

論文2003-40TC-8-1

# Rich-Scattering 페이딩 채널에서 RBF Network를 이용한 MIMO 수신기

## (MIMO Receiver Using RBF Network Over Rich-Scattering fading channels)

高均秉\*, 康昌彦\*, 洪代植\*

(Kyunbyoung Ko, Changeon Kang, and Daesik Hong)

### 요약

본 논문에서는 RBF Network를 이용한 새로운 수신기법을 MIMO 환경에서 제안한다. 그리고 제안된 수신기의 성능을 Rich-scattering 페이딩 채널에서의 모의 실험을 통해 검증한다. 모의 실험 결과를 통해 제안된 수신기가 MLD와 유사한 성능을 나타내고, VBLAST-ZF와 VBLAST-MMSE보다 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다. 그리고, 다양한 송수신 안테나의 개수 및 변조 기법에 따른 RBF 개수가 성능에 미치는 영향을 조사하였으며, 제안된 수신기의 성능을 RBF 중심값의 초기화 율에 따라 확인하였다.

### Abstract

This paper proposes a novel detection scheme using a radial basis function (RBF) network in a multi-input multi-output (MIMO) environment. In order to evaluate the performance of the proposed MIMO-RBF receiver, simulations are performed over the rich-scattering fading channel. Simulation results confirm that the proposed scheme shows the similar bit-error rate (BER) performance of a maximum likelihood detection (MLD) and outperforms Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time using minimum-mean-square-error nulling (VBLAST-MMSE) as well as VBLAST using zero-forcing nulling (VBLAST-ZF). Moreover, we investigate the effect on the performance of the number of RBF center with two modulation formats (BPSK and QPSK) and different number of transmit and receive antennas. The performance of the proposed detector is verified with respect to an initialization-rate of RBF centers.

**Keywords** : RBF Network, MIMO, Rich-scattering 페이딩 채널, VBLAST-ZF, VBLAST-MMSE

### I. 서론

최근의 연구에서는 Rich-scattering 이동 통신 채널환

경에서 송수신 단의 복수 안테나를 이용하여 이론적인 채널 용량에 근접할 수 있음을 보여 주었다<sup>[1-3]</sup>. 이러한 연구들에서는 채널 용량 증가를 위한 신호처리 기법들을 제시하였다. BLAST (Bell Laboratories Layered Space-Time) 구조 혹은, Vertical-BLAST (VBLAST)는 이러한 접근법중 하나이다<sup>[4,5]</sup>. 그리고, 참고문헌 [1]에서는 상호 독립적인 채널의 Flat-fading scattering 환경에서 이론적 채널 용량이 안테나 수의 증가에 따라 선형적으로 증가됨을 보여 주었다. VBLAST에서는 각

\* 正會員, 延世大學校 電氣電子工學科,  
(Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

※ 본 논문은 한국과학재단의 목적기초연구 사업(R01-2002-000-00153-0(2002))의 지원으로 수행되었습니다.  
接受日字:2002年11月5日, 수정완료일:2003年8月16日

안테나를 통해 정보열을 같은 전송률로 전송하게 된다. 이러한 전송 구조는 수신단에서 간섭 억압 및 제거 기술의 사용을 가능하게 한다<sup>[6]</sup>. 따라서, VBLAST 수신기는 정렬된 직렬 간섭제거 구조를 갖는 다중 사용자 수신기로 볼 수 있다<sup>[6, 7]</sup>. 직렬 간섭제거 방식은 다중 사용자 수신기에 관련된 분야에서 많이 연구되어 왔던 기술이며<sup>[6]</sup>, 다양한 다중사용자 검파 기법들이 다중 입출력 (MIMO: multi-input multi-output) 시스템에 적용될 수 있다.

