

# 나카가미 페이딩 채널에서 선택 합성 다이버시티를 적용한 FH/MFSK 시스템의 성능분석

## Performance Analysis of the FH/MFSK System using the Selection Diversity in Nakagami Fading Channel

이충성 · 김항래 · 김 남

Chung-Seong Lee · Hang-Rae Kim · Nam Kim

### 요 약

본 논문에서는 나카가미 페이딩 채널에서 FH/MFSK 시스템에 선택 다이버시티를 적용하였을 경우의 시스템 성능을 분석한다. 선택 합성(selection combining)후의 수신 신호대 잡음비(SNR)로부터 제거확률을 유도하고 FH/MFSK 시스템의 성능분석을 위해 사용자수(M), SNR, 나카가미 페이딩 지수(m), 다이버시티 가지의 수(D)와 같은 파라미터들을 사용한다. m이 1인 경우, 비트에러율(BER)은 각각 D=1에서  $1.0 \times 10^{-3}$ 이고 D=2에서  $1.0 \times 10^{-4}$ 으로 10배 만큼 감소함을 알 수 있다. m이 2인 경우, BER은 D가 증가하더라도 일정한 값을 갖는다는 것을 또한 알 수 있다. D가 2인 경우, SNR이 15 dB와 25 dB일 때의 시스템 용량은 다이버시티를 고려하지 않은 용량보다 각각 75%와 20% 증가된다.

### Abstract

In this paper, the system performance with the selection diversity which is applied to the FH/MFSK system in Nakagami fading channel is analyzed. The deletion probability is derived from the received signal to noise ratio(SNR) after selection combining and the parameters such as the number of users(M), SNR, Nakagami fading figure(m), and the number of diversity branches(D) is used for the performance analysis of the FH/MFSK system. Assuming that m set 1, it is observed that the bit error rate(BER) is  $1.0 \times 10^{-3}$  and  $1.0 \times 10^{-4}$  at D=1(no diversity) and D=2, respectively, and then is decreased by 10 times. Assuming that m set 2, it is also shown that the BER has a constant value although D is increased. In the case of D=2, the system capacity is more 75% and 20% than that considering no diversity at SNR=15 dB and 25 dB, respectively.

### I. 서 론

FH(frequency hopping)는 DS(direct sequence)와 더불어 가장 많이 사용되는 대역확산방식으로써 특히, 재밍(jamming)과 간섭(interference)에 강한 특징이 있다<sup>[1]</sup>. 초기의 FH는 주로 군의 통신보호를 목적

으로 사용되어 민간인의 연구는 미흡한 상태였지만, 다중접속 방식과 DPSK(differential phase-shift keying) 변조가 등장하면서부터 상업적인 목적의 무선 이동통신 시스템으로의 연구가 진행되었다. FH를 사용하는 무선 이동통신 시스템으로는 GSM(global system for mobile)과 DCS-1800(digital com-

충북대학교 정보통신공학과 전파통신연구실(Radio Communication Laboratory(RCLAB), Dept. of Computer & Communication Eng., Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20000509-055

· 수정완료일자 : 2000년 6월 9일

munication system 1800) 등이 있다<sup>[1]</sup>.

1978년에 Viterbi는 비교적 낮은 데이터율을 사용하는 위성통신에 이용할 목적으로 MFSK(multilevel frequency shift keying) 변조를 사용하는 FH 시스템을 제안하였다<sup>[2]</sup>. 이 시스템을 디지털 이동통신 서비스에서도 사용할 수 있는지에 대한 연구는 1980년 Goodman에 의하여 이루어졌다. 그 결과 단방향 대역폭이 20 MHz이고 데이터율이 32 kbps인 FH/MFSK 시스템에서는 209명의 사용자를 수용할 수 있음이 증명되었고 레일레이(Rayleigh) 분포된 다중경로 페이딩 환경을 고려할 경우에는 39명 적은 170명의 사용자에게 서비스할 수 있음이 또한 증명되었다<sup>[3]</sup>. 그러나, 기지국에서 이동국까지 가시경로(line-of-sight)가 형성될 경우 즉, 직접파가 간접파에 비해 우세한 지역 및 건물 등과 같은 지형지물에 의한 음영효과(shadowing effect)가 발생하는 지역에서는 레일레이 다중경로 페이딩 채널 모델만으로는 정확한 시스템의 성능분석을 할 수 없게 된다. 1998년 Xuto는 이러한 다중경로 페이딩 채널을 라이시안(Rician), 새도우드 라이시안(shadowed Rician), 나카가미(Nakagami)로 나누고 각각에 대한 시스템 성능분석을 하였다. 그러나 Xuto는 FH/MFSK 시스템에서 페이딩 환경을 극복하기 위한 어떠한 방법도 제시하지는 않았다<sup>[4]</sup>.

