

동기 CDMA에서의 결정 궤환 다중 사용자 검출기

*김 재 수, *김 병 주, *김 창 선, *변 건 식

*동아대학교 전자공학과

Decision-Feedback Multiuser Detector For Synchronous CDMA System

*Jae Soo Kim, *Byung Ju Kim, *Chang Sun Kim, *Kun Sik Byon

*Dept. of Electronics Engineering, Dong-A University

요 약

본 논문은 동기 코드분할다중접속(CDMA)을 위해 블라인드 적응 다중 사용자 검출기를 발전시킨 것으로 심벌 오류 성능을 증가시키기 위해 결정 궤환 블라인드 적응 다중사용자 검출기(DFBD)를 제안하여, 블라인드 적응 다중 사용자 검출기(BD)와 비교하였으며, 시뮬레이션에 의해 제시한 검출기가 성능이 향상됨을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we develop a blind adaptive multiuser detector for synchronous CDMA with a noise-whitened filter. To improve the symbol error probability performance, Decision-Feedback Blind Adaptive Multiuser Detector(DFBD) is proposed and compared with Blind Adaptive Multiuser Detector(BD). The proposed DFBD is slightly improved.

I. 서론

최근, 블라인드 적응 다중 사용자 검출기가 제안되고 있다. 블라인드 검파를 사용하는 이유는 학습 신호를 사용하지 않아도 된다는 것이다. 블라인드 검출기는 CMA(Constant Modulus Algorithms)를 사용하며 CMA는 대역 제한된 채널을 통한 디지털 전송에 있어서 심벌 간 간섭(ISI)을 제거하는데 사용되는 알고리즘이다. CMA 탭을 가진 무한 탭 필터는 초기 탭 값에 관계없이 항상 최소값에 수렴하지만 탭이 유한일 때 국부 최소값을 가질 수 있다. CMA가 CDMA에 적용될 경우, 희망신호가 포착될 때라도 위상 애매함이 생겨 복구 신호를 오류로 만들 수 있다. Zecevic과 Reed는 모호성을 해결 방법과 유사한 anchored CMA 접근 방식을 제안하였다[4].

본 논문에서는 CMA를 이용하여 블라인드 적응 다중 사용자 검출기와 결정 궤환 블라인드 적응 다중사용자 검출기를 비교 평가하였으며, 오류, 원근문제, 사용자수 등의 파라미터에 대해서 전반적으로 결정 궤환 블라인드 적응 다중 사용자 검출기가 우수함을 확인하였다.

II. 시스템 모델

동기 CDMA 시스템의 경우, K명의 사용자는 심벌 주기 T를 가지며 정규화 에너지가 $1(\int_T^0 s_k^2 dt = 1)$ 인 파형 $s_k(t)$, ($k=1, 2, \dots, K$)에 의해 변조됨으로써 동일 채널을 사용한다. 이러한 signature waveform은 선형 독립이며, 각 사용자의 입력 심벌은 동등한 확률을 가진 독립적인 antipodal 이진 값 [+1, -1]을 가진다. 각 사용자에 대한 입력 비트열은 다른 사용자들의 비트열과 독립적이다. AWGN 채널 환경이라고 가정한다면, 수신 신호 $r(t)$ 는 식 (1)과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{w_k(i)} b_k(i) s_k(t-iT) + n(t), \quad (1)$$

$$iT \leq t \leq (i+1)T$$

$n(t)$ 는 AWGN이며 $N_0/2$ 의 전력 스펙트럴 밀도를 가지고, $w_k(i)$ 는 i 번째 순간의 k 사용자의 에너지이다. 동기 전송에 있어서, 각 사용자는 희망 심벌에 정확히

간섭을 하는 심벌을 발생시킨다. 그러므로 보편성을 지키면서 하나의 심벌 주기동안 수신되어지는 신호를 고려하는 것은 충분하다. 그러므로, 시간 인덱스 i 를 사용하지 않고 $r(t)$ 를 나타내면 아래와 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{w_k} b_k s_k(t) + n(t), \quad 0 < t < T \quad (2)$$

