이진 ZCD 코드 기반의 WPAN용 CSS 변복조 알고리즘의 BER성능분석에 관한 연구

*여운서 *윤승금 *이선희 *최성진 **조주필 ***김성권 *차재상©

*서울산업대학교 **군산대학교 ***목포해양대학교

*wunseo@paran.com *chajs@snut.ac.kr©

BER analysis of CSS MODEM algorithm for WPAN based on binary ZCD

*Yeo, Wun-seo *Yoon, Seung-keum *Lee, Seon-hee *Choi, Sung-jin

**Cho, Ju-Phil ***Kim, Seong-Kweon *Cha, Jae-sang©

*Seoul National Univ. of Technology **Gunsan Univ. ***Mokpo National Maritime Univ.

요약

IEEE 802.15.4a에서는 첩(Chirp)신호을 이용한 UWB(Ultra Wide Band) 시스템으로서 DBO(Differential Bi-Orthogonal)-CSS(Chirp Spread Spectrum) 기술을 선택적 표준안으로 정하였다. 기존 DBO-CSS에서는 다중 피코넷 간섭(MPI; Multiple Piconets Interference)을 피하기 위하여 각 피코넷 별로 Different Time-Gap을 할당하고 있다 하지만 완벽한 직교성이 존재하지 않는다는 특성을 가지고 있어서 간섭의 영향에 민감할 수 밖에 없고, 무선통신시스템의 성능 저하를 야기시킨다. 본 논문에서는 각 피코넷 별로 보다 완전한 직교성을 확보하기 위하여, 확산코드기법을 적용한 CSS 변복조 알고리즘을 제안하고, 또한 일정한 시간 구간동안 연속적인 직교특성을 가지는 이진 ZCD(Zero Correlation Duration) 코드를 사용하여 BER(Bit Error Rate) 성능 분석을 통해 SOP(Simultaneously Operating Piconets) 환경에서 다중 피코넷 간섭 등의 영향을 효과적으로 제거함을 확인하였다.

1. 서론

최근 정보통신 환경은 유비쿼터스 네트워크에 대한 요구가 증가하면서 근거리에서 무선으로 네트워크를 구성하는 WPAN(Wireless Personal Area Network)이 주목받고 있다. WPAN은 무선을 이용하는 개인 영역 네트워크, 근거리의 무선 네트워크로서 PC, PDA, 무선 저장 장치, 무선 전화기 등 다양한 종류의 휴대용 컴퓨팅 장비들을 지원하기 위해 설계된 것이다 특히 UWB무선 기술은 고속의 데이터 전송, 저전력, 뛰어난 위치인식 등의 특징을 가지면서 WPAN을 위한 주요 기술로 인식되고 있으며, 표준화와 기술개발이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. UWB 무선 기술은 기존 협대역이나 광대역 CDMA (Code Division Multiple Access) 시스템에 비해 매우 넓은 주파수 대역에 걸쳐 상대적으로 낮은 스펙트럼 전력밀도를 가지므로 기존의 통신시스템과 양립할 수 있다는 것이 그 특징이다[1][2]. 이러한 UWB 매우 넓은 주파수 대역 점유라는 특징을 이용하여 고밀도의 위치인식이 가능하고 비교적 좁은 영역에서 수십 cm 이내의 정밀도를 요구하는 위치인식 서비스를 제공할 수 있다[3]. 무선 통신 환경의 WPAN 시스템은 MPI나 ISI(Inter Symbol Interference)등과 같은 외부의 다른 간섭 성분들과 잡음에 영향을 받기 쉬운 특징을 가지고 있고, 그 영향은 시스템의 성능 저하로 직결될 수 밖에 없다. IEEE 802.15.4a에서는 저속의 위치인식 PHY의 표준화로 UWB Impulse Radio방식과 CSS 방식을 선택적 표준안으로 정하였다[4]. 그 중 CSS 방식에서는 SOP 환경에서 피코넷 간의 간섭을 피하기 위하여 각 피코넷별로 Different Time-Gap을 할당하고 있지만, 완전한 직교성이 보장되지 않는다는 특성을 가지고 있어서 간섭의 영향에 민감할 수 밖에 없다는 한계성을 가진다[5][6].

