

수신안테나 다이버시티와 정규화 기법을 적용한 멀티 레이트 DS-CDMA 시스템에 대한 홉필드 신경망의 다중 사용자 검출기

준회원 장 병 관*, 전 재 춘*, 김 홍 열*, 김 중 민*, 정회원 황 인 관**

Hopfield Neural Network based Multiuser Detector for Multirate DS-CDMA Systems using Receive Antenna Diversity and Normalization Method

Byung-kwan Jang*, Jae-choon Jeon*, Hong-youl Kim*, Jong-min Kim*, In-kwan Hwang**

Regular Members

요 약

본 논문에서는 주파수 선택성 페이딩 환경하의 Multi-rate DS-CDMA 시스템에 홉필드 신경망(Hopfield Neural Network)을 적용한 다중 사용자 검출기를 설계하였다. 심각한 페이딩 채널에서 열악한 성능을 보이는 다중 사용자 검출기가 최적의 성능을 얻을 수 있도록 페이딩에 의한 시변 요인을 제거하기 위해 정규화(normalization) 기법과 그 효과를 극대화하기 위한 방법으로 두 개의 수신안테나를 사용하는 시스템을 도입하였다. 또한 Multi-rate 시스템에서 다중 사용자 검출기가 최소 확산이득에 맞춰 처리되기 때문에 발생하는 성능의 열화를 피하기 위해 제안된 다중 사용자 검출기에 지연된 형태의 여러 입력을 받아 제어하는 기법을 제안하였다. 또한 역방향 링크는 부호 길이가 256 칩인 short 스크램블링 부호를 가정하고, short 스크램블링 부호의 주기성을 이용한 간단한 상관계수 예측 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘을 사용하여 주기적인 확산부호간 상관계수 행렬을 계산하고 Hopfield 신경망의 입력으로 사용하여 확산 코드의 주기에 상응하는 연산에 필요한 신경망회로의 복잡도를 $1/(64*64)$ 배로 단순화하였다. 다중 경로 채널 환경에서 제안된 홉필드 다중 사용자 검출기의 성능을 병렬 간섭 제거기(PIC:Parallel Interference Cancellation)와 비교하고 근원 거리 문제(Near-Far problem)에 대한 저항 능력을 분석하였으며 페이딩에 의한 수신신호의 시변 요인을 최소화하여 성능개선이 이루어짐을 보였다.

ABSTRACT

In this paper, we present a Hopfield neural network based multiuser detector for multi-rate DS-CDMA system in selective fading environments. We use normalization method and two receive antenna diversity to eliminate time-varying factor of fading to obtain better performance in fading channel. In order to cancel not only MAI but also IPI of multirate channels, three delayed Rake receiver outputs of 4 chip length are used as inputs of the proposed MUD. When the delayed 4chip length symbols are elements of same bit and have same polarity, we combine these inputs and sum up the corresponding correlation coefficients so as to increase the detection capability of the proposed multiuser detector, and by doing so we can avoid the performance degradation resulting from detection based on minimum spreading gain of multi-rate channels. We assume that short

* 충북대학교 전자공학과

** 충북대학교 전기전자공학부

논문번호: 020396-0907, 접수일자: 2002년 9월 7일

scrambling codes of 256 chip length are used an uplink, suggest a simple correlation estimation algorithm and circuit complexity reduction method by using cyclostationarity property of short scrambling code. The performance of proposed multiuser detector is compared with that of the parallel interference cancellation(PIC). It is verified that multiuser detector using Hopfield neural network more efficiently cancels multiple access interference(MAI) and IPI and obtains better bit error rate and near-far resistant than PIC.

