
MC-CDMA 시스템의 성능 분석

최승국* · 임정욱**

Performance Evaluation of MC-CDMA Systems

Seung-kuk Choi* · Jung-wook Yim**

본 연구는 한국과학재단 지정 인천대학교 멀티미디어연구센터의 지원으로 수행되었음

요 약

MC-CDMA 방식에서는 데이터 전송 시, 서로 직교성이 있는 여러개의 부반송파들을 사용한다. 그러므로 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있어서 성능이 우수한 전송이 가능하다. 본 논문에서는 에러 제어 코드 및 안테나 다이버시티를 사용했을 때의 MC-CDMA 시스템 성능을 분석하였다. 이러한 시스템에서 데이터가 다중 경로 도플러 페이딩 환경 하에서 전송될 때의 데이터 비트 에러율을 구하였다.

ABSTRACT

MC-CDMA is a digital modulation technique where a single data symbol is transmitted at multiple subcarriers which are orthogonal to each other. With this technique, frequency diversity can be achieved. The performance of MC-CDMA systems is analyzed, when data is transmitted over multi-path and Doppler fading channel. The performance of this technique, gauged by the average bit error rate, is numerically analyzed for the system with the application of antenna diversity and error control coding.

I. 서 론

디지털 셀룰라 이동 통신 시스템에서 널리 사용되고 있는 DS-CDMA(Direct Sequence - Code Division Multiple Access) 시스템은 이동 통신 환경에서의 유연성, 보안성, 사용자 수용 능력 등에서 많은 장점을 가지고 있다[1]. 그러나 미래의 멀티미디어 서비스에는 동영상과 고속 디지털 데이터가 포함되어야 한다. DS-CDMA 경우에는 고속의 데이터를 전송 시 chip간 간섭이 증가한다.

그러므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다중 반송파 전송 방식이 제시되었다. 최근에 제안된 다중 반송파를 이용한 전송 방식은 크게

MC-CDMA(Multi Carrier -CDMA) 방식과 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식으로 구분된다. MC-CDMA 방식은 심볼간 간섭에 강한 OFDM 구조의 다중 반송파 전송 방식과 다중경로 페이딩에 강한 DS-CDMA 방식을 결합한 방식으로 송·수신단에서 변·복조 시 IFFT/FFT를 사용하여 고속의 시스템 구현이 가능하며, 수신단에서 각 부반송파마다 간단한 단일 탭(one-tap) 구조의 등화기를 사용하여 채널의 주파수 선택적 페이딩에 의한 왜곡을 보상할 수 있다[2]. 이러한 MC-CDMA 방식에 대한 연구는 N. Yee, J-P.

*인천대학교 정보통신공학과 교수
접수일자 : 2003. 3. 9

**인천대학교 정보통신공학과 대학원 석사과정

Linnartz 그리고 G. Fettweis[3]와 K. Fazel과 L. Papke[4]에 의해 제시되고 연구되었다. OFDM 전송 방식에서는 송신하려는 데이터를 병렬화한 후에 이를 다수의 직교 부반송파를 사용해서 전송하기 때문에 전송 심볼의 길이가 DS-CDMA 같은 단일 반송파 전송 방식보다 부반송파의 수 만큼 더 길어지게 된다. 따라서 심볼 주기가 짧은 고속 데이터 전송 시 발생하는 심볼간 간섭(ISI: inter symbol interference) 문제를 해결할 수 있다.

본 논문에서는 도플러 페이딩 다중 경로 채널 하에서의 MC-CDMA 시스템 성능을 비트 에러율(BER: bit error rate)과 사용자 용량 면에서 분석하고자 한다. II절에서는 MC-CDMA 시스템 구조 및 도플러 효과를 고려한 레일라이 페이딩 채널의 특징에 대하여 기술하고, III절에서는 MC-CDMA 시스템의 성능을 향상시키기 위한 안테나 다이버시티와 에러 제어 코딩(error control coding) 기법을 사용할 때의 시스템 성능을 분석한다.

