

VFF 칼만 필터와 데이터 가중 합을 이용한 DS-CDMA 에서의 다중 사용자 검출

전재진, 강상기, 이상욱, 성평모
서울대학교 전기 공학부

Multiuser Detection in DS-CDMA using VFF Kalman Filter and Weighted Sum of the Data

Jae-jin Jun, Sang-Ki Kang, Sang-wook Lee, Koeng-Mo Sung
School of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
e-mail: jjjun@acoustics.snu.ac.kr

요 약

기존의 Rayleigh fading 환경에서 칼만 필터를 사용한 다중 사용자 검출에서는 비동기적으로 들어온 다른 사용자 신호의 상태가 바뀔때 따라서 수렴 하던 신호에 영향을 미친다. 이러한 특성은 결국 전체 시스템에 영향을 미쳐서 검출 성능을 떨어 뜨린다. 본 논문에서는 에러가 발생하였을 때의 경우를 고려하기 위해 VFF(Variable forgetting factor)를 도입하였고 이를 이용해 추정된 신호의 가중 합을 기반으로 시스템을 구성한 결과 성능이 향상되었음을 보이고자 한다.

1. 서론

다중사용자 검출기법은 DS-CDMA 시스템에서 single user detector 에서 나타나는 사용자간 간섭신호와 원근 문제를 극복하기 위해 제안되었다. 이 문제를 적응 필터를 사용하여 해결하고자 하는 시도들이 있었는데 그 중에 칼만 필터를 이용한 방법이 제안되었다[1]. 이 방법을 이용하면 측정 계수들이 원하는 값으로 시간에 지남에 따라 수렴하는 것을 알 수 있다. 그러나, 사용자가 많아질수록 측정 계수의 차수는 증가하고 이 때문에 정확한 값의 추정은 힘들어진다. 게다가 수렴하는 과정에서 비동기적인 다른 사용자의 한 심볼의 전송이 완료되

고 새로운 신호의 전송이 시작될 때, 이 새로운 수렴과정은 다른 사용자의 수렴에도 영향을 미쳐서 결국 시스템의 성능을 저하시킨다.

한 심볼내에서 각 칩에 대해 연산을 수행할 경우 초기 수렴과정 후의 데이터들은 대부분 마지막 칩의 결과의 데이터 정보와 상관이 크다고 볼 수 있다. 그렇기 때문에 단순히 마지막 단에서 샘플링한 결과만으로 판단을 내리는 것보다 모든 칩들에서 얻을 수 있는 정보를 같이 고려하는 것이 성능향상에 도움이 된다고 본다.

에러 성분을 고려하여 VFF-칼만 필터를 사용하고, 데이터의 가중합을 이용하여 BER 성능이 개선됨을 보이고자 한다.

2. 다중사용자 환경에서 상태 방정식

그림 1 에서 기존의 다중사용자 검출을 위한 수신단의 블록도를 보였다. 수신단의 목적은 상태수정 갱신부분에서 칼만 필터를 이용하여 각 사용자의 데이터를 검출해 내는 것이다. 다중 사용자 검출을 위한 유사함수는

$$f[y(n)|(b_1, b_2, \dots, b_K)] = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left[y(n) - \sum_{k=1}^K c_k(n)b_k(i_k)s_k(n-\tau_k)\right]^2\right) \quad (1)$$

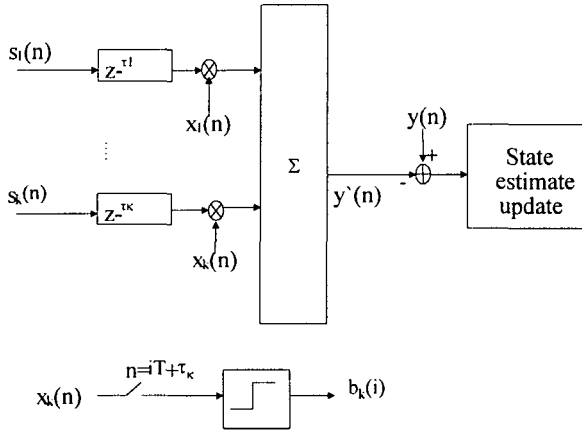


그림 1. 다중사용자 검출을 위한 수신단

이다. 여기서 수신된 신호 $y(n)$ 은

$$\begin{aligned}
 y(n) &= \sum_{k=1}^K c_k(n) b_k(i_k) s_k(n - \tau_k) + v(n) \\
 &= [s_1(n - \tau_1) \ s_2(n - \tau_2) \ \dots \ s_K(n - \tau_K)] \\
 &\quad \begin{bmatrix} c_1 b_1(i_1) \\ c_2 b_2(i_2) \\ \vdots \\ c_K b_K(i_K) \end{bmatrix} + v(n) \\
 &= \mathbf{h}_n^T \mathbf{x}(n) + v(n)
 \end{aligned} \tag{2}$$

이다[1].

