

# 이진 레벨 클리핑 multi-code PW-CDMA 시스템을 위한 적응역확산수신기

최정민, 이재홍  
서울대학교 전기컴퓨터공학부  
전화 : 02-880-7045

## Adaptive Despreading Receiver for Multi-Code PW-CDMA System with Binary-Level Clipping

Jung Min Choi and Jae Hong Lee  
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University  
E-mail : [blueseal@snu.ac.kr](mailto:blueseal@snu.ac.kr)

### Abstract

In this paper, we propose *adaptive despreading receiver* for multi-code PW-CDMA system with binary-level clipping. The distortion due to clipping the multi-level signal causes the performance degradation. *Adaptive despreading* alleviates the effect of clipping. It is shown that the proposed *adaptive despreading receiver* achieves smaller BER than conventional despreading receiver for multi-code PW-CDMA system with binary-level clipping.

### I. 서론

다양한 멀티미디어 서비스에 대한 요구가 증가함에 따라 고속 데이터 서비스와 다양한 QoS(Quality of Service)을 위한 다중전송률 다원접속기술이 요구된다. DS-CDMA에서 다중전송률을 지원하기 위한 유력한 후보 기술의 하나로 Multi-code CDMA 기술이 제안되었다. Multi-code CDMA는 전송률에 관계없이 일정한 처리이득을 보장하므로 다중경로 페이딩 채널에서 VSG-CDMA(Variable Spreading Gain CDMA)보다 우수한 성능을 갖는다. 하지만 전송률이 높아질수록 송신 신호의 PAPR(Peak to Average Power Ratio)가 증가하게 되어 증폭기의 비선형 특성에 의한 성능열화가 발생한다.

Multi-code CDMA에서 이러한 단점을 극복하고자 PAPR을 작게 하려는 연구가 많이 진행되었다. 송신 신호의 크기를 일정하게 하는 precoding 기법은 부가

적인 비트를 데이터 비트에 첨가하여 precoding된 비트를 만들어 냈으로써, 데이터 전송률의 손실이 생긴다 [2]. PW-CDMA(Pulse Width CDMA)의 특별한 경우인, 이진 레벨 클리핑 multi-code PW-CDMA는 송신 단에서 다중 레벨 신호를 이진 레벨로 클리핑하여 전송하는 기법으로 채널간의 직교성이 클리핑으로 인해 상실되어 성능열화가 발생한다 [5]. 이를 최소화하기 위해 최적의 성능을 나타내는 직교 코드의 조합에 대한 연구가 진행되었으나 최적의 코드 조합을 사용한 경우에도 채널간의 직교성 상실로 인한 영향은 여전히 존재하므로 이를 극복하기 위한 새로운 기법에 대한 연구가 요구된다 [4].

본 논문은 이진 레벨 클리핑 multi-code PW-CDMA에서 채널간의 직교성 상실에 의한 영향을 고려한 적응역확산수신기(adaptive despreading receiver)를 제안하며, 기존의 수신기와의 성능을 비교, 분석한다. 비트 오류율 성능의 척도로 하여, 전송률에 따른 적응역확산수신기의 성능을 AWGN 환경에서 기존의 수신기와 비교한다.

### II. 시스템 모델

홀수개의 병렬 채널로 구성된 이진 레벨 클리핑 multi-code PW-CDMA 시스템을 고려한다.  $M$  개의 병렬 채널을 사용하고 처리이득이  $N$  일 때, 데이터 전송률이  $R_b = 1/T_b$  이면, 송신신호의 주기는  $T_s = MT_b$  이고 각 병렬 채널에 주어진 확산신호의 칩주기는  $T_c = T_s/N$  으로 주어진다.

Multi-code CDMA 시스템에서 송신단의 기저대역 신호는 다음과 같다.

$$s_{MC}(t) = P(t) \sum_{k=1}^M b_j[k] c_j(t - kT_s) \quad (1)$$

한편, 이진 레벨 클리핑 multi-code PW-CDMA 시스템에서의 기저대역 신호는 위의 신호를 이진 레벨로 클리핑하고 평균 송신전력이 보상된 신호이므로 다음과 같이 주어지게 된다.

$$s(t) = P(t) \sqrt{M} \sum_{k=1}^M \text{sgn} \left( \sum_{j=1}^M b_j[k] c_j(t - kT_s) \right) \quad (2)$$

