

論文96-33A-5-1

동기화된 부호 분할 다원 접속 채널을 위한 ML 최적 다중 사용자 검출기의 간단한 계산 알고리즘

(A Simple Computational Algorithm of ML Optimum Multiuser Detector for Synchronous Code Division Multiple Access Channels)

權 亨 昱 *, 崔 太 永 **, 吳 成 根 **

(Hyung Uk Kwon, Tae Young Choi, and Seong Keun Oh)

요 약

본 논문에서는 동기화된 CDMA 채널에서 가장 우수한 검출 성능을 가지는 ML 최적 다중 사용자 검출기의 연산량을 크게 줄일 수 있는 효율적인 연산 알고리즘을 제안하였다. 제안된 검출기에서는 ML 추정치를 검출하기 위하여 교호 최대화 방식에 의한 순차적 추정 알고리즘을 이용하고 있으며, 이 순차적 알고리즘을 위한 초기치로는 기존의 단일 사용자 검출기 및 선형 역상관 다중 사용자 검출기, 역상관 판정 제환 다중 사용자 검출기 등으로부터 얻은 추정치들을 사용한다. 초기화 방식과 사용자 수에 따른 제안된 알고리즘의 수렴 성능과 검출 성능을 분석하며, ML 최적 다중 사용자 검출기와의 연산량을 비교하기 위하여 컴퓨터 모의 실험을 수행하였다. 그 결과 제안된 교호 최대화 알고리즘은 아주 적은 반복 횟수에서 ML 최적 다중 사용자 검출기와 거의 동일한 검출 성능을 유지할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, we propose an efficient computational algorithm that can reduce significantly the computational complexity of the ML optimum multiuser detector known as the most excellent detector in synchronous code division multiple access channels. The proposed detector uses the sequential detection algorithm based on the alternating maximization approach to obtain the ML estimates. As initial estimates for this sequential algorithm, we can use the estimated values obtained by the conventional single-user detector, the linear decorrelating multiuser detector, or the decorrelating decision-feedback multiuser detector. We have performed computer simulations in order to see the convergence behaviors and the detection performance of the proposed algorithm in terms of initial algorithms and the number of users, and then to compare the computational complexity with that of the ML optimum multiuser detector. From the results, we have seen that the proposed alternating maximization detector has nearly equal detection performance with that of the ML optimum multiuser detector in only a few iteration.

* 正會員, LG 情報通信(株)

(LG Information and Communications, Ltd.)

** 正會員, 亞洲大學校 電氣電子工學部

(Division of Electrical and Electronics Engineering, Ajou Univ.)

接受日字: 1995年8月9日, 수정완료일: 1996年4月24日

I. 서 론

부호 분할 다원 접속 (CDMA : Code Division Multiple Access) 방식에서 지지국의 수신기용으로 사용되는 가장 대표적인 검출기로는 단일 사용자 검출기(Single-User Detector)¹⁾가 있다. 이 검출기에서는 각 사용자의 고유신호(Signature Signal)에 해당하

는 독립된 정합 여파기의 출력을 단지 판정 소자만을 사용하여 정보 신호를 검출해 낸다. 이 검출기는 시스템이 간단하며 사용자의 고유신호들 간의 상호상관성이 작아질수록 그 성능이 우수하다. 그러나, 채널 내에 사용자 수가 증가하고 고유신호들 간의 상호 상관성이 큰 경우에는 그 성능이 급격히 떨어진다^{[2]~[6]}. ML (Maximum Likelihood) 최적 다중 사용자 검출기^[5,6]는 이러한 단일 사용자 검출기의 문제점을 해결할 수 있는 우수한 성능을 가지나, 정보 신호를 검출하는데 필요한 연산량이 아주 많아 사용자 수가 증가할 경우 이 방식을 사용하는 것은 거의 불가능하다^[7]. 이러한 단일 사용자 검출기와 ML 최적 다중 사용자 검출기의 문제점을 보완하기 위하여 여러 종류의 준 최적 다중 사용자 검출기들이 제안되었으며, 대표적인 방식으로는 선형 역상관 검출기 (Linear Decorrelating Detector)^[7], 최적 선형 다중 사용자 검출기 (Optimum Linear Multiuser Detector)^[7], 다단 검출기 (Multistage Detector)^[3,4], 역상관 판정 궤환 검출기 (Decorrelating Decision-Feedback Detector)^[8] 등이 있다. 이들 준 최적 다중 사용자 검출기들은 ML 최적 사용자 검출기에 비하여 시스템의 구성이나 계산이 간단하며 단일 사용자 검출기에 비하여 우수한 성능을 가지고 있다고 알려져 있다^[3,4,7,8]. 그러나, 이러한 검출기들의 성능은 ML 최적 검출기의 성능에는 크게 미치지 못한다. 특히, 대역폭 효율이 높아 사용자의 고유 신호들간의 상관성이 크거나 사용자 수가 많아질 경우 성능의 격차는 더욱 커진다.

