

# 불완전한 채널 정보 기반 협력 무인항공기 재머 전력 할당 및 비행 궤적 최적화 기법 연구

박지영\*, 정성아<sup>o</sup>

## Optimization of Jamming Power and Trajectory Design for Cooperative UAV Jammer with Imperfect Channel State Information

Ji-young Park\*, Seongah Jeong<sup>o</sup>

요 약

물리 계층의 특성을 이용하는 정보이론적 보안 (Information-Theoretic or Perfect Security) 개념인 물리 계층 보안 (Physical-Layer Security) 기술이 차세대 무선 네트워크 구현을 위한 핵심기술로 중요성이 증대되고 있다. 본 논문에서는 협력 무인 항공기 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 재머 (Jammer)를 고려한 다중 셀 (Multiple Cell)에서의 보안량 (Secrecy Rate) 향상을 위한 물리 계층 보안 기술을 제안한다. 제안 알고리즘은 네트워크를 구성하는 모든 노드에서의 불완전한 채널 가정을 고려하여, 보안량 향상을 최대화하는 무인 항공기 전력 할당 및 비행 궤적을 개발함으로써, 실효성을 향상시키고자 하였다. 이를 위해, 관련 최적화 문제를 형성하고, 이에 대한 최적의 솔루션을 찾기 위해 BCD (Block Coordinate Descent) Method에 기초한 반복 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해, 무인항공기의 비행 궤적 혹은 전력 할당만을 최적화한 경우에 비해, 제안된 알고리즘이 우수한 보안량 성능을 달성하는 것을 증명하였다.

**Key Words** : Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Physical Layer Security, Imperfect Channel State Information, Jammer, Power Allocation, Trajectory

ABSTRACT

With the recent advent of the Internet of Things (IoT) and the rapid spread of wireless communication devices, privacy and secure communication have been of interest due to the broadcast characteristics of wireless medium. The physical-layer security is an attractive technique for various security attacks, especially to resist the security risk of decryption of the conventional cryptographic protocol-based methods. In this paper, we consider the multi-cell scenario, each of which consists of a base station and a mobile user with the aid of a cooperative unmanned aerial vehicle (UAV) jammer to mitigate eavesdropping. In order to maximize the average secrecy rate of the entire network, we propose a joint optimization method of jamming power and trajectory of the multiple cooperative UAV jammers. For practicality, the location uncertainty of all the ground nodes, yielding the channel estimation errors, is assumed. To this end, the problem formulation is proposed, whose solution is developed based on Block Coordinate Descent (BCD) method. Via the simulation results, in comparison with either trajectory or jamming power optimization, the superiority of the proposed algorithm is verified.

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2020R1G1A100626011).

• First Author : Kyungpook National University, School of Electronic and Electrical Engineering Graduate School, bdt04023@airport.co.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Kyungpook National University, School of Electronics Engineering, seongah@knu.ac.kr, 정회원  
논문번호 : 202112-329-A-RE, Received December 5, 2021; Revised December 23, 2021; Accepted December 23, 2021

## I. 서론

최근 사물인터넷 (Internet of Things) 등장과 함께, 무선 통신 기기들이 급속히 증가함에 따라, 정보 도청 및 보안 전송 문제에 대한 관심이 급격하게 증가하고 있다. 이를 해결하기 위해, 널리 사용되었던 기존 네트워크 및 응용 계층 (Network/ Application layer) 보안 기술은 Advanced Encryption Standard (AES) 또는 RSA와 같은 암호화 (Cryptograph) 프로토콜을 이용하는 컴퓨팅 기반 보안 기술이다<sup>1)</sup>. 하지만, 컴퓨팅 능력 및 하드웨어의 급속한 성장으로 인해, 암호화 기반 보안 기술의 해독 위험성이 대두됨에 따라, 물리계층의 특성을 이용하는 정보이론적 보안 (Information-Theoretic or Perfect Security) 개념인 물리계층 보안 (Physical-Layer Security) 기술이 새로운 무선 통신 보안 패러다임으로 등장하여 국제적 선진 연구그룹을 중심으로 급속도로 집중적 연구가 진행되고 있다<sup>2,3)</sup>. 그 중에서도, 효과적인 물리 계층 보안량 (Secrecy Rate) 향상을 위해, 높은 이동성 및 자유로운 위치 선정 특성을 가진 무인항공기 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)가 도청자의 통신을 방해하는 협력 재머 (Cooperative Jammer)로 활용되는 연구가 활발히 진행 중이다<sup>4-6)</sup>. 특히나, 고정적 위치와 페이딩 채널 영향으로 보안량 향상 도움이 제한적이었던 협력 지상 재머에 비해, Line-of-Sight (LOS) 채널 확보가 용이하다는 측면에서 무인항공기 재머가 보안량 향상에 효과적이다.

싱글 셀 (Single Cell) 구성 노드의 완벽한 채널 정보나 일부 노드의 불완전 채널 정보 가정을 고려하였던 이전 연구들과 달리<sup>4-6)</sup>, 본 논문에서는 다중 셀 (Multiple Cell) 참여 모든 구성 노드에서의 불완전한 채널 가정을 고려한 협력 무인 항공기 재머 활용 물리 계층 보안 기술을 제안한다. 특히 [4]의 연구에서 제안된 기술은 송신기의 정확한 위치를 가정하므로 송신기가 설계하는 경우에 적용할 수 있는 기술이다. 하지만 다중 셀에서 전체 시스템의 보안 성능량을 최대화하기 위해서는 각 셀별 송신기 간의 완벽한 정보 공유가 전제되어 협력 통신을 가정하거나, 혹은 전체 시스템 설계를 관장하는 집중처리기 (Centralized Processor)가 별도로 고려되어야 한다. 본 논문은 다중 셀 시나리오에서 상용화 비율이 높은 후자의 경우를 고려하여 전체 시스템 설계를 관장하는 노드와 송신기가 별도로 설치되는 환경에서 모든 노드의 채널 불확실성을 고려한 알고리즘을 제안함으로써 별도의 중앙 서버/관제소를 두어 보안 통신을 고려하는 전지

및 긴급 재난 상황 등에서의 실효성과 확장성 측면을 중요하게 고려하였다. 이를 위해, 다중 셀 평균 보안량을 최대화하는 무인항공기 전력 및 비행 궤적 최적화 문제를 형성하고, Block Coordinate Descent (BCD) Method에 기초한 반복 알고리즘을 개발하여 최적의 솔루션을 제안한다. 시뮬레이션 검증을 통해, 무인항공기의 비행 궤적 혹은 전력 할당만을 최적화한 기술에 비해, 제안 알고리즘의 보안 성능 우수성을 증명하였다.

섹션 II에서 고려되는 시스템 모델을 소개하고, 섹션 III에서 보안 성능 최대화를 위한 최적화 문제 및 최적 솔루션 개발을 위한 알고리즘을 제안한다. 섹션 IV에서 제안 알고리즘의 시뮬레이션 결과를 분석하고, 섹션 V에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 물리 계층 보안 향상을 위해, 협력 무인항공기 재머를 고려한 다중 셀 시나리오 환경을 고려한다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 각 셀은 단일 안테나가 탑재된 송신기(이하 ‘Alice’)와 수신기(이하 ‘Bob’), 이 둘 사이 주고받는 기밀 정보를 가로채고자 하는 도청자(이하 ‘Eve’), 그리고 Eve의 도청을 방해하기 위해 재밍 (Jamming) 신호를 발생시키는 협력 무인항공기로 구성된다. 실제 Eve에 대한 불완전한 채널 정보 획득은 카메라, 합성 조리게 레이더, 스펙트럼 추적 등의 무인항공기의 감시 자산을 적용하여 잠재적 도청자의 위치를 추정할 수 있다<sup>4,7,8)</sup>. 각 셀은 서로 다른 주파수를 사용하여 통신을 수행하는 것으로 가정하고, 이에 따라 셀 사이의 간섭은 고려되지

