

# 스펙트럼 공유 환경의 비지상파 네트워크에서 항재밍, 다중 접속 간섭 경감 및 이미지 전송의 효율을 위한 멀티넷 성능 분석

전혜림\*, 백호기<sup>o</sup>

## Performance Analysis of Multinet for Anti-Jamming, Multiple Access Interference Mitigation, and Efficient Image Transmission in Spectrum Shared Non-Terrestrial Networks

Hyerim Jeon\*, Hoki Baek<sup>o</sup>

요약

군사 비지상 네트워크(M-NTN)에서는 모든 노드가 주파수 도약을 활용하여 항재밍 성능을 확보해야 하며, 동시 다발적인 작전을 지원하기 위해 주파수 도약 패턴 기반의 멀티넷 구조가 필수적이다. 또한, 제한된 대역폭을 효율적으로 활용하기 위한 스펙트럼 공유 기술이 요구된다. 이를 위해 M-NTN 설계 과정에서는 메시지 오류 확률(MEP), 동시 운용 가능한 net 개수 등의 주요 파라미터를 결정하고, 멀티넷 성능을 분석해야 한다. 한편, 기존 전술 네트워크의 낮은 전송 속도는 이미지로 전송되는 상황 인식 정보 교환을 크게 제한하기 때문에, 효율적인 이미지 전송을 위한 타임슬롯 할당, 메시지 패킹 기법, 그리고 안정적인 이미지 재전송 기법이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 스펙트럼 공유 기반 M-NTN 환경에서 다중 접속 간섭을 줄이면서 항재밍 성능을 유지하고, 동시에 이미지 전송 효율을 높일 수 있는 기법을 제시한다. 아울러, 네트워크 설계를 위한 핵심 파라미터를 도출하고, 재밍 공격이 있는 환경에서 이에 따른 멀티넷 성능 분석 모델을 제시한다.

**키워드** : 비지상 네트워크, 스펙트럼 공유, 전술데이터링크, 이미지 전송

**Key Words** : Non-terrestrial networks, Spectrum sharing, Tactical data link, Image transmission

### ABSTRACT

In Military Non-Terrestrial Networks (M-NTN), every node must utilize frequency hopping to ensure anti-jamming performance, and a multinet structure based on frequency hopping patterns is essential to support simultaneous operations. Additionally, spectrum-sharing technology is required to efficiently utilize the limited bandwidth. To achieve this, the M-NTN design process must determine key parameters such as the message error probability (MEP) and the number of simultaneously operable nets, followed by a performance analysis of the multinet structure. Meanwhile, the low transmission rate of conventional tactical networks significantly limits the exchange of situational awareness information transmitted as images. Therefore, efficient image

※ 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2022-00156389).

• First Author : Kyungpook National University, School of computer Science and Engineering, jhr020528@knu.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Kyungpook National University, School of computer Science and Engineering, neloyou@knu.ac.kr, 종신회원  
논문번호 : 202501-011-B-RU, Received January 6, 2025; Revised January 16, 2025; Accepted February 20, 2025

transmission requires effective time slot allocation, message packing techniques, and reliable image retransmission methods. Accordingly, this paper proposes a technique to reduce multiple access interference while maintaining anti-jamming performance and improving image transmission efficiency in a spectrum-sharing-based M-NTN environment. Furthermore, key network design parameters are derived, and a multinet performance analysis is presented for environments subject to jamming attacks.

## I. 서 론

비지상 네트워크(NTN)는 지상 네트워크로 서비스가 어려운 통신 음영 지역에서 안정적인 통신 서비스를 제공할 수 있는 대안으로 주목받고 있다<sup>1)</sup>. 최근 군사 환경에서도 이를 활용하려는 연구와 기술 개발이 활발히 진행되고 있으며<sup>2,4)</sup>, 군사적 용도로 활용되는 NTN을 military NTN (M-NTN)이라고 한다<sup>4)</sup>. M-NTN은 산악 지형과 같은 통신이 불안정한 지역에서도 저궤도(LEO, low earth orbit) 위성, 고고도 플랫폼(HAP, high altitude platform), 무인기(UAV, unmanned aerial vehicle) 등과 같은 항공우주 플랫폼을 활용하여 확장된 통신 커버리지를 확보할 수 있다<sup>1,3,4,5)</sup>. LEO 위성은 멀티 빔 구조를 사용하여 글로벌 통신 커버리지를 제공한다. HAP은 성층권에 위치하여 위성보다 더 낮은 고도에서 서비스 셀을 제공하며, 백본 네트워크 역할을 수행할 수 있다. UAV는 높은 기동성을 바탕으로 작전 지역에 신속히 배치되며, 낮은 고도에서 지상 노드(GNs, ground nodes)에게 서비스 셀을 제공하거나 relay node로서의 역할을 수행할 수 있다. 이러한 M-NTN 플랫폼들의 특징은 미래의 네트워크 중심 작전 환경에서 동시다발적으로 일어나는 작전의 효율성을 향상하는 데 핵심적인 역할을 할 수 있다<sup>3,4)</sup>.

M-NTN을 활용하기 위한 요구조건은 다음과 같다<sup>3,4)</sup>. 첫째, 항재밍과 도청 방지를 위해 전술 플랫폼 네트워크는 주파수 도약 기술을 통해 통신해야 한다. 특히, 고속 주파수 도약(FFH, fast frequency hopping) 기술은 메시지를 여러 개의 블록으로 나누어 1초에 수만 회씩 도약하며 메시지를 전송함으로써 높은 항재밍 성능을 갖는다. 둘째, 모든 전술 플랫폼이 주파수 도약할 수 있도록 하는 스펙트럼 공유 기술이 필요하다. 각 플랫폼에 주파수 도약 패턴(FHP, frequency hopping patterns)을 할당할 때, FHP는 충분히 넓은 대역폭에서 다양한 채널 조합을 기반으로, 무작위로 생성된다. 그러나 모든 플랫폼에 넓은 대역폭을 독립적으로 할당하는 것은 비현실적이기 때문에, 하나의 넓은 대역폭을 공유하여 각 플랫폼의 FHP를 효율적으로 생성하고 사용할 수 있어야 한다. 셋째, FHP가 적에게 유출되면 이를

기반으로 재밍 공격이나 도청이 이루어질 수 있으므로, FHP가 할당되고 변경되는 과정에서는 절대로 유출되지 않아야 한다. 넷째, 동시다발적으로 발생하는 군사 작전을 효과적으로 지원하기 위한 멀티넷 구조가 필요하다. 멀티넷은 여러 개의 net으로 이루어져 있으며 하나의 net은 하나의 FHP로 이루어져 있다. 여러 전술 플랫폼이 각각의 네트워크에 할당됨으로써, 각기 다른 FHP를 사용해 동시에 작전을 수행할 수 있다.

FHP 할당은 작전 이전에 network design(ND) 과정에서 이루어진다. 이는 작전에 관련된 전문가들이 작전의 형태를 사전에 판단하여 정보 교환 요구 사항에 따라 네트워크를 설계하는 과정이다. 이때, FHP가 생성되고 각각 한 개의 net이 운용되는 플랫폼에 할당된다. 이때 프레임 구조, 메시지 패킹 구조, 멀티넷의 net의 수와 같은 파라미터들이 정해지게 된다.