본 논문에서는 이진 ZCD 확산코드를 적용한 CSS 변복조 알고리즘을 제안하여 피코넷 간의 간섭에 대해 직교성을 보장하고자 한다. 확산코드를 사용하면 간섭 및 방해 성분에 강하다는 특징을 가질 뿐만 아니라, 각 피코넷 별로 서로 다른 확산코드를 할당함으로서 어느 피코넷에서 신호가 들어오는 지를 판별할 수 있다는 특징이 있다. 또한, 각 피코넷 별로 보다 완전한 직교성을 확보하기 위하여 일정 시간구간동안 연속적 직교특성을 가지는 이진 ZCD 코드를 사용하여 간섭완화 특성이 크게 향상된 저간섭의 시스템 구현 알고리즘을 제시하고 시스템의 BER 성능분석을 통하여 SOP 환경에서 MPI 등의 영향을 효과적으로 제거함을 확인했다..

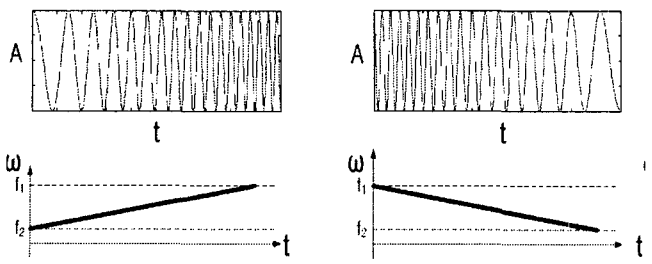
본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 DBO-CSS 시스템에 대해 알아보고 제3장에서는 본 논문에서의 핵심기술인 ZCD와 이진 ZCD코드의 특성에 대해서 살펴보고 제4장에서는 제안하는 확산코드 기반의 CSS 변복조 알고리즘을 살펴본다. 그리고 제5장에서는 제안된 시스템의 시뮬레이션을 통한 BER 성능 분석 결과를 나타내었고 마지막 제6장에서 결론을 맺는다.

2. DBO-CSS 시스템

가. 첩(Chirp)신호의 정의

첩신호는 시간에 따라 주파수가 선형적으로 변하는 신호이다. 일반적으로 첩신호는 원래 군사용 레이더 등에서 사용하는 변조의 반송파로 사용되었으며 잡음의 강한 특성을 가지고 있다. 첩신호의 변조 기술은 회로의 복잡도와 소비 전력이 낮고 잡음과 다른 신호의 간섭성분에 강하다는 특징을 가지고 있다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 Up-첩신

호(a)는 주파수 f_1부터 주파수 f_2까지 선형적으로 증가하는 형태이고 Down-첩신호(b)는 주파수 f_2부터 주파수 f_1까지 선형적으로 감소하는 형태의 신호이다.



(a) Up-Chirp (b) Down-Chirp

그림 1 첩신호의 종류

나. SOP를 위한 DBO-CSS 시스템[5][6][7]

DBO-CSS 시스템에서는 그림 2와 같이 인접한 두 주파수 대역에서의 Up-첩신호와 Down-첩신호를 서브 첩으로 정의하고, 이 4개의 서브 첩을 이용하여 특수한 조합으로 만들어진 4개의 첩 심벌을 각 피코넷에서 사용하고 있다. 또한 심벌 단위로 Different Time-Gap을 할당하여 사용함으로서 각 피코넷 간의 간섭을 줄이는 방법을 택하고 있다. 하지만 두 개의 심벌 뒤에는 각 피코넷 신호의 시작점이 같아지기 때문에 SOP 환경에서 다른 신호에 영향을 받을 수 밖에 없다는 특징을 가진다.

