

코드 제한 최소 분산 방법을 이용한 블라인드 다중 사용자 검파기

임상훈, 정형성, 이충용, 윤대희

연세대학교 전자공학과 음향, 음성 및 신호처리 연구실

Phone: +82-2-361-2863, Fax: +82-2-312-4584, E-MAIL: sang@radar.yonsei.ac.kr

Blind Multi-User Detector Using Code-Constrained Minimum Variance Method

Sang-Hoon Lim, Hyung Sung Jung, Chungyoung Lee and Dae Hee Youn

ASSP Lab., Dept. of Electronic Eng., Yonsei Univ.

ABSTRACT

This paper proposes a blind multi-user detector using Code-Constrained Minimum Variance (CCMV) method which directly detects the DS-SS signals in a multipath fading channel without estimating the channels. This algorithm reduces the complexity of computation by making a small size data matrix with the order of the channel length. Advantageously it requires to know the spreading code and the time delay of only the desired user.

1. 서론

DS-SS 시스템에서, 다른 사용자 간섭 신호를 단순히 가산성 잡음으로 간주하고 코드 필터링, RAKE 수신기 등의 방법을 통하여 원하는 사용자의 신호만을 검출해 내는 단일 사용자 검파기는 확산 코드간의 상관관계로 인한 근거리원거리 현상과 다중 경로 페이딩으로 인한 심벌간 간섭 신호(Inter Symbol Interference: ISI)로 인해 성능이 떨어진다.

이러한 단점이 다중 사용자 검파기의 사용으로 극복 될 수 있고 심벌간 간섭 신호는 채널 등화기로 극복 될 수 있는데, 이러한 다중 사용자 검파기와 채널 등화기에서는 모든 사용자의 확산 코드와 채널을 알고 있어야 하므로 채널을 추정하는 방법에 대해 많이 연구되어지고 있다[1][2]. 그러나 채널을 추정하는 공률적인 복잡도는 사용자의 신호를 검출하기 위한 것 이므로, 채널을 추정하는 과정 없이 사용자 신호를 직접 검출할 수 있는 방법에 대한 연구가 최근 주목 받고 있다[3][4][5]. 이에 따라 본 논문에서는 사용자의 채널을 추정하는 복잡한 과정을 기치지 않고, 다중 경로 페이딩 채널을 통하여 수신되는 신호를 직접 검출해내는 방법에 대해서 연구 하였다. 이 방법을 주파수 대역 효율을 떨어뜨리는 하측 신호만을 사용하지 않고, 블라인드 방식으로 단지 원하는 사용자의 확산 코드만으로 수신기 응답에 필요한 계산을 수행시 수신기 출력 전력을 최소화 시키는 코드 제한

최소 분산 (Code-Constrained Minimum Variance: CCMV) 방법을 이용하여 간섭신호의 영향을 제거한 원하는 사용자 신호만을 검출하게 된다.

다중 경로 페이딩 채널의 임펄스 응답의 길이는 확산 코드 길이에 비해 매우 작은데도 기존의 방법들은 채널을 추정하거나 사용자 신호를 검출하기 위해 확산 코드 길이 및 복의 데이터를 추적하는 비효율적인 방식을 사용하였다[2][4][5]. 최근에 채널 추정을 위해서 단지 실제 채널 임펄스 응답 길이보다 조금 크게, 적절히 선택된 길이의 데이터만을 추적하여 사용하는 새로운 방법이 제안 되었다. 이러한 효율적인 데이터 추적 방법을 이용하여, 채널 추정하는 복잡한 과정을 기치지 않고 사용자 신호를 직접 검출하는 효율적인 다중 사용자 검파기를 이 논문에서 제안한다.

본 논문의 2절에서 동기 방식과 비동기 방식 각각의 효율적인 추적을 통한 수신신호 모델에 대해 설명하고, 3절에서는 CCMV 방법을 이용한 블라인드 다중 사용자 검파기에 대해 설명한 후, 4절에서 컴퓨터 모의 실험을 통해 성능을 분석하고, 5절에서 결론을 내리겠다.

