

제한된 주파수 대역에서 Link-16 웨이브폼의 멀티넷 성능 향상을 위한 그룹 기반의 주파수 도약 방식

유 제 풍*, 이 규 만*, 백 호 기**, 임 재 성°, 김 중 성***, 최 효 기****

Group-Based Frequency Hopping Scheme for Improving Multi-Net Performance of Link-16 Waveform with Limited Frequency Band

Jungpung Yu*, Kyuman Lee*, Hoki Baek**, Jaesung Lim°, Jongsung Kim***, Hyogi Choi****

요 약

Link-16은 현재 미 공군 및 북대서양 조약기구 (NATO : North Atlantic Treaty Organization)에 의해 운용되고 있는 대표적인 전술데이터링크 (TDL : Tactical Data Link)이며 멀티넷 구조를 지원한다. 이러한 멀티넷 환경에서는 Link-16의 단말 노드들이 동시에 전체 대역에서 도약함으로써 작전을 효과적으로 수행할 수 있다. 최근 항공 교통량이 급증함에 따라 이를 수용하기 위해 새로운 항공 시스템을 도입하거나 기존의 시스템을 확충해야 하며 이러한 시스템을 운용하기 위해 할당되어야 할 주파수 대역이 부족한 상황이다. 이를 해결하기 위해 Link-16에서 사용하는 주파수 대역의 재분배 계획이 예정되어 있다. 재분배 계획이 수행되어 Link-16의 운용을 위한 주파수 대역이 제한될 경우 Link-16에서 다중 접속 간섭 발생률이 증가하게 되므로 멀티넷 성능 저하가 일어날 수 있다. 이로 인해 다양한 군사 작전을 수행하는데 어려움이 따른다. 따라서 본 논문에서는 주파수 부족 현상으로 인해 Link-16 웨이브폼의 멀티넷 성능이 저하되는 문제를 해결하기 위해 그룹 기반의 주파수 도약 방식을 제안하였다. 모의실험을 통해 제안 방식을 사용할 경우 Link-16 웨이브폼의 멀티넷 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

Key Words : Link-16, Link-16 Waveform, Group-based Frequency Hopping (GFH), Multi-net

ABSTRACT

Link-16 is a representative TDL operated by US air force and NATO and supports structure of Multi-net. Under Multi-net, military operation can be conducted effectively since terminal nodes in Link-16 hop over total frequency band simultaneously. As air traffic is rapidly increasing, new aeronautical system is introduced or existing system should be expanded to accommodate increasing air traffic and frequency band assigned for operating this system is scarce. It is scheduled to implement frequency remapping to solve frequency scarcity. With limited frequency band for operating Link-16, as frequency remapping is implemented, degradation of Multi-net performance can happen since multiple access interference in Link-16 is increasing so it is difficult to conduct multiple military operations. Thus, Group-based frequency hopping scheme is proposed to solve this problem. We verified the performance of the proposed scheme is improved.

※ 이 논문은 2015년도 한화탈레스(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.

※ 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2013R1A2A1A01016423).

◆ First Author : Department of Computer Engineering, Ajou University, mecm3355@ajou.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Department of Computer Engineering, Ajou University, jaslim@ajou.ac.kr, 중신회원

* Department of Computer Engineering, Ajou University, mool717@ajou.ac.kr, 학생회원

** Department of Military Digital Convergence, Ajou University, neloyou@ajou.ac.kr, 정회원

*** Department of Joint Tactical Data Link System, Agency for Defense Development, jskim0407@add.re.kr

**** Department of Satellite and Data Link, Hanwha Thales, hyogi.choi@hanwha.com

논문번호 : KICS2015-12-395, Received December 15, 2015; Revised January 3, 2016; Accepted January 4, 2016

I. 서 론

Link-16은 현재 미 공군 및 북대서양 조약 기구 (NATO : North Atlantic Treaty Organization)에 의해 운용되는 대표적인 전술데이터링크이다^[1]. Link-16은 멀티넷 구조를 지원함으로써 전투원들이 동시에 다양한 목적의 군사 작전을 수행하는 것이 가능하며 주파수 도약을 하게 되므로 적군의 전파 교란 공격에 대비할 수 있는 대전자전 능력을 보유하고 있다. 또한 다양한 메시지 패킹 구조에 따라 가변 전송률을 지원함으로써 군사 작전을 유연하게 수행할 수 있다^[2].

최근 항공 교통량이 급증함에 따라 증가되는 항공 교통량을 수용하기 위해 새로운 항공 시스템을 도입하거나 기존의 시스템을 확충해야 한다^[3]. 이러한 시스템을 운용하기 위해 할당되어야 할 주파수 대역이 부족한 상황이므로 기존의 운용되고 있는 시스템의 주파수를 회수하여 재할당하는 것이 필요하다. 이에 따라 항공기 시스템과 같은 주파수 대역에서 운용되고 있는 Link-16에서 사용하는 주파수의 재분배 계획이 예정되어 있으며^[4], 사용하는 주파수 대역이 제한될 것이다.

Link-16에서 동시다중작전을 수행하기 위해 멀티넷으로 운용 시 둘 이상의 단말 노드가 같은 채널을 사용하는 다중 접속 간섭 (MAI : Multiple Access Interference)이 발생되며 향후 Link-16의 재분배 계획이 수행되어 사용하는 주파수 대역이 제한될 경우 MAI 발생률이 증가되므로 멀티넷 성능 저하가 예상된다. 이로 인해 Link-16에서 다양한 군사 작전을 수행하는데 어려움이 따르므로 이러한 문제를 해결하기 위한 연구가 필요하다.

MAI 발생률 감소를 위한 주파수 도약 기법과 관련된 연구가 기존에 수행되었으며 주파수 회전 (FR : Frequency Rolling) 기법과 적응적 주파수 회전 (AFR : Adaptive Frequency Rolling) 기법이 있다^[8-9].

하지만 Link-16이 운용되는 공중 환경은 전파 지연 시간이 매우 길며 Link-16은 초당 약 78,000번의 매우 빠른 주파수 도약을 하므로 Link-16에서 사용하기에 적합하지 않다. 기 제안된 연구에서 MAI 발생률을 감소시키기 위해 채널을 분할하여 분할된 대역에서 주파수 도약을 하는 점을 제안 방식에서 활용하였다.

따라서 본 논문에서는 주파수 부족 현상으로 인해 Link-16 웨이브폼의 멀티넷 성능이 저하되는 문제를 해결하기 위해 그룹 기반의 주파수 도약 방식을 제안하였다. 제안 방식에서는 전체 대역을 소수의 부 채널 그룹으로 분할 후 Link-16의 단말 노드가 부 채널 그

룹에서 도약함으로써 멀티넷 성능 저하의 원인이 되는 MAI를 감소시키고자 하였다. 모의실험을 통해 제안 방식과 랜덤 주파수 도약 방식을 Link-16에서 사용하는 경우 채널의 개수에 따라 MAI로 인한 칩 오류 확률과 메시지 오류 확률을 보임으로써 멀티넷 성능 평가를 수행하였으며 제안 방식의 멀티넷 성능이 기존에 비해 향상되는 것을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Link-16에서 전송되는 웨이브폼을 설명한 뒤 Link-16에서 지원하는 멀티넷 구조와 Link-16의 주파수 도약 방식에 대해 살펴본다. 3장에서는 제안 방식인 그룹 기반의 주파수 도약 방식을 정의한다. 4장에서는 모의실험이 수행된 환경을 설명한다. 5장에서는 모의실험을 통해 제안 방식을 사용할 경우 Link-16 웨이브폼의 멀티넷 성능이 향상되는 것을 확인하였으며 6장에서 결론을 맺는다.

