

# IEEE 802.15.4a CSS를 위한 다중 선형 Chirp 전송 기법

김 광 열\*, 이승 우\*, 김 용 신\*,  
 이재 생\*, 김 진 영\*\*\*, 신 요 안°

## Multiple Linear Chirp Based Transmission Scheme for IEEE 802.15.4a Chirp Spread Spectrum

Kwang-yul Kim\*, Seung-woo Lee\*,  
 Yong-sin Kim\*\*, Jae-seang Lee\*\*,  
 Jin-young Kim\*\*\*, Yoan Shin°

### 요 약

Chirp 기반의 전송 기법에서 Cross-coherence는 전송 성능에 영향을 미치며, 전송 성능의 향상을 위해서는 Cross-coherence가 적은 Chirp 조합을 사용해야 한다. 이에 본 논문은 IEEE 802.15.4a CSS (Chirp Spread Spectrum)의 전송 성능을 향상시키기 위한 Chirp 조합으로 다중 선형 Chirp 기법을 제안한다. 모의실험 결과, 제안된 기법인 다중 선형 Chirp 기법이 단일 선형 Chirp 기법 보다 Cross-coherence가 적은 부분이 있음을 확인하였고, 이 조합을 이용하여 전송하였을 때 전송 성능이 향상됨을 확인하였다.

**Key Words** : chirp spread spectrum, chirp rate, sub-chirp, multiple linear chirp, cross-coherence

### ABSTRACT

In order to improve the performance of a chirp based transmission scheme, the cross-coherence property should be carefully considered. In this paper, we propose two pairs of combinations using

multiple linear chirp (MLC) which can reduce the cross-coherence for improving IEEE 802.15.4a chirp spread spectrum systems. The simulation results show that the proposed MLC scheme can improve the performance by considering the cross-coherence.

### I. 서 론

CSS (Chirp Spread Spectrum)는 시간에 따라 순간 주파수가 변하는 Chirp 신호를 이용하여 데이터 신호를 더 넓은 주파수 대역으로 확산시키는 기술이다. CSS는 저전력, 높은 시간 분해능, 다중 경로 감쇠에 강인한 특성을 지니고 있기 때문에 1940년대부터 군용 레이더 기술로 사용되었고, 2007년에 WPAN (Wireless Personal Area Network)을 위한 IEEE 802.15.4a 표준의 실내 무선통신을 위한 물리 계층 기술로 채택되었다<sup>1,2</sup>.

한편, Chirp을 이용한 통신은 Cross-coherence를 고려해야 한다. 현재 다중 사용자 접속을 위한 기법으로 다수의 단일 선형 Chirp (Single Linear Chirp; SLC)과 다중 선형 Chirp (Multiple Linear Chirp; MLC)을 조합하는 연구가 진행되었으며, 전송 성능의 향상을 위해 Cross-coherence를 고려하고 있다<sup>3,4</sup>. 이에 본 논문은 CSS 기술의 전송 성능을 향상시키기 위한 Chirp 조합으로 MLC 기법을 제안하였다.

### II. CSS 신호 모델 및 특성

본 논문은 표준에서 사용하는 CSS 신호 모델을 고려한다. 또한 표준의 Sub-chirp 특성을 분석하고 모의 실험을 통한 전송 성능을 측정하기 위해 일반적인 CSS-BOK (Binary Orthogonal Keying) 전송 기법을 고려하였다.

#### 2.1 IEEE 802.15.4a CSS 표준 신호 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 CSS 표준 신호 모델의 시간-주파수 관계를 도시한 것으로 4개의 Sub-chirp이 2개의 대역에서 서로 다른 스위핑 (Sweeping) 방향을 가지며 존재하는 것을 볼 수 있다<sup>1</sup>. 식 (1)은 이를

※ 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

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

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

논문번호 : KICS2015-10-334, Received October 13, 2015; Revised October 20, 2015; Accepted October 20, 2015

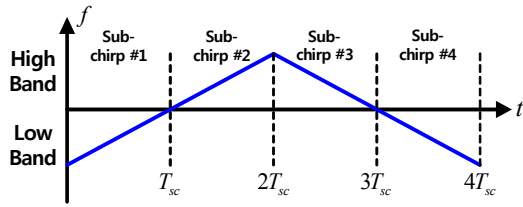


그림 1. CSS 신호 모델의 시간-주파수 관계  
Fig. 1. Time-frequency relationship of CSS signal model

수학적으로 모델링 한 것이다.

$$s_k(t) = e^{j(\omega_k t + \frac{\mu_k}{2} t^2)} p(t), \quad (1)$$

여기서 시간  $t$ 는  $-T_{sc}/2 \leq t \leq T_{sc}/2$ 이며,  $T_{sc}$ 는 Sub-chirp의 시간 구간을 의미한다.  $k$ 는 Sub-chirp 색인,  $\omega_k$ 는  $k$ 번째 Sub-chirp의 중심 주파수, 그리고  $\mu_k$ 는 Chirp Rate로  $k$ 번째 Sub-chirp의 순간 주파수 변화를 의미하는데  $\mu_k$ 의 부호가 양수이면 Up-chirp,  $\mu_k$ 의 부호가 음수이면 Down-chirp이 된다. 그리고  $p(t)$ 는 Raised-cosine 시간 윈도우를 의미한다.

