

# DS-CDMA 시스템을 위한 결정 귀환 검출기와 결합된 적응 최소평균제곱오류 다중사용자 검출기법

이 혜 정, 이 재 홍  
서울대학교 전기컴퓨터공학부  
전화 : 02-880-7045 / 팩스 : 02-882-4657

## Adaptive MMSE multiuser detector combined with decision-feedback detector for DS-CDMA system

Hye Jeong Lee and Jae Hong Lee  
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University  
E-mail : hiejlee2@snu.ac.kr

### Abstract

In this paper, adaptive minimum mean-squared error (MMSE) multiuser detector combined with decision-feedback detector (DFD) is considered for near-far resistant DS-CDMA system. To provide a reliable input to the adaptive MMSE detector, multiple-access interference (MAI) is regenerated using bit estimates from DFD and subtracted from the received signal. In the adaptive MMSE detector, the effect of the imperfect cancellation is compensated by a least mean square (LMS) algorithm. Through the numerical results, it is shown that, in a near-far situation, the proposed scheme provides superior performance to the matched filter (MF) receiver, adaptive MMSE detector, and DFD in terms of the bit error rate (BER).

### I. 서론

다중 사용자 검출기법(multiuser detection)은 다수의 사용자가 존재하는 무선통신 시스템에서 다중접속간섭(MAI), 잡음(noise), 원근효과(near-far effect)등을 극복하고 원하는 사용자의 신호를 검출하기 위한 수신기법이다. DS-CDMA 시스템을 위한 다양한 다중사용자 검출기 법이 제안되어 왔으며, 이 중에서 최적 수신기(optimum receiver)는 Viterbi 알고리즘이 적용된 최대우도 열 검출

수행되었습니다.

기(maximum likelihood detector, MLSD)로서 최적의 성능을 나타낸다[1]. 그러나 복잡도(complexity)면에서 사용자수에 대해 지수적으로 증가하므로 사용자수가 많을 경우에는 구현이 불가능하다. 이러한 점을 보완한 것이 준최적 수신기(suboptimum receiver)이다[2]. 준최적 수신기 중에서 선형 수신기(linear receiver)에 속하는 적응 최소평균제곱오류(adaptive MMSE)다중사용자 검출기는 기존의 정합필터수신기(MF)와 비교하였을 때 큰 성능 향상을 보인다[3], [4]. 그러나 원근효과가 있는 DS-CDMA 시스템에 적용하였을 때 성능 열화가 일어나며, 특히 원근효과가 심하거나 페이딩이 존재하는 채널 환경일 때 수신신호크기가 작은 사용자에 대한 성능의 열화 정도는 더욱 심각해진다. 한편, 비선형 수신기(nonlinear receiver)에 속하는 결정 귀환 검출기(DFD)는 수신신호크기가 큰 사용자부터 크기가 작은 사용자의 순서로 신호를 추정하여 수신신호로부터 제거함으로써 수신신호크기가 작은 사용자의 신호 추정값의 신뢰도를 높일 수 있다. 그 결과, 결정 귀환 검출기는 원근 효과에 대해 강인한 성능을 보인다[5], [6]. 이러한 점에 착안하여 본 논문에서는 원근 효과가 있는 동기식 DS-CDMA 시스템을 위한 수신기로서 기존의 적응 최소평균제곱오류 다중사용자 검출기의 성능을 향상시키기 위해 결정 귀환 검출기를 결합한 다중사용자 수신기를 제안한다.

본 논문의 □절에서는 원근 효과가 있는 DS-CDMA 시스템을 설명하고, □절에서는 결정 귀환 검출기와 결합된 적응 최소평균제곱오류 다중사용자 검출기를 제안한다. □절에서는 모의 실험 결과를 보이고 □절에서 결

본 연구는 BK21사업과 정보통신부 ITRC프로그램의 지원으로

론을 맺는다.

### II. 시스템 모델

원근 효과가 있는 동기식 DS-CDMA 시스템의 업링크(uplink)를 고려한다.  $K$  명의 사용자가 있을 때, 각 사용자의 이진 데이터 신호는 고유의 확산신호와 곱해진 후 전송된다.  $k$  번째 사용자의 기저대역 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$s_k(t) = \sqrt{P_T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} b_k[m] a_k(t - mT) \quad \text{for } 1 \leq k \leq K \quad (1)$$

여기서  $P_T$  는 송신 파워로서 모든 사용자에게 대해서 일정하고,  $b_k[m] \in \{1, -1\}$  은  $k$  번째 사용자의  $m$  번째 비트이며,  $T$  는 비트주기이다.  $a_k(t)$  는  $k$  번째 사용자의 확산신호를 나타내며 다음과 같이 주어진다.

