

# Linearly Constrained Constant Modulus Algorithm을 이용한 MC-CDMA 시스템에서의 MAI 완화 기법

준회원 김 동 주\*, 김 주 응\*, 정회원 정 성 순\*\*, 홍 대 식\*, 강 창 언\*

## An Multiple Access Interference Mitigation Technique Using Linearly Constrained Constant Modulus Algorithm in MC-CDMA Systems

Dong-Joo Kim\*, Joo-Eung Kim\*, Sung-Soon Jung\*\*, Chang-Eon Kang\* and Dae-Sik Hong\*

*Regular Members*

요 약

본 논문에서는 MC-CDMA 시스템에 적용 가능한 LCCMA(Linearly Constrained Constant Modulus Algorithm)와 HIC(Hybrid Interference Canceller)형태의 두 가지 간섭 제거 구조를 제안하였다. 제안된 구조는 사용자의 확산 부호만을 요구하므로 여러 가지 제한이 있는 이동국에서도 적용이 가능한 장점이 있다. 이와 더불어, 본 논문에서는 LCCMA와 PIC(Parallel Interference Canceller)를 결합한 새로운 구조의 HIC를 제안하였다. 다양한 환경에서 Monte Carlo 모의실험이 수행한 결과, 제안된 LCCMA 및 HIC 구조를 사용한 시스템이 역방향 링크와 순방향 링크에서 각각 MRC(Maximum Ratio Combining)와 EGC(Equal Gain Combining)를 사용한 시스템보다 실험 환경에 따라 1.4~3배정도 용량이 증가되며, MRC나 EGC에서 얻을 수 없었던 경로 다이버시티의 이용이 가능하여, 경로수가 증가할 경우 성능이 향상됨을 실험을 통하여 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, two interference suppression schemes (LCCMA, HIC) applied to the MC-CDMA system were proposed. The proposed schemes have advantages that it don't requires the other's spreading code and can be used even in mobile. The proposed HIC combines the proposed interference suppressor with PIC. Simulation is performed in various environments using the Monte Carlo method. Simulation results show that there is 1.4~3 times capacity increase in corresponding simulation environments. Also this scheme can take advantage of path diversity whereas the system using EGC, MRC, and PIC cannot. Therefore, as the number of path increase, a considerable performance improvement can be attained.

### 1. 서론

OFDM-CDMA 시스템으로 알려져 있는 MC-CDMA 시스템은 각각의 부반송파가 주파수 비선형

적이므로 주파수 다이버시티가 간단한 단일 탭 등 화기에 의해서 얻어질 수 있다. 더욱이 인접한 OFDM 심벌사이에 순환 구간(cyclic prefix)을 삽입함으로써 수신부에서 ISI의 영향을 손쉽게 억제할

\* 연세대학교 전기·전자공학과 정보통신 연구실(kimdjoo@itl.yonsei.ac.kr),  
논문번호: 010256-0921, 접수일자: 2001년 9월 21일

\*\* 동양공업전문대학교 전자통신학과

※ 본 연구는 2001년도 두뇌한국2001 사업 핵심분야에 의해서 지원되었습니다.

수 있는 장점이 있어 미래이동 통신시스템에 적용하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 MC-CDMA 시스템은 DS-CDMA와 마찬가지로 페이딩 채널에 의해 확산부호의 직교성이 심각하게 왜곡되므로 MAI(다중 사용자 간섭; Multiple Access Interference)가 필연적으로 발생한다<sup>[1]</sup>. 따라서 적절한 간섭제거 또는 간섭완화 기술은 시스템의 성능을 향상시키는데 중요하다. 그리고 향후 이동 시스템에 있어서 시스템의 전체 용량은 비대칭적인 전송량, 단말기의 크기적 제한 등으로 상향링크보다 하향링크에 의해 더 좌우될 것이다. 따라서 시스템의 용량측면에서 하향링크의 성능은 매우 중요한 요소로 부각되고 있어 단말기에서도 사용 가능한 간섭제거 기술이 요구된다. 그러나 기존의 방식들은 다른 사용자의 정보를 요구하며 시스템의 복잡도 및 계산량이 증가하므로 단말기에서의 사용이 힘들다. 그러므로 다른 사용자의 정보를 필요로 하지 않는 적응 알고리즘 개발이 필요하다.

