

처프 확산 대역 시스템을 위한 상호 상관 계수 분석

김 광 열*, 이승 우*, 김 용 신**, 이 재 생*, 김 진 영***, 신 요 안°

Analysis of Cross-Correlation Coefficient for Chirp Spread Spectrum Systems

Kwang-Yul Kim*, Seung-Woo Lee*, Yong-Sin Kim**, Jae-Seang Lee**, Jin-Young Kim***, Yoan Shin°

요 약

처프 확산 대역 시스템의 전송 성능을 향상시키기 위해서는 처프 신호 사이의 상호 상관 계수를 반드시 고려해야 한다. 본 논문은 단일 사용자 전송을 위한 처프 신호의 상호 상관 계수를 수식적으로 도출하였으며, 이를 기반으로 전송 성능을 향상시킬 수 있는 처프율을 이론적으로 제안하였다. 모의실험 결과, 최적의 상호 상관 계수를 고려했을 때 전송 성능이 향상되었으며, 도출된 이론적인 성능이 모의실험 결과와 동일함을 확인하였다.

Key Words : chirp spread spectrum, chirp rate allocation, multiple linear chirp, cross-correlation coefficient, time-bandwidth separation product

ABSTRACT

In order to improve the transmission performance of a chirp signal-based chirp spread spectrum system, the cross-correlation coefficient (CCC) should be carefully considered. In this paper, we derive the

CCC for analyzing the transmission performance and propose the optimal chirp rate based on the analysis. The simulation results verify the mathematical derivations and show that the considered scheme can improve the performance by considering the CCC.

I. 서 론

시간에 따라 순간 주파수가 변하는 처프 (Chirp) 신호는 높은 시간 분해능, 다중 경로 감쇠에 강인한 특성을 지니고 있어 근거리 무선 통신 및 레이더의 핵심 기술로 사용되고 있다^[1]. 처프 확산 대역 (Chirp Spread Spectrum; CSS) 기술은 처프 신호를 이용해 전송 신호의 대역을 확산시키는 기술로서, CSS 시스템의 전송 성능을 향상시키기 위해서는 처프 신호의 상호 상관 계수 (Cross-Correlation Coefficient; CCC)를 반드시 고려해야 한다. 이를 위해, 우리는 기존의 연구에서 CCC를 계산해서 이용했으며^[2], 본 논문은 이를 심화시켜 SLC (Single Linear Chirp), MLC (Multiple Linear Chirp) 방식^[3]의 CCC를 수식적으로 도출하여 최적의 처프율을 할당하였다. 그리고 Monte Carlo 모의실험을 통해 이론적인 성능을 검증하였다.

II. CSS 시스템 모델

그림 1은 BOK (Binary Orthogonal Keying)-CSS 전송 기법의 송수신기 구조를 도시한 것이다^[2]. 그림에서 $c_1(t)$ 과 $c_0(t)$ 는 직교 특성을 지닌 서로 다른 처프 신호이며, 송신 신호 $s(t)$ 는 비트 $b_i(t)$ 에 따라 비트 "1"이면 $c_1(t)$, 비트 "0"이면 $c_0(t)$ 로 전송한다. $n(t)$ 는 평균 0인 AWGN (Additive White Gaussian Noise)이며, $r(t)$ 은 수신 신호로 $r(t) = s(t) + n(t)$ 이다. 이 때 수신 신호 $r(t)$ 의 상관기 출력값 u_i 은 각각 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$u_0 = \sqrt{E}((1-i) + ip) + \frac{1}{\sqrt{E}} \int_0^{T_c} c_0(t)n(t)dt, \quad (1)$$

$$u_1 = \sqrt{E}((1-i)\rho + i) + \frac{1}{\sqrt{E}} \int_0^{T_c} c_1(t)n(t)dt, \quad (2)$$

※ 본 연구는 국방과학연구소 핵심SW 과제의 지원을 받아 수행되었음 (UD140076ED).