II. Link-16 웨이브폼의 멀티넷

이 장에서는 Link-16 송신기에서 전송되는 웨이브폼의 구성 요소를 나타내며 Link-16에서 동시다중작전 수행을 위해 지원하는 멀티넷 구조와 Link-16의 주파수 도약이 어떻게 수행되는지를 설명한다. 이어 Link-16의 단말 노드가 전체 대역에서 동시에 주파수 도약을 할 경우 송신기에서 발생하는 MAI가 수신기에서 발생하는 메시지 오류 확률에 어떻게 영향을 미치는지를 수식을 이용하여 설명한다.

2.1 Link-16에서 전송되는 웨이브폼

Link-16은 시분할 접속 방식 (TDMA : Time Division Multiple Access)을 지원하고 있으며 7.8125 msec의 타임슬롯 단위로 메시지가 처리된다. Link-16에서 전송되는 메시지는 35 비트의 헤더와 오류 검출을 위한 패리티 비트를 포함한 75 비트의 데이터 워드로 구성된다.

Link-16은 오류 정정을 위해 리드 솔로몬 (RS : Reed Solomon) 기법을 사용하며 헤더는 RS(16, 7), 데이터 워드는 RS(31, 15)로 각각 채널 코드화 되어 있다. 하나의 채널 코드화된 심볼은 5 비트로 구성되어 있다^[5]. 채널 코딩이 완료되면 항재밍 능력을 갖기 위해 5 비트의 RS 심볼은 인터리빙되며 순환코드 천이방식 (CCSK : Cyclic Code Shift Keying) 기법을 통해 32 칩 시퀀스로 확산된다^[6]. 확산된 32 칩의 CCSK 시퀀스와 의사 난수 잡음 (PRN : Pseudo Random Noise) 코드가 합성됨으로써 Link-16은 전송

보안 능력을 가진다. 이어서 확산된 각 칩은 최소 칩이 방식 (MSK : Minimum Shift Keying)을 통해 펄스로 변조된다.

그러므로 32 칩의 CCSK 시퀀스는 6.4 μ sec의 전송 시간을 갖는 펄스로 변조되고 다음 펄스에서 전송되는 심볼과 충돌을 방지하기 위해 전송 후 6.6 μ sec의 휴지 시간을 가지며 이 시간 동안 주파수 도약이 일어난다.

따라서 Link-16의 전송 펄스는 총 13 μ sec의 주기를 갖는다. 마지막으로 각 전송 펄스는 Link-16이 운용되고 있는 969-1206 MHz 대역 내 3 MHz 대역폭을 갖는 51개 채널에서 한 개의 채널을 무작위로 선택하여 전송한다. Link-16의 송신기 구조는 그림 1과 같다.

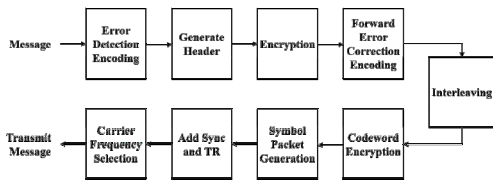


그림 1. Link-16 송신기의 구조
Fig. 1. Structure of Link-16 transmitter

2.2 Link-16의 멀티넷 및 주파수 도약 방식

2.2.1 Link-16의 멀티넷 구조

Link-16에서는 단말 노드의 주파수 도약 패턴에 따라 128개의 넷으로 구분된다. 128개의 넷에서 동일한 용도로 전체 넷을 사용하는 스택 넷을 제외하면 Link-16에서 멀티넷은 127개로 구성되며 0에서 126까지의 넷 번호를 가진다. 또한 Link-16에서 수행되는 작전의 용도에 따라 네트워크 참여 그룹 (NPG : Network Partition Group)이 정의 된다¹¹⁾.

그림 2에서 127개의 넷에 서로 다른 3개의 NPG가 매핑되어 있으며 7번 NPG에서는 감시, 9번 NPG에서는 항공관제, 10번 NPG에서는 전자전이 수행되고 있음을 알 수 있다.

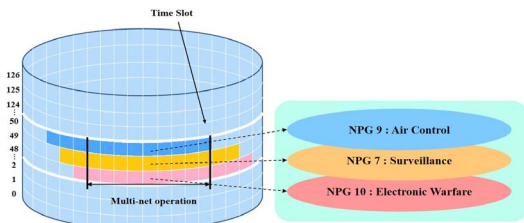


그림 2. Link-16에서 지원되는 멀티넷 구조
Fig. 2. Structure of Multi-net supported in Link-16

따라서 Link-16에서는 127개의 넷에 서로 다른 NPG가 매핑되어 전체 넷을 서로 다른 용도로 사용함으로써 동시에 다양한 작전을 수행할 수 있다.

2.2.2 Link-16의 랜덤 주파수 도약 방식

그림 3에서는 Link-16에서 주파수 도약 방식이 어떻게 수행되는지를 도시하였다. Link-16에서 멀티넷을 운용할 경우 단말 노드는 Link-16이 운용되는 대역 (969-1206 MHz)에서 전체 대역을 공유하며 동시에 주파수 도약을 하게 된다. 그러므로 Link-16의 단말 노드들이 특정 시간에 같은 채널을 사용할 수 있으므로 MAI가 집중적으로 발생할 수 있다. 예를 들어 그림 3과 같이 단말 노드 A는 청색으로 나타난 패턴으로 주파수 도약을 하며 단말 노드 B는 적색으로 나타난 패턴으로 주파수 도약을 한다. Link-16의 단말 노드 A, B에서 사용하는 채널이 다를 경우 MAI가 발생되지 않아 멀티넷 성능이 저하되지 않지만, 사용하는 채널이 같을 경우 MAI가 발생되어 멀티넷 성능이 저하된다.

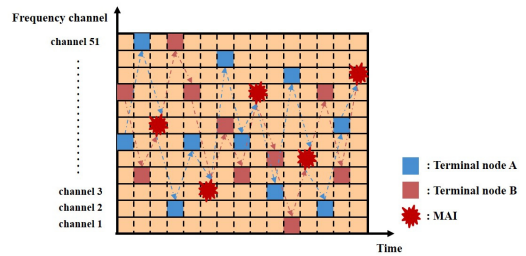


그림 3. Link-16의 랜덤 주파수 도약 방식
Fig. 3. Random frequency hopping scheme in Link-16

2.3 Link-16에서 발생하는 비동기식 MAI

Link-16의 단말 노드들은 동시에 주파수 도약을 하게 되므로 둘 이상의 단말 노드가 같은 채널을 사용할 경우 MAI가 발생되며 이로 인해 멀티넷 성능이 저하된다. MAI는 수신된 신호의 동기 일치 유무에 따라 동기식 MAI와 비동기식 MAI로 나뉜다.