본 논문에서는 가장 우수한 검출 성능을 가지는 것으로 알려진 ML 최적 다중 사용자 검출기의 계산량을 크게 줄일 수 있는 효율적인 계산 알고리즘을 제안하고 그 성능을 분석한다. 제안된 알고리즘에서는 ML 추정치를 구하는데 필요한 다차원 검색과정을 순차적인 일차원 검색과정으로 변환시키기 위하여, 효율적인 순차적 ML 추정 알고리즘인 교호 최대화 (AM : Alternating Maximization) 알고리즘^[9,10]을 사용하며, 이 순차적인 알고리즘의 초기치로는 단일 사용자 검출기 및 선형 역상관 다중 사용자 검출기, 역상관 판정 궤환 다중 사용자 검출기 등으로부터 구한 추정치를 사용한다. 마지막으로 초기화 알고리즘과 사용자 수에 따른 제안된 검출기의 수렴 성능과 검출 성능을 평가하며, ML 최적 다중 사용자 검출기와의 연산량을 비교하기 위하여 컴퓨터 모의실험을 수행한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제II절에서는 교호 최대화 알고리즘을 사용한 ML 다중 사용자 검출기를 설명하고, 제III절에서는 제안된 교호 최대화 검출기와 ML 검출기의 계산량을 분석하고 비교하며, 제IV절에서는 교호 최대화 알고리즘을 이용한 다중 사용자 검출기의 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통하여 분석하였고, 마지막 제V절에서는 결론을 내렸다.

II. 교호 최대화 알고리즘을 이용한 ML 다중 사용자 검출기

1. 교호 최대화 추정 알고리즘의 수학적 모델

교호 최대화 추정 기법^[9]은 다차원 탐색 과정을 순차적인 일차원 탐색 과정으로 변환시키는 간단한 계산 알고리즘이다. 교호 최대화 추정 알고리즘과 ML 추정 알고리즘의 큰 차이점은 ML 추정 알고리즘이 log-likelihood 함수를 최대화시키는 모든 변수를 다차원 탐색 과정을 통하여 추정해 내는 반면에, 교호 최대화 추정 알고리즘은 log-likelihood 함수를 순차적인 일차원 최대화 과정을 반복하여 모든 변수를 추정해 낸다는 것이다.

이러한 교호 최대화 추정 알고리즘은 다음과 같다. Log-likelihood 함수에서 추정해야 할 변수의 갯수가 K 일 때, 첫 번째 변수를 추정할 때에는 그 첫 번째 변수를 뺀 나머지 $K-1$ 개의 변수를 초기치로 고정시킨 후 log-likelihood 함수를 최대화시키는 값을 첫 번째 변수의 추정치로 한다. 그리고 두 번째 변수를 추정할 때에는 바로 전에 추정한 첫 번째 변수를 그 추정치로 고정시키고 나머지 $K-2$ 개의 변수는 전과 마찬가지로 초기치로 고정시킨 후 log-likelihood 함수를 최대화시키는 값을 두 번째 변수의 추정치로 한다. 이러한 과정을 순차적으로 계속 반복함으로써 ML 추정치로 수렴하게 된다.

그래서 $(i+1)$ 번째 반복에서의 k 번째 변수 $\hat{b}_{s_k}^{AM(i+1)}$ 를 추정하기 위한 일반적인 교호 최대화 알고리즘은 다음과 같다.

$$\hat{b}_{s_k}^{AM(i+1)} = \arg \left\{ \begin{array}{l} \max [L(b, r(t))] \\ b_s \\ b_l = \hat{b}_l^{AM(i-1)}, \quad l < k \\ b_l = \hat{b}_l^{AM(i)}, \quad l > k \end{array} \right\} \quad (1)$$

이 식에서 $L(\cdot)$ 은 log-likelihood 함수를 나타내며, 벡터 b 는 K 가입자들의 정보 신호를 나타내는 $K \times I$

벡터의 모든 가능한 집합을 나타내며, $r(t)$ 는 K 가입자들에 의한 정보 신호를 나타내는 벡터 b_s 의 함수로 주어지는 수신 신호이다.

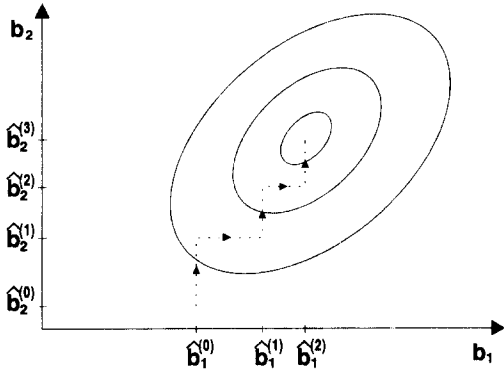


그림 1. 2 차원 함수의 최대화에 있어서 교호 최대화 알고리즘의 연속적인 반복 시행
 Fig. 1. Successive iterations of the AM algorithm in the maximization of a 2-dimensional function.

그림 1은 교호 최대화 추정 알고리즘의 수렴 과정을 보여 주는데, 일차원에서 log-likelihood 함수를 최대화하는 각 과정마다 최대화시키는 변수의 축으로만 평행하게 수렴해감을 볼 수 있다. 이러한 교호 최대화 추정 알고리즘의 수렴 과정은 $\hat{b}_{s,k}^{AM(i+1)}$ 와 $\hat{b}_{s,k}^{AM(i)}$ 가 같을 때까지 순차적인 반복을 계속한다. 그러나, 이러한 순차적인 추정 알고리즘에서 초기치들의 선정은 수렴 속도와 ML 추정치로의 수렴에 결정적인 영향을 미치므로 초기치의 선정은 매우 중요하다.

