

천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 MC-CDMA의 등화기법

정회원 최 종 호*, 조 용 수*

An Equalization Technique for MC-CDMA in a Frequency Selective, Slowly-varying Fading Channel

Jong-Ho Choi*, Yong-Soo Cho* *Regular Members*

*이 논문은 1997년도 중앙대학교 학술 연구비 지원에 의한 것임.

요 약

본 논문에서는 천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널(frequency selective, slowly-varying fading channel)에서 MC-CDMA 시스템의 등화기법에 대해서 논한다. OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 구조의 부반송파를 이용하는 MC-CDMA 시스템에서 채널의 시변화는 각 부채널에서의 직교성을 손상시키며 결과적으로 각 부반송파마다 결합된 단일탭(one-tap) 등화기의 계수 값을 변화 시켜 성능 열화를 초래한다. 본 논문에서는 천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 MC-CDMA 신호가 겪게되는 왜곡을 송·수신된 신호와 채널의 관계를 통하여 분석하고, 채널의 다중 경로 profile의 시변화를 고려하여 이를 보상할 수 있는 등화기법을 제안한다. 제안된 등화기법은 기존의 단일탭 구조의 등화기를 이용하며, 모의실험을 통하여 채널의 시변화 영향을 효과적으로 보상할 수 있음을 확인한다. 또한 제안된 등화기법을 사용하는 MC-CDMA 시스템과 Rake 수신기를 사용하는 DS-SS-CDMA 시스템과의 성능을 비교한다.

ABSTRACT

In this paper, an equalization technique for a MC-CDMA system in a frequency selective, slowly-varying fading channel is discussed. In a MC-CDMA system where the same subcarrier structure as in OFDM is employed, time variation of a channel leads to both a change of an optimal coefficient in one-tap equalizer and a loss of subchannel orthogonality, resulting in significant performance loss. In this paper, we analyze the time-variation effect of a channel by investigating the relationship between the transmitted signal and the received signal, and propose a new equalization technique which can reduce the effect of slowly time-varying frequency selective fading channel by taking into

* 중앙대학교 전자공학과
論文番號 : 97090-0306
接受日字 : 1997年 3月 6日

account the time-variation of multipath profile. It is shown by computer simulation that the time-variation effect of a channel can be effectively compensated by using the proposed equalizer with a single tap. Finally, the performance of the MC-CDMA system with a proposed equalizer is compared to that of the conventional DS-CDMA system with a Rake receiver.

I. 서 론

코드 분할 다중 접속(CDMA: Code Division Multiple Access) 방식은 기존의 시분할 다중 접속(TDMA: Time Division Multiple Access) 방식과 주파수 분할 다중 접속(FDMA: Frequency Division Multiple Access) 방식에 비해 높은 용량을 지니며, 주파수 선택적 페이딩(frequency selective fading)이 존재하는 무선 채널에서 좋은 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 특히 DS-CDMA(Direct Sequence CDMA) 방식은 Rake 수신기를 사용하여 채널의 경로 다이버시티(path diversity)를 이용하고 멀티미디어 데이터 traffic이 갖는 비동기적인 특성을 수용할 수 있어 제 3세대 이동통신 방식으로 활발히 논의되고 있다[1]. 그러나 DS-CDMA 방식은 고속의 데이터 전송시 chip간 간섭이 증가함에 따라 하드웨어 복잡도가 급속히 증가하고, 다중 사용자 간섭(multi-user interference)에 의해 수용할 수 있는 사용자의 용량에 한계가 있는 것으로 알려져 있다[2].

한편, 새로운 다중 접속 기법으로서 최근에 제안된 MC-CDMA(Multi-Carrier CDMA) 방식은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)구조의 다중 반송파 변조(multi-carrier modulation) 방식과 DS-CDMA 방식을 결합한 것으로서 채널의 지연 분산(delay spread) 보다 긴 보호구간(guard interval)을 추가하여 심볼간 간섭을 없앨 수 있고, 송·수신단에서 변·복조시 IFFT/FFT를 이용할 수 있으며, 수신단에서 각 반송파마다 간단한 단일탭(one-tap)구조의 등화기를 사용하여 채널의 주파수 선택적 페이딩에 의한 왜곡을 보상할 수 있는 것으로 알려져 있다[3][4]. 그러나 OFDM 구조를 이용하는 MC-CDMA 시스템에서 채널의 시변 영향과 수신단에서의 주파수 오프셋(frequency offset) 및 위상 지터(phase jitter) 그리고 송신단에서의 비선형 증폭기의 영향은 반송파 상호간의 직교성을 손상시켜 성능을 저하시키는 주된 요인으로 알려져 있다[5][6].

