

실내 다중경로 무선채널의 IR-UWB 시스템에서 레이크 수신기의 성능 분석

Performance Analysis of RAKE Receivers for IR-UWB Systems in Indoor Multipath Radio Channel

김은철*, 윤병완**, 양재수***, 김진영*
 (Eun Cheol Kim*, Byung Wan Yoon**, Jaesoo Yang***, and Jin Young Kim*)

Abstract : In this paper, we analyze the performance of RAKE receiver for impulse radio-ultra wide band (IR-UWB) systems in indoor multipath radio channel. Pulse position modulation-time hopping (PPM-TH) signal is considered. And we also consider three types of RAKE receivers, which are ideal RAKE, selective RAKE, and partial RAKE receivers. The indoor channel is modeled as the modified Saleh and Valenzuela (SV) model which has been proposed as a UWB channel model by the IEEE group, IEEE 802.15.SG3a.

Keywords: Impulse radio-ultra wide band system, pulse position modulation-time hopping signal, ideal RAKE, selective RAKE, partial RAKE, modified Saleh and Valenzuela (SV) model.

I. 서론

초광대역 (UWB : ultra wide band) 무선통신 기술은 반송파를 사용하지 않고 기저대역에서 10^9 초 이하의 매우 짧은 폭을 가지는 펄스 신호를 이용하여 정보를 전송하는 무선 기술이다 [1-3]. 이 기술은 통신을 위해 사용하는 펄스의 폭이 매우 좁기 때문에 전력 스펙트럼이 매우 낮다. 따라서 UWB 시스템은 기존의 통신 시스템과 상호 간섭을 일으키지 않으면서 주파수를 공유할 수 있으므로, 스펙트럼을 효율적으로 사용할 수 있는 시스템이다.

이와 같은 무선통신 시스템은 무선 채널을 통하여 신호를 전송하는데, 무선 채널에는 다중 경로가 존재하므로 송신된 신호의 에너지는 다중 경로로 분산된다. 그리고 수신기는 이 다중 경로상에 존재하는 분산된 에너지를 수신하여 수신된 신호를 결정한다. 송신기에서 송신된 신호가 다중 경로 채널을 통과하여 수신기에 수신되는 경우, 수신기는 하나의 경로로 수신되는 신호만 수신하여 판단을 하는 것 보다는 모든 경로의 신호를 모두 수신하여 판단하면 수신기 성능을 높일 수 있다. 하지만 이는 수신기의 복잡도를 향상시켜서, 실제로 구현하는데 어려움을 줄 수 있다. 비슷한 방법으로 다중 경로의 신호 중에서 원하는 신호만을 수신하면 수신기의 복잡도를 낮추면서 수신기의 성능을 높일 수 있는데, 이를 레이크 수신기라 한다 [4].

본 논문에서는 실내 다중경로 무선 채널에서 동작하는 IR-UWB (impulse radio-UWB) 시스템에서 레이크 수신기의 성능을 분석하였다. 이 때 실내 무선 채널 모델은 IEEE 802.15.3a에서 제안된 UWB 채널 모델을 이용하였다 [5]. 레이크 수신

기는 경로를 선택하는 방법에 따라 선택적 레이크 (SRAKE : selective RAKE) 수신기와 부분적 레이크 (PRAKE : partial RAKE) 수신기를 모두 고려하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제 II장에서는 UWB 시스템 모델을 송·수신 신호 및 채널 모델에 대해서 나타내었고, 레이크 수신기의 성능을 제 III장에서 분석하였다. 실험 결과를 제 IV장에서 나타내었고, 제 V장에서는 본 논문의 결론을 제시하였다.

II. 시스템 모델

1. 송신 신호 모델

본 논문에서는 펄스 위치 변조-시간 도약 (PPM-TH : pulse position modulation) UWB 시스템에 대해서 분석하였다. 펄스 위치 변조-시간 도약 UWB 시스템의 송신기는 그림 1과 같이 구성되어 있다.

