

다중 경로 채널 환경에서 DM-MPSK의 성능 분석

준회원 이 명 수*, 송 정 한*, 김 준 환*, 종신회원 윤 석 호*

Performance Analysis of the DM-MPSK in Multipath Fading Channels

Myungsoo Lee*, Chonghan Song*, Junhwan Kim* *Associate Members*,
Seokho Yoon*^o *Lifelong Member*

요 약

처프 확산 대역 (chirp spread spectrum: CSS) 기술은 넓은 주파수 대역에 걸쳐 데이터를 확산하는 기술로, 다중 경로 페이딩에 강인한 특성을 보인다. 이로 인해 무선 통신 분야에서 크게 주목받고 있다. 하지만 다중 경로 페이딩 환경에 따른 CSS 시스템의 성능에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 논문에서는 다중 경로 페이딩 채널이 직접 변조 (direct modulation: DM) M 진 위상 편이 방식 (M -ary phase shift keying: MPSK) 시스템에 미치는 영향에 대해 알아본다. 채널 환경은 레일리 페이딩을 가정하고, 덧셈 풀 백색 가우시안 잡음의 (additive white Gaussian noise: AWGN) 영향을 받은 chirp 신호의 이론적인 심볼 에러율을 (symbol error rate: SER) 구한다. 그리고 실험적인 결과를 통해 이론적인 SER이 실험적인 SER과 일치함을 확인한다.

Key Words : CSS, DM, MPSK, SER, Multipath

ABSTRACT

The chirp spread spectrum (CSS) technique that spreads the data signal over a wider frequency band via chirp signal for transmission has attracted much attention in the field of wireless communications due to capability to resist multipath fading signals. However, there has been little mathematical analysis for the performance of CSS-based communication systems in the multipath fading environments. In this paper, we study the influence of the multipath channel on the direct modulation (DM) scheme with M -ary phase shift keying (MPSK). When a chirp signal is transmitted on the Rayleigh fading channel and affected by additive white Gaussian noise (AWGN), we derive the theoretical performance. From numerical results, it is confirmed that the analytic symbol error rate (SER) agrees closely with the empirical SER.

I. 서 론

처프 (chirp) 신호를 이용해 넓은 주파수 대역에 걸쳐 데이터를 전송하는 처프 확산 대역 (chirp spread spectrum: CSS) 시스템은 본래 군용 레이더 분야에 사용되어 왔다. 최근에는 실제 무선 통신 환경인 다중

경로 채널 환경에 강한 특성 때문에 많은 관심을 받고 있다^[1]. 그 한 사례로 전기전자기술자협회에서 (institute of electrical and electronics engineers: IEEE) 저속 무선 개인 영역 네트워크 (wireless personal area network: WPAN) 시스템을 위한 표준인 802.15.4a의 물리 계층 표준 기술로 CSS를 채택한

* “이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2009-0071120)과 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업(NIPA-2010-(C1090-1011-0005))의 공동 연구 결과로 수행되었음.”

* 성균관대학교 정보통신공학부 (syoon@skku.edu), (°: 교신저자)

논문번호 : KICS2010-01-029, 접수일자 : 2010년 1월 21일, 최종논문접수일자 : 2010년 2월 1일

것을 들 수 있다²⁾.

CSS 기술은 chirp 신호를 이용하는 변조 방법에 따라 이진 직교 편이 (binary orthogonal keying: BOK) 방식과 직접 변조 (direct modulation: DM) 방식으로 나눌 수 있다^{3),4)}. BOK는 데이터를 표현하기 위해 chirp 율을 이용한다. 즉, 각각의 데이터를 나타내기 위해 다른 순간 주파수 변화율을 적용한다. 반면, DM 방식은 chirp 신호를 확산 기능을 위해 사용하고, 데이터를 변복조할 때 분리된 처리 과정을 거침으로써 다른 변조 기술들과 함께 사용될 수 있다.