서로 간섭 가능 지역에 있는 플랫폼들이 동일한 FHP의 채널을 통해 동시에 도약하면 다중 접속 간섭(MAI, multiple access interference)가 발생하게 된다. 일정 수준의 MAI는 Reed-Solomon(RS) 코딩 방식으로 완화할 수 있으나, 심각한 수준의 MAI는 통신 신뢰성을 크게 저하한다. 또한 전술네트워크 설계에서 최대 net 개수와 더불어 가장 중요한 파라미터는 메시지 오류 확률(MEP, message error probability)이다<sup>6)</sup>. 일반적인 전술네트워크에서는 MEP를 1% 이하로 요구한다. 결론적으로 MAI를 최소화하면서도 MEP를 1% 이하로 유지할 수 있는 네트워크 설계가 필요하며 이에 따라 멀티넷에서 사용할 수 있는 최대 net의 개수도 정해져야만 한다.

한편, 주파수 도약 시스템은 데이터 전송 시 idle period의 비중이 높아 처리량이 낮고, TDMA 구조로 인해 할당된 타임슬롯에서만 전송할 수 있으므로 이미지 전송에 어려움이 있다. 또한, 전송이 단발성이기에 사전에 타임슬롯을 할당하기가 어렵다. ACK 또한 문제가 될 수 있다. 이미지의 크기에 비례하여 ACK에 더 많은 타임슬롯이 할당되기 때문에 MEP가 증가하는 상황에서는 재전송에 취약해져 타임슬롯 할당 문제가 생길 수 있기 때문이다. 이때, 재밍 공격으로 인해 메시지 오류가 발생하게 되고 가용 채널이 줄어들게 된다면

이미지 전송 성공률은 급격히 저하된다. 따라서 재밍 환경에서도 MEP를 기반으로 성능을 평가하고, 도출된 파라미터를 활용해 멀티넷을 설계할 수 있는 성능 분석 모델이 필요하다.

NTN 기반 전술네트워크를 연구한 기존 연구는 [2], [3], [4]가 있고, Link-16을 개선하여 이미지 전송 기법을 개선한 논문으로는 [6], [7]이 있다.

[2]는 위성의 대역폭을 UAV 네트워크가 공유하는 환경에서 primary user(PU)인 위성의 간섭을 고려하여 WFH 기법을 제안하였으나 위성은 도약하지 않아 M-NTN 요구조건을 충족하지 못하였다. [3]은 위성의 대역폭을 공유하는 UAV-relay 전술 데이터 링크에서 펄스 충돌 확률을 통해 멀티넷을 분석하였다. [4]에서는 위성의 대역폭을 HAP, UAV 네트워크가 공유해서 사용하는 M-NTN 환경에서 PU인 위성은 타임슬롯 단위로 채널을 변경하는 slow frequency hopping(SFH)을 수행하고 HAP과 UAV는 secondary user(SU)로서 FFH을 수행하여 모든 플랫폼이 주파수 도약하는 시스템을 제안하였다. 더 나아가 MAI가 발생한 채널이나 재밍 공격을 당한 채널을 교체하는 과정에서 FHP이 유발되지 않도록 주파수를 변경하는 frequency hopping and remapping(FFHR) 기법과 재밍 공격을 판단하고 재밍 탐지 성공확률을 계산하여 한 슬롯 당 도약할 수 있는 펄스의 개수와 같이 프레임 구조에 필요한 파라미터를 결정할 수 있는 adaptive frequency hopping and remapping(A-FFHR)을 제안하였다. 하지만 [2], [3], [4]에서는 모두 FFH를 수행하는 과정에서의 pulse collision probability 기반의 성능 분석 모델만 제시하는 수준에 그쳤고 MEP를 고려한 파라미터들에 대한 값은 제시하지 못하였다. [6], [7]에서는 이미지 전송을 위해 새로운 메시지 패킹 구조를 제안하였다. [6]은 이를 통해 유효 데이터 속도를 분석하였고 [7]은 Link-16K를 제안하여 이미지 재전송이 있는 시뮬레이션 환경에서 멀티넷의 최대 net 개수를 도출하였다. 하지만 [6]은 재전송이 있는 환경에서 MEP를 고려한 성능 분석 모델을 제시하지 못하였고, [7]은 재밍이 있는 환경에서 MAI와 재밍 공격에 따른 MEP는 고려하지 않고 임의로 설정한 MEP 아래에서 파라미터를 도출하였다.

본 논문에서는 첫 번째로 M-NTN 요구조건을 충족하며 LEO 위성, HAP, UAV 네트워크가 전술네트워크를 구성할 수 있도록 하는 멀티넷 성능 분석 모델을 제시한다. 이를 위해 [4]에서 제시한 FFHR과 A-FFHR 기법의 방법론과 한계를 제시하고 이를 기반으로 한 성능을 분석하고자 한다. 이때, [4]와 차별화하여 위와 같

이 재밍 공격이 존재하는 환경에서 메시지 패킹 구조에 기반하여 MEP가 1% 이하가 유지될 수 있는 멀티넷 성능을 분석한다. 두 번째로는 이미지 전송 속도 개선을 위해서 [7]에서 제안한 메시지 패킹 구조를 FFHR과 A-FFHR 기술이 적용되는 환경에 적용한 후 net 수에 따른 이미지 전송 성능을 분석한다. [7]과 차별화하여 임의로 설정된 MEP가 아닌, 재밍 공격이 존재하는 환경에서 도출한 MEP를 통해 이미지 전송 기법에 대한 성능 분석을 제시하고자 한다.

## II. 관련 연구

본 장에서는 기존의 전술네트워크 기술과 이미지 전송을 위해 제안된 메시지 패킹 기법의 성능 분석 모델에 대해서 다룬다. 특히 [4]에서 제안한 NTN 환경에서 위성 과 HAP, UAV 네트워크 간의 스펙트럼 공유 기반 주파수 도약 기법인 FFHR, A-FFHR을 소개하고, [7]에서 이미지 전송을 위해 제안한 P5W2-SP 타입과 Link-16K에 대해 소개한다. 그리고 기존 성능 분석 모델의 한계점을 다룬다.

그림 1은 FFHR과 A-FFHR의 환경인 M-NTN의 네트워크 아키텍처와 멀티넷 구조를 보여준다. 위성 빔은 하나의 net을 사용하고, HAP 및 UAV 네트워크는 각 플랫폼이 하나의 net을 할당받는 모습을 나타낸다. GN은 각 네트워크 내에서 time division multiple access(TDMA)를 통해 플랫폼에 접근하며, 해당 플랫폼의 FHP를 통해 통신할 수 있다. 이때, LEO 빔에 할당된 FHP는 서로 직교하도록 생성되어, 빔 간 간섭이 없는 것으로 가정한다. FFHR<sup>[4]</sup>은 M-NTN에서 HAP 및 UAV 네트워크가 LEO 위성 자원을 공유할 때, SU 플랫폼 이동으로 인한 PU와의 MAI를 방지하기 위해 설계된 기법이다. SU들은 매 프레임마다 자신이 위치한

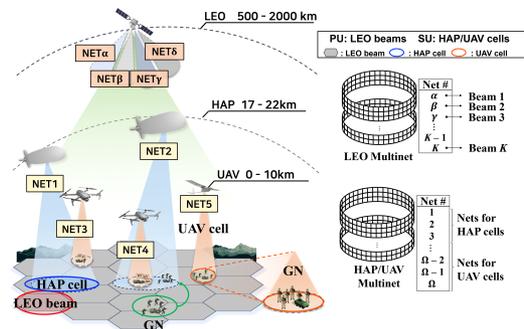


그림 1. M-NTN의 네트워크 아키텍처와 멀티넷 구조  
Fig. 1. M-NTN network architecture and multinet structure

지역에 있는 PU의 ID를 파악하여 ND 과정에서 미리 인지했던 PU의 FHP과 자신의 FHP을 비교하여 MAI가 발생할 수 있는 채널을 remapping 한다.

