

L-대역 내 레이더 주파수 공동사용 환경에서 멀티넷을 통한 Link-16 운용 가능성 성능 평가

최 선 주*, 유 제 풍*, 임 재 성°, 백 호 기**, 김 재 원***, 최 효 기****

The Multi-Net Performance Evaluation of Link-16 in the L-Band Sharing with Radars

Seonjoo Choi*, Jepung Yu*, Jaesung Lim°, Hoki Baek**, Jaewon Kim***, Hyogi Choi****

요 약

전장의 환경이 네트워크 중심전으로 빠르게 변화함에 따라 신속하고 정확한 상황인식을 하기 위해 전술데이터 링크의 필요성이 부각되고 있다. 현재 한국군에서는 Link-16을 전투기에 탑재하여 공중 작전을 수행하고 있으며, Link-16은 멀티넷 구조를 지원함으로써 동시에 다양한 작전 수행이 가능한 장점이 있다. 주파수 자원의 부족으로 인해 다른 체계와 주파수를 공동사용 하는 방안이 연구되고 있으며 레이더가 사용하는 L-대역이 후보 대역 중 하나로 고려되고 있다. 하지만 우리나라의 L-대역은 군사용 장거리 탐지 레이더에 할당되어 있어 주파수를 공동사용 하여 전술데이터링크를 운용할 경우 서로 간 간섭에 의한 영향을 받을 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 L-대역 내에서 레이더와 Link-16과 같은 전술데이터링크가 공동사용 하는 경우 전술데이터링크의 운용 가능성을 평가하였다.

Key Words : Link-16, Link-16 Waveform, Radar, Multi-net, Spectrum sharing

ABSTRACT

As the trend of future war has been changed to network centric warfare, tactical data link should be needed for fast and accurate situation awareness. Nowadays, Korean air force conducts military operations by using aircrafts equipped with Link-16. The Link-16 can conduct multiple mission at the same time because it supports multi-net capability. Due to lack of frequency resource, the way to share the frequency with other systems has been studied and using L band with radar is considered as one of the candidates bands. However, the data link can be affected by the interference from radars when it shares the L-band because the L-band in Korea is already assigned to long-range detection radars. In this paper, we evaluate operational possibilities of tactical data link in the L-band based on Link-16.

※ 본 연구는 2015년도 한화탈레스(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임

※ 본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2016R1A2A1A05005541).

◆ First Author : Department of Computer Engineering, Ajou University, csg1388@ajou.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Department of Software, Ajou University, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원

* Department of Computer Engineering, Ajou University, mecm3355@ajou.ac.kr, 학생회원

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

*** Department of Command & Communication System, Agency for Defense Development, arbor405@add.re.kr, 정회원

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

논문번호 : KICS2016-06-127, Received June 16, 2016; Revised July 1, 2016; Accepted July 5, 2016

I. 서 론

현대전의 수행 개념은 적 보다 빠르고 정확한 상황 인식(SA : Situation Awareness)을 통한 정보 우위를 기반으로 전쟁을 수행하는 네트워크 중심전(NCW : Network Centric Warfare)으로 빠르게 변화하고 있다^[1]. 네트워크 중심전에서 전술데이터링크(TDL : Tactical Data Link)는 실시간 전술 정보 분배 및 지휘 통제 능력 확보를 위한 핵심적인 체계로 인식되고 있기 때문에 선진국에서는 전술데이터링크를 지속적으로 개발 및 운용하고 있다^[2].

Link-16은 걸프전 이후에 미 국방부가 표준으로 채택하고 1996년부터 미국의 전 군에 배치되어 사용하던 전술데이터링크로서 감시와 지휘, 통제(surveillance and command and control)정보를 다양한 지휘통제 시스템 및 무기체계 플랫폼과 교환함으로써 작전 효율성을 향상시키는 통신, 항법 및 식별 시스템이다^[3]. 한국군 또한 전술데이터링크인 Link-16을 전투기에 탑재하여 공중 작전에 사용 중이다. Link-16은 멀티넷을 지원하기 때문에 다양한 작전을 동시에 수행할 수 있으며 빠른 주파수 도약을 통해 항재밍과 같은 대전 자전 능력을 보유하여 작전 지속 능력을 향상시킬 수 있다^[4].

