1999 年度 大韓電子工學會 夏季綜合學術大會 論文集 第 22 卷 第 1 號 99/6

나카가미 페이딩에서 FH-SSMA 시스템의 성능 연구

이 충 성(李 忠 成), 김 항 래(金 抗 來), 김 남(金 男)
충북대학교 정보통신공학과
전화 : (0431) 275-2578 / 팩스 : (0431) 274-6206

The Study on Performance of FH-SSMA System in Nakagami Fading

Chung Seong Lee, Hang Rae Kim, Nam Kim
Dept. of Computer & Communication Eng. Chungbuk National University
E-mail : cslee@osp.chungbuk.ac.kr
hrkim@osp.chungbuk.ac.kr
namkim@cbucc.chungbuk.ac.kr

Abstract

New solutions are given for the capacity and spectrum efficiency of frequency hopped spread spectrum multiple access system(FH-SSMA) in a Nakagami interference environment. In this paper we derive a exact formulation of the deletion probability for a mobile environment and analyze the system capacity and spectrum efficiency in terms of the average bit error rate(BER). It is shown that the system capacity is decreased by 52% as the Nakagami fading parameter is reduced to 0.5 and the required signal to noise ratio(SNR) is above 25dB, to get the spectrum efficiency of 0.3.

I. 서론

대역확산 기술에는 직접확산(DS), 주파수도약(FH), 하이브리드(hybrid), 시간도약(TH), 첩(chirp)등이 있으며 이 중에서 FH-SS(frequency hopped spread spectrum) 기술은 재밍(jamming)과 간섭에 강하기 때문에 군의 통신보호 뿐 만 아니라 무선 통신시스템 등에 광범위하게 사용되었으며 최근에는 신호의 방해요소를 제거하고 공통의 주파수 채널을 다수의 사용자가 공유하는 CDMA 통신시스템에 주로 사용되고 있다.

1970년대에 주파수 자원의 부족과 통신시스템을 좀 더 효율적으로 사용하기 위해 다중접속기술이 FH-SS 기술에 도입되었으며 주파수도약과 DPSK를 결합한 방식과[1] MFSK를 변조기법으로 사용한 방식이 연구되었다[2]. [3, 4]에서는 레일레이(Rayleigh) 페이딩과 로그노말 섀도우잉(log-normal shadowing) 영향하에 FH-SSMA 시스템의 성능을 분석하였는데 25dB의 신호대 잡음비(SNR)에서 시스템 용량(capacity)은 170명이고 음영효과(shadowing effect)가 강할수록 성능이 저하됨을 보여 주었다.

본 논문에서는 FH-SSMA 시스템의 전송채널을 나카가미(Nakagami) 페이딩으로 모델링하여 시스템의 용량과 스펙트럼 효율(spectrum efficiency)을 분석한다. 나카가미 페이딩은 나카가미 m-분포(Nakagami m-distribution)라고도 하는데 도심지의 다중경로 채널에 가장 적합한 페이딩으로 m값을 적절히 선택하고 적당한 범위를 설정하면 레일레이나 라이시안(Rician) 분포도 나타낼 수 있다[5].

시스템의 최대 용량과 최대 스펙트럼 효율을 얻기 위해 특정한 데이터율 D, 대역폭 W, BER P_B값이 필요하지만 용량을 최대화하는데 가장 중요한 역할을 하는 것은 메시지 단어 사이즈 K와 주소 시퀀스 길이 L 값이다. R=32kb/s, W=20MHz, $P_B \leq 10^{-3}$일 때 K와 L의 최대값은 각각 8과 19이며[3], 사용자 수를 M이라 할 때 시스템의 스펙트럼 효율 η는 다음과 같다[4].

$$\eta = \frac{MD}{W}$$

본 논문의 구성은 2장에서는 분석하고자 하는 FH-SSMA 시스템의 송신기와 수신기를 나타내었고 3장에서는 나카가미 페이딩에서의 제거 확률(deletion probability)을 기술하였다. 4장에서는 시뮬레이션을 통한 시스템 성능을 분석하였고 마지막으로 5장에 결론을 기술하였다.

II. 채널 모델링

1. FH-MFSK 시스템

FH-MFSK 송신기와 수신기를 그림 1에 블록 다이어그램으로 나타내었다. 사용자는 시스템의 전체 대역폭을 점유하며 다수의 사용자로부터 신호를 구분하는 유일한 방법은 시간과 주파수의 고정된 형식으로 구성된 주소를 각 사용자에게 할당하는 것이다.

