

# Transmitted Reference UWB 시스템을 위한 비트오율 향상 기법

정희원 김재운\*, 종신회원 신요안\*<sup>o</sup>

## Bit Error Rate Improvement Scheme for Transmitted Reference UWB Systems

Jaewoon Kim\* *Regular Member*, Yoan Shin\*<sup>o</sup> *Lifelong Member*

### 요약

본 논문에서는 임펄스 라디오 기반의 TR-UWB (Transmitted Reference Ultra Wide Band) 시스템을 위해 효과적으로 비트오율 (Bit Error Rate; BER) 성능을 향상할 수 있는 송수신 방안을 제안한다. BER 성능은 우수하지만 매우 복잡하여 실제 구현하기에 용이하지 않은 Coherent UWB 시스템과는 달리, TR-UWB 시스템은 송신기에서 참조 신호를 데이터 신호와 함께 전송하고 수신기에서 매우 간단한 지연 처리를 한 후 이들 수신된 신호들을 상관기 (Correlator) 처리를 하여 데이터를 복조하게 되므로 복잡도는 매우 낮다. 하지만 일반적인 TR-UWB 시스템은 수신단의 상관기에서 이용되는 참조 템플릿의 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)에 따라 BER 성능이 크게 영향을 받게 된다. 이에 본 논문에서는 참조 템플릿의 SNR을 향상시켜 시스템의 BER 성능을 효과적으로 개선할 수 있는 수신기 구조를 설계하고, 연접 오류를 피하기 위해 인터리버와 길쌈부호를 고용한다. 모의실험 결과, 제안된 기법은 일반적인 TR-UWB 시스템에 비해 매우 큰 BER 성능 향상이 가능함을 확인하였다.

**Key Words** : UWB (Ultra Wide Band), Impulse Radio, TR (Transmitted Reference), ATR (Average TR)

### ABSTRACT

In this paper, we propose a transceiver structure that can effectively improve BER (Bit Error Rate) performance for TR-UWB (Transmitted Reference Ultra Wide Band) systems based on impulse radio. Unlike coherent UWB systems that are too complex for practical implementation while having good BER performances, the complexity of the TR-UWB systems is quite low since they transmit data with the corresponding reference signals and demodulate the data through correlation using these received signals. However, the BER performance in the conventional TR-UWB systems is affected by SNR (Signal-to-Noise Ratio) of the reference templates used in the correlator. To this end, we propose a receiver structure that can effectively improve the BER performance by increasing the SNR of reference templates. Simulation results reveal that the proposed scheme achieves significant BER improvement as compared to the conventional TR-UWB systems.

### 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 전세계적

※ 본 논문은 한국학술진흥재단의 기초연구과제지원사업(과제번호 KRF-2008-313-D00665)의 지원으로 이루어짐.

\* 숭실대학교 정보통신전자공학부 통신 및 정보처리 연구실(ecko99@amcs.ssu.ac.kr, yashin@ssu.ac.kr) (<sup>o</sup> : 교신저자)  
논문번호 : KICS2008-12-570, 접수일자 : 2008년 12월 29일, 최종논문접수일자 : 2009년 4월 30일

으로 활발히 진행되고 있다<sup>11</sup>. 특히 현재는 표준 단일화 실패로 해체되었으나 100 Mbps 이상급 초고속 W-PAN (Wireless Personal Area Network)용 UWB 표준화를 담당했던 IEEE 802.15.3a[2]와 더불어, 향후 유비쿼터스 센서 네트워크에 요구될 무선측위 기능까지 수반하는 저속 저전력 W-PAN용 UWB 표준화 그룹인 IEEE 802.15.4a[3]를 중심으로 유수 관련 업체들이 경쟁적인 UWB 연구 개발 대열에 적극 참여하고 있는 상황이다<sup>4</sup>.

연속적인 정현파를 사용하는 기존의 무선통신 시스템과는 달리, 전형적인 임펄스 라디오 (Impulse Radio) 기반의 UWB 시스템 송신단에서는 1 nsec 내외의 매우 좁은 폭을 갖는 펄스 혹은 임펄스를 단속적으로 전송한다<sup>15,6</sup>. 이 때문에 이 시스템은 수백 MHz~수 GHz의 대역에 걸쳐 매우 낮은 전력의 초광대역 특성 및 간섭 특성을 갖게 되고, 높은 채널 용량과 데이터 전송률을 지원하며 다중경로에 대한 세밀한 분해가 용이하므로 오차가 수십 cm 이내의 정밀한 무선측위가 가능해진다는 장점을 가지고 있다<sup>5</sup>.

