

직접수열 부호분할 다중접속 시스템에서 다중경로 감쇄채널을 위한 미상 시공간 다중 사용자 검파기

준회원 강태성*, 정회원 김형명*

Blind space-time multiuser detector for multipath fading channel in DS/CDMA system

Tae-Sung Kang* Associate Members, Hyung-Myung Kim* Regular Members

요약

본 논문에서는 안테나 배열에 최소 분산 검파기를 이용한 시공간 미상 다중사용자 검파기를 제안한다. 기존의 방법에서는 최소출력에너지 검파기를 사용하여 다른 사용자의 간섭신호를 제거한 후 최대비율결합(MRC)하여 시공간 다이버시티 이득을 얻는다. 제안한 방법에서는 각 안테나에서 최소분산검파기를 이용하여 다른 사용자의 간섭신호를 제거할 뿐 아니라 시간다이버시티도 얻고 그 출력신호들을 최대비율결합하여 공간 다이버시티 이득을 얻는다. 하나의 최소 분산 검파기가 다중경로 수만큼의 최소 출력 에너지 검파기들의 출력을 최대 비율 결합(MRC)한 것과 같은 성능을 나타낸다는 것을 증명함으로써 제안한 시공간 미상 다중사용자 검파기가 최소 출력에너지 검파기를 사용하는 기존의 방법보다 더 적은 복잡도를 가질 수 있다는 것을 보인다. 또한 모의 실험을 통해 기존의 방법보다 더 좋은 성능을 가진다는 것을 보인다.

ABSTRACT

In this paper, a low complexity blind space-time multiuser detector is proposed. The conventional scheme used MOE(minimum output energy) detectors to suppress multiuser interference and MRC(maximum ratio combiner) to obtain spatial and temporal diversity. The proposed scheme uses MV(minimum variance) detectors and MRC. It is shown that one MV detector has the same performance as many MOE detectors as the number of multipath with MRC(Maximum Ratio Combiner). From this fact, we show that the proposed blind space-time multiuser detector has lower complexity than conventional one. And through the computer simulation, we show that the proposed blind space-time multiuser detector has better performance than the conventional one.

1. 서론

직접수열 부호분할 다중접속방식(DS/CDMA)에서 다중접속간섭(MAI)은 다른 직접수열을 갖는 사용자들에 의한 간섭을 말하는데, 이것은 DS/CDMA 시스템의 용량과 성능을 제한하는 한가지 원인이 된다. 사용자들의 간섭은 항상 존재하기 때문에 다중 사용자 검파방식을 사용하는 것이 더 효과적이다^[1]. 다중사용자 검파 방식에서는 다른 사용자들에 대한

정보를 이용해서 다른 사용자의 간섭을 제거한다. 이러한 다중 사용자 검파기 중에서 최적 검파기는 최대확률(ML: maximum likelihood)검파기^[2]이다. 그러나 이것은 뛰어난 성능을 갖지만, 사용자수에 따라 복잡도가 지수적으로 증가하므로 실제 구현은 불가능하다. 따라서 성능은 떨어지더라도 복잡도가 적은 다중사용자 검파기들이 연구되어 왔다^{[3]-[6]}. 최근에는 통신환경이 변하는 동적인 채널에서 적은 계산량으로 통신을 할 수 있는 적응 다중사용자 검

* 한국과학기술원 전자전산학과 통신신호처리 연구실(tskang@csplab.kaist.ac.kr, hmkim@csplab.kaist.ac.kr)
논문번호: 020023-0117, 접수일자: 2002년 1월 17일

파기(adaptive multiuser detector)에 관한 연구가 이루어지고 있다^[7]. 그 중에서 선형 검파기인 최소평균제곱오차(MMSE: minimum mean square error) 검파기는 학습 수열(training sequence)을 이용하여 변하는 통신환경에 적응할 수 있다. 그러나 학습 수열의 전송은 송신기와 수신기간에 또 다른 채널을 필요로 하거나, 유용한 정보를 보내는 시간에 수신기가 학습을 해야 하므로 시스템의 효율을 떨어뜨린다. 이러한 단점을 보완하기 위해 학습수열이 없이 원하는 사용자의 서명파형(signature waveform)과 시간정보만을 가지고 검파할 수 있는 방식이 제안되었다^{[8],[9]}. 이처럼 학습수열 없이 검파하는 방식을 미상검파(blind detection)라고 부른다. 이 때, 학습수열없이 선형 MMSE 다중사용자 검파기와 같거나 유사한 성능을 갖도록 미상 다중사용자 검파기를 설계하는 것이 문제가 된다. [8]에서는 원하는 사용자의 응답을 일정하게 하는 제한조건을 두고, 출력 에너지를 최소화하는 방법으로 미상 다중사용자 검파기를 설계하였다. 이러한 방법은 다중경로가 없는 백색 가우시안(White Gaussian) 채널에서만 MMSE 방법과 유사한 성능을 보인다. 그러나 이러한 제한조건은 신호의 부정합(mismatch)이나 칩간 간섭(interchip interference : ICI)에 매우 민감하기 때문에 다중 경로가 있는 환경에서는 부적합하다. 다중경로가 있는 경우에 미상 검파에 대한 연구는 Tsatsanis 등에 의해 이루어졌다^[10]. [10]에서는 원하는 신호의 모든 다중경로 지연에 대해서 지연 신호 성분(delayed copies)에 대한 응답을 0으로 만듦으로써 이러한 신호의 부정합 문제를 해결하였다. 그러나 지연 신호 성분(delayed copies)에도 원하는 신호의 에너지가 포함되어 있으므로 이것을 이용하지 않는 것은 효율성을 떨어뜨린다. 이러한 문제를 해결하기 위해 [11]에서는 원하는 신호의 모든 지연 신호 성분(delayed copies)을 이용해서 (간섭이 제거된 후의) 신호의 에너지를 최대화시키는 방법으로 최적의 제한조건을 만든 후에, 신호의 모든 지연 신호 성분에 대한 응답을 이 제한 조건에 맞게 미상 다중사용자 검파기를 설계하는 것을 제안하였다. 이 방법은 신호 대 잡음비(signal to noise ratio : SNR)가 클 경우 다중 경로가 있는 경우에도 MMSE 방법과 유사한 성능을 가진다는 것을 보여 주었다.