A-FFHR[4]은 pulse collision이 발생할 때 그 원인이 MAI로 발생하는 것인지 재밍으로 인해 발생하는 것인지에 관한 판단을 한 후 재밍된 채널을 다른 채널로 remapping 할 수 있는 기법이다. FFHR과 마찬가지로 매 프레임마다 재밍된 채널들을 보고하고 해당 채널들을 다른 채널들로 remapping 한다. 또한 주파수의 효율적인 사용을 위해서 재밍으로 판단되어 유휴 상태인 채널을 주기적으로 재검사하여 복구한다.

이때, ND 프로세스에서는 재밍 탐지 성공확률인  $\beta$ 를 알고리즘을 통해 사전 설정할 수 있다. A-FFHR은 한 프레임 내의 펄스 수인  $N_{TP}$ 개 중에서  $\gamma$ 개 이상 펄스 충돌이 나면 MAI가 아닌 재밍 공격으로 인한 pulse collision으로 간주한다.

그림 2는  $N_{TP}$ 가 사전에  $\gamma$ 와 탐지 실패 확률인  $\beta_{fail}$ 의 임계값인  $\beta_{thr}$ , 그리고 사용할 수 있는 채널의 수인  $N_A$ , 이 세 가지 파라미터를 기반으로 결정되는 알고리즘을 보여준다.  $N_{TP}$ 가  $\gamma$ 번 충돌을 탐지하기에 너무 적으면 재밍 탐지가 불가능하므로  $N_{TP}$ 의 초기값은 모든 채널이 같은 출현 확률을 가질 때, 최소  $\gamma$ 번 이상은 등장할 수 있도록  $\gamma \times N_{TP}$ 로 설정한다. 이어서 탐지 실패 확률은  $\beta_{fail}$ 이고, 이는 연속적으로  $\gamma$ 번 충돌이 발생할 때,  $N_{TP}$ 가 작아서 각 펄스가  $\gamma$ 번 이상 계산되지 않을 확률로 정의한다.  $\beta_{fail}$ 을 구하는 수식은 다음과 같다.

$$\beta_{fail} = \sum_{k=0}^{\gamma-1} \binom{N_p}{k} \left( \frac{1}{N_A} \right)^k \left( 1 - \frac{1}{N_A} \right)^{N_p-k} \quad (1)$$

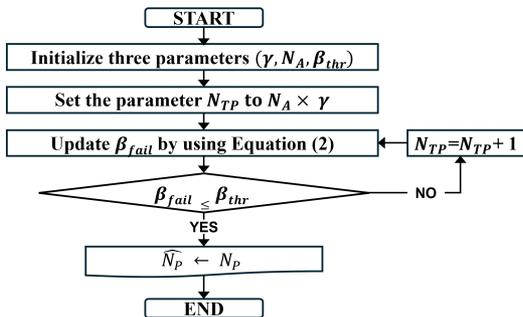


그림 2.  $\gamma$ 와  $\beta_{thr}$ 에 따른 최소  $N_{TP}$  계산 순서도  
Fig. 2. Flow chart for calculating the minimum size of NP according to  $\gamma$  and  $\beta_{thr}$

이를 통해서  $\beta_{fail}$ 을 계산한 후  $\beta_{thr}$ 보다 작을 때까지  $N_{TP}$ 를 증가시켜 재밍 탐지 성공확률인  $\beta$ 를 만족시키는 최소  $N_{TP}$ 를 찾을 수 있다. 즉,  $\beta$ 는 사전에 설정할 수 있는 값이며 이에 따라  $N_{TP}$ 가 정해진다.

그림 3은 M-NTN 내의 플랫폼들이 가지는 프레임 구조를 설명한다. 한 프레임 안에는  $N_S$ 개의 슬롯이 들어있고 FFH의 경우 한 슬롯 안에는  $N_P$ 개의 펄스가 들어있다. FFHR 및 A-FFHR을 수행하기 위해서는, 매 프레임의 첫 슬롯에 있는 비콘을 브로드캐스트하여 SU가 이동함에 따라 간섭을 줄 수 있는 PU의 ID 정보와 재밍된 채널들을 파악하고 선제적으로 대응할 수 있도록 한다.

[4]에서는 FFHR/A-FFHR 기법을 사용하기 위한 멀티넷 구조를 제안하고 성능 분석 모델을 제안하였다. 하지만 메시지 패킹을 고려하여 MEP를 분석하지 못하였고 펄스 충돌 확률 분석 모델까지만 제시하였다. 따라서 멀티넷 설계를 위한 완전한 파라미터를 도출하지 못했고, MEP나 이에 따른 동시 사용 가능한 최대 net의 수를 제공할 수 없다는 한계점이 있다. 또한 이미지 전송을 위한 기술이 고려되지 않아서 미래전 환경을 대비하는 데에 대한 방법론이 부족하다. 따라서 이미지 전송의 개선점을 가지면서도 MEP와 이에 따른 멀티넷 성능을 분석할 수 있어야 한다.

기존 Link-16의 메시지 패킹은 한 타임슬롯 동안 메시지를 담아 전송할 수 있도록 하는 방식이며 그림 4에 나타난 것과 같이 STD-DP, P2-SP, P2-DP, P4-SP로 4가지가 있다. 메시지 패킹 구조에는 헤더 정보, 데이터, 그리고 propagation으로 인한 충돌을 막기 위한 guard time이 포함되어 있다. STD-DP와 P2-SP는 두 개의 pack을 전송하는데, STD-DP는 하나의 pack을 두 번 전송함(210 bits)으로써 높은 신뢰성을 가질 수 있고 P2-SP는 서로 다른 두 개의 pack을 전송함(420 bits)으

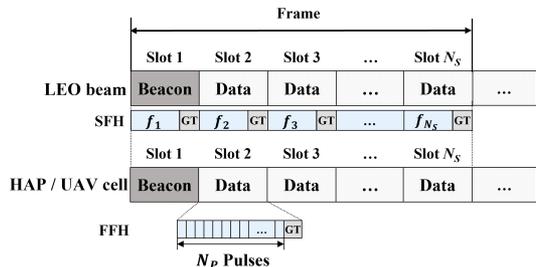


그림 3. LEO 빔과 HAP/UAV 네트워크 프레임 구조  
Fig. 3. Frame structure for LEO beams and HAP/UAV networks.

