

# 처프 대역 확산 시스템에서 단일 선형 처프 기반의 통신유사 재밍 기법

김 광 열\*, 신 요 안\*

## Single Linear Chirp-Based Communication-Like Jamming in Chirp Spread Spectrum Systems

Kwang-Yul Kim\*, Yoan Shin\*

요 약

높은 전력의 전파 신호를 무작위로 방사하는 일반적인 재밍 기법은 처프 대역 확산 시스템에 대한 재밍 성능을 향상시키는데 제한이 있으며, 적 통신 시스템뿐만 아니라 아군 통신 시스템도 교란시킬 수 있다. 이에, 본 논문에서는 재밍 성능을 향상시키기 위해 적 통신 신호와 유사한 신호로 재밍을 수행하면서도 동시에 아군 통신 시스템은 통신을 할 수 있는 통신유사 재밍 기법을 제안한다. 제안된 기법은 적 통신 시스템과 유사한 신호를 이용하기 때문에 적 통신 신호의 전송 대역폭에 대해 재밍 대역폭을 변화시키면서 대역폭 간 상호상관계수를 수직적으로 유도하고, 적 통신 신호에 대한 재밍 성능과 아군 통신 신호의 성능을 분석한다. 모의실험 결과, 아군 통신 시스템이 적 통신 신호의 전송 대역폭보다 낮은 재밍 대역폭으로 재밍을 수행하면서도 적 통신 신호에 대한 재밍 성능을 향상시킬 수 있으며, 아군 통신 시스템은 재밍에 사용되어야 하는 전력으로 통신이 가능함을 보였다.

**Key Words** : linear chirp, chirp spread spectrum, jamming strategy, spreading bandwidth, cross-correlation coefficient, processing gain

### ABSTRACT

The conventional jamming scheme that randomly radiates high power radio frequency signals limits the improvement of jamming performance against the chirp spread spectrum (CSS) system, and the jamming signal may affect the alliance communication system as well as the enemy's one. Thus, in this paper we propose a communication-like jamming (CLJ) scheme by which the communication signal can attack the enemy's signals and communicate between alliance's systems at the same time. Since the proposed scheme uses the single linear chirp (SLC) similar to the enemy's one, we mathematically derive the inter-bandwidth cross-correlation coefficient according to the jamming bandwidth when the transmission bandwidth for the enemy is fixed. Then, we analyze the jamming and communication performances in various perspectives. Simulation results show that the proposed SLC-CLJ scheme can communicate with the alliance and improve the jamming performance even the jamming bandwidth is lower than the enemy's transmission bandwidth.

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다 (UD160070BD).

• First Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, kky1117@ssu.ac.kr, 정희원

\* Corresponding Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, yashin@ssu.ac.kr, 종신희원

논문번호 : 201901-422-C-RN, Received January 28, 2019; Revised March 26, 2019; Accepted March 26, 2019

## I. 서 론

전자전 (Electronic Warfare; EW)에서 전쟁의 우위를 선점하기 위해서는 정보의 전달이 매우 중요하며, 이를 위해 전자 공격 (Electronic Attack; EA), 전자 지원 (Electronic Support; ES), 그리고 전자 방어 (Electronic Protection; EP)가 유기적으로 연결되어야 한다<sup>1)</sup>. 대역 확산 (Spread Spectrum; SS) 기술은 EA 기술로부터 통신 신호의 생존성을 보장하기 위해 개발된 EP 기술의 한 종류로서, 전송 대역폭을 확산시킴으로써 군 통신에서 요구되는 저피탐 (Low Probability of Detection)과 항재밍 (Anti-Jamming) 특성은 물론 다중 경로 감쇠에도 강한 통신 특성을 지니기 때문에 군용 통신은 물론 상용 통신의 핵심 기술로 사용되고 있다<sup>2)</sup>. 일반적으로 SS 기술은 확산 방식에 따라 직접 시퀀스 (Direct Sequence) 방식, 주파수 도약 (Frequency Hopping) 방식, 그리고 처프 (Chirp) 방식으로 구분된다<sup>3)</sup>. 이 중에서 처프 대역 확산 (Chirp Spread Spectrum; CSS) 시스템은 시간에 따라 순간 주파수를 변화시켜서 전송 대역폭을 확산시키는 기법으로 저전력, 높은 시간 분해능 특성이 있다. 이러한 특성으로 인해 CSS 시스템은 1940년대부터 군용 레이더 (RADAR) 신호로 사용되었으며<sup>4)</sup>, 2007년에는 IEEE 802.15.4a 표준에서 WPAN (Wireless Personal Area Network)을 위한 물리계층 기술로 채택된 바 있고<sup>5)</sup>, 최근에는 IoT (Internet of Things)를 위한 LPWAN (Low-Power Wide Area Network)의 물리계층 기술로 사용되고 있다<sup>6)</sup>.

