

실내 무선 페이딩 환경을 고려한 UWB 통신 시스템 성능분석

이양선* · 강희조** · 김윤호**

*동신대학교 전기전자공학부 · **목원대학교 IT공학부

Performance Analysis of UWB Communication System in Indoor Radio Fading Environment

Yang-Sun Lee* · Heau-Jo Kang** · Yoon-Ho Kim**

*Dept. of Electrical & Electronic Eng., Dongshin Univ. · **Dept. of IT Eng., Mokwon Univ.

E-mail : satcom2000@korea.com

ABSTRACT

본 논문에서는 채널의 진폭 특성만을 고려한 실내 무선 페이딩 환경에서 PPM 변조된 UWB 통신 시스템의 채널 성능을 분석하였다. 페이딩 채널은 기존에 발표되었던 UWB 전파 실험을 통한 데이터를 바탕으로 Nakagami-m분포 모델을 이용하여 페이딩 지수 m 에 따른 다양한 채널 환경을 고려하였다. 또한, 채널 성능을 평가하기 위해 신호대 잡음비, 페이딩 지수 m , 그리고 시스템 성능 파라미터인 펄스반복개수(N_s)를 이용하여 다양한 페이딩 환경에서의 UWB 시스템 성능을 분석하였다.

1. 서 론

최근들어 무선 통신 시스템의 급격한 증가로 인해 한정된 주파수 자원의 효과적인 분배가 큰 문제로 대두되고 있다. 이러한 문제에 대한 해결책으로서는 기존 시스템과 동일한 주파수 대역을 사용하면서 이들 시스템에 거의 간섭을 미치지 않는 새로운 방법을 이용하는 것을 들 수 있다.

이러한 접근 방법 가운데 하나로 잡음대역 아래로 무변조시켜 전송하는 초광대역 임펄스 통신 시스템(Ultra Wideband impulse radio system : UWB) 기술이 관심을 모으고 있다[1],[2].

2002년 2월 FCC에서 UWB 기술을 상업용으로 부분적 허용을 승인함으로써 UWB 기술을 이용하는 통신 시스템 개발이 활발하게 진행되고 있고 현재 IEEE 802.15.3a의 물리 계층 표준으로 제안되고 있으며 이를 위해 여러 UWB 방식들이 제시되고 있다[3].

그러나, UWB 기술은 아직 충분히 개발되지 않은 단계이고 통신 시스템의 효율적인 디자인을 위해 새로운 실험과 이론적인 활동들이 요구되어지고 있다. 특히, UWB 방식들에 대한 분석 및 성능 향상을 위해서는 UWB 채널 모델링 및 간섭에 관한 연구가 요구되어진다.

따라서, 본 논문에서는 기존에 발표되었던 UWB 전파 실험을 통한 데이터를 바탕으로 실내 무선 환경에서 채널 진폭 특성만을 고려한 UWB 전파 채널에 적합한 Nakagami-m분포 페이딩 모델을 이용하고 PPM 변조된 UWB 통신 시스템의 신호대 잡음비 및 시스템 성능 파라미터 N_s 에 따

른 채널 성능을 분석하였다.

II. binary PPM UWB 시스템

2.1 모노사이클 펄스 특성

본 논문에서 고려한 UWB 시스템은 수신 펄스 $p_{RX}(t)$ 에 대해, 가우시안 함수 $\exp(-2\pi[t/t_n]^2)$ 의 2차 미분된 형태로써 모델링 된다고 가정한다. 수신 펄스 $p_{RX}(t)$ 는 에너지 $E_p = \int_{-\infty}^{\infty} [p(t)]^2 dt$ 와 주기 T_p 를 갖는다. 이 경우 송신기에서는 아래 식 (1)로 표현되는 가우시안 모노사이클 펄스 $p_{TX}(t)$ 를 전송한다[4].

$$p_{TX}(t) = t \exp\left(-2\pi\left[\frac{t}{t_n}\right]^2\right) \quad (1)$$

여기서, t_n 은 펄스의 폭을 결정하는 파라미터로, 수 나노 초 이하의 매우 작은 값을 사용한다. 식 (1)과 같은 가우시안 모노사이클 펄스가 수신기에 입사되는 경우 수신단 입력 파형 $p_{RX}(t)$ 는 가우시안 함수의 2차 미분된 형태로써 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{RX}(t) = \left(1 - 4\pi\left[\frac{t}{t_n}\right]^2\right) \exp\left(-2\pi\left[\frac{t}{t_n}\right]^2\right) \quad (2)$$

여기서, 신호의 스펙트럼과 시간영역 구조는

t_n 에 의해 결정된다.

