

DS-CDMA 기반 전력선 통신 시스템을 위한 방사형 기저 함수를 이용하는 다중 사용자 검출기의 성능

황유민*, 김진영*

Performance of Multiuser Detector Based on Radial Basis Function for DS-CDMA Power Line Communication Systems

Yu Min Hwang* and Jin Young Kim*

요 약

본 논문에서는 멀티코드를 사용하는 직접 시퀀스-코드 분할 다중 접속 (DS/CDMA: direct sequence/code division multiple access) 전력선 통신 시스템에서 사용자 검출을 위해 방사형 기저 함수를 응용하는 모델을 제안하였다. 방사형 기저 함수 기반의 사용자 검출기의 성능은 기존의 부 최적화된 다중 사용자 검출기의 성능과 비트 에러율 면에서 비교 분석되었다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 모델인 역 상관기 기반 검출기보다 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였고, 다양한 환경에서 near-optimum 성능을 보이는 것을 확인하였다. 본 논문에서 이러한 결과들은 다중코드 DS/CDMA 전력선 통신 시스템에서 다중 사용자 검출기 디자인에 적용 될 수 있다.

Key Words : Multiuser detector, radial basis function, DS/CDMA, power line communication, multipath fading channel

ABSTRACT

In this paper, multiuser detector (MUD) based on radial basis function (RBF) is proposed and simulated for a multicode direct sequence/code division multiple access (DS/CDMA) system in a multipath fading channel. The performance of RBF-based MUD is compared with that of many suboptimal multiuser detectors in terms of bit error probability. From the simulation results, it is confirmed that the RBF-based MUD outperforms decorrelating detector, and achieves near-optimum performance under various environments. The results in this paper can be applied to design of MUD for a multicode DS/CDMA system.

I. 서 론

전력선 통신 시스템에서 near-far 문제를 극복하고 모든 사용자의 정보를 공동으로 검출하는 방법이 Verdu [1]에 의해 제안된 바 있다. Verdu는 additive white Gaussian noise (AWGN) 채널에서 최소의 bit error rate (BER)을 갖는 최적의 다중 사용자 검출기를 제안했지만, 사용자의 수 k 를 복잡도의 승수로 하는 검출기의 복잡도가 $O(2^k)$ 에 달하였다. 최적의 다중 사용자 검출기 (MUD: multiuser detector)는 기본적으로 최대 공산 시퀀스 (maximum likelihood sequence) 검출기이고 이것은 NP-complete 문제에 속하고 Viterbi 알고리즘을 기반으로 하는 정합 필터 뱅크로 구성되어 있다.

따라서 사용자 수가 증가함에 따라 기하 급수적으로 복잡도가 증가하는 MUD를 개선하기 위해 차선책으로서의 새로운 다중사용자 검출기가 제안된 바도 있다 [2]. 이러한 부최적화된 검출기는 역 상관 검출기나 다단계 검출기, 신경망 기반 검출기, 연속적 간섭 억제 검출기, 평행적 간섭 억제 기반 검출기, 적응적 검출기 그리고 반복적 회귀성 검출기 등등을 포함한다. 본 논문에서는 신경망 기반 MUD를 고안하는 것에 집중한다.

최근 신경망 시스템에 속하는 방사형 기저 함수 (RBF: radial basis function) 네트워크에 관한 연구가 주목받고 있다. 방사형 기저 함수망은 most likely pattern (MLP) 네트워크의 일종이며 다차원 공간에서 곡선 맞춤 보간법에 근간을 둔다. 또한 그 구조는 최적 Bayesian 솔루션과 일치한다.

* 본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업의 일환으로 수행되었음 (NRF-2016R1D1A1B03933872).

*광운대학교 유비쿼터스 통신 연구실 (yumin@kw.ac.kr, jinyoung@kw.ac.kr)

접수일자: 2017년 01월 03일, 수정완료일자: 20101년 02월 01일, 최종재확정일자: 2017년 02월 02일

최근 효과적인 다중사용자 검출을 위해 다중 통신 속도를 지원하는 전송 방법을 고려하고 있다. 신경망 기반 다중검출기에 관한 이전의 연구에서는 code division multiple access (CDMA) 채널을 통과하는 단일 속도 (통상적으로 음성 데이터 송신을 위한) 전송에 대해서만 고려하였다 [3,4]. 그러나 다중 속도 direct sequence-CDMA (DS-CDMA)를 위한 방사성 기저 함수 기반 다중사용자 검출기에 관한 연구는 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 방사성 기저 함수 기반 다중 사용자 검출기를 제안하며 다중코드 DS/CDMA 전력선 통신 시스템 환경과 다중경로 페이딩 채널을 시뮬레이션 환경 변수로 고려하여 컴퓨터 실험 결과를 획득하였다. 또한 본 논문에서는 다중 속도 전송 전략의 하나로서 제안하는 기법에 다중 코드 전송 방법을 이용하였다. 방사성 기저 함수 기반 다중사용자 검출기의 성능은 앞서 기술한 다양한 부최적의 다중사용자 검출기들과 대조하여 BER 관점에서 성능 비교하였다.

