

# 부분대역 잡음 재밍 환경에서 주파수 도약 처프 대역 확산 시스템의 전송 성능 분석

이 명 로\*, 김 광 열\*, 신 요 안\*

## Analysis of Transmission Performance for Frequency-Hopping Chirp Spread Spectrum Systems in Partial-Band Noise Jamming Environment

Myeong-Ro Lee\*, Kwang-Yul Kim\*,  
Yoan Shin\*

### 요 약

부분대역 잡음 재밍은 전송 대역폭 중 일부분을 재밍하는 방식으로, 이에 대한 항재밍 성능을 향상시키기 위해 대역 확산 기술이 사용된다. 본 논문은 대역 확산 기술인 주파수 도약 대역 확산 방식과 처프 대역 확산 방식을 융합한 주파수 도약 처프 대역 확산 기법을 고려하고, 처프 신호의 상호상관계수에 따른 전송률과 항재밍 성능을 분석한다. 모의실험 결과, 제안된 방식이 운용 목적에 따라 전송률을 향상시키거나, 항재밍 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다.

**Key Words** : frequency-hopping, chirp spread spectrum, partial-band noise jamming, anti-jamming, data rate

### ABSTRACT

Partial band noise jamming is a method of jamming a portion of the transmission bandwidth. In this case, the spread spectrum technique is used to

improve anti-jamming performance. In this paper, we consider a frequency-hopping chirp spread spectrum technique that fuses the frequency-hopping spread spectrum scheme and the chirp spread spectrum scheme, and analyze the transmission rate and the anti-jamming performance according to the cross correlation coefficient of chirp signals. Simulation results show that the proposed method can improve transmission rates or anti-jamming performance depending on the operational purpose.

### I. 서 론

전자전 (Electronic Warfare)에서 아군 통신의 항재밍 성능을 향상시키기 위해 대역 확산 (Spread Spectrum; SS) 기술이 사용되고 있다<sup>[1]</sup>. 한편, 항재밍 성능을 극대화하기 위해 주파수 도약 대역 확산 (Frequency Hopping SS; FHSS) 방식과 처프 대역 확산 (Chirp SS; CSS) 방식을 융합한 FH-CSS 시스템에 대한 연구가 진행되었으며<sup>[1]</sup>, 이 시스템에서 처프의 상호상관계수 (Cross-Correlation Coefficient)를 고려하여 FH-CSS 시스템의 전송률을 향상시키는 연구가 진행되었다<sup>[2]</sup>. 본 논문은 이러한 분석 결과를 확장하여 적군의 부분대역 잡음 재밍 비율 (Partial Band Noise Jamming Ratio; PBNJ Ratio)에 따른 FH-CSS 시스템의 전송 성능을 분석한다.

### II. 시스템 모델

#### 2.1 FH-CSS 모델링

그림 1은 FH-CSS 기법을 도시한 것이다. FH-CSS 송신기는 송신 신호 입력 비트  $i$ 가 처프 확산기에 의해 처프 신호  $c_i(t)$ 가 되고, 의사 잡음 코드 (Pseudo Noise code; PN Code)에 따른 도약 주파수를 통해 최종적으로 처프 신호  $s(t)$ 를 송신한다. 이후, FH-CSS 수신기는  $s(t)$ 에 채널 잡음과 재밍 신호의 영향을 받은 송신 신호인  $r(t)$ 를 PN Code에 따라 주파수를 역도약하고 처프 확산 변조된 처프 신호  $c_i(t)$ 를 복조하

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다 (UD190033ED).

• First Author : (ORCID:0000-0002-8982-8984)School of Electronic Engineering, Soongsil University, mrlee1102@soongsil.ac.kr, 학생(석사), 학생회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4722-6387)School of Electronic Engineering, Soongsil University, yashin@ssu.ac.kr, 정교수, 중신회원

\* (ORCID:0000-0003-1728-3230)Senior Engineer, SOLiD WiNTECH, kimky@solidwt.co.kr, 공학박사, 정회원

논문번호 : 202209-217-A-LU, Received September 20, 2022; Revised September 25, 2022; Accepted September 25, 2022

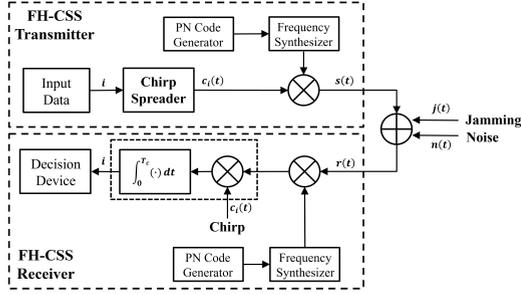


그림 1. FH-CSS 기법  
Fig. 1. An FH-CSS scheme

는 Chirp Despread 과정을 거쳐 최종적으로 송신 데이터  $i$ 를 수신한다.