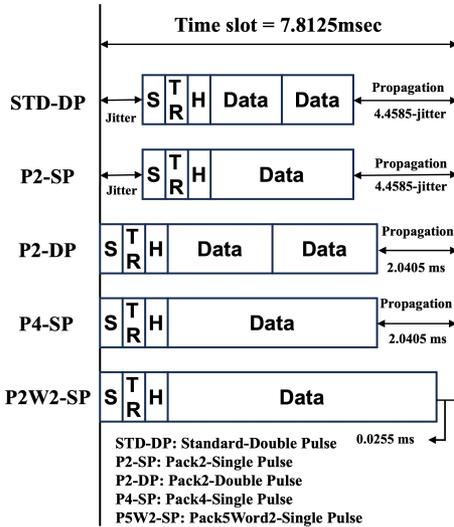


그림 4. 메시지 패킹 전략  
Fig. 4. Message packing strategy

로써 STD-DP보다 2배 높은 data rate을 가진다. P2-DP와 P4-SP는 jitter 구간을 없애 STD-DP와 P2-SP보다 더 많은 bits를 전송한다. P2-DP는 420 bits가 들어 있는 pack을 두 번 전송하고, P4-SP은 840 bits의 데이터를 한 번 전송한다. 결론적으로 가장 많은 데이터를 보낼 수 있는 메시지 패킹 구조는 P4-SP이지만 107.52Kbps를 가지며 이미지를 전송하기에는 낮은 data rate을 가진다.

Link-16K<sup>[7]</sup>에서는 P5W2-SP 기법과 이미지 전송을 위한 동적 타임슬롯 할당 방식인 Dynamic TDMA(DTDMA)을 제안하여 이를 해결하였다. P5W2-SP는 jitter와 propagation 시간을 모두 없애고 최소한의 guard time을 두어 한 타임슬롯에 5개의 pack과 2개의 word를 전송할 수 있다. 또한, Image net(IMG net)을 따로 두어 이미지 전송이 필요할 때 타임슬롯을 할당하는 DTDMA 방식을 사용하며, 이 타임슬롯의 집합은 Available Time Slots(ATS)로 정의된다. 전체 net의 개수가  $m$ 이고, 한 프레임 내의 타임슬롯 개수가  $n$ 이고, IMG net에 가입되어있는 모든 노드의 수를  $K$ 라고 할 때 ( $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq K$ ), 모든 net의  $i$ 번째 타임슬롯에서 IMG net을 사용하는 노드가 점유하는 net이 없으면 IMG net의  $j$ 번째 타임슬롯은 ATS에 포함된다. 그리고 ATS는 프레임 단위로 재할당된다. ATS에서 타임슬롯이 연속으로 할당될 때는 마지막 타임슬롯을 제외한 타임슬롯에 P5W2-SP 방식을 사용하고, 마지막 타임슬롯에는 기존의 4가지 패킹 구조 중 하나를 선택해서 사용하면 guard time을 그대로 유

지하면서도 기존 기법보다 더 많은 데이터를 전송할 수 있다. 한편, 메시지 충돌이 일어나게 되면 재전송이 필요하며, 재전송을 위해 자신이 수신하지 못한 패킷 정보를 담아 NACK 메시지를 전송한다.

Link-16K에서는 ATS 할당 기법과 메시지 패킹 기법의 성능을 평가하기 위해 이미지 크기, 수신 노드 수, 메시지 패킹 방법, 그리고 MEP에 따른 이미지 재전송 시간 및 타임슬롯 할당 효율성을 분석하였다. 그러는 이러한 평가에서는 멀티넷 환경(최대 net 개수)이나 재밍 환경과 같은 요인을 고려하지 않고, 임의로 설정된 MEP를 평가 파라미터로 사용한 한계가 있다. 전송네트워크에서는 재밍 공격이 멀티넷 성능에 중대한 영향을 미치며, 이에 따라 MEP도 변화한다. 특히, M-NTN과 같이 다양한 플랫폼과 다수의 노드가 공존하는 환경에서는 net 개수에 따라 성능 차이가 크기 때문에, 재밍 공격과 그로 인한 MEP 변화를 반영한 정확한 평가가 필요하다.

### III. M-NTN 멀티넷 성능 분석 모델

본 장에서는 M-NTN 환경에서의 멀티넷 성능 분석 모델을 제시한다. 첫 번째로는 FFHR 및 A-FFHR이 도입된 M-NTN 환경에서 재밍 채널 수와 메시지 패킹 방식에 따른 MEP와 멀티넷 최대 net 개수를 도출한다. 두 번째로는 해당 파라미터를 바탕으로 재밍 공격이 존재하는 환경에서 Link-16K의 이미지 전송 성능을 평가한다. M-NTN의 요구조건을 만족하기 위해서 네트워크 아키텍처 및 디자인, 멀티넷 구조, 프레임 구조는 [4]와 동일한 것으로 간주하였고, 이미지 전송을 위한 ATS 할당 방식은 [7]과 동일하게 구성하였다. 그리고 메시지 패킹 구조와 메시지의 심볼 변환 과정은 Link-16 표준과 호환되도록 동일하게 설계하였다. [4]와 차별화하여 LEO 위성 빔 멀티넷과 HAP/UAV 멀티넷 이외에 IMG net을 두어 이를 통해 이미지 전송이 가능하게 한다.

#### 3.1 전송 메시지 구조 및 전송 방식

그림 5는 메시지가 RS 심볼로 변환되는 과정을 보여준다. 각 메시지는 헤더와 패킷으로 구성되며, 하나의 패킷은 210비트로 이루어져 있다. 이 패킷은 70비트 크기의 워드 3개로 나뉜다. 각 워드에는 5비트의 패리티 비트가 추가된 후, RS(31,15) 인코딩 과정을 거쳐 총 155비트가 된다. 헤더는 20비트의 패리티 비트가 추가되어 35비트가 되며, RS(16, 7) 인코딩을 통해 최종적으로 80비트로 변환된다. 변환 결과, 5비트는 하나의

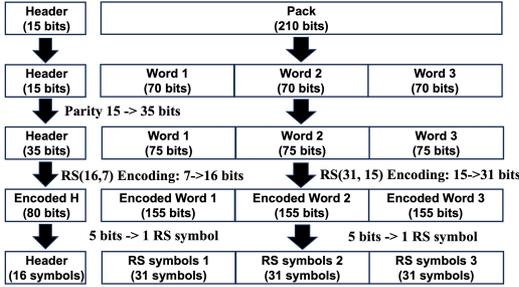


그림 5. 메시지의 RS 심볼 변환 과정  
Fig. 5. RS symbols conversion process of a message

RS 심볼이 되며, 헤더는 16개의 심볼, 각 워드는 31개의 심볼로 표현된다.

