

처프 대역 확산 시스템에서 처프율 부정합에 따른 성능 분석

김기태*, 김광울*, 신요안^o

Performance Analysis According to Chirp Rate Mismatch on Chirp Spread Spectrum Systems

Ki-tae Kim*, Kwang-wul Kim*, Yoan Shin^o

요약

본 논문에서는 처프 대역 확산 시스템에서 처프율 부정합에 따른 영향을 분석한다. 처프를 이용한 통신에서 전송 신호 간 직교성을 보장하기 위해 다중 선형 처프를 이용하는 연구가 진행되었다. 전자전 환경에서 우위를 점하기 위해서는, 아군 통신 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 저피감청 성능을 향상시킬 수 있는 기법이 요구된다. 이에, 본 논문에서는 다중 선형 처프를 고려하고 처프율 부정합 관점에서, 저피감청 성능을 모의실험을 통해 분석하고 단일 선형 처프의 경우와 비교한다.

키워드 : 처프 대역 확산, 저피감청, 단일 선형 처프, 다중 선형 처프, 이진 직교 변조, 처프율 부정합

Key Words : chirp spread spectrum, low probability of intercept, single linear chirp, multiple linear chirp, binary orthogonal keying, chirp rate mismatch

ABSTRACT

We analyze the effect of chirp rate mismatch on

chirp spread spectrum systems. Since orthogonality between transmission signals must be guaranteed in chirp-based communications, a study has been conducted using multiple linear chirps. On the other hand, in order to obtain a dominant position over the enemy in electronic warfares, a technique capable of improving not only communication performance but low probability of interception performance, is required. Therefore, in this paper the multiple linear chirps are considered, and the low probability of interception performance is analyzed and compared to the single linear chirp counterpart through simulations according to chirp rate mismatch.

1. 서론

처프 (Chirp) 신호는 레이더 신호 처리와 무선 통신 분야에 널리 사용되고 있다. 처프 신호에서 처프율 (Chirp Rate)은 처프 신호의 시간에 따라 변화하는 순간 주파수 값을 결정하는 중요 파라미터이므로, 이를 추정하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다^{1,2)}.

한편, 전자전 (Electronic Warfare) 환경에서 아군 통신 시스템은 적군 수신기에서의 저피감청 (Low Probability of Intercept; LPI) 특성을 극대화 하여야 한다³⁾. 처프 대역 확산 (Chirp Spread Spectrum; CSS) 통신 시스템⁴⁾을 고려할 때, 아군의 LPI 성능 향상을 위해서는 적군이 아군 송신 신호의 처프율을 정확히 추정하지 못하도록 해야 한다. 이를 위해 본 논문은 직교성을 보장하기 위해 고려될 수 있는 다중 선형 처프 (Multiple Linear Chirp; MLC)⁵⁾의 처프율 부정합에 따른 영향을 알아본다. 적군이 아군 신호를 추정할 때 처프율 부정합을 유발할 확률을 높일수록 아군은 LPI 성능을 향상할 수 있다. 이를 검증하기 위해 본 논문에서는 처프율 부정합 환경을 구성하고, 이에 따른 단일 선형 처프 (Single Linear Chirp; SLC)⁶⁾와 MLC의 비트 오율 (Bit Error Rate; BER) 성능을 모의실험을 통해 비교, 검증한다.

* First Author : (ORCID:0009-0003-6004-0338) School of Electronic Engineering, Soongsil University, kitae96@soongsil.ac.kr, 학생 (석사), 학생회원
^o 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 : 202308-055-A-LU, Received August 22, 2023; Revised August 31, 2023; Accepted August 31, 2023

II. 시스템 모델

2.1 CSS 통신 시스템

일반적으로 디지털 CSS 통신 시스템은 전송 방식에 따라 직접 변조 (Direct Modulation; DM) 방식과 이진 직교 변조 (Binary Orthogonal Keying; BOK) 방식으로 크게 구분할 수 있다⁶⁾. DM 방식은 비트 “0”과 “1”을 전송 시 한 종류 처프 (Up Chirp 또는 Down Chirp)의 위상만 180° 변화시키는 방식이다. 주로 위상 천이 변조 (Phase Shift Keying)와 함께 사용함으로써 고효율 전송이 가능하나, 수신기에서 상관기를 이용하므로 위상 추정 때문에 수신기 복잡도가 증가한다. 한편, BOK 방식은 비트 “0”과 “1”을 전송 시 다른 두 개 처프를 사용하며, 일반적인 SLC 방식의 경우 그림 1 윗 부분의 빨간색 실선 및 점선 그래프와 같이 Up Chirp와 Down Chirp를 모두 사용한다. 이 방식은 최대한 직교성에 근접한 처프들을 이용해서 수신기에서 위상 추정 없이 비동기 검출 (Noncoherent Detection)을 수행하므로, DM 방식보다 약간 성능은 열화되나 수신기 복잡도를 줄일 수 있다.

