

다중경로 채널 환경에서 Noncoherent UWB 시스템을 위한 고속 고신뢰의 동기획득 기법

김재운*, 양석철, 최성수[†], 신요안
송실대학교 정보통신전자공학부, [†] 한국전기연구원 전기정보망기술연구그룹
e-mail : *ecko99@amcs.ssu.ac.kr

Rapid and Reliable Signal Acquisition Scheme for Noncoherent UWB Systems in Multipath Channel

Jaewoon Kim*, Suckchel Yang, Sung Soo Choi[†], Yoan Shin
School of Electronic Engineering, Soongsil University

[†] Power Telecommunication Network Group, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

In this paper, we propose to extend the TSS-LS (Two-Step Search scheme with Linear search based Second step) scheme which was already proposed by the authors for coherent UWB (Ultra Wide Band) systems, to rapid and reliable acquisition of noncoherent UWB systems in multipath channels. The proposed noncoherent TSS-LS employing simple energy window banks utilizes two different thresholds and search windows to achieve fast acquisition. Furthermore, the linear search is adopted for the second step in the proposed scheme to correctly find the starting point in the range of effective delay spread of the multipath channels, and to obtain reliable BER (Bit Error Rate) performance of the noncoherent UWB systems. Simulation results show that the proposed TSS-LS can achieve significant reduction of the required mean acquisition time as compared to general search schemes. In addition, the proposed scheme achieves quite good BER performance, which is favorably comparable to the case of ideal perfect timing.

I. 서론

2002년 4월 미국 연방통신위원회 (Federal Communications Commission; FCC)의 주파수 할당 및 상업화 승인 이후 초광대역 (Ultra Wide Band; UWB) 통신 기술에 대한 연구와 개발이 전세계적으로 활발히 진행되고 있다[1]. 특히 100 Mbps 이상급 초고속 W-PAN (Wireless Personal Area Network)용 UWB 표준화를 담당하는 IEEE 802.15.3a[2] 및 무선측위 기능까지 수반하는 저속 저전력 W-PAN용 UWB 표준화 그룹인 IEEE 802.15.4a[3]를 중심으로 유수 관련 업체들이 UWB 연구 개발에 경쟁적으로 참여하고 있는 상황이다[4].

전형적인 UWB 시스템 송신단에서는 1 nsec 내외의 매우 좁은 폭을 갖는 펄스를 단속적으로 전송한다[5,6,7]. 이러한 UWB 시스템은 높은 전송율을 지원하며 다중경로에 대한 세밀한 분해가 용이하므로 매우 정밀한 무선측위가 가능해진다[7]. 이에 반해, 초단시간 데이터 처리를 위해 매우 정밀한 동기 제어가 요구된다. 따라서 UWB 시스템을 구현 시 정확하고 빠른 신호 동기획득 (Signal Acquisition)은 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 최근 들어 이러한 UWB 신호의 동기획득과 관련된 여러 연구 결과가 보고되고 있으며 [8,9,10], 특히 본 저자들은 Coherent UWB 시스

템에서 고속 고신뢰 신호 동기획득을 위한 두 단계 탐색 기법 (Two-Step Search Scheme)인 TSS-LS (Two-Step Search scheme with Linear search based Second step)를 [11]에서 제안한 바 있다.

한편, Coherent UWB 시스템은 일반적으로 비트오율 (Bit Error Rate; BER) 측면에서 Noncoherent 방식에 비해 성능이 우수하나, 수신단의 상관기 (Correlator)에서 사용될 참조 신호를 발생시킬 별도의 펄스 생성기가 필요하며 이러한 상관기 기반의 Rake 수신기를 사용하여 구조가 크게 복잡하게 된다. 그러나 효율적인 UWB 송수신기 구현을 위해서는 시스템 설계의 핵심 요소인 칩의 소형화, 저전력성, 구현의 용이성, 그리고 다중경로 페이딩에 대한 강인성 등을 고려해야 된다. 따라서 복잡한 Coherent UWB 시스템 보다는 단순한 형태의 에너지 윈도우 बैं크 (Energy Window Bank) 기반의 수신기를 이용하는 Noncoherent 방식이 이러한 시스템 설계 요구 사항에 근접할 수 있어 최근 주목받고 있다 [12,13,14].

