

직교 다항식의 근사화를 적용한 다중 사용자 간섭 제거 기법

노재호*, 고균병**, 최수용**, 이미숙***, 고종석***,
홍대식**, 강창언**

* 동국대학교 전자공학과 BK21 핵심사업팀

** 연세대학교 전기전자공학과

*** 한국통신 연구개발본부 가입자망 연구소

Multuser Interference Cancellation Scheme using Orthogonal Polynomial Approximation for Multiuser Signal Detection in CDMA System

Jae-Ho Roh*, Gyun-Byeong Ko, Soo-Yong Choi**, Mi-Suk Lee***, Jong-Seok Ko***,
Dae-Sik Hong**, Chang-Eon Kang****

***Department of Electronic Engineering, Dongkuk University**

****Department of Electric & Electronic Engineering, Yonsei University**

***** Korea Telecom**

ABSTRACT

In this paper, we propose and evaluate a new interference cancellation method using low pass filtered data estimation method of the instantaneous decision sample obtained from each decision stage. With respect to the convergence to the optimal solution, the superiority of the proposed method to parallel interference cancellation (PIC) referred as prevailing techniques is proved by its (asymptotic) spectral radius. Through the simulation under the various environments, we show the performance superiority of the IC scheme using proposed method to the PIC scheme. Furthermore, we show transcendence of the proposed method on the possibility of multirate transmission or multiple power scheduling and of performance in the various traffic environments.

I. 서론

3세대 이동 통신 시스템은 음성 위주의 통신 방식의 서비스 한계를 벗어나 멀티미디어통신을 수용할 수 있도록 대역 확산에 기초를 둔 코드분할 다중 접속 방식

을 채택하고 있다. 다매체 통신 시스템에서 요구되는 높은 정보 전송률은 더욱 더 많은 주파수 대역을 요구하고 있으며, 최근에는 이와 같은 한정된 주파수 자원에서 양질의 신호를 수신할 수 있도록 광대역 CDMA 시스템에 적합한 다중 사용자 간섭의 억압과 적응 배열 안테나를 기지국 수신기에 적용하는 방안이 고려되고 있다[1][2][3]. 다중 사용자 간섭 신호의 제거는 주로 반복적 기법이 많이 사용되는데, PIC의 경우에는 그의 복잡한 하드웨어 구조와 페이딩에 기인한 수렴성 보장의 문제로, 그리고 SIC(Serial Interference Cancellation) 계열의 경우에는 신호의 결정 지연이 가장 큰 문제로 지적된다. 하지만, 본 논문에서는 비록 하드웨어 구조는 복잡하더라도 사용자 용량을 늘일 수 있으며, 수렴성이 보장되어 고속 데이터 전송에 적합한 개선된 PIC 형식의 다중 사용자 간섭 제거 방식을 CDMA 시스템에 적용하고자 한다.

2장에서는 다중 사용자 환경하의 DS/CDMA에 대한 일반적인 선형 시스템 모델을 제시하고, 3장에서는 본 논문에서 제안될 직교 다항식의 근사화 기법에 근거한 간섭 제거방안을 제시하고, 4장에서는 각 방식의 수렴

성 및 실험을 통해 비트 오류의 측면에서 성능을 비교 하며, 마지막으로 5장에서 본 논문의 기여와 미래 연구 에 대한 방향을 알아보도록 한다.

