

CDMA 시스템에서 결정궤환을 이용한 다중 사용자 수신기

Decision-feedback Multiuser Receiver for CDMA Systems

김복규* · 김경호** · 이재용** · 권성락** · 강창언**

B. K. Kim · K. H. Kim · J. Y. Lee · S. L. Kwon · C. E. Kang

요 약

본 논문에서는 동기 CDMA 환경에서, 사용자간 간섭을 제거하기 위해 결정궤환을 이용한 다중 사용자 수신기를 설계한다. 부가백색 가우시안 잡음(AWGN) 채널인 경우에는 정합여파기 뱅크, 페이딩 채널인 경우는 RAKE 수신기 뱅크 출력으로부터 결정궤환을 이용하여 사용자간 간섭을 제거하고, 결정단에서 사용자 신호를 결정한다. 정합여파기와 RAKE 수신기는 심볼간 간섭과 다경로에 의한 간섭을 제거하고, 결정궤환 구조는 사용자의 신호간 간섭을 제거한다. 결정궤환 구조의 계수는 Least Mean Square(LMS) 알고리즘에 의해서 적용되도록 한다.

실험 결과를 통해서, 이동 통신 다중 사용자 환경에서 RAKE 수신기만을 사용하는 경우보다 결정궤환을 이용한 다중사용자 수신기를 사용하는 경우에 더욱 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper a decision feedback multiuser receiver which rejects multiuser interference is designed in synchronous CDMA systems. Multiuser interference rejection is achieved by decision feedback from the output of a matched filter bank in case of AWGN channels and RAKE receiver bank in case of fading channels. The coefficients of the decision feedback structure are adapted by the Least Mean Square(LMS) algorithm.

Simulation results show that the decision feedback multiuser receiver has better performance than the conventional receiver.

I. 서 론

통신 사용량의 증가 때문에 접속 수용량은 여러 가지 다원 접속 방식의 성능을 평가하는 주요 기준이 되었다. 코드분할 다중접속(Code Division M-

ultiple Access:CDMA)는 대역 확산 통신 방식을 이용하는 다원 접속 방식으로 잡음에 강하며, 많은 사용자가 같은 대역을 사용하므로 FDMA나 TDMA와 같은 다른 다원 접속 방식에 비해 사용자 수가 증가하는 장점을 지닌다^[1,2,3].

CDMA 시스템에서 사용자들은 채널을 공유하게

* LG 전자(LG Electronics Inc.)

** 연세대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Eng. Yonsei Univ.)

· 논문 번호 : 970704-044

· 수정완료일자 : 1997년 10월 28일

되는데, 수신기는 여러 사용자가 전송한 신호를 동시에 받으므로 사용자간 신호 간섭(Multiple Access Interference:MAI)이 존재하게 된다. 일반적인 검출기는 사용자마다 상관기를 두는 것인데, 이러한 구조는 가능한 모든 지연 경로마다 사용자 신호들간의 상호상관이 거의 없을 때만 가능하다. 그러나, CDMA 채널이 비동기 채널인 경우에는 사용자가 임의의 시간에 신호를 보내므로 사용자 신호의 상대적인 지연에 의해서 불가피하게 상호상관이 생기게 된다. 또한 CDMA 채널이 동기 채널인 경우에도, 수신단에서 역확산되지 않은 간섭 잡음의 레벨이 커지게 되면 사용자 신호들간에 상호상관이 존재하게 된다.

따라서 이러한 MAI를 제거하기 위한 연구가 계속 진행되어 왔으며, 주로 상관기를 통과한 출력으로부터 사용자들간의 상호상관을 제거해준 후 결정단(decision device)을 통과시켜 사용자 신호를 결정하는 방향으로 연구가 진행되어 왔다^{[4]-[7]}.

본 논문에서는 동기 CDMA 환경에서 생기는 MAI를 제거하기 위해 결정계환을 이용한 다중사용자 수신기를 설계하고, 부가백색 가우시안잡음(AWGN) 채널과 페이딩 채널에서 실험을 통해 결정계환을 이용한 다중사용자 수신기의 성능을 분석한다. AWGN 채널인 경우는 정합여파기 뱅크, 페이딩 채널인 경우에는 RAKE 수신기 뱅크 출력으로부터 결정계환을 이용하여 다중사용자 간섭을 제거하고 결정단에서 각 사용자의 신호를 결정한다. 결정계환 구조의 계수는 사용자 신호들 간의 상호상관 행렬에서 구해질 수 있으며, 상호상관을 알고 있는 경우에는 Cholesky decomposition으로 결정계환 구조의 계수를 결정하고, 상호상관을 모르는 경우에는 Least Mean Square(LMS) 알고리즘에 의해 계수가 적응되도록 하였다.

본 논문의 II장에서는 CDMA 수신기 구조에 대해서 살펴보고, III장에서는 결정계환을 이용한 다중사용자 수신기를 설계한다. IV장에서는 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 토대로 시스템 성능을 분석하고 V장에서 결론을 맺는다.

