

전술 UAV 네트워크에서 Weighted Frequency Hopping 기반 멀티넷 성능 분석

백 호 기*

Performance Analysis of Weighted Frequency Hopping-Based Multinet in Tactical UAV Networks

Hoki Baek*

요 약

전장 환경에서 전술 네트워크에 참여한 노드들은 전술데이터링크를 통해 전술 메시지를 공유하고 작전을 수행한다. 전술 네트워크는 적의 재밍 공격으로 네트워크가 마비되면 작전을 수행할 수 없어서 주파수 도약 기술을 사용한다. 그리고 동시에 여러 작전을 수행할 수 있도록 다중 주파수 도약 패턴들로 구성된 멀티넷(Multinet)을 지원한다. 최근 UAV를 지상 전술 네트워크 인프라로 활용하기 위한 연구들이 진행되고 있다. 그러나 주파수 도약 기술은 넓은 대역폭이 필요하여 전술 UAV 네트워크 전용 주파수를 확보하기보다는 스펙트럼 공유 기술을 활용하는 것이 합리적이다. 전술 네트워크에서는 네트워크가 시작하기 전에 네트워크 설계 과정을 통해 각 작전 그룹이 사용할 주파수 도약 패턴과 메시지 전송 방식 등을 수동으로 결정한다. 이때, 네트워크 설계를 위해서 메시지 에러 확률, 동시 사용 가능한 net의 최대 개수와 같은 파라미터가 결정되어 있어야 한다. 그러나 스펙트럼 공유로 인한 복잡한 간섭 문제를 고려하면서 네트워크 설계에 필요한 파라미터를 결정할 수 있는 분석 모델이 부재하다. 따라서 본 논문에서는 스펙트럼 공유 환경에서 네트워크 설계에 필요한 파라미터를 제공할 수 있는 멀티넷 성능 분석 모델을 제안하였다. 멀티넷 성능 분석을 위해 전술 메시지 구조 및 전송 방식을 제시하였고, 제안한 멀티넷 성능 분석 모델을 통해 메시지 에러 확률 및 간섭에 따라 동시 사용 가능한 net의 최대 개수와 같이 네트워크 설계에 필요한 파라미터를 제공할 수 있었다.

Key Words : Frequency hopping, Link-16, Multinet, Spectrum sharing, Unmanned aerial vehicle

ABSTRACT

In battlefield, nodes share tactical messages through tactical data links for operations. The network uses frequency hopping technique because it cannot perform operations when the network is paralyzed by jamming. It also supports multinet consisting of multiple frequency hopping patterns so that multiple operations can be performed simultaneously. Recently, there are studies to use UAV as tactical network infrastructure. However, frequency hopping technique requires wide bandwidth, so it is reasonable to use spectrum sharing. In tactical networks, frequency hopping patterns and transmission methods are determined manually through network design, before the network begins. At this time, parameters such as message error probability and the maximum number of simultaneously usable nets should be determined for network design. However, there is

* 본 연구는 2022년 (재)동일문화장학재단 학술연구비 지원으로 수행되었음.

• First Author : Kyungpook National University, School of Computer Science and Engineering, nelouyou@knu.ac.kr, 종신회원
논문번호 : 202205-091-0-SE, Received April 29, 2022; Revised June 10, 2022; Accepted June 16, 2022

no analysis model to determine these parameters, considering complex interference problem caused by spectral sharing. In this paper, we propose a multinet performance analysis model to provide these parameters for network design in a spectrum-sharing environment. We present a message structure and transmission method for multinet performance analysis and can provide parameters for network design.

1. 서 론

전술 네트워크에서는 작전에 참여하는 모든 플랫폼이 자신의 위치나 상태 정보를 전술데이터링크를 통해 공유하고 전장의 상황을 인지하며 작전을 수행한다.

우리 군에서는 다양한 전술데이터링크들을 운영하고 있다. 현재 운용중인 체계들은 공군 중심의 Link-16^[1], 해군 중심의 위성 ISDL(Inter-Site Data Link)과 Link-11, 육군 중심의 KVMF(Korea Variable Message Format) 등이 있다^[2]. 또한, 해군에서는 Link-11의 노후화로 미국의 Link-22 도입을 추진하고 있으며, 국내 기술력으로 한국형 합동전술데이터링크인 Link-K 완성형을 개발하고 있다^[2].

미래전에서는 분산된 환경에서 각 소규모 부대마다 각각의 전술 네트워크를 운용할 수 있는 전술데이터링크 기술이 필요하다. 미래에는 육상, 해상, 공중, 우주, 사이버 등 다양한 환경에서 동적으로 전쟁이 벌어지고, 전면전뿐만 아니라 국지전 형태로 지엽적으로 다양한 곳에서 동시다발적으로 전투가 벌어질 것으로 예상되기 때문이다. 그러나 현재 운용중인 전술데이터링크들은 각 군 작전, 합동작전, 연합작전 등 규모가 큰 작전 수행에 맞도록 설계가 되어 별도로 운용 가능한 전술데이터링크 기술이 필요하다.

최근 이러한 동적 전장 환경에서 운용할 수 있는 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 전술데이터링크에 대한 관심이 증가하고 있다^[3,4]. 초기 군용 UAV는 단말기로서 주로 고화질 영상을 촬영하고 감시 및 정찰 임무를 수행하는 데 그쳤으나, 전술 UAV는 신속하게 원하는 곳에 배치할 수 있고, 공중에서 쉽게 LoS(line of sight)를 확보할 수 있어 지상 또는 해상 플랫폼들과 안정적으로 연결할 수 있다는 장점 때문에 점차 역할이 확대되어 전술 네트워크 인프라를 제공하는 형태로 진화하고 있다.