본 논문에서는 MIMO 시스템의 수신기에 대한 RBF(radial basis function) network의 적용가능성을 Rich-scattering 이동 통신 채널 환경에서 살펴보고자 한다. 본 논문의 연구는 광범위하게 수행된 RBF에 관한 기존 연구들을 바탕으로 하고 있는데<sup>[8]</sup>, RBF에 관한 연구는 지금까지 폭넓게 진행되어 여러 분야에서 그 성능의 우수함이 확인되었다. 등화기에 적용된 경우에는 최적의 성능을 보이며, 정적인 통계적 특성을 갖는 시불변 채널 및 다중경로 페이딩 채널에서 우수한 성능을 보임이 확인되었다<sup>[9-13]</sup>. 그리고, CDMA 시스템에서는 RBF를 이용한 다중사용자 수신기에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 특히, RBF-based 다중 사용자 수신기는 가우시안 채널 환경에서 최적의 수신기임이 알려져 있다<sup>[14, 15]</sup>. 뿐만 아니라 수신기의 복잡도를 고려한 수신기 구조에 관한 연구와 다중로 페이딩 채널 환경에서 채널 추정 능력을 갖는 수신기 구조에 관한 연구도 진행되어 왔다<sup>[16, 17]</sup>. 따라서, 본 논문에서는 다중사용자 수신기법으로의 적용가능성이 검증된 RBF를 이용한 MIMO 수신기를 제안하도록 한다. 그리고, 제안된 수신기의 성능과 기존 수신기들의 성능을 Rich-scattering 레일리 페이딩 채널에서의 모의 실험을 통해 비교하도록 한다. 기존 수신기법들로는 VBLAST-ZF, VBLAST-MMSE, 및 MLD(maximum likelihood detection)가 고려되었다.

II장에서는 MIMO 시스템과 채널 모델에 대해 설명한다. III장에서는 RBF의 구조에 대하여 설명하며 RBF를 이용한 MIMO 수신기의 구조를 제안한다. IV장에서는 제안된 수신기의 성능을 모의 실험을 통해 확인한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

## II. MIMO 시스템 및 채널 모델

본 논문에서 획이 굵은 활자의 대문자 심벌과 소문자 심벌은 행렬과 벡터를 각각 나타내며, 행렬의 전치

(transpose) 연산과 Hermitian 연산은 위 첨자 T와 위 첨자 H로 각각 정의한다.

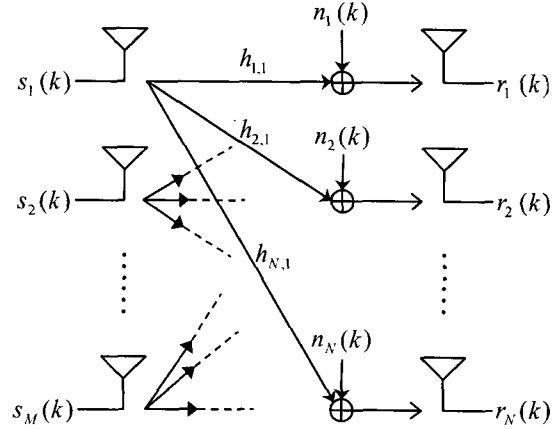


그림 1. MIMO 채널 모델

Fig. 1. Multi-input multi-output channel model.

MIMO 시스템에서 하나의 정보열은 복수 안테나 별로 할당되고 변조된 후 전송된다<sup>[4]</sup>. 전송 안테나의 수를  $M$ 이라 하고 각 안테나로 전송되는 정보의 심벌 간격을  $T_s$ 라 하면, 각 안테나 별로 전송되는 정보열의 심벌율은  $1/T_s$ 이고 전체 시스템의 전송률은  $M/T_s$ 이 된다. 그리고,  $M$ 에 상관없이 전체 전송 전력을 일정하게 하기 위해 각 안테나 전력을  $1/M$ 에 비례하도록 한다. 수신단에서는  $N$ 개의 안테나가 사용된다고 가정하며, 각 안테나는  $M$ 개의 전송 안테나로부터 전송된 신호가 채널을 통과한 후 수신되게 된다.  $M$ 개의 전송 안테나로부터의 신호들을 구별해내기 위해서는 수신안테나의 수  $N$ 이  $M$ 이상이어야 한다. 직접파 성분이 없는 Rich-scattering 환경에서 채널의 응답 행렬은  $\mathbf{H}^{N \times M}$ 으로 정의하고,  $h_{n,m}$ 는  $m$ 번째 송신 안테나로부터  $n$ 번째 수신안테나로의 복소 채널 응답을 나타내며  $E\{|h_{n,m}|^2\} = 1$ 을 가정한다. 이러한 채널 모델은 <그림 1>과 같다. <그림 1>과 같이 시간  $k$ 에서의 전송  $M \times 1$  벡터는 다음과 같이 표현한다.