II. CDMA 수신기 구조

2-1 RAKE 수신기

이동 통신 시스템에서 페이딩이 심할 경우에는 채널의 왜곡이 심하여 연접에러의 발생율이 커진다. 이러한 연접에러를 줄이기 위해서 다이버시티를 이용한다. 다이버시티란 전체 신호가 동시에 채널 감쇄의 영향을 받을 확률이 줄어든다는 개념을 이용한 것으로 동일한 정보를 지니는 신호를 여러 채널로 수신하는 방법이다. 즉, 한 신호가 페이딩의 영향으로 어떤 임계치 이하일 확률을 p 라고 할 때 동일한 L 개의 독립된 페이딩 신호가 임계치 이하일 확률은 p^L 이다. 다이버시티를 이용한 수신기는 여러 상관기에서 다른 경로를 통하여 들어온 신호를 추출해냄으로써 한 신호가 여러 경로를 통해서 들어온 것과 같은 효과를 낸다. 이때 한 경로에서 페이딩이 심하게 일어났을 때 다른 모든 경로에서도 페이딩이 심하게 일어날 확률은 적으므로 페이딩의 영향을 줄일 수 있다. RAKE 수신기는 여러 다이버시티 기법 중에서 전송 신호의 대역폭 W 가 코히어런스 대역폭 (Δf), 보다 훨씬 큰 주파수 선택적인 신호의 경우에 적용이 가능하다.

RAKE 수신기의 구성은 그 방법에 따라 선택적 결합, 최대비 결합, 동일이득 결합을 이용한 RAKE수신기로 나뉘며 본 논문에서는 동일이득 결합 RAKE 수신기를 사용한다. 동일이득 결합은 각 신호분기의 위상 값들을 한개의 점으로 모아서 결합시키는 것을 말한다.

RAKE 수신기는 채널의 경로수만큼의 상관기를 가지고 있다. 각 상관기에는 칩율로 샘플링 된 신호 $r(t)$ 가 한 칩씩 지연되어 입력되며 이는 다경로 페이딩에 의해 간섭된 신호이다. 상관기에서는 다경로 페이딩에 의해 간섭된 신호를 대역확산 신호 $u(t)$ 와 채널 계수 $c(t)$ 와의 비트 주기의 상관을 통해 제거하여 경로 간섭을 극복한다. 각 상관기의 출력은 모두 더하여져 비트 주기마다 신호를 결정한다.

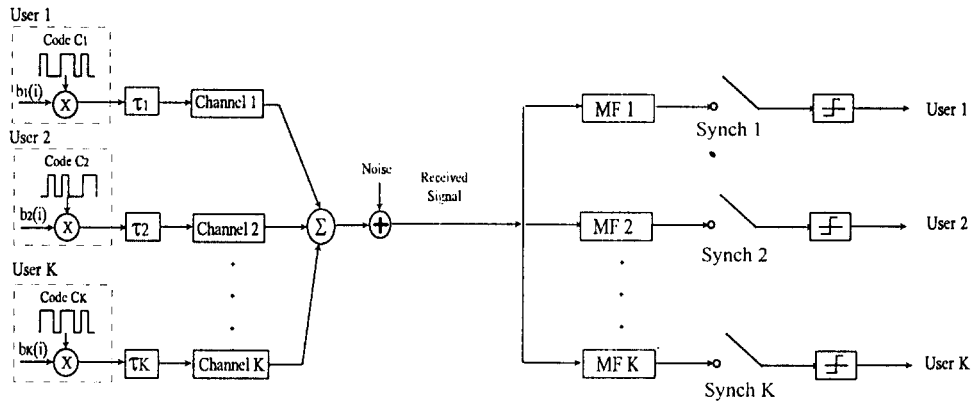


그림 1. 일반적인 CDMA 검출기

Fig. 1. General structure of the detector for CDMA.

2-2 MAI를 제거하는 다중 사용자 수신기

CDMA 시스템에서 사용자들은 채널을 공유하게 되는데, 수신기는 여러 사용자가 전송한 신호를 동시에 받으므로 사용자간 신호 간섭(MAI : Multiple Access Interference)이 존재하게 된다. 상관관계를 이용하는 일반적인 검출기는 그림 1과 같이 사용자마다 정합여파기를 두는 것이다.

K명의 사용자를 가진 CDMA 시스템에서, 사용자간의 상호상관 행렬을 H 라 하면, H 는 $K \times K$ 행렬이 되며, H 의 원소 H_{ij} 는 i 번째 사용자와 j 번째 사용자의 상호상관을 나타낸다. 일반적인 검출기는 사용자간의 상호상관의 영향을 고려하지 않고 정합여파기의 출력만을 바로 결정단에 통과시켜 사용자 신호, \hat{x} 을 결정한다.

그러나, 정합여파기의 출력을 바로 결정단에 통과시켜 사용자 신호를 결정하는 일반적인 검출기 구조는 가능한 모든 지연 경로마다 사용자 신호들간의 상호상관이 없어서 H 가 단위행렬이 되는 경우에만 가능하며, 사용자간의 상호상관이 존재하면 행렬 H 의 영향에 의해서 성능이 나빠진다.

CDMA 채널이 비동기 채널인 경우에는 사용자가 임의의 시간에 신호를 보내므로 사용자 신호의

상대적인 지연에 의한 상호상관이 생기게 된다. 또한 CDMA 채널이 동기 채널인 경우에도, 수신단에서 역확산되지 않은 여러 사용자의 간섭 잡음의 레벨이 커지게 되면 사용자 신호들간에 상호상관이 존재하게 된다.

MAI를 제거하는 최적의 다중 사용자 수신기는 MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation) 방법을 이용한 것이지만, 이러한 수신기는 사용자 수의 증가에 따라 복잡도가 지수적으로 증가하게 된다^[7]. 따라서, 복잡도는 사용자 수에 따라 선형적으로 증가하면서, MAI를 제거하는 성능은 최적의 다중 사용자 수신기에 가깝도록 하는 준최적 검출기에 대한 연구가 계속 진행되어왔다. 준최적 검출기는 상관기를 통과한 출력에서 MAI를 제거해 주는 필터를 통과시킨 후 그 출력을 결정단에 통과시켜 각 사용자 신호의 결정을 내리며, 준최적 검출기 중에서 상관해제 검출기(decorrelating detector)는 사용자 신호의 전력을 알지 않아도 되는 장점을 지니므로 원근문제에 영향을 덜 받아서, 수신 신호의 전력이 고정되지 않는 경우에는 유용하다^[6].