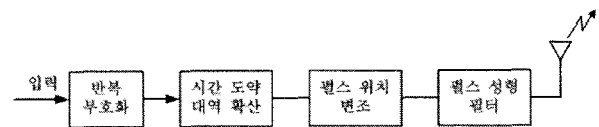


그림 1. 펄스 위치 변조-시간 도약 UWB 시스템 구조
 Fig. 1. PPM-TH UWB system structure.

그림 1과 같은 UWB 시스템에서 송신 신호 $S(t)$ 는 식 (1)과 같다 [6].

$$S(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} p\left(t - jT_f - c_jT_c - \delta_{d_{j,nsj}}\right) \quad (1)$$

여기서 $p(t)$ 는 송신된 임펄스 신호를 나타낸다. 그리고 T_f 는 프레임 시간을 나타내는데 임펄스 폭의 수백배에서 수천배에 달한다. 각 프레임은 T_c 시간 구간을 갖는 N_h 개의 시간 슬롯으로 구성되어 있다. 펄스 이동 형태 또는 시간 도약 시퀀스 c_j , $0 \leq c_j \leq N_h$, 는 가짜 불규

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 20xx. x. x., 채택확정 : 200x. x. xx.

김은철 : 광운대학교 전자공학과

(eun6210@kw.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2007-S-029-02, 가정용/기업용 WiBro 시스템 기술개발].

척 신호로 주기가 T_c 이다. 이것은 다중 접속 간섭에 의한 신호간의 충돌을 막기 위해서 추가적인 이동을 제공한다. $d_{\lfloor j/N_s \rfloor}$ 는 데이터 시퀀스인데, 심볼이 "1"인 경우 $d_{\lfloor j/N_s \rfloor} = 0$ 이고 심볼이 "0"인 경우 $d_{\lfloor j/N_s \rfloor} = 1$ 이다. δ 는 심볼이 "0"인 경우 PPM 변조에 사용되는 추가적인 시간 이동이다 [7]. $N_s > 1$ 인 경우 반복 부호가 적용되는데, 한 심볼을 전송하는데 N_s 개의 펄스가 사용 되는 것이다.

2. 채널 모델

본 논문에서는 IEEE802.15.SG3a 에서 초광대역 무선통신 시스템의 채널 모델로 선택한 변형된 SV (Saleh and Valenzuela) 모델을 실내 무선 채널 모델로 선택하였다.

이산 시간 다중경로 채널 충격 응답은 식 (2)와 같다 [5].

$$h(t) = X \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^{K(n)} \alpha_{nk} \delta(t - T_n - \tau_{nk}) \quad (2)$$

여기서 α_{nk} 는 n 번째 클러스터의 k 번째 다중 경로 계수이다. T_n 은 n 번째 클러스터의 도착 시간을 나타내며, τ_{nk} 는 n 번째 클러스터의 k 번째 다중 경로에 대한 지연을 나타낸다. N 은 관찰된 클러스터의 개수를 나타내고, $K(n)$ 은 클러스터에 수신된 다중경로의 개수를 나타내며, X 는 채널이 진폭 이득을 나타내는 로그노말 랜덤 변수이다.

3. 수신 신호 모델

다중 경로를 통해 수신된 신호 $r(t)$ 는 동일한 송신 신호 $S(t)$ 가 여러 경로에서 감쇄되고 지연되고 왜곡되어 더해진 형태이다. 따라서 수신된 신호는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = \sum_j a_j S(t - \tau_j) + n(t) \\ = X \sqrt{E_{TX}} \sum_j \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^{K(n)} \alpha_{nk} a_j p(t - jT_f - \phi_j - \tau_{nk}) + n(t) \quad (3)$$

여기서 $n(t)$ 는 수신기 입력단에서의 부가 백색 가우시안 잡음 (AWGN : additive white Gaussian noise)으로 평균은 0이고 표준편차는 σ 이다. E_{TX} 는 펄스당 송신된 에너지이고 a_j 는 j 번째 송신된 펄스의 진폭으로, 본 논문에서는 PPM 변조된 신호이므로 $a_j = 1$ 이다. 그리고 ϕ_j 는 j 번째 펄스의 시간상에서 흔들림을 나타낸다.

