

시정수 제어 기법이 적용된 Multi-Rate CDMA 시스템을 위한 Hopfield 신경망 기반 다중 사용자 검출기

준회원 김 홍 열*, 장 병 관*, 전 재 춘*, 정희원 황 인 관

Time Constant Control Method for Hopfield Neural Network based Multiuser Detector of Multi-Rate CDMA system

Hong-Youl Kim*, Byung-Kwan Jang*, Jae-Choon Jeon*,
In-Kwan Hwang *Regular members*

요 약

본 논문에서는 다수의 사용자가 있는 주파수 선택성 페이딩 환경하의 multi-rate CDMA 시스템에서 Hopfield 신경망의 시정수를 제어하는 알고리즘을 이용하여 Hopfield 신경망 기반 다중 사용자 검출기의 국부 최소점 문제를 간단히 해결하고 설계된 검출기의 성능을 병렬 간섭 제거기와 비교 분석하였다. 또한 역방향 링크는 부호 길이가 256 칩인 short 스크램블링 부호를 가정하고, short 스크램블링 부호의 주기성을 이용한 간단한 상관계수 예측 알고리즘을 사용하여 주기적인 확산부호간 상관계수 행렬을 계산하고 Hopfield 신경망의 입력으로 사용하여 확산 코드의 주기에 상응하는 연산에 필요한 신경망회로의 복잡도를 $1/(64*64)$ 배로 단순화하였다. 그 결과 Hopfield 신경망을 이용한 다중 사용자 검출기(HNN-MUD)는 다중 사용자 간섭(MAI)을 효과적으로 제거하여 기존의 검출기에 비해 낮은 비트 오류율을 보였고 근원거리상황(near-far situation)에서도 타 사용자의 전력의 크기에 관계없이 거의 일정한 비트 오류율을 보여, 기존의 검출기 보다 성능이 향상됨을 보였다.

Key words : Hopfield neural network; time constant control; multi-rate CDMA, MAI

ABSTRACT

In this paper, we propose a time constant control method for sloving local minimum problem of the multiuser detector using Hopfield neural network for synchronous multi-rate code division multiple access(CDMA) system in selective fading environments and its performance is compared with that of the parallel interference cancellation(PIC). We also assume that short 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. It is verified that multiuser detector using Hopfield neural network more efficiently cancels multiple access interference(MAI) and obtain better bit error rate and near-far resistant than conventional detector.

* 충북대학교 전자공학과
논문번호 : 020374-0830, 접수일자 : 2002년 8월 30일

I. 서 론

DS-CDMA시스템은 사용자수가 증가함에 따라 타 사용자의 간섭(MAI)에 의한 시스템의 성능 저하와 불완전한 전력제어에 의한 근원거리 문제에 의해 치명적인 영향을 받게 된다. 최근 이런 문제들을 해결하기 위한 많은 방법들이 연구되었는데 그 중에서 일반적으로 알려진 최적 다중 사용자 검출기로 Verdu가 제안한 MLSE 검출기를 들 수 있다.^[5] 그러나 MLSE 다중 사용자 검출기는 사용자가 증가함에 따라 복잡도가 지수적으로 증가하여 실시간 구현이 어려워지게 된다. 따라서 실시간 구현이 가능하고 MAI를 효과적으로 제거하며 근원거리 저항 능력이 뛰어난 준최적 검출 방식에 대한 연구가 진행되어 왔다. 이 중에서 병렬 간섭 제거 수신기는 MAI를 제거하는 과정에서 송신기와 동일한 구조를 포함해야 하므로 구조적으로 매우 복잡하다는 단점을 갖고 있다. 그러나 그동안 연구된^{[1]-[4]} 준최적 검출기 중에서 신경망은 병렬처리 기능을 갖는 구조적인 장점으로 계산량이 매우 적을 뿐만 아니라 적응 속도도 매우 뛰어나고 회로의 구조가 단순한 장점을 갖고 있다.

