논문 2010-4-21

스펙트럼 효율 향상을 위한 부가 데이터 전송 시스템에서의 채널용량

Channel Capacity of Additional Data Transmission System for Spectrum Efficiency Improvement

김주찬*, 김진영**

Joochan Kim* and Jin Young Kim**

요 약 본 논문에서는 스펙트럼 효율 향상을 위한 부가 데이터 전송 시스템을 제안하고 채널용량 식을 근사화 하여 유도 한다. 대역확산 워터마킹 기법이 워터마킹 신호 삽입기로 이용되었고 다중경로 채널로는 나카가미-q (Hoyt) 모델을 고려하였다. 수식적 결과는 무선 페이딩 채널에서 제안된 시스템의 채널 용량 변화를 보여준다. 결과로부터 워터마킹 시스템의 채널용량이 페이딩 계수와 호스트 샘플링 주파수, 호스트-워터마킹 전력비, 워터마킹-잡음 전력비 및 확산코드 길이에 의해서 영향 받음을 확인한다.

Abstract In this paper, we propose additional data transmission system for spectrum efficiency improvement and derive channel capacity formula as a approximated closed-form. Spread spectrum watermarking scheme is selected for the watermarking embedder. Nakagami-q (Hoyt) model is considered as a multipath fading channel. Numerical results show the channel capacity variation of the proposed system in wireless fading channel. From the results, we confirm that the channel capacity of the watermarking system is affected by the fading coefficient and system parameters such that host sampling frequency, host-to-watermark ratio, watermark-to-noise ratio, and PN sequence length.

Key words : Spectrum efficiency, Channel capacity, Wireless fading channel, Watermarking system

Ⅰ. 서 론

최근 들어 무선 주파수 자원의 한계성으로 인한 문제들이 이슈가 되면서 무선주파수를 이용하는 이동통신시스템, 방송시스템 및 다양한 전파시스템들에 대한 주파수 할당에 관한 정책들에 대한 관심이 높아지고 있다. 이는 기본적으로 무선 주파수 자원이 이론적으로는 무한대의 값을 가지지만 실제로 가용한 스펙트럼은 여러 가지 기술상의 이유로 제한되기 때문이다. 더군다나 무선 주파수 자원은 그 영역에 따라 고유의 전파특성을 가지기 때문에 서비스 사업자 측면에서는 자신들이 서비스하고자 하는 시스템과 관련하여 주파수 특성이 좋은 대역을 선호하기 때문에 이러한 논의는 향후에도 많은 관심을 이끌 것으로 기대된다. 더군다나 1990년대 이후부터 본격적으로 상용서비스 되고 있는 이동통신 시스템으로 인하여 이제는 누구나 무선 통신 시스템을 사용하는 것이 더 이상 낯 선 풍경이 아니며, 유비쿼터스 시대를 앞두고 있는 상황에서 무선뿐만 아니라 유선이 함께 서비스 되고 다양한 디지털 콘텐츠가 산재해 있는 네트웍을 통하여 서비스되기 때문에 주파수 자원의 효율적 관리의 중요성은 한층 높아져 가고 있다[1].

이렇듯 한정된 주파수 자원을 효율적으로 관리하기

*정회원, 광운대학교 전자융합공학과
**정회원, 광운대학교 전자융합공학과 (교신저자)
접수일자 2010.4.10, 수정일자 2010.7.12
게재확정일자 2010.8.21

위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 최근 많은 관심을 받고 있는 Cognitive Ratio기술, UWB기술, OFDM전송 기법 및 단일주파수망(single frequency network: SFN) 등은 이러한 노력들의 일환이다. 또한 관련 법규의 개정을 통해서 지난 수십 년간 바뀌지 않는 주파수 할당 문제에 있어서의 재정비가 정부차원에서 이루어지고 있는 실정이다. 그럼에도 불구하고 신규 산업이 끊임없이 발생하는 상황에서는 수요와 공급의 원칙에 따라 무선 주파수 자원의 공급이 수요를 못 따라가고 있다.

최근에는 비교적 간단한 방식으로 기존의 시스템과 스펙트럼을 공유하는 디지털 워터마킹 기법이 새로운 대안으로 주목받고 있다[2]. 디지털 워터마킹 기법은 원래 디지털 콘텐츠의 저작권 보호 및 불법복제 등을 차단하기 위하여 암호화 방식과 함께 사용되던 기술이다. 비교적 짧은 역사를 가지고 있는 이 기술은, 최근에는 불법복제 등의 방지를 위한 고유 목적 이외에도 변복조기법, 채널코딩기법 및 부통신채널로의 응용으로 그 활용범위가 넓어지고 있다.