최근 들어 CDMA 시스템에 안테나 배열(antenna array)을 사용하는 간섭 제거 알고리즘이 많이 제안되고 있다. 이들 알고리즘은 대개 하나의 안테나에

서 사용되는 기존의 알고리즘을 안테나 배열에 적용시키는 것이다. Rake 수신기는 다중 경로 채널로 들어오는 신호에 대하여 각 다중경로 별로 간섭을 제거하고, 각 다중 경로에 대한 검파기의 출력 신호들을 결합해서 시간 다이버시티(temporal diversity)를 얻는 방법인데, 이것을 안테나 배열에 적용해서 시간 다이버시티(temporal diversity)뿐 아니라, 공간 다이버시티(spatial diversity)도 동시에 얻는 2D Rake 수신기가 제안되었다^[12]. 또한 2D Rake 수신기에 미상 검파 방식을 적용한 시공간 미상 다중사용자 검파기가 제안되었다^[13]. 이 방법에서는 [10]에서 다중경로 시스템에서 신호의 부정합 문제를 해결하기 위해 제안한 최소 출력 에너지(MOE: Minimum Output Energy) 검파기를 안테나 배열에 적용해서 각 안테나와 각 다중경로에 대해서 간섭 신호를 제거한 후, 그 출력 신호들을 최대비율 결합(MRC: maximum ratio combination)해서 시간 다이버시티와 공간 다이버시티를 동시에 얻는다. 그러나 이 방법은 필요한 다중사용자 검파기의 수가 다중 경로 수와 안테나 수에 비례하게 되어 복잡도가 커지게 된다.

본 논문에서는 최소분산 검파기(MV: minimum variance detector)^[11]를 안테나 배열에 적용해서 다중사용자의 검파기의 수를 안테나 수에만 비례하게 해서 시스템의 복잡도를 줄일 수 있는 방법을 제안한다. 이 최소분산(MV) 검파기는 최소출력에너지(MOE) 검파기보다 좋은 성능을 보일 뿐 아니라, 하나의 최소분산(MV) 검파기를 사용해서 다중경로 수만큼의 최소출력에너지(MOE) 검파기와 그 출력들을 최대비율결합(MRC)한 것과 같은 성능을 가지고 시간 다이버시티 이득을 얻을 수 있다는 것을 보인다. 또한 최소분산(MV) 검파기의 출력들을 최대비율 결합(MRC)을 통하여 공간 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. 그리고 모의 실험을 통해 제안한 방법이 기존의 방법보다 성능이 향상된다는 것을 보인다.

본 논문의 구성은 서론에 이어 2장에서는 다중경로 환경에서의 수신 신호 모형에 대하여 살펴보고, 3장에서는 최소 출력 에너지(MOE) 검파기를 안테나 배열에 적용한 기존의 방법에 대하여 살펴본다. 그리고 4장에서는 최소분산(MV) 검파기를 안테나 배열에 적용한 방법을 제안하고, 5장에서는 제안한 방법과 기존의 방법을 비교, 분석한다. 6장에서는 모의 실험 결과를 확인하고, 7장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 수신 신호 모형

사용자 수가 K명, 다중 경로의 수가 L, 처리 이득이 N이고, 안테나 배열의 수가 M인 DS/CDMA 시스템의 기저대역 수신신호에 대하여 생각한다. 여기서 m번째 안테나의 수신신호는 다음과 같이 모형화될 수 있다.

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=-\infty}^{\infty} [A_k b_k(i) h_{mk}(l) \times c_k(t - iT - IT_c - \tau_k)] + n_m(t) \quad (1)$$

이 때, A_k 는 k번째 사용자의 수신 신호 크기이고, $\tau_k(0 < \tau_k < NT_c)$ 는 수신 신호의 상대 지연, T는 심볼구간이다. 데이터 $b_k(i)$ 는 독립적이고 -1과 +1이 일어날 확률이 같은 확률변수이고, $n_m(t)$ 는 단위 스펙트럼 밀도(unit spectral density)를 가지는 백색 정규(White Gaussian) 잡음이다. 이 때 $h_{mk}(l)$ 는 k번째 사용자, m번째 안테나사이의 l번째 채널 충격 응답(channel impulse response)이고, $c_k(t)$ 는 처리 이득이 N인 서명 파형이다. 각 사용자의 서명 파형은 다음과 같이 단위 에너지를 가지고 [0, T]구간에 한정된다고 가정한다.

$$\int_0^T c_k^2(t) dt = 1, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (2)$$

직접수열 부호분할 (DS/CDMA) 시스템에서 각 사용자의 서명 파형은 다음과 같은 형태이다.

