

IoT 네트워크를 위한 UAV 기반 SWIPT 연구: 기기의 우선순위를 고려한 UAV 경로 및 전력분배 최적화

김규영, 임현성, 이시현

한국과학기술원 전기및전자공학부

kimyou283@kaist.ac.kr, imhyun1209@kaist.ac.kr, sihyeon@kaist.ac.kr

UAV-Assisted SWIPT for IoT Networks: Priority-Aware Optimization of Trajectory and Power-Splitting

Kyuyeong Kim, Hyun-Seong Im, Si-Hyeon Lee*

School of Electrical Engineering, KAIST

요약

본 논문은 IoT 네트워크를 위한 UAV의 SWIPT 지원 상황에서 기기의 중요도를 곁한 시간지연과 UAV의 에너지 소모를 동시에 고려한 목적함수를 정의한다. 목적함수를 최소화하기 위해서 UAV의 방문순서와 비행 및 hovering 시간과 각 기기에서의 전력분배 비율을 모두 최적화 해야 하며, 본 연구에서 이를 방문순서만을 고려하는 외판원 문제로 재구성하였다. 해당 외판원 문제를 위해 동적 프로그래밍, 유전 알고리즘 기반의 알고리즘을 제안하였으며, 유전 알고리즘 기반의 토너먼트 방식의 경우 최적의 해를 보장하지만 기기 수의 2의 지수 승의 높은 복잡도의 동적 프로그래밍 기반의 알고리즘 대비 다항 복잡도를 가지며 유사한 성능을 보임을 입증하였다.

I. 서론

차세대 통신에서 들어서면서 비용이 저렴하면서 저전력을 소모하는 IoT 기기의 사용이 늘어나고 있다. 그러나 IoT 기기의 경우 일반적으로 에너지가 제한되어 있기 때문에 에너지를 어떻게 공급할 것인가에 대한 문제가 대두되고 있으며, UAV의 이동성을 활용하여 무선 전력 전송(WPT)를 지원하는 것이 해결책으로 제안되고 있다[1]. 무선 전력 전송의 경우 통신 대역과 동일한 RF 대역을 사용하기 때문에 동시 무선 정보 전력 전송(SWIPT)에 대한 연구가 되고 있다[2].

본 논문에서는 지상의 IoT 기기들이 서로 다른 중요도와 에너지 및 데이터 요구량을 가지고 있을 때, UAV가 SWIPT 지원을 통해 요구량을 충족시키면서 중요도를 고려한 기기들의 시간지연과 UAV의 에너지 소모를 최소화하기 위한 UAV의 경로 및 기기에서의 전력분배 최적화를 다룬다. 최적화 문제를 UAV의 방문순서만 고려한 외판원 문제의 변형으로 동일하게 재구성하여 동적 프로그래밍과 유전 알고리즘 기반으로 문제를 해결하였다.

II. 본론

1. 시스템 모델

본 논문에서는 고정된 고도에서 운용되는 1대의 rotary-wing UAV와 M 개의 ground sensor (GN)이 존재함을 가정한다. 각 GN들은 서로 다른 중요도와 데이터 및 에너지 요구량을 가지고 있으며, 이때 UAV는 일정한 속력으로 비행하며 동시시간에 1대의 GN에게만 fly-hover-communicate protocol을 사용하여 SWIPT를 지원한다. UAV는 정지 상황에서만 SWIPT를 지원을 하고 GN 바로 위에서 서비스를 제공한다 가정한다. UAV는 그림 1과 같이 시작 지점에서 GN들을 순서대로 방문하여 SWIPT를 지원한다. $\mathbf{q}_{(i)}$ 를 UAV가 i 번째 방문하는 GN이라고 할 때, 전체 방문순서는 $\mathbf{q}_0 \rightarrow \mathbf{q}_{(1)} \rightarrow \mathbf{q}_{(2)} \dots \rightarrow \mathbf{q}_{(M-1)} \rightarrow \mathbf{q}_{(M)}$ 와 같다. $\mathbf{q}_{(i)}$ 의 에너지 및 데이터 요구량은 $n_{(i)}^e$ 와 $n_{(i)}^d$ 로 표현되며, 우선순위 $n_{(i)}^p$

는 $n_{(i)}^p \in \{p_1, p_2, \dots, p_{L-1}, p_L\}$ 을 따른다.