$$a_k(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_k[n] p(t - nT_c) \quad \text{for } 0 \leq t < T \quad (2)$$

여기서  $T_c = T/N$  는 칩주기이고,  $N$  은 처리이득이다.  $a_k[n]$  는  $k$  번째 사용자에게 대한 확산신호의  $n$  번째 칩을 나타내고,  $p(t)$  는  $[0, T_c]$  구간에서 1의 값을 가지고 나머지 구간에서는 0의 값을 가지는 구형파이다. 또한  $a_k(t)$  는 정규화된 확산신호로써  $\int_0^{T_c} a_k^2(t) dt = 1$  의 조건을 만족한다.

$k$  번째 사용자가 전송한  $m$  번째 비트에 대한 신호는 원근효과에 따른 경로손실을 겪고, 페이딩 채널을 통해 수신기에 도달하게 되며 다음과 같이 주어진다.

$$x_k(t) = \sqrt{P_k} b_k[m] \sum_{l=1}^L c_{k,l} a_k(t - mT - \tau_{k,l}) \quad (3)$$

여기서  $\sqrt{P_k}$  는 수신신호의 크기이고, 페이딩 채널의 임펄스 응답은 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha_k(t) = \sum_{l=1}^L c_{k,l} \delta(t - \tau_{k,l}) \quad (4)$$

여기서  $L$  은 경로의 개수이고,  $c_{k,l}$  와  $\tau_{k,l}$  는 각각  $k$  번째 사용자 신호가  $l$  번째 채널경로에서 겪는 페이딩 이득의 크기와 시간지연이다. 페이딩 채널 이득은 정규화 조건을 만족하며, 한 비트내에서 일정한 값을 가진다고 가정한다.

본 논문에서는 단일경로 페이딩 채널을 고려하므로  $L=1$  이고,  $\tau_{k,1} = \tau_{2,1} = L = \tau_{K,1} = \tau$  을 가정한다. 또한, 사용자 인덱스가 커질수록 수신신호의 크기가 작아진다고 가정한다. 수신기에 도달한 전체  $K$  명의 사용자의  $m$  번째 비트에 대한 기저대역 수신신호는 다음과 같이 주어진다.

$$r(t) = \sum_{j=1}^K x_j(t) + n(t) \quad (5)$$

$$= \sum_{j=1}^K A_j b_j[m] a_j(t - mT - \tau) + n(t)$$

여기서  $A_k = c_{k,1} \sqrt{P_k}$  는 수신신호크기이며,  $n(t)$  는 양쪽 전력스펙트럼밀도가  $\sigma^2 = N_0/2$  W/Hz 인 AWGN이다.

### III. 결정 귀환 검출기와 결합된 적응 최소평균제곱오류 검출기

본 논문에서는 원근 효과가 있는 DS-CDMA 시스템을 고려하며 결정 귀환 검출기와 결합된 적응 최소평균제곱오류 검출기를 적용한다. 기존의 적응 최소평균제곱오류 다중사용자 검출기가 원근 효과가 있는 환경에서 성능 열화가 생기는 것은 검출하고자 하는 사용자에게 대하여 다중접속간섭(MAI)으로 작용하고 있는 다른 모든 사용자의 신호가 제거되지 않은 상태로 입력단에 들어가기 때문이다. 이를 해결하기 위해 원근 효과에 강한 결정 귀환 검출기를 이용하여 간섭신호를 제거한다. 그림 1에 결정 귀환 검출기와 결합된 적응 최소평균제곱오류 검출기의 블록도를 나타내었다.

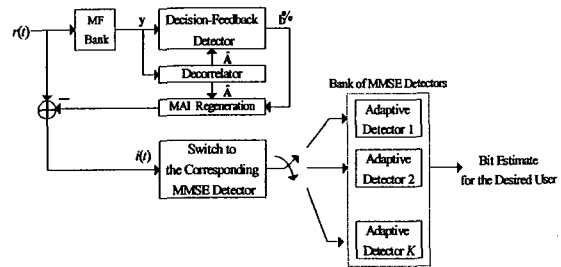


그림 1. 결정 귀환 검출기와 결합된 적응 최소평균제곱오류 검출기의 블록도

칩 동기화된 정합필터뱅크에서 전체 사용자의  $m$  번째 비트에 대한 출력벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$y = \mathbf{R} \mathbf{A} \mathbf{b} + \mathbf{n} \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{R}$  은 확산신호에 대한 상호상관(cross-correlation)행렬이고,  $\mathbf{A} = \text{diag}[A_1, A_2, \dots, A_K]$  는 수신신호의 크기행렬이며,  $\mathbf{b} = [b_1[m], b_2[m], \dots, b_K[m]]^T$  는  $m$  번째 전송비트벡터이다.  $\hat{\mathbf{n}} = [\hat{n}_0, \hat{n}_1, \dots, \hat{n}_K]^T$  는 가우시안 잡음으로 자기상관(auto-correlation)행렬이  $\sigma^2 \mathbf{R}$  이다.