본 논문에서는 chirp 신호가 다중 경로 채널 환경을 거칠 때 발생할 수 있는 간섭 및 잡음을 고려하였다. 기존의 대역 확산 변조 기법에서 다중 경로 채널 환경을 고려할 때 Rake 수신기를 사용하는 것과 마찬가지로, CSS 시스템 또한 Rake 수신기를 고려한다⁵⁾. 특히, 레일레이 분포를 가진 다중 경로 채널 환경에서 덧셈 풀 백색 가우시안 잡음의 (additive white Gaussian noise: AWGN) 영향을 받을 때 DM-M진 위상 편이 방식 (M-ary phase shift keying: MPSK)의 심볼 에러율 (symbol error rate: SER) 성능을 분석하는 데 초점을 맞춘다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에 해당하는 2장에서는 송수신기 모형과 채널 모델 등의 시스템 모형을 설명한다. 3장에서는 다중 경로 채널 환경에서 DM-MPSK의 SER 수식을 유도하고, 모의실험 결과

와 비교 및 분석한다. 마지막으로 4장에서는 결론을 내린다.

II. 시스템 모형

Chirp 파형의 복소 기저 등가 $c(t)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$c(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c}} \exp(j\pi\mu t^2), |t| < \frac{T_c}{2}, \quad (1)$$

여기서 T_c 는 chirp 신호의 구간을 나타낸다. Chirp 율은 (μ) 순간 주파수 변화율로서, $\mu > 0$ ($\mu < 0$) 일 때 up-chirp (down-chirp) 신호라고 불리며 순간 주파수는 증가한다 (감소한다). CSS 신호에 대한 대역폭 B 는 다음과 같이 정의된다.

$$B = |\mu|T_c. \quad (2)$$

그림 1은 Rake 수신기를 가진 DM-MPSK 시스템의 복소 기저대역 모델이다. 송신단에서는 입력 데이터를 먼저 MPSK 신호 성좌에 맵핑시키고 up-chirp 신호 $c(t - iT_c)$ 를 곱해준다. 그 때의 입력 신호 $s(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

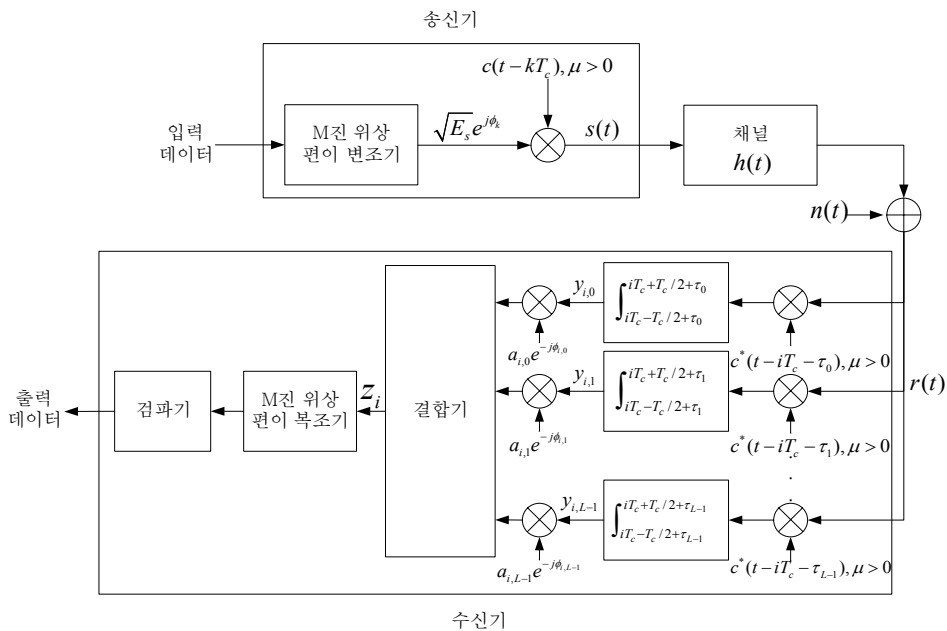


그림 1. Rake 수신기 기반의 DM-MPSK 시스템 구성도

$$s(t) = \sqrt{E_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{j\phi_k} c(t - kT_c), |t - kT_c| < \frac{T_c}{2}, \quad (3)$$

여기서 E_s 는 심볼 에너지, ϕ_k 는 $1/M$ 의 동일한 확률로 $\left\{0, \frac{2\pi}{M}, \dots, \frac{2(M-1)\pi}{M}\right\}$ 중에서 하나의 값을 가진다.

k 번째 DM-MPSK 신호는 채널 임펄스 응답이 다음과 같은 다중 경로 채널을 거치게 된다^{1,6,7)}.

$$h_k(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_{k,l} e^{j\theta_{k,l}} \delta(t - \tau_{k,l}), \quad (4)$$