$$c_k(t) = \sum_{j=0}^{N-1} \beta_j^k \phi(t - jT_c), \quad t \in [0, T] \quad (3)$$

이 때, $(\beta_0^k, \beta_1^k, \dots, \beta_{N-1}^k)$ 는 각 성분이 ± 1 의 값을 가지는 k번째 사용자에게 지정된 서명 수열이고 ϕ 는 시간 T_c 동안의 정규화 된 칩 파형이다.(여기서 $NT_c = T$). 일반적으로 $h_{mk}(l)$ 은 길이가 $L \ll N$ 인 시불변(time-invariant) FIR 여파기로 나타낼 수 있다. 그리고 첫번째 사용자를 원하는 사용자라고 하고, 모든 사용자의 동기는 칩률(chip rate)로 표분화했을 때 첫번째 사용자의 서명 수열에 맞추어져 있다고 가정한다.

벡터-행렬 표현

수신기의 각 안테나로 들어오는 수신신호를 동일한 칩률로 표분화했을 때, 한 심볼 구간 동안에 관

찰된 표본 벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$x_m(i) = [x_m(iN), \dots, x_m(iN+N-1), \dots, x_m(iN+N+L-1)] \quad (4)$$

일반적으로 다중경로가 존재하지 않을 때는 만 $[x_m(iN), \dots, x_m(iN+N-1)]$ 만 존재하게 된다. 그러나 L만큼의 다중경로가 존재하기 때문에, 이 다중경로에 의해서 지연이 생기게 되고 각 다중경로로 지연되어 들어오는 신호인 $[x_m(iN+N), \dots, x_m(iN+N+L-1)]$ 가 추가로 발생하게 된다.

식 (1)의 $x_m(t)$ 를 표분화 했을 때, i번째 표본 벡터는 다음과 같다.

$$x_m(i) = \sum_{k=1}^K A_k b_k(i) C_k h_{mk} + n_m(i) \quad (5)$$

채널 충격 응답 벡터와 서명수열 벡터는 각각

$$h_{mk} = [h_{mk}(0), \dots, h_{mk}(L-1)]^T$$

$$c_k = [c_k(0), \dots, c_k(N-1)]^T$$

로 모형화될 수 있다. 또한 다중경로 채널을 지난 후의 신호벡터는 식(5)과 같이 $(N+L-1) \times L$ 서명수열 행렬 (6)과 채널 충격응답 벡터의 곱으로 표현된다.

$$C_k = \begin{bmatrix} c_k(0) & & 0 \\ \vdots & \ddots & c_k(0) \\ c_k(N-1) & & \vdots \\ 0 & \ddots & c_k(N-1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 첫번째 열벡터는 원래 신호의 서명수열 벡터이고, 나머지 L-1벡터는 원래 신호의 지연 신호 성분(delayed copies)에 대한 서명수열 벡터들이다. 또한 (1)에서의 서명수열과 채널응답의 컨벌루션이 (6)에서의 컨벌루션행렬과 채널응답벡터의 곱으로 표현된 것이라고도 볼 수 있다.

III. 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기

첫번째 단에서는 각 안테나로 들어오는 수신신호를 최소 출력 에너지(MOE) 검파기를 이용해서 각 다중경로 별로 미상 검파를 한다. 그리고 두번째 단에서는 시공간 다이버시티를 얻기 위해 각 최소 출력 에너지(MOE) 검파기들의 출력을 최대 비율 결합(MRC)한다.

기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기의 수신기 구조는 그림 1과 같다.

여기서 w_{mi} 은 m번째 안테나, l번째 다중경로에

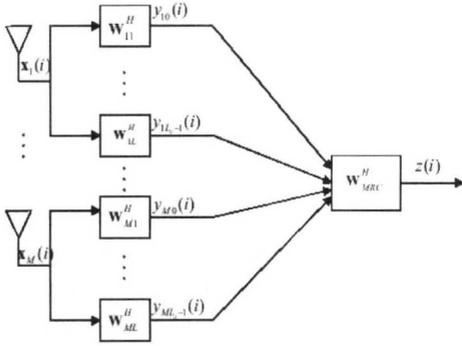


그림 1. 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기의 구조

대한 미상 다중사용자 검파기의 충격응답벡터(im-pulse response vector)를 나타내고, w_{MRC} 는 최대 비율 결합기(MRC)의 가중 벡터를 나타낸다.

1. 첫번째 단

첫번째 단에서 심볼 시간 i 에서의 m 번째 안테나, l 번째 다중경로에 대한 최소 출력 에너지(MOE) 검파기의 출력 $y_m(i)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_m(i) = w_{ml}^H x_m(i) \tag{7}$$

따라서 $y_m(i)$ 의 출력 에너지는

$$E_{y_{ml}} = E[|w_{ml}^H x_m(i)|^2] = w_{ml}^H R_{x_m} w_{ml} \tag{8}$$

이다. 이 때, R_{x_m} 은 m 번째 안테나로 들어온 수신 신호 $x_m(i)$ 의 상관 행렬을 나타낸다.

미상 다중사용자 검파기의 충격 응답 벡터 $w_m (m=1, \dots, M, l=1, \dots, L)$ 을 구하기 위해서는 다음과 같은 최적화 문제를 풀어야 한다.

$$\min_{w_{ml}} w_{ml}^H R_{x_m} w_{ml} \text{ subject to } C_l^H w_{ml} = 1_l \tag{9}$$

여기서 1_l 은 l 번째 원소만 1이고 나머지 모든 원소는 0인 $L \times 1$ 벡터를 나타낸다.

