

Link-16 웨이브폼 항재밍 성능 분석

정회원 노 홍 준*, 김 중 빈**, 종신회원 임 재 성*, 정회원 남 정 호***, 장 동 운***

Anti-jamming Performance Analysis of Link-16 Waveform

Hongjun Noh*, Jungbin Kim** *Regular Members*, Jaesung Lim* *Lifelong Member*,
Jeong-ho Nam***, Dhong-woon Jang*** *Regular Members*

요 약

Link-16은 현재 미군 및 북대서양조약기구에서 운용하고 있는 최신 전술데이터링크이다. Link-16은 전술 환경에서 항재밍/저피탐 통신을 보장하기 위해 주파수 도약, 확산 코딩 등의 기술을 운용하고 있다. 본 논문에서는 Nakagami 페이딩 환경에서 Link-16 웨이브폼의 심볼 에러 확률을, 부분대역 잡음 재밍과 펄스 재밍을 가정하여 각각 분석하였다. 이를 통하여 Link-16의 두 가지 송수신 방식인 single-pulse와 double-pulse에 대한 항재밍 성능을 각각 확인하였다.

Key Words : Link-16, JTIDS, anti-jamming, partial band noise jamming, pulse jamming

ABSTRACT

Link-16 is a up-to-date tactical data link used in the armed forces of U.S. and NATO. In order to guarantee the required capabilities of anti-jamming and low probability of detection, Link-16 uses the techniques of frequency hopping and spreading code etc. In this paper, under Nakagami fading channels, we analyze the symbol error rates (SERs) of JTIDS/Link-16-type waveform based on both the single- and double-pulse schemes by considering the partial band noise jamming and the pulse jamming models, respectively.

I. 서 론

현대의 전쟁 수행 개념은 적보다 더 나은 상황인식을 통한 정보 우위를 기반으로 전쟁을 수행하는 네트워크중심전(network centric warfare: NCW)으로 빠르게 변화하고 있다¹⁾. 네트워크중심전에서 전술데이터링크(tactical data link: TDL)는 전술 작전 수행을 위해 필요한 전술데이터를 센서 체계, 지휘통제 체계, 타격 체계에 신속하고 정확하게 제공하는 역할을 한다²⁾. 따라서 전술데이터링크는 무기체계의 전투력 상승 효과, 합동작전환경에서 작전능력 향상을 위해 요구되는 상호운용성을 제공하며, 실시간 전술정보 분배 및 지휘통제

능력 확보를 위한 핵심적인 체계로 인식되고 있다.

미군은 전술데이터링크의 중요성을 일찍부터 통감하고 지난 1960년대 말부터 지속적으로 이를 개발하여 왔으며, 최근에 수행된 아프가니스탄전, 이라크전 등의 전쟁을 통해 그 유용성과 효용성을 입증하였다. 미군에서는 현재 전술데이터링크를 통해 다수의 지휘통제 및 무기체계를 연동하고 있으며, 각 군단 간 표준화된 메시지를 사용하여 합동작전에서도 상호간에 전술데이터를 공유 및 교환할 수 있도록 정의하고 있다. 미군은 2015년까지 주요 전술데이터링크를 J-시리즈 계열인 Link-16, variable message format(VMF), Link-22로 전환할 계획이다.

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2010-(C1090-1021-0011))

* 이주대학교 일반대학원 컴퓨터공학(nonoboy, jsalim@ajou.ac.kr), ** 이주대학교 장위국방연구소(jbkim@ajou.ac.kr)

*** 국방과학연구소 (cosmosnam38, jdw123@add.re.kr)

논문번호 : KICS2010-07-368, 접수일자 : 2010년 7월 31일, 최종논문접수일자: 2010년 12월 3일

Link-16은 걸프전 이후 미 국방부가 표준으로 채택하여 1996년부터 미국의 전 군에 배치된 전송데이터링크 체계이다. Link-16은 감시와 지휘, 통제(surveillance and command and control)정보를 다양한 지휘통제 시스템 및 무기체계의 플랫폼 간 교환함으로써 작전 효율성을 향상시키기 위한 통신, 항법 및 식별 시스템이다. 이를 위해 Link-16은 주파수 도약 및 시분할 다중 접속 등을 이용해 다양한 플랫폼 간 정보 전달 시 근실시간 전송 및 항재밍이 가능한 다중접속을 제공한다^[1]. Link-16은 북대서양조약기구(north atlantic treaty organization: NATO)의 전송데이터링크로 채택되어 사용되고 있으며, 한국군 또한 2008년 F-15K를 구입함으로써 Link-16 체계도 함께 도입하게 되었다.