UAV 전술데이터링크는 다음과 같은 요구조건이 필요하다^[4]. 첫 번째, 항재밍 능력을 갖는 웨이브폼이 필요하다. 항재밍 능력을 갖는 웨이브폼은 전장 환경에서 적의 재밍 공격이 존재하더라도 아군 플랫폼 간 전술 메시지 교환이 가능하도록 하며 주로 주파수 도약 기술을 사용한다. Link-16, Link-22, 그리고

Link-K 완성형 등 대부분의 전술데이터링크들이 주파수 도약 웨이브폼을 사용하고 있다. 그러나 주파수 도약 웨이브폼은 넓은 주파수 대역폭이 필요하므로 전용 주파수를 할당하기 어렵다. 특히, 다수의 소규모 부대에서 각자 전술 UAV 네트워크를 운영할 경우를 고려하면 전용 주파수 할당은 거의 불가능하다. 따라서 스펙트럼 공유 기술을 통해 주파수 자원을 확보하는 것이 합리적이다. 두 번째, 동시에 다수의 작전이 별도로 수행될 수 있도록 지원하는 멀티넷 구조가 필요하다. 멀티넷 구조는 여러 개의 net으로 구성된 구조로서, 각 net은 하나의 주파수 도약 패턴으로 정의되고 동시에 여러 개의 net이 각 작전 그룹에 할당되어 동시에 다수의 작전이 수행될 수 있도록 한다. 그러나 다중 주파수 도약 패턴 사용 시 도약 패턴 간 주파수 충돌로 인한 간섭이 발생할 수 있다. 이를 다중 접속 간섭(MAI: multiple access interference)이라고 한다. 결론적으로 멀티넷 구조는 MAI가 발생하기 때문에 동시에 사용 가능한 net의 개수가 제한된다. 예를 들어, Link-16의 경우에는 127개의 nets으로 구성된 멀티넷 구조를 가지고 있으나, MAI로 인해 이론적으로 동시에 사용 가능한 net의 개수는 20개 정도로 제한된다^[5].

전술데이터링크는 네트워크가 시작하기 전에 네트워크 설계를 통해 작전 전문가들과 기술 전문가들이 모여 수행할 작전에 따라 작전 그룹을 결정하고, 수동으로 이들이 전술 정보를 교환하기 위한 net, 타임슬롯, 전송 방식인 메시지 패킹 구조를 결정한다. 이렇게 결정된 정보는 각 플랫폼에 프로그램으로 로딩되고 실행되면서 네트워크가 시작된다.

따라서 네트워크 설계에 앞서, 메시지 에러 확률(MEP: message error probability), 동시 사용 가능한 net의 최대 개수와 같은 파라미터를 결정할 수 있는 멀티넷 성능 분석 모델이 필요하다. 전술 네트워크에서는 요구조건에 따라 1% 이하의 MEP를 보장해야 하고, 각 작전 그룹에 net을 수동으로 할당하려면 동시 운용 가능한 net의 최대 개수를 알아야 하기 때문이다.

이러한 파라미터는 primary user(PU)로 인한 간섭, 다중 주파수 도약 패턴 사용으로 인한 간섭인 MAI,

그리고 메시지 전송 방식에 따라 달라진다. 그러나 대부분의 기존 전술데이터링크 성능 분석 모델⁵⁻⁷에 관한 연구들은 이러한 파라미터를 결정할 수 있는 성능 분석 모델을 제시하지 못하였으며, 대부분의 연구가 스펙트럼 공유가 아닌 전용 주파수를 사용하는 환경이기 때문에 PU로 인한 간섭은 고려하지 못하였다는 한계가 있다. [4]는 스펙트럼 공유 환경에서 PU의 간섭을 고려하여 WFH (Weighted frequency hopping) 기법을 제안하였다. WFH는 PU가 사용하는 대역과 사용하지 않는 휴면 대역을 구분하여 도약 패턴 생성 시 weight를 주어 두 대역의 패턴 발생 빈도를 차별화하였다. 그러나 제안한 성능 분석 모델은 WFH의 펄스 충돌 확률만 분석할 수 있고, MEP나 동시 사용 가능한 net의 최대 개수와 같이 네트워크 설계에 필요한 파라미터를 결정할 수 없다. 결론적으로 기존 성능 분석 모델들은 UAV 전술데이터링크의 네트워크 설계에 필요한 파라미터를 결정할 수 없다.

본 논문에서는 기존 성능 분석 모델의 한계를 극복할 수 있도록 전술 메시지 구조 및 전송 방식을 제시하고, 네트워크 설계에 필요한 파라미터들을 결정할 수 있는 멀티넷 성능 분석 모델을 제안한다. 환경은 [4]와 동일하게 X-Band 위성 업링크 대역을 공유하고, X-Band 위성 업링크 자원 사용 현황을 인지하고 있으며, PU에 주는 간섭은 없고, PU로부터의 간섭은 무조건 펄스 충돌로 간주하는 환경으로 고려하였다. 그리고 [4]와 차별화하여 전술 메시지 구조와 전송 방식을 제시하고 PU의 간섭량에 따라 MEP를 계산할 수 있는 멀티넷 성능 분석 모델을 제시하였다. 또한, MEP를 기준으로 동시 운용 가능한 net의 최대 개수를 분석한 테이블을 제공하였다. 결론적으로 본 논문에서 제안한 멀티넷 성능 분석 모델을 통해 PU의 간섭량을 고려하여 스펙트럼 공유 시 UAV 전술데이터링크의 네트워크 설계에 반드시 필요한 파라미터인 MEP와 동시 운용 가능한 net의 최대 개수를 결정할 수 있었다. 따라서 제안한 멀티넷 성능 분석 모델은 향후 전술 UAV 네트워크 운용을 위한 네트워크 설계에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 관련 연구

본 장에서는 기존의 전술데이터링크 성능 분석 모델에 대해 다룬다. 특히, [4]에서 제안한 스펙트럼 공유 기반 주파수 도약 기법인 WFH 기법을 소개하고, [4]에서 제안한 성능 분석 모델의 한계점에 대해 설명한다.

