

비동기 CDMA 채널을 위한 의사 역행렬 형태의 역상관 검출기

정회원 孟勝柱*, 李秉基*

Pseudo-Inverse-Filtering Type Decorrelating Detector
for Asynchronous CDMA ChannelsSeung Joo Maeng*, Byeong Gi Lee* *Regular Members*

*본 논문은 과학재단에서 주관하는 특정기초연구의 일환으로 수행되었습니다.

요 약

본 논문에서는 비동기 CDMA 채널을 위한 의사 역행렬 형태의 역상관 검출기를 제안한다. 본 논문에서는 먼저 동기 CDMA 채널에서 역상관 검출기의 동작이 확산 수열로 구성된 행렬의 의사 역행렬 처리와 동일함을 보이고, 이 사실을 이용하여 역상관 검출기가 다중접속 간섭신호를 완전히 제거하는 선형 검출기들 중 최대의 신호대 잡음비를 가짐을 보인다. 그 후, 의사 역행렬 형태를 비동기 채널로 확장하여 새로운 역상관 검출기를 제안하고, QR-분해를 이용한 구현 방법에 대해 논의한다. 제안 방법은 각 사용자별로 분산적인 형태를 가지기 때문에 사용자 수 변화에 대한 검출기 계수의 갱신을 효율적으로 수행할 수 있다. 본 논문에서는 마지막으로 제안된 역상관 검출기의 성능을 비트오류율의 관점에서 분석한 후, 컴퓨터 모의 실험을 통해 기존의 정합 필터링 방법에 대한 성능 향상 정도를 확인한다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a new decorrelating detector called pseudo-inverse-filtering type decorrelating detector for asynchronous CDMA channels. We first show that the matched filtering and decorrelating operations of the existing decorrelating detectors can be replaced with the pseudo-inverse filtering operations in synchronous channels, and using this fact we show that the decorrelating detector has the largest SNR among the linear detectors that can eliminate MAI. Then we introduce asynchronous pseudo-inverse filtering type decorrelating detector by extending this result for asynchronous channels, and discuss implementation methods of the proposed decorrelating detectors. Since the proposed scheme employs a decentralized structure for updating coefficients, it has the flexibility to add/remove users. Finally we analyze the performance of the proposed decorrelating detector in terms of the bit error rate, and examine its performance improvements over the conventional detectors through computer simulations.

* 서울대학교 전기공학부
論文番號 : 97392-1029
接受日子 : 1997年 10月 29日

I. 서 론

지난 몇 년 동안 무선환경에서 양질의 디지털 이동통신을 가능하게 하기 위한 연구가 디지털 통신의 영역에서 가장 중요한 부분의 하나로 등장했다. 특히, CDMA 시스템의 등장은 기존의 TDMA 시스템으로 는 힘들었던 가입자 수용용량의 문제점을 어느 정도 해결함으로써 새로운 디지털 이동통신방식으로 각광 받게 되었다[1]. CDMA 시스템에서는 여러 사용자가 동시에 같은 시간 대역과 같은 주파수 대역을 사용하여 신호를 전송하며, 그 사용자에 고유한 확산 신호에 의해 사용자의 신호를 구분한다. 이 경우, 서로 다른 사용자 확산 신호 사이에는 상관도가 존재하게 되며, 수신단에서 특정한 사용자의 신호를 수신하는 경우 이 값은 다중접속 간섭신호(MAI : multiple access interference)로 작용한다.

기존의 CDMA 시스템에서는 수신단에서 각 사용자 확산 신호를 이용한 정합 필터링을 통해 전송된 신호를 검출한다. 하지만 이 경우 MAI 성분은 잡음으로 작용하게 되며, 검출하고자 하는 사용자의 신호가 다른 사용자의 신호에 가려져 제대로 수신되지 못하는 원근 효과(near-far effect)로 인해 성능의 저하를 겪게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 수신된 신호에서 다른 사용자 신호로부터의 간섭 성분을 제거하여 검출 성능을 향상시키는 다중 사용자 검출법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다[2-7]. 이 중 [2]에 제안된 방법은 최적의 검출 방법으로 알려져 있지만, 그 복잡도가 사용자 수에 따라 지수적으로 증가하는 문제점을 가지고 있다. 이에 따라 다양한 준최적 검출기들이 제안되고 있으며, 이들 중 역상관 검출 방법은 간섭 신호의 크기에 관계없이 각 사용자 확산 신호에 대한 정보만을 이용해 다중접속 간섭신호를 제거해 주며, 원근 저항(near-far resistance)의 관점에서 볼 때 최적인 선형 검출기이다[3].