Link-16에 대한 학술 연구는 Link-16의 송수신 단말인 joint tactical information distribution system(JTIDS)의 연구와 역사를 같이 한다. JTIDS에 대한 학술 연구는 주로 항법 및 다중 접속 분야가 연구되었으며, 2000년대에 들어 웨이브폼의 성능에 대한 연구가 진행되었다. [4]에서는 additive white gaussian noise(AWGN) 환경에서 JTIDS 송신기 모델의 각 신호처리 블록에 대한 성능 분석을 진행하였다. [5]에서는 JTIDS의 확산 코딩 기법인 cyclic code-shift keying(CCSK)에 중점을 맞춰 JTIDS에서 사용되는 확산 코드와 직교 코드 간의 성능을 비교하였으며, [6]에서는 [5]를 기반으로 하여 Nakagami 페이딩 환경에서의 JTIDS 웨이브폼 성능에 대해 연구하였다.

본 논문에서는, Nakagami 페이딩 환경에서의 JTIDS 웨이브폼 항재밍 성능을 분석한다. 재밍(jamming) 모델로는, 주파수 도약 시스템에 대한 재밍 효과가 높다고 알려진 부분 대역 잡음 재밍과, 직접 시퀀스 확산 스펙트럼 시스템에 대한 재밍 효과가 높다고 알려진 펄스 재밍을 가정한다.

[6]에서는 Link-16의 통신 모드인 double-pulse 모드에 대한 성능 분석 시 단순히 signal to noise ratio(SNR)을 두 배 함으로써, 주파수 및 시간 다이버시티 이득을 제대로 반영하지 못하였다. 본 논문에서는 페이딩 환경에서 double-pulse로 인한 다이버시티를 고려하여 각 재밍 환경에서의 통신 성능 분석을 실시하였다. 이를 통해 double-pulse 모드에서는 부분대역 잡음 재밍의 효과가 미비하다는 결론을 내릴 수 있었다. 또한 펄스 재밍의 경우 Link-16의 신호 전송 특성에 의해 재밍 효과가 반감하는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 Link-16의 송수신 단말인 JTIDS의 시스템 모델에 대해 설명하고, III장에서는 성능 분석에 사용된 재밍 모델에 대해

설명한다. IV장에서는 각 재밍 모델에 대한 성능 분석을 실시하며, V장에서는 성능 분석된 결과를 통해 Link-16의 항재밍 성능에 대해 알아보고, VI장에서 결론을 맺고자 한다.

II. 시스템 모델

Link-16의 웨이브폼은 송수신 단말인 JTIDS의 구조를 통해 이해할 수 있다. 그림 1은 JTIDS의 송수신 모델을 나타낸다.

Link-16에서 메시지 비트 스트림은 채널 코딩을 위해 5비트씩 심볼로 구분된다. 각 심볼은 reed solomon(RS) 코드를 통해 채널 코딩되며, 이 때 메시지 헤더는 (16,7), 데이터는 (31, 15)의 비율로 블록 코딩된다. 채널 코딩을 거친 심볼들은 통신 보안을 위해 인터리버를 통해 섞이게 된다. 인터리버를 거친 5비트의 각 심볼은 CCSK 변조를 통해 32칩으로 확산 코딩된다. 확산 코딩된 칩 시퀀스는 minimum shift keying(MSK) 방식을 통해 하나의 펄스 신호로 변조된다. 변조된 펄스 신호는 특정 패턴에 따라 주파수 도약을 하며 전송된다.

Link-16에서는 패킹 구조에 따라 single-pulse와 double-pulse를 지원한다. single-pulse는 한 심볼 당 한 번의 펄스 신호를 전송하는 것을 의미하며, double 펄스는 한 심볼 당 두 번의 펄스 신호를 전송하는 것을 뜻한다. 따라서 double-pulse의 경우 주파수 도약을 하는 Link-16의 특성 상 주파수 및 시간에서의 다이버시티 이득을 얻게 된다. 그림 2는 패킹 구조에 따른

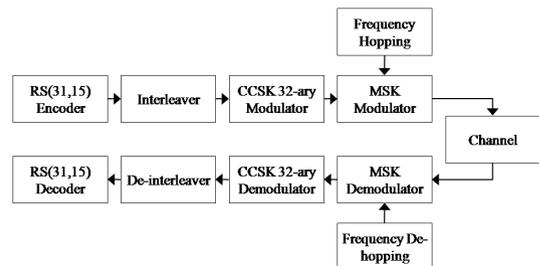


그림 1. JTIDS 송수신 모델

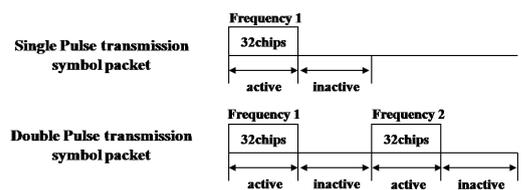


그림 2. Link-16 펄스 신호 전송 방식

Link-16의 신호 전송 형태를 나타낸다.

Link-16에서는 하나의 펄스 신호를 전송하고 난 후 주파수 도약을 위한 휴지 시간을 가지며, 따라서 double-pulse의 경우에 두 펄스 신호는 서로 다른 주파수 대역과 시간을 거쳐게 된다.

