

# 레이리 페이딩 환경하에서 FFH/BFSK 시스템의 경로 다이버시티를 이용한 성능 분석

조용진<sup>1)</sup>, 조형래<sup>2)</sup>

## A study on a Performance Analysis of FFH/BFSK System Using Path Diversity under Rayleigh Fading

Yong-jin Cho, Hyung-rae Cho

### Abstract

Digital communication technologies have been offering the advantages in views of high quality data service, a compacted mobile and base station, and frequency efficiency.

On the other hand, the practical advantage of spread spectrum communications is the fact that they can implement various diversity combining using a simple structure.

In the system based on microcell concept, the fading phenomena including time delay and path loss can be occurred by contours of hills, buildings, forests, billboards, and any other clumps throughout the path of communications. Thus we have to consider all kinds of these scatterers for some high quality services.

Although the mobile communication is used mainly for voice service today, it is expected to be used for multimedia service in the near future.

---

1) 한국해양대학교 전파공학과 석사과정 전파공학 전공

2) 한국해양대학교 전파공학과 조교수

In addition, both the SNR in analog type and the BER performance in digital type are severely degraded by fading in the terrestrial transmission.

In this thesis, we evaluate the performance of fast frequency hopping communication systems when a Rayleigh fading caused by envelope variations of multipath channel exists. The multipath fading channel and Rayleigh fading are confirmed using a theoretical analysis.

We evaluate the performances of the system over the channel affected by fading or not, so we compare the results. When the path diversity reception method is applied to the system, we can obtain 10~13 dB performance gain at  $10^{-3}$  BER point in comparison with the case of no diversity reception. In view of the modulation methods, DPSK shows 2~3 dB performance gain over the general BFSK.

## 제 1 장 서 론

통신에서의 디지털화는 세계적인 추세이며 높은 통화품질, 데이터 서비스, 기지국 및 단말기의 소형화, 주파수 이용 효율 등의 장점을 가지고 있다.

대역확산(Spread Spectrum: SS) 방식을 이용한 디지털 이동통신은 사용자 수용 능력의 증가뿐만 아니라 보안성과 안정성 때문에 이미 상용 서비스가 되고 있으며 많은 연구가 이루어지고 있다. 대역확산 통신의 실질적인 장점은 다양한 다이버시티 조합 기술을 간단히 구현할 수 있다는 것이다.

대역확산 방식에는 직접시퀀스(Direct Sequence: DS) 및 주파수도약(Frequency Hopping: FH)의 두 가지가 있으며, 현재 상용 서비스되고 있는 주파수공용 통신(Trunked Radio System) 역시 주파수도약 방식을 사용하고 있다

저속 주파수도약 방식을 채택하고 있는 상용 시스템도 존재하나, 최근 Chip기술의 발달로 고속 주파수 합성기의 제작이 가능하기 때문에 고속 주파수도약 방식 시스템에 대한 연구가 이루어짐으로써 시제품들이 출시되고 있다. 최근 주목받고 있는 주파수공용 통신도 주파수도약 방식을 사용하는 고품질의 디지털 무선통신 시스템이라 할 수 있다.

그러나, 지금은 통화량의 수용 및 고품질 통신의 요구와 한정된 전파자원의 효

유효적인 사용을 위해서 특히 대도시에서는 수많은 마이크로셀 형태의 기지국을 배치하고 있으며, 주파수 도약방식을 사용하는 주파수공용 통신 역시 마이크로셀 형태의 기지국을 사용하고 있다. 마이크로셀 단위를 기초로 하는 도시 지역의 통화 서비스에서 높은 건물이나, 광고탑, 빌딩 등의 현저한 물출물에 의해 발생하는 다경로 페이딩 현상과 시간 지연 특성, 경로 손실 등에 대한 철저한 대책은 양질의 서비스를 구현하는데 있어 필수적 요건이라 할 것이다.