2. 수신 신호 모델

2.1 동기 방식

동기 CDMA 방식에서는 모든 사용자들의 신호가 동기가 맞추어져 있고, 이 동기화 수신단에서 알고 있다고 가정할 수 있다. 그러면, M 개의 안테나를 사용하는 수신기에 다중 경로 페이딩 채널을 통과하여 수신된 j 번째 사용자의 기저 대역 신호는 검 주기에 따라 샘플링하여 이산 시간 신호 표현으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_j(n) = \sum_{k=0}^{L-1} g_j(k) s_j(n-k) \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{x}_j(n)$ 과 $\mathbf{g}_j(k)$ 는 M 차원 벡터로써, $\mathbf{g}_j(k)$ 는 j 번째 사용자와 배열 안테나 사이에 전체의 벡터 채널 임펄스 응답으로 다중 경로 페이딩 현상을 포함하며, FIR 채널로 모델링 할 수 있다[6]. 그리고 $s_j(k)$ 는 j 번째 사용자의 심볼 $b_j(n)$ 이 길이가 P 인 확산 코드 $c_j(k)$ 에 의해 확산된 신호이다. 이것을 실제의 채널 임펄스 응답 길이 q 와 다중 사용자의 수 J , 안테나의 수 M 에 따라서 $L > (q+JM)$ 의 관계를 만족하도록 L 을 결정하고 L 개 만큼의 수신 데이터 벡터를 축적하여 ML 차원 벡터를 만들면 다음과 같다.

$$\mathbf{X}_j(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_j^T(nP) & \mathbf{x}_j^T(nP-1) & \dots & \mathbf{x}_j^T(nP-L+1) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_j(0) & \dots & \mathbf{g}_j(q-1) \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{g}_j(0) & \dots & \mathbf{g}_j(q-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_j(P) \\ \vdots \\ c_j(P-L-q+2) \end{bmatrix} \mathbf{b}_j(n) \quad (2)$$

이것은 다시 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{X}_j(n) = \mathbf{C}_j \mathbf{g}_j \mathbf{b}_j(n) \quad (3)$$

여기서,

$$\mathbf{C}_j = \begin{bmatrix} c_j(P) & \dots & c_j(P-q+1) \\ \vdots & & \vdots \\ c_j(P-L+1) & \dots & c_j(P-L-q+2) \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_M \quad (4)$$

$$\mathbf{g}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_j(0) \\ \vdots \\ \mathbf{g}_j(q-1) \end{bmatrix}$$

이고, \otimes 는 Kronecker delta 곱이다. 이것을 J 명의 전체 사용자에게 대해서 쓰면

$$\mathbf{X}(n) = \sum_{j=1}^J \mathbf{X}_j(n) + \mathbf{v}(n) = [\mathbf{C}_1 \mathbf{g}_1 \dots \mathbf{C}_J \mathbf{g}_J] \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1(n) \\ \vdots \\ \mathbf{b}_J(n) \end{bmatrix} + \mathbf{v}(n) \quad (5)$$

이고, $\mathbf{v}(n)$ 은 가산성 가우시안 백색 잡음이다.

2.2 비동기 방식

비동기 CDMA 방식에서는 모든 사용자들의 신호가 임의의 시간 지연을 가지고 수신단에 입사하게 된다. 일반적으로 수신단에서 각 사용자들의 시간 지연을 알고 있다고 가정할 수 있으므로 식 (1)을 비동기 방식으로 다시 쓰면

$$\mathbf{x}_j(n) = \sum_{k=0}^{q-1} \mathbf{g}_j(k) s_j(n + \tau_j - k) \quad (6)$$

이다. 여기서 τ_j 는 j 번째 사용자의 시간 지연이며 잡음의 길이에 상수배이다. 각 사용자의 시간 지연으로부터 $K = \lfloor \tau_j - 0 \rfloor$ 인 시간 지연의 개수, $\lfloor \tau_j + (L-q-1) \rfloor$ 인 시간 지연의 개수)가 될 때, $(ML-2P+K) \geq Mq$ 를 만족하도록 L 을 결정하고 역시 L 개 만큼의 수신 데이터 벡터를 축적하여 ML 차원 벡터로 만들면 식 (2)와 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{X}_j(n) = \begin{bmatrix} c_j(\tau_j) & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{g}_j(0) \dots \mathbf{g}_j(q-1) & & c_j(1) & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{g}_j(0) \dots \mathbf{g}_j(q-1) & & 0 & \dots & c_j(P) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & c_j(P+\tau_j-L-q+2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_j(n) \\ \vdots \\ \mathbf{b}_j(n-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

