

대역확산 워터마킹 시스템의 채널용량 분석

정회원 김 주 찬*, 준회원 배 정 남*, 종신회원 김 진 영*

Analysis of Channel Capacity for Spread Spectrum Watermarking Systems

Joo-Chan Kim* *Regular Member*, Jung-Nam Bae* *Associate Member*, Jin-Young Kim* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 대역확산 워터마킹 시스템을 무선채널 환경에서 부가데이터를 전송하기 위하여 적용할 경우 채널에 의한 영향을 분석하기 위하여 채널용량식을 정보이론적 관점에서 유도하고 분석한다. 부가데이터를 기존의 무선통신 시스템을 통하여 전송하기 위해서는 무선채널을 통과하는 워터마킹 신호가 채널에 의해서 어떻게 영향을 받고, 어느 정도의 데이터를 신뢰할 만한 수준으로 전송가능한지를 판단하는 기준으로서의 채널용량에 관한 연구가 필수적이다. 수치적 결과로부터 대역확산 워터마킹 시스템의 채널용량은 HWR, WNR, PN 길이 및 호스트 시스템의 샘플링 주파수에 의해 결정됨을 알 수 있었다. 또한 적용된 Nakagami-m 페이딩 채널과 Log-normal 섀도잉 채널에서 채널 상태 변화에 따른 채널용량의 변화를 확인하였고 다이버시티를 적용했을 경우의 채널용량의 향상 또한 확인하였다. 본 논문에서 다룬 대역확산 워터마킹 시스템의 채널용량의 수식적 결과는 PN 시퀀스를 이용하는 일반적인 대역확산 워터마킹 시스템에 적용할 수 있다.

Key Words : Channel Capacity, Multipath/Shadowing, Spread Spectrum Watermarking

ABSTRACT

In this paper, we derive and analyze the channel capacity of the spread spectrum watermarking (SSW) system as an information-theoretic point of view in closed-form approximation formula in order to analyze the effect of the wireless multipath/shadowing channel. It is important to analyze the channel capacity to transmit an additive data through existing wireless channel by the SSW system. From the results, we confirm that the channel capacity of the SSW system can be determined by the HWR, WNR, PN length and host sampling frequency. Also, we verified that the variation of the channel capacity when the SSW system applied to Nakagami-m fading and Log-normal shadowing channel. The results of this paper can be applied to general spread spectrum watermarking system.

I. 서 론

디지털 워터마킹 기법은 원래 디지털 오디오, 비디오, 그래픽, 텍스트 등의 멀티미디어 저작권 보호를 위하여 생겨났다. 대역확산 워터마킹 기법(SSW:

Spread Spectrum Watermarking)은 특히 무선채널에서의 강인함이 우수하며, 수신단에서의 신호검출이 채널 상관기에 의해 쉽게 이루어지기 때문에 널리 사용되는 방식이다.

최근에는 이러한 워터마킹 기법을 이동통신 및

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2010-(C1090-1011-0005))

* 광운대학교 전자융합공학과 UCL 연구실(jn1112@kw.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-03-092, 접수일자 : 2010년 3월 6일, 최종논문접수일자 : 2010년 4월 20일

방송의 영역에 접목하려고 하는 시도들이 활발히 연구되고 있다¹⁾. 워터마킹 기법을 비단 정보의 불법복제나 불법사용 등을 방지하려는 목적뿐만 아니라 기존의 시스템에 별다른 영향을 끼치지 않으면서 추가적인 데이터를 보낼 수 있는 수단으로 사용할 수 있기 때문이다.

이러한 디지털 워터마킹 기법에 의해 생성된 부가데이터를 무선통신 시스템에 적용하기 위해서는 무선채널을 통과하는 워터마킹 신호가 채널에 의해 어떻게 영향을 받고, 어느 정도의 데이터를 신뢰할 만한 수준으로 전송가능함을 판단하는 기준으로서의 채널용량에 관한 연구가 필수적이다.