MAI의 영향을 줄이는 방법으로 모든 사용자에 대해서 간섭제거를 수행하는 다중 사용자 검출(MUD; Multiuser detection) 기법과 원하는 사용자에 대해서만 수행하는 단일 사용자 검출(Single User Detection) 기법이 있다. 다중 사용자 검출은 간섭을 효율적으로 제거하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있으나 사용자의 수에 따라서 계산량이 크게 증가하고 모든 사용자의 정보를 필요로 하는 단점이 있다<sup>[2][3]</sup>. 단일 사용자 검출 기법은 계산량이 적고 원하는 사용자만의 정보를 필요로 하므로 시스템의 복잡도가 상대적으로 적으나 간섭의 효율적인 제거가 힘들다<sup>[4]</sup>. 이러한 방식들에서는 시변채널에 적용하기 위해서 적응 필터링을 사용하는데 일반적으로 MMSE(Minimum Mean Square Error) 방식<sup>[5][6]</sup>과 블라인드 방식이 있다. MMSE 방식은 학습 심벌을 사용하므로 전송 효율의 낭비가 있다. 블라인드 적응 알고리즘은 이러한 문제점을 해소한 것으로 LCMV(Linearly Constrained Minimum Variance)에 기초한 알고리즘 등이 제시되어 있다<sup>[7][8]</sup>. 그러나 기존의 블라인드 방식들은 원하는 사용자의 타이밍 오류 및 획득한 확산부호내의 오류에 의한 성능 열화가 발생하며 수렴 속도가 느린 문제점이 있다.

본 논문에서는 다른 사용자의 정보를 필요로 하지 않아 기지국뿐만 아니라 이동단말기에서도 사용 가능한 블라인드 알고리즘을 사용하고 타이밍 오류와 부정확한 확산부호에 대해서 덜 민감한 간섭완

화기술을 제안한다. 또한 이 기술을 PIC에 적용한 하이브리드 간섭 제거기(HIC: Hybrid Interference canceller)를 제안하여 역방향 링크에서 대해서 모의 실험을 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 적용되는 채널의 모델과 일반적인 MC-CDMA 시스템을 기술한다. 3장에서는 LCCMA의 기본 구조와 동작 원리에 대하여 설명하고, 4장에서는 LCCMA를 MC-CDMA 시스템에 적용시켰을 때에 대한 특성과 LCCMA와 PIC와 결합한 HIC을 서술한다. 또한 여러 상황에서 모의 실험을 통한 결과가 5장에 제시되며 6장에서 결론을 맺는다.

## II. 채널모델과 MC-CDMA 시스템

주파수 선택적이며 빠른 레일리 페이딩 채널로서 다음과 같은 시변화 임펄스 응답의  $L$ 개의 복소 등가 저역통과 특성의 전달 경로를 갖는 넓은 의미의 고정 비상관 산란 채널(WSSUS; Wide-Sense, Stationary Uncorrelated Scattering channel)<sup>[9]</sup>을 가정하였다.

$$h(\tau, t) = \sum_{l=1}^L g_l(t) \delta(\tau - \tau_l) + n(t) \quad (1)$$

여기서  $t$ 와  $\tau$ 는 각각 순시 시간과 경로당 지연값이다.  $\delta(\cdot)$ 는 Dirac delta 함수이며,  $g_l(t)$ 는  $l$ 번째 경로상의 수신신호의 복소 포락선으로 평균이 0 이고 분산이  $\sigma^2$ 인 복소 가우시안 확률 프로세스이다.  $\tau_l$ 은  $l$ 번째 경로에 대한 전파 지연이며,  $n(t)$ 는 AWGN이다. MC-CDMA 시스템에서 전송부는 주파수 축에서 주어진 확산 부호를 사용하여 전송하고자 하는 심벌을 확산하게 된다. 그림 1은 MC-CDMA 시스템의 구조를 보여준다.  $a_j$ 의 심벌을 전송하는  $j$ 번째 사용자의 복소 등가 저역 통과 전송신호는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$s_j(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} d_j(m) a_j p_i(t - iT_s), \quad (2)$$

여기서  $\{d_j(0), d_j(1), \dots, d_j(K_{MC}-1)\}$ 는  $j$ 번째 사용자 확산부호이며,  $T_s$ 는 심벌의 길이이고,  $p_i(t)$ 는 구형파의 심벌 펄스 파형으로 다음과 같이 정의된다.

$$p_i(t) = \begin{cases} 1, & (-\Delta \leq t \leq T_s - \Delta) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $\Delta$ 는 보호구간의 길이이다.