본 논문에서는 전파의 다경로 페이딩 채널과 페이딩 현상을 이론적으로 정리하고, 고속 주파수도약 통신 시스템에 대한 분석과 특히 레일리 페이딩 현상이 나타날 때의 FFH/BFSK 시스템의 이론적 비트 오류율과 레일리 페이딩 하에서의 오류율을 구하여 그 결과를 비교하였다. 다만, 신호의 전송 중에 일어날 수 있는 ISI나 다른 영향은 고려하지 않았다.

또한, 여기서는 경로 다이버시티 기법을 사용하여 비트 오류율을 얼마나 감소시킬 수 있는지를 검토하고 그에 따른 시스템 성능을 분석하였다. 지금까지의 경로 다이버시티를 적용시키는 연구는 변조 방식을 주로 DPSK로 하였지만[5, 9], 변조 방식을 페이딩과 재밍에 강한 군용통신에서 많이 쓰는 BFSK로 하였으며, DPSK와 비트 오류율을 비교하였다.

## 제 2 장 대역확산 통신 및 페이딩

### 2-1. 대역확산 통신

대역확산 기술은 직접 시퀀스 방식과 주파수도약 대역확산 방식으로 분류할 수 있다. 직접시퀀스 방식은 데이터 대역폭보다 훨씬 넓은 대역폭으로 원래의 신호를 변조하여 확산시키며, 주파수도약 방식에서 데이터는 프로그램된 순서나 PN코드에 의해서 한 주파수에서 다른 주파수로 이동하며, 수신단에서는 주파수가 이동하는 상황을 파악하고 있어야 한다. 이 기술은 상당히 안전하지만 수신단과 송신단이 정확히 동기가 맞아야 하므로 구성하기가 복잡하여 단말기 가격이 좀 더 비싸진다. 하지만 이 방식은 직접시퀀스 방식보다 간섭 현상에 대해 강하다는 장점을 지니고 있다.

## 2-2. 주파수도약 방식

주파수도약 방식은 스펙트럼을 확산시켜야 할 신호의 반송파 주파수를 어떤 특정한 패턴에 따라 시간적으로 전환해 감으로써 시간평균으로 협대역 신호를 광대역 신호로 변환하는 방식이다. 주파수도약 시스템의 일반적인 구성도는 그림 2-1과 같다. 데이터 시퀀스로 변조된 반송파의 주파수를 PN 코드 발생기에 의해 제어되는 주파수 합성기의 출력신호에 의해 불규칙적으로 바꿈으로써 주파수 대역을 확산시킨다.

## 2-3. 페이딩 채널

현재 이동통신은 여러 분야에 걸쳐 주로 음성통신에 사용되고 있지만, 앞으로는 영상 통신, 고속 디지털 통신 등에 쓰일 것이므로 전송속도의 증가 또는 통신 품질의 향상이 요구되고 있다. 육상 페이딩 통신로의 경우 페이딩의 영향은 매우 심각하여 아날로그 통신에서는 신호 대 잡음전력비를 크게 저하시키거나, 디지털 통신에서는 부호 오류를 증가시킨다. 다음 그림 2-1은 육상 이동통신의 다경로 채널을 나타낸다.

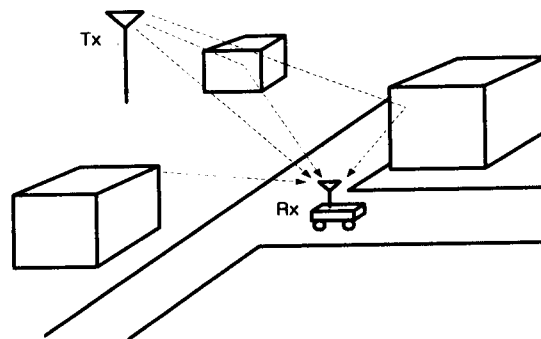


그림 2-1. 다경로 채널의 특성  
Fig. 2-1. Characteristic of multipath channel

도시에서의 이동통신 환경은 이동국 주변의 빌딩 등 인공건축물 및 지형지물 때문에, 기지국과 이동국은 직접 마주보지 못한다. 이러한 조건에서 이동국에 수신된 파는, 이동국의 주변 건물 등에 의한 반사, 회절, 산란 등으로 각각의 다른 지연시간을 갖게 되며, 여러 방향으로부터 이동국에 수신된다. 특히 짧은 구간에 시의 전개강도의 순간치는 레일리 분포를 갖는 것이 실험으로 확인되었다[2].