UWB 시스템에서 복조는 상관기를 이용하며, 수신 신호 $p_{RX}(t)$ 의 정규화된 신호 상관함수 $\gamma_p(\tau)$ 는 다음과 같이 정의된다[5].

$$\begin{aligned} \gamma_p(\tau) &= \frac{1}{E_p} \int_{-\infty}^{+\infty} p_{RX}(t) p_{RX}(t+\tau) dt \\ &= \left[1 - 4\pi \left[\frac{\tau}{t_n} \right]^2 + \frac{4\pi^2}{3} \left[\frac{\tau}{t_n} \right]^4 \right] \exp \left(-\pi \left[\frac{\tau}{t_n} \right]^2 \right) \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 실내 무선 채널 모델

UWB 채널 모델링은 채널 임펄스 응답의 진폭, 지연시간 및 위상에 대한 통계적 특성을 결정하는 과정으로 얻어진 결과가 실제 측정된 데이터의 특성을 잘 표현할 수 있어야 한다.

Hashemi의 결과에서는 방대한 데이터에 근거해서 진폭 및 도달 시간에 대한 통계적 특성을 얻었다[6]. 진폭에 대한 채널 모델 특성은 기존에 제시한 몇몇 연구결과와 유사하게 실측 데이터가 Log-normal 분포와 잘 일치하는 결과를 얻었다[7]. Cassioli는 지연 시간에 대한 특성은 생략하고 진폭 특성에 대한 채널 모델만을 제시하였다[8]. 여기서 Cassioli는 small-scale 페이딩 현상을 Nakagami 분포로 표현하였다. 이들이 사용한 측정 방법은 시간축상에서 실제로 펄스를 보낸 후 샘플링해서 측정한 것이므로 실제 UWB 시스템에 근거했다는 장점이 있다. 본 논문에서는 실내 환경으로써 송수신간의 상대적인 작은 이동에 의해 발생하는 진폭 변동으로 나타내는 small-scale 페이딩 환경을 고려하고 Cassioli가 표현한 Nakagami 분포의 채널 모델을 이용하여 채널 성능을 분석하였다.

통신로상에서 발생하는 여러 가지 심도(depth)의 페이딩을 나타낼 수 있는 Nakagami-m분포 페이딩 모델에 의하면 페이딩을 받은 수신신호 진폭 R의 확률밀도함수 p(R)은 다음과 같다[9].

$$p(R) = \frac{2m^m R^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega_S^m} \exp\left(-\frac{mR^2}{\Omega_S}\right) \quad (4)$$

여기서, $\Gamma(\cdot)$: Gamma 함수
 $\Omega_S/2$: 수신신호의 평균 전력
 $\Omega_S = \overline{R^2}$

III. UWB 시스템의 성능해석

3.1 AWGN 환경에서 binary PPM UWB 시스템의 성능

UWB 시스템의 복조는 기준 신호 $v(t)$ 를 사용하는 상관기를 이용한다. 기준 신호는 다음과 같다[5].

$$v(t) = p_{RX}(t) - p_{RX}(t-\delta) \quad (5)$$

본 논문에서는 수신단에서 완벽한 시간동기를 이룬다는 가정하에 다원접속 간섭이 배제되는 경우를 가정하였다.

따라서, 한 명의 사용자만이 접속한 것과 같고, 단일 수신된 신호로 정리하면,

$$\begin{aligned} r(t) &= r_{RX}(t-\tau) + n(t) \\ &= \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sqrt{E_s} p_{RX}(t-jT_f - c_j T_c - \delta a_{(j/N_s)} - \tau) + n(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $n(t)$ 는 양측 전력 밀도 $N_0/2$ 를 갖는 AWGN 잡음, τ 는 전파지연이다.

