

---

# 다중사용자 환경에서 공간적인 다이버시티를 이용하는 초광대역 통신시스템의 성능 비교분석

백선영\* · 안진영\* · 이성신\*\* · 김상준\*\*\*

Performance of UWB Systems using Spatial Diversity in Multi-User Environments

Sunyoung Baek\* · Jinyoung An\* · Sungsin Lee\*\* · Sangchoon Kim\*\*\*

## 요 약

본 논문에서는 다중 수신안테나가 제공하는 공간적인 다이버시티를 이용하여 고속의 데이터 전송률을 달성하기 위한 초광대역 통신시스템의 성능 향상에 대해 연구한다. 다중사용자 간섭 신호들이 존재하는 환경에서 2PPM (Binary Pulse Position Modulation) THMA (Time Hopping Multiple Access) UWB 시스템의 성능을 이론적으로 분석하기 위해서 다중 수신안테나를 통해서 수신되는 공간적인 신호들을 결합한 후의 수신 SINR 표현식을 유도하고 BER 성능을 수치적인 시뮬레이션에 의해 평가된다. 또한 2PPM에 의한 시스템의 성능 결과들을 2PAM (Binary Pulse Amplitude Modulation) THMA UWB 시스템의 이론적인 성능 결과와도 비교한다. 공간적인 다이버시티가 2PPM과 2PAM THMA UWB 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석한다. 다중 수신안테나의 수가 증가함에 따라 BER 성능이 향상됨을 보인다. 또한 다중사용자 간섭 신호들이 존재할 때 2PAM THMA UWB 시스템의 성능이 2PPM THMA UWB 시스템의 성능보다 상당히 우수하다는 것을 확인한다.

## ABSTRACT

In this paper, the performance improvement of ultra-wideband (UWB) communications system to achieve high-data-rate using spatial diversity provided by multiple receive antennas is investigated. We derive the expression for the received SINR after spatially combining through multiple receive antennas and evaluate the bit error rate (BER) performance by numerical simulation. We also compare the performance results in the case of 2PPM systems with the theoretical performance results in the case of 2PAM THMA UWB systems. The impacts of spatial diversity on the performance of 2PPM and 2PAM THMA UWB systems are analyzed. It is shown that the BER performance is improved as the number of receive antennas increases. Also, it is observed that in the presence of multiple user interference signals, the performance of 2PAM THMA UWB systems is considerably superior to that of 2PPM THMA UWB systems.

## 키워드

binary pulse position modulation, pulse amplitude modulation, time hopping multiple access, ultra wide band

---

\* 동아대학교 전자공학과 석사과정

접수일자 : 2007. 10. 26

\*\* 동아대학교 전자공학과 BK21 계약교수

\*\*\* 동아대학교 전자공학과 조교수

I. 서 론

임펄스 라디오 (IR : Impulse radio) 초광대역 (UWB : ultra-wideband) 통신 기술은 고속 데이터 전송률과 짧은 전송거리의 무선 멀티미디어 서비스를 위해서 적합한 후보 기술로 고려되어 왔다 [3]. [2]에서 시간 호핑 (TH : time-hopping) 대역확산 (SS : spread-spectrum) IR 시스템의 성능이 이상적인 다중접속 채널 환경에서 연구되었다. 실제적인 시나리오에서 IR 다중접속 시스템의 성능은 다중사용자 간섭 (MUI : multi-user interference) 신호에 의해 영향을 받는다.

다중 수신안테나는 이동통신 시스템의 상향 링크에서 간섭 신호를 제거하기 위한 빔형성을 위한 안테나 어레이나 또는 공간적인 다양성을 활용하기 위한 안테나 다양성의 형태로 사용될 수 있다. 다중 사용자 환경에서 IR 시스템의 성능을 향상시키기 위해서 다중 수신안테나를 사용할 수 있다. [4],[5], 그리고 [6]에서 안테나 어레이를 가진 UWB IR 시스템의 다중접속 능력은 TH 펄스 위치 변조 (PPM : pulse position modulation) 신호에 대해서 연구가 되었다. [7]에서 안테나 어레이를 사용하는 경우에 DS (direct sequence) UWB MA 시스템의 성능이 분석되었다.

