

다중접속 간섭 하에 적응형 고속 주파수 도약 리매핑의 성능 향상을 위한 채널 복구 기법

조은정*, 백호기^o

Channel Restoration Scheme to Improve Performance of Adaptive-Fast Frequency Hopping Remapping under Multiple Access Interference

Eunjeong Jo*, Hoki Baek^o

요약

주파수 도약을 활용하는 비지상 네트워크(NTN)에서 A-FFHR(Adaptive-Fast Frequency Hopping Remapping)은 재밍된 채널 발생시, 이를 제외하고 다른 가용 채널을 통해 제외된 부분에 대한 리매핑을 수행하는 항재밍 기법이다[1]. A-FFHR은 한 채널이 연속으로 충돌한 횟수를 측정하여 재밍 채널을 판단하며, 충돌 횟수가 재밍 임계값 미만인 채널은 무시하여 불필요한 리매핑을 방지한다. 그러나 작전 중 UAV 셀이 중첩되어 다중접속 간섭(MAI)이 빈번하게 발생하는 환경에서 MAI가 발생한 채널의 충돌 횟수가 재밍 임계값 이상일 수 있다. A-FFHR은 이를 재밍 채널로 오인하여 가용 채널을 불필요하게 제외하고, 감소한 가용 채널 수는 MAI를 더욱 증가시켜, 다시 리매핑을 유발하는 연쇄적인 펄스 충돌 확률 증가 문제로 이어진다. 이 문제를 해결하기 위해 가드 타임과 유틸리티를 활용하여 제외한 채널 중 비재밍 채널을 탐지하여 가용 채널로 복구하는 채널 복구 기법을 제안한다. 제안한 기법의 성능은 시뮬레이션을 통해 기존 A-FFHR과 비교하였으며, 제안 기법이 펄스 충돌 확률이 연쇄적으로 증가하는 것 방지 및 감소시킴을 보여준다.

키워드 : 비지상 네트워크, 주파수도약, 다중접속 간섭, 재밍

Key Words : Non-Terrestrial Networks, Frequency Hopping, Multiple Access Interference, Jamming

ABSTRACT

In Non-Terrestrial Networks (NTNs) utilizing frequency hopping, adaptive-fast frequency hopping remapping (A-FFHR) is an anti-jamming technique that performs remapping to other available channels, excluding the jammed channel, when a jammed channel occurs[1]. The A-FFHR determines which channels are jammed by measuring the number of consecutive collisions a channel has, and ignores channels with collision count below the jamming threshold to avoid unnecessary remapping. However, in an environment with multiple access interference (MAI) due to overlapping UAV cells during a military operation, the number of collisions on a

* 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2026-RS-2022-00156389, 50%). 이 논문은 정부(중소벤처기업부)의 재원으로 중소기업기술혁신개발사업(시장대응형)의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-25455183, 50%).

• First Author : Kyungpook National University, School of computer Science and Engineering, cheu03@knu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Kyungpook National University, School of computer Science and Engineering, neloyou@knu.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : 202511-295-0-SE, Received October 31, 2025; Revised December 8, 2025; Accepted December 10, 2025

channel with MAI can also be above the jamming threshold. The A-FFHR mistakes this channel for a jamming channel and unnecessarily excludes available channels, and the reduced number of available channels further increases MAI, causing remapping, leading to the cascading pulse collision probability problem. To solve this problem, we propose a channel restoration scheme that utilizes guard time and idle slots to detect nonjamming channels among excluded channels and recover them to available channels. The performance of the proposed scheme is compared with the existing A-FFHR through simulation, and it is shown that the proposed scheme can effectively solve and reduce the problem of increasing the probability of cascading pulse collisions in A-FFHR.

1. 서 론

비지상 네트워크(NTN, non-terrestrial network)는 저궤도(LEO, low Earth orbit) 위성과 무인 항공기(UAV, unmanned aerial vehicle) 등의 공중 플랫폼을 활용하여 통신 커버리지를 확장할 수 있으며, 통신이 어려운 음영 지역에서도 안정적인 통신을 지원한다^{2,4}.

최근 전장 환경은 NTN으로 확장되고 있으며⁵, 군사 작전을 위한 통신 기술이 중요하게 여겨지고 있다⁶⁻⁸. 더불어 LEO 위성과 전술 데이터 링크 간 주파수 자원을 공유하는 스펙트럼 공유 비지상 네트워크(SS-NTN, spectrum sharing-NTN)로 확장될 가능성도 제시되고 있다⁹.

이러한 흐름 속에서 군사 비지상 네트워크(M-NTN, military-NTN) 아키텍처가 제안되었으며¹¹, M-NTN의 설계 및 운용을 위해 다음과 같은 요구사항이 제시되었다. 첫째, 적의 재밍 공격에 대한 내성을 보장하기 위해 주파수 도약을 활용하여 항재밍 성능을 확보하는 것이 필수적이다. 둘째, 주파수 도약 패턴(FHP, frequency hopping pattern)이 적에게 유출되지 않아야 한다. 셋째, 다양한 플랫폼 간에 주파수 자원을 효율적으로 공유할 수 있는 메커니즘이 필요하다. 넷째, 동시다발적인 군사 작전을 지원하는 멀티넷 구조가 필요하다. 여기서 멀티넷은 복수의 net으로 이루어진 것이고, net은 하나의 FHP를 지칭한다.