이 후 논문의 전개는 제 2장에서 시스템 모델을 소개하고, 제 3장에서 전력선 통신 시스템 기반의 다중 코드 전송 모델과 방사성 기저 함수 기반 다중 사용자 검출기를 제안한다. 제 4장에서 시뮬레이션 결과를 제시하며, 제 5장에서 결론을 짓는다.

II. 시스템 모델

DS/CDMA 전력선 통신 시스템 [5] 을 위한 다중 속도 전송을 달성하기 위해 다중 코드 방식의 DS/CDMA 시스템을 고려하였다. 이 시스템은 데이터 전송 속도에 따라 하나 또는 다중의 병렬 코드 채널을 통과해서 전송하는 방식이다. 사용자는 다중의 확산 시퀀스를 통해 정보를 전송한다. 다중 속도 전송을 위한 DS/CDMA 전력선 통신 시스템의 수신부 모델은 그림 1과 같이 나타내었다. 각각의 코드 채널로부터 수신된 신호는 역확산을 위해 정합 필터 뱅크를 통과하게 된다. 정합 필터 뱅크의 결과물은 병렬-직렬 변환기를 거치고 칩 (chipt) 속도에 따라 샘플링 된다. 이 샘플러를 거친 신호는 전송된 데이터를 추산하기 위해 방사성 기저 함수 처리기를 통과한다.

III. 성능 분석

본 논문에서는 DS/CDMA 전력선 통신 시스템에 k 명의 사용자가 존재한다고 가정한다 ($1 \leq k \leq K$). k 번째 사용자는 N_k 개의 데이터 심볼 스트림을 생성한다. 그러므로

$N = \sum_{k=1}^K N_k$ 개의 데이터 심볼들이 전송된다. n 번째 스트림 ($1 \leq n \leq N$)은 다음과 같이 주어진다:

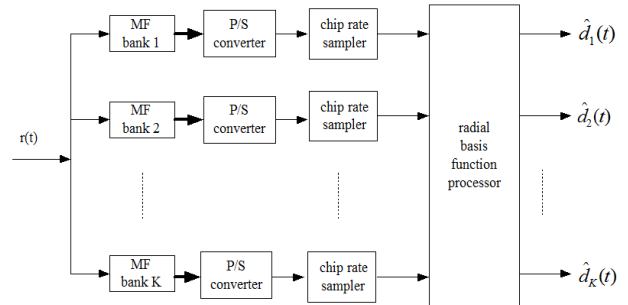


Fig. 1. 다중 속도 전송을 위한 DS/CDMA 전력선 통신 시스템의 수신부 모델.

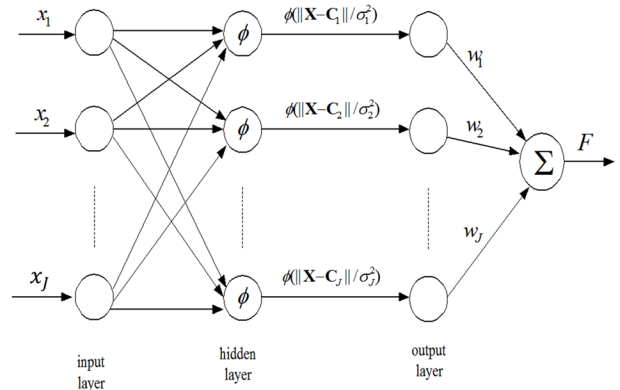


Fig. 2. 방사형 기저 함수의 블록 다이어그램.