이들 장점에도 불구하고, 임펄스 라디오 UWB 시스템은 많은 수의 다중경로 성분과 AWGN (Additive White Gaussian Noise)에 의해 왜곡된 임펄스 신호를 수신단에서 재결합하기 어려우므로 주어진 채널 환경에 상당히 민감하다고 할 수 있다. 이러한 이유에 의해, 대부분의 임펄스 라디오 UWB 시스템에서는 왜곡된 임펄스 신호를 효과적으로 결합하기 위한 높은 감도를 제공할 수 있는 Rake 기반의 Coherent 복조기를 고용하고 있다. 이러한 Coherent UWB 시스템은 정밀한 동기 회로와 복잡한 Rake 형태의 수신 구조를 필수적으로 요구한다<sup>7,8</sup>. 또한 Coherent UWB 시스템은 수신기의 상관기에서 채널 추정 알고리즘이 필요하므로 높은 해상도의 ADC (Analog-to-Digital Converter)가 요구될 뿐만 아니라, Rake 수신기 지원을 위해서는 Finger 수에 따라 그 복잡도는 더욱 상승하는 단점이 존재한다<sup>7,8</sup>. 반면 Noncoherent UWB 시스템은 일반적으로 간단한 방식인 에너지 검출을 기반으로 데이터를 복조하게 되므로 복잡도는 상당히 낮다고 할 수 있지만, 잡음이 더해진 수신 신호의 에너지를 이용하게 되므로 채널 환경에 민감하고 비트오율 (Bit Error Rate; BER) 성능이 열화되는 것을 피할 수 없게 된다<sup>8</sup>. 그러나, W-PAN 적용 분야의 특성상 설계된 UWB 송수신기는 구현이 용이해야 하고 낮은 가격 및 저전력 특성을 제공하면서도 다중경

로 페이딩에 강인해야 된다<sup>9,10</sup>.

이에 반해, TR-UWB (Transmitted Reference UWB) 시스템은 Semi-coherent 방식으로 Coherent 방식과 Noncoherent 방식의 장단점을 모두 가지고 있으나, 수신기 설계에 있어서 그 방식에 따라 시스템의 복잡도는 낮추고 BER 성능은 효과적으로 향상시킬 수 있는 여지가 충분히 존재한다<sup>8,11</sup>. 일반적으로 TR-UWB 시스템은 송신기에서 참조 신호를 데이터 신호와 함께 전송하고, 수신기에서 간단한 지연 처리를 한 후 이들 수신된 신호들을 상관기 (Correlator)에서 처리하여 데이터를 복조하게 되므로 복잡도는 상당히 낮다. 하지만 일반적인 TR-UWB 시스템은 수신단에서 이용되는 참조 템플릿의 신호대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)에 따라 BER 성능이 크게 영향을 받게 된다<sup>8,11</sup>.

이에 본 논문에서는 임펄스 라디오 기반의 TR-UWB 시스템을 위해 효과적으로 BER 성능을 향상시킬 수 있는 송수신 방안을 제안한다. 제안 기법은 참조 템플릿의 SNR을 향상시켜 시스템의 BER 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있는 형태로 설계되고, 연접 오류를 피하기 위해 인터리버 (Interleaver)와 길쌈 부호(Convolutional Code)를 고용한다. IEEE 802.15.4a UWB 다중경로 채널 모델<sup>12</sup>에서의 모의실험 결과, 제안 기법은 일반적인 TR-UWB 시스템에 비해 매우 우수한 BER 성능 제공할 수 있음을 확인하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 TR-UWB 시스템을 위한 송수신 신호와 채널 모델, 그리고 일반적인 TR-UWB 송수신기에 대해서 설명하고, III장에서는 본 논문에서 제안된 기법에 대해 설명한다. 그리고 IV장에서는 일반적인 TR-UWB 시스템과 비교하여 제안 기법의 성능을 모의실험을 통해 제시한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 내린다.

## II. UWB 송수신 신호와 TR-UWB 송수신기

전형적인 임펄스 라디오 기반의 UWB 시스템 송신단에서는 다음과 같은 가우시안 모노사이클 펄스 (Gaussian Monocycle Pulse)  $p(t)$ 를 전송한다고 가정한다<sup>6</sup>.

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

여기서  $A$ 는 펄스의 크기를 나타내는 상수이고  $\tau_p$ 는 펄스폭을 결정하는 파라미터이다. 식 (1)의 전송 펄스  $p(t)$ 가 송신단 및 수신단 안테나의 미분 특성

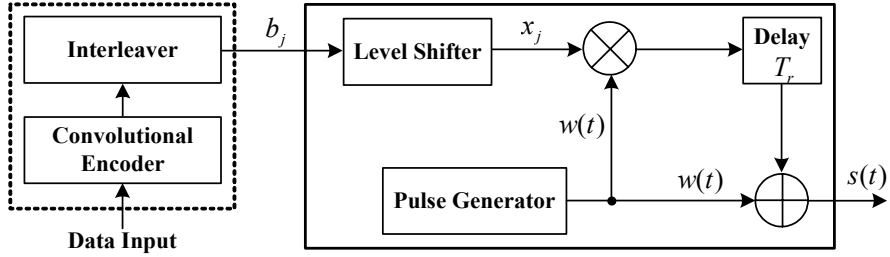


그림 1. TR-UWB 시스템의 송신기 구조  
Fig. 1. The transmitter structure of the TR-UWB systems

에 의한 영향을 받으면, 수신단의 상관기에는 이 펄스를 미분한 형태의 새로운 펄스가 입력된다. 따라서 수신단의 상관기에 입력되는 펄스  $w(t)$ 는 다음 식과 같이 표현될 수 있다<sup>6)</sup>.

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

위 식에서  $A'$ 은 크기를 나타내는 적절한 상수를 나타낸다.