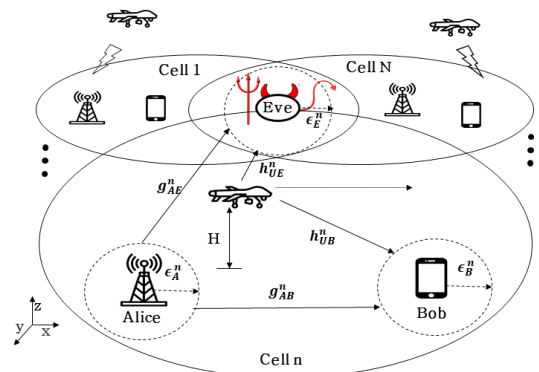


그림 1. 다중 셀에서 물리 계층 보안 향상을 위해 협력 무인항공기 재머가 고려된 시스템 모델  
Fig. 1. System model with cooperative UAV jammer for physical-layer security in multiple cell

않는다. 셀 통신 정보를 완벽히 획득하기가 어려운 Eve의 상황에 따라, 본 논문에서는 각 셀별로 동작하고 있는 Alice와 Bob 사이의 기밀 정보를 가로 채기 위해, Eve는 모든 주파수 채널 도청을 시도한다고 가정한다. 이러한 환경은 실제 정보의 기밀성을 중요시하는 전시 및 긴급 재난 상황 등에서 고려될 수 있다. 이러한 도청 상황의 보안성 향상을 위해, 셀별로 Eve에게 재밍 신호를 발생시키는 무인항공기를 적용하여, 전체 시스템의 보안성을 최대화하고자 한다.

지상에 존재하는 노드들, 즉 Alice, Bob, Eve의 위치는 2차원 데카르트 좌표계 (Cartesian Coordinates) 를 적용하여  $G_m^n = [x_m^n, y_m^n]^T$ ,  $n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{A, B, E\}$  로 각각 정의한다. 이때,  $n$  은 셀의 인덱스를,  $A, B, E$  는 Alice, Bob, Eve를 각각 의미한다. 여기서 Eve는 1개만 존재한다고 가정함으로 셀의 인덱스와 상관없이 좌표는 셀별로 동일하다고 보며, 본 연구에서 다중 Eve가 있는 경우로 확장이 용이하다. 또한, 채널 잡음 등으로 인해 시스템 구성 노드의 정확한 위치 정보획득이 어려운 실제 상황을 고려하여, 본 논문에서는 Alice, Bob, Eve의 불확실한 위치 정보를 기반으로 물리 계층 보안을 최대화할 수 있는 시스템 설계를 제안하고자 한다. 이를 위해, norm-bounded error model<sup>[9]</sup>을 적용하여, Alice, Bob, Eve의 불완전한 위치를 다음과 같이 고려한다.

$$\tilde{G}_m^n = [\tilde{x}_m^n, \tilde{y}_m^n]^T, \quad n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{A, B, E\} \quad (1)$$

수식 (1)의 노드별 추정 위치와 실제 노드의 정확한 위치의 차이는 아래와 같이 추정 오류 차이로 표현된다.

$$G_m^n = \tilde{G}_m^n + \Delta G_m^n, \quad n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{A, B, E\} \quad (2)$$

여기서  $\Delta G_m^n = [\Delta x_m^n, \Delta y_m^n]^T$  은 추정 위치와 실제 위치의 차이 값인 추정 오차를 나타내며, 다음과 같은 조건을 충족한다고 가정한다.

$$\|\Delta G_m^n\|^2 \leq (\epsilon_m^n)^2 \quad n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{A, B, E\} \quad (3)$$

여기서  $\epsilon_m^n$  은 각 셀의 추정 오차의 최대 크기를 나타낸다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 실제 노드 위치는 추정 위치  $\tilde{G}_m^n$  주변의 반경  $\epsilon_m^n$  인 불확실한 원형 영역에 위치한다고 가정한다. 각 셀의 무인항공기는 주어진 시간  $T^n$  이내에  $U_I^n$ 에서 이륙하여 일정한 고도  $H^n$ 를 유지하며  $U_F^n$ 에 착륙하는 비행 일정을 고려한다. 이 때, 시스템 설계를 위해 연속적 시간 단위  $T^n$ 를 충분히 짧은  $T_s$  길이의  $s^n$ 개의 슬롯으로 이산화하여 분석을 수행한다. 이에 따라, 슬롯 길이  $T_s$ 는 수식 (4)와 같이 정의된다.

$$T_s = T^n / s^n \text{ [sec]}, \quad n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4)$$

또한, 무인항공기의 최대 속도 제한을  $V_{\max}^n$  (m/s)로 정의하였을 때, 한 슬롯 내에서 무인항공기가 이동할 수 있는 최대 거리  $D_{\max}^n$  (m)는 다음과 같다.

$$D_{\max}^n = V_{\max}^n T_s, \quad n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5)$$

본 논문에서는 일정한 고도를 비행하는 무인항공기를 고려하였기에, 무인항공기의 수평 비행 위치를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U^n[s] = [x^n[s], y^n[s]]^T \quad n \in \{1, 2, \dots, N\}, s \in \{1, \dots, S\} \quad (6)$$

또한, 무인항공기의 최대 속도 제한 조건에 따라 무인항공기의 수평 이동은 아래와 같은 제약조건을 만족하여야 한다.

$$\|U^n[s+1] - U^n[s]\|^2 \leq (D_{\max}^n)^2, \quad (7)$$

$$\|U^n[1] - U_I^n\|^2 \leq (D_{\max}^n)^2 \quad (8)$$

$$U^n[S] = U_F^n \quad (9)$$

[4]를 참고하여, 무인항공기와 지상 노드 간의 채널은 Line-of-Sight (LOS) 채널로 모델링한다. 따라서, 시간 슬롯  $s$ 에서 무인항공기와 지상 노드  $m$ 까지의

채널은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & h_{Um}^n [s] \\ &= \rho_0^n (D_{Um}^n)^{-2} [s] \\ &= \frac{\rho_0^n}{\|U^n [s] - G_m^n\|^2 + (H^n)^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

$n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{B, E\}$

여기서  $D_{Um}^n [s]$ 은 시간 슬롯  $s$ 에서 무인항공기와 지상 위의 각 노드  $m$ 사이의 거리,  $\rho_0^n$ 는 채널 이득을 뜻한다. 지상 노드 간의 채널은 레일리 페이딩 (Rayleigh Fading) 채널로 가정하고, 시간 슬롯  $s$ 에서 Alice와 Bob 및 Alice와 Eve간 채널은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & g_{Am}^n \\ &= \rho_0^n (D_{Am}^n)^{-\psi} \zeta_m^n \\ &= \frac{\rho_0^n \cdot \zeta_m^n}{\|G_A^n - G_m^n\|^\psi}, \end{aligned} \quad (11)$$

$n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{B, E\}$

여기서  $D_{Am}^n$ 은 Alice와 지상 위의 각 노드  $m$  사이의 거리,  $\psi$ 는 경로 손실,  $\zeta_m^n$ 는 레일리 페이딩 채널 계수를 뜻한다. 추가적으로 시간 슬롯  $s$ 에서 무인항공기와 Alice의 송신 전력은 평균 전력 및 피크 전력에 대한 제약 조건을 충족해야 한다.

$$\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S P_m^n [s] \leq P_m^{n-mean}, \quad (12)$$

$n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{U, A\}$

$$0 \leq P_m^n [s] \leq P_m^{n-peak}, \quad (13)$$

$m \in \{U, A\}$

[10]에 따라, 각 셀의 Alice와 Bob 사이 달성 가능한 보안량은 아래와 같다.

$$[R^n [s]]^+ = [R_{AB}^n [s] - R_{AE}^n [s]]^+ \quad (14)$$

$n \in \{1, 2, \dots, N\}, s \in \{1, \dots, S\}$

여기서  $[x]^+ \triangleq \max(x, 0)$  이다. 수식 (14)에서 각 셀의 Alice-Bob과 Alice-Eve 사이 달성 가능한 데이터량 (Date Rate)  $[bps/Hz]$ 는 아래와 같다.

$$R_{AB}^n [s] = E \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{g_{AB}^n P_A^n}{h_{UB}^n [s] P_U^n [s] + \sigma^2} \right) \right] \quad (15)$$

$$R_{AE}^n [s] = E \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{g_{AE}^n P_A^n}{h_{UE}^n [s] P_U^n [s] + \sigma^2} \right) \right] \quad (16)$$

여기서  $E[\cdot]$ 는 레일리 페이딩 채널에 대한 추정값,  $\sigma^2$ 는 AWGN을 나타낸다.