첫 번째 요구사항을 만족하는 주파수 도약에 기반한 항재밍 기법은 다양하게 연구 되어왔다¹⁰. 재머의 전략을 알 수 없는 환경에서 강화학습을 활용하여 주파수 도약 시간 간격을 적응적으로 조절하는 기법¹¹은 도약 간격의 상충 관계를 활용한다. 도약 간격이 짧으면 신호 대 잡음비가 감소하여 수신 성능이 저하되고, 도약 간격이 길면 재밍이나 요격을 당할 확률이 증가한다. 이 기법은 강화학습을 통해 이 상충 관계를 고려한 최적의 도약 간격을 도출하며, 재밍을 당하거나 최대한 머물러도 되는 펄스 수에 도달하면 주파수를 도약하여 항재밍

성능을 보장한다. 이와 달리 block-shifted 패턴 기반 주파수 도약 기법¹²은 항재밍 성능과 동기화 오버헤드 사이의 균형을 맞춘다. 기존의 강화학습 기반 주파수 도약 방식은 에이전트가 매번 동적으로 주파수를 선택하여 송수신기 간 동기화에 상당한 오버헤드가 발생하는 문제를 안고 있었다. 이 기법은 FHP를 블록 단위로 생성한 후, 블록 내 패턴을 강화학습 에이전트가 결정한 오프셋만큼 이동시키는 방식으로 작동한다. 이를 통해 기존 방식보다 블록 길이에 반비례 하는 동기화 오버헤드를 달성하면서도 항재밍 성능을 유지한다. 고속 주파수 도약(FFH, fast frequency hopping) 시스템에 딥러닝을 적용한 기법¹³ 또한 제안되었다. FFH는 하나의 데이터 전송 동안 여러 번 주파수 도약을 수행하는 방식이지만, 딥러닝 에이전트의 의사 결정 속도가 FFH의 도약 속도보다 훨씬 느린 한계가 있다. 이에 따라 딥러닝 에이전트는 매 도약마다 개입하지 않고 가용 주파수 집합 결정에만 관여하도록 하였다. 이렇게 결정된 주파수 집합 내에서는 카오스 수열을 이용해 FFH를 수행함으로써 재밍을 효과적으로 대응하였다. 그러나 이 세 기법들은 다양한 플랫폼 간의 주파수 자원 공유 및 멀티넷 구조를 고려하지 않기에 M-NTN에 그대로 적용할 수 없다는 공통적인 한계를 지닌다.

반면, M-NTN¹¹은 상기 요구사항을 모두 충족하는 NTN 구조와 주파수 자원 공유를 위한 기법들을 제시하였다. M-NTN은 PU(Primary User)로 작동하는 LEO 위성과 SU(Secondary User)로 작동하는 UAV 셀들로 구성되어 있으며, 각각 저속 주파수 도약(SFH, slow frequency hopping)과 FFH를 수행한다. 이때 동시다발적으로 군사 작전을 지원할 수 있는 멀티넷 구조가 적용된다. 또한, 다양한 플랫폼 간의 스펙트럼 공유를 위해 FFHR(FFH remapping) 기법과 A-FFHR (Adaptive-FFHR) 기법이 제안되었다. FFHR은 SU가 PU에 간섭을 주는 것을 방지하기 위해 고안된 기법으로, SU의 이동성을 고려하여 SU의 인접한 빔에서 PU가 사용할 주파수를 제외하고, 제외된 부분에 대해 다른 주파수로

리매핑을 수행하는 기법이다. 그리고 A-FFHR 기법은 항재밍 기법으로, SU가 재밍 당한 채널을 감지할지, 그 채널을 net에서 제외하고, 다른 가용 채널을 통해 제외된 부분에 대해 리매핑하는 기법이다. FFHR과 A-FFHR은 FHP에 대한 정보 교환 없이, 사전에 정의된 규칙으로 FHP를 변경하여, 군사 네트워크의 핵심 요구 사항 중 하나인 FHP 유출을 방지한다.

멀티넷 구조와 SU의 이동성으로 인해 다수의 UAV 셀이 중첩되어 각 노드에서 다중접속 간섭(MAI, multiple access interference)이 발생하면 A-FFHR에 치명적인 문제가 발생한다. 구체적으로, MAI는 각 net에서 FHP에 따라 펄스를 전송할 때, 수신 노드에 동일한 주파수가 도달하여 충돌하는 경우 발생한다. 따라서 A-FFHR은 재밍 채널에 대해서만 리매핑을 수행하기 위해, 한 채널이 연속으로 충돌한 횟수를 측정하여 충돌 횟수가 재밍 임계값 이상인 채널만 재밍 채널로 간주한다. 그러나 MAI가 빈번하게 발생하는 상황에서는 한 채널이 연속으로 재밍 임계값 이상 충돌 가능하고, 이로 인해 A-FFHR이 해당 채널을 재밍 채널로 오인하여 리매핑하는 문제가 발생한다. 이는 가용 채널 수를 불필요하게 감소시키고, MAI를 유발하여 연쇄적인 펄스 충돌 확률 증가 문제로 이어진다. 또한, 리매핑으로 인해 펄스 충돌 확률이 일시적으로 감소하다가 다시 증가하는 현상이 관찰되는데, 이는 재밍 채널을 정확히 감지하여 리매핑함으로써 펄스 충돌 확률을 감소시켰으나, 감소한 가용 채널 수가 MAI를 유발하여 추가적인 리매핑을 유도하기 때문이다. 이러한 문제로 인해 재밍 임계값을 설정하는 것이 어려워진다. 따라서 MAI가 존재하는 환경에서 발생하는 A-FFHR의 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 방안이 필수적으로 제시되어야 한다.

본 논문에서는 연쇄적인 펄스 충돌 확률 증가 문제를 해결하기 위해 채널 복구 기법을 제안한다. MAI는 일시적인 현상이며, 연속적인 재밍과 구별되는 특징이 있으므로 가드 타임과 유티 슬롯을 활용하여 리매핑으로 인해 제외된 채널 중 비재밍 채널을 찾아 가용 채널로 복구하는 방법이다. 구체적으로, 채널 복구 방법은 유티 슬롯과 가드 타임 동안 오버헤어링한 채널의 에너지 감지 횟수가 감지 임계값 미만이면 복구할 채널로 간주하는 방법이다. 시뮬레이션 결과, 제안한 기법은 A-FFHR의 가용 채널 수를 확보하여 연쇄적으로 펄스 충돌 확률이 증가하는 현상을 방지하고, 펄스 충돌 확률을 더욱 낮춤으로써 견고한 A-FFHR 구현에 기여함을 확인할 수 있다.