$C_l^H w_{ml} = 1_l$ 의 제한 조건으로부터 원하는 사용자 의 신호 중에 l 번째 경로로 들어오는 신호만 다른 경로에 의한 신호에 간섭을 받지 않고 얻어낼 수 있다. 식(10)을 Lagrange Multiplier 방법을 이용하여 풀면 다음과 같은 최적해를 얻을 수 있다.

$$w_{ml} = R_{x_m}^{-1} C_l (C_l^H R_{x_m}^{-1} C_l)^{-1} 1_l \tag{10}$$

2. 두번째 단

식(7)에 식(10)을 대입하면

$$y_m(i) = w_{ml}^H x_m(i) = A_l b_l(i) w_{ml}^H C_l h_{ml} + e(i) \tag{11}$$

여기서 $e(i)$ 는 심볼 시간 i 에서의 검파기 통과 후의 간섭과 잡음의 합을 나타내므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$e(i) \triangleq w_{ml}^H [\sum_{k=2}^K A_k b_k(i) C_l h_{ml} + n_m(i)] \tag{12}$$

식(11)에서 제한 조건 $C_l^H w_{ml} = 1_l$ 를 이용하면 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$y_m(i) = A_l b_l(i) h_{ml}(l) + e(i) \tag{13}$$

원하는 사용자에 대한 m 번째 안테나의 채널응답 벡터는 $h_{ml} = [h_{ml}(0), \dots, h_{ml}(L-1)]^T$ 이므로, 첫번째 단의 출력 벡터 $y(i)$ 는

$$y(i) = [y_{11}(i), \dots, y_{1L}(i), \dots, y_{ML}(i), \dots, y_{ML}(i)]^T = h_1 s_1(i) + e(i) \tag{14}$$

여기서 $h_1 = [h_{11}, \dots, h_{M1}]^T$ 이다.

두번째 단에서는 각 다중경로를 이용한 시간 다이버시티와 안테나 배열을 이용한 공간 다이버시티를 얻기 위한 결합방식으로 각 가지의 SNR을 최대 로 하는 최대 비율 결합기(MRC)를 사용해서 결합 한다. 이러한 최대 비율 결합기(MRC)의 최적의 가중벡터는 원하는 사용자에 대한 채널충격응답벡터인 h_1 이지만, 실제로 이것은 알 수 없으므로 가중벡터의 최적의 추정값은 다음과 같은 미상 추정방법으 로부터 얻을 수 있다.

$$\max_{w_{MRC}} w_{MRC}^H R_y w_{MRC} \text{ subject to } w_{MRC}^H w_{MRC} = 1 \tag{15}$$

여기서 $R_y = E[y(i) y(i)^H]$ 이고, 식(15)을 풀면 최대 비율 결합기(MRC)의 최적의 가중 벡터는 R_y 의 가장 큰 고유값에 따르는 고유벡터임을 알 수 있다.

IV. 제한한 시공간 미상 다중사용자 검파기

제한한 시공간 미상 다중 사용자 검파기의 수신 기 구조는 그림 2와 같다. 각 안테나로 들어온 수신

신호는 최소 분산(MV) 검파기로 간섭신호를 제거하고, 간섭신호가 제거된 각 검파기 출력을 최대 비율 결합(MRC)한다.

여기서 v_m 은 m번째 안테나, l번째 경로에 대한 미상 다중사용자 검파기의 충격응답벡터(impulse response vector)를 나타내고, v_{MRC} 는 최대 비율 결합기(MRC)의 가중 벡터를 나타낸다.

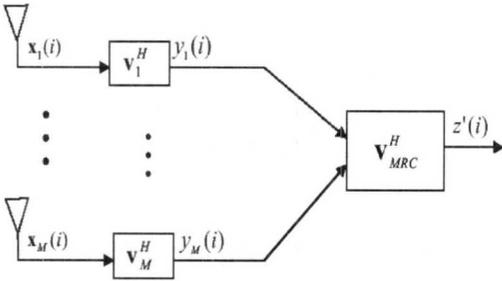


그림 2. 제한한 시공간 미상 다중사용자 검파기의 구조

1. 첫번째 단

첫번째 단의 미상 검파기의 충격응답벡터(impulse response vector)를 v_m 이라고 할 때, m번째 안테나의 최소출력 검파기의 출력신호 $y_m(i)$ 는 다음과 같다.

$$y_m(i) = v_m^H x_m(i) \tag{16}$$

따라서 $y_m(i)$ 의 출력 에너지는

$$E_{y_m} = E[|v_m^H x_m(i)|^2] = v_m^H R_{x_m} v_m \tag{17}$$

이 되고, 여기서 R_{x_m} 은 m번째 안테나로 들어온 수신 신호 $x_m(i)$ 의 상관 행렬(correlation matrix)을 나타낸다.

