

고밀도 도심 네트워크에서 레이저 무선 전력을 이용한 자립형 태양광 기반 UAV 군집

조강우, 이기송

동국대학교

wlrb1224@naver.com, kslee851105@gmail.com

Self-Sustaining Solar-Powered UAV Swarms With Laser Wireless Power Transfer in Dense Urban Networks

Cho Kangwoo, Lee Kisong

Dongguk Univ.

요약

본 논문은 밀집 도시 환경에서 UAV 군집이 지상 노드(GN)로부터 상향링크 데이터를 수집하는 상황을 고려한다. UAV의 임무 지속성을 보장하기 위해 태양광 에너지 수확과 레이저 무선전력전송(Laser Wireless Power Transfer, WPT)을 동시에 활용하는 에너지-인지 운용 구조를 제안한다. 도심 건물에 의해 UAV-GN 통신 링크뿐 아니라 레이저 충전 링크 또한 제한되므로, 건물 기하 기반의 장애물 인지(Blockage-Aware) LoS/NLoS 모델과 레이저 안전 고도가 제약을 함께 반영한다. 이를 바탕으로 OFDMA 기반 사용자 스케줄링, UAV 3차원 궤적, 레이저 충전 의사결정을 공동 최적화하여 모든 GN에 대한 최소 평균 스펙트럼 효율(SE)를 최대화하는 혼합 정수 비볼록 최적화 문제를 정식화한다. 제안 해법은 SCA(Sucessive Continuous Approximation)기반의 반복 볼록화 및 볼록 좌표 하강(Block Coordinate Descent) 구조를 통해 정지점으로 수렴한다. 실험 결과는 태양광 에너지 수확과 레이저 WPT를 활용할 경우, UAV 군집의 자가 지속형 운용이 가능함을 입증한다.

I. 서 론

무인항공기(UAV)는 높은 기동성으로 6G/IOT 핵심 기술로 주목받고 있지만, 장기 운용에 충분하지 못한 배터리 문제가 존재한다[1]. 이를 해결하기 위한 태양광 에너지 수확 기반 자원 할당 및 궤적 최적화 기법이 연구되었지만[2], 기상 조건과 고도에 따라 전력 공급이 불안정하며, 레이저 WPT 기술이 보조 수단으로 주목받고 있다[3]. 하지만, 기존 연구들은 단순한 채널 모델을 활용하여 건물 차폐 효과를 고려하지 못했다. 차단 인지 채널 모델에 관한 연구가 진행되었지만[4], 이를 레이저 WPT와 통합한 연구는 아직 제시되지 않았다. 따라서 본 논문은 차단 인지 채널 모델을 기반으로 태양광, 레이저 WPT를 결합한 통합 시스템을 제안한다. UAV 3D 궤적 및 OFDMA 기반 사용자 스케줄링, 충전 의사결정 변수를 공동 최적화 하여 UAV의 자가 지속 운용을 보장하며, 지상 노드의 최소 평균 스펙트럼 효율(SE)를 극대화하는 것을 목적으로 한다.

II. 시스템 모델

본 시스템은 그림 1과 같이 레이저 WPT 인프라가 구축된 도심 밀집 환경에서 태양광 UAV 군집 네트워크를 고려한다. 시스템은 M 대의 태양광 UAV, K 개의 GN, J 개의 레이저 전력 송신기(LPT)로 구성되며, 총 비행 시간 T 를 길이 δ 인 N 개의 타임 슬롯으로 분할하고 δ 는 충분히 작아 슬롯 내 UAV 위치는 거의 고정으로 간주한다. 사용자 스케줄링은 OFDMA 기반으로 수행하며, 전체 대역폭을 C 개의 직교 부채널로 분할해 군집 내 간섭을 제어한다.

A. UAV 이동 제약

UAV m 의 3차원 위치는 $q_m[n] = (x_m[n], y_m[n], z_m[n])$ 로, GN k 와

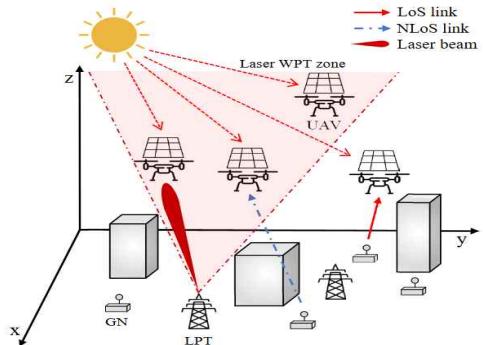


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model.