대표적인 EA 기술은 재밍 (Jamming)으로 광대역 (Broadband) 재밍, 부분대역 (Partial Band) 재밍, 펄스 (Pulse) 재밍, 그리고 톤 (Tone) 재밍이 있다<sup>2)</sup>. 하지만 이러한 재밍 기법은 재밍 성능을 향상시키기 위해 단순히 RF (Radio Frequency) 전력을 높이기 때문에, 적 통신 신호뿐만 아니라 아군 통신 신호도 영향을 받을 수 있다. 따라서 최근 재밍 성능을 지능적으로 향상시키기 위해 자동 변조 식별 (Automatic Modulation Classification; AMC) 기술을 통해 전송된 변조 신호를 식별하고, 이에 대한 최적의 펄스 지속 시간 (Pulse Duration)과 펄스 변조 신호로 재밍을 수행하는 기술이 제안되었다<sup>7)</sup>. AMC 기반 재밍 기법은 재밍 신호에 변조 특성을 추가한 방식으로 앞서 언급한 재밍 기법보다 재밍 성능을 향상시킬 수 있으나, 이 기법 또한 순간적으로 강력한 RF를 방사하기 때문에 아군 통신 신호를 교란시킬 수 있다.

따라서 본 논문에서는 아군이 적 통신 신호에 재밍

을 하면서도 통신을 할 수 있는 단일 선형 처프 (Single Linear Chirp; SLC) 기반의 통신유사 재밍 (Communication-Like Jamming; CLJ) 기법을 제안한다. 제안된 기법은 아군 통신 시스템이 ES 기술을 통해 적 통신 시스템을 SLC 기반의 BOK (Binary Orthogonal Keying)-CSS 시스템<sup>8)</sup>으로 식별했을 때를 가정하며, 재밍 성능과 통신 성능을 동시에 고려하기 위해 적 통신 신호의 전송 대역폭과 아군의 재밍 대역폭 간 상호상관계수 (Inter-Bandwidth Cross-Correlation Coefficient; IB-CCC)를 수식적으로 유도한다. 그리고 IB-CCC가 재밍 성능과 통신 성능에 미치는 영향을 분석하고 비트오율 (Bit Error Rate; BER) 성능을 측정한다. 또한 본 논문은 재밍 성능과 통신 성능을 함께 고려하는 것이 목적이기 때문에, IB-CCC에 따라 아군 통신 성능을 최대로 고려한 경우, 적 통신 신호에 대한 재밍 성능을 최대로 고려한 경우, 그리고 특정한 재밍 성능을 고려한 경우의 3가지 전략에 따른 BER 성능을 분석한다. 한편, EW를 위해 지금까지 진행된 CSS 관련 연구는 주로 통신 관점에서 전송 성능과 항재밍 성능을 분석한 것이며<sup>9,10)</sup>, 최근 재밍 관점에서 다양한 디지털 변조 방식에 대한 처프 재밍의 성능이 분석된 바 있다<sup>11)</sup>. 지금까지의 기존 연구들은 재밍 기법과 통신 기법에 대해 각각 진행되었으며, CSS 시스템의 재밍 성능과 통신 성능을 동시에 고려한 연구는 본 논문이 처음이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전자전 환경에서의 CSS 시스템의 송수신 모델을 설명하고, 3장에서는 제안된 SLC-CLJ 모델과 확산 대역폭에 따른 IB-CCC를 분석한다. 그리고 4장에서는 다양한 모의실험을 통해 제안된 기법을 평가하고, 5장에서는 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

그림 1은 전자전 환경에서의 BOK-CSS 시스템 모델을 도시한 것이다. 그림에서 아군 통신 신호는 장식 기호 “^ (Hat)”으로 구분하며, 아군 통신 시스템의 관점에서 재밍 성능과 통신 성능을 분석하기 위해 적 통신 신호를 기준으로 설명한다. 송신 신호  $s_i(t)$ 는 비트  $i \in \{0, 1\}$ 에 따라 “ $i = 1$ ”이면 업-처프  $c_1(t)$ , “ $i = 0$ ”이면 다운-처프  $c_0(t)$ 로 전송된다. 다음 식은 SLC의 통과대역 신호 모델을 표현한 것이다<sup>8)</sup>.