최근 급증하는 민간 항공 교통량을 수용하기 위해 차세대 항행 안전시설의 확충이 요구되고 있으며, 또한 무인기의 운행에 따른 트래픽 증가로 인해 항공 주파수 대역이 포화에 이르렀다^[5]. 이를 해결하기 위해 기존의 운용되고 있는 시스템의 주파수를 재할당하여 사용하는 방안이 제시되었으며, 또 다른 방안으로는 기존 체계들에 할당되어 있는 주파수 대역을 공동사용 하는 것을 고려하고 있다. 이에 따라 미국에서는 항공 시스템과 같은 대역에서 운용되고 있는 Link-16의 주파수를 재할당할 예정이며^[6], 주파수 재할당 또는 공동사용 시 기존 체계에 미치는 영향과 통신 가능성 등을 평가하기 위한 연구가 진행되기도 하였다^[7,8]. 본 논문에서는 기존 레이더 탐지 체계가 사용 중인 L-대역을 Link-16과 공동사용 하는 환경에서 Link-16의 작전 수행을 위해 요구되는 멀티넷 성능을 평가함으로써 L-대역에서 Link-16의 운용 가능성을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Link-16의 동작 원리 및 멀티넷, MAI에 대해 설명하며, 현재 L-대역에서 사용 중인 레이더 모델에 대해서 설명한다. 3장에서는 전술데이터링크에 미치는 영향을 분석하기 위한 레이더의 간섭을 모델링을 하고, 4장에서는 모의실험을 통해 L-대역 내에서 Link-16과 레이더의

주파수 공동사용 시 Link-16의 운용 가능성을 평가하며 5장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

주파수 대역의 포화로 인해 새로운 체계들이 개발되거나 기존 시스템을 확장하려고 할 때 주파수 할당에 어려움이 있다. 이에 따라 기존 체계들의 주파수를 회수하여 재할당하거나 기존 체계와의 주파수 공동사용을 통해 재활용하고자 하는 시도들이 진행되고 있다. 본 논문에서는 레이더 체계가 현재 사용 중인 L-대역을 전술데이터링크와 공동사용 하는 경우 전술데이터링크의 운용 가능성을 평가하고자 한다. 전술데이터링크는 현재 널리 사용 중인 Link-16을 기반으로 하였으며, 본 장에서는 Link-16의 특징과 L-대역에서 사용 중인 레이더 모델에 대해 설명한다.

2.1 Link-16

2.1.1 Link-16의 물리계층 전송 방식

Link-16의 물리계층 전송 방식은 항재밍 능력 보유와 통신 간섭을 극복하기 위해 높은 채널 코딩과 확산 코딩 기법을 적용하였다. Link-16의 송수신 단말인 JTIDS(Joint Tactical Information Distribution System)의 구조를 통해 Link-16의 웨이브폼 구조를 이해할 수 있으며 그림 1은 JTIDS의 송수신 구조를 나타낸다^[3].

Link-16은 70비트의 워드(Word)를 기본 단위로, 여러 검출을 위한 패리티 비트를 추가하여 총 75비트의 전술 메시지를 생성한다. 생성된 75비트 메시지 비트 스트림은 채널 코딩을 위해 각각 5비트 심볼 단위로 15개의 심볼로 구분된다. 각 심볼은 RS(Reed Solomon) 코드를 통해 채널 코딩되며, 이 때 헤더는 RS(16,7), 데이터는 RS(31,15)의 비율로 블록 코딩 된다. 재밍 공격으로 메시지가 손실되는 것을 방지하기 위해 헤더를 포함하여 심볼 단위의 인터리빙을 실시하고, 인터리빙 된 심볼들은 CCSK(Cyclic Code Shift

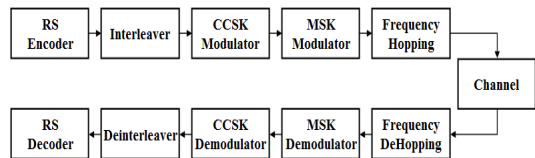


그림 1. JTIDS 송수신 구조
Fig. 1. Structure of Link-16 transmitter and Receiver

Keying) 변조를 통해 각각 32칩으로 확산 코딩된다. CCSK 변조를 통해 생성된 칩은 MSK(Minimum Shift Keying)방식을 통해 펄스 변조되며, 각 칩은 0.2 μs 마다 전송된다. 따라서 CCSK 변조된 32칩 시퀀스를 모두 전송하기 위해 총 6.4 μs 의 전송시간이 소요되며, 변조된 펄스 신호는 특정 패턴에 따라 주파수 도약을 실시하여 전송된다.

Link-16은 패킹 구조에 따라 SP(Single Pulse)와 DP(Double Pulse)를 지원한다. SP는 각각의 심볼마다 한 번의 펄스 신호를 전송하는 것을 의미하며, DP는 각각의 심볼마다 두 번의 펄스 신호를 전송하는 것을 의미한다. 따라서 DP의 경우 주파수 도약을 하는 Link-16의 특성 상 주파수 및 시간에서의 다이버시티 이득을 얻게 된다. 그림 2는 펄스 구조에 따른 Link-16의 신호 전송 형태를 나타낸다⁴⁾.