본 논문에서는 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 위하여 비교적 간단하면서도 그 비용이 저렴한 디지털 워터마킹 기법을 이용하여 기존의 시스템에 적용하기 위한 시스템을 제안한다. 또한, 무선통신 환경에서 이를 적용하기 위하여 무선채널에서 필수적으로 동반되는 페이딩 효과로 인한 채널용량의 변화를 알아보기 위하여 제안된 시스템의 채널용량 수식을 근사화 하여 유도한다.

본 논문의 구성은 Ⅱ장에서 제안된 시스템을 설명하고, Ⅲ장에서 무선페이딩 환경 하에서의 채널용량 수식을 유도한다. Ⅳ장에서는 유도된 수식을 바탕으로 수식적 결과를 보이고 Ⅴ장에서 결론을 도출한다.

Ⅱ. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 제안하는 부가 데이터 전송 시스템을 보인다. 편의 상 기존의 시스템을 호스트라 하고 데이터를 부가 시키는 시스템을 워터마킹 시스템이라 한다. 이 시스템에서 가장 중요한 것은 부가 데이터 시스템이 기존의 시스템에 가능한 최소한의 영향을 주어야 한다는 것이다. 그 이유는, 일반적인 시스템은 전력제한되고 스펙트럼 제한된 시스템이기 때문에 부가 데이터를 전송하기 위한 전력과 스펙트럼이 고스란히 기존 시스템에 영향을 미치기 때문이다.

부가 데이터는 그림과 같이 별도의 워터마킹 임베더를 통하여 PN 시퀀스에 의해 대역확산이 되는데 이러한 시스템을 디지털 워터마킹 기법 중에서도 대역확산 워터마킹 시스템 (spread spectrum watermarking system: SSW system)이라고 한다. 이 시스템은 다양한 워터마킹 기법 중에서 잡음 환경에 강인한 특성으로 인하여 각광받고 있으며, 그 성능은 이미 다양한 대역확산 시스템들에 의하여 입증 된 바 있다.

이러한 대역 확산 워터마킹 시스템을 기존의 시스템에 적용하기 위해서는 호스트-워터마킹 신호 레벨 간의 특성 문제 및 대역 확산 코드의 적정 길이에 의한 채널정보량이 이슈가 되고 있다. 또한 무선채널 환경에서 다중 채널로 페이딩으로 현상으로 인한 채널용량의 변화도 고려 대상이다. 다음 장에서는 이러한 의문점들을 해결하기 위한 채널용량 수식을 유도해 보기로 한다.

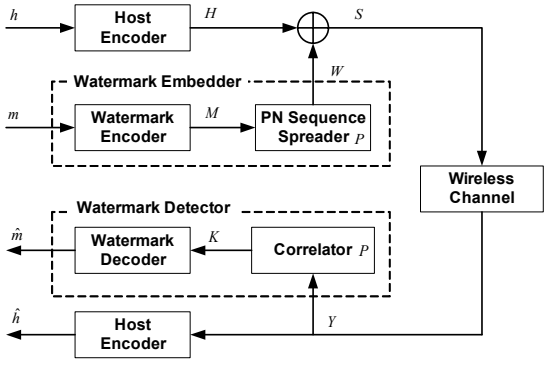

그림 1. 부가 데이터 전송 시스템
Fig. 1. Additional data transmission system

Ⅲ. 채널용량

무선 채널은 그 특성에 따라 주파수 선택적/비선택적 채널, 슬로우 페이딩/패스트 페이딩 등으로 분류 할 수 있다. 본 논문에서는 슬로우 페이딩이면서 주파수 비선택적 채널 모델로써 Nakagami-q (Hoyt) 모델을 적용한다[3]. 이 모델의 PDF는 다음과 같이 주어진다.

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{(1+q^2)}{2q\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{(1+q^2)^2\gamma}{4q^2\bar{\gamma}}\right) I_0\left(\frac{(1-q^4)\gamma}{4q^2\bar{\gamma}}\right), \quad \gamma \geq 0 \tag{1}$$

여기에서 , q는 페이딩 파라미터 이며 $0 \le q \le 1$의 값을 가지고, 특히 $q=1$일 때는 Rayleigh 페이딩과 일치하는 특성을 가진다. γ는 수신신호의 SNR이며 $\bar{\gamma}$는 평균 수신 SNR이다. I_0는 제1종 0차 변형된 베셀 함수이며 [6, 8.447.1]의 근사식을 이용하여 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_\gamma(\gamma) = ae^{-b\gamma}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{c^{2k}\gamma^{2k}}{(k!)^2}, \tag{2}$$

여기서 편의상 $a=(1+q^2)/2q\bar{\gamma}$, $b=(1+q^2)^2/4q^2\bar{\gamma}$ 그리고 $c=(1-q^4)/8q^2\bar{\gamma}$로 둔다.