최소 분산(MV) 검파기의 충격응답(impulse response)벡터 $v_m(m=1, 2, \dots, M)$ 을 구하기 위해서는 다음과 같이 제한 조건이 있는 최적화 문제를 풀어야 한다.

$$\min_{v_m} v_m^H R_{x_m} v_m \text{ subject to } C_1^H v_m = f_m \tag{18}$$

이 최적화 문제를 Lagrange Multiplier 방법을 이용하여 풀면 다음과 같은 최적해 v_m 을 얻을 수 있다.

$$v_m = R_{x_m}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1} f_m \tag{19}$$

여기서 제한 조건 벡터(constraint vector) f_m 은

최소 출력 에너지(MOE) 검파기의 제한조건벡터 1_l 을 일반화시킨 벡터이므로 최소 분산(MV) 검파기가 최적의 성능을 낼 수 있는 f_m 을 구하는 것이 문제가 된다. f_m 은 검파기 통과 후 간섭신호가 제거된 출력신호의 에너지를 최대화시키는 방법을 이용하여 구한다. 식(19)을 식(17)에 대입하면 다음과 같은 최소 출력 에너지(MOE: minimum output energy)를 얻을 수 있다.

$$MOE(f_m) = f_m^H (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1} f_m \tag{20}$$

f_m 은 다음과 같이 최소 출력 에너지(MOE)를 최대로 하는 벡터를 구함으로써 얻을 수 있다.

$$f_m^H (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1} f_m \text{ subject to } f_m^H f_m = 1 \tag{21}$$

식(21)에서 최적의 f_m 은 $(C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1}$ 의 가장 큰 고유값에 따르는 고유벡터 (또는 $(C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)$ 의 가장 작은 고유값에 따르는 고유벡터)가 됨을 알 수 있다.

2. 두번째 단

모든 최소분산(MV) 검파기들의 출력신호들을 벡터 $y'(i)$ 로 나타내면

$$y'(i) = [y_1(i), \dots, y_M(i)]^T \tag{22}$$

이 된다. 두번째 단에서는 안테나 배열을 이용한 공간 diversity를 얻기 위해 최소 분산(MV) 검파기들의 출력들을 최대 비율 결합(MRC)한다. 이 최대 비율 결합기(MRC)의 최적의 가중벡터는 III.2절에서 구한 것과 같은 방법으로 구하면 다음과 같은 최적화 문제를 풀어야 한다.

$$\max_{v_{MRC}} v_{MRC}^H R_y v_{MRC} \text{ subject to } v_{MRC}^H v_{MRC} = 1 \tag{23}$$

여기서 $R_y = E[y'(i)y'(i)]$ 이고, 최적의 결합벡터 v_{MRC} 는 R_y 의 가장 큰 고유값에 따르는 고유벡터가 된다.

V. 기존의 방법과 제안한 방법의 비교 분석

1. 최소분산(MV) 검파기와 최소출력에너지(MOE) 검파기의 비교

앞에서 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기는 최소 출력 에너지(MOE) 검파기를 사용하기 때문에

각 안테나에 대해서 다중경로 수만큼의 최소 출력 에너지(MOE) 검파기가 필요하였다. 그러나 제한한 시공간 미상 다중사용자 검파기에서는 하나의 최소 분산(MV) 검파기를 사용해서 다중경로 수만큼의 최소 출력 에너지(MOE) 검파기의 출력을 최대 비율 결합(MRC)한 것과 같다는 것을 보임으로써, 각 안테나에 하나의 최소 분산(MV)검파기만이 필요하다는 것을 보일 것이다.

보조정리 1 : 하나의 최소분산(MV) 검파기는 L개의 최소 출력 에너지(MOE)검파기의 출력을 최대 비율 결합(MRC)한 것과 같은 성능을 가진다.

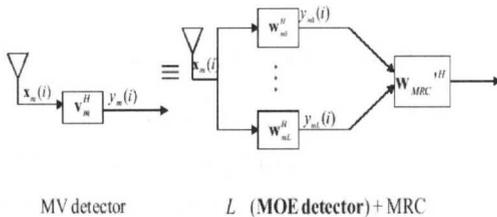


그림 3. 최소분산(MV) 검파기와 최소출력에너지(MOE) 검파기의 비교

<증명>

m번째 최소 출력 에너지(MOE) 검파기의 출력 $y_m(i) = w_m^H x_m(i)$ 에서 m번째 안테나의 모든 다중 경로의 출력들을 벡터 $y_m'(i)$ 로 나타내면

$$\begin{aligned}
 y_m'(i) &= \begin{bmatrix} y_{m1}(i) \\ \vdots \\ y_{mL}(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{m1}^H x_m(i) \\ \vdots \\ w_{mL}^H x_m(i) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} [R_{x_m}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1} 1_{11}]^H x_m(i) \\ \vdots \\ [R_{x_m}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1} 1_{L1}]^H x_m(i) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1_{11}^H \\ \vdots \\ 1_{L1}^H \end{bmatrix} \Pi [R_{x_m}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1}]^H x_m(i) \quad (24) \\
 &= I_{L1} [R_{x_m}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1}]^H x_m(i)
 \end{aligned}$$

이 된다. 따라서 m번째 안테나의 출력 벡터 $y_m'(i)$ 는 식(20)과 같이 나타낼 수 있고, $y_m'(i)$ 의 상관 행렬(correlation matrix)은

$$\begin{aligned}
 R_{y_m'} &= E[y_m'(i) y_m'^H(i)] \\
 &= [(R_{x_m}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1})^H]^H R_{x_m} \\
 &\quad \times [(R_{x_m}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1})^H] \\
 &= (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1} \quad (25)
 \end{aligned}$$

이 된다. m번째 안테나 출력을 최대 비율 결합(MRC)하기 위한 최대 비율 결합기(MRC)의 가중벡터는 $R_{y_m'}$ 의 가장 큰 고유값에 따르는 고유벡터이다. 즉, 이것은 $(C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1}$ 의 가장 큰 고유값에 따르는 고유벡터이므로 식(19)에서 구한 최소분산 검파기의 제한 조건 벡터(constraint vector) f_m 과 같다. 따라서 최대 비율 결합기(MRC)의 출력벡터를 $y_m''(i)$ 이라고 하면

$$\begin{aligned}
 y_m''(i) &= f_m^H y_m'(i) \\
 &= f_m^H [R_{x_m}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1}]^H x_m(i) \quad (26) \\
 &= [R_{x_m}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1} f_m]^H x_m(i)
 \end{aligned}$$

이 된다.