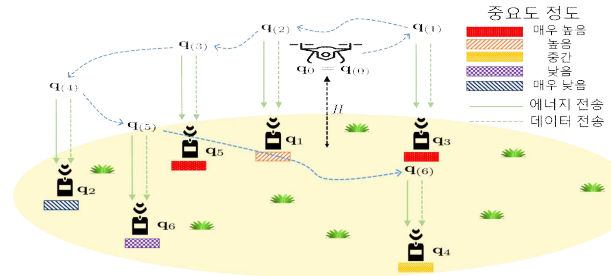


그림 1. 시스템 모델 (GN의 수: $M=6$, 중요도 정도: $L=6$)

UAV가 GN에 서비스를 제공할 때, 데이터 전송의 경우 LoS 링크가 확보가 되며, 에너지 전송의 경우 선형 에너지 하베스팅 모델을 따른다. 선형 에너지 하베스팅 모델의 경우 일정한 전력분배 비율로 에너지를 하베스팅 하는 정적 전력 분할 (SPS) 방식이 최적임이 알려져 있기 때문에 본 논문에서 각 GN들의 수신단 구조는 SPS 방식을 채택하였다[2].

2. 최적화 문제

본 논문에서는 중요도를 곁한 GN의 시간지연과 UAV의 에너지 소모를 최소화하기 위하여 UAV의 방문순서와 비행 및 hovering 시간과 GN들의 전력 분배 비율 최적화를 목표로 한다.

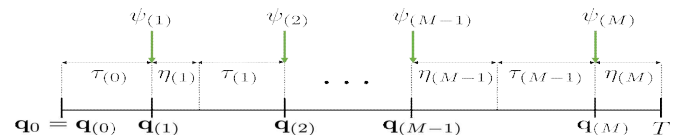


그림 2. UAV의 방문순서에 따른 시간 프레임

그림 2와 같이 $\mathbf{q}_{(i)}$ 에서의 서비스 받기까지의 시간지연을 $\psi_{(i)}$, UAV의 hovering 시간을 $\eta_{(i)}$, $\mathbf{q}_{(i+1)}$ 까지 UAV가 이동하는데 걸리는 시간을 $\tau_{(i)}$ 로 정의한다. UAV의 임무 완료 시간 T 까지의 우선순위를 곁한 GN의 시

간시엔 $f_D = f_D = \sum_{k=1}^M n_{(k)}^p \psi_{(k)}$ 로 표현되며, 이를 hovering 및 비행시간

으로 표현하면 $f_D = \sum_{k=0}^{M-1} (\eta_{(k)} + \tau_{(k)}) (\sum_{l=k+1}^M n_{(l)}^p)$ 와 같다.

UAV를 추진하는데 소모하는 전력은 알려진 모델 [3]을 따르며, UAV가 속력 v 로 비행할 때의 전력 소모 값과 hovering하여 SWIPT로 지원할 때의 전력 소모 값을 각각 P_v 와 P_{com} 로 정의한다. 임무완료 시간 T 까지의

UAV의 에너지 소모 f_E 는 $f_E = \sum_{k=0}^M (P_v \tau_{(k)} + P_{com} \eta_{(k)})$ 로 표현된다.

f_D 와 f_E 를 동시에 고려하기 위해 weighted-sum 방식을 이용하여 각각의 weight인 λ_D 와 λ_E 를 곱하면 목적함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_D \sum_{k=0}^{M-1} (\eta_{(k)} + \tau_{(k)}) (\sum_{l=k+1}^M n_{(l)}^p) + \lambda_E \sum_{k=0}^M (P_v \tau_{(k)} + P_{com} \eta_{(k)})$$

본 연구에서는 UAV의 GN의 방문순서와 hovering시간, 비행시간과 각 GN들에서 전력분배 비율을 최적화하여 주어진 목적함수를 최소화하는 것을 목적으로 한다.

3. 결과

본 연구의 최적화 문제에서 목적함수를 최소화하기 위한 필요 조건으로 $q_{(k)}$ 에 대하여 hovering 시간과 비행시간 $\eta_{(k)}, \tau_{(k)}$ 가 최소가 되어야 한다. 이를 만족하기 위한 조건으로 UAV가 GN사이를 비행을 할 때는 직선으로 이동하며, UAV는 각 GN들의 필요 요구량만큼만 SWIPT를 통하여 에너지와 데이터를 전송한다. 또한 각 GN들에서 수신 신호의 세기를 P_r , 채널 전력 이득을 $|h|^2$, UAV의 송신 신호를 P_u , 대역폭을 B , 선형 에너지 하베스팅 효율을 ζ 라고 할 때, $q_{(k)}$ 에서의 전력 분배 비율 $\rho_{(k)}$ 는 다음을 만족해야 한다.

$$\frac{n_{(k)}^d}{B \log_2 \left(1 + \frac{(1 - \rho_{(k)}) |h|^2 P_u}{(1 - \rho_{(k)}) \sigma_A^2 + \sigma_P^2} \right)} = \frac{n_{(k)}^e}{\zeta P_r \rho_{(k)}}$$

이는 SWIPT에서 SPS 방식의 불록성 성질을 이용하여 증명을 할 수 있으며, 만족하는 $\rho_{(k)}$ 는 수치 검색 방법을 통해 구할 수 있다.