본 논문에서는 MC-CDMA 시스템에서 채널의 시변

화가 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하고 이를 보상할 수 있는 등화기법에 대해서 논한다. 지금까지 MC-CDMA 시스템과 관련해서 소개된 기존의 등화 방식들은 대부분 옥내(indoor)의 채널 환경, 또는 낮은 주파수 대역에서 고속의 데이터를 전송할 경우처럼 MC-CDMA 신호의 블록주기 내에서 채널의 임펄스 응답의 시변화를 거의 무시할 수 있는 경우를 가정하거나, 임의적으로 채널의 시변화의 영향을 고려하지 않고 있다[2-3][7-8]. 그러나 일반적으로 이동통신 채널의 시변화는 신호의 주기(T_s)와 최대 도플러 주파수($f_{D,max}$)의 곱으로 정의되며, $T_s f_{D,max} \ll 1$ 의 천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널에서도 채널의 시변화를 완전히 무시할 수는 없다. 특히 MC-CDMA 시스템의 경우 신호의 주기 T_s 는 각 부채널에서 심벌의 주기가 되며 이는 설정된 대역폭과 반송파의 수에 의해 결정되게 되는데, 사용자의 용량을 증가시키고 신호율을 높이기 위해서 많은 수의 반송파를 사용할 경우 MC-CDMA 신호의 블록주기는 사용된 반송파의 수만큼 길어지게 되어 채널의 시변 영향은 전송되는 신호의 블록주기 내에서도 무시할 수 없게 된다. 따라서 이 경우 시변분 가정 하에서 추정된 채널 정보를 사용한 등화방식은 실제적인 시변 채널 환경하에서는 좋은 성능을 기대할 수 없게 된다. 따라서 본 논문에서는 먼저 천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 MC-CDMA 신호가 겪게되는 왜곡을 분석하고, 이 결과를 이용하여 MC-CDMA 시스템에서 채널의 시변화에 보다 강건한 등화방식을 제안한다. 또한 동일한 채널에서 DS-CDMA 시스템과 제안된 등화기를 사용한 MC-CDMA 시스템의 성능을 비교한다. 먼저 II절에서는 MC-CDMA 시스템의 송·수신단 구조에 대해서 기술하고, III절에서는 천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 MC-CDMA 신호가 겪게되는 왜곡을 송·수신된 신호와 시변 채널의 관계를 통하여 분석하며 이를 보상할 수 있는 등화 방식을 제안한다. IV절에서는 MC-CDMA 시스템

에서 기존의 등화기법과 제안된 등화기법을 사용할 경우 그 성능을 모의실험을 통하여 비교하고, 또한 제안된 MC-CDMA 방식과 DS-SS 방식의 성능을 비교한다. 마지막으로 V절에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. MC-CDMA 시스템

MC-CDMA 시스템의 송신단 모델을 그림 1에 나타내었다. 송신단에서 입력되는 데이터 열(data sequence)은 BPSK(binary phase shift keying) 신호, $a_m[i] \in \{-1, 1\}$ 로서 주어지며, 이때 m 은 사용자를, i 는 입력 데이터 심볼의 순서를 나타낸다. 그림 1에서 나타낸 바와 같이 입력된 i 번째 데이터 심볼은 먼저 N 개의 복사 본으로 만들어지며, 이는 다시 m 번째 사용자에게 할당된 코드 $C_m[k]$ (단 $k=1, 2, \dots, N$)와 곱해진다. 이때 MC-CDMA 시스템에서는 완전 직교성을 지닌 $N \times N$ Walsh-Hadamard 코드를 이용하므로 최대 사용자 용량(user capacity)은 N 이 된다. 이 신호는 각각 주파수 간격이 F/T_s 로 구성된 N 개의 협대역 부반송파를 변조하게 되는데 F 가 정수인 경우 T_s 가 심볼 주기를 나타내기 때문에 기저대역에서 N 개의 협대역 부반송파들은 기본 주파수 $1/T_s$ 의 하모닉 성분이 되며 서로 직교성을 유지하게 된다. 특히 $F=1$ 인 경우 각 부반송파들은 가장 가까운 간격으로 구성되며 OFDM 구조와 동일한 구조를 갖게 되는데, 이때 변조과정은 단순히 IDFT(Inverse Discrete Fourier Transform), 또는 IFFT를 이용할 수 있게 된다[9][10]. 결과적으로 전송되는 m 번째 사용자의 i 번째 MC-CDMA 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$s_m(t) = a_m[i] \sum_{k=0}^{N-1} C_m[k] e^{j2\pi(f_c + k\frac{F}{T_s})t}, \quad (1)$$

$$t \in [iT_s, (i+1)T_s]$$

여기서 f_c 는 반송파 주파수를 나타낸다. 또한 최대 사용자 용량인 N 명의 사용자가 동시에 사용할 경우 전송되는 MC-CDMA 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} a_m[i] C_m[k] e^{j2\pi(f_c + k\frac{F}{T_s})t}, \quad (2)$$

$$t \in [iT_s, (i+1)T_s]$$

위 식에서 $F=1$ 인 경우 $t = n \frac{T_s}{N}$, $n=0, 1, \dots, N-1$ 순간에서 이산화된 기저대역 신호는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_m(n) = a_m[i] \sum_{k=0}^{N-1} C_m[k] e^{j2\pi\frac{kn}{N}} \quad (3)$$

$$x(n) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} a_m[i] C_m[k] e^{j2\pi\frac{kn}{N}}, \quad (4)$$

$$n=0, 1, \dots, N-1$$

식 (4)는 k 번째 부반송파의 관점에서 다시 쓰면 다음과 같으며, 변조 과정이 IDFT 식으로 표현될 수 있다.