채널 상태의 임의적인 변화는 여러 가지 원인에 의해 채널의 물리적인 특성 즉, 수신 신호의 진폭, 위상 수신각이 변함에 따라 발생하는데 이때 채널의 시변 임펄스응답(time-variant impulse response)이 변한다. 다경로 채널(multipath channel)은 채널을 통해 전송된 신호에 의한 time spread 특성과 채널 구조의 시변화(time variation) 특성이 있다.

#### 2-4. 레일리 페이딩

이동통신을 특징짓는 페이딩은 large-scale 페이딩과 small-scale 페이딩이다. Large scale 페이딩은 넓은 지역에서 수신부(이동국)의 이동으로 인한 평균 신호 전력 감쇠 또는 경로손실을 나타낸다. 이 현상은 송·수신기 사이의 눈에 띄는 지상 물출물에 영향을 받는다. small-scale 페이딩은 송·수신기 사이의 공간 간격에서 작은 신호변화로 생길 수 있는 신호 진폭과 위상의 변화이다. small scale 페이딩은 다중반사 경로가 많고, 가시거리 신호성분(line of sight)이 없으며, 수신 신호의 포락선이 통계적으로 레일리 확률밀도함수를 가질 때 레일리 페이딩이 된다.

### 제 3 장 페이딩 채널에서 FFH/BFSK 시스템의 이론적 성능

#### 3-1. 고속 주파수도약 BFSK 시스템

FFH/BFSK 통신시스템에서 BFSK 복조기는 송신기에서 전송한 비트율,  $R_b = 1/T_b$  ( $T_b$ 는 비트 duration)의 데이터 시퀀스에 따라 두 개의 베이스 밴드 주파수  $f_1$  또는  $f_2$  중 하나를 선택하게 된다.  $f_1$ 과  $f_2$ 사이의 주파수 간격은 도약

을  $R_h = 1/T_h$ 와 같으며  $T_h$ 는 hopping duration이다.  $L$ 개의 hop이 각 비트 duration 동안 도약되기 때문에  $T_h = T_b/L$ 이다.

AWGN 채널 하에서 주파수 도약 비동기 BFSK 시스템의 오율은 다음 식과 같다[6].

$$\begin{aligned}
 P_e &= \text{prob}(r_1 < r_2) \\
 &= \int_{r_1=0}^{\infty} p(r_1) \int_{r_2=r_1}^{\infty} p(r_2) dr_2 dr_1 \\
 &= \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{A^2}{\sigma^2}\right) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma}{2}\right)
 \end{aligned} \tag{3-1}$$

단,  $\gamma$ 는 수신된 신호 대 잡음전력비(SNR)이다.

### 3-2. 페이딩이 있을 때 시스템의 오율

이장에서는 레일리 페이딩 환경 하에서 시스템의 비트에러율( $P_b$ )을 분석한다.

레일리 페이딩 채널에서 수신된 신호는 위상과 포락선에서 광범위한 변화가 있다. 연속적인 수신 SNR  $\gamma$ 는 페이딩 포락선 변화에 따라 변하며, 그 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$p_r(\gamma) = \frac{1}{\Gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right) \tag{3-2}$$

단,  $\Gamma$ 는 평균 수신 SNR이다..

레일리 페이딩 환경 하에서 주파수 도약 비동기 BFSK 시스템의 평균 오율은 주어진 확률 밀도함수  $\Gamma$ 에 대해 위의 식 (3-2)을 평균함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_b &= \int_0^\infty P_c \cdot p_\gamma(\gamma) d\gamma \\
 &= \int_0^\infty \frac{1}{\Gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right) \cdot \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma}{2}\right) d\gamma \\
 &= \frac{1}{2 + \Gamma}
 \end{aligned}
 \tag{3-3}$$

식 (3-1)과 (3-3)를 사용하여 AWGN 환경 하에서 레이리 페이딩 환경 하에서의 성능곡선을 비교한다. 그림 3-2는 AWGN과 레이리 페이딩 하에서의 비트 오류율을 나타낸다.