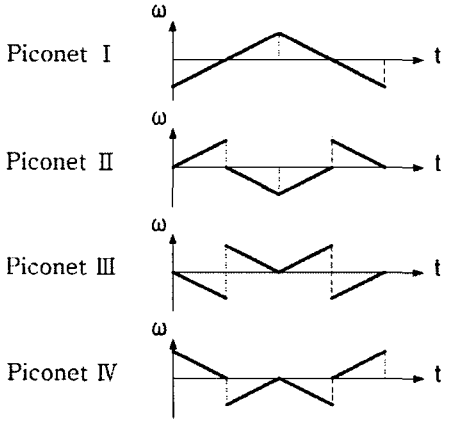


그림 2 피코넷에 따른 CSS 신호의 구분

변조신호인 첩 심벌은 다음의 식으로 나타날 수 있다. $\widetilde{s^m}(t)$는 연속적인 시간영역에서의 기저대역신호이다.

$$\widetilde{s^m}(t)=\sum_{n=0}^{\infty}\widetilde{s^m}(t,n)$$
$$=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{k=1}^{4}\widetilde{c_{n,k}}\exp\left[j\left(\widehat{\omega_{k,m}}+\frac{\mu}{2}\xi_{k,m}(t-T_{n,k,m})\right)(t-T_{n,k,m})\right]\cdot P_{RC}(t-T_{n,k,m}) \quad (1)$$

$m=1,2,3,4$ 로 4개의 서브 첩을 가지고 특정한 조합으로 만들어진 4개의 첩 심벌을 말하고, $n=0,1,2,\cdots$ 로 첩 심벌의 시퀀스 수를 뜻한다. 이것은 CSS 변조되는 데이터 비트의 개수와 상관있다. $\widehat{\omega_{k,m}}=2\pi\times f_{k,m}$로 첩 심벌의 중심주파수로서 서브 첩과 첩 심벌에 따라 특정하게 정해진다. ($k=1,2,3,4$:서브 첩의 번호)

$$T_{n,k,m}=\left(k+\frac{1}{2}\right)T_{sub}+nT_{chirp}-(1-(-1)^n)\tau_m \quad (2)$$

$T_{n,k,m}$은 실제의 서브 첩 신호가 만들어지는 시작시간으로서 이것은 첩 심벌의 구간 T_{chirp}과 서브 첩의 구간인 T_{sub}에 의존한다. $\mu=2\pi\times 7.3158\times 10^{12}[rad/\sec^2]$의 상수로 서브 첩 신호의 특성 정의한다. τ_m 역시 첩 심벌에 대해 정해진 특정 상수값으로서 T_{sub}에 더하거나 감함으로서 첩 심벌에 대한 Different Time-Gap을 만든다. $P_{RC}(t-T_{n,k,m})$는 첩 펄스 세이핑을 위한 Raised Cosine 윈도우를 나타낸다.

3. ZCD 특성 및 이진 ZCD 확산 코드

가. 제로상관특성을 갖는 ZCD 코드

무선통신 채널환경을 통한 신호는 잡음과 다양한 간섭성분에 민감하게 반응한다는 특징을 가진다. 이러한 잡음과 간섭성분으로 인해 직교성이 붕괴되고, 그 직교특성은 SS 시스템에서 확산코드와 깊은 연관이 있다.

확산코드 중 직교성이 유지되는 코드로서는 하다마드-왈쉬(Hadamard-Walsh)코드, 또는 하다마드-왈쉬코드의 변형형인 OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor)코드[8] 등이 있으나 이들 확산 코드들의 직교특성은 코드간의 동기가 확립된 시점에서만 직교가 유지된다는 한계점을 가진다. 이러한 동기 확립상태에서만 직교가 유지되는 특성은 SOP 환경에서의 MPI 등에 대해서 BER 성능 저하를 유발시킨다. 이 절에서는 이러한 문제점을 근본적으로 해결할 수 있는 본 논문의 핵심적인 기술인 이진 ZCD 확산코드에 대해 살펴본다.

먼저, 두 개의 확산코드 $S_N^{(x)}=(s_0^{(x)},\ldots,s_{N-1}^{(x)})$ 와 $S_N^{(y)}=(s_0^{(y)},\ldots,s_{N-1}^{(y)})$의 시간 주기 τ에 대한 주기상관의 식은 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_{x,y}(\tau)=\sum_{n=0}^{N-1}s_n^{(x)}s_{n\oplus\tau}^{(y)} \quad (3)$$