신호는 한 심볼 동안 일정한 값을 가진다고 생각한다면

$$x_k(n) = c_k(n) b_k(i_k), \quad x(n) \approx x(n-1) \quad \text{이다.}$$

$n = i_k T + \tau_k$ 일 때 심볼과 그 다음 심볼 사이에서는

다음과 같은 식이 성립한다.

$$\mathbf{x}(n) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(n-1) + \begin{bmatrix} w \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

3. VFF-칼만 필터

시변 추정 계수 $w(j, k)$ 를 사용하여 VFF 칼만 필터의 비용 함수를 나타내면 다음과 같다.

$$J_k = \sum_{j=1}^k w(j, k) R^{-1}(j) [y(j) - \mathbf{h}^T(j) \mathbf{x}(j)]^2 \tag{4}$$

여기서 $w(j, k)$ 는

$$w(j, k) = \begin{cases} \prod_{i=j+1}^k \lambda(i), & 1 \leq j \leq k-1 \\ 1, & j \geq k \end{cases} \tag{5}$$

로 주어진다.

비용함수를 최소화 시키는 VFF $\lambda(i)$ 를 구해보면 다음과 같다[2].

$$\lambda(k) = 1 - \frac{R^{-1}(k)}{J_1} e^2(k) [1 - \mathbf{h}^T(k) \mathbf{K}(k)]^2 \tag{6}$$

표 1에서 VFF 칼만 필터의 식을 정리하였다.

표 1 VFF 칼만 필터 알고리즘

$\hat{\mathbf{x}}^-(k) = \Phi(k) \hat{\mathbf{x}}^+(k-1)$ $\mathbf{P}^-(k) = \lambda^{-1}(k-1) \Phi(k)^T \mathbf{P}^+(k-1) \Phi(k) + \mathbf{Q}$ $\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k) \mathbf{h}(k) [\mathbf{h}^T(k) \mathbf{P}(k) \mathbf{h}(k) + R(k)]^{-1}$ $\hat{\mathbf{x}}^+(k) = \hat{\mathbf{x}}^-(k) + \mathbf{K}(k) (y(k) - \mathbf{h}^T(k) \hat{\mathbf{x}}^-(k))$ $e(k) = y(k) - \mathbf{h}^T(k) \hat{\mathbf{x}}^-(k)$ $R(k) = \alpha \sigma_e^2(k)$ $\lambda(k) = 1 - \frac{R^{-1}(k)}{J_1} e^2(k) [1 - \mathbf{h}^T(k) \mathbf{K}(k)]^2$ $\mathbf{P}^+(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \mathbf{h}^T(k)] \mathbf{P}^-(k)$
--

4. 데이터의 가중합

fading 환경에서 수신된 신호는 Rayleigh 분포를 가지는 임의의 크기로 들어온다. 이때, 신호의 크기가 작은 신호는 다른 신호의 상태 변화와 채널의 변화에 의해 영향을 받는다. 그러므로 기존에 제안된 방법처럼 칼만 필터를 통과시킨 후, $n = iT + \tau_k$ 에서 샘플링한 결과로 들어온 신호를 판단하는 방법을 수정해야 한다. 한 심볼 주기 내의 모든 신호는 전송된 신호에 대한 정보를 포함하고 있고 이것은 신호의 판단에 도움을 줄 수

있다. 그러나 심볼의 앞쪽에서 얻어진 신호는 칼만 필터의 수렴과정에서 나오는 불완전한 데이터이기 때문에 각 신호에 가중치를 설정하여 고려할 필요가 있다. 먼저 들어온 신호는 데이터 판단에 영향이 적어야 하고 채널이나 다른 사용자 신호 변화에 영향을 받은 데이터도 가중치가 적어야 한다. 이를 위해 수신단에서 사용할 파라미터로서 $d(n)$ 을 정의한다. 이것은

$$d(n) = \alpha * d(n-1) * \lambda(n) + x(n) \quad (7)$$

로 설정할 수 있다. 신호에 에리 성분이 커질 경우 forgetting factor $\lambda(n)$ 이 작아지므로, 그 전에 들어온 신호 성분이 결정에 미치는 영향을 작게 만든다. 위에서 α 는 시스템에 따라 결정해야 할 상수로서 코드의 길이나 사용자의 수, 또는 필터 수렴 정도에 따라 적절하게 결정되어야 한다.

$n = iT + \tau_k$ 일 경우 이 값을 이용하여 신호에 대한 판단을 정하고 $d(n)=0$ 으로 초기화한다.

5. 모의실험

시뮬레이션 환경은 Rayleigh fading 환경에서, Cross correlation 이 작은 31 칩의 gold sequence 를 사용하였으며, 사용자 수는 20 명으로 설정하였다. 사용자 신호 끼리는 비동기적이며, 신호의 delay 는 한 심볼 주기동안 균등하게 분포되어 있다고 생각하였다.