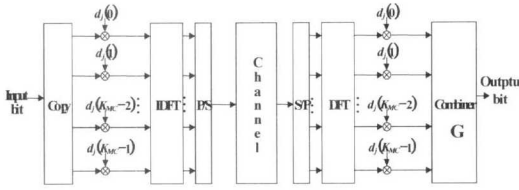


그림 1. MC-CDMA 시스템의 구조

시스템의 전체 사용자  $J$ 명에 대한 전송신호는 다음과 같다.

$$s(t) = \sum_{j=1}^J s_j(t). \quad (4)$$

채널을 통과한 수신신호는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t-\tau) * h(\tau, t) d\tau + n(t) \\ &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{K_{MC}-1} \sum_{j=1}^J z_{m,p}(t) d_{j,p}^i(t - iT_s) e^{j2\pi m \Delta f t} + n(t) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $z_{m,p}(t)$ 는  $m$ -번째 부반송파에서 수신된 복소 포락선이고  $K_{MC}$ 는 확산부호의 길이이다. 수신부에서 채널 보상기의 결정값은 다음과 같이 주어진다.

$$D_j(t = iT_s) = \sum_{m=0}^{K_{MC}-1} G_j(m) y(m), \quad (6)$$

$$y(m) = \sum_j z_m(tT_s) a_j d_j(m) + n_m(iT_s) \quad (7)$$

여기서  $y(m)$ 은 하향 변환 된 수신 신호의 복소 기저대역 성분이며  $n_m(iT_s)$ 은  $m$ -번째 부반송파에서  $t = iT_s$ 일 때의 AWGN이다. 그리고  $G_j$ 는 채널 보상 기법에 따른 사용자별 대각 이득 행렬이다. 채널 보상기법으로 EGC와 MRC 등이 사용된다. EGC와 MRC에서의 대각 이득 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{EGC: } G_j &= \text{diag} \left( \frac{H_1^j}{|H_1^j|}, \frac{H_2^j}{|H_2^j|}, \dots, \frac{H_{K_{MC}}^j}{|H_{K_{MC}}^j|} \right)^* \\ \text{MRC: } G_j &= \text{diag} ( H_1^{j*}, H_2^{j*}, \dots, H_{K_{MC}}^{j*} ) \end{aligned}$$

여기서  $H_m^j$ 는  $j$ 번째 사용자의  $m$ -번째 부반송파에서의 채널 계수이다.

### III. Linearly Constrained Constant Modulus Algorithm

학습 심벌 없이 신호를 추정하는 대표적인 블라인드 방식으로 CMA(Constant Modulus Algorithm)가 있다. 그러나 CMA는 원하지 않는 값으로 수렴할 가능성이 있고 추출된 신호의 위상 복원이 어렵다는 단점이 있다<sup>[13]</sup>. 이러한 문제는 CMA의 비용 함수가 하나의 최소값을 갖지 않고 여러 국부적인 최소값을 가짐으로써 발생한다. 또 다른 단점으로 느린 수렴 속도를 들 수 있다. LCCMA(Linearly Constrained Constant Modulus Algorithm)는 CMA의 단점 중의 하나인 국부 최소값의 존재의 문제를 줄이기 위해서 제안되었는데<sup>[10]</sup>, GSC(Generalized Sidelobe Canceller)<sup>[11]</sup>와 CMA<sup>[12]</sup>를 기초로 하고 있다. 그림 2에 LCCMA의 기본 블럭도를 나타내었다. LCCMA의 구성은 크게 두 가지 블럭으로 구성이 된다. 첫 번째 블럭은 그림 2의 위쪽 경로로 시스템의 출력신호의 구속 가중 행렬(constrained weight matrix)로 구성된다. 아래쪽 경로는 CMA를 사용하여 간섭 신호의 가중치를 적응하는 부분이다. 따라서 구속 가중 행렬에 의한 출력신호는 CMA의 구속인자로 사용되어 CMA가 국부 최소값을 갖는 것을 억제해준다.

