

# 재밍 환경에서 처프대역확산 주파수 도약 시스템의 NED 다이버시티 결합 기법 성능 분석

엄준수\*, 김광열\*, 이종호\*\*, 신요안\*\*, 신오순<sup>o</sup>

## Performance Analysis of NED Diversity Combining Scheme for Chirp Spread Spectrum Frequency Hopping Systems under Jamming Environments

Joon-Soo Eom\*, Kwang-Yul Kim\*, Jong-Ho Lee\*\*, Yoan Shin\*\*, Oh-Soon Shin<sup>o</sup>

### 요약

차세대 군 통신체계는 재밍(Jamming)이나 간섭 등의 채널환경에 최적으로 적응하여 서비스가 가능한 전송률, 항재밍 (Anti-Jamming) 능력, 망 제어 및 망 관리 능력을 가져야 하며 고속 이동 차량, 초소형 단말, 초고속 무인기 등의 다양한 플랫폼을 지원해야 한다. 여러가지 교란 기법들 중 재밍 기법은 저렴한 비용과 간단한 기술로도 손쉽게 장치를 제작하여 공격할 수 있기 때문에 재밍 공격에 대처하기 위한 항재밍 기술이 연구되고 있다. 본 논문에서는 군 통신 시스템의 항재밍 성능 향상을 위해 처프대역확산 주파수 도약 시스템에 Normalized Envelope Detection 다이버시티 기법을 적용한 시스템을 제시한다. 모의실험을 통해 다양한 부분대역잡음재밍과 멀티톤재밍 환경에서 제시한 시스템의 비트오류확률 성능을 검증하였다.

키워드 : 부분대역잡음재밍, 멀티톤재밍, 처프대역확산, NED, 항재밍

Key Words : Partial Band Noise Jamming, Multi-tone Jamming, Chirp Spread Spectrum, Normalized Envelope Detector, Anti-Jamming

### ABSTRACT

Next-generation military communication systems must be able to adapt optimally to channel environments such as jamming or interference, and should possess capabilities for achieving required transmission rates, anti-jamming, network control, and network management. It should also support various platforms such as high-speed moving vehicles, ultra-compact terminals, and high-speed drones. Among various disruptive techniques, jamming techniques can easily create devices at low cost and with simple technology, making it possible to launch attacks. Therefore, anti-jamming technologies are being researched to counter jamming attacks. This paper presents a system applying normalized envelope detection based diversity technique to the

\* 본 연구는 2022년 정부 (방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-044).

• First Author : Soongsil University, Department of Information Communication Convergence Technology, jseom@soongsil.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, osshin@ssu.ac.kr, 종신회원

\* Senior Engineer, SOLiD WiNTECH, kimky@solidwt.co.kr, 정회원

\*\* Soongsil University, School of Electronic Engineering, jongho.lee@ssu.ac.kr, 종신회원; yashin@ssu.ac.kr, 종신회원  
 논문번호 : 202310-107-A-RU, Received October 18, 2023; Revised October 23, 2023; Accepted October 23, 2023

chirp spread spectrum frequency-hopping system to enhance anti-jamming performance of military communication systems. Through simulations, the bit error rate performance was verified in diverse environments with partial band noise jamming and multi-tone jamming.

## I. 서론

네트워크 중심 작전환경 (Network Centric Operational Environment: NCOE) 구현을 위한 모든 무기체계의 기반인 전술통신체계는 지상, 해상, 공중, 우주로 아우른다. 네트워크 중심전(Network Centric Warfare: NCW)에 대비한 차세대 군 통신체계는 재밍 (Jamming)이나 간섭 등의 채널환경에 적응하여 서비스가 가능한 전송률, 항재밍 (Anti-Jamming) 능력, 망 제어 및 관리 능력을 확보해야 하며 고속 이동 차량, 초소형 단말, 초고속 무인기 등의 다양한 플랫폼을 지원해야 한다<sup>1-3</sup>. 전자전 (Electronic Warfare: EW)에서 전자공격 (Electronic Attack: EA)을 의미하는 재밍은 적군의 통신을 교란시킨다. 재밍은 저렴한 비용과 간단한 기술로도 손쉽게 장치를 제작하여 공격할 수 있기 때문에 재밍 공격에 효과적으로 대처할 수 있는 항재밍 기술이 활발히 연구되고 있다<sup>4</sup>.

