

DS-CDMA 시스템 환경에서 Constant Modulus 알고리즘을 이용한 블라인드 다중사용자 검출에 관한 연구

정회원 김 대 규*, 우 대 호*, 변 윤 식*

A Study on Blind Multiuser Detection using the Constant Modulus Algorithm for DS-CDMA Systems

Dae-Kyu Kim*, Dae-Ho Kim*, Youn-Shik Byun* *Regular Members*

요 약

본 논문은 DS-CDMA에서 발생하는 원근문제를 해결하기 위하여 CMA를 이용한 블라인드 다중 사용자 검출기를 제안하였다. 이 검출기는 신호 대 간섭비(SIR)의 수렴 특성을 통하여 기존 검출기인 MOE와 비교되었다. 기존의 방법은 사용자의 확산 파형 뿐만 아니라 타이밍에 대한 정보가 필요하지만, 제시된 방법은 CMA를 사용함으로써 사용자의 확산 코드 파형만을 요구하는 장점이 있다. 신호 대 간섭비의 특성을 나타내는 수렴 곡선을 통하여 기존 검출기인 MOE보다, 제안된 블라인드 CMA 다중 사용자 검출기의 성능이 우수함을 알 수 있었다. 제안된 다중 사용자 검출기는 비트 에러율(BER)을 기준으로 하였을 때, 신호 대 잡음비(SNR)와 원근비(near-far ratio)가 변화되는 가운데, 이에 대한 성능 평가가 이루어졌고, 사용자를 2명에서 16명으로 변화시켜가며 가우시안 채널과 레일리 채널 하에서도 신호 대 간섭비를 기존의 검출기와 비교하여 살펴 보았다. 이러한 조건 모두에서 CMA를 이용한 블라인드 다중 사용자 검출기가 기존 MOE 다중사용자 검출기에 비해 우수한 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

ABSTRACT

This paper presents the blind multiuser detector using the constant modulus algorithm(CMA) to solve the near-far problem in DS-CDMA systems. The convergence property of the detector is compared with the conventional MOE(minimum output energy) detector by means of SIR(signal-to-interference ratio). The MOE detector needs both the spreading code of the users and the timing information, while the proposed method needs only information about the spreading code of users.

Simulation results show that the CMA-based detector is superior to the conventional blind MOE multiuser detector. For this, the BER performance was tested using different values of SNR and near-far ratio. The SIR is also investigated for different number of users in AWGN and Rayleigh fading channels. We have observed that the proposed blind multiuser detector performs better than the conventional MOE multiuser detector.