여기서 N는 확산코드의 1주기 이며, $\oplus$ 는 modulo 연산을 의미하고, x=y일 경우는 자기상관함수(ACF; Auto Correaltion Function)가 되며 x≠y일 경우 상호상관함수(CCF; Cross Correlation Function)이 된다. 주기자기상관함수의 사이드 러브의 최대치(θ_{as})와 주기상호상관함수의 최대치(θ_c)는 상호간의 Trade off 관계에 의한 이론적인 한계치를 가지고 있다. 그러나 $\tau=0$ 주변의 특정 시간 영역 이내에서 연속적으로 0이 되게 하는 2진(Binary) 코드를 만드는 것이 가능하다. 이러한 연속적인 시간구간을 ZCD(Zero Correlation Duration)[9]이라고 정의한다. 이러한 ZCD 특성은 CDMA시스템에서의 다중사용자간섭(MAI; Multiple Access Interference)의 문제를 해결해 줄 수 있다 [10][11][12].

나. CSS 시스템을 위한 이진 ZCD 코드

본 절에서는 ZCD기반의 CSS 시스템을 구성하기 위한 이진 ZCD 확산코드를 알아본다. 이진 ZCD 확산코드는 코드의 레벨이 이진으로

서 (0.5N+1)칩이라는 최대 ZCD 구간을 갖는다는 특성을 가지고 있다. 아래 그림 3에서는 주기가 64칩인 이진 ZCD 확산코드가 갖는 ZCD 특성을 나타내었다. (0.5*64+1)의 값인 33칩 ZCD 구간에서의 ACF의 사이드러브와 CCF가 연속적으로 0의 값을 가지는 ZCD특성이 나타난 것을 확인할 수 있다. 이 ZCD 구간에서 잡음성분이나 MPI가 생기면 0의 값을 갖는 구간에서는 간섭의 영향을 받지 않는 특성을 갖는다. 즉, 본 논문에서는 이진 ZCD 확산코드를 사용하여 간섭 완화 성능이 크게 향상되는 특징을 적용한 알고리즘을 제안한다.

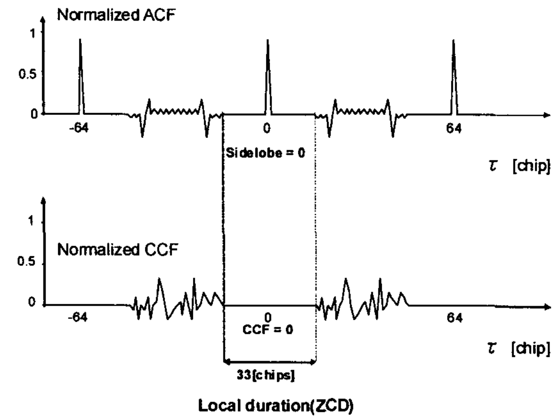


그림 3 이진 ZCD 코드의 ZCD 특성의 예

다음의 식(4)와 식(5)는 본 논문에서 사용한 주기 64칩의 이진 ZCD 코드 페어와, 6개의 코드로 이루어진 주기 32칩의 이진 ZCD 코드 셋을 나타냈다.

주기 64칩의 이진 ZCD 코드 페어(pair)

$$\begin{Bmatrix} S_{64}^{(a)} = c\ d\ c\ -d\ c\ d\ -c\ d\ c\ d\ c\ -d\ -c\ -d\ c\ -d \\ S_{64}^{(b)} = u\ v\ u\ -d\ u\ v\ -u\ v\ u\ v\ u\ -v\ -u\ -v\ u\ -v \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서, $c=(-+--)$, $d=(-+++)$, $u=(---+)$, $v=(--+-)$를 나타낸다.

주기 32칩의 이진 ZCD 코드 셋(set)

$$\begin{aligned} M_1 &= (--+-+++-++-++++- \\ &\quad ++-+---+++-++++-) \\ M_2 &= (-++++-+++---+-++ \\ &\quad +----+--+---+-++) \\ M_3 &= (-+++-++-++++-++- \\ &\quad +---+++-++++---+) \\ M_4 &= (++-+++---+-+++-- \\ &\quad --+--+---+-++-++) \\ M_5 &= (+-++-++++-++-+-- \\ &\quad -+++-++++---+-++) \\ M_6 &= (+++---+-+++----+ \\ &\quad --+---+-++-++++-) \end{aligned} \quad (5)$$

4. 이진 ZCD 코드 기반의 CSS 변복조 알고리즘

가. 제안하는 시스템의 구조 및 시스템 모델링

제안하는 이진 ZCD 코드 기반의 CSS 변복조 알고리즘은 ZCD코드기법과 CSS방식을 결합한 방식으로, 코드를 사용하여 피코넷을 구분하는 개념이다. 따라서 Different Time-Gap을 할당하지 않고 구현 가능하다. 제안된 송수신기의 구조는 그림 4와 같다.