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi\frac{nk}{N}}, \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

여기서

$$X(k) = \sum_{m=0}^{N-1} a_m[i] C_m[k] \quad (6)$$

결과적으로 식 (5)에 주어진 신호가 채널을 통해 전송되는데, 여기에서 주파수 선택적 페이딩 채널의 지연분산에 의해 발생하는 블록간 심볼간 간섭을 방지하기 위해서 채널의 지연분산 T_m 보다 긴 cyclic prefix를 데이터 블록의 전단에 보호구간(T_g)으로 추가하게 된다[10][11]. 그러므로 실제 데이터 블록의 주기는 $T = T_s + T_g$ 가 된다.

그림 2에 나타난 바와 같이 주파수 선택적 시변 페이딩 채널에 의한 최대 지연분산이 $L \frac{T_s}{N}$ (단, $L \ll N$) 이라고 가정하면 채널을 통과하여 수신된 MC-CDMA 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l, n) x(n-l) + w(n), \quad (7)$$

$$n=0, 1, \dots, N-1$$

여기서 $w(n)$ 은 가산성 백색 가우시안 잡음을 나타내고 $h(l, n)$ 은 주파수 선택적 시변 페이딩 채널에서 n 번째 시간에 l 지연의 임펄스 응답 값을 나타내며, MC-CDMA 수신단에서는 수신된 신호 $y(n)$ 을 DFT 또는 FFT를 사용하여 복조하게 된다.

$$Y(v) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi \frac{nv}{N}}, v = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

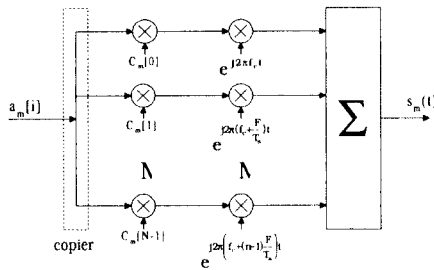


그림 1. MC-CDMA 송신단
Fig. 1 A MC-CDMA transmitter

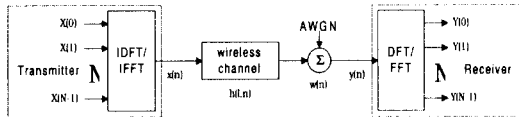


그림 2. MC-CDMA 시스템의 블록도
Fig. 2 A block diagram of a MC-CDMA system

채널의 왜곡과 가산성 백색 가우시안 잡음을 무시할 수 있는 이상적인 경우에 복조된 신호 $Y(v)$ 는 송신된 $X(k)$ (단, 이 경우 $k=v$)와 동일하게 되며, 최종적으로 특정 사용자에게 할당된 코드 $C_z[v]$ 와 곱해져서 z 번째 사용자의 심볼 $a_z[i]$ 를 얻게된다. 이 과정은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} a_z[i] &= \frac{1}{N} \sum_{v=0}^{N-1} C_z[v] Y(v) = \frac{1}{N} \sum_{v=0}^{N-1} C_z[v] X(v) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{v=0}^{N-1} C_z[v] \sum_{m=0}^{N-1} a_m[i] C_m[v] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} a_m[i] \sum_{v=0}^{N-1} C_z[v] C_m[v] = \frac{1}{N} N a_z[i] \quad (9) \end{aligned}$$

그러나 실제 무선 채널의 경우 주파수 선택적 페이딩 채널을 통과한 신호는 채널의 임펄스 응답과 결합되어 왜곡되기 때문에 수신기에서 보상이 필요하며 그림 3에 나타난 바와 같이 MC-CDMA 시스템에서는 수신단의 각 부분송파에 단일탐 구조의 등화기를 사용한다.

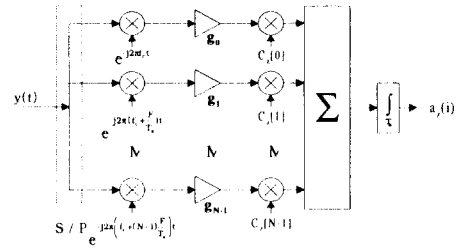


그림 3. MC-CDMA 수신단
Fig. 3 A MC-CDMA receiver

한편, 주파수 선택적 페이딩 채널에서 Rake 수신기를 이용하여 MRC(maximal ratio combining) 기법을 사용할 경우 DS-SS-CDMA 시스템의 비트에러율은 다음 식으로 주어진다[12].

$$P_b = \left[\frac{1}{2}(1-\mu) \right]^D \sum_{k=0}^{D-1} \binom{D-1+k}{k} \left[\frac{1}{2}(1+\mu) \right]^k \quad (10)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\gamma_c}{1+\gamma_c}} \quad (11)$$

여기에서 D 는 Rake 수신기에 결합되어지는 채널의 전송 경로 수를 나타내며 γ_c 는 채널의 각 전송 경로에서의 평균 SNR을 나타낸다. 식 (10)과 (11)은 주파수 선택적 페이딩 채널에서 각 경로에서의 평균 SNR 즉, γ_c 가 모두 동일한 경우를 가정하고 있으며 다른 사용자에게 의한 간섭은 고려하지 않은 경우로서 Rake 수신기를 사용하는 DS-SS-CDMA 시스템이 얻을 수 있는 비트에러율의 하한값(lower bound)을 나타낸다. 한편 비동기 DS-SS-CDMA 시스템에서 다중 사용자 간섭이 존재할 경우 가우스 근사화(Gaussian approximation)에 의해 μ 값은 다음과 같이 주어진다[2][5][13].