일반적으로 역상관 검출기의 구현은 동기 채널에 대해서는 간단하지만, 비동기 채널의 경우에는 다른 사용자들의 이전 및 이후 비트들에 의한 간섭이 현재 수신된 신호에 섞여 있기 때문에 그 구현이 복잡하게 된다. 본 논문에서는 먼저 동기 채널에서 역상관 검출기의 동작이 확산 수열로 구성된 행렬의 의사 역행렬 처리와 동일함을 이용하여 이를 비동기 채널에까지 확장한 의사 역행렬 형태의 새로운 역상관 검출기

를 제안하고자 한다. 이 방법은 사용자별로 분산적인 형태를 가지며, 사용자 수가 증가하거나 감소할 때, QR-분해를 이용하여 효율적으로 계수를 갱신할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 기본적인 DS/CDMA 시스템에 대해 설명한 후, 3장에서 의사 역행렬 형태의 역상관 검출기를 유도한다. 이어 4장에서는 제안된 다중 사용자 검출기의 구현 방법에 대해 검토하고, 끝으로 5장에서는 제안 방법의 비트오류율을 분석하고 컴퓨터 모의실험을 통해 성능 향상을 확인한다.

II. DS/CDMA 시스템 모델링

사용자 수가 K 인 비동기 다중 접속 채널을 가정하면, 수신단에서의 수신신호는

$$r(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^K \sqrt{E_k} b_k(i) s_k(t-iT-\tau_k) + n(t) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 이 식에서 $b_k(i) \in \{-1, 1\}$ 는 사용자 k 의 i 번째 비트를, $s_k(t)$ 는 사용자 k 의 정규화된 확산 신호를, $\sqrt{E_k}$ 와 τ_k 는 각각 사용자 k 의 전력과 지연을 나타낸다. 또 T 는 한 비트 주기를 나타내고, $n(t)$ 는 전력 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 가산성 백색 가우시안 잡음 신호를 나타낸다.

수신된 신호 $r(t)$ 는 각 사용자의 확산 신호에 정합되어 있는 정합 필터뱅크 수신기에 입력되며, 이 경우 출력은

$$y(i) = R(1) E b(i-1) + R(0) E b(i) + R^T(1) E b(i+1) + n(i) \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 단,

$$E = \text{diag} [\sqrt{E_1}, \sqrt{E_2}, \dots, \sqrt{E_K}], \quad (3)$$

$$y(i) = [y_1(i), y_2(i), \dots, y_K(i)]^T \quad (4)$$

이고, $b(i)$ 와 $n(i)$ 도 각각 이와 같은 형태로 정의된다. 또한 $R(l)$ 은 크기가 $K \times K$ 인 상호 상관 행렬이

며, 각 원소는

$$R_{ij}(l) = \int_{-\infty}^{\infty} s_i(t - \tau_i) s_j(t + lT - \tau_j) dt \quad (5)$$

로서 정의된다.

기존의 정합 필터링에 의한 검출기의 경우, 단순히 정합 필터처리된 신호의 부호를 이용하여 데이터를 검출하므로, 검출 신호 $\hat{b}(i)$ 는

$$\hat{b}(i) = \text{sgn}\{\mathbf{y}(i)\} \quad (6)$$

로 표현된다. 그러나 이 방법은 MAI를 전혀 고려하지 않으므로, MAI가 잡음 신호에 비해 상대적으로 큰 환경에서는 성능이 크게 저하된다.

III. 의사 역행렬 형태의 역상관 검출기

동기 채널의 경우에는 각 사용자의 지연을 모두 0으로 둘 수 있기 때문에, 식 (2)는

$$\mathbf{y}(i) = \mathbf{R}(0) \mathbf{E} \mathbf{b}(i) + \mathbf{n}(i). \quad (7)$$

의 형태로 간소화된다. 이 경우, 역상관 검출기는 $\mathbf{R}^{-1}(0) \mathbf{y}(i)$ 의 부호를 취해 출력 데이터의 값을 결정한다.