본 논문은 BOK 방식을 채택하여 연구를 진행하나, SLC의 경우 실질적으로 처프 간 직교성을 완벽히 보장하는 것이 어려워⁶⁾ 전송 성능이 열화되는 단점이 있으므로, 이를 극복하기 위해 파라미터 조절에 의해 직교성을 완벽히 보장할 수 있는 MLC의 사용을 고려하고⁶⁾ SLC와의 성능을 비교한다.

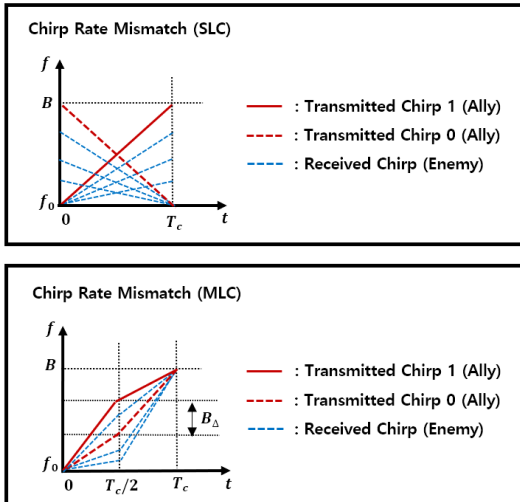


그림 1. 적군 수신기에서의 처프율 부정합 (상:SLC, 하:MLC)
Fig. 1. Chirp rate mismatch in enemy receiver (upper figure: SLC, lower figure: MLC)

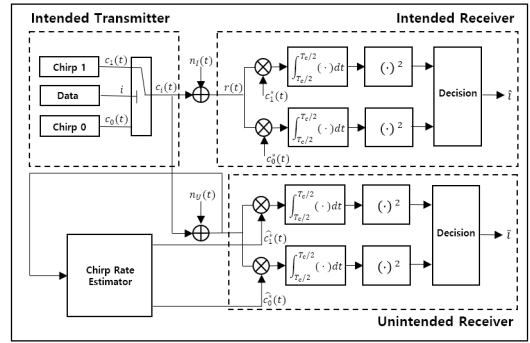


그림 2. 전자전 환경에서의 CSS 통신 시스템 모델
Fig. 2. Structure of the CSS communication system in an electronic warfare environment

그림 2는 전자전 환경에서 고려할 수 있는 CSS 통신 시스템 모델로서, 아군 송수신기와 적군 수신기로 구성된다. BOK 방식에 의해 아군이 전송하는 처프 신호 $c_i(t)$ 는 비트 i 에 따라 $i=1$ 이면 “Chirp 1” $c_1(t)$, $i=0$ 이면 “Chirp 0” $c_0(t)$ 로 전송한다. SLC와 MLC 방식을 고려할 때, 우선 식 (1)은 비트 i 에 따른 SLC의 전송 신호를 표현한 것이다⁴⁾.

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

여기서, $|t| \leq T_c/2$, $A = \sqrt{2E_b/T_c}$, E_b 는 비트 에너지, $T_c = 1/R_b$ 는 처프 신호의 전송 시간, R_b 는 전송률, f_c 는 중심 주파수, $\mu = B/T_c$ 는 처프율, B 는 전송 대역폭이다.

한편 그림 1 아랫 부분의 빨간색 실선 및 점선 그래프는 일반적인 MLC의 전송 신호를 도시하며, 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다⁵⁾.

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

여기서, $c_{f,i}^{MLC}(t)$ 와 $c_{b,i}^{MLC}(t)$ 은 각각 $0 \leq t \leq T_c/2$ 와 $T_c/2 \leq t \leq T_c$ 에서 정의되는 Front-Chirp와 Back-Chirp이며, $\mu_{f,i}$ 와 $\mu_{b,i}$ 는 각 처프의 처프율, B_i 는 비트 i 의 Front-Chirp 동안 스위핑 한 대역폭, $T_r = T_c/2$ 이다. $n_V(t)$ 와 $n_U(t)$ 는 각각 아군 수신기와 적군 수신기에서 발생하는 평균이 0인 AWGN (Additive White Gaussian Noise)이다.