1. 서론

고속 데이터 전송이 요구되는 DS-CDMA 방식은 제 3세대 고속 데이터 통신에서 이동통신시스템의 획기적인 발전에 중요한 역할을 하고 있으나 DS-CDMA 시스템 특성상 나타나는 타사용자 간섭 신호는 원근(Near-Far) 환경에서 심각한 문제로 인식되고 있으며 고속의 멀티미디어 서비스를 제공하기 위해 작은 확산이득을 가질수록 이러한 간섭은 시스템에 치명적이게 된다. 때문에 다중 접속 간섭(MAI : Multiple Access Interference) 제거 기술이 제안된 이후로 MAI를 효과적으로 제거하기 위한 다양한 방법들이 국제적으로 활발한 연구가 이루어져 왔다.^{[1]-[3]}

또한 다양한 멀티미디어 서비스를 제공하기 위해 요구되어지는 Multi-rate 시스템에 대한 간섭 제거기가 제안 및 연구되어지고 있다.^{[6],[7]}

최적 다중 사용자 검출기로 알려진 MLSE 방식은 사용자의 증가에 따라 계산량이 지수적으로 증가하여 현실적으로 구현이 어려운 단점을 가지고 있다. 그리하여 다중 사용자 간섭을 효과적으로 제거하고 복잡도를 줄이며 실시간 구현 및 VLSI로 구현이 용이한 준최적 검출기인 홉필드 신경망을 적용하여 다중 사용자 신호를 검출하는 연구들이 단순 가우시안 채널에서 이루어지고 있다.^{[4],[5]}

그러나 Multi-rate 시스템에서 최소 확산이득을 단위로 사용자 신호를 검출하고 주파수 선택성 페이딩 환경을 가정하면 심각한 MAI와 IPI(Inter Path Interference)가 발생되고 시변 요인으로 작용하여 성능 열화의 원인이 된다. 더욱이 Multi-rate 시스템에 적용되는 다중 사용자 검출기가 최소 확산이득으로 처리하는 과정에서 심각한 성능의 열화를 겪게 된다.

본 논문에서는 주파수 선택성 페이딩 환경에서 Multi-rate BPSK DS-CDMA 시스템에 홉필드 신경망을 적용하여 다중 사용자 신호 검출을 수행하였다. 또한 다중 사용자 검출기가 페이딩 환경에서 성능 열화가 크지만 백색잡음 채널에서 완전한 MUD로서 뛰어난 성능을 발휘할 수 있으므로 다중 경로

채널의 시변요인을 최소화 하기 위해 정규화 기법을 사용하였으며 수신 안테나 다이버시티를 사용하여 정규화 효과를 극대화 시켰다. 또한 긴주기 확산 부호의 시변특성에 대처하기 위해 주기적인 확산 부호간 상관계수 예측 알고리즘을 제안하고 이를 이용하여 신경망의 복잡도를 개선하였다. 그리고 Multi-rate 시스템의 특성으로 나타나는 여러 입력값을 효율적으로 제어함으로써 성능 향상을 시킬 수 있게 하였다. 이러한 결과를 병렬 간섭 제거기(PIC)와 그 성능을 비교 및 분석하였고 제안된 방식으로 얻어진 성능 개선 효과를 검증하였다.

II. 시스템 모델

K명의 사용자가 각각 다중 경로 페이딩 채널을 거친후 수신되는 BPSK DS-CDMA 시스템은 그림 1과 같다.

각 사용자의 BPSK 이진 데이터 b_k 는 A_k 의 진폭을 가지며 short scrambling code $c_k(t)$ 로 확산을 하여 다중 경로 채널을 통과하면 $S_k(t)$ 가 만들어진다.

$$S_k(t) = \sum_{l=1}^L A_k b_k \beta_{kl} c_k(t - \tau_{kl}) \tag{1}$$

여기서 L은 다중 경로의 수를 나타내고, 각 경로의 이득은 β_{kl} 로 k번째 사용자의 l번째 경로를 의미한다.

본 논문에서는 3개의 경로를 고려하여 시뮬레이션을 수행하였고 각 경로의 파라미터들의 값은

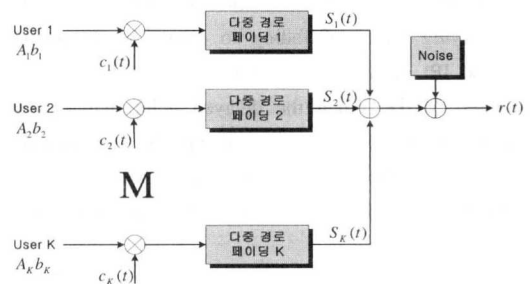


그림 1. BPSK DS-CDMA 시스템의 송·수신단

표 1. 다중 경로 채널 모델

경로	1	2	3
지연시간 (T_k)	0	1	2
채널이득 (dB)	-3	0	-2

COST 207 모델^[6]의 3탐을 모델로 구성하였으며 표 1과 같다. 지연 시간은 시스템이 3.84Mcps 의 데이터 레이트를 갖는 것으로 가정하여 구하였다.