이제, 사용자 k 의 정규화된 확산 신호를

$$s_k(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_{j=0}^{N-1} a_{k,j} p_{T_c}(t - jT_c). \quad (8)$$

로서 나타내도록 하자. 이 식에서 $p_{T_c}(t)$ 는 $0 \leq t \leq T_c$ 구간에서 1이고 나머지 구간에서 0인 구형과 함수를, N 은 처리 이득을, $T_c = T/N$ 은 칩 구간을 나타낸다. 또한, $a_{k,j} \in (-1, 1)$ 이다. 이 경우, 수신된 신호를 칩 단위로 적분한 후 표본화한 출력은

$$\mathbf{r}(i) = \mathbf{S} \mathbf{E} \mathbf{b}(i) + \mathbf{n}_c(i) \quad (9)$$

로 표현된다. 단, 확산 수열 행렬 \mathbf{S} 는 확산 수열 벡터 $\mathbf{a}_k = 1/\sqrt{N} \cdot [a_{k,0}, a_{k,1}, \dots, a_{k,N-1}]^T$ 에 대해

$$\mathbf{S} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_K] \quad (10)$$

와 같이 정의되며, $\mathbf{n}_c(i)$ 는 평균이 영벡터이고 자기 상관 행렬이 $N_0/2 \mathbf{I}_N$ 인 N 차원 가우시안 잡음 벡터이다. 식 (9)와 (10)을 결합하여 식 (7)과 비교하면

$$\mathbf{y}(i) = \mathbf{S}^T \mathbf{r}(i), \quad (11a)$$

$$\mathbf{R}(0) = \mathbf{S}^T \mathbf{S} \quad (11b)$$

의 관계를 얻는다. 이 식으로부터 \mathbf{S}^T 는 정합 필터링의 역할을, $(\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1}$ 는 $\mathbf{R}^{-1}(0)$ 의 역할을 각각 수행함을 알 수 있다. 그런데 $(\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T$ 는 \mathbf{S} 의 의사 역행렬이므로, 기존의 역상관 검출기의 정합 필터링과 역상관 처리과정은 의사 역행렬 처리로 수행될 수 있게 되는 것이다.

이제 위에 제시한 역행렬 형태의 역상관 검출기가 MAI를 완전히 제거하는 선형 검출기들 중 최대의 신호대 잡음비를 가지는 검출기임을 보이도록 하겠다. 사용자 k 에 대해 MAI를 완전히 제거하는 임의의 선형 검출기를 \mathbf{t}_k 라 할 때, 검출기를 통과한 출력은

$$\mathbf{x}_k(i) = \mathbf{t}_k^T \mathbf{r}(i) = \sqrt{E_k} b_k(i) + \mathbf{t}_k^T \mathbf{n}(i) \quad (12)$$

가 됨을 알 수 있다. 이 경우, 신호의 출력은 E_k 이고, 잡음 신호 $\mathbf{t}_k^T \mathbf{n}(i)$ 의 분산은 $N_0/2 \mathbf{t}_k^T \mathbf{t}_k$ 이다. 따라서, 신호대 잡음비를 최대로 하는 검출기는 K 차 단위 행렬 \mathbf{I}_K 의 k 번째 열을 나타내는 \mathbf{e}_k 에 대해 $\mathbf{S}^T \mathbf{t}_k = \mathbf{e}_k$ 의 조건을 만족시키며 $\mathbf{t}_k^T \mathbf{t}_k$ 을 최소로 하는 벡터 \mathbf{t}_k 가 된다. 이를 구하기 위해 라그랑지(Lagrange) 곱셈자 방법을 사용하도록 하자. 가산치 벡터 $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K]$ 에 대해 비용 함수 J 를

$$J = \mathbf{t}_k^T \mathbf{t}_k + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{S}^T \mathbf{t}_k - \mathbf{e}_k) \quad (13)$$

와 같이 정의하면, 이를 최소화시키는 \mathbf{t}_k 는 $\nabla(J) = 2 \mathbf{t}_k + \mathbf{S} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}$ 의 관계를 만족시켜야 하므로 $\mathbf{t}_k = -\frac{1}{2} \mathbf{S} \boldsymbol{\lambda}$ 와 같이 되며, $\mathbf{S}^T \mathbf{t}_k = -\frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{S} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{e}_k$ 로

부터 $\lambda = -2(S^T S)^{-1} e_k$ 를 얻는다. 따라서, 사용자 k 에 대한 검출기는

$$t_k^T = e_k^T (S^T S)^{-1} S^T \quad (14)$$

와 같이 되며, 전체 사용자에게 대한 검출기는 행렬 S 의 의사 역행렬인 $(S^T S)^{-1} S^T$ 가 된다. 이상의 결과로부터 역상관 검출기는 MAI를 완전히 제거하는 선형 검출기들 중 가장 성능이 우수함을 알 수 있다.

