

멀티톤재밍 환경에서 초프대역확산 고속 주파수 도약 시스템의 성능 분석

엄준수, 김광렬*, 이종호, 신요안, 신오순°

승실대학교 전자정보공학부(°교신저자), *(주)솔리드윈텍

Performance Analysis of Chirp Spread Spectrum Fast Frequency Hopping Systems under Multi-tone Jamming Environments

Joon-Soo Eom, Kwang-Yul Kim*, Jong-Ho Lee, Yoan Shin, Oh-Soon Shin

Soongsil Univ., *SOLiD WiNTECH

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. 본 논문에서는 군 통신 시스템의 항재밍 성능 향상을 위해 초프대역확산 고속 주파수 도약 시스템에 Normalized Envelope Detection 다이버시티 기법을 적용한 시스템을 제시한다. 모의실험을 통해 멀티톤재밍 환경에서 제시한 시스템의 비트 오류 확률 성능을 검증하였다.

I. 서론

대역확산(Spread Spectrum) 기술은 대표적인 항재밍 기술로서 20세기 초반부터 군 통신을 용도로 연구되고 다양한 시스템이 개발되었다[1-2]. 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. 일반적으로 DSSS 방식은 광대역 펄스재밍에 강하지만 부분대역잡음재밍에는 취약하고, 반면에 주파수 도약 대역확산은 부분대역잡음재밍에 강하지만 펄스재밍에 취약한 특성을 보인다[2]. 한편, 초프대역확산(Chirp Spread Spectrum: CSS) 기술은 시간에 따라 순간 주파수가 변하는 초프 신호를 변조 신호로 사용하여 대역확산 효과를 얻는 방식으로 직접 시퀀스 대역확산 방식과 유사하게 낮은 전력밀도 및 높은 시간 분해능 특성을 갖는다. 이러한 특성으로 인해 초프대역확산 시스템은 1940년대부터 군용 레이더 신호로 많이 사용되어 오고 있다[3].

본 논문에서는 초프대역확산과 주파수 도약 대역확산 기술을 결합한 초프대역확산 주파수 도약 시스템을 제시하고 항재밍 성능을 분석한다. 대역확산 기술과 더불어 항재밍에 효과적인 기술로 알려진 Normalized Envelope Detection (NED) 다이버시티 수신 기법을 고려한다. 다양한 점유율의 멀티톤재밍(Multi-tone Jamming: MTJ) 환경에서 초프대역확산 주파수 도약 시스템의 NED 다이버시티 결합 성능을 제시함으로써 제한된 시스템의 항재밍 효율성을 검증한다.

II. 초프대역확산 주파수 도약 시스템

1. 초프대역확산

초프대역확산은 초프 지속 시간 동안 시간이 지남에 따라 순간 주파수가 변하는 초프 신호를 이용하여 데이터 신호를 더 넓은 주파수 대역으로 확산시켜 전송한다. 시간에 따라 주파수가 증가하는 신호를 Up-Chirp 신호, 시간에 따라 주파수가 감소하는 신호를 Down-Chirp 신호로 정의한다. 초프대역확산 변조 방식은 변조 신호를 생성하는 방식에 따라 Binary Orthogonal Keying (BOK) 방식과 Direct Modulation (DM) 방식으로 분

류된다[4]. BOK 방식은 비트 전송을 위해 양과 음의 순간 주파수 변화율을 갖는 서로 다른 초프 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 초프 신호의 중심 주파수, T_c 는 초프 지속 시간을 나타낸다. 초프율(Chirp Rate) $\eta \equiv B/T_c$ 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 초프 신호를 스펙트럼 확산 기능을 담당하는 부호로만 사용하고 초프 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. 주파수 도약

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. FFH 기법은 각 심볼을 다수의 도약 주파수로 나누어 전송하므로 각 도약 신호마다 위상 추정하는 것이 어려운 관계로 Non-coherent 수신이 가능한 Multiple Frequency Shift Keying (MFSK)나 BOK 방식을 사용하는 것이 효율적이다. SFH 기법은 하나의 도약 주파수에 다수의 심볼이 전송되기 때문에 도약 신호마다 Preamble를 전송하여 위상추정이 가능하다. 따라서 고차 변조를 적용할 수 있는 DM 방식을 사용하는 것이 주파수 효율 측면에서 효과적이거나, Noncoherent 수신이 가능한 변조 방식을 사용하는 것이 복잡도를 줄

이는데 있어서는 유리하다.

3. NED 다이버시티 결합

본 논문에서는 여러 가지 다이버시티 결합 기법 중 하드웨어 설계가 간단하면서 항재밍 효과가 큰 것으로 알려진 NED 다이버시티 결합 기법을 적용하였다. 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[4].

