

다중경로 채널환경에서 수신 다이버시티를 이용하는 2PAM-TH-UWB 시스템의 오류 성능 분석

백선영 · 강윤정 · 김상준  
 동아대학교 전자공학과

Error Performance Analysis of 2PAM-TH-UWB Systems with Receive Diversity in Multipath channels

Sunyoung Baek · Yunjeong Kang · Sangchoon Kim  
 Department of Electronics Engineering, Dong-A University

**Abstract** - 본 논문에서는 다중경로가 무수히 많은 환경에서 다중안테나를 이용하여 고속의 데이터 전송률을 달성하기 위한 초광대역(UWB: Ultra-Wideband) 시스템의 성능 향상에 대해 연구한다. 다중 수신안테나가 제공하는 공간다이버시티와 RAKE 수신기가 제공하는 시간 다이버시티가 2PAM(Binary Pulse Amplitude Modulation) TH(Time Hopping) UWB 통신 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석한다. 시뮬레이션 결과를 통해 다중 수신안테나의 수가 증가함에 따라 TH-UWB 시스템의 BER(Bit Error Rate) 성능이 크게 향상됨을 보인다. 또한 SRAKE(Selective RAKE)에 의해 선택되는 다중경로 성분의 수가 증가할수록 시스템의 성능이 더욱 향상됨을 확인한다.

1. 서 론

최근에 초광대역(UWB: Ultra-Wideband) 무선통신 시스템은 가까운 전송거리에서 고속의 데이터 전송률을 제공하기 위한 통신방식으로 이용되고 있다[1]. [2]에서 송신기와 수신기 사이에 단 하나의 경로만 존재하는 이상적인 채널 환경에서 시간 호핑(TH: Time Hopping) 대역확산(SS: Spread Spectrum) IR(Impulse Radio) 시스템의 성능이 연구되었다. UWB 기술은 다중경로 신호성분이 많은 실내 환경에서 적용될 수 있는데, 이 환경에서는 RMS(Root Mean Square) 지연 시간이 늘어나기 때문에 ISI(Inter-Symbol Interference)가 증가하여 시스템의 성능에 제한을 받게 된다. 이러한 단점을 다중안테나 기술을 이용하면 다중경로 성분에 의한 ISI 현상을 억제함으로써 UWB 시스템의 수신기의 성능을 개선할 수 있을 뿐만 아니라, 데이터 전송률을 더욱 더 향상시킬 수 있다. 또한 다중경로 환경에서 RAKE 수신기는 여러 경로 성분들을 통해 수신기에 도착한 신호를 시간 다이버시티 형태로 신호들을 분리함으로써 다중안테나와 함께 사용되어 시스템의 성능 향상에 도움을 준다[3]. [4]-[6]에서는 다중경로 채널 환경에서 안테나 여러 개를 가진 UWB 시스템의 BER(Bit Error Rate) 성능이 분석되었다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.SG3a에서 제시된 UWB 무선 채널에 기반으로 하여 다중경로가 무수히 많은 환경에서 다중 수신안테나가 제공하는 공간 다이버시티와 RAKE 수신기가 제공하는 시간 다이버시티를 이용하는 2PAM(Binary Pulse Amplitude Modulation) TH UWB 통신 시스템의 성능 향상에 대해 연구한다. 공간·시간 다이버시티를 활용하기 위해 특히, 수신기에서 다중안테나는 균일 선형 어레이를 사용하고, 각각의 안테나 단에는 SRAKE(Selective RAKE)로 구성된다. 시뮬레이션 결과를 통해 수신안테나와 RAKE 펌퍼의 수에 따른 시스템의 BER 성능을 평가한다.