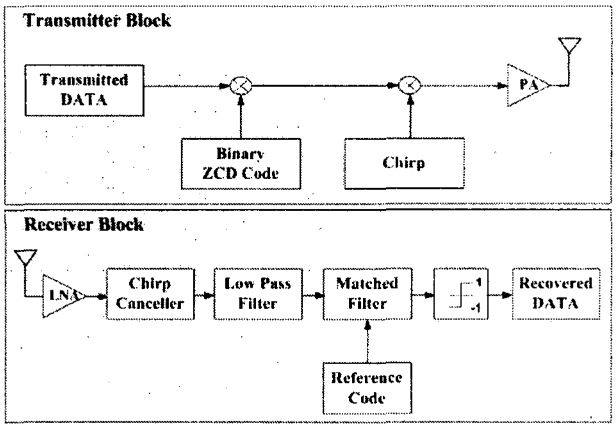


그림 4 이진 ZCD 코드 기반의 CSS 시스템의 송수신기 블록도

각 피코넷의 송신단에서는 데이터 비트가 ZCD코드에 의해서 확산된 후 CSS 변조되며, 이론적인 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u^l(t) = b^{(l)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n^{(k)} p_{T_c}(t-T_b) \cdot s^{\widehat{k,m}}(t) \quad (6)$$

l는 각 피코넷, $c^k(t)$와 $b^{(l)}$는 각 피코넷의 확산코드와 데이터 비트를 나타내고, $s^{\widehat{k,m}}(t)$는 반송파로 사용되는 CSS 신호를 나타낸다. $T_b = Nr \cdot T_c$로서 한 개의 데이터 심벌구간의 값을 가진다. 다수의 피코넷 신호가 합쳐져 AWGN(Additive White Gaussian Noise)채널을 통과하여 들어온 시스템 전체의 전송신호 $u(t)$는 식 (7)과 같이 된다.

$$u(t) = \sum_{l=0}^{L} u^{(l)}(t) + n(t) \quad (7)$$

L는 전체 피코넷 수, $n(t)$는 AWGN으로 가정한다. 정합필터의 모델링을 거치고 나서[13], AWGN 채널안의 l번째 피코넷의 이론적인 BER은 식 (8)과 같다.

$$P^l(\sigma) = \frac{1}{2} \sum_{c1 \in -1,1} \cdots \sum_{\substack{cj \in -1,1 \\ j \neq l}} \cdots \sum_{cl \in -1,1} Q\left(\frac{c_l}{\sigma} + \sum_{j \neq l} e_j \frac{c_l}{\sigma} \rho_{jl}\right) \quad (8)$$

여기서 $Q(x)$는 단위 정규화 변수의 상보적 누적분포함수이고 c_l은 l번째 피코넷의 진폭이다. AWGN 외에 MPI 특성을 반영하는 BER을 표현하면 식 (9)와 같다.

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt \quad (9)$$

제안하는 시스템의 BER 성능은 다중피코넷에 이용된 확산코드 상호간에 제로상관구간동안 연속적으로 직교성이 유지되므로MPI가 존재하지 않는다. 그러므로 AWGN의 환경하에서의 BER 성능은 식 (10)과 같이 표현될 수 있다.

$$P^l(\sigma) = \frac{1}{2} Q\left(\frac{c_l}{\sigma}\right) \quad (10)$$

5. 시뮬레이션 및 BER 결과 분석

본 장에서는 MPI 환경에서의 왈쉬 코드 기반의 CSS 시스템과 이진 ZCD 코드기반의 CSS 시스템을 AWGN 환경하에서 BER 성능을 분석하였다. 그림 5는 SOP 환경에서의 시뮬레이션 구조를 나타내고 표 1은 시뮬레이션과 관련된 환경 파라미터를 나타내었다.