### III. 무인항공기 전력 할당 및 궤적 최적화를 위한 알고리즘 제안

본 논문에서는 전체 시스템의 평균 보안량을 최대화하는 무인항공기의 최적 송신 전력 및 최적 궤적 디자인을 설계하는 것을 목표로 한다. 이를 위해, 먼저 문제 구성은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \max_{P_U^n [s], U^n [s]} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S R^n [s] \\ & s.t. (7), (8), (9), (12), (13) \end{aligned} \quad (17)$$

앞서 말한 바와 같이, 본 논문에서는 제안 알고리즘의 실효성을 위해 지상 노드 위치 정보의 불확실성을 고려한다. 이에 따라, 본 논문에서 제안된 알고리즘은 불확실성이 존재하는 최악의 상황 (Worst-Case)에서의 시스템 평균 보안량을 최대화하는 무인항공기의 전력 할당 및 궤적 디자인을 설계하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 이를 위해, 수식 (2)에서 주어진 불확실성 조건에 따라, 수식 (14)에서 정의된 Alice-Bob 및 Alice-Eve 간 달성 가능한 데이터량은 아래와 같이 표현이 가능하다.

$$\tilde{R}_{Am}^n [s] = E \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\tilde{g}_{Am}^n P_A^n}{\tilde{h}_{Um}^n [s] P_U^n [s] + \sigma^2} \right) \right], \quad (18)$$

$m \in \{B, E\}$

여기서  $\tilde{h}_{Um}^n [s]$ 은 무인항공기와 노드 사이,  $\tilde{g}_{Am}^n$ 은 Alice와 노드 사이의 최악의 채널 계수를 나타낸

다. 이 때, 노드별 불확실한 위치 정보로 인해 최악의 상황에서 보안량이 획득되는 경우는 Bob의 최소 데이터량  $R_{AB}^n[s]$ 가 획득되고, Eve의 최대 데이터량  $R_{AE}^n[s]$ 가 획득되는 경우이다. 이는 Bob의 경우 Bob에게 무인항공기의 최대 간섭이 적용되고, Alice와 Bob 사이의 채널 이득이 최소화되는 경우에 해당되고, 아래의 수식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{G_B^n} h_{UB}^n[s] \\ & = \tilde{h}_{UB}^n[s] \\ & = \frac{\rho_0^n}{\left( \| U^n[s] - \tilde{G}_B^n \| - \epsilon_B^n \right)^2 + (H^n)^2} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \min_{G_A^n, G_B^n} g_{AB}^n \\ & = \tilde{g}_{AB}^n \\ & = \rho_0^n \left( \tilde{D}_{AB}^n + \epsilon_{AB}^n \right)^{-\psi} \zeta_B^n \\ & = \frac{\rho_0^n \cdot \zeta_B^n}{\left( \| \tilde{G}_A^n - \tilde{G}_B^n \| + \epsilon_A^n + \epsilon_B^n \right)^\psi} \end{aligned} \quad (20)$$

비슷한 맥락으로, Eve의 위치에 대한 불확실성으로 얻을 수 있는 최악의 상황에서는 Eve에게 무인항공기의 최소 재밍 신호가 적용되고, Alice와 Eve사이의 채널 이득이 최대화되는 경우로, 아래 수식을 통해 최악의 상황에 대한 채널이 얻어진다.

$$\begin{aligned} & \min_{G_E^n} h_{UE}^n[s] \\ & = h_{E}^n[s] \\ & = \frac{\rho_0^n}{\left( \| U^n[s] - \tilde{G}_E^n \| + \epsilon_E^n \right)^2 + (H^n)^2} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \max_{G_A^n, G_E^n} g_{AE}^n \\ & = \tilde{g}_{AE}^n \\ & = \rho_0^n \left( \tilde{D}_{AE}^n - \epsilon_{AE}^n \right)^{-\psi} \zeta_E^n \\ & = \frac{\rho_0^n \cdot \zeta_E^n}{\left( \| \tilde{G}_A^n - \tilde{G}_E^n \| - \epsilon_A^n - \epsilon_E^n \right)^\psi} \end{aligned} \quad (22)$$

수식 (19)-(22)를 기반으로, 수식 (18)을 재정의하여 셀별 최악의 상황에서의 보안량을 도출하면 다음과 같다.

$$\tilde{R}^n[s] = \tilde{R}_{AB}^n[s] - \tilde{R}_{AE}^n[s] \quad (23)$$

따라서 수식 (17)은 다음과 같이 재정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{P_U^n[s], U^n[s]} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \tilde{R}^n[s] \\ & s.t. (7), (8), (9), (12), (13) \end{aligned} \quad (24)$$

수식 (24)에서는 레일리 페이딩 채널에 대한 평균 값을 목적 함수 (Objective Function)로 고려하기 때문에, 최적의 솔루션을 찾아내기에 어려움이 존재한다. 이를 해결하기 위해, 옌센 부등식 (Jensen's Inequality)<sup>[11]</sup>을 적용하여 Alice로부터 Bob과 Eve에 이르는 달성 가능한 데이터량의 근사 한계 (Approximate Bound)를 고려한다. 먼저,  $\tilde{R}_{AB}^n[s]$ 의  $\ln(1+e^x)$ 의 Convexity 특성을 활용하여,  $\tilde{R}_{AB}^n[s]$ 의 하한 값 (Lower Bound)인  $\tilde{R}_{AB}^{n,low}[s]$ 을 아래와 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{AB}^n[s] & = E \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\tilde{g}_{AB}^n P_A^n}{\tilde{h}_{UB}^n[s] P_U^n[s] + \sigma^2} \right) \right] \\ \tilde{R}_{AB}^n[s] & = \frac{1}{\ln 2} E [\ln(1 + X_k)] = \frac{1}{\ln 2} E [\ln(1 + e^{\ln X_k})] \\ & \geq \frac{1}{\ln 2} (1 + e^{E[\ln X_k]}) \end{aligned}$$

여기서,  $X_k = d_k \tilde{g}_{AB}^n$ 이며,

$d_k = \frac{P_A^n}{\tilde{h}_{UB}^n[s] P_U^n[s] + \sigma^2}$ 이다.  $X_k$ 는 매개변수

$\lambda_k = \frac{1}{\rho_0^n d_k} (D_{Am}^n)^\psi$ 인 지수 분포 랜덤 변수이기 때문에 아래와 같이 나타낸다.

$$E[\ln X_k] = \int_0^\infty \ln \lambda_k e^{-\lambda_k x} dx = -\ln \lambda_k - \gamma$$

따라서 아래의 수식(25)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{AB}^n[s] & \geq \tilde{R}_{AB}^{n,low}[s] \\ & = \log_2 \left( 1 + \frac{\hat{g}_{AB}^n P_A^n}{\tilde{h}_{UB}^n[s] P_U^n[s] + 1} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서

$$\hat{h}_{UB}^n[s] = \alpha_0 / \left( \left( \| U^n[s] - \tilde{G}_B^n \| - \epsilon_B^n \right)^2 + (H^n)^2 \right)$$

이고,  $\hat{g}_{AB}^n[s] = e^{-\gamma} \alpha_0 (\tilde{D}_{AB}^n + \epsilon_{AB}^n)^{-\psi} = e^{-\gamma} \alpha_0 /$

$(\| G_A^n - G_B^n \| + \epsilon_A^n + \epsilon_B^n)^\psi$ 이며,  $\alpha_0$ 는  $\rho^n / \sigma^2$ 로 잡음에 대한 채널이득,  $\gamma$ 은 오일러 상수를 뜻한다. 이와 비슷하게,  $\tilde{R}_{AE}^n[s]$ 의  $\ln(1+x)$ 의 Concavity 특성을 이용하여,  $\tilde{R}_{AE}^n[s]$ 의 상한값(Upper Bound)인  $\tilde{R}_{AE}^{n-upp}[s]$ 을 아래와 같이 전개할 수 있다.