$y$  의  $k$  번째 요소는 다음과 같이 주어진다.

$$y_k = \int_{mT+\tau}^{(m+1)T+\tau} r(t) a_k(t - mT - \tau) dt \quad (7)$$

$$= A_k b_k[m] + \sum_{j=1, j \neq k}^K A_j b_j[m] \rho_{j,k} + \hat{n}_k$$

여기서  $\rho_{j,k}$  는  $j$  번째,  $k$  번째 사용자의 확산신호에 대한 상호상관값을 나타낸다.

정합필터뱅크에 의해 역확산된 신호는 결정 귀환 검출기 내에서 백색정합필터(whitened matched filter)를 통과한 후, 수신신호세기가 큰 사용자에서 크기가 작은 사용자의 순서로 신호추정치를 얻게 된다. 그림 2에 결정 귀환 검출기의 블록도를 나타내었다.

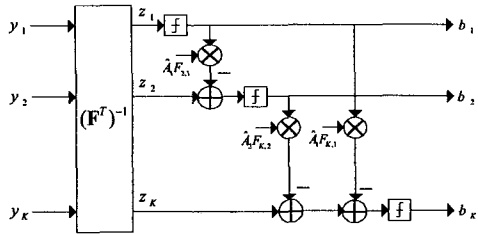


그림 2. 결정 귀환 검출기의 블록도

백색잡합필터를 통과한 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{z} = (\mathbf{F}^T)^{-1} \mathbf{y} = \mathbf{F} \mathbf{A} \mathbf{b} + \mathbf{n} \quad (8)$$

여기서  $\mathbf{F}$ 는 Cholesky 분할  $\mathbf{R} = \mathbf{F}^T \mathbf{F}$ 에서 얻어지는 저삼각행렬이고,  $\mathbf{n} = (\mathbf{F}^T)^{-1} \mathbf{n}_0 = [n_1, n_2, \dots, n_k]^T$ 은 가우시안 잡음으로 자기상관(auto-correlation)행렬이  $\sigma^2 \mathbf{I}$ 이다.

$\mathbf{z}$ 의  $k$ 번째 요소는 다음과 같이 주어진다.

$$z_k = F_{k,k} A_k b_k [m] + \sum_{j=1}^{k-1} F_{k,j} A_j b_j [m] + n_k \quad (9)$$

$k$ 가 1일 경우, 다중접속간섭이 없게 되어 신호추정치에 대한 신뢰도가 매우 높다. 신호크기가 가장 큰 사용자의 신호추정치가 결정된 후, 결정 귀환되어 신호크기가 작은 사용자의 순서로 신호추정치가 구해진다. 임의의  $k$ 번째 사용자의 신호추정치는 다음과 같다.

$$\hat{b}_k [m] = \text{sgn}(z_k - \sum_{j=1}^{k-1} F_{k,j} \hat{A}_j \hat{b}_j [m]) \quad (10)$$

여기서  $\hat{A}_j$ 는  $\hat{\mathbf{A}}$ 의  $j$ 번째 요소로서  $\hat{\mathbf{A}}$ 는 역상관기의 결과벡터이며  $\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y}$ 에서 얻을 수 있다.  $|g|$ 는 벡터내 요소의 절대값을 뜻한다. 또한  $\text{sgn}(g)$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{sgn}(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ -1, & n < 0 \end{cases} \quad (11)$$

수신기에서 검출하고자 하는 사용자(desired user)가  $i$ 번째 사용자일 때, 적응 최소평균제곱오류 검출기의 입력 신호는 수신신호로부터 재생성된 간섭신호를 제거함으로써 얻어지며, 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} i(t) &= r(t) - \sum_{j=1, j \neq i}^K \hat{A}_j \hat{b}_j [m] \sum_{n=0}^{N-1} a_j [n] p(t - mT - nT_c - \tau) \\ &= A_i b_i [m] a_i (t - mT - \tau) \\ &\quad + \sum_{j=1, j \neq i}^K (A_j b_j [m] - \hat{A}_j \hat{b}_j [m]) a_j (t - mT - \tau) + n(t) \end{aligned} \quad (12)$$