### 2.2 SLC 기반 CSS-BOK 전송 기법

IEEE 802.15.4a CSS의 Sub-chirp은 2개의 SLC로 구성되어 있기 때문에, CSS-BOK 전송 기법이 사용하는 SLC과 동일한 특성을 지니고 있다고 가정할 수 있다. 이에 본 논문에서는 Sub-chirp의 전송 성능을 측정하기 위해 그림 2와 같은 일반적인 CSS-BOK 전송 기법을 고려하였다<sup>41</sup>.

이 그림에서  $c_1(t)$ 은 Up-chirp,  $c_2(t)$ 는 Down-chirp으로 식 (2)와 같으며, 식 (1)의 Sub-chirp과 동일한 꼴임을 알 수 있다.

$$\begin{cases} c_1(t) = \cos(2\pi f_0 t + \pi \mu t^2) \\ c_2(t) = \cos(2\pi f_0 t - \pi \mu t^2) \end{cases} \quad (2)$$

그리고 송신 신호  $s(t)$ 는 비트  $b_i$ 에 따라 “1” 비트이면  $c_1(t)$ , “0” 비트이면  $c_2(t)$ 로 전송한다.  $n(t)$ 은 평균이 0이고 분산은 1인 AWGN (Additive White

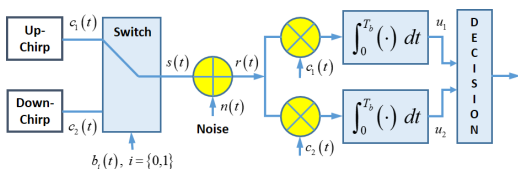


그림 2. 일반적인 CSS-BOK 전송 기법  
Fig. 2. Conventional CSS-BOK transmission scheme

Gaussian Noise)이며,  $r(t)$ 는 수신 신호이다.  $u_1$ 과  $u_0$ 는 상관기 출력 값으로 식 (3)과 같다.

$$u_i = \frac{1}{\sqrt{E}} \int_0^{T_{sc}} c_i(t) r(t) dt, \quad i = \{0,1\}, \quad (3)$$

여기서  $E$ 는 데이터를 직접 표현한 Chirp의 에너지,  $T_{sc}$ 는 Sub-chirp 시간 구간이다.

### III. MLC 전송 기법

그림 3은 SLC (좌)와 제안된 MLC (우)의 시간-주파수 관계를 도시한 것이며, 식 (4)는 Up-MLC인 경우에 대해 수학적으로 표현한 것이다.

$$\begin{cases} c_1(t) = c_{fc,1}(t) + c_{bc,1}(t), \\ c_0(t) = c_{fc,0}(t) + c_{bc,0}(t), \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $c_{fc,i}(t)$ 는 Front-chirp으로  $0 \leq t < T_{sc}/2$ ,  $c_{bc,i}(t)$ 는 Back-chirp으로  $T_{sc}/2 \leq t < T_{sc}$ 에서 발생된다.  $c_{fc,i}(t)$ 와  $c_{bc,i}(t)$ 는 식 (5)와 식 (6)으로 각각 상세히 표현된다.

$$\begin{cases} c_{fc,1}(t) = \cos(2\pi f_0 t + \pi \mu_{fc,1} t^2), \\ c_{fc,0}(t) = \cos(2\pi f_0 t + \pi \mu_{fc,0} t^2), \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} c_{bc,1}(t) = \cos \left[ 2\pi (f_0 + B_1) \left( t - \frac{T_{sc}}{2} \right) + \pi \mu_{bc,1} \left( t - \frac{T_{sc}}{2} \right)^2 \right], \\ c_{bc,0}(t) = \cos \left[ 2\pi (f_0 + B_0) \left( t - \frac{T_{sc}}{2} \right) + \pi \mu_{bc,0} \left( t - \frac{T_{sc}}{2} \right)^2 \right]. \end{cases} \quad (6)$$

여기서 Front-chirp Rate  $\mu_{fc,i} = B_i / (T_{sc}/2)$ , Back-chirp Rate  $\mu_{bc,i} = (f_B - B_i) / (T_{sc}/2)$ , 대역폭 간격  $B_D \doteq B_1 - B_0$ 이다.

Chirp의 주요 특성 가운데 하나는 2개의 서로 다른 Chirp 신호 사이에서 발생하는 Cross-coherence  $\rho$ 로서, 식 (7)에 표현한 것과 같이 CSS-BOK 전송 기법의 BER (Bit Error Rate) 성능을 결정한다<sup>41</sup>.

