

Synchronous DS-CDMA 시스템에서의 간략화된 RBF 다중사용자 수신기

정희원 고균병*, 이충용*, 강창언*, 홍대식*

Simplified RBF Multiuser Receivers of Synchronous DS-CDMA Systems

Kyun-Byoung Ko*, Chung-Yong Lee*, Chang-Eon Kang*,
Dae-Sik Hong* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 Synchronous DS-CDMA(direct sequence-code division multiple access) 시스템에서 준 최적의 RBF(radial basis function) 수신기를 제안한다. 제안된 수신기는 병렬적인 RBF Network들이 결합된 형태를 가지며, 각 RBF Network는 일반적인 RBF 수신기의 구조를 갖는다. 각각의 RBF Network는 다른 RBF Network에 할당된 사용자들에 의해 야기되는 간섭 성분으로 인해 성능이 저하된다. 따라서, 이러한 간섭 영향을 완화시킬 수 있는 병렬 간섭제거 기법(PIC)을 각 RBF Network들 간에 적용한다. 본 논문에서는 제안된 수신기가 요구되는 RBF의 개수(RBF의 중심값)를 줄일 수 있는 구조를 갖고, 수신과정에서 하나의 정보열당 요구되는 연산량 또한 줄일 수 있는 구조임을 확인하였다. 그리고, AWGN 채널에서의 모의실험을 통해 일반적인 수신기보다 복잡도를 줄인 제안된 수신기가 최적의 수신기와 유사한 성능을 나타냄을 확인하였다. 또한, 제안된 수신기가 다양한 시스템 요구사항에 대처할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Synchronous DS-CDMA, RBF Network, PIC

ABSTRACT

For synchronous direct sequence-code division multiple access (DS-CDMA) systems, the authors propose an adaptive radial basis function (RBF) receiver with suboptimal structure that reduces not only the complexity with regard to the number of centers but also the quantity of instructions required per one bit reception. The proposed receiver is constructed with parallel RBF networks. Each RBF network has the same procedure as the conventional RBF receiver. The performance of each RBF network is affected by interferences which are assigned to the other RBF networks because neither RBF network uses the full user set. To combat these interferences, the partial IC technique is employed. Monte Carlo simulations over additive white Gaussian noise (AWGN) channels confirm that the proposed receiver with its reduced complexity is able to obtain near-optimum performance. Moreover, the proposed receiver is able to properly cope with a various environment.

I. 서론

CDMA 기술에 기초를 둔 모든 시스템의 성능에 영향을 미치는 중요한 요인 중의 하나는 다중사용

자 간섭성분(multiple access interference : MAI)이다. 이러한 MAI의 영향을 극복하기 위한 방법으로 다중사용자 검파기법이 제안되어 이에 관련된 많은 연구들이 진행되어 왔다^{[1][2]}. DS-CDMA

* 연세대학교 전기전자공학과(pumi@itl.yonsei.ac.kr, clee@mcsp.yonsei.ac.kr, cekang@itl.yonsei.ac.kr, daesikh@itl.yonsei.ac.kr)
논문번호 : 020406-0916, 접수일자 : 2002년 9월 16일

※본 논문은 한국과학재단의 목적기초연구 사업(R01-2002-000-00153-0(2002))의 지원으로 수행되었습니다.

(direct-sequence code division multiple access) 시스템에서 이러한 연구는 Verdu에 의해 시작되어, 실질적인 구현 가능성을 고려한 준 최적의 수신기에 관련된 분야로 확장되어 왔다^{[1][2]}. 최근에는 적응 신호처리 기술이나 신경망을 이용한 새로운 구조의 다중사용자 수신기들이 제안되고 있다^{[3][4]}. 그 중에서, 가우시안 채널 환경의 DS-CDMA 시스템에서 최적 수신기는 RBF (radial basis function) Network를 이용하여 구현할 수 있음이 확인되었다^[4]. 이 연구는 광범위하게 수행된 RBF에 관한 기존의 연구들을 바탕으로 하고 있는데, RBF에 관한 연구는 지금까지 폭넓게 진행되어 여러 분야에서 그 성능의 우수함이 확인되었다^{[5]-[7]}. 그러나, RBF 다중사용자 수신기는 구현상의 복잡도 증가라는 큰 단점을 안고 있다. 따라서, RBF 다중사용자 수신기법에 관한 연구들도 시스템의 복잡도를 감소시킬 수 있는 방향으로 진행되어 왔다. 참고 문헌 [7]에서는 RBF 수신기에 선신호처리 기법을 적용하여 다중경로 환경에서 시스템 복잡도를 줄일 수 있는 방법을 제안하였다. 그러나, 이러한 방법은 한정된 환경에서의 RBF 수신기 복잡도 감소를 다루고 있어서 복잡도 감소를 위한 일반적인 구조를 제안하지 않고 있다.