이제 이 내용을 비동기 채널로 확장해보자. 비동기 채널 환경에서 첫번째 사용자를 검출하고자 하는 사용자라 가정하고, 편의상 $\tau_1 = 0$ 으로 두자. 또한, $k = 2, 3, \dots, K$ 에 대해 사용자 k 의 지연을 정수 l_k 와 $0 \leq \delta_k < T_c$ 인 실수 δ_k 에 대해 $\tau_k = l_k T_c + \delta_k$ 로 나타내도록 하자. 그러면, 비동기 채널에서의 수신 신호를 사용자 k 의 지연에 맞추어 칩단위로 적분한 후 표본화한 출력은

$$r_1(i) = \sqrt{E_1} b_1(i) a_1 + \sum_{k=2}^K \sqrt{E_k} (b_k(i) \tilde{a}_k + b_k(i-1) \hat{a}_k) + n_c(i). \quad (15)$$

와 같이 된다. 단,

$$\tilde{a}_k = \left(1 - \frac{\delta_k}{T_c}\right) \tilde{a}_{k,l_k} + \frac{\delta_k}{T_c} \tilde{a}_{k,l_k+1}, \quad (16a)$$

$$\hat{a}_k = \left(1 - \frac{\delta_k}{T_c}\right) \hat{a}_{k,l_k} + \frac{\delta_k}{T_c} \hat{a}_{k,l_k+1}, \quad (16b)$$

$$\tilde{a}_{k,m} = \frac{1}{\sqrt{N}} [0, 0, \dots, 0, a_{k,0}, \dots, a_{k,N-m-1}]^T, \quad (16c)$$

$$\hat{a}_{k,m} = \frac{1}{\sqrt{N}} [a_{k,N-m}, \dots, a_{k,N-1}, 0, 0, \dots, 0]^T \quad (16d)$$

이다. 이제 $2K-1$ 벡터량들을

$$C = [a_1, \tilde{a}_2, \hat{a}_2, \dots, \tilde{a}_K, \hat{a}_K], \quad (17a)$$

$$\bar{E} = \text{diag} [\sqrt{E_1}, \sqrt{E_2}, \dots, \sqrt{E_K}, \sqrt{E_K}], \quad (17b)$$

$$\bar{b}(i) = [b_1(i), b_2(i), \dots, b_K(i), b_K(i-1)] \quad (17c)$$

과 같이 정의하면, 식 (15)를

$$r_1(i) = C \bar{E} \bar{b}(i) + n_c(i) \quad (18)$$

과 같이 표현할 수 있다. 이때, 행렬 C 는 비동기 채널에 대한 확산 수열 행렬로 볼 수 있다. 따라서 동기 채널에서의 S 에 적용되었던 의사 역행렬 관계를 C 에 적용할 수 있고, 이 경우 첫번째 사용자에게 대한 역상관 검출기 w_1 은

$$w_1^T = e_1^T (C^T C)^{-1} C^T \quad (19)$$

와 같이 된다. 이 식에서 e_1 은 I_{2K-1} 의 첫번째 열을 나타낸다. 위와 같이 정의된 필터 계수 벡터 w_1 은 행렬 C 의 첫번째 열을 제외한 모든 열에 대해 직교하며, $w_1^T a_1 = 1$ 의 관계를 만족하므로 역상관 검출기의 기능을 수행하게 한다. 이러한 의사 역행렬 형태의 역상관 검출기는 MAI를 완전히 제거하면서도 비인과성 문제로부터 자유롭게 된다. 그림 1은 이 제안 방법의 구조를 보인 것이다.

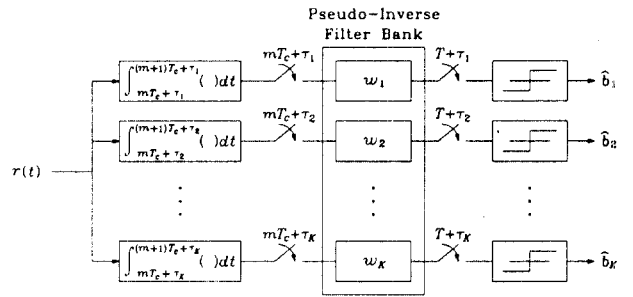


그림 1. 제안된 역상관 검출기의 구조
Fig. 1 The structure of the proposed decorrelating detector

IV. 의사 역행렬 역상관 검출기의 구현

행렬 C 에 QR-분해를 적용하면, $N \times (2K-1)$ 직교행렬 Q 와 $(2K-1) \times (2K-1)$ 상삼각행렬 R 에 대해 $C = QR$ 의 관계를 얻을 수 있다[8]. 이 경우, w_1^T 는

$$w_1^T = v_1^T Q^T, \quad (20a)$$

$$v_1^T = e_1^T R^{-1} \quad (20b)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 각 필터의 필터 계수는 새로운 사용자가 추가되거나 기존의 사용자가 서비스를 끝낼 경우 갱신한다.