그림 2는 Multi-rate DS-CDMA 시스템에 홉필드 신경망을 적용한 수신단을 보여준다. 수신된 신호 $r(t)$ 는 레이크 수신기와 확산 이득을 최소단위인 $4T_c$ 구간의 정합 필터를 통과한 후 출력이 y_k 가 되고, 통과된 신호는 다시 지연을 시켜 3개의 값이 홉필드 신경망으로 입력된다. 이렇게 3개의 입력을 만드는 이유는 주파수 선택성 페이딩에 의해 발생된 신호간의 간섭, 즉 IPI(Inter Path Interference)를 제거하기 위한 것이다. 만일 확산 이득이 32가 되는 사용자가 있다면 이들 3개의 신호는 같은 값을 가지게 되고 이들 값과 상관 계수 값을 적절히 결합하면 멀티 레이트 시스템에서 작은 확산 이득 값에 따라 다중 사용자 검출기의 성능이 열화되는 단점을 극복할 수 있게 된다. 그리하여 입력된 신호들은 홉필드 신경망 기반의 다중 사용자 검출기에서 간섭 성분을 제거하고 8십볼 만큼 sum-dump를 하면 각 사용자에 대한 비트 정보 \hat{b}_k 를 얻게 된다.

III. 다중 사용자 수신기로서의 병렬 간섭 제거기

그림 2의 점선부분에 나타난 부분, 즉 레이크 수신기는 다중 사용자로 인한 간섭을 제거하지 못하

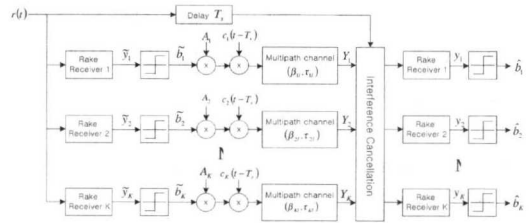


그림 3. 병렬 간섭 제거 수신기

기 때문에, MAI를 추정하여 간섭을 제거하는 다중 사용자 수신기인 병렬 간섭 제거 수신기의 구조가 그림 3와 같이 제시되고 있다. 그림 3에서 수신된 신호 $r(t)$ 는 레이크 수신기를 통과한 출력이 \tilde{y}_k 가 되고, 이 신호로 데이터 \tilde{b}_k 를 검출하여 송신기와 같은 구조로 \tilde{b}_k 를 재확산하여 Y_k 를 추정한다. 이렇게 생성된 MAI를 지연된 수신 신호 $r(t-T_s)$ 에서 제거하고 레이크 수신기로 다중 경로 성분을 분해하여 각 사용자의 정보 비트 \hat{b}_k 를 검출한다. 그러나 병렬 간섭 제거 수신기는 수신된 신호로 MAI를 추정하는데 있어서 오류 데이터의 부정확성이 성능을 좌우하며, MAI를 추정할 때 송신기와 동일한 구조를 포함하여야 하는 복잡성과 다단 간섭 제거기로 확장될 때의 계산량을 고려하면 실용성이 떨어진다.