III. 재밍 모델

항재밍 성능 분석에는 부분대역 잡음 재밍과 펄스 재밍이 사용되었다. 본 논문에서 재머는 Link-16의 운용 주파수 대역 및 채널 대역폭을 알고 있다고 가정하였으며, 주파수 도약 패턴 및 타임 슬롯의 시작 시간을 알지 못하는 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 Link-16의 시스템 모델이 매우 잘 알려져 있고, 주파수 도약 패턴 및 암호화 과정은 매번 바뀌는 상황을 바탕으로 한 것이다.

3.1 부분대역 잡음 재밍 모델

부분대역 잡음 재밍은 시스템에서 사용하는 전체 주파수 대역 중 일부 대역에 파워를 집중하여 재밍을 하는 방식이다. 부분대역 잡음 재밍은 일부 대역에 파워를 집중함으로써 해당 대역에 대한 재밍 효과를 높일 수 있다. 따라서 전체 대역 대비 재밍 대역의 비율에 따라 동일한 파워를 사용하는 전대역 재밍에 비해 높은 재밍 효과를 얻을 수 있다. 그림 3은 Link-16에서 부분대역 재밍 상황을 도시한 것이다.

그림 3에서 회색 부분이 재밍이 가해진 주파수 대역을 나타낸다. 이 때 정확하게 전송 채널의 대역폭만큼 전송하게 되므로 재밍 채널에서 전송되는 심볼은 모두 재밍의 영향을 받게 된다. 또한 재밍에 사용되는 파워는 한정되어 있으므로, 주파수 대역이 넓어질수록 재밍 신호의 세기는 낮아지게 된다.

이와 같이 Link-16에서 부분 대역 잡음 재밍을 적용

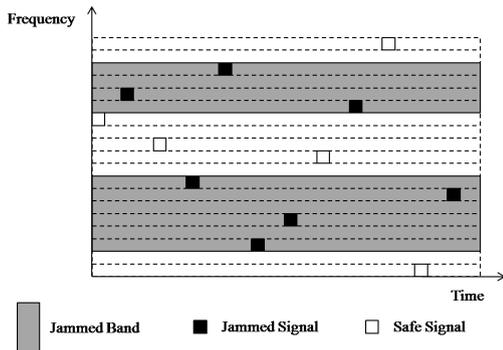


그림 3. 부분대역 잡음 재밍

시, 재밍 성능에 영향을 미치는 요소는 전체 대역폭 대비 재밍 대역폭이다. 본 논문에서는 이를 ρ_B 로 명시하였으며, 아래와 같이 나타낼 수 있다. ρ_B 는 재머가 몇 개의 채널에 얼마만큼의 파워를 집중하는가를 나타내는 척도가 된다.

$$\rho_B = \frac{\text{재밍 대역폭}}{\text{전체 대역폭}}$$

Link-16에서는 항재밍 성능 강화를 위해 single-pulse 모드와 double-pulse 모드를 나누어 사용하고 있다. Single-pulse 모드에서는 재밍 대역 내에 전송되는 심볼은 모두 재밍에 영향을 받게 된다. Double-pulse 모드에서는 두 개의 심볼이 서로 다른 주파수를 통해 전송되므로, 주파수에 대한 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 double-pulse 모드에서 두 심볼이 각각 재밍이 있는 대역과 재밍이 없는 대역을 통해 수신된 경우, 재밍이 없는 대역을 통해 수신된 신호만으로 데이터를 복호하는 selection combining (SC) 기법을 가정하였다. 만일 두 신호가 모두 재밍을 겪거나, 모두 재밍을 겪지 않을 경우에는 equal gain combining (EGC)를 통해 수신하는 것을 가정하였다.

3.2 펄스 재밍 모델

펄스 재밍은 짧은 시간 동안 강력한 펄스를 발생시켜 전대역을 재밍하는 것을 뜻한다. 신호 성분의 특성상 시간 축으로 짧은 신호는 주파수 축에서 길게 나타나므로 광대역 시스템에 재밍 시 적합하다. 그림 4는 Link-16에서 펄스 재밍 상황을 도시한 것이다.

그림 4와 같이 펄스 재밍은 매우 짧은 구간 전 대역에 걸쳐 재밍 신호를 발생시키게 되므로 한 심볼에 여러 개의 재밍 신호가 간섭을 일으키게 된다. 이 때 부분대역 잡음 재밍과 마찬가지로 재밍에 사용되는 파워는 제한적이므로, 단위 시간 당 재밍 시간이 넓어질수록

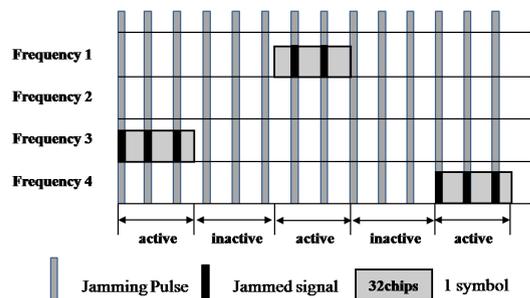


그림 4. 펄스 재밍

재밍 신호의 세기는 낮아지게 된다. 즉, 펄스 재밍에서 성능에 영향을 미치는 요소는 주파수 대역이 아닌 단위 시간 당 펄스의 지속 시간이다. 이를 부분 대역 잡음 재밍과 유사하게 ρ_r 라고 명칭하였다.

