

차폐인지 무인항공기 기반 보안 통신

김동희, 이기송

동국대학교

ksch0382@gmail.com, kslee851105@gmail.com

Blockage-Aware UAV-Enabled Secure Communications

Kim Donghee, Lee Kisong

Dongguk Univ.

요약

본 논문은 도심 장애물 환경에서 무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 지원 보안 무선 통신 시스템을 고려하였다. 시스템은 기지국 역할의 서비스 UAV와 아군 재머 UAV, 그리고 다수의 지상 노드(Ground Node, GN)로 구성되며, 링크의 가시선(Line-of-Sight, LoS)/비가시선(Non-Line-of-Sight, NLoS) 여부를 실제 장애물 형상을 초평면(hyperplane) 기반으로 모델링하여 결정론적으로 판별하는 차폐 모델을 도입하였다. 또한 스케줄링되지 않은 노드에 의한 도청 위협을 완화하기 위해 사용자 스케줄링과 인공 잡음(Artificial Noise, AN) 송신을 결합한 보안 전송 구조를 채택하고, 모든 GN에 대한 평균 보안 전송률(Secrecy Rate, SR)의 최소값을 최대화하도록 스케줄링, UAV 케적, 전력 할당의 공동 최적화 문제를 정식화하였다. 이를 해결하기 위해 블록 좌표 하강법(Block Coordinate Descent, BCD) 기반 반복 알고리즘을 제안하였고, 각 하위 문제는 연속 블록 극사(Successive Convex Approximation, SCA), 2차 변환 및 1차 근사를 통해 블록 형태로 재구성하여 풀이하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기준 기법 대비 SR을 유의미하게 향상시키며, 스케줄링된 사용자 채널 품질을 확보함과 동시에 잠재 도청 채널을 효과적으로 약화시킴을 확인하였다.

I. 서론

최근 UAV 기반 무선 통신 기술의 발전으로 도심 환경에서의 유연한 통신 서비스 제공이 가능해졌으나, 건물 등에 의한 신호 차폐(blockage)를 정밀하게 반영하는 테에는 한계가 있다. 특히 기존 연구들은 확률적 LoS/NLoS 모델에 주로 의존하여 특정 위치에서의 실제 가시성(LoS) 여부를 명확히 판별하기 어렵다[1]. 확률 모델은 평균적인 경향을 설명하는데에는 유용하지만, 도심의 복잡한 건물 배치와 UAV의 높은 기동성으로 인해 링크 상태가 급변하는 상황에서는 실제 채널 특성을 충분히 반영하지 못할 수 있다. 또한 동일한 거리 및 고도 조건에서도 주변 장애물의 상대적 위치에 따라 링크가 완전히 차폐되거나 반대로 안정적인 LoS가 확보될 수 있으므로, 위치 기반 의사결정이 중요한 UAV 통신에서는 LoS 판별의 정확도가 성능을 좌우하는 핵심 요인이 된다. 이에 본 논문에서는 도심 장애물 정보를 활용하는 결정론적(Deterministic) LoS 모델을 도입하여 통신 가용성을 보다 정확히 반영하고, 이를 기반으로 UAV - GN 링크의 전파 특성을 정밀하게 평가한다.

한편, 무선 매체의 개방성으로 인해 물리 계층 보안(Physical Layer Security)의 중요성이 증대되고 있으며, 협력 재머를 활용해 도청 성능을 저하시키는 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. 특히 UAV는 이동성을 활용하여 협력 사용자에 대한 링크 품질을 향상시키는 동시에, 잠재 도청자에 대한 채널 조건을 불리하게 유도할 수 있어 보안 통신 관점에서 유망한 플랫폼으로 평가된다. 본 논문은 보안 성능 지표로 보안 전송률(secrecy rate)을 채택하고, 결정론적 LoS 모델이 적용된 도심 환경에서 사용자 스케줄링, UAV 케적, 송신 전력을 공동 최적화하여 최소 평균 보안 전송률을 최대화하는 기법을 제안한다. 이를 통해 일부 사용자에게만 유리한 설계를 지향하고 사용자 간 공정성을 고려하는 동시에, 서비스 링크의 신뢰성을 확보하면서 도청 링크를 효과적으로 약화시키는 운용 전략을 도출하는 데 목적이 있다.

