

DS/CDMA 시스템에서 소프트검출 방식을 이용한 직렬 간섭 제거기에 대한 성능분석

이 상 훈(李 相 勳), 김 남(金 男)

충북대학교 전기전자공학부

전화 : (0431) 275-2578 / 팩스 : (0431) 274-6206

Performance Analysis of a Cascaded Interference Canceller Employing Soft Detection for DS/CDMA System

Sang Hoon Lee and Nam Kim

School of Electrical and Electronics Engineering, Chungbuk National University

E-mail : shlee@sunam.kreonet.re.kr

namkim@cbucc.chungbuk.ac.kr

Abstract

In this paper, the performance of DS/CDMA receiver is analyzed, which employs a cascaded interference canceller using a soft detection. The channels considered is characterized by the multipath fading which is one of the factors for the performance degradation in mobile communication systems. The idea behind the cancellation is that the co-channel interference can be regenerated at the receiver and is subtracted from the received signal. The numerical results show the improvement of BER can be obtained by the proposed cancellation scheme.

I. 서론

DS/CDMA방식은 다른 통신방식 비해 여러 측면에서 비교적 우수한 성능을 가지고 있으며[1], 이동 통신에 많이 활용되는 방식이다. 그러나 기존의 DS/CDMA 방식은 이동 통신 환경에서 다중 사용자에 의한 동일채널 간섭(CCI : Co-channel Interference)과 근원문제(near-far problem)로 인하여 성능이 저하되는 것으로 알려져 있다[2].

CDMA방식에서 동일채널 간섭들은 신호측면에서 동일한 특성을 가지고 있으며, 수신기에서 동기회로를 이용하여 간섭의 signature시퀀스를 알 수 있으므로, 수신기에서 간섭을 추정하여 제거할 수 있다. CCI에

의한 성능 저하 문제를 해결하기 위하여 최근 수 년 동안 여러 종류의 방법들이 제안되었으며, 결정 계획 다중사용자 검출기, 최적 다중 사용자 검출기, 단계 간섭 제거기 등이 알려져 있다[6]. 최적 다중 사용자 검출기에서 사용하는 알고리즘은 사용자의 증가에 따라 계산의 복잡성이 지수적으로 증가하는 단점이 있다 [6]. 최근에 이러한 단점을 줄이기 위한 방법들이 제시되고 있다[4-6].

본 논문에서는 다중사용자, 다중경로 DS/CDMA 통신에서 소프트 검출방식을 이용한 단계 직렬 CCI 제거기에 대한 수학적 모델을 제시하고, 모의 실험을 통하여 CCI와 근원문제에 대한 제거기의 성능을 분석하였다. II장에서는 다중사용자, 다중경로 환경에서의 DS/CDMA 시스템을 기술하였고, III장과 IV장에서는 동일채널에 대한 간섭제거 방식과 성능 분석, V장과 VI에서는 수치해석 결과와 결론을 기술하였다.

II. DS/CDMA 시스템 모델

비동기 DS/CDMA 시스템 송신신호는 다음 식으로 표현된다.

$$s_k(t) = \sqrt{2P_k} b_k(t - T_k) a_k(t - T_k) \cos[\omega_c(t - T_k) + \psi_k] \quad (1)$$

여기서 P_k 는 k 사용자에 대한 송신출력, ω_c 는 송신 주파수, ψ_k 와 T_k 는 각각 $[0, 2\pi]$, $[0, T_b]$ 에서 균일 분포를 갖는 위상 및 송신지연 시간이다. $b_k(t)$ 와 $a_k(t)$

는 주기가 T_b , T_c 인 이진테이터 및 PN시퀀스이다. 또 한 다중경로 Rayleigh 패이딩 특성을 갖는 채널의 임펄스 응답은 다음과 같다고 가정한다.

$$h_k(t) = \sum_{\lambda=1}^{L_k} g_{k,\lambda} \delta(t - t_{k,\lambda}) e^{j\theta_{k,\lambda}} \quad (2)$$