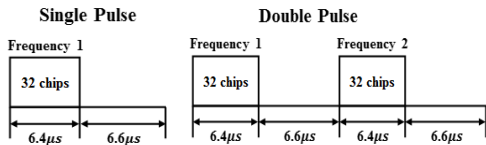


그림 2. Link-16 펄스 전송 방식
Fig. 2. Pulse transmission method of Link-16

2.1.2 멀티넷 구조

Link-16은 주파수 도약과 시분할 다중접속을 기반으로 하며, 시스템의 기본 통신 단위는 넷이다. 넷은 타임슬롯으로 구성되어 있으며 각각의 타임슬롯은 7.8125 ms 시간 간격으로 구성되어 있다. Link-16은 주파수 도약 패턴에 따라 128개의 넷을 정의하고 있으며 각각의 넷은 주파수 도약 패턴이 서로 다르기 때문에 동일한 타임슬롯에 다수의 넷이 존재할 수 있다. 이와 같이 넷을 달리하여 여러 네트워크가 동일한 주파수 대역에서 공존함으로써 동시에 다양한 작전을

수행할 수 있는 것을 멀티넷이라고 한다. Link-16은 127개의 멀티넷으로 구성되며 각각의 넷은 0에서 126까지의 넷 번호를 통해 구별된다. 일반적으로 사용자는 데이터 전송 시 특정 넷 중 하나의 넷에 참여하여 데이터를 전송하지만, 매 타임슬롯마다 서로 다른 넷에 참여하여 데이터를 전송할 수 있다. 그림 3은 Link-16의 멀티넷 구조를 나타내고 있다.

2.1.3 다중 접속 간섭

Link-16은 51개의 주파수 대역에서 128개의 주파수 도약 패턴을 정의하고 있으므로 도약 패턴 중 직교하지 않는 패턴이 발생하게 된다. 이러한 영향으로 인해 서로 다른 넷에 속한 단말이 동일한 채널을 사용하여 데이터를 전송하게 되는 경우가 있으며, 동시에 전송하는 경우 상호간 간섭을 일으키게 되는 다중 접속 간섭(MAI : Multiple Access Interference)이 발생한다. MAI는 수신된 신호의 동기 일치 여부에 따라 동기식 MAI와 비동기식 MAI로 나뉜다. 동기식 MAI는 수신 신호의 동기가 정확할 때 발생하는 것으로 이때 신호 간에 충돌이 발생하면 신호 전체가 영향을 받게 된다. 비동기식 MAI는 수신 신호의 동기가 틀어져 신호가 충돌하더라도 일부분만 간섭 영향을 받게 된다. 일반적인 주파수 도약 시스템을 생각하면 Link-16도 동기식 MAI가 발생한다고 생각할 수 있다. 하지만 Link-16은 300 NM에서 500 NM까지의 매우 넓은 전송 범위를 지원하고 신호의 전송 지연 시간에 비해 주파수 도약 주기가 매우 짧기 때문에 비동기식 MAI가 발생된다. Link-16의 전송 지연 시간이 최대 3.087 ms인 반면 주파수 도약은 13 μs 마다 실시하기 때문에 모든 단말의 수신 동기를 맞춰 전송하는 것이 매우 어렵다.

비동기식 MAI는 충돌 시 신호의 일부분만 간섭을 받기 때문에 간섭의 영향이 감소하지만, 신호의 충돌 확률은 동기식 MAI에 비해 2배 높다. Link-16의 6.4 μs 의 전송 시간(T_{Busy}), 6.6 μs 의 휴지 시간(T_{Idle}), 전체 채널의 개수(N_{TC})와 총 단말의 개수(N_{TN})를 고려하여 비동기식 MAI 발생률을 나타내면 수식 (1)과 같다⁹⁾.

$$P_{AsyncMAI} = 1 - (1 - 2 \times \frac{T_{Busy}}{T_{Busy} + T_{Idle}} \times \frac{1}{N_{TC}})^{N_{TN} - 1} \quad (1)$$

$$\approx 1 - (1 - \frac{1}{N_{TC}})^{N_{TN} - 1}$$

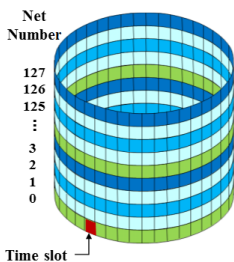


그림 3. Link-16 멀티넷 구조
Fig. 3. Structure of Link-16 Multi-net

2.2 레이더 모델

레이더(RADAR : Radio Detection And Ranging)는 펄스를 방사하고 표적으로부터 반사되어 되돌아온 신호를 이용하여 표적의 거리, 방위 및 고각 등의 정보를 탐지, 추적하는 센서 체계이다. 레이더는 전 방향에 있는 표적을 탐지하기 위해 일정 주기로 회전을 하면서 펄스를 방사한다. 따라서 레이더와 같은 주파수를 공동사용 하는 시스템이 존재할 경우 레이더로부터 일정한 주기로 간섭을 받게 된다. 레이더는 그림 4에서 보는 바와 같이 펄스 반복 주기(PRI: Pulse Repetition Interval)에 비해 레이더가 펄스를 방사하는 구간인 펄스폭(Pulse width)이 짧은 것을 알 수 있다. 이는 짧은 송신 시간 동안 펄스를 방사하고 긴 휴지 시간 동안 표적으로부터 반사되는 신호를 수신하기 때문이다. 이때 PRI는 매초 얼마나 많은 펄스를 방사하는지를 나타내는 펄스 반복 주파수(PRF: Pulse Repetition Frequency)와 서로 반비례 관계를 갖으며 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$PRF = \frac{1}{PRI} \quad (2)$$