$(\dots, d_{0,n}, d_{1,n}, d_{2,n}, \dots)$. 데이터 심볼 $d_{j,n}$ 은 독립적 확률 변수하고 평균 0과 단위 분산을 가진다. k 번째 사용자는 N_k 개의 주기적 확산 시퀀스를 생성하며 그 주기는 G 이다. 확산 시퀀스를 n 번째 데이터 스트림을 확산시키며 이는 다음과 같이 주어진다: $(\dots, c_{0,n}, c_{1,n}, c_{2,n}, \dots)$. n 번째 데이터 스트림은 n 번째 확산 시퀀스에 의해 확산되며 다음의 신호를 생성하기 위해 변조된다:

$$s_n(t) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} d_{\lfloor t/G \rfloor, n}(t) c_{i,n}(t) \psi(t - iT_c) \cos(\omega_c t), \quad (1)$$

여기서 $d_{i,n}(t)$ 는 데이터 시퀀스이고 비트 지속기간 T_b 를 갖는다. $c_{i,n}(t)$ 는 확산 시퀀스이고 칩 지속기간 T_c 를 갖는다. ω_c 는 전송 주파수이고 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 의 정수를 의미한다. $\psi(t)$ 는 칩 파형이다. 칩 파형은 “zero interchip interference”를 위한 Nyquist 기준을 준수한다고 가정한다. k 번째 유저로부터 전송된 신호는 N_k 신호들의 합으로 나타내어지고 다음과 같이 주어진다.

$$s(t) = \sum_{n=1}^{N_k} s_n(t). \quad (2)$$

AWGN 채널을 통과한 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{\infty} d_{\lfloor i/G \rfloor, n}(t) c_{i,n}(t) \psi(t - iT_c) e^{j\theta_n} + n(t),$$

$$= r_1(t) + n(t), \quad (3)$$

여기서 θ_n 은 n 번째 신호의 전체적 위상 천이를 나타내고 $n(t)$ 는 AWGN 이다. 주파수 선택적 다중 경로 페이딩 채널 [5-7]에서는 채널 임펄스 반응이 다음과 같이 주어진다:

$$h(\tau; t) = \sum_{i=0}^{L-1} a_i(t) e^{-j\theta_i(t)} \delta(\tau - iT_c), \quad (4)$$

여기서 L 은 다중 경로의 수, iT_c 는 i 번째 다중 경로에 대한 가시선 초과 지연을 나타낸다. $a_i(t)$ 는 i 번째 경로의 신호 크기, $\theta_{i0}(t)$ 는 i 번째 다중 경로의 위상, $\delta(\cdot)$ 함수는 Dirac-delta 함수를 의미한다. 다중 경로 페이딩 채널에서 수신 신호를 다음과 같이 나타낸다:

$$r_i(t) = r_1(t) * h(\tau; t) + n(t), \quad (5)$$

여기서 *은 convolution 연산을 의미한다.

방사성 기저 함수망을 이용해서 임의 입력 차원 공간으로부터 임의의 출력 차원 공간까지의 임의 함수를 추산할 수 있다. 그림 2에서 나타낸 것처럼 방사성 기저 함수망은 보통 세 단계로 구성되어 있다: input layer, hidden layer, output layer. 방사성 기저 함수망은 독립 변수를 생성하며 데이터 공간에서 방사성 대칭 함수의 합으로서 표현된다. 각각의 hidden layer는 중앙값 C_j ($1 \leq j \leq J$)와 방사성 기저 함수의 입력값 X_j ($1 \leq j \leq J$)간의 Euclidean 거리를 산출한다. Euclidean 거리는 이 후에 중앙 확산 변수에 의해 분할되며 그 결과값은 비선형 함수 Φ 를 통과한다. 방사성 기저 함수망을 통과한 출력 신호는 다음과 같다:

$$F(X) = \sum_{j=1}^J w_j \Phi(\|X - C_j\| / \sigma_j^2), \quad (6)$$

여기서 $\Phi(\cdot)$ 는 비선형 기저 함수 (Radial basis function), w_j 는 출력 layer weight, C_j 는 "knot", $\|\cdot\|$ 는 L_2 norm, σ_j 는 중앙 확산 변수이다. 방사성 기저 함수망은 완전히 비선형 기저 함수, weight, center에 의해서 특징화 된다.

클러스터링 과정에서 손실 함수(cost function)는 center가 입력 공간의 대표 영역에 위치하도록 최소화된다. 전통적 k -평균 알고리즘은 평균 제곱 거리의 합을 최소화 하기 위한 매커니즘을 제공한다. 그 center는 각각의 클러스터에 중간에 위치하고 있다고 가정한다. 여기서 $c_{k,T}$ 와 x_T 를 각각 k 번째 center, 시간 T 에 대한 입력 패턴으로 정의한다. k -평균 알고리즘은 다음의 규칙에 따라 적응적으로 시간 $T+1$ 에서 새로운 center를 연산한다 [8,9]:

$$c_{k,T+1} = c_{k,T} + \eta \cdot M_k(x_T) \cdot (x_T - c_{k,T}), \quad (7)$$

여기서 η 는 상수로서 학습률을 의미하며 M_k 는 패턴 x_T 가 센터가 $C_{k,T}$ 인 클러스터에 속하는지에 대한 지표이다. 이 지표 함수는 최소 자승 Euclidean 거리 기준을 이용하여 다음과 같이 표현된다:

$$M_k(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } \|x - c_k\| \leq \|x - c_i\|, \text{ for all } i \neq k \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

k -평균 클러스터링 알고리즘에서 클러스터링은 다음 과정에 따라 이루어진다.