여기서 $g_{k,\lambda}$, $t_{k,\lambda}$, $\theta_{k,\lambda}$ 는 각각 k 사용자의 λ 번째 경로 이득, 지연시간 및 지연위상이며, L_k 는 다중경로 수이다. 또한 Δ 를 다중경로의 최대 지연시간이라 할 때, 다중경로의 시간지연으로 발생하는 ISI(Intersymbol Interference)를 최소화하기 위해 Δ 는 T_b 보다 작고, $t_{k,\lambda}$ 는 $[T_c, \Delta]$ 의 범위에서 균일 분포를 갖는다고 가정한다. 경로이득 $g_{k,\lambda}$ 는 Rayleigh변수이다.

이러한 가정 하에서 수신신호 $r(t)$ 는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{\lambda=1}^{L_k} \sqrt{2P_k} g_{k,\lambda} b_k(t - \tau_{k,\lambda}) a_k(t - \tau_{k,\lambda}) \cos(\omega_c t + \phi_{k,\lambda}) + n(t) \quad (3)$$

여기서 $n(t)$ 는 백색 가우시안 잡음으로, 전력밀도는 $N_0/2$ 이다. $\phi_{k,\lambda} = \phi_k + \theta_{k,\lambda} - \omega_c \tau_{k,\lambda}$ 는 $[0, 2\pi]$ 에서 균일 분포를, 전체 시간지연 $\tau_{k,\lambda} = T_b + t_{k,\lambda}$ 는 $[0, T_b]$ 에서 균일 분포를 갖는 변수로 가정한다.

III. 간섭제거 방식

수신기는 i 번째 사용자의 수신신호 중 첫 번째 경로로 수신되는 신호에 동기되어 신호를 검출한다고 가정한다. 이 경우 $Z_n^{(i)}$ 는 $t = nT_b + \tau_{i,1}$ 에서 i 번째 사용자의 수신기 correlator 출력이라 할 때,

$$Z_n^{(i)} = \sqrt{\frac{P_i}{2}} g_{i,1} b_n^{(i)} T_b + \sqrt{\frac{P_i}{2}} \sum_{\lambda=2}^{L_i} x_{i,\lambda} + \eta_n^{(i)} \quad (4)$$

와 같다. 여기서

$$\begin{aligned} \eta_n^{(i)} &= \int_{(n-1)T_b + \tau_{i,1}}^{nT_b + \tau_{i,1}} n(t) a_i(t - \tau_{i,1}) \cos(\omega_c t + \phi_{i,1}) dt, \\ x_{k,\lambda} &= g_{k,\lambda} \cos(\phi_{k,\lambda} - \phi_{i,1}) [b_{n-m-1}^{(i)} R_{ik}(\tau) \\ &\quad + b_{n-m}^{(i)} \hat{R}_{ik}(\tau)] \end{aligned} \quad (5)$$

$\tau = \tau_{k,\lambda} - \tau_{i,1} - mT_b$, $m = \lfloor (\tau_{k,\lambda} - \tau_{i,1}) / T_b \rfloor$ 이며,

$$R_{ik}(\tau) = \int_0^\tau a_k(t - \tau) a_i(t) dt, \quad \hat{R}_{ik}(\tau) = \int_\tau^{T_b} a_k(t - \tau) a_i(t) dt$$

$a_i(t)dt$ 는 partial correlation 함수이다.