페이딩 채널에서 채널용량은 해당 시스템의 AWGN 채널에서의 채널용량을 해당 채널의 PDF에 곱하여 구할 수 있다[4]. 대역확산 시스템의 AWGN 채널에서의 채널용량은 다음 수식으로 주어진다[5].

$$C=\frac{f_x}{2N}log_2\left(\frac{\left(f_xHWR+2N^2\right)\gamma+f_x}{f_xHWR\gamma+f_x}\right), \tag{3}$$

여기에서 f_x는 호스트 시스템의 샘플링 주파수이며, HWR은 호스트-워터마킹 신호 전력비, WNR은 워터마킹-채널잡음 신호 전력비, N은 확산 코드의 주기를 의미한다. 수식 (2)와 (3)을 곱하여 적분을 취하면 Hoyt 채널에서 채널용량식을 수식 (4)와 같이 전개할 수 있다. 먼저, 수식 (4)의 적분항을 풀기 위하여 수식 (5)에서처럼 부분적분을 준비한다. 여기서 g를 구하기 위해 [6, 2.321.2]를 이용한다.

식 (6)은 (5)를 이용하여 부분적분한 결과를 보여준다. 부분적분의 앞항은 0으로 수렴하고 나머지 시그마항과 적분항 만이 남게 된다. 수식 (6)의 적분항은 [6, 3.383.10]을 이용하여 수식 (7)로 근사화 된다.

이제 수식 (4)의 두 번째 적분식도 위와 같은 방법으로 구할 수 있으며, 최종적으로 Hoyt 채널에서의 채널용량식을 수식 (8)과 같이 불완전 감마 함수를 이용하여 근사화 하게 된다. 불완전 감마 함수는 [6, 8.352.8]을 이용하여 근사화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}\bar{C}_{Hoyt} &= \frac{f_x a}{2N\ln 2}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{c^{2k}}{(k!)^2}\int_0^{\infty}\ln\left(\frac{\left(f_xHWR+2N^2\right)\gamma+f_x}{f_xHWR\gamma+f_x}\right)\gamma^{2k}e^{-b\gamma}d\gamma \\ &= \frac{f_x a}{2N\ln 2}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{c^{2k}}{(k!)^2}\left[\int_0^{\infty}\ln\left(\left(f_xHWR+2N^2\right)\gamma+f_x\right)\gamma^{2k}e^{-b\gamma}d\gamma-\int_0^{\infty}\ln\left(f_xHWR\gamma+f_x\right)\gamma^{2k}e^{-b\gamma}d\gamma\right],\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}f&=\ln\left(\left(f_xHWR+2N^2\right)\gamma+f_x\right) \rightarrow f'=\frac{f_xHWR+2N^2}{\left(f_xHWR+2N^2\right)\gamma+f_x} \\ g'&=\gamma^{2k}e^{-b\gamma} \rightarrow g=-e^{-b\gamma}\sum_{j=0}^{2k}\frac{2k!}{(2k-j)!}\frac{\gamma^{2k-j}}{(b)^{j+1}}\end{aligned} \tag{5}$$

$$\int_0^{\infty}\ln\left(\left(f_xHWR+2N^2\right)\gamma+f_x\right)\gamma^{2k}e^{-b\gamma}d\gamma=\sum_{j=0}^{2k}\frac{2k!}{(2k-j)!(b)^{j+1}}\int_0^{\infty}\frac{1}{\gamma+\dfrac{f_x}{f_xHWR+2N^2}}\gamma^{2k-j}e^{-b\gamma}d\gamma, \tag{6}$$

$$\int_0^{\infty}\frac{1}{\gamma+\dfrac{f_x}{f_xHWR+2N^2}}\gamma^{2k-j}e^{-b\gamma}d\gamma=\left(\frac{f_x}{f_xHWR+2N^2}\right)^{2k-j}e^{\frac{f_x}{f_xHWR+2N^2}b}\Gamma(2k-j+1)\Gamma\left(-2k+j,\frac{f_x}{f_xHWR+2N^2}b\right) \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\bar{C}_{Hoyt} &= \frac{f_x a}{2N\ln 2}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{c^{2k}}{(k!)^2}\sum_{j=0}^{2k}\frac{2k!}{(b)^{j+1}} \\ &\times\left[\left(\frac{f_x}{f_xHWR+2N^2}\right)^{2k-j}e^{\frac{f_xb}{f_xHWR+2N^2}}\Gamma\left(-2k+j,\frac{f_xb}{f_xHWR+2N^2}\right)-\left(\frac{1}{HWR}\right)^{2k-j}e^{\frac{b}{HWR}}\Gamma\left(-2k+j,\frac{b}{HWR}\right)\right]\end{aligned} \tag{8}$$

Ⅳ. 수식적 결과

본 절에서는 앞 절에서 유도된 채널용량 수식을 바탕으로 도출된 수식적 결과를 설명한다.