따라서, 본 논문에서는 대역확산 워터마킹 시스템을 무선채널 환경에서 부가데이터를 전송하기 위하여 적용될 경우 채널에 의한 영향을 분석하기 위하여 채널용량 수식을 근사화하여 유도하고 그 결과를 바탕으로 수식적 결과를 도출한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 대역확산 워터마킹 시스템을 간략히 소개한 후, III장에서 채널용량 수식을 유도하고 IV장에서 유도된 수식을 바탕으로 수행된 모의실험 결과를 분석한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 대역확산 워터마킹 시스템

그림 1은 SSW 시스템의 구조도를 나타낸다. SSW 시스템은 기존의 시스템인 호스트 부분과 워터마킹 데이터를 발생하는 워터마킹 재생기로 구성된다. 워터마킹 재생기는 추가데이터를 발생시키는 부분과 PN(Pseudo Noise) 시퀀스를 이용하여 워터마킹 신호를 대역확산 시키는 확산기를 포함한다. PN 시퀀스는 백색잡음과 유사한 통계적 특성을 갖도록 만들어진 주기 신호로 우수한 자기상관 특성을 가지며 간섭에 대한 영향이 적다. 대역확산된 워터마킹 신호는 작은 크기로 삽입되어도 PN 시퀀스의 자기상관 특성에 의해 데이터 추출이 가능하다. 워터마킹 신호는 PN 코드를 이용하여 대역 확산되고 호스트의 신호에 더해져 무선채널을 통하여 전송되게 된다.

전송된 신호는 무선채널을 통과하는 동안 채널효과에 의해 왜곡되어 수신된다. 수신된 신호는 수신단에서 상관기를 통하여 송신단에서 사용된 PN 시퀀스를 찾아내게 되고, 찾아낸 PN 시퀀스를 이용하여 워터마킹된 신호를 복원한다.

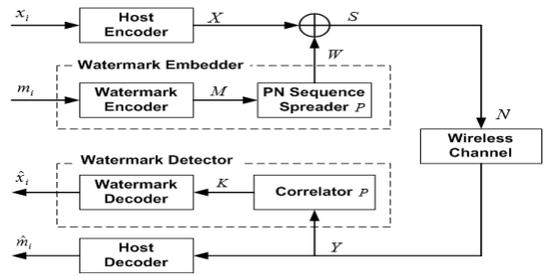


그림 1. 대역확산 워터마킹 구조도

III. 채널 용량 분석

본 논문에서는 다중경로 페이딩 모델로 Nakagami-m 페이딩 채널을 고려하고 새도잉 모델로는 Log-normal 새도잉 채널을 고려한다.

3.1 Nakagami-m Fading Channel with MRC

주파수 비선택적 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널에서의 채널용량은 Shannon에 의해 다음과 같이 알려져 있다²⁾.

$$C_{AWGN} = B \log_2(1 + \gamma). \quad (1)$$

페이딩 채널에서의 평균 채널용량은 AWGN 채널에서의 채널용량과 해당 모델의 확률밀도함수를 곱하여 다음과 같이 적분하여 얻을 수 있다³⁾.

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

본 논문에서 고려하는 시스템은 대역확산 워터마킹 시스템으로, AWGN 채널에서의 채널용량은 다음과 같다⁴⁾.

$$C_{SSW}^{AWGN} = \frac{f_x}{2N} \log_2 \left(1 + \frac{2N^2}{(HWR + 1/WNR)f_x} \right), \quad (3)$$

여기서, f_x 는 호스트 샘플링 주파수, N 은 대역확산기에 사용된 PN 시퀀스의 길이, HWR 은 호스트대 워터마킹 신호전력비 그리고 WNR 은 워터마킹 신호대 잡음 전력비를 나타낸다. 워터마킹 시스템 측면에서 보면 전송된 신호가 무선채널에 의해 영향을 받는 변수는 오직 수신되는 WNR 이기 때문에 이를 γ 로 볼 수 있다. 한편, Nakagami-m 페이딩 채널에서의 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다⁵⁾.