Link-16에서 펄스 재밍은 전체 주파수 대역에 대한 재밍을 실시하므로, 모든 심볼이 재밍에 영향을 받게 된다. 따라서 본 논문에서는 double-pulse 모드에서는 심볼 단위가 아니라, 심볼 내의 칩 단위에 대한 다이버시티 이득을 고려하여 성능 분석하였다.

IV. 성능 분석

본고에서는 앞서 기술한 시스템 모델과 재밍 모델을 바탕으로 재밍 환경에서 Link-16의 심볼 에러 확률에 대한 성능 분석을 진행하였다. 성능 분석에 사용된 채널 모델은 Nakagami 페이딩을 사용하였으며, 심볼 지속 시간 동안 채널이 일정한 Slow 페이딩을 가정하였다. 또한 Link-16의 송수신간 주파수 도약 동기는 일치하는 상황을 가정하였다. 또한 MSK 복조 시 coherent detection을 가정하였다.

4.1 채널 칩 에러 확률

항재밍 성능 분석은 우선 MSK 변조를 통해 전송되는 칩의 에러 확률에서 시작된다. AWGN (Additive White Gaussian Noise) 환경에서 MSK의 채널 칩 에러 확률은 BPSK, QPSK와 동일하며 SNR을 사용해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_c = Q\left(\sqrt{\frac{2E_c}{N_0}}\right) \tag{1}$$

$Q(\cdot)$ 는 Q-함수이며, E_c 는 칩 당 평균 에너지, N_0 는 수신기의 열잡음 에너지를 나타낸다. 이를 비트 당 평균 에너지에 관한 수식으로 바꾸기 위해서는 확산 코딩과 채널 코딩에 따른 code rate를 E_c 에 곱해줘야 한다. Link-16의 확산 코딩은 CCSK를 사용하며 code rate는 5/32이다. 채널 코딩은 RS 코드를 사용하며 code rate는 15/31이다. 이를 각각 r_s, r_c 라고 하면 AWGN에서 비트 에너지에 따른 Link-16의 채널 칩 에러 확률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_c = Q\left(\sqrt{\frac{2r_s r_c E_b}{N_0}}\right) \tag{2}$$

위의 칩 에러 확률에 Nakagami 페이딩을 고려하면

(3)과 같은 수식을 도출 할 수 있다.

$$P_{c_0} = \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\frac{2r_s r_c a_c^2 E_c}{N_0}}\right) f_{A_c}(a_c^2) da_c^2, \tag{3}$$

$$f_X(x^2) = \left(\frac{m}{\sigma^2}\right)^m \frac{x^{2(m-1)}}{\Gamma(m)} e^{-(m/\sigma^2)x^2}$$

이 때, P_{c_0} 의 0은 재밍이 없는 채널의 칩 에러 확률을 뜻하며, a_c 는 수신 신호의 채널 값을, f_X 는 Nakagami fading에서 채널 값의 pdf를 나타낸다^[8]. $\Gamma(\cdot)$ 는 감마 함수를 나타낸다.

재밍이 존재하는 채널에서 칩 에러 확률은 기존 칩 에러 확률에 사용된 SNR을 재밍에 의한 노이즈가 추가된 signal to interference and noise ratio(SINR)로 변환시켜 계산하였다. 이 때, 재밍 신호 또한 동일한 Nakagami 페이딩을 거치는 것으로 모델링하였다. 이에 따라 재밍이 존재하는 채널에서의 칩 에러 확률은 (4)와 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$P_{c_1} = \int_0^\infty \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\frac{2r_s r_c a_c^2 E_c}{N_0 + c_c^2 \frac{N_J}{\rho}}}\right) \times f_{A_c}(a_c^2) f_{C_c}(c_c^2) da_c^2 dc_c^2 \tag{4}$$

P_{c_1} 의 1은 재밍이 존재하는 채널의 칩 에러 확률을 뜻한다. 수식에서 N_J 는 재밍 신호의 에너지를 c_c 는 재밍 신호의 채널값을 뜻한다. 앞서 재밍 모델에 대한 설명 중 재밍에 사용되는 파워가 제한됨으로 인해 재밍 대역과 단위 시간 당 재밍 시간에 의해 재밍 신호의 세기가 낮아짐을 설명하였다. 수식 (4)에서 사용된 ρ 는 이에 따른 비율을 나타내는 변수로서, 부분대역 잡음 재밍의 경우 ρ_B 로, 펄스 재밍의 경우 ρ_r 로 구분하였다.