Kechriotis는 가우시안 채널의 비동기 DS-CDMA 시스템에 대하여 Hopfield 신경망 수신기를 설계하여 기존 검출기 및 멀티 스테이지 검출기 보다 성능이 우수함을 보였지만 국부 최소점(local minimum)에 대한 문제는 해결하지 못하였고^[2] Wang의 TCNN (Transiently Chaotic Neural Network) 기법은 gradient descent 알고리즘과 다르게 다이내믹한 접근 방식을 도입하여 global minimum에 수렴시키는 방식을 제안하였지만 global minimum을 보장하는 것으로 보기 곤란하며 Hopfield 신경망이 갖는 아날로그 IC회로를 이용한 실시간 구현의 장점을 활용하기가 곤란하다.^[11]

본 논문에서는 새로운 접근 방식으로 수신 신호의 사용자별 신호 세기를 구별하여 Hopfield 신경망의 시정수를 제어하는 알고리즘을 사용하여 다중 사용자 검출기를 설계하였다. 제안된 알고리즘을 사용한 다중 사용자 검출기의 성능은 3명의 사용자가 있는 주파수 선택성 페이딩 환경하의 multi-code CDMA 시스템에서 측정하여 병렬 간섭 제거 수신기와 비교 분석하였다.

II. 시스템 모델

그림 1은 각각 m 개의 직교 코드를 갖는 K 명의 사용자가 다중 경로 페이딩 채널을 통해 전송되는 multi-code CDMA 시스템 모델을 보여준다. k 번째 사용자의 데이터 b_k 는 A_k 의 진폭을 가지며 채널을 구분하기 위해 길이가 32인 직교 코드 $W_k(t)$ 를 곱한 후 short scrambling 코드 $\alpha_k(t)$ 로 확산을 하여 다중 경로 페이딩 채널을 통과하여 $s_k(t)$ 가 만들어진다.

$$s_k(t) = \sum_{l=1}^L \left(\sum_{m=1}^{M_k} A_k b_{km} W_{km}(t - \tau_{kl}) \right) c_k(t - \tau_{kl}) \beta_{kl} \quad (1)$$

여기서 L 은 다중 경로의 수를 나타내고, β_{kl} 은 k 번째 사용자의 l 번째 경로의 이득을 의미한다.

본 논문에서는 3개의 경로를 고려하여 시뮬레이션을 수행하였고 각 경로의 파라미터들의 값은 COST 207 모델^[8]의 3탭을 모델로 구성하였으며 표 1과 같다. 지연 시간은 시스템이 3.84Mcps의 칩 레이트를 갖는 것으로 가정하여 구하였다.

그림 2는 multi-rate DS-CDMA 시스템에 Hopfield 신경망을 적용한 수신단을 보여준다. 수신된 신호 $r(t)$ 는 레이크 수신기와 확산 이득의 최소 단위인 4T_c 구간의 정합 필터를 통과한 주파수 선택성 페이딩에 의해 발생된 신호 간의 간섭, 즉 IPI(Inter Path Interference)를 제거하기 위해 지연을 시킨 3개의 값이 Hopfield 신경망으로 입력된다. 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 이들 값과 이에 해당하는 상관 계수 값을 곱 합하면 그 신호에 대한 세기가 커지는 효과를 보이므로^[9]

multi-rate 시스템에서 작은 확산 이득 값에 따른 저속데이터의 성능열화와 같은 다중 사용자 검출기의 단점을 극복할 수게 된다. 그리하여 입력된 신호들은 Hopfield 신경망 기반의 다중 사용자 검출기에서 간섭 성분을 제거하고 8심볼 단위로 sum-dump하여 각 사용자에 대한 비트 정보 \hat{b}_k 를 얻게 된다.