페이딩의 영향을 감소시켜 시스템의 성능을 개선하기 위한 방법으로는 다이버시티(diversity)가 있다<sup>[5],[6]</sup>. 다이버시티는 다중경로로 전송된 신호의 통계적 특성을 이용하는 것으로 수신 신호들이 서로 독립적인 경우에는 다중경로 채널로 수신되는 신호의 전력들이 어느 정해진 임계값 이하로 동시에 떨어질 확률이 작다는 원리를 이용한 것이다. 합성 방식으로는 크게 최대비 합성(maximal ratio combining), 선택 합성(selection combining), 동일 이득 합성(equal gain combining)이 있다. 이러한 합성 방식 중에, 선택 합성 방식은 다중경로로 수신되는 신호중 가장 큰 신호를 선택하는 방식으로, 구현이 간단하고 비용이 저렴하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 선택 합성을 하는 나카가미  $m$ -분포된 다중경로 페이딩 채널의 제거확률을 유도하고 사용자수, 페이딩 지수, 다이버시티 가지의 수 및 신호대 잡음비(SNR)를 고려하여 FH/MFSK 시스템의

성능에 미치는 영향을 해석적으로 분석한다.

논문의 구성은 2장에서는 분석하고자 하는 FH/MFSK 시스템 모델링에 대해 서술하고, 3장에서는 나카가미 페이딩 채널에서 선택 합성후의 수신 신호에 대한 SNR을 유도한다. 4장에서는 시스템의 오경보확률(false alarm probability)과 제거확률(deletion probability)을 구하고, 5장에서는 수치해석 결과를 나타낸다. 6장에서는 결론을 기술한다.

## II. 시스템 모델링

제안한 FH/MFSK 시스템의 송신기와 수신기를 그림 1에 나타내었다. FH/MFSK 시스템에서는 사용자들끼리 시스템의 전 대역폭을 점유하게 되므로, 사용자들간의 신호를 구분하는 방법이 필요하게 된다. 이러한 신호 구분 방법은 시간과 주파수의 형식으로 구성된 주소를 각 사용자에게 할당하는 것이다<sup>[1]</sup>. 본 논문에서 제안한 FH/MFSK 시스템은 부호어  $K$ 의 크기 8이고 길이  $L$ 이 19인  $2^8$ -ary 시스템으로 fast FH 시스템이다.

사용자는 길이가  $L$ 이고  $K$ -비트의 부호어(code word)로 구성된 주소를 송신기로부터 할당받는다. 그 다음 사용자의  $K$ -비트 메시지는 부호어와 mo-

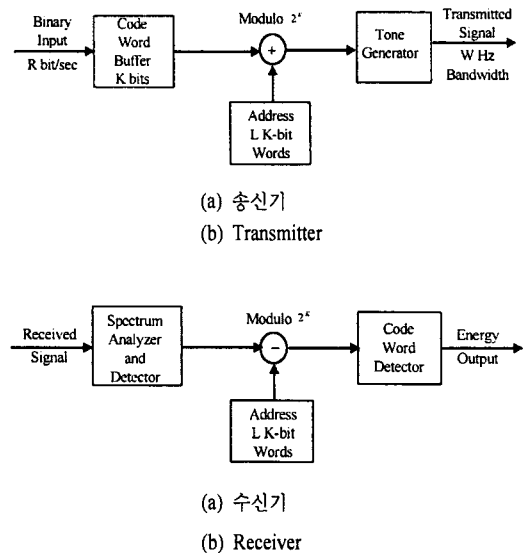


그림 1. FH/MFSK 시스템의 구성도  
Fig. 1. Block diagram of the FH/MFSK system.

dule-2<sup>k</sup>가산이 되어 길이가 L인 새로운 수열(sequence)을 생성한다. 신호의 주기를 T라 하면 새롭게 생성된 수열의 부호어는 간격이 τ=T/L가 되고 그 값은 0에서부터 2<sup>k</sup>-1사이의 값들로 구성된다. 톤 발생기는 새롭게 생성된 수열을 이용하여 2<sup>k</sup>개의 직교 주파수중에서 신호톤과 일치하는 주파수를 선택하게 된다.