$$\tilde{R}_{AE}^n[s] = E \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{\hat{g}_{AE}^n P_A^n}{\hat{h}_{UE}^n[s] P_U^n[s] + \sigma^2} \right) \right]$$

$$\tilde{R}_{AE}^n[s] = \frac{1}{\ln 2} E[\ln(1+x)]$$

$$= \frac{1}{\ln 2} E[\ln(1+x)] \geq \frac{1}{\ln 2} [1 + E(x)]$$

따라서 아래의 수식(26)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{AE}^n[s] &\leq \tilde{R}_{AE}^{n-upp}[s] \\ &= \log_2 \left( 1 + \frac{\hat{g}_{AE}^n P_A^n}{\hat{h}_{UE}^n[s] P_U^n[s] + 1} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

여기서

$$\hat{h}_{UE}^n[s] = \alpha_0 / \left( \left( \| U^n[s] - \tilde{G}_E^n \| + \epsilon_E^n \right)^2 + (H^n)^2 \right)$$

이고,  $\hat{g}_{AE}^n = \alpha_0 (\tilde{D}_{AE}^n - \epsilon_{AE}^n)^{-\psi} = \alpha_0 /$

$$(\| G_A^n - G_E^n \| - \epsilon_A^n - \epsilon_E^n)^\psi \text{이다.}$$

위의  $\tilde{R}_{AB}^n$ 의 하한값과  $\tilde{R}_{AE}^n$ 의 상한값을 바탕으로 수식 (24)의 목적 함수의  $\tilde{R}^n[s]$ 의 Approximate Secrecy Rate를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{R}^n[s] = \tilde{R}_{AB}^{n-low}[s] - \tilde{R}_{AE}^{n-upp}[s] \quad (27)$$

따라서, 수식 (24)는 수식 (27)의 근사 보안량 (Approximate Secrecy Rate)인  $\hat{R}^n[s]$ 을 활용하여 다음과 같이 재정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{P_U^n[s], U^n[s]} & \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \hat{R}^n[s] \\ \text{s.t.} & (7), (8), (9), (12), (13) \end{aligned} \quad (28)$$

그러나 수식 (28)은 목적 함수가 Difference of Convex Function(DC)의 형태로 Convex Programming이 아니다. 수식 (28)은 원래의 Non-Convex Optimization Problem 수식 (17)의 Objective Function의 Lower Bound를 고려함으로써, Log함수의 Monotonically Increasing 특성으로 인해 수식 (17)의 평균 보안 성능을 최대화하는 성질을 보장하므로, 아래에서는 수식 (28)식을 기반으로 제안된 알고리즘을 설계를 고려한다. 따라서, 수식 (28)의 Solution을 구하기 위해, 무인항공기의 전력  $P_U^n[s]$ 와 궤적  $U^n[s]$ 을 번갈아가며 최적화하는 반복 알고리즘 (Alternating Algorithm)<sup>[12]</sup>을 제안한다. 이에 대해, 자세한 내용을 아래 두 장에서 차례대로 설명하고자 한다.

### 3.1 무인항공기 재머 전력 할당 설계방법

본 장에서는 무인항공기 재머의 비행 궤적이 정해졌을 때, 무인항공기 재머의 최적 전력 할당 설계 방법에 대해 논하고자 한다. 이를 위해, 먼저 1차 테일러 확장(First-Order Taylor Expansion)을 적용하여  $\hat{R}^n[s]$ 의 하한 값인  $\hat{R}_{(i)}^n[s]$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} \hat{R}^n[s] &\geq \hat{R}_{(i)}^n[s] \\ &= \log_2 \left( 1 + \frac{\hat{g}_{AB}^n P_A^n}{\hat{h}_{UB}^n[s] P_{U,(i)}^n[s] + 1} \right) \\ &\quad - a_{s,(i)} (P_U^n[s] - P_{U,(i)}^n[s]) \\ &\quad - \log_2 \left( 1 + \frac{\hat{g}_{AE}^n P_A^n}{\hat{h}_{UE}^n[s] P_U^n[s] + 1} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

여기서

$$a_{s,(i)} = \hat{g}_{AB}^n P_A^n \hat{h}_{UB}^n[s] / (\ln 2 (\hat{h}_{UB}^n[s] P_{U,(i)}^n[s] + 1)) \cdot 1 / (\hat{h}_{UB}^n[s] P_{U,(i)}^n[s] + \hat{g}_{AB}^n P_A^n + 1) \text{이고, } P_{U,(i)}^n[s]$$

는 수식 (28)의 첫 번째 항에서  $P_U^n[s]$ 에 대한  $i$ 번째 반복을 뜻한다. 수식 (29)을 통해, 수식 (28)은 다음과 같이 재정의할 수 있다.

$$\max_{P_U^n[s]} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \hat{R}_{(i)}^n[s] \quad (30)$$

s.t. (12), (13)

수식 (30)는 Convex Programming이므로, Convex 최적화 문제의 솔루션툴인 CVX<sup>[13]</sup>를 통해 최적의  $P_U^n[s]$ 를 구할 수 있다.

### 3.2 무인항공기 재머 비행 궤적 설계방법

이 절에서는 무인항공기 재머의 전력이 주어졌을 때, 무인항공기 재머의 최적 비행 궤적 설계 방법에 대해 연구한다. 이를 위해, 먼저 여유 변수 (Slack Variable)인  $b[s]$ 와  $c[s]$ 를 도입하여, 수식 (28)의  $\hat{R}^n[s]$ 을 수식 (31)의  $\check{R}^n[s]$ 으로 재구성한다.

$$\check{R}^n[s] = \log_2 \left( 1 + \frac{\hat{g}_{AB}^n P_A^n}{\frac{\alpha_0 P_U^n[s]}{b[s]} + 1} \right) - \log_2 \left( 1 + \frac{\hat{g}_{AE}^n P_A^n}{\frac{\alpha_0 P_U^n[s]}{c[s]} + 1} \right) \quad (31)$$

여기서 여유 변수인  $b[s]$ 와  $c[s]$ 에 대한 제약조건은 다음과 같이 주어진다.

$$b[s] \leq (\|U^n[s] - \tilde{G}_B^n\| - \epsilon_B^n)^2 + (H^n)^2 \quad (32)$$

$$c[s] \geq (\|U^n[s] - \tilde{G}_E^n\| + \epsilon_E^n)^2 + (H^n)^2 \quad (33)$$

하지만, 위의 수식 (31)번은  $U^n[s]$ 에 대하여 Difference of Convex Function(DC)이기 때문에, 여전히 Convex Programming이 아니다. 따라서 위의 절과 마찬가지로 1차 테일러 확장을 적용하여  $\hat{R}^n[s]$ 의 근사 하한치인  $\hat{R}_{(i)}^n[s]$ 와 동일한 방식으로  $\check{R}^n[s]$ 의 하한 값인  $\check{R}_{(i)}^n[s]$ 을 다음과 같이 재구성한다.

$$\check{R}^n[s] \geq \check{R}_{(i)}^n[s] = \log_2 \left( 1 + \frac{\hat{g}_{AB}^n P_A^n}{\frac{\alpha_0 P_U^n[s]}{b[s]} + 1} \right) - \log_2 \left( 1 + \frac{\hat{g}_{AE}^n P_A^n}{\frac{\alpha_0 P_U^n[s]}{c_{(i)}[s]} + 1} \right) - e_{s,(i)}(c[s] - c_{(i)}[s]) \quad (34)$$

여기서

$$e_{s,(i)} = \hat{g}_{AB}^n P_A^n \alpha_0 P_U^n[s] / (\ln 2 (c_{(i)}[s] + \alpha_0 P_U^n[s]) \cdot 1 / ((\hat{g}_{AE}^n P_A^n + 1) c_{(i)}[s] + \alpha_0 P_U^n[s]))$$

이고,  $c_{(i)}[s]$ 은 수식 (31)번의 두 번째 항에서  $c[s]$ 에 대한  $i$ 번째 반복을 나타낸다. 이에 따라, 수식 (32)번의 제약조건은 다음과 같이 재정의할 수 있다.

$$b[s] \leq f_{s,(i)} + (H^n)^2 \quad (35)$$

여기서

$$f_{s,(i)} = \left( \|U_{(i)}^n[s] - \tilde{G}_B^n\| - \epsilon_B^n \right)^2 + \left( 2 \left[ U_{(i)}^n[s] - \tilde{G}_B^n \right]^T - 2\epsilon_B^n \frac{\left[ U_{(i)}^n[s] - \tilde{G}_B^n \right]^T}{\|U_{(i)}^n[s] - \tilde{G}_B^n\|} \right) \cdot (U^n[s] - U_{(i)}^n[s])$$

이며,

$U_{(i)}^n[s]$ 는 수식 (32)번에서  $U^n[s]$ 에 대한  $i$ 번째 반복의 실현가능한 값을 뜻한다. 또한, 위의 수식을 통해 수식 (28)은 다음과 같이 최종적으로 재표기할 수 있다.

$$\max_{U^n[s], b[s], c[s]} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \check{R}_{(i)}^n[s] \quad (36)$$

s.t. (7), (8), (9), (33), (35)

수식 (36)은 Convex Programming이므로, Convex 최적화 문제의 솔루션툴인 CVX<sup>[13]</sup>를 통해 최적의  $U^n[s]$ 를 구할 수 있다.

