

차폐 인지 UAV 통신을 통한 재밍 대응 데이터 수집 기법

조강우, 이기송

동국대학교

wlrb1224@naver.com, kslee851105@gmail.com

Anti-jamming Data Harvesting via Blockage-Aware UAV Communications

Cho Kangwoo, Lee Kisong

Dongguk Univ.

요약

본 논문은 밀집 도심 환경에서 무인항공기가 지상 노드로부터 데이터를 수집하는 상황에서, 적대적 재머의 통신 방해 및 Line-of-Sight (LoS) 기반 감시 위협을 동시에 고려한다. 건물 차폐를 활용하여 재머 - 무인항공기 채널을 non-LoS (NLoS) 상태로 유지하는 은닉 제약을 통해 감시를 회피하고 임무 지속성을 확보하며, 간접 완화를 통해 데이터 수집률을 향상시킨다. 또한, 지상 노드-무인항공기 사이의 건물 차폐 기반 채널 모델을 기반으로 시간 슬롯별 사용자 스케줄링과 3차원 궤적을 공동 최적화하여 최소 평균 데이터 수집 성능을 최대화한다. 실험 결과, 제안 기법은 다양한 도심 파라미터 변화에서도 기준기법 대비 일관되게 우수한 성능을 달성함을 확인하였다.

I. 서론

6G 시대에 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)를 활용한 통신 시스템은 스마트시티/산업 IoT에서 핵심 데이터 수집 플랫폼으로 주목받고 있으며, 특히 도심에서는 건물 차폐로 인한 LoS/NLoS 채널 상태가 성능을 좌우한다[1]. 한편, 적대적 재머가 존재하면 UAV - 지상노드 상향링크(Uplink, UL)의 Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio(SINR)이 급격히 악화되어 데이터 수집 성능이 감소하며[2]-[4], 추가적으로 감시 노드가 UAV를 관측할 가능성이 존재하는 경우 임무의 지속 가능성이 떨어진다. 따라서 재밍 대응(anti-jamming)과 감시 회피를 동시에 고려한 UAV 운용 전략이 필요하다. 본 논문은 감시 노드 관점에서 UAV가 LoS로 노출되지 않도록 건물 차폐 기반 은닉 제약을 도입하여, 감시 가능성을 낮추고 임무 지속성을 향상시키는 운용을 고려한다. 동시에, 건물 차폐를 반영한 채널 모델 하에서 지상 노드 - UAV 링크를 LoS로 유지하는 효율적인 스케줄링 및 3차원 궤적을 공동 최적화하여 모든 지상 노드에 대한 최소 평균 수집 성능을 최대화하는 방법을 제시한다.

II. 본론

밀집 도시 환경에서 UAV 1대, K개의 지상 노드(GS), M개의 지상 재머 (GJ), L개의 직육면체 건물을 고려한다. UAV 비행 시간 T는 N개의 동일한 시간 슬롯($\delta = T/N$)으로 분할되며, 각 슬롯에서 UAV 위치 $q[n]$ 은 변하지 않는다고 가정한다. GS는 상향링크 통신을 수행하고, UAV는 건물 차폐를 활용해 GJ의 감시를 회피하는 동시에 Time Division Multiple Access 방식으로 최대 1개의 GS만 선택하여 데이터를 수집한다 (C1).

A. UAV 이동 제약

UAV의 비행 시작과 마지막 지점은 같아야 하며 (C2), 최대 이동 속도는 V_{\max} , 최대 수직 이동 속도는 V_z 로 정의되고, $V_{\max} > V_z$ 이다. UAV는 한 타임슬롯 동안 최대 δV_{\max} 만큼 (C3), 수직으로 최대 δV_z 만큼 이동 가능하다 (C4). UAV의 최소 고도는 H_{\min} 최대 고도는 H_{\max} 로 정의된다 (C5).

B. 건물 차폐 및 안전 제약

GJ m에 대한 건물 l 의 차폐 영역은 초평면 $D_{m,l} = \{x \in R^3 | a_{m,l,i}^T x - b_{m,l,i} \leq 0, i \in I_{m,l}\}$ 로 정의되며, 이를 이용해 감시 회피 제약 $q[n] \in \cap_{m \in M} \cup_{l \in L} D_{m,l}$ (C6)과 안전 제약 $q[n] \notin \cup_{l \in L} B_l$ (C7)을 정의할 수 있다.