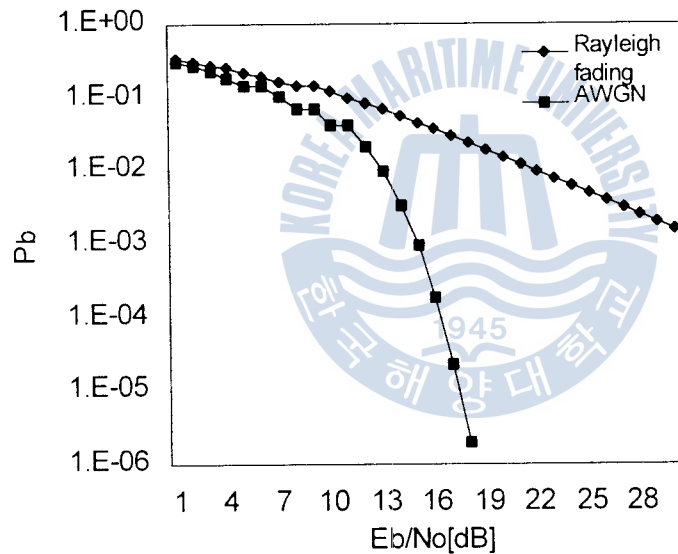


그림 3-1. AWGN과 레이리 페이딩 하에서 비트 에러확률  
 Fig. 3-1. The probability of bit error under AWGN and Rayleigh fading

## 제 4 장 경로 다이버시티를 이용한 FFH/BFSK의 성능 평가

### 4-1. Maximum Ratio Combining 기법

MRC(Maximum Ratio Combining)는 M개의 branch에 수신되는 신호로 그 각

각의 신호 전압과 잡음 전력의 비에 따라 가중되고 합산된다. MRC는 개개의 SNR의 합과 같은 출력 SNR을 만들어 낸다. MRC는 선형 다이버시티 Combiner 중 페이딩의 영향을 가장 많이 감소시킨다는 것을 통계치를 통해 알 수 있다[12].

효과적인 combining 과정이 될려면, combiner가 어떤 한 개의 branch를 사용해서 얻을 수 있는 성능과 비교해서 시스템의 성능을 경감시키지 않아야 하고, 가장 좋은 branch와 비교해서 수신기의 성능을 증가시켜야 한다. 다음의 그림 4-1은 M차 MRC(Maximal ration combining) 다이버시티에 대한 구성도를 나타내었다.

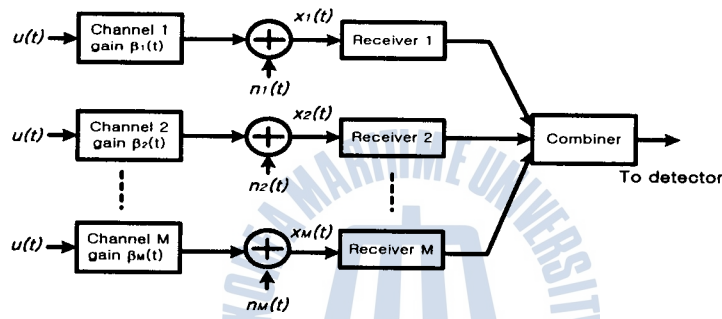


그림 4-1. Maximum Ratio Combiner

Fig. 4-1. Maximum Ratio Combiner

페이딩 채널에서 BER 성능을 향상시키기 위해 수신 SNR  $\gamma$ 의 확률밀도함수  $p(\gamma)$ 를 이용한다. 고속 주파수 도약 시스템에서 같은 정보 비트의 각 chip이  $M$ 개의 다른 반송파 주파수를 사용해서 전송되기 때문에 일종의 다이버시티 수신이 요구되며 비트 당  $M$ 개의 chip이 전송될 때, 이것은  $M$  branch MRC(Maximum Ratio Combining) 다이버시티 시스템과 등가이다[11, 13].