TR-UWB 시스템의 송신기는 데이터 신호와 수신단 상관기에서 사용될 참조 신호를 함께 전송하므로, 2진 안티포달 변조 (Binary Antipodal Modulation)를 사용하는 TR-UWB 시스템의 전송 신호  $s(t)$ 는 식 (2)의 펄스를 사용하여 등가적으로 다음과 같이 표현된다<sup>11)</sup>.

$$s(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \underbrace{[w(t-jT_f)]}_{\text{Reference Signal}} + x_j \underbrace{[w(t-jT_f-T_r)]}_{\text{Data Signal}} \quad (3)$$

여기서  $T_f$ 는 프레임 구간을 나타낸다. 또한  $T_r$ 은 하나의 프레임에서 참조 신호와 데이터 신호를 구분하기 위한 간격을 의미하며, 본 논문에서는 참조 신호와 데이터 신호 간에 인접펄스간간섭 (Inter-Pulse Interference; IPI)이 없도록 충분히 큰 값을 고려하여  $T_r \equiv T_f/2$ 로 설정하였다. 한편,  $x_j \in \{-1, 1\}$ 는 데이터 비트  $b_j \in \{0, 1\}$ 에 따른 2진 심벌을 의미하며, 이는 레벨 시프터 (Level Shifter)로부터 아래와 같이 산출된다.

$$x_j = \begin{cases} -1, & \text{if } b_j = 0 \\ +1, & \text{if } b_j = 1 \end{cases} \quad (4)$$

그림 1은 TR-UWB 시스템의 송신기 구조를 도시하며, 실선은 일반적인 TR-UWB 시스템의 송신기 기능을 포함하고, 점선은 본 논문의 제안 기법에

서 고용된 길썬부호기와 인터리버를 포함하고 있다.

UWB 다중경로 채널 모델은 전형적으로 탭 지연선 (Tap-Delay-Line) 모델링을 기반하며, 이 경우 채널 임펄스 응답  $h(t)$ 는 다음과 같다<sup>13)</sup>.

$$h(t) = \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_{\ell} \delta(t - \tau_{\ell}) \quad (5)$$

여기서  $L$ 은 분해 가능한 다중경로 성분의 수를 나타내며,  $\alpha_{\ell}$ 은  $\ell$ 번째 경로의 크기를 의미한다. 또한  $\tau_{\ell} \equiv \tau_0 + \ell T_m$ 은  $\ell$ 번째 경로의 시간 지연이고, 여기서  $T_m$ 은 다중경로 성분을 분해할 수 있는 최소 시간이다. 또한  $\tau_0$ 는 송수신기 간 거리로 인한 전송 시간 지연이며, 전체 프레임 구간  $T_f$  내에서 균일하게 분포한다고 가정하였다. 그리고 수신된 신호간의 부분 상관 (Partial Correlation)을 피하기 위해, 펄스폭  $T_p$ 는  $T_m$ 과 같다고 가정하였다<sup>13)</sup>.

이와 같은 다중경로 채널을 통과하여 수신단으로 입력되는 수신 신호는 식 (3)과 (5)를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left[ \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_{\ell} w(t-jT_f-\tau_{\ell}) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_{\ell} x_j w(t-jT_f-T_r-\tau_{\ell}) \right] + n(t) \quad (6) \\ &= \sum_{j=-\infty}^{\infty} [g(t-jT_f) + x_j g(t-jT_f-T_r)] + n(t) \end{aligned}$$

여기서  $g(t)$ 는 아래의 식과 같으며,  $n(t)$ 는 AWGN이다.

$$g(t) \equiv w(t) * h(t) = \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_{\ell} w(t - \tau_{\ell}) \quad (7)$$

여기서 '\*'는 컨볼루션 (Convolution) 연산이고,  $T_{m_{ds}}$ 를 채널의 최대 지연 확산이라 할 때  $g(t)$ 의

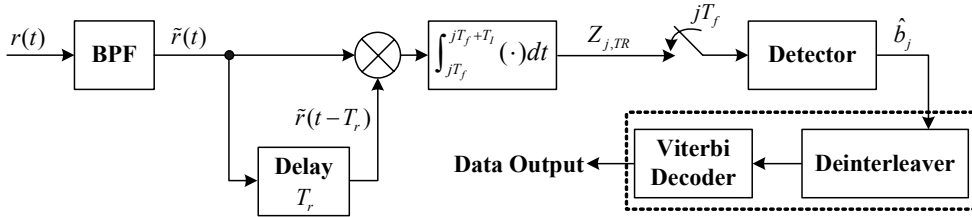


그림 2. 일반적인 TR-UWB 시스템의 수신기 구조  
Fig. 2. The receiver structure of the conventional TR-UWB systems

신호 구간은  $T_g \equiv T_p + T_{mids}$ 이다. 본 논문에서는 수신 신호들 사이에 IPI가 없도록  $T_r \equiv T_f/2$ 이  $T_g$ 보다 크거나 같다고 가정하였다.

