

경량화 메시지 프로토콜을 사용하는 UAV 시스템의 항재밍을 위한 적응형 주파수 도약 기법

권진솔*, 서경희*, 백호기°

Adaptive Frequency Hopping Technique for Anti-Jamming of UAV Systems Using Lightweight Messaging Protocols

Jinsol Kwon*, Kyunghee Seo*, Hoki Baek°

요 약

본 연구에서는 경량화 메시지 프로토콜을 사용하는 소형 무인항공기(UAV) 시스템의 항재밍 능력 향상을 위한 적응형 주파수 도약 기법을 제안한다. 제안된 기법은 채널 상태 모니터링, 채널 상태 정보 통합 및 배포, 주파수 도약 패턴 조정의 3단계로 구성되며, 동적 재밍 환경에서 효과적으로 작동하도록 설계되었다. 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 성능을 평가하였으며, 고정형 및 동적 재밍 환경에서 기존 방식과 비교 분석을 수행하였다. 결과적으로, 제안된 적응형 주파수 도약 기법은 동적 재밍 환경에서 가장 안정적이고 높은 성능을 보였으며, 특히 오탐지 누적 문제를 효과적으로 해결하여 장기적인 통신 안정성을 확보하였다. 본 연구에서 제안한 기법은 하드웨어 제약을 고려하여 설계되어 기존 경량화 메시지 프로토콜 기반 드론 시스템에 즉시 적용 가능하며, 이를 통해 소형 UAV 시스템의 보안성과 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 항재밍, 무인항공기, 주파수 도약, 경량화 메시지 프로토콜

Key Words : Anti-jamming, Unmanned Aerial Vehicle, Frequency Hopping, Lightweight Messaging Protocol

ABSTRACT

This study proposes an adaptive frequency hopping technique to enhance the anti-jamming capability of small Unmanned Aerial Vehicle (UAV) systems using lightweight messaging protocols. The proposed method consists of three phases: channel state monitoring, channel state information integration and distribution, and frequency hopping pattern adjustment, designed to operate effectively in dynamic jamming environments. The performance of the proposed technique was evaluated through simulations, comparing it with existing methods in both stationary and dynamic jamming scenarios. Results show that the proposed adaptive frequency hopping technique demonstrates the most stable and high performance in dynamic jamming environments, effectively addressing the problem of false detection accumulation and ensuring long-term communication stability. The technique is designed considering hardware constraints, making it immediately applicable to existing lightweight messaging protocol-based drone systems. This research is expected to significantly enhance the security and reliability of small UAV systems, offering a practical solution for improving anti-jamming capabilities in lightweight messaging protocol environments.

* 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성사업의 연구결과로 수행되었음. (IITP-2024-RS-2022-00156389)

• First Author : Kyungpook National University, School of Computer Science and Engineering, wlsth1219@knu.ac.kr, 정희원

° Corresponding Author : Kyungpook National University, School of Computer Science and Engineering, neloyou@knu.ac.kr, 종신회원

* Kyungpook National University, School of Computer Science and Engineering, k0_h2_218@knu.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202407-148-C-RU, Received July 16, 2024; Revised August 13, 2024; Accepted September 10, 2024

I. 서 론

UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 기술은 다양한 산업 분야에서 혁신적인 변화를 가져오고 있으며, UAV의 활용은 작업 효율성을 크게 향상시켜왔다. 이러한 활용 증가와 함께 통합 개발을 위한 표준 인터페이스 규격의 필요성이 대두되었고, MAVLink(Micro Air Vehicle Link) 프로토콜이 이러한 요구를 충족하는 대표적인 UAV 메시지 프로토콜로 자리잡았다.

MAVLink 프로토콜은 소형 드론 시스템에서 가장 흔히 사용되는 통신 메시지 프로토콜이다. MAVLink는 현재 대부분의 상용 및 오픈소스 드론 플랫폼에서 통신 프로토콜로 채택되고 있다^[1]. MAVLink 프로토콜은 경량화된 메시징 구조로서 제한된 대역폭에서도 효율적인 통신을 가능하게 하며, 다양한 기기 간 높은 호환성을 제공한다. 이러한 특성은 실시간 제어 및 텔레메트리 데이터 전송을 최적화하여, 드론의 정밀한 제어와 상태 모니터링을 가능하게 한다.

MAVLink 프로토콜과 같은 경량화 메시지 프로토콜은 재밍과 같은 신호 수준의 공격에 취약하다. 대표적인 경량화 메시지 프로토콜인 MAVLink 프로토콜은 경량화된 메시지 구조로 설계되어 메시지 여러 복구와 같은 능력은 갖추지 않고 있으며, 이로 인해 특정 수준 이상의 수신 신호 장애 발생 시 메시지 수신이 불가해진다. 제어 신호가 재밍되면 UAV와 지상 제어 시스템(GCS, Ground Control System) 간의 연결이 끊어져 제어 불능 상태에 빠질 수 있으며, 드론의 추락이나 미션 실패로 이어질 수 있다. 특히 도심 지역이나 주요 기반 시설 인근에서 운용될 때에는 대형 사고의 위험성이 있다^[2].

재밍 공격의 위험에 대응하기 위해 다양한 항재밍 기술이 연구되어 왔다. 대표적인 기술로는 확산 스펙트럼, 빔포밍, 적응형 필터링 등이 있다. 확산 스펙트럼 기술은 신호를 넓은 대역폭으로 확산시켜 재밍의 영향을 줄이는 방법이다. 확산 스펙트럼 기술은 효과적인 항재밍 성능을 제공하지만, 구현의 복잡성이 높고 대역폭 효율성이 낮다^[3]. 빔포밍은 안테나 어레이를 사용하여 원하는 방향으로 신호를 집중시키는 기술이다. 빔포밍 기술은 공간적으로 재밍 신호를 회피할 수 있지만, 소형 드론에 적용하기 어렵고 비용이 높다^[4]. 적응형 필터링은 재밍 신호의 특성을 실시간으로 분석하여 이를 제거하는 방식이다. 적응형 필터링은 다양한 재밍 신호에 대응할 수 있지만, 처리에 많은 계산 리소스가 필요하다는 한계가 있다^[5].