따라서, 본 논문에서는 최적의 RBF 다중사용자 수신기의 복잡도를 줄일 수 있는 일반적인 구조를 제안하고자 한다. 그리고, 제안된 구조가 시스템 요구사항에 따라 유동성을 갖고 대처할 수 있음을 확인하도록 한다. 제안된 구조의 성능 검증을 위해서는 가우시안 채널 환경에서의 모의실험을 통해 여러 준 최적 수신기들의 성능과 비교하도록 한다.

II장에서는 DS-CDMA 시스템에 대해 설명한다. III장에서는 제안된 RBF 다중사용자 수신기의 구조와 그 복잡도를 설명한다. IV장에서는 제안된 수신기의 성능을 모의 실험을 통해 확인하고, 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

II. DS-CDMA 시스템

일반적인 DS-CDMA 시스템에서는 m 번째 사용자의 k 번째 비트가 사용자에 할당된 확산 코드로 대역 확산되어 전송된다. 사용자에 할당된 길이 N 의 확산 코드는 벡터의 형태로 다음과 같다.

$$c_m = [c_{m,0}, c_{m,1}, \dots, c_{m,N-1}]^T \quad (1)$$

그리고, m 번째 사용자의 전송신호는 다음과 같다.

$$s_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sqrt{P} a_{m,k} c_{m,n} p[t-nT_c] \quad (2)$$

여기서, $a_{m,k} = \{\pm 1\}$ 는 m 번째 사용자의 정보열이고, $k = \lfloor n/N \rfloor$ 이고, T_c 와 $T_b (= NT_c)$ 는 칩 간격과 비트 간격이고, $p[t]$ 는 구간 $[0, T_c]$ 에서 단위 크기를 갖는 구형파 함수이다. 그리고, P 는 수신 신호의 전력을 나타낸다. 다중접속 환경에서는 다른 사용자의 신호들이 더해진 후, 평균이 0이고 양측의 전력 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 가산성 백색 잡음(additive white Gaussian noise: AWGN), $n(t)$, 이 더해진다. 따라서, 전체 M 명의 사용자 신호들간에 칩간 동기가 일치한다 가정한다면 채널을 통과한 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} s_m(t) + n(t) \\ = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sqrt{P} a_{m,k} c_{m,n} p[t-nT_c] + n(t) \quad (3)$$

그리고, 수신 신호는 다음과 같이 이산적인 형태로 표현된다.

$$r_{(kN+n)} = \frac{1}{T_c} \int_{-\infty}^{\infty} r(t) p[t-(kN+n)T_c] \\ = \sum_{m=0}^{M-1} \sqrt{P} a_{m,k} c_{m,n} p[t-nT_c] + \eta_{(kN+n)} \quad (4)$$

따라서, k 번째 비트의 수신 벡터는 다음과 같다.

$$r^{(k)} = [r_{(kN)}, r_{(kN+1)}, \dots, r_{(kN+N-1)}]^T \quad (5)$$

일반적인 단일 사용자 수신기에서 0 번째 사용자의 k 번째 비트에 대한 추정값은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{a}_{0,k} = \sqrt{P} a_{0,k} \\ + \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{P} a_{m,k} c_{m,n} c_{0,n} + \mu_0 \quad (6)$$

여기서, 첫 번째 항은 원하는 신호성분, 두 번째 항은 다중사용자 간섭성분 그리고, 마지막 항은 잡음 성분이 된다. 이러한 다중사용자 간섭성분은 시스템의 성능에 영향을 미치는 요인이 되고, 다중사용자 수신기에서는 다른 사용자 신호에 대한 정보를 이용하여 다중사용자 간섭성분의 영향을 효율적으로 제거하고자 여러 기법을 적용하게 된다^{[1][2]}.