국내의 L-대역에서는 장거리 대공 감시레이더가 운용 중이다. 장거리 대공 감시 레이더는 주로 높은 고지에 설치하여 장거리 대공 표적을 탐지하고 표적의 정보를 우군지휘/통제 체계에 전파하는 역할을 수행한다. 본 논문에서는 대표적인 대공 감시 레이더인 AN/FPS-117 레이더의 기본적인 제원과 특징을 고려하여 레이더를 모델링 한다. AN/FPS-117은 L-대역인 1,215-1,400 MHz 대역을 사용하며 능동위상배열 방식(AESA : Active Electronically Scanned Array)을 사용한다. 또한 펜슬 빔을 사용하므로 수평 빔폭이 3.4도인 좁은 빔을 방사하며 38.6 dBi의 안테나 이득을 가진다. 안테나의 최대 송신 전력은 24.75 kW이며 평균 송신 전력은 4.5 kW이다. 분당 회전수는 5회로

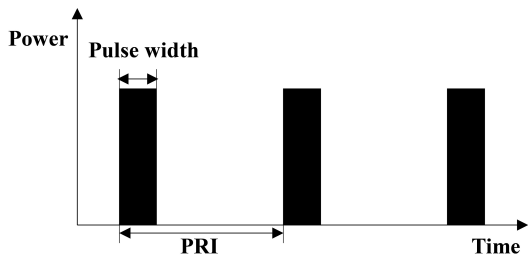


그림 4. 레이더 펄스 전송 방식
Fig. 4. Method of radar pulse transmission

12초에 한 바퀴를 돌며 표적을 탐지한다. 레이더는 펄스폭이 51.2 μs 와 409.6 μs 인 펄스를 방사하며, 매 초 241개의 펄스를 송신할 수 있기 때문에 PRF는 241이다^[10].

III. L-대역 레이더 간섭 모델

현재 L-대역은 AN/FPS-117과 같은 레이더 체계들에 할당되어 있다. 그러나 AN/FPS-117과 같은 레이더는 군사용으로 제원이 대부분 비밀로 제한되어 있어 간섭 영향을 파악하기 위한 모의실험에 정확한 수치를 반영하기 어렵다. 또한 L-대역에서 AN/FPS-117 외에도 다양한 종류의 레이더가 운용 중에 있어 모든 체계로부터의 간섭을 고려하는데 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 AN/FPS-117의 공개된 사양을 이용해 수학적으로 모델링 하여 간섭의 영향에 따른 전술데이터링크의 운용성을 평가하였다. 모델링에서는 최악의 상황(Worst case)를 고려하기 위해 단말이 레이더의 영향을 받는 구간에서 수신한 모든 데이터를 손실하는 것으로 간주하였다.

레이더는 표적을 탐지하기 위해 일정 주기로 전 방향을 회전하며 펄스를 방사한다. 이로 인해 Link-16 단말은 레이더의 회전 주기에 따라 주기적으로 간섭을 받는다. 하지만 레이더가 회전 중에 Link-16 단말을 향해 빔을 방사하는 구간보다 Link-16을 향하지 않는 구간이 더 길다. 따라서 Link-16 단말이 받는 간섭은 레이더가 회전하는 전체 구간이 아닌 일부 구간에 대한 모델링을 통해 최악의 상황을 고려하였다. Link-16 단말은 레이더의 간섭을 받는 구간에서 연속적으로 영향을 받는 것이 아니라 레이더의 듀티 사이클(D_I)에 따라 실질적으로 영향을 받는 시간이 달라지기 때문에 듀티 사이클을 통해 실질적으로 영향을 받는 정도를 측정해야 한다. 레이더의 듀티 사이클은 레이더가 방사하는 펄스폭(τ)과 펄스 반복 주파수(PRF)를 통해 구할 수 있으며 수식 (3)와 같이 나타낸다.

$$D_I = \tau \times PRF \quad (3)$$

주파수 대역을 도약하면서 데이터를 송신하는 Link-16 단말이 레이더로부터 간섭을 받게 될 확률은 다음과 같이 구할 수 있다. 간섭 확률 모델링에서 하나의 레이더는 Link-16의 전체 주파수 채널 중 서로 다른 한 개의 채널을 사용하며, 모든 레이더의 시간은