이에 본 논문에서는 본 저자들이 앞서 Coherent UWB 시스템을 위해 제안했었던 TSS-LS 기법을 확장 적용하여 Noncoherent UWB 시스템에서 고속 고신뢰의 동기획득을 보장할 수 있는 Noncoherent TSS-LS 기법을 제안하고자 한다.

II. UWB 신호 및 Noncoherent UWB 시스템의 에너지 윈도우 बैं크 출력

Noncoherent UWB 시스템의 송신단에서 동기 획득을 위해 다음과 같은 가우시안 모노사이클 펄스 (Gaussian Monocycle Pulse)[7,8] $p(t)$ 를 수신단으로 전송한다고 가정한다.

$$p(t) = 2A \sqrt{\pi} e^{-\frac{t}{\tau_p}} e^{-2\pi(t/\tau_p)^2} \quad (1)$$

여기서 A 는 펄스의 크기를 나타내는 상수이고, τ_p 는 펄스폭을 결정하는 파라미터이다. 식 (1)의 전송 펄스 $p(t)$ 가 송신단 및 수신단 안테나의 미분 특성에 의한 영향을 받으면, 수신단의 에너지 윈도우 बैं크에는 이 펄스를 미분한 형태의 새로운 펄스가 입력된다[5,6,8]. 따라서, 수신단 에너지

윈도우 बैं크에 입력되는 펄스 $w(t)$ 는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$w(t) = A' \left(1 - \frac{4\pi t^2}{\tau_p^2} \right) e^{-2\pi(t/\tau_p)^2} \quad (2)$$

위 식에서 A' 은 크기를 나타내는 적절한 상수이다. 따라서 UWB 신호의 동기획득을 위한 전송 신호 $s(t)$ 는 이러한 수신 펄스를 프레임 단위로 반복 전송함으로써 다음과 같이 등가적으로 모델링될 수 있다. 단 여기서 T_f 는 프레임 구간이다.

$$s(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} w(t - jT_f) \quad (3)$$

본 논문에서는 UWB 다중경로 채널 모델로서 전형적인 탭지연선 모델링을 고려하였으며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t) = \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i \delta(t - \tau_i) \quad (4)$$

여기서 α_i 는 i 번째 경로의 신호 진폭 감쇠를 나타내며, $\tau_i \equiv \tau_0 + iT_m$ 은 i 번째 경로의 시간 지연을 나타낸다. 또한, 임펄스 응답의 기본 시간 지연을 다중경로 성분을 분해할 수 있는 최소 시간인 T_m 이라고 하였을 때 신호 사이의 부분적인 상관 (Partial Correlation)을 피하기 위해 식 (2)의 펄스의 지속 시간 T_c 를 $T_c = T_m \approx 2\tau_p = 0.7626$ nsec라고 가정하였다[8,9].

이와 같은 다중경로 채널을 통과하여 수신된 신호는 식 (3)과 (4)을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$r(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i w(t - jT_f - \tau_i) + n(t) \quad (5)$$

위 식에서 $n(t)$ 는 부가성 백색 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise; AWGN)이다.

한편, j 번째 프레임 내에서 n 번째 탐색 위치에 의해 신호가 에너지 윈도우 बैं크를 거쳐 출력된 값을 $z_j^{(n)}$ 이라 한다면, 이는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$z_j^{(n)} = \int_{jT_f + \epsilon^{(n)}}^{jT_f + \epsilon^{(n)} + T_c \times N_s} r^2(t) dt \quad (6)$$

여기서 $\epsilon^{(n)}$ ($n = 0, \dots, N-1$)은 동기획득을 위해 순차적으로 탐색하는 위치를 바뀌어나가는 Bin의 위치를 나타내며, 탐색 단위 구간 간격은 전체 프레임 구간 내에서 T_f/N 로 고정된다. 또한, N_s

는 에너지 윈도우 बैं크의 크기를 나타낸다.