동기식 MAI는 신호가 수신되는 시간을 예측할 수 있으므로 신호의 동기가 일치하는 장점이 있지만 전송되는 펄스의 전 구간에서 MAI가 발생하는 단점이 있다. 한편 비동기식 MAI에서는 전송되는 펄스의 일부 구간에서 MAI가 발생하는 장점이 있지만 신호가 수신되는 시간을 예측할 수 없으므로 신호의 동기가 일치하지 않는 단점이 있다.

Link-16이 운용되는 공중 환경은 송신기와 수신기 간의 거리가 300 NM로 1.852 msec의 매우 긴 전파

지연 시간이 발생하며 주파수 도약 시간은 13 μsec 이므로 전파 지연 시간보다 약 143배 정도 빠르다. 그러므로 Link-16의 송신기에서 동기를 맞춰서 신호를 전송하더라도 수신기에서 신호의 동기가 일치하는 것이 매우 어렵다. 또한 Link-16에서 주파수 패턴에 따라 구분되는 넷의 개수가 채널의 개수보다 많으므로 주파수 도약 패턴이 직교하지 않는다.

따라서 이러한 특성으로 인하여 Link-16의 송신기에서는 그림 4와 같이 비동기식 MAI가 발생된다. 그림 4에서 두 개의 단말 노드가 멀티넷으로 운용되고 있으며 단말 노드에서 전송되는 펄스 간 MAI가 발생하는 모습을 도시하였다. Link-16에서 발생하는 비동기식 MAI 발생률은 동기식 MAI 발생률 보다 2배 더 높으며 Link-16에서 6.4 μsec 의 전송 시간 (T_{DWELL}), 6.6 μsec 의 휴지 시간 (T_{IDLE}), 전체 대역 개수 (N_{TC}) 총 단말 노드의 개수 (N_{NODE})를 고려한 비동기식 MAI 발생률 ($P_{Asynchronous MAI}$)은 수식 (1)과 같다.

$$P_{Asynchronous MAI} = 1 - \left(1 - 2 \times \frac{T_{DWELL}}{T_{DWELL} + T_{IDLE}} \times \frac{1}{N_{TC}} \right)^{N_{NODE} - 1} \approx 1 - \left(1 - \frac{1}{N_{TC}} \right)^{N_{NODE} - 1} \quad (1)$$

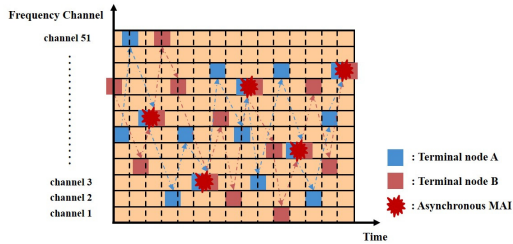


그림 4. Link-16 송신기에서 발생하는 비동기식 다중 접속 간섭
Fig. 4. Asynchronous multiple access interference occurred in Link-16 transmitter

2.4 Link-16에서 발생하는 메시지 오류 확률

Link-16의 수신기에서는 송신기에서 처리되는 과정과 정반대로 이루어지며 MSK 복조, CCSK 복조, RS 디코딩을 통해 원래 신호가 복조된다.

2.4.1 MSK 복조

MSK를 통해 Link-16에서 전송되는 펄스는 칩으로 복조되며 채널 코딩에 따른 코드 비율 (r_c), 확산 코딩에 따른 코드 비율 (r_s)과 수식 (1)에 나타난 송신기에서 발생하는 MAI를 고려한 칩 오류 확률 (P_c)을 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_c = P_{MAI} \times Q \left(\sqrt{\frac{2r_s r_c E_b}{N_0}} \right) \approx \left\{ 1 - \left(1 - \frac{1}{N_{TC}} \right)^{N_{NODE} - 1} \right\} \times Q \left(\sqrt{\frac{10r_s E_b}{32N_0}} \right) \quad (2)$$

$$\left(r_c = \frac{15}{31}, r_s = \frac{5}{32} \right)$$

2.4.2 CCSK 복조

MSK 복조 후 CCSK를 통해 칩은 다시 심볼로 복조되며 칩 오류 개수에 따른 심볼 오류 확률의 상계값 (ζ_{UB})을 고려한 심볼 오류 확률 (P_s)을 수식 (3)과 같이 나타낸다^[7].

$$P_s \leq \sum_{j=0}^{32} \zeta_{UB,32} C_j P_c^j (1 - P_c)^{32-j} \quad (3)$$

2.4.3 RS 디코딩

CCSK 복조 후 RS 디코딩을 통해 RS(n, k) 코드는 $\lfloor (n-2)/2 \rfloor = t$ 개 만큼의 심볼 오류를 정정할 수 있다. Link-16에서는 RS(31, 15) 코드를 사용하므로 8개의 심볼 오류를 정정할 수 있으며 복구된 심볼 오류 확률 (P_{Srs})은 수식 (4)와 같이 나타낸다^[4].

$$P_{Srs} = \frac{1}{n} \sum_{e=L+1}^n e_n C_e P_s^e (1 - P_s)^{n-e} \quad (4)$$

2.4.4 메시지 오류 확률

Link-16에서는 타임슬롯 메시지 단위로 데이터가 처리되며 메시지는 여러 개의 심볼이 모여 형성된다. 심볼 개수 (N_s)에 따른 메시지 오류 확률 (P_{MER})은 수식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{MER} = 1 - (1 - P_{Srs})^{N_s} \quad (5)$$

따라서 Link-16에서 MAI가 발생하는 경우 수식 (5)에 나타난 수신기에서 발생하는 메시지 오류 확률을 도출함으로써 Link-16에서 멀티넷 운용 시 성능을 예측할 수 있다.

2.5 관련 연구

본 논문에서는 MAI 발생률 감소를 위한 주파수 도약 기법과 관련된 연구인 주파수 회전 기법, 적응적 주파수 회전 기법에 대해 설명한다.

2.5.1 주파수 회전 기법

주파수 회전 기법에서는 전체 대역을 균등하게 분할함으로써 슬롯 간 분할된 대역에서 주파수 도약이 일어나며 주파수 도약 패턴이 서로 직교하다. 주파수

도약 패턴이 직교 하므로 시간 영역에서 네트워크 간 동기는 일치해야 하는 특성이 있으며 그림 5에 주파수 회전 기법이 어떻게 수행되는 지를 나타냈다.

그림 5에서 네트워크 T 시간 동안 분할된 K개의 채널에서 주파수 도약을 하며 4T 시간 동안 주어진 N개의 채널에서 주파수 도약이 이루어진다.

하지만 Link-16이 운용되는 공중 환경은 전파 지연 시간이 매우 길며 주파수 도약 시간이 전파 지연 시간에 비해 매우 빠르므로 Link-16의 단말 노드 간에 동기 일치하지 않는다. 그러므로 주파수 회전 기법을 Link-16에서 사용하기에 부적합하다. 따라서 동기가 맞지 않을 경우 사용할 수 있는 주파수 도약 기법이 필요하며 적응적 주파수 회전 기법이 제안되었다.