II. MC-CDMA 시스템과 도플러 채널 특성

1. MC-CDMA 시스템 구조

MC-CDMA 방식에서는 하나의 데이터를 여러 개의 부반송파로 병렬 전송한다. 그림 1에 MC-CDMA 송·수신기의 구성도가 표시되었다. 송신기 입력 데이터 $a_m[k]$ 는 m 번째 사용자의 k 번째 이진 데이터 값을 나타내며, 이때 데이터 값은 +1 또는 -1의 값을 가진다. 그림 1에서와 같이 하나의 데이터 심볼은 먼저 사용자 간에 직교성이 있는 코드 $c_m[i]$ 와 각각 곱해진 다음, 주파수 간격이 F/T_b 만큼 떨어짐으로서 서로 직교성이 있는 N 개의 부반송파들로 전송된다. 이때 T_b 는 데이터의 심볼 간격이며 F 는 임의의 정수이다. 결과적으로 m 번째 사용자의 k 번째 데이터에 대한 전송 신호는 다음 식(1)과 같이 표시된다.

$$s_m(t) = \sum_{i=0}^{N-1} a_m[k] c_m[i] \cos(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{F}{T_b} t) \cdot P_{T_b}(t - kT_b) \quad (1)$$

위 식에서 $P_{T_b}(t)$ 는 구간 $[0, T_b]$ 에서 1의 일정한 크기를 가지는 것으로 가정한다 (rectangular pulse shaping). 우선 $1/T_b \ll BW_c \ll F/T_b$ 인 주파수 선택적 채널인 경우를 가정하기로 한다. 이때 BW_c 는 채널의 coherence 대역폭을 나타내며, 위 부등식이 만족 되도록 F 를 충분히 크게 선정한다. 그러면 이 경우에는 전송 시 데이터 심볼간 간섭(ISI)이 없으며 각 부반송파의 전달 특성이 서로 독립적이다. 각 부반송파가 할당 주파수 대역폭 내에서 flat 하면, m 번째 사용자에 대한 채널의 전달 특성은 다음 식(2)와 같이 표시된다.

$$H_m \left[f_c + i \frac{F}{T_b} \right] = \rho_{m,i} e^{j\theta_{m,i}} \quad (2)$$

이때 $\rho_{m,i}$ 와 $\theta_{m,i}$ 는 주파수가 $f_c + i(F/T_b)$ 인 m 번째 사용자의 i 번째 부반송파에 대한 불규칙 크기 및 위상 전달 특성을 나타낸다. 이때 다중 경로 페이딩에 의하여 그 크기 $\rho_{m,i}$ 는 레일라이 분포를 가지며 위상 $\theta_{m,i}$ 는 균일한 분포를 가진다. 또한 m 번째 사용자의 i 번째 부반송파 신호의 평균 전력은 다음 식(3)과 같다.

$$\overline{p_{m,i}} = E \left[\rho_{m,i} \cos(2\pi i \frac{F}{T_b} t + \theta_{m,i}) \right]^2 = \frac{1}{2} E[\rho_{m,i}^2] \quad (3)$$

Downlink 전송시 이동 단말기에서는 모든 다른 사용자들에 대한 전송 신호와 자신의 전송 신호($m=0$)를 같은 한 경로를 통해서 수신한다.

따라서 downlink에서는 아래 식(4)가 성립한다.

$$\rho_{m,i} = \rho_{0,i} \quad \theta_{m,i} = \theta_{0,i} \quad \text{for all } m. \quad (4)$$

반면에 uplink에서는 $\rho_{m,i}$ 와 $\theta_{m,i}$ 는 모든 m 과 i 에 따라 서로 다른 불규칙한 랜덤 변수가 된다. 식 (1)에 주어진 신호가 채널을 통해 수신기에 도착되는 신호 $r(t)$ 는 식(5)와 같이 다른 사용자에게 의한 간섭 신호들 이외에 가산성 백색가우시안 잡음(AWGN: additive white gaussian noise) $n(t)$ 가 작용하며 이 AWGN의 one-sided 전력 스펙트럼 밀도는 N_0 로 일정한 값을 가진다.