여기서 L 은 다중 경로의 개수, $a_{k,l}$ 과 $\theta_{k,l}$ 은 각각 k 번째 신호에 대한 채널의 l 번째 경로 이득과 위상을 나타내며, $\tau_{k,l}$ 은 l 번째 경로의 시간 지연이다. $a_{k,l}$ 은 독립적이고 동일한 분포를 (independent and identically distributed: i.i.d.) 갖는 레일레이 임의의 변수이고, $\theta_{k,l}$ 은 $[0, 2\pi)$ 에서 i.i.d.한 임의의 변수로 가정한다. 또한, 하나의 심볼이 전송되는 동안 채널은 변하지 않는다고 가정한다.

채널을 통과한 DM-MPSK 신호는, 평균이 0이고 양측 전력 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 덧셈 풀 백색 가우시안 잡음 $n(t)$ 에 의해 오염된다. 따라서 채널을 통과한 출력 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \sqrt{E_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{j\phi_k} \sum_{l=0}^{L-1} a_{k,l} e^{j\theta_{k,l}} c(t - kT_c - \tau_{k,l}) + n(t). \quad (5)$$

대역 확산 변조 기법에서는 다중 경로 채널 효과를 완화하기 위해 Rake 수신기를 사용하는 것이 일반적이다. DM-MPSK의 경우, 변조 방식이 대역 확산 변조 기법과 유사하며, 높은 시간 해상도를 가지므로 Rake 수신기를 사용하기에 적합하다. 이 때 채널 추정 은 완벽하게 수행되었다고 가정한다. 수신된 신호는 Rake 수신기의 각 가지에서 down-chirp 신호들과 상관 함수 연산이 수행된다. i 번째 시점에서 n 번째 가지의 down-chirp 신호와 수신된 신호와의 상관 함수 연산 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_{i,n} &= \int_{-\infty}^{\infty} r(t) c^*(t - iT_c - \tau_{i,n}) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{E_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{j\phi_k} \sum_{l=0}^{L-1} a_{k,l} e^{j\theta_{k,l}} \\ &\quad \times c(t - kT_c - \tau_{k,l}) c^*(t - iT_c - \tau_{i,n}) dt \\ &\quad + \int_{-\infty}^{\infty} n(t) c^*(t - iT_c - \tau_{i,n}) dt. \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에 있는 $y_{i,n}$ 과 추정된 채널 계수들을 최대 비율 결합에 (maximal ratio combining: MRC) 적용함으로써 i 번째 결정 변수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$z_i = \sum_{n=0}^{L-1} y_{i,n} a_{i,n} e^{-j\theta_{i,n}} = D_i + S_i + I_i + \xi_i, \quad (7)$$

$$D_i = \sum_{n=0}^{L-1} a_{i,n}^2 \sqrt{E_s} e^{j\phi_i}, \quad (8)$$

$$S_i = \sum_{n=0}^{L-1} a_{i,n} e^{-j\theta_{i,n}} \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq n}}^{L-1} a_{i,l} e^{j\theta_{i,l}} \sqrt{E_s} e^{j\phi_i} P_{l,n}^{i,i}, \quad (9)$$

$$I_i = \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=-\infty}^{i-1} a_{k,l} e^{j\theta_{k,l}} a_{i,n} e^{-j\theta_{i,n}} \sqrt{E_s} e^{j\phi_i} P_{l,n}^{i,k}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \xi_i &= \sum_{n=0}^{L-1} a_{i,n} e^{-j\theta_{i,n}} \\ &\quad \times \int_{iT_c - T_c/2 + \tau_{i,n}}^{iT_c + T_c/2 + \tau_{i,n}} n(t) c^*(t - iT_c - \tau_{i,n}) dt, \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 D_i 는 수신된 신호에서 원하는 부분을 나타내며, S_i 는 i 번째 신호 자신에 의한 간섭, I_i 는 인접한 신호에 의한 간섭, ξ_i 는 평균이 0이고 분산이 $\sum_{n=0}^{L-1} N_0 a_{i,n}^2/2$ 인 AWGN이다. Chirp 신호 간의 상관 값인 $P_{l,n}^{i,k}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{l,n}^{i,k} &= \int_{iT_c - T_c/2 + \tau_{i,n}}^{kT_c + T_c/2 + \tau_{k,l}} c(t - kT_c - \tau_{k,l}) \\ &\quad \times c^*(t - iT_c - \tau_{i,n}) dt, \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 주엽의 폭은 거의 $2/B$ 이며, 부엽이 존재한다. 다중 경로 채널을 거칠 경우, 지연으로 인한 간섭이 발생하게 되는데, 이는 상관 함수를 통해 설명할 수 있다. 채널 지연에 따른 상관 함수 값이 0이 아닌 값을 가질 때, 이것은 원하는 신호에 대한 간섭이 된다. 이러한 점을 감안하여 수학적으로 성능 분석을 하기 위해, 식 (9)와 (10)에 있는 S_i 와 I_i 를 임의의 가우시안 변수로 보고 각각의 평균은 0이며, 독립적인 변수로 다룬다.