### 3.2 스펙트럼 공유 기반의 M-NTN에서의 FFHR 및 A-FFHR 기반 멀티넷 성능 평가

M-NTN 환경에서 스펙트럼 공유를 위해 FFHR과 A-FFHR이 수행되는 경우 단일 SU 관점에서 간섭을 유발할 수 있는 주변 플랫폼의 수를  $\Omega$ 로 정의하고 메시지 오류 확률을  $P_M$ 이라고 한다. 이때, 메시지 패킹 기법에 따른  $P_M$ 을 구하면 다음과 같다.

$$P_M = \begin{cases} 1 - (1 - P_w^L)^3 & L = 2 \text{ (STD-DP)} \\ 1 - (1 - P_w^L)^6 & L = 1 \text{ (P2-SP)}, \\ & L = 2 \text{ (P2-DP)} \\ 1 - (1 - P_w^L)^{12} & L = 2 \text{ (P4-SP)} \\ 1 - (1 - P_w^L)^{17} & L = 1 \text{ (P5W2-SP)} \end{cases} \quad (2)$$

이때,  $P_w$ 는 word 오류 확률이고  $L$ 이 1이면 SP, 2이면 DP를 나타낸다.  $P_w$ 은 다음과 같이 계산한다.

$$P_w = \sum_{i=t+1}^n \binom{n}{i} P_c^i (1 - P_c)^{n-i} \quad (3)$$

위 수식에서  $P_c$ 는 펄스 충돌 확률이다.  $t$ 는 3.1에서 설명한 메시지 RS 심볼 변환 방식에 따라 심볼의 복구 가능성을 반영한 변수이다. RS(31, 15) 인코딩에서는 총 31개의 심볼 중 최대 8개까지 복구할 수 있으므로  $n = 31$ 과  $t = 8$ 로 설정하여  $P_w$ 의 수식을 도출할 수 있다.

$P_c$ 는 재밍으로 인해 충돌이 나는 확률인  $P_J$ 와 MAI로 인해 충돌이 나는 확률인  $P_{MAI}$ , 재밍 공격과 MAI로 인해 동시에 충돌이 나는 확률인  $P_{J \cap MAI}$ 를 고려하여 구할 수 있고 수식은 다음과 같다.

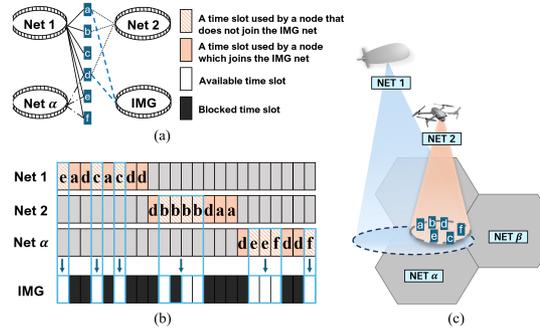


그림 6. M-NTN에서의 IMG net과 ATS 선정 예시  
Fig. 6. Examples of IMG net and ATS selection in M-NTN

$$P_c = P_J + P_{MAI} - P_{J \cap MAI} \quad (4)$$

한편,  $P_c$ 는 FFHR 기법과 A-FFHR 기법에 따라 달라지며 FFHR의  $P_J$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_J = \frac{\sum_{k=a}^{N_J} f(k)}{N_J - \alpha + 1} \quad (5)$$

$N_J$ 는 전체 네트워크에서 채밍된 채널 수이고, 채밍된 채널들은 네트워크에서 사용 가능한 채널 집합인  $C_A$ 에 포함되거나, 부분적으로 포함되거나, 포함되지 않을 수도 있다.  $k$ 는  $C_A$ 에 포함된 채밍 채널의 수이며 최대  $N_J$ 를 초과할 수 없다.  $\alpha$ 는  $k$ 의 최솟값이며 다음과 같다.

$$\alpha = \max(N_J + N_A - N_T, 0) \quad (6)$$

이때,  $N_A$ 는 한 net이 사용할 수 있는 채널의 수이며, 전체 네트워크의 채널 수인  $N_T$ 개에서 SU와 간섭 범위에 있는 PU의 위성 빔이 사용하는 채널의 수인  $N_U$ 를 제외한 값이다.  $N_A$ 는 SU의 위치에 따라 매 프레임 변경될 수 있다.  $f(k)$ 는  $\frac{k}{N_A}$ 으로 구할 수 있다.

$P_{MAI}$ 는  $\Omega$  중  $C_A$ 에서 동일한 채널을 선택한 net이 하나라도 있을 때 발생할 수 있는 확률이며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{MAI} = 1 - (1 - \frac{1}{N_A})^{\Omega-1} \quad (7)$$

마지막으로 재밍 공격과 MAI로 인해 동시에 펄스 충돌이 나는 확률인  $P_{J \cap MAI}$ 는  $P_J$ 와  $P_{MAI}$ 를 곱한 값으로 구할 수 있다.

A-FFHR의  $P_c$  또한 각각의 확률값인  $P_J$ ,  $P_{MAI}$ ,  $P_{J \cap MAI}$ 을 통해 구할 수 있으며 이어지는 수식들로 구할 수 있다. A-FFHR에서 재밍으로 충돌이 나는 확률인  $P_J$ 에 관한 수식은 다음과 같다.

$$P_J = \frac{\sum_{k=a}^{n_j} f_{AFFHR}(k)}{N_J - \alpha + 1} \quad (8)$$

여기에서  $f_{AFFHR}(k)$ 은  $\frac{N'_{J,U}}{N_A - N'_{J,D}}$ 으로 구할 수 있고,  $N'_{J,U}$ 는 이전 채널에서 탐지되지 않은 재밍된 채널의 수이고  $N'_{J,D}$ 는 이전 채널에서 탐지된 재밍된 채널의 수이다.  $N'_{J,U}$ 는  $k - [k\beta]$ 이고  $N'_{J,D}$ 는  $[k\beta]$ 이다. 이때  $\beta$ 는 재밍 탐지 성공확률이다.

$P_{MAI}$ 는 재밍된 채널을 제외하고 펄스 충돌이 났을 때의 확률이며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{MAI} = \frac{\sum_{k=a}^{n_j} f_{MALAFFHR}(k)}{N_J - \alpha + 1} \quad (9)$$

여기에서  $f_{MALAFFHR}(k)$ 는 다음과 같다.

$$f_{MALAFFHR}(k) = 1 - \left(1 - \frac{1}{N_A - [k\beta]}\right) \quad (10)$$

$P_{J \cap MAI}$ 는  $P_J$ 와  $P_{MAI}$ 를 곱한 값으로 구할 수 있다.

### 3.3 DTDMA의 Image net 운용 및 ATS 할당 방법

그림 6은 M-NTN에서의 IMG net과 ATS 선정 예시를 보여준다. 기존 Link-16K와 달리 제안하는 환경에서는 노드가 전술 플랫폼이 아닌, 각 플랫폼 네트워크에 포함된 GN으로 정의된다. 그림 6(a)와 6(c)에서 볼 수 있듯이, 해당 지역에는 GN a, b, c, d, e, f가 포함되어 있다. 이들은 UAV 네트워크와 통신하기 위해 Net 2, HAP 네트워크와 통신하기 위해 Net 1, 위성 빔과 통신하기 위해 net  $\alpha$ 과 net  $\beta$ 를 사용한다. IMG net에 가입된 노드는 a와 d로 설정되어 있으며 ATS 할당 방식에 따라  $j$ 가 1, 4, 6, 10, 12, 13, 18, 19, 20, 23인 경우