완벽한 시간동기의 가정하에서 상관기의 해석은 다음과 같다.

$$\beta_i = \sum_{j=N_s}^{(i+1)N_s} \int_{t+jT_f}^{t+(j+1)T_f} r(t)v(t-jT_f - c_j T_c - \tau) dt \quad (7)$$

최종적으로 결정 회로에서 판단된 데이터 \hat{a}_i 는 다음과 같다.

$$\hat{a}_i = \begin{cases} 0 & \text{if } \beta_i \geq 0 \\ 1 & \text{if } \beta_i < 0 \end{cases} \quad (8)$$

따라서, 위와 같은 조건에서 AWGN 환경에서 단일 사용자 UWB 시스템의 비트 오류 P_b 는 다음과 같다[4].

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{N_s E_p}{2N_0}} \sqrt{1 - \gamma(\delta)} \right) \quad (9)$$

여기서, $N_s E_p = E_b$, 단일 정보 비트를 전송하는 데 필요한 에너지이다.

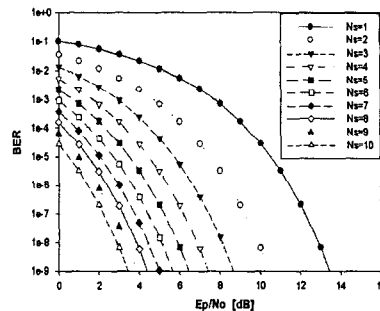


그림 1. AWGN환경에서 binary PPM UWB 시스템 오율 성능

그림 1은 binary PPM UWB 시스템의 AWGN 환경에서 시스템 특성 파라미터인 펄스반복개수 (N_s)의 변화에 따른 오율성능을 나타내고 있다. 무선 데이터 서비스 (10^{-6} BER)를 기준으로 하였을 때 $N_s=1$ 인 경우 11.45dB에서 기준 서비스를 만족하고 N_s 가 2, 3으로 증가함에 따라 3dB, 2dB의 수신이득을 얻을 수 있고 $N_s=3$ 이상에서는 1dB

이하의 수신이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.2 m-분포 페이딩 환경에서 binary PPM UWB 시스템 성능 분석

페이딩에 의한 binary PPM UWB 시스템의 오율식은 식(4)와 식(9)에 의해 페이딩 심도지수 m 값으로 나타낼 수 있다.

$$P_{e-F} = \int_0^{\infty} P_b \cdot p(x) dx \quad (14)$$

문헌 [8]의 내용에 의하면, Nakagami 분포의 파라미터 m값에 따라서 여러 가지 형태의 채널 환경을 나타낼 수가 있으며 UWB 채널의 small-scale 페이딩 특성을 잘 표현하였다. 또한, 여러 다른 위치에서 측정한 지연시간에 따른 m 값의 분포 특성이 약 1~5 사이의 통계적 m분포 특성을 보임을 알 수 있었다[8].

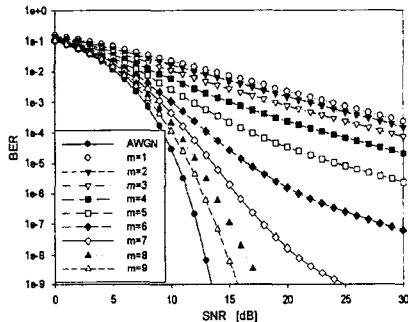


그림 2. 페이딩 환경에서 m값에 따른 binary PPM UWB 시스템 성능(Ns=1)

그림 2는 Ns=1인 경우로 m값에 따른 다양한 채널 환경에서의 binary PPM UWB 시스템 성능을 나타내고 있다.

AWGN 환경에서는 11.45dB에서 기준 서비스를 만족하는데 비해, 페이딩 환경에서는 m값이 8 이상인 채널 환경에서 AWGN 성능과 근접한 수신성능을 보임을 알 수 있다. 그러나, 5 이하의 m분포 채널 특성에서는 기준 서비스를 만족하지 못하는 심각한 성능 열화를 보임을 알 수 있다. 따라서, UWB 채널 환경에서는 페이딩 현상으로 인한 성능열화가 심각함을 알 수 있다.

그림 3은 Ns=1인 경우 AWGN 환경에서 기준 서비스를 만족하는 수신 전력 11.45dB를 기준으로 m값의 변화와 Ns의 변화에 따른 시스템 성능을 나타내고 있다.