식 (4)는 잡음 성분인 $\eta_n^{(i)}$ 함, i 번째 사용자 신호

$D_n^{(i)} = \sqrt{P_i/2} g_{i,1} b_n^{(i)} T_b$ 함, ISI 간섭인 $F_n^{(i)}$ 함, MAI (Multiuser Access Interference) 간섭인 $I_n^{(i)}$ 함으로 구분할 수 있으며, ISI와 MAI의 합을 CCI라 한다.

$$F_n^{(i)} = \sqrt{\frac{P_i}{2}} \sum_{\lambda=2}^{L_i} x_{i,\lambda} \quad (6)$$

$$I_n^{(i)} = \sqrt{\frac{P_i}{2}} \sum_{k=1}^K \sum_{\lambda=2}^{L_k} x_{k,\lambda} \quad (7)$$

CCI를 제거하기 위해 $F_n^{(i)}$ 와 $I_n^{(i)}$ 값을 최소화하여야 한다. 제안하는 CCI제거는 $F_n^{(i)}$ 와 $I_n^{(i)}$ 를 수신기에서 재생하여 i 번째 사용자의 수신신호에서 뺌으로써 제거가 가능하다. 즉, 수신기 correlator(단계-0)에서 검출된 신호를 이용하여 채널의 특성을 추정하고, CCI값을 재생한 다음, 이 값을 T_b 만큼 지연된 다음 단계(단계-1)의 신호에서 뺌으로써 CCI를 제거하게 된다. 이러한 제거는 직렬 형태로 연결되는 여러 단계를 거치게 된다. 다중경로 특성을 갖는 무선 채널의 CDMA통신에서 CCI를 제거하기 위하여 비교적 강한 수신신호를 검출하는 다음과 같은 soft 검출을 사용한다.

$$\hat{b}_n^{(i)}[v] = \begin{cases} 1 & T_v^{(i)} \leq Z_n^{(i)}[v] \\ 0 & -T_v^{(i)} \leq Z_n^{(i)}[v] \leq T_v^{(i)} \\ -1 & Z_n^{(i)}[v] \leq -T_v^{(i)} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 v 는 직렬 연결된 단계의 수, 상수 $T_v^{(i)}$ 는 신호 검출에 사용되는 threshold이다. 제거 단계- v 에서 재생된 CCI를 $\hat{F}_{n-v}^{(i)}[v]$, $\hat{C}_{n-v}^{(i)}[v]$ 라 할 때, i 번째 사용자의 $(n-v)$ 번째 bit에 대한 CCI가 제거된 수신신호 $Z_n^{(i)}[v]$ 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} Z_n^{(i)}[v] &= Z_n^{(i)} - \hat{F}_{n-v}^{(i)}[v] - \hat{C}_{n-v}^{(i)}[v] \\ &= \sqrt{\frac{P_i}{2}} g_{i,1} b_{n-v}^{(i)} T_b \\ &\quad + \sqrt{\frac{P_i}{2}} \sum_{\lambda=2}^{L_i} g_{i,\lambda} \cos(\phi_{i,\lambda} - \phi_{i,1}) \\ &\quad \cdot \{ \hat{b}_{n-v-1}^{(i)}[v-1] R_{ik}(\tau_{i,\lambda} - \tau_{i,1}) \\ &\quad + \hat{b}_{n-v}^{(i)}[v-1] \hat{R}_{ik}(\tau_{i,\lambda} - \tau_{i,1}) \} \\ &\quad + \sqrt{\frac{P_i}{2}} \sum_{k=1}^K \sum_{\lambda=1}^{L_k} g_{k,\lambda} \cos(\phi_{k,\lambda} - \phi_{i,1}) \\ &\quad \cdot \{ \hat{b}_{n-v-m-1}^{(k)}[v-1] R_{ik}(\tau_{k,\lambda} - \tau_{i,1} - mT_b) \\ &\quad + \hat{b}_{n-v-m}^{(k)}[v-1] \hat{R}_{ik}(\tau_{k,\lambda} - \tau_{i,1} - mT_b) \} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\hat{b}_j^{(k)}[v-1] = b_j^{(k)} - \hat{b}_j^{(i)}[v-1]$ 이다.