기존의 전술데이터링크 성능 분석 모델은 다음과 같다. [5]에서는 Link-16의 주파수 도약 기법의 항재밍 능력을 평가하기 위해 부분 대역 재밍 하에 심볼 에러율을 분석하였다. [6]에서는 Link-16의 주파수 remapping 이슈를 고려하여 채널의 개수가 줄어들었을 때의 멀티넷 성능을 분석하였고, 동시에 더 많은 net을 사용할 수 있는 그룹 기반 주파수 도약 기법을 제안하였다. 그러나 [5]와 [6]의 환경은 전용 대역이 할당된 환경으로 분석 모델이 스펙트럼 공유 시 복잡한 간섭 문제를 고려하지 않고 있다. 따라서 동시 사용 가능한 net의 최대 개수를 분석하기 어렵다. [7]에서는 L-밴드 레이더 대역을 공유하여 Link-16 채널로 운용 시 멀티넷의 성능을 평가하였다. 그러나 레이더 대역을 그대로 사용하여 주파수 도약을 하는 것 외에 레이더로부터의 간섭을 줄일 수 있는 방법은 제시하지 않았다. 또한, Link-16이 레이더로 주는 영향은 고려하지 않아 현실적으로 대역을 공유하기에는 한계가 있다.

WFH 기법⁴은 UAV 전술데이터링크의 대역 확보를 위해 X-Band 위성 업링크 대역인 7.9-8.4 GHz를 공유하는 주파수 도약 기법이다. 네트워크의 형태는 그림 1과 같이 PU는 X-Band 위성과 ES(Earth station)로 구성되어 있고, 전술 UAV 네트워크를 구성하는 지상 노드들과 UAV가 WFH 기법을 사용한다. 모든 지상 노드들은 UAV에 안정적으로 연결되어 있다고 가정하였다.

그림 1에서 간섭 시나리오는 ①과 ②는 각각 UAV나 지상 노드들이 X-Band 위성으로 주는 간섭이고, ③과 ④는 ES가 각각 UAV나 지상 노드들로 주는 간섭을 나타낸다. [4]에서는 ①과 ②는 사실상 거의 영향이 없음을 입증하였고, ③과 ④는 worst case로 고려하여 UAV나 지상 노드의 위치와 상관없이 주파수가 겹치면 무조건 충돌로 간주하였다. 본 논문에서도

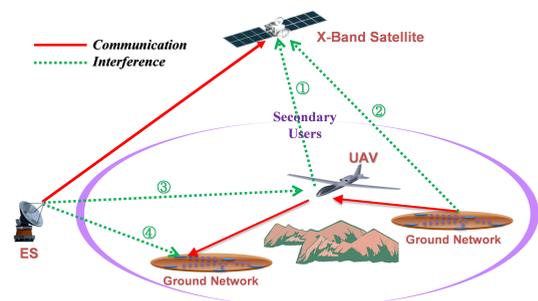


그림 1. X-Band 업링크와 전술 UAV 네트워크 간 간섭
Fig. 1. Interferences between X-Band uplink and tactical UAV network

동일한 조건으로 성능을 분석하였다.

그림 2는 X-Band 위성 업링크의 위성 채널과 위성 슬롯 구조이다. 총 대역폭은 다수의 위성 채널이 있고 위성 채널 간 간섭을 피하기 위해 가드 밴드(G)를 두었다. 그리고 위성 채널은 사용 중(busy)이거나 휴면(idle)일 수 있다. 그리고 위성 채널은 시간 축에서 여러 개의 슬롯으로 나누어지는데, 사용 중인 위성 채널은 사용 중인 busy 슬롯과 휴면 중인 idle 슬롯으로 나누어진다. 그리고 busy 슬롯은 데이터 전송에 사용되는 busy duration과 다음 슬롯과 충돌을 방지하기 위한 idle duration으로 구성된다.

그림 3은 UAV 전술데이터링크에서 X-Band 업링크 대역을 공유하여 채널과 멀티넷을 구성하는 방법을 나타낸다. B_{Total} 은 X-Band 업링크 대역폭이고, B_{SAT} , B_G , B_{TDL} 은 각각 위성 채널 대역폭, 가드 밴드 크기, UAV 전술데이터링크 채널의 대역폭이다. 위성 채널의 개수는 Ch_{SAT} 개이고, 가드 밴드는 $Ch_{SAT} + 1$ 개이다. 그리고 UAV 전술데이터링크는 X-Band 업링크 대역 전체를 γ 개의 UAV 전술데이터링크 채널로 나눈다. 상대적으로 UAV 전술데이터링크 채널 크기가 작기 때문에 위성 채널이나 가드 밴드에 다수 포함되는 형태가 된다. 위성 채널에 포함되는 채널 수는 γ_{SAT} 이고, 가드 밴드에 포함되는 채널 수는 γ_G 이다. 이들은 각각 $\gamma_{SAT} = \lfloor B_{SAT}/B_{TDL} \rfloor$ 과 $\gamma_G = \lfloor B_G/B_{TDL} \rfloor$ 으로 구한다. 이때 PU가 사용하지 않는 대역에 포함된 γ_I 는 $\gamma_I = \gamma_G \times (Ch_{SAT} + 1) + \gamma_{SAT} \times Ch_{SAT,I}$ 와 같이 구할 수 있다. 여기에서 $Ch_{SAT,I}$ 는 위성 채널 중 idle 채널의 개수를 의미한다. 그리고 PU가 사용하는 대역에 포함된 채널 수 γ_B 는 $\gamma_B = \gamma_{SAT} \times Ch_{SAT,B}$ 와 같이