IV. Hopfield 신경망을 적용한 다중 사용자 검출기

1. Hopfield 다중 사용자 검출기 구현

Hopfield 신경망은 그림 4와 같이 비선형 입출력

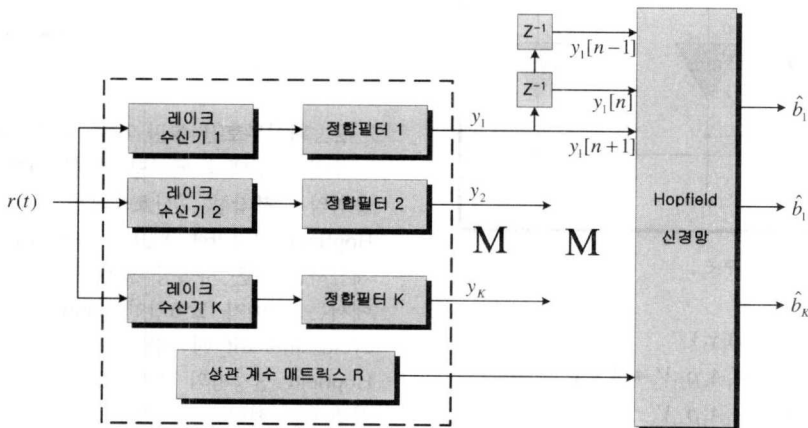


그림 2. 동기식 BPSK DS-CDMA 수신단

특성을 갖는 아날로그 증폭기와 RC 회로로 구성되고 R과 C에 의해 결정되는 $\tau(=RC)$ 값에 의해 수렴 속도가 결정된다.

여기서 Kirchoff의 전류 법칙에 따라 해석하게 되면 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$C \frac{dU_i}{dt} + \frac{U_i}{R} = \sum_{j \neq i} T_{ij} V_j + I_i, \quad i, j=1, 2, \dots, N(\text{user}) \quad (2)$$

이 식에서 T_{ij} 와 I_i 를 C에 대해서 풀면 하면 식 (3)으로 표현되고 출력 값은 식 (4)이 된다. 출력값을 보면 m+1번째 값이 m번째 값에 의해 변화되고 있다. 또 시정수 τ 가 1이면 병렬 간섭 제거기(PIC)와 동일한 형태를 가지게 되고 식(5),(6),(7),(8)을 통해 홉필드의 구조상 무한 단계 PIC(Infinite Stage PIC) 구조가 됨을 볼 수 있다.

$$\frac{dU_i}{dt} = -\frac{U_i}{\tau} + \sum_{j \neq i} T_{ij} V_j + I_i, \quad i, j=1, 2, \dots, N(\text{user}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_i(m+1) &= g(U_i(m+1)) = g(U_i(m) + dU_i) \\ &= g\left(U_i(m) - \frac{U_i(m)}{\tau} + \sum_{j \neq i} T_{ij} V_j + I_i\right) \end{aligned} \quad (4)$$

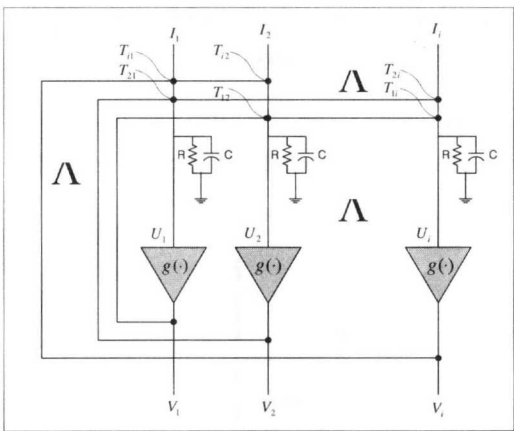


그림 4. 홉필드 신경망의 구조

$$\begin{aligned} V_1 &= g(T_{12}V_2 + T_{13}V_3 + A_1y_1) \\ &= g(-A_1A_2\rho_{21}V_2 - A_1A_3\rho_{31}V_3 + A_1y_1) \\ &= g(-A_1A_2\rho_{21}V_2 - A_1A_3\rho_{31}V_3 \\ &\quad + A_1(A_1b_1\rho_{11} + A_2b_2\rho_{21} + A_3b_3\rho_{31} + n_1)) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\hat{b}_1 = \text{sgn}(A_1b_1\rho_{11} + A_2(b_2 - \hat{b}_2)\rho_{21} + A_3(b_3 - \hat{b}_3)\rho_{31} + n_1) \quad (6)$$

$$\hat{b}_2 = \text{sgn}(A_2b_2\rho_{22} + A_1(b_1 - \hat{b}_1)\rho_{12} + A_3(b_3 - \hat{b}_3)\rho_{32} + n_2) \quad (7)$$

$$\hat{b}_3 = \text{sgn}(A_3b_3\rho_{33} + A_1(b_1 - \hat{b}_1)\rho_{13} + A_2(b_2 - \hat{b}_2)\rho_{23} + n_3) \quad (8)$$