$$\mu = \sqrt{\frac{\gamma}{D+\gamma}}, \quad \gamma = \left(\frac{2(N_u-1)}{3J} + \frac{N_0}{E_b} \right)^{-1} \quad (12)$$

여기에서 $N_0/2$ 는 가우스 잡음의 스펙트럼 밀도(Gaussian noise spectral density), E_b 는 데이터 비트 에너지를 나타내며, γ 는 전송된 데이터 비트당 다중 사용자에게 의한 간섭으로 수정된 신호 대 잡음비, J 는 확산 코드의 길이, N_u 는 사용자 수를 각각 나타낸다.

III. 천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 MC-CDMA 신호의 등화기법

MC-CDMA 시스템에서 천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널의 영향을 분석하기 위해 식 (8)에 식 (7)을 대입하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$Y(v) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} h(l, n) x(n-l) e^{-j2\pi \frac{vn}{N}} + W(v), \quad v = 0, 1, \dots, N-1 \quad (13)$$

여기서, $W(v)$ 는 가산성 백색 가우시안 잡음 $w(n)$ 의 푸리에 변환을 나타낸다.

$$W(v) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w(n) e^{-j2\pi \frac{vn}{N}} \quad (14)$$

식 (5)를 식 (13)에 대입한 후 정리하면 다음과 같다.

$$Y(v) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} X(k) H(l, v-k) e^{-j2\pi \frac{lk}{N}} + W(v), \quad v = 0, 1, \dots, N-1 \quad (15)$$

여기서 $H(l, v-k)$ 는 주파수 선택적 시변 페이딩 채널의 임펄스 응답인 $h(l, n)$ 의 푸리에 변환을 나타낸다.

$$H(l, v-k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} h(l, n) e^{-j2\pi \frac{n(v-k)}{N}} \quad (16)$$

또한 식 (15)을 $X(k)$ 에 대해서 $k=v$ 인 경우와 $k \neq v$ 인 경우를 분리해서 다시 쓰면 다음 식과 같이 주어진다.

$$Y(v) = \alpha(v)X(v) + \beta(v) + W(v), \quad v = 0, 1, \dots, N-1 \quad (17)$$

여기서 $\alpha(v)$ 와 $\beta(v)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha(v) = \sum_{l=0}^{L-1} H(l, 0) e^{-j2\pi \frac{lv}{N}} \quad (18)$$

$$H(l, 0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} h(l, n) \quad (19)$$

$$\beta(v) = \sum_{k \neq v} \sum_{l=0}^{L-1} X(k) H(l, v-k) e^{-j2\pi \frac{lk}{N}} \quad (20)$$

식 (17)은 주파수 선택적 시변 페이딩 채널의 영향을 나타내는데, 우변 첫째 항은 $X(v)(k=v)$ 와 곱셈 왜곡 성분 $\alpha(v)$ 를 나타내며, 두 번째 항 $\beta(v)$ 는 $X(k)(k \neq v)$ 항의 부채널간 간섭(ICI: interchannel interference)을 나타낸다[6]. 시불변 채널의 경우에는 $h(l, n) = h(l)$ 이므로 $\alpha(v)$ 는 단순히 $h(l)$ 의 푸리에 변환($H(v)$)이 되고, $\beta(v)$ 는 식 (16)에 의해 $H(l, v-k) = h(l)\delta(v-k)$ 이 되므로 식(20)에 주어진 바와 같이 $\beta(v) = 0$ 이 되어 부채널간 간섭이 사라진다. 그러나 시변 채널을 통해 전송된 MC-CDMA 신호에서는 식 (17)과 (18)에 나타난 바와 같이 $\alpha(v)$ 는 $H(v)$ 로 단순화되지 않고, 식 (19)에 주어진 바와 같이 l 지연으로 주어지는 각각의 경로에서 채널의 시변 임펄스 응답을 시간에 대해서 평균한 값의 푸리에 변환이 되며, 또한 부채널간 간섭인 $\beta(v)$ 도 0이 아니다. 그러므로 이를 보상하기 위해서는 반드시 시변 채널에 대한 고려가 이루어져야 함을 알 수 있다. 위의 결과로부터 채널의 시변 효과에 의한 신호 왜곡을 정확히 보상하려면 각각의 지연경로 l 과 시간 n 의 함수로 주어지는 채널의 시변 임펄스 응답 $h(l, n)$ 에 대한 모든 정보를 알아야 함을 알 수 있다. 실제 상황에서 이는 거의 불가능하나 시변 채널에 의한 곱셈왜곡 $\alpha(v)$ 를 보상하기 위해서 본 논문에서는 다음과 같은 방식을 제안한다. 즉, 천천히 변하는 다중 경로 채널(slowly-varying multipath channel)의 각 지연 경로는 한 블록 내에서 선형으로 근사화할 수 있다. 이 경우 식 (19)에 주어진 결과는 다음 식에 의해 근사화 된다.