시스템의 전체 가중 행렬(W)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W = W_C - W_B W_a, \quad (8)$$

여기서  $W_a$ 는 비구속 가중 벡터(unconstraint weight matrix)이다. 또한 제한 가중 벡터 ( $W_C$ )는 다음과 같다.

$$W_C = C(C^H C)^{-1}, \quad (9)$$

여기서  $C$ 는 구속 벡터는 원하는 사용자의 확산 부호와 같으며,  $(\cdot)^H$ 는 허미션(Hermitian)변환이다.  $W_B$ 는 블럭킹 행렬로  $C$ 의 좌측 널 공간(null space)이다. 즉,

$$C^H W_B = 0 \quad (10)$$

이다.

비구속 가중 벡터는 다음과 같은 CMA의 가중치 갱신식에 의해서 갱신된다.

$$\begin{aligned} W_a(k+1) &= \\ W_a(k) - \mu |y(k)|^{\rho-2} (|y(k)|^\rho - 1) y^*(k) x_a(k) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $y(k) = W^H(k) r(k)$ 이다.

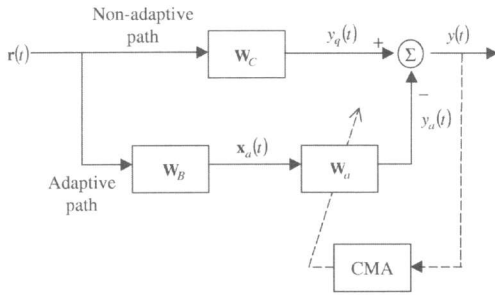


그림 2. LCCMA의 블록 다이어그램

IV. 제안된 시스템

그림 3은 LCCMA 구조를 MC-CDMA 시스템에 적용한 것이다. 간섭 완화기는 역확산을 수행하는 부분과 다른 사용자의 신호를 차단하는 부분으로 이루어져 있다. MC-CDMA의 채널 보상기와 구속 벡터는 기존의 MC-CDMA 시스템의 수신기와 같다. 즉 MC-CDMA 시스템에서 구속 벡터(C)는 사용자의 확산 부호가 된다. 블록킹 부분에서는 원하는 사용자의 신호가 사용자의 확산 부호의 널 공간으로 이루어진 블록킹 행렬에 의해서 차단된다. 역확산 부분의 출력 신호는 채널에 의해서 수신신호에서 확산부호의 직교성이 왜곡되어 원하는 사용자의 신호 이외에 MAI성분이 포함되어있다. 이에 반해 블록킹 부분의 출력신호는 널 행렬의 원리에 의해서 원하는 사용자의 성분을 제거하여 MAI성분을 추출해낸다. 따라서 전체 시스템의 출력은 MAI성분의 제거를 위해 역확산 부분의 출력에 관해서 적용된 블록킹 행렬의 출력을 제거하여 구해진다.

그러나 CMA의 느린 수렴성 때문에 위의 구조를 실제 이동환경에 적용하기는 힘들다. 특히 빠른 페이딩 환경을 겪는 경우, 일반적인 steepest decent 알고리즘으로는 올바른 탭-가중치를 얻지 못한다<sup>[14]</sup>. 따라서 페이딩 환경 하에서 시스템의 성능을 향상

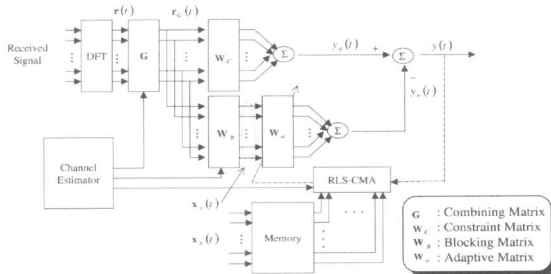


그림 3. 제안된 MC-CDMA 시스템의 구조

시키기 위해서는 기존의 CMA보다 빠르게 수렴할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 빠른 수렴을 보장하는 CMA를 위한 많은 알고리즘이 존재하는데 그 중 관심을 끄는 것 중의 하나는 RLS(recursive least square)-CMA이다<sup>[15][16]</sup>. 이러한 갱신 알고리즘은 빠른 페이딩 채널 환경 하에서도 빠르고 안정적으로 동작한다.