#### 4-2. 경로 다이버시티 기법

직접 시퀀스 방식 시스템은 높은 분해능으로 다양한 경로의 신호 성분을 나눌 수 있다. 이런 이유로 레이크 수신기와 같은 경로 다이버시티 기법이 제안되었다. 경로 다이버시티 기법이 직접 시퀀스 방식에서는 널리 사용되고 있지만, 주파수



도약 시스템에서는 사용되고 있지 않다.

주파수 도약 시스템은 직접 신호 성분을 “오리지널(original)”, 지연 성분을 “에코(echo)”라고 각각 부른다. 에코는 다경로 페이딩에서 나타나며, 그림 4-2에서 1개의 chip delay와 같거나 다른 신호 성분이라고 가정한다. 시스템 성능은 경로 다이버시티를 이용해서 더 나아지고, 같은 동작전력에 대해 더 좋은 BER 성능을 가져온다[7].

#### 4-3. 경로 다이버시티 적용시 FFH/BFSK 시스템의 이론적 성능평가 모델 제안

고속 주파수도약 시스템에 MRC 경로 다이버시티의 수신 SNR  $\gamma$ 의 확률밀도함수  $P_{P-D}$ 는 식 (4-1)과 같고  $\Gamma'$ 는 경로 다이버시티 실행후의 평균 수신 SNR로 다음 식과 같다.

$$p(\gamma) = \frac{\gamma^{M-1}}{\Gamma'^M (M-1)!} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma'}\right) \quad (4-1)$$

경로 다이버시티를 적용한 시스템에 대한 평균 BER 성능은 FFH/BFSK 시스템의 오류 식을 경로 다이버시티 수신 SNR  $\gamma$ 의 확률밀도함수로 적분함으로써 다음 식 (4-2)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{P-D} &= \int_0^{\infty} P_e \cdot p(\gamma) d\gamma \\ &= \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma}{2}\right) \cdot \frac{\gamma^{M-1}}{\Gamma'^M (M-1)!} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma'}\right) d\gamma \\ &= \frac{1}{2 (M-1)!} \int_0^{\infty} \frac{\gamma^{M-1}}{\Gamma'^M} \left\{ \exp - \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{\Gamma'} \right) \gamma \right\} d\gamma \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2} \Gamma'\right)^M} \end{aligned} \quad (4-2)$$

## 제 5 장 시뮬레이션 결과 및 고찰

먼저 그림 3-1을 살펴보면 고속 주파수 도약 시스템에서  $P_b$ 가  $1.5 \times 10^{-3}$ 일 때 AWGN이 레일리 페이딩하에서 보다  $E_b/N_0$ 가 약 15 dB 이상인 것을 알 수 있다. 이 결과로 레일리 페이딩이 AWGN보다는 통신 성능에 훨씬 심각한 영향을 미침을 알 수 있다.

그림 5-1은 FFH/BFSK 시스템에 경로 다이버시티를 적용한 결과를 나타낸다. 경로 수는 2경로에서 5경로로 변화시켰다. 2경로 일 때는 레일리 페이딩 하에서 그림 3-1과 비교하였을 때  $P_b$ 가  $1.5 \times 10^{-3}$ 일 때  $E_b/N_0$ 가 약 13 dB 이상 개선됨을 알 수 있다. 또한, 경로수가 증가함에 따라  $E_b/N_0$ 가 향상됨을 알 수 있는데, 2경로와 5경로는  $P_b$ 가  $1.5 \times 10^{-3}$  일 때를 기준으로 약 10 dB의 성능개선이 이루어짐을 알 수 있다. 그러므로, 가능한 한 경로 수를 증가시킴으로서  $E_b/N_0$ 의 향상을 가져올 수 있다하겠다.