$$\hat{H}(l, 0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{h}(l, n) = \frac{1}{2} \{ \hat{h}(l, 0) + \hat{h}(l, N-1) \}, \quad l = 0, 1, \dots, L-1 \quad (21)$$

여기서 \wedge 기호는 추정된 값을 나타내며 식 (21)을 이용하면 $\hat{\alpha}(v)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{\alpha}(v) = \sum_{l=0}^{L-1} \hat{H}(l, 0) e^{-j2\pi \frac{lv}{N}} \quad (22)$$

식 (21)과 (22)를 사용하여 각 부반송파마다 채널의 시변 영향에 의한 왜곡성분 $\alpha(v)$ 를 추정할 수 있으며, 위의 결과는 다음과 같이 기존의 여러 등화 방식들을 수정하여 그림 3의 MC-CDMA 수신단 모델에 주어진 단일탭 구조의 등화기에 적용될 수 있다[7][8]. 여기서 등화에 사용되는 계수는 $g(v)$ (단, $v=0, 1, \dots, N-1$)로 정의하였다.

i. MRC(Maximum Ratio Combining)방식 :

$$g(v) = \alpha(v)^*$$

ii. 위상 등화(Phase equalization)방식 :

$$g(v) = \alpha(v)^* / |\alpha(v)|$$

iii. 영 강압(Zero-Forcing)방식 :

$$g(v) = 1/\alpha(v)$$

iv. 조정된 등화(Controlled equalization)방식 :

$$g(v) = \begin{cases} 1/\alpha(v) & |\alpha(v)| > \alpha_{th} \\ \alpha(v)^* / |\alpha(v)| & |\alpha(v)| < \alpha_{th} \end{cases}$$

v. 최소 자승 평균 에러(MMSE)방식 :

$$g(v) = \alpha(v)^* / (|\alpha(v)|^2 + \sigma_n^2 / \sigma_s^2)$$

IV. 모의실험

제안된 MC-CDMA 등화방식의 성능을 검증하기 위하여 본 모의실험에서는 두 개의 독립적인 경로와 동일한 에너지를 갖는 Jakes 모델로서 경로간의 지연은 20 μ sec이며, 천천히 변하는 주파수 선택적 레일리 페이딩 채널을 사용하였다. 실험 환경에서 사용된 대역폭은 250 KHz, 반송파는 1 GHz로 설정하였으며, 최대 200 Hz까지의 도플러 주파수 천이를 고려하였다.

먼저 MC-CDMA 시스템에서 제안된 등화기법과 기존의 등화방식들을 비교하기 위해 설정된 모의실험 환경은 다음과 같다. MC-CDMA 시스템의 부반송파 수는 $N=64$ 로 설정하였고, 길이가 64인 Walsh-Hadamard 코드를 사용하였다. 따라서 이 경우 최대 사용자 수는 64명으로서 모의 실험에서도 64명의 사용자환경을 가정하였으며, 부반송파간의 간격은 3.906 KHz, 각 부

반송파에서 한 심볼의 주기는 256 μ sec이 된다. 이 경우 채널의 시변화 정도는 $T_s f_{D_{max}} = 0.0512$ 가 되는데 참고 문헌 [2]의 $T_s f_{D_{max}} = 0.082$ 에 비해 오히려 시변화가 더 적은 환경임을 알 수 있다. 또한, 블록간 심볼간 간섭 방지를 위해 채널의 경로간 지연인 20 μ sec와 동일한 길이의 cyclic prefix를 사용하였으며, 채널 추정을 위한 구간이 추가로 사용되었다.

그림 4는 최대 도플러 주파수 천이가 200 Hz인 경우 기존의 등화방식과 본 논문에서 제안된 여러 등화 방식을 MC-CDMA 시스템에 적용한 결과를 나타낸다. 이 그림에서 실선은 데이터 블록 주기 내에서 채널의 시변화 효과를 고려하지 않은 경우로서 기존의 등화 방식을 사용하여 구한 비트에러율 성능 곡선을 나타내며, 점선은 본 논문에서 제안된 시변 채널의 영향을 고려한 등화기를 사용한 경우이다. 여러 등화 방식 중에 Controlled 등화 방식과 MMSE 기준을 적용한 등화 방식이 비교적 우수함을 알 수 있다. 동일한 등화 방식을 사용할 경우 시변 채널의 왜곡 영향을 고려한 제안된 방식이 기존의 방식에 비해서 전 구간에서 걸쳐 우수한 것을 알 수 있으며, 특히 높은 E_b/N_0 에서 제안된 MMSE 방식이 매우 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

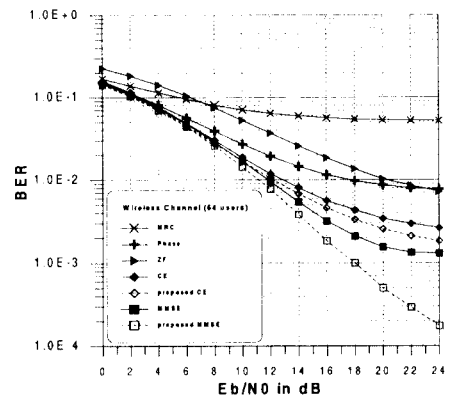


그림 4. 천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 MC-CDMA의 등화방식에 따른 BER 성능곡선 ($f_{D_{max}} = 200\text{Hz}$)