### 2.2 SLC 방식과 MLC 방식

그림 2는 FH-CSS 시스템에 사용되는 SLC (Single Linear Chirp)와 MLC (Multiple Linear Chirp)의 시간-주파수 관계를 나타낸 그림이다. 다음 식은 SLC를 표현한 것이다<sup>3)</sup>.

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

여기서  $0 \leq t \leq T_c$ ,  $A = \sqrt{2E_b/T_c}$ ,  $E_b$ 는 처프 신호의 에너지,  $T_c$ 는 처프 지속 시간,  $f_c$ 는 중심 주파수,  $\mu = B/T_c$ 는 처프율,  $B$ 는 처프 신호의 전송 대역폭이다<sup>2)</sup>. SLC는 입력 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<sup>4)</sup>.

MLC는 처프 지속 시간을 균등하게 나누어 분할된 처프 지속 시간 동안 서로 다른 처프율을 갖는 신호를 전송하는 방식이다. 다음 식은 MLC를 표현한 것이다<sup>5)</sup>.

$$\begin{aligned} c_{f,i}^{MLC}(t) &= A \cos [2\pi (f_c t + \pi \mu_{f,i} t^2)], \\ c_{b,i}^{MLC}(t) &= A \cos [2\pi (f_c + B_i)(t - T_r) + \pi \mu_{b,i}(t - T_r)^2], \end{aligned} \quad (2)$$

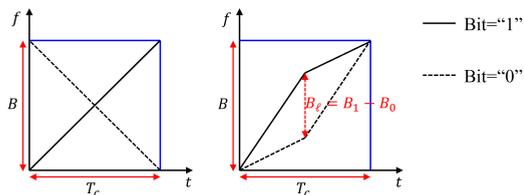


그림 2. SLC (좌)와 MLC (우)의 시간-주파수 관계  
Fig. 2. Time-Frequency relationship between SLC (left) and MLC (right)

여기서  $c_{f,i}^{MLC}(t)$ 과  $c_{b,i}^{MLC}(t)$ 는 각각 Front-처프와 Back-처프이며,  $\mu_{f,i}$ 와  $\mu_{b,i}$ 는 각 처프의 처프율이고,  $B_i$ 는  $i$ 비트의 Front-처프 동안 스위핑 한 대역폭이며,  $T_r = T_c/2$ 이다<sup>2)</sup>. MLC는 입력 비트  $i \in \{0,1\}$ 에 따라 대역폭 분할 간격만큼 떨어진 처프 신호가 할당되어 전송된다<sup>5)</sup>.

## III. FH-CSS 시스템 분석

### 3.1 상호상관계수 정리

본 논문에서는 PBNJ 환경에서 직교성을 고려한 신호를 바탕으로 FH-CSS 시스템에서의 가용 대역폭 내 전송 대역폭의 할당에 따른 최대 전송률 및 적군의 PBNJ Ratio에 따른 항재밍 성능을 분석한다. 한편, 본 논문에서는 이미 검증된 상호상관계수를 이용한다. 다음 식은 SLC의 상호상관계수를 표현한 것이다<sup>3)</sup>.

$$\rho^{SLC} = \frac{1}{\sqrt{T_c B}} \cdot C(\sqrt{T_c B}), \quad (3)$$

식 (3)에서  $C(x) = \int_0^x \cos(\pi v^2/2) dv$ 는 프레넬 코사인 적분이다<sup>3)</sup>. 식 (3)의 물리적인 의미는 전송 대역폭을 넓히거나 전송 시간을 늘려도 전송 신호의 직교성을 보장할 수 없으며, 이는 FH-CSS 시스템의 전송률 및 항재밍 성능 저하를 초래한다는 것이다<sup>2)</sup>.