$$r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{m,i} c_m[i] a_m[k] \cdot \cos(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{F}{T_b} t + \theta_{m,i}) + n(t) \quad (5)$$

MC-CDMA 수신기에서 $\theta_{0,i}$ 는 각 채널을 통하여 신호가 전송될 때 발생된 위상 성분이다. 자기 자신의 신호($m=0$)를 얻기 위하여 각 지로에 자기 자신의 직교 코드 $c_0[i]$ 가 곱해지고 적분된 다음, 매 심볼 시간 때마다 샘플링되어 출력 v_0 이 식(6)과 같이 구해진다.

$$v_0 = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{m,i} c_m[i] d_{0,i} a_m[k] \times \frac{2}{T_b} \int_{kT_b}^{(k+1)T_b} [\cos(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{F}{T_b} t + \theta_{m,i}) \times \cos(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{F}{T_b} t + \hat{\theta}_{0,i})] dt + \eta \quad (6)$$

이때 $\hat{\theta}_{0,i}$ 는 i 번째 부반송파에서 위상 추정값이며 η 는 AWGN 성분으로 인한 값이며 식(7)과 같다.

$$\eta = \sum_{i=0}^{N-1} \int_{kT_b}^{(k+1)T_b} [n(t) \frac{2}{T_b} d_{0,i} \cos(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{F}{T_b} t + \hat{\theta}_{0,i})] dt \quad (7)$$

만일 위상 추정이 완벽하게 이루어지면, 즉 $\hat{\theta}_{0,i} = \theta_{0,i}$ 이면 출력 판정값 v_0 는 다음 식(8)과 같이 된다.

$$v_0 = a_0[k] \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0,i} d_{0,i} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} a_m[k] c_m[i] \cdot c_0[i] \rho_{m,i} d_{0,i} \cos \hat{\theta}_{m,i} + \eta \quad (8)$$

2. 도플러 효과를 고려한 레일라이 페이딩 채널 특성

이동 통신 채널은 전파가 도시의 빌딩 사이를 전파될 때 빌딩에 의해서 반사되고, 또 산의 경사면에 의해서 반사되는 등 다중 경로를 통해서 수신측에 전파가 도달되는 채널이다. 이렇게 다중 경로를 통해서 도달된 전파는 다경로 퍼짐에 의한 ISI 뿐만 아니라, 수신측이 차량인 경우 대개의 단말기는 이동하면서 수신하게 되므로 도플러 페이딩이 발생하게 된다. 도플러 페이딩의 최대 주파수 f_D 는 다음 식(9)와 같이 단말기의 이동 속도 v 와 반송파의 파장 λ 에 의해 결정된다.

$$f_D = \frac{v}{\lambda} \quad (9)$$

위 식에서와 같이 보통 f_D 는 수 100Hz 이하의 값을 가진다. 모노폴(monopole) 안테나를 사용할 때 도플러 영향을 받아 시간에 따라 변화되는 페이딩의 모양이 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 생성되었다[5]. 이러한 방법을 이용하여 도플러 효과를 고려한 레일라이 페이딩이 생성되어 그 sample 함수가 그림 2에 주어졌다. 만일 단말기가 이동하면 그림 2에서와 같이 전파의