대역확산(Spread Spectrum) 기술은 대표적인 항재밍 기술로서 20세기 초반부터 군 통신을 용도로 연구되고 다양한 시스템이 개발되었다<sup>4,5</sup>. 대역확산 기술은 신호를 주파수 축에서 확산시킨 후 전송하고 수신기에서 역확산 과정을 통해 잡음, 간섭 및 재밍의 영향을 줄이는 기술이다. 대역확산 기술은 신호를 확산하는 방식에 따라 직접 시퀀스 대역확산(Direct Sequence Spread Spectrum: DSSS) 방식과 주파수 도약 대역확산(Frequency Hopping Spread Spectrum: FHSS) 방식으로 분류된다. DSSS 방식은 협대역 변조 신호에 고속으로 변하는 부호를 직접 곱하여 광대역으로 확산하는 방식이며, FHSS 방식은 적이 쉽게 추적하여 방해할 수 있는 고정 반송파 주파수를 사용하는 대신에 주파수를 의사랜덤(Pseudo Random) 도약하여 변조 신호를 전송함으로써 적의 추적을 회피하는 방식이다. 일반적으로 DSSS 방식은 광대역 펄스재밍에 강하지만 부분대역잡음재밍에는 취약하고, 반면에 FHSS는 부분대역잡음재밍에 강하지만 펄스재밍에 취약한 특성을 보인다<sup>5</sup>.

한편, 초프대역확산(Chirp Spread Spectrum: CSS) 기술은 시간에 따라 순간 주파수가 변하는 초프 신호를 변조 신호로 사용하여 대역확산 효과를 얻는 방식으로 DSSS 방식과 유사하게 낮은 전력밀도 및 높은 시간 분해능 특성을 갖는다<sup>6,7</sup>. 이러한 특성으로 인해 CSS

시스템은 1940년대부터 군용 레이더 신호로 많이 사용되어 오고 있다<sup>8</sup>.

본 논문에서는 CSS와 FHSS 기술을 결합한 CSS-FH 시스템을 제시하고 항재밍 성능을 분석한다. CSS-FH 시스템에서는 각 도약 내에서 CSS 신호를 사용함으로써 고정된 시간-대역폭 곱을 갖는 협대역 펄스를 사용하는 기존 FHSS의 단점을 극복하고 이중의 항재밍 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 아울러, 대역확산 기술과 더불어 항재밍에 효과적인 기술로 알려진 Normalized Envelope Detection (NED) 다이버시티 (Diversity) 수신 기법을 고려한다. 다양한 부분대역잡음재밍(Partial-Band Noise Jamming: PBNJ) 및 멀티톤재밍(Multi-tone Jamming: MTJ) 환경에서 CSS-FH 시스템의 NED 다이버시티 결합 성능을 제시함으로써 제안한 시스템의 항재밍 효용성을 검증한다.

## II. 초프대역확산 주파수 도약 시스템

그림 1은 본 논문에서 고려하는 NED 다이버시티 결합 기능을 갖는 CSS-FH 시스템의 블록도를 나타낸다. 송신 데이터는 CSS 변조 과정을 거쳐 주파수 도약을 통해 전송된다. 수신기에서는 주파수 도약 신호를 검출하여 NED 다이버시티 결합 후 CSS 복조 과정을 거쳐서 데이터를 복원한다.

