

IEEE 802.15.4a 채널 환경 하에서의 저간섭 Chaotic OOK 무선통신기술의 BER 성능 분석에 관한 연구

*정재호 *박구만 *전태현 **서보석 ***곽경섭 *차재상[Ⓒ]
 *서울산업대학교 **충북대학교 ***인하대학교
 jeong@snut.ac.kr chajs@snut.ac.kr[Ⓒ]

A study of low-interference(Interference-cancelled) Chaotic-OOK system in IEEE802.15.4a

*Jeong, Jae-ho *Park, Goo-man *Jeon, Tae-hyun **So, Bo-seok ***Kwak, Kyung-sup
 *Cha, Jae-sang[Ⓒ]
 *Seoul National Univ. of Tech. **Chungbuk National Univ. ***Inha Univ.

요약

현재 WPAN(Wireless Personal Area Network) 전송기술의 하나인 IEEE 802.15.4a의 저속형 UWB(Ultra Wide Band) 기술이 활발하게 연구되어지고 있다. 하지만 IEEE 802.15.4a에서 제시된 WPAN 전송채널의 경우에는 심각한 멀티패스 간섭 성분이 존재하여 이에 대한 해결방안이 절실히 요구되어지고 있다.

따라서 본 논문에서는, WPAN 환경에서 전송채널의 심각한 멀티패스 성분을 물리계층(Physical layer) 레벨에서 근원적으로 해결하여 높은 QoS(Quality of Service)를 확보하게 해 줄 수 있는 단극형 ZCD(Zero Correlation Duration) 확산코드 기반의 Chaotic-OOK (On-Off Keying) 무선통신기술을 제안하고 IEEE 802.15.4a 채널 환경 하에서의 모의실험을 통한 성능평가를 통해 제안한 무선통신기술의 유용성을 입증하였다.

1. 서론

최근에 UWB 통신기술이 발달함에 따라 근거리 무선 홈네트워크 분야에서, 위치인식기능과 더불어 정보데이터의 전송이 가능한 IEEE 802.15.4a와 같은 위치기반의 저속형 무선 UWB 기술이 주목 받고 있다[1]. 저속형 무선 UWB 기술은 실내, 사무실 등 제한된 장소 내에 존재하는 컴퓨터와 주변기기, 휴대폰, 가전제품 등을 무선으로 연결하여 이들 기기간의 통신을 지원할 뿐만 아니라 위치인식과 저속의 정보전송기능을 포함하는 다양한 응용 서비스를 제공한다. 위치기반의 저속형 UWB 기술은 단순한 하드웨어 구현을 필요로 하는데, Chaotic OOK-CDM(On Off Keying - Code Division Multiplexing) 변조방식은 Chaotic 소스를 반송파로 사용하고, OOK 변조를 기반으로 코드기반의 다중화를 행함으로써, UWB 신호를 간단히 발생시킬 수가 있고 수신기 구조도 단순화시킬 수 있다는 측면에서 저속형 UWB 기술로서 IEEE 802.15.4a의 표준화에 옵션으로 채택이 되어있다[2].

하지만, 저속형 UWB가 적용되는 무선 전송채널에서는 그림 1에서 보는 바와 같이 피코넷간의 상호간섭(IPI; Inter Piconet Interference)이나 다중경로간섭(MPI; Multi Path Interference)과 같은 다양한 간섭원들이 존재하게 된다. 따라서, 이러한 간섭 문제들을 물리계층 레벨에서 근본적으로 해결하기 위해서는 다양한 간섭환경에 대해 상관함수 특성이 양호한 확산코드의 선택이 중요하며, 이를 기반으로 하는 효율적인 저속형 UWB 시스템의 제시가 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 또한, 상기 기술한 다양한 간섭문제를 해결하기 위하여 주저자와 교신저자가 기존에 단극형 ZCD 확산코드기반의 Chaotic-OOK

UWB 시스템을 제안하였으며[3], 본 논문에서는 IEEE 802.15.4a 채널 환경 하에의 모의실험을 통해 제안한 무선통신기술의 유용성을 입증하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 1장 서론에 이어 2장에서는 효율적인 Chaotic-OOK UWB 시스템을 위한 ZCD 특성을 갖는 새로운 단극형 ZCD 확산코드를 제안한다. 3장에서는 단극형 ZCD 코드가 적용된 새로운 Chaotic-OOK ZCD-UWB 시스템 구조를 설명하고 제안한 시스템의 모델링에 대해 분석할 것이다.