IV. 성능 분석

본 장에서는 단계-0의 BER을 구하고, 이를 이용하여 CCI가 제거되는 단계-1의 BER 구하고자 한다. 여기서 CCI는 가우시안 분포를 갖는다고 가정한다[3,6,7]. 단계-0에서 CCI항에 대한 분산은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \text{var}[F_n^{(i)}] &= \frac{P_i}{4} (\bar{L}_i - 1) E[g_{i,\lambda}^2] (E[R_{ii}^2(\tau)] + E[\hat{R}_{ii}^2(\tau)]) \\ \text{var}[I_n^{(i)}] &= \sum_{k=1, k \neq i}^K \frac{P_k}{4} \bar{L}_k E[g_{k,\lambda}^2] (E[R_{ik}^2(\tau)] + E[\hat{R}_{ik}^2(\tau)]) \end{aligned} \quad (10)$$

그리고 $\text{var}[\eta_n^{(i)}] = N_0 T_b / 4$ 이다. 또한 i 사용자의 첫 번째 경로이득 $g_{i,1}$ 을 주어진 값 g 라 할 때, 단계-0에서 i 사용자에 대한 S/N값은 다음과 같다.

$$S/N_i[0] = \frac{P_i/2 T_b^2 g^2}{\text{var}[F_n^{(i)}] + \text{var}[I_n^{(i)}] + \text{var}[\eta_n^{(i)}]} \quad (11)$$

따라서 $S/N_i[0]$ 이 g 의 함수로 나타나므로, 단계-0의 에러 확률은

$$\begin{aligned} P_e[0] &= \int_0^\infty Q(\sqrt{S/N_i[0]}) f_g(g) dg \\ &= \frac{1}{2} (1 - \sqrt{\gamma_i[0] / (1 + \gamma_i[0])}) \end{aligned} \quad (12)$$

이다. 여기서 $f_g(g) = \frac{g}{\rho^2} e^{-\frac{g^2}{2\rho^2}}$, $\gamma_i[0] = \frac{1}{2} E[S/N_i[0]]$

이며, $E[\cdot]$ 는 g 에 대한 기대치이다. 단계-0에서 재생한 CCI를 단계-1에서 빼게 됨으로 단계-1의 $S/N_i[1]$ 은

$$S/N_i[1] = \frac{P_i/2 T_b^2 g^2}{\text{var}[\tilde{F}_n^{(i)}[1]] + \text{var}[I_n^{(i)}[1]] + \text{var}[\eta_n^{(i)}]} \quad (13)$$

이다. soft검출에서 신호가 에러로 검출할 확률과 $T_v^{(i)}$ 보다 작을 확률을 각각 $P_e^{(i)} = \Pr(x_n^{(i)} > T_0 | b_n^{(i)} = -1)$, $P_i^{(i)} = \Pr(|x_n^{(i)}| < T_0 | b_n^{(i)} = -1)$ 라고, soft검출을 위하여 다음과 같은 식을 정의하면,

$$\xi_0^{(i)} = \frac{T_0^{(i)}}{\sqrt{\text{var}[F_n^{(i)}] + \text{var}[I_n^{(i)}] + \text{var}[\eta_n^{(i)}]}} \quad (14)$$

식 (13)의 $\text{var}[\tilde{F}_{n-1}^{(i)}[1]]$ 과 $\text{var}[I_{n-1}^{(i)}[1]]$ 는 $\text{var}[\tilde{F}_{n-1}^{(i)}[1]] = [(\tilde{b}_n^{(i)}[0])^2] \text{var}[F_n^{(i)}]$

$$\text{var}[I_{n-1}^{(i)}[1]] = \sum_{k=1, k \neq i}^K E[(\tilde{b}_n^{(k)}[0])^2] \text{var}[I_n^{(k)}] \quad (16)$$