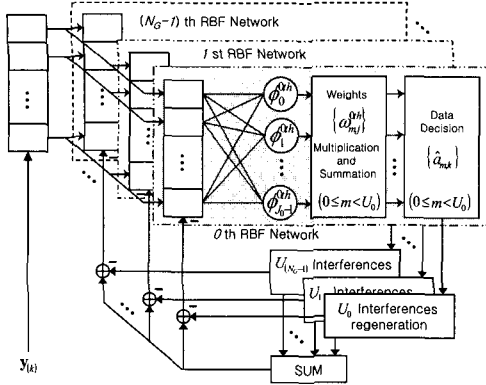


그림 1. 제안된 RBF 다중사용자 수신기 구조

III. 제안된 RBF 다중사용자 수신기 및 복잡도 비교

본 장에서는 제안된 수신기 구조를 설명하고, 제안된 수신기의 복잡도를 일반적인 RBF 수신기의 복잡도와 비교하도록 한다.

1. 준 최적의 RBF 다중사용자 수신기 구조

제안된 수신기의 구조는 그림 1과 같다. 그림에서와 같이 제안된 수신기에서는 전체 사용자를 N_C 집합으로 나누어 N_C 개의 RBF Network에 할당하게 된다. 그림 1의 수신기에서 $U_g (> 0)$ 명의 사용자가 g 번째 RBF Network에 할당된다고 할 때, 제안된 수신기를 $RBF[U_0, U_1, \dots, U_{N_C-1}]$ 로 정의한다.

0 번째 RBF Network에 중심값들은 U_0 명의 비트들로 만들 수 있는 가능한 모든 조합들을 나타낸다. 즉, U_0 명 사용자들의 확산코드를 이용해 0 번째 RBF Network의 중심값, C_j^{0th} for $0 \leq j \leq J_0 - 1$, 은 다음과 같이 초기화된다^[5].

$$C_j^{0th} = \sum_{m=0}^{U_0-1} \sqrt{P} a_m^j c_m = \begin{bmatrix} \sum_{m=0}^{U_0-1} \sqrt{P} a_m^j c_{m,0} \\ \sum_{m=0}^{U_0-1} \sqrt{P} a_m^j c_{m,1} \\ \dots \\ \sum_{m=0}^{U_0-1} \sqrt{P} a_m^j c_{m,N-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, $a_m^j = \pm 1$ 는 j 번째 조합의 m 번째 사용자의 비트가 되며, j 번째 조합의 m 번째 사용자에게 대한 결합계수 $\omega_{m,j}^{0th}$ 는 a_m^j 로 초기화된다^[5]. 따라서, g 번째 ($g=1, 2, \dots, N_C-1$) RBF Network에서의 C_j^{gth} 와 $\omega_{m,j}^{gth}$ 도 같은 방법으로 초기화된다. 초기단계에

서 각 RBF 수신기의 동작은 일반적인 RBF 다중 사용자 수신기의 동작과 동일하다. 식 (5)의 수신 신호 벡터는 RBF 수신기의 입력신호로 사용된다. m 번째 사용자가 g 번째 RBF network에 할당되었다면, RBF 수신기의 출력신호는 기저함수의 출력값들에 원하는 사용자에게 대한 결합계수를 곱하여 선형 결합함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다^[5].

$$\hat{a}_{m,k}[0] = \text{sgn} \left[\sum_{j=0}^{J_g-1} \omega_{m,j}^{gth} \exp \left(- \frac{\| \mathbf{y}_{(k)} - \mathbf{C}_j^{gth} \|^2}{(\sigma_j)^2} \right) \right] \quad (8)$$

이러한 초기단계의 각 RBF 수신기는 다른 RBF Network에 할당된 사용자들 신호에 영향을 받는다. 따라서, 제안된 수신기에서는 RBF 수신기간에 간섭제거 기법(interference cancellation : IC)을 적용한다^{[1][2]}. 그림과 같이 각 RBF 출력값으로 주어지는 추정된 정보열과 확산코드를 이용해 간섭성분을 재생성하고, 각각 수신신호에서 간섭성분을 제거하여 RBF 수신기의 입력값으로 할당한다. 그러므로, 한번의 간섭제거가 이뤄진 후의 0 번째 RBF 수신기의 입력 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_{(k)}^{0th}[1] = (r_{(kN+0)}^{0th}[1], r_{(kN+1)}^{0th}[1], \dots, r_{(kN+N-1)}^{0th}[1])^T \quad (9)$$