II. 네트워크 및 프레임 구조

본 장에서는 본 논문에서 고려하는 네트워크 및 프레임 구조를 제시한다. 그림 1(a)는 고려하는 네트워크 구조를 나타낸다. PU로 작동하는 LEO 위성과 SU로 작동하는 작전 그룹이 있으며, 재밍 공격이 존재한다. 작전 그룹은 UAV와 지상 노드로 구성되어 있으며, UAV가 지상 노드를 커버하는 UAV cell을 만든다. 작전 그룹은 송신 노드 1개와 수신 노드 $N_{user} - 1$ 개로 총 N_{user} 명으로 이루어져 있고, 하나의 net을 할당 받아 FFH를 수행한다. 이때 사용하는 net 인덱스는 i 로 표기하며, 그림 1(a)에는 이를 α, β, γ 로 표기하였다. FHP는 네트워크 설계 과정에서 미리 생성된다. 이때, PU인 LEO 위성은 전체 대역 중 일부를 사용하여 도약하며, SU인 작전 그룹은 인접한 빔에서 사용되는 PU의 대역을 피해서 도약한다. 이에 따라 SU의 총 가용 채널 수는 N_{ch} , 가용 채널 집합은 C_{total} 로 표기한다. 그림 1(a)는 작전 중 작전 그룹들이 중첩된 모습을 나타내며, 중첩된 셀의 개수는 N_{net} 으로 표기한다.

중첩된 셀 내에서 MAI 발생 확률은 N_{ch} 에 반비례하며, N_{net}, N_{user} 에 비례하여 증가한다^[14]. 먼저, 다수의 셀이 중첩되었을 때 다른 net의 펄스 타이밍과 겹치면 MAI가 발생할 수 있다. 예를 들어, net 1과 net 2가 중첩되어있다고 가정하자. 이때 net 1의 송신 노드가 net 1의 노드들에게 채널 5를 사용하여 전송을 시도했

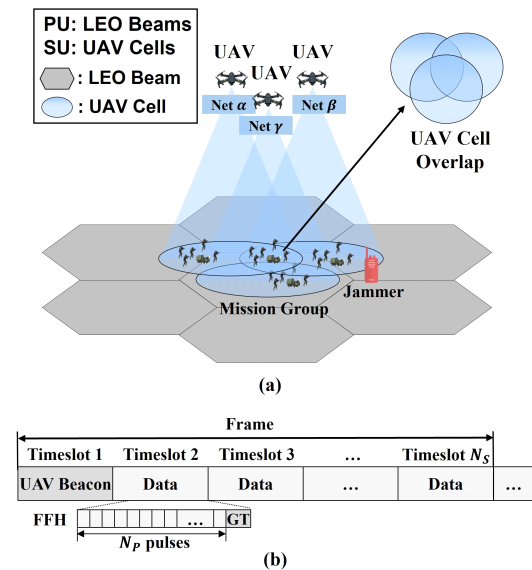


그림 1. 고려하는 네트워크 및 프레임 구조
Fig. 1. The considered network and frame structure

다. 하지만 이 신호가 net 2의 어떤 노드들에 도달할 수 있다. 그 순간 net 2의 송신 노드가 net 2의 노드들에게 채널 5를 사용하여 보내고 있었다면, net 2의 수신 노드들은 채널 5에 대한 간섭을 겪게 된다. 이러한 충돌은 각 net의 송신 노드가 동시에 같은 채널을 사용하여 송신하고, 그 펄스가 수신 노드에 동일한 시간에 도달할 때 발생한다. 또한, 동시에 같은 채널로 송신하지 않았더라도, 지연 범위에 따라, 한 채널이 수신 노드에 도달하는 시간이 같으면 MAI가 발생한다. 예를 들어, net 1의 FFH 패턴 중 일부가 1, 2, 3이고, net 2의 패턴 중 일부는 4, 5, 1인 경우에, net 1의 송신 노드가 채널 1로 송신한 후, net 2의 수신 노드에 도달하기까지 지연이 발생하여 net 2가 채널 1로 전환되었을 때 net 1의 신호가 도달하여 펄스가 충돌할 수 있다.

그림 1(b)는 SU의 프레임 구조를 나타낸다. 이때 N_s 는 프레임당 타임 슬롯 수, N_p 는 한 슬롯 당 도약하는 펄스 수를 의미한다. 프레임 구조는 UAV 비콘 메시지와 N_s 개의 타임 슬롯으로 구성되어 있으며, 작전 그룹은 한 타임 슬롯 내에서 N_p 번 도약하는 FFH를 수행한다. 매 슬롯마다 채널 전환의 성공 및 동기화 보장을 위해 N_p 펄스 이후에 가드 타임이 존재한다.