2. 다중 사용자 검출 방식에의 적용

CDMA 채널에서 다중 사용자 검출기는 채널 내에 존재하는 여러 사용자들에게 할당된 고유 신호를 이용하여 각 사용자가 보낸 정보 신호를 검출하는 시스템이다. 사용자 수가 K 인 경우 두 개의 위상을 가지도록 변조된 정보신호 $b_{s,k}(j)$ 의 집합을 $\{b_{s,k}(j) | b_{s,k}(j) \in \{-1, 1\}, k = 1, 2, \dots, K\}$ 라 할 때, 백색 가우시안 잡음이 부과되는 동기화된 CDMA 채널을 통하여 다중 사용자 검출기로 수신된 신호 $r(t)$ 는 다음과 같이 주어진다¹⁵⁾.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{w_k} b_{s,k}(j) s_k(t-jT) + n(t), \quad t \in [jT, jT+T] \quad (2)$$

여기서, w_k 는 k 번째 사용자의 에너지이고, $b_{s,k}(j)$ 는

k 번째 사용자의 j 번째 정보 비트로서 집합 $\{b_{s,k}(j)\}$ 중의 k 번째 비트를 나타낸다. $s_k(t)$ 는 집합 $\{s_k(t) | s_k(t), t \in [0, T], k = 1, 2, \dots, K\}$ 중 k 번째 사용자의 고유 신호를 나타내며, $n(t)$ 는 백색 가우시안 잡음으로 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규 분포를 갖는다. 또한, 정보 비트인 $b_{s,k}(j)$ 가 특정 비트 j 에서 -1 과 +1을 가질 확률은 동일하다고 가정하며, 앞으로의 수식에서는 $j = 0$ 이라고 가정한다.

이 때, 그림 2에서 k 번째 정합 여파기를 통과한 신호를 y_k 라 하면

$$y_k = \int_0^T r(t) s_k(t) dt = \sqrt{w_k} b_{s,k} + \sum_{i \neq k}^K \sqrt{w_i} R_{k,i} b_{s,i} + \eta_k, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

이다. K 사용자에 대하여 나타내면, 식 (3)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y = RWb_s + N \quad (4)$$

여기서 $y = (y_1, y_2, \dots, y_K)^T$ 는 정합여파기 출력신호의 $K \times 1$ 벡터이고, $b_s = (b_{s,1}, b_{s,2}, \dots, b_{s,K})^T$ 는 K 가입자의 정보신호를 나타내는 $K \times 1$ 벡터이며, 윗 첨자 T 는 전치 연산자를 나타낸다. $K \times 1$ 벡터 N 은 평균이 0이고 공분산 행렬이 $\sigma^2 R$ 인 정합여파기 출력에서의 잡음벡터이다. $K \times K$ 행렬 R 은 각 사용자에게 할당된 고유 신호들 간의 정규화된 상호 상관 행렬이며, 그 행렬의 (i,j) 번째 요소는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{i,j} = \int_0^T s_i(t) s_j(t) dt \quad (5)$$

윗 식에서 $R_{i,i} = 1$ 이다. 또한, $K \times K$ 행렬 W 는 대각 행렬이며 i 번째 대각 성분은 $\sqrt{w_i}$ 이다.

이 때, ML 최적 다중 사용자 검출기는 수신된 신호 $r(t)$ 에 대하여 log-likelihood 함수를 최대로 하는 K 사용자들의 정보 신호 $\hat{b}_s^* = (\hat{b}_{s,1}^*, \hat{b}_{s,2}^*, \dots, \hat{b}_{s,K}^*)^T$ 를 다차원 검색과정을 통하여 동시에 검출한다. 즉, 잡음 전력이 가장 작은 정보신호 \hat{b}_s^* 를 검출하는 것과 동일하다¹⁰⁾. 이러한 ML 검출기의 검출 알고리즘¹⁵⁾은 다음과 같다.

$$\hat{b}_s^* = \arg \left\{ \min_{b \in \{-1, -1\}^K} \int_0^T [r(t) - \sum_{k=0}^K b_k s_k(t)]^2 dt \right\} = \arg \left\{ \max_{b \in \{-1, +1\}^K} [2y^T Wb - b^T W R W b] \right\} \quad (6)$$

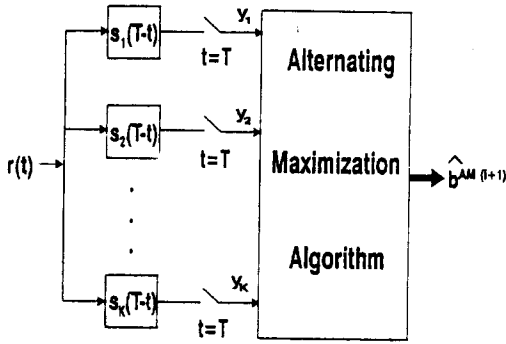


그림 2. 교호 최대화 알고리즘을 이용한 ML 다중 사용자 검출기
 Fig. 2. ML multiuser detector using the AM algorithm.

그림 2는 다중 사용자 검출을 위한 교호 최대화 알고리즘을 이용한 ML 다중 사용자 검출기를 나타낸 것으로, 식 (4)에서 주어진 정합 여파기의 출력 벡터 y 가 교호 최대화 알고리즘의 입력으로 사용되어, 각 사용자의 정보 비트가 검출된다. $(i+1)$ 번째 반복에서의 k 번째 사용자의 정보 비트 $\hat{b}_{s,k}^{AM(i+1)}$ 를 검출해 내기 위한 교호 최대화 알고리즘^[11]은 다음과 같다.

$$\hat{b}_{s,k}^{AM(i+1)} = \arg \left\{ \begin{array}{l} \max [2y^T Wb - b^T WRWb] \\ b_i \in \{-1, 1\} \\ b_i = \hat{b}_{s,k}^{AM(i-1)}, \quad 1 \leq i < k \\ b_i = \hat{b}_{s,k}^{AM(i)}, \quad i > k \end{array} \right\} \quad (7)$$

ML 최적 다중 사용자 검출기에서는, 식 (6)에서와 같이 K 개의 모든 가능한 신호들의 조합에 의한 log-likelihood 함수값들을 계산하여, 최대값에 해당하는 K 개의 사용자 정보비트를 검출한다. 그러나, 교호 최대화 알고리즘을 사용한 다중 사용자 검출기는, 식 (7)에서와 같이, 검출하고자 하는 사용자의 정보 비트를 뺀 나머지 $K-1$ 개의 사용자 정보 비트에 대해선 이전까지 검출된 추정치로 고정시키고, log likelihood 함수가 일차원에서 최대값을 가지는 정보 비트값을 검출하게 된다. 결국 이러한 방법을 순차적으로 반복하여 바로 전 반복에서 검출된 $\hat{b}_{s,k}^{AM(i)}$ 와 $\hat{b}_{s,k}^{AM(i+1)}$ 가 같을 때까지 순차적으로 반복하면 다차원 ML 추정 알고리즘을 사용한 ML 최적 다중 사용자 검출기의 성능으로 수렴하게 된다.