본 논문에서는 TH MA 전략하에서 다중 수신안테나를 사용하는 이진 PPM (2PPM) UWB 시스템에 대해 연구한다. 공간적인 다양성이 2PPM-TH-UWB 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석한다. 공간적인 신호들을 결합한 후에 수신 SINR에 대한 표현식을 유도하고 BER(bit error rate) 성능을 평가한다. 수신안테나의 수가 증가하면 BER 성능이 개선됨을 확인한다. 또한 2PPM-TH-UWB 시스템의 BER 성능과 2PAM-TH-MA UWB 시스템의 성능과 비교 분석한다.

II. 이진 PPM-TH-UWB 시스템 모델

모든 송신기로부터 전송되는 이진 수열은 비트 구간  $T_b$ 를 가진 정보 비트 "0"과 "1"에 의해 발생된다. 이때 이진 수열은  $R_b = N_s/T_b$  bits/s의 속도로 전송이 된다. 사용자  $u$ 로부터 전송되는 이진 PPM-TH MA 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$v_{ix}^{(u)}(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sqrt{E_{txp}^{(u)}} p(t - jT_s - c_j^{(u)}T_c - a_j^{(u)}\varepsilon) \quad (1)$$

여기서  $E_{txp}^{(u)}$ 는 각각의 펄스에 대해 전송되는 에너지를 나타내고,  $T_s$ 는 펄스가 반복되는 평균시간(초)으로 모든 송신기가 동일한 값을 사용한다.  $c_j^{(u)}$ 는 TH 수열의  $j$  번째 계수이고,  $T_c$ 는 칩 시간 구간을 표시한다.  $c_j^{(u)}T_c$ 는 TH 코드에 의해 생기는 시간 전이이다. 각각의 TH 코드는 주기  $N_p$ 를 가지는 의사 무작위 추출 수열로서 구간  $[0, N_h - 1]$ 에서 균일 분포를 가지고 무작위로 선택된  $N_p$  정수 값들로 구성되어 있다. 다시 표현하면 이진 코드수열은  $[c_1^{(u)}, c_2^{(u)}, \dots, c_{N_p}^{(u)}]$ 에 의해 표현될 수 있고 여기서 각각의 원소는  $n_p = 1, 2, \dots, N_p$ 에 대해  $c_{n_p}^{(u)} \in \{\pm 1\}$ 이다.  $a_j^{(u)}\varepsilon$  항은 변조에 의해 생겨나는 시간 전이 성분이다.  $\varepsilon$ 은 PPM 전이이고  $a_j^{(u)}$ 는 사용자  $u$ 의 펄스  $j$ 에 의해 전송되는 1이나 0의 이진 값이다.

나노초 단위의 폭  $T_p$ 를 가지는 아주 짧은 펄스 (monocycle)  $p(t)$ 는 에너지가 정규화된 펄스 파형으로 형상을 결정하는 요소인  $\alpha$  값을 가진 2차 도함수 가우시안 펄스로 다음과 같이 표현할 수 있다 [1,3].

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

여기서 라디오 전파는 단 하나의 경로 채널을 경유하여 각각의 안테나로 전송된다고 가정한다. 또한 수신기에서  $N$ 개의 다중 안테나를 가지는 균일 선형 어레이를 사용한다. 각각의 안테나는 독립적인 페이딩을 경험한다고 가정한다. 사용자  $u$ 와 기준 수신기 사이의 전송 채널을 나타내는 채널 임펄스 응답은 단 하나의 전송안테나로부터  $n$ 번째 수신 안테나로 채널은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_n^{(u)}(t) = \beta_n^{(u)} \delta(t - \tau_n^{(u)}) \quad (3)$$

여기서  $\beta_n^{(u)}$ 와  $\tau_n^{(u)} \in [0, T_s)$ 는 각각 사용자  $u$ 의 채널 이득과 시간 지연 성분을 나타낸다.

