

논문 2006-43IE-2-12

DS-CDMA 시스템을 위한 혼합 LMSF 블라인드 다중 사용자 검출

(Mixed LMSF Blind Multiuser Detector for DS-CDMA Systems)

박 성 욱*, 박 종 욱**

(Sung-Wook Park and Jong-Wook Park)

요 약

블라인드 기법은 훈련열 없이 검출하고자 하는 사용자의 최소한의 정보만을 가지고 정보 검출이 가능한 방법이다. 본 논문에서는 직접 대역 확산 코드 분할 다중 접속 시스템에서 다중사용자 간섭을 제거하기 위해서, 혼합된 비용함수를 사용하는 블라인드 다중사용자 검출기를 제안하였다. 제안된 블라인드 다중사용자 검출기의 비용함수는 LMS와 LMF를 혼합한 형태로 이루어져있으며, 제안된 다중사용자 검출기의 성능을 평가하기 위해서 가우시안 채널 하에서 BER을 비교 하였다. 모의실험 결과, 사용자가 20 명 존재하는 경우, 제안된 블라인드 검출기가 블라인드 MOE 다중사용자 검출기에 비해 약 3dB정도 더 나은 성능을 지님을 확인 할 수 있었다.

Abstract

Blind techniques without the help of training sequences are able to detect the information signal which has the minimal information of desired user. In this paper, we proposed the blind multiuser detector using the hybrid cost function to cancel the multiple user interference in direct sequence code division multiple access systems. The cost function of proposed blind multiuser detector is the hybrid type which joints both least mean square(LMS) algorithm and least mean fourth(LMF) algorithm. We evaluate the bit error rate(BER) performance of proposed blind multiuser detector under additive white Gaussian noise channel. Simulation results show that the proposed blind detector has an about 3dB of signal to noise ratio more than blind minimum output energy(MOE) multiuser detector under existing active user 20.

Keywords : DS-CDMA System, Blind Technique, Blind Multiuser Detection, Mixed-LMSF

I. 서 론

직접 대역 확산 기법에 근거한 무선 이동 서비스 사용자가 꾸준히 증가하고 있다. 이러한 시스템에서는 사용자의 증가에 따라 원근 효과와 다중 접속 간섭이 발생하게 된다. 이 두 성분은 시스템의 성능을 저하시키는 요인으로 작용하며, 이 문제를 해결 위해 1984년에 Sergio

Verdu에 의해 다중 사용자 검출 기법이 연구되었다^[1]. 이 기법은 최적 다중사용자 검출 기법이며, 가장 이론적인 접근 방법이지만, 사용자의 수에 따라서 시스템의 복잡도가 지수 적으로 증가하는 단점을 지니고 있다. 최적 다중사용자 검출기의 단점을 극복하기 위해서 준 최적 다중사용자 검출기법들이 연구되어왔다^[2-8]. 준 최적 기법에는 역 상관 검출기와 최소 평균 제곱 오차 검출 기법이 존재하며 이들 검출기들은 모두 선형 검출기들이다. 또한 이를 하드웨어적인 구조로 접근하기 위해서 비선형 기법에 바탕을 둔 연속 간섭 제거 기법과 병렬 간섭 제거 기법이 연구되었다^[4]. 위에서 언급한 기법들은 모든 사용자에 대한 확산 파형, 타이밍, 사용자 전력 등 많은 정보를 필요로 한다^[1].

* 정회원, 인하공업전문대학 디지털전자정보과
(Dept. of Digital Elec. & Info., Inha Tech. College)

** 정회원, 인천대학교 전자공학과
(Dept. of Electronic Eng., University of Incheon)

※ 본 연구는 산업자원부, 한국산업기술평가원 지정 인천대학교 멀티미디어연구센터의 지원에 의한 것입니다.