정확하게 동기화되어 있어 동일한 시간 동안 Link-16 단말에 간섭을 준다고 가정하였다.

$$P_I = D_I \times N_{\text{Radar}} \times \frac{1}{N_{TC}} \quad (4)$$

수식 (4)에서 P_I 는 Link-16 단말의 간섭 확률을 나타내며 D_I 는 레이더가 방사하는 빔의 듀티 사이클을 나타낸다. N_{Radar} 과 N_{TC} 는 각각 레이더의 수와 Link-16의 총 채널 대역수이다. 수식(4)에서 확인할 수 있듯이 N_{Radar} 가 증가하면 Link-16 단말은 레이더로부터 더 많은 간섭을 받기 때문에 P_I 가 증가하게 된다. 반대로 Link-16의 총 채널수가 증가하게 되면 주파수 도약을 통해 레이더로부터 간섭을 회피할 수 있기 때문에 P_I 는 감소한다.

레이더가 방사한 펄스가 Link-16 단말에 수신되었을 때 신호의 세기를 구하기 위해 자유 공간 경로 손실 모델을 사용하였다. 자유 공간 경로 손실을 겪은 레이더 펄스는 Link-16 단말에 간섭으로 작용한다.

$$P_R = P_T G_T(\theta) G_R \times \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (5)$$

수식 (5)에서 P_R 은 Link-16에 수신된 레이더 펄스의 수신신호 전력, P_T 는 레이더의 송신 전력을 나타낸다. $G_T(\theta)$ 와 G_R 은 각각 레이더와 Link-16 단말의 안테나 이득을 나타낸다. 레이더의 안테나 이득은 레이더와 Link-16 단말 사이의 각도에 따라 값이 달라질 수 있지만, 각도와 관계없이 최대 이득을 갖는 최악의 경우를 고려하였다.

레이더는 자신에게 할당된 대역에서 지속적으로 임무를 수행하고 있으므로 Link-16 단말이 레이더가 사용하고 있는 채널에 주파수 도약을 하여 송신하는 경우 충돌이 발생한다. 이는 부분 대역 잡음 재밍과 유사한 형태이므로 본 논문에서는 레이더에 의한 간섭 영향을 부분 대역 잡음 재밍과 유사하게 모델링하였다. 레이더의 간섭을 받을 때 Link-16의 칩 에러 확률은 수식 (6)과 같으며, 그림 5는 레이더가 Link-16 단말에 간섭을 주는 모습을 나타낸다. 수식 (6)에서 $Q(\cdot)$ 는 Q-함수이며, E_b 는 비트 당 평균 에너지이다. N_0 는 수신기의 열잡음 에너지를 나타내며, N_I 는 레이더의 간섭 에너지를 나타낸다. r_c 는 CCSK의 부호율로

5/32이고, r_s 는 RS의 부호율이며 값은 15/31이다^[3].

$$P_c = Q \left(\sqrt{\frac{2r_s r_c E_b}{N_0 + N_I}} \right) \quad (6)$$

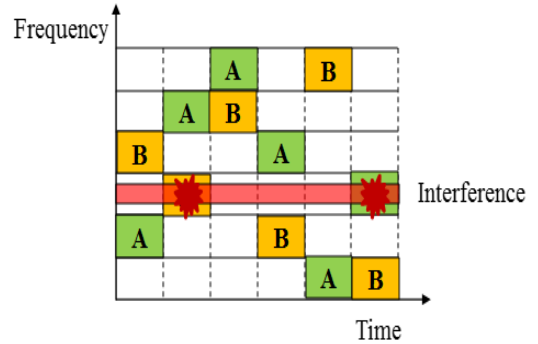


그림 5. 레이더 간섭 방식
Fig. 5. Method of radar interference

IV. L-대역 레이더와 주파수 공동사용 환경에서 멀티넷 성능 평가

4.1 모의실험 환경

L-대역 내 레이더 공존 환경에서 Link-16의 멀티넷 성능 평가를 위해 MATLAB을 기반으로 모의실험을 수행하였다. 레이더의 모의실험 변수는 현재 한국군에서 운용 중인 FPS-117 레이더의 제원들을 참조하였으며 표 1과 같다. 레이더는 분당 5회 전 방향으로 회전하면서 표적을 탐지하는 탐지 레이더를 고려하였으며, 듀티 사이클의 경우 10%로 설정하였다. FPS-117은 지향성 안테나를 사용하기 때문에 안테나 이득을 고려해야 한다. 안테나 이득은 수신하는 각도에 따라 달라지지만 최악의 경우를 고려하기 위해 최대 안테나

표 1. FPS-117 제원
Table 1. Feature of FPS-117

Parameters	Values
Frequency	1,215-1,400 MHz
Peak power	24.75 kW
Average power	4.5 kW
Azimuth Beam width	3.4°
Rotation per minute	5
Pulse width	51.2 μs, 409.6 μs
PRF	241
Antenna gain	38.6 dBi

이득인 38.6 dBi로 설정하였다^{[10][11]}. 레이더의 송신 출력은 평균 송신 출력인 4.5 kW로 설정하였으며, 레이더와 Link-16 단말과의 거리는 200 km로 설정하였다. 레이더의 주파수 대역은 Link-16과 동일한 3MHz로 가장하였다.