본 논문에서 초기화 알고리즘으로는 다음의 세 가지 방법이 사용되었다. 즉, 기존의 단일 사용자 검출기^[11]

방식과 선형 역상관 검출기 방식^[7], 역상관 검출 계환 검출기 방식^[8]의 알고리즘을 사용하였다.

III. 교호 최대화 알고리즘과 ML 알고리즘의 계산량

이 절에서는 ML 최적 다중 사용자 검출기와 제II절에서 제안된 교호 최대화 알고리즘을 사용한 다중 사용자 검출기의 계산량을 비교한다.

이 절에서 비교할 연산량은 곱셈의 개수로 나타내었으며 판정 소자의 연산이나 선형 역상관 검출기에서 상호 상관 행렬 R 의 역행렬을 구하는 데 필요한 연산량과 상관성 제거 판단-계환 검출기에서 상관 행렬을 분해하는 데 드는 연산량은 고려하지 않는다. 이와 같은 가정은 상호 상관 행렬 R 의 역행렬이나 그 행렬을 Cholesky 분해 알고리즘을 사용하여 구한 행렬 F 는 각 사용자에게 고유 신호가 할당되면 각 사용자들의 모든 정보 비트를 검출하는 데 있어서 단 한번만 구하면 되므로 전체 시스템의 연산량을 크게 좌우하지 않기 때문에 가능하다.

식 (6)의 다차원 검색과정에 의한 ML 최적 다중 사용자 검출기에서는, W 가 대각행렬이라는 사실을 이용하면 $2y^T Wb$ 의 계산에 $2K+1$ 의 연산량이 필요하고, Wb 는 이미 계산되었으므로 $b^T WRWb$ 의 계산에 K^2+K 의 연산이 필요하므로, log-likelihood 함수의 계산에는 (K^2+3K+1) 번의 연산이 필요하다. 따라서, K 개의 ML 추정치 \hat{b}_s^* 를 검출해 내기 위해서는 log-likelihood 함수의 계산을 2^K 번 만큼 반복해야 하므로, 필요한 총 연산량은 $2^K \times (K^2+3K+1)$ 이다. 다음으로 본 논문에서 제안한 식 (7)의 교호 최대화 추정 알고리즘을 사용한 다중 사용자 검출기에서는, ML 최적 검출기와 마찬가지로 log-likelihood 함수의 계산에 K^2+3K+1 의 연산이 필요하고, 매 반복에서 각 사용자에 대해 두 번의 log-likelihood 함수의 값을 계산하는 것만이 필요하므로 매 반복당 연산량은 $2 \times K \times (K^2+3K+1)$ 가 되어, 수렴시까지의 반복 횟수를 I 라고 하면 AM 알고리즘을 이용하여 ML 추정치 \hat{b}_s^* 를 검출해 내기 위해서 필요한 총 연산량은 $2 \times I \times K \times (K^2+3K+1)$ 이다. 위의 결과로부터 사용자 수 K 가 증가하거나 신호의 레벨 수가 많아짐에 따라 ML 알고리즘의 계산량은 급격히 늘어난다. 하지만, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 경우 그 계산량을 크게 줄일 수 있다.

IV. 모의 실험과 고찰

이 절에서는 ML 최적 다중 사용자 검출기와 본 논문에서 제안한 교호 최대화 추정 알고리즘을 사용한 다중 사용자 검출기의 성능 비교한다. 모의 실험은 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 사용하여 비트 오류 확률을 구하였다.

1. 초기치 결정 방식에 따른 성능 분석

교호 최대화 추정 알고리즘을 사용한 다중 사용자 검출기는 제II절에서 언급한 바와 같이 초기치의 선택에 따라, ML 최적 다중 사용자 검출기의 성능에 미치지 못하는 경우도 발생할 수 있다. 또한, ML 최적 다중 사용자 검출기의 성능에 순차적으로 수렴해 가기는 하지만 많은 반복 횟수를 요구하는 경우도 존재한다.

본 논문에서는 교호 최대화 추정 알고리즘의 초기화 알고리즘으로 단일 사용자 검출기 방식과 선형 역상관 검출기 방식 및 역상관 판정-궤환 검출기 방식을 사용하였으며, 각 초기화 알고리즘에 따른 성능 비교를 통하여 가장 효율적인 초기화 알고리즘을 소개할 것이다. 세 가지 종류의 초기화 알고리즘을 사용한 교호 최대화 다중 사용자 검출기 알고리즘의 오류 확률은 그림 3 과 그림 4에 나타내었다. 앞으로는 단일 사용자 검출 방식을 초기화 알고리즘으로 사용한 경우를 AM-S로 표현할 것이며, 선형 역상관 검출 방식을 초기화 알고리즘으로 사용한 경우와 역상관 판정 궤환 검출 방식을 초기화 알고리즘으로 사용한 경우를 각각 AM-D와 AM-DF으로 표현할 것이다.

