및 $\boldsymbol{P}_U, \boldsymbol{L}_U$로 w를 최적화한다. 3) 다른 하나는 고정된 $\boldsymbol{P}_A$, $\boldsymbol{P}_U$ 및 w로 $\boldsymbol{L}_U$를 최적화한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

그림 1. (a)는 최적화된 SEE 를 임무시간 T 의 함수로 나타낸 것으로, 제안한 알고리즘은 벤치마크 곡선보다 우수하며 OptP&T/NEH 의 경우와 유사하다. 또한, Eve 가 가깝기 때문에 주어진 기한이 충분하지 않은 OptEH/EP&LT 및 OptT&EH/EP 와 같은 전력 최적화가 없는 경우에 대해 SEE 가 0 일 가능성이 있다. 그림 1. (b)는 최적화 문제(6)에서 해결된 최적의 무인항공기의 궤적을 나타낸다. 임무시간이 충분하면 UAV 는 그림 2(b)와 같이 Eve 에 대해 비행하고 Bob 에 더 가깝게 비행하여 SEE 를 최대화하려고 시도한다.

Table 1. 시뮬레이션 파라미터

$L_A/L_B/L_E$	(0,0,0)/(100,200,0)/(200,100,0)	P_U^{avg}	20 dBm
$L_{U,I}/L_{U,F}$	(-100,0,20)/(300,0,20)	P_U^{max}	26 dBm
H	20 (m)	B	1 MHz
v_{max}	3 (m/s)	$\sigma_B^2 = \sigma_E^2 = \sigma_U^2$	-110 dBm
ρ_0	-60 dB	η	0.7
P_A^{avg}	30 dBm	φ	-90 dBm
P_A^{max}	36 dBm	λ/ϵ	$10^{-4}/10^{-4}$

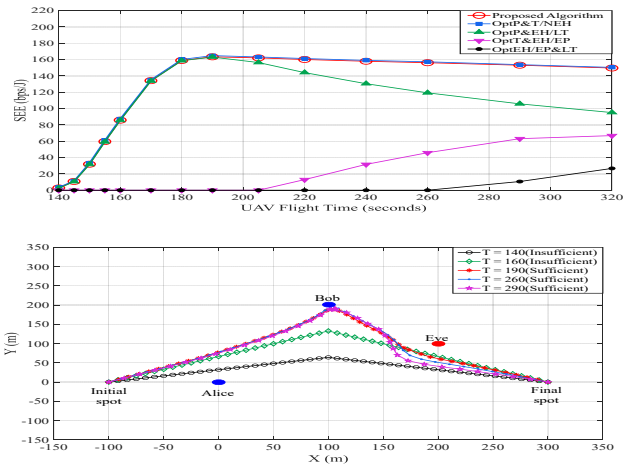

그림 1. (a) 임무 시간에 따른 SEE 비교 (b) 제안한 기법에 따른 UAV 의 궤적 (최대 속도 3m/s).

본 논문에서는 UAV 기반 보안 SWIPT 통신 시스템을 제안한다. SEE 최대화를 목표로 Alice 와 UAV 의 전송 전력, Bob 에서의 EH 운용을 위한 전력 분할 비율, UAV 의 비행 궤적에 대한 공동 최적화 문제를 공식화한 다음 반복 알고리즘을 통해 해결하였다. 제안된 성능은 벤치마크 방식과 비교한 시뮬레이션 결과로 검증된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2021R1F1A1050734).

참 고 문 헌

[1] N. H. Motlagh, T. Taleb, and O. Arouk, "Low-altitude unmanned aerial vehicles-based Internet of Things services: Comprehensive survey and future perspectives," IEEE Internet of Things Jour., vol. 3, no. 6, pp. 899-922, Dec. 2016.

[2] G. Zhang, Q. Wu, M. Cui, and R. Zhang, "Securing UAV communi- cations via joint trajectory and power control," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 18, no. 2, pp. 1376-1389, Feb. 2019.

[3] M. Cui, G. Zhang, Q. Wu, and D. W. K. Ng, "Robust trajectory and transmit power design for secure UAV communications," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 67, no. 9, pp. 9042-9046, Sep. 2018.

[4] W. Feng, J. Tang, Y. Yu, J. Song, N. Zhao, G. Chen, K.-K. Wong, and J. Chambers, "UAV-enabled SWIPT in IoT networks for emergency communications," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 27, no. 5, pp. 140-147, Oct. 2020.

[5] X. Sun, W. Yang, Y. Cai, Z. Xiang, and X. Tang, "Secure transmissions in millimeter wave SWIPT UAV-Based relay networks," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 8, no. 3, pp. 785-788, Jun. 2019.

[6] J.Mo, M.Tao, and Y.Liu,"Relay placement for physical layer security: A secure connection perspective," IEEE Commun. Lett., vol. 16, no. 6, pp. 878-881, Jun. 2012.