- 1) 임의의 초기 클러스터 형태를 선택한다.
- 2) 클러스터 k 그룹에서 center, C_1, C_2, \dots, C_k , 를 연산한다.
- 3) 최소 자승 Euclidean 거리 분류기를 활용하는 클러스터 중에서 패턴을 재분배한다.
- 4) 클러스터 center가 변화가 없는 경우에는 스텝 2)로 돌아간다.

IV. 모의 실험

컴퓨터 시뮬레이션을 위해 데이터와 칩 시퀀스에 대해 binary phase shift keying (BPSK) 변조를 수행하였고 칩 동기화가 완벽하게 이루어 졌다고 가정한다. 참조 사용자는 전체 K 사용자 중 1번 사용자로 가정한다. 처리 이득 (processing gain) $G = 128$ 로 설정한다. 또한 방사성 기저 함수 수신기는 모든 사용자와 다중 경로 채널에 대해 각각의 시간 지연을 고려한 신호 파형을 알고있다고 가정한다. 다중 경로 채널에 대해서는 다음과 같이 변수를 세팅하였다: 1) 다중 경로 수 = 3 (3-ray model), 2) 각 경로의 채널 이득 = -0.7, 0.2, 0.1 (세 개의 경로에 대해서 각각), 3) Doppler 주파수 = 20Hz, 4) 페이딩 크기는 Rician 분포를 따름. 그리고 모든 사용자는 전송률 57.6 kbps와 activity 변수 1을 갖는다.

그림 3에서 사용자 수 K 는 6이고 Gaussian 비선형 기저 함수를 사용할 때 비트 에러율 대 Signal-to-noise ratio (SNR)를 나타내었다. 방사성 기저 함수 수신기의 성능은 거의 최적 MUD의 성능에 준하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 다차원 공간에서 복잡한 mapping을 처리하는 방사성 기저 함수망의 적용을 통해 얻어졌다고 할 수 있다.

그림 4는 SNR이 6 dB일 때 비트 에러율 대 Negative Frequency Rejection (NFR)을 나타내었다. 또한 Gaussian

비선형 기저 함수와 near-far 환경을 고려한 유저 수 $K = 6$ 가 고려되었다. 그림 4에서 방사성 기저 함수 MUD가 near-far 문제를 극복하는 결과를 나타내고 있다. m 개의 소스를 갖는 혼합 전송 환경에서 아웃티지 확률은 다음과 같이 주어진다:

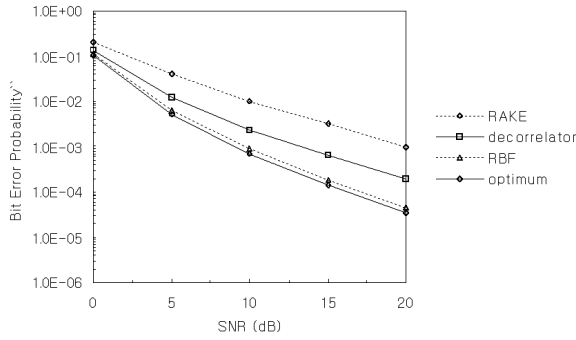


Fig. 3. Bit error probability with perfect power control in a multipath fading channel.

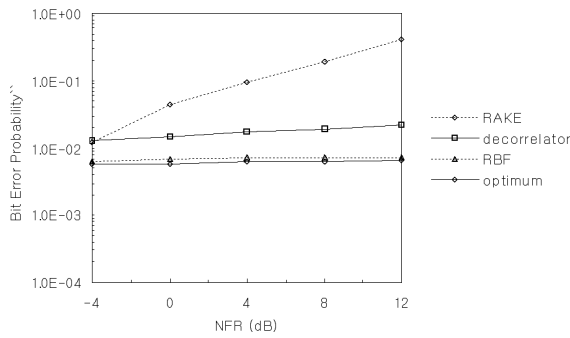


Fig. 4. Bit error probability under near-far situation in a multipath fading channel.