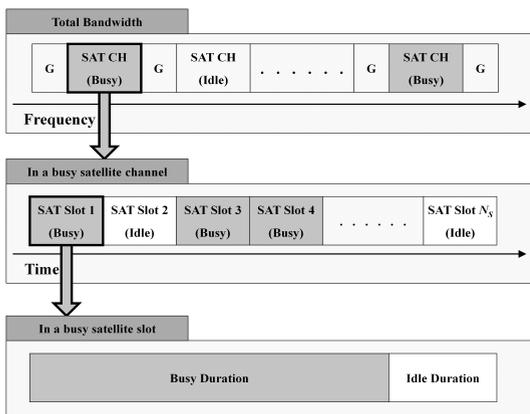


그림 2. 위성 채널과 위성 슬롯의 구조
Fig. 2. Structure of satellite channel and satellite slot

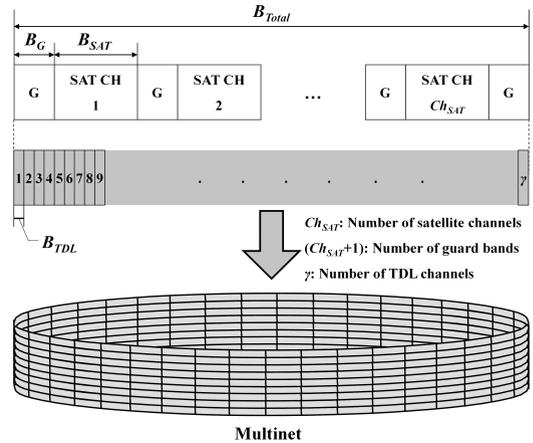


그림 3. X-Band 업링크 스펙트럼 공유를 통한 UAV 전술데이터링크 채널과 멀티넷 구성
Fig. 3. Configuring UAV tactical data link channels and multinet through X-Band uplink spectrum sharing

구할 수 있다. 여기에서 $Ch_{SAT,B}$ 는 위성 채널 중 busy 채널의 개수를 의미한다. 결과적으로 γ 는 $\gamma_I + \gamma_B$ 가 된다.

[4]에서는 WFH 기법 사용을 위한 멀티넷 구조까지 제안하였지만, 성능 분석 모델은 멀티넷 성능 분석 모델이 아닌 펄스 충돌 확률 분석 모델을 제시하였다. 따라서 [4]의 성능 분석 모델은 네트워크 설계에 필요한 파라미터인 MEP나 동시 사용 가능한 net의 최대 개수를 제공할 수가 없다는 치명적인 한계점이 있다.

III. 제안하는 WFH기반 멀티넷 성능 분석 모델

본 장에서는 WFH 기반 멀티넷 성능 분석 모델을 제시한다. 이에 앞서, 고려하는 네트워크의 형태, PU의 채널과 슬롯의 구조, 그리고 UAV 전술데이터링크에서 X-Band 업링크 대역을 공유하여 채널과 멀티넷을 구성하는 방법은 각각 그림 1, 그림 2, 그리고 그림 3과 같이 [4]와 동일한 것으로 간주하였다.

멀티넷에서 동시 사용 가능한 net의 최대 개수를 분석하려면 net의 사용 가능성에 대한 기준이 필요하다. [8]에서는 여러 net이 동시에 운용될 때, 각 net에서 메시지의 MEP가 1% 이하여야 동시 사용할 수 있다는 기준을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 WFH 기반 멀티넷에서 사용할 전송 메시지의 구조와 전송 방식을 설명하고, 멀티넷 성능 분석 모델을 제시한다.

3.1 전송 메시지 구조 및 전송 방식

본 논문에서 고려하는 UAV 전술데이터링크의 메

시지 구조는 세계에서 가장 널리 사용되는 전술데이터링크인 Link-16의 J-series 전술 메시지를 참고하였다^[1].

그림 4는 메시지의 Reed-Solomon(RS) 심볼 변환 과정을 설명한 그림이다. 메시지는 헤더(Header)와 팩(Pack)으로 구성된다. Pack은 210 bits이고, 70 bit짜리 word 3개로 구성된다. 각 word는 parity가 5 bits 추가되고, RS(31, 15) 인코딩을 통해 155 bits가 된다. 한 word는 총 31개의 RS 심볼이 된다. 헤더는 15 bits인데, parity가 20 bits 추가되고, RS(16, 7) 인코딩을 통해 80 bits가 되고, 총 16개의 RS 심볼이 된다.

그림 5는 펄스 구조를 나타낸 그림이다. 한 펄스의 길이는 13 μ sec으로 6.4 μ sec 동안 RS 심볼을 전송하고, 6.6 μ sec 동안 다음 채널로 변경한다. 이때, RS 심볼을 한 번만 전송하는 single pulse (SP) 구조와 동일한 심볼을 주파수를 변경하여 한 번 더 전송하는 double pulse (DP) 구조가 있다. DP는 효율이 절반으로 저하되지만, 주파수를 변경하여 두 번 전송하기 때문에 간섭으로 인한 펄스 충돌을 극복할 가능성이 커진다.