또한, 4장에서는 제안 시스템에 대하여 다양한 간섭성분들이 반영된 IEEE 802.15.4a 채널 환경 하에서의 모의실험 및 BER 성능분석을 행할 것이며, 5장에서는 본 논문에 대한 결론을 기술하고자 한다.

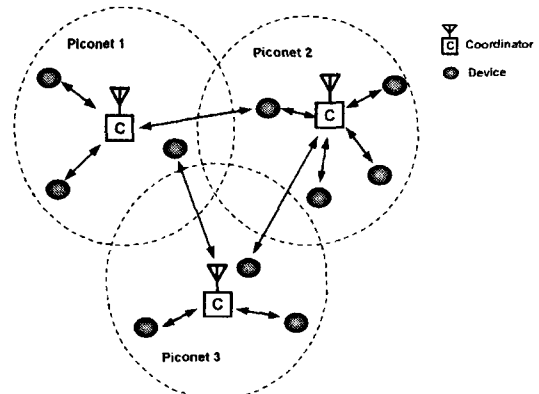


그림 1. 피코넷간의 간섭문제

2. 새로운 단극형 ZCD 확산코드

본 논문에서 제시한 단극형 확산코드는 코드발생기의 하드웨어적인 구현이 용이하면서도, 코드간의 상호상관특성이 코드간의 칩간이 확립된 한지점에서 0이 되는 한점적 또는 일정시간구간 동안 연속적으로 상호상관특성이 0이 되는 ZCD(Zero Correlation Duration)특성을 갖는다.

다음 식(1)은 주기상관의 수식을 나타낸다.

$$\Theta_{x,y}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n^{(x)} s_{n \oplus \tau}^{(y)} \quad (1)$$

여기서 $\Theta_{x,y}(\tau)$ 은 주기상관함수로서, $x=y$ 일 경우는 자기상관함수(ACF; Auto Correlation Function)가 되며, $x \neq y$ 일 경우 상호상관함수(CCF; Cross Correlation Function)가 된다. N 은 확산코드의 한 주기이며, \oplus 는 modulo N 연산을 의미하고, ZCD는 $\tau=0$ 일 때, 주변의 특정시간 영역 이내에서 연속적으로 ACF의 사이드러브와 CCF가 0이 되는 시간구간을 의미한다[4-6].

(0,1)의 신호레벨로 구성되었던 단극형 ZCD 확산코드를 표기하는 기호로는 $(N, w, \lambda_a, \lambda_c)$ 를 사용하며, 여기서 N 은 확산코드의 한 주기이며, w 는 코드 한 주기중에 존재하는 1의 총 개수를 의미한다. 또한 λ_a 는 ACF의 사이드러브 값이며, λ_c 는 CCF의 값을 의미한다. 또한 칩 코드셋을 구성하는 family size를 M 이라고 할 때, 상호간의 관계식은 다음과 같다.

$$Truncation(N/M) = w \quad (2)$$

여기서 $Truncation(N/M)$ 은 N/M 수의 소수점 이하를 절삭한 값이다. 새롭게 구성된 단극형 ZCD 확산코드는 순환적과 비순환적 단극형 코드로 나눌 수 있다. 새로운 단극형 ZCD 코드의 예는 다음과 같다.

A. (8,4,0,0)과 $M=2$ 의 단극형 ZCD 코드셋 예1 (순환적 타입 코드)
code a=[1 0 1 0 1 0 1 0] code b=[0 1 0 1 0 1 0 1]

B. (6,2,0,0)과 $M=3$ 의 단극형 ZCD 코드셋 예2 (비순환적 타입 코드)
code a=[1 0 0 1 0 0] code b=[0 1 0 0 0 1] code c=[0 0 1 0 1 0]

그림 2는 (32,17,0,0)과 $M=2$ 의 ACF와 CCF특성을 보여주고 있다.