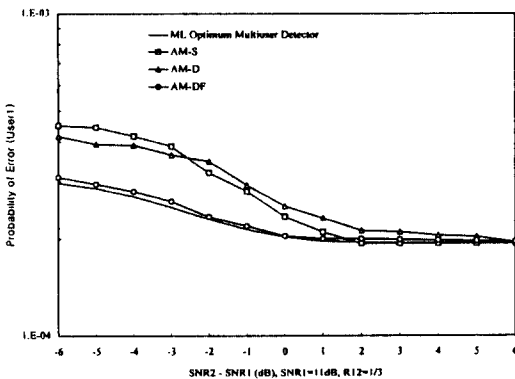


그림 3. $r=1/3$ 인 경우, 교호 최대화 알고리즘을 이용한 다중 사용자 검출기의 오류 확률
Fig. 3. Error probability of the multiuser detector using the AM algorithm with $r=1/3$.

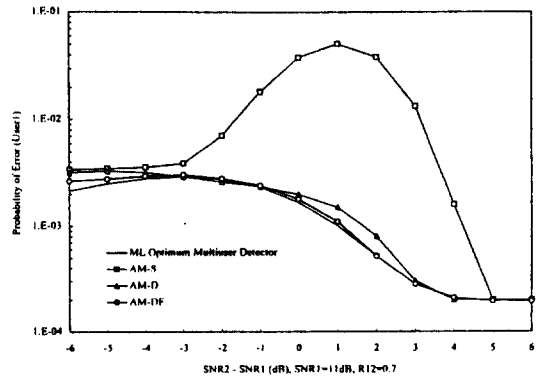


그림 4. $r=0.7$ 인 경우, 교호 최대화 알고리즘을 이용한 다중 사용자 검출기의 오류 확률
Fig. 4. Error probability of the multiuser detector using the AM algorithm with $r=0.7$.

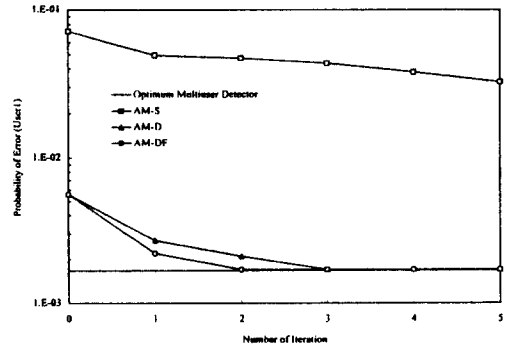


그림 5. $r=0.7$ 인 경우, 교호 최대화 알고리즘을 이용한 다중 사용자 검출기의 수렴 특성
Fig. 5. Convergence behavior of the multiuser detector using the AM algorithm with $r=0.7$.

먼저, 그림 3은 고유 신호들 간의 상호 상관성이 $1/3$ 인 경우에 대한 것이며 그 반복 횟수는 1이다. 즉, $\hat{\delta}_{s,1}^{AM(2)} = \hat{\delta}_{s,1}^{AM(1)}$ 을 만족시킨다. 그리고 그림 4는 고유 신호들간의 상호 상관성이 0.7인 경우이며, 그 반복 횟수가 AM-D는 3이고 AM-DF는 2일 때 ML 최적 다중 사용자 검출기에 의해서 검출된 추정치로 수렴하지만 AM-S는 반복 횟수가 5인 데도 아직 그 값에 수렴하지 못하였다. 그림 3과 그림 4에서 볼 수 있듯이 고유 신호들 간의 상호 상관성이 작은 경우 초기값에 관계없이 적은 반복 횟수에서 ML 최적 다중 사용자 검출기의 성능에 수렴하였지만, 상호 상관성이 클 경우

AM-S를 제외한 AM-D와 AM-DF는 적은 반복 횟수에서 ML 최적 다중 사용자 검출기의 성능에 수렴해 간다. 특히 역상관 판정 케환 검출기를 초기화 알고리즘으로 사용한 경우가 가장 수렴 속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. 그림 5는 고유 신호들 간의 상호 상관성이 0.7이고 사용자 1의 신호대 잡음비 SNR_1 과 사용자 2의 SNR_2 이 모두 11 dB인 경우에 세 가지 초기화 알고리즘을 사용한 경우 제안된 검출기의 초기화 알고리즘에 따른 오류 확률이 ML 최적 다중 사용자 검출기의 오류 확률로 순차적으로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. 이 그림에서 보면 단일 사용자 검출 방식을 초기화 알고리즘으로 사용한 경우에는 반복 횟수가 5일 때까지도 ML 최적 다중 사용자 검출기의 성능에 수렴해 가지 못하고 있음을 볼 수 있다. 반면에 선형 역상관 검출 방식과 역상관 판정 케환 검출 방식을 초기화 알고리즘으로 사용하였을 때는 몇 번의 반복 시행으로 ML 최적 다중 사용자 검출기의 오류 확률로 순차적으로 수렴해 간다. 결국 고유 신호들 간의 상호 상관성이 커짐에 따라 모든 검출기의 성능이 떨어짐을 볼 수 있으며, 특히 고유 신호들 간의 상관성을 고려치 않은 단일 사용자 검출기가 가장 많은 영향을 받는다.

따라서 사용자 수가 2인 경우에 교호 최대화 알고리즘을 사용한 다중 사용자 검출기 중 그 초기화 알고리즘으로 역상관 판정 케환 검출 방식을 사용하였을 경우에는 ML 추정 기법을 사용한 ML 최적 다중 사용자 검출기의 오류 확률로 가장 빠르게 수렴해 감을 알 수 있다.