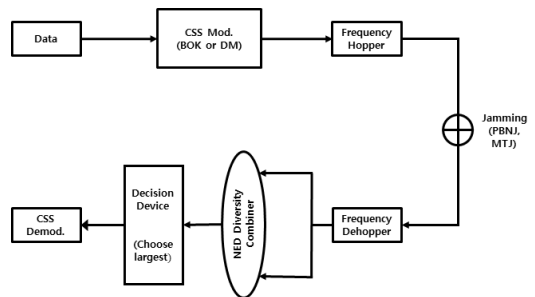


그림 1. NED 다이버시티 결합 초프대역확산 주파수 도약 시스템 블록도

Fig. 1. Block diagram of the CSS-FH system NED diversity combining

### 2.1 초프대역확산

그림 2와 같이 초프 지속 시간 동안 시간이 지남에

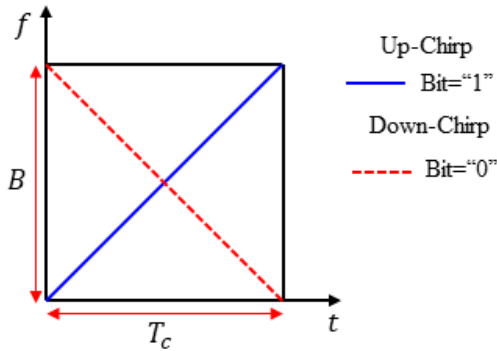


그림 2. 처프 신호의 시간-주파수 관계  
Fig. 2. Time-frequency relationship of chirp signals

따라 순간 주파수가 변하는 처프 신호를 이용하여 데이터 신호를 더 넓은 주파수 대역으로 확산시켜 전송한다. 그림 2에서 시간에 따라 주파수가 증가하는 신호를 Up-Chirp 신호, 시간에 따라 주파수가 감소하는 신호를 Down-Chirp 신호로 정의한다. CSS 변조 방식은 변조 신호를 생성하는 방식에 따라 Binary Orthogonal Keying (BOK) 방식과 Direct Modulation (DM) 방식으로 분류된다<sup>9,10</sup>. BOK 방식은 비트 전송을 위해 양과 음의 순간 주파수 변화율을 갖는 서로 다른 처프 신호를 전송하는 방식으로,  $i$  번째 비트  $b_i$ 에 대한 BOK 변조 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$c_i(t) = A \cos \left[ 2\pi f_c t - (-1)^{b_i} \pi \eta t^2 \right], \quad |t| < \frac{T_c}{2} \quad (1)$$

여기서  $A = \sqrt{2E_b/T_c}$ ,  $E_b$ 는 비트당 에너지,  $f_c$ 는 처프 신호의 중심 주파수,  $T_c$ 는 처프 지속 시간을 나타낸다. 처프율(Chirp Rate)  $\eta = B/T_c$ 는  $T_c$  동안 전송 대역폭  $B$ 만큼 주파수 스위핑(Sweeping) 함을 나타낸다.  $b_i = 1$ 이면 양의 순간 주파수 변화를 갖는 Up-Chirp 신호로,  $b_i = 0$ 이면 음의 순간 주파수 변화를 갖는 Down-Chirp 신호로 전송된다. 한편 DM 방식은 처프 신호를 스펙트럼 확산 기능을 담당하는 부호로만 사용하고 처프 신호에 Phase Shift Keying (PSK), Quadrature Amplitude Modulation (QAM) 등 데이터 변조된 신호를 곱하여 전송한다.  $i$  번째 데이터 변조 심볼  $s_i$ 에 Up-Chirp 신호를 곱하여 생성한 DM 변조 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$c_i(t) = s_i \cos \left[ 2\pi f_c t + \pi \eta t^2 \right], \quad |t| < \frac{T_c}{2} \quad (2)$$

## 2.2 주파수 도약

주파수 도약 기법은 반송파의 주파수가 고정되어 있지 않고 변조된 신호를 일정한 대역폭 내에서 주파수가 빠르게 변화되는 반송파에 실어서 송수신한다. 주파수 도약 기법은 하나의 심볼을 다수의 반송파로 나누어 송신하는 고속 주파수 도약(Fast Frequency Hopping: FFH)과 하나의 반송파를 통해 여러 개의 심볼을 연속적으로 전송하는 저속 주파수 도약(Slow Frequency Hopping: SFH)으로 분류할 수 있다. 도약 주파수는 일반적으로 의사랜덤 코드를 이용하여 결정하기 때문에 도약 패턴에 대한 정보가 없는 적외 통신을 방해하기 어렵다는 측면에서 항재밍 기능을 제공한다. 특히 FFH 시스템은 주파수 도약이 상대적으로 빨리 이루어지기 때문에 적외 도약 패턴을 파악하기 어렵다.

FFH 기법은 각 심볼을 다수의 도약 주파수로 나누어 전송하므로 각 도약 신호마다 위상 추정하는 것이 어려운 관계로 Non-coherent 수신에 가능한 BOK 방식을 사용하는 것이 효율적이다. SFH 기법은 하나의 도약 주파수에 다수의 심볼이 전송되기 때문에 도약 신호마다 Preamble을 전송하여 위상추정이 가능하다. 따라서 고차 변조를 적용할 수 있는 DM 방식을 사용하는 것이 주파수 효율 측면에서 효과적이나, Noncoherent 수신에 가능한 변조 방식을 사용하는 것이 복잡도를 줄이는데 있어서는 유리하다.

## 2.3 다이버시티 전송 및 결합

다이버시티 전송 및 결합 기법은 다수의 채널을 통해 동일한 데이터를 반복적으로 전송하고 수신기에서 반복 수신된 데이터를 적절히 결합하여 복조하는 기법이다. 다이버시티 기술은 서로 다른 채널을 통해 수신된 신호에 일반적으로 서로 다른 가중치를 주어 결합함으로써 무선 채널의 페이딩뿐만 아니라 재밍의 영향을 줄이는데 효과적이다.