표 1. 다중 경로 채널 모델

경로	1	2	3
지연시간 (T _c)	0	1	2
채널이득 (dB)	-3	0	-2

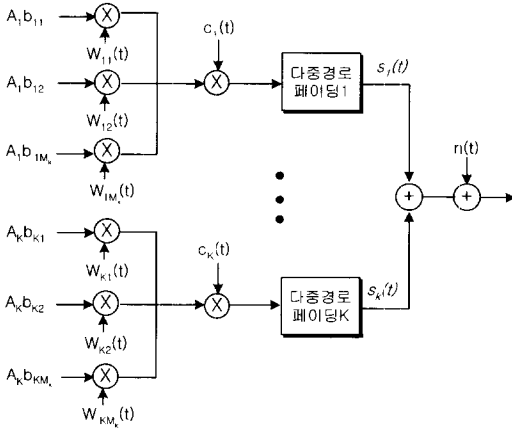


그림 1. Multi-Code CDMA 시스템의 송신기

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

이 식에서 T_{ij} 와 I_i 를 C 에 대해서 정규화를 하면 식 (3)으로 표현되고 출력 값은 식 (4)가 된다. 출력값을 보면 $n+1$ 번째 값이 n 번째 값에 의해 변화 되고 있다. 또 시정수 τ 가 1이면 병렬 간섭 제거기(PIC)와 동일한 형태를 갖게 되고 식(5),(6),(7),(8)을 통해 Hopfield의 구조상 무한단계 PIC(infinite stage PIC) 구조가 됨을 볼 수 있다.

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

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

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

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

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

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

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

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

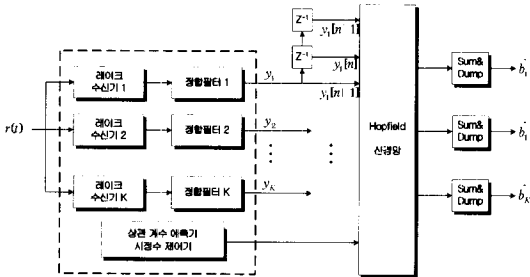


그림 2. 동기식 BPSK DS-SS-CDMA 수신단

III. Hopfield 신경망을 이용한 다중 사용자 검출기

1. Hopfield 신경망

Hopfield 신경망은 그림 3과 같이 비선형 입출력 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.^[2]

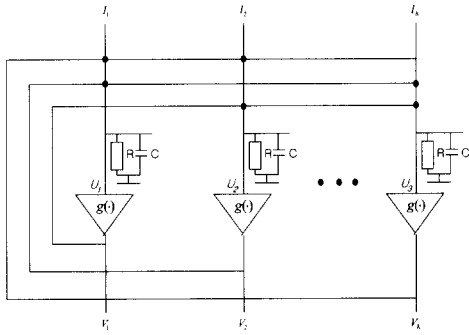


그림 3. Hopfield 신경망 모델

2. 시정수 제어 알고리즘

multi-rate CDMA 시스템에서 길이가 256인 short scrambling 코드를 사용할 경우 채널간 확산 이득의 차이로 인해 사용자간의 상관계수 특성이 변하게 되는데 본 논문에서는 상관계수의 주기성을 이용하여 이러한 시변 요인을 제거했을 뿐만 아니라 신경망의 회로를 간단히 하였다.^[9] 하지만 단순한 신경망에서 사용자가 많아지면 국부 최소점 문제에 빠지게 되는데 이는 수학적 접근이 용이하지 않다. 따라서 본 논문에서는 수신 신호의 사용자별 신호세기를 구별하여 Hopfield 신경망의 시정수를 제어하는 알고리즘을 사용하여 이러한 단점을 간단히 해결하였다. 즉, PIC의 성능을 개선하기 위하여 채택하는 groupwised PIC 내지는 SIC와 같이 수신 신호의 세기를 구분하여 신호 검출 순서를 제어하는 방식과 유사하나 본 논문에서 채용하는 시정수 제어 기법은 HNN에서만 적용 가능하며, SIC에 비하여 국부 최소점 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 장점을 제공한다.

Hopfield 신경망 기반 MUD의 입력으로 요구되는 확산 부호간 자기 상관계수 매트릭스와 수신신호 매트릭스의 곱을 식(10)이라고^[9] 할 때 시정수를 제어하는 알고리즘은 다음과 같다. 여기서 ij 는 사용자 $m-1, m, m+1$ 은 HNN의 입력으로 들어가는 지연된 3개의 데이터를 나타내며 m 은 64개의 입력 데이터 중 현재 데이터의 위치가 된다. 또한 식(11)의 n 은 입력으로 들어오는 데이터의 4칩 단위의 시간을 말하며 M 은 64가 된다.

$$\{\rho_{i,m-1,j,m-1}, \rho_{i,m,j,m}, \rho_{i,m+1,j,m+1}, \text{ for } i = j = 1 \sim K\} \quad (10)$$