* 시립 인천대학교 전자공학과(byun@lion.inchon.ac.kr)
논문번호 : 99067-0218, 접수일자 : 1999년 2월 18일

I. 서론

적용 알고리즘을 사용한 신호처리 기술은 이동통신 시스템 분야에서 성공적으로 자리 매김을 하고 있다. 산업적인 측면에서 발전된 신호처리 기술은 무선 통신 시스템의 용량을 증가시킬 뿐 아니라 통신의 질을 높이고 모든 종류의 간섭을 제거하는 역할을 한다. 특별히, 코드분할 다중접속 방식(CDMA)에서 간섭을 제거하는 신호처리 기술은 중요한 기술 중의 하나로 인식되고 있다^[1]. 코드분할 다중접속 방식에서 다른 사용자의 신호인 간섭을 제거함으로써 시스템의 성능 및 시스템 용량을 증대시키며, 저 전력 소모, 효과적인 스펙트럼 이용을 기대할 수 있기 때문이다^{[2][3]}. DS-CDMA 방식에서는 근거리로부터 강한 전력의 간섭신호가 원하는 신호에 간섭을 미치는 원근문제가 존재하는 동시에 다른 사용자로부터의 다중 접속 간섭(Multiple Access Interference) 등의 영향으로 복조기의 성능이 크게 제한되므로 간섭을 제거하는 것이 중요한 기술중의 하나로 여겨지고 있다^[4]. 이는 각 사용자는 상호 신호간 같은 채널을 사용하게 됨으로 간섭 작용을 하게 됨으로 발생하는 결과이다^{[5][6]}. 폭발적인 이동통신 사용자의 증가와 함께, 이에 따른 다중접속 간섭이 더욱 많이 발생하게 되었다. 따라서 다중사용자 검출기는 이러한 다중접속 간섭을 제거함으로써 지속적으로 증가하는 가입자에 대하여, 다중접속 간섭으로 인한 서비스의 품질저하를 막고 시스템의 용량을 증대시키는 방법으로 유용한 방법임에 틀림없다. 1980년대 초반, Verdu는 최적의 다중사용자 알고리즘을 제시하여 다중사용자 검출 방법의 기반을 제시하는데 기여하였다^[7]. 그러나 이러한 Maximum Likelihood Sequence Detection (MLSD) 알고리즘은 사용자의 수가 증가함에 따라 시스템의 복잡도가 지수적으로 증가하므로 현실적으로 구현이 불가능한 단점이 있다^[8]. 이러한 단점을 극복하기 위해 Verdu는 역상관 검출기를 제시하기도 하였다. 역상관 검출기와 선형 최소 평균 에러(MMSE) 검출기는 코드 분할 다중 접속 방식에서 다중 사용자 간섭을 제거하기에 아주 효율적인 것으로 알려져 있다. 특히 이런 최적의 다중 사용자 검출기는 최적의 원근 저항을 제공한다. 특히 훈련 데이터 수열을 이용할 때 MMSE 다중 사용자 검출기는 신호 파형 또는 수신된 진폭의 정보 없이도 적응적으로 구현되어진다. 그러나 역상관 검출기는

잡음부의 전력이 커지면 시스템이 열화 되는 단점이 있다. 이러한 역상관 검출기의 단점을 극복하기 위해 MMSE 다중 사용자 검출기가 제시되기도 하였지만 MMSE 검출기 또한 검출하고자 하는 사용자에 대한 시간정보와 훈련수열에 대한 정보가 필요하다는 단점을 역시 갖고 있다. 1994년에 블라인드 다중 사용자 검출기를 사용하여 사용자의 시간정보와 훈련수열에 대한 정보를 필요로 하지 않는 블라인드 검출기가 Madhow에 의해 제시되었다^{[9][10]}. 이러한 블라인드 기법은 훈련수열에 대한 정보를 사용하지 않는다는 장점이 있다. 그러나 Madhow에 의해 제시된 Minimum Output Energy (MOE) 방법은 훈련수열은 필요 없지만, 출력하고자 하는 신호에 대한 타이밍과 확산 파형에 대한 정보를 반드시 요구한다. 본 연구에서는 Madhow가 제시한 MOE 블라인드 검출기와 이를 기초로 제안된 블라인드 검출기에 대하여 살펴보기로 한다^{[11][12]}. 기존의 블라인드 다중사용자 검출은 검출하고자 하는 사용자에 대한 확산파형에 관한 정보뿐만 아니라 타이밍 정보를 요구한다. 또한 CMA는 정보신호를 검출하는데 있어 사용자 신호 파형의 부정확한 파형에 대해서도 좋은 특성을 보인다^[13]. 이에 본 연구에서는 검출하고자 하는 사용자의 확산 파형만의 정보만을 가지고 데이터 정보를 검출하고자 CMA를 이용한 블라인드 다중 사용자 검출기에 연구하고자 한다. 시스템의 성능을 알아보기 위하여, 본 실험에서는 BPSK 타입의 DS-CDMA 시스템 환경에서, 컴퓨터 모의실험을 통하여 기존의 MOE 검출기와 제안된 블라인드 다중 사용자 검출기를 신호 대 간섭비와 비트 에러율 측면에서 성능을 비교하고자 한다.