$$p_{\gamma}^{N_{mrc}}(\gamma) = \left(\frac{m}{\gamma}\right)^{Lm} \frac{\gamma^{Lm-1}}{\Gamma(Lm)} \exp\left(-m\frac{\gamma}{\gamma}\right), \gamma \geq 0 \quad (4)$$

여기에서 $\bar{\gamma}$ 는 평균수신 WNR을 나타내고 L 은 다이버시티 가지의 개수, m 은 Nakagami 페이딩 계수를 나타낸다. 수식 (2)에서처럼 (3)번과 (4)번 수식을 곱한 후 적분을 취하면 채널용량 수식 (5)를 얻는다. 수식 (5)의 적분항은 로그 특성에 의하여 분자와 분모를 분리하여 두 개의 항으로 나눌 수 있다. 수식 (6)은 수식 (5)의 첫 번째 적분항을 [6, 2.321.2]을 이용하여 부분 적분한 결과를 보여준다. 수식 (6)에서 두 번째 줄은 0으로 수렴하고, 마지막 세 번째 줄의 적분항만 남게 된다. 수식 (7)은 수식 (6)의 적분항을 [6, 3.383.10]을 이용하여 계산한 결과이다. 여기에서 $\Gamma(a,b)$ 는 불완전 감마함수으로써 [6, 8.350.2]에 정의되고 [6, 8.352.8]에 의해 근사화된 결과를 얻을 수 있다. 수식 (5)의 두 번째 적분항 역시 위와 같은 방식으로 구할 수 있고, 그 결과를 수식 (5)에 대입하면 최종적으로 Nakagami-m 페이

딩 채널에서 MRC 다이버시티 기법을 적용한 경우의 SSW 시스템의 채널용량을 수식 (8)과 같이 얻는다.

3.2 Log-normal Shadowing Channel

Log-normal 분포의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 주어진다^[7].

$$p_{\gamma}^{LN} = \frac{\xi}{\sigma\gamma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(10\log_{10}\gamma - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (9)$$

여기서 $\xi = 10/\ln 10 = 4.3429$ 이며 μ (dB)와 σ (dB)는 $10\log_{10}\gamma$ 의 평균과 표준편차이다.