(1) 새로운 사용자가 추가될 경우

새로운 사용자, 즉 $(K+1)$ 번째 사용자가 추가될 경우, 사용자의 추가에 따라 C, Q, R 이 갱신된 행렬을 각각 $\tilde{C}, \tilde{Q}, \tilde{R}$ 이라 하면,

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} C & C_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q & Q_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & R_{a1} \\ O & R_{a2} \end{bmatrix} = \tilde{Q} \tilde{R} \quad (21)$$

의 관계가 성립한다. 이 식에서 C_a, Q_a, R_{a1}, R_{a2} 는 각각 $N \times 2, N \times 2, (2K-1) \times 2, 2 \times 2$ 크기의 행렬이고, $C_a \equiv [\hat{a}_{K+1} \ \hat{a}_{K+1}]$ 이고, Q_a 는 $Q_a^T Q = O$ 의 관계를 만족하는 직교 행렬이며, R_{a2} 는 상삼각 행렬이다. 이 경우, 식 (21)로부터

$$R_{a1} = Q^T C_a, \quad (22a)$$

$$Q_a R_{a2} = (I_N - Q Q^T) C_a \quad (22b)$$

의 관계가 성립함을 알 수 있다. 한편, \tilde{Q} 의 직교 성질을 이용하면

$$R_{a2}^T R_{a2} = C_a^T (I_N - Q Q^T) C_a \quad (23)$$

와 같은 식을 얻을 수 있다. R_{a2} 가 2×2 상삼각 행렬임을 이용하면 식 (23)으로부터 R_{a2} 를 쉽게 구할 수 있다. Q_a 는 구해진 R_{a2} 를 식 (22b)에 대입하여 얻는다. 즉,

$$Q_a = (I_N - Q Q^T) C_a R_{a2}^{-1} \quad (24)$$

로부터 Q_a 를 얻을 수 있다.

이제 w_1^T 의 갱신 과정을 살펴보자. 2×1 벡터 v_a 에 대해 $\tilde{v}_1^T \equiv [v_1^T \ v_a^T]$ 라 하면, I_{2K+1} 의 첫번

째 열벡터 \tilde{e}_1 에 대해 $\tilde{v}_1^T \tilde{R} = \tilde{e}_1^T$ 이 성립해야 하므로 $v_a^T = -v_1^T R_{a1} R_{a2}^{-1}$ 와 같이 되며, 식 (20a)와 (22a)를 이용하면

$$v_a^T = -w_1^T C_a R_{a2}^{-1} \quad (25)$$

의 관계를 얻게 된다. 필터 계수 w_1^T 은 갱신된 행렬 및 벡터에 대해 $\tilde{w}_1^T = \tilde{v}_1^T \tilde{Q}$ 와 같이 갱신되고, 이 식은 다시 $D = C_a R_{a2}^{-1}$ 에 대해

$$\begin{aligned} \tilde{w}_1^T &= w_1^T + v_a^T Q_a^T \\ &= w_1^T [I_N - D D^T (I_N - Q Q^T)] \end{aligned} \quad (26)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 사용자가 새로이 추가될 경우, 먼저 식 (22a), (23), (24)를 이용하여 R 과 Q 를 갱신하고, 식 (26)을 이용하여 필터 계수 벡터를 갱신하면 된다.

(2) 사용자가 서비스를 끝낼 경우

j 번째 사용자가 서비스를 끝낼 경우, C 로부터 $(2j-2)$ 번째와 $(2j-1)$ 번째 열이 삭제되어 $N \times (2K-3)$ 행렬 \tilde{C} 가 남게 되며, 이 결과로 R 의 $(2j-2)$ 번째와 $(2j-1)$ 번째 열이 삭제된다. 두 열이 삭제된 $(2K-1) \times (2K-3)$ 행렬 \bar{R} 는 더 이상 상삼각 행렬이 아니며, $(2j-2)$ 번째 열부터 $(2K-3)$ 번째 열까지 대각 원소 아래쪽에 두 개씩의 0이 아닌 원소를 갖게 된다.