그림 2는 이산 시간 채널 모델에 대한 레이크 수신기 구조를 나타낸다. T_L 은 채널의 충격 응답 시간 구간을 나타내고, Z_{TOT} 는 레이크 수신기의 결정 변수를 나타낸다. $\Delta\tau$ 는 finger 지연시간으로 다중 경로의 신호들은 $\Delta\tau$ 만큼의 시간 간격을 두고 수신되는 것으로 가정한다.

상관기는 수신된 신호 $r(t)$ 와 상관 마스크 $m(t)$ 와의 곱을 적분한다. 상관기의 출력은 $\Delta\tau$ 주기로 샘플링된 후 지연 소자와 레이크 결합기를 통과한다. 이 때 각 경로의 신호에 가중치 w_r 를 곱하여 수신기 성능을 향상시킨다. 가중치를 결정하기 위해서는 채널 정보를 알아야 하므로, 파일럿 신호를 이용하여 가중치를 결정하였다.

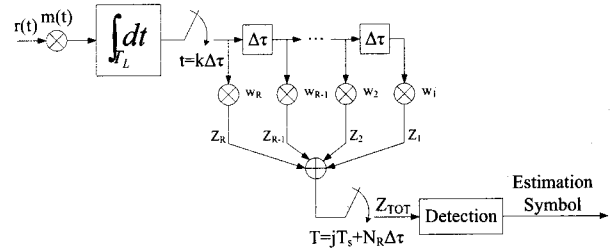


그림 2. 이산 시간 채널 모델에 대한 레이크 수신기.

Fig. 2. RAKE receiver for discrete time channel model.

III. 성능 분석

R 개의 finger를 가지고 있는 레이크 수신기 출력은 [8]에 나타난 바와 같다.

$$f(t) = \sum_{r=1}^R w_r r \{t - (r-1)\Delta\tau\} \quad (4)$$

$\Delta\tau$ 가 심볼 주기의 1/4로 고정되어 있다고 가정하면 과표본화된 레이크 출력 신호는 식 (5)와 같다.

$$f(k) = \sum_{r=1}^R w_r r \{k - (r-1)\} \quad (5)$$

여기서 $r'(k)$ 는 표본화 주기가 $T_p = T_s/4$ 로 과표본화된 수신 신호이다.

수신 신호에 대한 결정 $x(k)$ 는 $f(k)$ 의 부호로부터 결정된다.

수신 신호에 대한 비트 오류율은 식 (6)과 같다.

$$P_E = \int_{-\infty}^{\infty} p(z; w) dz \quad (6)$$

여기서

$$p(z; w) = \frac{1}{N_h \sqrt{2\pi\sigma} \sqrt{w_r^T w_r}} \sum_{k=1}^{N_h} \exp \left[-\frac{(z - z'(k))^2}{2\sigma^2 w_r^T w_r} \right] \quad (7)$$

이고 $z'(k) = x(k)f(k)$ 는 결정 변수이다.

따라서 레이스 수신기의 비트 오류율은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_E = \frac{1}{N_h \sqrt{2\pi\sigma} \sqrt{w_r^T w_r}} \sum_{k=1}^{N_h} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{(z - z'(k))^2}{2\sigma^2 w_r^T w_r} \right] dz \\ = \frac{1}{N_h} \sum_{k=1}^{N_h} Q(g(k)) \quad (8)$$

여기서 $g(k) = \frac{w_r}{\sigma \sqrt{w_r^T w_r}}$ 이고 $Q[\cdot]$ 는 Q-함수이다.

IV. 실험 결과

이번 장에서는 이진 PPM-TH UWB 시스템에서 레이크 수신기의 성능을 모의 실험을 통하여 보였다. 변형된 SV 채널 모델 파라미터에서 LOS (line of sight) 경우인 Case A가 실험에 사용되었다. 또한 비트당 펄스의 수는 1개로 하였으며, 심볼간 간섭은 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 또한 송·수신기 사이의 거리는 2m 이고, 송·수신기는 정확하게 동기가 일치하며, finger의 시간 지연은 시스템 성능이 최적화 되도록 설정되어 있다고 가정하였다.