### 3.3 제안 알고리즘

이 절에서는 III-1과 III-2에서 소개된 무인항공기 재머 전력 할당 방법과 비행 궤적 설계 방법을 활용하여, 수식 (30)와 수식 (36)을 번갈아가며 반복적으로 해결하여 수식 (28)에 대한 솔루션을 찾는 절차를 수행하는 알고리즘 (표1)을 제안한다. 이를 위해, BCD (Block Coordinate Descent) Method<sup>[14, 15, 16]</sup>를 적용하였고, 제안 알고리즘은 각 단계 별 ( $i+1$ )번째 솔루션은 BCD Method와 하위 절의 비볼록성 근사치를 통해 반복에 따라 감소하지 않으므로 최적의 전력 할당 및 비행 궤적 솔루션에 수렴한다. 제안된 알고리즘의 Convergence 보장 및 효율성은 (28)식의 Non-Convex Objective Function과 Non-Convex 제약조건들과 이를 해결하기 위해 활용된 수식 (30)과

(36)의 Approximation의 대소 관계 조건 및 동일한 Gradient 값 조건<sup>[17-19]</sup>을 만족함에 따라, 보장될 수 있다.

#### IV. 실험

본 섹션에서는 단일 셀과 다중 셀에서의 시뮬레이션을 통해, 제안된 불완전한 채널 정보 기반 무인항공기 재머의 전력할당 및 비행궤적 설계 기술인 Joint Optimization Method(이하 'JO', 표1)의 성능을 평가한다.

표 1. 제안 알고리즘  
Table 1. Proposed Algorithm

<b>[Algorithm] Joint optimization of the UAV jamming power and the flight trajectory</b>
<b>Input:</b> $P_{U,(0)}^n [s]$ and $U_{(0)}^n [s]$ . Set $i = 0$ .
<b>Iterate</b>
With $P_{U,(i)}^n [s]$ and $U_{(i)}^n [s]$ , find the optimal solution $P_{U,(i+1)}^n [s]$ of equation(30).
With $P_{U,(i+1)}^n [s]$ and $U_{(i)}^n [s]$ , find the optimal solution $U_{(i+1)}^n [s]$ of equation(36).
$i \leftarrow i + 1$ .
<b>until</b> convergence.
<b>Output:</b> optimal $P_U^n [s]$ and $U^n [s]$

##### 4.1 단일 셀에서의 시뮬레이션

이 절에서는 단일 셀에서의 시뮬레이션을 진행한다. 시뮬레이션 파라미터는 아래의 (표 2)에서와 같이 설정되며 각 지상과 항공 노드의 좌표는  $G_A = [200, 200]^T$ ,  $G_B = [200, -200]^T$ ,  $G_E = [550, -200]^T$ ,  $U_I = [100, 0]^T$ ,  $U_F = [700, 0]^T$ 와 같다. 제안 성능 검증을 위해, 아래 제시된 세 가지 비교 기술을 고려한다.

- 1) Only Trajectory Optimization(TO) : 궤적은 제안된 알고리즘과 동일한 방식으로 최적 설계되지만 무인항공기 재머 전력은 위의 수식 (12)에서 언급한  $P_m^{mean}$  에 고정된다.
- 2) Only Power Optimization(PO) : 무인항공기 재머 전력은 제안된 알고리즘에 의해 최적화되지만, 비행 궤적 설계는 다음과 같은 조건에 의해 이루어진다. 위에서 밝힌 바와 같이 무인항공기의 수평 이동거리( $U_F - U_I$ )는 600m이며, (표2)에서 제시한

바와 같이 최대속도( $V_{max}$ )는 20m/s라고 가정할 때, 최소 요구 비행시간은  $T_{min} = (U_F - U_I) / V_{max}$  에 의해 30s로 계산된다. 비행시간의 충분시간과 부족시간은 개발자나 시스템 특성에 따라  $T_{min} \pm \alpha\%$ 의 오차범위를 두며, 본 실험에서는  $\alpha = 30$ 으로 설정한다.

- (1) 충분한 비행시간 할당 경우 ( $T_{th} \geq T_{min} + (T_{min} \times \alpha\%)$ ): 무인항공기는 초기 출발지점에서부터 Eve의 추정(예상) 위치 위의 지점까지 곧장 비행하여 할당된 시간에서 충분히 그 주위를 맴돈다. 그 후, 남은 임무 시간 동안 최대 속도로 최종 도착지점까지 날아간다.
- (2) 부족한 비행시간 할당 경우 ( $T_{th} \leq T_{min} - (T_{min} \times \alpha\%)$ ): 무인항공기는 Eve의 추정(예상) 위치까지 가능한 가깝게 도달했다가 곧장 최대속도로 최종 도착지점으로 향한다.
- 3) No Jammer(NJ) : 무인항공기 재머가 동작하지 않는 경우로 Eve에게 어떤 재밍 신호도 주지 않는 상태를 가정한다.

그림 2는 JO, TO, PO에 따른 비행시간 T의 궤적을 보여준다. 이 그림에서 각 노드별 추정오류인  $\epsilon_m, m \in \{A, B, E\}$ 은 50m로 설정한다.  $T = 30s$ 일 때 JO, TO, PO 모두 부족한 비행시간이 할당된 경우임으로 무인항공기는 초기 출발지점에서부터 곧장 최종 도착지점까지 날아간다.

$T = 32s$ 일 때는  $T = 30s$ 일 때보다 할당된 시간이

표 2. 단일 셀에서 제안 알고리즘의 시뮬레이션 파라미터  
Table 2. Simulation JO parameter of Proposed Algorithm in Single Cell

Simulation Parameters in Single Cell	Value
Altitude of the UAV, H	100m
Maximum speed of the UAV, V_max	20m/s
Flight Time of the UAV, T	30, 32, 45s
Length of Slots, T_s	1
Number of time slots, S	T / T_s
Path loss exponent, ψ	3
Channel gain over noise power, ρ_0	90dB
Transmit power of Alice, P_A	30dBm
Average power of UAV, P_U^{mean}	10dBm
Maximum power of the UAV, P_U^{peak}	4 P_U^{mean}



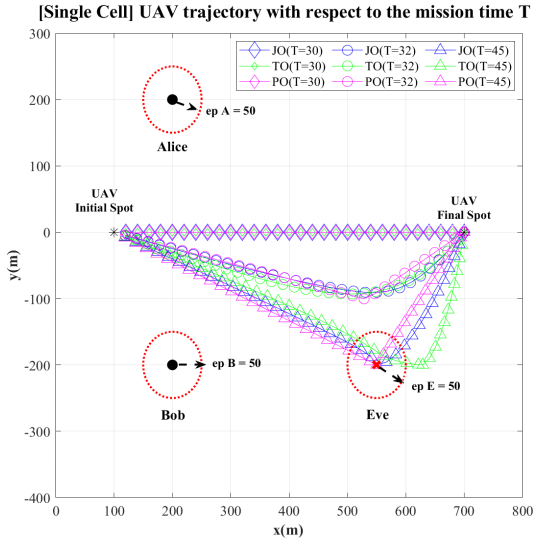


그림 2. 단일 셀에서 지상노드 Alice, Bob, Eve의 추정오차  $\epsilon_m = 50$ ,  $m \in \{A, B, E\}$  일 때 비행시간  $T$ 에 대한 무인항공기 궤적  
Fig. 2. UAV trajectory with respect to the mission time  $T$ , when each ground node(Alice, Bob, Eve)'s estimation error  $\epsilon_m = 50$ ,  $m \in \{A, B, E\}$  in Single Cell