이제 \bar{R} 를 $(2K-3) \times (2K-3)$ 크기의 상삼각 행렬 \hat{R} 로 변환시키는 방법에 대해 살펴보자. 이를 위해 먼저 $L=2(K-j)$ 에 대해, $G_{2L} G_{2L-1} \cdots G_1 \bar{R}$ 의 $(2j-2)$ 번째와 $(2j-1)$ 번째 행이 모두 0이 되도록 $(2K-1) \times (2K-1)$ 크기의 회전 행렬 G 를 \bar{R} 에 적용한다. 이 경우 $G \equiv G_{2L} G_{2L-1} \cdots G_1$ 에 대하여 QR-분해 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{C} = Q \bar{R} = [Q G^T][G \bar{R}]. \quad (27)$$

다음, $G \bar{R}$ 로부터 원소가 모두 0인 두 행을 제거함으로써 새로운 상삼각 행렬 \hat{R} 을 구성한다. 즉 J 를 I_{2K-3} 의 $(2j-2)$ 번째와 $(2j-1)$ 번째 열의 위치에 원소가 모두 0인 열을 삽입한 $(2K-3) \times (2K-1)$ 크기의 행렬이라 하면, QR-분해 관계식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{C} = [Q G^T J^T][J G \bar{R}] = \hat{Q} \hat{R}. \quad (28)$$

w_1^T 도 위와 유사한 과정을 거쳐 갱신한다. \hat{e}_1 을 I_{2K-3} 의 첫번째 열이라 하면

$$\hat{e}_1^T = v_1^T \bar{R} = v_1^T G^T J^T \hat{R} \quad (29)$$

과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 한편, 갱신된 $(K-3) \times 1$ 크기의 벡터를 \hat{v}_1 이라 하면, 식 (20b)에 의해 $\hat{e}_1^T = \hat{v}_1^T \hat{R}$ 이므로,

$$\hat{v}_1^T = v_1^T G^T J^T \quad (30)$$

와 같이 되며, 이 경우 필터 계수 벡터 \hat{w}_1^T 는 $\hat{w}_1^T = \hat{v}_1^T \hat{Q}^T$ 로부터 구할 수 있다. 한편, $(2j-2)$ 번째와 $(2j-1)$ 번째 대각 원소만 1이고 나머지 대각 원소는 모두 0인 $(2K-3) \times (2K-3)$ 대각행렬 K 에 대해, $J^T J = I_{2K-1} - K$ 이므로, 필터 계수 벡터의 갱신식은 최종적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{w}_1^T = w_1^T - v_1^T G^T K G Q^T. \quad (31)$$

따라서, 사용자가 서비스를 끝낼 경우, 먼저 Givens 회전 행렬 G 를 구한 후, 필터 계수를 (31)과 같이 갱신해 주면 된다.

V. 성능 분석 및 컴퓨터 모의 실험

(18)과 (19) 사이의 내적을 취하면

$$w_1^T r_1(i) = \sqrt{E_1} b_1(i) + w_1^T n_c(i) \quad (32)$$

와 같은 관계식을 얻을 수 있다. 이 식에서 $w_1^T n_c(i)$ 는 분산 행렬이 $N_0/2 \|w_1\|^2$ 인 가우시안 잡음벡터이다. 따라서 제안 방법에서 첫번째 사용자의 비트오류율은

$$p_e^b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_1}{N_0} \frac{1}{\|w_1\|^2}}\right) \quad (33)$$

와 같이 된다. 이 식에서 $Q(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 이다.

이제 몇가지 모의 실험을 통해 제안된 역상관 검출기의 성능을 기존의 정합 필터링 검출기와 비교해 보자. 모의 실험시 확산수열로는 Gold 수열[9]을 사용하였고, 지연은 $[0, T)$ 의 범위에서 임의로 결정하였다.

먼저 제안 방법과 기존의 정합 필터링 방법의 비트오류율을 E_1/N_0 의 함수로 비교하였다. 이를 위한 모의 실험 환경은 다음과 같다: 시스템 내의 능동적인 사용자는 검출하고자 하는 사용자를 포함하여 5명이고(즉, $K=5$), 4명의 간섭 사용자는 같은 크기로 수신되며, 처리이득은 31이다(즉, $N=31$). 본 논문에서는 두 개의 서로 다른 에너지 비 $\gamma_k \equiv E_k/E_1 = 0\text{dB}$, 5dB 에 대해 실험을 수행하였다. 그림 2는 이 실험 결과를 보인 것으로, 그림에서 선분들은 해석적 결과를 나타내며, 기호 표시들은 모의실험 결과를 나타낸다. 비교를 위해 단일 사용자 시스템의 경우의 비트오류율 $p_e^b = Q(\sqrt{2E_1/N_0})$ 을 함께 보였다[10]. 그림으로부터, 제안된 의사 역행렬 역상관 검출기의 성능은 에너지 비의 변화에 관계없이 일정하지만, 기존의 정합 필터링 검출기의 경우에는 에너지 비가 증가함에 따라 성능이 저하됨을 알 수 있다. 모든 사용자의 에너지 값이 같을 경우에도 제안된 검출기의 성능은 아주 낮은 신호대 잡음비 구간을 제외하고는 기존의 방법보다 향상된 성능을 보여준다. 사용자가 10명이고 처리 이득이 63인 경우의 실험 결과도 그림 3에 실린 것과 같이 비슷한 양상을 보여준다.