식 (10)의 크기를 식(11)의 방식으로 비교 분리하고 Hopfield 신경망의 시정수 $R'_{j,l}C$ 를 분류된 크기순서에 따라 식 (12)와 같이 제어한다.

$$\begin{aligned} &\text{If Decreasing Order } \{\rho_{i,l,j,l}\} = k \\ &\text{for } i = j = 1 \sim K, k = 3K \\ &l = m-1, m, m+1, m = n \text{ mod } M \end{aligned} \quad (11)$$

그림 4는 앞에서 살펴본 시정수 제어 알고리즘에 따른 HNN의 동작시간 흐름도를 나타낸 것이다. 정합필터를 통과한 사용자의 신호를 크기의 순서대로 정렬한 후 신호의 크기가 큰 순서대로 Hopfield 신경망의 입력으로 들어가 동작하게 된다. 이 때 동작은 그림 4와 같이 크기가 큰 신호가 두 번 동작할 때 다음 크기의

$$\begin{aligned} R'_{j,l}[m] &= 2^{k-1} R_0 \\ \text{for } j &= 1 \sim K, l = m-1, m, m+1, k = 1 \sim 3K \end{aligned}$$

$$R[m] = \begin{bmatrix} R'_{1,m-1}[m] \\ R'_{1,m}[m] \\ R'_{1,m+1}[m] \\ R'_{2,m-1}[m] \\ R'_{2,m}[m] \\ R'_{3,m+1}[m] \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ R'_{K,m-1}[m] \\ R'_{K,m}[m] \\ R'_{K,m+1}[m] \end{bmatrix} \quad (12)$$

신호가 한번 동작하는 방법으로 동작한다. 즉 k 개의 신호가 입력으로 들어온다고 가정하면 가장 큰 신호는 2^{k-1} 번 동작하게 되고 다음 크기의 신호는 $2^{k-2}, 2^{k-3}, \dots, 2^1$ 번, 마지막으로 크기가 가장 작은 신호는 한번 동작하게 된다. 그리하여 신호 세기가 작은 사용자 정보가 검출되면 이의 결과를 반영하여 신호세기가 큰 사용자 신호에서부터 다시 신호 검출이 이루어지는 과정이 반복하여 이루어지게 된다.

따라서 PIC 및 SIC보다 국부 문제점의 해결에 보다 우수한 장점을 갖게 된다.

IV. 성능평가 및 분석

본 논문에서는 multi-code CDMA 시스템에서 3명의 사용자가 있는 상황을 고려하고 multi-rate 채널을 전제로 하여 모의실험을 하였다.

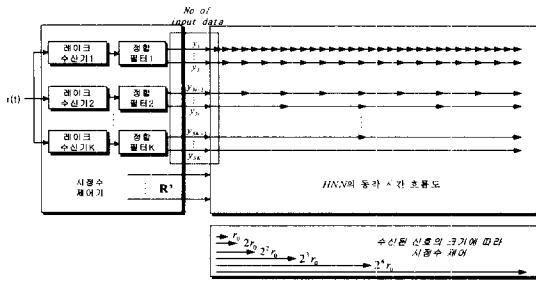


그림 4. 시정수 제어 알고리즘

각 사용자는 3개의 경로를 갖는 레일리 페이딩 채널을 통하여 전송되고 확산 코드는 길이가 256인 short scrambling 코드, 채널 코딩은 1/3 레이트의 구조장이 9인 컨벌루션 코드를 사용하였고 확산 이득은 4와 32로 하였다. 모의실험은 Monte Carlo 방식을 사용하여 병렬 간섭 제거 수신기 및 Hopfield 신경망을 적용한 다중 사용자 검출기(HNN-MUD)에 대해 그 성능을 평가하고 비교하였다.

그림 5는 single-rate 시스템에서 확산 이득이 32인 경우에 병렬 간섭 제거 수신기와 HNN 다중 사용자 검출기의 비트 오류율을 보여준다. 그림에서 보듯이 병렬 간섭 제거 수신기와 HNN 다중 사용자 검출기의 성능이 거의 비슷함을 볼 수 있다. 즉 확산 이득이 클 경우에는 성능의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 하지만 그림 6과 7에서와 같이 확산 이득이 작은 경우에는 HNN 다중 사용자 검출기가 병렬간섭 제거 수신기보다 뛰어난 성능을 보이고 있다.