$$c_i(t) = A \cos [2\pi f_c t - (-1)^i \pi \mu t^2] \quad (1)$$

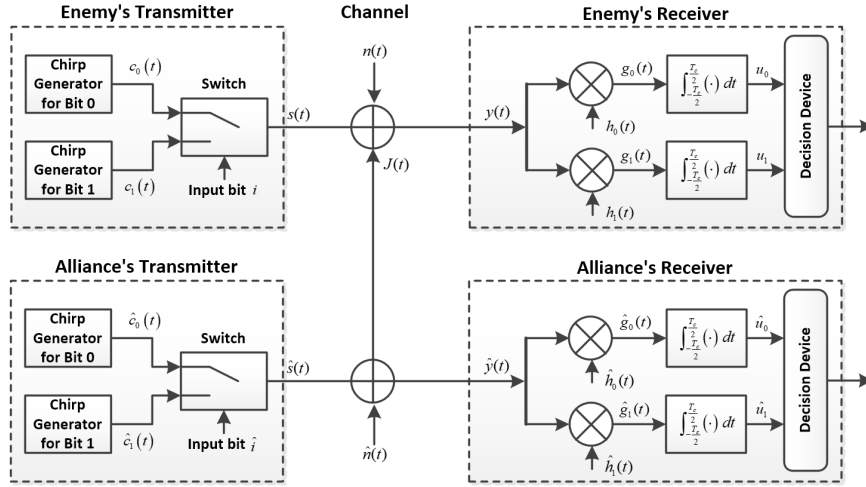


그림 1. 전자전 환경에서의 BOK-CSS 시스템 모델  
Fig. 1. BOK-CSS system model in electronic warfare environments

여기서  $-T_c/2 \leq t \leq T_c/2$ ,  $A = \sqrt{2E_b/T_c}$ ,  $E_b$ 는 처프 신호의 에너지,  $T_c$ 는 처프 지속 시간,  $f_c$ 는 처프 신호의 중심 주파수,  $\mu = B/T_c$ 는 처프율로  $B$ 는 처프 신호의 전송 대역폭이다.  $n(t)$ 는 AWGN (Additive White Gaussian Noise),  $y(t)$ 은 수신 신호,  $g_i(t) = c_i(t)$ ,  $u_i$ 는 상관기 출력값이다. 다음 식은 일반적인 SLC 기반의 BOK-CSS 시스템의 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)에 따른 BER 성능을 표현한 것이다<sup>[12]</sup>.

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{N_0} G_e}\right) \quad (2)$$

여기서  $Q(x) \triangleq 1/\sqrt{2\pi} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ ,  $N_0$ 는 적 수신기에서의 잡음 전력 스펙트럼 밀도,  $\rho$ 는 처프 신호 간 CCC (Inter-Chrip CCC; IC-CCC),  $G_e = BT_c$ 는 적 통신 신호의 처리 이득 (Processing Gain)이다.

한편, 본 논문에서 제안하는 SLC-CLJ 기법의 재밍 성능을 평가하기 위해 대표적인 재밍 기법 중 하나인 톤 재밍 성능과 비교한다. 톤 재밍은 단일 또는 다수의 톤 신호를 이용하여 전송 신호의 주파수 대역을 교란시키는 기법으로 다음 식과 같이 표현된다<sup>[13]</sup>.

$$s(t) = \sqrt{2J} \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad (3)$$

여기서  $\sqrt{2J}$ 는 톤 재밍의 크기,  $\theta$ 는 톤 재밍의 위상이다. 재밍 전력 스펙트럼 밀도  $E_j(\theta) = 2JT_c \cos^2 \theta$ 는 톤

재밍의 위상에 따라 변화되는데,  $\theta = 0$ 일 때 톤 재밍의 성능이 최대가 된다. 따라서 톤 재밍의 성능은 다음 식과 같이 표현될 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$P_e^{TJ} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{E_j + N_0} G_e}\right) \quad (4)$$

여기서  $E_j$ 는 아군 재밍 신호의 에너지를 의미한다. 식 (4)를 통해 적 통신 신호의 처리 이득이 높을수록 톤 재밍에 대한 항재밍 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다.

### III. 제안된 SLC-CLJ 모델 및 IB-CCC 분석

아군 통신 시스템의 제한된 전력과 주파수 자원 내에서 재밍을 위해 별도의 자원을 사용하는 것보다는 동일한 자원으로 아군이 재밍을 하면서 통신을 하는 것이 경제적 관점에서 효율적이다. 그리고 아군 통신 관점에서 통신의 생존성을 높이기 위한 일반적인 방법은 처리 이득을 높이는 것이지만, 하드웨어의 물리적인 한계로 인해 대역폭을 무한대로 확산시키는 것은 불가능하다. 이에 본 논문에서는 재밍 에너지로 적 통신 신호의 대역폭에 부분대역 재밍을 수행하면서도 아군 통신 시스템은 통신을 할 수 있는 SLC-CLJ 기법을 제안한다.

#### 3.1 제안된 SLC-CLJ 모델

그림 2는 제안된 SLC-CLJ 기법의 시간-주파수 관

계를 도기한 것이다. 그림에서 실선은 비트 “1”, 점선은 비트 “0”을 의미하며,  $B$ 는 적 통신 신호의 전송 대역폭,  $B_\ell$ 은  $\ell = \{1, \dots, L\}$ 번째 아군의 재밍 대역폭,  $L$ 은 재밍 대역폭 분할 개수를 의미한다. 이 때 아군 통신 시스템은 적 통신 신호의 중심 주파수를 알고 있다고 가정하며, 적 통신 신호의 중심 주파수를 기준으로 재밍 대역폭만큼 SLC-CLJ를 수행한다. 따라서 제안된 SLC-CLJ 신호는 아군의 재밍 대역폭에 따라 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\widehat{c}_{i,\ell}(t) = A_j \cos [2\pi f_c t - (-1)^i \pi \mu_\ell t^2] \quad (5)$$

여기서  $A_j = \sqrt{2E_j/T_c}$ ,  $\mu_\ell = B_\ell/T_c$ 은  $\ell$ 번째 재밍 신호의 처프율을 의미한다.