II. 시스템 모델

모든 반송파 위상은 동기되어 있으며, 각각의 전송 신호들은 수신기에 하나의 경로를 통해서 수신된다고 가정한다. 즉 다중 사용자 간섭의 제거를 위한 모델링 에서는 순수히 다중 사용자 간섭과 복소 가우시안 잡음 만이 심플 단위로 존재한다는 가정을 하고 있다. 따라 서, 동기 전송의 경우 채널의 one shot 구간만의 반응을 살펴보는 것만으로 충분하므로 수신된 기저 대역의 신호는 다음의 식 (1)과 같이 이산 신호의 형태로 표현된다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k(t) b_k(t) s_k(t) + n(t) \quad (1)$$

여기서, $A_k(t)$ 는 k 번째 사용자의 수신된 신호 진폭이 며, $b_k(t) \in \{1, -1\}$ 는 k 번째 사용자의 정보 비트이다. K 는 전체 사용자수를 나타내며, $n(t)$ 는 분산 σ^2 을 갖는 AWGN을 뜻한다. 레일리 페이딩 채널 환경의 경 우, 수신된 신호는 레일리 분포를 갖는 신호의 진폭만 을 제외하고, 동일한 형태를 갖는다. 특정 비트 구간동 안 k 번째 사용자 상관기의 출력은 식 (2)와 같다.

$$y_k = A_k b_k + \sum_{i=0, i \neq k}^{K-1} \rho_{i,k} A_i b_i + \frac{1}{T_b} \int_{t_0}^{t_0+T_b} n(t) s_k(t) dt \quad (2)$$

$$= A_k b_k + MAI_k + z_k$$

여기서 $\rho_{i,k} = (1/T_b) \int_{t_0}^{t_0+T_b} c_i(t) c_k(t) dt$ 이다.

결국, k 번째 사용자 자신의 상관관계를 나타내는 항은 $A_k b_k$, 다른 사용자로 인한 상관관계를 나타내는 항은 MAI_k , 잡음으로 인해 발생한 항은 z_k 로 표현된다. 식 (5)는 K 명의 사용자를 동시에 고려하여 식 (6)과 같이 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$y = \mathbf{R} \mathbf{A} \mathbf{b} + \mathbf{z} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_K]^T$, $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_K]^T$, $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_K]^T$, $\mathbf{A} = \text{diag}[A_1, A_2, \dots, A_K]$, 그리고 그의 상호 상 관 계 수, \mathbf{R} 은 $\rho_{ij} (i=1, 2, \dots, K, j=1, 2, \dots, K)$ 를 원소로 갖는 $K \times K$ 의 상호 상관 행렬을 나타낸다.

III. 다중 사용자 검출기로서의 간섭 제거기

다단계 방법에 의한 최적 검출기에 준하는 수신기는

사용자 수신 신호의 집합에 선형 연산자 Ξ 을 연속적 으로 적용하여 송신 신호 \mathbf{b} 를 예측하는 방식이다[1]. 우리는 식 (3)의 해를 구하는 문제를 실수 또는 복소 $K \times K$ 행렬 \mathbf{M} , 알 수 없는 벡터 \mathbf{x} , 관찰 벡터 \mathbf{y} 가 주어졌을 때, 다음의 선형시스템의 해를 구하는 것 으로 해석할 수 있다.

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{y} \Leftrightarrow \hat{\mathbf{b}} = \text{sgn}\{\Xi\{\mathbf{y}\}\} \quad (4)$$

따라서 식 (4)의 다단계 구현은 일반적인 선형 방정 식의 해를 반복적으로 구하는 문제로 귀결된다. 따라서 이의 적용을 위해 $K \times K$ 행렬 $\mathbf{M} = \mathbf{S} - \mathbf{T}$ 의 형태 로 나누어 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{b} + \mathbf{y} \quad (5)$$

초기 추정 값 $\mathbf{b}^{(0)}$ 에 대하여 순차적으로 다음의 식 (6)과 같이 재귀적인 단계를 거쳐 최종 예측 신호인 $\mathbf{b}^{(n)}$ 을 구할 수 있다.

$$\mathbf{b}^{(k+1)} = (\mathbf{S}^{-1} \mathbf{T}) \mathbf{b}^{(k)} + \mathbf{S}^{-1} \mathbf{y}, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