수신기에서는 톤의 유무에 상관없이 임계값(threshold level) b와 주파수 빈(bin)의 에너지 값을 비교하여 2<sup>k</sup>개 주파수중 하나를 τ초마다 검출한다. 수신된 톤들은 검출된 후 일치하는 부호어로 다시 변환되고 송신기에서 사용했던 주소와 modulo-2<sup>k</sup>가산을 한다. 그러므로 마지막 신호의 주기에서는 원 K-비트 메시지의 L개 복사본이 생성된다. 수신기는 원하는 사용자로부터 수신된 톤뿐만 아니라 시스템의 다른 사용자들이 송신한 톤까지도 검출한다. 이 과정에서 상호간섭, 다중경로 페이딩, AWGN이 전송된 톤을 제거(deletion)하거나 잘못 수신된 톤을 간접적으로 검출하여 오경보(false alarm)를 일으키게 된다.

### III. 다이버시티

#### 3-1 채널 모델

무선 이동통신의 여러 가지 문제점 중에서도 특히 신호의 다중경로에 의한 페이딩 현상은 아주 중요한 문제가 되고 있다. 이러한 페이딩 채널을 모델링하기 위해 레일레이, 라이시안, 로그노말, 나카가미등 여러 가지의 페이딩 모델이 제시되었고, 그 중에서 나카가미 페이딩 모델은 실험 및 이론적으로 도시 지역에서의 페이딩 채널을 표현하는데 가장 적합하다고 알려져 있다<sup>[7],[8]</sup>.

따라서 본 논문에서는 전송채널로써 나카가미 페이딩 채널을 고려하였다. 나카가미 페이딩은 나카가미 m-분포라고도 하는데, 수신된 신호의 포락선이 다음과 같은 확률밀도함수를 갖는 페이딩 모델이다<sup>[7],[8]</sup>.

$$p(u) = \frac{2m^m u^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mu^2}{\Omega}\right), \quad u \geq 0 \quad (1)$$

여기서 u는 나카가미 페이딩 신호의 크기, Ω는 u의 제곱 평균값, 즉 E(u<sup>2</sup>), Γ(m)은 감마함수(gamma function)를 나타낸다. m은 모멘트의 비율로써 분포의 모양을 결정하고 페이딩 정도를 나타내며 페이딩 지수(fading figure)라고 한다. m값의 범위는 0.5 ≤ m < ∞이고 m=1인 경우는 레일레이 분포가 되며, m=0.5인 경우는 단축 7-우시안(half-Gaussian) 분포가 된다. 특히 이 모델은 m이 증가할수록 페이딩이 약하게 되고 m이 무한히 커지면 델타함수에 근사하게 되어 페이딩이 없는 상태가 된다. 나카가미 페이딩은 m과 Ω를 조절하여 조절함으로써 레일레이 페이딩과 라이시안 페이딩을 모두 표현할 수 있기 때문에 이동통신과 위성통신에 적용할 수 있는 페이딩 모델이다. 그림 2에 나카가미 m-분포 함수를 나타내었다.

#### 3-2 선택 다이버시티

나카가미 페이딩 채널에서 다이버시티를 적용할 때, 합성 전후의 수신 SNR의 분포를 구하여 시스템 성능이 합성에 의해서 어느 정도 개선되는지를 분석한다.

선택 합성 기법은 안테나를 통해 수신된 신호를 계속 비교한 후, SNR이 가장 우수한 것을 취하는데

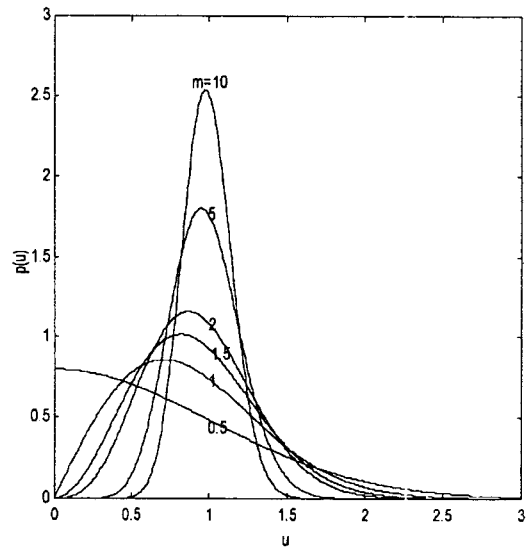


그림 2. 나카가미 m-분포 함수 (Ω=1)  
Fig. 2. Nakagami m-distribution function.

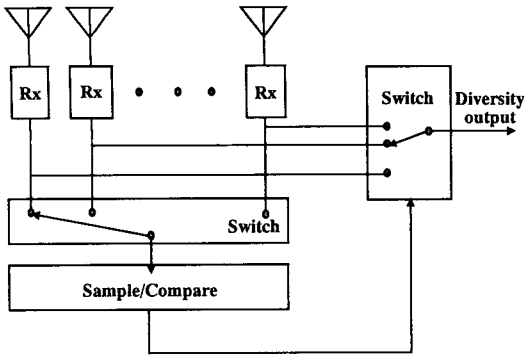


그림 3. 선택 다이버시티 구성도  
Fig. 3. Block diagram of the selection diversity.