그림 4는 제안 방법이 간섭 사용자의 에너지 크기에 관계없이 일정한 성능을 나타냄을 확연히 보여준다.

다. 모의 실험에서 다른 사용자의 에너지 크기를 수신하고자 하는 사용자의 에너지 크기에 비해 0dB부터 40dB까지 증가시켰을 때, 제안 방법의 비트오류율은 일정한 값을 나타내지만, 기존의 정합 필터링 검출기는 급격히 성능이 저하됨을 알 수 있다.

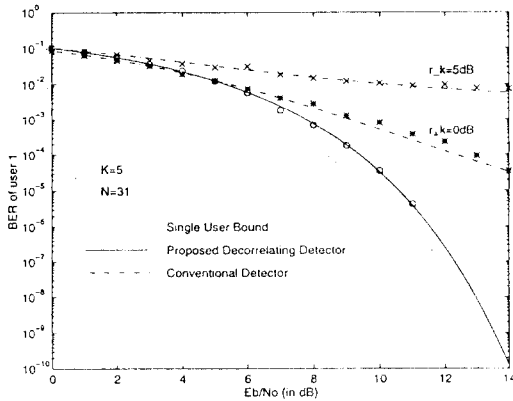


그림 2. $K=5$, $N=31$ 인 경우 첫번째 사용자의 비트오류율 (선분 : 해석 결과, 기호 표시 : 모의실험 결과)
 Fig. 2 Bit error rate of user 1 in the case $K=5$ and $N=31$ (lines : analytic results, symbol marks : simulation results)

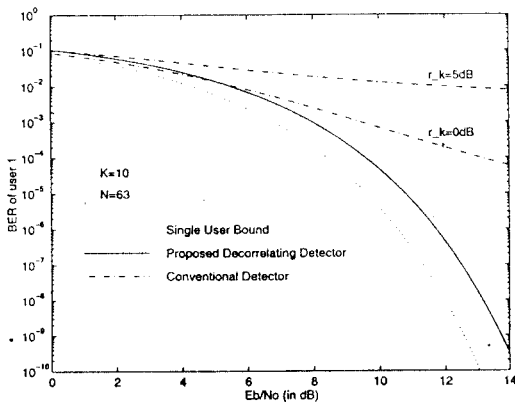


그림 3. $K=10$, $N=63$ 인 경우 첫번째 사용자의 비트오류율 (해석 결과)
 Fig. 3 Bit error rate of user 1 in the case $K=10$ and $N=63$ (analytic results)

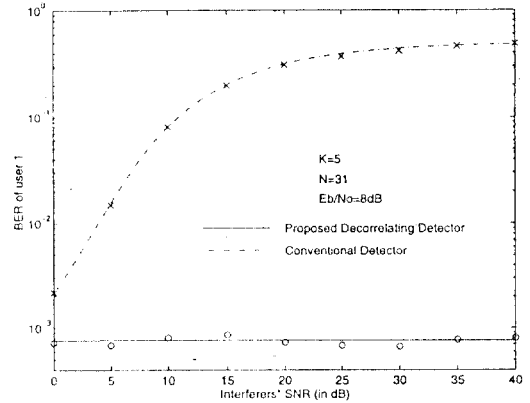


그림 4. $K=5$, $N=31$ 인 경우 다른 사용자의 SNR 증가에 따른 첫번째 사용자의 비트오류율 (선분 : 해석 결과, 기호 표시 : 모의실험 결과)
 Fig. 4 Bit error rate of user 1 with respect to interferer's SNR in the case $K=5$ and $N=31$ (lines : analytic results, symbol marks : simulation results)

VI. 결 론

본 논문에서는 비동기 CDMA 채널을 위한 의사 역행렬 형태의 역상관 검출기를 제안하고, 그 구현 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 먼저 동기 CDMA 채널에서 기존의 역상관 검출기의 정합 필터링과 역상관 처리 과정이 확산 수열로 구성된 행렬의 의사 역행렬 처리와 동일함을 보였다. 또한, 이 사실을 이용하여 역상관 검출기가 다중접속 간섭신호를 완전히 제거하는 선형 검출기들 중 최대의 신호대 잡음비를 가지는 검출기임을 보임으로써 역상관 검출기의 우수성을 확인하였다.