항재밍을 위한 확산 스펙트럼 기술의 일종으로 주파

수 도약 방식이 있다. 주파수 도약 방식에서는 전송 주파수를 실시간으로 변화하며 전송하여 특정 주파수 대역의 재밍 공격을 피할 수 있다. 항재밍을 위한 주파수 도약 기술은 지속적으로 연구되어 오고 있다. [6]에서는 비지상 네트워크에서의 보안을 위해 주파수 도약 체계의 공존을 연구하였으나, MAVLink를 사용하는 소형 UAV에는 적용이 어려운 고속 주파수 도약 기술을 기반으로 하였다. [7]에서는 동적이고 지능적인 재밍 환경을 대응하기 위해 강화학습을 활용하여 적의 재밍 공격을 회피하는 연구를 진행하였으며, 실제 주파수-시간 자원 사용 정보인 Spectrum Waterfall을 학습에 활용하고, 최적의 항재밍을 위해 Deep Reinforcement Learning 알고리즘을 제안했다. 이 방법은 분석되지 않은 환경에서도 재밍 공격을 피할 수 있음을 보였으나, 학습을 위해서는 소형 UAV에는 적용하기 어려운 수준의 연산량이 요구되기에 적용할 수 없다. [8]에서도 학습 기반으로, 재밍 공격과 다중 Agent 환경에서 상호 간섭을 고려하여 Collaborative Multi-Agent Reinforcement Learning 알고리즘을 제안하였으나, 학습의 연산량이 소형 UAV 체계에는 합리적이지 않다.

본 논문에서는 하드웨어 제약을 고려한 실용적인 주파수 도약 기법을 제안한다. 특히 MAVLink 프로토콜을 사용하는 소형 UAV 제어 시스템에도 적용하기 위하여, 고수준의 하드웨어가 요구되지 않는 슬롯 단위 주파수 도약 기법을 활용한다. 주파수 도약의 속도가 높을수록 재밍 극복에 유리하지만^[9], 슬롯 단위의 느린 도약에도 항재밍 능력을 확보하기 위해서 재밍 채널을 탐지하고 능동적으로 회피하는 기법을 적용한다. 본 연구에서 제안하는 적응형 주파수 도약 기법의 핵심 아이디어는 실시간으로 채널 상태를 모니터링하고, 재밍 상황을 감지하여 도약 패턴을 동적으로 조정하는 것이다. 이를 통해 다양한 재밍 공격 시나리오에 효과적으로 대응할 수 있으며, 채널 상태에 따른 동적 조정으로 전반적인 통신 품질을 개선할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 기법은 기존 하드웨어에 큰 수정 없이 적용 가능할 것을 고려하여 실용성이 높으며, 이는 현재 운용 중인 MAVLink 기반 드론 시스템의 보안성을 즉각적으로 향상시킬 수 있음을 기대할 수 있다.

II. 시스템 모델

본 장에서는 제안하는 적응형 주파수 도약 기법의 기반이 되는 시스템 모델에 대해 상세히 설명한다. 네트워크 토폴로지, 경량화 설계, 그리고 프레임 구조를 중

심으로 기술한다.

2.1 네트워크 토폴로지

본 연구에서 고려하는 네트워크는 GCS, UAV, 그리고 Central Node로 구성된다. 이 구조는 미군의 전술데이터링크인 Link-16^[10]을 참고하였다.

GCS는 UAV를 원격으로 제어하고 모니터링하는 역할을 담당한다. 각 GCS는 하나의 UAV와 연결되어 UAV-GCS 통신 쌍을 형성한다. 각 통신 쌍에서 GCS는 UAV의 제어 및 모니터링을 책임진다.

UAV는 실제 비행을 수행하는 드론으로, 경량화된 메시지 프로토콜을 사용하여 GCS와 통신한다. UAV는 센서 데이터, 위치 정보, 상태 정보 등을 GCS에 전송한다.

중앙 노드는 네트워크의 핵심 위치에서 전체 시스템의 관리를 수행한다. 모든 UAV-GCS 통신 쌍의 시간 동기화 기능을 제공하며, 새로운 통신 쌍의 추가 또는 제거 시 조정을 담당한다. 다수의 UAV-GCS 통신 쌍이 주파수 도약 기술을 사용할 경우, 주파수 도약 패턴의 충돌 방지를 위해 이를 관리하고 할당하고, 네트워크의 각 통신 쌍으로부터 주기적으로 채널 상태 정보를 수집하고 통합하여 전체 네트워크의 채널 상태를 감시한다.

네트워크 내의 주요 통신 링크로는 UAV-GCS 링크와 Center Node-GCS 링크가 있다. UAV-GCS 링크는 각 UAV와 해당 GCS 간의 직접적인 양방향 통신을 통해, UAV의 상태 및 위치 정보와 GCS의 제어 명령이 교환된다. Center Node-GCS 링크는 Center Node와 각 GCS 간의 제어 및 정보 교환을 위한 링크로, 시간 동기화, 네트워크 가입, 타임슬롯 할당, 채널 상태 정보 등이 주된 내용으로 처리된다.

2.2 경량화 설계

본 시스템은 경량화된 메시지 프로토콜을 기반으로 한다. 이는 소형 UAV의 특성과 운용 환경을 고려한 것이다. 소형 UAV는 제한된 계산 능력과 배터리 용량을 가지고 있다. 이러한 하드웨어적 제약 조건 하에서 효율적인 통신을 수행하기 위해서는 필수적인 기능만을 수행하는 경량화된 메시지 프로토콜이 적합하다.

경량화 설계는 보안 측면에서, 복잡한 암호화나 인증 메커니즘을 포함하지 않아 취약점이 존재할 수 있다. 물리 계층(L1)과 데이터 링크 계층(L2)에서의 기능도 최소화되어 있어, 기존의 항재밍 기법들을 적용하기 어렵다. 예를 들어, 고속 주파수 도약, 적응형 빔포밍, 복잡한 확산 스펙트럼 기술 등은 높은 계산 능력과 에너지 소비를 요구하기 때문에 소형 UAV의 제한된 리소스로

는 구현하기 어렵다.

따라서 이러한 경량화 메시지 프로토콜을 사용하는 UAV 시스템에 L1, L2 레벨에서의 복잡한 보안 기능을 추가 적용하는 것은 비합리적이다. 이는 프로토콜의 경량성을 해치고, 소형 UAV의 제한된 하드웨어 능력을 초과하여 전체적인 시스템 성능을 저하시킬 수 있다.