그림 6은 4가지 패키징 전략을 나타낸 그림이다. 패

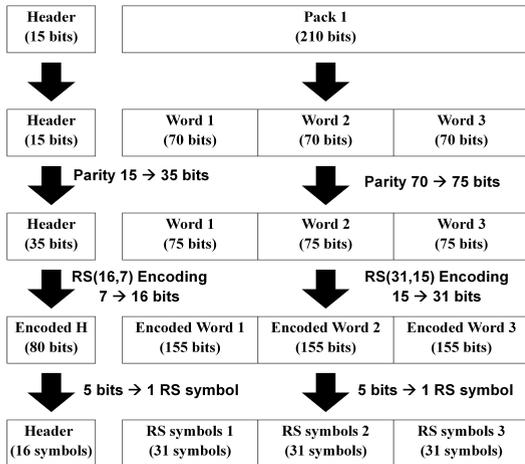


그림 4. 메시지의 RS 심볼 변환 과정
Fig. 4. RS symbols conversion process of a message

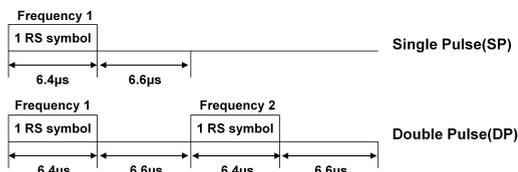


그림 5. 펄스 구조
Fig. 5. Pulse Structure

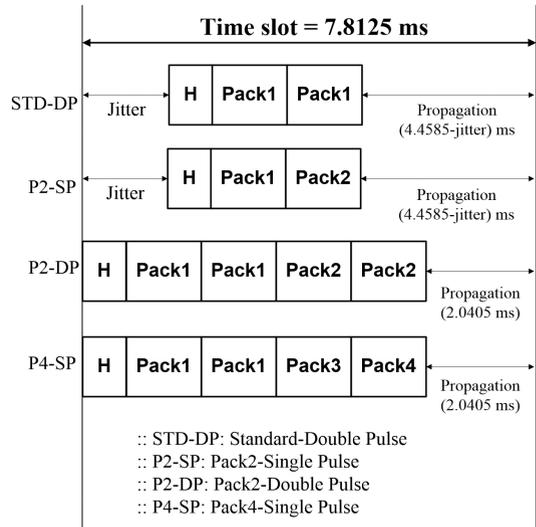


그림 6. 패키징 전략
Fig. 6. Packing strategy

키 전략이란 7.8125 ms 길이의 타임 슬롯 동안에 메시지를 전송하는 방식으로 STD-DP, P2-SP, P2-DP, 그리고 P4-SP가 있다. STD-DP는 기본 방식으로 1 pack(= 210 bits)의 정보를 전송하는 방식으로 DP를 사용하여 1 pack을 두 번 보내는 방식이다. P2-SP는 2 pack을 전송하고 SP를 사용한다. P2-DP는 동일하게 2 pack을 전송하나, 앞의 jitter 구간을 제외하여 확보한 시간을 활용하여 2 pack을 한 번 더 전송하는 DP를 사용한다. 마지막으로 P4-SP는 제일 많은 데이터를 보내는 방식으로 4 pack을 SP로 전송한다. 참고로 메시지 헤더는 안정성을 고려하여 무조건 DP로 전송한다.

본 논문에서는 [4]와 동일하게 X-Band 업링크의 위성 채널과 위성 슬롯의 사용 현황이 UAV 전술데이터링크의 네트워크 설계 단계에 사전에 공유가 되고, 운영 중에는 변동되지 않는다고 가정하였다.

3.2 WFH 기반 멀티넷 성능 분석 모델

네트워크 설계에서 가장 필요한 파라미터는 MEP와 동시 사용 가능한 net의 최대 개수이다. 스펙트럼 공유로 인해 PU의 간섭이 발생하고, 멀티넷 사용으로 인해 MAI 간섭이 발생하여 이를 모두 고려한 성능 분석 모델이 필요한데, 이를 모두 고려한 성능 분석 모델이 없었다. 특히, PU의 자원 사용 현황에 따른 MEP와 동시 사용 가능한 net의 최대 개수를 분석해야 한다. 또한, 네트워크 설계 과정에서 작전 그룹에 net을 할당해주는 작업 외에도 메시지 전송 방식을 결

정해야 한다. 그림 6과 같이 4가지 패킹 타입 중 하나를 선택해야 하는데, 패킹 구조에 따라 MEP와 동시 사용 가능한 net의 최대 개수가 달라진다. 결론적으로 PU의 자원 사용 현황이 주어진 상태에서 4가지 메시지 패킹 타입에 대한 MEP와 동시 사용 가능한 net의 최대 개수를 분석할 수 있는 멀티넷 성능 분석 모델이 필요하다.

따라서 본 장에서는 PU의 자원 사용 현황을 고려하면서 메시지의 패킹 타입 별로 MEP와 동시 사용 가능한 net의 최대 개수를 파악하는 것을 목표로 하는 WFH 기반 멀티넷 성능 분석 모델을 제안한다. 그리고 동시 사용 가능한 net의 최대 개수 분석 시 각 net의 MEP가 1% 미만을 만족하는 것을 기준으로 하였다⁸⁾.

메시지 에러 확률을 P_M 이라고 하자. 메시지 헤더는 에러가 없다는 가정하에 P_M 을 구하면 다음과 같다.

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

여기에서 P_w 는 word의 에러 확률이고, L 은 펄스 타입을 고려한 변수로 DP와 SP는 각각 2와 1이 된다. P_w 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_w = \sum_{i=t+1}^n \binom{n}{i} P_c^i (1 - P_c)^{n-i} \quad (2)$$

여기에서 P_c 는 펄스 충돌 확률이고, t 는 RS(31, 15) 인코딩된 1개의 word의 복구능력을 고려한 변수이다. 1 word는 RS(31, 15) 인코딩을 통해 31개의 RS 심볼로 변환되고, 각 RS 심볼은 1개의 펄스로 전송된다. 펄스 충돌이 발생하여도 31개 중 8개의 심볼까지 복구가 가능하기 때문에 t 를 8로 하고, n 을 31로 하여 9개부터 31개 심볼까지 에러가 발생한 경우를 모두 누적하여 P_w 를 구할 수 있다. 펄스 충돌 확률 P_c 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_c = P_{c,I} + P_{c,B} \quad (3)$$

$P_{c,I}$ 는 임의의 유저 v 가 idle한 위성 채널 γ_I 개 중 하나로 펄스를 전송했다가 충돌한 확률이고, $P_{c,B}$ 는 임의의 유저 v 가 busy한 위성 채널 γ_B 개 중 하나로 펄

스를 전송했다가 충돌한 확률이다. 우선 $P_{c,I}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{c,I} = \mu \times \sum_{i=0}^{\Omega-1} P_{I,MAI}(i) \quad (4)$$

이때 μ 는 주파수 도약 패턴에서 전체 채널 등장 수 대비 채널 등장 수의 비율을 나타내고, $P_{I,MAI}(i)$ 는 임의의 유저 v 의 펄스가 i 명의 user의 펄스와 충돌할 확률이다. $P_{I,MAI}(i)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{I,MAI}(i) = \binom{\Omega-1}{i} \mu^i (1-\mu)^{\Omega-i-1} \times \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\gamma_I}\right)^i\right) \quad (5)$$

그리고 $P_{c,B}$ 는 다음과 표현할 수 있다.

$$P_{c,B} = P_{c,B,1} + P_{c,B,2} + P_{c,B,3} \quad (6)$$

여기에서 $P_{c,B,1}$ 은 유저 v 가 전송한 펄스가 busy한 위성 슬롯의 busy duration과 충돌할 확률이고 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{c,B,1} = (1-\mu)(1-\alpha)(1-\beta) \quad (7)$$