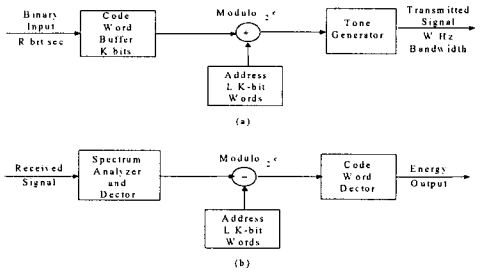

그림 1. FH-MFSK 시스템의 블록 다이아그램
(a) 송신기 (b) 수신기

Fig. 1. Block diagram of an FH-MFSK System
(a) Transmitter (b) Receiver

2. 나카가미 페이딩에서 제거 확률

오경보 확률(false alarm probability) P_F는 어떠한 신호도 포함하지 않은 주파수 빈(bin)의 에너지 값이 임계값을 초과할 확률로 정의한다. 이 에너지는 기본적으로 배경잡음에 의해 발생하며 다음과 같이 표현된다[3,6].

$$P_F = \exp[-\frac{b_0^2}{2}] \tag{1}$$

여기서 $b_0 = b/\sqrt{N}$는 실제의 임계값 b를 평균 잡음전력 N으로 정규화한 값이다.

제거 확률 P_D는 대부분 다중경로 페이딩과 AWGN에 의해 발생하고 톤의 포락선 크기가 임계값보다 작을 확률로 정의된다. 레일레이 페이딩에서 제거 확률은 식 (2)과 같다[3].

$$P_D = 1 - \exp[-\frac{b_0^2}{2(1+\gamma_0)}] \tag{2}$$

도심지의 무선환경채널은 수신된 신호 포락선의 확률밀도함수가 아래와 같은 나카가미 m-분포로 표현할 수 있다[6].

$$p(\lambda) = \frac{2m^m \lambda^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp[-\frac{m\lambda^2}{\Omega}], \quad \lambda \geq 0 \tag{3}$$

여기서 λ는 나카가미 페이딩 신호의 크기를 나타내며 $\Omega = \langle \lambda^2 \rangle$은 λ의 제곱평균값, $m = \frac{\Omega^2}{var(\lambda^2)} \geq 0.5$ 은 분포의 모양을 결정하는 페이딩 파라미터이다. 예를 들어 만일 m=1이면 레일레이 분포가 되고 m=0.5이면 단측 가우시안(one-sided Gaussian) 분포가 된다. 식 (3)으로부터 m값이 커질수록 페이딩이 약해지는 것을 알 수 있고 m=∞일 때는 넌페이딩(nonfading) 상태가 되는 것을 알 수 있다.

SNR을 다음과 같이 정의하면 일대일 랜덤변수 변환(one-to-one random variable transformation)이 된다.

$$\gamma = \frac{\lambda^2}{2N} \tag{4}$$

그러므로 γ는 다음과 같은 분포를 갖는다.

$$p(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\Gamma(m)\gamma_0^m} \exp[-\frac{m\gamma}{\gamma_0}], \quad \gamma \geq 0 \tag{5}$$

여기서 $\gamma_0 = \Omega/2N$는 페이딩이 존재할 경우의 평균 SNR이다. 잡음이 섞인 신호가 넌페이딩 채널을 통하여 전송될 때 수신된 신호 포락선 r의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$p(r) = \frac{r}{N} \exp[-\frac{r^2+\lambda^2}{2N}] I_0\left(\frac{r\lambda}{N}\right) \tag{6}$$

여기서 λ는 수신된 신호 포락선의 크기이며 제거 확률은 다음 식과 같다.

$$P_D = \int_0^\infty \frac{r}{N} \exp[-\frac{r^2+\lambda^2}{2N}] I_0\left(\frac{r\lambda}{N}\right) dr \tag{7}$$

식 (4)와 식 (7)의 변수 $x = r/\sqrt{N}$를 치환하여 계산하면 다음과 같은 γ의 항으로 제거 확률을 다시 쓸 수 있다.

$$P_D = \int_0^{b_0} x \exp[-\frac{x^2+2\gamma}{2}] I_0(x\sqrt{2\gamma}) dx \tag{8}$$

여기서 $b_0 = b/\sqrt{N}$ 은 정규화된 임계값이다.

AWGN과 나카가미 페이딩을 겪은 채널에서 식 (8)은 식 (5)의 랜덤변수 γ의 밀도함수가 된다. 그러므로 전체확률은 아래와 같이 식 (5)와 식 (8)을 평균하여 얻을 수 있다[6].

$$P_D = \int_0^{\infty} \int_0^{b_0} \frac{m^m \gamma^{m-1} x}{\Gamma(m)\ \gamma_0{}^m} \exp[-\frac{m\gamma}{\gamma_0}] \times \exp[-\frac{x^2+2\gamma}{2}] I_0(x\sqrt{2\gamma}) dx d\gamma \quad (9)$$

m=1인 특별한 경우 식 (9)는 레일레이 페이딩에서 제거 확률인 식 (2)와 동일하게 된다.