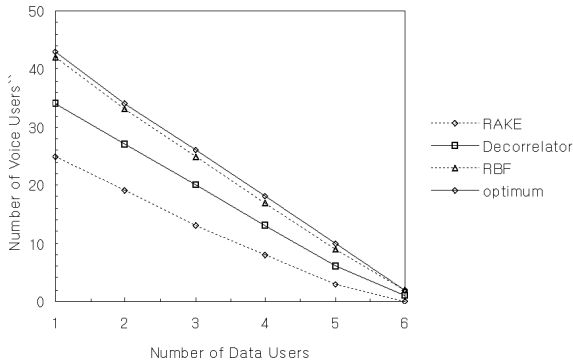


Fig. 5. The number of admissible users for mixed traffic sources in a multipath fading channel.

$$P_{out} = \min(P_{1,out}, P_{2,out}, \dots, P_{m,out}), \quad (9)$$

여기서 $P_{i,out}$ 은 트래픽 소스 i 에 대한 아웃티지 확률이다. DS/CDMA 전력선 통신 시스템의 채널 용량은 통상적으로 호출 허용 정책 (call admission policy) 에 따라 결정된다. 소스 i 에 대한 채널 용량은 다음과 같이 정의된다:

$$C_i = K_{i,max}, \text{ for } P_{i,out} < P_{i,out,ref}, \quad (10)$$

여기서 $P_{i,out,ref}$ 는 소스 i 에 대한 참조 아웃티지 확률이다.

Table 1. System parameters with mixed traffic sources.

System parameters	Value
Required SINR for voice traffic	7 dB
Required SINR for data traffic	10 dB
Activity factor for voice traffic	3/8
Activity factor for data traffic	1
Data rate for voice traffic	9.6 kbps
Data rate for data traffic	76.8 kbps

그림 5에서 음성 및 데이터 트래픽 소스에 대한 허용 사용자 수를 나타내었다. 결과들은 Gaussian 비선형 함수와 $P_{out} = 0.01$ 과 Table 1에 기술된 파라미터 세팅을 기반으로 산출되었다. 방사성 기저 함수 기반 다중사용자 검출 성능은 혼합 트래픽 유저 환경에서 최적의 다중사용자 검출 성능과 유사한 결과를 얻는 것을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 방사성 기저 함수 기반의 다중사용자 검출 방법을 제안하고 near-far 문제와 다중 경로 채널 환경에서 multiple access interference (MAI)를 극복하는 성능을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] S. Verdu, "Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 32, no. 1, pp. 85-96, Jan. 1986.
- [2] Z. Xie, R. T. Short, and C. K. Rushforth, "A family of suboptimum detectors for coherent multiuser communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 8, no. 4, pp. 683-690, May 1990.
- [3] U. Mitra and H. V. Poor, "Neural network techniques for adaptive multiuser demodulation," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 12, no. 9, pp. 1460-1470, Dec. 1994.
- [4] B. Aazhang, B. P. Paris, and G. C. Orsak, "Neural networks for multiuser detection in code division multiple access communications," IEEE Trans. Commun., vol. 40, no. 7, pp. 1212-1222, July 1992.
- [5] M. Zimmermann, K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," IEEE Trans. Commun., vol. 50, no. 4, pp. 553-559, Apr. 2002.
- [6] M. Zimmerman, K. Dostert, "Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 44, no. 1, pp. 249-258, Feb. 2002.
- [7] M. Katayama, T. Yamazato, H. Okada, "A mathematical model of noise in narrowband power line communication systems," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 23, no. 7, pp.

1267-1276, Jul. 2006.

- [8] S. A. Kassam and I. Cha, "Radial basis function networks in nonlinear signal processing," Proc. Annual Asilomar Conference, pp. 600-604, Pacific Grove, CA, U.S.A, Nov. 1993.
- [9] S. Haykin, Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Macmillan, 1994.

저자

황 유 민(Yu Min Hwang)

준회원



- 2012년 2월 : 광운대학교 전파공학과 학사 졸업
- 2012년 3월~현재 : 광운대학교 전파공학과 석·박사통합과정

<관심분야> : 디지털 통신, 전력선 통신, 무선에너지하비스팅, 무선 측위 시스템.

김 진 영(Jin Young Kim)

종신회원



- 1998년 2월 : 서울대학교 전자 공학과 공학박사
- 2001년 2월 : SK텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
- 2001년 3월~현재 : 광운대학교 전자 융합공학과 교수

<관심분야> : 디지털통신, 가시광통신, UWB, 부호화, 전력선 통신, 차세대 이동통신, 무선 에너지 하비스팅