II. 다중사용자 시스템 모델

일반적인 DS-CDMA 시스템의 동기식 BPSK 변조방식에서, 연속적으로 수신된 기저대역 신호의 수학적 모델은 다음 식(1)과 같이 고려할 수 있다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k b_k(t) S_k(t) + n(t) \quad (1)$$

여기서, A_k 는 k 번째 사용자의 진폭, $b_k(t)$ 는 정보 비트, $S_k(t)$ 는 확산부호, $n(t)$ 는 전력스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 백색 가우시안 잡음을 각각 나타낸다. 먼저 K 명의 사용자를 가진 다중 사용자 시스템

모델을 가정할 때 그림 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 위의 식(1)에서 칩률 샘플링 후에 우리는 수신된 모델을 식(2)과 같이 정의 할 수 있다. 이 수신 모델로부터 "one-shot" 검출을 할 수 있다.

$$Y = SDb + n \quad (2)$$

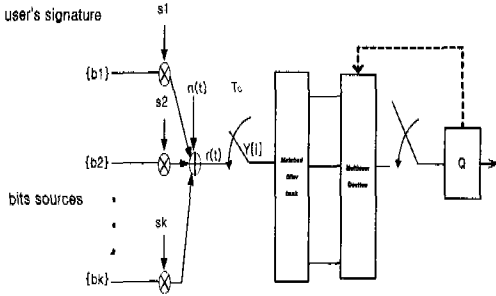


그림 1. 다중사용자 시스템 모델.

여기서, $Y = [y_1, \dots, y_M]^T$ 는 수신된 모델이며, $S = [s_1, \dots, s_k]$ 는 $N \times K$ 인 확산 행렬, $D = \text{diag}(A_k)_{K \times K}$ 는 사용자의 진폭, $b = [b_1, \dots, b_k]^T$ 는 정보 비트이고 N 은 확산 시퀀스의 길이를 나타낸다.

III. 블라인드 다중 사용자 검출기

본 장에서는 기존의 블라인드 검출기에 대한 사전적 지식을 제공하고 이와 비교하여 제안된 블라인드 다중 사용자 검출기에 대하여 구조와 적용 계수식에 대하여 살펴보도록 한다. 다중 접속 통신 방식에서는 훈련열을 필요로 한다는 것은 상당히 부담스러운 부분이다. 송신기들은 서로 비동기로 전송을 시작하고 끝내기 때문에 새로운 간섭에 대해서는 적응 수신기의 계수들이 새롭게 갱신되어야 한다.

3-1. 기존의 블라인드 MOE 다중 사용자 검출기
기존의 다중 사용자 검출 블라인드 MOE 구조는 같다^[8].

위의 식(2)에서 우리는 $k=1$ 일 때를 우리가 검출하고자 하는 원하는 사용자로 가정한다. 이러한 MOE 구조는 MAI 간섭을 간단히 줄일 수 있다. 이 방법은 출력에너지를 최소로 만드는 x_1 를 선택

하는데 있다.

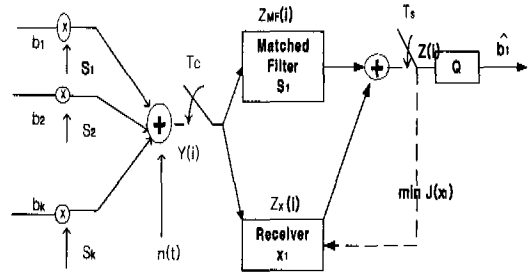


그림 2. 기존의 블라인드 MOE 다중 사용자검출기.

$$\begin{aligned} MOE(x_1) &= E[\langle y^T, c_1 \rangle^2] \\ &= E[\langle y, s_1 + x_1 \rangle^2] \end{aligned} \quad (3)$$

$$c_1 = s_1 + x_1 \leftrightarrow \text{MF+adaptive component}$$

여기서 y 는 정합필터의 출력 값을 나타낸다. 위의 식(3)에서 c_1 을 구성하는 성분 중 s_1 과 x_1 은 다음과 같은 성질이 있다.

$$\langle s_1, x_1 \rangle = 0 \quad (4)$$

$$\langle s_1, c_1 \rangle = \|s_1\|^2 = 1$$

우리가 검출하기를 원하는 신호를 $k=1$ 로 설정하였을 때, 원하는 신호의 확산 파형 s_1 과 직교성을 유지하면서 x_1 을 갱신하기 위해 선형 변환, $\langle y^T, s_1 + x_1 \rangle$ 의 출력에너지는 다음과 같은 독립된 세 개의 성분으로 나눌 수 있다.