여기서, $r_{(kN+n)}^{0th}[1]$ 는 간섭 제거된 수신신호 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$r_{(kN+n)}^{0th}[1] = \sum_{m=0}^{U_0-1} \sqrt{P} a_{m,k} c_{m,n} + \sum_{m=U_0}^{M-1} \sqrt{P} (a_{m,k} - \omega_{IC}[1] \hat{a}_{m,k}[0]) c_{m,n} + \eta_{(kN+n)} \quad (10)$$

위 식에서 $\omega_{IC}[1]$ 는 첫 번째 간섭제거 단의 간섭제거 계수이다^[1]. 그리고, g 번째 RBF 수신기의 입력 신호 벡터, $\mathbf{y}_{(k)}^{gth}[1]$ for $g=1, 2, \dots, N_C-1$, 는 위와 같은 방법으로 얻어진다. 이렇게 다른 RBF Network에 할당된 사용자 신호들에 대한 간섭성분이 제거된 후에 초기단계와 같은 과정을 수행하여 다음과 같은 첫 번째 단계에서 m 번째 사용자의 k 번째 추정 정보열을 얻을 수 있다.

$$\hat{a}_{m,k}[1] = \text{sgn} \left[\sum_{j=0}^{J_g-1} \omega_{m,j}^{gth} \exp \left(- \frac{\| \mathbf{y}_{(k)}^{gth}[1] - \mathbf{C}_j^{gth} \|^2}{(\sigma_j)^2} \right) \right] \quad (11)$$

또한, 이러한 간섭제거 과정은 여러 단계 걸쳐 반복적으로 수행될 수 있다^[1]. 제안된 수신기에서는 간

표 1. RBF 수신기들의 복잡도 비교 (BPSK, 사용자수=M, 확산계수=N, IC 단계= S_{IC} , 그룹의 수= N_G)

Parameter	일반적인 RBF 수신기	제안된 RBF 수신기 [$U_0, U_1, \dots, U_{N_G-1}$] ($N_G \leq M$)
Required RBFs (centers)	2^M	$\sum_{g=0}^{N_G-1} 2^{U_g}$
Required weights	$M2^M$	$\sum_{g=0}^{N_G-1} U_g 2^{U_g}$
Additions for RBFs	$2^M(2N+M-1)-M$	$(S_{IC} + 1) \sum_{g=0}^{N_G-1} [2^{U_g}(2N+U_g-1)-U_g]$
Multiplications for RBFs	$2^M(2N+M+1)$	$(S_{IC} + 1) \sum_{g=0}^{N_G-1} 2^{U_g}(N+U_g+1)$
Additions for Center & Weight Update	$2M2^M + 2N$	$\sum_{g=0}^{N_G-1} 2U_g 2^{U_g} + 2NN_G$
Multiplications for Center & Weight Update	$2M2^M + N$	$\sum_{g=0}^{N_G-1} 2U_g 2^{U_g} + NN_G$
Additions for Partial IC	0	$MN(N_G-1)S_{IC}$
Multiplications for Partial IC	0	$M(N+1)S_{IC}$

섭제거 과정이 최종적으로 끝난 후에 중심값과 연결 가중치 값이 'decision directed learning algorithm'과 'LMS algorithm'으로 학습된다[6].

2. 제안된 수신기와의 복잡도 비교

표 1에서는 하나의 비트를 수신하는 동안에 요구되는 일반적인 RBF 수신기와 제안된 RBF 수신기의 복잡도를 비교하고 있다. 표에서 전체 사용자수는 M , 확산계수는 N , 결합된 간섭제거 단은 S_{IC} , 그룹의 수는 N_G 이다. 그림 2에서는 $N=15$, $M=8$, $N_G=(2,3,4)$, $S_{IC}=(1,2,3)$ 인 경우에 대해 표 1의 결과를 일반적인 RBF 수신기에 대한 제안된 수신기의 복잡도 비로 나타내고 있다. 그림을 통해 일반적인 RBF 수신기의 복잡도를 제안된 구조를 이용해 반 이하로 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