사용자 신호의 에너지를 알고 있거나, 또는 추정할 수 있다는 가정하에서 여러가지 준최적 검출기들이 제안되었는데, 이러한 검출기들은 파워가 큰

사용자로부터 연속적으로 MAI를 제거하는 형태를 지닌다. 다만 검출기(Multistage detector)도 이러한 부류에 속하는데, 비동기 CDMA 채널하에서 사용자 신호의 상대적인 지연으로 인해 생기는 MAI를 제거하는 방법을 제시한다. 즉, 앞단에서의 일시적인 결정을 이용하여 뒷단에서 MAI를 제거하는 방법을 이용한다^[8].

다단 RAKE 수신기(Multistage RAKE Receiver)는 RAKE 수신기를 여러단으로 연결하여 MAI를 제거한다^[9]. 첫단의 RAKE 수신기를 통해서 내려진 일시적인 결정을 통해 다시 그에 해당하는 확산 시퀀스를 재생하고, 두번째 단 입력으로는 수신 신호에서 나머지 모든 사용자의 확산 신호를 뺀 신호를 사용한다. 이렇게 하면 두번째 단의 RAKE 수신기에서는 결국 단일 사용자의 경우와 같은 입력이 들어오지만, 잡음 전력의 증가로 단일 사용자의 경우보다는 사용자가 N명일 때 $10 \log N$ dB가 떨어지게 된다.

Duel-Hallen은 AWGN 채널에서 다중사용자 결정제환(Multiuser Decision Feedback)수신기를 소개하였다^{[4], [6]}. 여기에서는 사용자간의 상호 상관을 알고 있으면 선형등화와 결정제환을 이용하여 MAI를 제거할 수 있다는 것을 보여준다.

MAI를 제거하기 위한 연구는 대부분 가우시안 채널에서 진행되었는데, 이동통신에서는 페이딩 채널에서 사용되도록 설계되어야 한다. 페이딩 채널에 대한 수신기는 다이버시티 결합기법을 이용하여야 한다는 것은 잘 알려진 사실이며 본 논문에서는 동일 이득 RAKE 수신기를 사용한다.

ISI(Intersymbol Interference)와 MAI는 모두 사용자 신호의 선형 왜곡이므로 대역폭과 수신 다이버시티가 주어지면 다중 입력, 다중 출력(즉, 선형 등화/다이버시티 결합) 수신기에 의해 제거될 수 있다. 성능향상을 위해서 선형 등화보다는 결정제환을 사용하고, 적응적으로 설계한다.

III. 결정제환을 이용한 다중사용자 수신기

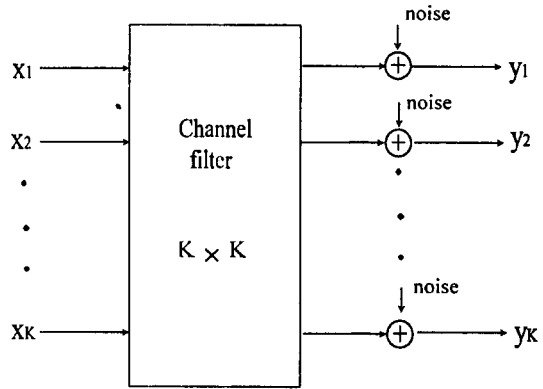


그림 2. 이산 시채널 모델
Fig. 2. Discrete Time Channel Model.

CDMA 시스템에서 사용자들은 채널을 공유하게 되는데, 수신기는 여러 사용자가 전송한 신호를 동시에 받으므로 사용자간 신호 간섭이 존재하게 된다. CDMA 채널이 비동기 채널인 경우에는 사용자가 임의의 시간에 신호를 보내므로 사용자 신호의 상대적인 지연에 의해서 신호간 간섭이 생기게 되며, 또한 CDMA 채널이 동기 채널인 경우에도, 수신단에서 역확산되지 않은 간섭 잡음의 레벨이 커지게 되면 사용자 신호들간에 상호상관이 존재하게 된다.

이 장에서는 사용자간 간섭을 제거하기 위해 결정제환을 이용한 다중사용자 수신기를 설계하고 결정제환 구조의 계수를 결정하는 방법에 대해서 고찰한다. 1절에서는 다중사용자 결정제환 검출기의 구조를 다루며, 2절에서는 결정제환 구조의 계수를 적응적으로 구하는 방법에 대해서 알아본다.

3-1 결정제환 다중사용자 수신기의 구조

사용자 수가 K인 동기 CDMA 채널에서 x_n^k 가 ± 1 의 값을 갖는 k번째 사용자의 n번째 입력 값일 때 입력 벡터 X_n 은 $X_n = (x_n^1, \dots, x_n^K)^T$ 으로 정의할 수 있다. 이때, 수신 신호는 사용자 각각의 확산 코드에 정합되어 있는 K개의 정합 여파기를 통과하게

되며, 이러한 정합 여파기 뱅크는 이산 시출력을 내놓으므로 그림 2와 같은 이산 시채널로 모델링할 수 있다. 여기에서, $K \times K$ 행렬인 채널 필터를 S 라 하면, 정합 여파기 출력 Y 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Y = ESX + W \quad (1)$$

여기서 S 의 원소인 s_{kl} 은 k 번째 사용자 와 l 째 사용자의 상호상관이며, W 는 백색 가우시안 잡음이다. 식에서 Y 와 W 는 $Y_n = (y_n^1, \dots, y_n^K)^T$, $W_n = (w_n^1, \dots, w_n^K)^T$ 의 관계에 있다. 또한 사용자 신호의 수신 전력을 나타내는 E 는 다음과 같다.