이것은 다시 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{X}_j(n) = [\mathbf{C}_{jw} \mathbf{C}_{j\beta}] \begin{bmatrix} \mathbf{g}_j(0) & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{g}_j(q-1) & 0 \\ 0 & \mathbf{g}_j(0) \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \mathbf{g}_j(q-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_j(n) \\ \mathbf{b}_j(n-1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,

$$\mathbf{C}_{jw} = \begin{bmatrix} c_j(\tau_j) & \dots & c_j(1) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_j(1) & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_M \quad (9a)$$

$$\mathbf{C}_{j\beta} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & c_j(P) & \dots & c_j(P+\tau_j-q+1) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & c_j(P-q+2) & \dots & c_j(P-q+1) \\ c_j(P) & \dots & \dots & \dots & \dots & c_j(P-q+1) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_j(P+\tau_j-L+1) & \dots & \dots & \dots & \dots & c_j(P+\tau_j-L-q+2) \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_M \quad (9b)$$

이다. J 명의 전체 사용자에게 대해서는,

$$\mathbf{X}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{1w} \mathbf{C}_{1\beta} \mathbf{G}_1 & \dots & \mathbf{C}_{Jw} \mathbf{C}_{J\beta} \mathbf{G}_J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1(n) \\ \mathbf{b}_1(n-1) \\ \vdots \\ \mathbf{b}_J(n) \\ \mathbf{b}_J(n-1) \end{bmatrix} + \mathbf{v}(n) \quad (10)$$

로 표현할 수 있다.

3. 코드 제한 최소 분산 방법을 이용한 블라인드 다중 사용자 검파기

이 절에서는 2절에서 설명한 동기화 및 비동기 신호 모델을 이용하여 제안한 다중 사용자 검파기에 대해 설명하겠다.

전형 다중 사용자 검파기의 계수 벡터를 \mathbf{w} 라 하면,

$$\hat{\mathbf{b}}(n) = \mathbf{w}^H \mathbf{X}(n) \quad (11)$$

로 j 번째 사용자 신호를 검출 할 수 있다. 이 다중 사용자 검파기의 계수벡터 \mathbf{w} 를 결정하기 위해 다음과 같이 원하는 사용자 신호에 대해서는 일정한 응답을 갖도록 하는 선형 제한 조건을 주고 수신기 출력 전력을 최소로 만들어 주어 다른 간섭 신호들을 제거하는 선형 제한 최소 분산(Linear Constrained Minimum Variance: LCMV) 빔 형성 방법을 이용한다[7].

$$\mathbf{w}_j = \arg \min_{\mathbf{w}_j} \mathbf{w}_j^H \mathbf{R} \mathbf{w}_j \quad \text{subject to} \quad \mathbf{w}_j^H \mathbf{C}_j \mathbf{g}_j = r \quad (12)$$

여기서, r 은 파라미터 상수이고, \mathbf{C}_j 는 선형 제한 조건 행렬로 동기 방식에서는 식 (4)에 표현된 행렬을 사용하고, 비동기 방식에서는 각 사용자의 시간 지연 τ 에 따라 다음과 같이 줄 수 있다.

$$\mathbf{C}_j = \begin{cases} \mathbf{C}_{j\mu} & \tau_j > \frac{L+q-1}{2} \\ \mathbf{C}_{j\beta} & \tau_j < \frac{L+q-1}{2} \end{cases} \quad (13)$$

그러면, 식 (12)에서의 제한 조건을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_j^H \mathbf{C}_j \mathbf{g}_j &= \mathbf{r}^H \mathbf{g}_j = r \\ \mathbf{C}_j^H \mathbf{w}_j &= \mathbf{r} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, \mathbf{r} 은 최적화 시켜 주어야 할 파라미터 벡터이다. 식 (14)에 주어진 제한 조건은 단지 원하는 사용자의 확산 코드에 의해 결정되므로 다른 사용자들의 확산 코드에 대한 정보가 필요 없게 된다.

최적 계수는 식 (12), (14)에서 다음과 같이 얻어진다[7].

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C}_j (\mathbf{C}_j^H \mathbf{R} \mathbf{C}_j)^{-1} \mathbf{r} \quad (15)$$

여기서, 최적의 파라미터 벡터 \mathbf{r} 을 결정하기 위해 식 (15)를 식 (12)에 대입하여 최소 출력 전력을 구하면

$$J(\mathbf{r}) = \mathbf{r}^H (\mathbf{C}_j^H \mathbf{R} \mathbf{C}_j)^{-1} \mathbf{r} \quad (16)$$

이 되고, 수신기 출력에서 원하는 사용자 신호의 전력을 최대로 만들어주기 위하여 \mathbf{r} 은 다음과 같이 결정된다.

$$\mathbf{r}_{\text{opt}} = \arg \max_{\mathbf{r}} \frac{\mathbf{r}^H (\mathbf{C}_j^H \mathbf{R} \mathbf{C}_j)^{-1} \mathbf{r}}{\mathbf{r}^H \mathbf{r}} \quad (17)$$

따라서 \mathbf{r} 은 $(\mathbf{C}_j^H \mathbf{R} \mathbf{C}_j)^{-1}$ 의 최대 고유치에 대응하는 고유벡터, 즉, $(\mathbf{C}_j^H \mathbf{R} \mathbf{C}_j)$ 의 최소 고유치에 대응하는 고유벡터가 된다. 그림 1은 이 알고리즘에 대한 블록도이다.