LPT j 의 위치는 각각 $w_k = (x_k, y_k, 0)$, $w_j = (x_j, y_j, 0)$ 로 정의된다. UAV는 수평/수직 속도제한, 충돌 회피 및 건물 회피 제약을 만족하며, 스케줄링 변수 $s_{m,k,c}[n]$ 은 OFDMA 기반 제약을 만족한다.

$$\|q_m[n] - q_m[n-1]\| \leq \delta V_{\max}, \quad \forall m, n. \quad (1)$$

$$\|z_m[n] - z_m[n-1]\| \leq \delta V_z, \quad \forall m, n. \quad (2)$$

$$\|q_m[n] - q_m[n]\|^2 \geq d_{\min}^2, \quad \forall m \neq m', n. \quad (3)$$

$$q_m[n] \not\in \cup_{l \in L} A_l, \quad \forall m, n \quad (4)$$

$$s_{m,k,c}[n] \in \{0, 1\}, \quad \forall m, k, c, n \quad (5)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{k \in K} s_{m,k,c}[n] \leq 1, \quad \forall c, n. \quad (6)$$

B. 건물 인지(Blockage-aware) 채널 모델

GN k 에 대한 건물 l 의 차폐 영역은 초평면 집합 $D_{k,l}$ 으로 정의되며, UAV-GN 차폐 여부 지시 함수는 선형 함수의 합을 이용해 연속함수로 근사한다. LoS/NLoS 경로 손실 모델을 따르는 UAV m -GN k 채널 이득

을 $h_{m,k}(\mathbf{q}_m[n])$ 로 정의할 때, 지상 노드들의 평균 SE는 다음과 같다.

$$r_{m,k,c}[n] = s_{m,k,c}[n] \log_2 \left(1 + \frac{h_{m,k}[n] p_S}{\sigma^2} \right), \quad (7)$$

$$R_k = \frac{1}{NC} \sum_{m \in M} \sum_{c \in C} \sum_{n \in N} r_{m,k,c}[n], \quad \forall k. \quad (8)$$

C. UAV 에너지 모델 및 문제 정식화

UAV 태양광 수확 에너지 모델은 구름층에 의한 일사 감쇠를 고려해 시그모이드 형태로 근사된다. 레이저 충전은 최소 고도각 안전 조건, LoS 조건을 만족해야 하며 연속 함수로 근사된 지시 함수를 활용하여 제약 조건을 정의한다. τ 는 충전 의사결정 변수이며, UAV-레이저 연결은 각 타임 슬롯에 한 쌍만 가능하다. $\lambda_{m,j}^{\text{safe}}[n], \lambda_{m,j}^{\text{LoS}}[n]$ 는 안전 조건 만족 여부, LoS 조건 만족 여부 지시 함수다. 또한, UAV는 충전 중 호버링 제약을 만족해야 한다.

$$\tau_{m,j}[n] \in \{0, 1\}, \quad \forall m, j, n, \quad (9)$$

$$\tau_{m,j}[n] \leq \min(\lambda_{m,j}^{\text{safe}}[n], \lambda_{m,j}^{\text{LoS}}[n]), \quad \forall m, j, n. \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} \tau_{m,j}[n] \leq 1, \quad \forall m, n, \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M} \tau_{m,j}[n] \leq 1, \quad \forall j, n. \quad (12)$$

$$\|\mathbf{q}_m[n] - \mathbf{q}_m[n-1]\| \leq \delta V_{\max} \left(1 - \sum_{j \in J} \tau_{m,j}[n] \right) \quad (13)$$

$E_m^C[n], E_m^U[n]$ 는 타임슬롯 n에서 충전 에너지, 소비 에너지를 의미하고, B_{\max} 는 UAV 최대 배터리 용량, B_{start} 는 시작 배터리 용량, B_{end} 는 마지막 최소 배터리 용량이다. 배터리 제약은 다음과 같으며, 최적화 문제는 (P0)으로 정의된다.

$$0 \leq B_m[n] \leq B_{\max}, \quad \forall m, n, \quad (14)$$

$$E_m^U[n] \leq B_m[n], \quad \forall m, n, \quad (15)$$

$$B_m[n+1] \leq B_m[n] + E_m^C[n] - E_m^U[n], \quad \forall m, n, \quad (16)$$

$$B_m[0] = B_{\text{start}}, \quad (17)$$

$$B_m[N] \geq B_{\text{end}}, \quad \forall m, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} (\text{P0}): \quad & \max_{\mathbf{Q}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{B}, \eta} \quad \eta \\ \text{s.t.} \quad & R_k \geq \eta, \quad \forall k, \\ & (1)-(6), (9)-(13), \\ & (14)-(18). \end{aligned} \quad (19)$$