Link-16에서 사용하는 송신기의 출력은 Link-16에서 사용하는 200 W로 설정하였으며, 채널 모델로는 Two-ray 채널 모델을 고려하였다^[12]. Link-16 단말 간 가시선 신호는 자유 공간 손실 모델을 통해 신호 세기를 감쇠시켰으며, 경로 손실 계수는 자유 공간에서 경로 손실 계수인 2로 설정하였다. 지상에서 반사되어 수신되는 신호의 경우 경로 손실 계수를 2.5로 설정하여 자유공간에서 가시선 신호에 비해 경로 손실로 인한 감쇠가 더 커지도록 하였다^[9]. 또한 지상에서 반사된 신호의 경우 가시선 신호에 비해 더 긴 경로를 지나기 때문에 전송 지연 시간만큼 지연시켜 중첩 수신되도록 하였다. Link-16의 멀티넷 소속 단말의 거리

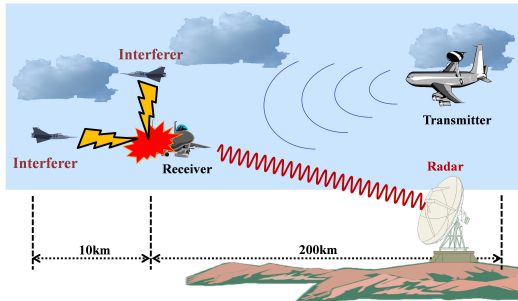


그림 6. 멀티넷 모의실험 환경
Fig. 6. Simulation environment of Multi-net

표 2. 모의실험 변수
Table 2. Simulation Parameter

Parameters	Values
Transmission power of radar	4.5 kW
Duty cycle of radar transmission pulse	10%
Bandwidth of radar	3 MHz
Center frequency	1.3 GHz
Transmission power of Link-16	200 W
Bandwidth of Link-16	3 MHz
Distance between radar and Link-16	200 km
Channel model of Link-16	two-ray
Message format of Link-16	Packed-2 Single Pulse

분포는 기본 송신 단말과 수신 단말 간의 거리를 200km로 설정하였으며 MAI를 유발하는 단말과 기본 수신 단말 간의 거리는 10km로 설정하여 최악의 경우를 고려하였다^[13]. 그림 6은 모의실험 환경을 도시하였다. Link-16 단말은 AWGN을 거쳐 신호가 수신되도록 하였다. 중심 주파수는 L-대역 내의 1.3 GHz로 설정하였으며 Link-16에서 99%의 메시지를 수신할 경우 멀티넷 운용이 가능하다고 판단하였다.

4.2 모의실험 결과

첫 번째 모의실험에서는 레이더 수에 따른 Link-16의 멀티넷 성능을 비교하였다. 모의실험에서는 Link-16의 전체 채널 수를 50개로 고정하고 각 단말이 전체 대역에서 임의의 도약하도록 하였으며, 송신 메시지의 99%가 정상적으로 수신되는 경우 멀티넷이 운용 가능한 것으로 판정하였다.

그림 7에서 확인할 수 있듯이 레이더가 운용 중이지 않는 환경에서 Link-16은 13개 멀티넷을 운용할 수 있으며, 운용하는 레이더의 수가 증가할수록 운용 가능한 멀티넷 수는 감소한다. 이는 운용 레이더의 수가 증가할수록 50개의 주파수 대역에서 임의의 도약하는 Link-16 단말에게 주는 간섭이 증가하기 때문이다. 40개의 레이더가 운용될 때까지 Link-16은 멀티넷 운용 가능하지만 50개의 레이더가 운용되는 경우 단일 넷 구성만 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

두 번째 모의실험에서는 레이더와 Link-16이 주파수 대역을 공동사용 하여 사용하는 경우 Link-16의 운용 채널 수에 따른 멀티넷 성능을 비교하였다. 그림 8은 운용하는 레이더의 수를 10기로 고정하고