Nakagami-m 페이딩 모델에서와 마찬가지로 Log-normal 새도잉 채널에서의 평균채널용량은 수식 (10)과 같이 구할 수 있다. 첫 번째 줄의 적분항은 로그 특성에 따라 분자와 분모를 분리하여 계산할 수 있으며 각 적분항은 수식 (11)의 Gauss-Hermite quadrature 수식을 이용하여 근사화 시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{C}_{SSW}^{Nkqm} &= \frac{f_x}{2N\ln 2} \int_0^{\infty} \ln\left(\frac{(f_x HWR + 2N^2)\gamma + f_x}{f_x HWR + f_x}\right) \left(\frac{m}{\gamma}\right)^{Lm} \frac{\gamma^{Lm-1}}{\Gamma(Lm)} \exp\left(-\frac{m}{\gamma}\gamma\right) d\gamma \\ &= \frac{f_x}{2N\ln 2\Gamma(Lm)} \left(\frac{m}{\gamma}\right)^{Lm} \left[\int_0^{\infty} \ln[(f_x HWR + 2N^2)\gamma + f_x] \gamma^{Lm-1} \exp\left(-\frac{m}{\gamma}\gamma\right) d\gamma \right. \\ &\quad \left. - \int_0^{\infty} \ln(f_x HWR\gamma + f_x) \gamma^{Lm-1} \exp\left(-\frac{m}{\gamma}\gamma\right) d\gamma \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &\int_0^{\infty} \ln[(f_x HWR + 2N^2)\gamma + f_x] \gamma^{Lm-1} \exp\left(-\frac{m}{\gamma}\gamma\right) d\gamma \\ &= -\ln[(f_x HWR + 2N^2)\gamma + f_x] \exp\left(-\frac{m}{\gamma}\gamma\right) \sum_{j=1}^{Lm} \frac{(Lm-1)!}{(Lm-j)!} \left(\frac{m}{\gamma}\right)^{-j} \gamma^{Lm-j} \Big|_0^{\infty} \\ &\quad + \sum_{j=1}^{Lm} \frac{(Lm-1)!}{(Lm-j)!} \left(\frac{m}{\gamma}\right)^{-j} \int_0^{\infty} \frac{f_x + 2N^2}{(f_x HWR + 2N^2)\gamma + f_x} \gamma^{Lm-j} \exp\left(-\frac{m}{\gamma}\gamma\right) d\gamma, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &\int_0^{\infty} \frac{1}{\gamma + \frac{f_x}{f_x HWR + 2N^2}} \gamma^{Lm-1} \exp\left(-\frac{m}{\gamma}\gamma\right) d\gamma \\ &= \left(\frac{f_x}{f_x HWR + 2N^2}\right)^{Lm-j} \exp\left(\frac{f_x}{f_x HWR + 2N^2} \frac{m}{\gamma}\right) \Gamma(Lm-j+1) I\left(-Lm+j, \frac{f_x}{f_x HWR + 2N^2} \frac{m}{\gamma}\right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{C}_{SSW}^{Nkqm} &= \frac{f_x}{2N\ln 2\Gamma(Lm)} \left(\frac{m}{\gamma}\right)^{Lm} \sum_{k=1}^{Lm} (Lm-1)! \left(\frac{m}{\gamma}\right)^{-k} \\ &\quad \times \left[\left(\frac{f_x}{f_x HWR + 2N^2}\right)^{Lm-k} \exp\left(\frac{f_x}{f_x HWR + 2N^2} \frac{m}{\gamma}\right) I\left(-Lm+k, \frac{f_x}{f_x HWR + 2N^2} \frac{m}{\gamma}\right) \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{1}{HWR}\right)^{Lm-k} \exp\left(\frac{1}{HWR} \frac{m}{\gamma}\right) I\left(-Lm+k, \frac{1}{HWR} \frac{m}{\gamma}\right) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{C}_{SSW}^{LN} &= \frac{f_x}{2N} \int_0^\infty \log_2 \left(\frac{(f_x HWR + 2N^2)\gamma + f_x}{f_x HWR + f_x} \right) \frac{\xi}{\sigma\gamma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(10\log_{10}\gamma - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) d\gamma \\ &= \frac{f_x \xi}{2N\sigma\sqrt{2\pi} \ln 2} \left[\int_0^\infty \ln[(f_x HWR + 2N^2)\gamma + f_x] \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{(10\log_{10}\gamma - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) d\gamma \right. \\ &\quad \left. - \int_0^\infty \ln(f_x HWR\gamma + f_x) \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{(10\log_{10}\gamma - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) d\gamma \right], \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} \bar{C}_{SSW}^{LN} &= \frac{f_x \xi \ln 10}{2N\sigma\sqrt{\pi} 10 \ln 2} \\ &\quad \times \left[\sum_{n=1}^N h_{s_n} \ln \left((f_x HWR + 2N^2) \exp\left(\frac{\ln 10}{10} (\sqrt{2} \sigma s_n + \mu)\right) + f_x \right) \right. \\ &\quad \left. - \sum_{n=1}^N h_{s_n} \ln \left(f_x HWR \exp\left(\frac{\ln 10}{10} (\sqrt{2} \sigma s_n + \mu)\right) + f_x \right) \right] \\ &= \frac{f_x \xi \ln 10}{2N\sigma\sqrt{\pi} 10 \ln 2} \sum_{n=1}^N h_{s_n} \ln \left(\frac{(f_x HWR + 2N^2) \exp\left(\frac{\ln 10}{10} (\sqrt{2} \sigma s_n + \mu)\right) + f_x}{f_x HWR \exp\left(\frac{\ln 10}{10} (\sqrt{2} \sigma s_n + \mu)\right) + f_x} \right). \end{aligned} \tag{12}$$

$$\int_{-\infty}^\infty f(x) \exp(-x^2) dx \approx \sum_{k=1}^K h_{x_k} f(x_k), \tag{11}$$