### III. 수신 신호 모델 및 수신기의 출력

$n$ 번째 안테나에 수신되는 신호는  $N_u$ 개의 송신기로 부터 전송되는 모든 신호들의 합으로 형성되는데 다음과 같다.

$$r_n(t) = \sum_{u=1}^{N_u} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sqrt{E_{rxp,n}^{(u)}} p(t-jT_s - c_j^{(u)}T_c - a_j^{(u)}\varepsilon - \tau_n^{(u)}) + w_n(t) \quad (4)$$

여기서  $E_{rxp,n}^{(u)} = (\beta_n^{(u)})^2 E_{txp}^{(u)}$ 이고 열잡음 성분  $w_n(t)$ 는 좌우 양측의 PSD  $N_0/2$ 을 가지는 부가적인 화이트 가우시안이다.

수신기는 사용자 1에 해당하는 첫 번째 송신기에 동기화가 완전히 이루어졌다고 가정한다.  $n$ 번째 안테나에 수신되는 신호는 다음과 같이 세 성분으로 구성되었다고 볼 수 있다.

$$r_n(t) = r_{U,n}(t) + r_{MUI,n}(t) + w_n(t) \quad (5)$$

여기서  $r_{U,n}(t)$ 와  $r_{MUI,n}(t)$ 는 각각  $n$ 번째 안테나 수신기에서의 희망하는 신호와 MUI 성분을 나타낸다. 소프트 결정(soft decision)을 사용하는 상관 수신기에서 [3]에서 처럼 단 한 개의 안테나를 사용하는 경우와 비슷한 접근 방법을 사용하여 구간  $T_b$ 의 비트 시간에 집중하여 분석이 이루어진다. 구간  $t \in [0, T_b]$ 에서  $r_{U,n}(t)$ 와  $r_{MUI,n}(t)$ 는 다음과 같이 각각 표현될 수 있다.

$$r_{U,n}(t) = \sum_{j=0}^{N_s-1} \sqrt{E_{rxp,n}^{(1)}} p(t-jT_s - c_j^{(1)}T_c - a_j^{(1)}\varepsilon) \quad (6)$$

$$r_{MUI,n}(t) = \sum_{u=2}^{N_u} \sum_{j=0}^{N_s-1} \sqrt{E_{rxp,n}^{(u)}} p(t-jT_s - c_j^{(u)}T_c - a_j^{(u)}\varepsilon - \tau_n^{(u)}) \quad (7)$$

그때 공간적인 다양성을 활용하기 위하여  $N$ 개의 안테나에서 얻어진 상관기 출력들을 동일하게 결합함으로써 테스트 통계변수(test statistics)를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$Z = \sum_{n=1}^N \int_0^{T_b} r_n(t) e(t) dt \quad (8)$$

여기서 상관 마스크(correlation mask)  $e(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$e(t) = \sum_{n=1}^{N_s-1} \eta(t-jT_s - c_j^{(1)}T_c) \quad (9)$$

여기서

$$\eta(t) = p(t) - p(t-\varepsilon) \quad (10)$$

테스트 통계 변수는 다음과 같이 세 개의 성분으로 표현할 수 있다.

$$Z = Z_u + Z_{MUI} + Z_w \quad (11)$$

여기서  $Z_u$ ,  $Z_{MUI}$  그리고  $Z_w$ 는 수신기 출력에서의 희망하는 신호, MUI, 그리고 열잡음 성분들을 표시한다. 그리고 테스트 통계 변수에 기반한 수신기에서의 결정 규칙(decision rule)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z \geq 0 &\Rightarrow \hat{b} = 0 \\ Z < 0 &\Rightarrow \hat{b} = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $\hat{b}$ 는 추정된 비트를 표시한다.

### VI. 수신 SINR 식의 유도 및 BER 공식

본 논문에서 사용자의 수는 충분히 많다고 가정한다. CLT(central limit theorem)에 의해서  $Z_{MUI}$ 와  $Z_w$ 는 각각 분산이  $\sigma_{MUI}^2$ 와  $\sigma_w^2$ 이고 평균이 0인 가우시안 랜덤변수로 모델링될 수 있다. 이러한 가우시안 근사화 가정을 사용하여 2PPM TH UWb 시스템에 대한 비트오차 확률  $P_b$ 와 SINR (signal to interference plus noise) 사이의 관계식은 다음과 같이 주어진다 [3].