다음 식은 MLC의 상호상관계수를 표현한 것이다<sup>4)</sup>.

$$\rho^{MLC} = \rho_f^{MLC} + \rho_b^{MLC}, \quad (4)$$

여기서  $\rho_f^{MLC}$ 와  $\rho_b^{MLC}$ 는 각각 Front-처프와 Back-처프의 상호상관계수이며, 각각 식 (5)와 식 (6)으로 표현된다<sup>5)</sup>.

$$\rho_f^{MLC} = \frac{1}{2\sqrt{T_c B_\ell}} \cdot C(\sqrt{T_c B_\ell}), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho_b^{MLC} &= \frac{1}{2\sqrt{T_c B_\ell}} \cdot \left\{ \cos\left(\pi \frac{T_c B_\ell}{2}\right) \cdot C(\sqrt{T_c B_\ell}) \right\} \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{T_c B_\ell}} \cdot \left\{ \sin\left(\pi \frac{T_c B_\ell}{2}\right) \cdot S(\sqrt{T_c B_\ell}) \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $B_\ell = B_1 - B_0$ 은 균등하게 나뉜 분할 대역폭,

$S(x) = \int_0^x \sin(\pi v^2/2) dv$ 는 프레넬 사인 적분이다<sup>3)</sup>. 식 (4)~(6)의 물리적인 의미는 가용 대역폭이 균등하게 분할된 분할 대역폭  $B_i$ 을 조절하여 직교성이 보장된 신호를 얻을 수 있다는 것이다<sup>2)</sup>.

### 3.2 항재밍 성능 분석

다음 식은 PBNJ 환경에서 아군의 항재밍 성능 지표인 비트오율 (Bit Error Rate; BER)을 표현한 것이다<sup>6)</sup>.

$$P_{e, PBNJ} = Q \left( \sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{N_0 + N_j/G_p}} \right), \quad (7)$$

여기서  $\rho$ 는 전송 신호 간 상호상관계수이고,  $N_0$ 는 잡음 전력 스펙트럼 밀도,  $N_j$ 는 재밍 전력 스펙트럼 밀도,  $G_p$ 는 SS 시스템에서 획득 가능한 처리 이득 (Processing Gain)이다.

한편, 본 논문에서는 상호상관계수 식에서 처프 지속 시간  $T_c$ 를 변경하면서 최대 전송률과 항재밍 성능을 측정한다<sup>5)</sup>. 또한, 아군의 전송 대역폭 대비 적군의 PBNJ Ratio에 따라 SLC와 MLC가 적용된 FH-CSS 시스템의 항재밍 성능을 측정한다.

## IV. 모의실험 결과 분석 및 결론

모의실험을 위해 그림 1의 FH-CSS 기법을 고려하였으며, 처프 방식은 SLC 방식 ("FH-SLC")과 MLC 방식 ("FH-MLC")을 고려하였다. 대역폭 분할의 경우 식 (4)~(6)에 근거하여 아군 통신 성능 최대화를 위해 1MHz로 설정하였다. 또한, 모든 송수신은 상관 시간 (Coherence Time) 내에 수행되며 홉 동기는 포착되었다고 가정하였다. 표 1은 모의실험을 위한 주요 파라

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

Parameter	Value
Hopping Bandwidth $B$	10MHz
Transmission Bandwidth	1MHz
Data Rate	50kbps~1Mbps
Bandwidth Separation $B_i$	1MHz
Channel Model	AWGN, PBNJ
PBNJ Ratio ( $1/G_p$ )	0.1~1
Iterations	100,000

미터를 정리한 것이다.

그림 3은 PBNJ Ratio가 0.1일 때 전송률에 따른 항재밍 성능을 도시한 것이다. 모의실험 결과, FH-MLC 기법을 사용했을 때 FH-SLC 기법보다 최대 전송률 측면에서 대략 250kbps 향상시킬 수 있다. 이는 동일한 오차 확률 관점에서 FH-MLC 기법이 FH-SLC 기법보다 처리율 (Throughput)이 좋은 것을 의미하며, 더욱 적은 오차로 동일한 양의 데이터를 송수신 할 수 있다는 것을 의미한다.