한편, 적군은 아군 통신 방식을 알고 있을 수 있으나

사용되는 처프율은 파라미터로서 추정하여야 하며, 비동기 검출기를 이용해 수신 신호를 판정한다고 가정한다.

2.2 적군 수신기에서의 처프율 추정

적군 수신기에서 SLC와 MLC를 추정 시의 처프율 부정합의 개념을 그림 1에서 시간-주파수 영역에서 도시하고 있다 (파란색 점선 그래프). 적군은 수신기에서 아군 송신 신호를 추정하며, 이는 실제적으로 처프율 추정을 의미한다. 따라서, 그림 1과 같이 적군 수신기에서 아군 송신 신호를 완벽히 추정할 수 없어 처프율 부정합이 발생하면, 적군 수신 성능이 악화되어 아군 입장에서는 LPI 성능이 향상되는 효과가 기대된다. 이때, 적군이 추정한 SLC와 MLC는 각각 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{c}_i^{SLC}(t) = A \cos(2\pi f_c t - (-1)^i \pi \hat{\mu} t^2), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \hat{c}_{f,i}^{MLC}(t) &= A \cos(2\pi(f_c t + \pi \hat{\mu}_{f,i} t^2)), \\ \hat{c}_{b,i}^{MLC}(t) &= A \cos(2\pi(f_c + \hat{B}_i)(t - T_r) + \pi \hat{\mu}_{b,i}(t - T_r)^2), \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\hat{\mu}$ 는 SLC의 경우 적군이 추정한 처프율, $\hat{\mu}_{f,i}$ 와 $\hat{\mu}_{b,i}$ 는 각각 MLC의 경우 적군이 추정한 Front-Chirp 및 Back-Chirp의 처프율이다.

III. 모의실험 결과 및 결론

본 논문에서는 적군 수신기에서 추정된 처프율의 오차에 따라 SLC와 MLC 각각에 대해 적군 수신기의 BER을 측정하고 그 결과를 분석하였다. 모의실험 환경은 $E_b/N_0 = 10$ dB의 AWGN 채널을 가정하였고, 100,000번의 몬테카를로 반복을 거쳤다. 이외의 주요 모의실험 파라미터로서, 처프 지속 시간 $T_c = 125 \mu\text{sec}$, 처프 대역폭 $B = 100$ kHz이다.

SLC의 경우, 적군 수신기에서 아군 전송 신호를 추정 시 처프율이 $\mu = B/T_c$ 임을 감안하여 추정된 대역폭 변화에 따라 처프율이 변화하는 상황을 가정하였다. 이때, 앞서 언급한 바와 같이 아군 송신 신호 대역폭은 100 kHz이고, 적군 수신기에서 최대 대역폭 추정 오차 ± 20 kHz까지를 고려하였다.

한편, MLC는 아군 송신 신호 대역폭은 SLC와 동일하게 100 kHz이고 적군 수신기에서 이 전송 대역폭은

정확히 추정하였으나, 대역폭 분할 간격 $B_\Delta = 48$ kHz을 제대로 추정하지 못해 (그림 1 아랫부분 참고), 최대 ± 20 kHz까지의 추정 오차가 발생한다고 가정하였다.

그림 3은 SLC 방식을 사용하였을 때 처프율 부정합에 따른 적군 수신기에서의 BER 결과를 도시한다. 적군 수신기에서 아군 전송 신호인 SLC를 정확하게 추정했다면, 처프율에 따른 대역폭 차이가 없으므로 전송 성능이 보장되어 7×10^{-3} 의 최소 BER을 얻었다. 하지만, 적군 수신기에서 아군 전송 신호를 정확하게 추정하지 못해 처프율 부정합이 발생하는 경우, 부정합의 정도가 커질수록 BER 성능이 급격히 악화됨을 확인할 수 있다 (즉, 아군의 LPI 성능 향상). 특히, 처프율 부정합으로 인한 대역폭 차이가 가장 큰 20 kHz에서 5×10^{-2} 의 매우 나쁜 BER을 얻었다.