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\operatorname{SINR}}{2}} \right) \quad (13)$$

여기서 수신 SINR은 열잡음과 MUI 성분을 반영하고 있다. 희망하는 신호 성분은 수신 비트 에너지  $E_{rxb}$ 에 반영되기 때문에 수신 SINR은 다음과 같이 표현된다.

$$\operatorname{SINR} = \frac{E_{rxb}}{\sigma_w^2 + \sigma_{MUI}^2} \quad (14)$$

위의 SINR 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\operatorname{SINR} = \left( \frac{1}{\operatorname{SNR}} + \frac{1}{\operatorname{SIR}} \right)^{-1} = \left( \left( \frac{E_{rxb}}{\sigma_w^2} \right)^{-1} + \left( \frac{E_{rxb}}{\sigma_{MUI}^2} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (15)$$

여기서 SNR과 SIR은 희망하는 신호 대 열잡음 비 그리고 희망하는 신호 대 MUI 비를 나타낸다.

하나의 비트 구간에 대해  $N_s$  펄스를 공간적으로 결합한 후 수신기의 출력에서의 희망하는 신호 성분의 에너지는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E_{rxb} &= (Z_U)^2 \\ &= \left( \sum_{n=1}^N \sqrt{E_{rxp,n}^{(1)}} \sum_{j=0}^{N_s-1} \right. \\ &\quad \cdot \left. \int_{jT_s+c_j^{(0)}T_c}^{jT_s+c_j^{(1)}T_c+T_c} p(t-jT_s-c_j^{(1)}T_c)\eta(t-jT_s-c_j^{(1)}T_c) dt \right)^2 \\ &= \left( N_s \sum_{n=1}^N \sqrt{E_{rxp,n}^{(1)}} \right)^2 \left( \int_0^{T_s} p(t)(p(t)-p(t-\varepsilon)) dt \right)^2 \\ &= \left( N_s \sum_{n=1}^N \sqrt{E_{rxp,n}^{(1)}} \right)^2 (1-R(\varepsilon))^2 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $R(\varepsilon)$ 는 펄스 파형  $p(t)$ 의 자기상관 함수이다.

2PPM 수신기 출력에서의 열잡음 분산  $\sigma_w^2$ 은  $\sigma_w^2 = NN_s N_0 (1-R(\varepsilon))$ 로 주어진다. 그때 수신 SNR 식은  $E_{rxb,n}^{(1)} = N_s E_{rxp,n}^{(1)}$ 을 사용하여 다음과 같다.

$$\operatorname{SNR} = \frac{E_{rxb}}{\sigma_w^2} = \left( \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{E_{rxb,n}^{(1)}}{N_0}} \right)^2 \frac{(1-R(\varepsilon))}{N} \quad (17)$$

$n$ 번째 안테나 수신기에서  $u$ 번째 송신기에 의해 한 개의 외부 펄스(alien pulse)의 존재 때문에 발생하는 간섭 신호는 다음과 같다.

$$i_n^{(u)}(\tau_n^{(u)}) = \int_0^{2T_p} p(t-\tau_n^{(u)})\eta(t) dt \quad (18)$$

지연 시간은 구간  $[0, T_s]$ 에서 균일하게 분포되었다고 가정하고 외부 펄스에 의한 간섭 신호 성분의 분산은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\sigma_{i_n^{(u)}}^2 = \frac{E_{rxp,n}^{(u)}}{T_s} \int_0^{T_s} \left( \int_0^{2T_p} p(t-\tau_n^{(u)})\eta(t) dt \right)^2 d\tau_n^{(u)} \quad (19)$$

모든 지연 성분들은 동일하게 분포되었다고 가정하고, 공간적인 결합 후에 수신기의 출력에서 펄스들, 즉, 주어진 하나의 비트에서 전체적인 간섭 MUI 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{MUI}^2 &= \frac{N_s}{T_s} \int_0^{T_s} \left( \int_0^{2T_p} p(t-\tau)\eta(t) dt \right)^2 d\tau \sum_{n=1}^N \sum_{u=2}^{N_s} E_{rxp,n}^{(u)} \\ &= \frac{N_s}{T_s} \int_{-T_p}^{2T_p} (R(\tau)-R(\tau+\varepsilon))^2 d\tau \sum_{n=1}^N \sum_{u=2}^{N_s} E_{rxp,n}^{(u)} \end{aligned} \quad (20)$$