Ⅲ. 시뮬레이션 결과 및 수치해석

그림 2는 레일레이 페이딩에서의 성능곡선을 나타낸 것이다. 본 논문에서 분석한 FH-SSMA 시스템의 대역폭은 20MHz이고 데이터율은 32kb/s 이다. SNR=15dB일 때 $P_B \leq 10^{-3}$을 만족하기 위한 최대 용량은 95명으로 넌페이딩에서의 용량과 비교하여 55% 감소한다. SNR이 증가할수록 용량이 증가하며 넌페이딩과 같은 곡선이 되기 위해서는 45dB 이상의 SNR이 요구된다는 것을 관찰할 수 있다.

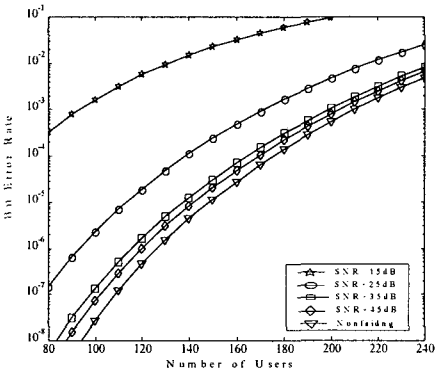

그림 2. 레일레이 페이딩 영향하의 FH-SSMA 시스템의 성능곡선

Fig. 2. Performance curves of the FH-SSMA system under the influence of Rayleigh fading

그림 3은 SNR이 15dB와 25dB일 때 나카가미 팩터 m값을 0.5에서 2.0까지 변화를 주어가며 FH-SSMA 시스템의 성능을 나타낸 곡선이다. m값이 주어졌을 때 검파 임계값 b_0는 $P_B = 10^{-3}$에서 최적이 되고 이때 최대 용량을 얻는다. 그림으로부터 각 곡선은 나카가미 팩터 m값이 0.5에서 2.0까지 변화함에 따라 성능이 다르다는 것을 볼 수 있다. SNR이 높을수록 m값이 클수록 BER이 감소하며 SNR=25dB일 때 m값이 2.0이상 증가하면 그림 2의 넌페이딩의 성능곡선에 접근하는 것을 알 수 있다. m=0.5와 SNR=25dB일 때 시스템은 단지 107명의 사용자를 수용할 수 있는데 이 값은 동일한 SNR에서 레일레이 페이딩과 넌페이딩에서의 사용자 용량보다 각각 37%와 50%로 감소한다. m=1.0일 때는 레일레이 페이딩과 동일한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

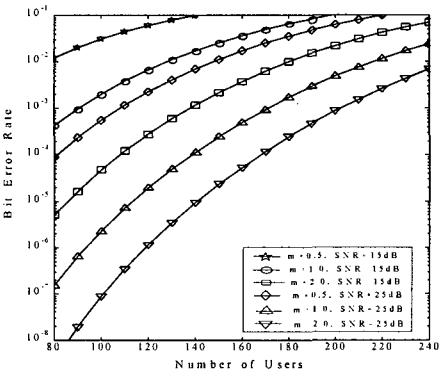

그림 3. 나카가미 페이딩 영향하의 FH-SSMA 시스템의 성능곡선

Fig. 3. Performance curves of the FH-SSMA system under the influence of Nakagami fading

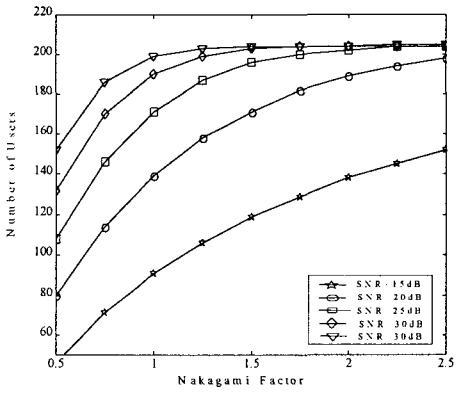

그림 4. 나카가미 페이딩 채널에서 FH-SSMA 시스템의 최대용량 ($P_B \leq 10^{-3}$)

Fig. 4. Maximum capacity of the FH-SSMA system in Nakagami fading channel ($P_B \leq 10^{-3}$)

시스템 용량이 나카가미 팩터 m값에 얼마나 의존하는지 보여주기 위하여 $P_B \leq 10^{-3}$의 SNR에 대해서 m

값을 0에서 2.5까지 변화를 주어가며 시스템이 수용할 수 있는 최대 용량을 그림 4에 나타내었다. SNR=20dB인 경우 m값이 2.0에서 0.5로 감소하면 시스템 용량은 188명에서 80명으로 줄어들어 언페이딩과 비교할 때 52%의 용량감소가 일어나며 그림 4는 SNR이 작을수록 용량의 감소율이 더 커짐을 나타낸다.