접수일자: 2005년10월20일, 수정완료일: 2006년6월7일

이런 문제점을 보완하기 위해서 검출하고자 하는 사용자의 정보만을 필요로 하는 블라인드 다중 사용자 검출 기법이 연구 되었다^[5]. 블라인드 기법은 최소 출력 에너지 비용함수에 사용하고 있으며, 다중 사용자 검출기의 에너지를 최소화 하여 검출하고자 하는 사용자의 에너지를 최대화 하는 기법이다. 최소 출력 에너지 다중 사용자 검출 기법은 2차 함수를 사용하고 있다. 이는 최소 평균 제곱 기법으로서 다중 사용자 간섭 성분의 변화, 채널 변화 등에 빠르게 대처하지 못한다. 또한 최소 평균 사제곱이 수렴 할 수 있는 곳이 두 군데 존재하므로 발산의 문제가 존재하나 초기 수렴이 빠른 이점을 지니고 있다.

본 논문에서는 기존 MOE 다중사용자 검출기의 초기 수렴 문제 그리고 더 나은 성능을 가진 블라인드 다중 사용자 검출기를 위해서 최소 평균 제곱, 최소 평균 사제곱의 비용함수를 혼합한 형태의 비용함수를 적용한 적응 블라인드 다중사용자 검출기를 제안한다. 제안된 검출기는 기존 MOE 구조를 사용하면서, 4차 비용함수를 사용하는 MOE 구조를 혼합한 블라인드 구조를 채택하였다. 또한 검출기의 성능을 개선하기 위해서 블라인드 다중사용자 검출기를 사용하였다.

다음 II장에서 다중사용자 접속으로 인하여 발생하는 문제점등을 기술하고, III장에서는 블라인드 MOE 다중사용자 검출기에 대하여 살펴보고자 한다. IV장에서는 혼합형 비용함수를 사용하는 블라인드 다중사용자 기법에 대하여 설명하였다. V장에서 모의실험을 통해 제안된 검출기의 성능을 평가하였고, VI장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

CDMA 시스템에서 발생하는 문제점을 살펴보기 위해서 다음과 같은 K 명의 사용자가 존재하는 동기 시스템을 사용하고자 한다. 각 사용자로부터 수신된 신호는 $r(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

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

여기서 $s_k(t)$ 는 k 번째 사용자의 확산 파형이다. 확산 파형은 다음과 같은 특성을 지닌다.

$$\|s_k\|^2 = \int_0^T s_k^2(t) dt = 1 \quad (2)$$

A_k 는 k 번째 사용자의 진폭이고 $b_k \in \{-1, +1\}$ 는 k 번째 사용자의 정보 비트이다. 마지막으로 $n(t)$ 는 부가 백색 가우시안 잡음이다. 수신된 신호로부터 k 번째 정합 필터의 입력이며 그 출력을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_k &= \int_0^T r(t) s_k(t) dt \\ &= \int_0^T [\sum_{j=1}^K A_j b_j s_j(t) + n(t)] s_k(t) dt \\ &= \sum_{j=1}^K A_j b_j \int_0^T s_j(t) s_k(t) dt + \int_0^T n(t) s_k(t) dt \\ &= A_k b_k \int_0^T s_k(t) s_k(t) dt + \sum_{j=1, j \neq k}^K A_j b_j \int_0^T s_j(t) s_k(t) dt \\ &\quad + \int_0^T n(t) s_k(t) dt \\ &= A_k b_k + \sum_{j=1, j \neq k}^K A_j b_j \rho_{jk} + n_k \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\rho_{jk} = \int_0^T s_j(t) s_k(t) dt$ 는 k 번째 사용자와 j 번째 사용자의 확산 코드의 상호 상관 값이다. 그리고 $n_k = \int_0^T n(t) s_k(t) dt$ 는 잡음 성분이다. 식 (3)의 출력에서 첫 번째 성분은 신호 성분이고, 두 번째 성분의 시스템의 성능을 저하시키는 MAI (multiple access interference) 성분이다. 마지막은 잡음 성분이다. 검출기의 출력 신호는 k 번째 사용자의 정보 비트를 결정하기 위해서 판단 블록으로 들어가게 된다. 즉 다음과 같다.