$$r(t) = A_1 b_1(i) s_1(t-iT) + \sum_{k=2}^K A_k b_k s_k(t-iT) + n(t) \quad (5)$$

첫째 성분은 우리가 검출하고자 하는 사용자 신호, 둘째 성분은 다중 사용자간의 간섭 신호, 그리고 셋째는 배경 잡음을 각각 나타낸다. 이 세 성분 중 첫 번째 부분의 에너지는 x_1 과 무관하고 두 번째와 세 번째 성분의 에너지는 x_1 의 변화에 따라 변동하게 된다. 따라서 가장 간단히 간섭을 줄일 수 있는 방법은 출력에너지를 최소로 하는 x_1 을 선택하는 것이다. 다음 식(6)은 다중 사용자간의 간섭을 최소로 하는 비용함수를 나타낸다.

$$MOE(x_1) = E[\langle y^T, s_1 + x_1 \rangle^2] \quad (6)$$

이와 같은 경우, 만약 배경 잡음이 매우 작다면 다중 사용자에 의한 간섭 잡음은 거의 제거되며, $(s_1 + x_1)$ 는 역 상관 다중 사용자 검출기와 유사한 결과를 나타낸다. 또한 배경 잡음의 크기가 매우 크다면 x_1 은 다중 사용자 간섭보다는 배경 잡음 제거에 더 많이 관여를 하므로 이런 경우는, 변형된 선형 MMSE 다중 사용자 검출기의 형태가 다음 식 (7)에 나타나 있다.

$$MOE(x_1) = E[A_1 b_1 - \langle y, s_1 + x_1 \rangle]^2 + A_1^2 \quad (7)$$

선형 MMSE 다중 사용자 검출기는 평균 제곱 오차의 최소화를 위해서 적응성 훈련열이 반드시 필요하다. 반면 블라인드 다중 검출 방식은 이와 같은 훈련열이 필요가 없고 경사 강하 방법으로 나타낼 수 있다. 이에 대한 유도 과정은 다음과 같다. 먼저, 다중 사용자 간섭을 최소로 하는 비용함수 식 (6)을 x_1 에 관해 편미분하면 다음과 같은 결과 식을 얻을 수 있다.

$$2 \langle y, s_1 + x_1 \rangle y \quad (8)$$

y 의 성분중 s_1 에 대해서 직교하는 성분은 다음 식 (9)과 같으므로,

$$y - \langle y, s_1 \rangle s_1 \quad (9)$$

다음과 같은 계수 적응식(stochastic gradient adaptation rule)을 얻을 수 있다.

$$x_1[i] = x_1[i-1] - \mu * z[i](y[i] - z_{MF}[i] s_1) \quad (10)$$

여기서, z_{MF} 와 z 는 각각 기존 단일 사용자 정합 필터의 출력과 블라인드 다중 사용자 검출기에서 제안된 선형 변환의 출력을 의미한다.

3-2. CMA를 사용한 제안된 블라인드 다중 사용자 검출기

제안된 블라인드 다중 사용자 검출기는 기존의 다중 사용자 검출 알고리즘이 MOE에서 나타나는 문제점을 해결하고 더 나은 성능을 얻기 위하여 다음 그림과 같은 구조로 나타낼 수 있다. 제시된 알고리즘은 기존의 MOE 비용함수를 MSE 비용함수로 대체하고자 한다.

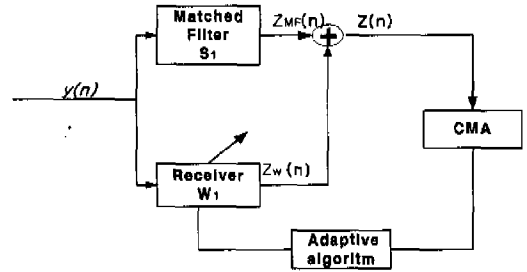


그림 3. 제안된 블라인드 다중사용자 검출기.