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

° Corresponding Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, yashin@ssu.ac.kr, 종신회원

* School of Electronic Engineering, Soongsil University, fla1117@ssu.ac.kr, 학생회원

** The 2nd R&D Institute-1, Agency for Defense Development, {dragon, jslee15}@add.re.kr

*** Department of Electronics Convergence Engineering, Kwangwoon University, jinyoung@kw.ac.kr, 종신회원

논문번호: KICS2016-10-314, Received October 17, 2016; Revised November 3, 2016; Accepted November 3, 2016

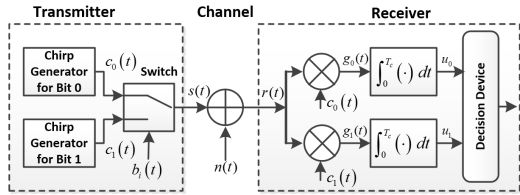


그림 1. 일반적인 BOK-CSS 전송 기법
Fig. 1. Conventional BOK-CSS transmission scheme

여기서 E 는 처프 신호의 에너지, T_c 는 처프 신호의 스위핑 (Sweeping) 시간 구간, $i \in \{0,1\}$ 는 전송 비트, ρ 는 서로 다른 처프 신호 사이의 CCC로, 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\rho \triangleq \frac{1}{E} \int_0^{T_c} c_1(t)^* c_0(t) dt, \quad (3)$$

여기서 “*”는 Complex Conjugate이다. 식 (1), (2)에서 볼 수 있듯이 동일한 신호인 경우에는 전송된 처프 신호의 에너지가 검출되며, 서로 다른 처프 신호인 경우에는 CCC가 반영된 에너지가 검출된다. 따라서 일반적인 BOK-CSS 전송 기법의 비트오율 (Bit Error Rate; BER) 성능 P_e 은 식 (4)와 같이 표현된다²¹.

$$P_e = Q \left(\sqrt{\frac{E_b \cdot (1-\rho)}{N_0}} \right), \quad (4)$$

여기서 $Q(x) \triangleq 1/\sqrt{2\pi} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 이다.

III. 상관도 분석

3.1 SLC 방식

식 (5)는 일반적인 SLC 방식의 기저대역 신호 모델을 표현한 것이다³¹.

$$c_i(t) = \exp[j(2\pi f_c(t - T_r)t - (-1)^i \pi \mu(t - T_r)^2)], \quad (5)$$

여기서 $0 \leq t \leq T_c$ 이며, T_r 은 처프 신호의 실제 시작 시간으로 $T_c/2$ 이다. f_c 는 처프 신호의 중심 주파수이며, $\mu = B/T_c$ 는 처프율로 처프 신호의 순간 주파수 변화량 [Hz/sec]이며, B 는 처프 신호를 이용해서 확산 시키는 대역폭이다. 이 때 CCC ρ_s 를 도출하기 위해 식 (5)를 식 (3)에 대입하면 식 (6)과 같이 정리된다.

$$\rho_s = \frac{2}{T_c} \int_0^{T_c/2} \exp[-2j\pi \mu t^2] dt. \quad (6)$$

이 때 식 (6)을 프레넬 (Fresnel) 적분¹¹으로 표현하기 위해 변수 $v = 2\sqrt{\mu}t$ 로 치환하여 정리하면, 식 (7)과 같이 정리된다.

$$\rho_s = \frac{1}{T_c \sqrt{\mu}} \int_0^{T_c \sqrt{\mu}} \exp\left[-j \frac{\pi v^2}{2}\right] dv. \quad (7)$$

마지막으로, 오일러 공식으로 $e^{jx} = \cos(x) + j\sin(x)$ 을 전개하고 프레넬 적분으로 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\rho_s^b = \frac{1}{\sqrt{T_c B}} \cdot \{C(\sqrt{T_c B}) - jS(\sqrt{T_c B})\}, \quad (8)$$

단 $C(x) \triangleq \int_0^x \cos(\pi v^2/2) dv$, $S(x) \triangleq \int_0^x \sin(\pi v^2/2) dv$ 은 각각 프레넬 코사인과 사인을 의미한다. 그러나 실제 전송되는 통과대역 신호는 실수 (Real-Valued) 영역이기 때문에 CCC의 이론적인 값은 식 (9)와 같다.

$$\rho_s^p = \text{Re}[\rho_s^b], \quad (9)$$

여기서 $\text{Re}[\cdot]$ 은 복소수의 실수부를 의미한다.