FFH 시스템에서는 그림 3(a)와 같이 하나의 심볼이 다수 도약 주파수에 걸쳐서 전송되기 때문에 수신기에 매 심볼마다 다이버시티 결합을 수행한다. 재밍된 주파수에 의해 심볼의 일부 구간이 손상되었다고 재밍의 영향을 받지 않은 부분과의 다이버시티 결합을 통해 복원이 가능하다. SFH 시스템에서는 그림 3(b)와 같이 각 심볼을 여러 개의 도약 주파수로 분할하여 띄엄띄엄 전송하고 수신기에서 이를 모아서 다이버시티 결합을 할 수 있다. 각 심볼의 모든 부분이 수신되어야만 다이버시티 결합을 할 수 있으므로  $L$ 차 다이버시티의 경우  $(L-1)$ 개 홉 길이만큼의 시간지연(Delay)이 발생한다. 다이버시티 결합 기법으로는 Coherent 수신에 경우

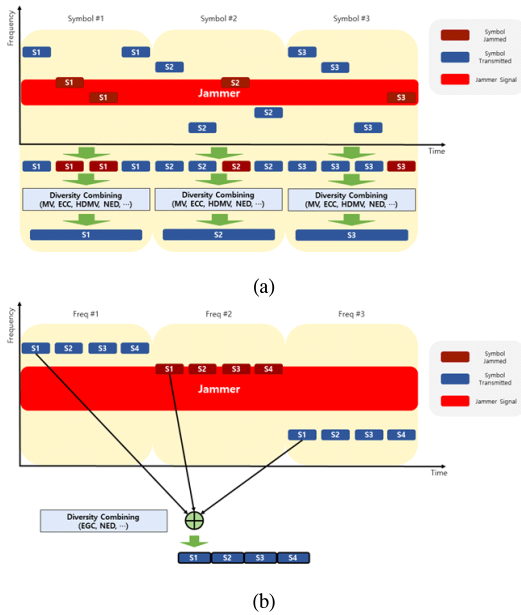


그림 3. (a) FFH 시스템에서의 다이버시티 결합, (b) SFH 시스템에서의 다이버시티 결합  
 Fig. 3. (a) Diversity combining in FFH systems, (b) Diversity combining in SFH systems

Maximal Ratio Combining (MRC), Equal Gain Combining (EGC), Selection 등이 있고, Noncoherent 수신인 경우 Hard Decision Majority Vote (HDMV), Energy Clipped Combining (ECC), EGC, Normalized Envelope Detection (NED) 등이 있다<sup>11-12)</sup>.

본 논문에서는 여러 가지 다이버시티 결합 기법 중 하드웨어 설계가 간단하면서 항재밍 효과가 큰 것으로 알려진 NED 다이버시티 결합 기법을 적용하였다. NED 다이버시티 결합 기법은 특히 부분대역잡음재밍과 멀티톤재밍에 효과적이다<sup>13)</sup>. 그림 1과 같이 수신기는 각 도약 신호를 제곱 포락선 검출기(Square-Law Envelope Detector)를 이용하여 검출하고 이를 모아서 NED 다이버시티 결합을 한다.

NED 다이버시티 결합 기법은 각 톤에 대한 수신 신호를 전체 톤에 대한 수신신호의 합으로 정규화(Normalization)한 후 합산하여 결합하는 방식이다.  $M$ 진 주파수 변조한 심볼을  $L$ 개의 도약을 통해 전송하는 경우 각 도약에서  $M$ 개 톤에 대한 포락선 검출기 출력을  $z_{m\ell}$  ( $m=1, 2, \dots, M, \ell=1, 2, \dots, L$ )이라고 하면, 각 톤에 대한 NED 다이버시티 결합된 신호  $z_m$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>12)</sup>.

$$z_m = \sum_{\ell=1}^L \frac{z_{m\ell}}{\sum_{m=1}^M z_{m\ell}}, \quad m=1, 2, \dots, M \quad (3)$$

재밍된 홉의 수신전력 레벨이 상대적으로 커지는데 식 (3)의 정규화 과정을 통해 해당 홉의 영향을 줄이는 효과를 기대할 수 있다.