식(26)에서 $R_{x_m}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1} f_m$ 는 식(19)의 최소 분산(MV) 검파기의 가중벡터 v_m 과 같으므로 최소 출력 에너지(MOE) 검파기들의 출력을 최대 비율 결합(MRC)한 것의 출력 $y_m''(i)$ 과 최소분산 검파기의 출력 $y_m(i)$ 는 같다. □

2. 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기와 제한한 시공간 미상 다중사용자 검파기의 비교

보조정리 2 : 채널 응답을 정확히 추정하고 전력제어가 완벽할 경우, M+L개의 최소 출력 에너지(MOE) 검파기의 출력을 최대 비율 결합(MRC)한 것(기존의 방법)은 M개의 최소 분산(MV)검파기의 출력을 등이득 결합한 것과 같다.

<증명>

1) 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기에서, 식(20)으로부터 m번째 안테나에 대한 최소 출력 에너지(MOE) 검파기들의 출력 벡터를 다시 쓰면

$$y_m'(i) = [R_{x_m}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_m}^{-1} C_1)^{-1}]^H x_m(i) \quad (27)$$

이고, 모든 안테나에 사용된 최소 출력 에너지 검파기의 출력 신호들을 벡터 $y(i)$ 로 나타내면

$$\begin{aligned}
 y(i) &= \begin{bmatrix} y_1'(i) \\ \vdots \\ y_M'(i) \end{bmatrix} \quad (28) \\
 &= \begin{bmatrix} [R_{x_1}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_1}^{-1} C_1)^{-1}]^H x_1(i) \\ \vdots \\ [R_{x_M}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_M}^{-1} C_1)^{-1}]^H x_M(i) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

이다. III.2에서 기존의 시공간 다중사용자 검파기의

최대비율결합기(MRC) 벡터 w_{MRC} 는 h_1 에 대한 추정값이므로 $w_{MRC} = h_1' = [h_{11}', \dots, h_{M1}']$ 이라고 둔다. 이 때, 최대 비율 결합기(MRC)의 출력 $z(i)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$z(i) = w_{MRC}^H y(i) = [h_{11}'^H \dots h_{M1}'^H] \times \begin{bmatrix} [R_{x_1}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_1}^{-1} C_1)^{-1}]^H x_1(i) \\ \vdots \\ [R_{x_M}^{-1} C_M (C_M^H R_{x_M}^{-1} C_M)^{-1}]^H x_M(i) \end{bmatrix} = h_{11}'^H [R_{x_1}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_1}^{-1} C_1)^{-1}]^H x_1(i) + \dots + h_{M1}'^H [R_{x_M}^{-1} C_M (C_M^H R_{x_M}^{-1} C_M)^{-1}]^H x_M(i) \quad (29)$$

2) 제한한 시공간 다중사용자 검파기에서 모든 안테나에 사용된 최소 분산(MV) 검파기들의 출력은

$$\begin{bmatrix} y_1(i) \\ \vdots \\ y_M(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1^H x_1(i) \\ \vdots \\ v_M^H x_M(i) \end{bmatrix} \quad (30)$$

이 되고, 이것을 등이득 결합한 값은

$$z'(i) = v_1^H x_1(i) + \dots + v_M^H x_M(i) = f_1^H [R_{x_1}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_1}^{-1} C_1)^{-1}]^H x_1(i) + \dots + f_M^H [R_{x_M}^{-1} C_M (C_M^H R_{x_M}^{-1} C_M)^{-1}]^H x_M(i) \quad (31)$$

이 된다. 앞의 보조정리 1의 증명에서 f_m 은 m번째 안테나의 출력의 최대 비율 결합기(MRC)의 가중벡터와 같다고 했다. III.2에서와 같은 논리로, 최대 비율 결합기(MRC)의 가중벡터는 채널 응답 벡터의 최적의 추정값이므로, 이 f_m 은 m번째 안테나에 대한 채널 응답 벡터 h_{m1} 의 최적의 추정값이다. 여기서 f_m 을 h_{m1} 의 추정값 h_{m1}'' 이라고 하면

$$z'(i) = h_{11}''^H [R_{x_1}^{-1} C_1 (C_1^H R_{x_1}^{-1} C_1)^{-1}]^H x_1(i) + \dots + h_{M1}''^H [R_{x_M}^{-1} C_M (C_M^H R_{x_M}^{-1} C_M)^{-1}]^H x_M(i) \quad (32)$$

이 된다.