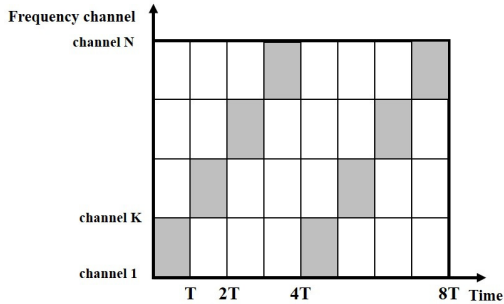


그림 5. 주파수 회전 기법
Fig. 5. Frequency rolling

2.5.2 적응적 주파수 회전 기법

적응적 주파수 회전 기법에서는 시간 영역에서 네트워크 간 동기가 맞지 않으며 네트워크에서 사용하는 채널이 동일한 경우 네트워크 간에 충돌이 발생한다. 네트워크 간 충돌을 회피하기 위해 충돌 시 주파수 도약 셋을 랜덤으로 변경하며 각 네트워크에 주파수 도약 셋 변경 정보를 전송해야 하는 특성이 있으며 그림 6에서 적응적 주파수 회전 기법이 어떻게 수행되는 지를 나타냈다.

그림 6에서 2개의 네트워크가 운용되고 있으며 네트워크 A는 청색으로 네트워크 B는 녹색으로 표기하였다. 각 네트워크에서는 T 시간 동안 주파수 회전 기법에서 사용하는 절반의 채널에서 주파수 도약이 이루어진다. 만일 2개의 네트워크가 같은 채널을 사용할 경우 네트워크 간 충돌이 발생하므로 충돌을 회피하기 위해 네트워크 A는 3T 지점에서 주파수 도약 셋을 변경하며 8T 시간 동안 주어진 N개의 채널에서 주파수 도약이 이루어진다.

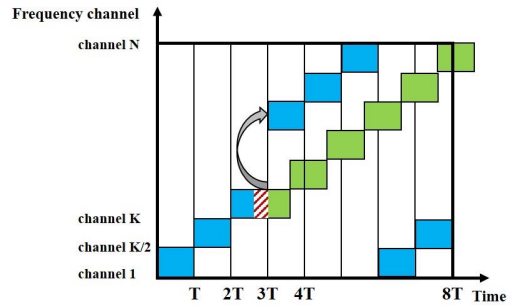


그림 6. 주파수 회전 기법
Fig. 6. Adaptive frequency rolling

III. 그룹 기반의 주파수 도약 방식

이 장에서는 제한된 주파수 대역에서 Link-16 웨이브폼의 멀티넷 성능을 향상시키기 위해 제안한 그룹 기반의 주파수 도약 방식에 대해 설명한다.

3.1 그룹 기반의 주파수 도약 방식의 정의

제안 방식에서는 전체 대역을 소수의 부 채널 그룹으로 분할 후 Link-16의 단말 노드가 부 채널 그룹에서 도약함으로써 멀티넷 성능 저하의 원인이 되는 MAI를 감소시키고자 하였다. 분할된 소수의 부 채널 그룹은 부 채널 그룹 간에 공유하는 채널의 유무에 따라 직교 그룹과 비 직교 그룹으로 분류된다.

기존의 주파수 도약 방식과 달리 제안하는 그룹 기반의 주파수 도약 방식은 전체 대역에서 도약하는 채널 그룹과 부분 대역에서 도약하는 채널 그룹을 사용하며 본 논문에서는 전체 대역에서 도약하는 채널 그룹을 전 채널 그룹 (Total Group), 부분 대역에서 도약하는 채널 그룹을 부 채널 그룹 (Sub Group)이라고 명명하며 그림 7과 같이 나타낸다. 그림 7에서 1개의 전 채널 그룹과 3개의 부 채널 그룹이 공존하고 있다. 전 채널 그룹은 1에서 n번째까지의 전체 대역에서 주파수 도약이 일어나며 부 채널 그룹은 전체 대역 내에

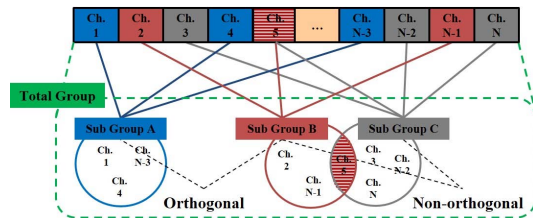


그림 7. 그룹 기반의 주파수 도약 방식의 정의
Fig. 7. Definition of Group-based Frequency Hopping scheme

있는 부 채널 그룹에서 주파수 도약이 일어난다. 부 채널 그룹 A와 B 간에는 공유하는 채널이 없으며 부 채널 그룹 B와 C 간에는 공유하는 채널이 있는 것을 알 수 있다.

3.2 그룹 기반의 주파수 도약 방식의 유형

3.2.1 직교 그룹

직교 그룹에서는 1개의 전 채널 그룹과 소수의 부 채널 그룹이 공존하며 부 채널 그룹 간에는 배타적으로 주파수가 할당되므로 부 채널 그룹 간에는 MAI가 발생하지 않는다. 그러나 1개의 전 채널 그룹과 소수의 부 채널 그룹 간에 MAI가 발생하게 된다.

직교 그룹에서는 부 채널 그룹에서 사용하는 채널의 개수를 선정하기 위해 전체 대역을 소수의 부 채널 그룹으로 분할하며 부 채널 그룹에서 사용하는 채널의 개수가 N_{TC} 의 약수가 될 경우 직교 그룹 할당이 이루어지게 된다. 직교 그룹에서는 1개의 전 채널 그룹과 소수의 부 채널 그룹들이 공존하므로 N_{NODE} 는 부 채널 그룹의 개수보다 1개 더 많다.

그림 8에 직교 그룹의 할당이 어떻게 이루어지는지를 도시하였다. 그림 8에서 9개의 채널에서 3개의 부 채널 그룹이 운용되고 있으며 부 채널 그룹 A에서는 1, 4, 6번 채널을 사용하며 부 채널 그룹 B에서는 2, 5, 8번 채널을 사용한다. 부 채널 그룹 C에서는 3, 7, 9번 채널을 사용하며 1개의 전 채널 그룹에서는 1번에서 9번까지의 채널을 사용한다.

따라서 3개의 부 채널 그룹 간에 공유하는 채널이 없으므로 직교 그룹의 할당이 이루어지게 된다.

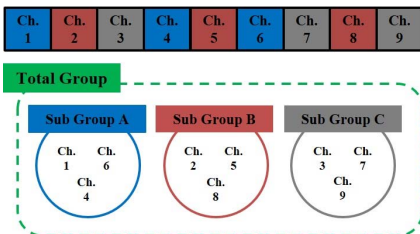


그림 8. 직교 그룹 할당의 예시
Fig. 8. Example of Orthogonal Group assignment

3.2.2 비 직교 그룹

비 직교 그룹에서는 전 채널 그룹의 유무에 따라 비 직교 그룹 A, 비 직교 그룹 B로 분류된다. 비 직교 그룹 A에서는 소수의 부 채널 그룹만 존재하며 부 채널 그룹 간에는 최소한의 주파수 채널을 공유하여 MAI 발생률을 줄이고자 하였다. 그러므로 비 직교 그

룹 A에서는 일부 부 채널 그룹 간에서만 MAI가 발생하게 된다. 비 직교 그룹 B에서는 1개의 전 채널 그룹과 소수의 부 채널 그룹이 공존하며 1개의 전 채널 그룹과 소수의 부 채널 그룹 간에는 주파수 채널을 공유한다. 따라서 1개의 전 채널 그룹과 1개의 부 채널 그룹 간에 MAI가 발생하며 일부 부 채널 그룹 간에도 MAI가 발생하게 되므로 제안 방식 내에서 MAI 발생률이 가장 높은 것을 알 수 있다.