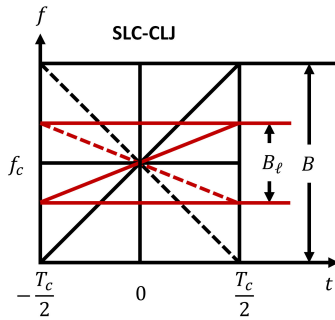


그림 2. SLC-CLJ 기법의 시간-주파수 관계  
Fig. 2. Time-frequency relationship of SLC-CLJ scheme

### 3.2 IB-CCC 분석

본 논문에서는 주어진 적 통신 시스템의 전송 대역폭 내에서 재밍 성능을 향상시키기 위해 아군의 재밍 대역폭  $B_\ell$ 에 따른 IB-CCC를 분석한다. 다음 식은 적 통신 신호와 아군 통신 신호의 IB-CCC를 표현한 것이다.

$$\begin{aligned} \rho_{s,\ell}^\pm &= \frac{1}{E_b} \int_{-\frac{T_c}{2}}^{\frac{T_c}{2}} c_i(t) \widehat{c}_{i,\ell}(t) dt \\ &= \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \cos [j\pi \mu_\ell^\pm t^2] dt \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $E_b = E_j = 1$ 이며,  $\mu_\ell^+ = (B - B_\ell)/T_c$ 는 동일한 비트를 전송했을 때의 처프율,  $\mu_\ell^- = (B + B_\ell)/T_c$ 는 상이한 비트를 전송했을 때의 처프율이다. 위 첨자 “+”와 “-”는 동일한 비트와 상이한 비트를 전송했을 때를 각각 의미하며, 통합적으로 표현하기 위해 위 첨자

“±”로 표현한다. 다음 식은 동일한 비트와 상이한 비트를 전송했을 때의 IB-CCC를 근사화하여 표현한 것이다.

$$\rho_{s,\ell}^\pm = \frac{2}{\sqrt{2T_c B_\ell^\pm}} C \left( \sqrt{\frac{T_c B_\ell^\pm}{2}} \right) \quad (7)$$

여기서  $C(x) \triangleq \int_0^x \cos(\pi v^2/2) dv$ 는 프레넬 코사인 적분이며<sup>[3]</sup>,  $B_\ell^+ = B - B_\ell$ 이고  $B_\ell^- = B + B_\ell$ 이다. 따라서 IB-CCC는 다음 식과 같이 동일한 처프를 전송했을 때의 IB-CCC와 상이한 처프를 전송했을 때의 IB-CCC의 차이를 정규화한 값으로 표현할 수 있다.

$$\rho_\ell = \frac{(\rho_{s,\ell}^+ - \rho_{s,\ell}^-)}{\max_{\ell \in \{1, \dots, L\}} (\rho_{s,\ell}^+ - \rho_{s,\ell}^-)} \quad (8)$$

따라서 정규화된 IB-CCC는  $\ell$ 번째 재밍 대역폭마다 계산된다.

### 3.3 BER 성능 분석

본 논문은 적 통신 시스템과 아군 통신 시스템이 동일한 SLC로 통신하며, 적 수신기와 아군 수신기에서의 잡음 전력 스펙트럼 밀도  $N_0$ 는 모두 1로 동일하다고 가정한다. 따라서 이 문제를 동일 채널 간섭 (Co-Channel Interference) 문제<sup>[14]</sup>로 접근하면, SLC-CLJ 기법의 재밍 성능을 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{e,\ell} &= \frac{1}{2} Q(\sqrt{\gamma} + \rho_\ell \sqrt{\gamma_\ell}) + \frac{1}{2} Q(\sqrt{\gamma} - \rho_\ell \sqrt{\gamma_\ell}) \\ &= \frac{1}{2} Q((1 + \alpha \rho_\ell) \sqrt{\gamma}) + \frac{1}{2} Q((1 - \alpha \rho_\ell) \sqrt{\gamma}) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $\gamma = E_b(1 - \rho_e)G_e/N_0$ 는 적 수신기에서의 SNR로서  $\rho_e$ 는 전송 대역폭에 따른 적 통신 신호의 IC-CCC,  $\gamma_\ell = E_j(1 - \rho_j)G_\ell/N_0$ 는 적 수신기에서의 재밍대잡음비 (Jamming-to-Noise Ratio; JNR)로서  $\rho_j$ 는 재밍 대역폭에 따른 아군 통신 신호의 IC-CCC,  $\alpha = 1/\sqrt{\beta E_b(1 - \rho_e)/(E_j(1 - \rho_j))}$ ,  $\beta = G_e/G_\ell$ 는 적 통신 신호의 처리 이득  $G_e$ 에 대한 아군 통신 신호의 처리 이득  $G_\ell = B_\ell T_c$ 의 비율,  $\rho_\ell$ 는 IB-CCC이다.

