

차폐 인지 UAV 네트워크에서의 무선 전력 기반 양방향 통신

이형우, 이기송

동국대학교

hywo81@gmail.com, kslee851105@gmail.com

Wireless-Powered Two-Way Communications in Blockage-Aware UAV Networks

Lee Hyungwoo, Lee Kisong

Dongguk Univ.

요약

본 논문에서는 건물에 의한 가시선(Line-of-Sight, LoS) 및 비가시선(Non-Line-of-Sight, NLoS) 전이를 고려하여 도심 환경에서 운용되는 무인 항공기(UAV) 지원 네트워크를 위한 장애물 인지형 무선 전력 기반 양방향 통신 시스템을 제안한다. UAV는 하향링크 신호를 브로드캐스트하여 지상 노드들이 무선 정보 및 전력 동시 전송(SWIPT)을 수행하도록 하고, 수확된 에너지는 이후 상향링크 데이터 전송에 사용된다. 기존 연구들과 달리 건물이 UAV-지상노드 링크를 직접적으로 차단하는 현실적인 채널 모델을 고려하며, 전력 분할 및 시간 스위칭 정책 하에서 비선형 에너지 수확 회로 특성을 반영한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 방안이 도심 환경의 장애물을 회피하며 안정적인 통신을 보장하고, 상향링크 주파수 효율을 크게 향상시킴을 확인하였다.

I. 서론

무인 항공기(UAV) 기술은 높은 기동성과 가시선(LoS) 확보 용이성을 바탕으로 차세대 무선 네트워크의 핵심 요소로 주목받고 있다[1]. UAV는 3차원 위치 조정을 통해 지상 노드(GN)와의 채널 상태를 능동적으로 개선할 수 있어, 에너지 제약이 있는 센서 네트워크의 데이터 수집에 효과적이다. 이에 따라 UAV 궤적과 통신 자원을 공동 최적화하는 연구가 활발하나, 대부분 확률적 LoS 모델에 의존하여 도시의 실제 건물에 의한 신호 차단을 반영하지 못하는 한계가 있었다[2].

동시에 무선 정보 및 전력 동시 전송(SWIPT) 기술은 GN의 배터리 수명을 연장하는 핵심 기술이다[3]. 이를 양방향 통신(WPTWC)에 적용하면 GN이 하향링크에서 에너지를 수확해 상향링크 전송에 활용할 수 있다[4]. 그러나 기존 WPTWC 연구는 이상적인 선형 에너지 수확 모델을 가정하거나 장애물에 의한 LoS 차단을 고려하지 않아 실제 환경에서의 성능을 보장하기 어렵다.

본 논문에서는 도심 건물의 기하학적 정보에 기반한 장애물 인지형 채널 모델과 현실적인 비선형 에너지 수확(EH) 모델을 도입한다. 이를 바탕으로 전력 분할(PS) 및 시간 스위칭(TS) 정책 하에서 모든 GN의 하향링크 요구 조건을 만족하면서 최소 상향링크 주파수 효율(SE)을 최대화하는 3차원 궤적 및 자원 할당 기법을 제안한다.

전체 비행 시간은 다수의 타임 슬롯으로 나뉜다. 각 슬롯에서 UAV는 하향링크 신호를 방송하고, GN은 이를 수신하여 정보를 복호화(ID)하고 에너지를 수확(EH)한다. 수확된 에너지는 이후 할당된 상향링크 구간에서 데이터를 전송하는 데 사용된다. UAV는 임무 수행 후 시작 지점으로 복귀해야 하며, 최대 속도 및 고도 제약을 준수해야 한다.

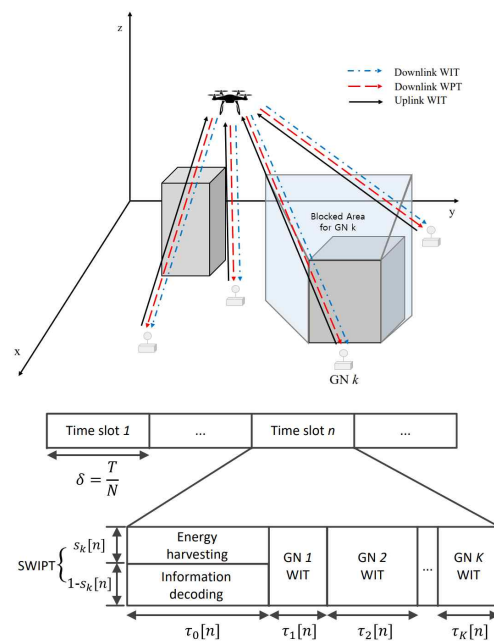


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model.

II. 본론

A. 프로토콜 및 시스템 개요

본 연구는 다수의 GN과 하나의 회전익 UAV로 구성된 시스템을 고려한다. '전송-수확-응답 (transmit-harvest-respond)' 프로토콜을 따르며,

B. 차폐 인지 채널 및 비선형 EH 모델

도시 환경의 특성을 반영하기 위해 건물 정보를 기반으로 한 장애물 인지 채널 모델을 적용한다. UAV와 GN 사이의 LoS 링크가 건물에 의해 차단되는지 여부는 기하학적 교차 판별을 통해 결정된다. 최적화의 용이성을 위해 불연속적인 LoS 지시자는 연속 함수로 근사화된다. 채널 이득은 LoS 확보 여부에 따라 달라지며, 차단 시 NLoS 경로 손실 모델을 따른다. 또한, GN의 에너지 수확 회로는 입력 전력에 따라 수확 효율이 변하는 비선형 포화 특성을 가진다. 본 논문에서는 실제 회로 데이터를 기반으로 한 로지스틱 함수 형태의 비선형 EH 모델을 적용하여 수확 에너지를 산출한다.