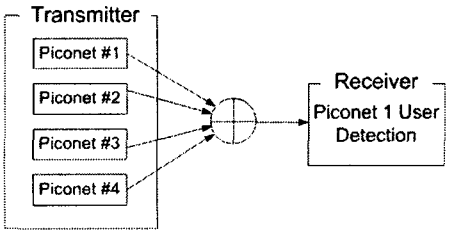


그림 5 SOP 환경에서의 시뮬레이션 구조

표 1 시뮬레이션 환경 파라미터

분류	내용
코드	왈쉬, 이진 ZCD
코드의 주기	32 칩
변조 방식	CSS 변조
검파 방법	포락선 검파 & 정합필터
피코넷 수	1~4
신호대잡음비[dB]	0~30
채널 환경	AWGN

본 논문 4장의 BER 이론식에서 $Q(x)$함수는 변수 x에 대한 단조롭게 감소하는 함수로서, 이진 ZCD 코드 기법을 적용한 시스템의 BER값은 MPI환경하에서 코드간의 동기가 확립되는 한점에서만 직교성을 갖는 왈쉬 코드 기반의 시스템에 비하여 항상 작은 값을 갖게 된다. 그림 6은 AWGN 환경하에서 하나의 피코넷에서의 왈쉬 코드와 이진 ZCD 코드기반의 시스템의 BER 성능을 비교 분석한 것이다. 각 코드의 주기 32칩을 사용하여 신호대 잡음비를 0~30[dB]까지 변경하면서 측정하였다.

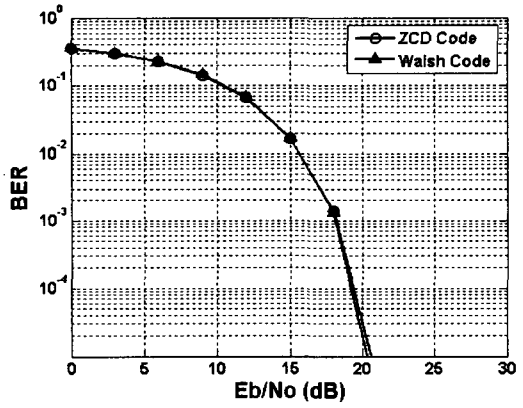


그림 6 피코넷=1, 32칩의 코드주기, AWGN 환경에서의 성능분석비교

하나의 피코넷일 때의 시뮬레이션 결과는 왈쉬 코드와 이진 ZCD 코드 모두 각각 직교성을 유지한다는 것을 볼 수 있고 BER의 값은 10^{-3}인 경우를 기준으로 하면, 약 18[dB]정도의 이득을 얻음을 알 수 있다.

다음 그림 7은 SOP 환경을 가정하여, 이 같은 경우 제안한 방식이 건실한 통신이 가능한지를 알아보고자 시뮬레이션 하였다. 피코넷의 수를 2~4개까지 변화시켜가면서 왈쉬 코드와 이진 ZCD 코드에 따른 성능을 비교하였다.

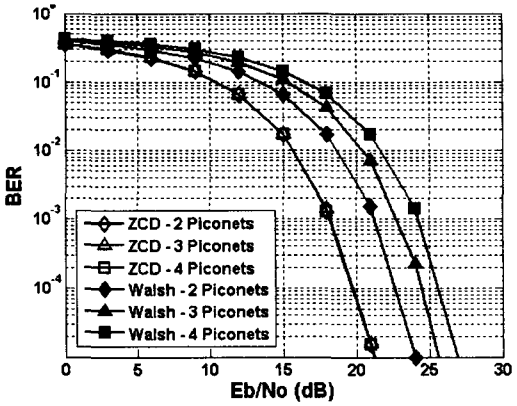


그림 7 피코넷=2~4, 32칩의 코드주기, AWGN 환경에서의 성능분석비교

피코넷이 하나일 경우 왈쉬 코드와 이진 ZCD 코드의 비교시 거의 비슷한 성능을 보이지만 MPI 영향에 대해 완전한 직교성를 확보하지 않는 왈쉬 코드의 경우 피코넷의 수가 2개, 3개, 4개로 증가할수록 신호대 잡음비가 10^{-3} 기준에서 약 21[dB], 23[dB], 25[dB]로 성능이 열화된다는 것을 볼 수 있다. 반면 이진 ZCD코드의 경우 피코넷 수에 상관없이 동일한 BER 성능이 나온다는 것을 볼 수 있다. 이는 이진 ZCD 기반의 CSS 변복조 방식이 MPI의 간섭에 대해서 적합한 특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