2. 본 론

2.1 2PAM-TH-UWB 신호 모델

한 개의 송신기로부터  $N$ 개의 수신 안테나로 전송되는 이진 수열은 비트 구간  $T_b$ 를 가진 "0"과 "1"의 정보 비트로 구성된다. 여기서 각 비트는  $R_b = N_s/T_b = 1/T_s$ 의 속도로 전송된다. 전송되는 이진 PAM-TH 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$s_{ix}(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} a_j \sqrt{E_{ixp}} w(t - jT_s - c_j T_c) \quad (1)$$

여기서  $a_j$ 는  $j$ 번째 펄스에 의해 전송되는 1이나 0의 이진 값이고,  $E_{ixp}$ 는 각각의 단일 펄스에 대해 전송되는 에너지이다.  $T_s$ 는 프레임 시간,  $c_j$ 는 TH 수열의  $j$ 번째 계수,  $T_c$ 는 칩 시간을 나타낸다.  $c_j T_c$ 는 TH 코드에 의한 시간 전이로써, 각 TH 코드는 구간  $[0, N_s - 1]$ 에서 균일 분포를 가지고 무작위로 선택된  $N_s$ 개의 정수 값들로 구성된다. 에너지 정규화된 펄스 파형  $w(t)$ 는 정상계수  $\alpha$ 값을 가지는 2차 도함수 가우시안 펄스로 정의되며 다음과 같이 표현할 수 있다[1].

$$w(t) = \left(1 - 4\pi \frac{t^2}{\alpha^2}\right) e^{-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}} \quad (2)$$

2.2 채널 모델

시뮬레이터의 채널부는 무선 다중경로 페이딩 환경을 모델링하기 위하여 IEEE 802.15.SG3a에서 제시된 UWB 무선 채널 모델을 기반으로 한다. IEEE UWB 채널 모델은 클러스터(clusters) 기반의 채널 모델을 약간 수정하여 사용하고 있다[7]. 클러스터 기반의 채널 모델에서 클러스터의 평균적

인 PDP(Power Delay Profile)는 지수감소함수의 형태를 따르고, 각각의 클러스터에 속하는 수신 펄스(rays)의 크기는 클러스터보다 빨리 감소하는 지수형태를 띤다. 이것은 각각 클러스터 감쇠인수  $\Gamma$ 와 레이 감쇠인수  $\gamma$ 에 의해 표현되는데, 일반적으로 서로 다른 클러스터에 속하는 레이들이 오버랩되지 않기 위해  $\Gamma > \gamma$ 를 가정한다. 클러스터 도착율과 레이 도착율은 각각  $\Lambda$ 와  $\lambda$ 로 나타내고, 여기서  $\lambda > \Lambda$ 이다. 각각의 클러스터와 클러스터에 속하는 각각의 레이에 대해서는 독립적인 페이딩을 가정한다. 그리고 각각의 안테나 성분에 대해서도 독립적인 페이딩을 가정한다.

$m$ 번째 클러스터의 도착시간은  $\tau_m$ ,  $m$ 번째 클러스터에 속하는  $k$ 번째 레이의 도착시간은  $\tau_{k,m}$ 로 표시한다. 총 다중경로 개수는  $L_{TOT} = M \times K$ 이다.  $n$ 번째 안테나로의 채널 임펄스 응답은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$h(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{K-1} X_n \alpha_{k,m,n} \delta(t - \tau_n - \tau_m - \tau_{k,m,n})$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{K-1} X_n \alpha_{k,m,n} \delta(t - \tau_{k,m,n})$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{L_{TOT}-1} X_n \alpha_{i,n} \delta(t - \tau_{i,n}) \quad (3)$$

여기서  $\tau_{k,m,n} = \tau_n + \tau_m + \tau_{k,m}$ 이고,  $\delta(t)$ 는 Dirac delta 함수이다.  $X_n$ 는  $n$ 번째 안테나에서 채널의 크기 이득을 나타내는 로그-정규 랜덤 변수이고,  $\alpha_{k,m,n}$ 는  $n$ 번째 안테나에 대해서  $m$ 번째 클러스터의  $k$ 번째 레이에 대한 채널 계수를 나타내고,  $\tau_{k,m,n}$ 은 시간지연을 표시한다.