제안된 간섭 완화구조를 위해 필요한 정보는 단지 원하는 사용자의 확산 부호와 이 확산부호에 상응하는 널 공간뿐이기 때문에 제안된 간섭 완화기는 기지국뿐만 아니라 이동 단말기에서도 손쉽게 적용될 수 있다. 또한 확산부호에 대한 정확한 정보가 있지 않을 경우 전체 확산 부호의 일부분으로도 적용이 가능하다<sup>[10]</sup>. 블록킹 행렬(WB)은 사용자의 확산부호의 SVD(singular value decomposition)에 의해서 구해질 수 있다.

제안된 간섭 완화기는 단독적으로 사용하여 단일 사용자를 검출하는데 사용될 수도 있으나 기존의 다양한 순차적인 간섭 제거 구조에 적용하여 다중 사용자의 검출에도 이동될 수 있다. 예를 들어 제안된 시스템을 PIC에 적용할 경우 앞서 결정된 값의 정확도가 향상되므로 PIC 전체의 성능의 향상을 꾀할 수 있고 LCCMA의 여러 특성들을 이용가능하다. 그림 4는 제안된 간섭 완화 구조를 PIC에 적용한 시스템이다.

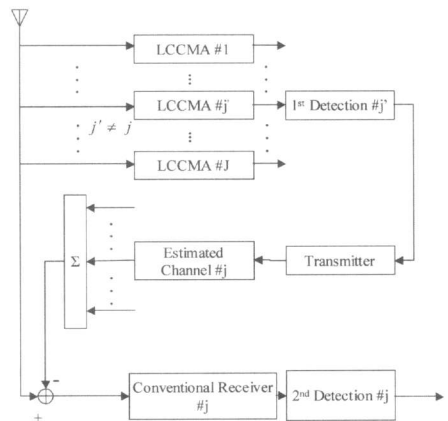


그림 4. 제안된 HIC의 구조

V. 모의실험 결과

MC-CDMA 시스템에서 제안된 간섭 완화 알고리즘의 MAI 제거성능을 평가하기 위해서 다양한 이동통신 환경에 대해서 Monte-Carlo 모의실험을

수행하였다. 실험에 사용한 환경 변수들을 표 1에 정리하였다.

수행한 모든 모의 실험에서, 완벽한 채널 추정과, 심벌, 주파수 동기, 그리고 사용자에 따른 동기가 이루어졌다고 가정한다. 이동국은 반송파의 주파수가 1.8GHz일 경우 6m/s의 속도로 이동하여 최대 도플러 주파수 천이( Doppler shift)가 10Hz가 발생한다. RLS-CMA에서 사용되는 망각 상수(forgetting factor)의 값은 0.992로 실험적으로 얻어졌다.

MC-CDMA 시스템의 특성상 하향링크와 상향링크에서 각각 EGC와 MRC가 성능이 우수하므로 제안된 LCCMA의 구조와의 비교를 위해서 이들 환경에 대해서 모의 실험을 수행하였다. 또한 상향 링크에서는 다중 사용자 검출 기법의 사용이 가능하므로 대표적인 검출 기법인 PIC와의 성능도 비교하였다.

그림 5는 하향 링크에서의 성능을 보인 것이다. 그림 5(a)와 5(b)는 각각 20명의 사용자와 30명의 사용자가 존재할 경우  $E_b/N_0$ 의에 따른 성능을 보인 것이다. EGC의 경우, 채널에 의한 확산부호의 직교성이 왜곡되어 높은  $E_b/N_0$ 의 경우에도 BER 성능은 크게 향상되지 않는다. 그러나 제안된 시스템의 경우 직교성 왜곡으로 발생하는 MAI성분들을 적응 블록에 의해서 제거할 수 있으므로 성능이 향상됨을 볼 수 있다. 또한 경로수가 3에서 5로 증가할 때, EGC의 경우 성능의 열화가 나타나는 반면 제안된 시스템의 경우 경로 다이버시티를 이용할 수 있어 성능이 향상됨을 알 수 있다. 그림 5(c)는 사용자 증가에 따른 시스템의 성능을 보인 것이다. 제안된 시스템에 보다 EGC의 경우 성능의 하락폭이 상대적으로 커지게 됨을 알 수 있다. 시스템의 용량 증가를 살펴보면 BER이  $10^{-4}$ 이고  $E_b/N_0$ 가 20dB