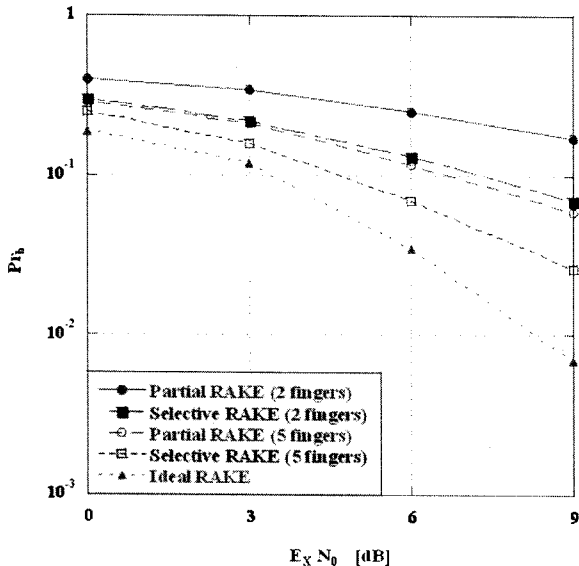


그림 3. 이상적인 레이크 수신기와 선택적 레이크 수신기, 부분적 레이크 수신기에서 펄스 에너지대 잡음 에너지 비율에 따른 비트 오류율 성능 비교.

Fig. 3. Bit error rate vs. E_x/N_0 performance comparison of the ideal RAKE, selective RAKE, and partial RAKE receivers.

그림 3은 펄스 에너지당 잡음 에너지에 따른 레이크 수신기의 비트 오류 성능을 나타낸다. 예상된 바와 같이 모든 다중 경로에 존재하는 에너지를 모두 수신하여 결정을 내리는 이상적인 수신기가 가장 좋은 성능을 나타내었다. 하지만 이상적인 레이크의 경우 모든 다중 경로의 신호를 수신해야 하기 때문에 수신기가 복잡해지는 단점을 가지고 있다.

비트 오류율이 10^{-1} 인 경우, finger의 개수가 5개와 2개인 경우 선택적 레이크의 성능은 이상적인 레이크에 비해서 각각 2.5 dB와 4dB 정도의 성능 차이가 있다. 이는 이상적인 수신기보다 finger의 개수를 줄이기 위해서, 모든 다중 경로의 에너지를 수신하여 결정을 내리지 않고 경로의 상태에 따라서 finger의 개수만큼의 다중경로로부터 수신된 에너지를 이용하여 결정을 내리기 때문이다. 하지만 선택적 레이크 수신기 역시 모든 채널 상태를 측정해야 하므로, finger의 개수가 줄어든 것 이외에는 이상적인 레이크 수신기와 복잡성이 거의 비슷하다.

비트 오류율이 10^{-1} 인 경우, finger의 개수가 5개와 2개인 경우 부분적 레이크의 성능은 이상적인 레이크에 비해서 각각 3 dB와 6 dB 정도의 손실이 있다. 부분적 레이크 수신기는 구조를 간단히 하기 위해서 finger를 선택하는 과정을 제거하고, 단순

히 먼저 도착하는 순서대로 finger 수만큼의 경로에서 신호 에너지를 수신하여 결정을 내린다. 따라서 세가지 레이크 수신기 중에서 성능이 가장 좋지 않은 것을 확인할 수 있다.