식 (6)의 해를 구하는 방식에 따라 (weighted) PIC, (weighted)SIC로 해석할 수 있다. 그러나 PIC 계열의 간섭 제거는 사용자 코드의 상관 행렬식에 따라 제한적 으로 수렴하지 않는 단점이 있고, SIC 계열의 간섭 제거 는 신호의 결정 지연이 가장 큰 문제로 지적된다. 본 논문에서는 위와 같은 1차의 선형 정적(stationary) 방법 에서 각 단계별 가중치의 결정에 체비셰프 직교 다항식 의 근사화를 이용하여 새로운 간섭 제거 방식을 다음에 서와 같이 제시하고자 한다. 이는 식 (7)로 간단히 나타 낼 수 있다[4].

$$\tilde{b}_i^{(n)} = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_{n,k} \hat{b}_i^{(k)} \quad (i=1, 2, \dots, K) \quad (7)$$

체비셰프 다항식(Tchebyshev polynomial)의 수렴 영역 $[-1, 1]$ 에서 직교 다항 근사화를 적용하여 3 단계의 최적 화를 행한 후, 단계들 사이의 선형 관계를 다음과 같이 얻을 수 있다[4].

$$\alpha_{2,0} = \frac{(\lambda_{\max} + \lambda_{\min})^2 + 4\lambda_{\min} \lambda_{\max}}{(\lambda_{\max} + \lambda_{\min})^2 + 8(1 - (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})) + 4\lambda_{\min} \lambda_{\max}} \quad (8)$$

$$\alpha_{2,1} = \frac{-8(\lambda_{\max} + \lambda_{\min})}{(\lambda_{\max} + \lambda_{\min})^2 + 8(1 - (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})) + 4\lambda_{\min} \lambda_{\max}}$$

$$\alpha_{2,2} = \frac{8}{(\lambda_{\max} + \lambda_{\min})^2 + 8(1 - (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})) + 4\lambda_{\min} \lambda_{\max}}$$

여기서 λ_{\max} 와 λ_{\min} 은 사용자간의 상호 상관 제거를 위해 도입한 식 (6)의 행렬곱, $\mathbf{G} = (\mathbf{S}^{-1}\mathbf{T})$, 의 최대(최소) 고유치를 나타내며, 이는 Power Method (PM) 를 적용하여 얻을 수 있다[5][6][7].

$\alpha_{n,k}$ 는 각 단계에서 직교 다항식의 근사에 의하여 연관지을 수 있다. 그러나 과도기적인 결정 변수 $\hat{b}_k^{(i)}$ 를 직접 계산을 통해 구하는 것이 더욱 편리하며, 이를 위해 체비셰프 다항식의 재귀적 성질을 이용하여 결정 변수 $\hat{b}_k^{(n)}$ 는 식 (9) 또는 (10)과 같이 나타낼 수 있다 [4]. 그림 1 은 식 (10)을 이용한 간섭 제거기의 한 단의 구조를 보이고 있다.

$$\mathbf{b}^{(n)} = \Phi(\mathbf{b}^{(n-1)}, \mathbf{b}^{(n-2)}; \mathbf{M}, \mathbf{y}), \quad n=2,3,\dots \quad (9)$$

$$\text{또는 } \mathbf{b}^{(n)} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{b}^{(n-1)} + \mathbf{Q} \cdot \mathbf{b}^{(n-2)} + \mathbf{O} \quad (10)$$

여기서

$$\mathbf{P} = \frac{\rho_{n+1}}{2 - (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})} [2\mathbf{G} - (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})\mathbf{I}] \quad ,$$

$$\mathbf{Q} = (1 - \rho_{n+1}), \text{ 그리고 } \mathbf{O} = \frac{\rho_{n+1}}{2 - (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})} 2\mathbf{k} \text{ 를 나}$$

타낸다.