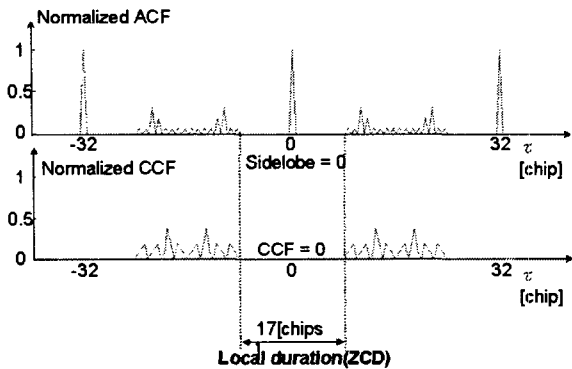


그림 2. 단극형 ZCD 확산코드의 ACF와 CCF(32chip)

3. Chaotic-OOK ZCD-UWB 시스템

가. 시스템 구조

본 절에서는 앞서 제시한 단극형 ZCD 확산코드 기반의 Chaotic-OOK UWB 시스템을 제시하고자 한다.

그림 3에서 나타난 바와 같이 제시된 송수신기의 구조를 살펴보면 다음과 같다. 우선 송신기에서는 "1", "0"의 신호레벨을 갖는 단극형 정보 데이터를 ZCD특성을 나타내는 단극형 코드로 확산 변조시킨다.

또한 확산 변조된 신호에는 초광대역 특성을 갖는 Chaotic 소스를 반송파로 이용함으로써, OOK(On Off Keying) 변조를 행해짐과 동시에 간단하게 UWB RF(Radio Frequency)신호가 형성된다[2]. 이후 RF신호는 증폭기(PA)를 거쳐 송신안테나로 방사(송출)되게 된다. 한편, 송출된 신호는 근거리 무선 PAN용 전송채널을 통과하여 수신기에 수신된다. 수신기에서는 수신안테나를 통해서 UWB신호를 받은 후 BPF(Band Pass Filter)와 포락선검파기(Envelope Detector)를 통해 간단하게 UWB 신호인 Chaotic 소스성분을 제거하여 기저대역신호를 생성한 뒤, 정합필터(Matched Filter)에서 미리 구성된 참조코드(Reference Code)와 기저대역신호와의 상관 피크치를 출력한다. 마지막으로, 정합필터에서 출력된 상관 피크치는 판정기를 통해 임계치와 비교하여 "1"또는 "0"의 신호로 판정되어 정보데이터로서 복원된다.

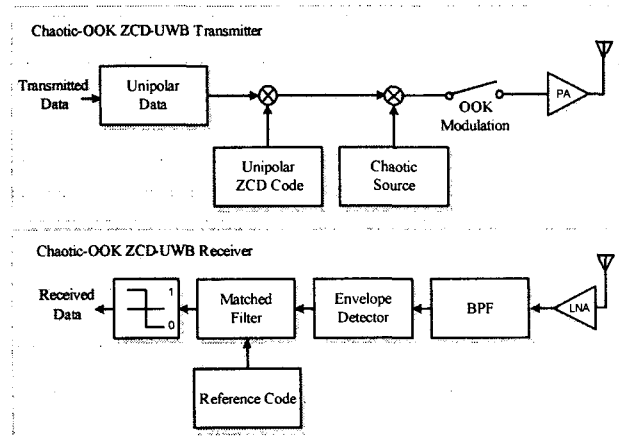


그림 3. 송/수신기 블록다이어그램

나. 시스템 모델링 및 BER 성능 분석

본 절에서는 본 논문에서 제시하는 단극형의 이진 심볼 {1,0}을 전송하는 Chaotic-OOK ZCD-UWB 시스템의 모델링을 행하고자 한다.

제안하는 Chaotic-OOK ZCD-UWB 시스템에서 전송되는 신호 $s^k(t)$ 는 식(3)과 같다.

$$s^k(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N_s-1} \sqrt{P_k} b_i^k c_n^k z(t - iT_b - nT_c) \quad (3)$$

여기서 N_s 은 단극형 확산코드의 주기이며, $\sqrt{P_k}$ 는 송신 전력이고, $b_i^k \in \{1, 0\}$ 은 k 번째 데이터 심볼, $c_n^k \in \{1, 0\}$ 은 k 번째 확산 변조를 위한 단극형 ZCD 확산코드이다. 그리고 T_b 는 비트 주기, T_c 는 칩 주기이며, $z(t)$ 는 UWB특성을 갖는 반송파로서 Chaotic 소스를 의미하는데, $z(t)$ 는 변조된 한 심볼의 주기 T_m 동안

Non-zero의 값을 갖고, 이 구간 밖에서는 0의 값을 가지며, $T_m < T_c$ 의 관계에 있다.