### III. 성능 평가

#### 3.1 재밍 환경

재밍 신호는 무선통신 시스템이나 레이더 시스템의 정상적인 작동을 방해하거나 간섭시키기 위해 전송되는 신호를 의미한다. 이러한 신호는 주로 잡음 또는 왜곡된 신호 형태로 전송되어 원래 신호의 수신과 해석을 방해하거나 불가능하게 만드는 역할을 한다. 재밍 신호는 다양한 형태와 기술로 구현이 될 수 있다. 가장 기본적인 재밍 형태인 잡음재밍은 통신 신호를 잡음으로 뒤덮어 원래 신호의 식별을 어렵게 만든다. 연속파(Continuous Wave: CW) 재밍은 특정 주파수 대역에 위치하는 연속적인 주파수 신호를 생성하여 해당 주파수 대역에서 통신을 방해한다. 톤 재밍은 특정 주파수에 고정된 주기적인 톤 신호를 전송하여 통신시스템의 작동을 방해하거나 혼란시키는 방법이다. Deceptive 재밍은 진짜 또는 왜곡된 신호를 생성하여 적의 레이더 시스템을 혼란스럽게 만들고, 적 레이더가 실제 대상을 찾는 대신 진짜 대상을 추적하거나 정확한 거리와 위치 정보를 찾을 수 없게 만든다<sup>10)</sup>. 본 논문에서는 부분대역잡음재밍과 멀티톤재밍 환경을 고려한다.

부분대역잡음재밍은 전체 주파수 대역 대신 특정 주파수 범위만을 선택하여 잡음 신호를 생성하여 보내는 방식으로, 원하는 통신 채널을 겨냥하여 공격하고자 하는 목적을 갖고 있다. 원하는 통신 채널 주파수 대역 내에서 잡음은 적군의 신호와 동일한 주파수 특성을 가지지만, 의미 없는 데이터로 채워진다. 그림 4(a)는 부분대역잡음재밍의 주파수 분포를 도시한 것으로 파라미터  $\rho = W_j / W_{SS} \leq 1$ 는 재밍 신호의 주파수 점유율

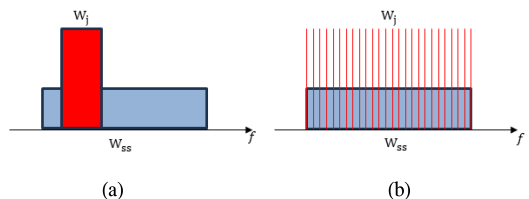


그림 4. (a) 부분대역잡음재밍, (b) 멀티톤재밍  
 Fig. 4. (a) PBNJ, (b) MTJ

을 나타낸다. 여기서  $W_{SS}$ 는 시스템의 확산 대역폭,  $W_J$ 는 재밍 신호 대역폭을 의미한다.  $J$ 를 재밍 신호의 전력,  $J_0 = J/W_J$ 를 전체 확산 대역에서의 재밍 신호 전력 스펙트럼 밀도라고 하면, 재밍 대역에서의 재밍 전력 밀도는 다음과 같이 표현된다<sup>14)</sup>.

$$\frac{J}{W_J} = \frac{J}{W_{SS}} \cdot \frac{W_{SS}}{W_J} = \frac{J_0}{\rho} \quad (4)$$

주파수  $f_c$ , 전력  $J$ 를 갖는 톤 신호는  $\text{Re}\{\sqrt{J}e^{j\theta}e^{j2\pi f_c t}\}$ 와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\text{Re}\{\cdot\}$ 는 실수 부분을 의미하고,  $\theta$ 는  $[0, 2\pi)$  구간에서 균일 분포를 따른다<sup>15)</sup>. 따라서 톤의 개수가  $N_J$ 인 멀티톤재밍 신호  $j(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$j(t) = \sum_{k=1}^{N_J} \text{Re}\{\sqrt{J_k}e^{j\theta_k}e^{j2\pi f_{c,k}t}\} \quad (5)$$

전체 도약 중심주파수의 수를  $N$ 이라고 하고 멀티톤재밍의 각 톤의 주파수가 도약 중심주파수와 일치하는 경우 재밍 점유율은  $\mu = N_J/N$ 로 정의된다. 그림 4(b)는  $\mu = 1$ 인 경우를 나타낸 것으로 모든 도약 주파수가 재밍의 영향을 받는다. 이 경우는 각 도약 대역 내에서의 처프대역확산이 항재밍 역할을 하게 된다.