Fig. 4 BER performance of different equalization techniques for MC-CDMA in a frequency selective, slowly-varying fading channel ($f_{D_{max}} = 200\text{Hz}$)

그림 5와 그림 6은 최대 도플러 주파수 천이 값은 50, 100, 200 Hz로 할 때 기존의 MMSE 방식과 제안된 MMSE 방식의 비트에러율 성능 곡선을 각각 나타낸다. 이 그림들로부터 도플러 주파수 천이가 감소할수록 두 방식의 성능이 모두 향상됨을 알 수 있는데, 이는 채널의 시변화가 감소되기 때문이다. 즉, 도플러 주파수 천이가 가장 작은 경우(50 Hz: $T_s f_{D_{max}} = 0.0128$)에는 두 방식의 성능이 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나 도플러 주파수 천이 값이 증가함에 따라 채널의 시변화가 커져 이를 고려하지 않는 기존의 방식에서는 성능의 저하가 두드러짐을 알 수 있다. 특히 높은 E_b/N_0 에서 기존의 등화방식을 사용할 경우 error floor가 심해져서, E_b/N_0 가 24 dB인 경우, 기존의 방식에서는 도플러 주파수 천이가 50 Hz에서 200 Hz로 증가할 때 비트에러율이 18배 감소하나, 제안된 방식에서는 3.4배 감소에 불과함을 관찰할 수 있다.

한편, MC-CDMA 시스템과 DS-CDMA 시스템의 성능비교를 위해 그림 7과 그림 8은 각각 비동기 DS-CDMA 시스템과 동기 DS-CDMA 시스템의 경우에 사용자 수를 1, 8, 16, 32, 63명으로 변화시키면서 경로 다이버시티가 2인 Rake 수신기를 사용하여 MRC 기법을 적용하였을 때 얻은 비트에러율 성능곡선을 나타낸다. 이때 DS-CDMA 시스템에서 사용된 확산

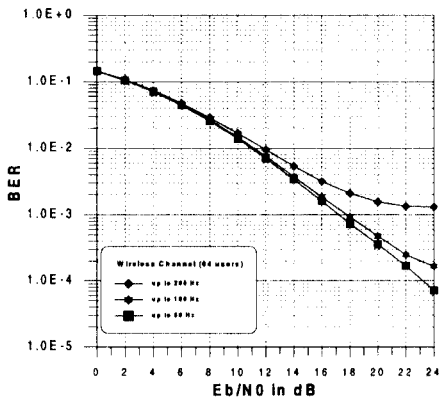


그림 5. 채널의 시변화에 따른 기존 MMSE 등화기를 사용한 MC-CDMA의 BER 성능곡선
Fig. 5 BER performance of conventional MMSE equalizers for MC-CDMA when the time variation of the channel varies

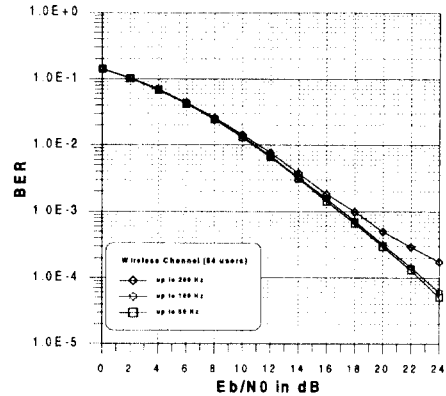


그림 6. 채널의 시변화에 따른 제안된 MMSE 등화기를 사용한 MC-CDMA의 BER 성능곡선
Fig. 6 BER performance of proposed MMSE equalizers for MC-CDMA when the time-variation of the channel varies

코드는 길이가 63인 골드 코드(Gold code)를 사용하였으며, 최대 도플러 주파수 천이는 200 Hz로서 MC-CDMA 시스템과 동일한 채널과 대역폭을 사용하였다. 한편, 그림 8의 동기 DS-CDMA 시스템에서의 성능 곡선과 그림 7의 비동기 DS-CDMA 시스템의 결과를 비교하면 사용자 수의 증가에 따라 비동기 DS-CDMA 시스템의 성능 열화가 동기 DS-CDMA 시스템에 비해 더욱 심함을 알 수 있는데, 이것은 상호상관 값으로 결정되어지는 사용자간 간섭이 각 사용자의 확산된 데이터 비트가 동기적으로 결합되는 경우에 비해 비동기적으로 결합되는 경우 더 커짐을 의미한다. 그러므로 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 가능하다면 확산 코드에 의해 결합되는 각 사용자의 데이터 비트 사이에 동기의 획득이 중요함을 알 수 있다. 그러나 DS-CDMA 시스템에서는 시간 영역에서 확산이 이루어지기 때문에 송신단에서 각 사용자간의 데이터 비트에 대해서 동기가 이루어지더라도 주파수 선택적 페이딩 채널을 통해 전송된 신호는 채널의 다중 경로에 의한 지연 분산으로 수신 단에서는 비동기적인 확산 코드의 결합으로 귀결될 수밖에 없다. 또한 코드가 비동기적으로 결합될 경우 그 직교성을 보장할 수 있는 코드는 실현 불가능하므로 주파수 선택적 페이딩 채널에서 DS-CDMA 시스템의 성능은 사용자간의 간섭에 의해 일정한 한계가 있음을 알 수 있다.