여기서 $f(x)$ 는 임의의 실수 함수, K 는 근사화 차수, $h_{x_k} (k=1, 2, \dots, K)$ 는 Gauss-Hermite quadrature weight 값이며, x_k 에 따른 h_{x_k} 의 값이 표로 주어진다^[8]. 수식 (11)을 이용하여 Log-normal 세도잉 채널에서 대역확산 위터마킹 시스템의 채널용량을 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

IV. 모의실험 결과

그림 2는 Nakagami-m 페이딩 채널에서 호스트 시스템의 샘플링 주파수에 따른 채널용량 대 PN 시퀀스 길이 그래프를 보여준다. 그림으로부터 적용된 PN 시퀀스의 특정한 길이에 따라 채널용량이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 그림 3~6에서는 각 채널에서의 채널용량을 exact결과와 함께 본 논문에서 근사화하여 유도된 수식적 결과를 함께 나타낸다. exact한 결과는 해당 수식을 구분구적법을 통해 구한 값이다.

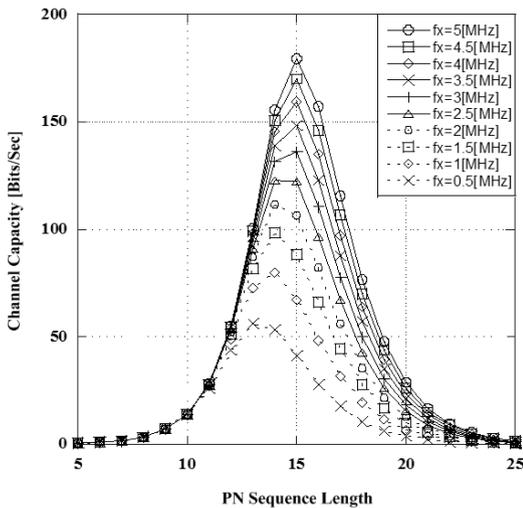


그림 2. Nakagami-m 채널에서 호스트 샘플링 주파수에 따른 채널용량 대 PN 시퀀스 길이 (HWR=20[dB], WNR=0[dB], m=1, L=1)

그림 3은 HWR를 변경해 가면서 평균수신 WNR에 따른 채널용량의 그래프를 보여준다. HWR이 증가하면 채널용량이 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 제안된 시스템을 적용하기 위해서는 호스트 시스템에 최대한 영향을 주지 않으면서 성능을 유지하는 것이 중요하기 때문에 HWR과 WNR의 값을 적절하게 선택해야 한다. 실제 시스템에서는 HWR이 20~30[dB] 사이에서 결정되는 것이 바람직하다.

그림 4는 Nakagami-m 페이딩 채널에서 페이딩 계수인 m값에 따른 채널용량 대 호스트 샘플링 주파수 그래프를 보여준다. m값이 증가할수록 채널의 상태는 좋아지며 따라서 채널용량 또한 증가하게 된다. 위터마킹되는 신호의 측면에서 보면 WNR이 높을수록 채널의 변화에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 또한 그래프로부터 WNR이 높을수록 근사화가 더 정확해지는 것을 알 수 있다.

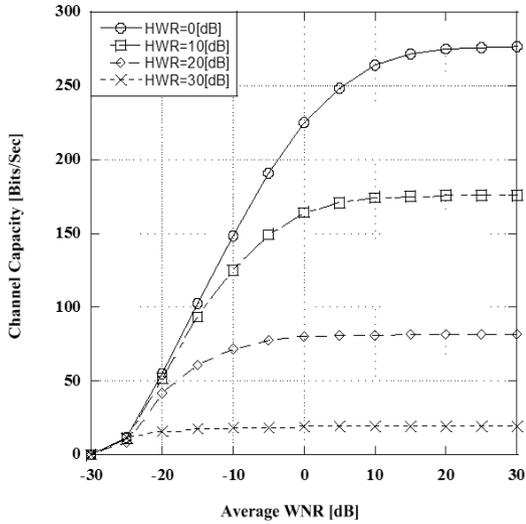


그림 3. Nakagami-m 채널에서 HWR에 따른 채널용량 대 평균수신 WNR 그래프 ($f_x=1$ [MHz], $PN=14$, $m=1$, $L=1$)