III. DM-MPSK의 SER

평균 신호 대 간섭과 잡음비에 (signal to interference

and noise ratio: SINR) 대한 SER을 구하기 위해서는 채널당 SINR이 요구되므로, S_i 와 I_i 의 채널당 분산을 계산해야 한다. l 번째 채널에 대한 $S_{i,l}$ 과 $I_{i,l}$ 에 대한 분산은 다음과 같다.

$$\text{Var}(S_{i,l}) = a_{i,l}^2 E_s \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq l}}^{L-1} E(a_{i,n}^2) (P_{l,n}^{i,i})^2, \quad (13)$$

$$\text{Var}(I_{i,l}) = a_{i,l}^2 E_s \sum_{n=0k=-\infty}^{L-1} \sum_{i=1}^{i-1} E(a_{k,n}^2) (P_{l,n}^{i,k})^2. \quad (14)$$

식 (13)과 (14)를 이용하여 식 (15)와 같이 l 번째 채널의 SINR을 쉽게 구할 수 있으며, 그에 대한 채널당 평균 SINR은 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} X_{i,l} &= \frac{a_{i,l}^4 E_s}{2\{\text{Var}(S_{i,l}) + \text{Var}(I_{i,l}) + \text{Var}(\xi_{i,l})\}} \\ &= \frac{a_{i,l}^2 E_s}{2} [E_s \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq l}}^{L-1} E(a_{i,n}^2) (P_{l,n}^{i,i})^2 \\ &\quad + E_s \sum_{n=0k=-\infty}^{L-1} \sum_{i=1}^{i-1} E(a_{k,n}^2) (P_{l,n}^{i,k})^2 + \frac{N_0}{2}]^{-1}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \overline{X}_{i,l} &= \frac{E(a_{i,l}^2) E_s}{2} [E_s \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq l}}^{L-1} E(a_{i,n}^2) (P_{l,n}^{i,i})^2 \\ &\quad + E_s \sum_{n=0k=-\infty}^{L-1} \sum_{i=1}^{i-1} E(a_{k,n}^2) (P_{l,n}^{i,k})^2 + \frac{N_0}{2}]^{-1}. \end{aligned} \quad (16)$$

DM-MPSK에 대한 SER은 기존의 다중 경로 레일 레이 페이딩 채널 환경에 대한 MPSK의 SER을 이용하여 얻을 수 있다. 식 (7)의 결정 변수를 실수 성분과 허수 성분으로 분해한다. 분해된 성분에 대한 결합 확률 밀도 함수는 (joint probability density function: joint PDF) 다음과 같다⁷⁾.

$$\begin{aligned} p(\alpha_i, \beta_i) &= \frac{(1-|\nu|^2)^L}{(L-1)! \pi 2^L} \left(\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \right)^{L-1} \\ &\quad \times \exp[\nu(\alpha_i \cos \epsilon + \beta_i \sin \epsilon)] K_{L-1} \left(\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \right), \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 $K_{L-1}(\cdot)$ 은 $L-1$ 차 modified Hankel 함수이며, α_i 와 β_i 는 각각 결정 변수에 대한 실수 성분과 허수 성분이다. ν 는 상관 함수 결과 값 $y_{i,n}$ 과 추정된 채널 계수 $a_{i,n} e^{-j\theta_{i,n}}$ 에 대한 교차 상관 계수로, Rake 수신기에서 곱해지는 계수들이 완벽한 채널 추정을 통해 얻어질 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다⁷⁾.

