

# ITS 시스템을 위한 무선 채널에서의 SSW 기법의 채널용량 분석

## Channel Capacity Analysis of SSW Technique in Wireless Channels for ITS System

김 주 찬\*  
(Joo-Chan Kim)

배 정 남\*\*  
(Jung-Nam Bae)

김 진 영\*\*\*  
(Jin-Young Kim)

### 요 약

본 논문에서는 다중경로 채널 모델로써 일반적으로 사용되는 Rayleigh 페이딩 채널과 Rician 페이딩 채널에서 SSW 시스템의 채널용량을 분석하고 모의실험을 수행하였다. ITS 시스템에 SSW 기법을 적용하면 주파수 효율을 증가시킬 수 있고, 기존의 정보 외에 부가적인 정보를 워터마킹 기법을 통하여 전송 가능하다. SSW 기법을 적용하기 위해서는 기존 시스템에 최소한의 영향을 주면서 얼마만큼의 데이터를 신뢰할 만한 수준으로 전송 가능할 것인지에 대한 채널용량 분석이 필수적으로 요구된다. 이를 위해서 Rayleigh와 Rician 페이딩 채널에서 근사화된 채널용량 수식을 정보이론 관점에서 유도하였고, 분석 결과 이론적으로 유도한 수식과 실험 결과가 거의 일치함을 보였다.

### Abstract

In this paper, we analyze and simulate the channel capacity of a spread spectrum watermarking (SSW) technique in wireless fading channel to apply ITS system. Channel capacity analysis causing minimum effect to existing system is required necessary to apply SSW technique. We derive the channel capacity as a closed-form approximation formula in Rayleigh and Rician fading channel model. The numerical results are demonstrated and good approximated results are reported.

**Key words:** ITS, spread spectrum watermarking, channel capacity

## I. 서 론

확산 대역 워터마킹 기법(Spread Spectrum Watermarking: SSW)은 디지털 워터마킹 시스템의 일종이다. 디지털 워터마킹 시스템은 원래 디지털화 된 비디오, 오디오, 그래픽 또는 텍스트 등의 멀티미디어

컨텐츠를 보호하려는 목적에서 생긴 기술이다. 그 중에서 SSW 기법은 노이즈 환경 하에서 가장 강력한 컨텐츠 보호 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 최근 이러한 SSW 기법을 방송통신 영역에 접목하려는 시도가 많이 연구되고 있다 [1,2]. 그 중에 대표적인 것이 디지털 방송시스템에 SSW를 이용하여 단

† 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2010-(CI090-1011-0005))

\* 주저자 : 광운대학교 전파공학과 박사과정

\*\* 공저자 : 광운대학교 전파공학과 석사과정

\*\*\* 공저자 및 교신저자 : 광운대학교 전파공학과 교수

† 논문접수일 : 2010년 3월 1일

† 논문심사일 : 2010년 3월 31일

† 게재확정일 : 2010년 4월 3일

일주파수망에서 필수적으로 고려되고 있는 송신기 식별(Transmitter Identification: TxID)에 이 기술을 접목시키려고 하는 것이다. 비단 디지털방송뿐만 아니라 다양한 영역에서 SSW 기법을 응용한 새로운 기술들이 나타날 것으로 예상된다.

지능형 교통 시스템(Intelligent Transport System: ITS)은 기존의 교통체계를 정보통신, 전자, 제어 컴퓨터 등의 첨단기술과 접목시켜 교통의 이동성, 안정성, 효율성 및 교통 환경을 혁신적으로 개선하는 신 교통체계를 말한다. 기존의 도로 교통 정보 시스템은 길가 표지판에 교통 체증 정보, 교통 메시지를 주로 사용하였으나 작은 양의 정보를 전송하므로 효율성이 떨어졌다. ITS 시스템에 SSW 기법을 적용하면 주파수 효율을 증가시킬 수 있고, 기존의 정보 외에 부가적인 정보를 워터마킹 기법을 통하여 전송 가능하다. 특히 최근에는 대부분의 차량들이 네비게이션을 사용하고 있으므로 T-DMB (Terrestrial-Digital Multimedia Broadcasting)와 같은 방송 시스템과 연계하여 국지적인 영역에서 교통상황 등의 정보를 SSW 기법을 이용하여 저렴한 비용으로 제공할 수 있다.