그림에서 제안된 수신기는 검출하고자 하는 사용자의 신호만을 필요로 한다. 제안된 수신기에서 칩 샘플링 후의 수신된 신호는 정합필터와 적응수신기의 공통입력으로 작용한다. 동시에 정합필터의 출력 부분에서는 검출하고자하는 사용자의 정보와 간섭에 의해서 발생하는 정보가 존재하고, 적응 수신기 부분에서는 다중접속 간섭과 잡음에 의한 간섭을 억제하고자 한다. 두 출력의 합에 의해 검출하고자 하는 사용자의 신호가 검출되는 결과를 나타낸다.

식(3)에서 c_1 의 구성 성분 중 x_1 을 블라인드 알고리즘으로 적응시키기 위해, 다음과 정의 되는 오차 $e(n)$ 를 사용한다. 이 오차신호에 대한 비용함수를 최소화하는 적응 알고리즘은 다음과 같다.

$$J(n) = E[|e(n)|^2] \quad (11)$$

$$e(n) = |z_{MF}(n) + z_w(n)|^2 - \delta$$

여기서, δ 는 검출하기를 원하는 사용자의 전력 밀도를 나타낸다. 이때 계수 벡터 $w_1(n)$ 의 계수 갱신식은 steepest descent 방법을 사용하여 다음 식(12)과 같이 나타내어진다.

$$w_1(n+1) = w_1(n) - \mu \cdot \nabla_{w_1(n)} J(n) \quad (12)$$

여기서, $\nabla_{w_1(n)} J(n)$ 은 비용함수, $J(n)$ 의 계수 벡터, $w_1(n)$ 에 대한 순차 추정치를 나타낸다.

$\nabla_{w_1(n)} J(n)$ 의 k 번째 성분은 다음 식(13)과 같이 정의된다.

$$\nabla_{w_1(n)} J(n) = \nabla_{w_1(n)} E[|e(n)|^2] \quad (13)$$

$$\frac{\nabla_k E[|e(n)|^2]}{\partial w_k(n)} = \frac{\partial |e(n)|^2}{\partial a_k} + j \frac{\partial |e(n)|^2}{\partial b_k}$$

$$= 4|e(n)|(z_{MF}(n) + z_w(n)) y^*(n)$$

a_k 는 적응 수신기 벡터 $w_1(n)$ 의 k 번째 요소의 실수부, b_k 는 허수부 값을 나타낸다. ($j=\sqrt{-1}$) 따라서 블라인드 CMA 다중 사용자 알고리즘의 적응 수신기 계수 벡터 $w_1(n)$ 의 갱신식은 다음과 같이 된다.

$$w_1(n+1) = w_1(n) - 4\mu e(n)(z_{MF}(n) + z_w(n)) y^*(n) \quad (14)$$

μ 는 스텝 사이즈, $y(n)$ 는 입력벡터, *은 공액 복 소수(complex conjugate)를 각각 나타낸다. 제안된 블라인드 알고리즘은 다중점접속에 의해 발생하는 간섭과 심벌간 간섭을 동시에 억제하기 위한 구조이다. 기존의 MOE 비용합수를 MSE 비용합수로 대체하였고, 이러한 알고리즘을 바탕으로 한 검출기는 잡음하에서 우수한 특성을 나타내는 constant modulus 알고리즘을 사용하여 성능이 향상될 수 있도록 제안되었다.

IV. 시뮬레이션 환경 및 성능평가

다중 사용자 환경 하에서 제안된 블라인드 적응 다중 사용자 검출 알고리즘의 수렴특성을 알아보기 위해 MOE 검출기와 CMA가 결합된 시스템을 구성하였다. 각각의 desired user의 정보 데이터는 랜덤하게 ± 1 의 값을 갖도록 발생시켰고, 확산 신호는 길이가 31인 확산 파형을 랜덤하게 ± 1 의 값을 갖도록 발생시켰다. 부가 잡음은 송신데이터인 desired user와 독립이고, 평균이 0인 가우시안 잡음을 사용하였다. 여기서 desired user는 $k=1$ 일 때를 기준으로 하였다. 블라인드 적응 수신기의 수렴특성에 대한 성능 지표로서 다음 식과 같이 정의되는 SIR (Signal to Interference Ratio)을 사용하였다.