수식 (3)과 (4)는 심볼 당 신호가 하나씩 전송되는 single-pulse에 대한 칩 에러 확률을 나타낸다. double-pulse의 경우에는 동일한 심볼을 두 번 전송함으로써 주파수 및 시간 다이버시티 이득을 얻게 되므로, 이를 수식에 반영해야 한다. double-pulse에서 수신되는 두 개의 신호는 재밍에 의해 다음과 같은 세 가지 상황으로 구분된다.

- 1) 두 신호 모두 재밍을 겪지 않은 경우
- 2) 한 신호는 재밍을 겪고, 다른 한 신호는 재밍을 겪지 않은 경우
- 3) 두 신호 모두 재밍을 겪은 경우

성능 분석 시에는 1)과 3)의 경우 두 신호는 동일한

환경이므로 수신 신호의 에너지를 동일한 비율로 더하는 equal gain combining(EGC)를 사용하였으며, 2)의 경우에는 성능 분석의 편의를 위해 재밍을 겪지 않은 신호 성분만을 사용하는 selection combining(SC)을 사용하였다. 따라서 double-pulse에서 칩 에러 확률은 1)과 3)의 경우에 대해서 구하면 되고, 2)의 경우에는 single-pulse의 칩 에러 확률을 사용하면 된다. Double-pulse에서 1)의 상황은 두 개의 수신 신호 모두 재밍을 겪지 않게 되므로, 수식(5)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{e_{0D}} = \int_0^\infty \int_0^\infty Q \left(\sqrt{\frac{2r_s r_c (a_c^2 + b_c^2) E_c}{N_0}} \right) \times f_{A_c}(a_c^2) f_{B_c}(b_c^2) da_c^2 db_c^2 \quad (5)$$

$P_{e_{0D}}$ 에서 D는 double-pulse를 나타내며, b_c 는 두 번째 심볼의 채널 값을 나타낸다. double-pulse에서 3)경우는 다음 수식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{e_{1D}} = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty Q \left(\sqrt{\frac{2r_s r_c (a_c^2 + b_c^2) E_c}{N_0 + c_c^2 \frac{N_J}{\rho}}} \right) \times f_{A_c}(a_c^2) f_{B_c}(b_c^2) f_{C_c}(c_c^2) da_c^2 db_c^2 dc_c^2 \quad (6)$$

$P_{e_{1D}}$ 에서 1은 재밍을 D는 double-pulse를 나타내며, b_c 와 c_c 는 두 번째 수신 신호와 재밍 신호의 채널 값을 나타낸다.

4.2 부분대역 잡음 재밍 성능 분석

본 장의 2와 3에서는 위의 칩 에러 확률 값을 바탕으로 각 재밍 기법에 대한 성능 분석을 진행한다. 부분대역 잡음 재밍에 대한 분석을 진행 시, 본 장의 1에 제시된 수식의 ρ 에는 모두 ρ_B 가 사용 된다. 본 논문에서 재머는 Link-16의 시스템 대역폭을 이미 알고 있다고 가정하였으므로, 재밍 대역 내에 존재하는 심볼은 모두 재밍에 의한 영향을 받게 된다. 이에 따라 재밍이 있는 경우와 없는 경우 각각에 대한 심볼 에러 확률은 (7)과 같이 계산된다.

$$P_{s_i} \leq \sum_{j=0}^{32} \zeta_{UB_j} \binom{32}{j} P_{e_i}^j (1 - P_{e_i})^{32-j}, \quad i=0, 1, 0D, 1D \quad (7)$$

수식 (8)에서 i 는 Pc를 A에서 도출한 칩 에러 확률에 각각 매핑하기 위해 사용되는 변수이며, ζ_{UB_j} 는 Link-16의 CCSK에서 사용된 확산 코드의 칩 에러 개수에 따른 심볼 에러 확률의 upper bound, 즉, worst case를 나타

낸다⁵⁾. 수식 (7)은 재밍 유무에 따른 심볼 에러 확률을 각각 나타내므로, 이를 평균화하여 전체 시스템에서의 심볼 에러를 구해야 한다. 수식 (8)은 부분대역 잡음 재밍 환경에서 single-pulse와 double-pulse에 따른 심볼 에러 확률의 평균값을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{single pulse} : P_s &= (1 - \rho_B)P_{s_0} + \rho_B P_{s_1} \\ \text{double pulse} : P_s &\leq (1 - \rho_B)^2 P_{s_{0D}} + 2(1 - \rho_B)\rho_B P_{s_0} + \rho_B^2 P_{s_{1D}} \end{aligned} \quad (8)$$

Double-pulse의 경우는 수신 신호의 상황에 따라 EGC와 SC를 선택적으로 사용함에 따라 도출되는 수식이다. 이 때 주파수 다이버시티를 통해 single-pulse보다 높은 이득을 얻게 된다.