여기서  $P(t)$  은 사용자의 신호세기이고,  $b_j[k] \in \{-1, 1\}$  은  $j$  번째 병렬 채널을 통해 송신되는  $k$  번째 비트를 나타내며,  $c_j(t)$  는  $j$  번째 병렬 채널에 주어진 확산신호를 나타낸다.  $c_j(t)$  는 다음과 같이 주어진다.

$$c_j(t) = \sum_{i=0}^{N-1} c_j[i] p_{T_c}(t - iT_c) \quad (3)$$

여기서  $p_{T_c}(t)$  는  $[0, T_c]$  에서 1의 값을 가지고 나머지 구간에서는 0의 값을 가지는 구형파이고,  $c_j[i] \in \{-1, 1\}$  는  $j$  번째 병렬 채널에 주어진 확산신호의  $i$  번째 칩을 나타낸다.

$\text{sgn} \left( \sum_{j=1}^M b_j[k] c_j(t - kT_s) \right)$  은 멀티레벨의 신호를 이진 레벨로 클리핑한 신호를 나타내며,  $\text{sgn}(g)$  은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{sgn}(u) = \begin{cases} 1, & u \geq 0 \\ -1, & u < 0 \end{cases} \quad (4)$$

전송된 신호가 AWGN 채널을 통해 수신기에 도달하게 되며 지연시간이 없다고 가정하면, 기저대역 수신신호는 다음과 같이 주어진다.

$$r(t) = s(t) + n(t) = P(t) \sqrt{M} \sum_{k=1}^M \text{sgn} \left( \sum_{j=1}^M b_j[k] c_j(t - kT_s) \right) + n(t) \quad (5)$$

여기서  $n(t)$  는 전력스펙트럼밀도가  $N_0/2$  W/Hz 인 AWGN이다. 칩율로 샘플링된 수신신호의 추정치는 다음과 같이 주어진다.

$$r[l] = A(IT_c) \sqrt{M} \text{sgn} \left( \sum_{j=1}^M b_j \left[ \left\lfloor \frac{l}{N} \right\rfloor \right] c_j[l \bmod N] \right) + n(IT_c) \quad (6)$$

기존의 수신기에서,  $j$  번째 병렬 채널을 통해 송신된  $k$  번째 비트에 대한 추정치는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \hat{b}_j^k &= \text{sgn}(\mathbf{r}_k \mathbf{c}_j^T) \\ &= \text{sgn} \left( \sum_{i=0}^{N-1} r[kN+i] c_j[i] \right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 벡터  $\mathbf{r}_k, \mathbf{c}_j$  는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{r}_k = [r[kN+0] \ r[kN+1] \ \dots \ r[(k+1)N-1]] \quad (8-a)$$

$$\mathbf{c}_j = [c_j[0] \ c_j[1] \ \dots \ c_j[N-1]] \quad (8-b)$$

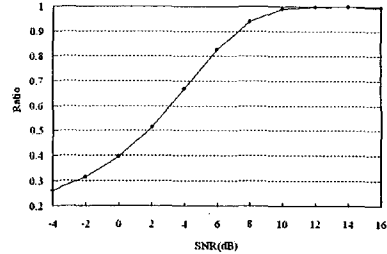


그림 1. 역확산된 신호의 절대값이 최소인 채널에서의 오류가 전체 오류에 대해 차지하는 비율

그림 1은 위에서 언급된 기존의 수신기에서 처리이득이  $N=32$  이고 병렬 채널의 수가  $M=7$  일 때, 역확산된 신호의 최소 절대값을 갖는 채널에서의 오류가 전체 오류에 대해 차지하는 비율을 나타낸다. 그림 1에서 보는 바와 같이 신호대 잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)가 증가할수록 이런 특성을 갖는 채널에서의 오류가 차지하는 비율이 높아지게 되므로 역확산된 신호의 최소 절대값을 갖는 채널에서의 오류를 감소시킨다면 성능향상을 얻을 수 있다.

### III. 적응역확산수신기

본 논문에서는 이진 레벨 클리핑 multi-code PW-CDMA 시스템의 성능을 향상시키기 위한 적응역확산 수신기를 제안한다.