$i(t)$ 는 기저대역 신호이므로  $\mathbf{i} = [i_0, i_1, \dots, i_{N-1}]^T$ 와 같이 벡터로 나타낼 수 있으며, 적응 최소평균제곱오류 검출기를 통해  $i$ 번째 사용자의 결정 통계는 다음과 같이 주어진다.

$$v_i = \mathbf{i}^T \mathbf{g} \mathbf{w}_i \quad (13)$$

여기서  $\mathbf{w}_i = \mathbf{a}_i + \mathbf{h} = [w_{i,0}, w_{i,1}, \dots, w_{i,N-1}]^T$ 는 무계 시퀀스이고,  $\mathbf{a}_i = [a_{i,0}, a_{i,1}, \dots, a_{i,N-1}]^T$ 는  $i$ 번째 사용자의 확산 시퀀

스이다.  $\mathbf{h} = [h_0, h_1, \dots, h_{N-1}]^T$ 는 적응 시퀀스로서 적응 알고리즘에 의해 업데이트된다.  $i$ 번째 사용자의 신호추정치는  $\hat{b}_i = \text{sgn}(v_i)$ 와 같이 얻어진다.

한편, 적응시퀀스  $\mathbf{h}$ 는 정규화된 최소평균제곱(normalized least mean square, NLMS) 알고리즘에 의해서 업데이트되며 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{h}_j = \mathbf{h}_{j-1} + 2\mu(\hat{b}_j - v_j) \mathbf{i} \quad (14)$$

여기서  $\mathbf{h}_j$ 는  $j$ 번째 업데이트를 나타내며,  $\mu$ 는 스텝 길이(step size)로서 입력신호의 에너지에 반비례하게 주어진다.

### □. 모의실험 결과

사용자마다 수신기로부터 서로 다른 거리에 떨어져 있어 원근효과가 있는 동기식 DS-CDMA 시스템을 고려하고 전체 사용자는 10명으로 가정한다. 사용자간의 수신신호크기 차이는  $10 \log(A_k / A_{k+1})^2 = 2\text{dB}$ ,  $k=1, 2, \dots, 9$ 이며, 도착시간지연에 대한 추정은 정확하다고 가정한다. 확산신호는 길이 31인 골드시퀀스(Gold sequence)를 사용한다. AWGN 채널과 단일 경로 레일레이 페이딩 채널 환경을 고려하며, 모든 채널 환경에 대하여 비트오율을 성능의 척도로 하여 수신신호크기가 가장 약한 사용자의 성능을 구한다.

그림 3은 AWGN 채널 환경에서의 비트오율을 나타낸다. 적응 최소평균제곱오류 검출기는 AWGN 채널 환경에서는 잘 동작하나, 결정 귀환 검출기가 적응 최소평균제곱오류 검출기에 비해 성능이 좋게 나타나며, 제안하고 있는 수신기의 성능은 단일 사용자 성능에 근접하게 된다.

그림 4의 (a)는 고속 레일레이 페이딩 환경에서의 비트오율을 나타내며, 페이딩률  $f_D T$ 는 0.01로 가정한다. 정합필터의 성능은 AWGN 채널 환경에서보다 훨씬 열화가 일어나며, 적응 최소평균제곱오류 검출기는 정합필터보다 성능 향상은 있으나,  $10^{-3}$ 의 비트오율에서 성능 향상이 더 이상 일어나지 않는다. 결정 귀환 검출기는 AWGN 채널 환경에서와 마찬가지로 적응 최소평균제곱오류 검출기보다 성능이 좋으며, 두 검출기를 결합하였을 때, 단일 사용자의 성능에 근접함을 알 수 있다.

그림 4의 (b)는 저속 레일레이 페이딩 환경에서의 비트오율을 나타내며, 페이딩률  $f_D T$ 는 0.001로 가정한다. 고속 레일레이 페이딩 환경에서와 비슷한 경향이 나타난다. 적응 최소평균제곱오류 검출기는 원근효과가 있는 채널 환경에서 성능 열화가 나타나지만 제안하고 있는 수신기에서는 결정 귀환 검출기의 결과값에 오류가 있을 경우, 최소평균제곱오류 기준에 의해 보정이 됨으로써 성능이 향상되는 것으로 판단된다. 그림 3과 그림 4를 종합해 보면 모든 경우에 대하여 정합필터가 가장

열화된 성능을 보이고, 적응 최소평균제곱오류 검출기가 정합필터보다 훨씬 나은 성능을 보인다. 결정 귀환 검출기는 적응 최소평균제곱오류 검출기보다 원근 효과에 강인한 성능을 보이고, 제안하고 있는 수신기가 단일 사용자 성능에 근접하며 가장 좋은 성능을 나타내었다.