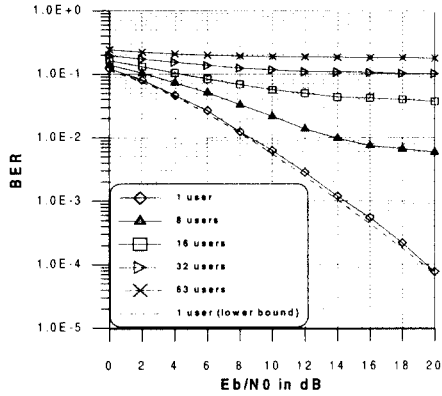


그림 7. 천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 비 동기 DS-CDMA 시스템의 사용자 수에 따른 BER 성능곡선(경로 다이버시티가 2인 Rake 수신기와 MRC 사용, $f_{D,max} = 200\text{Hz}$)

Fig. 7 BER performance of asynchronous DS-CDMA systems in a frequency selective, slowly-varying fading channel when the number of users varies(Rake receiver with MRC and path diversity2, $f_{D,max} = 200\text{Hz}$)

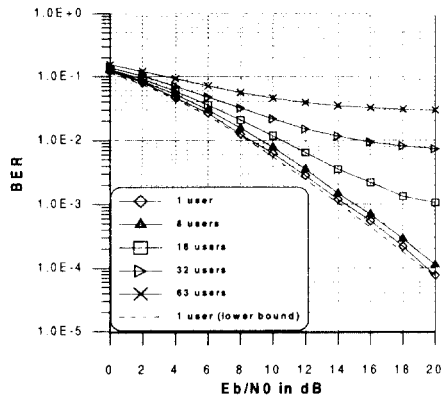


그림 8. 천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 동기 DS-CDMA 시스템의 사용자 수에 따른 BER 성능곡선(경로 다이버시티가 2인 Rake 수신기와 MRC 사용, $f_{D,max} = 200\text{Hz}$)

Fig. 8 BER performance of synchronous DS-CDMA systems in a frequency selective, slowly-varying fading channel when the number of users varies(Rake receiver with MRC and path diversity2, $f_{D,max} = 200\text{Hz}$)

선과 비교하기 위해 동일한 채널 환경하의 MC-CDMA 시스템에서 사용자 수를 1, 8, 16, 32, 64명으로 증가시킬 때 본 논문에서 제안된 MMSE 기법을 사용하여 등화한 모의실험 결과를 나타낸다. 그림 7, 8에 나타난 DS-CDMA 시스템의 비트에러율 성능에 비해서 MC-CDMA 시스템에서는 사용자수의 증가에 따라서 시스템의 성능이 크게 영향받지 않으며, 최대 64명의 사용자 환경에서도 비교적 우수한 성능을 유지함을 알 수 있다. 이것은 시간 영역에서 확산을 이용하는 DS-CDMA 방식이 주파수 선택적 페이딩 채널에 의한 심볼간 간섭에 의해 사용자 간섭에 의한 한계를 보이는 것과는 달리 MC-CDMA 방식에서는 OFDM 구조를 기반으로 하여 각 부반송파간의 직교성이 존재하고 또한, 보호구간과 적절한 등화방식을 사용하여 채널에 의한 왜곡을 보상함으로써 각 사용자간에 할당된 확산 코드의 직교성을 효과적으로 복원함에 기인한다. 한편, 사용자가 1명일 경우에는 위의 그림으로부터 DS-CDMA 방식의 경우가 보다 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있는데, 이는 두 방식 모두 1명의 사용자 환경에서는 MRC를 이용한 Rake 수신기가 비트 에러율의 하한값(lower bound)을 갖기 때문이다[5].

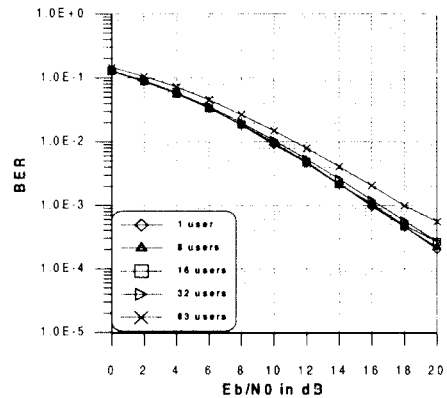


그림 9. MC-CDMA 시스템에서 사용자 수에 따른 BER 성능곡선 (제안된 MMSE 등화기)

Fig. 9 BER performance of MC-CDMA systems when the number of users varies(proposed MMSE equalizer)

그림 9는 그림 7, 8의 DS-CDMA 시스템의 성능곡

그림 10은 DS-CDMA 방식과 MC-CDMA 방식의 사용자 증가에 따른 비트에러율 성능곡선을 $E_b/N_0 = 16$

에서 나타내는데, 본 논문에서는 채널 코딩을 고려하고 있지 않기 때문에 두 시스템 모두 다중 사용자 간섭이 없을 경우 BER = 10⁻³을 얻을 수 있는 E_b/N₀ = 16 dB인 환경을 가정하였다. 그럼에서 두 시스템간의 사용자 수의 증가에 따른 성능의 차이를 명백히 확인할 수 있으며, 동일한 MC-CDMA의 경우 본 논문에서 제안된 시변 채널의 왜곡을 보상한 MMSE 방식이 기존의 MMSE 방식 보다 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 이미 그림 9에서 설명한 바와 같이 MC-CDMA 방식은 사용자 수의 증가에 따른 성능의 변화가 거의 없어 최대 64명의 사용자 환경에서도 0.004 미만의 비트에러율을 얻을 수 있지만, DS-CDMA 시스템의 경우 사용자 수의 증가에 따라 성능 열화가 매우 급격하여 0.01의 비트에러율을 얻기 위해서도 10명 미만의 사용자 환경에서만 가능함을 확인할 수 있다.