수신기에서 수신 신호는 송신 신호와 대역이 일치하는 대역통과필터 (Band Pass Filter; BPF)를 통과하게 되며, 필터의 출력 신호  $\tilde{r}(t)$ 는 아래와 같다.

$$\tilde{r}(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} [\tilde{g}(t - jT_f) + x_j \tilde{g}(t - jT_f - T_r)] + \tilde{n}(t) \quad (8)$$

여기서,  $\tilde{g}(t)$ 와  $\tilde{n}(t)$ 는 각각  $g(t)$ 와  $n(t)$ 가 BPF를 통과한 출력이다.

그림 2에서는 전송된 참조 신호를 간단히 지연시켜 참조 템플릿으로 사용하여 복조를 수행하는 일반적인 TR-UWB 시스템의 수신기 구조를 도시하고 있다<sup>[11]</sup>. 이 그림에서 점선 내의 블록은 TR-UWB 송수신 방식에 따라 인터리버와 길쌈부호기를 고흡할 경우 수신단에서 필요한 기능을 나타내고 있다. 이 수신기에서  $j$ 번째 프레임에서  $T_f$  ( $0 < T_f \leq T_f$ ) 구간동안 상관기 출력  $Z_{j,TR}$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$Z_{j,TR} = \int_{jT_f}^{jT_f + T_f} \tilde{r}(t) \tilde{r}(t - T_r) dt \quad (9)$$

이 때, 일반적인 TR-UWB 수신기의 검출기에서는 상관기의 출력  $Z_{j,TR}$ 을 이용하여 아래와 같은 조건에 따라 데이터 비트를 복조하게 된다.

$$\hat{b}_j = \begin{cases} 0, & \text{if } Z_{j,TR} \leq 0 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

### III. 제안된 BER 향상 기법

앞서 살펴본 바와 같이, TR-UWB 시스템은 송신기에서 참조 신호를 데이터 신호와 함께 전송하고 수신기에서 간단한 지연 처리를 한 후 이들 수신 신호들을 상관기에서 처리를 하여 데이터를 복조하

게 되므로 복잡도는 매우 낮다. 하지만 이 시스템은 상관기에서 이용되는 참조 템플릿의 SNR에 따라 BER 성능이 크게 영향을 받게 된다. 이에 본 논문에서는 임펄스 라디오 기반의 TR-UWB 시스템을 위해 효과적으로 BER 성능을 향상시킬 수 있는 송수신 방안을 제안한다. 제안 기법은 참조 템플릿의 SNR을 향상시켜 시스템의 BER 성능을 효과적으로 개선할 수 있는 수신기 구조로 설계되고, 연접 오류를 피하기 위해 인터리버와 길쌈부호를 고흡한다. 제안 기법에서 길쌈부호 대신 터보부호나 LDPC (Low Density Parity Check)와 같은 다른 적절한 채널부호를 사용하는 것도 당연히 가능하다.

좀 더 세부적으로 살펴보면, 제안 기법의 수신기는 수신된 참조 신호들을 재귀적으로 (Recursively) 평균을 취함으로써 데이터 비트의 검출 시 사용되는 참조 템플릿의 SNR을 향상시킨다. 이러한 재귀적인 수신 구조는<sup>[14]</sup>에서 제시된 방식 (이하 “일반적인 RTR”)을 기반으로 한다. 재귀적으로 평균을 취할 때, 일반적인 RTR-UWB 시스템은 수신된 참조 신호들을 비균형적으로 (Unbalanced) 평균을 취하게 되므로 참조 템플릿의 SNR을 효과적으로 향상시키지 못하게 되어, 결국 BER 성능 향상이 일반적인 TR-UWB 시스템과 비교하여 그다지 크지 않다. 하지만 본 논문에서 제안된 기법에서는 수신된 참조 신호들을 균형적으로 (Balanced) 평균 취할 수 있는 구조로 재설계되어 있으므로, 참조 템플릿의 SNR을 효과적으로 향상시킬 수 있게 됨에 따라 매우 향상된 BER 성능을 제공하게 된다. 이제 제안 기법의 세부적인 절차에 대해 살펴보면 다음과 같다.

그림 3에서는 디인터리버와 비터비 복호기가 고흡된 제안 기법의 수신기 구조를 도시하고 있다. 이 그림으로부터 알 수 있듯이, 제안 기법은 그림 2에서 도시된 일반적인 TR-UWB 시스템의 수신기와는 달리 “Recursive Update Processing Block”이 추가되었으며, 이 블록은 수신된 참조 신호를 재귀적

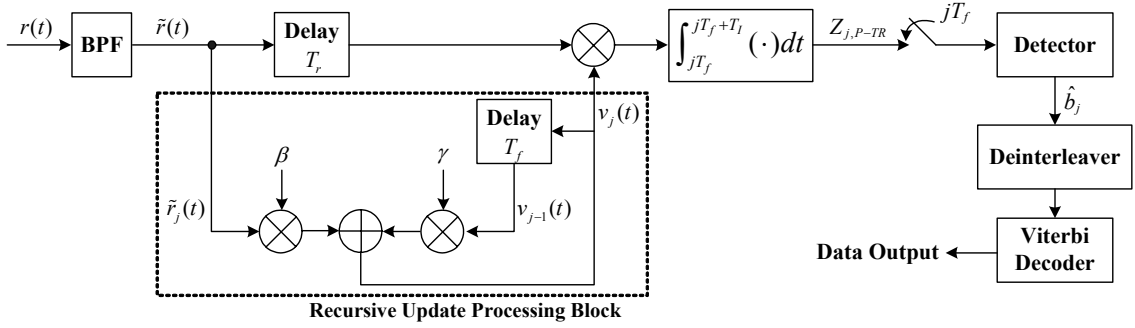


그림 3. TR-UWB 시스템의 BER 향상을 위한 제안 기법의 수신기 구조  
 Fig. 3. The receiver structure of the proposed scheme to improve the BER of the TR-UWB systems