III. 두 단계 탐색 기반의 TSS-LS 기법

UWB 신호 동기획득은 임의의 전송 지연 τ_0 에 대한 정밀한 추정을 통하여 신호 프레임의 경계를 정확히 맞추는데 목적이 있다[8]. 본 논문에서는 동기 탐색을 위해 Markov 분석을 기반으로 하여, 현재 탐색 구간에서 상관기 출력값이 임계값을 넘을 때 동기를 획득했다고 보고 탐색을 종료하며 임계값을 넘지 않을 때는 다음 구간으로 탐색을 전환하는 방법을 고려하였다. 여기서 현재 탐색 구간에서 다음 탐색 구간으로 전환될 확률을 p_n 이라 하면 현재 구간에서 탐색을 종료되는 확률은 $1 - p_n$ 이 된다. 확률 p_n 은 식 (6)의 에너지 윈도우 बैं크 출력에 따라 다음과 같이 구해진다. 여기서, $n = j \bmod N$ 이며, Γ 는 탐색이 종료되기 위한 임계값이다.

$$p_n = \Pr(|z_j^{(n)}| \leq \Gamma), \quad j = \dots, -1, 0, 1, \dots \quad (7)$$

한편, 본 논문에서는 동기획득을 위한 기본 탐색 알고리즘으로 Linear 및 Bit Reversal 탐색[8]을 고려하였다.

UWB 신호의 동기획득 성능 향상을 위해 Bit Reversal 탐색 알고리즘을 적용한 일반적인 Double-Dwell 탐색 기법[10]을 고려할 수 있다. Double-Dwell 방식의 탐색 기법은 동기획득 속도 측면에서 일반적인 Single-Dwell 방식에 비해 두 배 가량 우수하나, Coherent UWB 시스템에서는 두 개의 상관기를 동시에 사용하며 Noncoherent UWB 시스템에서는 두 개의 에너지 윈도우 बैं크를 동시에 사용하기 때문에 시스템 복잡도를 증가시키는 단점을 피할 수 없다. 이에 본 저자들은 Coherent UWB 시스템에서 기존의 탐색 기법에 비해 동기획득 속도를 효과적으로 향상시킬 수 있는 TSS-BS (Two-Step Search scheme with Bit reversal search based Second step) 탐색 기법을 [9]에서 제안한 바 있다.

이러한 TSS-BS는 모든 단계에서 Bit Reversal 알고리즘을 사용함에 따라, 연속적으로 탐색되는 두 개의 Bin 간 거리를 최대화하는 랜

덤한 특성을 가지고 있다. 따라서 TSS-BS에서는 두번째 단계에도 Bit Reversal 알고리즘을 통하여 채널의 실효 다중경로 지연 확산의 범위에서 랜덤한 동기획득 위치를 잡게 되므로 매우 빠

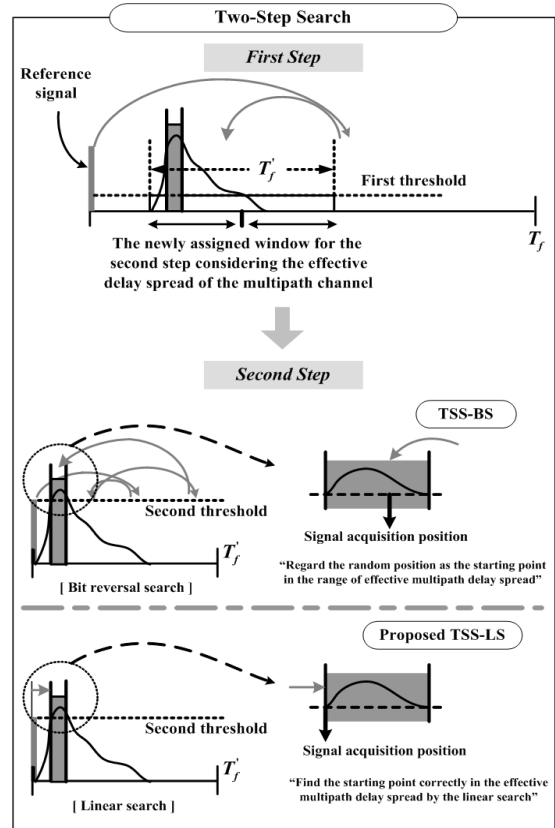


그림 1. TSS-BS 및 TSS-LS 기법에 대한 설명

표 1. TSS-BS와 TSS-LS의 신호 동기획득 알고리즘 비교 설명

STEP 1 : Rough search
1. Search “roughly” all bins in a frame T_f by bit reversal algorithm using the first threshold Γ_1 .
2. Estimate a signal bin $\epsilon_1^{(n)}$ which is any position in the range of effective delay spread (Θ bins) of the multipath channel within the given frame.
STEP 2 : Fine search
3. Assign new search window T_f' of size 2Θ bins around $\epsilon_1^{(n)}$ as $\epsilon_1^{(n)} - \Theta + 1, \dots, \epsilon_1^{(n)} + \Theta$.
4. Search “finely” the selected 2Θ bins in the newly allocated window by “bit reversal algorithm” (TSS-BS) or “linear algorithm” (TSS-LS) using the second threshold $\Gamma_2 (< \Gamma_1)$.