III. 기존 Adaptive Fast Frequency Hopping Remapping 기법

본 장에서는 기존에 제시된 A-FFHR 메커니즘을 고려하는 네트워크를 반영하여 설명하고 한계점을 제시한다. A-FFHR은 이전 프레임에서 감지한 재밍 채널을 제외하고, 남은 가용 채널을 통해 제외된 부분에 대해 리매핑을 수행하는 항재밍 기법이다. 지상 노드는 재밍 채널을 식별하기 위해서 재밍 판단 방법을 적용한다. 이 방법은 데이터 전송 슬롯에서 FFH가 수행되는 동안, 동일 채널의 연속 충돌 횟수가 재밍 임계값 β_j 번 이상 충돌이 발생하면 해당 채널을 재밍 채널로 간주하는 방법이다. 본 논문에서 A-FFHR의 재밍 판단 방법을 그림 2와 같이 jamming counter 알고리즘으로 구체화하였다. 이 알고리즘은 현 슬롯에서 사용되는 FHP에서 재밍 채널을 찾아 C_j 에 할당하고 반환한다. 이때 C_j 는 한 노드에서 재밍으로 간주한 채널들의 집합이며, 재밍 채널을 판단하는 방법은 도약했던 채널의 충돌이 다음에도 β_j 번 이상 충돌이 발생하는 것으로 식별한다. 알고리즘이 끝난 직후, 모든 노드에서 재밍으로 간주한 채널들의 집합인 $C_{J,total}$ 에 C_j 를 추가해 UAV에게 갱신된

```

Algorithm 1 Jamming Counter Algorithm
1: Input: Current FHP
2: Output:  $C_j$ 
3: procedure JAMMING_COUNTER(Current FHP)
4:   Initialize  $C_j$ , previous channel, count
5:   while current slot do
6:     if a channel is collided then
7:       if the channel is the previous channel then
8:         count += 1
9:       else
10:        count = 1
11:      end if
12:      if count is above  $\beta_j$  then
13:        add the channel in  $C_j$ 
14:      end if
15:      previous channel is assigned the collided channel
16:    else
17:      count = 0
18:      previous channel is initialized as none
19:    end if
20:  end while
21:  Return  $C_j$ 
22: end procedure
    
```

그림 2. Jamming counter 알고리즘의 의사코드
Fig. 2. Pseudo code of the jamming counter algorithm

$C_{J,total}$ 를 보고한다. UAV는 각 노드로부터 보고받은 $C_{J,total}$ 을 집계한 후, 비콘을 통해 해당 UAV 그룹의 모든 노드들에게 전파한다. 비콘을 받은 직후, 각 노드는 전체 채널 집합에서 갱신된 $C_{J,total}$ 을 배제하고 가용 채널 집합인 C_A 를 결정하게 된다. 이후 각 노드는 제외된 부분에 수식 (1)에서 계산된 값에 해당하는 인덱스를 가용 채널 집합인 C_A 의 주파수로 리매핑한다. C_A 의 주파수 개수는 N_A 로, 현재 제외된 부분의 위치는 $C_{pre,i,j}$ 으로 표기하며 i 와 j 는 net i 의 j 번째 채널을 의미한다.

$$\hat{I} = (i + C_{pre,i,j}) \% N_A \quad (1)$$

그림 3은 A-FFHR이 감지한 재밍 채널을 리매핑하는 과정을 보여준다. 재밍된 채널이 5, 6, 7, 8임을 감지하면, C_A 를 업데이트하고, 곧 사용될 FHP에서 재밍 채널의 위치를 찾아 제외한다. 제외된 채널 위치를 수식 (1)로 계산하면 각각 4, 6, 3, 5이고, 이를 C_A 에 대응시키면 20, 43, 1, 21로 리매핑할 수 있다.

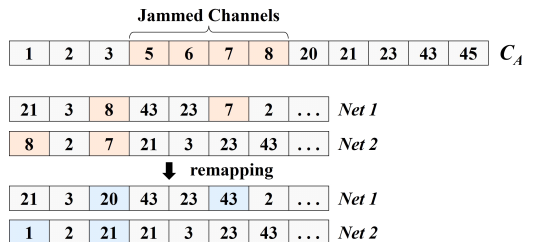


그림 3. A-FFHR 작동 예시
Fig. 3. An example of the A-FFHR

A-FFHR은 MAI가 존재하는 상황에서 치명적인 문제가 세 가지 있다. 첫째, 펄스 충돌 확률인 P_c 를 연쇄적으로 증가시키는 문제가 있다. 구체적으로, jamming counter 알고리즘에 의하면 MAI 발생시 펄스 충돌이 발생하여 충돌 횟수가 카운트된다. 만약 MAI가 빈번하게 발생하여 충돌 횟수가 β_j 이상이 되면, 이를 재밍으로 오인하여 리매핑을 수행하고 N_{ch} 를 불필요하게 감소시킨다. 감소한 N_{ch} 는 MAI를 더욱 심화시키는 결과를 초래한다. 이는 다시 더 많은 펄스 충돌을 유발하고, 추가적인 오인으로 이어지며, 결국 연쇄적인 P_c 증가로 이어지게 된다. 둘째, A-FFHR은 재밍 채널을 정확히 감지하여 리매핑하는 경우 P_c 를 일시적으로 감소시킬 수 있으나, 그 직후 감소한 N_{ch} 가 오히려 MAI 발생 확률을 증가시켜 추가적인 리매핑을 유도한다. 이는 다시 첫 번째 문제인 연쇄적으로 P_c 가 증가하는 성능 저하 현상이 관찰된다. 셋째, A-FFHR의 성능은 N_{ch} 가 고정인 상황에서 재밍 임계값 β_j 의 설정에 민감하다. β_j 가 크면 MAI와 재밍을 더 정확히 구별할 수 있으나, 재밍 채널을 식별하기까지 시간이 오래 걸려 재밍 채널이 다수 존재할 경우 A-FFHR의 효율이 감소한다. 반면, β_j 가 작으면 재밍을 빠르게 감지할 수 있지만, MAI가 존재하는 환경에서는 비재밍 채널까지 재밍으로 오인하는 연쇄적인 P_c 증가 문제를 유발한다.

IV. 제안하는 채널 복구 기법

본 장에서는 가용 채널을 확보하는 채널 복구 기법을 제시한다. 이 기법은 기존 A-FFHR 기법에서 제시되지 않았던 재밍 채널 복구 메커니즘을 구체화하여 연쇄적인 P_c 증가 문제를 해결하는 것을 목표로 한다.