지금까지 고속 주파수도약 방식에 경로 다이버시티를 적용시키는 연구는 변조 방식을 주로 DPSK로 하였다[5, 9]. 본 논문에서는 DPSK와  $E_b/N_0$  차이가 약 2~3 dB 정도가 나지만 페이딩과 재밍에 강한 군용통신에서 많이 쓰는 BFSK로 하였고, 그림 5-2는 레일리 페이딩 하에서 FFH/BFSK와 DPSK 시스템에 경로 다이버시티를 적용함으로써 나타나는 성능을 비교하였다. 그림 5-2에서 보면 2경로 일 때  $P_b$ 가  $1.5 \times 10^{-3}$ 에서 약 2 dB, 3경로일 때  $10^{-3}$ 에서 3 dB, 4경로일 때 약 3 dB의 차이가 남을 알 수 있다.

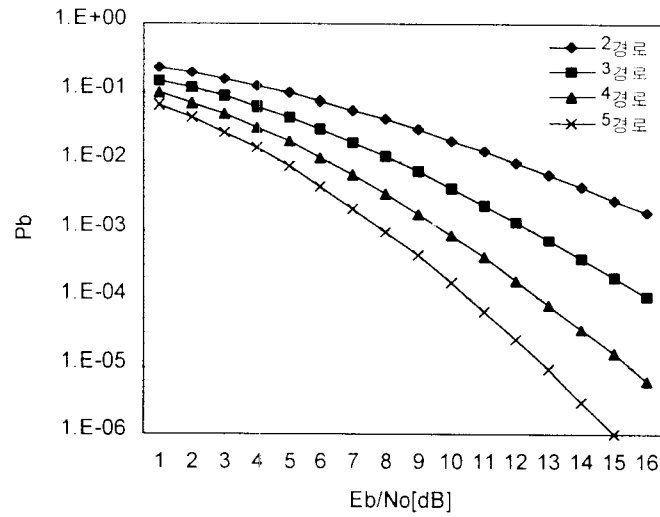


그림 5.1. 경로 다이버시티 적용후의 비트 오류  
 Fig. 5.1. Probability of bit error after path diversity

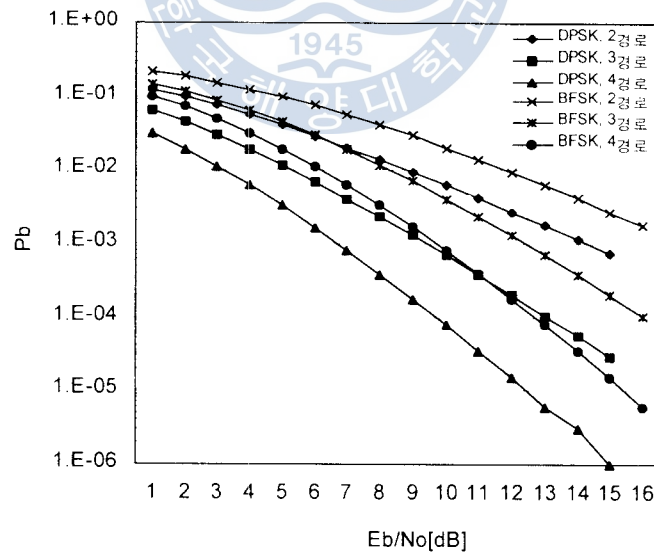


그림 5-2. FFH에서 BFSK와 DPSK의 오류 비교  
 Fig. 5-2. Comparison of bit error probability of BFSK and DPSK for FFH

## 제 6 장 결론

현재의 Cellular, PCS와 같은 이동 통신 시스템은 직접 시퀀스 대역확산 방식을 사용하고 있다. 그러나, 특정지역에서의 페이딩과 신호의 간섭 등의 문제는 직접 시퀀스 방식에서는 신호의 왜곡 현상으로 이어져 시스템의 성능저하를 가져오기 쉽기 때문에 주파수도약 시스템이 훨씬 효과적이다.