비 직교 그룹에서는 부 채널 그룹에서 사용하는 채널의 개수를 선정하기 위해 전체 대역을 소수의 부 채널 그룹으로 분할하며 부 채널 그룹에서 사용하는 채널의 개수가 N_{TC} 의 약수가 되지 않을 경우 비 직교 그룹 할당이 이루어지게 된다. 비 직교 그룹 A서는 부 채널 그룹만 존재하므로 N_{NODE} 는 부 채널 그룹의 개수와 동일하며 비 직교 그룹 B에서는 1개의 전 채널 그룹과 소수의 부 채널 그룹들이 공존하므로 N_{NODE} 는 부 채널 그룹의 개수보다 1개 더 많다.

그림 9에서 비 직교 그룹 할당이 어떻게 이루어지는지를 도시하였다. 그림 9에서 8개의 채널에서 3개의 부 채널 그룹이 운용되고 있으며 부 채널 그룹 A에서는 1, 4, 6번 채널을 사용하며 부 채널 그룹 B에서는 2, 5, 8번 채널을 사용한다. 부 채널 그룹 C에서는 3, 7, 8번 채널을 사용하며 1개의 전 채널 그룹에서는 1번에서 8번까지의 채널을 사용한다.

따라서 부 채널 B와 C에서 8번 채널을 공유하고 있으므로 비 직교 그룹 할당이 이루어지게 된다.

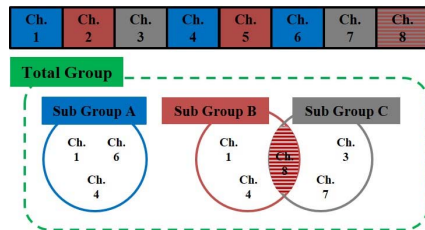


그림 9. 비 직교 그룹 할당의 예시
Fig. 9. Example of Non-orthogonal Group assignment

3.3 그룹 기반의 주파수 도약 방식의 알고리즘

이 장에서는 그룹 기반의 주파수 도약 방식의 알고리즘에 대해 설명한다. 제안 방식의 알고리즘은 채널 분할 단계, 채널 할당 단계와 같이 크게 2단계로 구성된다.

채널 분할 단계에서는 전체 대역을 N개의 부 채널 그룹으로 분할하여 부 채널 그룹에서 사용하는 채널의 개수 (N_{sc})를 선정한다.

이후 채널 할당 단계에서는 채널 분할 단계에서 선정된 N_{SC} 만큼 소수의 부 채널 그룹에 배타적으로 할당한다. N_{SC} 는 N_{TC} 를 부 채널 그룹의 개수 (N_{SUB})로 나눈 몫과 동일하며 수식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{SC} = \left\lfloor \frac{N_{TC}}{N_{SUB}} \right\rfloor \quad (6)$$

할당되지 않은 채널의 유무를 판별하여 직교 그룹 또는 비 직교 그룹으로 할당할 지를 결정하며 그룹을 할당하는 조건은 modular 연산을 이용하여 수식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Mod(N_{TC}, N_{SUB}) = 0 \text{ or } Mod(N_{TC}, N_{SUB}) \neq 0 \quad (7)$$

할당되지 않은 채널이 존재하지 않을 경우 부 채널 그룹 간 공유하는 채널 유무를 판별하여 직교 그룹의 할당이 올바르게 이루어지도록 하며 부 채널 그룹 간 공유하는 채널이 없을 경우 전 채널 그룹에 N_{TC} 만큼 채널을 할당함으로써 직교 그룹의 할당이 이루어지게 된다.

할당되지 않은 채널이 존재할 경우 할당되지 않은 채널을 K번째 부 채널 그룹까지 순서대로 1개씩 할당한다. 이후 전체 대역 내에서 랜덤으로 선택하여 1개의 비 직교 채널을 생성하며 할당받지 못한 K+1번째에서 마지막 N번째 부 채널 그룹까지 1개의 비 직교 채널을 할당한다. 그러므로 K번째 그룹까지는 MAI가 발생하지 않으나 K+1번째 그룹에서 마지막 N번째 부 채널 그룹 간에는 MAI가 발생하게 된다. 이후 전 채널 그룹의 유무를 판별하여 전 채널 그룹이 존재하지 않을 경우 비 직교 그룹 A의 할당이 이루어지며 전 채널 그룹이 존재할 경우 전 채널 그룹에 N_{TC} 만큼 채널을 할당함으로써 비 직교 그룹 B의 할당이 이루어

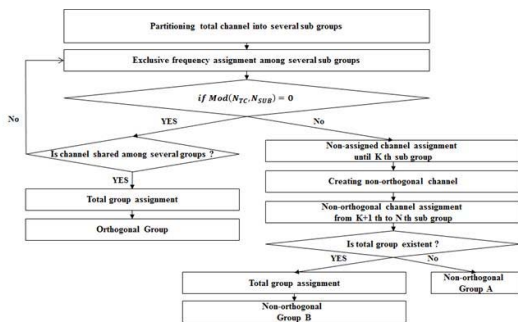


그림 10. 그룹 기반의 주파수 도약 방식의 알고리즘
Fig. 10. Algorithm of Group-based Frequency Hopping scheme

지게 된다.

그림 10에 순서도를 이용하여 그룹 기반의 주파수 도약 방식의 알고리즘을 나타냈다.

IV. 모의실험 환경

이 장에서는 그룹 기반의 주파수 도약 방식을 사용하여 Link-16 웨이브폼의 멀티넷 성능 평가를 수행하기 위한 모의실험 환경을 설명한다.

4.1 Two-ray 채널 모델

모의실험에서는 공중 가시선 (LOS : Line Of Sight) 신호와 지상 반사파를 고려한 Two-ray 채널 모델을 가정하였으며 그림 11에 도시하였다. 항공기 간의 LOS 신호는 자유 공간 손실 (FSPL : Free Space Path Loss) 모델을 통해 감쇠되며 경로 손실 계수는 2로 고려하였다. 지상 반사파는 경로 손실 계수를 LOS 신호에서 고려한 2보다 더 큰 값인 2.5로 설정함으로써 LOS 신호보다 감쇠가 더 커지도록 하였으며 LOS 신호에 비해 긴 경로에 따른 지연 시간을 고려하여 중첩 수신되도록 하였다. 평균 고도는 중고도를 가정하여 7 km를 사용하였다^[10-11].