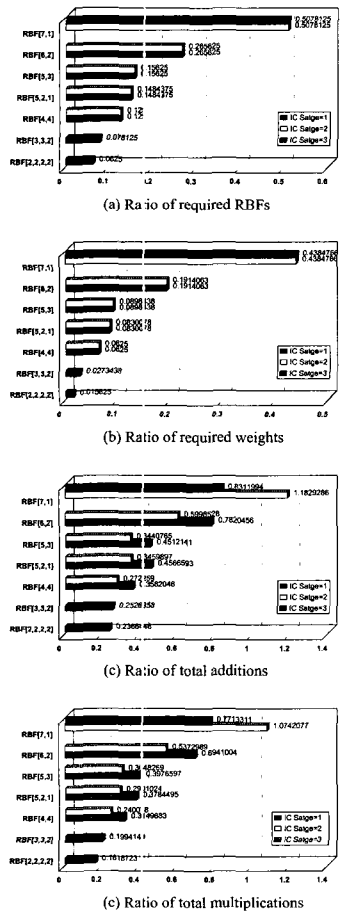


그림 2. RBF 다중사용자 수신기들간의 복잡도 비교 ($N=15$, $M=8$, $N_G=(2,3,4)$, $S_{IC}=(1,2,3)$)

3. Cross-Correlation을 기반으로 한 사용자 할당 알고리즘

제안된 수신기에서는 각 RBF Network에서 다른 RBF Network들에 할당된 신호들을 제거하기 위해 부분 간섭제거기법을 사용한다[1][2]. 간섭제거기법의 주된 문제점은 부정확한 간섭성분의 제거에 따른 간섭성분의 증가이다. 그리고, 제안된 수신기에서는 강한 상관성을 갖는 코드들이 다른 RBF Network에 할당되게 되면 이러한 문제가 심각하게 발생하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 다음의 사용자 할당 기법을 적용하도록 한다.

각각의 RBF Network에 사용자를 할당하기 위해서는 우선 사용자 코드들간의 Cross-correlation을 계산한다. 그리고, 강한 상관성을 갖는 코드들을 같은 RBF Network에 할당하도록 하며, 나머지 코드들은 다른 그룹에 속하는 코드들간의 Cross-correlation이 같은 그룹에 속하는 코드들간의 Cross-correlation보다 작은 값을 갖도록 할당한다.

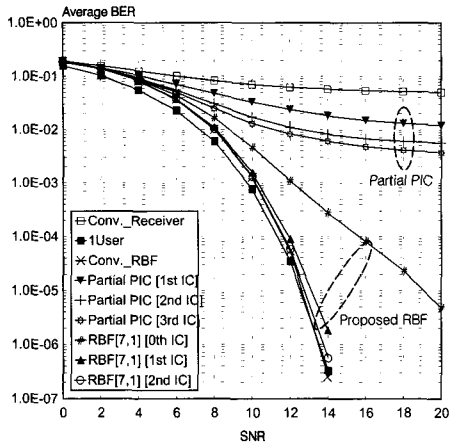


그림 3. Average BER of several detectors as a function of SNRs. ($M=8$, $N_C=2[U_0=7, U_1=1]$, $S_{IC}=2$, Proposed RBF[7, 1])

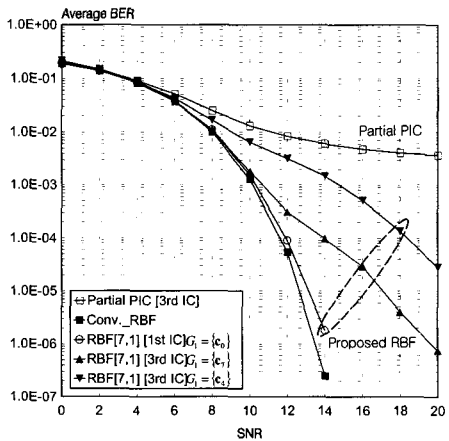


그림 4. Average BER of the proposed RBF[7, 1] for different user allocations as a function of SNRs. ($M=8$, $N_C=2[U_0=7, U_1=1]$, $S_{IC}=1$ or 3)