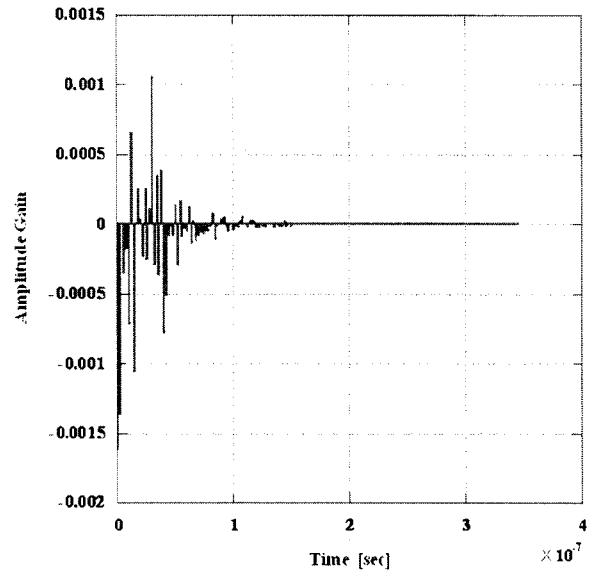


그림 4. 이산 시간 채널 충격 응답 (LOS 시나리오).
Fig. 4. Discrete time channel impulse response (LOS scenario).

그림 4는 본 논문의 실험에서의 설정한 UWB 시스템에 대한 이산 시간 채널 충격 응답을 나타낸다. 전체 96개의 0이 아닌 값이 존재하는데, 이상적인 레이크 수신기는 이에 대한 finger가 모두 있어야 하므로 시스템 복잡도가 증가하는 것을 알 수 있다.

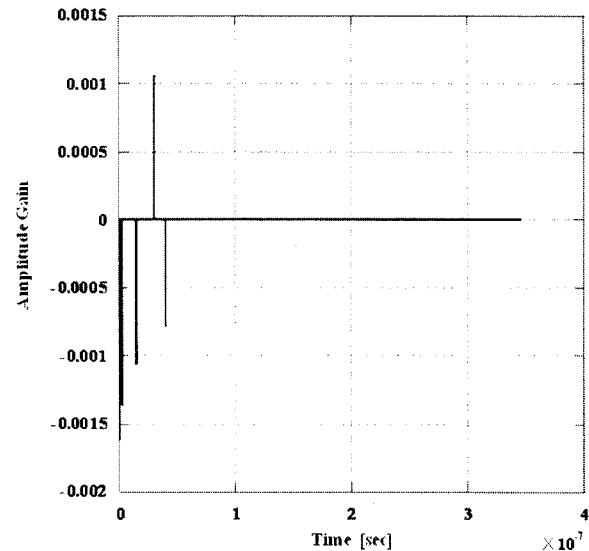


그림 5. 선택적 레이크의 추정된 채널 충격 응답.
Fig. 5. Estimated channel impulse response with selective RAKE.

그림 5와 그림 6은 각각 finger가 5개인 경우 선택적 레이크 수신기와 부분적 레이크 수신기에 추정된 채널의 충격 응답을 나타낸다.

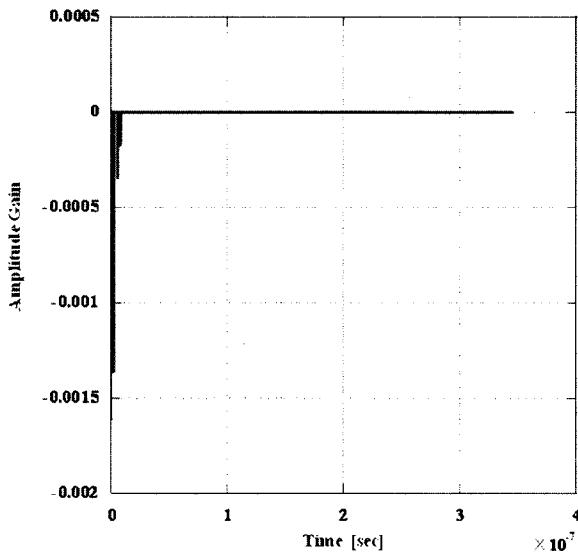


그림 6. 부분적 레이크의 추정된 채널 충격 응답.
Fig. 6. Estimated channel impulse response with partial RAKE.

V. 결론

본 논문은 실내 다중경로 무선채널에 존재하는 IR-UWB 시스템에서 레이크 수신기 성능을 분석하였다. 이 때 레이크 수신기는 경로 선택 방법에 따라서 이상적인 레이크와 선택적 레이크 및 부분적 레이크로 구분하였다. 초광대역 무선통신 시스템은 이진 펄스 위치 변조-시간 도약 방식의 시스템을 고려하였으며, 실내 무선 채널 모델은 IEEE802.15.SG3a의 초광대역 무선통신 시스템의 채널 모델로 설정하였다.