$$E = \begin{bmatrix} \sqrt{E_1} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \sqrt{E_2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \sqrt{E_K} \end{bmatrix} \quad (2)$$

이때, S 는 음이 아니며 대칭($S^T=S$) 이다. Cholesky decomposition을 이용하면 S 는 다음과 같이 나뉘어질 수 있다.

$$S = F^T F \quad (3)$$

이때 F 는 lower triangular 행렬이다. 정합 여파기 출력은 다음과 같이 된다.

$$Y = ESX + W = EF^T FX + W \quad (4)$$

결정제환 검출기는 채널 출력과 과거의 결정을 이용하는 심볼 대 심볼 검출기이며, 전방여파기 (feed forward filter) G 와 후방여파기(feed back filter) B 를 필요로 한다. 구조는 그림 3과 같다.

전방여파기 G 는 입력으로 정합여파기 출력 Y 를 가지며, 후방여파기 B 는 정합여파기 출력 Y 와 과거의 결정 \hat{X} 을 입력으로 한다. 페이딩 채널에서 정합여파기는 RAKE 수신기를 사용한다. 이때, 결정

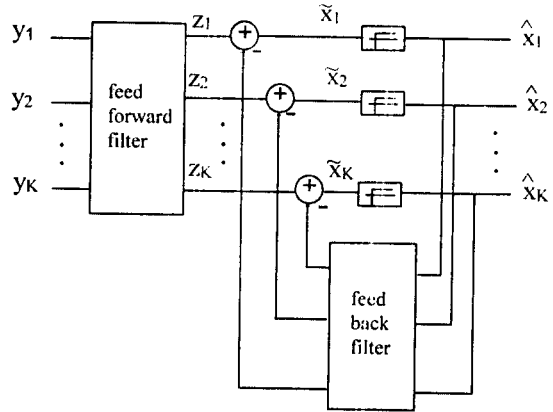


그림 3. 다중 사용자 결정제환 검출기
Fig. 3. Decision Feedback Detector for Multiple User.

단 입력은 $\tilde{X} = GY - B\hat{X}$ 이 된다.

n 번째 시간에 k 번째 사용자의 결정을 내릴 때 $n-1$ 번째 시간의 모든 사용자의 결정을 이용한다. 이때, 전방여파기와 후방여파기는 다중 사용자간 간섭을 제거하도록 선택된다. 만약, k 번째 사용자가 j 번째 사용자의 결정, \hat{x}_j^n 이 내려지길 기다릴 수 있다면, \hat{x}_j^n 가 k 번째 사용자의 결정, \hat{x}_k^n 을 내리는데 이용될 수 있다. 이러한 경우, n 번째 시간에 1번 사용자는 수신 신호와 $n-1, n-2, \dots$ 번째의 다른 모든 사용자의 결정을 이용하여 신호를 결정한다. 2번 사용자는 1번 사용자의 신호 결정을 기다린 후, 1번 사용자 신호 결정에 이용된 모든 데이터와 1번 사용자의 신호 결정을 이용하여 신호를 결정한다. 즉, k 번째 사용자는 다음의 데이터를 이용하여 신호를 결정한다.

$$\begin{aligned} &\hat{x}_1^n, \hat{x}_1^{n-1}, \dots, \dots \quad (\text{첫번째 사용자로부터}) \\ &\hat{x}_2^n, \hat{x}_2^{n-1}, \dots, \dots \quad (\text{두번째 사용자로부터}) \\ &\hat{x}_{k-1}^n, \hat{x}_{k-1}^{n-1}, \dots \quad (k-1\text{번째 사용자로부터}) \\ &\hat{x}_k^{n-1}, \hat{x}_k^{n-2}, \dots \quad (k\text{번째 사용자로부터}) \\ &\dots \\ &\hat{x}_K^{n-1}, \hat{x}_K^{n-2}, \dots \quad (K\text{번째 사용자로부터}) \end{aligned}$$

사용자 신호의 전력이 상당히 차이가 나면, 전력이 약한 사용자는 다중 사용자 간섭의 영향을 크게 받고, 결정체환으로 인한 효과도 크다. 따라서, 사용자 신호의 전력 순서대로 신호를 결정하도록 하려면, 이러한 방식을 이용하여야 한다. 그러나, 이러한 경우에는 k 번째 사용자는 $k-1$ 번째 사용자의 결정이 내려질 때까지 기다려야 하므로, 사용자 수가 증가하면 지연시간으로 인한 문제가 발생한다. 따라서, n 번째 시간에 모든 사용자의 신호 결정에는 $n-1$ 번째 시간까지의 신호 결정만을 이용한다. 이렇게 하면, 모든 사용자는 n 번째 시간에 동시에 신호를 결정하게 된다. 첫번째 심볼의 출력이 전방 여파기와 후방 여파기를 통과한 시간만큼만 지연되고, 두번째 심볼부터는 시간 지연없이 계속 검출되게 한다. 본 논문에서는 완전한 전력제어를 가정하고, 사용자 신호 결정에 시간 지연 없는 결정체환 구조를 이용한다. 본 논문에서는 완전한 전력제어를 가정하고, 사용자 신호 결정에 시간 지연 없는 결정체환 구조를 이용한다.