$$\hat{b}_k = \text{sgn}(y_k) \quad (4)$$

여기서 sgn 은 signum 함수이다. 식 (3)에서 각 사용자들의 확산 코드들 간의 직교성을 유지한다고 가정하면, 상호 상관 값은 0을 가지며 검출하고자 신호 성분과 잡음 성분으로 구성된다. 신호 대 잡음비가 큰 경우에는 식 (4)와 같은 판단 블록을 지나게 되면 검출하고자 하는 사용자의 정보 비트 검출이 가능하다. 그러나 실제 시스템의 경우에는 간섭 성분의 증가로 인하여 시스템의 성능이 급격히 저하 된다. 정합 필터 군의 출력은 모든 사용자에 대한 정확한 타이밍 정보, 확산 파형, 수신 신호 크기 등을 알아야 한다. 또한 선형 검출기군 중 하나인 역 상관 검출기도 올바르게 동작하기 위해서는 사용자의 타이밍 정보, 확산 파형을 반드시 알아야 한다. 또한 모든 사용자들의 확산 코드의 역상관 행렬이 계산되어야 한다. 이에 비하여 선형 MMSE (minimum mean squared error) 다중사용자 검출기는 검출하고자 하는 사용자에 대한 정보를 필요로 한다. 또한 적응적으로 구현하기 위해서는 훈련열(training

sequences)이 반드시 필요하다. 이런 문제점을 극복하기 위해서 이미 블라인드 다중사용자 검출기가 제안되었다^[1]. 블라인드 다중사용자 검출기는 훈련열을 사용하지 않으며, 검출하고자 하는 사용자의 확산 수열만을 가지고 검출하는 방식이다. 본 논문에서는 블라인드 다중사용자 검출기에 대한 방식으로 한정하고 다음 절에서 기존 블라인드 검출 방식을 살펴보고자 한다.

III. 블라인드 MOE 다중사용자 검출 기법

최소 출력 에너지에 근거한 블라인드 다중사용자 검출 기법은 1995년 Madhow, Honig, 그리고 Verdu가 제안하였다[5]. 이 방식은 최소 출력 에너지를 이용하여 간섭 성분을 추정하여 수신된 신호의 정합필터 출력으로부터 간섭 성분을 제거함으로써 검출하고자 하는 신호의 검출 확률을 높이는 구조로 되어 있다. 우선 선형 다중사용자 검출기에 대하여 살펴보고자 한다.

블라인드 적응 MMSE 검출기는 정합 필터군의 출력 단 이후에 추가되는 구조로 이루어져 있다. 우선 첫 번째 사용자에 대한 선형 다중사용자 검출기는 새로운 확산 수열 c_1 에 의해서 수신기를 구성할 수 있다. c_1 은 두 성분으로 이루어지며, 즉, 하나는 첫 번째 사용자의 확산 수열 s_1 이고 다른 성분은 x_1 으로 구성된다고 가정한다. x_1 은 다음과 같은 관계를 지닌다.

$$c_1 = s_1 + x_1 \quad (5)$$

여기서 $c_1, s_1, x_1 \in N$ 이며, N 은 심벌 당 칩의 수이다. 그리고 두 성분은 직교한다.

$$\langle s_1, x_1 \rangle = 0 \quad (6)$$

위의 두 식의 가정에 의해서 임의의 x_1 은 다중 접속 간섭과 c_1 사이의 관계를 최소화하는 방향으로 값을 결정한다. 따라서 항상 첫 번째 사용자의 신호 성분만 남게 된다.