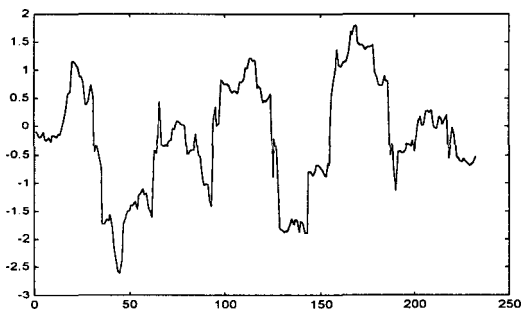


그림 2. 필터 통과한 수신 신호

그림 2는 사용자 한명의 7개의 심볼에 대한 수신 신호를 보인 것이다. 데이터는 {1, -1, -1, 1, -1, 1, 1} 이고 가중합 결과를 그림 3에서 보였다.

모의실험을 통해서 정합 필터, 칼만 필터, VFF-칼만 필

터, VFF-칼만+ 가중합 의 성능을 BER 측면에서 비교해 보았다. 그림 4는 모의 실험 결과이다.

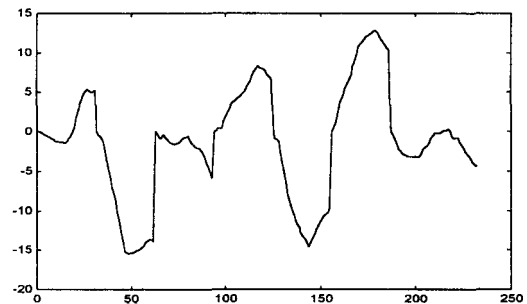


그림 3. 데이터의 가중합

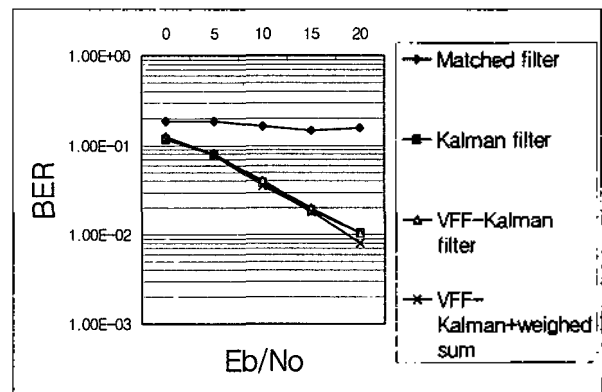


그림 4. Eb/No 에 따른 BER 측정

정합필터는 다른 사용자에 의한 간섭에 의해 영향을 많이 받기 때문에 Eb/No 이 증가하는 경우라도 성능향상이 두드러지지 못한다. 다른 필터들은 여러 사용자에 대해 최적화된 경우이다. 그에 따라 신호성분이 커지면 성능향상을 보인다.

모의실험 환경이 느린 페이딩이기 때문에 한 심볼동안 채널의 변화는 없다고 가정한다. 이렇게 정적인 환경에서는 VFF-Kalman 에서 망각인자가 1 일 경우 최적의 성능을 보인다. 이 경우는 일반적인 칼만 필터와 같다. 시뮬레이션 결과에서도 정적인 환경에서 Kalman filter 가 VFF-Kalman filter 보다 약간 나은 성능을 보였다.

가중합을 고려한 수신기는 다른 것들보다 조금 더 나은 성능을 보임을 알 수 있다

6. 결론 및 향후 연구

모의실험 결과를 통해 제안된 알고리즘의 성능이 기존의 방법에 비해 우수함을 알 수 있었다. 다양한 크기로 들어오는 사용자들의 신호를 비교적 정확히 분리해 내는 것을 알 수 있었다. 실제 환경처럼 빠른 페이딩 환경의 경우를 고려한다면 성능 향상이 더 있을 것으로 기대된다.

지금까지는 신호가 채널을 통과하여 생기는 감쇄에 대한 정보 없이 수신단을 구성하였으나 채널추정(channel estimation)을 통해 채널에 대한 정보를 알 수 있다면, 더 나은 성능 향상을 위한 수신단을 설계 할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 얻어진 데이터는 감쇄크기값을 평균으로 하는 확률 분포를 나타낼 것으로 예상되며, 이것을 모델링한다면 가중합을 이용한 방법보다 더 좋은 성능을 보일 것이다.

참고문헌

- [1] T. J. Lim, L. K. Rasmussen, and Hiroki Sugimoto, "An Asynchronous Multiuser CDMA Detector Based on the Kalman Filter", *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 16, No.9, Dec. 1998.
- [2] S.W. Lee, J.S. Lim et al, "Time varying Signal Frequency Estimation by VFF Kalman Filtering", *Signal Processing*, vol. 77 343-347, 1999.
- [3] Sergio Verdu, "Multiuser Detection", Cambridge university press, 1998.
- [4] T.J. Lim, "Adaptive Symbol and Parameter Estimation in Asynchronous Multiuser CDMA detectors", *IEEE trans. On communications*, vol.45, No.2, Feb, 1997.
- [5] M.K.Simon, S.M.Hinedi, W.C.Lindsey, "Digital Communication Techniques: Signal Design and Detection", Prentice Hall, 1994.
- [6] Simon Haykin, "Adaptive Filter Theory", Prentice Hall, 1996.
- [7] M.H.Hayes, "Statistical Digital Signal Processing and Modeling", John Wiley & Sons, Inc, 1996.