$$\mathbf{s}(k) = [s_1^{(k)} \ s_2^{(k)} \ \dots \ s_M^{(k)}]^T \quad (1)$$

여기서,  $s_M(k)$ 는 시간  $k$ 에서  $M$ 번째 전송안테나의 심벌을 나타낸다. 본 논문에서는 복소의 이산시간 기저대역 모델과 단일 사용자 환경을 가정한다. 전송된 신호는 심벌율로 표본화되어 시간  $k$ 에서의 수신  $N \times 1$  벡터는

다음과 같다.

$$r(k) = \frac{1}{\sqrt{M}} H s(k) + n(k) \quad (2)$$

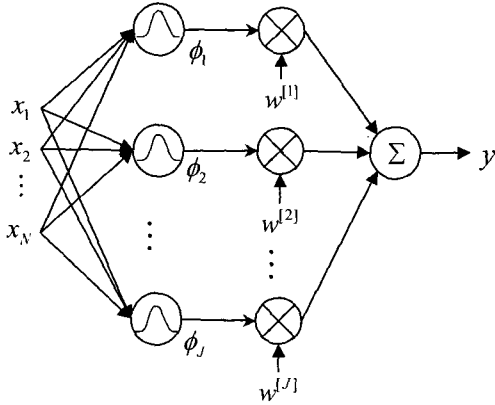


그림 2. Radial basis function Network의 구조  
Fig. 2. Structure of Radial basis function network.

여기서,  $n(k)$  는  $E[n(k)n^H(k)] = \sigma^2 I_N$  을 만족하는 시간  $k$  에서의 가산성 백색잡음으로 다음과 같이 표현된다.

$$n(k) = [n_1^{(k)} n_2^{(k)} \dots n_N^{(k)}]^T \quad (3)$$

### III. RBF Network와 제안된 MIMO-RBF 수신기

#### 1. RBF(Radial Basis Function) Network

일반적인 RBF의 구조는 <그림 2>와 같이 두 계층의 구조로 이루어진다<sup>[9]</sup>. 입력 신호 열은 J개의 RBF로 이뤄진 은닉층에 연결된다. 각각의 RBF에서는 할당된 중심값과 입력 신호 열의 거리를 계산하고, 거리의 제곱값을 비선형 함수로 통과시켜 출력값을 얻게 된다. 이러한 출력값들은 각각의 연결 가중치와 곱해지고 선형 결합을 통해 최종적인 출력값을 얻게 된다. 따라서, 최종 출력  $y$  는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y = \sum_{j=1}^J w^{[j]} \exp\left(-\frac{\|X - c^{[j]}\|^2}{(\sigma_{[j]})^2}\right) \quad (4)$$

여기서,  $c^{[j]}$  는 N차원을 갖는 j번째 기저 함수(basis function)의 중심 벡터이고,  $\sigma_{[j]}$  는 j번째 기저 함수의

폭을,  $w^{[j]}$  는 j번째 기저 함수의 연결 가중치를 나타내고 일반적으로 LMS (least mean square) 알고리즘에 의하여 학습된다<sup>[5]</sup>.

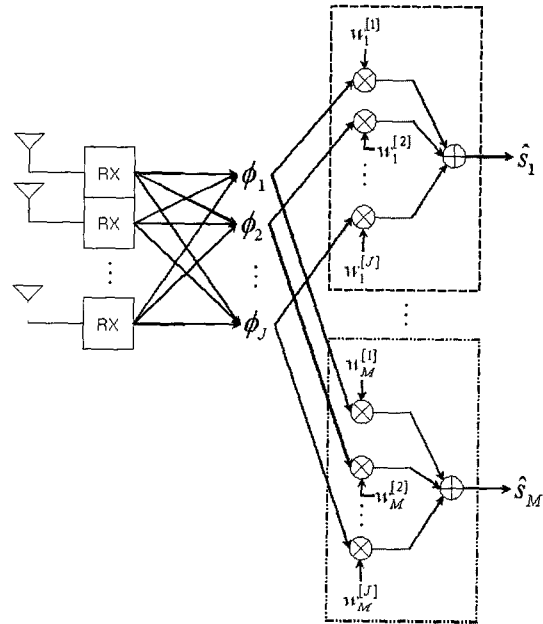


그림 3. RBF network를 이용한 MIMO 수신기 구조  
Fig. 3. The proposed MIMO-RBF receiver.

여러 가지 형태의 비선형 함수가 사용될 수 있지만, 본 논문에서는 가우시안 함수를 사용하도록 한다. 비선형 함수의 중심값  $c^{[j]}$  는 'supervised k-means clustering algorithm'이나 'unsupervised clustering algorithm'에 의해 학습된다<sup>[9]</sup>. 학습 과정은 입력 신호와의 거리가 가장 가까운 기저함수를 선택하고, 선택된 기저함수의 중심값을 입력 신호에 가깝도록 갱신시키는 것이라 할 수 있다.