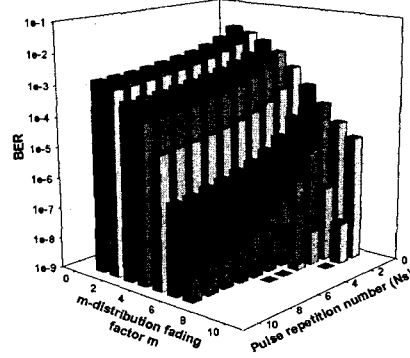
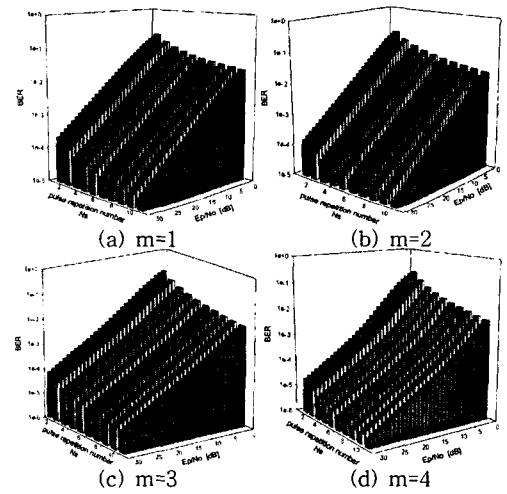


그림 3. 페이딩 환경에서 페이딩 지수 m과 Ns에 따른 binary PPM UWB 시스템 성능 (Ep/No = 11.45dB)

페이딩 지수 m=6 이상인 경우 Ns를 증가시킴으로써 성능 이득을 얻을 수 있으나 m=6 이하의 페이딩 채널 환경에서는 Ns의 증가로 인한 성능 이득을 얻을 수 없었다. 시스템 설계 시 Ns의 증가는 시스템의 전송효율을 저하시키는 원인이 된다. 결국, 페이딩을 고려한 UWB 채널환경에서는 Ns를 이용한 성능 이득을 얻을 수 없기 때문에 채널성능 열화를 극복하기 위한 채널 코딩기법 또는 그 외의 성능개선기법이 필수적으로 적용되어야 함을 알 수 있다.

그림 4에 페이딩 지수 m=1~9사이의 페이딩 환경에서 시스템 성능 파라미터 Ns와의 관계 및 10^-6 BER의 기준을 만족하기 위한 신호전력과의 관계를 3D그래프로 나타내었고 이를 정리하여 표 1에 나타내었다.



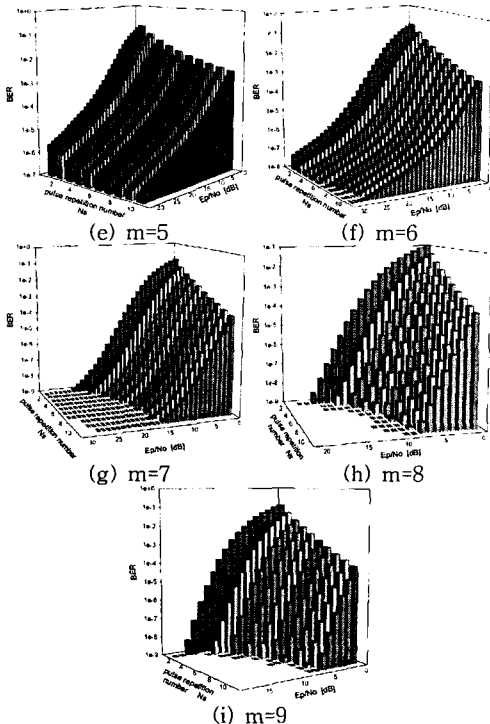


그림 4. 페이딩 지수 m 과 N_s 및 신호전력과의 관계(기준서비스 오율 10^{-6} BER)

표 1. 페이딩 지수 m 과 N_s 및 신호전력과의 관계(기준서비스 오율 10^{-6} BER)