각 사용자의 signature waveform의 정합필터의 출력은

$$\begin{aligned} r_k &= \int_0^T r(t) s_k(t) dt \\ &= \sqrt{w_k} b_k + \sum_{j=1, j \neq k}^K \sqrt{w_k} b_j \rho_{jk}(0) + n_k \end{aligned} \quad (3)$$

$(k=1, 2, \dots, K)$

이다. r_k 는 k 번째 signature waveform과 수신호와의 상호 상관, ρ_{jk} 는 signature waveform $s_j(t)$ 와 $s_k(t)$ 의 상호 상관을 의미한다.

$$\rho_{jk}(0) = \int_0^T s_j(t) s_k(t) dt \quad (4)$$

잡음 요소 n_k 는

$$n_k = \int_0^T n(t) s_k(t) dt \quad (5)$$

이다. n_k 는 분산이 σ_n^2 인 zero-mean 가우시안 변수이다.

$$\sigma_n^2 = E[n_k^2] = \frac{1}{2} N_0 \int_0^T s_k^2(t) dt = \frac{1}{2} N_0 \quad (6)$$

K 개의 정합필터의 입력 데이터 벡터와 출력 벡터를 아래와 같이 정의한다.

$$b = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_k)'$$

$$r = (r_1 \ r_2 \ \dots \ r_k)'$$

출력 r 은 다음과 같이 표현 할 수가 있다.

$$r = R W b + n \quad (7)$$

여기서,

$$R = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{21} & \dots & \rho_{K1} \\ \rho_{12} & \rho_{22} & \dots & \rho_{K2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{1K} & \rho_{2K} & \dots & \rho_{KK} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\rho_{ii}(0) = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, K)$$

$$\rho_{jk}(0) = \rho_{kj}(0) \quad (j, k = 1, 2, \dots, K)$$

인 $K \times K$ signature waveform의 상호 상관의 매트릭스이다. W 는 $\sqrt{w_k}$ ($k=1, 2, \dots, K$)을 가진 대각 매트릭스이다. $n = (n_1, n_2, \dots, n_k)'$ 는 $K \times K$ 자기 상관 매트릭스 $R(n) = \sigma_n^2 I$ 를 가진 가우시안 잡음 벡터이다. r 은 입력 비트 b 를 추정할 때 충분한 통계적 특성을 가짐을 알 수 있다. 다중 사용자 검출기의 목적은

출력 r 에 근거하여 입력 비트 b 를 복원하는 것이다.

상호 상관 매트릭스 R 은 $R = F' F$ 로 분해할 수 있기 때문에(여기서, F 는 lower 삼각 매트릭스), CDMA 시스템의 백색 잡음 모델을 얻기 위해서 정합 필터의 출력 (7)에 응답이 $(F')^{-1}$ 인 필터로 적용할 수 있다.

$$y = F W b + z \quad (9)$$

z 는 자기 상관 매트릭스 $R(n) = \sigma_n^2 I$ (I 는 $K \times K$ Identity 벡터)를 가진 백색 가우시안 잡음 벡터이다.

III. 블라인드 적응 다중사용자 검출기

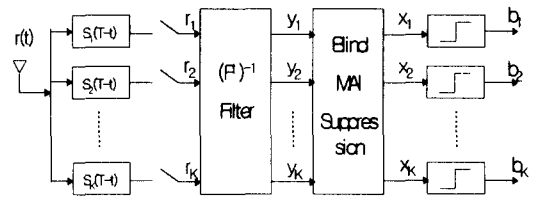


그림 1 블라인드 적응 다중 사용자 검출기

i 번째 순간의 y 의 k 번째 요소는 다음과 같다.

$$y_k(i) = F_{kk} \sqrt{w_k(i)} b_k(i) + \sum_{j=1}^{j \neq k} F_{kj} \sqrt{w_j(i)} b_j(i) + z_k(i), \quad (10)$$

$k = 1, 2, \dots, K$

식 (10)에서 첫 번째 요소는 희망 신호이고 두 번째 요소 MAI(Multiple Access Interference)이고, 세 번째 요소는 백색 가우시안 잡음이다. MAI는 대역 제한된 채널을 통과하는 디지털 신호의 전송으로 인한 ISI와 유사한 형태를 가진다. 그러므로, 적응 등화 알고리즘이 시변 이동 통신 채널에서, 수신 진폭 $W(i)$ 이 수신기에 미지일 때, MAI를 제거하기 위해서 사용될 수 있다.