그림 2는 호스트 시스템의 샘플링 주파수에 따른 채널용량 대 확산코드길이이다. 여기서 HWR=20[dB], WNR=0[dB], 그리고 페이딩 계수 q=1로 주어진다. 그림으로부터 채널용량은 호스트 시스템의 샘플링 주파수에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 각 샘플링 주파수에서는 최대 채널 용량을 나타내는 특정 PN 코드 길이가 있음을 알 수 있다.

그림 3은 HWR에 따른 채널 용량 대 평균 수신 WNR을 보여준다. 여기서 fx=1[MHz], PN=14[bits] 그리고 페이딩 계수 q=1이다. 워터마킹 기법을 이용한 부가 데이터 전송 시스템의 경우에는 호스트-워터마킹 신호 전력비의 선정이 중요하다. 두 신호 간 전력비가 같아지게 되면 부가 데이터 전송량이 급격히 증가하지만 이로 인한 호스트 시스템의 성능 저하가 우려된다. 그러나 긴급 재난방송과 같은 응용에서는 방송통신망에 이와 같은 부가 데이터 전송 시스템을 이용하여, 사용되고 있는 호스트 신호에 상응하거나 훨씬 높은 전력을 이용하여 공중파를 시청 및 청취하는 위험지역 사람들에게 즉각적으로 경고 메시지를 전달할 수 있다.

그림 4는 (HWR,WNR) 조합이 (20, 0)과 (20, -10)인 경우에 각각 채널 페이딩 계수에 따른 채널용량 변화를 보이고 있다. 또한 q=1일 경우에는 Rayleigh 채널과 같은 값을 가짐을 보인다. 여기서 PN=14[bits]이다. 그림으로부터 WNR이 작을수록 채널 페이딩 계수로 인한 채널용량의 변화량이 커짐을 알 수 있다.

그림 5는 본 논문에서 유도된 채널용량 수식이 정확히 근사화 되는지를 알아보기 위하여 구분구적법을 통한 적분 계산 값과 근사화된 수식의 결과 값을 비교한다. 여기서 PN=14[bits]이고 q=1이다. 그림으로부터 WNR이 증가할수록 근사화가 정확히 이루어지는 것을 알 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 스펙트럼 효율을 높이기 위한 방안으로써 대역확산 워터마킹 기법을 이용한 부가 데이터 전송 기법의 무선채널 환경에서의 채널용량 수식을 근사화하여 유도하고, 유도된 수식을 바탕으로 채널 페이딩 계수와 fx, HWR, WNR, PN과 같은 시스템 파라미터에 의한 채널용량의 변화를 수식적 결과로부터 확인 하였다. 제안된 시스템은 향후 다양한 멀티미디어 시스템에서 비교적 간단한 방식으로 부가 데이터를 전송하기 위한 시스템 디자인에 도움이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 전형석, 이혁재 “미래의 스펙트럼 관리 정책과 동적 스펙트럼 관리 기술이 나아가야 할 방향”, 한국통신학회지, 제24권 제9호, pp.5-14, 2007년 9월

[2] X. Wang, Y. Wu, and B. Caron “Transmitter identification using embedded pseudo random sequences”, IEEE Trans. Broadcasting, vol. 50, no. 3, pp. 244-252, Sep. 2004.

[3] M. K. Simon and M.-S. Alouini, ″Digital Communication over Fading Channels″, WILEY, 2005

[4] W. C. Y. Lee, “Estimate of channel capacity in Rayleigh fading environment”, IEEE Trans. Veh. Technol.,, vol. VT-39, pp. 187-190, Aug. 1990.

[5] S. Sedghi, M. Khademi and N. Cvejic, “Analysis of channel capacity of spread spectrum audio watermarking system”, in Proc. of Intellgigent Signal Processing and Communications, pp. 175-178, Dec. 2006.