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{E}{2N_0} (1 - \rho) \right). \quad (7)$$

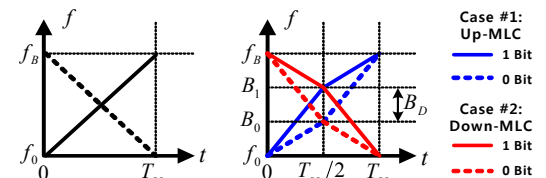


그림 3. SLC와 제안된 MLC의 시간-주파수 관계  
Fig. 3. Time-frequency relationship of SLC and MLC

여기서 Cross-coherence  $\rho$ 는 식 (8)로 표현된다.

$$\rho = \frac{1}{E} \int_0^{T_{sc}} c_0(t)c_1(t)dt. \quad (8)$$

#### IV. 모의실험 결과 및 결론

제안 기법의 전송 성능 평가를 위해 그림 2의 CSS-BOK 전송 기법을 고려하였으며, Chirp은 SLC와 Up-MLC를 사용하였다. 표 1은 모의실험을 위한 주요 파라미터를 정리한 것이다.

그림 4는 대역폭 간격에 따른 Cross-coherence  $\rho$  특성을 도시한 것으로, 본 모의실험을 위해 생성한 SLC와 MLC를 식 (9)를 이용하여 실험적으로 계산한 것이다. 계산 결과를 통해 MLC에는 SLC 보다 Cross-coherence  $\rho$  영향이 적은 부분이 2MHz와 5.5MHz 부분에 존재한다는 것을 확인할 수 있었고, 식 (7)에 따라 이 부분을 이용할 경우에 MLC 기법의 전송 성능이 향상될 것이라 예측할 수 있다.

그림 5는 SLC와 Up-MLC의 전송 성능 결과로 Up-MLC의 대역폭 간격은 표 1에 정리한 것처럼 Cross-coherence  $\rho$  영향이 적은 2MHz와 5.5MHz 부분을 모두 고려하였다. 모의실험 결과, Up-MLC의 전송 성능이 SLC의 전송 성능보다 향상되었으며, 결과적으로 Cross-coherence  $\rho$  영향이 적을수록 전송 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 식 (7)을 이용한 이론적인 BER 성능과 모의실험 결과가 동일함을 보임으로써 모의실험의 결과 또한 검증하였다.

본 논문은 IEEE 802.15.4a CSS 표준의 전송 성능을 향상시킬 수 있는 Sub-chirp 조합으로 MLC 기법을 제안하였다. Chirp 전송 성능에 직접적으로 영향을 미치는 Cross-coherence  $\rho$  특성을 확인하였으며, 전송 실험 결과를 통해 제안된 MLC 기법의 성능이 일반적인 SLC 기법보다 우수함을 검증하였다. 앞으로

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

Parameter	Value	
Sub-chirp time $T_{sc}$	1.2 $\mu$ s	
Sub-chirp bandwidth $f_B$	7MHz	
MLC bandwidth according to bandwidth distance $B_D$	Case 1 $B_D = 2$ MHz	$B_1 = 4.5$ MHz
		$B_0 = 2.5$ MHz
	Case 2 $B_D = 5.5$ MHz	$B_1 = 6.25$ MHz
		$B_0 = 0.75$ MHz
Sampling frequency $f_s$	32MHz	
Channel	AWGN, $CN(0,1)$	
Number of simulations	1,000,000	

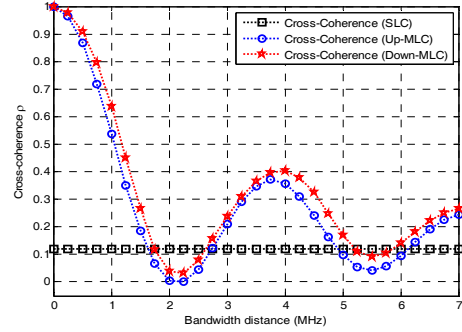


그림 4. 대역폭 간격에 따른 Cross-coherence 특성  
Fig. 4. Cross-coherence according to bandwidth distance

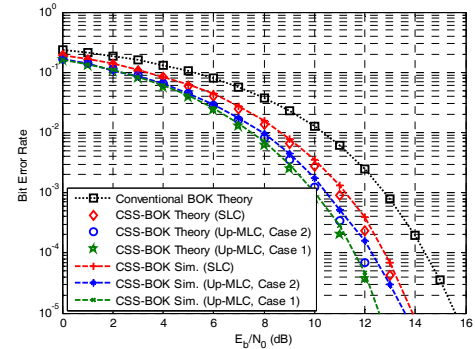


그림 5. SLC와 MLC의 전송 성능  
Fig. 5. Transmission performance between SLC and MLC

MLC의 Cross-coherence에 대한 Closed Form을 구하고 CSS 시스템에 해당 기법을 실제 적용하는 방안을 연구하고자 한다.

#### References

- [1] IEEE Standard 802.15.4a-2007, *Wireless MAC and PHY Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, 2007.
- [2] K. Chae, S.-R. Lee, and S. Yoon, "Overlap-based chirp spread spectrum transmission scheme for maritime multipath environment," *J. KICS*, vol. 39, no. 11, pp. 1124-1131, Nov. 2014.
- [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, 2015.
- [4] X. Wang, M. Fei, and X. Li, "Performance of chirp spread spectrum in wireless communication systems," in *Proc. ICSS 2008*, pp. 466-469, Guangzhou, China, Nov. 2008.