그림 6은 single-rate 시스템에서 확산 이득이 4인 경우의 비트 오류율을 나타내는데 확산 이득이 작을 경우에도 코딩을 하지 않으면 성능의 차이가 많이 나지 않지만 코딩을 하는 경우에는 그림에서와 같이 HNN 다중 사용자 검출기의 성능이 월등히 좋음을 볼 수 있다.

그림 7은 multi-rate 시스템에서 확산이득이 4인 사용자가 2명, 32인 사용자가 1명인 경우의 비트 오류율을 나타낸다. 고속 데이터 사용자는 저속데이터 사용자의 전력이 작으므로 간섭의 영향을 적게 받는다. 따라서 single-rate일 때보다 성능이 좋아졌고 저속 데이터 사용자는 고속 데이터 사용자의 전력이 크기 때문에 간섭이 크게 작용하여 고속 데이터 사용자에 비해 성능이 좋지 않음을 볼 수 있다. HNN 다중 사용자 검출기는 고속 및 저속 데이터 사용자의 성능이 함께 좋아 졌지만 병렬 간섭 제거 수신기의 경우는 고속 사용자의 성능만 개선되고 저속 데이터 사용자의 성능은 코딩을 하기 전보다 더 나빠졌다.

그림 8과 9는 multi-rate 시스템에서 원근 상황하의 타 사용자의 전력에 따른 고속 및 저속 데이터 사용자(desired user)의 비트 오류율을 보여준다. 고속 데이터 사용자의 경우에는 HNN 다중 사용자 검출기의 성능이 병렬 간섭 제거 수신기와 유사하지만 저속 데이터 사용자의 경우에는 HNN 다중 사용자 검출기의 성능이 월등히 좋음을 볼 수 있다.

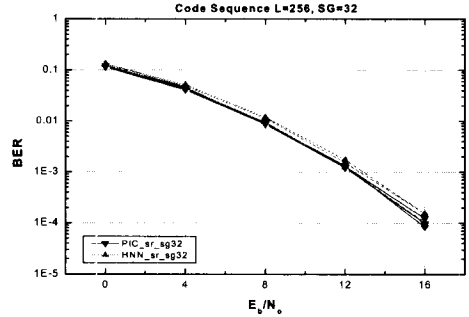


그림 5. single-rate 시스템의 병렬간섭 제거수신기, HNN-MUD의 비트 오류율(SG=32인 경우)

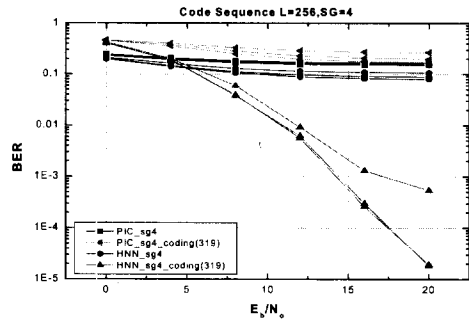


그림 6. single-rate 시스템의 병렬간섭 제거수신기, HNN-MUD의 비트 오류율(SG=4인 경우)

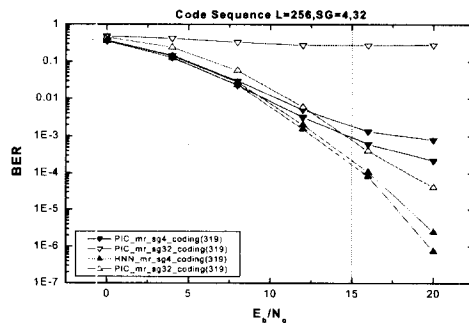


그림 7. multi-rate 시스템의 병렬간섭 제거수신기, HNN-MUD의 비트 오류율

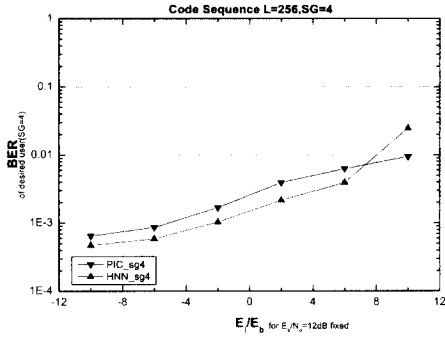


그림 8. 고속 데이터 사용자의 원근 강도(SG=4)