#### 2. RBF network를 이용한 MIMO 수신기

<그림 3>은 제안된 MIMO-RBF 수신기의 구조를 나타내며, RBF Network는 식 (2)의 N 차원의 수신신호 벡터  $r(k)$  에 연결된다. 심벌당 비트 수를 b라 하면, 요구되는 기저함수의 수는  $J = (2^b)^M$  가 된다<sup>[6,7]</sup>. 이러한 경우 RBF Network의 중심 벡터들은 M 개의 안테나로부터 전송되는 모든 경우의 조합들을 나타내게 된다<sup>[6]</sup>. 따라서, 채널의 응답 행렬  $H^{N \times M}$  을 이용하여  $j (1 \leq j \leq J)$  번째 중심 벡터는 다음과 같이 초기화된다.

$$c^{[j]} = H s^{[j]} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M h_{1,m} s_m^{[j]} \\ \sum_{m=1}^M h_{2,m} s_m^{[j]} \\ \vdots \\ \sum_{m=1}^M h_{N,m} s_m^{[j]} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $s_m^{[j]}$ 는  $j$ 번째 조합의  $m$ 번째 전송안테나의 심벌을 나타낸다<sup>[15, 16]</sup>.  $w_m^{[j]}$ 는  $j$ 번째 기저함수의  $m$ 번째 전송안테나 연결 가중치로  $s_m^{[j]}$ 에 의해 초기화된다<sup>[16]</sup>. 중심값과 연결 가중치의 초기화 과정은 'adaptive supervised clustering algorithm'과 'LMS algorithm'으로 각각 학습될 수 있다<sup>[9]</sup>.

초기화 과정 후에 수신신호 벡터  $r(k)$ 는 RBF network를 이용한 MIMO 수신기의 입력으로 사용되며, 기저함수들의 출력에 아래와 같이 표현되는 연결 가중치 벡터  $w_m$ 가 곱해지고 선형 결합을 통해 결정 변수가 얻어지게 된다.

$$w_m = [w_m^{[1]} w_m^{[2]} \dots w_m^{[j]}]^T \quad (6)$$

따라서, 시간  $k$ 의 추정된 심벌 벡터는 다음과 같다.

$$\hat{s}(k) = [\hat{s}_1(k) \hat{s}_2(k) \dots \hat{s}_M(k)]^T \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^J w_1^{[j]} \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}(k) - \mathbf{c}^{[j]}|^2}{(\sigma_{1j})^2}\right) \\ \sum_{j=1}^J w_2^{[j]} \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}(k) - \mathbf{c}^{[j]}|^2}{(\sigma_{2j})^2}\right) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^J w_M^{[j]} \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}(k) - \mathbf{c}^{[j]}|^2}{(\sigma_{Mj})^2}\right) \end{bmatrix}$$

그리고 본 논문에서는 정보를 전송하는 동안에 학습률 0.2의 'decision directed learning algorithm'을 사용하였다<sup>[9]</sup>. 이러한 학습과정은 수신신호 벡터와 각 중심값들과의 거리를 계산하고, 거리가 가장 가까운 중심값을 수신신호 벡터로 이동시키는 것이라 할 수 있다<sup>[9]</sup>. 즉,  $M$  개의 안테나로 전송된 벡터에 의해 하나의 RBF 중심값이 학습된다. 따라서, 각 RBF 중심값의 위상성분들은 천천히 변화하는 페이딩 채널 환경에서 채널의 위상성분을 추정하도록 학습되게 된다<sup>[17]</sup>.