그런데 채널 응답 벡터 $h_1 = [h_{11}, \dots, h_{M1}]^T$ 을 정확히 추정할 수 있다고 하면, 최대비율 결합기(MRC)는 추정값 대신에 정확한 h_1 을 사용할 수 있고 f_m 대신 h_{m1} 을 사용할 수 있다. 1)에서

$$h_1' = h_1 = [h_{11}, \dots, h_{M1}]^T \quad \text{이 되고, 2)에서}$$

$h_{m1}'' = h_{m1}$, 즉 $h_1'' = h_1$ 이 되므로 $h_1'' = h_1'$ 이다. 따라서 $z'(i) = z(i)$ 가 된다. □

VI. 모의 실험 및 고찰

처리 이득이 31이고, 사용자의 수가 10인 DS/CDMA 시스템을 가정하고, 원하는 사용자를 첫번째 사용자라 한다. 각 사용자들의 서명수열은 무작위 수열(random sequence)을 사용한다. 그리고 다른 사용자들은 원하는 사용자보다 전력이 10dB 높은 근원(near-far)환경이다. 그림 4에서는 다중경로 수가 3일 때의 최소 분산(MV) 검파기와 최소 출력 에너지(MOE) 검파기의 입력 SNR의 변화에 따른 출력 SINR의 성능을 비교하였다. 그리고 하나의 최소 분산(MV) 검파기가 다중경로 수만큼의 최소 출력 에너지(MOE) 검파기와 그 출력들을 최대 비율 결합(MRC)한 것과 같은 성능을 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 그림 5에서는 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기와 제안한 시공간 미상 다중사용자 검파기의 입력 SNR의 변화에 따른 출력

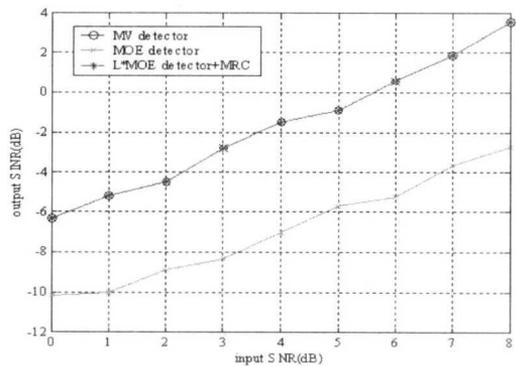


그림 4. 최소 출력 에너지(MOE) 검파기와 최소 분산(MV) 검파기의 SINR 성능비교

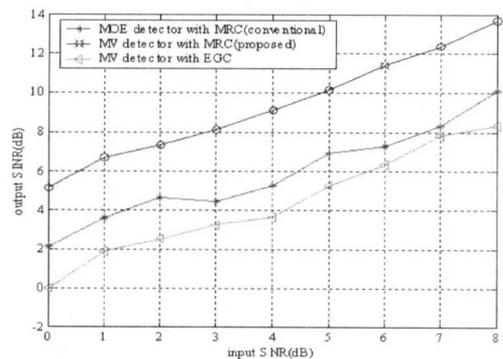


그림 5. 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기와 제안한 시공간 미상 다중사용자 검파기의 SINR 성능 비교

SINR의 성능을 비교하였다. 이 때 다중경로의 수는 3이고, 안테나의 수는 2이다. 여기서 V.2절에서 설명한 바와 같이 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기는 최소 분산(MV) 검파기의 출력을 등이득 결합한 것보다 더 좋은 성능을 가지지만, 제안한 시공간 미상 다중사용자 검파기가 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기보다 SINR 성능이 더 좋다는 것을 확인할 수 있다.

제안한 시공간 미상 다중사용자 검파기는 M개의 최소 분산(MV) 검파기의 출력을 최대 비율 결합(MRC)한 것이다. 그리고 보조정리 1로부터 하나의 최소 분산(MV) 검파기는 L개의 최소 출력 에너지(MOE)검파기의 출력을 최대 비율 결합(MRC)한 것과 같으므로, 제안한 방법(M개의 최소 분산(MV) 검파기의 출력을 최대 비율 결합(MRC)한 것)은 각 안테나 별로 L개의 최소 출력 에너지(MOE) 검파기의 출력을 최대 비율 결합(MRC)하고, 그 M개의 출력을 다시 최대 비율 결합(MRC)한 것과 같다. 따라서 만약 보조정리 2에서처럼 채널 응답 벡터를 정확히 추정할 수 있다면, 기존의 방법과 M개의 최소 분산(MV)검파기를 등이득 결합한 것과 제안한 방법이 모두 같은 성능을 가질 것이다.

그러나, 실제로 기존의 방법에서는 최대 비율 결합(MRC)의 가중벡터 h_1' 은 M개의 안테나로 들어오는 수신신호의 상관 행렬을 이용하여 고유벡터를 구했고, 최소분산(MV) 검파기의 h_{ml}'' 은 m번째 안테나로 들어온 수신신호만의 상관 행렬을 이용하여 고유벡터를 구했으므로, h_1' 의 값이 실제 채널 응답 벡터 h_1 에 더 가까운 추정값이라고 볼 수 있다. 또한 MRC는 각 가지의 SNR을 최대로 하는 가중벡터로 결합하므로 기존의 시공간 다중사용자 검파기의 성능이 M개의 최소분산(MV) 검파기와 그 출력을 등이득 결합한 것보다 더 좋을 수 있다.

그러나 제안한 방법에서는 안테나 별로 L개의 최소 출력 에너지(MOE) 검파기의 출력을 최대 비율 결합(MRC)하고(최소분산(MV) 검파기)), 그 출력들을 다시 최대 비율 결합(MRC)했으므로, ML개의 최소 출력 에너지(MOE) 검파기의 출력을 최대 비율 결합(MRC)한 것보다 좋은 성능을 낼 수 있다. 따라서 제안한 시공간 미상 다중사용자 검파기는 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기보다 적은 수의 검파기를 사용하면서 더 좋은 성능을 가질 수 있다.