$$SIR = \frac{A_k^2(w^T s_k)^2}{\sigma^2(w^T w) + \sum_{k=2}^K A_k^2(w^T s_k)^2} \quad (15)$$

여기서 σ^2 은 부가잡음 $n(t)$ 의 전력 밀도를 의미하며, w 는 검출기의 웨이트 벡터이다. 적응 수신기는 FIR 필터를 사용하였다. 본 실험에서는 검출기의 웨이트 벡터의 수는 확산신호와 같은 수 ($N=31$)로 가정하였다.

벡터 $w = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_{15}, \dots, w_{31}]^T$ 의 초기치

는 $w_{15} = (1 + j)/\sqrt{2}$ 로 하였고 나머지 값은 0으로 하였다.

아래의 그림 4.에서 그림 6.까지는 다음과 같은 조건에서 컴퓨터 모의실험을 통하여 기존의 MOE 알고리즘과 제시된 블라인드 MOE(Minimum Output Energy) 알고리즘을 SIR(Signal-to-Interference ratio)과 비트 에러율(Bit-error rate)로 비교하여 나타내었다.

$$(SNR)_{k=1} = 10 * \log_{10} \frac{\sigma_{k=1}^2}{\sigma_v^2} = 10 [dB] \quad (16)$$

$$NFR_k = 10 \log_{10} \frac{user_power}{user_power} = 5 [dB] \quad (17)$$

그림 4.에서 그림 6.까지는 AWGN 채널하에서 SNR과 NFR 값을 식(16),(17)의 값과 동일하게 놓았다. 사용자의 수를 k 로 놓고, 2명에서 16명까지 증가시켰을 때, 기존의 검출기와 개선된 검출기의 SIR 수렴 특성을 비교하였다. 사용자의 수가 증가할수록, 다른 사용자의 신호가 원하는 신호에 대해 간섭신호로 작용함으로 신호 대 간섭비가 작아지게 된다. 그러나 여전히 제안된 블라인드 다중 사용자 검출기는 기존의 MOE 검출기에 비해 2~3[dB]정도의 이득을 정상상태에서 가짐을 볼 수 있다. 그림 7.과 그림 8.은 사용자를 8명으로 설정하였을 때, 식 (16) (17)와 같이 정의된 SNR 값을 0~10[dB]로, NFR을 0~20[dB]까지 변화시켰을 때, 두 알고리즘을 BER 특성을 통하여 비교하였다. 역시 CMA를 사용한 제안된 검출기가 부가잡음과 다른 사용자의 간섭 전력에 대하여 BER 특성면에서 우수함을 알 수 있었다. 그림 9.에서는 레일리 페이딩 채널하에서 두 검출기의 성능을 비교하였다. AWGN 채널 환경에서와 마찬가지로 제안된 검출기의 수렴 특성이 SIR을 기준으로 보았을 때 우수함을 알 수 있었다.

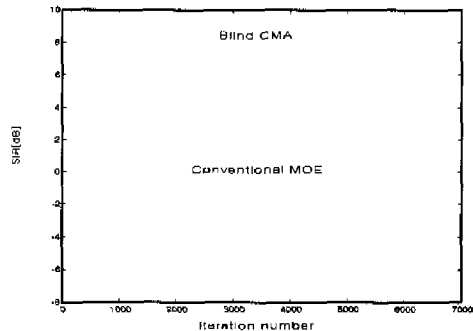


그림 4. SIR에 대한 수렴특성 ($k=2$).

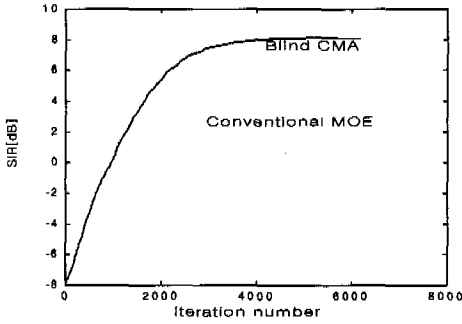


그림 5. SIR에 대한 수렴특성($k=4$).