식 (4)에서 활성화 함수 $g(\cdot)$ 는 비선형 특성을 갖고 미분 가능하며 단조증가함수인 시그모이드(sigmoid)함수를 사용한다. 본 논문에서는 식 (9)와 같은 $\tanh(\cdot)$ 함수를 사용하였다.

$$V_i = g(U_i) = \text{sigm}(\alpha U_i) = \tanh(\alpha U_i) = \frac{1 - e^{-\alpha U_i}}{1 + e^{-\alpha U_i}} \quad (9)$$

홉필드 신경망에 기반한 다중 사용자 검출기는 주파수 선택적 페이딩 환경에서 시변 요인으로 인해 성능이 열화 되는 단점이 있다. 따라서 수신 신호를 백색 잡음에 근사하도록 정규화 시켜주면 월등한 성능 개선 효과를 얻게 된다.

그림 5는 레이크 수신기에 정규화 회로가 추가된 형태를 보여준다.

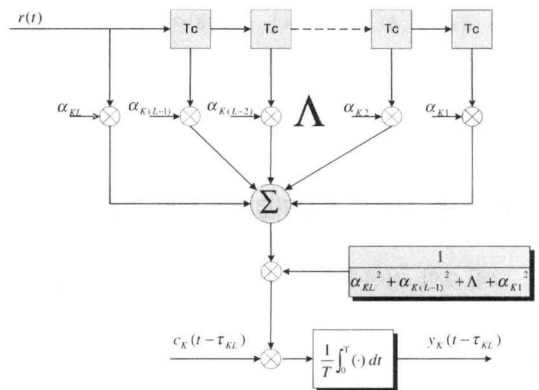


그림 5. 정규화 기법을 사용한 레이크 수신기

2. 확산부호간 상관 계수 행렬의 예측 알고리즘

주파수 선택적 페이딩 채널하에서 레이크 수신기 출력의 복잡한 신호상태를 정확히 계산하여 Hopfield 신경망에 필요한 상관계수 행렬을 정확히 계산하는 것은 사실상 불가능에 가까우나, 본 논문에서는 길이가 256칩인 short 스크램블링 코드의 cyclostationarity에 의한 수신신호의 주기적 특성과 Hopfield 신경망의 출력신호를 이용하여 확산부호간 상관계수 행렬을 간단히 그리고 정확히 예측할 수 있도록 하였다.

$$\hat{\mathbf{R}}_A(m) = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_{11}(m) & \hat{\rho}_{21}(m) & \hat{\rho}_{31}(m) & \hat{\rho}_{41}(m) \\ \hat{\rho}_{12}(m) & \hat{\rho}_{22}(m) & \hat{\rho}_{32}(m) & \hat{\rho}_{42}(m) \\ \hat{\rho}_{13}(m) & \hat{\rho}_{23}(m) & \hat{\rho}_{33}(m) & \hat{\rho}_{43}(m) \\ \hat{\rho}_{14}(m) & \hat{\rho}_{24}(m) & \hat{\rho}_{34}(m) & \hat{\rho}_{44}(m) \end{bmatrix} \quad m = 0 \sim M-1 \quad (10)$$

확산부호간 상관계수 매트릭스를 식 (10)와 같이 정의할 때 각 성분들의 값은 아래 식 (11), (12), (13)에서와 같이 실시간 평균을 계산하여 구한다.