른 동기획득 성능을 갖게 되는 반면, 실효 다중 경로 지연 확산의 맨 처음 위치를 잡지 못하게 될 가능성이 존재하게 된다. 결국 TSS-BS에 의해 결정된 동기획득 위치에서부터 데이터 복조를 수행한다면, 심각한 BER 성능 열화를 피할 수 없게 된다.

이에 본 저자들은 [11]에서 Coherent UWB 시스템을 위해 TSS-BS와 같이 고속의 동기획득 속도를 유지하면서, 동시에 안정적인 BER 성능을 보장할 수 있는 TSS-LS를 제안한 바 있다. TSS-LS에서는 TSS-BS와 유사하게 고속의 동기획득을 위해 각각의 두 단계에서 두 개의 다른 임계값과 탐색창을 사용하게 된다. 그러나 TSS-BS와는 다르게 TSS-LS에서는 다중경로 채널의 실효 지연의 범위에서 맨 처음 시작하는 지점을 정확히 찾기 위해 두번째 단계에서 **Linear 탐색 알고리즘을 적용**하게 된다. 그림 1에서는 TSS-BS 및 TSS-LS의 동기획득 방식에 대하여 도식적으로 비교 설명하고 있으며, 표 1에는 TSS-BS와 TSS-LS의 신호 동기획득 알고리즘을 간단히 정리하고 있다.

결국 본 논문에서 제안하는 Noncoherent TSS-LS 기법은 이러한 TSS-LS에서 상관계 대신 식 (6)의 에너지 윈도우 뱅크를 이용해 구성하여 Noncoherent UWB 시스템의 동기획득에 적합한 구조를 갖게 된다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 다중경로 채널 모델로서 IEEE 802.15.3a UWB 채널 모델 CM1~CM4[15]를 고려하였다. 앞서 2절에서 펄스의 지속 시간을 $T_c = T_m (\approx 2\tau_p)$ 로 가정하였으므로 각 채널 임펄스 응답을 0.7626 nsec 단위로 샘플링하였다. 또한, 가우시안 모노사이클 펄스의 크기는 1, 펄스폭 파라미터 τ_p 는 0.3813 nsec, 펄스당 샘플의 수는 127개로 하였다[9].

우선 평균 동기획득 시간을 평가하기 위해 잡음이 없는 다중경로 채널 환경을 가정하였다. 전체 프레임 구간 T_f 와 전체 Bin의 수 N 은 각각 1000 nsec, 8192로 설정하였다. 또한 두 단계 탐

색을 위한 첫번째 단계에서 임계값 Γ_1 은 4.3으로 고정하였고, 두번째 단계에서 새로운 탐색창의 크기 2θ 는 CM1에서 256, CM2와 CM3에서 512, 그리고 CM4에서 2048로 설정하였다.

그림 2에서는 식 (6)의 에너지 윈도우 뱅크를 수신단에서 사용하는 Noncoherent UWB 시스템에서 다양한 채널 모델과 임계값 Γ (이 값은 두 단계 기법에서 Γ_2 와 동일)에 대하여 일반적인 Single-Dwell Bit Reversal 탐색 기법과 TSS-BS 및 제안된 TSS-LS의 J/N 에 따른 정규화된 평균 동기획득 시간 $E(T)/N$ 을 비교하여 나타낸다. 이 결과로부터 TSS-BS가 일반적인 Single-Dwell Bit Reversal 탐색 기법보다 매우 빠른 동기획득 성능을 보임을 알 수 있으며, 제안된 TSS-LS가 TSS-BS와 거의 유사한 우수한 동기획득 성능을 보임을 확인할 수 있다. 특히 임계값 Γ 이 점점 커질수록 (즉, J/N 이 점점 작아질수록) 고품질의 신호 동기획득이 가능해지므로, 제안된 TSS-LS는 TSS-BS에 필적하는 매우 우수한 동기획득 성능을 가짐을 알 수 있다.