$b_j(i)$ 의 사용자로부터의 다중 사용자 간섭은 $y_k(i)$ 에 포함되지 않는다. 그러므로, 블라인드 적응 다중 사용자 검출기는 그림1에서와 같이 등화기와 양자화기로 구성될 수 있다. k 번째 사용자에 대한 등화기의 출력은 식 (11)과 같다.

$$x_k(i) = \sum_{j=1}^k c_{kj}(i) y_j(i) = C_k'(i) Y_k(i), \quad (11)$$

$k = 1, 2, \dots, K$

여기서,

$$C_k'(i) = (c_{kk} \ c_{kk-1} \ \dots \ c_{k1})'$$

$$Y_k(i) = (y_{kk}(i) \ y_{kk-1} \ \dots \ y_{k1})'$$

는 각각 i 번째 순간에서 탭 계수 벡터와 등화기의 입력 신호 벡터이다. 정보 비트는 antipodal 이진 값 ± 1 을 가지므로, Godard 비용 함수는 아래와 같은 형태를 가진다.

$$J(x_k(i)) = \frac{1}{4} E[(x_k^2(i) - 1)^2], \quad k=1, 2, \dots, K \quad (12)$$

블라인드 등화기의 목적은 탭 계수를 조정하여 비용함수의 최소값을 찾는 것이다. i 번 째 순간에서의 탭 계수를 $C_k(i)$ 가 기지이면, 다음 판정의 반복(recursive) 식은 (13)과 같다.

$$C_k(i+1) = C_k(i) - \mu \frac{\partial J(x_k(i))}{\partial C_k(i)}, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (13)$$

여기서 μ 는 스텝 사이즈이다. 반복식을 다시 정리하면

$$C_k(i+1) = C_k(i) - \mu Y_k(i) x_k(i) (x_k(i)^2 - 1), \quad k=1, 2, \dots, K \quad (14)$$

$y_k(i)$ 는 희망 정보 비트 $b_k(i)$ 를 포함하고 있고, 주 탭 계수 c_{kk} 가 0이 아닐때만 비용 함수의 최소화는 사용자 k 에 대한 최적 값이 된다. 또한, 탭 계수는 신호 에너지의 변화를 계속해서 추정하며, 주 탭 계수는 0보다 크도록 제한되어야 한다. 따라서, 블라인드 등화 알고리즘은 위상 애매함이 없음이 자연스럽게 증명된다. 블라인드 등화기의 수렴 후, i 번 째 k 사용자에 대한 판단은 $x_k(i)$ 의 극성을 취함으로써 구할 수 있다.

$$\widehat{b}_k(i) = \text{sgn}(x_k(i)), \quad k=1, 2, \dots, K \quad (15)$$

블라인드 적응 다중 사용자 검출기는 좋은 수렴성을 가지지만, 등화 과정에서의 잡음은 강화됨을 식 (11)에서 알 수 있다. 블라인드 적응 다중 사용자 검출기는 CDMA 시스템의 백색 잡음 모델의 Decorrelator 검출기로 수렴한다[2]. 따라서, 심벌 오류 확률은 CDMA 시스템의 Decorrelator 검출기의 성능과 같다.

IV. 결정 제한 블라인드 적응 다중 사용자 검출기

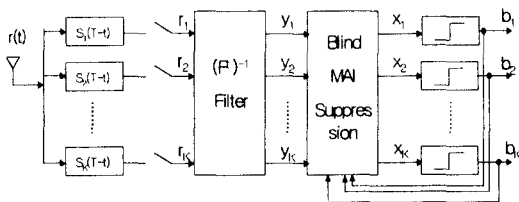


그림 2 결정 제한 블라인드 적응 다중 사용자 검출기

Duel-Hallen는 백색화 잡음의 통계적 특성에 근거하여 Decorrelating decision-feedback multiuser detection (DDEF)을 제안하였다[5]. 백색화 잡음의 통계적 특성에 근거한 블라인드 CMA 검출기는 결정 제한을 포함하도록 자연스럽게 확장 될 수 있다. 알고리즘의 전개는