### 3.2 모의실험 결과

NED 다이버시티를 적용한 CSS-FH 시스템의 성능 평가를 위한 모의실험 결과를 제시한다. 도약율이 1,500hops/sec, 심볼율이 24ksps인 SFH 시스템을 고려하고, 처프대역확산은 Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK) 변조 신호를 DM 방식으로 확산하는 경우를 고려한다. SFH 시스템의 경우 위상추정이 가능하지만, [16]과 같이 시스템의 복잡도를 줄이기 위하여 차등 검출(Differential Detection)을 하는 DBPSK를 사용하였다. 중심주파수는 1GHz, 전체 도약 대역폭은 40MHz, 처프확산된 전송 신호의 대역폭은 1MHz로 총 40개의 채널을 도약한다고 가정한다. 모의실험 파라미터는 표 1에 정리되어 있다.

그림 5는 재밍 점유율  $\rho = 0.05, 0.1, 0.2$ 인 경우의 부분대역잡음재밍 환경에서 NED 다이버시티를 적용한 경우  $E_b/J_0$ 에 따른 비트오류확률(Bit Error Rate: BER) 성능을 보여준다. “NED2”는  $L = 2$ 의 NED 다이버시티 결합 방식을 적용하여 디코딩한 경우이며 “NoNED”는 다이버시티 결합 없이 2개 중 마지막 도약 신호만

표 1. 모의실험 파라미터  
Table 1. Simulation Parameters

| Parameter                               | Value                         |
|---|-------------------------------|
| 중심주파수<br>(Center Frequency)             | 1GHz                          |
| 도약 대역폭<br>(Hopping Bandwidth)           | 40MHz                         |
| 처프확산 대역폭<br>(Chirp Spreading Bandwidth) | 1MHz                          |
| 도약율<br>(Hopping Rate)                   | 1,500hops/sec                 |
| 심볼율<br>(Symbol Rate)                    | 24ksps                        |
| 다이버시티 차수<br>(Diversity Order)           | 2                             |
| 재밍 점유율<br>(Jamming Occupancy Ratio)     | PBNJ: $\rho = 0.05, 0.1, 0.2$ |
|   | MTJ: $\mu = 0.5, 0.8, 1$      |

사용하여 디코딩한 경우의 BER 성능을 보여준다.  $\rho = 0.1$ 의 경우 NED 다이버시티 결합 알고리즘을 적용함으로써 부분대역잡음재밍에 대해서 상당한 성능 이득을 얻을 수 있음을 확인 할 수 있다. 또한 재밍 점유율이 커지면 특히 낮은  $E_b/J_0$ , 즉 재밍 신호의 전력이 큰 경우, 재밍에 의해 영향받는 도약 주파수가 늘어남에 따라 BER 성능이 열화됨을 확인할 수 있다.

그림 6에 제시한 모의실험 결과는 재밍 점유율  $\mu = 0.5, 0.8, 1$ 인 멀티톤재밍 환경에서의 BER 성능을 보여준다. 멀티톤재밍 환경일 때, NED 다이버시티 결합 기법을 적용하지 않은 경우 [15]에서 제시한 식을

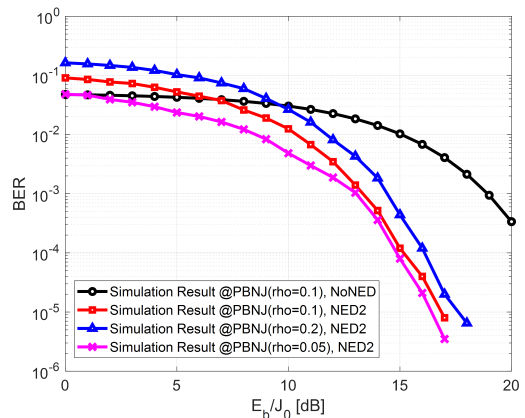


그림 5. 부분대역잡음재밍 환경에서 NED 다이버시티를 적용한 CSS-FH 시스템의 BER 성능  
Fig. 5. BER performance of the CSS-FH system with NED diversity in the presence of PBNJ

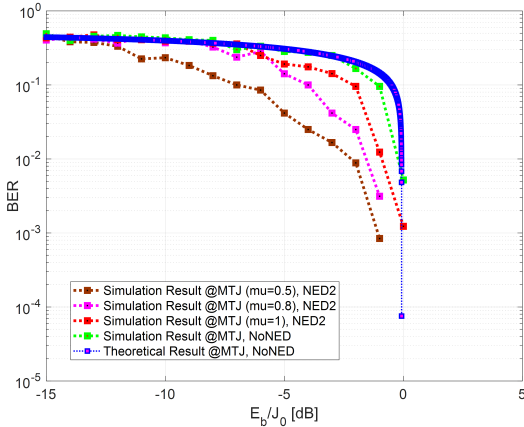


그림 6. 멀티톤재밍 환경에서 NED 다이버시티를 적용한 CSS-FH 시스템의 BER 성능

Fig. 6. BER performance of the CSS-FH system with NED diversity in the presence of MTJ