3-2 적응 알고리즘에 의한 필터계수 결정

이 절에서는 전방여파기와 후방여파기의 계수를 결정하는 방법에 대해서 알아본다. 사용자 신호간의 상호상관 행렬을 알고있는 경우에는 Cholesky decomposition에 의해서 결정체환 구조의 계수를 바로 결정해줄 수가 있지만, 상호상관을 모르는 경우에는 적응 알고리즘에 의해서 적응되도록 한다. 다음은 사용자 신호간의 상호상관행렬을 알고있는 경우에 대해서 결정체환 구조의 계수를 결정하는 방법이다.

전방여파기를 $G=(F^T)^{-1}$ 로 선택하면, 정합여파기 출력 $Y=EF^T FX+W$ 를 입력으로 하는 후방여파기 출력 Z 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z &= (F^T)^{-1}Y \\ &= (F^T)^{-1}[EF^T FX+W] \\ &= EFX+W \end{aligned} \tag{5}$$

이때, $U=(F^T)^{-1}W$ 이다.

또한, 후방여파기 B 는 다음과 같이 정해주면 된다.

$$B = (F - \text{diagonal}(F))E \tag{6}$$

완전한 전력제어에 의해 E 가 단위행렬이 되면 B 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & 0 \\ f_{2,1} & 0 & \dots & 0 \\ f_{3,1} & f_{3,2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ f_{k,1} & f_{k,2} & \dots & f_{k,k-1} \end{bmatrix} \tag{7}$$

사용자 신호에 상관을 주는 S 행렬을 알고 있으면 Cholesky decomposition을 이용하여 $S=F^T F$ 로 나누어 결정체환구조의 계수를 완벽히 알아낼 수 있지만, 실제 시스템에서 사용자간 간섭이 어느 정도 일어나는지를 모르므로 S 행렬을 안다고 할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 전방여파기 G 와 후방여파기 B 의 계수를 적응 알고리즘을 이용하여 찾아내고자 한다. 이때, 각 필터의 계수는 에러를 최소화 하도록 정해지는데, 에러는 다음과 같다.

$$e_k = \tilde{x}_k - \hat{x}_k \tag{8}$$

k 번째 전방여파기의 계수를 g_k 라 하고, k 번째 후방여파기의 계수를 b_k 라 하면 g_k 와 b_k 는 다음식에 의해 적응된다.

$$\begin{aligned} g_k &= g_{k-1} - 2 \cdot \mu \cdot e_k Y^T \\ b_k &= b_{k-1} - 2 \cdot \mu \cdot e_k \hat{X}^T \end{aligned} \tag{9}$$

여기에서 Y 는 정합여파기 출력이며, \hat{X} 는 결정단의 출력이다. μ 는 수렴계수이며, 실험에서는 각 계수를 적응시키는데 같은 μ 값을 사용한다. 페이딩 채널에서 Y 는 RAKE 수신기의 출력이다.

IV. 실험 결과 및 고찰

이 장에서는 III장에서 설계한 결정계환을 이용한 다중 사용자 수신기를 AWGN 채널과 페이딩 채널 환경에서 실험을 통해 성능을 분석한다. 결정계환 구조의 계수는 사용자 신호들 간의 상호상관 행렬에서 구해질 수 있으며, 상호상관을 알고 있는 경우에는 Cholesky decomposition으로 결정계환 구조의 계수를 결정하고, 상호상관을 모르는 경우에는 LMS 알고리즘에 의해서 계수가 적응되도록 하였다.

4-1 실험 시스템

각 사용자의 신호는 디지털 데이터를 BPSK 방식으로 변조하여 짧은 PN코드(short PN)로 대역 확산하고, 비트당 64 칩을 사용하며, 동기 CDMA 채널 및 완전한 전력제어를 가정한다. 실험에서 사용한 짧은 PN코드는 레지스터가 15개인 것을 사용하여 주기가 $2^{15}-1$ 이며, 식 10의 특성 다항식에 의해 만들어진다. 또, 각 사용자가 사용하는 긴 PN 코드(LONG코드)는 레지스터가 42개인 것을 사용하여 주기가 $2^{42}-1$ 이며, 식 11의 특성 다항식에 의해 만들어진다.

$$\begin{aligned}
 P(x) &= x^{15} + x^{10} + x^5 + 1 \\
 P(x) &= x^{42} + x^{36} + x^{33} + x^{31} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{22} \\
 &\quad + x^{21} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{10} + x^7 + x^6 \\
 &\quad + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1
 \end{aligned} \tag{11}$$

실험환경의 전체적인 블록 다이어그램은 그림 4와 같다. AWGN 환경에서는 그림 4에서의 페이딩 채널은 사용하지 않으며, RAKE 수신기 बैं크 대신에 정합여파기 बैं크를 사용한다. 페이딩 환경에서 채널은 레일리 느린 페이딩(Rayleigh slow fading)을 사용한다. 도플러 주파수는 30 Hz로 설정하고, 경로수는 5인 경우를 가정한다. 또한 사용자 수

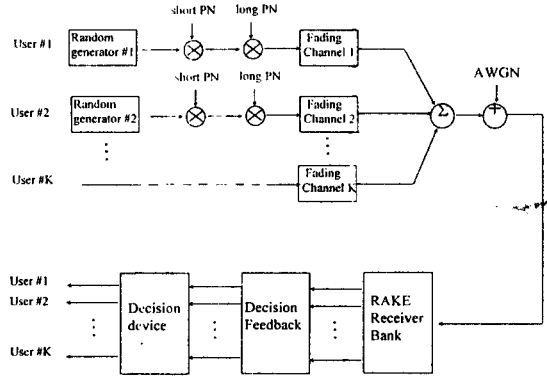


그림 4. 시스템 블록도

Fig. 4. System structures for simulation.

는 AWGN인 경우에는 3명, 페이딩 채널인 경우에는 각각 1, 5, 10, 15명에 대해서 시스템의 성능을 분석한다.