본 연구에서 제안하는 적응형 주파수 도약 기법은 경량화 설계를 고려하여, 하드웨어 제약이 큰 소형 UAV 시스템에 적합한 기법이다. 전통적으로 항재밍을 위해 사용되는 μ s단위의 고속 주파수 도약이 높은 신호 처리 능력, 특수한 RF 하드웨어, 고정밀 시간 동기 등을 필요로 하는 것과 달리, 소형 UAV로 감당할 수 있는 ms수준의 주파수 도약을 기반으로 하며, 단순한 신호 처리 및 간단한 연산으로 기법이 동작하는 등 경량화 설계가 고려되어 있어 소형 UAV 시스템에 적합하다.

2.3 TDMA 기반 프레임 구조 설계

본 연구에서 제안하는 적응형 주파수 도약 기법을 구현하기 위해, 제안 기법의 기능과 동작 순서를 고려하여 TDMA 프레임 구조를 설계하였다. IEEE 802.16e 모바일 와이맥스 표준^[11]의 프레임 구조를 참고하였다.

제안된 프레임 구조는 Beacon, Random Access, Control, 그리고 Channel State Sharing의 네 가지 주요 세그먼트로 구성된다. 이는 IEEE 802.16e 표준의 프리앰블, 랜덤 액세스, 하향링크, 상향링크 구간과 유사한 구조를 가지고 있다. 네트워크 구성을 위한 beacon, random access 등의 기능과 제안 기법에 필요한 채널 상태 공유, 통합 정보 전송 등을 모두 고려하여 구조를 설계하였다.

- 1) Beacon 구간: IEEE 802.16e의 프리앰블과 유사한 역할을 수행한다. 프레임의 시작을 알리는 비콘 신호가 전송되며, GCS가 시간 동기화 신호와 필수 정보를 UAV에 전송하여 네트워크의 동기를 맞춘다. 또한, 제안하는 적응형 주파수 도약 기법을 위한 통합된 채널 상태 정보가 전송된다.
- 2) Random Access 구간: IEEE 802.16e의 랜덤 액세스

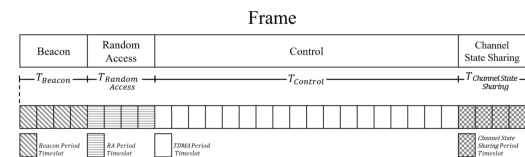


그림 1. 제안 기법을 위한 네트워크의 프레임 구조
Fig. 1. Frame Structure of a Network for Proposal Technique

세스 채널과 유사한 기능을 수행한다. 신규 노드가 네트워크에 접근하거나 긴급 데이터를 전송할 수 있도록 동적 타임슬롯이 제공된다. 이는 네트워크의 유연성을 높이고 예측할 수 없는 트래픽 요구에 대응할 수 있게 한다.

- 3) Control 구간: IEEE 802.16e의 하향링크 및 상향링크 구간을 통합한 형태로 볼 수 있다. UAV로부터의 텔레메트리 데이터를 수집하고 GCS의 제어 명령을 처리한다. UAV는 이 시간 동안 비행 상태, 위치, 그리고 기타 필수 작업 명령들을 GCS로 전송한다.
- 4) Channel State Sharing 구간: UAV-GCS 통신 쌍의 채널 상태 정보를 Center Node에게 공유하고 통합한다. 이를 통해 재밍 감지 등 통신 채널을 관리할 수 있다.

이러한 프레임 구조는 UAV와 GCS 간의 효율적인 데이터 교환을 지원하며, 제안하는 적응형 주파수 도약 기법을 적용할 수 있도록 설계되었다.

III. 적응형 주파수 도약 기법

본 장에서는 주파수 도약 기법의 메시지 성공 확률을 확률적 모델로 분석하고, MAVLink 프로토콜과 같이 경량화된 메시징 프로토콜의 항재밍을 위한 적응형 주파수 도약 기법에 대해 기술한다.

3.1 주파수 도약 기법의 메시지 성공 확률 분석

본 논문에서 제안하는 주파수 도약 기법에 대해서 설명하기에 앞서, 기반이 되는 타임슬롯 단위의 주파수 도약 기술의 항재밍 성능에 대해 확률적 모델을 통해 분석하고, 적응형 주파수 도약 기법이 사용되어야 하는 이유를 설명한다.

소형 UAV는 높은 연산 능력 및 고수준의 하드웨어를 갖추기 어렵기 때문에, 높은 항재밍 능력을 보장하지만 높은 하드웨어 능력을 요구하는 고속 주파수 도약 기술을 사용할 수 없다. 본 논문에서는 경량화 프로토콜을 사용하는 소형 UAV 수준에서의 항재밍을 고려하여 타임슬롯 단위의 주파수 도약 기술을 사용한다.

재밍이 존재하며, 1개의 노드가 타임슬롯 단위의 주파수 도약 기술을 사용하여 송신하였을 때의 수신 성공률을 확률적 모델로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{success} = (N - J) / N. \quad (1)$$

$P_{success}$ 는 수신 성공 확률을 나타내며, N 은 전체 채널 수, J 는 동시 재밍 채널 수이며, J 는 N 이하이다. 수신이 성공할 확률은 노드가 선택한 채널이 재밍되지 않은 채널일 확률과 같다.

같은 상황에서 노드의 수가 k 개로 증가할 경우, 임의의 단일 노드 i 의 송신이 수신 성공할 확률은 선택한 채널이 재밍되지 않은 채널일 확률과 다른 $k-1$ 개 노드가 모두 다른 채널을 선택할 확률을 곱한 것과 같다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P(success_i) = ((N - J) / N) * ((N - 1) / N)^{(k-1)}. \quad (2)$$

느린 주파수 도약의 경우, 노드의 수가 전체 채널 수를 초과하지 않으면, 직교하는 패턴을 설계할 수 있고, 직교하는 패턴으로 사전에 설계될 경우, 다중 노드의 경우에도 단일 노드의 확률과 동일하다고 볼 수 있다. 즉, 주파수 도약 기술은 주파수 도약 패턴 간의 충돌이 발생하지 않더라도 전체 채널 수 대비 재밍 채널의 수만큼의 확률로 장애가 발생하게 된다. 이는 여러 복구 기능이 갖추어진 시스템에서는 대비할 수 있는 수준일 수 있으나, 경량화에 초점이 맞추어진 프로토콜에서는 메시지 장애로 이어진다. 따라서 본 논문에서는 경량화된 메시징 구조를 채택한 소형 UAV의 항재밍을 구현할 수 있는 적응형 주파수 도약 기법을 제안한다.