VII. 결론

본 논문에서는 미상 다중사용자 검파기를 안테나 배열에 적용한 시공간 미상 다중사용자 검파기에 대해서 알아보았다. 기존의 방법은 최소출력에너지(MOE) 검파기를 사용하기 때문에 각 다중경로마다 최소출력에너지(MOE)검파기가 필요하였다. 왜냐하면, 최소출력에너지(MOE) 검파기는 다중경로 지연에 의한 심볼간 간섭을 막기 위해 하나의 다중경로에 대해서만 검파를 하기 때문이다. 따라서 필요한 검파기의 수가 다중경로의 수와 안테나의 수에 비례한다. 그러나 제안한 방법에서는 최소분산(MV) 검파기를 사용해서 안테나의 수에만 비례하도록 검파기의 수를 줄인다. 이 최소분산(MV) 검파기는 모든 다중경로의 신호에 대해서 만족하는 제한조건을 정해주기 때문에 하나의 최소분산(MV) 검파기를 이용해서 다중경로 수만큼의 최소출력에너지(MOE) 검파기의 출력을 최대 비율 결합(MRC)한 것과 동일한 성능을 가진다. 따라서 제안한 시공간 미상 다중사용자 검파기는 안테나 수에만 비례한다. 채널 응답 벡터를 알 경우 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기는 M개의 최소분산(MV) 검파기의 출력을 등이득 결합한 것과 같은 성능을 보인다는 것을 보였다. 그리고 모의 실험을 통해 제안한 시공간 미상 다중사용자 검파기가 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기보다 더 좋은 성능을 가진다는 것을 보였다. 따라서 제안한 시공간 미상 다중사용자 검파기는 기존의 시공간 미상 다중사용자 검파기보다 적은 수의 미상 다중사용자검파기를 사용하면서 좋은 성능을 가진다.

참고 문헌

- [1] S.Verdu, "Multiuser detection", in Advances in Statistical Signal Processing, V.H.Poor, New York, JAI, 1993, vol. 2, pp. 369-409
- [2] S. Verdu, "Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels", IEEE Trans. Inform. Theory, vol.IT-32, pp.85-96, Jan. 1986
- [3] Lupas, R.; Verdu, S. "Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple-access channels" IEEE Trans. Information Theory, vol: 35, pp. : 123 -136, Jan. 1989

[4] Lupas, R.; Verdu, S. "Near-far resistance of multiuser detectors in asynchronous channels" IEEE Trans. Communications, vol: 38, pp. : 496 -508, April 1990

[5] Madhow, U.; Honig, M.L. "MMSE interference suppression for direct-sequence spread-spectrum CDMA" IEEE Trans. Communications, vol: 42, pp. : 3178 -3188, Dec. 1994

[6] Tsatsanis, M.K.; Giannakis, G.B. "Optimal decorrelating receivers for DS-CDMA systems: a signal processing framework" IEEE Trans. Signal Processing, vol: 44 ,pp. : 3044 -3055, Dec. 1996

[7] M. Honig and H. V. Poor, "Adaptive interference suppression in wireless communication system", in H. V. Poor and G. W. Wornell, Eds, Wireless Communications: Signal Processing Perspectives", IEEE JSAC, vol. 12, pp. 698-706, May, 1994

[8] M. Honig, U. Madhow, and S. Verdu, "Blind adaptive multiuser detection," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 41, pp. 944 - 960, July 1995.

[9] Poor, H.V. Xiaodong Wang. "Code-aided interference suppression for DS/CDMA communications. II. Parallel blind adaptive implementations", IEEE Transactions on Communications, vol. 45 ,pp.1112 -1122 Sept. 1997

[10] Tsatsanis, M.K., "Inverse filtering criteria for CDMA systems", IEEE Trans. Signal Processing, vol: 45 Issue: 1 , Jan. 1997, pp.: 102 -112

[11] Tsatsanis, M.K. Xu, Z.D., "Performance analysis of minimum variance CDMA receivers", IEEE Trans. on Signal Processing, vol: 46, Nov. 1998, pp.: 3014 - 3022 [12] Hui Liu; Zoltowski, M.D., "Blind equalization in antenna array CDMA systems", IEEE Trans. on Signal Processing, vol: 45 , Jan. 1997 pp.: 161 -172

[13] Rongfang Song, Guangguo Bi, "Constrained optimisation based space-time -code blind receiver in CDMA systems" Electronics Letters , vol: 36 , June 2000 , pp.: 1061 -1062

강 태 성(Tae-Sung Kim)

준회원



2000년 2월 : 한국과학기술원
전자전산학과 학사
2002년 2월 : 한국과학기술원
전자전산학과 석사
2002년 3월~ : 한국과학기술원
전자전산학과 박사과정

<주관심 분야> CDMA, 다중사용자 검파기, 스마트 안테나, 무선 자원 관리

김 형 명(Hyung-Myung Kim)

정회원



1974년 2월 : 서울대학교 공학사
1982년 4월 : 미국 Pittsburgh
대학 전기공학과 석사
1985년 12월 : 미국 Pittsburgh
대학 전기공학과공학박사

1986년 4월~1992년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 조교수
1992년 9월~2000년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 부교수
2000년 3월~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수

<주관심 분야> 이동 통신 기술, 디지털 신호와 영상 처리, 다차원 시스템 이론, 다중사용자 검파기