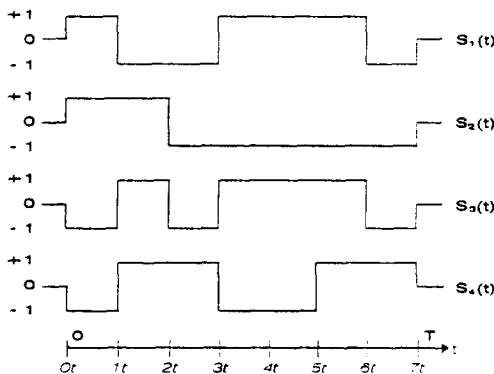


그림 6. 사용자 수가 4명일 경우, CDMA 시스템에 할당된 각각의 기저 대역 고유 신호
Fig. 6. Baseband signature signals assigned to four-user CDMA system.

2. 사용자 수에 따른 성능 분석
이 절에서는 교호 최대화 추정 알고리즘을 사용한 다중 사용자 검출기의 성능이 사용자 수에 따라 어떻게 변화하는지 검토해 본다. 즉, 사용자 수에 따른 교호 최대화 추정 알고리즘을 사용한 다중 사용자 검출기의 성능을 분석한다.

그림 6은 CDMA 채널 내에 존재하는 4명의 사용자에게 할당된 고유 신호를 나타낸 것으로 코드의 길이가 7인 Gold code이다. 이 코드들 간의 상호 상관 행렬은 다음과 같다.

$$R = \frac{1}{7} \begin{pmatrix} 7 & -1 & 3 & 3 \\ -1 & 7 & -1 & 3 \\ 3 & -1 & 7 & -1 \\ 3 & 3 & -1 & 7 \end{pmatrix}$$

먼저, 그림 7은 사용자 수가 2인 경우, 즉 $s_1(t)$ 를 할당받은 사용자 1과 $s_2(t)$ 를 할당받은 사용자 2만이 동일 채널을 사용할 때, 각 초기화 알고리즘에 대한 비트 오류 확률(BER)을 나타낸 것이다. 또한, 이 그림에서 AM-DF(I)은 초기 알고리즘을 역상관 판정 케환 검출 방식을 사용하였으며 I 반복 횟수를 나타낸다. 즉, 모든 초기화 알고리즘에 대하여 반복 횟수가 1일때 모두 수렴하였다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 AM-DF는 ML 최적 다중 사용자 검출기와 동일한 성능을 나타내었지만 AM-S와 AM-D는 약간의 차이가 있음을 알 수 있다.

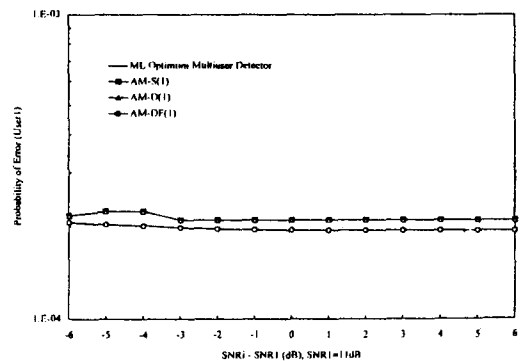
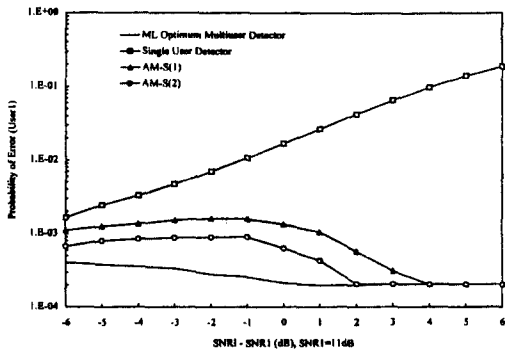
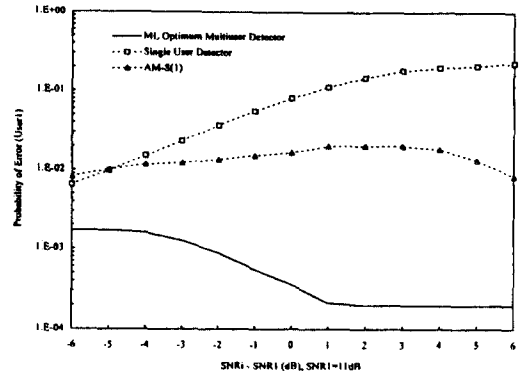


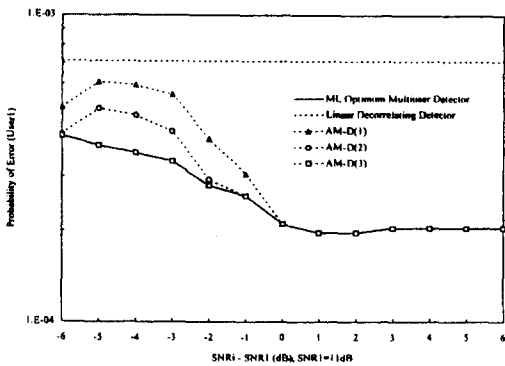
그림 7. 사용자 수가 2명인 경우, 초기화 알고리즘에 따른 교호 최대화 알고리즘을 사용한 ML 다중 사용자 검출기의 오류 확률 (사용자 1,2)
Fig. 7. Error probability of the ML multiuser detector using the AM algorithm in terms of initial algorithms in two-user case (Active users 1,2).