채널 계수  $\alpha_{k,m,n}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_{k,m,n} = p_{k,m,n} \beta_{k,m,n} \quad (4)$$

$$20 \log_{10}(\beta_{k,m,n}) \propto \text{Normal}(\mu_{k,m,n}, \sigma_k^2 + \sigma_c^2) \quad (5)$$

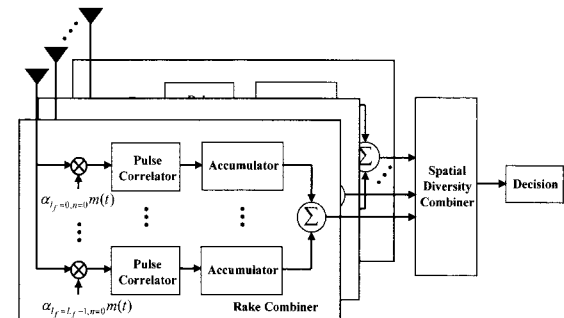
여기서  $p_{k,m,n}$ 은 동일한 확률의  $\pm 1$ 값을 가지는 이산 랜덤변수이고,  $\beta_{k,m,n}$ 은  $n$ 번째 안테나에서 클러스터  $m$ 에 속하는 다중경로 성분  $k$ 의 로그-정규 분포를 가지는 채널 계수를 나타낸다. 식 (5)에서  $\sigma_k^2$ 와  $\sigma_c^2$ 는 각각 클러스터와 레이에 대한 채널 계수의 변동을 나타내기 위한 분산 값이다. 평균값  $\mu_{k,m,n}$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\mu_{k,m,n} = \frac{10 \ln(\langle |\beta_{0,0,n}|^2 \rangle) - 10 \frac{\tau_{m,n}}{T} - 10 \frac{\tau_{k,m,n}}{\gamma}}{\ln(10)} - \frac{(\sigma_k^2 + \sigma_c^2) \ln(10)}{20} \quad (6)$$

여기서  $\langle |\beta_{0,0,n}| \rangle$ 은  $n$ 번째 안테나 성분에서 첫 번째 클러스터에 속하는 첫 번째 레이의 평균 에너지이다.

2.3 수신 신호 모델 및 수신기의 출력

그림 1은 시뮬레이터를 구성하는 수신기의 구조를 나타낸다. 우선 각각의 안테나 단에는 다중경로를 적절하게 활용할 수 있는 RAKE 결합기로 구성되고, RAKE 결합기의 각각의 출력은 공간적인 다양성 결합기를 통해 신호들을 적절히 결합함으로써 최종적으로 수신 신호에 대한 편정을 내리게 된다. 이 때 수신기에서는  $N$ 개의 다중 안테나를 가지는 균일 선형 어레이를 사용하고, 각각의 안테나 성분은  $L_f$ 개의 펌퍼로 구성되는 SRAKE로 되어 있다. 또한 신호들을 적절하게 결합하기 위한 최적화 기준으로 최대비 결합(MRC : maximal ratio combining) 방식을 사용한다.



〈그림 1〉 다중안테나 UWB 수신기 구조.

선택되는 경로들의 지연 시간과 채널 계수는 수신기에서 알고 있다고 가정한다. 또한 소프트 결정(soft decision)을 사용하는 수신기에서 구간  $T_s$ 의 비트 시간에 집중하여 분석이 이루어진다. 따라서 수신되는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l_j=0}^{L_j-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{E_{rxp,n}} \alpha_{l_j,n} a_j w(t-jT_s - c_j T_c - \tau_{l_j,n}) + \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l_j=0}^{L_j-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{E_{rxp,n}} \alpha_{l_j,n} a_j w(t-jT_s - c_j T_c - \tau_{l_j,n}) + \sum_{n=0}^{N-1} \eta_n(t) \quad (7)$$

여기서  $E_{rxp,n} = (X_n)^2 E_{txp}$ 이고,  $n_{si}(t)$ 는 선택되지 않은 경로들로부터의 간섭(SI: self-interference) 성분,  $\eta_n(t)$ 는 좌우 양측의 PSD  $N_0/2$ 을 가지는 부가적인 백색 가우시안 잡음(AWGN)을 나타낸다.