SSW 기법의 가장 큰 장점은 새로운 시스템과 망을 새롭게 구축하는 것이 아니라, 기존의 시스템에 추가적인 주파수 자원을 사용하지 않고 최소한의 비용으로 구축이 가능하기 때문에 경제적으로 매우 효율적인 시스템이라고 생각한다. 이러한 SSW 기법을 적용하기 위해서는 기존 시스템에 최소한의 영향을 주면서 얼마만큼의 데이터를 신뢰할 만한 수준으로 전송 가능할 것인지에 대한 채널용량 분석이 필수적으로 요구된다. SSW 기법의 기원인 디지털 워터마킹 영역에서는 이러한 무선채널에 대한 영향보다는 디지털 콘텐츠를 보호하려는 관점에서 해당 콘텐츠에 대한 공격에 어떻게 방어할 것인가가 주된 관심사항이었다. 하지만 SSW 기법을 방송이나 통신과 같은 무선통신 영역에서 사용하기 위해서는 다양한 무선채널 모델에서의 채널 용량 분석이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 SSW 기법을 무선채널환경 하에서 적용하기 위하여 대표적인 다중경로 페이딩 모델인 Rayleigh와 Rician 모델에서 채널용량을 수식적으로 유도하고 분석해 보고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 SSW 기법의 모델에 대해 소개하고, III장에서 다중경로 페이딩 모델에서의 수식을 유도한다. IV장에서 유도된 수식을 바탕으로 모의실험 및 결과를 분석하고, 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

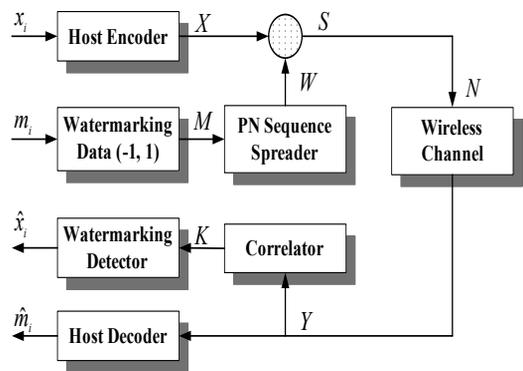
## II. SSW 시스템 모델

<그림 1>은 SSW 시스템의 블록도를 나타낸다. SSW 시스템은 정보 또는 데이터를 부호화 하는 호스트와 워터마킹 데이터를 발생하는 워터마킹 재생기로 구성이 되며, 워터마킹 재생기는 추가데이터를 발생시키는 부분과 PN(Pseudo Noise) 시퀀스를 이용하여 대역확산 시키는 확산기를 포함한다. 워터마킹 신호는 PN 코드를 이용하여 대역 확산되고 호스트의 신호에 더해져 무선채널을 통하여 전송되게 된다.

무선채널을 통과하는 동안 다중경로 페이딩에 의하여 영향을 받아 왜곡되어 수신된다. 수신단에서는 상관기를 통하여 송신단에서 사용된 PN 시퀀스를 찾아내게 된다. 찾아낸 PN 시퀀스를 이용하여 워터마킹된 신호를 복원한다.

## III. 채널 용량 분석

다중경로 페이딩은 무선통신 시스템에서 필수적으로 고려되는 사항으로서 주로 송신된 신호가 무선



<그림 1> SSW 시스템 블록도  
<Fig. 1> Block diagram of SSW system

$$\bar{C}_{SSW}^{Rayleigh} = \int_0^\infty \frac{f_x}{2N} \log_2 \left( 1 + \frac{2N^2}{(HWR+1/\gamma)f_x} \right) \frac{1}{\gamma} \exp(-\gamma/\bar{\gamma}) d\gamma \quad (4)$$

$$\bar{C}_{SSW}^{Rayleigh} = \int_0^\infty \frac{f_x}{2N} \log_2 \left( 1 + \frac{2N^2}{(HWR+1/\gamma)f_x} \right) \frac{1}{\gamma} \exp(-\gamma/\bar{\gamma}) d\gamma$$

$$\bar{C}_{SSW}^{Rayleigh} = \frac{f_x}{2N\bar{\gamma}\ln 2} \left[ \int_0^\infty \ln [(f_x HWR + 2N^2)\gamma + f_x] \exp(-\gamma/\bar{\gamma}) d\gamma - \int_0^\infty \ln (f_x HWR\gamma + f_x) \exp(-\gamma/\bar{\gamma}) d\gamma \right] \quad (5)$$