3.2 적응형 주파수 도약 기법

적응형 주파수 도약 기법은 그 기능에 따라 3단계로 구분할 수 있고, 1단계인 채널 상태 모니터링, 2단계 채널 상태 정보 통합 및 배포, 3단계 주파수 도약 패턴 조정의 과정이 진행된다. 각 단계는 순차적으로 수행되고, 앞선 2장에서 정의한 프레임 구조에 따라 매 프레임마다 반복되어 재밍 채널을 판단하고 이를 회피하는 주파수 도약 패턴으로 조정해 항재밍 능력을 갖출 수 있다. 각 기능이 수행되는 과정을 단계별로 설명한다.

적응형 주파수 도약 기법의 첫 단계인 채널 상태 모니터링은 각 UAV-GCS(무인항공기-지상통제소) 통신 쌍에서 독립적으로 수행된다. 이는 재밍 공격의 방향 및 범위에 따라 네트워크 내 노드들이 서로 다른 채널 상태를 경험할 수 있으며, 재밍 공격의 대상이 시간에 따라 변화할 수 있기 때문이다.

채널 상태를 평가하기 위해 사용되는 주요 지표는 다음과 같다. 1) SNR (Signal to Noise Ratio): 신호 대 잡음비로, 원하는 신호의 강도와 배경 잡음의 비율을 나타낸다. 2) BER (Bit Error Rate): 전송된 총 비트 수 대비 오류 비트의 비율을 나타낸다. 3) PLR (Packet

Algorithm 1 Channel State Monitoring for Each UAV-GCS Communication Pair

```

1: Input: Channel set  $C$ , Monitoring window  $W$ , Thresholds ( $SNR_{th}, BER_{th}, PLR_{th}$ )
2: Output: Channel status  $S$  for each channel
3: Initialize monitoring data  $D_c = []$  for each channel  $c \in C$ 
4: for each time slot  $t$  do
5:   for each channel  $c \in C$  do
6:     Measure SNR, BER, PLR of channel  $c$ 
7:     Add measurements to  $D_c$ 
8:     if  $length(D_c) > W$  then
9:       Remove oldest entry from  $D_c$ 
10:    end if
11:   end for
12: end for
13: for each channel  $c \in C$  do
14:   Calculate average SNR, BER, PLR from  $D_c$ 
15:   if  $avg\_SNR < SNR_{th}$  or  $avg\_BER > BER_{th}$  or  $avg\_PLR > PLR_{th}$  then
16:      $S[c] = \text{'compromised'}$ 
17:   else
18:      $S[c] = \text{'normal'}$ 
19:   end if
20: end for
21: return  $S$ 

```

그림 2. 채널 상태 모니터링 알고리즘
Fig. 2. Channel state monitoring algorithm

Loss Rate): 전송된 총 패킷 수 대비 손실된 패킷의 비율을 나타낸다.

알고리즘에서는 각 통신 쌍이 모든 채널에 대해 매 타임슬롯마다 이러한 지표들을 측정한다. 측정된 데이터는 각 채널별로 별도의 모니터링 데이터 구조(D_c)에 저장된다. 이 구조는 고정된 크기의 윈도우(W)를 유지하며, 새로운 측정값이 추가될 때 가장 오래된 데이터를 제거함으로써 최근 상태에 대한 정보만을 유지한다.

모니터링 기간이 종료되면, 각 채널에 대해 수집된 데이터의 평균값을 계산한다. 이 평균값들을 미리 정의된 임계값(SNR_{th} , BER_{th} , PLR_{th})과 비교하여 채널의 상태를 판단한다. 만약 평균 SNR이 임계값보다 낮거나, 평균 BER 또는 PLR이 임계값보다 높다면, 해당 채널을 '손상됨(compromised)'으로 표시한다. 그렇지 않은 경우 '정상(normal)'으로 간주한다.

이러한 접근 방식은 일시적인 변동이나 노이즈의 영향을 줄이고, 채널의 전반적인 상태를 더 정확하게 평가할 수 있게 한다. 또한, 각 통신 쌍이 독립적으로 평가를 수행함으로써, 지역적인 재밍 효과를 감지하고 대응할 수 있는 능력을 제공한다.

알고리즘의 성능은 모니터링 윈도우의 크기(W)와 각 지표의 임계값(SNR_{th} , BER_{th} , PLR_{th}) 설정에 크게 의존한다. 파라미터들은 예상되는 재밍 공격의 특성, 네트워크의 운용 환경, 그리고 요구되는 반응 속도 등을 고려하여 신중하게 선택되어야 한다. 예를 들어, 윈도우 크기를 작게 설정하면 빠른 반응이 가능하지만 일시적인 변동에 민감할 수 있으며, 크게 설정하면 더 안정적인 평가가 가능하지만 반응 속도가 느려질 수 있다.

Algorithm 2 Channel State Integration and Distribution by Center Node

```

1: Input: Channel status  $S$  from all UAV-GCS pairs, Channel set  $C$ , Total number of pairs  $N$ , Compromise threshold  $T$ 
2: Output: Integrated channel status  $I$ 
3: Initialize  $I = \{\}$ 
4: for each channel  $c \in C$  do
5:    $compromised\_count = \text{count of 'compromised' in } S[c]$  across all pairs
6:   if  $compromised\_count/N > T$  then
7:      $I[c] = \text{'unavailable'}$ 
8:   else
9:      $I[c] = \text{'available'}$ 
10:   end if
11: end for
12: Broadcast  $I$  to all UAV-GCS pairs
13: return  $I$ 

```

그림 3. 채널 상태 정보 통합 및 배포 알고리즘
Fig. 3. Channel state information integration and distribution algorithm

적응형 주파수 도약 기법의 두 번째 단계는 채널 상태 정보의 통합 및 배포 과정이다. 이 단계는 네트워크의 Center Node에서 수행되며, 개별 UAV-GCS 통신 쌍들의 지역적 관찰을 종합하여 네트워크 전체의 채널 상태에 대한 포괄적인 평가를 제공한다.

프로세스는 다음과 같이 진행된다:

- 1) 정보 수집: 각 UAV-GCS 통신 쌍은 1단계에서 수행한 채널 상태 모니터링 결과를 Center Node에 전송한다. 이 정보는 각 채널의 상태를 포함한다.
- 2) 정보 통합: Center Node는 수집된 정보를 바탕으로 각 채널에 대한 네트워크 차원의 평가를 수행한다. 특정 채널에 대해 'compromised'로 보고한 통신 쌍의 비율이 미리 정의된 임계값(T)을 초과하면, 해당 채널을 'unavailable'로 표시한다. 그렇지 않은 경우 'available'로 간주한다.
- 3) 정보 배포: 통합된 채널 상태 정보(I)는 다음 프레임의 시작 시점에 모든 UAV-GCS 통신 쌍에게 브로드캐스트된다. 이 정보는 각 채널의 가용성 여부만을 포함하며, 구체적인 주파수 도약 패턴은 포함하지 않는다.