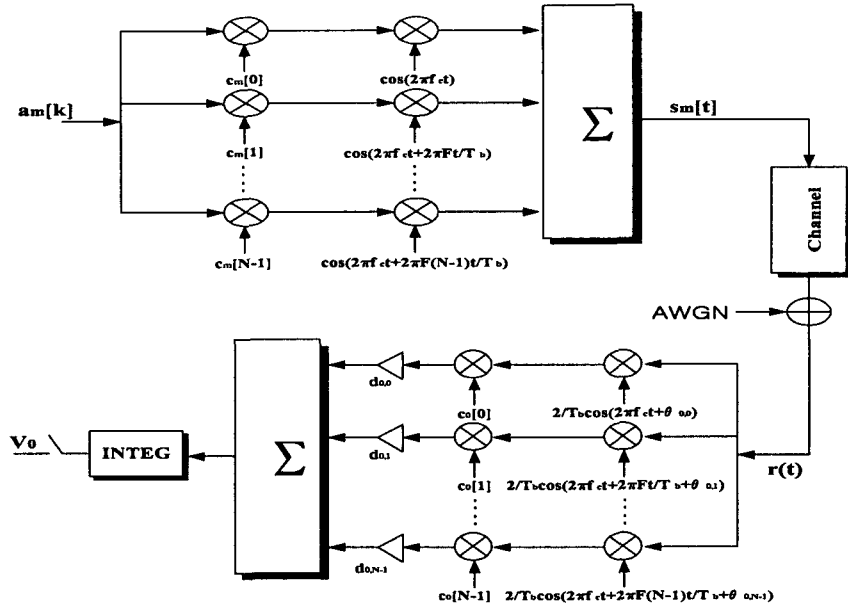


그림 1. MC-CDMA 송·수신기 구조
Fig.1 Structure of MC-CDMA system

크기는 장시간씩 그 크기가 작아지게 되므로 연
집(burst) 에러가 발생되며 따라서 에러가 증가
하게 된다.

이러한 도플러 레일라이 페이딩의 특성은 주로
LCR(level crossing rate), ADF(average
duration of fades), CDF(cumulative distribution
function)로 측정된다. LCR이란 수신 신호가 단
위 시간당 특정한 신호 level과 양의 기울기 방
향으로 교차하는 횟수로서 신호의 빠르기를 나
타내고, ADF는 수신 신호가 특정한 신호 level
아래에 있을 평균적인 시간으로서 신호의 null이
깊은 정도를 나타낸다. 또한, CDF는 수신 신호
가 특정한 신호 level보다 아래에 있을 확률을
나타낸다[6]. 본 논문에서 생성된 도플러 효과를
가지는 레일라이 페이딩의 LCR과 ADF는 다음
과 같은 특성을 갖는다. LCR은 -30dB에서 0.06,
-20dB에서 0.21, -10dB에서 0.38, 0dB에서 0.36 이
며, ADF는 -30dB에서 0.27, -20dB에서 0.37, -10
dB에서 0.67, 0dB에서 1.75 이다.

III. 시뮬레이션 및 결과 분석

본 절에서는 도플러 효과를 고려하지 않은 경
우와 최대 도플러 주파수 천이가 100Hz인 레

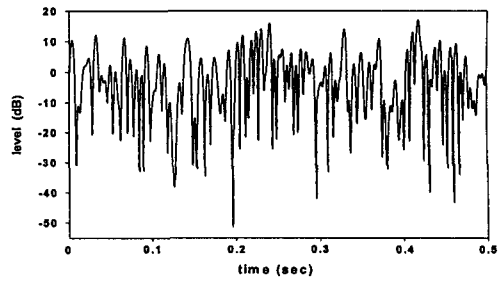


그림 2. 도플러 레일라이 페이딩의 sample 함수
Fig. 2 Sample function of Doppler Rayleigh fading

일라이 페이딩 채널 환경에서 MC-CDMA 시스
템의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석
한다. MC-CDMA 시스템의 부반송파 수는
N=128로 설정하였고, 길이가 128인
Walsh-Hadamard 코드를 사용하였다. 송·수신

기의 주파수가 일치하며 타이밍 동기가 정확한 EGC(equal gain combining) 수신기 경우를 우선 고찰한다($d_{0,i} = 1$). downlink 경우, 식(4)가 성립되므로 식(8)은 EGC 등화기를 사용하는 경우에 다음 식(10)과 같이 표시된다.

$$v_0 = a_0[k] \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0,i} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} a_m[k] c_m[i] c_0[i] \cdot \rho_{0,i} + \eta \quad (10)$$

서로 독립적이며 같은 모양으로 분포된(IID: independent and identically distributed) 레일라이 변수 $\rho_{0,i}$ 를 가지는 채널 환경을 가정하였으며, 신호 대 잡음비 $E_b/N_0 = \overline{p_0} T_b / N_0$ 가 10dB인 경우에 시스템의 BER 특성을 분석하였다. 이때 $\overline{p_0} = N \overline{p_{m,i}} = 0.5E[\rho^2_{m,i}]$ 이며 η 성분의 분산(variance) $\sigma^2_\eta = N(N_0/T_b)$ 이다.