Link-16은 CCSK를 통해 복구된 31 개의 심볼을 모아 RS(31, 15) 코딩을 통해 데이터를 복구하게 된다. RS(n, k) 코드는 (n-k)/2=t 개만큼의 심볼 에러를 정정할 수 있으며, 이에 따라 최종적으로 부분 대역 잡음 재밍 환경에서 Link-16의 심볼 에러 확률은 (9)과 같이 계산할 수 있다⁶⁾.

$$P_{s_{RS}} \approx \frac{1}{n} \sum_{e=t+1}^n e \binom{n}{e} P_s^e (1 - P_s)^{n-e} \quad (9)$$

수식 (9)에서 $P_{s_{RS}}$ 는 RS 코딩을 통해 복구된 경우의 심볼 에러 확률을 나타내며, e 는 31개의 심볼 중 에러가 일어난 심볼의 개수를 나타낸다. Link-16에서는 RS(31, 15)를 사용하므로 위 수식에서 t 는 8 이며, P_s 는 single-pulse, double-pulse에 따라 (8)의 수식을 사용하면 된다.

4.3 펄스 재밍 성능 분석

펄스 재밍은 전체 주파수 대역에 대한 재밍을 실시하므로, 성능에 영향을 미치는 요소는 주파수 대역이 아닌 단위 시간 당 펄스의 지속 시간이다. 본 논문에서는 이를 ρ_T 라고 명칭하였으며, 펄스 재밍에서의 칩 에러 확률을 계산 시 ρ 대신 사용하였다.

펄스 재밍은 심볼 지속 시간보다 짧은 펄스를 일정 간격으로 발생시켜 재밍하므로 모든 심볼이 ρ_T 만큼의 재밍을 겪게 된다. 따라서 수신 심볼은 재밍을 ρ_T 에 따라 재밍을 겪은 칩과 겪지 않은 칩으로 구성된다. 따라서 심볼 에러 확률을 구하기 전에 평균적인 채널 칩 에러 확률을 구해야 하며, 수식 (10)은 펄스 재밍에서 single-pulse와 double-pulse의 평균 채널 칩 에러 확률을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 & \text{single pulse : } P_c = (1 - \rho_T)P_{c_0} + \rho_T P_{c_1} \\
 & \text{double pulse :} \\
 & P_c < (1 - \rho_T)^2 P_{c_{0D}} + 2(1 - \rho_T)\rho_T P_{c_0} + \rho_T^2 P_{c_{1D}}
 \end{aligned} \tag{10}$$

부분대역 재밍과 마찬가지로 double-pulse에서의 다이버시티 이득은 EGC와 SC를 통해 계산하였다. 평균 칩 에러 확률을 통해 수신 심볼의 에러 확률을 (11)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_s \leq \sum_{j=0}^{32} \zeta_{UB,j} \binom{32}{j} P_c^j (1 - P_c)^{n-j} \tag{11}$$

수식 (11)에서 P_c 는 single-pulse와 double-pulse에 따라 수식(10)의 값을 사용하면 된다. RS 코딩을 통해 복구된 경우의 심볼 에러 확률은 부분 대역 잡음 재밍과 동일하게 수식 (9)에 수식 (11)을 대입하여 계산할 수 있다.

V. Link-16의 항재밍 성능

IV장에서 도출한 성능 분석 수식을 바탕으로 Link-16의 항재밍 성능을 도출하였다. 이 때, Nakagami 페이딩 채널을 고려하였으며, line of sight(LOS)를 고려하여, Nakagami 파라미터에 $m=2, \sigma=1$ 을 사용하였다.

그림 5는 재밍이 없는 환경에서 single-pulse와 double-pulse의 성능을 나타낸 것이다. 위 그래프를 통해 재밍이 없는 경우, double-pulse가 single-pulse에 비해 3dB 정도의 이득을 보이는 것을 확인할 수 있다. E_b/N_0 가 10dB인 경우, single-pulse와 double pulse 모두 $1E-5$ 이하의 심볼 에러 확률을 나타낸다. 따라서 본고에서 재밍에 대한 성능 분석 시 E_b/N_0 를 10dB를 사용하였다.