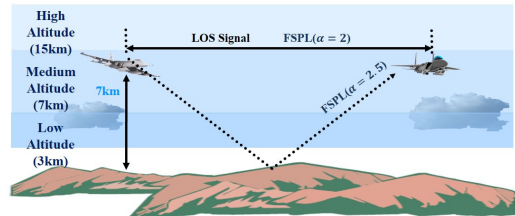


그림 11. Two-ray 채널 모델
Fig. 11. Two-ray channel model

4.2 최악의 멀티넷 분포

Link-16에서 사용하는 단말 노드의 거리 분포는 MAI를 유발하는 간섭원이 송신기에 비해 수신기에

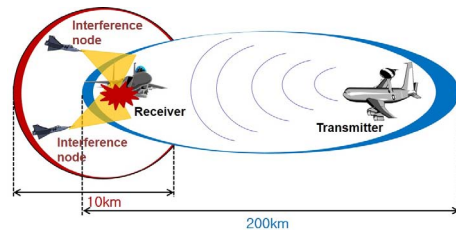


그림 12. 최악의 멀티넷 분포
Fig. 12. The worst distribution of Multi-net

훨씬 근접한 최악의 경우를 고려하였다^[10,11]. 그림 10 과 같이 간섭원에서 수신기까지의 거리를 10 km 이 내, 송신기에서 수신기까지의 거리는 200 km로 설정 하였다.

따라서 MAI를 유발하는 간섭원의 수신 세기가 송신기의 수신 세기보다 상당히 높다는 것을 알 수 있다.

V. 모의실험 결과

제안 방식을 Link-16에서 사용할 경우 기존에 비해 멀티넷 성능을 향상시키는 것을 입증하기 위해 매트랩 툴을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 수행 횟수는 10,000회로 설정함으로써 Link-16에서 10,000개의 메시지가 처리되는 경우를 고려하였다. Link-16에서 사용하는 요소들을 모의실험 변수로 정 하였으며 표 1과 같다.

송신기의 출력은 Link-16에서 사용하는 200 W로 설정하였으며^[12], Two-ray 채널 모델에서 Nakagami fading ($\gamma=2$)을 거쳐 신호가 수신되도록 하였다^[13]. 대역폭은 3 MHz, 중심 주파수는 Link-16이 운용되는 대역 (969-1206 MHz) 내의 1.2 GHz로 설정하였다. Link-16을 Double Pulse로 운용할 경우 Maximal ratio combining을 통해 다이버시티 이득을 얻도록 하였다.

전 채널 그룹은 하나의 부 채널 그룹과 MAI가 발생하며 그룹간의 MAI 발생률이 높으므로 Double Pulse로 운용하고 부 채널 그룹은 그룹 간 공유하는

채널의 유무에 따라 MAI가 발생하며 그룹 간의 MAI 발생률이 전 채널 그룹에 비해 낮으므로 Single Pulse로 운용한다. 모의실험의 비교군인 랜덤 주파수 도약 방식은 부 채널 그룹과 동일하게 Single Pulse로 운용한다.

멀티넷 성능 저하의 원인이 되는 MAI가 멀티넷 성능에 어떠한 영향을 미치는 지 알아보기 위해 MSK 복조 후 제안 방식과 랜덤 주파수 도약방식의 MAI로 인한 칩 오류 확률을 측정하였으며 RS 디코딩 후 Link-16에서 99%의 메시지를 수신할 경우 멀티넷 운용이 가능하다고 판단하였다^[4].

랜덤 주파수 도약 방식을 Link-16에서 사용할 경우 멀티넷 성능을 그림 13에 나타냈다. 그림 13에서 7개 미만의 채널에서는 멀티넷 운용이 불가능하다. 그러므로 제안 방식을 사용할 경우 Link-16 웨이브폼의 멀티넷 성능 향상을 보이기 위해 N_{TC} 를 최소 6개로 고려하였다. 또한 12개 채널에서는 랜덤 주파수 도약 방식을 사용할 경우 3개의 멀티넷을 운용할 수 있다. 작전 수행을 위해 적어도 4개의 멀티넷이 운용되어야 하므로 제안 방식을 사용할 경우 Link-16의 멀티넷 성능 향상을 보이기 위해 N_{TC} 를 최대 12개, N_{SUB} 를 최대 4개로 고려하여 12개 채널에서 4개의 멀티넷이 운용 가능하도록 하였다. 7-11개 채널에서는 3개의 멀티넷을 운용할 수 없으므로 제안 방식을 사용할 경우 Link-16의 멀티넷 능력 향상을 보이기 위해 N_{SUB} 를 최소 3개로 고려하여 3개의 멀티넷이 운용 가능하도록 하였다.

전 채널 그룹과 부 채널 그룹이 공존하는 직교 그룹, 비 직교 그룹 B에서는 N_{NODE} 가 4, 5개이며 부 채

표 1. 모의실험 변수
Table 1. Simulation Parameters

Parameters	Value
The number of Total Channel (N_{TC})	$6 \leq N_{TC} \leq 12$
The number of Sub Group (N_{SUB})	$3 \leq N_{SUB} \leq 4$
Carrier frequency	1.2 GHz
Bandwidth	3 MHz
Transmission power	200 W
Channel model	Two-ray
Fading	Nakagami fading ($\gamma=2$)
Combining	Maximal ratio combining
Pulse type	Total Group (Double Pulse)
	Sub Group, Link-16 (Single Pulse)

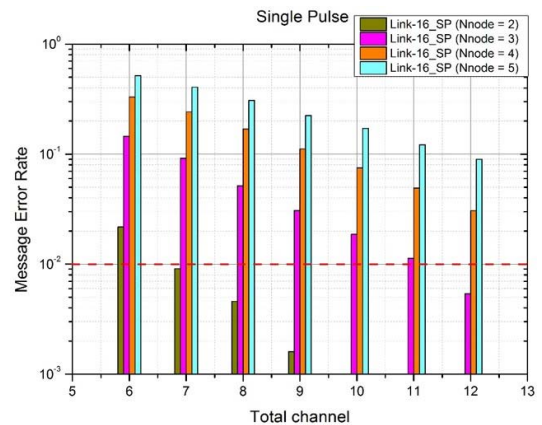


그림 13. Link-16의 랜덤 주파수 도약 방식의 멀티넷 성능
Fig. 13. Multi-net performance of random frequency hopping in Link-16

널 그룹만 존재하는 비 직교 그룹 A에서는 N_{NODE} 가 3, 4개이다.

N_{SC} 가 N_{TC} 의 약수일 때 직교 그룹의 할당이 이루어 지므로 N_{SUB} 가 3개로 구성될 경우 N_{TC} 를 6-12개 범위 내에 있는 6, 9, 12개, N_{SUB} 가 4개일 경우 N_{TC} 를 6-12개 범위 내에 있는 8, 12개로 고려하였다.

N_{SC} 가 N_{TC} 의 약수가 아닐 때 비 직교 그룹의 할당이 이루어지므로 N_{SUB} 가 3개로 구성될 경우 N_{TC} 를 6-12개 범위의 내에 있는 7, 8, 10, 11개, N_{SUB} 가 4개로 구성될 경우 N_{TC} 를 6-12개 범위 내에 있는 6, 7, 9, 10, 11개로 고려하였다.

그림 14, 15에서는 전 채널 그룹과 부 채널 그룹 관점에서 제안 방식과 랜덤 주파수 도약 방식의 MAI로 인한 칩 오류 확률을 측정하였으며 제안 방식을 사용할 경우 기준에 비해 칩 오류 확률이 최소 1.5 %에서 최대 5 % 낮게 나타났다.