제안하는 채널 복구 기법은 MAI의 산발적 특성과 재밍의 지속적 특성을 구별하는 것에 기반한다. MAI는 펄스 간의 일시적인 타이밍 겹침에서 발생하므로 가드 타임이나 유휴 슬롯 동안 신호가 사라지지만, 재밍 신호는 의도적으로 지속되므로 짧은 탐색 시간 동안에도 에너지가 감지된다. 이러한 점을 통해 가드 타임과 유휴 슬롯 동안 채널을 오버헤어링한 후, 에너지가 감지되지 않은 채널은 재밍 채널 집합에서 제외하는 방식이다.

그림 4의 jamming detector 알고리즘은 MAI와 재밍 채널에 대하여 에너지를 감지하는 방식을 모사한 것이다. $C_{J,total}$ 에 포함된 채널들을 복사하여 $C_{candidate}$ 에 할당한다. 유휴 슬롯 및 가드 타임 동안 $C_{candidate}$ 에 포함

```

Algorithm 2 Jamming Detector Algorithm
1: Input:  $C_{J,total}$ , Delay range, Detectable quantity
2: Output: Set of channels to restore
3: procedure JAMMING DETECTOR( $C_{J,total}$ , delay range, detectable quantity)
4:   Initialize  $C_J$ ,  $C_{candidate}$ , count, detector
5:   Assign a channel randomly selected from  $C_{candidate}$  to  $C_{check}$  for the Detectable quantity
6:   while current slot do
7:     for channel  $c$  in  $C_{check}$  do
8:       Select another channel from the overlapping net within the delay range for comparison
9:       if  $c$  is the selected channel or a jamming channel then
10:        detector[c] += 1
11:       end if
12:     end for
13:     for channel  $c$ , count in detector do
14:       if count is greater than  $\beta_d$  then
15:         add  $c$  to set of channels to restore
16:       end if
17:     end for
18:   end while
19:   Return Set of channels to restore
20: end procedure
    
```

그림 4. Jamming detector 알고리즘의 의사코드
Fig. 4. Pseudo-code of the jamming detector algorithm

된 채널들 중에서 무작위로 탐지 가능 개수만큼 선택하고 이를 C_{check} 에 할당한다. detector는 모든 채널의 충돌 횟수 β 를 저장하는 역할을 하며, C_{check} 에 할당된 채널 중, 중첩된 넷에서 지연 범위 내에 있는 채널과 충돌하거나 재밍 채널이 있다면, 그 채널의 β 를 1씩 카운트한다. 재밍 신호는 적어도 β_d 개 펄스 지속 시간 이상 지속되므로, 감지 임계값 β_d 미만으로 감지된 채널은 MAI와 같은 일시적 신호로 판단하여 복구할 채널 집합에 할당하고 반환한다.

채널 복구 절차는 그림 5의 순서도와 같다. 각 지상 노드에서 유휴 슬롯이라면, $C_{J,total}$ 에 포함된 채널 중 일부를 오버헤어링하여 에너지를 감지한다. 이때 jamming detector 알고리즘이 적용되어 C_{idle} 이 반환된다. 유휴 슬롯이 아닌 데이터 전송 슬롯에서는 jamming counter 알고리즘이 적용되어 C_J 를 얻은 후 $C_{J,total}$ 을 갱신한다. 한 슬롯 이후마다 존재하는 가드 타임에는 jamming detector 알고리즘이 적용되고 C_{GT} 를 얻는다. 최종적으로 $C_{J,total}$ 은 데이터 전송 슬롯에서 새로 감지된 $C_{J,total}$ 과 합쳐진 후, 유휴 슬롯과 가드 타임에서 얻은 비재밍 채널 C_{idle} 및 C_{GT} 이 제외되어 갱신된다. 각 노드는 $C_{J,total}$ 을 UAV에 보고하고, 본 과정은 stop condition이 만족될 때까지, 즉 네트워크의 종료 시점까지 반복 수행된다. UAV는 $C_{J,total}$ 을 집계한 후, 비콘을 통해 모든 그룹에 갱신된 $C_{J,total}$ 을 전파한다.

기존 A-FFHR과 제안하는 채널 복구 기법의 한 net 관점에서 펄스 충돌 확률 P_c 는 수식 2와 같이 나타낼 수 있다.

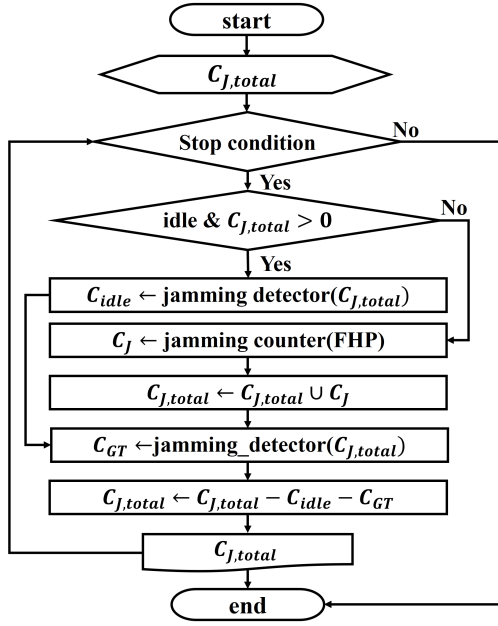


그림 5. 제안 기법의 채널 복구 절차 순서도
 Fig. 5. Flowchart of the channel restore procedure for the proposed scheme

$$P_c = \frac{\sum_{n=1}^{N_{user}} N_{col,n}}{N_s \times N_p \times N_{user}} \quad (2)$$

수식 2에서 $N_{col,n}$ 은 각 노드의 충돌 펄스 개수를 나타내며, 나머지 파라미터는 II장에서 소개한 바와 같다. 제안하는 채널 복구 기법은 MAI가 존재하는 상황에서 A-FFHR의 문제를 모두 해결한다. 먼저 제안 기법은 가용 채널을 지속적으로 확보하는 메커니즘을 통해 연쇄적인 P_c 증가 문제를 원천적으로 방지한다. 따라서 재밍 채널을 정확히 리매핑하여 감소한 N_{ch} 로 인해 MAI가 발생한 채널을 리매핑하더라도, 이를 복원하여 MAI가 심화 및 P_c 증가 문제를 방지한다. 또한, β_j 에 크게 영향 받지 않는다. 재밍 채널을 식별 가능한 β_j 를 설정하기만 하면, 채널 복구 메커니즘을 통해 A-FFHR의 문제를 해결할 수 있다.