$$\bar{C}_{SSW}^{Rayleigh} = \frac{f_x}{2N\ln 2} \left[ \exp\left(\frac{f_x}{\bar{\gamma}(f_x HWR + 2N^2)}\right) I\left(0, \frac{f_x}{\bar{\gamma}(f_x HWR + 2N^2)}\right) - \exp\left(\frac{1}{\bar{\gamma}HWR}\right) I\left(0, \frac{1}{\bar{\gamma}HWR}\right) \right] \quad (6)$$

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{(1+K)}{\bar{\gamma}} \exp(-K) \exp\left(-\frac{(1+K)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) I_0\left(\sqrt{\frac{4K(1+K)\gamma}{\bar{\gamma}}}\right), \quad \gamma \geq 0 \quad (7)$$

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{(1+K)}{\bar{\gamma}} \exp(-K) \sum_{n=0}^{\infty} (n!)^{-2} \left(\frac{K(1+K)^n}{\bar{\gamma}}\right) \gamma^n \exp\left(-\frac{(1+K)\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \quad \gamma \geq 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{C}_{SSW}^{Rician} &= \frac{f_x}{2N} \int_0^\infty \log_2 \left( 1 + \frac{2N^2}{(HWR+1/\gamma)f_x} \right) \frac{(1+K)e^{-K}}{\bar{\gamma}} \sum_{n=0}^{\infty} (n!)^{-2} \left(\frac{K(1+K)^n}{\bar{\gamma}}\right) \gamma^n \exp\left(-\frac{(1+K)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) d\gamma \\ &= \frac{f_x}{2N\ln 2} \frac{(1+K)e^{-K}}{\bar{\gamma}} \sum_{n=0}^{\infty} (n!)^{-2} \left(\frac{K(1+K)^n}{\bar{\gamma}}\right)^n \times \end{aligned} \quad (9)$$

$$\left[ \int_0^\infty \ln [(f_x HWR + 2N^2)\gamma + f_x] \gamma^n \exp\left(-\frac{(1+K)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) d\gamma - \int_0^\infty \ln (f_x HWR\gamma + f_x) \gamma^n \exp\left(-\frac{(1+K)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) d\gamma \right]$$

$$\bar{C}_{SSW}^{Rician} = \frac{f_x}{2N\ln 2} \frac{(1+K)e^{-K}}{\bar{\gamma}} \sum_{n=0}^{\infty} (n!)^{-2} \left(\frac{K(1+K)^n}{\bar{\gamma}}\right)^n \sum_{j=0}^n \frac{n}{\left(\frac{1+K}{\bar{\gamma}}\right)^{j+1}} \times$$

$$\left[ \left(\frac{f_x}{f_x HWR + 2N^2}\right)^{n-j} \exp\left(\frac{f_x}{f_x HWR + 2N^2} \frac{1+K}{\bar{\gamma}}\right) I\left(-n+j, \frac{f_x}{f_x HWR + 2N^2} \frac{1+K}{\bar{\gamma}}\right) \right] \quad (10)$$

$$- \left(\frac{1}{HWR}\right)^{n-j} \exp\left(\frac{1}{HWR} \frac{1+K}{\bar{\gamma}}\right) I\left(-n+j, \frac{1}{HWR} \frac{1+K}{\bar{\gamma}}\right) \right]$$

채널공간을 통과하면서 발생된 지연신호, 반사파, 산란 및 회절된 신호성분에 의하여 발생되게 된다. 이런 종류의 페이딩은 새도잉된 신호성분에 비하여 비교적 빠르게 변화하므로 짧은 신호 구간에서 신호의 상태를 변화시키게 된다. 페이딩의 종류는 전파환경에 따라 다양한 모델이 존재하여 각 환경에 따른 통계적 분석을 가능하게 한다.

본 논문에서는 무선채널을 다중경로 페이딩에 일반적으로 사용되는 두 채널 모델 즉, Rayleigh와 Rician 페이딩 모델로 가정한다. 여기에서 채널의 변화는 송신 데이터의 구간에서 변화가 없는 flat 페이딩 모델로 가정한다.