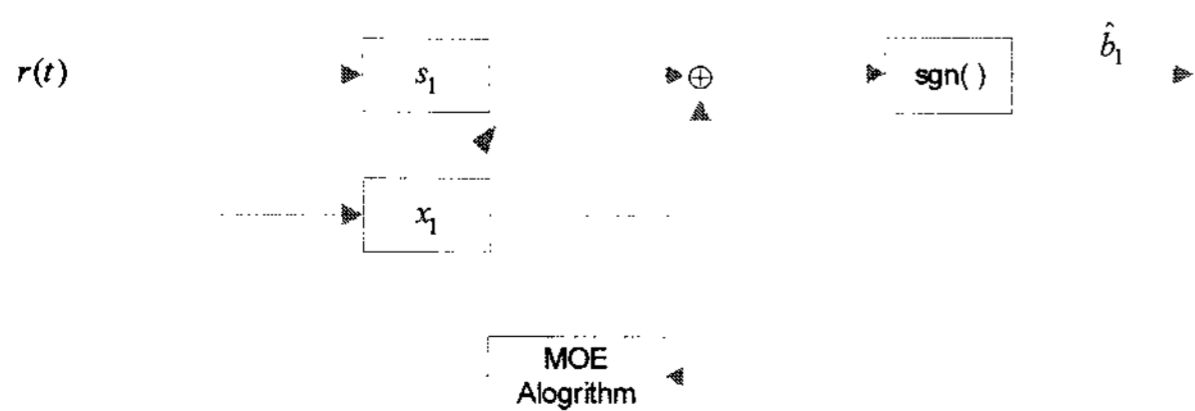


그림 1. 블라인드 MOE 다중 사용자 검출기
Fig. 1. Blind MOE Multiuser Detector.

$$\langle s_1, c_1 \rangle = |s_1|^2 = 1 \quad (7)$$

선형 검출기는 정합 필터의 출력 성분의 부호에 의해서 첫 번째 사용자의 정보신호 판별이 가능하다.

$$\hat{b}_1 = \text{sgn}(\langle r, c_1 \rangle) \quad (8)$$

위의 식에서 c_1 의 구성 성분을 서로 직교하게 만들기 위해서 MOE 알고리즘을 사용하였다. 블라인드 적응 MMSE 검출기는 MOE를 최소로 하는 것에 의해서 동작한다. 첫 번째 사용자에 대한 선형 다중사용자 검출기의 MOE는 다음과 같다.

$$J_{MOE} = E[(\langle r, c_1 \rangle)^2] \quad (9)$$

식 (9)의 출력 에너지는 첫 번째 사용자의 에너지와 잡음과 간섭 성분에 의한 에너지로 구성되어 있다. 임의의 x_1 과 s_1 을 직교하게 만들면, 간섭 성분을 최소화할 수 있다.

$$J_{MOE}(x_1) = E[(\langle r, s_1 + x_1 \rangle)^2] \quad (10)$$

MOE 알고리즘은 MSE 알고리즘과 다음과 같은 관계를 지닌다.

$$J_{MSE}(x_1) = J_{MOE}(x_1) - A_1^2 \quad (11)$$

이 관계를 통하여 MSE 알고리즘은 MOE에 의해서 구현이 가능하다. 따라서 MOE 함수를 이용하여 적응 MMSE 검출기 구현이 가능하다. 위 식 (10)의 MOE 비용 함수에 의해서 통계적 경사 강하 알고리즘 (stochastic gradient descent, SGD)을 이용하여 x_1 성분의 갱신이 가능하다[9].

$$x_1[i] = x_1[i-1] - \frac{\mu}{2} \frac{\partial \hat{J}_{MOE}(x_1)}{\partial x_1} \quad (12)$$

여기서 μ 는 스텝 사이즈이며 상수 값을 지닌다. 식 (12)에서 경사도를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{J}_{MOE}(x_1)}{\partial x_1} = 2 \langle r[i], s_1 + x_1[i-1] \rangle r[i] \quad (13)$$

식 (13)에서 $2 \langle r[i], s_1 + x_1[i-1] \rangle$ 항은 상수이며, SGD 알고리즘에 의해서 s_1 과 x_1 은 직교를 유지함으로써, $r[i]$ 는 s_1 에 직교한 성분만 관여를 한다. 즉, 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$r_{\text{orthogonal}}[i] = r[i] - \langle r[i], s_1 \rangle s_1 \quad (14)$$