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

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

III. 성능평가

1. 재밍환경

재밍 신호는 무선통신 시스템이나 레이더 시스템의 정상적인 작동을 방해하거나 간섭시키기 위해 전송되는 신호를 의미한다. 본 논문에서 고려하는 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, θ 는 $[0, 2\pi)$ 구간에서 균일 분포를 따른다[6]. 따라서 톤의 개수가 N_j 인 멀티톤재밍 신호 $j(t)$ 는 $\sum_{k=1}^{N_j} \text{Re}\{\sqrt{J_k}e^{j\theta_k}e^{j2\pi f_{c,k}t}\}$ 와 같이 나타낼 수 있다. 전체 도약 중심주파수의 수를 N 이라고 하고 멀티톤재밍의 각 톤의 주파수가 도약 중심주파수와 일치하는 경우 재밍 점유율은 $\mu = N_j/N$ 로 정의된다.

2. 모의실험 결과

NED 다이버시티 결합 기법을 적용한 CSS-FH 시스템의 성능 평가를 위한 모의실험 결과를 제시한다. 도약율이 25,600hops/sec, 심볼율이 12.8kpsps인 FFH 시스템을 고려하고, 초프대역확산은 BOK 방식을 고려한다. 중심주파수는 1GHz, 전체 도약 대역폭은 40MHz, 초프확산된 전송 신호의 대역폭은 1MHz로 총 40개의 채널을 도약한다고 가정한다.

그림 1에 제시한 모의실험 결과는 재밍 점유율 $\mu = 0.5, 0.8, 1$ 인 멀티톤재밍 환경에서의 초프대역확산 고속 주파수 도약 시스템의 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 사용하여 디코딩한 경우의 BER 성능을 보여준다. NED 다이버시티 결합 기법을 적용하지 않은 경우 [6]에서 제시한 식을 이용하여 계산한 이론치와 모의실험 결과가 거의 동일함을 확인할 수 있다. [7]에서 보인 부분대역잡음재밍 환경의 실험 결과와 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.

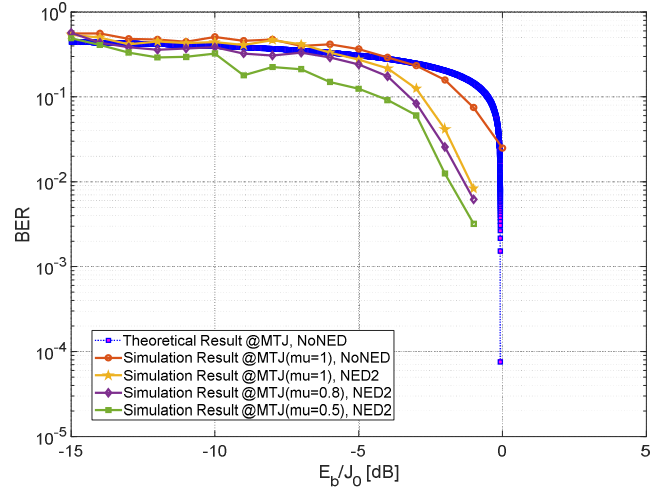


그림 1. 멀티톤재밍 환경에서 NED 다이버시티를 적용한 CSS-FFH 시스템의 BER 성능

IV. 결론

본 논문에서는 군 통신 시스템의 항재밍 성능 향상을 위해 초프대역확산 고속 주파수 도약 시스템에 NED 다이버시티 기법을 제시하였다. 모의 실험을 통해 멀티톤재밍 환경에서 제시한 시스템의 BER 성능을 검증하였다. 전대역을 점유하는 멀티톤재밍은 주파수 도약과 다이버시티의 영향은 미미하지만 초프대역확산에 의해 어느 정도의 항재밍 효과를 얻을 수 있음을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년 정부 (방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-044).

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] Q. Ling and T. Li, "Modeling and detection of hostile jamming in spread spectrum systems," in *Proc. IEEE Work. Signal Process. Applications for Public Security and Forensics*, Washington, DC, USA, Apr. 2007, pp. 1-5.
- [3] C. E. Cook and M. Bernfeld, *Radar Signals: An Introduction to Theory and Application*, Ch. 1, Academic Press, 1967.
- [4] R. Poisel, *Modern Communications Jamming: Principles and Techniques*, Ch. 1, Artech House, 2011.
- [5] 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.*, Washington, DC, USA, Oct. 1983, pp. 17-21.
- [6] 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.
- [7] J-S. Eom, K-Y. Kim, J-H. Lee, Y. Shin, and O-S. Shin, "Performance Analysis of NED Diversity Combining Algorithm for Frequency Hopping Chirp Spread Spectrum Systems under Partial-Band Noise Jamming," in *Proc. Symp. of the Korean Inst. Commun. & Inform. Sci.*, Jun. 2023, pp. 866-866.