각 병렬 채널을 통해 송신되는 신호의 크기가 1이라고 가정하고, 칩주기로 샘플링된 이산신호 영역에서 고려한다. 송신단에서 보낼 데이터가  $\mathbf{b} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_M]$  이라고 하자. 그러면 Multi-code CDMA 시스템에서 송신되는 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{t} = \sum_{j=1}^M b_j \cdot \mathbf{c}_j = \sum_{j=1}^M b_j \cdot \mathbf{c}_j + b_m \cdot \mathbf{c}_m = \mathbf{t}' + b_m \cdot \mathbf{c}_m \quad (9)$$

그리고 이진 레벨 클리핑 multi-code PW-CDMA 시스템의 송신되는 신호  $\mathbf{t}^b$  는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{t}^b &= \sqrt{M} [\text{sgn}(t[0]) \ \text{sgn}(t[1]) \ \dots \ \text{sgn}(t[N-1])] \\ &= \sqrt{M} [t^b[0] \ t^b[1] \ \dots \ t^b[N-1]] \end{aligned} \quad (10)$$

$\mathbf{t} = [t[0] \ t[1] \ \dots \ t[N-1]]$ ,  $\mathbf{t}' = [t'[0] \ t'[1] \ \dots \ t'[N-1]]$  일 때  $M-1$ 이 짝수이므로  $t'[i]$  는 짝수 값만을  $t'[i] \neq 0$  이면, 항상  $\text{sgn}(t[i]) = \text{sgn}(t'[i])$  이다. 따라서  $t'[i] \neq 0$  이면  $b_m \cdot \mathbf{c}_m$  이  $t^b[i]$  에 영향을 미치지 못한다. 즉,  $b_m \cdot \mathbf{c}_m$  이 영향력을 미치는 칩은  $t'[i] = 0$  일 때이다. 이는  $t'[i] = 0$  일 때만  $b_m \cdot \mathbf{c}_m$  에 대한 정보가  $t^b[i]$  에 담겨져 있음을 의미한다.

제안된 수신기는 그림 2와 같다. 수신된 신호를 칩주기로 샘플링한 이산 신호  $\mathbf{r}$  은  $M$  개의 병렬 확산 시퀀스  $\mathbf{c}_j$  ( $j=1, K, M$ ) 들에 의해 역확산된다. 역확산된 신호

$z_j$  는 다음과 같이 주어진다.

$$z_j = \mathbf{r} \mathbf{c}_j^T = \sum_{i=0}^{N-1} r[i] \cdot c_j[i], \quad j=1,2,K,M \quad (11)$$

weighting vector generator 블록은 이러한  $z_j$  를 입력으로 받아서 벡터  $\mathbf{w}$  를 발생시킨다.

$$\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_M] \quad , \quad \begin{cases} w_m = 0 \\ w_j = 1, \quad j \neq m \end{cases} \quad (12)$$

$$m = \arg \min_j \{|z_j|\}$$

reconstructor 블록은 상관값의 절대값이 최소인 substream을 제외한  $M-1$  개의 substream들을 이용하여 Multi-code CDMA 시스템의 전송신호를 재구성하게 된다.

이제  $M-1$  개의 비트를 정확하게 검출했다고 가정하자. 그러면  $\mathbf{r}' = \mathbf{r}$  이므로  $r'[i] = 0$  일 때만  $b_m \cdot \mathbf{c}_m$  에 대한 정보가 담겨져 있다. 따라서 zero level selector 블록은  $r'[i] = 0$  인 chip부분들만 선택하는 역할을 한다.

$$\mathbf{s} = [s[0] \ s[1] \ \dots \ s[N-1]] \quad , \quad s[i] = \begin{cases} 1, & \text{only if } r'[i] = 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

벡터  $\mathbf{s}$  를 이용하여  $m$  번째 substream을 다시 적응적으로 역확산하여  $\hat{b}_m'$  을 검출할 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$z_m' = (\mathbf{s} \otimes \mathbf{r}) \cdot \mathbf{c}_m^T = \sum_{i=0}^{N-1} s[i] \cdot r[i] \cdot c_m[i] \quad (14)$$

$$\hat{b}_m' = \text{sgn}(z_m')$$

여기서  $\otimes$  은 같은 차원들끼리의 곱 (component-wise product) 을 의미한다.

벡터  $\mathbf{s}$  의 Hamming weight가  $n_m$  이면, AWGN 채널 환경에서

$$\text{var}\{z_m\} = N\sigma^2 \longrightarrow \text{var}\{z_m'\} = n_m\sigma^2$$

이므로 제안된 검출 기법을 사용할 때, 기존의 검출 기법보다 더 좋은 성능을 얻을 수 있다.