실제 이 방식을 적용할 때는 SNR을 계산하기 보다는 수신 신호의 세기가 가장 큰 것을 선택한다<sup>[6],[9],[10]</sup>. 그림 3은 선택 다이버시티의 구성도를 나타낸다.

다이버시티를 사용할 경우  $k$ 번째 수신단에서 수신된 신호는 다음과 같이 정현파로 표현할 수 있다.

$$y_k(t) = u_k \exp(j2\pi f_0 t) \quad (2)$$

여기서  $u_k$ 는  $k$ 번째 사용자 신호의 포락선 크기를 나타낸다. 수신된 신호의 시간 평균(time averaging), 즉 평균전력은  $u_k^2/2$ 이 된다. 평균잡음 전력을  $N$ 이라 하면  $k$ 번째 수신단에서 수신된 신호의 SNR,  $\gamma_k$ 는 다음과 같이 된다.

$$\gamma_k = \frac{u_k^2}{2N} \quad (3)$$

그러므로 나카가미 페이딩을 겪은  $k$ 번째 수신단에서, 수신된 신호의 순시 SNR에 대한 확률밀도함수는 다음과 같다<sup>[4]</sup>.

$$p_{\gamma}(\gamma) = \frac{m_k^{m_k} \gamma_k^{m_k-1}}{\Gamma(m_k) \gamma_0^{m_k}} \exp\left(-\frac{m_k \gamma_k}{\gamma_0}\right), \quad \gamma \geq 0 \quad (4)$$

여기서  $\gamma_k$ 는  $k$ 번째 수신단에서의 SNR,  $\gamma_0 = \Omega/2N$ 는 페이딩이 존재할 경우의 평균 SNR,  $m_k$ 는  $k$ 번째 수신단에서의 페이딩 지수를 나타낸다. 확률분포함수는 확률밀도함수를 적분한 것이므로  $\gamma_k$ 에 대한 확률분포함수는 다음과 같이 쓸 수 있

다.

$$P_{\gamma}(\gamma) = \int_0^{\gamma} \frac{m_k^{m_k} x^{m_k-1}}{\Gamma(m_k) \gamma_0^{m_k}} \exp\left(-\frac{m_k x}{\gamma_0}\right) dx, \quad \gamma \geq 0 \quad (5)$$

선택 합성후 수신 신호의 SNR에 대한 분포를 구하기 위해서는 선택 합성후의 SNR,  $\gamma_{sc}$ 가  $x$ 이하일 확률을 구해야만 한다. 각 수신단에서의 SNR을  $\gamma_k$  ( $k=1, 2, \dots, D$ )라 하고 모든 수신단이 서로 독립적이라고 가정하면, 선택 합성후 수신된 신호의 SNR이  $x$ 이하일 확률은 다음과 같이 된다.

$$\Pr\{\gamma_{sc} \leq x\} = \prod_{k=1}^D \Pr\{\gamma_k \leq x\} \quad (6)$$

여기서  $D$ 는 수신단의 개수 즉, 다이버시티 가지의 수이다.

각 수신단에서 평균 SNR과 페이딩 파라미터  $m_k$ 가 동일한 값을 갖는다고 가정하면, 수신 신호의 SNR은 동일한 확률분포를 갖게 된다. 즉, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Pr\{\gamma_1 \leq x\} = \Pr\{\gamma_2 \leq x\} = \dots = \Pr\{\gamma_D \leq x\} \\ = \Pr\{\gamma \leq x\} \quad (7)$$

그 다음 선택 합성후 수신 신호의 SNR에 대한 확률분포함수,  $P_{\gamma,sc}(x)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$P_{\gamma,sc}(x) = \prod_{k=1}^D \Pr\{\gamma_k \leq x\} = [\Pr\{\gamma \leq x\}]^D \\ = [P_{\gamma}(x)]^D \quad (8)$$

선택 합성후 수신 신호의 SNR에 대한 확률밀도함수는 식 (8)을 미분하면 된다. 그러므로 최종적으로 나카가미 페이딩 환경에서 선택 합성후 수신 신호의 SNR에 대한 밀도함수,  $P_{\gamma,sc}(\gamma)$ 는 다음과 같다.

$$p_{\gamma,sc}(\gamma) = D [P_{\gamma}(\gamma)]^{D-1} p_{\gamma}(\gamma) \quad (9)$$

#### IV. 오경보확률과 제거확률

AWGN과 다중경로 페이딩 등은 오경보와 제거

를 일으키며 이러한 채널 손상은 랜덤한 특성을 갖기 때문에 확률로써 표현할 수 있다. 이 장에서는 오경보확률과 나카가미 페이딩 채널에서 다이버시티를 적용한 경우의 제거확률을 구하여 FH/MFSK 시스템을 분석한다.