비 직교 그룹 A에서는 부 채널 그룹만 존재하며 일부 부 채널 그룹 간에서만 MAI가 발생하므로 칩 오류 확률이 가장 낮게 나타났다. 직교 그룹에서는 전 채널 그룹이 부 채널 그룹과 공존하므로 전 채널 그룹은 1개의 부 채널 그룹과 MAI가 발생하지만 부 채널 그룹 간에는 MAI가 발생하지 않으므로 칩 오류 확률이 두 번째로 낮게 나타났다. 비 직교 그룹 B에서는 전 채널 그룹이 부 채널 그룹과 공존하므로 전 채널 그룹은 1개의 부 채널 그룹과 MAI가 발생하며 일부 부 채널 그룹 간에도 MAI가 발생하므로 칩 오류 확률이 그 다음으로 낮게 나타났다. 랜덤 주파수 도약 방식에서는 전체 대역에서 Link-16의 단말 노드가 동시에 주파수 도약이 이루어지므로 칩 오류 확률이 가장 높게 나타났다.

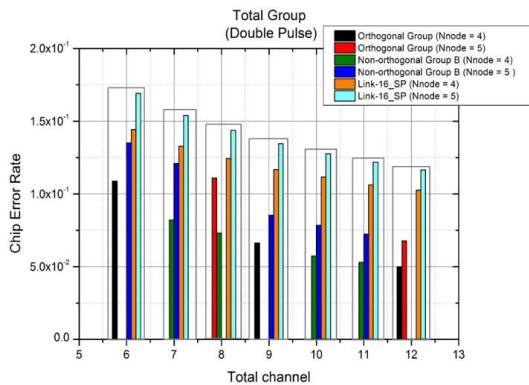


그림 14. 전 채널 그룹 관점에서의 MAI로 인한 칩 오류 확률
Fig. 14. Chip Error Rate result from MAI in terms of Total Group

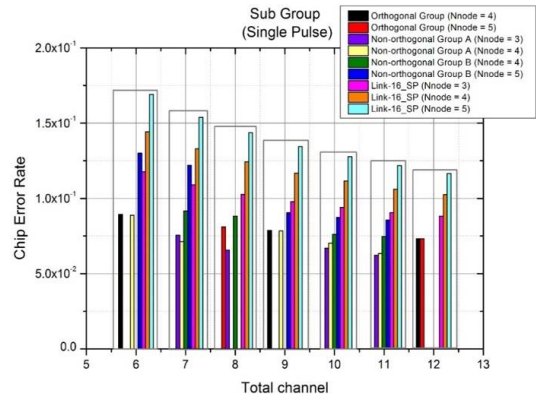


그림 15. 부 채널 그룹 관점에서의 MAI로 인한 칩 오류 확률
Fig. 15. Chip Error Rate result from MAI in terms of Sub Group

따라서 그림 14와 15를 통해 제안 방식을 Link-16에서 사용할 경우 기준에 비해 MAI가 덜 발생된다고 할 수 있다.

그림 16, 17에서는 전 채널 그룹과 부 채널 그룹 관점에서 제안 방식과 랜덤 주파수 도약 방식의 메시지 오류 확률을 측정하였다. 랜덤 주파수 도약 방식을 사용할 경우 N_{NODE} 는 제안 방식에서 고려한 N_{NODE} 와 동일하며 제안 방식을 사용할 경우 기준에 비해 메시지 오류 확률이 낮게 나타났다. 직교 그룹에서 N_{SUB} 가 3개로 구성될 경우 N_{NODE} 는 4개이며 9, 12개 채널에서 운용할 수 있는 멀티넷 개수 (N_{MULTI})는 4개이다. N_{SUB} 가 4개로 구성될 경우 N_{NODE} 는 4개이며 9, 12개 채널에서 운용할 수 있는 N_{MULTI} 는 5개이다. 비 직교 그룹 A에서 N_{SUB} 가 3개로 구성될 경우 N_{NODE} 는 3개이며 7, 8, 10, 11개 채널에서 운용할 수 있는 N_{MULTI} 는 3개이다. N_{SUB} 가 4개로 구성될 경우 N_{NODE} 는 4개이며 6, 7,

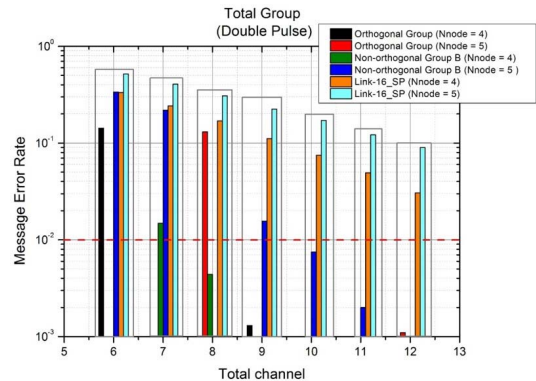


그림 16. 전 채널 그룹 관점에서의 메시지 오류 확률
Fig. 16. Message Error Rate in terms of Total Group

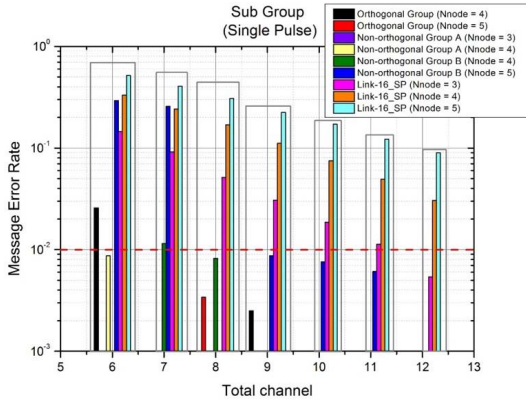


그림 17. 부 채널 그룹 관점에서의 메시지 오류 확률
Fig. 17. Message Error Rate in terms of Sub Group

9, 10, 11개 채널에서 운용할 수 있는 N_{MULTI} 는 4개이다. 비 직교 그룹 B에서 N_{SUB} 가 3개로 구성될 경우 N_{NODE} 는 4개이며 7, 8, 10, 11개 채널에서 운용할 수 있는 N_{MULTI} 는 4개이다. N_{SUB} 가 4개로 구성될 경우 N_{NODE} 는 5개이며 6, 7, 9, 10, 11개 채널에서 운용할 수 있는 N_{MULTI} 는 5개이다.

제안 방식을 사용할 경우 기존에 비해 Link-16 웨이브폼의 멀티넷 성능이 향상되는 것을 표 2에서 4가지 나타냈다.