D. 제안 최적화 기법

비볼록 최적화 문제 (P0)을 해결하기 위해, S와 $(\mathbf{Q}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{B})$ 두 개의 하위 문제로 분해한다. 주어진 $(\mathbf{Q}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{B})$ 에서 S에 대한 하위 문제는 볼록 형태로 정리되며, S가 주어지면, $(\mathbf{Q}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{B})$ 에 대한 하위 문제는 SCA 및 이차 변환, 분리 초평면 기법, 슬랙 변수 등의 다양한 수학적 도구로 반복 볼록화를 통해 볼록 형태로 근사한다. 이후 BCD 구조를 채택하고, S와 $(\mathbf{Q}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{B})$ 를 교대로 간선하며 CVX를 이용한 반복 알고리즘을 통해 최적화 문제를 해결한다.

III. 실험 결과

그림 2는 흐린 날씨로 태양광 수확이 거의 없는 조건에서, 2개의 건물, 1개의 LPT, 6개의 GN 환경에서 2대 UAV 3D 궤적을 도시한다. UAV는 자가 지속 운용을 위해 UAV는 항상 최단 경로로 이동하기보다, 충전 가능 지점(Charging point)을 경유하도록 경로를 조정하여 배터리 제약을 만족한다. 예를 들어 GN5 인근은 건물 차폐로 LoS 확보가 어려워 UAV가 고도를 낮춰서 통신하고, 그 결과 추진 에너지 소모 증가로 레이저 충

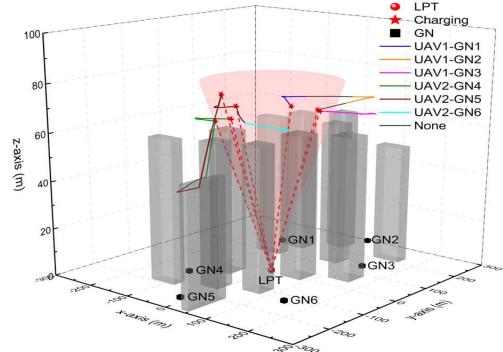


그림 2. 제안 기법 3차원 궤적

Fig. 2. 3D trajectory of the proposed scheme

전 슬롯이 상대적으로 더 많이 할당된다. 성능 측면에서 제안 기법은 2.5596bps/HZ를 달성하며, LoS based, Fixed altitude, Fixed trajectory, Fixed scheduling 기법의 2.1974, 2.3389, 2.1947, 1.7818 bps/HZ 대비 평균 약 21.6%의 성능 향상을 보인다.

III. 결론

본 논문은 밀집 도심 환경에서 태양광 에너지 수학과 레이저 WPT를 결합한 자가 지속형 UAV 구조 운용을 고려하고, 건물 차폐 및 레이저 안전 고도각 제약을 반영한 에너지-인지 운용 구조를 제안하였다. 또한 OFDMA 사용자 스케줄링 S, UAV 3차원 궤적 Q, 레이저 충전 의사결정, 배터리 상태 B를 공동 최적화 하여 최소 평균 스펙트럼 효율을 최대화하는 혼합정수 비볼록 최적화 문제를 정식화하였다. 제안 기법은 SCA 기반 반복 볼록화와 BCD 구조를 결합해 각 반복의 볼록 하위 문제를 CVX로 해결하며, 실험 결과 UAV 군집의 자가 지속 운용 가능성과 기준 기법 대비 우수한 성능을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00343262).

참 고 문 헌

- [1] M. Park and C. Kim, "Energy-Efficient Data Collection and Trajectory Optimization in Multi-UAV Assisted Wireless Sensor Networks," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 46, no. 5, pp. 823-831, May 2021.
- [2] A. Ranjha, M. A. Javed, G. Srivastava, and M. Asif, "Quasi-optimization of resource allocation and positioning for solar-powered UAVs," *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 6, pp. 4071 - 4081, Nov. - Dec. 2023.
- [3] Y.-S. Liau, Y.-W. P. Hong, and J.-P. Sheu, "Laser-powered UAV trajectory and charging optimization for sustainable data-gathering in the Internet of Things," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 24, no. 5, pp. 4278 - 4295, May 2025
- [4] P. Yi, L. Zhu, Z. Xiao, R. Zhang, Z. Han, and X.-G. Xia, "3-D positioning and resource allocation for multi-UAV base stations under blockage-aware channel model," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 3, pp. 2453-2468, Mar. 2024