위의 식 (13)에 식 (14)를 대치하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{J}_{MOE}(x_1)}{\partial x_1} &= 2 \langle r[i], s_1 + x_1[i-1] \rangle r_{orthogonal}[i] \\ &= 2 \langle r[i], s_1 + x_1[i-1] \rangle r[i] - \langle r[i], s_1 \rangle s_1 \end{aligned} \quad (15)$$

따라서 식 (15)를 식 (12)에 대입하여, SGD 알고리즘을 완성할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1[i] &= x_1[i-1] - \\ &= 2\mu \langle r[i], s_1 + x_1[i-1] \rangle (r[i] - \langle r[i], s_1 \rangle s_1) \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)에 의해서 간섭 성분을 추정하여 올바르게 검출하고자 하는 사용자의 정보 신호가 가능하다. 식 (16)에서 $\langle r[i], s_1 + x_1[i-1] \rangle$ 는 전체 출력 신호 Z_I 이고 $\langle r[i], s_1 \rangle$ 을 정합필터의 출력 신호 Z_{MF_1} 이면, 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$x_1[i] = x_1[i-1] - 2\mu Z_I (r[i] - Z_{MF_1} s_1) \quad (17)$$

IV. 제안된 블라인드 다중 사용자 검출

위에서 설명한 MOE 알고리즘은 LMS에 바탕을 두고 있다. LMS 알고리즘은 구조가 간단하여 구현이 쉽다. 반면, 입력 신호의 상태가 갑자기 변화를 하면 정상 상태에 이르는 초기 수렴 속도가 길기 때문에, 이를 효과적으로 대처하지 못한다. 본 논문에서는 초기 수렴 속도가 빠른 LMF 알고리즘과 구조적으로 안정된 성능을 보이는 LMS 알고리즘을 사용하고자 하며, 이를 구조적으로 결합한 LMSF-MOE 다중사용자 검출기를 제안하였다. 제안된 알고리즘을 다음과 같은 비용함수를 사용한다.

$$\begin{aligned} J_{LMSF-MOE} &= (1-\lambda)J_{MOE} + \lambda J_{MOE}^2 \\ &= (1-\lambda)E[\langle r, c_1 \rangle^2] + \lambda E[\langle r, c_1 \rangle^4] \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 λ 는 0과 1 사이의 값을 가진다. $\lambda=1$ 이면 LMF에 근거한 MOE 다중사용자 검출기로 동작을 하고 $\lambda=0$ 이면 기존의 LMS MOE 다중사용자 검출기로 동작한다. 식 (17)에서 x_1 에 관한 식으로 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} J_{LMSF-MOE}(x_1) &= \frac{(1-\lambda)}{2} E[\langle r, c_1 \rangle^2] \\ &+ \frac{\lambda}{4} E[\langle r, c_1 \rangle^4] \end{aligned} \quad (19)$$

앞장에서 설명하였듯이, 비용함수를 사용하여 x_1 을

갱신하기 위해서 다음과 같은 통계적 경사 강하 방법을 사용하였다.

$$x_1[i] = x_1[i-1] - \mu \frac{\partial \hat{J}_{LMSF-MOE}(x_1)}{\partial x_1} \quad (20)$$

식 (20)에서 x_1 에 대한 경사도에 대한 순시치 값을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{J}_{LMSF-MOE}(x_1)}{\partial x_1} &= (1-\lambda) \langle r[i], s_1 + x_1[i-1] \rangle r_{orthogonal}[i] \\ &+ \lambda \langle r[i], s_1 + x_1[i-1] \rangle^3 r_{orthogonal}[i] \\ &= (1-\lambda) \langle r[i], s_1 + x_1[i-1] \rangle (r[i] - \langle r[i], s_1 \rangle s_1) \\ &+ \lambda \langle r[i], s_1 + x_1[i-1] \rangle^3 (r[i] - \langle r[i], s_1 \rangle s_1) \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)에 Z_I 과 Z_{MF_1} 을 대입하여 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{J}_{LMSF-MOE}(x_1)}{\partial x_1} &= (1-\lambda) Z_I (r[i] - Z_{MF_1} s_1) \\ &+ \lambda Z_I^3 (r[i] - Z_{MF_1} s_1) \\ &= ((1-\lambda) + \lambda Z_I^2) Z_I (r[i] - Z_{MF_1} s_1) \end{aligned} \quad (22)$$