무선채널 환경의 통신 시스템은 잡음이나 다른 간섭성분에 의해 성능이 감소하는 현상이 나타난다. 이를 효율적으로 해결할 수 있는 방안들이 연구되고 있으며, 본 논문에서도 이런 과정으로 볼 수 있다. 잡음과 다양한 간섭성분에 대해 강인한 특성을 가지는 이진 ZCD 코드 기법과 CSS 변복조 기술을 결합하고자 시도하였다. 그리고 이진 ZCD 코드 기법이 다중 피코넷 간섭에 대한 성능을 알아보기 위해서 가우시안 환경하에서 직교성이 우수한 왈쉬 코드를 CSS 변복조 기술에 적용하여 두 코드간의 특성을 비교하였고, 이진 ZCD 코드 기반의 CSS 시스템이 왈쉬 코드 기법을 적용한 CSS 시스템에 비해 월등히 우수한 성능을 나타냄을 확인했다.

본 연구 성과의 일부는 한국과학재단 2006년 특정기초연구과제 (위치인식기반의 차세대 Wireless PAN 알고리즘 및 모듈개발)에 의하여 수행된 결과물임

Reference

[1] J. Foerster, E. Green, S. Somayazulu, and D. Leeper, "Ultra-Wideband Technology for Short or Medium Range Wireless Communications," Intel Technology Journal, Q2, 2001.

[2] 윤두영, 전수연, "UWB 기술 개요 및 주파수 정책 동향," 정보통신정책, 통

권 397호, 제 18권 13호, 2006년 7월, pp.1-20.
[3] S. Gezici, Z. Tian, G.B. Giannakis, H. Kobayashi, A.F. Molisch, H.V. Poor, and Z. Sahinoglu, "Localization via Ultra-Wideband," IEEE Signal Processing Magazine, July 2005, pp.70-84.
[4] IEEE 802.15 WPAN Low Rate Alternative PHY Task Group 4a (TG4a), http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html
[5] Kyung-Kuk Lee, et.al, "DBO-CSK Proposal for IEEE 802.15.4a", IEEE-15-05-0025-01-004a, 2005
[6] John Lampe, Kyung-Kuk Lee, et al, "DBO-CSS PHY Presentation for 802.15.4a", IEEE-15-05-0126-01-004a, 2005
[7] Rainer Hach, Kyung-Kuk, Lee, et. al, "Draft for 2.4GHz Chirp-Spread Spectrum(CSS) PHY", IEEE 15-02- 0410-04-004a rev3.0,
[8] Mun Geon Kyeong, Suwon park, Jae Kyun Kwon, Dan Keun Sung, and Jae-sang Cha, "3G Enhancements with a view towards 4G", Tutorial. CIC 2002, Seoul, Korea, Tutorial-3, pp.91~245
[9] J.S. Cha, S. Kameda, M. Yokoyama, H. Nakase, K.Masu and K. Tsubouchi, "New binary sequences with zero-correlation duration for approximately Synchronised CDMA", ELECTRONICS LETTERS 25th May 2000 Vol. 36 No. 11, pp991~993
[10] Cha,J.S,Kameda,S.,Takahashi,K.,Yokoyama,M., Suehiro,N. Masu,K, and Tsubouchi, K, "Proposal and Implementation of Approximately synchronized CDMA system using novel biphase sequences", Proc. IEICE ITC-CSCC 99, Vol. 1, pp.56-59, Sado Island, Japan July13-15, 1999
[11] P.Z. Fan, N. Suehiro, N. Kuroyanagi and X.M. Deng, "Class of binary sequences with zero correlation zone", Electron. Lett., 1999, 35, (10), pp.777~779.
[12] Masato SAITO, Takaya YAMAZATO, Masaaki KATAYAMA Akira OGAWA, "New Quasi-Synchronous Sequences for CDMA Slotted ALOHA Systems", IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences Vol.E81-A No.11 pp.2274-2280
[13] Sergio Verdu, Multiuser Detection, Cambridge university press, 1998