다음으로 각각의 기법에 따른 신호 동기획득의 신뢰성을 검증할 수 있는 BER 성능 평가를 위해, 다음의 실험에서는 AWGN이 있는 다중경로 채널 환경을 고려하였으며 데이터 변조 방식으로는 Noncoherent UWB 시스템 기반의 Binary Pulse Position Modulation (2PPM)을 적용하였다 [12]. 신호 동기획득 기법과 연동된 시스템의 성능을 효율적으로 평가하기 위해 IEEE 802.15.3a CM1~CM4에서 최적의 적분 구간 $T_c \times N_s$ 을 모의실험을 통해 결정하였다. 이 값은 가장 우수한 BER 성능을 보임과 동시에 가장 짧은 적분 구간으로 설정된다. 모의실험 결과 가우시안 모노사이클 펄스 구간인 T_c 이 0.7626 nsec일 경우, 적분 크기 N_s 는 각각 CM1에서 10, CM2에서 20, CM3에서 40, 그리고 CM4에서 80으로 설정되었다. 또한 신호 동기획득을 위해 첫번째 임계값 Γ_1 은 4.3, 최종의 임계값 $\Gamma (= \Gamma_2)$ 는 8.6으로 적용되었으며, 잡음이 존재하는 다중경로 채널 환경에서 각각의 동기획득 기법에 의해 획득하게 되는 동기 위치 시점에서부터 Noncoherent UWB 2PPM 방식의 데이터 복조를 수행하게 된다.

그림 3에서는 UWB 시스템 수신단에서 동기 획득 기법이 연동된 경우의 BER 성능을 E_b/N_0 에 따라 도시하고 있다. 그림에서 실선은 이상적으로 완벽한 타이밍을 가정하였을 때의 BER 성능을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 큰 E_b/N_0 에 해당하는 부분에서의 BER 성능은 제안된 TSS-LS가 TSS-BS와 일반적인 Single-Dwell Bit Reversal 탐색 기법보다 대략 2~4 dB 정도 우수함을 확인할 수 있고, 이상적으로 완벽한 타이밍을 가정한 경우와 거의 비슷한 성능을 나타냄을 알 수 있다. 결과적으로 제안된 TSS-LS는 TSS-BS와 거의 동일한 매우 우수한 동기 획득 성능을 보임과 동시에, 이상적으로 완벽한 타이밍을 가정한 경우에 근접하는 BER 성능을 보임을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 상관 복조기 기반의 Coherent UWB 시스템을 위해 본 저자들이 이미 제안했던 TSS-LS 기법을 에너지 윈도우 뱅크를 수신기에서 이용하는 Noncoherent UWB 시스템에 확장 적용한 Noncoherent TSS-LS 기법을 제안하였다. 제안된 TSS-LS 기법은 Single-Dwell 연속 동기 탐색 기법을 기반으로 한 두 단계 탐색 기법으로서, 고속 동기 획득을 위해 두 개의 서로 다른 임계값과 탐색창을 적용하는 방식을 채택하며 특히 두번째 단계에서 사용되는 탐색 방법에 Linear 탐색을 이용한다. IEEE 802.15.3a에서 제공하는 4가지 다중경로 채널 환경에서의 모의실험 결과, 일반적인 탐색 기법들보다 제안 기법이 정규화된 평균 동기 획득 시간 측면에서 큰 폭의 향상을 가져옴을 알 수 있었다. 특히, 제안 기법은 동기 획득과 변복조를 연동할 때 높은 SNR에 대해 TSS-BS를 비롯한 기존의 탐색 기법들보다 우수하고 이상적인 경우와 유사한 BER 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