4-2 AWGN 환경에서의 성능분석

이 절에서는 AWGN 환경하에서 MAI를 제거하는 수신기의 성능을 분석한다. 3명의 사용자에 대해서 MAI를 제거하지 않은 상태의 성능과 결정계환을 이용하여 MAI를 제거한 후의 성능을 비교한다. 결정계환을 사용할 경우, 사용자간 상관관계를 알고 있을 때는 Cholesky decomposition으로 결정계환 구조의 계수를 결정하고, 상관관계를 알 수 없을 때는 결정계환 구조의 계수는 적응 알고리즘에 의해 얻어지도록 한다. 다음은 실험에 사용한 상관 계수값들이다.

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 1 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 1 \end{bmatrix} \\
 S_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{12}$$

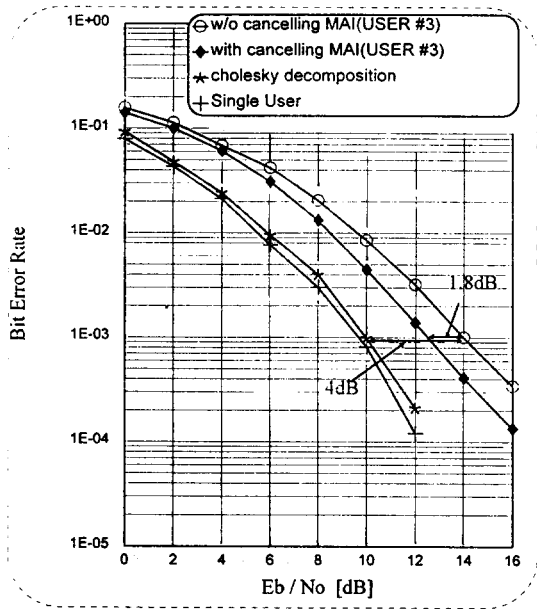


그림 5. AWGN환경에서 사용자수=3, 상호상관이 0.2(상관행렬 = S_1)인 경우의 성능 분석
 Fig. 5. Performance evaluations for the system(3 users, cross correlation = 0.2) in AWGN.

그림 5는 사용자간 상관관계 행렬 S 가 식 12의 S_1 과 같을 때, 상관관계를 아는 경우와 모르는 경우에 대해서 실험한 결과를 보이고 있다. S_1 에서 대각선 성분인 1은 자기상관 값을 나타내며, 0.2는 상호상관 값을 나타낸다. Cholesky decomposition으로 결정제한 구조의 계수를 구하는 경우에는 오울 10^{-3} 에서 정합여파기에 비해 약 4 dB의 이득이 있고, 결정제한 구조의 계수를 적응적으로 변하게 하는 경우에는, 오울 10^{-3} 에서 약 1.8 dB의 성능향상을 얻는다. 계수를 적응적으로 변하게 하기위해서 LMS 알고리즘을 사용하였으며, 수렴계수에 의한 수렴속도 등의 문제는 고려하지 않았다.

그림 6은 사용자간 상관관계 행렬 S 가 식 12의 S_2 와 같을 때, 상관 관계를 아는 경우와 모르는 경우에 대해서 실험한 결과를 보이고 있다. 상호상관 관계가 0.2인 경우($S=S_1$)보다는 상호상관 관계가

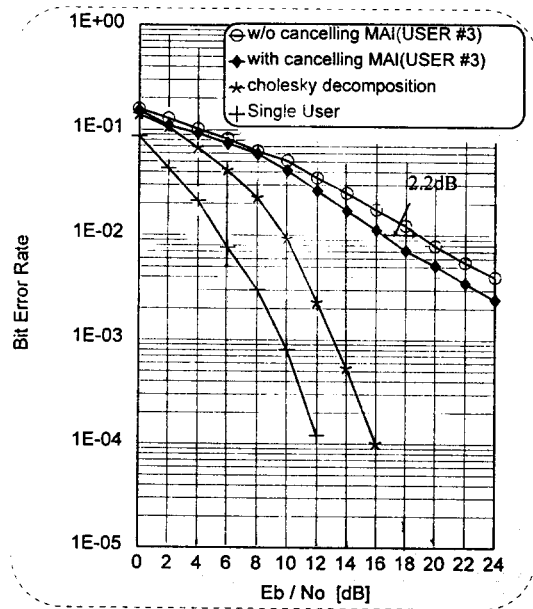


그림 6. AWGN환경에서 사용자수=3, 상호상관이 0.5(상관행렬 = S_2)인 경우의 성능분석
 Fig. 6. Performance evaluations for the system(3 users, cross correlation=0.5) in AWGN.

0.5인 경우($S=S_2$)에서, 정합 여파기만을 사용한 수신기의 성능이 상당히 떨어지는 것을 알 수 있다. 이것은 사용자 수는 같더라도 사용자 간에 상호상관이 커지면 에러확률이 나빠지는 것을 의미한다.

상호상관 관계를 정확히 알고 있는 경우에는 Cholesky decomposition으로 결정제한 구조의 계수를 결정하는데, 상호상관이 0.5인($S=S_2$) 경우에, 결정제한을 이용한 다중 사용자 수신기는 오울 10^{-2} 에서 약 9 dB의 이득을 갖는다. 계수를 적응적으로 변하게 하면 결정제한을 이용한 다중 사용자 수신기는 오울 10^{-2} 에서 약 2.2 dB의 성능향상을 갖는다.

4-3 페이딩 환경에서의 성능분석

이 절에서는 페이딩 환경하에서 MAI를 제거하는 수신기의 성능을 분석한다.