로 평균을 취함으로써 참조 템플릿의 SNR을 향상시키는 일련의 과정이다. 제안 기법의 수신기에서 데이터 복조를 위해 사용되는  $j$ 번째 참조 템플릿  $v_j(t)$ 는 재귀적으로 다음과 같이 계산된다.

$$v_j(t) = \beta \tilde{r}(t - jT_f) + \gamma v_{j-1}(t) \quad (11)$$

여기서  $\beta$ 와  $\gamma$ 는 재귀적으로 평균을 취할 때 현재 수신된 참조 신호와 과거에 산출된 참조 템플릿의 비중을 결정하는 가중치 요소 (Weighting Factor)를 나타낸다. 또한 본 논문에서는 재귀적으로 평균을 취하는 프레임 구간과 순서를 정의하기 위해 인덱스  $k \in \{1, \dots, N\}$ 를 사용한다. 즉,  $k$ 과  $N$ 은 각각 재귀적으로 평균을 취하는 순서와 전체 프레임 수를 의미한다. 예를 들어 만일  $j=10$ 번째 프레임부터 재귀적으로 평균을 취하는 구간이 시작된다면 (즉, 여기서  $k=1$ 으로 설정) 평균을 취하는 구간은  $j=10+N$ 에서 끝나게 된다.

한편 일반적인 RTR-UWB 시스템<sup>[14]</sup>에서는  $\beta$ 와  $\gamma$ 를 모두 1/2로 고정하였는데, 이 경우에는 수신된 참조 신호들을 균형적으로 평균을 취하지 못하게 된다. 예를 들어,  $k$ 가 10일 경우에 과거에 산출된 참조 템플릿  $v_{j-1}(t)$ 에는 9개의 프레임에 해당하는 참조 신호들에 대해 평균을 취한 신호 값이 저장되어 있는 것이며 현재 수신된 참조 신호  $\tilde{r}_j(t)$ 는 단 하나의 참조 신호 값이 저장되어 있는 것이므로,  $\beta$ 와  $\gamma$ 를 모두 1/2로 고정되어 있다면 비균형적으로 평균을 취하게 되는 것이 된다. 이에 본 논문에서 제안된 기법의 수신기에서는 수신된 참조 신호들을 균형적으로 평균 취할 수 있도록  $\beta=1/k$ ,  $\gamma=(k-1)/k$ 로 각각 설정하게 된다. 따라서, 제안 기법의 수신기에서 데이터 복조를 위해 사용되는 식 (11)은 결국 다음과 같이 표현된다.

$$v_j(t) = \frac{1}{k} \tilde{r}(t - jT_f) + \frac{(k-1)}{k} v_{j-1}(t) \quad (12)$$

그리고, 제안 기법의 수신기는  $j$ 번째 참조 템플릿  $v_j(t)$ 을 이용하여 다음과 같이  $j$ 번째 프레임의 상관기 출력  $Z_{j,P-TR}$ 를 산출한다.

$$Z_{j,P-TR} = \int_{jT_j}^{jT_j+T_i} v_j(t) \tilde{r}(t - T_r) dt \quad (13)$$

마지막으로, 제안 기법의 수신기는  $j$ 번째 프레임의 상관기 출력  $Z_{j,P-TR}$ 을 기반으로 검출기를 통해 복조 데이터 비트  $\hat{b}_j$ 를 다음과 같이 결정하게 된다.

$$\hat{b}_j = \begin{cases} 0, & \text{if } Z_{j,P-TR} \leq 0 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

따라서 제안 기법은 수신된 참조 신호를 재귀적으로 평균 취하여 참조 템플릿의 SNR을 효과적으로 향상시켜 결국 TR-UWB 시스템에서 큰 BER 성능 이득을 얻을 수 있게 된다.

한편, 부호화를 사용하지 않는 제안된 기법은 참조 신호를 재귀적으로 평균 취하는 횟수  $k$ 가 참조 템플릿의 SNR을 충분히 향상시킬 수 있는 횟수 이상이 된다면 이후의 비트열에서는 오류가 거의 발생하지 않는다, 하지만 참조 신호를 재귀적으로 평균 취하는 횟수  $k$ 가 작은 경우 참조 템플릿의 SNR이 낮아 복조된 대부분의 비트열이 오류가 생기는, 즉 연립 오류가 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 현상을 분석하기 위해 다음과 같이 참조 템플릿의 MSE (Mean Squared Error)를 측정하였다.

$$MSE[k] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} (\tilde{r}_{k,no}(t) - v_{k,m}(t))^2 \quad (15)$$