한편, 수신단에서는 해석의 편의상, 다중경로 페이딩에 의한 시간 지연성분이 최단 경로 분해능력시간 T_m ($T_m \sim 1/B_s$)의 정수배의 시각에 도달한다고 가정하면, 이 때 다중 피코넷 환경하의 IPI 및 다중경로 환경하에서의 MPI와 같은 간섭성분이 고려된 수신 파형은 식(4)와 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{l=0}^{L-1} c_l^0 s^0(t-lT_m-\tau^0) + \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} \sum_{l=0}^{L-1} c_l^k s^k(t-lT_m-\tau^k) + n(t) \quad (4)$$

여기서, 수식의 두 번째 항목은 IPI성분이며, L 은 MPI를 일으키는 다중경로의 개수, c_l^k 은 l 번째 경로에서의 진폭이며, 다중 경로 지연은 $\tau^k = q_k T_m$ 로 기술되고, q_k 는 구간 $[0, N_r N_c - 1]$ 에서 균일하게 분포되는 정수이고, $n(t)$ 는 백색가우시안잡음(AWGN; Additive White Gaussian Noise)이며, $N_c = T_c / T_m$ 이다. 이때 경로지연은 $0 \leq \tau^k < T_r$ 의 범위에 존재하며 T_r 은 최대지연시간을 의미한다. 수신 신호의 검파를 위해 본 논문에서는 코드 한 주기 단위로 상관처리를 행하는 정합 필터를 사용한다. 수신기는 하나의 심벌 단위로, 입력 $r(t)$ 에 대한 K 개의 피코넷별 확산 코드를 이용한 정합필터의 출력을 수집해서 얻은 식(5)와 같은 통계 벡터 y 를 산출한다.

$$y = RWCb + n \quad (5)$$

여기서 정규화된 특징 파형 벡터(Normalized Signature Waveform Vector)의 상호상관 행렬(Cross-Correlation Matrix)은 다음의 식(6)과 같이 표현된다[7].

$$R = \{\rho_{ij}\} \quad (6)$$

여기서, 상관계수 ρ_{ij} 는 다음과 같다.

$$\rho_{ij} = \langle s_i, s_j \rangle = \sum_{k=1}^N d_i(k) d_j(k) \quad (7)$$

여기서, 벡터 d 는 식(8)과 같이 주어졌다.

$$d_k(t) = \sum_{n=0}^{K-1} a_n^k z(t - nT_c) \quad (8)$$

그리고 n 은 행렬 R 과 등가인 공변 행렬을 갖는 가우시안 0-평균 K -벡터이고, C 는 레일리 무작위 변수의 다중 채널 행렬이다. 행렬 C 및 W 는 다음의 식(9)과 같이 표현된다.

$$C = \begin{bmatrix} c^0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & c^1 & \ddots & \dots \\ \dots & 0 & 0 & c^k \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} W^0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & W^1 & \ddots & \dots \\ \dots & 0 & 0 & W^k \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 $W^k = \sqrt{P_k} I_L$, $c_k = [c_0^k \ c_1^k \ \dots \ c_{L-1}^k]$ 이다. 한편, 식(7)에서 알 수 있는 바와 같이, 본 논문에서 제안한

Chaotic-OOK ZCD-UWB 시스템은 제로상관 구간 특성이 유지되는 단극형 ZCD 확산코드를 이용하였으므로, ZCD 구간 내에서는 확산신호들의 상호상관특성이 영(0)이 된다.

따라서, IPI 및 MPI가 ZCD 구간 내에 존재하는 경우에는 본 논문에서 제안한 단극형 ZCD 확산코드기반의 Chaotic-OOK UWB 시스템은 이들 간섭신호의 영향을 확산코드의 직교특성만으로 완벽하게 제거할 수 있다는 특징을 갖게 된다.

또한, Chaotic-OOK ZCD-UWB 시스템의 BER 성능을 분석하기 위하여 다양한 채널환경하에서 제안된 시스템을 정량적으로 분석하고자 한다. 제안한 시스템에서 사용하는 Chaotic 소스의 경우 송수신과 정에서 반송파로만 동작하여 시스템의 BER 성능에는 거의 영향을 미치지 않으므로 기저대역레벨에서의 BER 성능분석을 행하였다.