#### IV. 모의 실험 결과 및 분석

제안된 수신기의 성능을 비교 분석하기 위하여 Rich-

scattering 페이딩 채널 ( $f_d T_s = 0.001$ )에서 모의 실험을 수행하였다. 여기서,  $f_d$ 는 최대 주파수 편이(Maximum Doppler shift)를 나타낸다. MLD에서는 각  $T_s$ 당 완벽한 채널 정보를 수신기가 이용한다고 가정하였다. 그리고 제안된 수신기에서는 식 (5)의 초기화 과정에서만 완벽한 채널 정보를 사용하였다. 그리고, VBLAST-MMSE와 제안된 수신기에서는 AWGN의 분산을 알고 있다고 가정하였으며, 모든  $j$ 에 대해  $\sigma_{1j} = \sigma$ 를 제안된 수신기에서 가정하였다. 만약 매 심벌마다 채널 정보를 이용하여 식 (5)의 초기화 과정이 수행된다면, 제안된 수신기는 MLD로 간주할 수 있다. 이는 CDMA 시스템에 최적의 RBF 수신기와 같은 형태가 되기 때문이다. 따라서, 본 논문에서는 제안된 수신기의 성능을 초기화율을  $R_I$ 에 따라 살펴보도록 한다. 예를 들어  $R_I = 1/(40T_s)$ 과  $R_I = 1/(80T_s)$ 은 식 (5)의 초기화 과정이  $40T_s$ 와  $80T_s$ 마다 실행됨을 의미한다. <그림 4>와 <그림 5>에서는 VBLAST-ZF 및 VBLAST-MMSE가 각  $T_s$ 당 완벽한 채널 정보를 이용한다고 가정하였다. 반면에 <그림 6>과 <그림 7>에서는 VBLAST-ZF 및 VBLAST-MMSE가 각  $(R_I)^{-1}$ 당 완벽한 채널 정보를 이용한다고 가정하였다.

<그림 4>에서는 BPSK와  $f_d T_s = 0.001$ 의 경우에 대해 제안된 수신기의 평균 오류율 성능을 여러 수신기와 비교하고 있다. (a)에서는 송수신 안테나의 개수가 2인 경우를 나타내고, (b)에서는 송수신 안테나의 개수가 4인 경우를 나타낸다. <그림 5>에서는 변조기법이 QPSK인 경우에 대해 <그림 4>와 같은 형태로 제안된 수신기의 평균 오류율 성능을 여러 수신기와 비교하고 있다. 두 그림들은 제안된 수신기를 통해 MLD와 유사한 성능을, VBLAST-ZF와 VBLAST-MMSE보다 우수한 성능을 얻을 수 있음을 나타내고 있다. 또한, 제안된 수신기의 RBF 중심값들이  $f_d T_s = 0.001$ 인 천천히 변화하는 페이딩 채널에서 초기화율  $R_I = 1/(80T_s)$ 에 따라 효과적으로 학습되고 있음을 확인할 수 있다. 두 그림에서 (a)와 (b)를 비교해보면, 송수신 안테나의 개수가 큰 (b)의 경우가 (a)에 비하여  $R_I = 1/(40T_s)$ 의 성능과  $R_I = 1/(80T_s)$ 의 성능간의 차이가 작다는 사실을 알 수 있다. 이러한 현상은 (b)의 경우가 (a)의 경우와 비하여 RBF의 개수가 많음에도 불구하고 다이버시티 증가에 따른 성능 향상이 크기 때문이다. 반면에 <그림 4(a)>와 <그림 5(a)>(혹은 <그림 4(b)>와 <그림

5(b)>>를 비교해보면, 초기화 율에 따른 성능 차이 정도가 <그림 5>의 경우가 크다는 사실을 발견할 수 있다. 이는 같은 다이버시티를 갖으면서 그림 5(QPSK를 사용한 경우)의 경우에 RBF의 개수가 많기 때문이다. 즉, 학습되어야 할 RBF 중심값이 많은 경우에는 수신기의 성능이 초기화 율에 더욱 민감하게 반응한다고 할 수 있다.