Downlink 경우, 식(10)가 컴퓨터 시뮬레이션으로 BER를 분석하기 위한 기본식이 된다. 식(10)에서 첫 번째 항은 자기 자신의 신호이며, 두 번째 항은 다른 사용자에 의한 간섭 신호 그리고 세 번째 항은 AWGN 잡음 성분이다. 이때 전파의 다중 경로 지연 특성에 의해 ISI가 발생될 수 있으며, 본 연구에서는 ISI가 없는(no ISI)인 주파수 비선택적 채널인 경우와, 상대 전력이 -6dB인 한 개의 지연 경로가 존재하는 경우(ISI 1)와 -3dB와 -6dB 두 개의 지연 경로가 존재하는(ISI 2) 주파수 선택적 채널의 경우들을 아울러 고찰한다.

그림 3은 128개의 부반송파가 사용되며 신호 대 잡음비 E_b/N_0 가 10dB일 때 downlink에서 사용자의 수에 따른 BER 성능을 나타낸 것이다. 이 그림에서 관찰되듯이 AWGN 잡음 성분보다는 주로 다른 사용자들에 의한 간섭에 의해서 에러가 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 에러를 작게 하기 위하여 두 개의 수신 안테나를 이용하여 신호를 수신하고, 이 중에서 큰 크기의

신호를 선택적으로 이용하는 안테나 다이버시티 기술을 적용할 때 발생하는 에러가 분석되어 그림 4에 도시되었다. 이때 두 수신 안테나가 공간적으로 충분히 먼 거리에 설치되어서 수신되는 두 신호는 서로 독립적인 성질을 가지고 있는 경우를 가정한다.

또한 에러의 크기를 작게 하기 위하여 보통 에러 제어 코드(error control code)가 사용된다. 그러므로 본 논문에서도 송신기에서 (2,1,2) convolution 코딩을 사용하고 수신기에서 Viterbi 알고리즘을 이용하여 디코딩할 때 발생하는 비트 에러율을 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법으로 분석하여 그림 5에 도시하였다. 이 두 경우에 모두 ISI는 존재하지 않는 flat 페이딩 경우를 고찰하였다. 이 결과에서 알 수 있는 것과 같이 가령, 10^{-3} 의 비트 에러 확률이 요구될 때 downlink에서는 16명의 사용자를 수용할 수 있다. 그러나 안테나 다이버시티를 사용한 그림 4와 convolution 코딩을 사용한 그림 5를 비교하여 보면, 각각 64명과 88명의 사용자를 수용하므로 에러 제어 코드가 안테나 다이버시티 방법보다 에러를 작게 하는데 더 효과적인 수단인 것을 알 수 있다.

도플러 페이딩의 최대 주파수 f_D 가 100Hz인 레일라이 페이딩 전파 환경에서 발생하는 에러가 E_b/N_0 가 10dB에 대하여 분석되었다. 분석 결과, 그림 6에서와 같이 도플러 효과를 고려하지 않은 그림 3에 비하여 에러가 급증하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 에러를 작게 하기 위하여 두 개의 안테나를 이용한 다이버시티 방법을 사용했을 때 발생하는 에러가 분석되어 그림 7에 도시되었다. 그림 7에서 관찰되듯이 도플러 페이딩 하에서는 안테나 다이버시티 방법 만으로는 에러를 크게 개선하지 못한다. 그림 8에 도시된 것과 같이, ISI가 존재하지 않은 flat 페이딩 환경 하에서 에러 제어 코드를 사용했을 때는 비트 에러율이 더욱 향상되는 것으로 분석되었다.