II. 본론

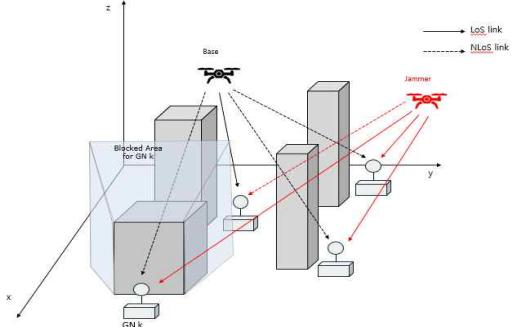


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System Model

본 논문에서는 그림 1과 같이 기지국 역할을 수행하는 UAV *B*, 아군 재머 UAV *J*, 그리고 *K*개의 지상 노드(GN)로 구성된 UAV 지원 보안 무선 통신 시스템을 고려한다. 전체 *K*개의 고정된 지상 노드(GN)는 기지국으로부터 기밀 정보를 전송받으며, 스케줄링 되지 않은 노드에 의한 도청 위협을 방지하기 위해 사용자 스케줄링 및 인공 잡음(Artificial Noise) 송신 정책을 사용한다. 도심의 실제 지형지를 정보를 바탕으로 도출된 결정론적 차폐 모델(Deterministic Blockage Model)은 각 통신 링크의 가시선(LoS) 확보 여부를 판별하고 시스템의 보안 전송률(Secrecy Rate)을 계산하는 데 사용된다. 전체 비행 시간 *T*는 *N*개의 타임 슬롯(길이 $\delta = T/N$)으로 나뉘며, 각 슬롯은 UAV의 케적 제어 및 보안 데이터 전송을 위한 통신 구간으로 구성된다.

A. 채널 모델

UAV - GN 간 무선 채널은 도심 환경의 장애물로 인해 가시선(LoS) 또

는 비가시선(NLoS) 상태로 구분된다. 각 링크의 LoS/NLoS 여부는 도심의 건물 배치 및 높이 정보를 반영한 결정론적 차폐 모델을 통해 판별되며, 판별 결과에 따라 링크의 경로순실 특성이 달라진다. 일반적으로 LoS 링크는 상대적으로 작은 감쇠를 가지는 반면, NLoS 링크는 차폐 및 산란 효과로 인해 더 큰 감쇠가 발생한다.

각 타임 슬롯에서 스케줄링된 사용자는 서비스 UAV로부터 기밀 데이터를 수신하며, 스케줄링되지 않은 노드는 잠재적 도청자로 간주된다. 도청 위협을 완화하기 위해 재머 UAV는 인공 잡음을 송신하여 잠재 도청자의 수신 품질을 저하시킨다. 따라서 합법 사용자 링크의 수신 성능과 잠재 도청 링크의 수신 성능은 각각 서비스 신호의 세기, 경로순실(LoS/NLoS 상태), 그리고 인공 잡음에 의한 간섭의 영향을 함께 받는다. 이러한 채널 모델을 기반으로 각 사용자에 대한 보안 전송률을 평가한다.

B. 문제 공식화

각 타임 슬롯에서 사용자 스케줄링, 서비스/재머 UAV 채적, 정보·인공 잡음 전력을 공동으로 설계하고, 결정론적 차폐 기반 LoS/NLoS 판별을 반영해 보안 전송률을 평가한다. 목표는 운용 제약(기동·고도·전력·스케줄링)을 만족하면서 최소 평균 보안 전송률을 최대화하는 것이다.

C. 제안 알고리즘

문제는 UAV 간 최소 거리 제약과 보안 전송률 표현에서 발생하는 변수 간 결합으로 인해 비볼록 특성을 가지며, 이에 따라 전역 최적해 도출이 어렵다. 이를 해결하기 위해 전체 문제를 사용자 스케줄링, UAV 채적, 전력 할당의 세 하위 문제로 분해하고, 각 변수를 순차적으로 최적화하는 3 단계 블록 좌표 하강법(BCD) 기반 반복 알고리즘을 적용한다. 각 하위 문제에서 나타나는 비볼록 항은 연속 볼록 근사(SCA), 이차 변환(Quadratic Transform), 분리 초평면 기법, 1차 근사 등을 통해 매 반복에서 해가 구해지는 볼록 형태로 재구성된다. 이러한 반복 최적화 절차는 목적함수의 점진적 개선을 유도하여 수렴성을 확보하며, 최종적으로 실행 가능한 지역 최적해에 도달하도록 설계된다.