그리고 $P_{c,B,2}$ 는 유저 v 가 전송한 펄스가 busy한 위성 슬롯의 idle duration에 잘 전송되었으나, 다른 user와 MAI로 인해 충돌이 발생할 확률이다. $P_{c,B,2}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{c,B,2} = (1-\mu)(1-\alpha)\beta \times \sum_{i=0}^{\Omega-1} \left\{ \binom{\Omega-1}{i} (1-\mu)^i \mu^{\Omega-1-i} \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\gamma_B}\right)^i\right) \right\} \quad (8)$$

그리고 $P_{c,B,3}$ 는 유저 v 가 전송한 펄스가 idle한 위성 슬롯에 전송되었으나, 다른 user와 MAI로 인해 충돌이 발생할 확률이다. $P_{c,B,3}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{c,B,3} = (1-\mu)\alpha \times \sum_{i=0}^{\Omega-1} \left\{ \binom{\Omega-1}{i} (1-\mu)^i \mu^{\Omega-1-i} \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\gamma_B}\right)^i\right) \right\} \quad (9)$$

IV. 수치적 결과

본 장에서는 성능 분석 모델의 수치적 결과를 다룬다. 표 2는 결과 획득을 위해 사용한 파라미터 값을 정리한 표이다.

그림 7은 α 와 β 가 0일 때, net 수에 따른 메시지 에러 확률을 나타낸 그림이다. 그림 7(a)는 μ 가 0.9이고, 그림 7(b)는 μ 가 1.0일 때의 그래프이다. 두 그래프를 비교해보면, μ 가 0.9일 때보다 1.0일 때 PU로 인한 펄스 충돌이 감소하여 P_M 이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 두 그래프 모두 idle한 위성 채널의 수가 증가할수록 동일한 Ω 에서 P_M 이 낮게 나오는 경향을 보였다. 이는 PU에 영향을 받지 않는 UAV 전술데이터링크 채널 수가 증가하여 MAI가 현저히 감소하기 때문이다. 그리고 4가지 패킹 타입에서도 성능 차이가 나타나는데, STD-DP의 경우가 가장

표 1. 성능 분석을 위한 변수들
Table 1. Description of variables for performance analysis

변수	설명
BTotal	총 대역폭
BSAT	위성 채널 대역폭
BG	가드 밴드 대역폭
BTDL	UAV 전술데이터링크 채널 대역폭
ChSAT	위성 채널 개수
ChSAT,I	위성 채널 중 idle 채널의 개수
ChSAT,B	위성 채널 중 busy 채널의 개수
γ	UAV 전술데이터링크 채널의 개수
γ_{SAT}	위성 채널에 대응되는 UAV 전술데이터링크 채널의 개수
γ_G	가드 밴드에 대응되는 UAV 전술데이터링크 채널의 개수
γ_I	Idle한 위성 채널에 대응되는 UAV 전술데이터링크 채널의 개수
γ_B	Busy한 위성 채널에 대응되는 UAV 전술데이터링크 채널의 개수
Ω	net의 개수
TS	위성 슬롯의 길이
TS,I	위성 슬롯 내 idle duration의 길이
α	Busy한 위성 채널에서 총 슬롯 중 idle 슬롯 개수에 대한 비율
β	위성 슬롯 길이 중 idle duration의 길이 비율 (= TS,I / TS)
μ	주파수 도약 패턴에서 전체 γ 채널 등장 수 대비 γ_I 채널 등장 수의 비율

표 2. 파라미터 값
Table 2. Parameter values

파라미터	값
BTotal	500 MHz
BSAT	50 MHz
BG	11 MHz (9개)
BTDL	3 MHz
ChSAT	8개
ChSAT,I	0개, 4개, 8개
γ	155개
Ω	1 - 50
α	0, 0.2, 0.4
β	0, 0.1, 0.2
μ	0.9, 1.0

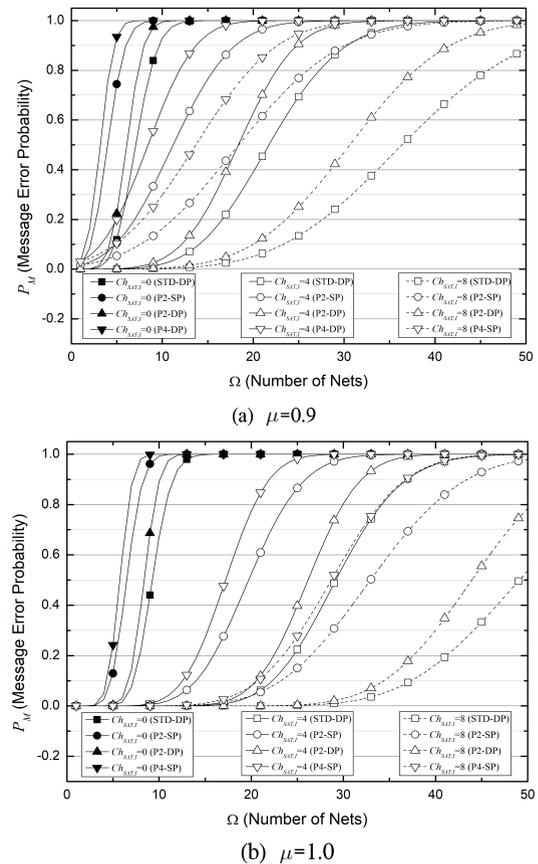


그림 7. Net 수에 따른 메시지 에러 확률 ($\alpha=0, \beta=0$)
Fig. 7. Message error probability according to number of nets ($\alpha=0, \beta=0$)

좋은 성능을 보이고, 그 뒤로 P2-DP가 우수한 성능을 보인다. 그 이유는 DP를 사용하여 펄스 충돌을 극복할 가능성이 커졌기 때문이다.