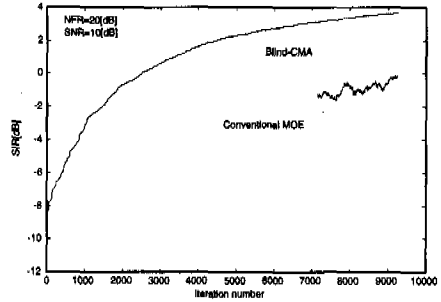


그림 9. 레일라이 페이딩 채널에서의 SIR($k=8$).

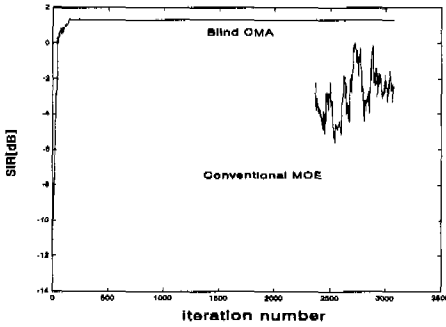


그림 6. SIR에 대한 수렴특성($k=16$).

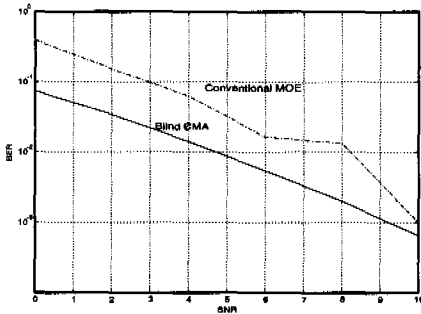


그림 7. SNR에 대한 BER ($k=8$).

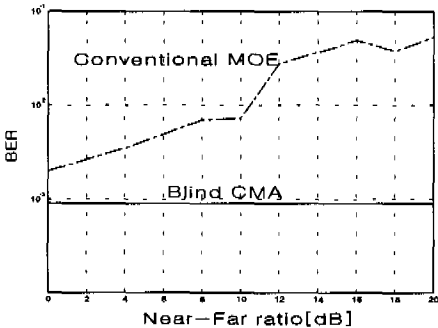


그림 8. NFR (0~20[dB]) 일 때 에러확률.

V. 결론

본 연구에서는 DS-CDMA 환경 하에서 블라인드 적응 다중 사용자 검출을 위해, 현실한 특성을 나타내는 알고리즘에 대해서 컴퓨터 모의 실험을 통하여 살펴보았다. 블라인드 CMA 알고리즘과 기존의 Madhow가 제시한 MOE(Minimum Output Energy) 방법을 SIR(Signal-to-Interference ratio)과 비트 에러율(bit-error-rate)을 통하여 비교하였다. CMA를 사용한 블라인드 알고리즘이 신호 대 간섭비 면에서도 사용자 수에 관계없이 우수하며, 원근비(Near-Far-Ratio)와 SNR(Signal-to-Noise ratio)을 변화시켜 가며 비교해 보았을 때도 안정되고 낮은 에러율을 가짐을 알 수 있었다. 이는 MOE 구조가 데이터에 의존적인 반면, CMA는 동적인 환경에서의 변화(강한 간섭사용자의 출현)에 대해서 강한 특성을 가지기 때문이라 사료된다. 제시된 구조가 역 방향 채널에서 사용 되었을 때에는 다중사용자 검출기로 사용되어지며, 최소한 정보인 확산 코드만을 가지고 모든 사용자에 대한 정보를 원할히 복원이 가능하리라 예측되어진다.

참고 문헌

- [1] Simon Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice-Hall, 3rd edition, 1996.
- [2] H. V. Poor and X. Wang, "Code aided interference suppression for DS/CDMA communications: Part I and II," *IEEE Trans. Communications*, pp.1101-1122, Sep. 1997.