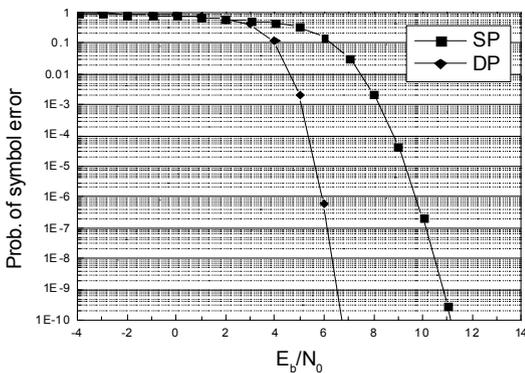


그림 5. 재밍이 없을 경우 Link-16의 심볼 에러 확률 (single-pulse, double-pulse)

그림 6은 부분대역 잡음 재밍 환경에서 single-pulse의 항재밍 성능을 확인한 것이다. 이 때 가로축은 E_b/N_j 로서 재밍 에너지 대비 비트 에너지를 나타내며, 값이 작아질수록 재밍의 송신 출력이 높거나, 근접 거리에서 재밍을 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 그래프는 재밍 대역의 크기를 달리하며 재밍을 수행한 결과에 대해 나타낸다. 그래프를 통해 전체 대역폭의 1/5를 재밍하는 것이 전체 대역을 재밍하는 것보다 재밍 효과가 높은 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 재밍 대역폭이 좁을수록 재밍 신호의 세기가 높아져 해당 대역의 심볼 에러 확률을 증가시키기 때문이다.

그림 7은 부분대역 잡음 재밍 환경에서 double-pulse의 성능을 확인한 것이다. double-pulse의 경우 재밍 대역의 수가 감소할수록 재밍 신호가 간섭을 일으킬 확률이 현저하게 낮아지게 되므로, 전대역 재밍에 비해 이득을 얻을 수가 없다. 따라서 Link-16의 double-pulse를 사용할 경우 부분 대역 잡음 재밍에 대해 매우 강력한

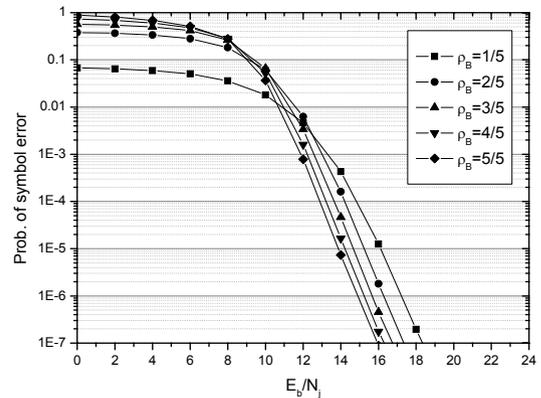


그림 6. 부분대역 잡음 재밍 환경에서 Link-16의 심볼 에러 확률($E_b/N_0=10\text{dB}$, single-pulse)

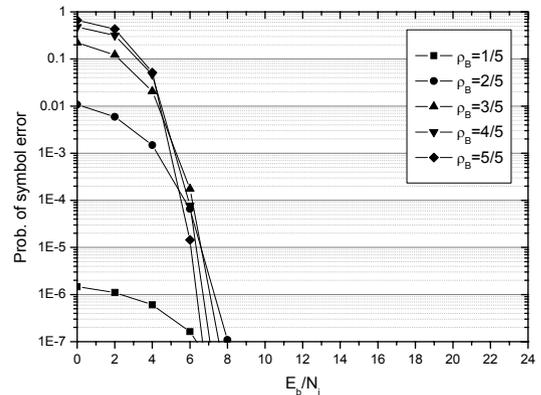


그림 7. 부분대역 잡음 재밍 환경에서 Link-16의 심볼 에러 확률($E_b/N_0=10\text{dB}$, double-pulse)

한 항재밍 성능을 보인다고 할 수 있다.

그림 8은 펄스 재밍 환경에서 single-pulse와 double-pulse의 성능을 비교한 것이다. 그래프에서 ρ_T 는 단위 시간 당 재밍 펄스가 존재하는 시간의 비율을 나타낸다. Single-pulse와 double-pulse 모두 ρ_T 가 1인 경우 즉, 재밍이 항상 존재하는 경우가 가장 높은 재밍 성능을 나타낸다. 이를 통해 결국 시간 축에서 짧게 끊어서 보내는 펄스 재밍은 Link-16에 적합하지 않음을 확인할 수 있다.

Link-16의 time slot 구조는 넓은 네트워크 커버리지를 지원하기 위해 propagation time을 위해 타임 슬롯 구간의 절반 정도 시간에 전송하지 않는다. 또한 전송되는 순간에도 주파수 도약을 위해 심볼 구간과 유사한 시간을 휴지 구간으로 활용한다. 그림 9은 Link-16의 이러한 속성을 고려하여 펄스 재밍 시 재머가 소비하는 파워의 양을 고려한 그래프이다. 그림 8에 비해 4.5 dB 정도 왼쪽으로 쉬프트 된 것을 확인할 수 있다. 결