2초 가량 늘어났지만 여전히 비행시간이 부족하게 할당되었기 때문에 Eve 쪽으로 향하던 중간에 다시 최종 도착지점으로 날아간다. 반면에  $T = 45s$  일 때,  $T$ 는 최대 속도로 무인항공기 초기 출발지점에서 최종 도착지점까지 이동하는 데까지 충분한 시간이므로 무인항공기는 Eve에 접근하는 동시에 Bob으로부터는 멀리 떨어져 이동하려고 한다. 이는 무인항공기 재머가 Eve에게 강한 방해신호를 보내기 위한 용도이긴 하지만 합법적인 수신기인 Bob에게도 방해신호의 영향을 주어 간섭신호로 통한다. 따라서 무인항공기는 Eve에 강한 방해신호를 보내면서도 Bob에게는 영향을 주지 않을 수 있는 최적의 비행 궤적을 찾는 경향이 있다.

그림 3은 주어진 시간  $T = 45s$  일 때, Alice의 추정오류  $\epsilon_A$ 의 변화에 따른 비행궤적을 보여준다.  $\epsilon_A$ 가 증가할수록 JO의 궤적은 Eve에 근접하게 비행하며 일직선의 형태로 비행하는 PO의 궤적과 유사해진다. 이를 통해 위의 시뮬레이션 상황에서는 전력할당 최적화 방법이 보안량의 향상에 유리함을 보여준다. TO의 경우 비행궤적 최적화를 위해 설계되어 Alice의 추정오류  $\epsilon_A$ 의 크기가 0일 경우 채널정보의 불확실성이 개선되어 보안량을 보호하기 위해 최대한 Eve를 피해 비행하지만 추정오류  $\epsilon_A$ 의 크기가 100일 경우와 같이 정확한 위치를 모르는 상황에서는 보안량을 최대한

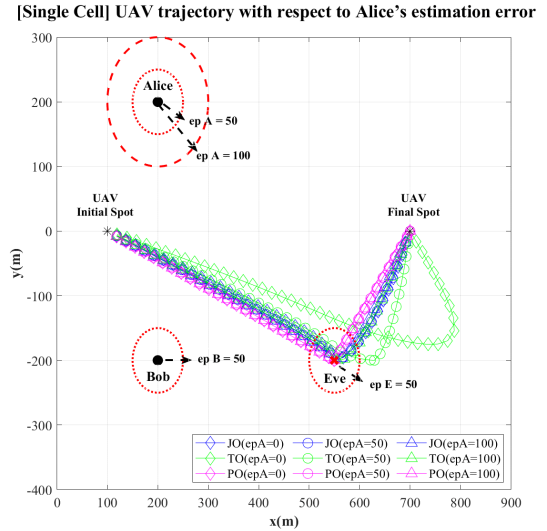


그림 3. 단일 셀에서 비행시간  $T = 45s$  일 때 Alice의 추정 오류  $\epsilon_A$ 에 대한 무인항공기 궤적  
Fig. 3. UAV trajectory with respect to Alice's estimation error  $\epsilon_A$ , when the flight time  $T = 45s$  in Single Cell

높이기 위해 Eve에 접근하여 재밍 신호를 주어 공격한다.

그림 4는 비행시간  $T$ 에 대한 평균 보안량의 경향을 보여준다. 앞서 언급한 네 가지 방법(JO, TO, PO, NJ)을 모두 평가한다. NJ를 제외하고 비행시간  $T$ 에 따라 평균 보안량이 증가한 것으로 보이는 데 그 이유는 비행시간이 증가할수록 무인항공기가 Eve의 근처에 머물면서 재밍 신호로 Eve가 완벽한 동작을 수행하지 못하도록 방해하기 때문이다. 또한, JO가 NJ를 포함한 다른 방법(TO, PO)들을 능가하는 것으로 관찰된다. Alice의 추정 오류  $\epsilon_A$ 가 0m에서 50m로 커지자

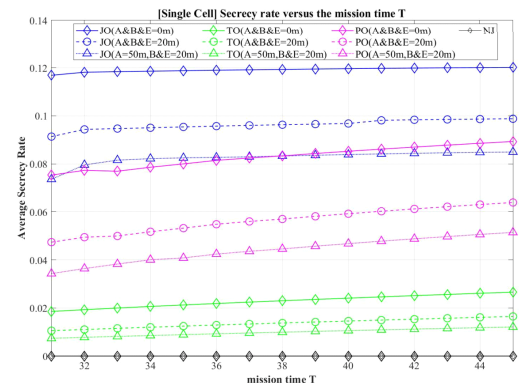


그림 4. 단일 셀에서 보안량 대 비행시간  $T$   
Fig. 4. Secrecy Rate versus the flight time  $T$  in Single Cell

각 method별 보안량이 감소하는 것으로 나타났다.

이는 Alice의 추정오류  $\epsilon_A$ 가 증가함에 따라, 보안량 향상을 달성할 수 있는 비행 궤적과 전력 할당을 올바르게 디자인할 수 없기 때문이다. TO는 NJ를 제외한 세 가지 방법 중 가장 성능이 좋지 않은 것으로 보이는 것을 통해, 고려되는 시나리오에서는 비행 궤적 디자인보다 재밍 전력의 최적 할당이 보안량 향상에 더욱 효과적인 것을 알 수 있다.

그림 5은  $T=45s$ 일 때, Alice의 추정오류  $\epsilon_A$ 와 관련된 보안량을 나타낸다. JO는 모든 경우에서 뛰어난 성능을 보장한다. 그림 4와 같이 그림5에서도  $\epsilon_A$ 가 증가함에 따라 모든 method의 보안량이 저하된다. 특히 무인항공기가 각 지상노드의 위치에 대한 더 정확한 정보를 가지고 있을 때, 비행 위치 조정에 따른 보안량 향상보다 전력 할당 조정이 더욱 효과적인 것을 다시한번 확인해 볼 수 있다.

#### 4.2 다중 셀에서의 시뮬레이션

이 절에서는 다중 셀에서의 시뮬레이션을 진행한다. 싱글 셀에서 비행시간  $T$ 나 추정오류에 따른 보안량은 다중 셀에서도 비슷한 경향을 띠기 때문에 다중 셀에서의 시뮬레이션은 생략한다. 비행궤적 시뮬레이션 파라미터는 단일 셀의 파라미터인 (표2)와 같으나 무인항공기의 비행시간은 각각  $T=37s$  와  $T=60s$ 로 설정되며, 3개의 셀이 존재한다고 가정한다. Eve의 좌표는  $G_E = [-100, -100]^T$ 로 나타내며, 각 지상 및 항공 노드의 좌표는 다음과 같다.

셀1)  $G_A^1 = [-400, 400]^T$ ,  $G_B^1 = [-200, 100]^T$ ,

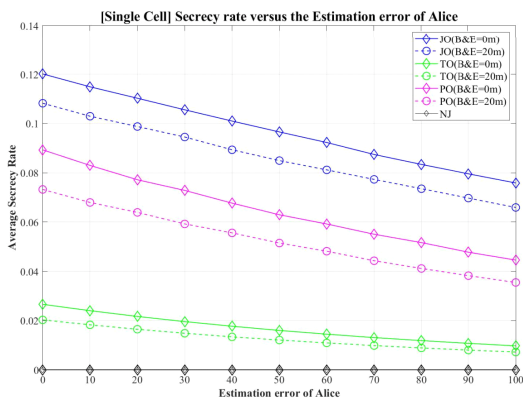


그림 5. 단일 셀에서 비행시간  $T=45s$ 일 때, 보안량 추정오류  $\epsilon_A$  Fig. 5. Secrecy Rate versus the estimation error  $\epsilon_A$ , when the flight time  $T=45s$  in Single Cell

$U_I^1 = [-400, 200]^T$ ,  $U_F^1 = [300, 400]^T$

셀2)  $G_A^2 = [100, 300]^T$ ,  $G_B^2 = [200, -100]^T$ ,

$U_I^2 = [-300, 300]^T$ ,  $U_F^2 = [400, 100]^T$

셀3)  $G_A^3 = [0, -400]^T$ ,  $G_B^3 = [200, 200]^T$ ,

$U_I^3 = [-300, 0]^T$ ,  $U_F^3 = [400, -200]^T$

JO의 성능 검증에는 단일 셀에서와 같이 세 가지 비교 기술(TO, PO, NJ)을 고려한다.