이동 무선 채널에서 발생하는 레일리 페이딩에 대하여 수신기에서 경로 다이버시티를 적용할 때와 적용하지 않을 때의 오율을 비교하였다. 비교결과, 경로 다이버시티가 페이딩에 매우 효과적임을 알 수 있었다. 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 고속 주파수 도약 BFSK 시스템의 AWGN환경 하에서의 오율과 레일리 페이딩 하에서 에리확률을 유도하여 비트에러율을 보였다.  $P_b$ 가  $1.5 \times 10^{-3}$ 일 때  $E_b/N_0$ 는 AWGN환경과 레일리 페이딩 하에서의 약 15 dB의 차이가 남을 알 수 있었다.
- (2) 레일리 페이딩 하에서 고속 주파수 도약 시스템은 경로의 수가 증가할수록, 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 페이딩 하에서 AWGN과 2경로 다이버시티 적용 후의 성능은  $P_b$ 가  $1.5 \times 10^{-3}$ 에서 약 13 dB, 2경로와 5경로일 때는  $P_b$ 가  $1.5 \times 10^{-3}$ 일 때  $E_b/N_0$ 의 차이는 약 10 dB 이상이 됨을 알 수 있었다.
- (3) 변조 방식을 달리하여 경로 다이버시티를 적용했을때, FFH/BFSK와 DPSK 시스템은 DPSK와 약 2~3 dB의 차이가 남을 알 수 있었다.

이상의 분석 결과로 레일리 페이딩하의 FFH/BFSK 시스템에서는 경로 다이버시티를 적용함으로써 시스템 성능 향상이 있었고, 페이딩의 영향을 극복하는 효율적인 수단임을 알 수 있었다. 앞으로 Rician 및 m분포 페이딩등 여러 가지 페이딩에 대한 다이버시티 기법의 연구와 이를 적용한 고속 주파수 도약 시스템에 대한 연구가 요구된다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. G. Glisic, P. A. Leppane, *Code Division Multiple Access Communications*, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [2] 최명선, 위규진, 황인희, 이경희, 임재우, "1~3 GHz 대역에서의 전파지연특성 측정 및 분석 연구," *전자파기술*, vol. 10, no. 1, pp. 16-32, 1999. 3.
- [3] J. G. Proakis, *Digital Communication - Third Edition*. McGraw Hill, 1995.
- [4] Bernard Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I : Characterization," *IEEE Communications Magazine*, pp. 90-100, July 1997.
- [5] 고봉진, 황인수, 조성준, "페이딩 통신로의 통신 용량에 관한 연구," *한국통신학회논문지*, Vol. 18, no. 18, pp. 1136-1145. 1993.
- [6] William C. Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, McGraw Hill, 1982.
- [7] K. C. Teh, Alex C. Kot, and Kwok H. Li, "Partial Band Jamming Rejection of FFH/BFSK with Product Combining Receiver over a Rayleigh Fading Channel," *IEEE Comm letter*, vol. 1, no. 3, pp. 1050-1057, May 1997.
- [8] J. S. Lee, R. H. French, and L. E. Miller, "Probability of error analyses of a BFSK frequency-hopping system with diversity under partialband jamming interference-Part I: Performance of squarelaw linear combining soft decision receiver," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM 32, pp. 645-653, June 1984.
- [9] R. L. Peterson, R. E. Ziemer, and D. E. Borth, *Introduction to Spread Spectrum Communications*, Prentice Hall, 1995.
- [10] Y. Murata, et al., "PDI receiver for fast frequency hopping spread spectrum system," *Proc. of IEEE Vehic. Technol. Conf. '93*, N. J, USA, pp. 380-383, 1993.
- [11] Y. Murata, et al., "Path Diversity for FFH/PSK Spread Spectrum Communication System," *IEEE JSAC*, vol. 12, no. 5, pp. 970-975. June 1994.
- [12] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications Principles & Practice*, IEEE Press and Prentice Hall, 1996.

- [13] M. Schwartz, W. R. Bennett, and S. Stein, *Communication Systems and Techniques*, IEEE Press, 1996.