이러한 접근 방식은 다음과 같은 이점을 제공한다. 첫째, 개별 통신 쌍의 제한된 관점을 넘어 네트워크 전체의 상황을 고려한 채널 상태 평가가 가능하다. 이는 지역적으로 발생하는 간섭이나 재밍을 더 정확하게 식별할 수 있게 한다. 둘째, 모든 통신 쌍이 동일한 통합 정보를 받음으로써, 네트워크 전체가 일관된 채널 가용성 인식을 갖게 된다. 이는 효과적인 주파수 도약 패턴 조정을 위한 기반이 된다. 셋째, 구체적인 주파수 도약 패턴을 배포하지 않고, 채널의 가용성 정보만을 공유함으로써 도청에 의한 패턴 유출 위험을 최소화한다. 각 통신 쌍은 이 정보를 바탕으로 자체적으로 도약 패턴을

Algorithm 3 Frequency Hopping Pattern Adjustment for Each UAV-GCS Pair

```

1: Input: Integrated channel status  $I$ , Total channels  $C$ , Number of pairs  $N$ ,
   Current time  $T$ , Pair ID  $id$ 
2: Output: Updated hopping pattern  $P$  for the pair
3:  $available\_channels = [c \text{ for } c \in C \text{ if } I[c] == 'available']$ 
4:  $M = \text{length}(available\_channels)$ 
5:  $random.seed(T)$ 
6:  $shuffle(available\_channels)$ 
7:  $P = []$ 
8: for  $i = 0$  to  $M - 1$  do
9:    $index = (i \cdot N + id) \% M$ 
10:   $P.append(available\_channels[index])$ 
11: end for
12: return  $P$ 

```

그림 4. 주파수 도약 패턴 조정 알고리즘

Fig. 4. Frequency hopping pattern adjustment algorithm

생성하게 된다. 넷째, 통합된 정보만을 브로드캐스트함으로써 네트워크 전체의 통신 오버헤드를 줄일 수 있다.

알고리즘의 성능은 임계값 T 의 설정에 크게 의존한다. 이 값을 너무 낮게 설정하면 false positive가 증가할 수 있고, 너무 높게 설정하면 실제 재밍된 채널을 감지하지 못할 위험이 있다. 따라서 네트워크의 규모, 예상되는 재밍 위협의 특성, 그리고 요구되는 신뢰성 수준 등을 고려하여 이 임계값을 신중히 선택해야 한다.

적응형 주파수 도약 기법의 마지막 단계인 주파수 도약 패턴 조정은 각 UAV-GCS 통신 쌍에서 독립적으로 수행된다. 이 과정은 앞서 Center Node로부터 받은 통합 채널 상태 정보를 바탕으로 이루어지며, 재밍이나 간섭을 회피하면서도 네트워크의 다른 통신 쌍들과의 충돌을 방지하는 새로운 주파수 도약 패턴을 생성한다.

주요 알고리즘 단계와 특징은 다음과 같다:

- 1) 가용 채널 선별: 통합 채널 상태 정보(I)를 바탕으로 'available'로 표시된 채널만을 선별한다. 이는 재밍이나 심각한 간섭이 감지된 채널을 회피하는 첫 단계다.
- 2) 채널 순서 무작위화: 현재 시간(T)을 시드로 사용하여 가용 채널의 순서를 무작위로 섞는다. 모든 통신 쌍에서 동일하게 수행되어, 일관된 채널 순서를 보장한다. 시간을 시드로 사용함으로써 매 주기마다 다른 무작위 순서를 생성하여 패턴의 예측 가능성을 낮춘다.
- 3) 고유 패턴 생성: 각 통신 쌍은 자신의 고유 ID를 사용하여 섞인 채널 목록에서 특정 간격으로 채널을 선택한다. 이 방식은 모든 통신 쌍이 사용할 수 있는 모든 채널을 균등하게 사용하면서도, 직교한 패턴을 가지게 한다. 예를 들어, 총 12개의 가용 채널(C1~C12)과 3개의 통신 쌍(ID: 1, 2, 3)이 있다고 하자. 먼저, 무작위화된 채널 순서를 다음과 같이 한다: C5, C1, C9, C3, C11, C7, C2, C10, C6, C4, C8, C12. 그리고, 고유 패턴을 생성

한다:

- 통신 쌍 1 (ID=1): C5, C3, C2, C4
- 통신 쌍 2 (ID=2): C1, C11, C10, C8
- 통신 쌍 3 (ID=3): C9, C7, C6, C12

이러한 알고리즘은 네트워크 차원에서 감지된 재밍 채널을 효과적으로 회피하고, 각 통신 쌍이 서로 다른 패턴을 가짐으로써 동시에 같은 채널을 사용할 확률을 최소화한다. 또한, 모든 가용 채널이 각 통신 쌍에 의해 균등하게 사용되어 특정 채널에 부하가 집중되는 것을 방지하며, 시간에 따라 변화하는 무작위 패턴을 사용하여 외부 관찰자가 패턴을 예측하기 어렵게 만든다.

알고리즘의 성능은 가용 채널의 수(M)와 네트워크의 통신 쌍 수(N)의 관계에 따라 달라질 수 있다. M 이 N 보다 충분히 큰 경우, 모든 통신 쌍이 항상 서로 다른 채널을 사용할 수 있다. 그러나 M 이 N 에 가까워지거나 작아지는 경우, 채널 충돌의 가능성이 증가한다. 따라서 실제 구현 시에는 이러한 관계를 고려하여 필요에 따라 추가적인 충돌 회피 메커니즘을 도입할 수 있다.

또한, 이 알고리즘은 모든 통신 쌍이 정확히 동기화된 시간을 가지고 있다고 가정한다. 실제 환경에서는 시간 동기화의 오차로 인해 패턴 생성에 차이가 발생할 수 있으므로, robust한 시간 동기화 메커니즘이 필요할 수 있다.

결론적으로, 이 주파수 도약 패턴 조정 알고리즘은 앞선 두 단계의 결과를 효과적으로 활용하여, 동적인 재밍 환경에서 신뢰성 있는 통신을 가능하게 한다. 이는 전체 적응형 주파수 도약 기법의 핵심 요소로서, 네트워크의 항재밍 능력을 향상시킨다.