해당 과정을 통해 UAV의 GN 방문순서가 주어졌을 때, 최적의 hovering 및 비행시간과 각 GN들의 전력 분배 비율이 정해지기 때문에 제안한 최적화 문제를 방문순서만 고려하는 외판원 문제(TSP)의 변형으로 동일하게 문제를 재구성할 수 있다.

재구성 한 최적화 문제에서 최적의 방문순서를 구하기 위해 외판원 문제에서 최적의 해를 보장하는 동적 프로그래밍(DP)[4] 기반의 알고리즘을 제안하여 최적의 해를 얻었으며, 해당 알고리즘의 경우 항상 최적의 해를 보장하지만 GN의 수 M 에 대하여 2의 지수 승의 $O(2^M M^2)$ 의 높은 계산 복잡도를 갖는다. 이를 해결하고자 유전 알고리즘(GA)[5] 기반의 하위 최적 알고리즘을 제안하였다. GA-기반의 알고리즘의 경우 토너먼트(Tournament), 엘리트(Elite), 비례(Proportional) 3가지의 방식을 제안하였다. GA-기반의 알고리즘의 경우 가능한 해의 후보 N_p , 반복 횟수 N_G , GN의 수 M 에 대하여 $O(N_p N_G M)$ 의 계산복잡도로 M 에 대하여 다항 복잡도를 갖는다. 그림 3에서 결과를 비교하였으며, GA-기반의 알고리즘의 경우 $N_p = 5000$, $N_G = 1000$ 에 대해 100번 반복 실험한 평균과 최대, 최솟값을 표시하였다. 결과에서 확인할 수 있듯이 GN의 수가 증가할수록 최적의 DP-기반의 알고리즘에 대비하여 탐색해야 할 해의 후보가 많아지기 때문에 성능 차이가 발생하지만, 제안한 GA-기반 알고리즘의 토너먼트 방식의 경우 표 1에서 확인할 수 있듯이 GN의 수가 작을 때

는 최적과 성능이 동일하며, GN의 수가 증가할 때에도 1.494(%)의 성능 차이만 발생함을 확인하였다. 이를 통해 복잡도는 낮추면서 최적의 알고리즘과 성능이 유사한 적절한 하위 최적 알고리즘을 제안하였음을 확인할 수 있었다.

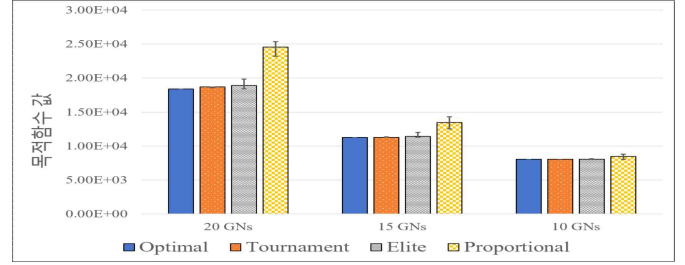


그림 3. DP-기반 알고리즘과 GA-기반 알고리즘 성능 비교

GN의 수	Tournament	Elite	Proportional
$M=20$	1.494	2.702	33.221
$M=15$	0.020	1.243	19.434
$M=10$	0	0.266	5.313

표 1. GA-기반 알고리즘들의 성능(%) 비교

III. 결론

본 논문에서는 서로 다른 중요도의 GN들이 각자의 에너지와 데이터 요구량을 가지고 있을 때, UAV가 SWIPT를 지원하는 상황에서 중요도를 고려한 GN의 시간간이연과 UAV의 에너지 소비를 최소화시키기 위해 UAV의 방문순서, hovering 시간 및 비행시간, 각 GN들의 전력분배 비율 최적화 문제를 제안하였다. UAV의 방문순서가 고정되었을 때, 최적의 UAV의 hovering과 비행시간, 각 GN의 전력분배 비율을 구하여 본 문제를 외판원 문제의 일종으로 동일하게 재구성하여 문제를 해결하였으며, 특히 제안한 GA-기반 알고리즘에서의 Tournament 방식의 경우 복잡도는 낮추면서 최적의 알고리즘과 성능이 유사함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원과(No. 2020M3C1C1A03078081) 정보통신기획평가원의 지원을 (No. 2020-0-01787-004) 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] O. L. Lopez, H. Alves, R. D. Souza, S. Montejo-Sanchez, E. M. G. Fernandez, and M. Latva-Aho, "Massive wireless energy transfer: Enabling sustainable IoT toward 6G era," IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 11, pp. 8816 - 8835, 2021.
- [2] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," IEEE Transactions on communications, vol. 61, no. 11, pp. 4754 - 4767, 2013.
- [3] Y. Zeng, J. Xu, and R. Zhang, "Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 4, pp. 2329 - 2345, 2019.
- [4] D. Bertsekas, "Dynamic programming and optimal control: Volume I," Athena scientific, vol. 4, 2012.
- [5] J.-Y. Potvin, "Genetic algorithms for the traveling salesman problem," Annals of Operations Research, vol. 63, pp. 337 - 370, 1996.