C. 건물 인지 채널 모델

GS k에 대한 건물 l 의 차폐 영역은 초평면 $D_{k,l} = \{x \in R^3 | a_{k,l,i}^T x - b_{k,l,i} \leq 0, i \in I_{k,l}\}$ 로 정의된다. GS k와 건물 l 에 대한 LoS 영역을 판별하는 함수가 $d_{k,l}(x) = \max_{i \in I_{k,l}} \{a_{k,l,i}^T x - b_{k,l,i}\} > 0$ 이면 점 x는 LoS 영역에, 그렇지 않으면 NLoS 영역에 위치한다. 함수의 불연속성을 시그모이드 (Sigmoid) 함수를 사용해 점 x의 LoS/NLoS 이진 조건을 다음과 같이 근사한다.

$$c_k(x) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-\mu \min_{i \in L} d_{k,l}(x)}{d_k(x^{prev})}\right)}. \quad (1)$$

이를 이용해 GS-UAV 채널 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} h_k(q[n]) &= \frac{\beta_k(q[n])}{\|q[n] - w_k\|^{\alpha_k(q[n])}}, \\ \alpha_k(q[n]) &= (\alpha_L - \alpha_N)c_k(q[n]) + \alpha_N, \\ \beta_k(q[n]) &= (\beta_L - \beta_N)c_k(q[n]) + \beta_N \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 w_k 는 GS k의 3D 좌표를 나타내며, $(\alpha_L, \beta_L), (\alpha_N, \beta_N)$ 은 각각 LoS/NLoS 상태에서의 경로 손실 지수 및 기준 채널 이득을 나타낸다. 또한, GJ-UAV 채널 모델은 항상 NLoS 채널이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_m(q[n]) = \frac{\beta_N}{\|q[n] - w_m\|^{\alpha_N}}. \quad (3)$$

따라서 시간 슬롯 당 GS k에 대한 채널 용량은 다음과 같다.

$$r_k[n] = \log_2 \left(1 + \frac{1 + h_k(q[n])p_S}{\sigma^2 + \sum_{m \in M} h_m(q[n])p_J} \right). \quad (4)$$

식 (4)에서 p_S , p_J 는 GS 및 GJ의 전송 전력 상수이며, σ^2 는 잡음 전력이다. 따라서 GS k 에 대한 UAV 데이터 수집 평균 성능은 다음과 같다.

$$R_k = \frac{1}{N} \sum_{n \in N} s_k[n] r_k[n]. \quad (5)$$

D. 문제 정의

본 논문은 시간 슬롯 기반 사용자 스케줄링과 UAV의 3차원 궤적을 공동으로 최적화한다. 목적함수는 GS별 평균 수집률의 최소값을 최대화하는 max-min 형태이며, $\eta = \min_{k \in K} R_k$ 로 정의한다. UAV의 이동성 제약, 건물 충돌 회피 제약, GJ-UAV 링크의 NLoS 은닉 제약을 만족하는 최적화 문제는 다음과 같이 정식화한다.

$$(P0) : \begin{aligned} & \max_{S, Q} \eta \\ & \text{s.t.} \quad \eta \geq R_k, \forall k \\ & \quad (C1) - (C7). \end{aligned}$$

E. 제안 최적화 기법

비볼록 최적화 문제 (P0)를 해결하기 위해, S와 Q에 대해 두 개의 하위 문제로 분해하고, S는 주어진 Q에서 볼록형태로, Q는 SCA 및 DC분해, 이차 변환 등 다양한 수학적 도구로 반복 볼록화 하여 해결한다. 이후 BCD(Block Coordinate Descent) 구조를 기반으로 S와 Q를 교대로 간선화하며, 각 반복에서 도출되는 볼록 하위 문제는 CVX로 해결한다.

III. 실험 결과

표1. 제안 기법과 기준 기법 성능 비교

Table1. Performance comparison bewtween the proposed and baseline schemes.

Algorithm	SE(bps/Hz)
Proposed	2.9054
Los-based	2.24622
Fixed-altitude	2.6516
Fixed-trajectory	2.6041
Fixed-scheduling	2.6726

Proposed는 제안 방식이며, Los-based는 LoS 채널 모델을 기반으로 스케줄링 S와 UAV 3D 궤적 Q를 최적화하는 방식이다. Fixed-altitude는 UAV의 고도를 80m 고정하고, 스케줄링 S와 수평 궤적을 최적화하는 방식이다. Fixed-trajectory는 UAV 고도를 80m로 고정하고, 각 GS 위로 순차적으로 비행 및 정지(hover-and-fly)를 수행하며, GJ-UAV가 LoS 채널을 형성하면 해당 스케줄링 GS와 가장 가까운 NLoS 영역에서 서비스한다. Fixed-scheduling은 각 GS에 동일한 시간 슬롯 수를 할당하고, UAV 3D 궤적 Q를 최적화하는 방식이다.