IV. 시뮬레이션 환경 및 결과

4.1 시뮬레이션 환경

본 연구에서는 제안된 적응형 주파수 도약 기법의 성능을 다양한 환경에서 평가하기 위해 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 시뮬레이션은 Python을 기반으로 구현되었으며, NumPy 라이브러리를 활용하여 수치 계산을 수행하고 Matplotlib을 이용하여 결과를 시각화하였다.

시뮬레이션의 주요 목적은 제안된 적응형 주파수 도약 기법의 항재밍 성능을 평가하고, 다양한 재밍 시나리오에서의 기법 적응성을 분석하는 것이다. 또한 기존 주파수 도약 방식과의 성능을 비교하고, 네트워크 규모 및 채널 환경 변화에 따른 성능 변화를 분석하고자 한다.

표 1. 제시하는 알고리즘의 파라미터들과 그 설명
Table 1. Parameters of the presented algorithm and their descriptions

Parameter	Description
C	Total number of channels
N	Number of UAV-GCS pairs
F	Total number of frames in simulation
S	Number of timeslots per frame
J	Number of channels jammed simultaneously
T_j	Frame interval for changing jamming channels
T_r	Frame interval for re-evaluating channel states
T_f	Frame interval for re-evaluating all channels
SNR_{th}	SNR threshold for assessing channel state [dB]
BER_{th}	BER threshold for assessing channel state
PLR_{th}	PLR threshold for assessing channel state

시뮬레이션에서 고려된 주요 파라미터는 표 1과 같다. 이러한 파라미터들은 다음과 같은 이유로 사용되었다.

- 1) 총 채널 수(C)와 UAV-GCS 통신 쌍 수(N): 네트워크 규모와 가용 주파수 자원의 관계를 분석하기 위해 선정되었다. 제안된 기법의 확장성을 평가할 수 있다.
- 2) 프레임 수(F)와 타임슬롯 수(S): 시스템의 장기적 성능과 단기적 반응성을 동시에 관찰하기 위해 선정되었다. 시간에 따른 적응성을 평가하는데 사용된다.
- 3) 재밍 관련 파라미터(J, T_j): 다양한 재밍 시나리오를 시뮬레이션하기 위해 선정되었다. 제안된 기법의 다양한 재밍 환경에서의 효과성을 검증할 수 있다.
- 4) 채널 평가 관련 파라미터($T_r, T_f, SNR_{th}, BER_{th}, PLR_{th}$): 채널 상태 평가의 정확성과 적시성을 조절하기 위해 선정되었다. 이는 제안된 기법의 채널 상태 인식 능력을 평가하는 데 중요하다.

본 시뮬레이션에서는 채널 상태 파악 여부에 따라 크게 두 가지 접근 방식을 비교한다. 첫 번째 접근 방식은 채널 상태를 고려하지 않고 고정 직교 패턴을 사용하는 방법 3이다. 두 번째 접근 방식은 채널 상태를 파악하여 적응적으로 패턴을 변경하는 방법으로, 이는 다시

두 가지 세부 방법으로 나뉜다. 방법 1은 채널 상태를 이진 분류하여 재밍된 채널을 배제하는 단순한 방식이다. 그러나 이는 한 번 'unavailable'로 판단된 채널을 지속적으로 사용하지 않아, 채널 상태 평가를 할 수 없어지는 문제가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 제안된 방법 2는 연속적인 채널 품질 평가, 확률적 채널 선택, 채널 상태 감쇠, 주기적 재평가 등의 기법을 도입하여 사용 불가 채널의 누적 문제를 해결한다. 방법에 따른 성능 차이를 분석하여 고정적 재밍 환경과 변동적 재밍 환경에서 각 방법의 효과성을 평가한다.

4.2 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션에서 사용된 주요 파라미터의 설정값과 그 선정 이유는 다음과 같다.

총 채널 수(C)는 66개로 설정하였다. 이는 2.4 GHz ISM 밴드에서 실제로 사용 가능한 채널 수를 고려한 것으로, 실제 무선 통신 환경의 주파수 자원을 현실적으로 반영하고자 하였다. UAV-GCS 통신 쌍 수(N)는 5로 설정하였는데, 이는 중규모 네트워크를 가정한 것으로 실제 운용 환경을 고려한 선택이다.

시뮬레이션의 총 프레임 수(F)는 1000으로 설정하였다. 이는 장기적인 성능 추이를 관찰하기 위해 충분한 시간을 설정한 것이다. 각 프레임 내 타임슬롯 수(S)는 100으로 설정하여, 프레임 단위의 성능과 타임슬롯 단위의 세부적인 동작을 모두 관찰할 수 있도록 하였다.

동시에 재밍되는 채널의 수(J)는 10개로 설정하였다. 이는 총 채널의 약 15%가 동시에 재밍되는 상황을 가정한 것으로, 중간 정도의 재밍 강도를 나타낸다. 동적 재밍 환경을 구현하기 위해, 재밍 채널 변경 주기(T_j)는 50 프레임으로 설정하여 동적 재밍 환경을 시뮬레이션할 수 있도록 하였다.

채널 상태 재평가 간격(T_r)은 10 프레임으로 설정하였다. 이는 채널 상태 변화에 충분히 빠르게 대응하면서도, 과도한 연산을 피하기 위한 선택이다. 전체 채널 재평가 간격(T_f)은 100 프레임으로 설정하여, 주기적으로 모든 채널의 상태를 초기화하고 재평가할 수 있도록 하였다.

채널 상태 판단을 위한 임계값들($SNR_{th}, BER_{th}, PLR_{th}$)은 각각 10dB, 1e-5, 0.1로 설정하였다. 이 값들은 일반적인 무선 통신 시스템에서 요구되는 성능 지표를 참고하여 선정하였다. SNR 임계값 10dB는 안정적인 통신을 위한 최소 신호 강도를, BER 임계값 1e-5는 허용 가능한 최대 비트 오류율을, PLR 임계값 0.1은 허용 가능한 최대 패킷 손실률을 나타낸다.

채널 상태 모니터링 윈도우(W)는 10 프레임으로 설정하여, 최근 10개 프레임의 데이터를 기반으로 채널 상태를 평가하도록 하였다. 채널 메모리 감쇠율은 0.9로 설정하여, 과거 채널 상태 정보의 영향이 점진적으로 감소하도록 하였다.