$$\hat{\rho}_0 = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^N \hat{b}_{i,M-1}[l-1]y_{j,M-1}[l-1] & \sum_{l=1}^N \hat{b}_{i,0}[l]y_{j,M-1}[l-1] & \sum_{l=1}^N \hat{b}_{i,1}[l]y_{j,M-1}[l] \\ \sum_{l=1}^N \hat{b}_{i,M-1}[l-1]y_{j,0}[l] & \sum_{l=1}^N \hat{b}_{i,0}[l]y_{j,0}[l] & \sum_{l=1}^N \hat{b}_{i,1}[l]y_{j,0}[l] \\ \sum_{l=1}^N \hat{b}_{i,M-1}[l-1]y_{j,1}[l] & \sum_{l=1}^N \hat{b}_{i,0}[l]y_{j,1}[l] & \sum_{l=1}^N \hat{b}_{i,1}[l]y_{j,1}[l] \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\hat{\rho}_j(m) = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \sum_{l=m}^N \hat{b}_{i,m-1}[l]y_{j,m-1}[l] & \sum_{l=m}^N \hat{b}_{i,m}[l]y_{j,m-1}[l] & \sum_{l=m}^N \hat{b}_{i,m+1}[l]y_{j,m-1}[l] \\ \sum_{l=m}^N \hat{b}_{i,m-1}[l]y_{j,m}[l] & \sum_{l=m}^N \hat{b}_{i,m}[l]y_{j,m}[l] & \sum_{l=m}^N \hat{b}_{i,m+1}[l]y_{j,m}[l] \\ \sum_{l=m}^N \hat{b}_{i,m-1}[l]y_{j,m+1}[l] & \sum_{l=m}^N \hat{b}_{i,m}[l]y_{j,m+1}[l] & \sum_{l=m}^N \hat{b}_{i,m+1}[l]y_{j,m+1}[l] \end{bmatrix} \quad (12)$$

$m = 1 \sim M-2$

$$\hat{\rho}_j(M-1) = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \sum_{l=M-1}^N \hat{b}_{i,M-2}[l]y_{j,M-2}[l] & \sum_{l=M-1}^N \hat{b}_{i,M-1}[l]y_{j,M-2}[l] & \sum_{l=M-1}^N \hat{b}_{i,0}[l+1]y_{j,M-1}[l] \\ \sum_{l=M-1}^N \hat{b}_{i,M-2}[l]y_{j,M-1}[l] & \sum_{l=M-1}^N \hat{b}_{i,M-1}[l]y_{j,M-1}[l] & \sum_{l=M-1}^N \hat{b}_{i,0}[l+1]y_{j,M}[l] \\ \sum_{l=M-1}^N \hat{b}_{i,M-2}[l]y_{j,0}[l+1] & \sum_{l=M-1}^N \hat{b}_{i,M-1}[l]y_{j,0}[l+1] & \sum_{l=M-1}^N \hat{b}_{i,0}[l+1]y_{j,0}[l+1] \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 \mathbf{M} 은 한 주기동안 갖는 매트릭스의 수를 말한다.

그림 6는 주기적 특성을 갖는 확산 부호간 상관 계수 매트릭스를 Hopfield 신경망의 입력으로 사용하여 확산 부호의 연산에 필요한 신경망 회로의 복잡도를 단순화하기 위한 구조도이다. 그림에서 보이는 바와 같이 멀티 레이트 시스템에서 다중 사용자 검출기가 최소 확산이득에 맞춰 처리되기 때문에 발생하는 성능의 열화를 피하기 위해 제안된 다중 사용자 검출기가 지연된 형태의 여러 입력을 받아들여 효율적으로 제어함을 나타낸다. 그림 6과 같이 3개의 입력을 받아들임으로써 주파수 선택성 페이딩에 의해 발생된 신호간의 간섭, 즉 IPI(Inter Path Interference)에 의한 성능의 열화를 피할 수 있다. 만일 확산 이득이 32가 되는 사용자가 있다면 4칩 단위의 8개의 심볼은 같은 데이터를 갖게 되므로 이들 3개의 입력 신호는 모두 같은 값을 갖게 되는 경우와 2개가 같고 1개가 다른 경우, 반대로 1개의 다른 데이터와 2개의 같은 데이터가 입력이 되는 경우로 나눌 수 있다. 지연시킨 신호가 같은 경우 이 입력값들을 더하여 하나의 입력으로 받아들이고 이에 해당하는 상관 계수 값 또한 결합하여 하나의 입력으로 받아들이면 그 신호에 대한 세기가 커지