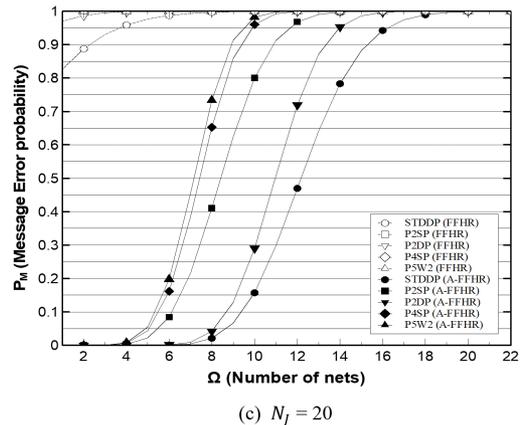
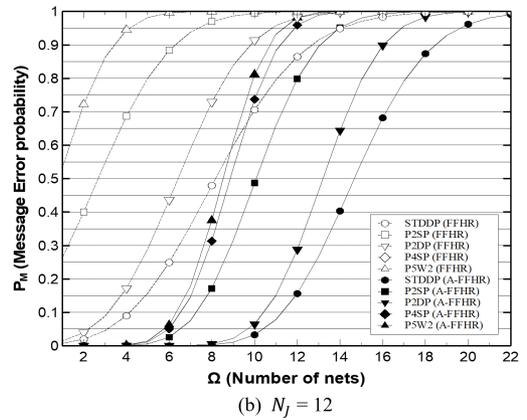
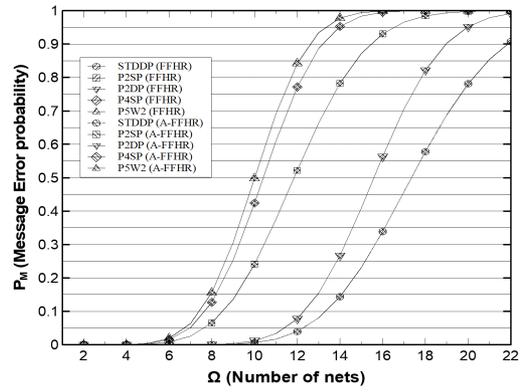


그림 7. 재밍 환경에서 메시지 패킹 방식과  $\Omega$ 에 따른 FFHR 및 A-FFHR 성능 비교 ( $N_J=60$ ,  $\beta=1$ )

Fig. 7. Performance of FFHR and A-FFHR under jamming attacks based on message packing methods and  $\Omega$

ATS에 타임슬롯이 할당된다. 또한 12, 13번과 18~20번까지의 타임슬롯은 연속으로 할당되기 때문에 P5W2-SP를 사용할 수 있다.

#### IV. 시뮬레이션 환경 및 결과

여러 전술 플랫폼이 항재밍 능력을 갖추고 위성의 자원을 공유해서 네트워크를 형성하는 M-NTN 환경에서는 항재밍 성능 평가와 원활한 작전 진행을 위한 이미지 전송 성능 평가가 필수적이다. M-NTN의 성능을 평가하기 위해서 본 논문에서는 세 가지 시뮬레이션을 진행하였다. 그 중 전송네트워크 설계에서 가장 중요한 파라미터인 MEP와 최대 운용 가능 net 개수를 중심으로 시뮬레이션을 진행하였고 이에 기반하여 이미지 전송 성능 평가도 진행하였다.

첫 번째 시뮬레이션에서는 FFHR와 A-FFHR의 성능을 평가하기 위한 측정값으로 MEP가 사용되었고, 재밍 공격이 있는 환경에서 메시지 패킹 방식과 동시 운용되는 net 개수에 따른 FFHR와 A-FFHR의 성능을 보여준다. 이때, 메시지 패킹 방식 간의 항재밍성능을 비교하기 위해서  $\beta$ 는 1로 설정하였다.

두 번째 시뮬레이션에서는 재밍 탐지 성공확률인  $\beta$ 에 따른 FFHR와 A-FFHR의 항재밍 성능을 비교하기 위해, 가장 안정성이 떨어지는 메시지 패킹 방식인 P5W2-SP를 채택하여, 재밍 채널 수에 따른 MEP를 도출한다. 이때, 정확한 비교를 위해  $\beta$ 는 0.7, 0.8, 0.9, 1.0으로 설정된다.

세 번째 시뮬레이션에서는 재밍 환경에서 기존 Link-16과 Link-16K DTDMA의 MEP와 net 수에 따른 이미지 전송 성능을 비교한다. 이때, 첫 번째 시뮬레이션과 동일하게 메시지 패킹 방식 간의 항재밍 능력을 평가하기 위해서  $\beta$ 는 1로 설정한다. 이미지 전송 성능 평가에 사용되는 측정값은 이미지를 재전송 시간을 포함하여 최종적으로 전송에 성공한 시간인  $T_{IMG}$ 이고, 재밍 공격이 있는 환경에서 첫 번째 시뮬레이션으로도 출된 MEP와, 동시 사용한 net의 수를 고려하여 이미지 전송의 성능을 평가하였다. 이미지의 크기는 1,000KB,  $N_s$ 는 64이고, Link-16K에서 연속으로 할당된 타임슬롯의 수를 20%, 40%, 60%, 80%로 설정하여 시뮬레이션하였다. 세 시뮬레이션 모두 총 300MHz의 대역폭을 스펙트럼 공유하는 M-NTN 환경에서, 채널 대역폭이 5MHz이고 채널 개수가 60개인 상태로 시뮬레이션 되었다.

##### 4.1 재밍 환경에서 메시지 패킹 기법과 net 수에 따른 FFHR 및 A-FFHR 성능

그림 7은  $N_j$ 가 0, 12, 20일 때 net 수에 따른 FFHR와 A-FFHR의  $P_M$ 을 보여준다. 그림 7의 세 그래프 모

두 net 수가 증가할수록 MEP가 급증하는 것을 확인할 수 있다. 또한 data rate이 높은 메시지 패킹 방식일수록 MEP가 높고 DP보다는 SP에서 전송의 안정성이 떨어져 MEP가 높은 것을 확인할 수 있다. MEP가 1%인 수준을 유지하기 위해서는 적은 수의 net을 활용해야 하지만, 이는 단일 SU의 관점에서 자신이 간섭을 줄 수 있는 영역 안에서의 동시 운용 가능한 net의 개수를 평가한 것이기 때문에 전체 네트워크에서 운용 가능한 net의 총 개수는 네트워크의 크기에 비례해서 더 많아진다.

그림 7(a)는  $N_j$ 가 0일 때의 FFHR와 A-FFHR 성능이 동일한 것을 보여준다. 이는 탐지할 재밍 채널이 존재하지 않기 때문에  $P_C$ 는 온전히  $P_{MM}$ 의 영향만을 받게 되기 때문이다. 가장 MEP가 높은 P5W2-SP에서는 5개의 net을 운용할 수 있고 가장 MEP가 낮은 STD-SP에서는 10개가량의 net을 운용할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 7(b)는  $N_j$ 가 12일 때의 성능을 보여주며 모든 메시지 패킹 방식에서 A-FFHR의 성능과 FFHR의 성능이 2배 이상 차이 나는 것을 확인할 수 있다. 이때, FFHR만 사용했을 때 STD-DP를 제외한 모든 메시지 패킹 방식에서는 MEP가 1% 이하로 운용 가능한 net이 없음을 확인할 수 있고 STD-DP마저도 최대 1개의 net만 운용할 수 있다. 하지만 A-FFHR을 사용한다면 P2SP, P4SP, P5W2-SP에서 최대 4개까지의 net을 운용할 수 있고 STD-DP와 P2DP는 최대 8개까지 net을 운용할 수 있다.