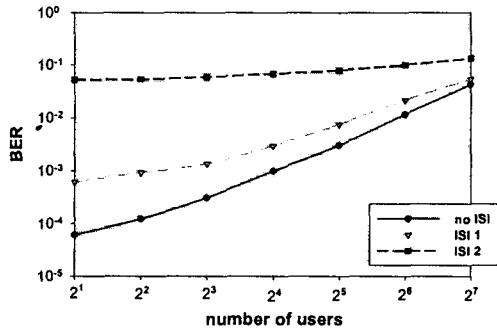


그림 3. E_b/N_0 가 10dB인 downlink에서 사용자의 수에 따른 BER 성능 곡선
Fig. 3 BER of downlink system against number of users($E_b/N_0 = 10\text{dB}$)

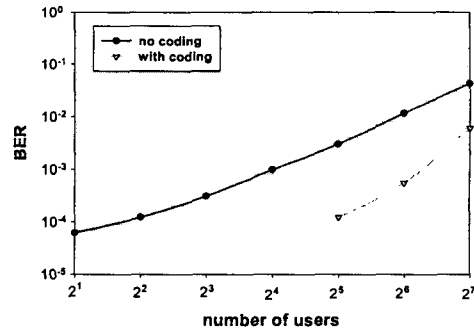


그림 5. E_b/N_0 가 10dB이며 ISI가 없는 downlink에서 convolution 코딩을 사용했을 때의 BER
Fig. 5 BER of downlink system using convolution coding($E_b/N_0 = 10\text{dB}$)

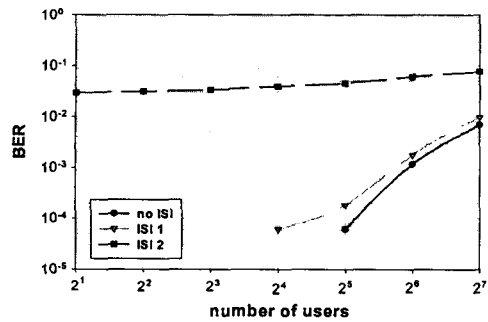


그림 4. E_b/N_0 가 10dB인 downlink에서 안테나 다이버시티를 사용했을 때의 BER
Fig. 4 BER of downlink system using antenna diversity ($E_b/N_0 = 10\text{dB}$)

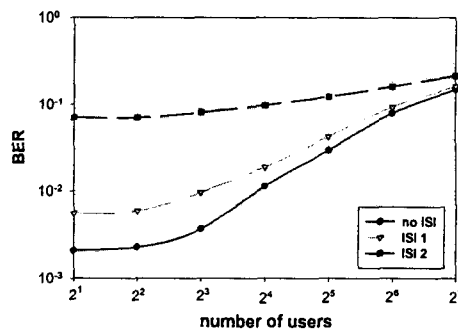


그림 6. E_b/N_0 가 10dB인 downlink에서 $f_D=100\text{Hz}$ 인 도플러 페이딩 하에서 convolution 코딩을 사용했을 때의 BER
Fig. 6 BER of downlink system using convolution coding under $f_D=100\text{Hz}$ Doppler fading($E_b/N_0 = 10\text{dB}$)

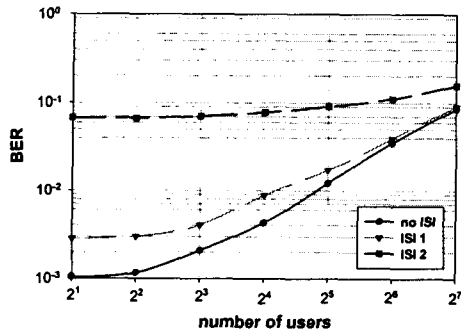


그림 7. E_b/N_0 가 10dB인 downlink에서 $f_D=100\text{Hz}$ 인 도플러 페이딩 하에서 안테나 다이버시티를 사용했을 때의 BER
 Fig. 7 BER of downlink system using antenna diversity under $f_D=100\text{Hz}$ Doppler fading ($E_b/N_0 = 10\text{dB}$)