일반적으로 확산 코드의 길이는 채널의 차수 보다 훨씬 크게 되므로, 즉, $P \gg L$, 식 (15)에서 행렬 \mathbf{R}^{-1} 의 계산은 기존의 $MP \times MP$ 차원 행렬에서 단지 $ML \times ML$ 차원 행렬로 차원이 대폭 줄어들게 되어 계산상의 상당한 이득을 얻을 수 있다.

그러나 이 방법은 사용자 신호의 검출을 위해 확산 코드의 일부분만을 가지고 제한 조건을 주어 사용하므로 DS-SS-CDMA 시스템에서 얻게 되는 기리 이득을 다 얻을 수

없는 단점이 있다

4. 성능평가

이 절에서는 컴퓨터 모의실험을 통해 앞에서 제안한 방법에 대하여 성능을 평가하였다. 모의 실험은 4개의 안테나를 사용하는 수신기에 5명의 사용자의 신호가 길이 $P=32$ 인 랜덤한 확산 코드에 의해 확산되어, 임펄스 응답의 길이가 7인 랜덤한 FIR 채널로 모델링한 각각의 다중 경로 페이딩 채널을 통해 동시에 수신되는 환경이다.

그림 2는 제안한 비동기 방식 다중 사용자 검파기와 Paulraj에 의해 제안된 블라인드 MMSE 다중 사용자 검파기[5]에서의 출력 신호의 정상도를 나타낸다. 정상도를 놓고 볼 때 제안한 방법은 블라인드 MMSE 다중 사용자 검파기에 비해 훨씬 적은 계산량으로 비슷한 성능을 내는 것을 볼 수 있다. 여기서 $\text{SNR} = 10\text{dB}$ 이고, 256개의 데이터 샘플을 사용하였다.

그림 3은 동기 방식과 비동기 방식의 수신기에서 검출한 사용자 신호의 정상도를 나타낸다. 비동기 방식에서 각 사용자의 시간 지연은 $[0, P/2]$ 에서 임의의 값을 갖도록 하였다. 그림을 통해 원하는 사용자 신호를 잘 검출하는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 같은 환경에서 식 (18)과 같이 정의된 수신기 출력의 평균 자승 오차를 SNR 에 따라 그린 것이다.

$$\text{MSE} = E \left\{ \left[\hat{b}_j(n) - b_j(n) \right]^2 \right\} \quad (18)$$

그림 5는 $\text{SNR}=10\text{dB}$ 로 고정시킨 후 데이터 샘플에 따라 출력의 평균 자승 오차를 그린 것이다. 그림 3, 4와 5에서 알 수 있는 것처럼 비동기 방식이 동기 방식에 비해 성능이 떨어진다. 이것은 두 방식에서의 제한조건 \mathbf{C}_j 와 $\mathbf{C}_{j\alpha}$ (or $\mathbf{C}_{j\beta}$)를 비교해 보면 쉽게 알 수 있는데, 비동기 방식의 제한 조건에는 사용자의 시간지연을 경계로 q 개의 코드가 나뉘어져 들어가 있으므로 원하는 사용자의 응답을 일정하게 유지시켜 주는 제한조건이 약해지기 때문이다.

5. 결론

본 논문에서는 효율적인 데이터 축적을 통한 적은 계산량으로 다중 사용자 신호를 검출하는 방법에 대해서 제안 하였다. 제안한 블라인드 다중 사용자 검파기는 다중 경로 페이딩 채널 환경에서 채널 추정하는 복잡한 과정을 거치지 않고 직접 사용자 신호를 검출할 수 있는 것으로 그 성능을 모의 실험을 통해 확인하였다.