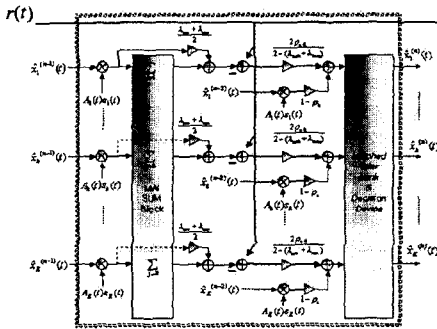


그림 1. 체비셰프 다항식을 재귀적으로 적용한 간섭 제거기의 한 단의 구조

IV. 성능 비교 및 고찰

다단계 방법의 수렴은 그의 상호 상관 행렬의 최대 고유치에 의한 스펙트럼 반경에 의하여 결정된다. 수렴 특성을 비교하기 위하여 각 사용자에게 신호 생성 다항식 $g(x) = x^3 + x + 1$ 인 *m-sequence* 를 고려하여 그의 수렴

곡선을 백색 잡음이 없는 즉, 다중 사용자 간섭만이 존재하는 경우를 보이도록 한다. *m-sequence* 는 서로 다른 부호간의 상호 상관의 거의 0 (1/N)에 근사하여 코드 오프셋만 정확히 예측이 된다면, 매우 우수한 상관 특성을 가진다. 그러나 그의 스펙트럼 반경은 $(K-1)a$ 로 사용자 수에 정확히 비례한다. 따라서 모든 간섭 제거 방법에 있어, 사용자가 수가 늘어날수록 수렴 속도가 느려짐을 알 수 있다. 간섭 제거 단계가 증가함에 따라 제안된 방식을 사용한 간섭 제거 기법이 가장 빠른 수렴 속도를 나타내었다. 그림 2 는 완벽한 전력제어 하에서 *m-sequence* 를 이용하였을 경우의 사용자 수에 따른 각 간섭 제거 방식에 따른 수렴 곡선을 나타낸 것이다.

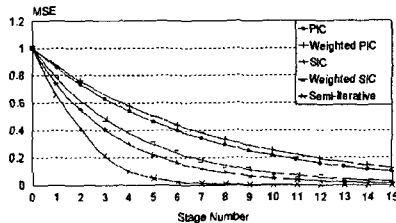
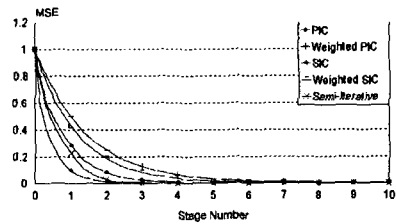


그림 2. 완벽한 전력제어 하에서 *m-sequence* 를 이용하였을 경우의 각 간섭 제거 방식에 따른 수렴 곡선 (upper : 3 User, Lower : 7-user)

가우시안 잡음의 환경에서 $PG=31$ 이고, 생성 다항식이 $g_1(x) = x^5 + x^2 + 1$ 과 $g_2(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 1$ 인 *Gold code sequence* 를 확산 부호로 사용한 동기식 DS/CDMA 시스템을 고려하였고, 사용자가 적은 $K=8$ 인 시스템을 가정하여 실험하였으며, 실험의 도표에서 PIC-*n* 은 *n*-단의 PIC 방식을, SI-*n* 은 제안하고 있는 *n*-단의 Semi Iterative Method 를 사용한 경우를 각각 나타낸다.

그림 3 은 완벽한 전력 제어가 이루어졌을 때, 2 단계 간섭 제거 후, 사용자의 수에 따른 BER 성능을 나타내었다. E_b/N_0 가 낮은 6dB 와 8dB 의 경우, 부가 백색 잡음에 의해 각 수신기의 성능 차이는 거의 나타

나지 않으나 $E_b/N_0 = 10\text{dB}$ 일 경우 각 수신기의 성능은 다중 사용자 간섭에 의해 지배되는 것을 알 수 있다. 그림 4는 완벽한 전력 제어가 이루어지지 않은 원근 환경에서 시스템에 대한 평균 BER 곡선을 나타낸 것이다.