식 (22)를 SGD 식에 대입하면 다음과 같다.

$$x_1[i] = x_1[i-1] - \mu ((1-\lambda) + \lambda Z_I^2) Z_I (r[i] - Z_{MF_1} s_1) \quad (23)$$

식 (23)은 적응 필터 부분의 계수 갱신 식을 나타낸다.

V. 모의실험 및 결과

DS-CDMA에서 블라인드 적응 다중사용자 검출기의 성능을 판별하기 위해서 다음과 같은 실험 조건에서 행하였다. 각 사용자의 데이터를 확산하기 위해서 랜덤 의사 확산 수열을 사용하였다. PN의 길이는 127를 사용하였다. 모든 사용자의 전력은 동일하고, 동기 시스템이고, 가우시안 채널 하에서 모의실험을 하였다. 모의실험을 위한 데이터의 수는 10000개이다. 이런 조건하에서 SNR을 0dB부터 30dB까지 변화하면서 BER을 측정한다. 제안된 검출기의 λ 는 0.5이며, MOE 기법과 제안된 방식의 μ 값은 0.0003이다. 이때 다중사용자가 20명 존재하는 경우, 검출기의 BER 특성을 비교하였다. 즉, 간섭 성분이 증가하였을 경우, 기존 검출기인 정합필터의 성능이 급속히 저하되고, MOE 블라인드 다중사용자 검출기도 다중사용자 간섭성분에 많은 영향을 받는다. 제안된 블라인드 검출기는 기존의 블라인드 검출기에 비하여, BER 기준을 10^{-3} 으로 하였을 경우, 약 3dB 정도 SNR 이득을 얻을 수 있다.