이용하여 계산한 이론치와 모의실험 결과가 거의 동일함을 확인할 수 있다. 부분대역잡음재밍의 경우와 마찬가지로 재밍 점유율이 커지면 대체적으로 성능이 열화되는 것을 확인할 수 있다. 특히  $\mu = 1$  인 경우는 모든 도약 채널이 재밍의 영향을 받기 때문에 NED 다이버시티에 따른 성능 향상이 미미한 것을 볼 수 있다. 또한 재밍 점유율에 상관없이  $E_b/J_0$  값이 일정값 이상이 되면 재밍에 거의 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 초프대역확산의 항재밍 효과에 의한 것으로 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

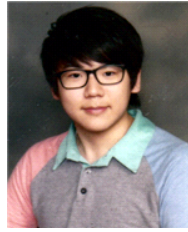
본 논문에서는 군 통신 시스템의 항재밍 성능 향상을 위해 초프대역확산 주파수 도약 시스템에 NED 다이버시티 기법을 적용하였다. 제시한 시스템은 항재밍에 효과적인 초프대역확산, 주파수 도약, 다이버시티 기술이 망라된 시스템으로 볼 수 있다. 모의실험을 통해 부분대역잡음재밍과 멀티톤재밍 환경에서 제시한 시스템의 BER 성능을 검증하였다. NED 다이버시티를 적용함으로써 부분대역잡음재밍과 멀티톤재밍 환경 모두에서 성능 이득이 있고, 일반적으로 재밍 점유율이 낮을수록 좋은 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 전대역을 점유하는 멀티톤재밍의 경우 주파수 도약과 다이버시티의 영향은 미미하지만 초프대역확산에 의해 어느 정도의 항재밍 효과를 얻을 수 있음을 검증하였다.

#### References

- [1] Y. D. Heo, "The study on the improvement plan for military combat power by base of NCW against the future war," *J. Convergence Secur.*, vol. 17, no. 5, pp. 153-161, Dec. 2017.
- [2] J. Y. Kim, U. C. Kim, and J. M. Lee, "Jamming technology in military communications," *KICS Inform. & Commun.*, vol. 26, no. 3, pp. 32-40, Feb. 2009.
- [3] S. W. Han and J. W. Seo, "Development direction of the next military communication satellite," *KICS Inform. & Commun.*, vol. 26, no. 3, pp. 24-31, Feb. 2009.
- [4] L. B. Milstein, S. Davidovici, and D. Schilling, "The effect of multiple-tone interfering signals on a direct sequence spread spectrum communication system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 30, no. 3, pp. 436-446, Mar. 1982.
- [5] Q. Ling and T. Li, "Modeling and detection of hostile jamming in spread spectrum systems," in *Proc. IEEE Work. Signal Process. Appl. for Public Secur. and Forensics*, pp. 1-5, Washington, DC, USA, Apr. 2007.
- [6] B. G. Mobasser and K. D. Pham, "Chirp spread spectrum performance in low probability of intercept theater," in *Proc. IEEE Military Commun. Conf.*, pp. 329-335, Los Angeles, CA, USA, Oct. 2018.
- [7] B. Reynders and S. Pollin, "Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication," in *Proc. Symp. Commun. & Veh. Technol.*, pp. 1-5, Mons, Belgium, Nov. 2016.
- [8] C. E. Cook and M. Bernfeld, *Radar Signals: An Introduction to Theory and Application*, Ch. 1, Academic Press, 1967.
- [9] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B. K. Levitt, *Spread Spectrum Communications Handbook*, Electronic Ed., McGraw-Hill, 2002.
- [10] R. Poisel, *Modern Communications Jamming: Principles and Techniques*, Ch. 1, Artech House, 2011.