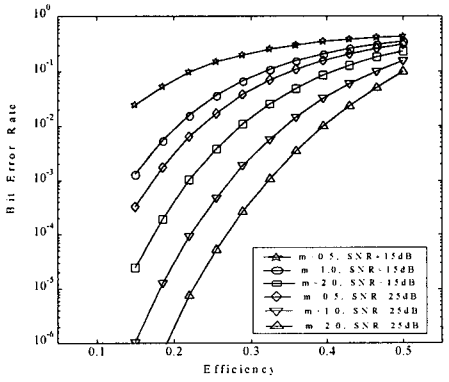

그림 5. 나카가미 페이딩에서 파라미터 m과 SNR에 따른 비트에러확률대 스펙트럼 효율

Fig. 5. The probability of bit error verse the spectrum efficiency with m and SNR as parameter in Nakagami fading

그림 5는 SNR이 15dB와 25dB일 때 팩터 m값과 SNR에 따른 스펙트럼 효율대 BER을 나타낸다. 그림에서 BER이 일정할 때 m값이 높을수록 스펙트럼 효율이 증가하며 m값이 일정할 경우 SNR이 높을수록 스펙트럼 효율이 증가한다. $P_B \leq 10^{-3}$와 SNR=25dB일 때 m값이 0.5에서 2.0으로 증가하면 스펙트럼 효율은 0.171에서 0.323으로 증가하였다. m=2.0인 경우 SNR=15dB에서 SNR=25dB로 증가하면 스펙트럼 효율은 0.224에서 0.323으로 증가하였다. 또한 그림으로부터 스펙트럼 효율과 BER은 역비례 관계가 성립한다. m=2.0과 SNR=15dB일 때 스펙트럼 효율을 0.2로 하면 BER은 10^{-3}보다 작아지지만 만약 스펙트럼 효율을 0.3으로 증가시키면 BER이 10^{-3}보다 크게되어 원하는 신호의 수신시 어려움이 발생하기 때문에 BER과 스펙트럼 효율사이에는 적절한 trade-off가 요구됨을 알 수 있다. 이 경우 0.3이상의 스펙트럼 효율을 얻으려면 SNR을 25dB이상 증가시켜 $P_B \leq 10^{-3}$을 만족시킴으로써 원하고자 하는 스펙트럼 효율을 얻을 수 있다.

Ⅳ. 결론

본 논문은 FH-SSMA 시스템의 전송채널을 나카가미 페이딩으로 모델링하였고 제거 확률을 이용하여 시스템 용량과 스펙트럼 효율을 분석하였다. SNR과 나카가미 펙터 m값이 증가할수록 시스템 용량이 증가하였으며 m=1.0일 때는 레일레이 페이딩과 동일한 성능을 나타내었다. 본 논문에서는 BER과 스펙트럼 효율과의 관계도 보여주었다. 스펙트럼 효율을 크게하면 할수록 BER이 10^{-3}보다 크게 되어 원하는 신호의 수신시 어려움이 발생하게 되는 것을 알 수 있다. 또한 SNR을 증가시킴으로써 시스템 성능을 개선시킬 수 있음을 보이고 있다.

참고문헌

[1] Q. Wang, T. A. Gulliver, V. K. Bhargava, and E. B. Felstead, "Performance of fast frequency hopped noncoherent M-ary FSK with fixed hop rate under worst case jamming," IEEE Trans. Commun., vol. 38, pp. 1786-1798, Oct. 1990.

[2] A. J. Viterbi, "A processing satellite transponder for multiple access by low-rate mobile users," in Proc. 4th Int. Conf. Digital Satellite Commun., Montreal, Canada, pp. 166-174, Oct. 23-25, 1978.

[3] D. J. Goodman, P. S. Henry, and V. K. Prabhu. "Frequency-hopped multilevel FSK for mobile radio," Bell Syst. Tech. J., vol. 59, no. 7, pp. 1257-1275, Sept. 1980.

[4] R. H. Muammar, "Degradation in FH-MFSK mobile radio system capacity due to Rayleigh fading and log-normal shadowing," IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 37, no. 3, pp. 130-134, Aug. 1988.

[5] H. Suzuki, "A statistical model for urban radio propagation," IEEE Trans. Commun., vol. Com-25, no. 7, pp. 673-680, July 1977.

[6] U. S. Xuto, Q. Wang and V. K. Bhargava, "Capacity of an FH-SSMA system in different fading environments," IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 47, no. 1, pp. 75-83, Feb. 1998.