한편 그림 4는 MLC 방식을 사용하였을 때 적군 수신기에서의 BER 결과를 도시한다. 앞서 SLC의 경우와 같이 적군 수신기에서 아군이 전송한 MLC를 정확히 추정했다면, 전송 성능이 보장되어 최소의 우수한 BER 성능을 얻을 수 있다. 하지만, 적군 수신기에서 부정확한 추정에 의해 처프율 부정합이 발생하는 경우에는 MLC가 SLC에 비해 추정 오차가 클수록 BER 성능이 떨어졌다. 또한, MLC가 대역폭 분할 간격에 따라 SLC 방식에 비해 기울기가 급격하게 상승한다. 이를 통해 MLC 방식이 SLC 방식에 비해 LPI 성능이 우수하다고 판단할 수 있고, 또 MLC는 SLC에 비해 처프 신호의 민감성을 순수하게 높였다고 할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이, 본 연구에서 MLC 방식을

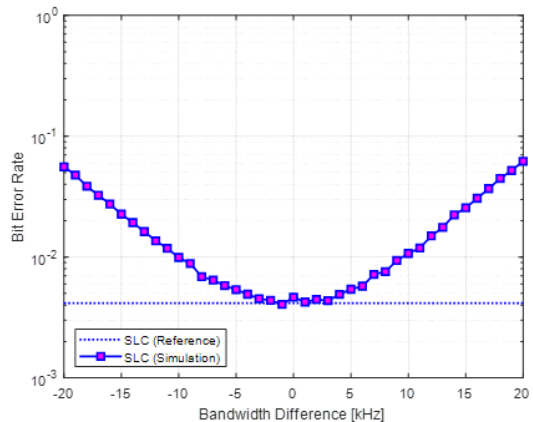


그림 3. 처프율 부정합에 따른 적군 수신기에서의 BER 성능 결과 (SLC)
Fig. 3. BER performance at enemy receiver as a function of chirp rate mismatch (SLC)

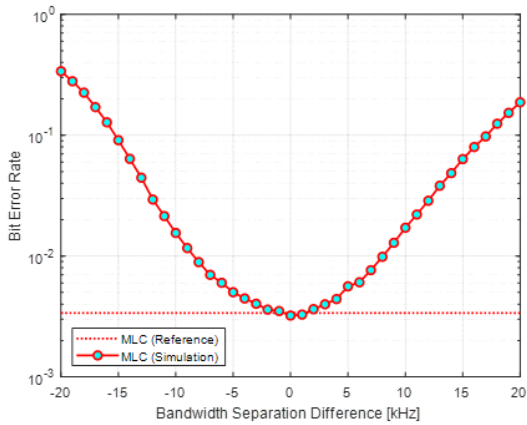


그림 4. 처프율 부정합에 따른 적군 수신기에서의 BER 성능 결과 (MLC)

Fig. 4. BER performance at enemy receiver as a function of chirp rate mismatch (MLC)

고려할 때는 대역폭 분할 간격 추정 오차만을 고려한 결과이며, SLC에서와 같이 대역폭 추정 오차까지 동시에 고려할 경우 이군의 LPI 성능이 더욱 향상될 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] X.-G. Xia, “Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation,” *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 48, no. 11, pp. 3122-3133, Nov. 2000. (<https://doi.org/10.1109/78.875469>)

[2] J. Wang, S. Su, and Z. Chen, “Accurate parameter estimation of chirp signal in low SNR,” in *Proc. IEEE ICALPI 2014*, Shanghai, China, Jul. 2014. (<https://doi.org/10.1109/icalip.2014.7009854>)

[3] A. G. Stove, A. L. Hume, and C. J. Baker, “Low probability of intercept radar strategies,” *IEE Proc. Radar, Sonar and Nav.*, vol. 151, no. 5, pp. 249-260, Oct. 2004. (<https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20041056>)

[4] B.-S. Kim and Y. Shin, “Comparative performance analysis of single linear chirp based communication-like jamming schemes in chirp spread spectrum,” *J. KICS*, vol. 46, no. 4, pp. 634-637, Apr. 2021. (<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.4.634>)

[5] K.-Y. Kim and Y. Shin, “A multiple chirp based inter-relay interference mitigation technique for two-path successive relaying protocol,” *J. KICS*, vol. 44, no. 1, pp. 38-47, Jan. 2019. (<https://doi.org/10.7840/kics.2019.44.1.38>)

[6] 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, no. 1, pp. 1959-1967, Jan. 2020. (<https://doi.org/10.1109/tifs.2019.2953332>)