표 1은 default 환경에서 제안 기법과 기준 기법들의 최소 평균 스펙트럼 효율(SE)을 비교한 결과이다. 제안 기법은 2.9054 bps/Hz로 가장 높은 성능을 달성하며, 모든 기준 기법 대비 유의미한 개선을 보인다. LoS-based는 실제 도심 차폐 환경을 최적화 과정에 반영하지 못해 NLoS 채널에서 스케줄링이 발생할 수 있어 성능이 크게 저하된다. 또한 Fixed-altitude 및 Fixed-trajectory는 고도/경로 자유도가 제한되어 차폐에 따른 채널 품질과 은닉 조건을 동시에 만족시키기 어렵고, Fixed-scheduling은 노드 간 공정성을 고려한 자원 배분이 최적이 아니므로 높은 성능을 기대하기 어렵다. 결과적으로 도심 차폐 및 은닉 조건을 반영한 채널 모델 하에서

스케줄링과 3차원 궤적을 공동 최적화하는 제안 기법이 기준 기법보다 유의미한 성능 향상을 보인다.

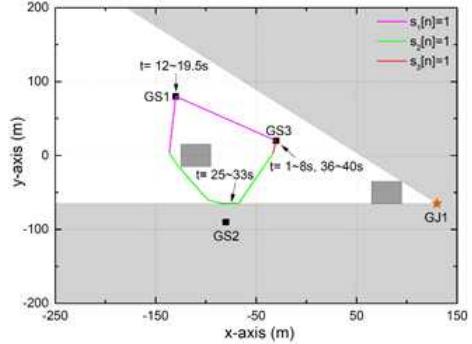


그림 2. 제안 기법 수평 궤적

Fig. 2. Horizontal trajectory of the proposed scheme

그림 2는 간단한 환경에서 제안 기법의 UAV 수평 궤적을 보여준다. 비행 경로상 GS 스케줄링은 구분되는 색으로 표시되며, UAV의 궤적은 감시 회피 제약을 만족하는 하얀색 NLoS 영역 내에서만 형성된다. UAV는 데이터 수집을 위해 각 GS 위에서 일정 시간 동안 정지하며, 효율적인 궤적을 형성한다. 구체적으로 GS2는 UAV가 직접 접근할 수 없어, 가장 많은 타임 슬롯을 할당하고, t=25s~33s 동안 차단 초평면 경계에서 GS2를 서비스한다. 본 결과는 제안 기법이 건물 차폐 영역을 통해 GJ의 간섭을 완화, 감시를 회피하면서도 GS들에게 효율적인 서비스가 가능함을 보여준다.

IV. 결론

본 논문은 밀집 도심 환경에서 UAV 지원 데이터 수집을 수행할 때 지상 재머의 방해와 LoS 기반 감시 위협을 동시에 고려한 차폐 인지 최적화 구조를 제시하였다. 건물 차폐 기반 은닉 제약을 통해 재머-UAV 링크의 NLoS 상태를 유지하고, 차폐 인지 채널 모델 하에서 사용자 스케줄링과 3차원 궤적을 공동 최적화함으로써 GS 간 공정성을 고려한 최소 평균 수집 성능을 향상시켰다. 실험 결과, 제안 기법은 도심 환경에서 기준 기법 대비 강인한 성능 개선을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] C. You and R. Zhang, "Hybrid offline-online design for UAV-enabled data harvesting in probabilistic LoS channel," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 6, pp. 3753 - 3768, Jun. 2020.
- [2] B. Duo, Q. Wu, X. Yuan, and R. Zhang, "Anti-jamming 3D trajectory design for UAV-enabled wireless sensor networks under probabilistic LoS channel," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 12, pp. 16288 - 16293, Dec. 2020.
- [3] H. Wang, G. Ding, J. Chen, Y. Zou, and F. Gao, "UAV anti-jamming communications with power and mobility control," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 7, pp. 4729 - 4744, Jul. 2023.
- [4] L. Xiao, X. Lu, D. Xu, Y. Tang, L. Wang, and W. Zhuang, "UAV relay in VANETs against smart jamming with reinforcement learning," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 5, pp. 4087 - 4097, May 2018.