표 3은 그림 7에서 나온 성능을 가지고 P_M 1% 이

표 3. 동시 운용 가능한 net의 개수 ($\alpha=0, \beta=0$)
 Table 3. Number of simultaneously usable nets ($\alpha=0, \beta=0$)

$Ch_{SAT,I}$	μ	STD-DP		
		P2-SP		
0	0.9	STD-DP	3	
		P2-SP	0	
		P2-DP	2	
		P4-SP	0	
0	1.0	STD-DP	5	
		P2-SP	3	
		P2-DP	5	
		P4-SP	3	
4	0.9	STD-DP	8	
		P2-SP	0	
		P2-DP	7	
	4	1.0	P4-SP	0
			STD-DP	17
			P2-SP	9
8	0.9	P2-DP	16	
		P4-SP	9	
		STD-DP	13	
	8	1.0	P2-SP	0
			P2-DP	11
			P4-SP	0
8	1.0	STD-DP	28	
		P2-SP	16	
		P2-DP	27	
		P4-SP	14	

내를 만족하면서 동시에 최대로 운용 가능한 net의 개수를 도출한 결과이다. Idle한 위성 채널이 증가할수록 net의 개수가 증가하였고, 동일한 idle한 위성 채널 수에서는 μ 가 1.0일 때가 0.9일 때보다 net의 개수가 증가하였다. 그 이유는 idle한 위성 채널이 증가해야 WFH 기법이 PU의 간섭없이 도약할 수 있는 채널 수가 늘어나서 PU의 간섭과 MAI가 모두 줄어들기 때문이다. 그리고 STD-DP와 P2-DP 등 DP가 SP보다 성능이 우수하였으며, STD-DP가 가장 좋은 성능을 보였는데, 그 이유는 DP가 동일한 RS 심볼을 두 번 전송하면서 효율성을 포기하는 대신 MEP 측면에서 이득을 얻었기 때문이다. 즉, 동일한 7.8125 ms의 타임 슬롯 동안 STD-DP는 가장 작은 메시지인 210 bits를 안정적으로 전송하는 것이고, P4-SP는 가장 큰 메시지인 840 bits를 전송하는 대신에 재밍에 취약하게 되는 것이다. 또한, WFH 기법은 idle한 위성 채널이 0개인 열악한 경우에도 μ 가 1.0일 때 동시 사용 가능한 net의 개수가 최대 5개까지는 확보가 되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 8은 μ 가 0.9이고 β 가 0일 때, net 수에 따른 메시지 에러 확률을 나타낸 그림이다. 그림 8(a)는 α 가 0.2이고, 그림 8(b)는 α 가 0.4일 때의 그래프이다.

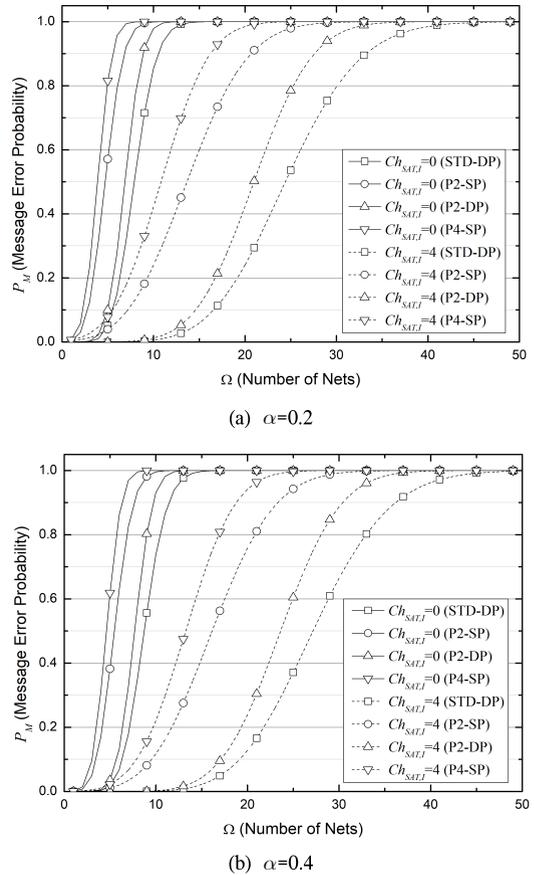


그림 8. Net 수에 따른 메시지 에러 확률 ($\mu=0.9, \beta=0$)
 Fig. 8. Message error probability according to number of nets ($\mu=0.9, \beta=0$)

두 그래프를 비교해보면, 동일한 Ω 에서 α 가 클수록 idle한 위성 슬롯이 많아서 PU로 인한 펄스 충돌이 감소하여 P_M 이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 WFH 기법이 PU가 사용하는 대역과 사용하지 않는 대역을 구분하여 주파수 도약을 하는데, PU가 사용하는 대역으로 구분되어 있으나 위성의 타임 슬롯이 idle한 경우에는 WFH 기법에 간섭을 않는다. α 가 크다는 것은 idle한 타임 슬롯의 개수가 많다는 것을 의미하기 때문에, α 가 0.4인 경우가 0.2인 경우보다 MEP 측면에서 성능이 우수한 것이다.

표 4는 그림 8에서 나온 성능을 가지고 P_M 1% 이내를 만족하면서 동시에 최대로 운용 가능한 net의 개수를 도출한 결과이다. Idle한 위성 채널이 0개일 때보다 4개일 때 동시 운용 가능한 net의 개수가 더 많았고, 동일한 idle한 위성 채널 수에서는 α 가 0.4일 때보다 0.2일 때 더 많았다. 이는 α 가 0.4일 때 idle

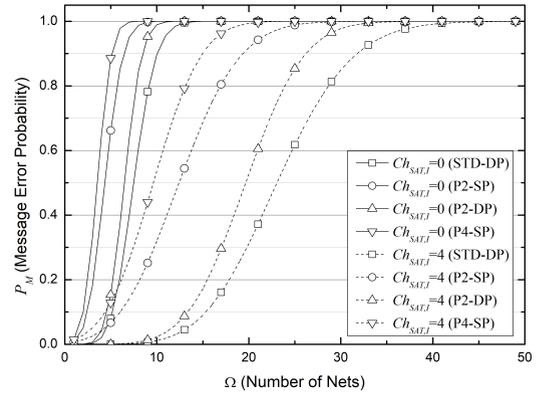
표 4. 동시 운용 가능한 net의 개수 ($\mu=0.9, \beta=0$)
Table 4. Number of simultaneously usable nets ($\mu=0.9, \beta=0$)