한편, SLC-CLJ 기법의 통신 성능은 적 통신 신호에 간섭을 받기 때문에 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 P_{j,\ell} &= \frac{1}{2} Q(\sqrt{\gamma_\ell} + \rho_\ell \sqrt{\gamma}) + \frac{1}{2} Q(\sqrt{\gamma_\ell} - \rho_\ell \sqrt{\gamma}) \\
 &= \frac{1}{2} Q((1 + \hat{\alpha}\rho_\ell)\sqrt{\gamma_\ell}) + \frac{1}{2} Q((1 - \hat{\alpha}\rho_\ell)\sqrt{\gamma_\ell})
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

여기서  $\hat{\alpha} = 1/\sqrt{\beta E_j(1-\rho_j)/(E_b(1-\rho_e))}$ 이며,  $\hat{\beta} = G_i/G_e$ 는 아군 통신 신호의 처리 이득에 대한 적 통신 신호의 처리 이득 비율이다. 이 때  $\gamma$ 는 아군 수신기에서의 JNR을 의미하며,  $\gamma_\ell$ 은 아군 수신기에서의 SNR을 의미한다. 결과적으로, 식 (9)와 (10)을 통해 주어진 적 통신 자원에 대한 SLC-CLJ 기법의 재밍 성능과 통신 성능은 아군의 재밍 에너지, 재밍 대역폭, IC-CCC, 그리고 IB-CCC에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 모의실험 및 결과 분석

모의실험을 위해 송수신 모델은 그림 1을 고려하였으며, BER 성능으로 적 통신 신호에 대한 재밍 성능과 아군 통신의 성능을 평가하였다. 모의실험을 위한 주요 파라미터로 처프 지속 시간  $T_c = 1 \mu s$ , 적 통신 신호의 전송 대역폭  $B = 30 \text{ MHz}$ , 아군의 재밍 대역폭  $B_j$ 은 0 MHz부터 30 MHz까지 1 MHz 간격으로 변화되며, 채널은 AWGN이다. BER  $10^{-5}$ 까지 확인하기 위해 모의실험은 1,000,000번씩 수행하였다. 표 1은 모의실험을 위한 주요 파라미터를 정리한 것이다.

표 1. 모의실험을 위한 주요 파라미터  
Table 1. Main parameters for simulations

Parameter	Value
Chirp duration, $T_c$	1 $\mu s$
Spreading bandwidth, $B$	30 MHz
Channel	AWGN
Number of simulations	1,000,000

##### 4.1 확산 대역폭에 따른 IC-CCC와 IB-CCC 분석

그림 3은 아군의 재밍 대역폭에 따른 IC-CCC와 IB-CCC를 도시한 것으로서, 적 통신 신호의 전송 대역폭을 30 MHz로 고정시켜 놓고 아군의 재밍 대역폭을 0 MHz부터 30 MHz까지 1 MHz 간격으로 증가시키면서 IC-CCC와 IB-CCC의 이론적인 성능과 측정값을 비교하였다. IC-CCC의 이론적인 성능은 참고문헌 [12]를 참고하였으며, IB-CCC는 식 (8)을 이용하였다. 그림을 통해 아군의 재밍 대역폭이 클수록 아군 통신 성능이 향상될 수 있으나, 적 통신 신호와 유사

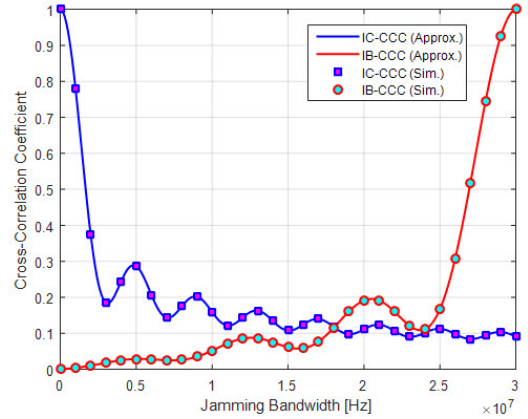


그림 3. 아군의 재밍 대역폭에 따른 IC-CCC와 IB-CCC  
Fig. 3. IC-CCC and IB-CCC according to jamming bandwidth

한 신호를 이용하기 때문에 간섭도 커질 수 있음을 볼 수 있다. 그리고 재밍 대역폭이 0 MHz부터 18 MHz까지는 IB-CCC의 영향이 적기 때문에 IC-CCC에 따라 아군 통신 성능이 향상되는 반면, 적 통신 신호에도 재밍의 영향이 적을 것으로 예상된다. 반면 19 MHz부터는 IB-CCC의 영향이 커지기 때문에 적 통신 신호에 재밍의 영향이 커지나 식 (10)에 따라 IB-CCC의 영향으로 인해 아군 통신의 BER 성능이 저하될 것으로 예상된다. 따라서 적 통신 신호와 동일한 에너지나 낮은 에너지로는 통신 성능과 재밍 성능을 효과적으로 얻을 수 없음을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 ‘아군의 재밍 에너지가 적 통신 에너지보다 상대적으로 항상 크다 ( $E_b < E_j$ )’라고 가정한다.