표 2. 직교 그룹과 랜덤 주파수 도약 방식의 멀티넷 성능 비교
Table 2. Comparison of Multi-net performance of Orthogonal Group with random frequency hopping

$MER = 1\%$	Orthogonal Group		Link-16
	$N_{SUB} = 3$	$N_{SUB} = 4$	
$N_{TC} = 12$	$N_{MULTI} = 4$	$N_{MULTI} = 5$	$N_{MULTI} = 3$
$N_{TC} = 9$		No operation	$N_{MULTI} = 2$
$N_{TC} = 8$		$N_{MULTI} = 5$	

표 3. 비 직교 그룹 A와 랜덤 주파수 도약 방식의 멀티넷 성능 비교
Table 3. Comparison of Multi-net performance of Non-orthogonal Group A with random frequency hopping

$MER = 1\%$	Non-orthogonal Group A		Link-16
	$N_{SUB} = 3$	$N_{SUB} = 4$	
$N_{TC} = 11$	$N_{MULTI} = 3$	$N_{MULTI} = 4$	$N_{MULTI} = 2$
$N_{TC} = 10$			
$N_{TC} = 9$			
$N_{TC} = 8$	$N_{MULTI} = 3$	No operation	
$N_{TC} = 7$		$N_{MULTI} = 4$	
$N_{TC} = 6$	No operation		No operation

표 4. 비 직교 그룹 B와 랜덤 주파수 도약 방식의 멀티넷 성능 비교

Table 4. Comparison of Multi-net performance of Non-orthogonal Group B with random frequency hopping

$MER = 1\%$	Non-orthogonal Group B		Link-16
	$N_{SUB} = 3$	$N_{SUB} = 4$	
$N_{TC} = 11$	$N_{MULTI} = 4$	$N_{MULTI} = 5$	$N_{MULTI} = 2$
$N_{TC} = 10$			
$N_{TC} = 9$		No operation	
$N_{TC} = 8$	$N_{MULTI} = 4$	No operation	
$N_{TC} = 7$	No operation	No operation	No operation
$N_{TC} = 6$	No operation		

VI. 결론

본 논문에서는 제한된 주파수 대역에서 Link-16 웨이브폼의 멀티넷 성능이 저하되는 문제를 해결하기 위해 그룹 기반의 주파수 도약 방식을 제안하였다. 랜덤 주파수 도약 방식을 사용할 경우 Link-16의 단말 노드들이 전체 대역을 공유하여 사용하며 동시에 도약하므로 MAI가 발생하며 주파수 대역이 제한될 경우 MAI 발생률이 증가하게 되므로 멀티넷 성능 저하가 일어난다. 하지만 제안 방식을 사용할 경우 전체 대역을 소수의 부 채널 그룹으로 분할함으로써 Link-16의 단말 노드가 부 채널 그룹에서 도약하게 되므로 MAI 발생률을 감소시킴으로써 멀티넷 성능을 기존에 비해 향상시킬 수 있으며 모의실험을 통해 이를 확인하였다. 현재 한국군에서 Link-K 완성형을 설계 중이며 Link-K 완성형 운용을 위한 주파수 도약 방식을 선정할 시 그룹 기반의 주파수 도약 방식이 대안이 될 수 있다^[4].

References

- [1] *Understanding voice and data link networking*, Northrop Grumman Corporation, pp. 1-320, 2013.
- [2] H. K. Baek, J. Y. Koo, J. H. Jin, P. S. Chun, I. H. Oh, and J. S. Lim, "Reliable dynamic TDMA scheme with new packing method for image transmission over Link-16," *J. KICS*, vol. 37, no. 11, pp. 1043-1053, Nov. 2012.
- [3] Y. K. Kwag and K. W. Lee, "Policy study on efficient aeronautical frequency band allotment and management in the congested air traffic

environments,” *J. KIEES*, vol. 23, no. 8, pp. 878-887, Aug. 2012.

[4] K. M. Lee, H. J. Noh, and J. S. Lim, “Performance analysis of link-16 waveform considering frequency remapping under PBNJ,” *J. KICS*, vol. 38, no. 11, pp. 955-965, Nov. 2013.

[5] H. J. Noh, J. P. Yu, K. M. Lee, and J. S. Lim, “Code selection approach for partitioned cyclic code shift keying to improve multinet capability,” in *Proc. IEEE MILCOM*, pp. 836-841, Tampa, USA, Oct. 2015.

[6] G. M. Dillard, M. Reuter, J. Zeidler, and B. Zeidler, “Cyclic code shift keying: a low probability of intercept communication technique,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 39, no. 3, pp. 786-798, Jul. 2003.

[7] C. H. Kao, C. Roberston, and K. Lin, “Performance analysis and simulation of cyclic code-shift keying,” in *Proc. IEEE MILCOM*, pp. 1-6, San Diego, USA, Nov. 2008.

[8] P. Popovski, H. Yomo, S. Aprili, and R. Prasad, “Frequency rolling: A cooperative frequency hopping for mutually interfering WPANs,” in *Proc. ACM Mobihoc '04*, pp. 199-209, Roppongi, Japan, 2004.

[9] H. Yomo, P. Popovski, H. Nguyen, and R. Prasad, “Adaptive frequency rolling for coexistence in the unlicensed band,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 2 pp. 598-608, Feb. 2007.

[10] H. J. Noh and J. S. Lim, “Multinet performance evaluation of link-16 waveform,” *KIMST*, pp. 1-5, Daejeon, Korea, 2011.

[11] J. P. Yu, H. J. Noh, H. K. Baek, and J. S. Lim, “Multi-net performance evaluation of tactical data link according to the number of channels and frequency hopping rate in UHF,” in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 43-44, Jeju Island, Korea, 2014.

[12] DTIC, *Link-16 Electromagnetic Compatibility (EMC) Features Certification Process and Requirements (DoD 4650.1-R1)*, Retrieved Apr., 26, 2006, from <http://www.dtil.mil/whs/directives/corres/pdf/465001r1p.pdf>

[13] Y. J. Lee, S. J. Kim, and M. Y. Lim, “Methodology of inter-operating link-k track number in multi TDLs,” *J. KICS*, vol. 38, no. 12, Dec. 2013.

유 제 품 (Jepung Yu)



2014년 2월 : 백석대학교 정보통신학 학사
 2014년 3월~현재 : 아주대학교 컴퓨터공학과 석사과정
 <관심분야> 전술데이터링크, 주파수 도약 알고리즘

이 규 만 (Kyuman Lee)



2011년 2월 : 아주대학교 전자공학 학사
 2011년 3월~현재 : 아주대학교 컴퓨터공학과 석박사통합과정
 <관심분야> 위치인식, 신호원 추적, 전술데이터링크

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 선임연구원

2015년 3월~현재 : 아주대학교 국방디지털융합학과 특임교수
 <관심분야> 전술데이터링크, 다중 접속, 시간동기, 위치인식, 무선네트워크

임 재 성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자공학 학사
1985년 2월 : KAIST 영상통신 석사
1994년 2월 : KAIST 디지털통신 박사
1998년 3월~현재 : 아주대학교 소프트웨어융합학과 정교수

2004년 3월~현재 : 아주대학교 국방전술네트워크 연구센터장

<관심분야> 이동 및 위성통신, 무선네트워크, 국방전술통신

최 효 기 (Hyogi Choi)



2001년 2월 : 숭실대학교 정보통신전자공학 학사
2003년 2월 : 숭실대학교 통신 및 신호처리 석사
2002년 11월~현재 : 한화탈레스 데이터링크 전문연구원
<관심분야> 국방전술데이터링크 시스템, 모뎀 및 채널코딩

김 종 성 (Jongsung Kim)



1984년 2월 : 숭실대학교 전자계산학 학사
1986년 2월 : 숭실대학교 전자계산학 석사
1997년 2월 : 포항공과대학교 컴퓨터공학 박사
1986년 3월~현재 : 국방과학연구소 재직 중

<관심분야> 전술데이터링크, 통신시스템, 컴퓨터 네트워크