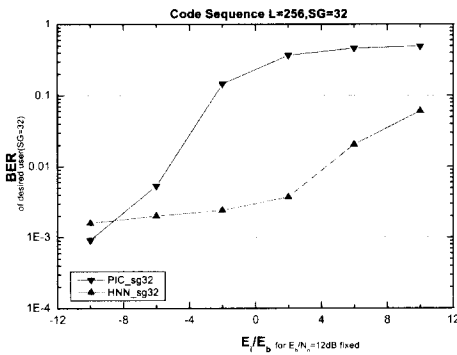


그림 9. 저속 데이터 사용자의 원근 강도(SG=32)

그림에서 타 사용자의 전력이 커지면 HNN 다중 사용자의 성능이 나빠지는 것을 볼 수 있는데 이것은 상호 간섭의 시변 요인이 남아있기 때문에 최적의 값으로 수렴하지 못한 것이며 안테나를 2개사용하여 시변요인을 감소시키고 레이크 수신기에서 최대 비 결합 방법을 사용하면 해결할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 multi-rate multi-code CDMA 시스템에서 MAI 및 IPI를 제거하기 위해 Hopfield 신경망을 적용한 다중 사용자 검출기를 제안하였다. 또한 국방 최소점 문제를 해결하기 위해 수신 신호의 사용자별 신호 세기를 구별하여 HNN의 시정수를 제어하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 3명의 사용자가 있는 주파수 선택성 페이딩 환경에서 모의

실험하여 성능을 측정하였다. 위의 결과에서 확인하였듯이 본 논문에서 제안한 다중 사용자 검출기는 MAI 및 IPI를 제거할 뿐만 아니라 근원거리 문제에 대한 저항 성능도 병렬 간섭 제거 수신기보다 뛰어난 것을 보였다. 물론 상호 간섭의 시변 요인이 남아있기 때문에 최적의 값으로 수렴하지 않았지만 안테나를 2개사용하여 시변요인을 감소시키고 레이크 수신기에서 최대 비 결합 방법을 사용하면 해결할 수 있다.

병렬 간섭 제거 수신기는 수신된 신호에서 MAI를 제거하는 과정에서 송신기와 동일한 구조를 포함해야 하므로 구조적으로 매우 복잡해서 사용자가 많아질수록 실효성이 떨어진다. 또한 PIC의 성능을 개선하기 위하여 채택하는 groupwise PIC와 SIC는 수신 신호의 세기를 구분하여 신호 검출 신호를 제어하는 방법이지만 MAI를 완전히 제거하지 못한다. 이에 반해 국방 최소점 문제가 완전히 해결된 Hopfield 신경망을 적용한 다중 사용자 검출기는 무한 단계의 검출기와 동일한 성능을 갖으면서도 단시간에 수렴하는 특성을 갖기 때문에 실시간 구현이 가능하다. 또한 회로의 구조가 단순하여 아날로그 IC회로로 구현하기가 쉬우므로 실제 시스템에 적용 가능성이 병렬 간섭 제거 수신기 보다 뛰어나다. 따라서 이번 연구의 결과는 HNN-MUD가 IMT-2000 이동기 시스템의 기지국에서 다중 사용자 검출기로 사용될 경우 성능개선 및 용량 증대를 가져옴은 물론 전력제어 또한 용이하게 할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Lupas and S. Verdu, "Linear Multi-user Detectors for Synchronous Code Division Multiple Access Channels", *IEEE Trans. on Inform Theory*, vol. 35, no. 1, pp. 123-136, Jan. 1989.
- [2] George I. Kechriotis and Elias S. Manolakos, "Hopfield Neural Network Implementation of the Optimal CDMA Multiuser Detector", *IEEE Trans. Neural networks*, vol. 7, no.1, Jan. 1996.
- [3] B. Aazhang, B. Paris and G.C. Orsak, "Neural Network for Multiuser Detection in Code Division Multiple Access Communications," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 40, no. 7, pp. 1212-1222, July 1992.