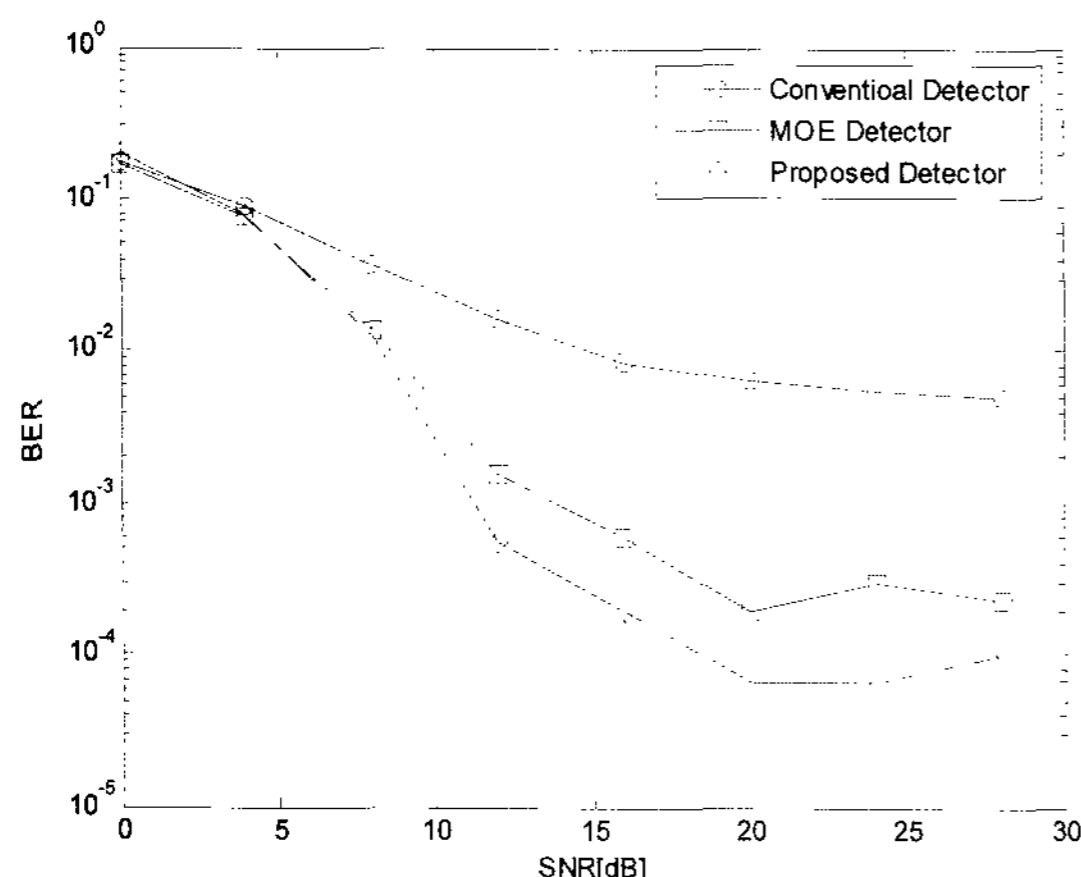


그림 2. 블라인드 다중 사용자의 BER 특성(K=20)
Fig. 2. BER characteristic of blind multiuser detector (K=20).

VI. 결 론

본 논문에서는 다중사용자 간섭을 단지 사용자의 확산 코드 정보만을 가지고 효과적으로 제거할 수 있는 블라인드 다중사용자 검출기에 대하여 살펴보았고, 동일한 조건에서 더 나은 성능을 지니는 블라인드 검출기를 제안하였다. 제안된 검출기는 기존 MOE 구조를 사용하면서, 4차 비유함수를 사용하는 MOE 구조를 혼합한 블라인드 구조를 채택하였다. 정합 필터를 사용하는 기존 검출기는 다중 사용자가 증가하면 할수록 성능이 급격히 저하된다. 성능을 개선하기 위해서 블라인드 다중사용자 검출기를 사용하였다. 모의실험 결과를 살펴보면 사용자가 20 명 존재하는 경우, 제안된 블라인드 검출기가 블라인드 MOE 검출기에 비해 약 3dB 신호 대 잡음비의 이득을 얻을 수 있다. 따라서 제안된 검출기가 더 나은 성능을 지니는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] H. V. Poor, S. Verdu, "Single-user detectors for multiuser channels," *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 36, no. 1, pp. 50-60, January 1988.
- [2] R. Lupas, S. Verdu, "Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple-access channels," *IEEE Trans. Info. Theory*, Vol. 35, no. 1, pp. 123-136, Jan. 1989.
- [3] R. Lupas, S. Verdu, "Near-far resistance of multiuser detectors in asynchronous channels," *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 38, no. 4, pp. 496-508, April 1990.

- [4] Duel-Hallen, J. Holtzman, Z. Zvonar, "Multiuser detection for CDMA Systems," *IEEE Personal Comm.*, pp. 46-58, April 1995.
- [5] M. Honig, U. Madhow, S. Verdu, "Blind adaptive multiuser detection," *IEEE Trans. Info. Theory*, Vol. 41, no. 4, pp. 944-960, July 1995.
- [6] H. V. Poor, S. Verdu, "Probability of error in MMSE multiuser detection," *IEEE Trans. Info. Theory*, Vol. 43, no. 3, pp. 858-871, May 1997.
- [7] S. Verdu, *Multiuser Detection*, Cambridge University Press, 1998.
- [8] L. Fanucci, E. Letta, R. de Daudenzi, F. Giannetti, M. Luise, "VLSI implementation of a CDMA blind adaptive interference-mitigating detector," *IEEE J. Selected Areas in Comm.*, Vol. 19, pp.179-190, 2001.
- [9] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice-Hall, 2001.

저 자 소 개

박 성 욱(정회원)

대한전자공학회 논문지 제43권 1E편 제1호 참조

박 종 욱(정회원)

대한전자공학회 논문지 제41권 SP편 제6호 참조