그림 4는 적군 PBNJ Ratio에 따른 항재밍 성능을 도시한 것이다. 모의실험 결과, 전송률이 750kbps일 때 BER  $10^{-2}$ 에서 FH-MLC 기법은 FH-SLC 기법보다 약 2배 넓은 PBNJ에도 동일한 항재밍 성능을 유지할

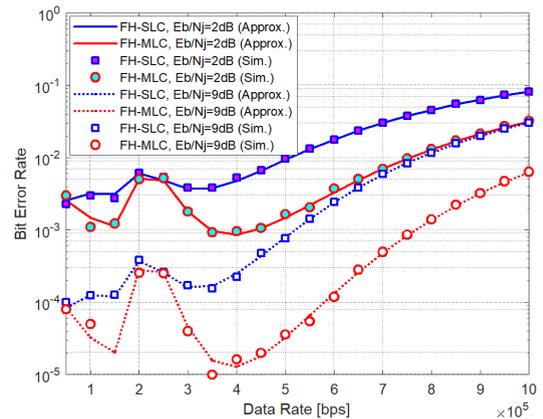


그림 3. 전송률에 따른 항재밍 성능 ( $E_b/N_0=13\text{dB}$ )  
Fig. 3. AJ performance according to data rate ( $E_b/N_0=13\text{dB}$ )

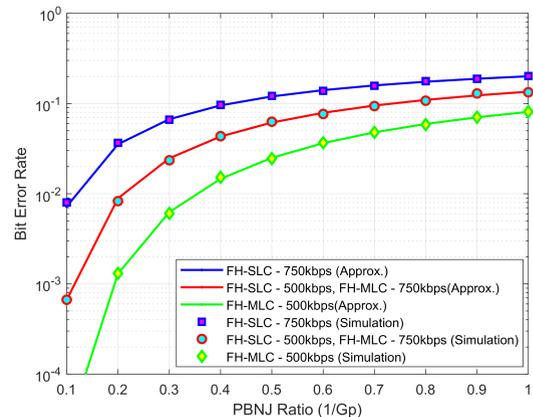


그림 4. 적군의 PBNJ Ratio에 따른 항재밍 성능 ( $E_b/N_0=20\text{dB}$ ,  $E_b/N_j=13\text{dB}$ )  
Fig. 4. AJ performance according to PBNJ Ratio ( $E_b/N_0=20\text{dB}$ ,  $E_b/N_j=13\text{dB}$ )

수 있음을 보였다. 따라서, FH-MLC 기법이 더 넓은 PBNJ에도 강인한 특성이 있으며, 운용 목적에 따라 아군의 전송률을 향상시키거나 항재밍 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, 동일한 전송률에서 상호상관계수를 고려한 FH-MLC 기법의 항재밍 성능이 우수하였다. 결론적으로, FH-CSS 시스템의 항재밍 성능은 PBNJ Ratio의 영향보다 상호상관계수를 더 고려해야 한다는 것을 알 수 있다.

앞으로는 다중 톤 재밍 환경과 도플러 영향을 고려하여 FH-CSS 시스템의 전송률과 항재밍 성능을 분석하고자 한다.

## References

- [1] 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.  
(<https://doi.org/10.9766/KIMST.2011.14.1.069>)
- [2] K.-Y. Kim, "A data rate improvement scheme for frequency-hopping chirp spread spectrum systems," in *Proc. 2022 KICS Summer Conf.*, Jun. 2022.
- [3] J. Pinkney, "Low complexity indoor wireless data links using chirp spread spectrum," Ph. D. Dissertation, Dept. Elect. & Comput. Eng., Univ. of Calgary, Calgary, Canada, 2003.  
(<https://doi.org/10.11575/PRISM/16904>)
- [4] K.-Y. Kim and Y. Shin, "Single linear chirp-based communication-like jamming in chirp spread spectrum systems," *J. KICS*, vol. 40, no. 4, pp. 685-692, Apr. 2019.  
(<https://doi.org/10.7840/kics.2019.44.4.685>)
- [5] K.-Y. Kim and Y. Shin, "Analysis on cross-correlation coefficient for survivability of chirp spread spectrum systems," *IEEE Trans. Info. Forensics Secur.*, vol. 15, pp. 1959-1967, Jan. 2020.  
(<https://doi.org/10.1109/TIFS.2019.2953332>)
- [6] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B. K. Levitt, *Spread Spectrum Communications Handbook*, McGraw-Hill, 2002.