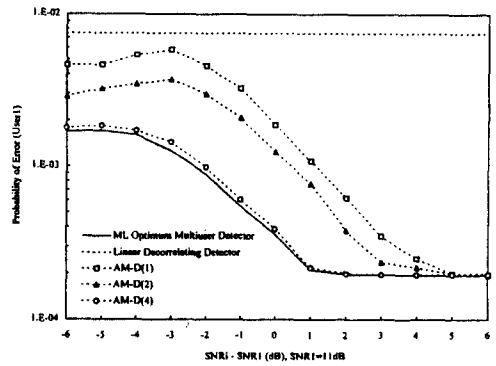
(a) 단일 사용자 검출기
(a) Single user detector.



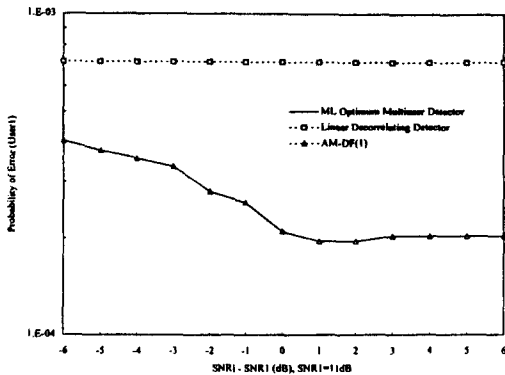
(a) 단일 사용자 검출기
(a) Single user detector.



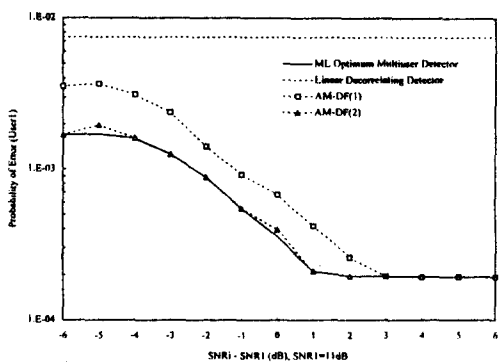
(b) 선형 상관성 제거 검출기
(b) Linear decorrelating detector.



(b) 선형 상관성 제거 검출기
(b) Linear decorrelating detector.



(c) 상관성 제거 판정-궤환 검출기
(c) Decorrelating decision-feedback detector.



(c) 상관성 제거 판정-궤환 검출기
(c) Decorrelating decision-feedback detector.

그림 8. 사용자 수가 3명인 경우, 초기화 알고리즘에 따른 교호 최대화 알고리즘을 사용한 ML 다중 사용자 검출기의 오류 확률 (사용자 1,2,3)
Fig. 8. Error probability of the ML multisuser detector using the AM algorithm in terms of initial algorithms in three-user case (Active users 1,2,3).

그림 9. 사용자 수가 네 명인 경우 초기화 알고리즘에 따른 교호 최대화 알고리즘을 사용한 ML 다중 사용자 검출기의 오류 확률 (사용자 1,2,3,4)
Fig. 9. Error probability of the ML multisuser detector using the AM algorithm in terms of initial algorithms in four-user case (Active users 1,2,3,4).

그림 8의 (a)~(c)는 채널에 존재하는 사용자가 그림 6의 사용자 1, 2, 3이 존재할 때, 각 초기화 알고리즘에 대하여 사용자 1의 BER을 나타낸 것이다. 또한, X축은 그 CDMA 채널을 공유하는 사용자 중에서 신호 전력이 가장 큰 사용자의 SNR_i 에 대한 SNR_1 의 차를 나타내는 것으로 원근 문제를 쉽게 파악할 수 있다. 그림 8의 (a)는 단일 사용자 검출기의 검출 방식을 초기화 알고리즘으로 사용한 검출기로 ML 최적 다중 사용자 검출기의 BER에 도달하기 전에 수렴하였다. 이것은 log-likelihood 함수의 최대값으로 수렴하기 전에 국부 최대값에서 수렴한 경우이다. 하지만 그림 8의 (b)와 (c)는 선형 역상관 검출 방식과 역상관 판정 제한 검출 방식을 초기화 알고리즘으로 사용한 경우를 나타낸 것으로 ML 최적 다중 사용자 검출기의 BER로 수렴하였다. 각각의 반복 횟수는 3와 1이다. 그리고 마지막으로 그림 9의 (a)~(c)는 각 초기화 알고리즘에 대하여 사용자 수가 4인 경우의 BER을 나타낸 것이다. 여기에서도 각 사용자의 고유신호는 그림 6에 나타낸 것을 사용하였다. CDMA 채널 내에 사용자 수가 4명인 경우도 3명인 경우와 마찬가지로 단일 사용자 검출 방식을 초기화 알고리즘으로 사용한 경우에는 ML 최적 다중 사용자 검출기의 BER에 도달하기 전에 수렴하였다. 그리고 선형 역상관 검출 방식과 역상관 판정 제한 검출 방식을 초기화 알고리즘으로 사용한 경우에는 각각 반복 횟수 4와 2에서 ML 최적 다중 사용자 검출기의 BER로 수렴하였다. 4.1절의 모의 실험과 마찬가지로 역상관 판정 제한 검출 방식을 초기화 알고리즘으로 사용한 경우에 가장 빠르게 ML 최적 다중 사용자 검출기의 BER에 도달함을 확인하였다. 결국 위의 그림들을 통하여, 사용자 수에 관계없이 SNR_i - SNR_1 이 클수록 그 반복 횟수 1에서 ML 최적 다중 사용자 검출기의 성능과 동일하게 나왔으며, 그 값이 작을 때에도 사용자 수에 크게 영향을 받지 않고 작은 반복 횟수에서 ML 최적 다중 사용자 검출기의 성능에 수렴하여 그 연산량을 크게 줄일 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 ML 최적 다중 사용자 검출기의 연산량을 줄이기 위하여 다차원 검색 과정을 연속적인 일차원 검색 과정을 반복하여 ML 최적 다중 사용자 검출기의 계산량을 크게 줄일 수 있는 교호 최대화

(AM) 알고리즘을 제안하였다. 순차적인 AM 알고리즘의 초기치 선정 알고리즘으로는 단일 사용자 검출 방식과 선형 역상관 검출 방식 및 역상관 판정 제한 검출 방식등을 채택하였다.