3.2 MLC 방식

MLC 방식은 균등하게 분할된 처프 시간 동안 서로 다른 처프율로 전송하는 기법이다. 식 (10)은 일반적인 MLC의 기저대역 신호 모델을 표현한 것이다³¹.

$$\begin{aligned} c_f(t) &= \exp[j(2\pi f_c t + \pi \mu_f t^2)], \\ c_b(t) &= \exp[j(2\pi(f_c + f_i)(t - T_r) + \pi \mu_b(t - T_r)^2)], \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $0 \leq t \leq T_c$ 이며, f_i 는 각 처프의 시작 주파수, $\mu_f = B_f/(T_c/2)$ 와 $\mu_b = (B - B_f)/(T_c/2)$ 는 각각 Front와 Back 처프율을 의미한다. 한편 $\mu_\Delta = |\mu_f - \mu_b|$ 는 처프율 간격으로, $\mu_\Delta = 2B_\Delta/T_c$ 특성을 이용하여 Front 처프의 CCC ρ_{m_f} 를 정리하면 식 (11)과 같다.

$$\rho_{m_f} = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c/2} \exp[j\pi \mu_\Delta t^2] dt. \quad (11)$$

그리고 변수 $v = \sqrt{2\mu_\Delta}t$ 로 치환하고, 오일러 공식과 프레넬 적분을 이용하면 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\rho_{m_f}^b = \frac{1}{2\sqrt{T_c B_\Delta}} \cdot \{C(\sqrt{T_c B_\Delta}) + jS(\sqrt{T_c B_\Delta})\}. \quad (12)$$

다음으로 Back 처프의 CCC ρ_{m_b} 를 정리하면 식 (13)과 같다.

$$\rho_{m_b} = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c/2} \exp[j\pi(\mu_\Delta t^2 + 2B_\Delta t)] dt. \quad (13)$$

그리고 변수 $v = 2(\sqrt{\mu}t + B_\Delta/\sqrt{\mu_\Delta})$ 로 치환하기 위해 식 (13)을 식 (14)와 같이 변형시킬 수 있다.

$$\rho_{m_b} = \frac{1}{T_c} \exp\left[-j\pi \frac{B_\Delta^2}{\mu_\Delta}\right] \int_0^{T_c} \exp\left[j\pi \left(\sqrt{\mu_\Delta}t + \frac{B_\Delta}{\sqrt{\mu_\Delta}}\right)^2\right] dt. \quad (14)$$

최종적으로 오일러 공식과 프레넬 적분을 이용하여

정리하면 식 (15)와 같이 표현된다.

$$\rho_{m_o}^b = \frac{1}{2\sqrt{T_c B_\Delta}} \exp\left[-j\pi \frac{T_c B_\Delta}{2}\right] \cdot \left\{ C(\sqrt{T_c B_\Delta}) + jS(\sqrt{T_c B_\Delta}) \right\}. \quad (15)$$

그리고 식 (16)은 통과대역에서의 CCC를 나타낸다.

$$\rho_m^p = \text{Re}[\rho_{m_f}^b + \rho_{m_o}^b]. \quad (16)$$

IV. 모의실험 결과 및 결론

본 논문에서 도출한 CCC의 수식을 검증하기 위해 모의실험을 수행하였다. 전송 성능을 평가하기 위해서 그림 1의 BOK-CSS 전송 기법을 고려하였으며, 처프 방식은 SLC 방식과 MLC 방식을 사용하였다. 표 1은 모의실험을 위한 주요 파라미터를 정리한 것이다.