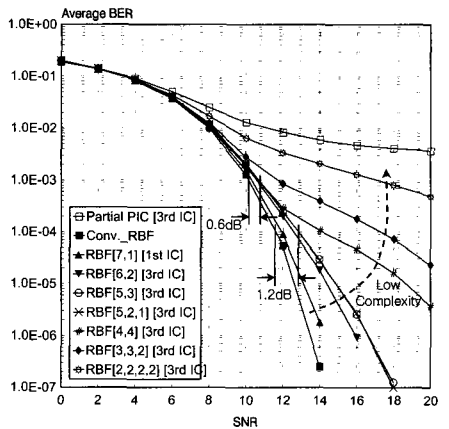


그림 5. Average BER of the proposed schemes as a function of SNRs. ($M=8$, $N_C \in \{2, 3, 4\}$)

IV. 모의 실험 결과 및 분석

본 장에서는 준 최적의 RBF 다중사용자 수신기의 성능을 AWGN 채널 환경에서의 모의 실험을 통하여 확인한다. 모의 실험에서는 확산계수가 15인 Random 코드를 각 사용자에게 할당하였다고 가정하였다. 본 논문에서 사용한 8개 코드들의 Cross-correlation 행렬은 다음과 같다.

$$R = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 15 & -1 & -1 & -1 & 3 & -1 & -1 & 3 \\ -1 & 15 & -1 & 3 & 7 & -1 & 3 & -5 \\ -1 & -1 & 15 & 3 & -5 & -1 & -5 & -1 \\ -1 & 3 & 3 & 15 & -1 & -1 & 7 & -1 \\ 3 & 7 & -5 & -1 & 15 & 7 & -1 & 3 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 7 & 15 & -5 & 3 \\ -1 & 3 & -5 & 7 & -1 & -5 & 15 & -1 \\ 3 & -5 & -1 & -1 & 3 & 3 & -1 & 15 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, $R_{i,j} = 1/N \sum_{n=0}^{N-1} c_{i,n} c_{j,n}$ 이다.

모의 실험에서는 제안된 수신기와 성능 비교를 위한 3단의 부분 간섭제거기법이 적용된 PIC (parallel interference canceller)를 고려한다. 그리고, PIC와 제안된 수신기의 부분 간섭제거기법에서는 $\omega_{IC}[1] = 0.4$, $\omega_{IC}[2] = 0.7$, $\omega_{IC}[3] = 1.0$ 를 간섭제거 계수로 사용하였다. 두 단의 간섭제거 단을 갖는 경우에는 $\omega_{IC}[1] = 0.7$, $\omega_{IC}[2] = 1.0$ 를 사용하였다. 제안된 수신기에서는 0.005와 0.001을 중심값과 결합계수의 학습율로 사용하였고, $(\sigma_j)^2 = N_0/2$ 가 모든 j 에 대하여 가정되었다. 신호 대 잡음비는 $SNR = P T_b / N_0$ 로 정의한다.

그림 3에서는 전체 사용자가 8명인 경우에 제안된 수신기 [7,1]과 여러 수신기의 성능을 SNR의 변화에 따라 보여주고 있다. 제안된 수신기에서는 c_0 의 사용자와 나머지 7명의 사용자를 첫 번째 RBF Network와 0번째 RBF Network에 할당하였고, 이를 $G_0 = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7\}$ 과 $G_1 = \{c_0\}$ 로 정의한다. 따라서, 제안된 수신기를 통해 요구되는 RBF의 개수는 256개에서 130개로 줄일 수 있으며, 요구되는 결합계수의 수는 2048에서 898로 줄일 수 있다. 이러한 시스템 복잡도의 감소에도 불구하고, 한단 이상의 간섭제거 과정을 갖는 제안된 수신기가 최적의 RBF 수신기와 유사한 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 그림 4에서는 제안된 RBF [7,1] 수신기의 성능을 여러 사용자 할당 방법에 따라 비교하고 있다. 일곱 번째 사용자(혹은 네 번째 사용자)가 첫 번째

RBF Network에 할당된 경우에는 ($G_1 = \{c_1\}$ or $G_1 = \{c_4\}$) 3단의 간섭제거 기법을 갖는 제안된 수신기의 성능이 $G_1 = \{c_0\}$ 이고 한 단의 간섭제거 기법을 적용한 수신기의 성능에 미치지 못함을 알 수 있다. 이러한 결과는 제안된 사용자 할당 알고리즘을 적용하지 않는다면, 부가적인 간섭제거 단의 증가가 성능향상을 보장하지 못하기 때문이다.