$$\nu = \sqrt{\frac{\overline{X_{i,l}}}{\overline{X_{i,l}} + 1}}. \quad (18)$$

DM-MPSK 신호에 대한 SER을 위상을 이용하여 구하기 위해 식 (17)의 α_i 와 β_i 를 변수 변환을 통해 r 과 θ 로 변환한다. 이 과정에서 식 (17)의 modified Hankel 함수는 복잡한 적분 형태를 갖게 된다. 이에 참고 문헌 [8, p.692]을 이용하여 L 의 값에 따른 θ 에 대한 주변 확률 밀도 함수를 (marginal PDF) 구할 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p(\theta) &= \frac{(1-|\nu|^2)^L}{2\sqrt{\pi}(L-1)!} \frac{1}{\{1-|\nu|\cos(\theta-\epsilon)\}^{2L}} \frac{\Gamma(2L)}{\Gamma(L-\frac{1}{2})} \\ &\quad \times \int_0^1 t^{L-3/2}(1-t) \left\{ 1-t \frac{|\nu|\cos(\theta-\epsilon)+1}{|\nu|\cos(\theta-\epsilon)-1} \right\}^{-2L} dt. \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)를 이용하여, 위상이 0인 심볼이 전송되었다는 가정 하에 SER은 식 (19)을 적분함으로써 얻어질 수 있다. 복소수 값을 가지는 ν 는 θ 의 PDF에 대해 ϵ 만큼의 위상 천이를 야기한다. 채널이 완벽하게 추정되었다는 가정에 따라 ν 는 양의 실수 값을 가지게 되며, $p(\theta)$ 에서 그러한 ν 를 적용하였을 때의 결과는 ν 를 복소수로 가정했을 때의 $p(\theta)$ 와 동일하다. 위의 사항을 고려할 때 DM-MPSK의 SER을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P_E &= 2 \int_{\pi/M}^{\pi} p(\theta) d\theta \\ &= \frac{(-1)^{L-1} (1-\nu^2)^L}{\pi (L-1)!} \frac{\partial^{L-1}}{\partial b^{L-1}} \left[\frac{1}{b-\nu^2} \left(\frac{\pi}{M} (M-1) \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\nu \sin(\pi/M)}{\sqrt{b-\nu^2} \cos^2(\pi/M)} \cot^{-1} \left(\frac{-\nu \cos(\pi/M)}{\sqrt{b-\nu^2} \cos^2(\pi/M)} \right) \right]_{b=1}. \end{aligned} \quad (20)$$

식 (16)의 결과와 식 (18)을 위 식에 적용함으로써 DM-MPSK의 SER 성능을 구할 수 있다. 다중 경로 채널 환경을 거칠 경우 chirp 신호의 간섭 신호는 반드시 발생하게 된다. 또한 chirp 신호의 주엽의 첫 번째 0인 값이 $1/B$ 이라는 것은 정확한 값이 아닌 근사화된 값이다. 따라서 그에 따른 간섭 성분도 발생하므로, CSS 시스템에 대한 성능 분석에 있어서 이에 대한 영향을 고려해야 한다.

다중 경로 채널에 따른 Rake 수신기 기반의 DM-MPSK 성능을 알아보기 위해 다음과 같이 매개 변수를 지정하였다. $T_c = 1\mu s$, $\mu = 100MHz/\mu s$, $B = 100MHz$ 이며, 다중 경로의 수 L 이 1, 2, 3인 상황에서 $M=2, 4, 8$ 인 경우를 고려하였다. 수신기는

모든 채널 계수와 지연을 안다고 가정하였다. 식 (20)에 의해 계산된 이론적인 SER과 시뮬레이션에 의해 얻어진 DM-MPSK의 SER에 대한 비교는 그림 2와 같다.

그림 2의 SER 성능으로부터 이론적인 결과와 실험적인 결과가 상당히 일치하는 것 확인할 수 있다. 송신단에서의 전송 전력 SNR을 기준으로 하며, 수신단에서 결합되는 모든 다중 경로의 분산의 합은 1로 정규화 한다. 다중 경로의 수가 늘어남에 따라 다이버시티 효과로 인해 DM-MPSK의 성능 곡선의 기울기가 점차 커지는 것을 확인할 수 있다.