FH/MFSK 시스템이 넌코히런트 온오프 키잉(noncoherent on-off keying)처럼 각각의 톤을 전송할 때, 오경보확률  $P_F$ 는 어떠한 신호도 포함하지 않은 주파수 빈의 에너지 값이 임계값을 초과할 확률이다. 주파수 빈의 에너지는 배경잡음에 의해 발생하며 다음과 같이 주어진다<sup>[1,3]</sup>.

$$P_F = \exp\left(-\frac{b_0^2}{2}\right) \quad (10)$$

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

제거확률은 수신된 신호의 포락선의 크기가 임계값보다 작을 확률이다. 오경보와는 달리 제거는 다중경로 페이딩과 AWGN에 의해 발생한다. 만일 다중경로 페이딩이 다양한 분포로 나타나면 제거확률도 다양한 형태로 표현될 수 있다. 먼저 신호가 페이딩은 고려하지 않은 AWGN 채널을 통과한다고 가정하면, 수신된 신호 포락선  $r$ 의 확률밀도함수는 다음과 같다<sup>[3]</sup>.

$$P(r) = \frac{r}{N} \exp\left(-\frac{r^2 + u^2}{2N}\right) I_0\left(\frac{ru}{N}\right) \quad (11)$$

여기서  $u$ 는 수신된 신호 포락선의 크기,  $I_0(z)$ 는 1종 0차 수정된 베셀함수(modified Bessel function of 1<sup>st</sup> kind and 0<sup>th</sup>)이다. 그러므로 제거확률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} b_d &= \Pr\{r < b\} = \int_0^b p(r) dr \\ &= \int_0^b \frac{r}{N} \exp\left(-\frac{r^2 + u^2}{2N}\right) I_0\left(\frac{ru}{N}\right) dr \quad (12) \end{aligned}$$

여기서  $b$ 는 임계값이다. 식 (12)에서 변수  $x = r/\sqrt{N}$ 로 놓고 식 (3)을 사용하면 다음과 같이  $\gamma$ 의 항으로 제거확률을 나타낼 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$b_d = \int_0^{b_0} x \exp\left(-\frac{x^2 + 2\gamma}{2}\right) I_0(x\sqrt{2\gamma}) dx \quad (13)$$

AWGN과 나카가미 페이딩을 겪은 채널에서 선택 다이버시티를 적용할 때 수신된 신호의 SNR에 대한 분포가 식 (9)와 같을 때 식 (13)은 식 (9)의 랜덤변수  $\gamma$ 의 확률밀도함수이므로 선택 다이버시티를 적용한 시스템의 제거확률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_D &= \int_0^\infty p_{r,sc}(\gamma) b_d d\gamma \\ &= \int_0^\infty D[P_\gamma(\gamma)]^{D-1} p_\gamma(\gamma) b_d d\gamma \quad (14) \end{aligned}$$

## V. 시스템 성능 분석

나카가미 페이딩 채널에서 선택 다이버시티를 적용한 FH/MFSK 시스템의 성능을 유도된 제거확률, 사용자수( $M$ ), 페이딩 지수( $m$ ), 신호대 잡음비(SNR), 및 다이버시티 가지 수( $D$ )를 함수로 하여 수치적으로 분석한다. 시스템의 비트에러율은 Goodman<sup>[3]</sup>이 구한 식을 적용하였다. 본 논문에서 고려한 시스템의 대역폭은 20 MHz, 데이터율은 32 kb/s이고 심볼 간 간섭(intersymbol interference)이나 도플러 효과(Doppler effect)는 고려하지 않았다.

그림 4, 5 및 6에서 가로축은 사용자 수( $M$ )를 나타내고 세로축은 비트에러율(BER)을 나타낸다. 그림 4에서는 SNR이 25 dB인 경우에 FH/MFSK 시스템의 BER을 나타낸다. 나카가미 페이딩 채널에서  $m$ 이 1인 경우 즉, 레일레이 페이딩 채널에서는 다이버시티 가지의 수  $D$ 가 증가함에 따라 시스템의 BER이 개선됨을 알 수 있다. 여기서  $D$ 가 1인 경우에는 다이버시티를 적용하지 않았을 경우의 BER을 나타낸다. 또한, FH/MFSK 시스템의  $M$ 이 일정한 경우에 다이버시티를 적용하면 시스템의 BER이 감소되어 성능이 개선됨을 알 수 있다.  $M$ 이 170명일 때  $D$ 가 1인 경우와  $D$ 가 2인 선택 다이버시티를 사용한 경우의 BER을 비교하면,  $D$ 가 1인 경우 시스템의 BER은 약  $1.0 \times 10^{-3}$ 이지만  $D$ 가 2인 경우 시스템의 BER은 약  $1.0 \times 10^{-4}$ 으로 감소하여 시스템 성능이 개선된다. 그러나, 동일한 조건일 때,  $D$ 가 2에서 3으로 증가한 경우에는 시스템의 BER이 전혀 개선되지 않았다. 이것은 시스템 성능 개선 정도와 가지의 수는 비례하지 않음을 의미하는 것이다.  $M$