여기서  $MSE[k]$ 는 참조 신호를 재귀적으로 평균 취하는 횟수가  $k$ 인 경우에 측정된 MSE 값을 나타낸다. 또한  $m$ 은 MSE 측정을 위한 실험 반복 순서를 나타내는 인덱스이며, 본 논문에서는  $M$ 을 10,000으로 고정하였다. 그리고,  $\tilde{r}_{k,no}(t)$ 는 아래 식과 같이 AWGN이 없고 다중경로 성분만 존재하는 환경에서 수신된 참조 신호를 의미한다.

$$\tilde{r}_{k,no}(t) = x_k \tilde{g}(t - kT_f) \quad (16)$$

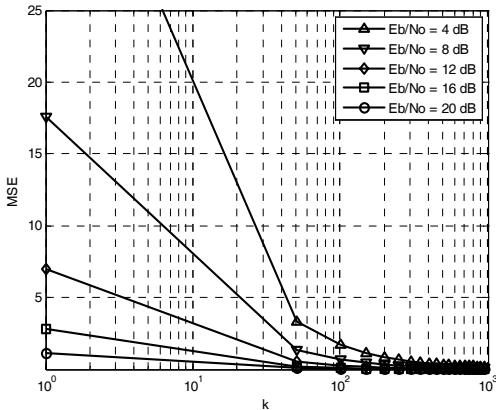


그림 4. IEEE 802.15.4a CM1 채널 모델에서 제안 기법의 수신기에서 사용되는 참조 템플릿의 MSE  
Fig. 4. MSE of the reference templates which are used in the receiver of the proposed scheme in IEEE 802.15.4a CM1 channel model

그림 4는 IEEE 802.15.4a CM1 채널 모델<sup>[12]</sup>에서 부호화를 사용하지 않는 제안 기법의 수신기를 사용하는 경우 다양한  $E_b/N_0$ 에서  $k$ 에 따른 참조 템플릿의 측정된 MSE 결과를 도시하고 있다. 이 그림으로부터 알 수 있듯이, 제안 기법은  $k$ 가 매우 큰 경우에는  $E_b/N_0$ 에 관계없이 매우 낮은 MSE 값을 보장하지만  $k$ 가 작은 경우에는  $E_b/N_0$ 에 따라 MSE 값의 변화폭이 상당히 큰 것을 확인할 수 있다. 즉 제안 기법의 수신기에서는 매우 높은  $E_b/N_0$ 를 제외하고 참조 템플릿이 신뢰성 있게 데이터 비트를 복조하기에 충분하지 않은 SNR을 갖는 특정  $k$  이하의 비트열은 오류가 발생할 확률이 매우 높다고 할 수 있다. 따라서, 낮은  $E_b/N_0$ 에서는 물론 이거니와 높은  $E_b/N_0$ 일지라도 참조 템플릿이 복조에 있어 충분히 신뢰성 있는 SNR을 보장하지 않는 특정  $k$  이하의 비트열은 연접 오류를 피할 수 없게 된다. 그러나 이러한 상황에서도 제안 기법은 인터

리버를 사용하여 특정  $k$  이하의 비트열에서 발생하는 연접 오류를 완화시켜주고, 비터비 복호기를 통해 간단히 해결할 수 있게 된다.

#### IV. 모의실험 결과

본 논문에서는 제안 기법의 성능을 일반적인 TR-UWB 시스템 및 RTR-UWB 시스템과 비교 분석하기 위해, IEEE 802.15.4a CM1, CM5, CM8 채널 모델<sup>[12]</sup>를 고려하였으며 펄스폭  $T_p \approx 2\tau_p$ 가 약 0.7626 nsec인 가우시안 모노사이클 펄스를 사용하여 모의실험을 수행하였다. 또한, 모든 실험에서 상관계수의 적분 구간  $T_I$ 는  $100 \times T_p$ 로 고정하였다. 본 논문에서 고려하는 IEEE 802.15.4a UWB 채널 모델은 Poisson 분포 기반의 수정된 Saleh-Valenzuela 모델<sup>[15]</sup>에 기초하고 있으며, 여기서 다중경로 성분은 Cluster와 Ray의 형태로 도착하게 되고 이들의 진폭은 Nakagami 분포에 의해 산출된다. 제안 기법과 일반적인 RTR-UWB 시스템에서 재귀적으로 평균을 취하는 프레임 수  $N$ 은 10, 100, 1,000, 10,000으로 설정하였고, 이 구간 동안에는 채널 임펄스 응답은 불변한다고 가정하였다. 또한, 제안 기법과 일반적인 TR 및 RTR-UWB 시스템, 그리고 이상적인 TR-UWB 시스템에서 모두 인터리버와 길쌈부호가 고용되었다. 이 때 사용된 인터리버는 표 1에서 정리하고 있으며, 길쌈부호기는 부호율이 1/2이며, 구속장 (Constraint Length)이 3이고, 생성다항식 (Generating Polynomial)이  $(5,8)_8$ 이다.