V. 시뮬레이션 환경 및 결과

본 장에서는 제안하는 채널 복구 기법의 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션 환경을 소개하고, β_j 에 따른 기존 A-FFHR의 성능인 P_c 를 보여준다. 더불어, A-FFHR

표 1. 시뮬레이션 파라미터
 Table 1. The parameters and values of simulation

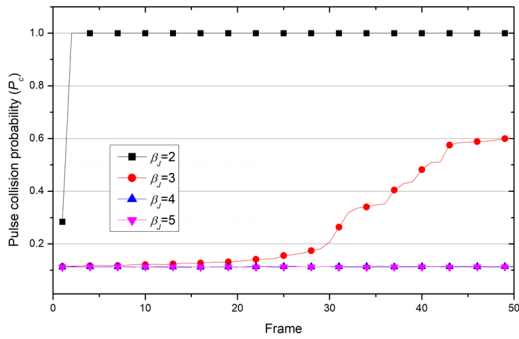
Parameters	Values
Jamming tone	30%
The number of time slot in a frame (N_s)	30
The number of pulse in a slot (N_p)	400
Delay range	(-3, 3)
Threshold of detection (β_d)	3
The number of overlapped nets (N_{net})	2
The number of users in a mission group (N_{user})	5

의 재밍이나 MAI가 존재하는 상황에서 아무 조치도 취하지 않은 경우, 기존 A-FFHR 기법을 적용한 경우, 그리고 제안한 기법을 적용한 경우의 P_c 를 비교한다.

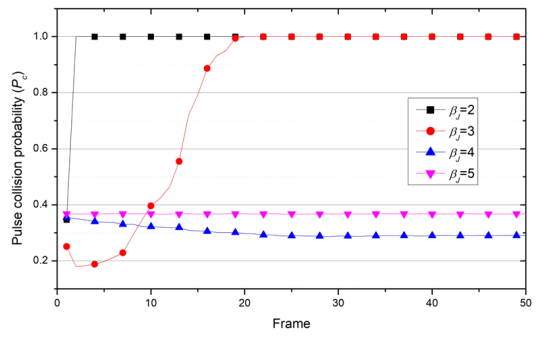
시뮬레이션 환경은 표 1에 기반하여 다음과 같이 설정하였다. FHP는 매 슬롯마다 무작위로 생성된다. 재밍 모델은 랜덤 톤 재밍이며, N_{ch} 중 30%에 해당하는 채널들을 무작위로 선택하여 시뮬레이션 동안 고정된다. N_s 와 N_p 값은 각각 30과 400으로 설정하였다. MAI를 모사하기 위해, 다른 net의 송신 노드가 전송한 채널이 수신 노드의 펄스 타이밍에 대해 -3에서 3까지의 지연 범위 내에서 랜덤하게 도달하도록 하였다. 한 프레임에서 유휴 슬롯일 확률은 30%로 설정하였고 각 라디오미터가 하나의 채널을 감지하기 위해서는 4개의 펄스가 지속되는 시간을 수신해야 한다고 가정하였다. β_d 는 4로 설정하여 가드 타임 동안에는 3개 채널, 유휴 슬롯에서는 100개 채널을 감지할 수 있도록 구성하였다. 시뮬레이션 결과는 프레임이 50회 진행되는 동안의 P_c 를 나타내며, 각 시뮬레이션을 10번 반복 수행한 후 평균값을 산출하였다.

5.1 β_j 에 따른 A-FFHR의 펄스 충돌 확률 분석

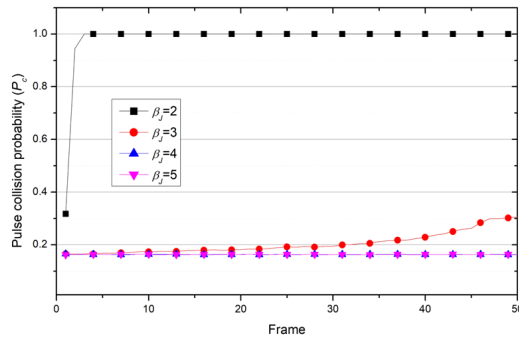
그림 6은 MAI만 존재하는 상황에서 프레임 진행에 따른 A-FFHR의 P_c 를 보여준다. 그림 4(a)는 총 가용 채널 수 N_{ch} 값 20에 대해서, 그림 4(b)는 N_{ch} 값 40에 대해서 시뮬레이션한 결과이고, N_{net} 과 N_{user} 는 각각 2와 5로 고정하였다. 그림 4(a)와 4(b)에서는 β_j 가 2일 때에는 P_c 가 매우 급격하게 증가하는 모습을 보여준다. 이는 리매핑한 채널이 너무 많고 가용 채널을 복구하지 못하므로 P_c 가 증가하는 것이다. $\beta_j=3$ 의 경우도 마찬가지로, 가용 채널을 복구하지 못하여 P_c 가 연쇄적으로 증가하는 현상이 나타난다. 특히, 그림 4(a)는 더욱 급