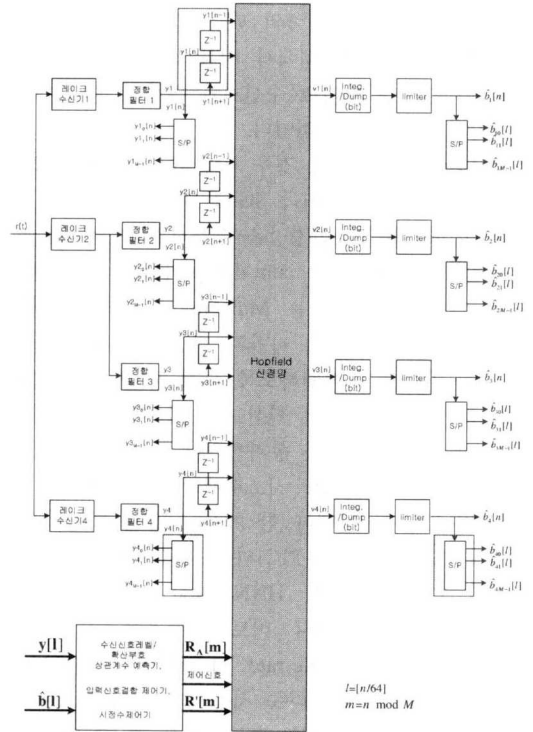


그림 6. 확산부호간 상관계수 행렬 알고리즘을 적용한 홉 필드 다중사용자 검출기

는 효과를 보이므로^[9] multi-rate 시스템에서 작은 확산 이득 값에 따른 저속데이터의 성능열화와 같은 다중 사용자 검출기의 단점을 극복할 수 있게 된다. 그리하여 입력된 신호들은 홉필드 신경망 기반의 다중 사용자 검출기에서 간섭 성분을 제거하고 8심볼 만큼 sum-dump를 하면 각 사용자에 대한 비트 정보 \hat{b}_k 를 얻게 된다.

V. 성능평가 및 분석

표 2. 시뮬레이션 환경

변수	값
사용자	3명
경로	3path
Code	short scrambling code code length : 256
확산 이득	32
최소 확산 이득	4
Modulation	BPSK

DS-CDMA 시스템에 대하여 위의 표 2와 같은

시뮬레이션 환경과 표 1의 다중 경로 채널을 가정하여 Multi-rate 시스템에서 시뮬레이션 하였다. 그리고 이 결과를 레이크 수신기와 결합된 병렬 간섭 제거기의 성능과 비교하였다.

Multi-rate 시스템의 경우 확산 이득을 SG=32로 가정하고 최소 확산 이득 SG=4의 단위로 정합 필터링 한 후 홉필드 신경망을 적용시켰다. 때문에 홉필드 신경망 후단에는 sum-dump 블록이 필요하게 되며 이와 같은 구조는 Multi-rate 시스템을 위한 구조로 홉필드 신경망 기반의 다중 사용자 검출기가 모든 레이트를 지원하도록 설계 하였다. 본 논문에서는 시뮬레이션에서 확산 이득이 32이므로 다시 8심볼만큼 정합 필터를 통과시켜야 하는 구조이다.

그림 7은 single-rate 시스템에서 확산 이득이 32인 경우에 수신 안테나 한 개를 사용한 병렬 간섭 제거 수신기(Antenna1-PIC)와 수신 안테나 한 개에 정규화 기법을 사용한 HNN 다중 사용자 검출기(Antenna1-HNN-Nor)의 비트 오류율을 보여준다. 그림에서 보듯이 single-rate 시스템에서 병렬 간섭 제거 수신기와 HNN 다중 사용자 검출기가 MAI를 제거하여 거의 최적 성능에 근접함을 알 수 있다.