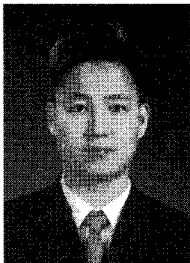
실험 결과 모든 다중 경로의 에너지를 이용하여 결정을 내리는 이상적인 레이크가 성능이 가장 좋았으며, 도착 순서대로 경로를 선택, 그 경로에 존재하는 에너지를 이용하는 부분적 레이크가 성능이 가장 좋지 않았다. 하지만 이상적인 레이크의 경우 수신기 복잡성 증가로 인해 구현이 어려웠으며, 부분적 레이크의 경우 성능이 감소하기는 하지만 수신기

복잡도가 감소하였다. 선택적 레이크는 모든 경로를 추정된 후 경로 선택을 해야 하기 때문에 finger 수의 감소 이외에는 이상적 레이크에 비해 수신기 복잡도가 그리 많이 감소하지는 않는다.

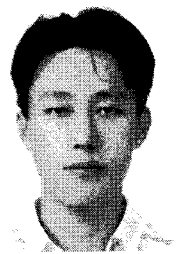
그런데 실내 무선 채널이 LOS의 경우라면, 많은 에너지가 앞에 도착하는 경로상에 존재한다. 따라서 실내 환경이 LOS가 보장된다면 수신기 복잡도가 낮은 부분적 레이크 수신기를 이용하여도 시스템 성능의 저하가 크지 않을 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] K. Siwiak and D. McKeown, *Ultra-wideband radio technology*, John Wiley and Sons Ltd., 2004.
- [2] Oppermann, M. Hamalainen, and J. Iinatti, *UWB theory and applications*, John Wiley and Sons Ltd., 2004.
- [3] 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. 679-689, Apr. 2000.
- [4] R. Price and P. E. Green, "A communication technique for multipath channels," in *Proc. of IRE*, vol. 46, no. 3, pp. 555-570, Mar. 1958.
- [5] IEEE 802.15.SG3a, "Channel modeling Sub-committee Report Final," *IEEE P802.15-02/490r1-SG3a*, Feb. 2003.
- [6] M. Z. Win and R.A. Scholtz, "Impulse radio: How it works," *IEEE Commun. Letter*, vol. 2, pp. 36-38, Feb. 1998.
- [7] W. H. Zhuang, X. M. Shen, and Q. Bi, "Ultra-wideband wireless communications," *Wireless Commun. and Mobile Computing*, vol. 6, no. 3, pp. 663-685, Nov. 2003.
- [8] A. G. Klein, D. R. Brown, D. L. Goeckel, and C. R. Johnson, "Rake reception for UWB communication systems with intersymbol interference," in *Proc. of 4th IEEE Workshop SPAWC*, pp. 244-248, June 2003.



김 은 철
2003년 광운대학교 전자공학부 (공학사). 2005년 광운대학교 전파공학과 (공학석사), 2005년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 이동통신, 디지털통신, 동기화.



윤 병 완
2004년 포항공과대학교 전자공학과 (석사). 2004년 ~ 현재 KT 인프라연구소 선임연구원. 관심분야는 WiBro Femtocell 시스템



양 재 수
1981년 한국항공대학교 통신공학과 (공학사). 1985년 건국대학교 전자공학과 (공학석사). 1993년 미 NJIT 전기 및 컴퓨터공학 (공학박사). 1991년 서울대 MBA 수료. 2006년 ~ 현재 광운대학교 교수. 2007년 ~ 현재 경기도 정보화보좌관. 관심분야는 디지털통신, RFID/USN, 차세대 이동통신.



김 진 영
1998년 서울대 전자공학과 (공학박사). 1998년 ~ 2000년 미국 Princeton University, Research Associate. 2000년 ~ 2001년 SK텔레콤 네트워크 연구원 책임연구원. 2001년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 교수. 관심분야는 디지털통신, 신호처리, 채널 부호화.