그림 5는 MRC 다이버시티 계수를 증가함에 따른 채널용량 대 호스트 샘플링 주파수 관계를 보여 준다. 일반적으로 다이버시티의 계수는 2일 때가 성능의 향상이 제일 크고 그 이상에서는 성능의 향상이 점점 줄어드는 것으로 알려져 있다. 그래프로부터 WNR이 낮을수록 다이버시티로 인한 성능 향상이 크게 증가되는 것을 알 수 있다.

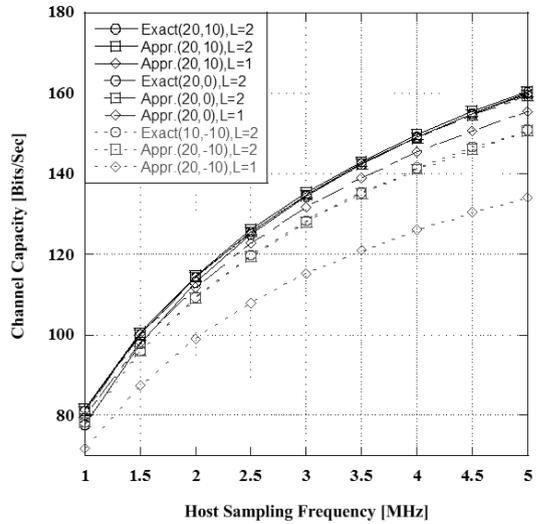


그림 5. Nakagami-m 채널에서 (HWR, WNR) 및 다이버시티 계수에 따른 채널용량 대 호스트 샘플링 주파수 그래프 ($PN=14$, $m=1$)

그림 6은 Log-normal 새도잉 채널에서 채널용량 대 호스트 샘플링 주파수 그래프를 보여주고 있다. 여기서 근사화는 근사화 차수 $K=2$ 일 때 나타난다. 표준편차에 따라 채널의 상태가 변하게 되며 그 값이 증가될수록 채널의 상태가 새도잉 효과를 많이 받는 것을 나타낸다. 또한 채널의 상태가 좋을수록 근사화가 잘 되는 것을 알 수 있다.

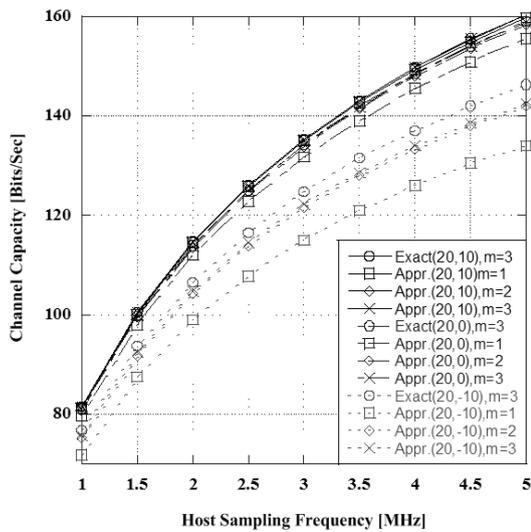


그림 4. Nakagami-m 채널에서 (HWR, WNR) 및 다중경로 계수에 따른 채널용량 대 호스트 샘플링 주파수 그래프 ($PN=14$, $L=1$)