- [11] T. A. Gulliver, R. E. Ezers, E. B. Felstead, and J. S. Wight, "The performance of diversity combining for fast frequency hopped NCMFSK in Rayleigh fading," in *Proc. IEEE Military Commun. Conf.*, pp. 452-457, San Diego, CA, USA, Oct. 1992.
- [12] K. S. Gong, "Performance of diversity combining techniques for FH/MFSK in worst case partial band and multi-tone jamming," in *Proc. IEEE Military Commun. Conf.*, pp. 17-21, Washington, DC, USA, Oct. 1983.
- [13] S.-H. Kim, Y.-J. Kim, S.-G. Hwang, B.-G. Jo, K.-H. Shin, and N. Kim, "AJ performance of the FH-CSS communication systems," *J. Korea Inst. Military Sci. & Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 69-73, Feb. 2011.
- [14] D. L. Schilling, L. B. Milstein, R. L. Pickholtz, and R. W. Brown, "Optimization of the processing gain of an M-ary direct sequence spread spectrum communication system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 28, no. 8, pp. 1389-1398, Aug. 1980.
- [15] Y. Lee, D. Chong, C. Song, I. Song, and S. Yoon, "Performance analysis of a CSS system in the presence of jamming signals," *J. Korean Inst. Commun. & Inform. Sci.*, vol. 34, no. 4, pp. 453-459, Apr. 2009.
- [16] J. Q. Pinkney, A. B. Sesay, S. Nichols, and R. Behn, "A robust high speed indoor wireless communications system using chirp spread spectrum," in *Proc. IEEE Canadian Conf. Electr. and Comput. Eng.*, vol. 1, pp. 84-89, 1999.

**엄 준 수 (Joon-Soo Eom)**



2019년 2월 : 숭실대학교 전자정보공학부 (학사)  
 2021년 2월 : 숭실대학교 정보통신융합학과 (석사)  
 2021년 3월~현재 : 숭실대학교 정보통신융합학과 박사과정  
 <관심분야> 통신이론, 통신시스템, 무선통신

[ORCID:0000-0002-6358-4600]

**김 광 열 (Kwang-Yul Kim)**



2007년 2월 : 공주대학교 정보통신공학과 (학사)  
 2017년 8월 : 숭실대학교 정보통신공학과 (박사)  
 2007년 5월~2009년 4월 : 한국 전자통신연구원 위촉연구원  
 2017년 9월~2019년 8월 : 숭실대학교 전임연구원

2019년 9월~2019년 12월 : 한양대학교 Post-Doc.  
 2020년 1월~2021년 7월 : 인포씨즈시스템 책임연구원  
 2021년 8월~현재 : (주)솔리드윈텍 책임연구원  
 <관심분야> 전술통신 시스템, 위성통신 시스템

[ORCID:0000-0003-1728-3230]

**이 종 호 (Jong-Ho Lee)**



1999년 2월 : 서울대학교 전기공학부 (학사)  
 2001년 2월 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 (석사)  
 2006년 2월 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 (박사)  
 2006년 3월~2008년 8월 : 삼성

전자 통신연구소 책임연구원

2008년 9월~2009년 8월 : Georgia Institute of Technology 박사후연구원

2009년 9월~2012년 2월 : 공주대학교 전기전자제어공학부 조교수

2012년 3월~2015년 9월 : 가천대학교 전자공학과 조교수

2015년 10월~2018년 8월 : 가천대학교 전자공학과 부교수

2018년 9월~현재 : 송실대학교 전자정보공학부 교수  
 <관심분야> 통신이론, 통신시스템, 통신 신호처리

[ORCID:0000-0002-7439-1740]

**신 오 순 (Oh-Soon Shin)**



1998년 2월 : 서울대학교 전기공학부 (학사)  
 2000년 2월 : 서울대학교 전기공학부 (석사)  
 2004년 2월 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 (박사)  
 2004년 3월~2005년 9월 : Harvard

University 박사후연구원

2006년 4월~2007년 8월 : 삼성전자 통신연구소 책임연구원

2007년 9월~현재 : 송실대학교 전자정보공학부 교수  
 <관심분야> 통신이론, 통신시스템, 통신 신호처리

[ORCID:0000-0002-6984-8240]

**신 요 안 (Yoan Shin)**



1987년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (학사)  
 1989년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (석사)  
 1992년 12월 : University of Texas at Austin 전기및컴퓨터공학과 (박사)

1992년 12월~1994년 7월 : Austin 소재 MCC (Microelectronics & Computer Technology Corp.) 연구원

2009년 9월~2010년 8월 : University of British Columbia 전기및컴퓨터공학과 방문교수

1994년 9월~현재 : 송실대학교 전자정보공학부 교수

2015년 2월~2017년 1월 : 송실대학교 연구산학협력처장 겸 산학협력단장

2021년 2월~2023년 1월 : 송실대학교 기획조정실장

2023년 2월~현재 : 송실대학교 학사부총장

2022년 1월~2022년 12월 : 한국통신학회 회장

2023년 1월~현재 : 한국통신학회 명예회장

<관심분야> 이동통신 시스템, 통신 신호처리

[ORCID:0000-0002-4722-6387]