아래에 전개된다. $y_1(i)$ 는 다른 사용자들로부터 발생하는 MAI에 영향을 받지 않기 때문에 백색화 잡음의 통계적 특성에 근거한 사용자 1의 등화는 필요가 없다. 사용자 1에 대한 판정은 다음과 같다.

$$\widehat{b}_{1(i)} = \text{sgn}(x_1(i)) = \text{sgn}(y_1(i))$$

사용자 1의 심벌 오류 성능은 Decorrelator의 성능과

일치한다. 사용자 2에 대해서는, 사용자 1이 판정되었으므로 사용자에 대한 등화는 결정값 \widehat{b}_1 을 제한 시킴으로서 다음과 같이 구현될 수 있다.

$$x_2(i) = c_{22}y_2(i) + c_{21}\widehat{b}_1(i)$$

사용자 2에 대한 결정은 $\widehat{b}_2(i) = \text{sgn}(s_2(i))$ 로써 얻을 수 있다. 마찬가지로, 사용자 k 에 대해서, 등화기의 출력은 아래와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} x_k(i) &= c_{kk}y_k(i) \\ &\quad + c_{kk-1}\widehat{b}_{k-1}(i) + c_{kk-2}\widehat{b}_{k-2}(i) \\ &\quad + \dots + c_{k1}\widehat{b}_1(i) \\ &= C_k'(i) \widehat{Y}_k(i), \quad k=2, 3, \dots, K \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,

$$\widehat{Y}_k(i) = (y_k(i) \widehat{b}_{k-1}(i) \widehat{b}_{k-2}(i) \dots \widehat{b}_1(i))$$

는 i 번 째 순간의 등화기의 입력 벡터이다. 그러므로 사용자 k 에 대한 결정은 아래와 같다.

$$\widehat{b}_k(i) = \text{sgn}(x_k(i)), \quad k=1, 2, \dots, K \quad (17)$$

식 (16)을 식(12),(14)에서 뺄으로써, 결정 제한 블라인드 등화 알고리즘이 얻어진다. 블라인드 등화기의 탭 계수의 반복식은 아래와 같다.

$$C_k(i+1) = C_k(i) - \mu \widehat{Y}_k(i) x_k(i) (x_k(i)^2 - 1), \quad k=1, 2, \dots, K \quad (18)$$

식(16)과(18)를 조합하면, 결정 제한 블라인드 적응 다중 사용자 검출기(DFBD)가 얻어진다. DFBD의 성능은 3절에서의 블라인드 적응 검출기보다 우수하다. 그 이유는 제한 신호의 잡음은 제한 전의 사용자 결정이 올바르게 하면 완전히 제거되어 질 수 있기 때문이다. 블라인드 적응 다중 사용자 검출기와 마찬가지로 DFBD도 위상과 애매함을 피할 수 있다.

V. 시뮬레이션 및 결과

모든 사용자에 대한 확산 계열로서는 길이가 31인 골드 코드를 사용하였다. BPSK 변조가 사용자들에게 사용되었으며 비교를 위해 두 가지의 검출기는 동일한 조건으로 시뮬레이션 하였다.

10명의 다중 사용자 채널과 AWGN 환경 하에서 블라인드 적응 다중 사용자 검출기와 결정 제한 블라인드 적응 다중 사용자 검출기의 BER은 그림 3과 같다. 각

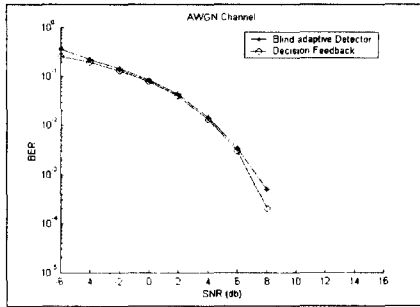


그림 3 BD와 DFBD의 BER

각의 간섭 신호의 에너지는 희망 사용자 신호보다 6dB 크다고 가정하였다. 그림 3에서 알 수 있듯이 강한 MAI가 존재하는 다중 사용자 채널에서 결정 궤환 블라인드 적응 검출기가 블라인드 적응 검출기보다 성능이 우수함을 알 수 있다.