그림 2는 시간-대역폭 분리 곱 $T_c B_\Delta$ 에 따른 CCC의 결과를 도시한 것으로, 그림을 통해 식 (9), (16)의 이론적인 값이 실험값과 일치하는 것을 볼 수 있다. SLC 방식의 경우에는 시간-대역폭 곱 $T_c B$ 이 클수록 CCC가 "0"에 근접하게 되지만 "0"에 수렴되지 않기 때문에 전송 성능에 제한이 발생된다. 그러나 MLC 방식의 경우에는 주어진 시간-대역폭 곱 $T_c B$ 내에서 특정한 주기로 음수인 CCC가 발생됨에 따라, 음수의 변곡점을 이용할 때 전송 성능이 향상될 수 있음을 예측할 수 있다.

그림 3은 전송 성능을 측정된 것이다. 그림을 통해, SLC 방식은 $T_c B$ 가 클수록 전송 성능이 향상된 것을 볼 수 있다. 반면, MLC 방식은 주어진 $T_c B$ 내에서 $T_c B_\Delta$ 에 따른 최적의 CCC를 고려함으로써 SLC 방식보다 전송 성능이 BER 10^{-3} 에서 최대 1.2 [dB] 정도 향상된 것을 볼 수 있다. 이것은 전송 성능의 향상을 위해서는 전송 신호의 대역폭만을 단순히 넓히는 것이 아니라 $T_c B_\Delta$ 를 고려해야 한다는 것을 의미한다.

본 논문은 BOK-CSS 시스템의 전송 성능을 향상

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

Parameter	Value
Chirp time T_c	1, 4 [μsec]
Chirp bandwidth B	10 [MHz]
Bandwidth separation B_Δ	0.1 [MHz]
Center frequency f_c	2.4 [GHz]
Optimal bandwidth separation point	@ 1 [μsec] $B_\Delta = 2.65$ [MHz]
	@ 4 [μsec] $B_\Delta = 0.65$ [MHz]
Channel	AWGN
Number of simulations	1,000,000

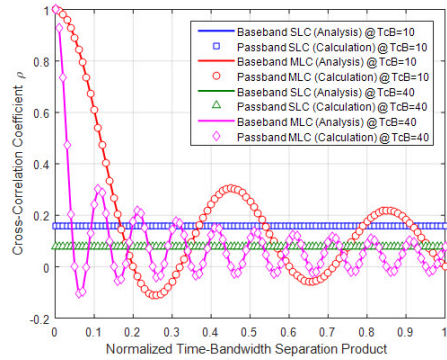


그림 2. 시간-대역폭 분리 곱에 따른 CCC 결과
Fig. 2. Analysis and simulation results of cross-correlation coefficient according to time-bandwidth separation product

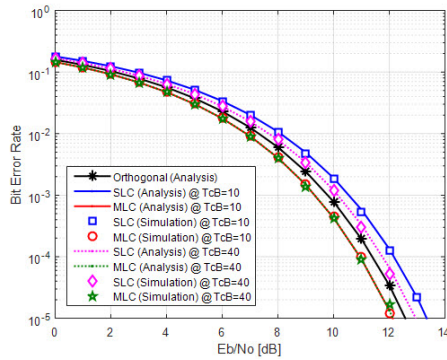


그림 3. SLC 방식과 제안된 MLC 방식의 전송 성능 비교
Fig. 3. Transmission performance comparison between the SLC method and the proposed MLC method

시켰으며, 시스템의 설계에 필요한 이론적인 전송 성능을 간단하게 제공할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] 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.
- [2] K.-Y. Kim, S.-W. Lee, Y.-S. Kim, J.-S. Lee, J.-Y. Kim, and Y. Shin, "Multiple linear chirp based transmission scheme for IEEE 802.15.4a chirp spread spectrum," *J. KICS*, vol. 40, no. 10, pp. 1937-1939, Oct. 2015.
- [3] E. Cheng, S. Chen, and F. Yuan, "Design and detection of multilinear chirp signals for underwater acoustic sensor networks," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, Article ID 371579, pp. 1-13, Jan. 2015.