그 후, 동기 채널에서의 결과를 비동기 채널로 확장하여, 사용자별로 분산적인 형태를 가지는 의사 역행렬 형태의 역상관 검출기를 제안하였다. 제안 방법은 각 사용자별로, 그 사용자에 대한 MAI 성분에 직교하는 필터 계수 벡터를 통해 데이터를 검출하며, 이 필터 계수 벡터는 비동기 채널에서의 확산 수열 행렬에 대한 의사 역행렬의 첫번째 행에 해당한다. 제안 방법은 "원근 저항적"이라는 역상관 검출기 고유의 특성을 간직하면서도 비동기 채널에서 기존 역상관 검출기의 문제점인 긴 지연, 구현의 복잡성, MAI 제거의 불완전성 등의 문제를 해결한다는 장점을 가진다.

또한 사용자 수의 변화에 대처하기 위해 제안 방법의 분산적인 구조를 이용하여 각 사용자별로 검출기 계수를 효율적으로 갱신할 수 있는 QR-분해를 이용한 검출기 계수 갱신 방법을 제안하였다. 제안된 계수 갱신 방법을 사용하면 사용자 수의 변화시에도 상대적으로 적은 양의 계산만으로 검출기를 갱신할 수 있으므로, 구현시의 효율성을 높일 수 있게 된다. 모의 실험을 수행한 결과, 제안 방법이 MAI에 영향을 받지 않으며, 기존의 정합 필터링에 의한 검출기에 비해 훨씬 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. A. Duel-Hallen, J. Holtzman, and Z. Zvonar, "Multi-user detection for CDMA systems," *IEEE Personal Commun.*, pp. 46-58, Apr. 1995.
2. S. Verdú, "Minimum probability of error for asynchronous gaussian multiple-access channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-32, pp. 85-96, Jan. 1986.
3. R. Lupas and S. Verdú, "Near-far resistance of multiuser detectors in asynchronous channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 38, pp. 496-508, Apr. 1990.
4. M. K. Varanasi and B. Aazhang, "Multistage detection in asynchronous code-division multiple-access communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 38, pp. 509-519, Apr. 1990.
5. A. Dual-Hallen, "A family of multiuser decision-feedback detectors for asynchronous code-division multiple-access channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, pp. 421-434, Feb/Mar/Apr. 1995.
6. Z. Xie, R. T. Short, and C. K. Rushforth, "A family of suboptimum detectors for coherent multiuser communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 8, pp. 683-690, May 1990.
7. P. B. Rapajic and B. S. Vucetic, "Adaptive receiver structures for asynchronous CDMA systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, pp. 685-697, May 1994.
8. S. Haykin, *Adaptive filter theory*, 2nd Ed., Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.

9. D. V. Sarwate and M. B. Pursley, "Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences," *Proc. IEEE*, vol. 68, pp. 593-619, May 1980.
10. J. G. Proakis, *Digital communications*, 2nd Ed., New York: McGraw-Hill, 1989.



孟 勝 柱 (Seung Joo Maeng) 정회원
 1969년 2월 19일생
 1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 졸업
 1993년 2월: 서울대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 현재: 서울대학교 대학원 전기공학부 박사과정 재학중
 ※주관심분야: 디지털 신호처리 및 디지털 통신 시스템, CDMA 시스템



李 秉 基 (Byeong Gi Lee) 정회원
 1951년 5월 12일생
 1974년 2월: 서울대학교 전자공학과(공학사)
 1978년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1982년 2월: University of California, Los Angeles 대학원 전자공학과(공학박사)
 1974년~1979년: 해군사관학교 교관
 1982년~1984년: Granger Associates, Santa Clara, CA, 연구원
 1984년~1986년: AT&T Bell Laboratories, North Andover, MA, 연구원
 1986년~현재: 서울대학교 전기공학부 교수
 1997년: IEEE Fellow
 1998년: 한국공학원 정회원
 ※주관심분야: 디지털 신호처리, 디지털 전송, 광대역 통신망, 통신 신호처리