#### IV. 수식적 분석

CDMA 시스템에서는 AWGN이 전혀 없는 경우에도 이진 레벨 클리핑에 의한 distortion 때문에 각 substream에서 역확산 후 상관값의 절대값은 일정하지 않다. 하지만 병렬 채널에 할당된 직교코드들을 적절하게 선택하면, 각 substream에서 역확산 후, 클리핑에 의한 distortion으로 인해 생기는 상관값의 절대값의 변화폭을 작게 만들 수 있다. 이론적 분석이 용이하도록 AWGN이 없을 때, 역확산 후 상관값의 절대값의 변화폭이 매우 작아서 상관값의 절대값이  $\mu$  로 거의 일정하다고 가정하자. 그러면 AWGN 채널에서 역확산할 때,  $z_j$  ( $j=1,K,M$ ) 는 확률 변수  $X$  와 같은 Gaussian pdf를 갖게 된다.

$$p_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (15)$$

여기에서  $\sigma^2$  는 칩주기로 샘플링할 때 AWGN의 분산이다. 그러면  $\gamma_m = |z_m|$  의 pdf는 다음과 같이 주어진다.

$$p_{\gamma_m}(\gamma) = \begin{cases} M[p_X(\gamma) + p_X(-\gamma)](p_1(\gamma) + p_2(\gamma))^{M-1}, & \gamma \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$p_1(\gamma) = \int_{-\infty}^{\gamma} p_X(x) dx = Q\left(\frac{\gamma+\mu}{\sigma}\right), \quad (16)$$

$$p_2(\gamma) = \int_{\gamma}^{\infty} p_X(x) dx = Q\left(\frac{\gamma-\mu}{\sigma}\right)$$

$\gamma_m$  이 주어졌을 때,  $M-1$  개의 다른 substream에서  $n$  개의 오류가 발생할 조건부 확률은

$$P_{\text{err}_n}(n) = \binom{M-1}{n} \left(\frac{p_1(\gamma_m)}{p_1(\gamma_m) + p_2(\gamma_m)}\right)^n \left(\frac{p_2(\gamma_m)}{p_1(\gamma_m) + p_2(\gamma_m)}\right)^{(M-1)-n}, \quad 0 \leq n \leq M-1. \quad (17)$$

으로 주어진다.  $M-1$  개의 다른 substream에서 1개 이상의 오류가 발생하는 경우는  $m$  번째 substream에서 오류가 발생할 확률,  $\Pr\{\hat{b}_m' \neq b_m\} \approx 1/2$  이라고 할 수 있다. 따라서  $\gamma_m$  이 주어졌을 때의 조건부 평균 BER은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} P_{\text{BER}_{\gamma_m}} &\approx \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M-1} \left\{ \frac{1}{2}n + \frac{1}{2}(n+1) \right\} P_{\text{err}_n}(n) \\ &= \frac{M-1}{M} \frac{p_1(\gamma_m)}{p_1(\gamma_m) + p_2(\gamma_m)} + \frac{1}{2M} \{1 - P_{\text{err}_n}(0)\} \end{aligned} \quad (18)$$

위의 두 식들로부터 Binary CDMA 시스템에서 제안된 적응역확산수신기의 평균 BER은

$$\begin{aligned} P_{\text{BER}} &= \int_0^{\infty} P_{\text{BER}_{\gamma_m}} \cdot p_{\gamma_m}(\gamma) d\gamma \\ &\approx \int_0^{\infty} \left\{ \frac{(M-1)p_1(\gamma)}{p_1(\gamma) + p_2(\gamma)} + \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{p_2(\gamma)}{p_1(\gamma) + p_2(\gamma)} \right)^{M-1} \right] \right\} \\ &\quad \cdot \{p_X(\gamma) + p_X(-\gamma)\} (p_1(\gamma) + p_2(\gamma))^{M-1} d\gamma \end{aligned} \quad (19)$$

으로 주어진다.

#### V. 모의실험 결과

그림 3의 (a)은 처리이득  $N=32$  인 직교코드를 사용하고 병렬 채널의 수  $M=7$  인 경우의 이진 레벨 클리핑 multi-code CDMA 시스템의 성능을 보이고 있다.  $M=1$  인 경우의 저속 데이터를 보내는 경우와 동일한 DS-CDMA와 비교했을 때, 기존의 수신기가 큰 성능 차이를 보이는 반면, 제안된 적응역확산수신기는 DS-CDMA와 근접한 성능을 나타내는 것을 볼 수 있다.

그림 3의 (b)는 처리이득  $N=64$  인 직교코드를 사용하고 병렬 채널의 수  $M=17$  인 경우의 이진 레벨 클리핑 multi-code CDMA 시스템의 성능을 보이고 있다.