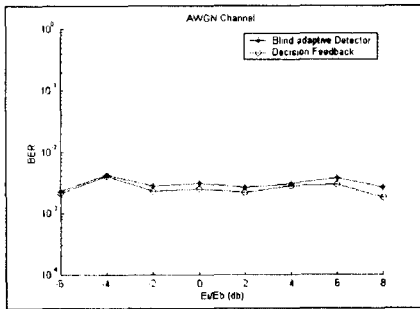


그림 4 원근 문제 하에서의 BD와 DFBD의 BER

그림 4는 앞의 경우와 같은 조건(10명의 사용자를 가진 AWGN 채널)에서의 원근 문제를 시뮬레이션 하기 위해서 각각 사용자의 전력을 달리하였다. 이 시뮬레이션에서, 넓은 에너지 범위를 가진 다른 사용자 간섭의 영향을 줄이는 결정 궤환 블라인드 적응 검출기가 BER을 일정하게 유지하며 조금 더 신뢰성 있게 희망 수신 신호를 검출함을 알 수 있다.

그림 5는 블라인드 적응 검출기와 결정 궤환 블라인드 적응 검출기의 사용자들의 수에 따른 BER을 나타낸다. 두 경우의 조건으로는 SNR이 6dB인 AWGN 채널이며, 다른 사용자 신호가 희망신호에 6dB 큰 원근 환경 하에서 시뮬레이션 되어졌다. 결정 궤환 블라인드 적응 검출기는 사용자 수가 증가함에 따라 성능이 떨어지는 블라인드 적응 검출기보다 성능이 안정함을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 동기 CDMA 시스템에 대해서 시뮬레이션으로 블라인드 적응 다중 사용자 검출기와 결정 궤환

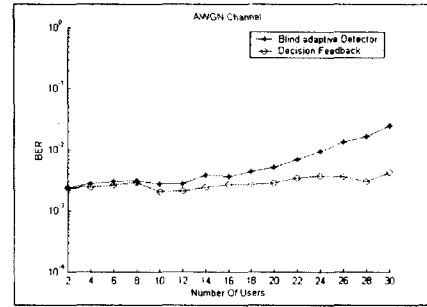


그림 5 $E_b(\text{desired})/N_0=6\text{dB}$,
 $E_i/E_b(\text{desired})=6\text{dB}$ 인
다중 접속 채널 환경에서의
사용자 수에 따른 BER

블라인드 적응 다중 사용자 검출기의 성능을 평가하였다. 결정 궤환 블라인드 적응 다중 사용자 검출기가 블라인드 적응 다중 사용자 검출기보다 조금의 성능 향상이 있으나, 사용자가 증가함에 따라서는 결정 궤환 블라인드 적응 다중 사용자 검출기는 오율을 일정하게 유지하는 반면 블라인드 적응 다중 사용자 검출기는 성능이 저하된다. 그러나, 두 방법의 성능 면에서 크게 차이 나지 않기 때문에 모든 면에서 성능을 향상시키기 위해서는, 앞으로 시간과 공간을 모두 고려하는 Space-time Processing을 이용한 다중 사용자 검출기를 향후 연구하여야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] Sergio Verdu, Multiuser Detection, Cambridge, 1998
- [2] P. He, T. Tjhung, and L.K. Rasmussen, "Constant modulus algorithms(CMA) for CDMA communication systems," in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., 1998, pp. 949-953.
- [3] D. N. Godard, "Self-recovering equalization and carrier tracking in two dimensional data communication systems," IEEE Trans. commun., vol COM-28, pp. 1867-1875, Nov.1980
- [4] N. Zecevic and J. H Reed, "Blind CDMA interference rejection in multipath channel," in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., Phoenix 1997, pp. 21-25.
- [5] A. Duel-Hallen, "Decorrelating decision-feedback multiuser detection," IEEE Trans. commun., vol. 41, Feb, 1993