그림 7(c)는  $N_j$ 가 20로, 전체 채널의 1/3만큼 재밍 피해를 입었을 때의 성능을 보여주며 FFHR만 사용했을 때는 모든 메시지 패킹 방식에서 운용할 수 있는 net의 수는 없다. 하지만 A-FFHR을 사용하면  $N_j$ 가 12일 때와 유사하게 P2SP, P4SP, P5W2-SP에서도 최대 4개까지의 net을 운용할 수 있고, STD-DP와 P2DP는 최대 7개까지 net 운용이 가능하다.

결론적으로 재밍 채널의 수가 늘어날수록 FFHR 성능보다 A-FFHR의 성능이 월등히 높아지는 것을 확인할 수 있고 메시지 패킹 방식에 따라서 MEP의 차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 세 그래프 모두에서 MEP를 통해 확인할 수 있는 메시지 패킹 방식의 안정성은 STD-DP가 가장 높았고 다음으로는 P2DP, P2SP, P4SP, P5W2-SP 순으로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

### 4.2 재밍 환경에서의 net 수와 재밍 탐지 성공확률에 따른 P2W5-SP 기반 FFHR 및 A-FFHR 성능

그림 8은  $N_j$ 가 12, 20일 때 재밍 탐지 성공확률인  $\beta$ 에 따른 FFHR과 A-FFHR의 성능을 보여준다.  $N_j$ 가 12인 경우의 FFHR은 그림 7(b)에서 확인했듯이 MEP가 1% 이하로 운용 가능한 net이 없음을 확인할 수 있다. 하지만 A-FFHR은  $\beta$ 가 0.7와 0.8인 경우에도 최대 운용 가능한 net 개수를 3개 정도 운용할 수 있으며,  $\beta$ 가 0.9인 경우에는 1.0일 때와 동일하게 4개까지 운용할 수 있다.  $N_j$ 이 20인 경우에도 FFHR의 net 개수가 1일 때, MEP가 1이 되기 때문에 해당 기법을 사용할 수가 없다. 그리고  $\beta$ 가 0.7, 0.8인 A-FFHR도 재밍 채널 수가 전체 채널 수의 1/3이 되었을 때는 운용 가능한 net의 개수가 존재하지 않는다. 하지만  $\beta$ 이 0.9일 때는 최대 2개, 1.0일 때는 최대 4개를 사용할 수 있음을 확인할 수 있다.

결론적으로  $\beta$ 가 감소하면 사용 가능한 net의 수가 줄어든다. 하지만  $\beta$ 를 조절하는 이유는 기본적으로  $N_{TP}$ 이 클수록 주파수 도약률이 높아져 전체 네트워크 처리량이 줄어들는데, 이때  $\beta$ 를 줄여  $N_{TP}$ 를 감소시키는데 있다. 기존 논문 [4]에서는  $\beta$ 가 0.99에서 0.9까지 줄더라도  $N_{TP}$ 가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있으므로, 현실적으로는  $\beta$ 가 0.8 이하까지 떨어지지 않더라도 적은  $N_{TP}$ 의 수를 유지하며 효율적으로 멀티벡 설계할 수 있다.

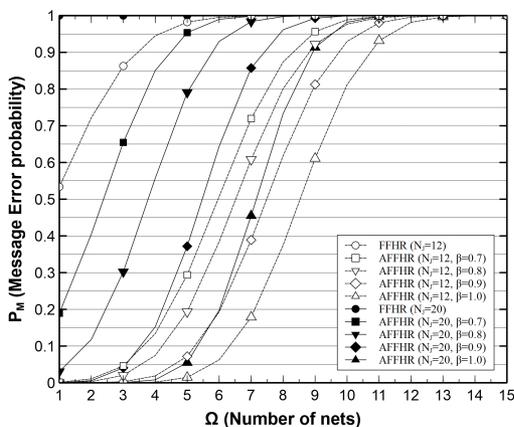


그림 8. 재밍 환경에서 P5W2 패킹 방식의  $\Omega$ 와  $N_j$ 에 따른 FFHR 및 A-FFHR 성능 비교 ( $N_T=60$ )  
 Fig. 8. Performance of FFHR and A-FFHR with P5W2 packing method under jamming attacks based on  $N_j$  and  $\Omega$  ( $N_T=60$ )

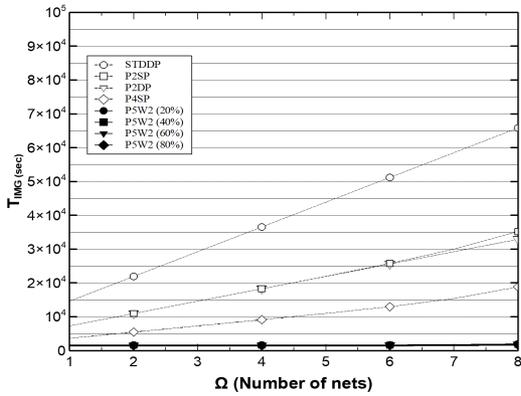
### 4.3 재밍 환경에서의 net 수와 메시지 패킹 방식에 따른 A-FFHR 기반 이미지 전송 성능

본 시뮬레이션에서는 4.1에서 구한 A-FFHR에서의 성능에서 net 수와 메시지 패킹 방식에 따른 MEP를 적용하여 재밍 공격이 동일하게 일어나는 환경에서 이미지 전송 성능 평가를 진행하였다.

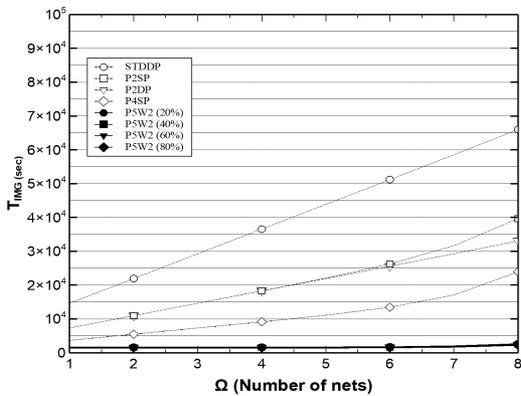
그림 9는  $N_j$ 가 0, 12, 20일 때 net 수와 각 메시지 패킹 기법에 따른 이미지 전송 성능을 보여주며 크게 기존 Link-16의 메시지 패킹 방식인 STD-DP, P2SP, P2DP, P4SP와 Link-16K의 메시지 패킹 방식인 P5W2-SP을 비교하였다. 그림 9(a), 9(b), 9(c)에서는 net의 수가 6 이가까지는 거의 동일한 성능을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 4.1에서 확인할 수 있듯이 A-FFHR을 사용하게 되면  $N_j$ 가 달라져도 MEP는  $N_j$ 의 영향보다 net의 수와 메시지 패킹 방식에 따라서 크게 영향을 받기 때문이다. 또한 세 그래프 모두에서 P5W2-SP을 활용하였을 때의  $T_{IMG}$ 가 매우 낮게 나오는 것을 확인할 수 있다. P5W2-SP은 4.1에서 확인했듯이 MEP가 크기 때문에 성능이 저하될 수 있지만 재전송 시, data rate이 높은 특성을 활용하여 효율적으로 재전송할 수 있으므로 비교적 변화폭이 크지 않은 것처럼 보인다.