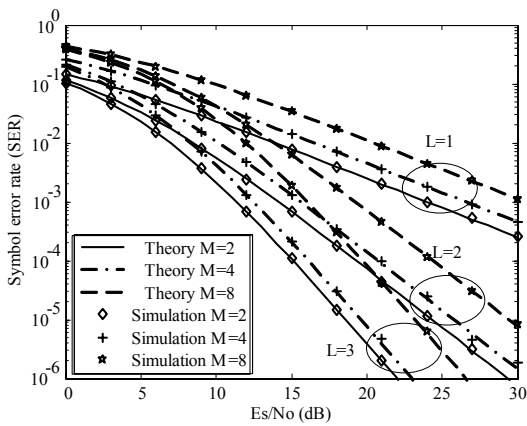


그림 2. 다중 경로 채널에서 DM-MPSK의 SER

IV. 결 론

Chirp 신호를 이용해 전송하고자 하는 데이터의 대역을 넓게 확산시키는 CSS 시스템은 다중 경로 채널에 강한 특성을 보인다. 본 논문에서는 그러한 다중 경로 채널 환경에서 DM-MPSK의 SER 성능을 분석하였다. Chirp 신호의 상관 함수 결과를 통해, DM-MPSK 신호가 다중 경로 채널을 거칠 경우 지연으로 인해 자기 자신에 의한 간섭과 인접하는 신호 간의 간섭이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 레일레이 분포를 가진 다중 경로 채널 환경에서 Rake 수신기를 이용한 성능 분석에 간섭 신호를 고려하여 이론적인 SER을 얻을 수 있었다. 끝으로 이론적인 SER과 실험적인 SER을 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 이론적인 분석과 실험적인 결과가 상당히 일치함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] H. Shen and A. Papandreou-Suppappola, "Diversity and channel estimation using time-varying signals and time-frequency techniques," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 54, no. 9, pp. 3400-3413, Sep. 2006.
- [2] IEEE Std. 802.15.4a-2007, *Wireless MAC and PHY Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE, 2007.
- [3] J. Pinkney, *Low Complexity Indoor Wireless Data Links Using Chirp Spread Spectrum*, Ph. D. Dissertation, Dept. Elect. Comput. Engineer., University of Calgary, Calgary, Canada, 2003.
- [4] Y.-P. Lee, T. Yoon, I. Song, Y. H. Kim, T. H. Han, and S. Yoon, "Symbol error rate of the DM-MPSK under the influence of jamming signals," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, no. 7, pp. 468-470, July 2009.
- [5] H. Liu, "Multicode ultra-wideband scheme using chirp waveforms," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 4, pp. 885-891, Apr. 2006.
- [6] K. Wan, L. Hao, and P. Fan, "Performance analysis of pre-Rake diversity with generalized orthogonal codes for DS-CDMA," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 4, pp. 1896-1901, July 2007.
- [7] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 2001.
- [8] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Tables of Integrals, Series, and Products*, Academic Press, New York, 2000.

이 명 수 (Myungsoo Lee)

준회원



2008년 2월 성균관대학교 정보통신공학부 공학사
2009년 3월~현재 성균관대학교 휴대폰학과 석사과정
2009년 12월 IEEE Seoul Section Student Paper Contest 동상 수상

<관심분야> 통계학적 신호처리, 추정 및 검파, 이동통신

김 준 환 (Junhwan Kim)

준회원



2010년 2월 성균관대학교 정보통신공학부 공학사
2010년 3월~현재 성균관대학교 휴대폰학과 석사과정
<관심분야> 인지 무선 통신, 통계학적 신호처리, 추정 및 검파

송 정 한 (Chonghan Song)

준회원



2009년 2월 성균관대학교 정보통신공학부 공학사
2009년 3월~현재 성균관대학교 휴대폰학과 석사과정
<관심분야> OFDM, 통계학적 신호처리, 추정 및 검파

윤 석 호 (Seokho Yoon)

종신회원



1997년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학사(최우등)
1999년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학석사
2002년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학박사
2002년 3월~2002년 6월 MIT 박사후 연구원

2002년 7월~2003년 2월 하버드대학교 박사후 연구원

2003년 3월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 전임 강사, 조교수, 부교수

2000년 2월 삼성 휴먼테크 논문대상 동상 수상

2007년 Marquis Who's Who in Asia에 등재

2007년 IEEE 준석학회원

2008년 Marquis Who's Who in World에 등재

2009년 한국통신학회 LG 학술상 수상

<관심분야> 통신 이론, 이동통신, 통계학적 신호처리