10^{-6} BER 기준	$N_s=1$	$N_s=2$	$N_s=3$	$N_s=4$	$N_s=5$	$N_s=6$	$N_s=7$	$N_s=8$	$N_s=9$	$N_s=10$
AWGN	11.45dB	8.45 dB	6.6 dB	5.5 dB	4.5 dB	3.6 dB	3 dB	2.4 dB	2 dB	1.5 dB
$m=1$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$m=2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$m=3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$m=4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$m=5$	-	-	29 dB	28 dB	27 dB	26 dB	25 dB	24.5 dB	24 dB	23.5 dB
$m=6$	21 dB	18 dB	16 dB	15 dB	14 dB	13 dB	12.5 dB	12 dB	11.3 dB	11 dB
$m=7$	15.5 dB	12.5 dB	10.7 dB	9.5 dB	8.5 dB	7.7 dB	7.2 dB	6.5 dB	6 dB	5.5 dB
$m=8$	13.7 dB	10.7 dB	9 dB	7.7 dB	6.7 dB	5.8 dB	5.2 dB	4.5 dB	4 dB	3.7 dB
$m=9$	12.8 dB	9.7 dB	8 dB	6.7 dB	5.7 dB	5 dB	4.2 dB	3.7 dB	3.2 dB	2.7 dB

표 1에서 정리한 관계로부터 페이딩 채널을 고려한 경우 페이딩 지수 $m=1\sim5$ 사이에서 기준 BER을 만족하지 못하는 심각한 성능 열화를 보이는 것을 알 수 있고, 이는 다중경로로 인한 페이딩 현상에 따라 UWB 시스템 성능에 미치는 영향이 클 수 있다. 페이딩 지수 $m=6$ 이상인 경우는, AWGN 환경에서 요구되는 수신전력보다 m 값의 증가에 따라 약 10.5dB, 4dB, 2.2dB, 1.3dB가량이 N_s 의 증가와는 무관하게 추가적으로 요구되는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 실내 small-scale 페이딩 환경으

로써 기존에 발표되었던 UWB 전파 실험을 통한 데이터를 바탕으로 Nakagami- m 분포 모델을 이용하여 페이딩 지수 m 에 따른 다양한 페이딩 채널 환경에서의 PPM 변조된 UWB 통신 시스템의 채널 성능을 분석하였다. 신호대 잡음 비와 시스템 파라미터 N_s 를 이용하여 페이딩 지수 m 에 따른 채널 성능을 분석한 결과, $m=1\sim5$ 사이의 페이딩 환경에서 심각한 성능 열화를 보임을 알 수 있었고, $m=6$ 이상인 경우에는 AWGN 환경에서 요구되는 수신전력보다 m 값의 증가에 따라 약 10.5dB, 4dB, 2.2dB, 1.3dB 가량이 N_s 의 증가와는 무관하게 추가적으로 요구되는 것을 알 수 있었다. 결과적으로 UWB 채널 환경에 근접한($m=1\sim5$) m 분포 채널특성에서는 채널의 진폭 특성으로 인한 성능 열화가 심각하기 때문에 채널 상태를 고려한 고속 전송 시스템 설계 시에는 낮은 N_s 의 설계 및 채널 코딩기법 또는 그 외의 성능 개선 기법이 필수적으로 적용되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] P. Withington, "UWB Regulation & Applications", UWB Workshop, www.timedomain.com, 11, 2001.
- [2] Aetherwire & Location Inc., www.aetherwire.com.
- [3] FCC Notice of Proposed Rule Making, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission System", ET-Docket, pp. 98-153.
- [4] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse Radio : How It Works," IEEE Comm. Lett., vol. 2, pp. 36-38, Feb. 1998.
- [5] F. Ramirez-Mireles, "On performance of ultra wideband signals in Gaussian noise and dense multipath," accepted for publication in IEEE Trans. on Veh. Technol.1999.
- [6] H. Hashemi, "Impulse response modeling of indoor radio propagation channels," IEEE J. select. Areas Commun., vol. 11, no. 7, pp. 967-978, 1993.
- [7] R. Ganesh and K. Pahlavan, "Statistical modeling and computer simulation of the indoor radio channel," IEE Proc. Part I: Commun., Speech and Vision, vol. 138, no. 3, pp. 153-161, June. 1991.
- [8] D. Cassioli, M. Z. Win and A. F. Molisch, "A statistical model for the UWB indoor channel," IEEE J. Select Areas Commun, Vol. 20, pp. 1247-1257, Aug. 2002.
- [9] Nakagami. M., "The m-distribution, a general formular of intensity distribution of rapid fading," In Statistical Methods of Radio Wave Propagation, W.C. Hoffman Ed., New York: Pergamon Press, pp. 3-36, 1960.