- 1) Only Trajectory Optimization(TO) : 단일 셀에서와 같이 동일하게 적용
- 2) Only Power Optimization(PO) : 전력은 단일 셀에서와 같이 동일하게 적용되지만, 비행 궤적 설계는 다음과 같은 조건에 의해 이루어진다. 무인항공기의 수평 이동거리( $U_F^m - U_I^m$ )가 단일 셀과 같은 600m가 아닌 700m로 달라지기 때문에 무인항공기의 최대속도( $V_{max}^m$ )는 20m/s라고 가정할 때,  $T_{min}^m = (U_F^m - U_I^m) / V_{max}^m$ 에 의한 비행시간은 35s로 계산되며, 비행시간의 충분시간과 부족시간은 개발자나 시스템 특성에 따라  $T_{min} \pm \alpha\%$ 의 오차 범위를 두며, 본 실험에서는  $\alpha = 30$ 으로 설정한다. 충분한 비행시간 및 부족한 비행시간 할당 경우, 단일 셀과 동일하게 궤적을 고려한다.

그림 6, 7은 다중 셀( $N=3$ )에서 JO, TO, PO에 따른 비행시간  $T^m$ 의 궤적을 각각 보여준다. 그림 6의 경우에는  $T^m = 37s$ , 그림 7의 경우에는  $T^m = 60s$ 로 설정한다. 위 그림에서 각 노드별 추정오류인  $\epsilon_m^n$ ,  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $m \in \{A, B, E\}$ 는 50m로 설정한다. 우선 전반적으로 살펴보자면  $T^m = 37s$ 일 때, 부족한 비행시간이 할당되었기 때문에 각 셀별 무인항공기는 Eve를 타격하지 못하고 초기 출발지점에서 곧장 최종 도착지점으로 향한다. 그림 6의 모든 셀들은 JO와 TO의 유사한 비행궤적을 보여주는데 이를 통해서 위의 다중 셀의 상황에서는 비행궤적에 대한 최적화 방법이 보안량의 향상에 유리함을 보여준다. 셀 3의 경우 셀 1, 2와 다르게 무인항공기의 초기 출발지점과 최종 도착지점의 일직선 연결 사이에 Eve를 두고 있기 때문에 유일하게 Eve에 재밍 공격을 수행한다. 반면에  $T^m = 60s$ 일 때는 충분한 비행시간이 할당되었기 때문에 무인항공기가 초기 출발지점에서 Eve로 곧장 향하여 Eve 주위에 머무르다가 최종 도착지점으로 향하

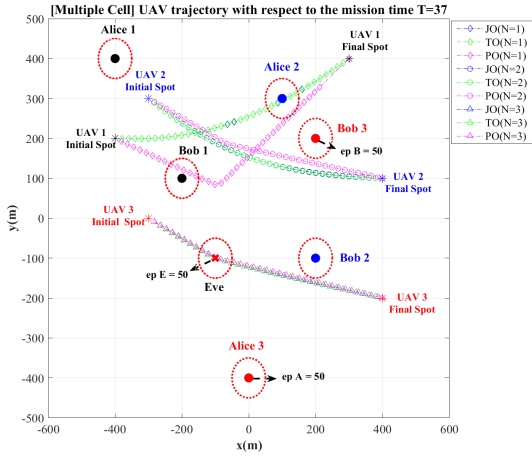


그림 6. 다중 셀에서 지상노드 Alice, Bob, Eve의 추정오차  $\epsilon_m^n = 50, n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{A, B, E\}$  일 때 비행시간  $T^n = 37s$ 에 대한 무인항공기 궤도  
Fig. 6. UAV trajectory with respect to the mission time  $T^n = 37s$ , when each ground node(Alice, Bob, Eve)'s estimation error  $\epsilon_m^n = 50, n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{A, B, E\}$  in Multiple Cell

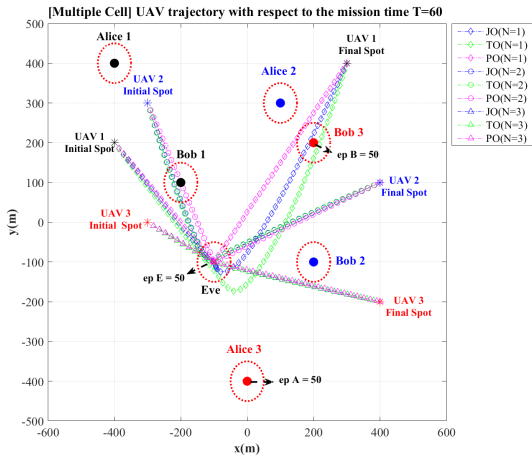


그림 7. 다중 셀에서 지상노드 Alice, Bob, Eve의 추정오차  $\epsilon_m^n = 50, n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{A, B, E\}$  일 때 비행시간  $T^n = 60s$ 에 대한 무인항공기 궤도  
Fig. 7. UAV trajectory with respect to the mission time  $T^n = 60s$ , when each ground node(Alice, Bob, Eve)'s estimation error  $\epsilon_m^n = 50, n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{A, B, E\}$  in Multiple Cell

는 모습을 볼 수 있다. 셀 1과 2의 무인항공기 비행 궤적은 초기 출발지점에서 JO, TO, PO의 비행 궤적은 유사한 형태를 보이긴 하지만, TO의 경우 Bob에게 영향을 미치는 무인항공기 재머의 전력을 조절할 수 없기 때문에 Alice와 Bob간 통신에 주는 간섭을 최대한 피하기 위해 JO와 PO에 비해 최대한 Bob을 피해

비행한다. 최종 출발지점으로 돌아가는 TO의 궤적 역시 Bob을 최대한 피하기 위해 Eve에게도 멀리 떨어져 비행을 한다.

그림 8, 9는 다중 셀( $N=3$ )에서 주어진 시간  $T^n = 60s$ 일 때, 각 셀별 Alice의 추정오류  $\epsilon_A^n, n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 의 변화에 따른 비행 궤적을 보여준다. 그림 8의 경우는  $\epsilon_A^n$ 를 0으로, 그림 9의 경우는  $\epsilon_A^n$

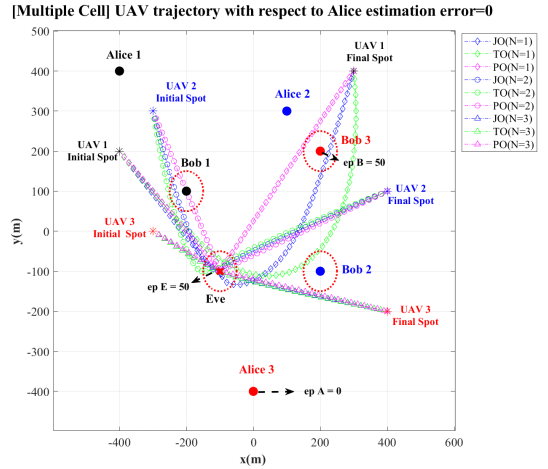


그림 8. 다중 셀에서 비행시간  $T^n = 60s$  일 때 Alice의 추정 오류  $\epsilon_A^n = 0, n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 에 대한 무인항공기 궤적  
Fig. 8. UAV trajectory with respect to Alice's estimation error  $\epsilon_A^n = 0, n \in \{1, 2, \dots, N\}$ , when the flight time  $T^n = 60s$  in Multiple Cell