그림 8은 Multi-rate 시스템에서 다중 사용자로 인한 간섭(MAI)를 제거할 때 한 개의 수신안테나를 사용하여 레이크 수신기와 결합된 병렬간섭 제거기(A1-PIC)와 홉필드 신경망(A1-HNN) 및 정규화시킨 홉필드 신경망(A1-HNN-Nor)의 다중 사용자 검출 성능을 보여주고 있다. 여기서 병렬 간섭 제거기는 single-rate 채널을 기준으로 신호를 검출하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 제안된 정규화 기법을 사용한 홉필드 다중 사용자 검출기는 지연된 여러 입력값을 사용하여 Multi-rate 시스템에서 최소 확산 이득으로 처리하는 과정에서 생기는 심각한 성능

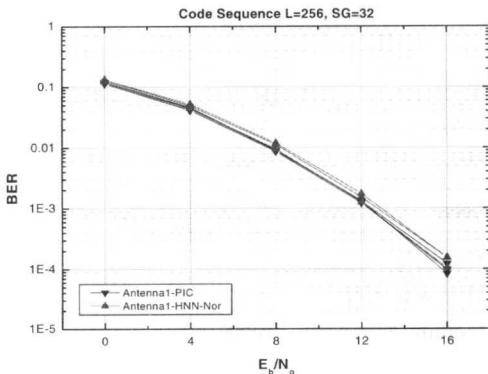


그림 7. single-rate 시스템의 HNN-MUD의 성능

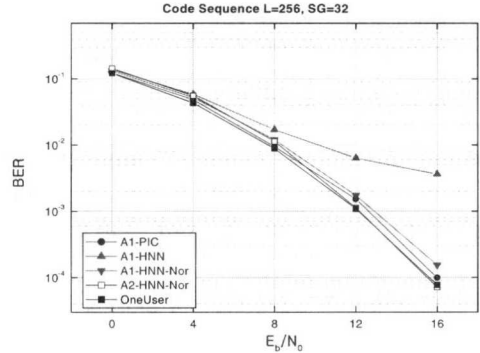


그림 8. Multi-rate 채널을 전제로 한 HNN-MUD의 성능

열화를 제거하여 single-rate의 병렬 간섭 제거기와 비슷한 성능, 즉 사용자가 한명일 때의 성능인 최적 성능에 근접하는 것을 볼 수 있다. 또한 정규화와 더불어 수신 안테나를 두 개 사용한 검출기(A2-HNN-Nor)의 성능이 신호대 잡음비가 커질수록 최적 값과 동일해짐을 볼 수 있다.

그림 9은 원근 문제를 보기 위한 것으로 타 사용자의 각기 다른 전력에 따른 자기 신호의 BER 성능을 보여주고 있다. 이 그림에서 한 개의 수신 안테나를 사용한 병렬 간섭 제거기(A1-PIC)는 타 사용자의 간섭이 클수록 성능이 열화되지만, 정규화 기법을 사용한 HNN 다중 사용자 검출기(A1-HNN-Nor)는 타 사용자의 간섭이 커지더라도 원하는 사용자(desired user)의 BER 성능은 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. 또한, 정규화와 더불어 수신 안테나를 두 개 사용하면 HNN 다중 사용자 검출기(A2-HNN-Nor)의 성능이 더 좋아짐을 볼 수 있다. 즉, 앞의 결과와 마찬가지로 Multi-rate 시스템에서 홉필드 신경망이 병렬간섭 제거기 보다 우수하고 정규화를 통해 월등한 성능 개선 효과가 있음을 알 수 있다.

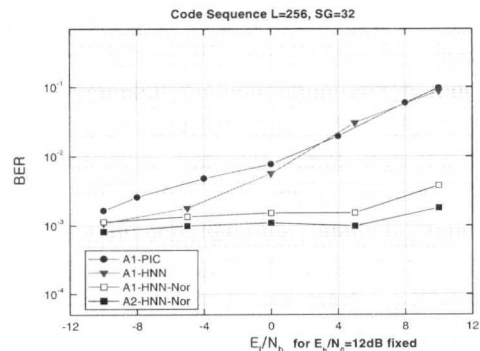


그림 9. 원근 문제에 따른 다중 사용자 검출기의 성능