SSW 시스템의 채널용량은 AWGN(Adaptive White Gaussian Noise) 환경에서 다음과 같이 주어진다 [3].

$$C_{AWGN} = \frac{f_x}{2N} \log_2 \left( 1 + \frac{2N^2}{(HWR+1/WNR)f_x} \right), \quad (1)$$

여기서,  $f_x$ 는 호스트 시스템의 샘플링 주파수,  $N=2^l-1$ ,  $l$ 은 워터마킹 신호를 확산시키는데 이용된 PN 시퀀스의 길이, HWR(Host Watermarking Ratio)은 호스트 대 워터마킹 전력비를 나타내고, WNR(Watermarking Noise Ratio)은 워터마킹 대 노이즈 전력비를 나타낸다.

한편, Shannon의 평균 채널용량 식은 다음과 같이 주어진다 [4].

$$\bar{C} = B \int_0^\infty \log_2(1+\gamma) p_\gamma(\gamma) d\gamma. \quad (2)$$

### 1. Rayleigh 페이딩 채널

Rayleigh 페이딩 모델은 직접파가 존재하지 않는 환경에서의 다중경로 페이딩을 모델링하는데 주로 사용된다. Rayleigh 페이딩의 PDF(Probability density Function)는 지수적 분포를 따르며 다음과 같이 주어진다 [5].

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \exp(-\gamma/\bar{\gamma}), \quad \gamma \geq 0. \quad (3)$$

식 (2)로부터 SSW 시스템의 평균채널용량은 WNR을  $\gamma$ 로 대체하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

주어진 적분은 로그항을 정리한 후 로그의 특성을 이용하여 분자와 분모를 각각 나누어 식 (5)와 같이 적분을 수행할 수 있다.

각 적분을 부분적분 수행한 후, [6, 3.383.10]의 적분식을 이용하여 식 (6)의 Rayleigh 페이딩 채널에서의 SSW 시스템의 채널용량 식을 얻을 수 있다. 여기서,  $\Gamma(\cdot)$ 는 불완전 감마함수이며 [6, 8.359.1]을 이용하여 근사화된 값을 찾을 수 있다.

### 2. Rician 페이딩 채널

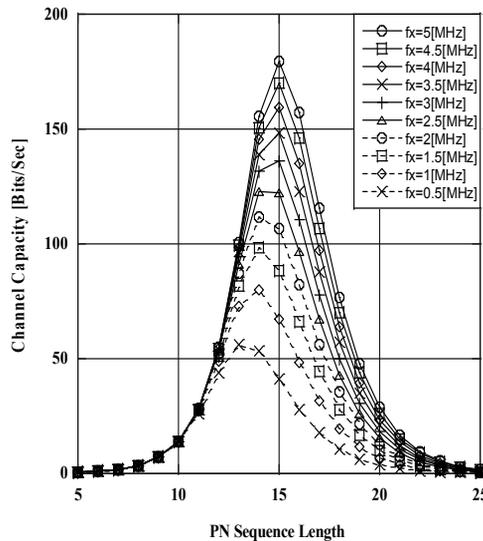
Rayleigh 페이딩 채널과 달리 Rician 페이딩 채널은 강력한 하나의 직접파와 상대적으로 약한 많은 불규칙 성분을 포함하는 전파모델이다. Rician 페이딩의 PDF는 식 (7)과 같이 주어진다 [5]. 여기서  $K$ 는

Rician 페이딩 계수이며,  $I_0(\cdot)$ 는 1종 0차 변형된 베셀 함수를 나타낸다. [6, 8.447.1]을 이용하여 Rician 페이딩 채널의 PDF를 식 (8)과 같은 형태로 변환할 수 있다. 여기서  $K=n^2$ 의 관계를 갖는다.  $n$ 값은 0(Rayleigh 페이딩 즉, 직접파가 존재하지 않는 경우)에서부터 무한대(페이딩이 없는 경우 즉, 하나의 직접파만 존재하는 경우)의 값을 가진다. 앞서의 Rayleigh 페이딩 채널모델에서와 비슷하게 Rician 페이딩 채널에서의 평균 채널용량은 식 (9)와 같이 유도할 수 있다.

각 적분항을 [6, 2.321.2]와 [6, 3.383.10]을 이용하여 정리 한 후, [6, 8.352.8]을 이용하면 식 (10)과 같이 근사화된 수식을 얻을 수 있다.