우선, Chaotic-OOK ZCD-UWB 시스템에서 AWGN 채널환경에서의 k 번째 피코넷에서의 이론적인 BER을 기술하면 식(10)와 같다.

$$P^k(\sigma) = \frac{1}{2} \sum_{c_l \in \{1,0\}} \dots \sum_{c_l \in \{1,0\}} \sum_{c_l \in \{1,0\}} Q\left(\frac{c_k}{2\sigma}\right) + \sum_{j \neq k} e_j \frac{c_j}{\sigma} \rho_{jk} \quad (10)$$

여기서, $\sigma^2 = \xi N_0 / 2$ 이고, $Q(x)$ 는 단위 정규화 변수의 상보적 누적 분포 함수이다.

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt \quad (11)$$

본 논문에서 제안된 Chaotic-OOK ZCD-UWB 시스템의 BER 성능은 다중접속에 이용된 확산코드 상호간에 제로상관구간동안 연속적으로 직교성이 유지되므로 IPI가 존재하지 않는다. 그러므로 AWGN 환경하에서의 BER 성능은 각각 다음의 식(12)로 표현될 수 있다.

$$P^k(\sigma) = \frac{1}{2} Q\left(\frac{c_k}{2\sigma}\right) \quad (12)$$

$Q(x)$ 함수는 변수 x 에 대한 단조롭게 감소하는 함수이다. 따라서 ZCD 시간구간내에서는 AWGN 환경에서의 BER 성능은 OOK 변조방식의 성능과 동일하다는 것을 알 수 있다.

또한, AWGN외에 지연과 간섭성분을 포함하는 페이딩 채널을 레일리 형태로 가정해서 고려할 경우, BER 성능은 식(13)과 같이 표현될 수 있다.

$$P^{rk}(\sigma) = Q\left(\frac{c_k}{2\sqrt{c_k^2 + \sum_j c_j^2 \rho_{jk}^2}}\right) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{c_k}{\sqrt{c_k^2 + 4\sigma^2}}\right) \quad (13)$$

본 논문에서 제안한 Chaotic-OOK ZCD-UWB 시스템에서는 식(13)의 BER 값은 IPI나 MPI에 의해서 발생하는 지연 신호들이 ZCD 구간안에 들어가지 되면 CCF가 0가 되어 직교성이 유지되어, 모든 $\rho_{j \neq k}$ 가 영(0)이 되므로 식(12)과 동일해지게 된다.

4. 모의실험 및 결과

가. 모의실험 조건

본 장에서는 단극형 ZCD 코드기반의 Chaotic-OOK UWB 시스템의 확산코드에 의한 간섭완화능력을 확인하기 위하여 단극형 ZCD 코드외에 단극형 Optical Orthogonal(OO) 코드를 적용하여, 표 1과 이하에 나타낸 다양한 조건하에서의 BER 특성들을 도출하는 모의실험을 수행하였다.

표 1. 모의실험 파라미터

구분	내용
확산코드	단극형 ZCD 코드 단극형 Optical Orthogonal 코드[8]
코드 주기	32 칩
변조 방식	Chaotic-OOK-CDM
Detection 방식	포락선 검파기 & 정합필터
피코넷수	Max. 4
데이터율	1Mbps
전송채널 타입	AWGN, IEEE 802.15.4a CM1, CM5, CM8[9]
셀 타입	피코넷

모의실험은 크게 이하의 3가지 경우를 고려하여 단극형 ZCD 코드와 단극형 OO 코드를 각각 Chaotic-OOK UWB 시스템에 적용하여 BER 성능을 도출하였다.