$N$ 개의 안테나의 각 경로로부터 얻어진 상관기 출력들을 동일하게 결합함으로써 다음의 테스트 통계변수(test statistics)를 얻을 수 있다.

$$Z = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l_j=0}^{L_j-1} \int_0^{T_s} r(t) \alpha_{l_j,n} m(t) dt \quad (8)$$

여기서  $m(t)$ 는 상관마스크(correlation mask)를 나타내고, 다음과 같은 수식으로 정의된다.

$$m(t) = \sum_{j=0}^{N-1} w(t-jT_s - c_j T_c - \tau_{l_j,n}) \quad (9)$$

수신기는 다음과 같이 테스트 통계변수를 기반으로 한 결정규칙(decision rule)에 따라 수신된 신호를 추정한다.

$$\begin{aligned} Z \geq 0 &\Rightarrow \hat{b} = 1 \\ Z < 0 &\Rightarrow \hat{b} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $\hat{b}$ 는 추정된 비트를 표시한다.

## 2.4 시뮬레이션 결과

MATLAB으로 구현한 시뮬레이터를 통해 2진 PAM-TH-UWB 시스템의 BER 성능을 평가하고자 한다. 본 논문에서는 Monte Carlo 방법을 사용함으로써 1000회의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 사용한 시스템 파라미터는 다음과 같이 주어진다: 샘플링 주파수  $f_c = 25$  GHz, 프레임 시간  $T_s = 60$  ns, 칩 시간  $T_c = 1$  ns, 펄스 폭  $T_p = 0.5$  ns, 펄스 형태 인자  $\alpha = 0.2$  ns. 송신기와 수신기는 LOS(line of sight)에 있다고 가정한다. 이와 같은 시나리오에서 채널 모델은 다음의 파라미터를 사용한다: 클러스터 도착률  $\Lambda = 0.0233$  /ns, 레이 도착률  $\lambda = 2.5$  /ns, 클러스터 감쇠 인자  $\Gamma = 7.1$  /ns, 레이 감쇠 인자  $\gamma = 4.3$  ns, 클러스터 페이딩과 레이 페이딩의 표준편차  $\sigma_c = \sigma_r = 3.3941$  dB.

그림 2는  $L_f = 5$  일 때, 수신안테나의 수를 서로 다르게 했을 경우 ( $N=1, 2, 3$ ) 주어졌던 시스템의 BER 성능을  $E_{rxb}/N_0$ 의 함수로 보여주고 있다. 안테나의 수가 증가할수록 BER 성능이 향상됨을 알 수 있다. 이것은 다중 수신안테나를 통한 공간적인 다이버시티의 영향에 의한 결과이다.

그림 3은 3개의 수신안테나가 사용될 경우, RAKE 펄서의 수가 서로 다를 때 ( $L_f = 1, 2, 3, 4$ ) 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 수신기에서 선택되는 경로의 수가 증가함에 따라 BER 성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 선택되는 경로의 수가 많을수록 수신기에 더 많은 에너지를 제공하는 효과를 가지기 때문이다.

RAKE 펄서와 수신안테나의 수 사이의 tradeoff는 그림 4에서 비교하고 있다. 어레이 사이즈가 증가하는 방향으로 선택되는 경로의 수는 같은 값으로 감소하도록 주어진다. 이 결과는 더 큰 어레이 사이즈를 갖는 시스템이 더 나은 BER 성능을 제공한다는 것을 보여준다. 따라서 공간 다이버시티로부터의 성능 향상이 경로 다이버시티로부터의 성능 향상보다 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 다중경로가 밀집된 환경에서 안테나 어레이를 가지는 이진 PAM-TH-UWB 시스템의 성능을 평가하였다. 시스템의 BER 성능을 향상시키기 위한 방법으로 RAKE 수신기가 제공하는 경로 다이버시티와 함께 공간적인 다이버시티를 활용하기 위해서 다중 수신안테나가 이용되었다. 수신안테나의 수가 증가될수록 그리고/또는 수신기에서 선택되는 경로의 수가 많을수록 UWB 시스템의 BER 성능이 향상될 수 있음을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다. 또한 경로 다이버시티로부터의 성능 향상보다 공간 다이버시티로부터의 성능 향상이 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