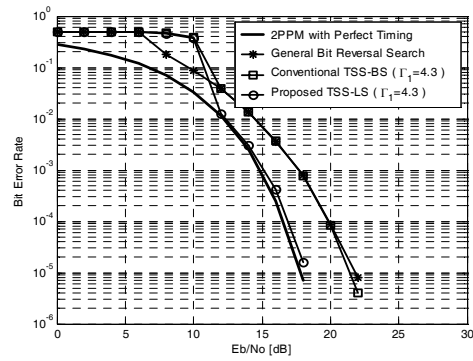
감사의 글

본 논문은 2005년도 산업자원부 차세대신기술 개발사업의 연구비 지원 결과임

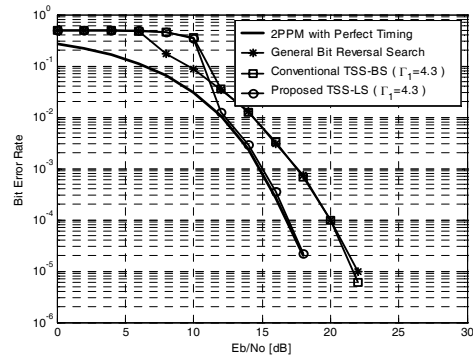
참고 문헌

- [1] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's rules regarding ultra-wideband transmission," ET Docket 98-153, Apr. 2002.
- [2] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3a.html>
- [3] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>
- [4] 신요안, 양석철, 오종욱, "IEEE 802.15 WPAN 기술 표준화 동향," *Telecommun. Review* (무선통신·방송의 표준 기술 특집호), 제87호, pp. 131-148, 2003년 11월.
- [5] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 4, pp. 679-691, Apr. 2000.
- [6] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse radio : How it works," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 2, no. 2, pp. 36-38, Feb. 1998.
- [7] K. Siwiak and D. McKeown, *Ultra-Wideband Radio Technology*, John Wiley & Sons, 2004.
- [8] E. A. Homier and R. A. Scholtz, "Rapid acquisition of ultra-wideband signals in the dense multipath channel," *Proc. IEEE UWBST 2002*, pp. 105-109, Baltimore, USA, May 2002.
- [9] J. Oh, S. Yang, and Y. Shin, "A rapid acquisition scheme for UWB signals in indoor wireless channels," *Proc. IEEE WCNC 2004*, Atlanta, USA, Mar. 2004.
- [10] J. K. Holmes and C. C. Chen, "Acquisition time performance of PN spread-spectrum systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 25, no. 8, pp. 778-784, Aug. 2002.
- [11] J. Kim, S. Yang, and Y. Shin, "A two-step search scheme for rapid and reliable UWB signal acquisition in multipath channels," *Proc. IEEE ICU 2005*, pp. 355-360, Zurich, Switzerland, Sept. 2005.

- [12] M. Weisenhorn and W. Hirt, "Robust noncoherent receiver exploiting UWB channel properties," *Proc. Joint UWBST 2004 & IWUWBS 2004*, pp. 156-160, Kyoto, Japan, May 2004.
- [13] S. Dubouloz, B. Denis, S. de Rivaz, and L. Ouvry, "Performance analysis of LDR UWB non-coherent receivers in multipath environments," *Proc. IEEE ICU 2005*, pp. 491-496, Zurich, Switzerland, Sept. 2005.
- [14] L. Stoica, S. Tiuraniemi, I. Oppermann, and H. Repo, "An ultra wideband impulse radio low complexity transceiver architecture for sensor networks," *Proc. IEEE ICU 2005*, pp. 55-59, Zurich, Switzerland, Sept. 2005.
- [15] IEEE 802.15 TG3a Channel Modeling Sub-Committee, "Proposed UWB channel model," available at <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3.html>

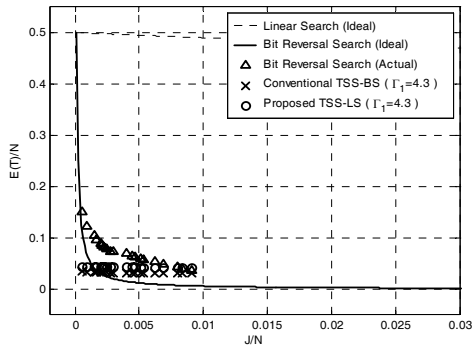


(a) CM2

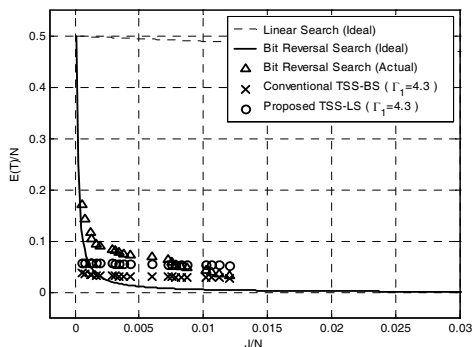


(b) CM3

그림 3. Noncoherent 2PPM UWB 시스템과의 연동을 고려할 때 동기획득 기법에 따른 BER 성능



(a) CM2



(b) CM3

그림 2. 일반적인 탐색 기법과 TSS-BS 및 제안된 TSS-LS의 정규화된 평균 동기획득 시간