그림 5~7에서는 IEEE 802.15.4a CM1, CM5, CM8 채널 모델에서 일반적인 TR-UWB 시스템 ("TR"), 일반적인 RTR-UWB 시스템 ("RTR") 및 제안 기법 ("Prop")의  $E_b/N_0$ 에 따른 BER 성능을 각각 비교하여 도시하고 있다. 이들 그림에서 마크가 없는 점선은 인터리버와 채널부호화를 사용하지 않은 일반적인 TR-UWB 시스템 ("Uncoded TR")의 성능을 나타낸다. 이들 모의실험 결과로부터 알

표 1. 본 논문에서 고려된 인터리버의 프레임의 수에 따른 크기  
Table 1. Interleaver size according to the number of frame considered in this paper

| 프레임의 수 | 인터리버의 크기 |
|--------|----------|
| 10     | 4×5      |
| 100    | 10×20    |
| 1000   | 40×50    |
| 10,000 | 125×160  |

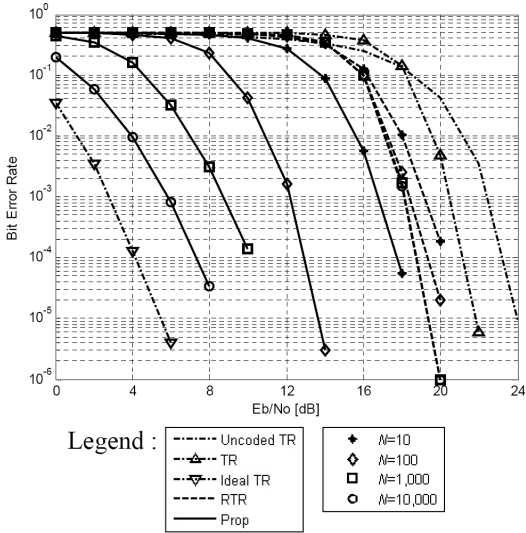


그림 5. IEEE 802.15.4a CM1에서 일반적인 TR-UWB, RTR-UWB 시스템 및 제안 기법의 BER 성능 비교  
Fig. 5. Comparison of BER performances among the conventional TR-UWB, RTR-UWB systems and the proposed scheme in the IEEE 802.15.4a CM1

수 있듯이, 일반적인 RTR-UWB 시스템은 일반적인 TR-UWB 시스템에 비해 BER 성능 향상이 1~3 dB 정도에 불과하다. 그러나 제안 기법은 일반적인 TR-UWB 시스템과 비교하면 매우 월등한 BER 성능을 보임을 알 수 있으며, 일반적인 RTR-UWB 시스템과 비교하면 재귀적으로 평균을 취하는 프레임의 수  $N$ 이 커질수록 BER 성능 이득은 더욱 커짐을 확인할 수 있다.

이러한 성능 차이에 대한 원인은 다음과 같이 설명될 수 있다. 일반적인 TR-UWB 시스템은 수신단 상관기에서 다중경로 성분과 AWGN으로부터 왜곡된 참조 신호를 아무런 신호처리 과정없이 그대로 사용하기 때문에, BER 성능이  $E_b/N_0$ 에 따라 매우 민감하게 반응하게 되고, 결국 매우 높은  $E_b/N_0$ 가 보장되어야 낮은 BER을 얻을 수 있게 된다. 반면, 일반적인 RTR-UWB 시스템은 수신단 상관기에서 사용될 참조 템플릿의 SNR을 향상시키기 위해 수신된 참조 신호들을 재귀적으로 평균을 취하여 사용하는 수신기 구조로 설계되어 있으나, 수신된 참조 신호들을 균형적으로 평균을 취하지 못하여 효과적으로 BER 성능을 향상시키지 못하게 된다. 이러한 문제점을 해결할 수 있도록 제안 기법은 수신된 참조 신호들을 균형적으로 평균을 취할 수 있는 수신기 구조로 재설계되어 있으며, 특정  $k$  이하의 비트열에서 발생하는 연접 오류는 고용된 인터리버

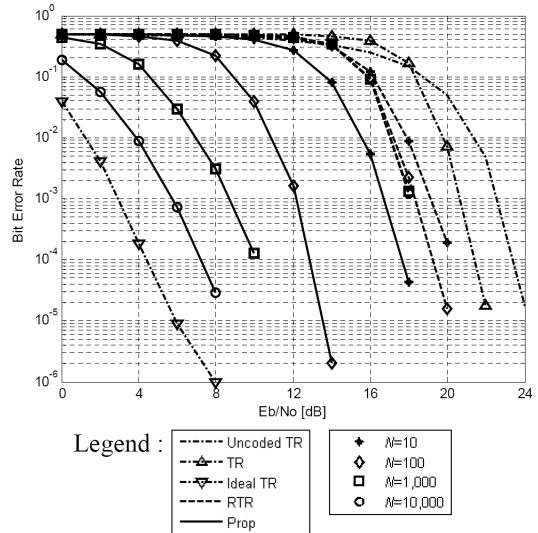


그림 6. IEEE 802.15.4a CM5에서 일반적인 TR-UWB, RTR-UWB 시스템 및 제안 기법의 BER 성능 비교  
Fig. 6. Comparison of BER performances among the conventional TR-UWB, RTR-UWB systems and the proposed scheme in the IEEE 802.15.4a CM5