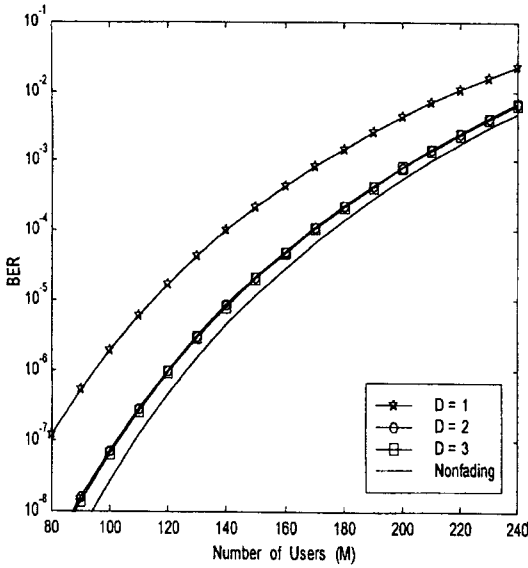


그림 4.  $m = 1.0$ 인 경우 FH/MFSK 시스템의 성능곡선 (SNR = 25 dB)

Fig. 4. Performance curves of the FH/MFSK system when  $m = 1.0$  (SNR = 25 dB).

이 170명일 때  $D$ 가 1인 경우  $1.0 \times 10^{-3}$ 의 BER은 Xuto의 결과<sup>[4]</sup>와 동일하다. 제안한 FH/MFSK 시스템은 SNR이 25 dB인 경우에는 가지의 수가 3이상 증가하더라도 시스템 성능이 전혀 개선되지 않는다. 이것으로부터 높은 차수의 다이버시티가 시스템의 만족할 만한 성능개선을 가져다 주지 못한다는 것을 알 수 있다. 만일, SNR이 25 dB 이상이 된다면 가지의 수는 2개가 적당하다.

그림 5와 그림 6에서는 SNR이 25 dB이고  $m$ 이 1.5 및 2.0인 경우에 시스템의 BER을 나타내었다. 그림 4의 결과와 마찬가지로 다이버시티 가지의 수  $D$ 가 1에서 2 또는 1에서 3으로 증가함에 따라 BER이 개선됨을 알 수 있다. 그렇지만,  $D$ 가 1에서 2 또는 1에서 3으로 증가하더라도 시스템의 BER의 개선량은  $m$ 이 1인 경우보다 둔화됨을 알 수 있다. 예를 들어, 그림 5에서  $M$ 이 170명일 때  $D$ 가 1에서 2로 증가하면 시스템의 BER은  $1.0 \times 10^{-4}$ 에서  $8.0 \times 10^{-5}$ 으로 개선되지만 개선량이 그림 4보다는 작았고, 그림 6에서는  $D$ 가 증가하더라도 시스템의 BER은 거의 개선되지 않음을 알 수 있다. 이것

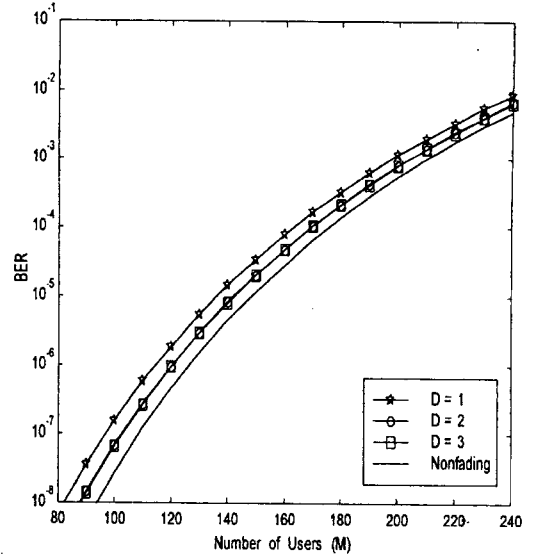


그림 5.  $m = 1.5$ 인 경우 FH/MFSK 시스템의 성능곡선 (SNR = 25 dB)

Fig. 5. Performance curves of the FH/MFSK system when  $m = 1.5$  (SNR = 25 dB).