## [참 고 문 헌]

- [1] M. D. Benedetto and G. Giancola, Understanding Ultra Wide Band Radio Fundamentals, Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A., Prentice Hall, 2004
- [2] 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, April 2000

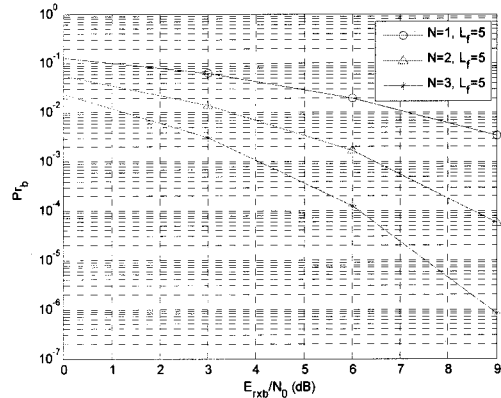
[3] T. Q. S. Quek and M. Z. Win, "Analysis of UWB transmitted reference communication systems in dense multipath channels," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 23, no. 9, pp. 1863-1874, Sep. 2005

[4] S. S. Tan, B. Kannan, and A. Nallanathan, "Performance of UWB Multiple-Access Impulse Radio Systems with Antenna Array in Dense Multipath Environments," IEEE Trans. Commun., vol. 54, no. 6, pp. 966-970, June 2006

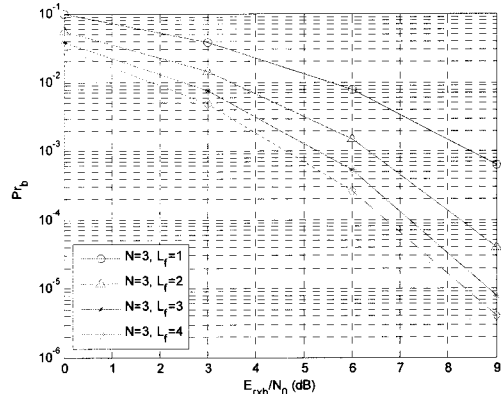
[5] S. S. Tan, B. Kannan, and A. Nallanathan, "Multiple Access Capacity of UWB M-ary Impulse Radio Systems With Antenna Array," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 5, no. 5, pp. 61-66, Jan. 2006

[6] S. S. Tan, A. Nallanathan, and B. Kannan, "Performance of DS-UWB Multiple Access Systems With Diversity Reception in Dense Multipath Environments," IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 55, no. 4, pp. 1269-1280, July 2006

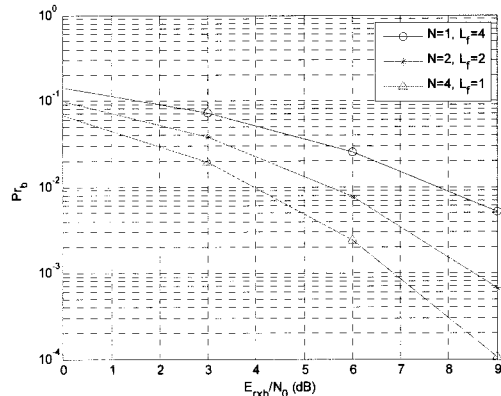
[7] A. F. Molisch, J. R. Foerster, and M. Pendergrass, "Channel models for ultrawideband personal area networks," IEEE Pers. Commun. Mag., vol. 10, no. 6, pp. 14-21, Dec. 2003



<그림 2> BER vs.  $E_{rxb}/N_0$  for  $L_f = 5$ .



<그림 3> BER vs.  $E_{rxb}/N_0$  for  $N=3$



<그림 4> Tradeoff between the number of the receive antennas and RAKE fingers.