Case 1) AWGN 및 IPI를 고려한 상태에서,

E_b/N_0 의 증가에 따른 BER 특성을 도출하는 경우

Case 2) AWGN 및 IPI를 고려한 상태에서, 고정된

E_b/N_0 에서 피코넷수의 가변에 따른 BER 특성을 도출하는 경

우

Case 3) AWGN과 IPI외에 IEEE 802.15.4a 채널모델까지 고려한

상태에서, E_b/N_0 의 증가에 따른 BER 특성을 도출하는 경우

나. 모의실험 결과

1) Case 1

그림 4는 Case 1의 환경에서의 단극형 ZCD 확산코드기반의 Chaotic-OOK UWB 시스템과 단극형 OO 코드기반의 Chaotic-OOK UWB 시스템의 BER 성능 결과를 비교한 것이다. 그림 4에서 보이듯이 ZCD 코드기반의 시스템은 피코넷수가 가변되어도 동일한 BER 커브를 나타내고 있으므로 IPI에 영향을 받지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 한편 단극형 OO 코드기반의 시스템은 BER 10^{-3} 을 기준으로 2피코넷 환경에서, E_b/N_0 값이 ZCD 코드 기반의 시스템에 비하여 4dB 열화한다는 것을 알 수 있다. 또한 IPI가 더욱 심각한 4피코넷 환경하에서는 IPI의 영향으로 인해서 BER 커브가 수렴하지 못하고 발산해 버리는 특성을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 본 논문에서 제안한 단극형 ZCD 코드기반의 시스템이 IPI에 영향을 받지 않음과 동시에 통신성능을 직교성이 우수한 ZCD 코드에 의존한다는 사실을 보여주는 것이다. 즉 본 논문에서 제안한 시스템은 ZCD 코드가 갖는 우수한 직교성으로 인하여, 직교성이 떨어지는 OO 코드와 같은 다른 코드 기반의 시스템에 비하여 IPI에 대한 내성과 더불어 우수한 통신성

능을 갖을 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

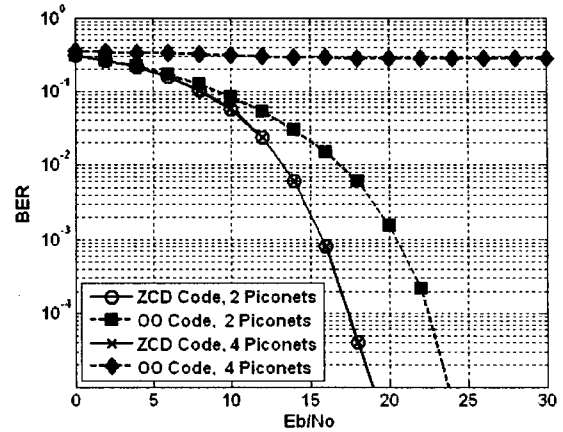


그림 4. AWGN 및 IPI를 고려한 상태에서, E_b/N_0 의 증가에 따른 BER 성능

2) Case 2

그림 5는 Case 2에 대한 결과로서, 이에 대한 모의실험 조건은 Case 1의 모의실험 조건과 동일하며, 그 결과에 대한 표현만 다음과 같이 달리 한 것이다. 즉, 그림5에서는 E_b/N_0 를 16dB로 고정된 상태에서 피코넷수의 가변에 따른 BER 커브를 도출한 것이다.

그림 5에서 알 수 있듯이, ZCD 코드기반의 시스템은 피코넷수가 가변되어도 동일한 BER 값을 유지해서 IPI의 영향을 전혀 받지 않지만, OO 코드기반의 시스템은 피코넷수의 증가에 따라 BER 성능이 크게 열화하여 4피코넷 이상의 경우에는 10^{-1} 도 유지하지 못함으로써 IPI의 영향을 받게 되면 시스템이 제대로 동작되지 못한다는 것을 확인할 수가 있다.

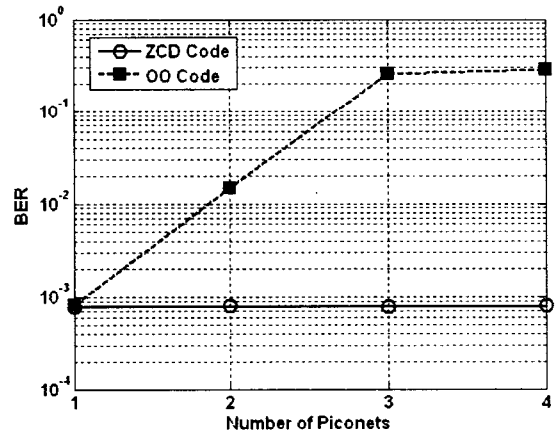


그림 5. AWGN 및 IPI를 고려한 상태에서, 고정된 E_b/N_0 에서 피코넷수의 가변에 따른 BER 성능

3) Case 3

그림 6은 AWGN과 IPI외에 다양한 멀티패스 채널 모델 (Residential LOS(CM1), Open outdoor LOS(CM5), Industrial NLOS(CM8))을 적용하여 단극형 ZCD 확산코드기반의 Chaotic-OOK UWB 시스템과 단극형 OO 코드기반의 Chaotic-OOK UWB 시스템의 BER 성능 결과를 비교한 것이다.