국 시간 축에서 하는 재밍은 Link-16에서 큰 효과가 없음을 확인할 수 있으며, Link-16의 높은 항재밍 성능을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본고에서는 전술데이터링크 기술 중 전세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 Link-16의 항재밍 성능에 대한 분석을 실행하였다. 본 연구를 통해 부분대역 잡음 재밍의 경우 Link-16의 single-pulse 통신 방식에는 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 반면 double-pulse를 사용하는 경우에는 두 개의 수신 신호가 재밍을 겪지 않을 확률이 매우 높아져, 부분대역 잡음 재밍이 효과를 보지 못함을 확인할 수 있었다. 펄스 재밍의 경우에는 전체 시간의 절반 이상을 휴지 시간으로 갖는 Link-16의 특성으로 인해 큰 효과를 나타내지 못하는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] US DoD, *Network centric warfare report to congress*, Jul. 2001.
- [2] 김한동, 최태봉, “전술데이터링크 기술 표준화 동향”, *한국통신학회지* 제24권 제10호, Oct. 2007년
- [3] 박형원, 노홍준, 임재성, “한국형 합동전술데이터링크 구축을 위한 Link-16 PHY/MAC 기술 분석”, *한국통신학회지* 제26권, 제3호, Feb. 2009.
- [4] H. Wang, J. Kuang, Z. Wang, H. Xu, “Transmission performance evaluation of JTIDS”, *IEEE Military Communications Conference*, 2005.
- [5] C. Kao, C. Robertson, and K. Lin, “Performance analysis and simulation of cyclic code-shift keying,” *IEEE Military Communications Conference*, 2008.
- [6] C. Kao, F. Kragh, and C. Robertson, “Performance analysis of a JTIDS/Link-16-type waveform transmitted over Nakagami fading channels with pulsed noise interference,” *IEEE Military Communications Conference*, 2008.
- [7] R.A. Poisel. *Modern Communication Jamming Principles and Techniques*. Artech House, 2004.
- [8] S. M. Rytov, Yu. A. Kravtsov, V. I. Tatarskii, *Principles of Statistical Radio physics 1*, Springer-Verlag, 1987.

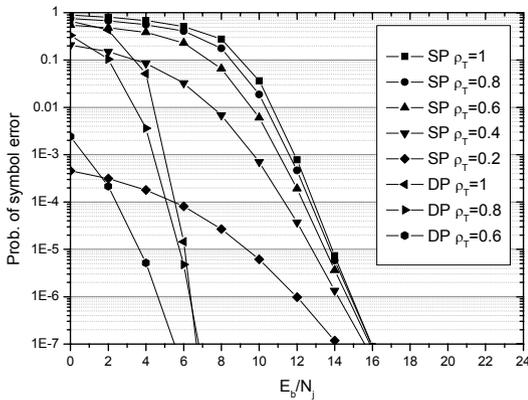


그림 8. 펄스 재밍 환경에서 Link-16의 심볼 에러 확률 ($E_b/N_0=10dB$)

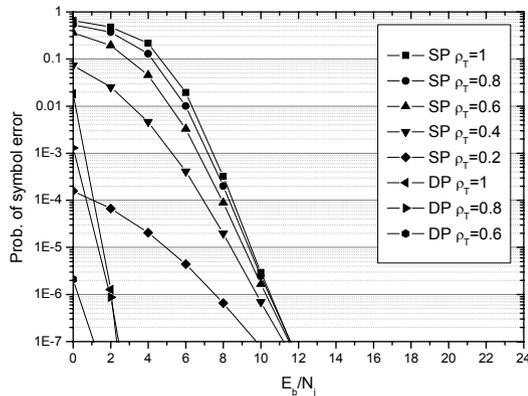


그림 9. 펄스 재밍 환경에서 Link-16의 심볼 에러 확률 ($E_b/N_0=10dB$, Link-16 시스템 요소 고려)

노 흥 준 (Hongjun Noh)

정회원



2008년 2월 아주대학교 전자공학과 학사
2008년 3월~현재 아주대학교 컴퓨터공학과 석박사통합과정 <관심분야> 전술데이터링크, 항재밍 통신

임 재 성 (Jaesung Lim)

중신회원



1983년 2월 아주대학교 전자공학과 학사
1985년 2월 KAIST 영상통신 석사
1994년 8월 KAIST 디지털통신 박사
1998년 3월~현재 아주대학교 정보통신전문대학원 교수

2006년 8월~현재 아주대학교 국방전술네트워크 연구센터장

<관심분야> 이동통신, 무선네트워크, 국방전술통신

김 중 빈 (Jungbin Kim)

정회원



2004년 2월 한양대학교 전자컴퓨터공학부 학사
2006년 2월 한양대학교 전자전기제어계측공학과 석사
2010년 2월 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사
2010년 3월~현재 아주대학교 장위국방연구소 연구교수

<관심분야> 협력형 릴레이, 무선인지, 다중 사용자 다중 안테나 시스템

남 정 호 (Jeong-Ho Nam) Kim

정회원

1990년 3월~현재 국방과학연구소 연구원

<관심분야> 위성 단말 송수신기, 전술데이터링크

장 동 운 (Dhong-Woon Jang)

정회원

1987년 3월~현재 국방과학연구소 연구원

<관심분야> SDR 모뎀, 전술데이터링크 프로토콜