표 1. Simulation Parameters

Walsh code length	32
Rayleigh fading channel	TDL Fading channel structure (No. of paths =3, 5)
Doppler frequency	10Hz
Downlink	EGC, LCCMA
Uplink	MRC, LCCMA, PIC, HIC
Modulation	BPSK
Cyclic prefix	3(for 3 paths), 5(for 5 paths)
Forgetting factor for RLS-CMA	0.992

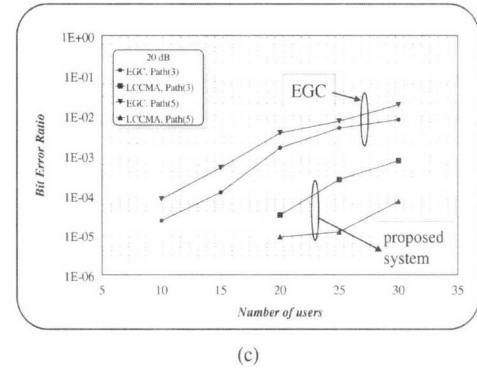
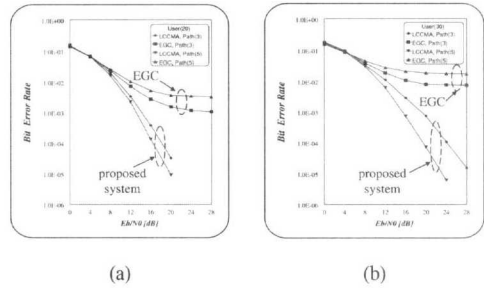


그림 5. 레일리 페이딩 채널에서 순방향 링크 성능 (a) 전체 사용자수 20, (b) 전체 사용자수 30, (c)  $E_b/N_0 = 20$ dB

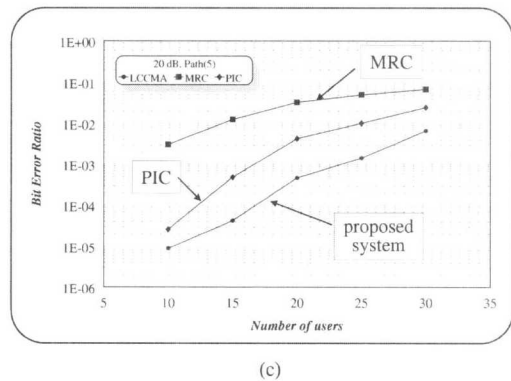
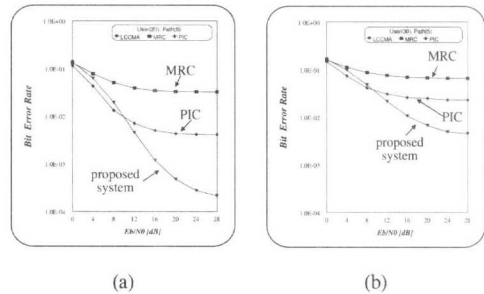


그림 6. 레일리 페이딩 채널에서 역방향 링크 성능 (a) 전체 사용자수 20, (b) 전체 사용자수 30, (c)  $E_b/N_0 = 20$ dB

이며 경로수가 3일 경우 1.5배, 5일 경우 3배 증가하였다.

그림 6은 상향 링크에서의 성능을 보인 것이다. 그림 6(a)와 그림 6(b)는 경로수가 5일 경우 각각 20명과 30명에 따른 시스템의 성능이다. 사용자의 모든 정보를 이용하는 PIC의 경우보다 단일 사용자 검출 기법으로 사용된 제안된 시스템의 성능이 우수함을 알 수 있다. 역시 기존의 시스템은 높은 Eb/No에서도 성능은 일정한 값을 갖게 되는 데 제안된 시스템의 경우 이런 성능 수렴의 특성이 상대적으로 높은 Eb/No에서 나타나게 된다. 그림 6(c)는 사용자별 증가에 따른 시스템의 성능향상을 도사한 것이다. 시스템의 용량 증가를 살펴보면 Eb/No가 20dB이고, 경로수가 5이고, BER이 10<sup>-4</sup>인 경우, 제안된 간섭완화구조를 사용하는 MC-CDMA 시스템의 용량이 PIC의 경우보다도 1.4배 증가함을 알 수 있다.