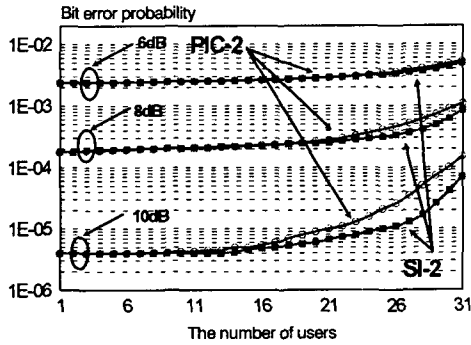


그림 3. 사용자의 전력에 비해 간섭 사용자의 전력이 16 dB 강할 때의 신호대 잡음비에 따른 BER 성능

원하는 사용자와 5번째, 6번째, 7번째 사용자는 같은 전력을 가지며, 1번째 2번째, 3번째, 4번째 사용자는 원하는 사용자에 비하여 각각 +6dB, -3dB, +10dB 와 +3 dB의 전력차이를 갖도록 한 환경에서 실험을 하였다. 그림으로부터 과부하가 걸린 상황에서는 다중 사용자 간섭으로 인해 일반적인 기지국 수신기의 구조를 갖는 경우 음성 통신이 불가능함을 알 수 있으며, 단계별 간섭 제거 기법을 사용하더라도 제안하는 시스템이 적은 단에서 더욱 더 낮은 성능 곡선을 보이는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 현 단계의 연판정 정보와 이전의 연판정 정보를 이용한 다단계 간섭 제거 기법을 제안하고 제안된 간섭 제거 기술의 수렴 특성을 분석하였다. 제안한 방식이 비록 간섭 제거를 위한 시스템에 최소와 최대 고유치를 이용한 2 차의 예측 방식을 적용함으로써 발생하는 구조적 불리함을 그 대가로 하여 최적해로 보다 빠른 수렴 특성을 가짐을 알 수 있었다.

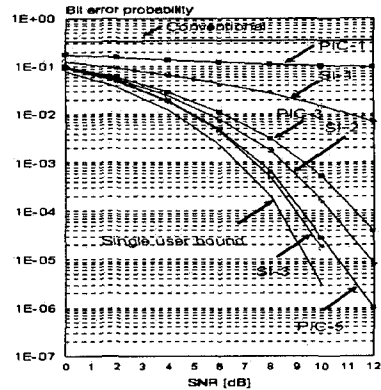


그림 4. 완벽한 전력 제어가 이루어지지 않은 원근 환경에서 시스템에 대한 평균 BER (K=8)

수렴성 분석과 컴퓨터 모의 실험을 통하여 제안한 수신기의 성능을 기존의 간섭 제거 기법과 비교 분석하여 전력제어가 완벽히 이루어지지 않는 원근 환경에서는 제안한 간섭 제거 기술이 PIC 간섭 제거 기술보다 같은 단계의 간섭 제거에서 확연히 우수함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 제안한 간섭 제거 기술이 보다 신뢰성 있는 초고속 무선 통신에 있어서 다중 사용자 신호의 검출기 중에서 보다 발전된 신호 처리 기술로 자리 매김할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] S. Verdu, *Multisuser Detection*, Cambridge University Press, 1998.
- [2] M. Juntti and S. Glisic, "Advanced CDMA for wireless Communications", in *Wireless Communications: TDMA Versus CDMA*, pp. 447-490, Kluwer, 1997.
- [3] L. C. Godara, "Application of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility, and System Consideration", *Proc of IEEE*, Vol. 85, No. 7, 1997, pp. 1031 ~ 1060.
- [4] D. M. Young, *Iterative Solution of Large Linear Systems*, Academic Press, New York and London, 1971.
- [5] T. K. Moon and W. C. Stirling, *Mathematical Methods and Algorithm for Signal Processing*, Prentice-Hall, 1999
- [6] O. Axelsson, *Iterative Solution Methods*, Cambridge University Press, 1994