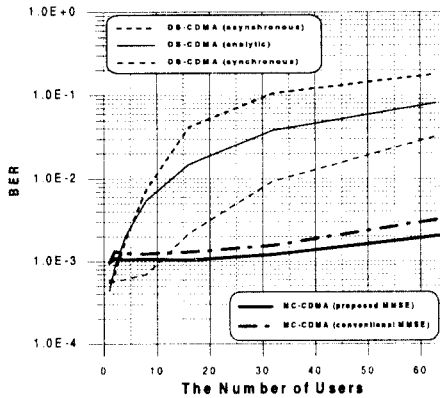


그림 10. 천천히 변하는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 사용자 수에 따른 BER 비교 (E_b/N₀ = 16 dB, f_{D,max} = 200Hz)

Fig. 10 BER vs. number of users in a frequency selective, slowly-varying fading channel (E_b/N₀ = 16 dB, f_{D,max} = 200Hz)

V. 결 론

본 논문에서는 천천히 변하는 주파수 선택적 시변 페이딩 채널에서 MC-CDMA 신호의 왜곡과 이를 보상할 수 있는 등화기에 대하여 논하였다. MC-CDMA 시스템의 경우 시변 채널 또는 도플러 주파수 천이에

의해 발생하는 채널의 변화는 부채널 간의 직교성을 손상시켜 채널간 간섭을 발생시키며, 각 부반송파에 곱해지는 이득(gain)과 위상을 왜곡시킨다. 본 논문에서는 채널의 변화율이 적어 한 구간 내에서 다중경로 profile이 선형적으로 변하는 것으로 근사될 경우 시변 채널의 왜곡을 보상할 수 있는 등화 기법이 제안되었다. 제안된 MC-CDMA 등화 기법은 기존의 등화기와 마찬가지로 단순한 구조로서 주파수 선택적 시변 페이딩 채널의 왜곡을 효과적으로 보상할 수 있음을 모의실험을 통하여 확인하였다. 또한, 동일한 채널 환경에서 DS-CDMA 방식과 MC-CDMA 시스템의 방식의 성능 비교를 통해서 MC-CDMA 방식이 낮은 비트에러율로서 보다 많은 사용자를 수용할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Shinsuke Hara and Ramjee Prasad, "DS-CDMA, MC-CDMA and MT-CDMA for mobile multi-media communications," *Proc. VTC*, pp. 1106-1110, Apr. 1996.
2. S. Kaiser, "OFDM-CDMA versus DS-CDMA : Performance evaluation for fading channels," *Proc. ICC*, pp. 1722-1726, June 1995.
3. N. Yee, J. Linnarz, and G. Fettweis, "Multi-carrier CDMA in indoor wireless radio networks," *Proc. PIMRC*, pp. 109-113, Sep. 1993.
4. A. Chouly, A. Brajal, and S. Jourdan, "Orthogonal multicarrier techniques applied to direct sequence spread spectrum CDMA systems," *Proc. GLOBECOM*, pp. 1723-1728, Nov. 1993.
5. S. Hara, T-H. Lee, and R. Prasad, "BER comparison of DS-CDMA and MC-CDMA for frequency selective fading channels," *Proc. of the 7th International Tyrrhenian Workshop on Digital Communications*, Sep. 1995.
6. M. Russell and G. L. Stüber, "Interchannel interference analysis of OFDM in a mobile environment," *Proc. VTC*, pp. 820-824, July 1995.
7. N. Yee and J.P. Linnarz, "Controlled equalization of multi-carrier CDMA in an indoor Rician fading channel," *Proc. VTC*, pp. 1665-1669, June 1994.

8. S. Kaiser, "On the performance of different detection techniques for OFDM-CDMA in fading channels," *Proc. GLOBECOM*, pp. 2059-2063, Oct. 1995.
9. S. B. Weinstein and P. M. Ebert, "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform," *IEEE Trans. Commun. Tech.*, vol. COM-19, pp. 628-634, Oct. 1971.
10. M. Alard and R. Lassale, "Principles of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers," *EBU Tech. Review*, no. 224, pp. 3-25, Aug. 1987.
11. J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.
12. J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, third ed., 1995.
13. M. B. Pursley, "Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-access communication-part I:," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-25, no. 8, pp. 795-799, Aug. 1977.

최 종 호 (Jong-Ho Choi)
한국통신학회 논문지 23권 5호 참조

정회원

조 용 수 (Yong Soo Cho)
한국통신학회 논문지 23권 5호 참조

정회원