그림 7은 제안된 구조를 PIC와 결합한 HIC의 성능을 보인 것이다. MAI가 없는 단일 사용자의 경우를 한계값(bound)으로 표시하였다. 제안된 LCCMA를 PIC와 결합하여 사용하였을 경우, LCCMA에 의해서 앞서 검출된 심벌의 정확도가 증가하여 전체 HIC의 성능 향상을 가져옴을 알 수 있다. 또한 사용자수가 시스템의 수용한계의 절반 이하인 경우 단일 사용자의 경우와 성능이 거의 일치함을 알 수 있다. 그리고 높은 Eb/No에서도 성능이 향상되지 않는 현상도 그림 6(a)(b)와 비교하였을 경우 크게 개선되었다. 또한 HIC 구조에서는 앞단의 LCCMA에 의해 경로 다이버시티에 의한 이득을 얻을 수 있으므로, PIC만을 사용하는 경우와는 달리 경로수의 증가에 따른 이득을 얻는 것이 가능하였다.

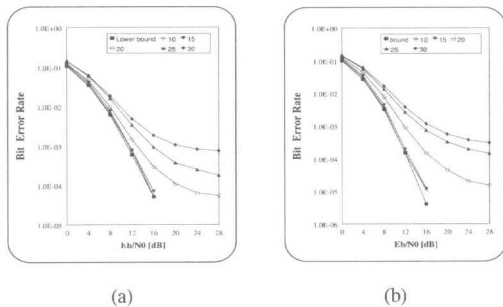


그림 7. 역방향 링크에서의 Hybrid IC의 성능  
(a) 경로수 3, (b) 경로수 5

## VI. 결론

본 논문에서는 MC-CDMA 시스템을 위한 블라인드 방식의 2가지 간섭 완화 구조를 제안하였다. 본 논문에서 제안된 구조는 다른 사용자의 정보 없이 원하는 사용자의 확산부호만으로 MAI 성분을 제거할 수 있으므로 제안된 방식은 모든 사용자의 확산부호를 미리 알고있는 기지국뿐만 아니라 기지국 보다 제한된 환경 하에서 구현해야 할 이동국에서도 사용이 가능한 구조이다. 이러한 구조적인 장점뿐만 아니라 모의 실험을 통하여 제안된 LCCMA 구조를 적용한 MC-CDMA 시스템은 하향, 상향링크 모두에서 기존의 시스템보다 성능이 우수함을 알 수 있었다. 그리고 제안한 구조는 사용자가 많을 경우 기존의 시스템인 EGC, MRC, 그리고 PIC에서 얻을 수 없었던 경로다이버시티를 얻을 수 있어 시스템 측면에서 좀 더 효율적이었다. 제안된 LCCMA 구조는 MC-CDMA 시스템에서 단일 사용자 검출기로서 뿐만 아니라 여러 다중 사용자 검출에 적용할 수 있다. 또한 본 논문에서는 PIC와 결합된 형태로 사용된 HIC의 경우를 실험하였는데, PIC만을 사용한 경우에 비해서 간섭 제거에 의한 성능의 향상과 함께 경로 다이버시티에 의한 이득이 발생하여 많은 다중 경로와 사용자가 존재하는 환경에서 많은 이득을 얻을 것으로 보인다.

## 참고 문헌

- [1] N. Yee, J. P. Linnartz and G. Fettweis, "Multicarrier CDMA in indoor wireless radio networks", *Proc. IEEE PIMRC'93*, pp. 468-472, Sept. 1993.
- [2] S. Verdú, "Adaptive Multiuser Detection," *Proc. IEEE 3rd International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, vol. 1, pp.43-50, 1994
- [3] F. Petre, P. Vandenameele, A. Bourdoux, B. Gyselinckx, M. Engels, M. Moonen, H. De Man, "Combined MMSE/pcPIC multiuser detection for MC-CDMA," *Vehicular Technology Conference Proceedings*, pp. 770-774 vol.2, May 2000,
- [4] R. Le Gouable, M. Helard, "Performance of single and multi-user detection techniques for