##### 4.2 아군의 재밍 대역폭에 따른 BER 성능 분석

그림 4는 아군의 재밍 대역폭에 따른 SLC-CLJ 기법의 BER 성능을 도시한 것이다. 아군 통신 시스템을 위한 최적의 재밍 대역폭을 찾기 위해 적 통신 신호의  $E_b/N_0 = -3 \text{ dB}$ 이고  $E_j/E_b = 3 \text{ dB}$ 로 아군 통신 신호의  $E_j/N_0 = 0 \text{ dB}$ 로 설정하였다. 그리고 적 통신 신호의 전송 대역폭을  $B = 30 \text{ MHz}$ 로 설정한 상태에서 아군의 재밍 대역폭  $B_j$ 은 5 MHz부터 30 MHz까지 1 MHz 간격으로 증가시키면서 측정하였다. 모의실험 결과, 재밍 대역폭  $B_j = 5 \sim 15 \text{ MHz}$ 일 때 아군 통신 신호의 처리 이득이 적 통신 신호보다 낮기 때문에 아군의 재밍 에너지가 높아도 BER 성능이 적 통신 신호의 BER 성능보다 낮은 것을 볼 수 있으며, 재밍의 영향도 적은 것을 볼 수 있다. 반면 재밍 대역폭  $B_j = 16 \sim 29 \text{ MHz}$ 일 때 처리 이득이 낮고 적 통신 신호에 의한 간섭이 있음에도 불구하고, 아군 통신의 BER 성능이 적

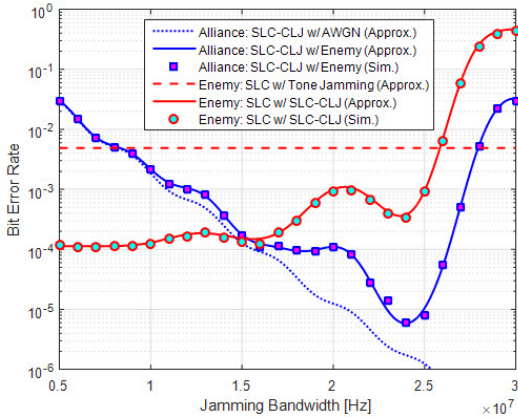


그림 4. 아군의 재밍 대역폭에 따른 BER 성능  
Fig. 4. BER performance according to jamming bandwidth

통신 성능보다 높은 것을 볼 수 있다. 그리고 적 통신 신호에 최적인 재밍 대역폭은 적 통신 신호의 전송 대역폭과 동일한 30 MHz로서 아군 통신 시스템이 동일한 재밍 에너지로 톤 재밍을 수행하는 것보다 재밍 성능을 높일 수 있음을 볼 수 있다. 하지만, 아군 통신의 관점에서는 적 통신 신호가 간섭이 되기 때문에 아군 통신의 BER 성능도 저하된 것을 볼 수 있다. 반면 적 통신 신호는 톤 재밍 성능보다 저하시키면서 아군 통신 성능은 유지시킬 수 있는 재밍 대역폭  $B_j=26$  MHz로서 아군 통신 성능을 BER  $10^{-4}$ 로 유지시킬 수 있음을 볼 수 있다. 하지만, 적 통신 신호가 아군 통신 신호에 재밍의 영향을 주기 때문에 아군 통신의 BER 성능이 이론적인 BER 성능보다는 저하된 것을 볼 수 있다.

### 4.3 $E_j/E_b$ 에 따른 BER 성능 분석

그림 5는  $E_j/E_b$ 에 따른 SLC-CLJ 기법의 BER 성능을 도시한 것이다. 모의실험을 위해 적 통신 신호의 전송 대역폭  $B=30$  MHz, 아군의 재밍 대역폭  $B_j=26$  MHz,  $E_b/N_0=-3$  dB를 고려하였다. 모의실험 결과, 제안된 SLC-CLJ 기법이 BER  $10^{-2}$ 에서 톤 재밍보다 1dB 정도 재밍 성능을 향상시킨 것을 볼 수 있다. 그러나 아군 통신 성능은 BER  $10^{-3}$ 에서 이론적인 BER 성능보다 약 2.5 dB 정도 저하된 것을 볼 수 있다. 따라서 아군 통신 성능을 적 통신 성능보다 높이기 위해서는  $E_j/E_b$ 가 1 dB 이상이어야 하며, 재밍 성능을 BER  $10^{-2}$  이상으로 유지시키기 위해서는  $E_j/E_b$ 가 4 dB 이상이어야 함을 확인할 수 있다. 결과적으로, 제안된 SLC-CLJ 기법은 톤 재밍을 수행하는 에너지로 아군 통신 시스템이 통신을 하면서도 재밍 성능은 톤