이 방법은 사용자 신호의 검출을 위해 확산 코드의 일부분만을 가지고 제한 조건을 주어 사용하므로 계산상으로 효율적이지만, DS-SS-CDMA 시스템에서의 기리 이득을 다 얻지 못한다는 단점이 있다. 차후에 이에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] M. Torlak and G. Xu, "Blind Multiuser Channel Estimation In Asynchronous CDMA Systems," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 45, no. 1, Jan 1997.
- [2] D. Gesbert and A. Paulraj, "Blind Multi-User Linear Detection Of CDMA Signals In Frequency Selective Channels," in *Proc. ICC 98*, Atlanta, June 1998.
- [3] J. B. Schodorf and D. B. Williams, "A Constrained Optimization Approach To Multiuser Detection," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 45, no. 1, Jan 1997.
- [4] M. K. Tsatsanis and Z. Xu, "On Minimum Output Energy CDMA Receivers In The Presence Of Multipath," in *Conf. On Info. Sciences and Systems (CISS '97)*, Baltimore, MD, March 1997.
- [5] D. Gesbert, J. Sorelius and A. Paulraj, "Blind Multi-User MMSE Detection Of CDMA Signals," in *Proc. ICASSP-98*, Seattle, May 1998.
- [6] J. G. Proakis, *Digital Communications*, New York: McGraw-Hill, 1989, 2nd Ed.
- [7] D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.

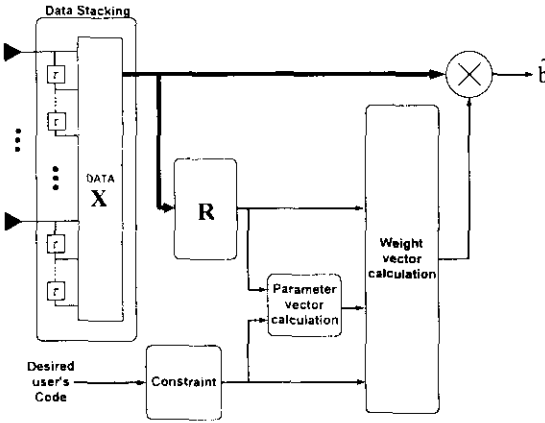


그림 1. CCMV 방법을 이용한 블라인드 다중 사용자 검파기의 블록도

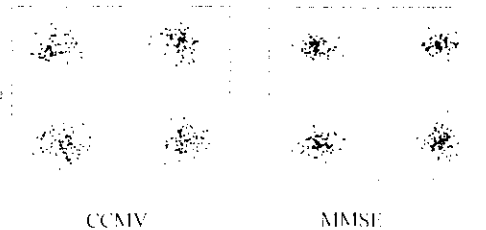


그림 2. CCMV 블라인드 다중 사용자 검파기와 블라인드 MMSE 다중 사용자 검파기의 정상도

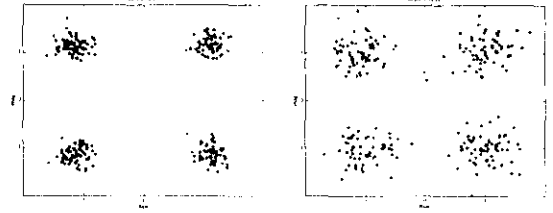


그림 3. CCMV 블라인드 다중 사용자 검파기에서 원하는 사용자 신호의 정상도

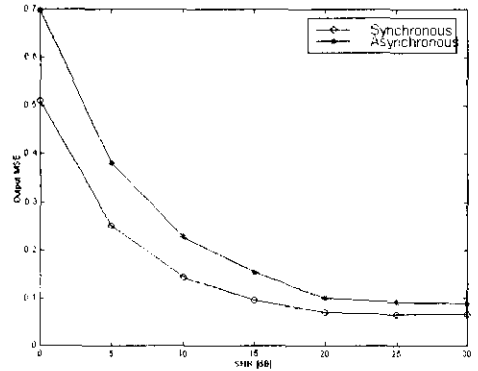


그림 4. SNR 에 따른 출력 평균 자승 오차

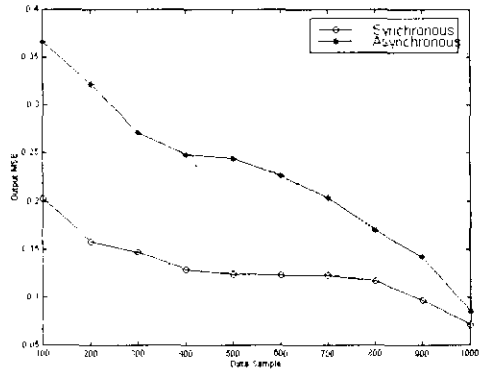


그림 5. 데이터 샘플 수에 따른 출력 평균 자승 오차