C. 최적화 문제 및 해결 방안

본 연구의 목표는 UAV의 기동성, 건물의 물리적 충돌 회피, 에너지 인과성, 그리고 하향링크 통신 품질(QoS) 제약을 모두 만족하면서, GN들 중 가장 낮은 상향링크 주파수 효율(Max-Min Fairness)을 최대화하는 것이다. 이 문제는 변수들이 서로 결합된 비볼록(non-convex) 최적화 문제이다. 이를 해결하기 위해 문제를 궤적, 시간 할당, 전력 제어, EH 비율 결정의 하위 문제로 분해하고, 블록 좌표 하강법(BCD)과 연속 볼록 근사(SCA) 기법을 활용하여 반복적으로 해를 갱신하는 알고리즘을 제안한다.

D. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 절에서는 제안하는 기법의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행한다. 비교 분석을 위해 제안하는 기법(Proposed) 외에 세 가지 벤치마크 기법을 고려하였다. 비교를 위해 3가지 벤치마크(Fixed Allocation, Fixed Trajectory, Fixed Altitude)를 사용하였다.

주요 시뮬레이션 파라미터는 아래와 같다.

$K = 6$, $L = 3$, $T = 30$ s, $N = 60$, $\delta = 0.5$ s, $H_{\min} = 20$ m, $H_{\max} = 500$ m, $V_{\max} = 20$ m/s, $V_z = 10$ m/s, $P_{\text{avg}} = 40$ dBm, $P_{\text{peak}}^D = 50$ dBm, $P_{\text{peak}}^U = 20$ dBm, $\alpha_L = 2$, $\alpha_N = 3.3$, $\beta_L = -30$ dB, $\beta_N = -40$ dB, $\sigma^2 = -100$ dBm, $\sigma_A^2 = -110$ dBm, $r_{\min}^D = 10$ bps/Hz, $U = 0.1071$ mW, $r_1 = 0.8963$, $r_2 = 0.6614$, $a_1 = 0.02$, $a_2 = 0.3$, $b_1 = 0.025$.

표 1. 주파수 효율

Table 1. Spectral efficiency

Scheme	TS	PS
Proposed	0.3637	0.4670
Fixed Altitude	0.2807	0.3680
Fixed Trajectory	0.2290	0.3066
Fixed Allocation	0.1456	0.2568

표 1은 비행 시간 $T=30$ s 일 때, 제안하는 기법과 벤치마크 기법들의 최소 주파수 효율(Spectral Efficiency)을 비교하여 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과, 제안된 기법은 전력 분할(PS) 및 시간 스위칭(TS) 정책 모두에서 타 기법들을 크게 상회하는 성능을 보였다. 우선 벤치마크 기법들과

비교했을 때, Fixed Allocation 기법은 PS(0.2568 bps/Hz)와 TS(0.1456 bps/Hz) 모두에서 가장 저조한 성능을 기록하였다. 이는 엄격한 하향링크 요구조건(10 bps/Hz)을 달성하기 위해서는 고정된 자원 할당이 아닌, 채널 상태에 따른 유연한 최적화가 필수적임을 시사한다. 또한 제안 기법은 3차원 기동이 제한된 Fixed Altitude나 궤적이 고정된 Fixed Trajectory 기법 대비 월등한 성능 우위를 보임으로써, 도시 환경의 건물 장애물을 능동적으로 회피하고 채널 이득을 극대화하는 궤적 최적화의 중요성을 입증하였다. 다음으로 SWIPT 정책 간 성능을 비교해보면, 모든 기법에서 PS 정책이 TS 정책보다 우수한 성능을 달성하였다. 제안 기법을 기준으로 볼 때 PS 정책은 0.4670 bps/Hz를 기록하여, TS 정책의 0.3637 bps/Hz 대비 약 28% 더 높은 효율을 보였다. 이러한 성능 격차는 두 정책의 구조적 차이에서 기인한다.

TS 정책은 높은 하향링크 전송률 요구조건을 충족하기 위해 통신 시간의 상당 부분을 정보 복호(ID)에 할애해야 하며, 이로 인해 상대적으로 에너지 수확 및 상향링크 데이터 전송 시간이 부족해져 성능이 제한된다. 반면 PS 정책은 단일 시간 슬롯 내에서 수신 전력을 분할하여 ID와 에너지 수확(EH)을 동시에 수행한다. 이를 통해 하향링크 제약 조건을 만족시키면서도 상향링크 전송에 필요한 에너지를 효율적으로 확보할 수 있어, 제안된 도심형 양방향 통신 시스템에 더 적합함을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 도심 환경의 물리적 장애물과 비선형 에너지 수확 특성을 고려한 UAV 지원 양방향 통신 시스템을 제안하였다. 상향링크 최소 주파수 효율을 최대화하기 위한 궤적 및 자원 할당 최적화 알고리즘을 수립하고, 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 검증하였다. 결과적으로 제안 기법은 장애물을 효과적으로 회피하며 GN들에게 안정적인 통신을 제공하였으며, 특히 PS 정책이 TS 정책보다 도심 환경에서 더 높은 에너지 및 주파수 효율을 달성함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] M. Mozaffari et al., "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 21, no. 3, pp. 2334 - 2360, 3rd Quart. 2019.
- [2] P. Yi et al., "Joint 3-D positioning and power allocation for UAV relay aided by geographic information," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 21, no. 10, pp. 8148 - 8162, Oct. 2022.
- [3] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. L. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 17, no. 2, pp. 757 - 789, 2nd Quart., 2015.
- [4] G. Park, K. Heo, W. Lee, and K. Lee, "UAV-assisted wireless-powered two-way communications," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 25, no. 3, pp. 2641 - 2655, Mar. 2024.