이러한 파라미터 설정을 통해 실제 무선 통신 환경과 유사한 조건에서 제안된 적응형 주파수 도약 기법의 성능을 평가할 수 있도록 하였다. 또한, 다양한 재밍 시나리오와 네트워크 조건에서의 성능을 분석할 수 있는 기반을 마련하였다.

4.2.1 고정형 재밍 상황에서의 성능 분석

그림 5는 고정형 재밍 환경에서 세 가지 주파수 도약 방법의 메시지 수신 성공률을 시간(프레임)에 따라 나타낸다. 세 가지 주파수 도약 방법은 모두 타임슬롯 단위의 느린 주파수 도약 방법을 기반으로 하고 있다. 가로축은 프레임 수를, 세로축은 메시지 수신 성공률을 표시한다. 이 그래프를 통해 각 방법의 성능과 특성을 분석할 수 있다.

방법 1은 채널 상태를 이진 분류하여 재밍된 채널을 완전히 배제하는 단순한 접근 방식이다. 이 방법은 고정형 재밍 환경에서 가장 높은 성공률(95% 이상)을 보인다. 매 프레임마다 채널 상태를 평가하고 재밍된 채널을 즉시 회피하기 때문에, 신속한 대응이 가능하다. 시뮬레이션 결과, 방법 1은 안정적으로 높은 성능을 유지하며, 이는 고정형 재밍 환경에서 즉각적인 채널 평가와 대응의 효과를 잘 보여준다.

방법 2는 방법 1에서 발생할 수 있는 사용 불가 채널의 누적 문제가 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 제안되었다. 이 방법은 사용 불가 채널의 누적 문제를 대비한다. 그러나 고정형 재밍 환경에서는 방법 1에 비해 다소 낮은 성능을 나타낸다. 이는 추가된 메커니즘들

이 변하지 않는 재밍 환경에서 불필요한 변동성을 초래하기 때문이다. 대표적으로, 채널 상태 감지로 인해 일부 재밍된 채널이 일시적으로 사용 가능한 것으로 간주될 수 있고, 주기적 재평가 시 모든 채널을 일시적으로 사용 가능한 것으로 판단하여 성능이 저하될 수 있다.

방법 3은 채널 상태 변화에 관계없이 미리 정해진 패턴을 사용하기 때문에 가장 낮은 성공률을 보인다. 이 방법은 다른 두 방법에 비해 성능 변동이 적지만, 지속적으로 재밍되는 채널을 피하지 못해 성능이 저하된다.

시간에 따른 성능 변화를 분석해보면, 초기 적응 단계에서 방법 1과 2가 유사하게 급격한 성능 향상을 보이는데, 이는 시스템이 재밍 환경을 파악하고 적응하는 과정을 나타낸다. 반면, 방법 3은 초기부터 일정한 성능을 보인다. 안정화 단계에서는 각 방법이 자신의 특성에 맞는 성능 수준에서 안정화된다. 1000 프레임에 걸친 장기 시뮬레이션에서 모든 방법이 일정한 성능을 유지하는데, 이는 고정형 재밍 환경의 특성을 잘 반영한다.

4.2.2 동적 재밍 상황에서의 성능 분석

그림 6은 동적 재밍 환경에서 세 가지 주파수 도약 방법의 메시지 수신 성공률을 시간(프레임)에 따라 나타낸다. 이 그래프를 통해 각 방법의 성능과 특성을 다음과 같이 분석할 수 있다.

방법 1은 초기에 높은 성공률(약 95-100%)을 보이지만, 시간이 지남에 따라 급격한 성능 저하를 경험한다. 특히 400 프레임 이후부터 성능이 크게 떨어지며, 모든 채널이 불가능한 경우 초기화하도록 하여 회복되는 모습을 보이거나 매우 불안정한 성능을 나타낸다. 이는 재밍 채널이 동적으로 변화함에 따라 오탐지가 누적되어 사용 가능한 채널이 점차 줄어들기 때문이다. 성공률의 급격한 하락(20% 이하)은 오탐지의 누적이 임계점에

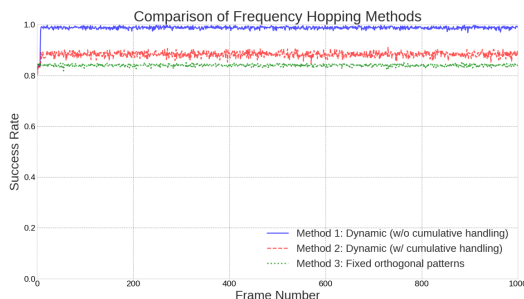


그림 5. 고정형 재밍 상황에서 세 가지 주파수 도약 방법의 메시지 수신 성공률 비교
Fig. 5. Comparing message receive success rates of three frequency hopping methods in stationary jamming situations

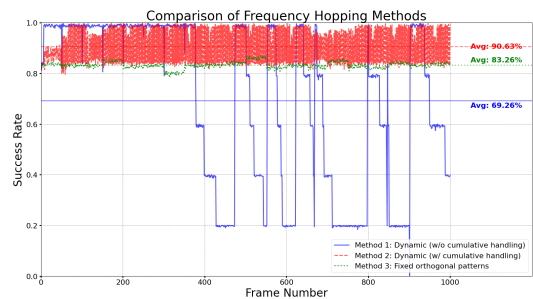


그림 6. 동적 재밍 상황에서 세 가지 주파수 도약 방법의 메시지 수신 성공률 비교($T_j = 50$)
Fig. 6. Comparing message receive success rates of three frequency hopping methods in dynamic jamming situations

도달했음을 시사한다.

방법 2는 세 가지 방법 중 가장 안정적이고 높은 성능을 보여준다. 성공률이 대체로 85-95% 사이를 유지하며, 시간이 지나도 성능 저하가 거의 없다. 이는 누적 처리와 주기적인 채널 상태 리셋 메커니즘이 동적 재밍 환경에서 오탐지의 누적을 효과적으로 방지하고 있음을 보여준다. 특히 방법 1에서 나타난 급격한 성능 저하가 없어, 장기적으로 안정적인 통신을 제공할 수 있음을 시사한다.

방법 3은 동적 재밍 환경에서도 비교적 일정한 성능을 유지한다. 성공률이 대체로 80-85% 사이에서 유지되며, 시간에 따른 변동이 없다. 이는 고정된 패턴을 사용하기 때문에 오탐지에 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 그러나 전반적인 성능은 낮은 편이다.