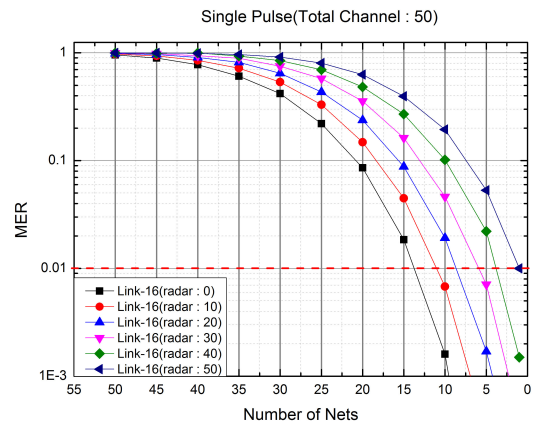


그림 7. 레이더 수에 따른 멀티넷 성능
Fig. 7. Multi-net performance according to the number of radars

Link-16의 전체 채널수를 10, 20, 30, 40, 50개로 증가시켰을 때 멀티넷 성능을 비교한 결과이다.

결과에서 확인할 수 있듯이 Link-16이 운용 가능한 채널의 수가 많을수록 멀티넷 성능이 향상된다. 이는 Link-16이 전체 채널에서 랜덤 주파수 도약을 실시하기 때문에 사용 가능한 채널이 많을수록 주파수 도약을 통해 레이더로부터의 간섭을 회피할 수 있기 때문이다. 하지만 Link-16이 10개의 채널을 운용하는 경우 Link-16 단말이 사용하는 모든 채널이 레이더의 간섭 영향을 받기 때문에 운용 가능한 넷의 개수가 1개 밖에 존재하지 않는다. 따라서 10개의 채널을 운용할 경우 멀티넷을 통한 다양한 작전 운용에 어려움이 있을 수 있다.

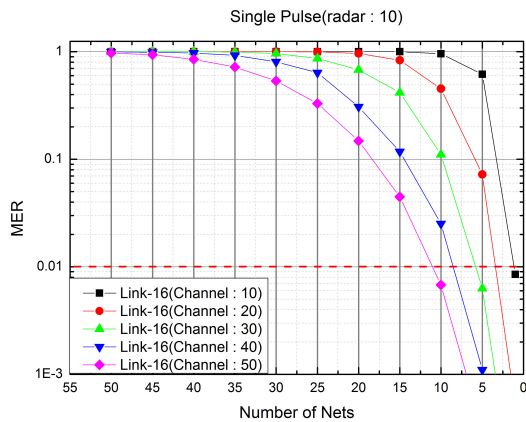


그림 8. Link-16 채널수에 따른 멀티넷 성능
Fig. 8. Multi-net performance according to the number of Link-16 channels

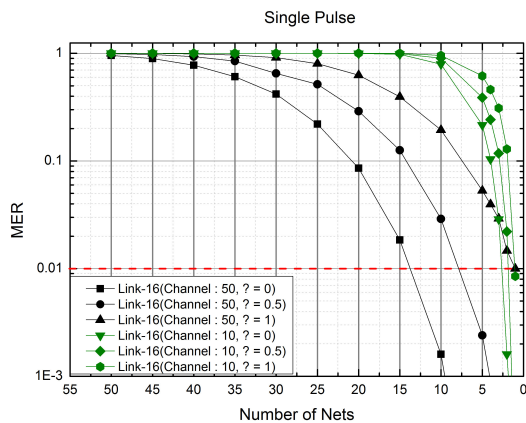


그림 9. 채널 점유율에 따른 멀티넷 성능
Fig. 9. Multi-net performance according to the ratio of channel occupied

그림 9는 Link-16이 사용하는 채널의 수와 운용하는 레이더의 채널 점유율에 따른 Link-16의 멀티넷 성능을 비교한 결과이다. 이를 통해 Link-16이 사용하는 전체 채널 수에 따라 레이더의 채널 점유율이 다를 때 멀티넷 성능 변화를 확인하였다. 채널 점유율은 운용하는 레이더의 수에 Link-16이 사용하는 채널을 나누어 ρ 로 나타냈다. Link-16이 사용하는 총 채널의 수는 50개와 10개를 고려하였으며, 채널비율은 0, 0.5, 1인 상황을 설정하였다.

결과에서 확인할 수 있듯이 Link-16이 50개의 채널과 10개의 채널을 사용하였을 때 운용 가능한 멀티넷은 각각 13개와 2개 이하의 멀티넷을 운용 가능하지만 ρ 가 증가할수록 운용 가능한 멀티넷의 수가 감소하여 ρ 가 1일 경우 단일 채널에서만 운용 가능한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 레이더가 점유하고 있는 채널의 수보다 Link-16이 주파수 도약을 하는 채널의 수가 많아야 멀티넷을 운용하여 다양한 작전을 수행할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

표 3은 Link-16을 통해 동시 다중 작전을 수행할 때 필요한 최소한의 멀티넷의 수가 10개라고 가정하였을 때, 10개의 멀티넷을 운용할 수 있는 환경을 나타내고 있다. Link-16의 총 채널수는 40 또는 50개가 운용되는 환경을 고려하여 각각 운용하는 레이더의 수에 따른 최소 멀티넷 성능을 확인하였다.