그림 5에서는 사용자 8명에 대해 여러 구조의 제안된 수신기 성능을 나타낸다. 수신기의 구조들의 복잡도는 그림 3과 같고, 제안된 사용자 할당 방법을 사용하였다. 그림 5와 그림 3의 비교를 통해, 제안된 구조의 수신기에서 복잡도 감소는 성능 열화에 비례하여 얻어짐을 알 수 있다. 제안된 수신기 [4,4]를 최적의 RBF 수신기와 비교할 때, 10^{-3} 의 BER을 기준으로 0.6dB의 성능 저하를 통해 요구되는 RBF 수와 결합계수의 수를 0.125와 0.0625로 줄일 수 있다. 또한, 요구되는 덧셈 연산량과 곱셈 연산량은 0.358과 0.315로 줄일 수 있다. 제안된 수신기 [5,3] 혹은 [5,2,1]은 10^{-4} 의 BER을 기준으로 1.2dB의 성능 저하를 통해 요구되는 RBF 수, 결합계수의 수, 덧셈 연산량과 곱셈 연산량을 각각 0.156, 0.09, 0.46 및 0.4 이하로 줄일 수 있다. 이러한 결과를 종합해 보면, 제안된 준 최적의 수신기 구조를 이용하여 다양한 사용자 환경에서 사용자들을 적절히 할당함으로써 요구되는 시스템의 복잡도와 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 RBF를 이용한 준 최적의 DS-CDMA 수신기 구조를 제안하고, AWGN 채널에서의 성능을 모의 실험을 통해 확인하였다. 제안된 수신기의 성능 검증을 위하여 최적의 수신기, 병렬간섭제거 수신기의 성능을 함께 제시하였다. 시스템의 복잡도와 관련하여, 제안된 RBF 수신기의 구조를 변화시켜서 최적의 RBF 수신기에 비해 요구되는 RBF의 개수, 결합계수의 수 및 요구되는 연산량을 줄일 수 있었다. 또한, 제안된 수신기에서 사용자들을 적절히 할당함으로써 시스템의 복잡도와 성능을 고려한 여러 환경에 대응할 수 있음을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] S. Verdu, MULTIUSER DETECTION. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1998.

[2] S. Moshavi, "Multi-User Detection for DS-CDMA Communications," *IEEE Communication Mag.*, pp. 124-136, Oct. 1996.
 [3] B. Aazhang, B. Paris, and G. Orsak, "Neural Networks for Multiuser Detection in Code-Division Multiple-Access Communications," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 40, no. 7, pp. 1212-1222, Jul. 1992.
 [4] U. Mitra and H. V. Poor, "Neural Network Techniques for Adaptive Multiuser Demodulation," *IEEE J. of Selected Areas in Comm.*, vol. 12, no. 9, pp. 1460-1470, Dec. 1994.
 [5] KyunByoung Ko, Sooyong Choi, Changeon Kang, and Daesik Hong, "RBF Multi-User Detector with Channel Estimation Capability in a Synchronous MC-CDMA System," *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 12, no. 6, pp. 1536-1539, Nov. 2001.
 [6] S. Chen, B. Mulgrew, and P. M. Grant, "A Clustering Technique for Digital Communications Channel Equalization using Radial Basis Function Networks," *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 4, no. 4, pp. 570-579, Jul. 1993.
 [7] R. Tanner and D. G. M. Cruickshank, "RBF based Receivers for DS-CDMA with Reduced Complexity," in *Proc. IEEE ISSSTA'1998*, vol. 2, pp. 647-651, 1998.

고 균 병(Kyun-Byoung Ko) 정회원
한국통신학회 논문지 제 26권 제 3A호 참조

이 충 용(Chung-Yong Lee) 정회원
한국통신학회 논문지 제 27권 제 2A호 참조

강 창 언(Chang-Eon Kang) 정회원
한국통신학회 논문지 제 23권 제 2호 참조

홍 대 식(Dae-Sik Hong) 정회원
한국통신학회 논문지 제 21권 제 8호 참조