□. 결론

본 논문에서는 원근효과가 있는 동기식 DS-CDMA 시스템을 위한 수신기로서 결정 귀환 검출기와 결합된 적응 최소평균제곱오류 검출기를 제안하였다. 제안하고 있는 수신기와 다른 다중사용자 수신기의 비트오율을 AWGN 채널과 레일리 페이딩 채널에서 모의 실험을 통해 비교, 분석하였다. 모의 실험 결과로부터 제안하고 있는 수신기가 정합필터수신기에 비해 큰 성능 향상을 나타내었으며, 적응 최소평균제곱오류 다중사용자 검출기와 결정 귀환 검출기에 비해 개선된 성능을 나타내었다.

참고문헌

[1] S. Verdu, "Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 32, no. 1, pp. 85-96, Jan. 1986.  
 [2] Z. Xie, R. T. Short, and C. K. Rushforth, "A family of suboptimum detectors for coherent multiuser communications," *IEEE J. Select. Areas. Commun.*, vol. 8, no. 4, pp. 683-690, May 1990.  
 [3] M. L. Honig, S. L. Miller, M. J. Shensa, and L. B. Milstein, "Performance of adaptive linear interference suppression in the presence of dynamic fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 4, pp. 635-645, Apr. 2001.  
 [4] A. N. Barbosa and S. L. Miller, "Adaptive detection of DS/CDMA signals in fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 1, pp. 115-124, Jan. 1998.  
 [5] A. Duel-Hallen, "Decorrelating decision-feedback multiuser detector for synchronous code-division multiple-access channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 41, no. 2, pp. 285-290, Feb. 1993.  
 [6] A. Duel-Hallen, "A family of multiuser decision-feedback detectors for asynchronous code-division multiple-access channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 421-434, Feb./Mar./Apr. 1995.

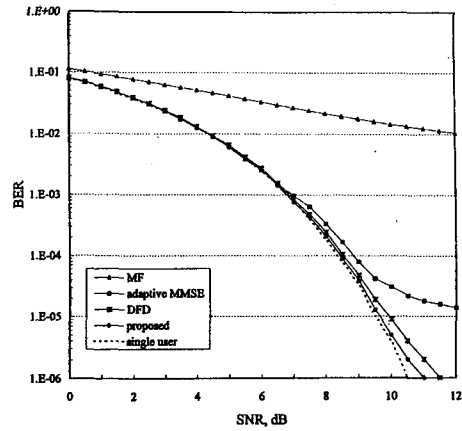
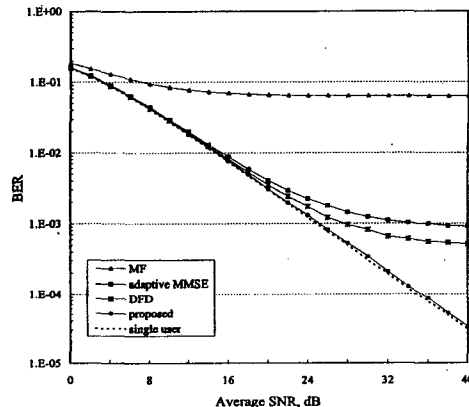
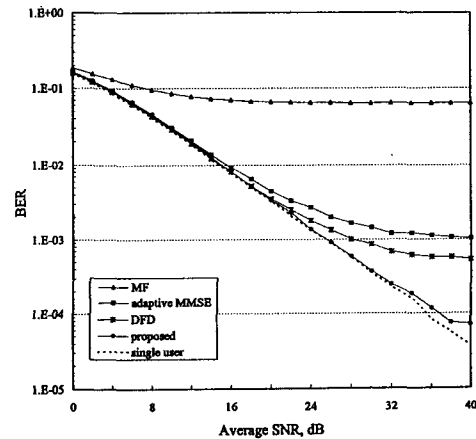


그림 3. AWGN 채널에서 가장 약한 사용자에 대한 비트 오율



(a) 고속 레일레이 페이딩 환경,  $f_D T = 0.01$



(b) 저속 레일레이 페이딩 환경,  $f_D T = 0.001$

그림 4. 단일 경로 레일레이 페이딩 채널에서 가장 약한 사용자에 대한 비트오율