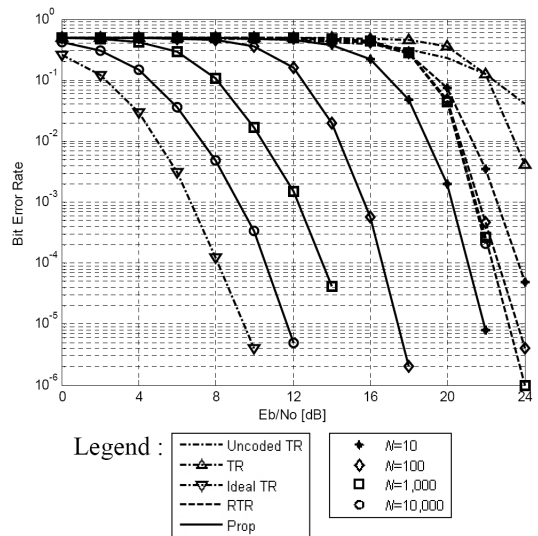


그림 7. IEEE 802.15.4a CM8에서 일반적인 TR-UWB, RTR-UWB 시스템 및 제안 기법의 BER 성능 비교  
Fig. 7. Comparison of BER performances among the conventional TR-UWB, RTR-UWB systems and the proposed scheme in the IEEE 802.15.4a CM8

와 길쌈부호기로부터 충분히 보상 가능하게 되어 크게 향상된 BER 성능을 보장하게 된다. 한편 제안 기법이 달성할 수 있는 성능의 한계를 보여주기 위해, 수신된 참조 신호가 다중경로 왜곡은 존재하지만 AWGN은 전혀 없는 경우, 즉 이상적인 TR-UWB 시스템 ("Ideal TR")에 대한 BER 성능을

그림 5~7에 포함시켰다. 그림으로부터 확인할 수 있듯이, 제안 기법은 재귀적으로 평균을 취하는 프레임의 수  $N$ 이 커질수록 이상적인 TR-UWB 시스템의 성능에 근접하고 있음을 알 수 있다.

## V. 결 론

일반적으로 TR-UWB 시스템은 송신기에서 참조 신호를 데이터 신호와 함께 전송하고 수신기에서 매우 간단한 지연 처리를 한 후 이들 수신된 신호들을 상관기에서 처리를 하여 데이터를 복조하게 되므로 복잡도는 매우 낮다. 하지만 이 시스템은 수신단의 상관기에서 이용되는 참조 템플릿의 SNR에 따라 BER 성능이 크게 영향을 받게 된다. 이에 본 논문에서는 임펄스 라디오 TR-UWB 시스템을 위해 효과적으로 BER 성능을 향상시킬 수 있는 송수신 방안을 제안하였다. 제안된 기법은 참조 템플릿의 SNR을 향상시켜 시스템의 BER 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있는 수신기 구조로 설계되었고, 연접 오류를 피하기 위해 인터리버와 길쌈부호를 고풀하였다. IEEE 802.15.4a 채널 모델에서의 모의실험을 통해, 제안 기법은 일반적인 TR-UWB 시스템뿐만 아니라 RTR-UWB 시스템과 비교하여 매우 높은 BER 성능 이득을 얻을 수 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

[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*, 제87호, pp. 131-148, 2003년 11월.

[5] K. Siwiak and D. McKeown, *Ultra-Wideband Radio Technology*, John Wiley & Sons, 2004.

[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] M. Oh, B. Jung, R. Harjani, and D. Park, "A new noncoherent UWB impulse radio receiver," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 151 - 153, Feb. 2005.

[8] L. Yang and G. B. Giannakis, "Ultra-wideband communications: An idea whose time has come," *IEEE Signal Proc. Mag.*, vol. 21, no. 11, pp. 26-54, Nov. 2004.

[9] P. Datta, X. Fan, and G. Fischer, "A transceiver front-end for ultrawide-band applications," *IEEE Trans. Circuits Syst. II-Exp. Briefs*, vol. 54, no. 4, pp. 362 - 366, Apr. 2007.

[10] I. D. O'Donnell and R. W. Brodersen, "An ultra-wide-band transceiver architecture for low power, low rate, wireless systems," *IEEE Trans. Vehicular Technol.*, vol. 54, no. 5, pp. 1623 - 1631, Sept. 2005.

[11] D. J. Choi and W. E. Stark, "Performance of ultra-wideband communications with suboptimal receivers in multipath channels," *IEEE Jour. Selected Areas in Commun.*, vol. 20, no. 9, pp. 1754-1766, Dec. 2002.

[12] IEEE 802.15 TG4a Channel Model Subcommittee, "IEEE 802.15.4a channel model - Final report," available at <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>

[13] J. R. Foerster, "The effects of multipath interference on the performance of UWB systems in an indoor wireless channel," *Proc. IEEE VTC 2001-Spring*, pp. 1176-1180, Rhodes, Greece, May 2001.

[14] M. G. Khan, J. Nordberg, and I. Claesson, "Detection of impulse radio ultra-wideband signals using recursive transmitted reference receivers," *Proc. IEEE ICUWB 2007*, pp. 376-380, Singapore, Sept. 2007.

[15] A. Saleh and R. A. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation," *IEEE J. Selected Areas Commun.*, vol. 5, no. 2, pp. 138 - 137, Feb. 1987.

김 재 운 (Jaewoon Kim)

정회원

한국통신학회논문지 Vol. 34, No. 1 참조

신 요 안 (Yoan Shin)

중신회원

한국통신학회논문지 Vol. 34, No. 1 참조