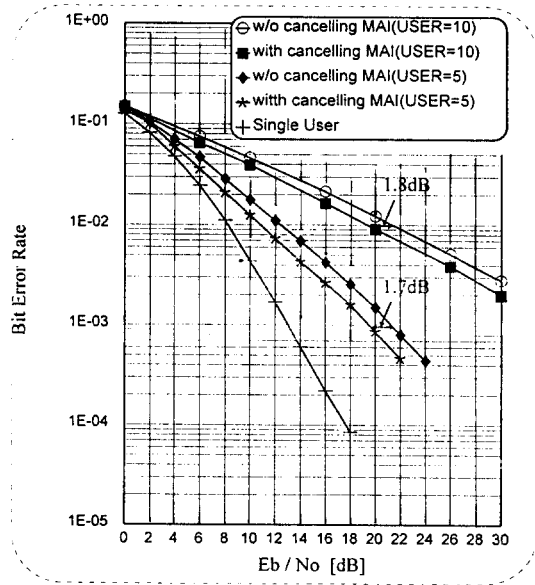


그림 7. 사용자 수에 따른 다중사용자 수신기의 성능분석 (사용자수=5, 10, $f_d=30$ Hz)

Fig. 7. Performance evaluations in fading channel($f_d=30$ Hz) according to the Number of users.

그림 7은 결정제환을 이용한 다중 사용자 수신기를 사용하였을 때, 사용자 수에 따른 성능 분석이다. 도플러 주파수는 30 Hz, 페이딩 경로수는 5, PN길이는 64로 설정하고 사용자를 5명, 10명으로 하였을 때의 결과를 비교한다. 그리고 다중 사용자 수신기 없이 RAKE 수신기만을 사용한 경우와 결정제환을 이용한 다중사용자 수신기를 사용하였을 때의 성능도 비교한다. 사용자가 증가함에 따라 다중 사용자 수신기를 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우 모두에 있어서 성능이 저하 되는 것을 볼 수 있다. 이때, 사용자가 5명인 경우 오율 10^{-3} 에서 결정 제환을 사용한 경우가 1.7 dB의 성능향상을 가지며, 사용자가 10명인 경우에는 오율 10^{-2} 에서 약 1.8 dB의 성능 향상을 갖는다.

그림 8은 MAI를 제거하는 상관해제 검출기와 결정제환을 이용한 다중 사용자 수신기를 비교한

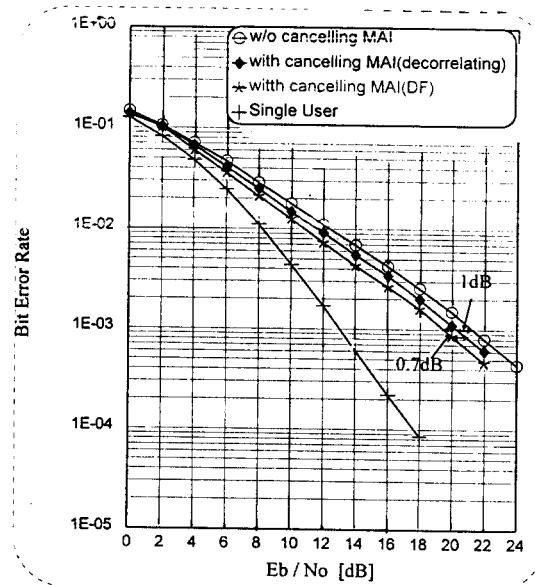


그림 8. 상관해제 검출기와 결정제환을 이용한 다중 사용자 수신기의 성능분석 (USER=5, $f_d=30$ Hz)

Fig. 8. Performance comparison between decorrelating detector and decision feedback detector.

다. 도플러 주파수 30 Hz, 페이딩 경로수 5인 레일리 페이딩 채널에서 PN길이 64를 사용하였을 때, 사용자가 5명인 경우에 대한 결과이다. 결과는 RAKE 수신기만을 사용한 경우, 결정제환을 이용한 다중 사용자 수신기를 사용한 경우 및 상관해제 검출기를 사용한 경우에 대해서 비교한다. 오율 10^{-3} 에서 상관해제 검출기는 RAKE수신기에 비해서 약 1 dB의 성능 향상을 갖는다. 결정제환을 이용한 다중 사용자 수신기는 RAKE수신기만을 이용한 경우에 대해서는 약 1.6 dB의 성능 향상을 갖으며, 상관해제 검출기에 대해서는 약 0.7 dB의 성능 향상을 볼 수 있다.

이상에서 본 논문에서 제안한 결정제환 다중사용자 수신기의 성능을 AWGN 채널과 페이딩 채널에서 비교 분석하였다. AWGN환경에서 상관기만을

사용하는 경우에 사용자 신호간의 상호상관이 커지면 성능이 저하된다. 사용자 신호간의 상호상관이 0.2인 경우와 0.5인 경우에 대해서 결정계환 다중사용자 수신기를 사용하면 상관기만을 사용하는 경우에 비해 약 2 dB 이상의 성능향상이 있었다. 페이딩 채널에서도 도플러 주파수가 30 Hz이고, 사용자 수가 5, 10명일 때 약 2 dB에 가까운 성능향상을 얻었다. 또한 도플러 주파수가 30 Hz이고, 사용자 수가 5명인 경우에 제안한 결정계환 다중사용자 수신기는 상관해제 검출기를 사용하는 경우에 비해 약 1 dB의 성능향상이 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 동기 CDMA 환경하에서 다중 사용자에 의한 간섭을 제거하기 위해 결정계환을 이용한 다중 사용자 수신기를 설계하고 그 성능을 분석하였다. MLSE 방법을 이용한 최적의 다중 사용자 수신기는 사용자 수에 따라 복잡도가 지수적으로 증가하므로, 복잡도가 사용자 수에 선형적으로 증가하는 준최적 다중 사용자 수신기를 설계하였다. 그 방법은 AWGN 채널인 경우에는 정합여파기, 페이딩 채널인 경우에는 RAKE 수신기 출력으로부터 결정계환을 이용하여 MAI를 제거하고, 그 출력을 결정단에 통과시켜 사용자 신호를 결정하도록 하였다. 결정계환의 계수는 사용자 신호의 상호상관 행렬에서 구해지는데, 사용자 신호의 상호 상관을 알지 못하는 경우는 적응 알고리즘에 의해서 얻어지도록 설계하였다. 실험에서는 동기 CDMA와, 사용자 신호 전력의 완전한 전력제어를 가정하였다.