결과에서 확인할 수 있듯이 레이더가 존재하지 않는 환경에서 Link-16이 50개 채널과 40개 채널에서 10개 이상의 멀티넷을 운용할 수 있다. 하지만 레이더가 증가할수록 멀티넷 성능이 저하되며, 전체 채널이 40개일 경우는 2대의 레이더와 공동사용 하거나 전체 채널이 50개일 경우에는 14대의 레이더와 주파수를 공동사용 하게 되면 최소한의 멀티넷 성능을 만족하지 못하는 것을 알 수 있다.

표 3. 최소 멀티넷 운용 가능 환경
Table 3. Operable environment of minimum Multi-net

N_{Radar}	Number of Nets	
	$N_{TC} = 50$	$N_{TC} = 40$
0	13	10
1	13	10
2	13	9
⋮	⋮	⋮
13	10	8
14	9	7

V. 결 론

주파수 대역의 포화로 인해 이미 사용 중인 체계의 주파수를 공동사용 하여 사용하는 방안이 고려되고 있다. 본 논문에서는 레이더가 운용 중인 L-대역에서 Link-16과 같은 전술데이터링크와 공동사용 하는 경우 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해 레이더 간섭 모델링을 하였으며 레이더 간섭 환경에서 Link-16의 멀티넷 성능 평가를 통해 Link-16의 운용 가능성을 평가하였다. 레이더와 주파수를 공동사용 하는 환경에서 Link-16 단말은 다른 넷의 단말로부터 발생하는 MAI 뿐만 아니라 레이더의 간섭 영향으로 인해 멀티넷 성능이 저하된다. 하지만 그 영향이 레이더가 전체 대역을 사용하지 않는 이상 크지 않기 때문에 주파수 대역의 공동사용 시에도 멀티넷을 통한 작전의 효율성을 유지할 수 있음을 확인하였다.

References

[1] J.-Y. Jang and J.-H. Kim, "Analysis on optimized WNW topology and traffic modeling under tactical environment," *J. KICS*, vol. 39, no. 11, pp. 1114-1121, 2014.

[2] C. Golliday, "Data link communications in tactical air command and control systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 3, no. 5, pp. 779-791, 1985.

[3] H. J. Noh, J. B. Kim, J. S. Lim, J. H. Nam, and D. W. Jang, "Anti-jamming performance analysis of Link-16 waveform," *J. KICS*, pp. 1105-1112, 2010.

[4] *Understanding voice and data link networking*, Northrop Grumman Corporation, pp. 1-320, 2013.

[5] 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, 2012.

[6] DTIC, LINK 16 Electromagnetic Compatibility (EMC) Features Certification Process and Requirements (DoD 4650.1-R1), retrieved May 20, 2016, from <http://www.dtic.mil/whs/directs/corees/pdf/465001r1p.pdf>

[7] K. Lee, H. Noh, J. Lee, and J. Lim, Per-

formance analysis of link-16 waveform considering frequency remapping under PBNJ," *J. KICS*, vol. 38, no. 11, pp. 955-965, 2013.

[8] J. T. Johnson, et al., "Assessing the potential for spectrum sharing between communications and radar systems in the L-band portion of the RF spectrum allocated to radar," *IEEE ICEAA*, pp. 331-334, Palm Beach, Aug. 2014.

[9] J. P. Yu, K. M. Lee, H. K. Baek, J. S. Lim, J. S. Kim, and H. G. Choi, "Group-based Frequency Hopping scheme for improving Multi-net Performance of Link-16 Waveform with limited frequency band," *J. KICS*, vol. 41, no. 1, pp. 110-121, 2016.

[10] U.S. Department of the Navy, Hawaii Range Complex, *Final Environmental Impact Statement / Overseas Environmental Impact Statement*, Department of the Navy, Washington, DC, 2007

[11] M. Skolnik, *Radar handbook*, McGraw-Hill Book Company, 2008.

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

[13] 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.

최 선 주 (Seonjoo Choi)



2016년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학 학사
 2016년 3월~현재 : 아주대학교 컴퓨터공학과 석사과정
 <관심분야> 전술데이터링크, 주파수 도약 알고리즘

유 제 풍 (Jepung Yu)



2014년 2월 : 백석대학교 정보통신학 학사
2016년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학과 석사
<관심분야> 전술데이터링크, 주파수 도약 알고리즘

김 재 원 (Jaewon Kim)



2003년 2월 : 연세대학교 전기전자공학 학사
2005년 2월 : 연세대학교 전기전자공학 석사
2005년 2월~현재 : 국방과학연구소 지휘통제체계단 재직 중
<관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

임 재 성 (Jaesung Lim)



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

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