$\varepsilon \geq T_p$ 를 만족하는 직교 펄스의 경우 위의 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{MUI}^2 = \frac{N_s}{T_s} 2 \int_{-T_p}^{T_p} (R(\tau))^2 d\tau \sum_{n=1}^N \sum_{u=2}^{N_s} E_{rxp,n}^{(u)} \quad (21)$$

그리하여 2PAM의 경우 수신 SIR은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \operatorname{SIR} &= \frac{E_{rxb}}{\sigma_{MUI}^2} \\ &= \frac{\zeta_R}{2 \int_{-T_p}^{T_p} (R(\tau))^2 d\tau R_b} \frac{\left( \sum_{n=1}^N \sqrt{E_{rxp,n}^{(1)}} \right)^2}{\sum_{n=1}^N \sum_{u=2}^{N_s} E_{rxp,n}^{(u)}} \end{aligned} \quad (22)$$

여기서  $\zeta_R = N_s T_s / T_b = N_s T_s R_b$ .

따라서 가우시안 근사화에 기반한 2PPM-TH-MA UWB 시스템의 BER  $P_b$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{((\operatorname{SNR})^{-1} + (\operatorname{SIR})^{-1})^{-1} / 2} \right) \quad (23)$$

### V. 수치적인 시뮬레이션 결과

다중 수신안테나를 사용하는 2진 PPM-TH-MA 시스템의 경우에 BER 성능을 평가하고, 그 결과를 [8]에서 이미 제시된 2PAM-TH-MA 경우의 성능과 비교 분석하고자 한다. 수치적인 시뮬레이션에서  $n = 1, 2, \dots, N$ 에 대해  $E_{rxp,n}^{(1)} = 1$ 를 사용하고 또한 전력 제어는 완벽하게 이루어진다( $u = 2, 3, \dots, N_u$ 에 대해  $E_{rxp,n}^{(1)} = E_{rxp,n}^{(u)}$ )고 가정한다. 샘플링 주파수, 펄스 폭, 펄스 형태 인자는  $f_c = 1 \times 10^{11}$ ,  $T_p = 1 \times 10^{-9}$ ,  $\alpha = 0.25 \times 10^{-9}$ 로 각각 주어진다. 비트율은  $R_b = 30 \times 10^6$  bits/s로 가정하고,  $\zeta_R = 1$ 이다.

그림 1, 2, 3은 각각  $N_u = 6, 21, 51$  사용자 환경에서 안테나 수가 서로 다를 때 주어진 시스템의 이론적인 BER 성능을  $E_{rxb}/N_0$ 의 함수로 보여주고 있다. 두 개의 안테나를 사용하면 BER 성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 이 결과는 다중 수신안테나를 통한 공간적인 결합 과정은 수신 SINR을 증가시켜서 수신기에 더 많은 에너지를 제공하는 효과를 가지기 때문이다. 간섭 신호 성분들이 더 많이 존재할수록 BER 성능은 error floor를 경험하게 되는데 이는 수신  $E_{rxb}/N_0$  값이 크면 BER 성능이 MUI 성분에 의해 제한을 받기 때문이다. 안테나 수를 증가시키면 error floor를 감소시키고 주어진 시스템에 MUI에 대해서 더 잘 견딜 수 있도록 한다. 또한 다중사용자 간섭 신호들이 존재할 때 2PAM THMA UWB 시스템의 성능이 2PPM THMA UWB 시스템의 성능보다 상당히 우수하다는 것을 알 수 있다.