[6] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, “Table of Integrals, Series, and Products”, Academic Press, 2007

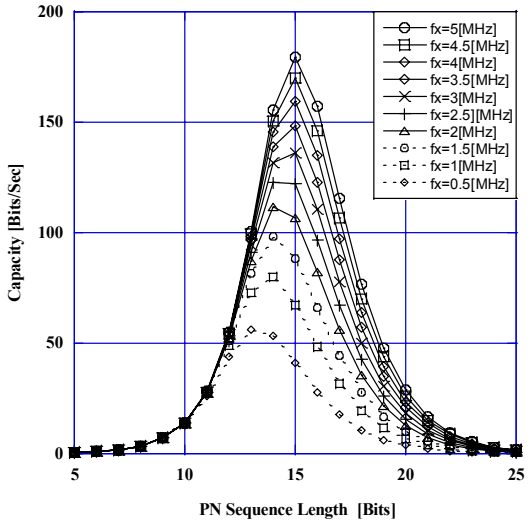

그림 2. 채널 용량 대 확산코드길이
Fig. 2. Channel capacity vs. PN sequence length

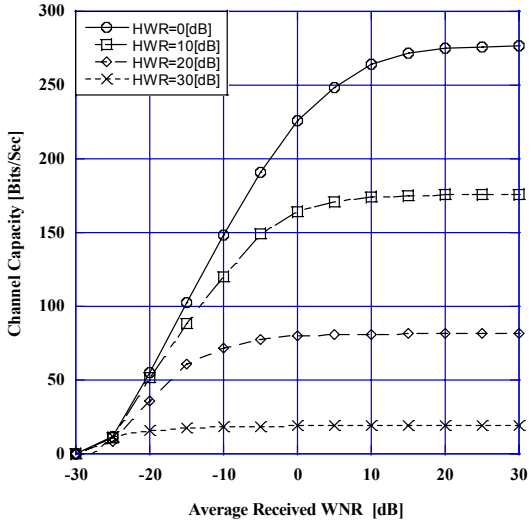

그림 3. 채널 용량 대 평균 수신 WNR
Fig. 3. Channel capacity vs. average received WNR

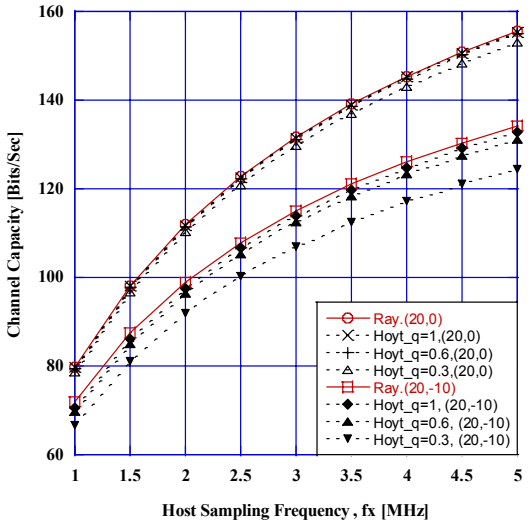

그림 4. 채널 용량 대 호스트 샘플링 주파수
Fig. 4. Channel capacity vs. host sampling frequency

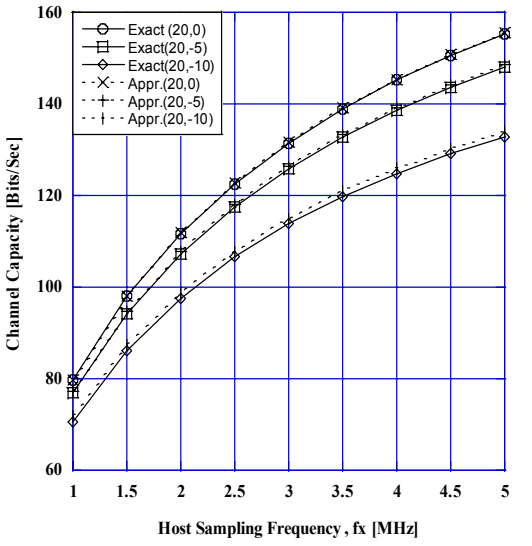

그림 5. 채널 용량 대 호스트 샘플링 주파수
Fig. 5. Channel capacity vs. host sampling frequency

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

저자 소개

김 주 찬(정회원)

- 2004년~현재 광운대학교 전파공학과 박사과정
- 2007년~2008년 아시아나 IDT RFID/USN연구소 주임연구원

<주관심분야 : 이동통신시스템>

김 진 영(정회원)

- 1998년 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 2000년 미국 Princeton University, Research Associate
- 2001년 SK 텔레콤 네트웍 연구소 책임연구원
- 2009년 미국 M.I.T 공대 Visiting Scientist
- 2001년~현재 광운대학교 전파공학과 부교수

<주관심분야 : 디지털통신, 무선통신, 채널부호화>