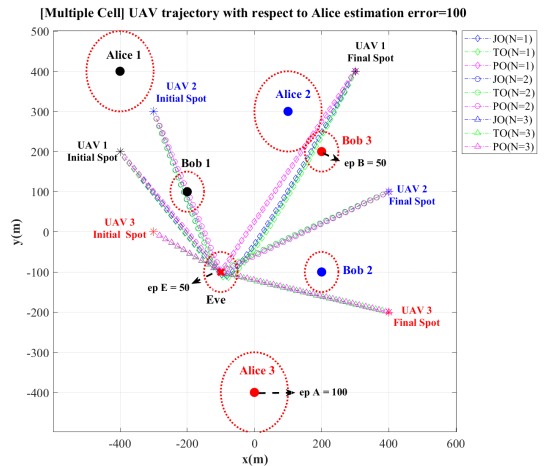


그림 9. 다중 셀에서 비행시간  $T^n = 60s$  일 때 Alice의 추정 오류  $\epsilon_A^n = 100, n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 에 대한 무인항공기 궤적  
Fig. 9. UAV trajectory with respect to Alice's estimation error  $\epsilon_A^n = 100, n \in \{1, 2, \dots, N\}$ , when the flight time  $T^n = 60s$  in Multiple Cell

를 100으로 설정한다.  $\epsilon_A^u$ 가 0인 경우 셀 1과 2의 TO는 Alice와 Bob간의 보안량 보호를 위해 Bob을 피해 비행한다.  $\epsilon_A^u$ 가 100인 경우 지상노드 위치점이 아닌 추정오류 영역을 피해야하기 때문에 모든 셀의 JO, TO는 모두 일직선으로 비행하는 PO와 비슷한 궤적을 보인다. 추정오류가 큰 상황에서는 전력 할당의 최적화 방법이 유리함을 보여준다.

다중 셀에서 비행시간  $T^m$  및 Alice의 추정오류  $\epsilon_A^u$ 에 대한 보안량을 측정하였을 때 그림 6- 그림 8의 보안량은 JO > PO > TO 순으로 측정되었다. 다중 셀 시나리오에서도 보안량 향상을 위해서는 UAV의 전력 할당을 디자인하는 것이 비행 경로 디자인보다 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 앞에서 밝힌 것과 같이 다중 셀에서의 비행시간 및 추정오류에 대한 보안량 증감 그래프는 단일 셀에서와 비슷한 양상을 보이기에 생략한다.

## V. 결 론

본 연구는 다중 셀에서의 물리 계층 보안 향상을 위해 협력 무인항공기 재머를 고려하여, 무인 항공기의 최적 전력 할당 및 비행 궤적 설계를 제안하였다. 제안 알고리즘의 실효성 증대를 위해, 모든 네트워크 구성 노드의 불완전한 채널 정보를 가정하여, 최악의 경우에서 보안량을 최대화하는 물리 계층의 보안 기술을 개발하였다. 단일 셀 및 다중 셀에서의 시뮬레이션 검증을 통해, 비행 궤적 혹은 전력 할당만을 최적화한 협력 무인 항공기 재머 대비 제안 알고리즘의 성능 우수성을 입증하였다. 특히, 채널 추정 오류가 커짐에 따라, 재밍 영역에 대한 불확실한 위치 정보로 인해, 비행 궤적이 증가함을 확인하였다. 또한, 무인항공기가 비행할 수 있는 시간 정도에 따라, 비행 경로가 한정됨에 따라 최적 비행 경로가 상이하다는 점도 확인되었다. 보안 성능 향상의 극대화를 위해, 비행 궤적 설계 뿐만 아니라 무인항공기 전력 할당이 필수적이라는 사실 또한 검증되었다. 본 논문의 연구를 확장하여, 다수 개의 수신기와 도청자가 존재하는 다중 셀 시나리오에서 지상 재머 및 항공 재머의 최적 협력 방안 연구를 통해, 향상된 물리 계층 보안 성능을 기대해 볼 수 있다. 또한 동일 주파수를 사용하는 환경 등을 고려하는 다중 셀 시나리오를 고려해 볼 수 있다.

## References

- [1] L. Zhou and Z. Haas, "Securing ad hoc networks," *IEEE Netw.*, vol. 13, no. 6, pp. 24-30, Nov. 1999.
- [2] E. A. Jorswieck, A. Wolf, and S. Gerbracht, "Secrecy on the physical layer in wireless networks," *Trends in Telecommun. Technol.*, pp. 413-435, Mar. 2010.
- [3] A. D. Wyner, "The wire-tap channel," *The Bell Syst. Tech. J.*, vol. 54, pp. 1355-1387, Oct. 1975.
- [4] Y. Roh, S. Jung, and J. Kang, "Cooperative UAV jammer for enhancing physical layer security: Robust design for jamming power and trajectory," *IEEE MILCOM 2019*, Norfolk, VA, USA, Nov. 2019.
- [5] C. Zhong, J. Yao, and J. Xu, "Secure UAV communication with cooperative jamming and trajectory control," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 2, pp. 286-289, Feb. 2019.
- [6] A. Li and W. Zhang, "Mobile jammer -aided secure UAV communications via trajectory design and power control," *Ch. Commun.*, vol. 15, no. 8, pp. 141-151, Aug. 2018.
- [7] M. Cui, G. Zhang, Q. Wu, and D. W. K. Ng, "Robust trajectory and transmit power design for secure UAV communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 9042-9046, Jun. 2018.
- [8] C. Zhong, J. Yao, and J. Xu, "Secure UAV communication with cooperative jamming and trajectory control," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 2, pp. 286-289, Dec. 2018.
- [9] Y. Cai, Z. Wei, R. Li, D. W. K. Ng, and J. Yuan, "Energy-efficient resource allocation for secure UAV communication systems," arXiv preprint arXiv:1901.09308, 2019.
- [10] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*, John Wiley & Sons Inc., pp. 183-222, 2006.
- [11] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 7th Ed., Elsevier, pp. 1066, 2007.
- [12] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex

*Optimization*,” Cambridge Univ. Press, 2004.

- [13] M. Grant and S. P. Boyd, “CVX: Matlab software for disciplined convex programming (Ver. 2.2, Jan. 2020, Build 1148),” Retrieved May 14, 2021, from <http://cvxr.com/cvx/>
- [14] A. Beck and L. Tretuashvili, “On the convergence of block coordinate descent type methods,” *SIAM J. Optimization*, vol. 23, no. 4, pp. 2037-2060, Aug. 2013.
- [15] S. Jeong, O. Simeone, A. Haimovich, and J. Kang, “Beamforming design for joint localization and data transmission in distributed antenna system,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 1, pp. 62-76, Jan. 2015.
- [16] S. Jeong, “Edge computing and vehicles: Opportunities and challenges for the future,” *J. KICS*, vol. 46, no. 5, pp. 834-847, May 2021.
- [17] A. Zappone, E. Björnson, L. Sanguinetti, and E. Jorswieck, “Globally optimal energy-efficient power control and receiver design in wireless networks,” *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 65, no. 11, pp. 2844-2859, Feb. 2017.
- [18] G. Scutari, F. Facchinei, L. Lampariello, and P. Song, “Parallel and distributed methods for nonconvex optimization,” *2014 IEEE ICASSP*, May 2014.
- [19] Q. Wang, Z. Chen, H. Li, and S. Li, “Joint power and trajectory design for physical-layer secrecy in the UAV-Aided mobile relaying system,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 62849-62855, Oct. 2018.

**박 지 영 (Ji-young Park)**



2020년 2월 : 고려사이버대학교  
전자전기공학과 졸업  
2022년 2월 : 경북대학교 전자  
전기공학부 석사 졸업  
<관심분야> 전자공학, 통신공  
학, 이동통신시스템  
[ORCID:0000-0002-8258-071X]

**정 성 아 (Seongah Jeong)**



2010년 2월 : 한국과학기술원 정  
보통신공학과 졸업  
2012년 2월 : 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학부 석사 졸업  
2015년 8월 : 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학부 박사 졸업  
2015년 9월~2016년 2월 : 한국  
과학기술원 정보전자연구소 박사후 연구원  
2016년 3월~2017년 8월 : Harvard John A. Paulson  
School of Engineering and Applied Sciences 박사  
후 연구원  
2017년 9월~2019년 8월 : Samsung Research 책임 연  
구원  
2019년 9월~현재 : 경북대학교 전자공학부 조교수  
<관심분야> 통신공학, 신호 처리  
[ORCID:0000-0002-9737-0432]