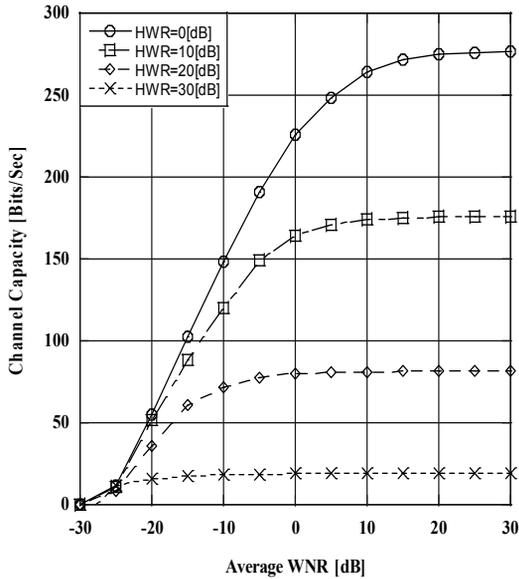
## IV. 모의실험

<그림 >2는 Rayleigh 페이딩 채널에서 호스트 시스템의 샘플링 주파수 별 적용된 PN 시퀀스 길이에 따른 채널용량의 변화를 보이고 있다. 최적의 채널용량은 PN 시퀀스의 길이에 선형적이지 않다는 것을 알 수 있고,



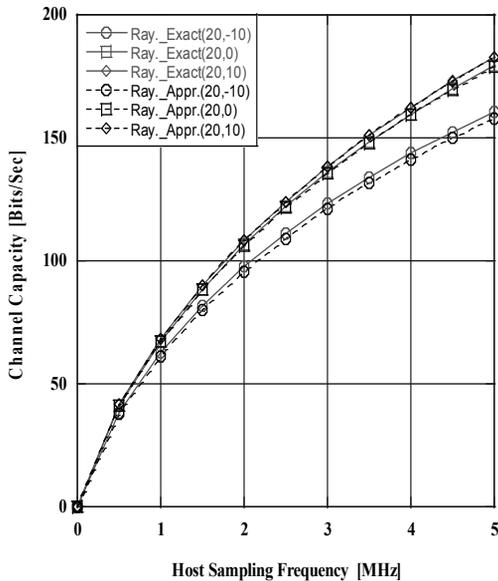
<그림 2> Rayleigh 채널에서  $f_x$  별 PN길이에 따른 채널용량 (HWR=20[dB], WNR=0[dB])

<Fig. 2> Channel capacity versus PN sequence length according to  $f_x$  in Rayleigh fading channel



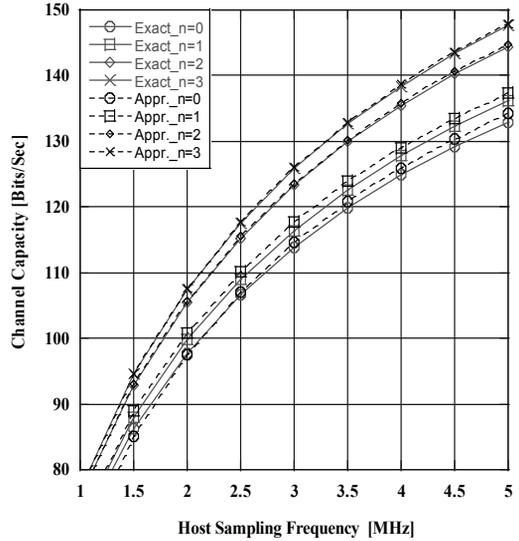
<그림 3> Rayleigh 채널에서의 HWR별 평균 WNR에 따른 채널용량 ( $f_x=1$ [MHz], PN=14)

<Fig. 3> Channel capacity versus average WNR according to HWR in Rayleigh fading channel



<그림 4> Rayleigh 채널에서 다양한 (HWR,WNR) 조합별  $f_x$ 에 따른 채널용량 (PN=15)

<Fig. 4> Channel capacity versus  $f_x$  according to various combination in Rayleigh fading channel



<그림 5> Rician 채널에서의 페이딩 계수별  $f_x$ 에 따른 채널용량 (HWR=20[dB], WNR=-10[dB], PN=14)  
 <Fig. 5> Channel capacity versus  $f_x$  according to fading factor n in Rician fading channel