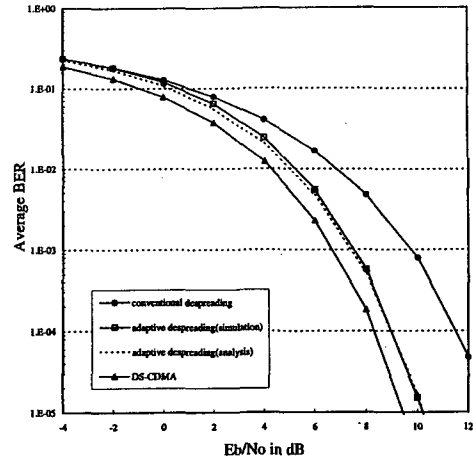
제한된 적응역확산수신기가 기존의 수신기에 비해 큰 성능향상을 나타내는 것을 볼 수 있다. 하지만 병렬 채널의 수가 증가함에 따라 클리핑에 의한 영향이 더 커지므로 DS-CDMA와의 성능차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

### VI. 결론

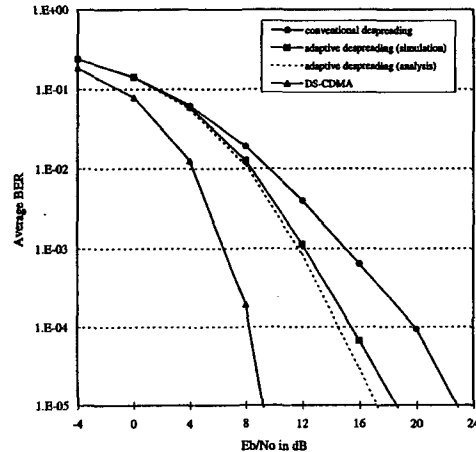
본 논문에서는 이진 레벨 클리핑 multi-code CDMA 시스템에 적용할 수 있는 새로운 수신기를 제안하고 AWGN 환경에서 그 성능을 평가하였다. 모의실험 결과 특정한 병렬 채널에서 이진 레벨 클리핑에 의한 영향을 완화시킬 수 있는 적응역확산수신기가 AWGN 환경에서 기존의 수신기보다 우수한 성능을 보였다.

### 참고문헌

- [1] T. Ottosson and A. Svensson, "On schemes for multirate support in DS-CDMA systems," *Wireless Personal Communications*, vol. 6, no.3, pp. 265-287, 1998.
- [2] T. Wada, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, "A constant amplitude coding for orthogonal multi-code CDMA systems," *IEICE Trans. Fund.*, vol. E80-A, no. 12, pp. 2477-2484, Dec. 1997.
- [3] H. S. Ahn, S. M. Ryu and S. W. Ra, "Introduction to Binary CDMA," *JCCI 2002*, April 2002.
- [4] S. P. Kim, J. K. Oh, M. J. Kim, H. S. Ahn, and S. M. Ryu, "On the selection of code set for binary multi-code CDMA system," *ICOIN-16*, 2002.
- [5] J. K. Oh, S. P. Kim, M. J. Kim, H. S. Ahn, and S. M. Ryu, "Orthogonal multi-code CDMA systems with constant amplitude transmission based on level clipping and pulse width modulation," *ICOIN-16*, 2002.



(a) 처리이득  $N=32$ , 병렬채널의 개수  $M=7$  인 경우



(a) 처리이득  $N=64$ , 병렬채널의 개수  $M=17$  인 경우  
그림 3. AWGN 채널에서 적응역확산수신기의 성능

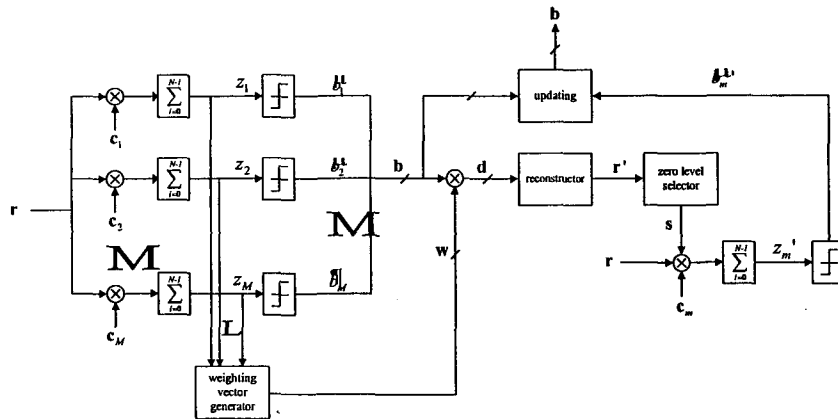


그림 2. 적응역확산수신기의 블록도