동기화된 CDMA 채널 내에 사용자 수가 K 일 때, ML 최적 다중 사용자 검출기의 연산량은 $O(2^K \cdot K^2)$ 에 비례하지만, 제안된 단순화된 ML 다중 사용자 검출기의 연산량은 ML 방식에 의한 결과로 수렴하였을 때의 반복 횟수를 I 라 할 때 $O(IK^2)$ 에 비례한다.

그리고 세 가지 초기화 알고리즘에 따른 교호 최대화 알고리즘을 사용한 다중 사용자 검출기의 수렴 특성을 분석하기 위하여 사용자 수가 2명인 경우와 실제 CDMA 채널에 적용시키기 위하여 사용자 수가 4명인 채널에 대하여 컴퓨터 모의 실험을 수행하였다. 그 결과 단일 사용자 검출 방식을 초기화 알고리즘으로 사용한 경우에는 ML 최적 다중 사용자 검출기에 의한 결과치로 수렴하였지 못함을 확인하였다. 이것은 AM 방식의 초기치를 잘못 선정하였기 때문에 발생한 것으로 국부 극대치로 수렴하였음을 확인할 수 있다. 반면에, 선형 역상관 검출 방식과 역상관 판정 제한 검출 방식을 단순화된 ML 다중 사용자 검출기의 초기화 알고리즘으로 사용한 경우에는 ML 최적 다중 사용자 검출기에 의한 결과치로 수렴하였음을 알 수 있다. 특히, 역상관 판정 제한 검출기 방식을 초기화 알고리즘으로 사용한 경우, 그 반복 횟수가 가장 적게 나타나 연산량을 가장 크게 줄일 수 있었다. 또한 사용자 수가 증가하여도 그 반복 횟수가 크게 증가하지 않기 때문에 실제 채널 내에 많은 사용자가 서비스를 받는 CDMA 시스템에 적용을 시켰을 경우 본 논문에서 제안된 검출기가 효과적으로 그 연산량을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B. L. Levitt, *Spread Spectrum Communications, Vol. III, chapter 5*, Computer Science Press, 1985.
- [2] E. A. Geraniotis and M. B. Pursley, "Error Probability for Direct-Sequence Spread-Spectrum Multiple Access Communications - Part I: Upper and Lower Bounds," *IEEE Trans. Comm.*,

- Vol. COM-30, No. 5, pp. 985-995, May 1982.
- [3] M. K. Varanasi and B. Aazhang, "Multistage Detection in Asynchronous Code-Division Multiple Access Communication," *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-38, No. 4, pp. 509-519, Apr. 1990.
- [4] M. K. Varanasi and B. Aazhang, "Near-Optimum Detection in Synchronous Code-Division Multiple Access System," *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-39, No. 5, pp. 725-736, May 1991.
- [5] S. Verdú, "Minimum Probability of Error for Asynchronous Gaussian Multiple Access Channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 32., No.1, pp. 85-96, Jan. 1986.
- [6] S. Verdú, "Optimum Multiuser Asymptotic Efficiency," *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-34, No. 9, pp. 890-897, Sep. 1986.
- [7] R. Lupas and S. Verdú, "Linear Multiuser Detectors for Synchronous Code-Division Multiple Access Channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 35, No. 1, pp. 123-136, Jan. 1989.
- [8] A. Duel-Hellen, "Decorrelating Decision-Feedback Multiuser Detector for Synchronous Multiple Access Channel," *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-41, No. 2, pp. 285-290, Feb. 1993.
- [9] I. Ziskind and M. Wax, "Maximum Likelihood Localization of Multiple Sources by Alternating Projection," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, Vol. 36, No. 10, pp. 1553-1560, Oct. 1988.
- [10] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B. L. Levitt, *Spread Spectrum Communications, Vol. III, chapter 5*, Computer Science Press, 1985.
- [11] H. Vincent Poor, *An Introduction to Signal Detection and Estimation*, Springer-Verlang, 1988.
- [12] 권 형욱, 성 상현, 오 성근, 최 태영, "동기화된 CDMA 채널에서의 Alternating Maximization 기법을 사용한 준 최적 다중 사용자 검출기," 제7회 신호 처리 합동 학술 대회 논문집, pp. 259-263, 1994

저 자 소 개



權 亨 昱(正會員)

1993년 아주대학교 전자공학과 학사. 1995년 아주대학교 전자공학과 석사. 1995년 부터 현재까지 LG정보통신(주) 중앙연구소에서 근무. 주관심 분야는 이동 통신,

디지털통신, 채널코딩 등임



吳 成 根(正會員)

1961년 4월 4일생. 1983년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1985년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1990년 8월 한국과학기술원

전기 및 전자공학과 졸업(Ph.D.) 1988년 12월 ~ 1993년 8월 삼성전자(주). 1993년 8월 ~ 현재 아주대학교 전기전자공학부 조교수. 주관심분야는 이동통신 시스템용 적응 배열 안테나 신호처리 시스템, 이동통신 시스템용 적응등화기, DS-CDMA 수신 시스템, Acoustic Echo Canceller 등임

崔 太 永(正會員)

第 33卷 B編 第 3號 參照

현재 아주대학교 전기전자공학부 교수