그림 6에서 보이듯이 단극형 OO 코드기반의 시스템은 LOS 환경인 CM1, CM5에서 단극형 ZCD 코드기반의 시스템보다 BER 10^{-3}

을 기준으로 2피코넷 환경에서, 8~10dB의 성능이 열화되었다. 또한 MPI가 더욱 심각한 NLOS 환경인 CM8의 경우 단극형 OO 코드기반의 시스템은 BER 커브가 수렴하지 못하고 발산하였으나 단극형 ZCD 코드기반의 시스템은 동일한 성능이 나타남에 따라 IPI외에 IEEE 802.15.4a 채널모델의 다양한 MPI 환경하에 대해서도 영향을 받지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이와 같은 결과들은 본 논문에서 제안한 단극형 ZCD 코드기반의 시스템이 IPI는 물론이고 MPI에 대해서도 ZCD 코드가 갖는 우수한 직교성으로 인하여, 강한 저항력을 가짐으로써, 다른 코드 기반의 시스템에 비하여 우수한 통신성능을 가질 수 있다는 것을 입증해주고 있다.

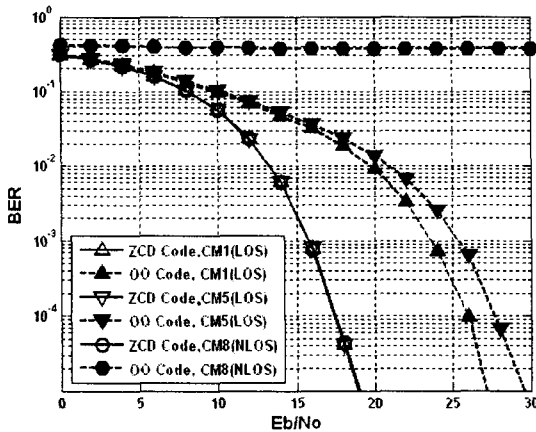


그림 6. IEEE802.15.4a 채널모델을 고려한 상태에서, E_b/N_0 의 증가에 따른 BER 성능

5. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4a에서의 표준화가 진행중인 WPAN 환경에서의 단극형 ZCD 확산 코드기반의 저간섭 Chaotic-OOK UWB 시스템을 제시하였다. 또한, 단극형 ZCD 확산코드를 사용하는 Chaotic-OOK UWB 시스템을 구성하여 AWGN 및 IEEE 802.15.4a 채널모델 환경에서 BER 모의실험을 해 본 결과 다양한 간섭환경에 대해 강인한 통신성능이 보였음을 확인하였다.

본 연구는 대학 IT연구센터(이하 UWB-ITRC) 육성, 지원사업의 연구 결과로 수행되었음.

Reference

[1] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>
 [2] Samsung Electronics(SAIT) and Jaesang Cha et al, "IEEE P802.15 Working Group For Wireless Personal Area Networks(WPANs)", Samsung Electronics(SAIT) CFP Document, Jan, 2005
 [3] JaeSang Cha, KyungSup Kwak, ChongHyun Lee, JaeHo Jeong, Il-Kyoo Lee "Chaotic-OOK UWB modem using new unipolar ZCD codes for wireless PAN", Consumer Electronics, 2006. ICCE. 2006 Digest of Technical Papers, pp197-198, 7-11 Jan. 2006
 [4] Jaesang Cha., S. Kameda, M. Yokoyama, H. Nakase, K. Masu

and K. Tsubouchi, "New binary sequences with zero-correlation duration for approximately synchronized CDMA", IEE Electronics Letters, Vol. 37, no.10, pp. 636-637, May. 2000
 [5] Jaesang Cha, "Class of ternary spreading sequences with zero correlation duration", IEE Electronics Letters, Vol. 36, no.11, pp. 991-993, May. 2001
 [6] H. Donelan and T.O. Farrell, "Families of ternary sequences with aperiodic zero correlation zones for MC-DS-CDMA", IEE Electronics Letters, Vol. 38, no.25, pp. 1660-1661, Dec. 2002
 [7] Sergio Verdu, Multiuser Detection, Cambridge university press, 1998
 [8] J.A. Salehi, "Code division multiple-access techniques in optical fiber networks. I. Fundamental principles", IEEE Transactions on Communications, Vol. 37, Issue 8, pp824-833, Aug. 1989
 [9] A. F. Molisch, et. al., "IEEE 802.15.4a Channel Model - Final Report.", IEEE 802.15-04-0662-00-004a, San Antonio, TX, USA, Nov. 2004