<그림 6>과 <그림 7>에서는  $R_f$ 에 따른 여러 수신기의 성능을 변조기법이 BPSK 및 QPSK인 경우에 대하여 각각 나타내고 있다. VBLAST-ZF, VBLAST-MMSE 및 제안된 수신기는 매  $(R_f)^{-1}$  당 완벽한 채널 정보를 이용한다고 가정하였다. 제안된 수신기에서  $(R_f)^{-1}$ 는 초기화 과정후의 'decision directed training period'로 이해할 수 있다. 그림에서 보이는 것처럼,  $(R_f)^{-1}$ 가 증가함에 따라 성능저하가 발생하게 되는데, 이는 채널의 시변 특성의 영향에 의한 것이라 할 수 있다. 그림을 통하여,  $(R_f)^{-1}$ 의 증가에 따른 성능 열화 정도가 제안된 수신기의 경우 VBLAST-ZF와 VBLAST-MMSE에 비하여 적음을 확인할 수 있다. 또한, RBF의 개수가 많은 경우( $[M,N]=[2,2]$ 보다는  $[M,N]=[4,4]$ )가 성능 저하 정도가 크다는 사실을 알 수 있다. 이러한 결과는 하나의 전송 심벌당 한 개의 RBF 중심값이 학습되기 때문이다. 즉, 개개의 기저함수 입장에서 페이딩 율은  $J \times (f_d T_s)$ 가 된다. 따라서, 제안된 MIMO-RBF 수신기를 통해 적절한 성능을 얻기 위해서는 주어진 페이딩 율에 따른  $R_f$ 의 선택이 필요함을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 RBF Network를 이용한 MIMO 수신기를 제안하고, 그 성능을 Rich-scattering 페이딩 채널에서의 모의 실험을 통해 검증하였다. 모의 실험 결과를 통해 제안된 수신기가  $f_d T_s = 0.001$ 의 환경에서 MLN과 유사한 성능을 나타냄을 확인하였다. 그리고 초기화 율에 따른 성능 비교를 통하여, 제안된 수신기의 RBF 중심값들이 천천히 변화하는 페이딩 채널에서 효과적으로 학습됨을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture

for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," Bell System Tech. Journal., vol. 1, no. 2, pp. 41~59, 1996.

- [2] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," Wireless Personal Commun., vol. 6, no. 3, pp. 311~335, 1998.
- [3] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communications: Performance criterion and code construction," IEEE Trans. Inform. Theory., vol. 44, pp. 744~765, Mar. 1998.
- [4] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," in Proc. IEEE ISSSE'98, Pisa, Italy, pp. 295~300, 1998.
- [5] G. J. Foschini, G. D. Golden, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky, "Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi-element arrays," IEEE J. of Selected Areas in Comm., vol. 17, no. 11, pp. 1841~1852, Nov. 1999.
- [6] S. Verdú, MULTIUSER DETECTION. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1998.
- [7] A. Lozano and C. Papadias, "Layered Space-Time Receivers for Frequency-Selective Wireless Channels," IEEE Trans. on Comm., vol. 50, no. 1, pp. 65~73, Jan. 2002.
- [8] B. Mulgrew, "Applying Radial Basis Functions," IEEE Signal Processing Mag., pp. 50~65, Mar. 1996.
- [9] 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.
- [10] Sooyong Choi and Daesik Hong, "A Suboptimal Bayesian Equalizer using a Nonlinear Multilayer

- Combiner," in Proc. IEEE NNSP'99, IX, pp. 353~362, Aug. 1999.
- [11] Sooyong Choi and Daesik Hong, "Performance of RBF equalizer in data storage channels," in Proc. IEEE IJCNN'99, vol. 2, pp. 1077~1080, Jul. 1999.
- [12] Sooyong Choi and Daesik Hong, "Nonlinear multilayer combining techniques for Bayesian equalizers using the radial basis function network as a digital magnetic storage equalizer," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 35, no. 5, pp. 2319~2321, Sep. 1999.
- [13] S. Chen, S. Mclaughlin, B. Mulgrew, and P. M. Grant, "Adaptive Bayesian Decision Feedback Equalizer for Dispersive Mobile Radio Channels," IEEE Trans. on Comm., vol. 43, no. 5, pp. 1937~1946, May 1995.
- [14] U. Mitra and H. V. Poor, "Neural Network Techniques for Adaptive Multiuser Demodulation," IEEE J. of Selected Areas in Comm., vol. 12, pp. 1460~1470, Dec. 1994.
- [15] D. G. M. Cruickshank, "Radial basis function receivers for DS-CDMA," ELECTRONICS LETTERS, vol. 32, no. 3, pp. 188~190, Feb. 1996.
- [16] KyunByoung Ko, Sooyong Choi, Changeon Kang, and Daesik Hong, "A simplified multiuser receiver of DS-CDMA system," in Proc. IEEE IJCNN'01, vol. 3, pp. 1977~1982, 2001.
- [17] 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.

## 저 자 소 개



高均乘(正會員)

1997년 2월 : 연세대학교 전자공학  
공학사. 1999년 8월 : 연세대학교 전  
기컴퓨터공학과 석사. 1999년 9월~  
현재 : 연세대학교 전기전자공학과  
박사과정. <주관심분야 : 통신공학  
및 이동통신기술>

康昌彦(正會員) 第28卷 A編 第5號 參照

洪代植(正會員) 第34卷 S編 第9號 參照