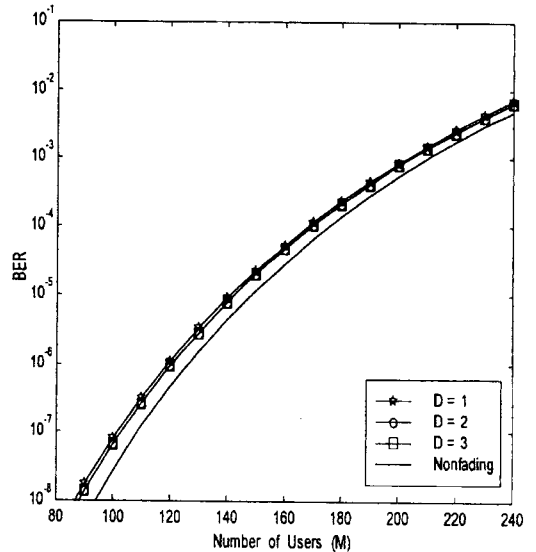


그림 6.  $m = 2.0$ 인 경우 FH/MFSK 시스템의 성능곡선 (SNR = 25 dB)

Fig. 6. Performance curves of the FH/MFSK system when  $m = 2.0$  (SNR = 25 dB).

은 SNR이 높을때와 마찬가지로  $m$ 이 큰 경우 즉, 페이딩의 영향이 약한 경우에도 높은 차수의 선택 다이버시티가 시스템의 만족할만한 성능개선을 가

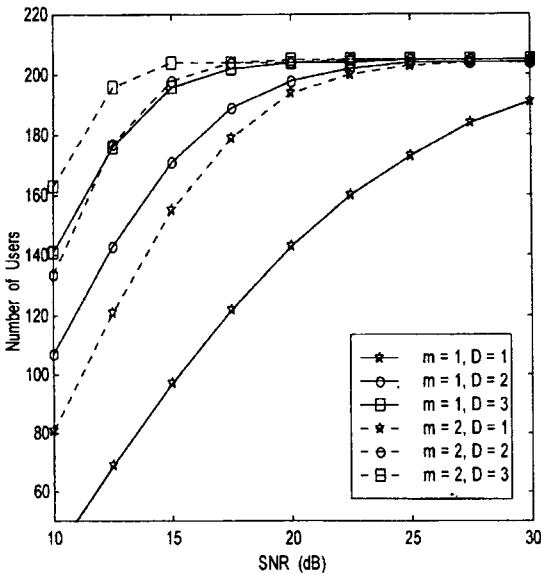


그림 7.  $BER \leq 10^{-3}$ 에서 SNR 변화에 따른 FH/MFSK 시스템의 최대 용량

Fig. 7 Maximum capacity of the FH/MFSK system as a function of SNR at  $BER \leq 10^{-3}$ .

저다 주지 못한다는 것을 알 수 있다.

그림 7에서는  $10^{-3}$ 의 BER에서 SNR에 변화를 주어가며 페이딩과 선택 다이버시티의 영향에 따른 FH/MFSK 시스템의 최대 용량을 나타내었다. Xuto의 결과<sup>[4]</sup>에 의하면  $m$ 값이 2와 2.5인 경우에 FH/MFSK 시스템의 성능은 페이딩을 고려하지 않은 채널에서의 성능과 별로 차이가 나지 않는다. 따라서, 본 논문에서  $m$ 이 2인 경우는 페이딩이 없는 채널로 가정해도 무리가 없을 것이다. 다이버시티를 적용할 경우,  $m$ 이 작고 SNR이 낮을수록 더욱 많은 시스템 용량이 증가함을 알 수 있다. 예를 들어,  $m$ 이 1이고  $D$ 가 1에서 2로 증가할 때, SNR이 25 dB인 경우에는 시스템 용량이 170명에서 204명으로 다이버시티를 고려하지 않은 경우의 시스템 용량보다 약 20% 증가한다. 그렇지만, SNR이 15 dB인 경우에는 시스템 용량이 97명에서 169명으로 다이버시티를 고려하지 않은 경우의 시스템 용량보다 약 75% 증가한다.  $m$ 이 2이고  $D$ 가 1에서 2로 증가할 때, SNR이 25 dB인 경우에는 시스템 용량이 전혀 증가하지만, SNR이 15 dB인 경우에는 시스템 용량

이 155명에서 199명으로 다이버시티를 고려하지 않은 경우의 시스템 용량보다 약 28% 증가함을 알 수 있다.