그림 9(a), 9(b), 9(c)를 비교하였을 때 net 수가 7개를 넘어가게 되면  $N_j$ 에 따라  $T_{IMG}$ 이 증가하는 경향을 확인할 수 있는데 특히 P2SP와 P4SP에서 뚜렷하게 보인다. 이는 SP를 활용하게 되면 전송의 안정성이 떨어져 net 수가 증가할 때 MEP가 DP보다 급격히 증가하기 때문이다. P4SP의 예시를 살펴보면 net 수가 7개일 때  $N_j$ 가 0인 경우  $T_{IMG}$ 가 20,000sec에 못 미치지만,  $N_j$ 가 30인 경우 거의 50,000sec에 가깝게 증가한 것을 확인할 수 있다.

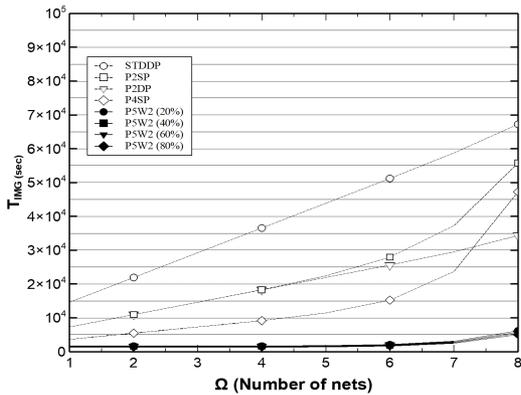
그림 10은 그림 9에서의 P5W2-SP의 성능 그래프만을 취합한 것으로  $N_j$ 에 따른 P5W2-SP의  $T_{IMG}$ 를 자세히 확인할 수 있다. Net 개수가 최대 3개까지는  $N_j$ 에 따른 유의미한 차이는 나타나지 않으며 P5W2-SP의 비율이 높을수록  $T_{IMG}$ 가 낮고, 80% 정도의 비율을 차지할 때 1,200sec 정도로 낮은  $T_{IMG}$ 을 확인할 수 있다. 그리고 비율이 가장 낮은 20%의 성능에서도 1,600sec 정도로 낮은  $T_{IMG}$ 을 가진다. Net의 개수가 4개를 넘어갈 때는  $N_j$ 에 따른  $T_{IMG}$ 가 급격히 변화하기 시작하며,  $N_j$ 가 30인 경우에는 net의 개수가 5일 때, 3일 때보다 1.5배가량 높은  $T_{IMG}$ 를 가지는 것을 확인할 수 있었다.



(a)  $N_J = 0$



(b)  $N_J = 12$



(c)  $N_J = 20$

그림 9. 재밍 환경에서 MEP와 net 수에 따른 Link-16과 DTDMA의 이미지 전송 성능 ( $N_J=60, \beta=1$ )

Fig. 9. Image transmission performance between Link-16 and DTDMA based on MEP and the number of nets under jamming attacks ( $N_J=60, \beta=1$ )

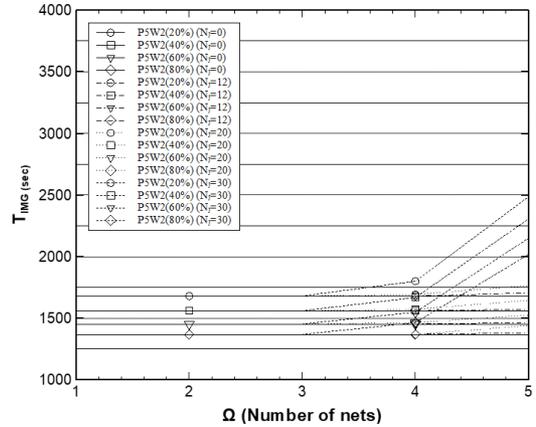


그림 10. 재밍 채널 수와 P5W2-SP 비율에 따른 DTDMA의 이미지 전송 성능 비교

Fig. 10. Comparison of image transmission performance in DTDMA based on the number of jamming channels and P5W2-SP ratio

### V. 결론

본 논문에서는 LEO 위성, HAP, UAV 네트워크가 스펙트럼 공유하는 M-NTN 환경에서 재밍 공격이 존재할 때의 멀티넷 성능 분석 모델을 제시했다. 재밍 채널의 개수에 따라 FFHR 기법과 A-FFHR 기법을 비교 분석하였고, net 수에 따른 MEP를 제시하였다. 동시 사용 가능한 최대 net 개수를 도출하여 멀티넷 성능을 분석할 수 있었고 A-FFHR의 항재밍 성능을 확인할 수 있었다. 또한, 이 시뮬레이션에서 도출한 MEP를 고려하여 Link-16K의 DTDMA와 P5W2 메시지 패킹 기법의 이미지 전송 성능을 평가할 수 있었다. 결과적으로 P5W2-SP 메시지 패킹 기법의 MEP는 다른 메시지 패킹 기법보다 높을 수 있지만 효율적인 재전송 기법과 낮은 data rate으로 인해 이미지 전송 시간이 단축되는 것을 확인할 수 있었다.

### References

[1] Q. T. Ngo, Z. Tang, B. Jayawickrama, Y. He, E. Dutkiewicz, and B. Senanayake, "Timeliness of information in 5G nonterrestrial networks: A survey," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 11, no. 21, pp. 34652-34675, Nov. 2024.

[2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Y. Xiao, Z. Ye, M. Wu, H. Li, M. Xiao, and M. Alouini, “Space-air-ground integrated wireless networks for 6G: Basics, key technologies, and future trends,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 42, no. 12, pp. 3327-3354, Dec. 2024.
- [6] Y. Kim, J. Lim, H. Noh, and K. Lee, “Tactical data link message packing scheme for imagery air operations,” *J. KICS*, vol. 37, no. 4, pp. 278-287, Apr. 2012.
- [7] H. Baek, S. Ko, J. Lim, and I. Oh, “Enhanced MAC protocol with new packing for imagery transmission in link-16,” 2014 *IEEE Military Commun. Conf.*, Baltimore, MD, USA, 2014.

전혜림 (Hyerim Jeon)



2024년 8월: 경북대학교 컴퓨터학부 학사 졸업  
2024년 9월~현재: 경북대학교 컴퓨터학부 석사과정  
<관심분야> Non-terrestrial Networks, Tactical networks, 5G/6G

[ORCID:0000-0003-0886-3110]

백호기 (Hoki Baek)



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

대학교 장위국방연구소 전임연구원  
2015년 3월~2021년 2월: 아주대학교 국방디지털융합학과 강의교수

2021년 3월~현재: 경북대학교 컴퓨터학부 조교수  
<관심분야> 5G/6G, Spectrum sharing, UAV networks, Tactical networks, Non-terrestrial networks, Manned-Unmanned Teaming

[ORCID:0000-0001-9213-7845]