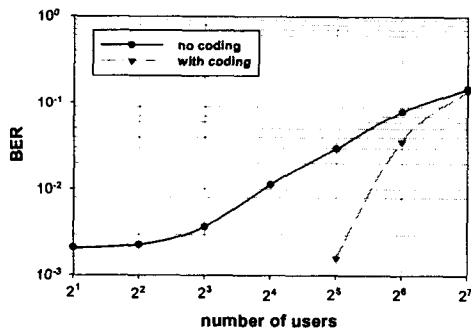


그림 8. E_b/N_0 가 10dB이며 ISI가 없는 downlink에서 $f_D=100\text{Hz}$ 인 도플러 페이딩 하에서 convolution 코딩을 사용했을 때의 BER
 Fig. 8 BER of downlink system using convolution coding under $f_D=100\text{Hz}$ Doppler fading without ISI ($E_b/N_0 = 10\text{dB}$)

IV. 결 론

본 논문에서는 우선 주파수 선택적 및 비선택적 레일리 페이딩 채널 하에서 사용자 수에

따른 MC-CDMA 시스템의 성능을 분석 비교하였다. 분석 결과, ISI가 없는 주파수 비 선택적 페이딩 환경에서 MC-CDMA 방식은 작은 에러가 발생하였으나 ISI가 존재하게 되면 에러의 크기는 증가하였다. 이러한 에러의 발생은 AWGN 잡음 성분보다는 다른 사용자들에 의한 간섭에 의해서 에러가 증가함을 알 수 있었다. 안테나 다이버시티를 이용하면 발생하는 에러를 감소시킬 수 있으며 convolution 에러 제어 코드를 사용 시, 더욱 현격하게 에러를 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나 도플러 페이딩이 발생하면 데이터의 전송 에러가 급격하게 증가하게 되어 간단한 안테나 다이버시티 방법으로는 성능을 향상시킬 수 없으며, 에러 제어 코드를 사용해야만 성능이 향상되는 것으로 분석되었다. 따라서 MC-CDMA 방식을 이용하여 고성능의 전송을 하기 위해서는 도플러 페이딩의 영향을 극복할 수 있는 강력한 에러 제어 코드에 관한 연구가 앞으로 더 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] W. C. Y. Lee, "Overview of cellular CDMA," IEEE Trans. Veh. Techn., vol. 40, pp. 291 - 302, May 1991.
- [2] S. Hara, and R. Prasad, "Overview of Multicarrier CDMA", IEEE Commun. Mag., pp. 126 - 133, Dec. 1997.
- [3] N. Yee, J-P. Linnartz and G. Fettweis, "Multicarrier CDMA in Indoor Wireless Radio Networks", Proc. of IEEE PIMRC '93, Yokohama, Japan, pp. 109 -113, Sept. 1993.
- [4] K. Fazel and L.Papke, "On the Performance of Convolutionally-Coded CDMA/OFDM for Mobile Communication System", Proc. of IEEE PIMRC '93, Yokohama, Japan, pp.468 - 72, Sept. 1993.
- [5] J. I. Smith, "A Computer Generated Multipath

- Fading Simulation for Mobile Radio", IEEE Trans. on Veh. Techn., vol. VT-24, No.3, pp. 39 - 40, Aug. 1975.
- [6] William C. Y. Lee, "Mobile Cellular Telecommunications Analog and Digital Systems", McGraw-Hill, 1993.

저자소개



최승국(Seung-Kuk Choi)

1974년 연세대학교 전자공학과 공학사

1981년 연세대학교 대학원 전자공학과 공학석사

1988년 독일 Braunschweig 대학교 전

자공학과 공학박사

1978년~1981년 한국전자통신연구소 연구원

1989년~현재 인천대학교 정보통신공학과 교수

※관심분야: 이동 통신 시스템, 동기



임정욱(Jung-Wook Yim)

2001년 서원대학교 정보통신공학과 공학사

2002년~현재 인천대학교 정보통신공학과 석사과정

※관심분야: 이동 통신 시스템