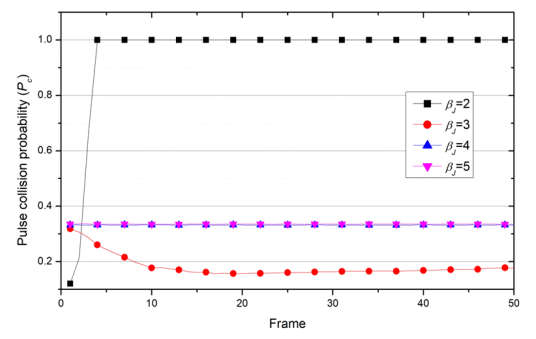
(a) $N_{ch} = 20$



(a) $N_{ch} = 20$



(b) $N_{ch} = 40$



(b) $N_{ch} = 40$

그림 6. MAI만 존재할 때 여러 β_J 의 프레임 진행에 따른 A-FFHR의 펄스 충돌 확률
Fig. 6. Pulse collision probability of A-FFHR versus frame progress under MAI for various β_J values

격하게 증가하는 양상을 띠는데 이는 더 적은 N_{ch} 를 보유하고 있기 때문이다. $\beta_J \geq 4$ 인 경우에는 MAI를 재밍으로 간주하지 않아 리매핑하지 않기 때문에 P_c 연쇄 증가 문제가 나타나지 않는다. 그러나 재밍 채널도 인지하지 못하여 리매핑이 이루어지지 않고, P_c 가 유지되는 모습을 확인할 수 있다.

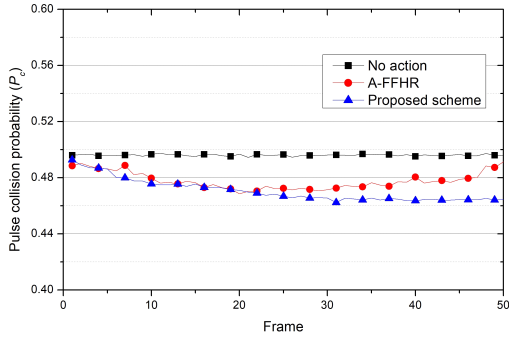
그림 7은 재밍과 MAI가 존재할 때, 프레임이 진행됨에 따른 A-FFHR의 P_c 를 나타낸다. 그림 5(a)는 $N_{ch} = 20$ 인 경우로, β_J 가 2와 3일 때 P_c 가 연쇄적으로 증가하는 모습을 보인다. 특히 $\beta_J = 3$ 인 경우에는 P_c 가 감소하다가 증가하는데, 이는 재밍 채널을 정확히 감지 후 리매핑하여 P_c 가 감소하였고, 감소한 가용 채널 수가 다시 리매핑을 유발하여 P_c 가 다시 증가한 것이다. $\beta_J = 4$ 인 경우는 강력하게 재밍 채널만 감지하여 A-FFHR의 효과를 나타내는 모습을 보인다. $\beta_J = 5$ 인 경우에는 재밍 채널을 감지하지 못하여 P_c 가 약 0.36으로 유지된다. 그림 7(b)는 $N_{ch} = 40$ 인 경우로, $\beta_J = 3$

그림 7. 재밍과 MAI가 존재할 때 여러 β_J 의 프레임 진행에 따른 A-FFHR의 펄스 충돌 확률
Fig. 7. Pulse collision probability of A-FFHR versus frame progress under jamming and MAI for various β_J values

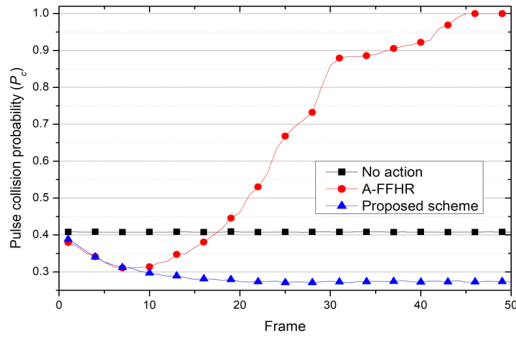
일 때 재밍을 정확히 감지하여 P_c 를 감소시키는 모습을 확인할 수 있다. $\beta_J \geq 4$ 인 경우에는 재밍을 거의 감지하지 못하여 P_c 가 약 0.33 수준에 머문다.

5.2 제한한 채널 복구 기법의 펄스 충돌 확률 분석

그림 8은 재밍과 MAI가 존재할 때 프레임이 진행됨에 따른 P_c 를 나타내며, 아무 조치도 취하지 않은 경우, A-FFHR의 경우, 제한한 기법의 경우와 비교한다. 제한한 기법의 성능을 더 잘 보여주기 위해서 MAI가 더 많이 존재하는 상황에서 시뮬레이션하였다. N_{net} 과 N_{user} 의 값을 (N_{net} , N_{user})로 표기한다고 하자. 그림 8(a)는 $N_{ch} = 20$, (N_{net} , N_{user}) = (3, 10), $\beta_J = 4$ 인 경우의 P_c 를 보여준다. 아무 조치도 취하지 않은 경우, 재밍과 MAI를 무방비하게 겪어 P_c 가 약 0.5인 높은 수준으로 머무는 것을 확인할 수 있다. 그러나 기존 A-FFHR은 연쇄적인 P_c 증가 현상이 나타난다. 반면, 제한한 기법은 리매핑 후에 가용 채널을 다시 확보하여



(a) $N_{ch} = 20, (N_{net}, N_{user}) = (3, 10), \beta_J = 4$



(b) $N_{ch} = 40, (N_{net}, N_{user}) = (3, 10), \beta_J = 3$

그림 8. 제밍과 MAI가 존재할 때 여러 β_J 의 프레임 진행에 따른 제안 기법의 펄스 충돌 확률
Fig. 8. Pulse collision probability of the proposed scheme versus frame progress under jamming and MAI for various β_J values

P_c 가 증가하는 현상을 억제할 뿐 아니라 더 낮추는 것을 보여준다. 그림 8(b)는 $N_{ch} = 40, (N_{net}, N_{user}) = (3, 10), \beta_J = 3$ 인 경우로, 아무 조치도 취하지 않은 경우에는 제밍과 MAI를 무방비 상태로 겪어 약 0.4에서 머문다. 기존 A-FFHR은 P_c 가 연쇄적으로 증가하여 아무 조치도 취하지 않은 경우보다 낮은 성능을 보여준다. 그러나 제안한 기법은 P_c 연쇄 증가를 막고, 오히려 약 0.39에서 0.27로 감소하도록 돕는다.