AWGN에서 상호 상관관계를 알고 Cholesky decomposition에 의해 결정계환 구조의 계수를 정한 경우에는 성능이 단일 사용자의 경우에 가까워졌으나, 결정계환 구조의 계수를 적응 시키도록 하면 약 2 dB 정도의 성능 향상을 얻을 수 있다. 페이딩 채널의 다중 사용자 환경에서 실험한 결과 MAI를 제거하는 결정계환을 이용한 다중 사용자 수신

기는 RAKE 수신기에 비해 약 1.7 dB의 성능이 향상되었으며, 상관해제 검출기보다는 약 0.7 dB의 성능이 향상되었다.

본 논문에서는 사용자간 상호상관을 알지 못하므로, 결정계환 구조의 계수를 적응 알고리즘에 의해 적응되도록 하였다. 상호상관을 정확히 예측할 수 있다면 적응 알고리즘을 적용할 필요없이 성능을 더욱 크게 향상시킬 수 있다. 따라서, 페이딩 환경에서 사용자간의 상호상관을 정확히 예측하기 위한 채널 추정 알고리즘에 대한 연구가 앞으로 필요하다. 또한, 비동기 CDMA 채널에서도 적용할 수 있는 보다 일반화된 알고리즘에 대한 연구도 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] William C. Y. Lee, "Overview of Cellular CDMA," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. VT-40, no. 2, pp. 291-302, May 1991.
- [2] Klein S. Gilhousen, "On the Capacity of a Cellular CDMA System," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. VT-40, no. 2, pp. 303-312, May 1991.
- [3] Paymond L, Pickholtz, "Spread Spectrum for Mobile Communications," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. VT-40, no. 2, pp. 313-322, May 1991.
- [4] A. Duel-Hallen, "Decorrelating Decision Feedback Multiuser Detectors for Synchronous Code-Division Multiple Access Channel," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. COM-41, no. 2, pp. 285-290, Feb. 1993.
- [5] D. S. Chen and S. Roy, "An Adaptive Multiuser Receiver for CDMA System," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, vol. 12, no. 5, pp. 808-816, June 1994.
- [6] A. Duel-Hallen, "A Family of Multiuser

Decision-Feedback Detectors for Asynchronous Code-Division Multiple-Access Channels," *IEEE Tran. on Comm.*, vol. 43, no. 2, pp. 421-434, Feb. 1995.

- [7] Z. Xie, R. T. Short, C. K. Rushforth, "A Family of Suboptimum Detectors for Coherent Multiuser Communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, vol. 8, no. 4, pp. 683-690, May 1990.
- [8] M. Varanasi and B. Aazhang, "Multistage Detection in Asynchronous Code-Division Multiple-Access Communications," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 38, pp. 509-519, Apr. 1990.
- [9] S. Striglis, A. Kaul, N. Yang, B. D.

Woerner, "A Multistage RAKE Receiver for Improved Capacity of CDMA Systems," *IEEE Veh. Tech. Conf.*, pp. 789-792, 1994.

- [10] R. Lupas and S. Verdu, "Linear Multiuser Detectors for Synchronous Code-Division Multiple-Access Channels," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 35, no.1, pp. 123-136, Jan. 1989.
- [11] S. Verdu, "Minimum Probability of error for asynchronous Gaussian multiple access channels," *IEEE Tran. Inform. Theory*, vol. IT-32, no.1, pp. 85-96, Jan. 1986.
- [12] John G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 1989.

김 복 규

1994년 2월 : 연세대학교 공과대학 전자공학과 학사
 1996년 2월 : 연세대학교 본대학원 전자공학과 석사
 1996년~현재 : LG 전자 멀티미디어 연구소 TC Gr. 연구원

김 경 호

1992년 2월 : 연세대학교 공과대학 전자공학과 학사
 1994년 2월 : 연세대학교 본대학원 전자공학과 석사
 1994년~현재 : 연세대학교 본대학원 전자공학과 박사과정

이 재 용

1992년 2월 : 연세대학교 공과대학 전자공학과 학사
 1994년 2월 : 연세대학교 본대학원 전자공학과 석사
 1994년~현재 : 연세대학교 본대학원 전자공학과 박사과정

권 성 략

1992년 2월 : 연세대학교 공과대학 전자공학과 학사
 1994년 2월 : 연세대학교 본대학원 전자공학과 석사
 1994년~현재 : 연세대학교 본대학원 전자공학과 박사과정

강 창 언

1960년 : 연세대학교 전기공학과 학사
 1965년 : 연세대학교 대학원 전기공학과 석사
 1969년 : 미국 미시간 주립대학교 대학원 전기공학과 석사
 1973년 : 미국 미시간 주립대학교 대학원 전기공학과 박사
 1982년~현재 : 연세대학교 전자공학과 교수