시간에 따른 성능 변화 분석에서는 초기 적응 단계, 중기 성능, 장기 성능, 주기적 변동의 네 가지 측면을 살펴볼 수 있다. 초기에는 방법 1과 2가 빠르게 높은 성능에 도달하는 반면, 방법 3은 일정한 성능을 유지한다. 중기에는 400 프레임까지 방법 1과 2가 비슷한 수준의 높은 성능을 보이지만, 이후 방법 1의 성능이 급격히 저하된다. 장기적으로는 600 프레임 이후 방법 2가 가장 안정적이고 높은 성능을 유지한다. 주기적 변동은 방법 1과 2에서 관찰되며, 이는 재밍 채널의 변경 주기에 따라 발생한다.

결론적으로, 동적 재밍 환경에서는 누적 처리를 포함한 적응형 주파수 도약 방식(방법 2)이 가장 우수한 성능을 보인다. 이 방법은 채널 상태의 변화를 효과적으로 추적하면서도 오탐지로 인한 성능 저하를 방지할 수 있다. 이러한 결과는 동적 재밍 환경에서 오탐지의 누적을 대비하는 접근이 필요함을 보인다. 오탐지 관리가 시스템의 장기적 안정성과 성능에 크게 기여함을 보여주며, 적응형 주파수 도약 기법에서는 효과적인 오탐지 관리 메커니즘이 필수적임을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 경량화 프로토콜을 사용하는 소형 UAV 시스템의 항재밍 능력 향상을 위한 적응형 주파수 도약 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 채널 상태 모니터링, 채널 상태 정보 통합 및 맵포, 주파수 도약 패턴 조정의 3단계로 구성되며, 동적 재밍 환경에서 효과적으로 작동하도록 설계되었다.

본 연구에서 제안한 적응형 주파수 도약 기법의 주요 파라미터로는 총 채널 수, UAV-GCS 통신 쌍 수, 프레임 수, 타임슬롯 수, 동적 재밍 채널 수, 재밍 채널 변경

주기, 채널 상태 재평가 간격, 전체 채널 재평가 간격, 그리고 SNR, BER, PLR 임계값 등을 제시하였다. 이러한 파라미터들이 제안한 알고리즘의 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

본 논문에서 제안한 적응형 주파수 도약 기법은 경량화된 메시징 프로토콜을 사용하는 소형 UAV 시스템의 항재밍 능력을 향상시키는 데 목적이 있다. 이 기법은 하드웨어 제약을 고려하여 설계되었으며, 기존 하드웨어에 큰 수정 없이 적용 가능하다. 따라서, 현재 운용 중인 MAVLink와 같은 경량화 프로토콜 기반 드론 시스템의 보안성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] A. Koubâa, A. Allouch, M. Alajlan, Y. Javed, A. Belghith, and M. Khalgui, "Micro air vehicle link (MAVlink) in a Nutshell: A survey," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 87658-87680, Jun. 2019. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>)
- [2] 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. (<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2889062>)
- [3] X. Wanget, et al., "Dynamic spectrum anti-jamming communications: Challenges and opportunities," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 2, pp. 79-85, Feb. 2020. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900530>)
- [4] P. Gu, C. Hua, W. Xu, R. Khatoun, Y. Wu, and A. Serhrouchni, "Control channel anti-jamming in vehicular networks via cooperative relay beamforming," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 7, no. 6, pp. 5064-5077, Jun. 2020. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2973753>)
- [5] J. Song, Z. Lu, Z. Xiao, B. Li, and G. Sun, "Optimal order of time-domain adaptive filter for anti-jamming navigation receiver," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 1, p. 48, Jul. 2022. (<https://doi.org/10.3390/rs14010048>)
- [6] H. Jeon and H. Baek, "Military non-terrestrial networks architecture and spectrum sharing

method for mitigating jamming attacks and multiple access interference,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 42, no. 5, pp. 1465-1474, May 2024.

(<https://doi.org/10.1109/JSAC.2024.3365897>)

- [7] X. Liu, Y. Xu, L. Jia, Q. Wu, and A. Anpalagan, “Anti-jamming communications using spectrum waterfall: A deep reinforcement learning approach,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 5, pp. 998-1001, May 2018.
(<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2815018>)
- [8] F. Yao and L. Jia, “A collaborative multi-agent reinforcement learning anti-jamming algorithm in wireless networks,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 8, no. 4, pp. 1024-1027, Aug. 2019.
(<https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2904486>)
- [9] J. Kwon and H. Baek, “Message error probability analysis of pulse transmission methods considering multiple access interference in tactical data link,” in *Proc. KICS Conf.*, pp. 95-96, Jeju Island, Korea, Jun. 2023.
- [10] Northrop Grumman Corporation Information Technology Communication & Information Systems Division, “Understanding link-16: A guidebook for new users,” *NCTSI*, San Diego, CA, pp. 5.47-5.49, Sep. 2001.
- [11] IEEE Standard 802.16 Working Group, “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems,” *IEEE Std. 802.16-2009 (Revision of IEEE Std. 802.16-2004)*, pp. 1-2080, May 2009.
(<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.5062485>)

권진솔 (Jinsol Kwon)



2022년 2월 : 경북대학교 컴퓨터 학부 졸업

2024년 2월 : 경북대학교 컴퓨터 학부 석사

2024년 3월~현재 : 경북대학교 컴퓨터학부 박사과정

<관심분야> 항재밍, 주파수 도약, 무선통신
[ORCID:0009-0003-1408-3679]

서경희 (Kyunghee Seo)



2023년 8월 : 경북대학교 컴퓨터 학부 졸업

2023년 9월~현재 : 경북대학교 컴퓨터학부 석사과정

<관심분야> 5G/6G, Non-terrestrial Networks, Handover, V2X

[ORCID:0009-0005-0487-384X]

백호기 (Hoki Baek)



2006년 2월 : 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학 학사

2008년 2월 : 아주대학교 정보통신공학 석사

2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학 박사

2014년 3월~2015년 2월 : 아주대학교 장위국방연구소 전임연구원

2015년 3월~2021년 2월 : 아주대학교 국방디지털융합학과 강의교수

2021년 3월~현재 : 경북대학교 컴퓨터학부 조교수

<관심분야> 5G/6G, Spectrum sharing, Non-terrestrial networks, UAV networks, Tactical networks, IoT, V2X, Networked PNT (Positioning, navigation and timing), Manned-Unmanned Teaming

[ORCID:0000-0001-9213-7845]