## VI. 결 론

나카가미 페이딩 채널에서 FH/MFSK 시스템의 성능분석을 위해서는 제거확률에 대한 분석이 중요하다. 왜냐하면, FH/MFSK 시스템의 BER은 제거 확률의 함수로 주어졌기 때문에 시스템의 BER을 분석하기 위해서는 먼저 제거 확률을 구해야만 한다. 페이딩을 겪은 신호는 시스템에서 제거를 유발시켜 시스템 성능을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 평균 SNR을 증가시킬 수 있다. 그러나 송신전력의 증가는 간섭량을 증가시키는 단점을 가지기 때문에 다이버시티 기법을 사용하여 페이딩을 보상해주는 방법이 더욱 적합하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 SNR을 증가시키지 않으면서 FH/MFSK 시스템의 성능을 개선하는 방법으로 선택 다이버시티를 고려하였다. 나카가미  $m$ -분포 페이딩을 겪은 MFSK 신호의 선택 다이버시티에 대한 제거확률을 유도하여 FH/MFSK 시스템의 성능 변화를 분석하였다.

전반적으로 선택 다이버시티 방식을 적용한 시스템이 다이버시티를 적용하지 않은 시스템 보다 성능이 우수하였다. 그러나 시스템 성능의 개선량은 가지의 수에 선형적으로 비례하지 않음을 알 수 있었다. 또한 본 논문에서 고려한 다이버시티 방식은 심한 페이딩을 겪은 채널에서 SNR이 낮을수록 성능개선이 효과적이라는 결론을 얻을 수 있었다.  $m$ 이 1일 때 가지의 수가 2인 경우에는 시스템의 BER이 약  $1.0 \times 10^{-4}$ 으로 개선되었지만  $m$ 이 2일 때는 시스템 BER이 전혀 개선되지 않았다. 가지의 수가 2인 다이버시티를 적용할 때 SNR이 15 dB인 경우에는 시스템 용량이 75% 증가하였고 SNR이 25 dB인 경우에는 시스템 용량이 20% 증가하였다. 이상의 분석 결과들을 종합해 보면, 극심한 페이딩을 겪은 채널에서는 다이버시티가 효과적이며 SNR이 25 dB 이상일 때는 가지의 수를 2개로 선택하는 것이 적합하다는 것을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 FH 시스템의 용량과 이동 통신

시스템의 무선전파환경, 다이버시티의 효과에 대한 이론적 근거로 사용할 수 있으며 향후 다양한 다이버시티에 대한 성능변화 연구를 계속 할 예정이다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. Kohno, R. Meidan, and L. B. Milstein, "Spread spectrum access method for wireless communications," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 58-67, Jan., 1995.
- [2] A. J. Viterbi, "A processing satellite transponder for multiple access by low-rate mobile user," in *Proc. 4<sup>th</sup> 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] 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.
- [5] G. L. Stuber, J. W. Mark, and I. F. Blake, "Diversity and coding for FH/MFSK systems with fading and jamming part-II: selective diversity," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 8, pp. 859-869, Aug., 1989.
- [6] A. Annamalai, "Analysis of selection diversity on Nakagami fading channel," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 7, pp. 548-549, 1997.
- [7] J. G. Proakis, *Digital communication*, McGraw-Hill, Inc., 3rd ed., 1995.
- [8] J. C. Lin, W. C. Kao, Y. T. Su, and T. H. Lee, "Outage and coverage considerations for microcellular mobile systems in a shadowed-Rician/shadowed-Nakagami environment," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 48, no. 1, pp. 66-75, Jan., 1999.
- [9] K. Wu and S. Tsaur, "Selection diversity for DS-SSMA communications on Nakagami fading channel," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 43, no. 3, pp. 428-438, Aug., 1994.
- [10] M. D. Yacob, *Foundations of mobile radio engineering*, CRC press, 1993.

### 이 충 성



1998년 2월: 충북대학교 정보통신공학과(공학사)  
 1998년 3월~현재: 충북대학교 정보통신공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 디지털 이동통신, 전파전파

### 김 항 래

1995년 2월: 청주대학교 전자공학과(공학사)  
 1997년 8월: 청주대학교 전자공학과(공학석사)  
 1997년 3월~1997년 12월: 한국전자통신연구원 위촉연구원  
 1999년 3월~현재: 충북대학교 정보통신공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 디지털 이동통신, 무선시스템

### 김 남



1981년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학사)  
 1983년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학석사)  
 1998년 8월: 연세대학교 전자공학과(공학박사)  
 1992년 8월~1993년 8월: 미

Standford 대학 방문교수

1989년 2월~현재: 충북대학교 정보통신공학과 교수  
 [주 관심분야] Diffractive Optics, WDM Optical Filter & DEMUX Optical Memory, Holography Application, 디지털 이동통신, 전자파 해석, EMR/EMC