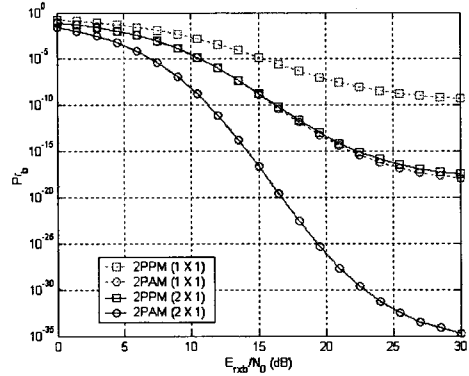


그림 1. 5명의 간섭 사용자 환경에서 BER  
Fig. 1. BER as a function of  $E_{rxb}/N_0$  for 5 interferers

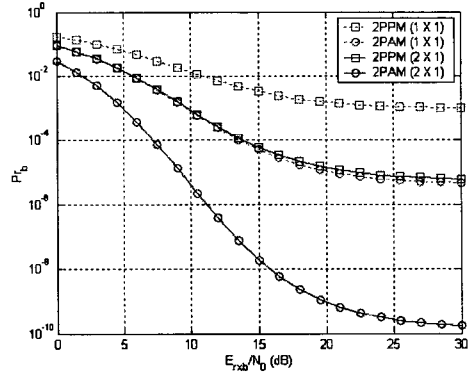


그림 2. 20명의 간섭 사용자 환경에서 BER  
Fig. 2. BER as a function of  $E_{rxb}/N_0$  for 20 interferers

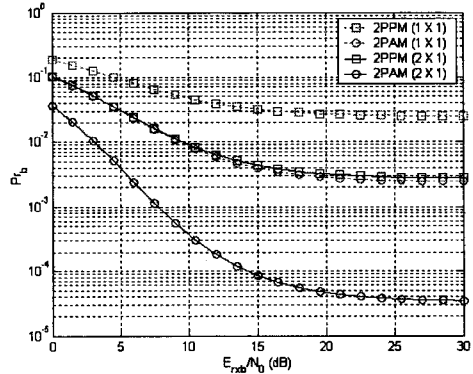


그림 3. 50명의 간섭 사용자 환경에서 BER  
Fig. 3. BER as a function of  $E_{rxb}/N_0$  for 50 interferers

VI. Acknowledgement

This work was partially sponsored by ETRI SoC Industry Promotion Center, Human Resource Development Project for IT SoC Architect.

참고문헌

[1] R. A. Scholtz, "Multiple Access with Time-Hopping Impulse Modulation" in Proceedings of MILCOM'93, 1993, pp. 679-691

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

[4] L. Wang, W. Liu, and K. Shieh, "On the Performance of Using Multiple Transmit and Receive Antennas in Pulse-Based Ultrawideband Systems," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 4, no. 6, pp. 2738-2750, Nov. 2005

[5] 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

[6] 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

[7] 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

[8] S. Baek, J. An, S. Lee, and S. Kim, "Error Performance Analysis of Multi-User Binary PAM TH UWB Systems With Multiple Receive Antennas," Scheduled for presentation in FGCN 2007

저자소개



백 선 영(Sunyoung Baek)

2007년 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 전자전공 졸업 (공학사)  
2007년~현재 동아대학교 대학원 전자공학과 석사과정

※관심분야: 이동/무선통신



안 진 영(Jinyoung An)

2007년 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 전자전공 졸업 (공학사)  
2007년~현재 동아대학교 대학원 전자공학과 석사과정

※관심분야: 이동/무선통신



이 성 신(Sungsin Lee)

1991년 2월 동의대학교 전자공학과 (공학사)  
1993년 2월 동아대학교 전자공학과 (공학석사)

2006년 2월 동아대학교 전자공학과 (공학박사)  
1993년 9월~2002년 1월: 대양전기공업(주) 부설 기술연구소 책임연구원  
2004년 12월~2007년 2월: (주)넷하우스 연구개발실 개발실장  
2007년 3월~현재: 동아대학교 BK21 고성능 멀티미디어 사업팀 계약교수

※관심분야: UWB, MIMO, OFDM, CDMA, 통신시스템



김 상 준(Sangchoon Kim)

1991년 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1995년 미국 University of Florida 전기공학과 (공학석사)

1999년 미국 University of Florida 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)  
2000년~2005년 LG전자 책임연구원  
2005년~현재 동아대학교 전자공학과 조교수

※관심분야: 이동/무선통신