D. 시뮬레이션 결과 및 논의

표 1. 시스템 파라미터

Table 1. System Parameters

Number of GNs	$K = 4$
Number of UAVs	$M = 2$
Number of buildings	$L = 2$
Flight period	$T = 120 \text{ s}$
Number of time slots	$N = 60$
Length of time slots	$\delta = 0.5 \text{ s}$
Minimum altitude	$H_{\min} = 30 \text{ m}$
Maximum altitude	$H_{\max} = 200 \text{ m}$
Maximum velocity in 3D space	$V_{\max} = 30 \text{ m/s}$
Maximum velocity in z-axis	$V_z = V_{\max}/2$
Peak transmit power	$P_{\text{peak}} = 36 \text{ dBm}$
Average transmit power	$P_{\text{avg}} = 30 \text{ dBm}$
Channel power gain at unit distance for LoS	$\beta_L = -30 \text{ dB}$
Channel power gain at unit distance for NLoS	$\beta_N = -40 \text{ dB}$
Path-loss exponent for LoS	$\alpha_L = 2$
Path-loss exponent for	$\alpha_N = 2.7$

LoS	
Noise power	$\sigma^2 = -100 \text{ dBm}$
Minimum distance	$d_{\min} = 10 \text{ m}$
Linear Sigmoid Parameters	$a_1 = 1.25, a_2 = 2.5, b_1 = 0.02$

표 2. 제안 기법과 기준 기법의 보안 전송률 비교

Table 2. Performance Comparison in Terms of Secrecy Rate (bps/Hz)

Scheme	Secrecy Rate (bps/Hz)
Proposed	2.1878
Fixed Power	1.9111
Fixed Trajectory	0.2917
Fixed Altitude	1.4547
Fixed Scheduling	2.0719
LoS-based	1.2648

표2는 제안 기법과 기준 기법의 보안 전송률을 비교한 결과이다. 제안 기법은 기준 기법 대비 가장 우수한 성능을 보인다. 이는 전력·캐적·고도·스케줄링을 고정하지 않고 자원 할당을 공동 최적화함으로써 스케줄링된 통신 구간의 성능을 유지하는 동시에, 스케줄링되지 않은 통신 구간을 효과적으로 억제하기 때문이다.

III. 결론

본 논문에서는 도심 장애물 환경에서 UAV 지원 보안 통신을 고려하고, 건물 기하 정보를 이용한 결정론적 차폐 모델로 LoS/NLoS를 판별하는 기법을 제안하였다. 기지국 UAV와 애군 재머 UAV가 공존하는 시스템에서, 모든 지상 노드에 대한 평균 보안 전송률의 최소값을 최대화하도록 스케줄링, UAV 채적, 송신 전력을 공동 최적화하는 문제를 정식화하였다. 비볼록 문제는 BCD 기반 반복 알고리즘과 SCA/근사 기법을 통해 효율적으로 해결하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기존 방안 대비 보안 전송률을 유의미하게 향상시키며, 서비스 대상 채널을 유지하는 동시에 잠재 도청 채널을 약화시키는 경향을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] P. Yi, L. Zhu, Z. Xiao, R. Zhang, Z. Han, and X.-G. Xia, "Trajectory Design and Resource Allocation for Multi-UAV Communications Under Blockage-Aware Channel Model," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 72, no. 4, pp. 2324 - 2338, Apr. 2024.
- [2] J.-Y. Park and S. A. Jeong, "Optimization of Jamming Power and Trajectory Design for Cooperative UAV Jammer with Imperfect Channel State Information," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences (JKICS)*, vol. 47, no. 3, pp. 409 - 421, Mar. 2022.