또한 호스트 시스템의 샘플링 주파수에 따라 채널용량은 선형적으로 증가하는 것을 보인다. 그러나 샘플링 주파수가 증가함에 따라 채널용량의 증가폭은 점점 줄어들게 된다. <그림 3>은 Rayleigh 페이딩 채널에서 HWR과 수신된 평균 WNR에 따른 채널용량의 변화를 보여준다. SSW 기법의 특성상 위터마킹 신호의 레벨은 호스트 신호에 직접적으로 영향을 주게 되므로 가능한 낮을수록 좋다. 그러나 위터마킹의 신호의 레벨이 너무 낮아지게 되면 그림에서 보이는 바와 같이 그 채널용량이 상당히 줄어들게 되므로 적절한 위터마킹 신호의 레벨을 정하는 것이 중요하다.

<그림 4>는 Rayleigh 페이딩 채널에서 다양한 (HWR, WNR) 조합별  $f_x$ 에 따른 채널용량의 변화를 보이고 있다. 또한 그림에서는 유도된 채널용량의 근사화된 수식 (6)이 이론적인 적분값 수식 (5)와 거의 일치함을 보이고 있다. 그림에서 보듯이 고정된 HWR에서는 WNR의 레벨이 증가할수록 채널용량의 증가폭은 점점 줄어들게 된다. <그림 5>는 Rician 페이딩 채널에서 호스트 샘플링 주파수에 따른 채널용량의 변화를 보이고 있다. 또한 페이딩 계수에 따른

채널용량의 변화를 보이며, Rician 페이딩 채널에서 유도된 채널용량의 근사화된 수식 (10)이 이론적인 적분값 수식 (9)와 거의 일치함을 보였다.

## V. 결 론

본 논문에서는 다중경로 채널 모델로써 일반적으로 사용되는 Rayleigh 페이딩 채널과 Rician 페이딩 채널에서 SSW 시스템의 채널용량을 정보이론적인 관점에서 유도하고 분석하였다. 수식을 바탕으로 수행된 모의실험으로부터 SSW 시스템의 채널용량을 HWR, WNR, PN 길이 그리고 호스트 시스템 등 다양한 조합에 따라 분석하였다. 분석 결과 이론적으로 유도한 값과 모의실험 결과가 거의 일치함을 보였다. 본 논문에서 유도된 SSW 시스템을 위한 채널용량 수식은 ITS 시스템에서의 SSW 기법을 사용하는 방송 및 무선 통신 분야에 적용될 수 있다.

## 참 고 문 헌

[1] J. N. Bae, J. S. Cha, and J. Y. Kim, "Novel TxID

scheme of ternary ZCD code with watermarking for T-DMB systems," *Proc. Int. Conf. Consumer Electronics*, Jan. 2010.

- [2] X. Wang, Y. Wu, and B. Caron, "Transmitter identification using embedded pseudo random sequences," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 50, pp. 244-252, Sept. 2004.
- [3] S. Sedghi, M. Khademi, and N. Cvejic, "Analysis of channel capacity of spread spectrum audio watermarking system," *Proc. Int. Symp. Intelligent Signal Processing and Communications*, pp. 175-178, Dec. 2006.
- [4] W. C. Y. Lee, "Estimate of channel capacity in Rayleigh fading environment," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 39, no. 3, pp. 187-190, Aug. 1990.
- [5] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, Wiley, 2005.
- [6] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products 7th ed.*, Academic, San Diego, CA, 2007.

저자소개



김 주 찬 (Kim, Joo-Chan)

2006년 : 광운대학교 박사과정 수료(이동통신공학전공)  
2007년 ~ 2008년 : 아시아나 IDT, RFID/USN 주임연구원  
2009년 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 박사과정



배 정 남 (Bae, Jung-Nam)

2009년 : 광운대학교 전자공학과 학사  
2009년 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 석사과정



김 진 영 (Kim, Jin-Young)

1998년 : 서울대학교 전자공학과 박사  
1999년 : 미국 Princeton University, Research Associate  
2000년 : SK 텔레콤 네트워크연구원 책임연구원  
2009년 : 미국 M.I.T 공대 Visiting Scientist  
2010년 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 교수