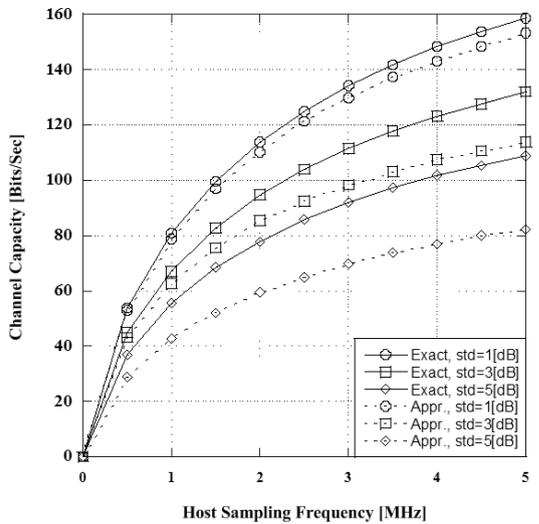


그림 6. Log-normal 새도잉 채널에서 표준편차에 따른 채널 용량 대 호스트 샘플링 주파수 그래프 (HWR=20[dB], $PN=14$, $m=0$)

V. 결 론

본 논문에서는 대역확산 워터마킹 시스템을 무선 통신 시스템에 적용할 경우에 필수적으로 고려해야 하는 페이딩 및 새도잉 채널에서의 채널용량을 수 식적으로 유도해 보고 유도된 수식을 바탕으로 모 의실험을 진행하였다. 결과로부터 대역확산 워터마 킹 시스템의 채널용량은 HWR, WNR, PN 길이 및 호스트 시스템의 샘플링 주파수에 의해 결정됨을 알 수 있었다. 또한 적용된 Nakagami-m 페이딩 채 널과 Log-normal 새도잉 채널에서 채널 상태 변화 에 따른 채널용량의 변화를 확인하였고 다이버시티 를 적용했을 경우의 채널용량의 향상 또한 확인하 였다. 본 논문에서 적용한 대역확산 워터마킹 시스 템은 PN 시퀀스를 이용하는 일반적인 대역확산 워 터마킹 시스템에 적용할 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," in *proc. on Int' Conf. on Consumer Elec.*, Jan., 2010.
- [2] C. E. Shannon and W. Weaver, *The mathematical theory of communication*, Univ of Illinois Pr, 1963.
- [3] W. C. Y. Lee, "Estimate of channel capacity in Rayleigh fading environment," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, Vol.39, No.3, pp.187-190, Aug., 1990.
- [4] S. Sedghi, M. Khademi, and N. Cvejjic, "Analysis of channel capacity of spread spectrum audio watermarking system," in *Proc. on Int' Symp. on Intelligent Signal Processing and Commun.*, pp.175-178, Dec., 2006.
- [5] M.-S. Alouini and A. Goldsmith, "Capacity of Nakagami multipath fading channels," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, Vol.1, pp.358-362, May, 1997.
- [6] I. S. Gradshteyn, and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 7th ed., Academic, SanDiego, CA, 2007.
- [7] M. K. Simon, M.-S. Alouini, *Digital Communi-cation over Fading Channels*, Wiley, 2005.
- [8] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of*

Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, 9th printing, Dover, NY: U.S. Department of Commerce, 1972.

김 주 찬 (Joo-Chan Kim)

정회원



2006년 2월 광운대학교 전자공
학과 박사과정 수료
2007년~2008년 아시아나 IDT
RFID/USN연구소 주임연구원
2009년 3월~현재 광운대학교
전자융합공학과 박사과정
<관심분야> 디지털 통신, 4G

이동통신, 무선통신

배 정 남 (Jung-Nam Bae)

준회원



2009년 2월 광운대학교 전파공
학과 학사
2009년 3월~현재 광운대학교
전자융합공학과 석사과정
<관심분야> 디지털 방송통신, 4G
이동통신, 무선통신, UWB

김 진 영 (Jin-Young Kim)

종신회원



1998년 2월 서울대학교 전자공
학과 박사
2000년 2월 미국 Princeton Uni-
versity Research Associate
2001년 2월 SK텔레콤 네트워크
연구소 책임 연구원
2001년 3월~현재 광운대학교
전자융합공학과 부교수

<관심분야> 디지털통신, 무선통신, UWB, 부호화,
인지무선기술, 4G 이동통신