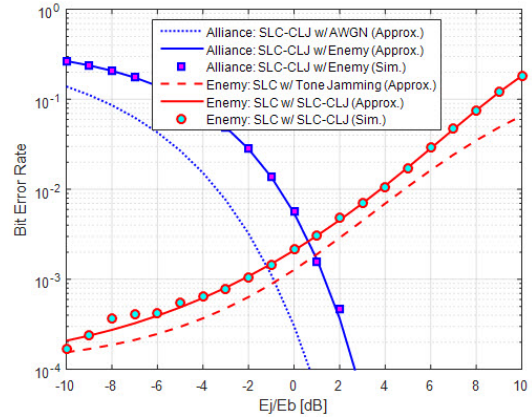


그림 5.  $E_j/E_b$ 에 따른 BER 성능  
Fig. 5. BER performance according to  $E_j/E_b$

재밍보다 향상시킬 수 있으며, 재밍 대역폭을 적 통신 신호의 전송 대역폭보다 약 4 MHz 정도 절약할 수 있기 때문에 경제성 있는 재밍 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

### 4.4 전략에 따른 통신 및 재밍 성능 분석

본 논문의 최종적인 목적은 적 통신 신호에 대한 재밍 성능과 아군 통신 성능을 함께 분석하는 것이다. 이에 여기서는 적 통신 신호의 전송 대역폭  $B=10\sim 80$  MHz로 변화시키면서 다음의 3가지 전략에 따른 SLC-CLJ의 재밍 성능과 통신 성능을 분석한다. 이 때 적 통신 신호의  $E_b/N_0=-3$  dB이고  $E_j/E_b=3$  dB로 아군 통신 신호의  $E_j/N_0=0$  dB이며, 아군의 재밍 대역폭  $B_j$ 은 3가지 전략에 따라 적응적으로 할당된다고 가정한다.

- 전략 #1: 적 통신에 대한 재밍 성능을 우선적으로 고려
- 전략 #2: 아군 통신 성능을 우선적으로 고려
- 전략 #3: 재밍 성능과 통신 성능을 모두 고려

여기서 전략 #3의 기준은 SLC-CLJ 기법의 재밍 성능이 톤 재밍의 재밍 성능과 동일할 때를 의미한다.

그림 6은 적 통신 신호의 확산 대역폭에 따른 전략별 BER 성능을 도시한 것이다. 이 결과는 적 통신 신호의 전송 대역폭에 따라 3가지 전략별 BER 성능을 식 (9)와 식 (10)으로 계산한 것이다. 이 때 적 통신 시스템의 목표 성능은 AWGN 환경에서 BER  $10^{-5}$ 이라고 가정하며, 아군은 적 통신 신호의 전송 대역폭만큼 재밍 대역폭을 확산시킨다. 모의실험 결과, 아군

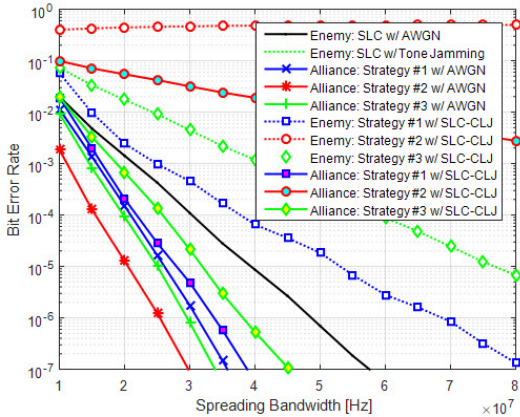


그림 6. 적 통신 신호의 전송 대역폭에 따른 전략별 BER 성능  
 Fig. 6. BER performance by three strategies according to transmission bandwidth

의 전략 #1에 대해 적 통신 시스템이 목표 성능을 얻기 위해서는 약 12 MHz 정도의 대역폭이 더 요구됨을 볼 수 있다. 그러나 전략 #2에서는 목표 성능을 얻을 수 없을 뿐만 아니라 통신이 불가능한 상태인 것을 볼 수 있다. 그리고 전략 #3에서는 약 36 MHz 정도의 대역폭이 더 요구됨을 볼 수 있다. 이 때 아군 통신 시스템은 전략 #2에서만 적 통신 신호와의 강한 간섭으로 인해 통신 성능이 급격하게 저하된 것을 볼 수 있다. 결과적으로, 제안된 SLC-CLJ 기법은 적 통신 신호의 처리 이득에 따른 항재밍 성능을 무력화시킬 수 있는 기법이라고 할 수 있다. 다만, 이 결과는 아군의 재밍 에너지가 적 통신 신호보다 높았을 때 가능한 결과이며, 모든 자원을 고려하기 위해서는 재밍 에너지와 확산 대역폭 간의 절충 관계를 고려해야 할 것이다.