$Ch_{SATI} = 0$	$\alpha = 0.2$	STD-DP	3
		P2-SP	1
		P2-DP	3
		P4-SP	1
	$\alpha = 0.4$	STD-DP	4
		P2-SP	2
		P2-DP	4
$Ch_{SATI} = 4$	$\alpha = 0.2$	STD-DP	10
		P2-SP	2
		P2-DP	9
		P4-SP	1
	$\alpha = 0.4$	STD-DP	13
		P2-SP	4
		P2-DP	12
		P4-SP	3

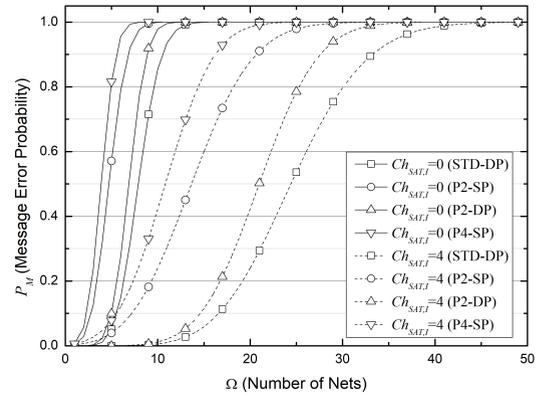
위성 슬롯이 더 많기 때문에 PU로 인한 충돌이 감소하여 나타난 결과이다. 그리고 idle한 위성 채널이 0개 이고 α 가 0.2로 매우 열악한 환경에서도 STD-DP 방식으로 전송하면 최대 3개의 net까지 운용할 수 있음을 확인하였다.

표 5. 동시 운용 가능한 net의 개수 ($\mu=0.9, \alpha=0$)
Table 5. Number of simultaneously usable nets ($\mu=0.9, \alpha=0$)

$Ch_{SATI} = 0$	$\beta = 0.1$	STD-DP	3
		P2-SP	1
		P2-DP	3
		P4-SP	0
	$\beta = 0.2$	STD-DP	3
		P2-SP	1
		P2-DP	3
$Ch_{SATI} = 4$	$\beta = 0.1$	STD-DP	9
		P2-SP	1
		P2-DP	8
		P4-SP	0
	$\beta = 0.2$	STD-DP	10
		P2-SP	2
		P2-DP	9
		P4-SP	1



(a) $\beta=0.1$



(b) $\beta=0.2$

그림 9. Net 수에 따른 메시지 에러 확률 ($\mu=0.9, \alpha=0$)
Fig. 9. Message error probability according to number of nets ($\mu=0.9, \alpha=0$)

그림 9는 μ 가 0.9이고 α 가 0일 때, net 수에 따른 메시지 에러 확률을 나타낸 그림이다. 그림 9(a)는 β 가 0.1이고, 그림 9(b)는 β 가 0.2일 때의 그래프이다. 두 그래프를 비교해보면, 동일한 Ω 에서 β 가 클수록 P_M 이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 β 가 클수록 위성 슬롯 내 idle duration 구간이 길어져서 PU로 인한 펄스 충돌이 감소하기 때문이다. 그러나 β 에 따른 성능의 차이는 크지 않았다.

표 5는 그림 9에서 나온 성능을 가지고 P_M 1% 이내를 만족하면서 동시 최대로 운용 가능한 net의 개수를 도출한 결과이다. β 가 클수록 P_M 이 낮아지기 때문에 동시 사용 가능한 net의 개수가 증가하였으나, 성능 차이가 크지는 않았다. 그런데도 idle한 위성 채널이 없고 β 가 0.1인 열악한 상황에서 STD-DP 방식으로 전송하면 최대 3개의 net까지 운용할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 스펙트럼 공유 환경에서 전술 UAV 네트워크 설계에 필요한 파라미터인 MEP와 동시 운용 가능한 net의 최대 개수를 제공할 수 있는 WFH 기반 멀티넷 성능 분석 모델을 제안하였다. 제안한 성능 분석 모델을 통해 PU의 스펙트럼 사용 현황이 주어졌을 때, 메시지의 4가지 패킹 타입의 MEP를 계산할 수 있었으며, MEP 1%를 기준으로 동시 운용 가능한 net의 최대 개수를 정량화할 수 있었다. 결론적으로 제안한 WFH 기반 멀티넷 성능 분석 모델은 스펙트럼 공유 환경에서 PU의 자원 사용 현황을 고려하여 네트워크 설계에 필요한 파라미터를 제공할 수 있으며, 향후 전술 UAV 네트워크 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] Northrop Grumman Corporation Information Technology Communication & Information Systems Division, "Understanding Link-16: A Guidebook for New Users," *NCTSI*, pp. 5.47-5.49, San Diego, CA, Sep. 2001.

[2] H. Baek, S. Jeong, and J. Lim, "Trends of tactical data link technologies for network centric operations," *Commun. of the KIISE*, vol. 28, no. 7, pp. 59-69, Jul. 2010.

[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. (<http://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700259>)

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

[5] H. Noh, J. Kim, J. Lim, J. Nam, and D. Jang, "Anti-jamming performance analysis of link-16 waveform," *J. KICS*, vol. 38, no. 11, pp. 955-965, Nov. 2013.

[6] J. Yu, K. Lee, H. Baek, J. Lim, J. Kim, and H. Choi, "Group-based frequency hopping scheme for improving multi-net performnce

of link-16 waveform with limited frequency band," *J. KICS*, vol. 41, no. 1, pp. 110-121, Jan. 2016.

(<https://doi.org/10.7840/kics.2015.41.1.110>)

[7] S. Choi, J. Yu, J. Lim, H. Baek, J. Kim, and H. Choi, "The multi-net performance evaluation of link-16 in the 1-band sharing with radars," *J. KICS*, vol. 41, no. 7, pp. 738-746, Jul. 2016.

(<https://doi.org/10.7840/kics.2016.41.7.738>)

[8] P. S. Rempfer, "Link 16 operations for the air force wing and unit manager," *The MITRE Corporation*, pp. 2-11, Oct. 1999.

백 호 기 (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, UAV 통신네트워크, V2X, IoT, 국방전술네트워크, 시간동기, 위치인식

[ORCID:0000-0001-9213-7845]