VI. 결론

본 논문에서는 MAI가 존재하는 상황에서 A-FFHR 기법의 한계를 제시하고, 이를 해결할 수 있는 채널 복구 기법을 제안한다. 기존 A-FFHR에는 제밍 채널을 복구하는 메커니즘이 부재해 비제밍 채널까지 리매핑함으로써 불필요하게 가용 채널 수가 감소하고, 이로 인해 연쇄적인 펄스 충돌 확률 증가 문제가 발생한다. 제안한 채널 복구 기법은 유휴 슬롯이나 가드 타임을

활용하여 비제밍 채널을 찾아 복구하는 방식이다. 시뮬레이션 결과, 기존 A-FFHR은 펄스 충돌 확률이 일시적으로 감소하다가 증가하거나 연쇄적으로 증가하는 반면, 제안한 채널 복구 기법은 이러한 연쇄 증가를 억제하며 펄스 충돌 확률을 더욱 낮게 유지하는 것으로 나타났다. 이는 제안한 기법이 A-FFHR의 성능 개선에 효과적임을 입증한다.

References

- [1] 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>)
- [2] S. Mahboob and L. Liu, "Revolutionizing future connectivity: A contemporary survey on AI-empowered satellite-based non-terrestrial networks in 6G," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 26, no. 2, pp. 1279-1321, Jan. 2024. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3347145>)
- [3] Y. Kang, "The role and development direction of non-terrestrial networks in 6G communication networks," *J. KIICE*, vol. 29, no. 5, pp. 740-743, May 2025. (<https://doi.org/10.6109/jkiice.2024.29.5.740>)
- [4] T. Kim, W. Lee, and J. Kim, "Enhanced RACH-less conditional handover for LEO intra-satellite system," *ICT Express*, Sep. 2025. (<https://doi.org/10.1016/j.icte.2025.08.004>)
- [5] H. Baek and J. Lim, "Design of future UAV-relay tactical data link for reliable UAV control and situational awareness," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 10, pp. 144-150, Oct. 2018. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700259>)
- [6] R. Bajracharya, R. Shrestha, S. A. Hassan, H. Jung, and H. Shin, "5G and beyond private military communication: Trend, requirements, challenges and enablers," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 83996-84012, Aug. 2023. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3303211>)

[7] Q. Zhang, M. Bakshi and S. Jaggi, "Covert communication over adversarially jammed channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 67, no. 9, pp. 6096-6121, Sep. 2021. (<https://doi.org/10.1109/TIT.2021.3096176>)

[8] V. R. Anitha, S. Palanisamy, O. I. Khalaf, S. Algburi, and H. Hamam, "Design and analysis of SRR based metamaterial loaded circular patch multiband antenna for satellite applications," *ICT Express*, vol. 10, pp. 836-844, May 2024. (<https://doi.org/10.1016/j.icte.2024.05.002>)

[9] H. Baek and J. Lim, "Spectrum sharing for coexistence of fixed satellite services and frequency hopping tactical data link," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 34, no. 10, pp. 2642-2649, Oct. 2016. (<https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2605979>)

[10] H. Pirayesh and H. Zeng, "Jamming attacks and anti-jamming strategies in wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 24, no. 2, pp. 767-809, Mar. 2022. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3159185>)

[11] Ailiya, W. Yi, and P. K. Varshney, "Adaptation of frequency hopping interval for radar anti-jamming based on reinforcement learning," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 12, pp. 12434-12449, Dec. 2022. (<https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3197425>)

[12] J. Zhang and X. Wu, "RL-based frequency hopping with block-shifted patterns: Balancing between anti-jamming performance and synchronization overhead," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 1, pp. 909-922, Jan. 2024. (<https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3307341>)

[13] S. Cheng, X. Ling, and L. Zhu, "Deep reinforcement learning-based anti-jamming approach for fast frequency hopping systems," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 6, pp. 961-971, Jan. 2025. (<https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2025.3529982>)

[14] H. Jeon and H. Baek, "Performance analysis of multinet for anti-jamming, multiple access interference mitigation, and efficient image transmission in spectrum shared non-terrestrial networks," *J. KICS*, vol. 50, no. 8, pp. 1217-1227, Aug. 2025. (<https://doi.org/10.7840/kics.2025.50.8.1217>)

조 은 정 (Eunjeong Jo)



2022년 3월~현재 : 경북대학교
컴퓨터학부 학사과정
<관심분야> 5G/6G, Non-terrestrial networks, Semantic communication, Secure communication, WiFi, Spectrum sharing, UAV networks, Tactical networks

[ORCID:0009-0002-6587-8220]

백 호 기 (Hoki Baek)



2006년 2월 : 아주대학교 정보
및 컴퓨터공학 학사
2008년 2월 : 아주대학교 정보
통신공학 석사
2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨
터공학 박사
2014년 3월~2015년 2월 : 아주

대학교 장위국방연구소 전임연구원
2015년 3월~2021년 2월 : 아주대학교 국방디지털융
합학과 강의교수
2021년 3월~현재 : 경북대학교 컴퓨터학부 부교수
<관심분야> 5G/6G, Non-terrestrial networks, ISAC, Semantic communication, Secure communication, WiFi, Spectrum sharing, UAV networks, Tactical networks

[ORCID:0000-0001-9213-7845]