### V. 결론

본 논문은 CSS 시스템에서 SLC-CLJ 기법을 제안하였다. 제안된 기법에서 적 통신 신호의 전송 대역폭 내에서 아군의 재밍 대역폭에 따른 IB-CCC를 수직적으로 도출하였으며, 이를 기반으로 적 통신 신호는 교란시키면서 동시에 아군 통신 시스템은 통신을 가능하게 하는 재밍 대역폭을 할당하였다. 모의실험 결과를 통해, 적 통신 신호의 전송 대역폭이 30 MHz일 때 재밍 성능을 최대로 얻기 위한 재밍 대역폭은 30 MHz이며 이 때 재밍 성능이 톤 재밍보다 우수한 것을 보였다. 그리고 아군 통신 성능을 최대로 보장할 수 있는 재밍 대역폭은 24 MHz이며, 톤 재밍과 동일

한 재밍 성능을 얻으면서 아군 통신 시스템이 통신을 할 수 있는 재밍 대역폭은 26 MHz이다. 결과적으로 제안된 SLC-CLJ 기법은 재밍 에너지로 적 통신 신호를 교란시키면서도 동시에 통신을 수행할 수 있었으며, 재밍 대역폭이 줄었음에도 재밍 성능이 톤 재밍보다 향상된 부분이 있기 때문에 경제성 있는 군 통신 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 제안된 기법은 다중 CSS 시스템에서 확산 대역폭 간 간섭 문제를 고려한 것이기 때문에, 군용뿐만 아니라 상용 CSS 시스템에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### References

- [1] R. Poisel, *Modern Communications Jamming: Principles and Techniques*, Ch. 1, Artech House, 2011.
- [2] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B. K. Levitt, *Spread Spectrum Communications Handbook*, Ch. 2-3, McGraw-Hill, 2002.
- [3] J. Pinkney, "Low complexity indoor wireless data links using chirp spread spectrum," Ph. D. Dissertation, Dept. of Elect. & Comput. Eng., Univ. of Calgary, Calgary, Canada, 2003.
- [4] C. E. Cook and M. Bernfeld, *Radar Signals: An Introduction to Theory and Application*, Ch. 1, Academic Press, 1967.
- [5] IEEE Standard 802.15.4a-2007, *Wireless MAC and PHY Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, 2007.
- [6] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, Jan. 2017.
- [7] S. Amuru and R. M. Buehrer, "Optimal jamming against digital modulation," *IEEE Trans. Info. Forensics Secur.*, vol. 10, no. 10, pp. 2212-2224, Oct. 2015.
- [8] Q. Wang, "Non-linear chirp spread spectrum communication systems of binary orthogonal keying mode," Ph.D. Dissertation, Dept. of Elect. & Comput. Eng., Univ. of Western Ontario, Ontario, Canada, 2015.
- [9] Y. Lee, T. Yoon, I. Song, Y. H. Kim, T. H.

- Han, and S. Yoon, "Symbol error rate of the DM-MPSK under the influence of jamming signals," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, no. 7, pp. 468-470, Jul. 2009.
- [10] K.-Y. Kim, Y. Shin, Y.-M. Hwang, and J.-Y. Kim, "Analysis on antijamming performance of binary orthogonal keying chirp spread spectrum systems," *Proc. IEEE APWCS 2017*, pp. 1088-1091, Incheon, Korea, Aug. 2017.
- [11] J.-Y. Ko, D.-H. Lee, D.-Y. Choi, C.-H. Lee, H.-W. Park, and J.-H. Kim, "Performance analysis of various modulation schemes under optimized sweep jamming," *J. KICS*, vol. 43, no. 10, pp. 1561-1570, Oct. 2018.
- [12] K.-Y. Kim, S.-W. Lee, Y.-M. Hwang, J.-S. Lee, Y.-S. Kim, J.-Y. Kim, and Y. Shin, "Correlation based optimal chirp rate allocation for chirp spread spectrum using multiple linear chirps," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E100-A, no. 4, pp. 1088-1091, Apr. 2017.
- [13] K. Cheun, *Spread-Spectrum Communications: Introduction to Basic Concepts with Emphasis on Direct-Sequence Spreading*, Ch. 3, Postech Press, 1995.
- [14] D. Altamirano and C. de Almeida, "Evaluation of the effects of the cochannel interference on the bit error rate of cellular systems for BPSK modulation," *Proc. ITS 2010*, pp. 1-5, Manaus, Brazil, Sep. 2010.
- 김 광 열 (Kwang-Yul Kim)  
한국통신학회논문지 Vol. 44, No. 1 참조  
[ORCID:0000-0003-1728-3230]
- 신 요 안 (Yoan Shin)  
한국통신학회논문지 Vol. 34, No. 1 참조  
[ORCID:0000-0002-4722-6387]