$$\text{이며, } \text{var}[I_n^{(k)}] = \frac{P_k T_b^2}{12N^3} \bar{L}_k E[g_{k,\lambda}^2] r_{ki} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} E[(\tilde{b}_n^{(k)}[0])^2] &= 1 + 2 Q(\xi_0^{(k)}) \\ &- \sqrt{\frac{\gamma_k}{1 + \gamma_k}} \exp\left(-\frac{(\xi_0^{(k)})^2}{2(\gamma_k + 1)}\right) \\ &\cdot [1 + 2 Q(\sqrt{\frac{(\xi_0^{(k)})^2 \gamma_k}{2(\gamma_k + 1)}})] \end{aligned} \quad (18)$$

$$r_{ki} = \sum_{i=0}^{N-1} (C_{k,i}^2 (i-N) + C_{k,i} (i-N) C_{k,i} (1+i-N) + C_{k,i}^2 (1+i-N) + C_{k,i}^2 (i) + C_{k,i} (i) C_{k,i} (i+1) + C_{k,i}^2 (i+1)) \quad (19)$$

이다. $C_{k,i}(i)$ 는 i 와 k 사용자의 PN시퀀스에 대한 partial crosscorrelation이다[7]. 따라서 구하고자 하는 단계-1의 에러 확률은

$$P_e[1] = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{\gamma_i[1] / (1 + \gamma_i[1])}) \quad (20)$$

이며, 상기의 CCI제거 방식을 확장하여 cascade되는 단계- n 에 적용하면, 단계-1에서 적용한 공식에서 [1] 대신 $[v]$ 를 대입한 식과 같다.

V. 수치 해석 결과

CCI 제거기의 성능 분석을 위하여 사용한 PN 시퀀스는 $(211)_8$ 과 $(217)_8$ 의 m-sequence로 얻어지는 길이 127인 gold 코드를 사용하였으며[7], 데이터 rate는 9600bps, 경로의 최대지연 시간 $\Delta = 7 \mu\text{sec}$ 로 하였다[4].

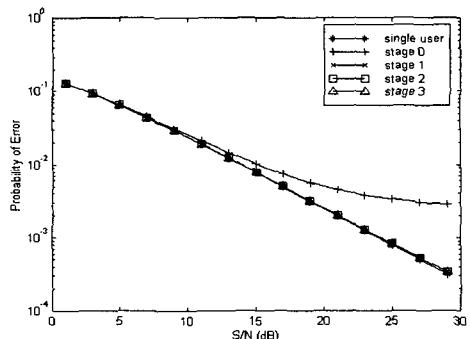


그림 1 S/N변화에 따른 에러확률($L_k=1, K=3$)

Fig 1 The probability of error versus S/N
($L_k=1, K=3$)

그림 1은 모든 사용자의 수신 전력이 같고, $L_k=1, K$

=3으로 가정하였을 때, \bar{E}_b/N_0 의 변화에 따른 단계별 P_e 를 나타내고 있다. 단계가 증가할수록 단일 사용자 성능에 접근함을 알 수 있다.

그림 2는 $L_k=2$, $E_b/N_0=17\text{dB}$ 일 때, 사용자 수의 변화에 따른 에러확률을 나타내고 있다. 단계가 증가할수록 기존의 수신기(단계-0)의 보다 향상된 성능을 보여주고 있다.

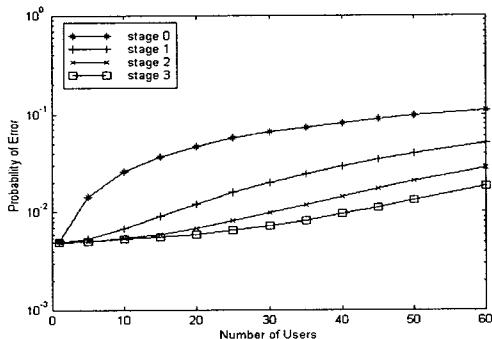


그림 2 사용자수 변화에 따른 에러확률($L_k=2$, $K=3$)

Fig 2 The probability of error versus number of users ($L_k=2$, $K=3$)

그림 3은 직렬 간섭 제거 방식의 에러확률에 대한 근원문제(near-far problem)의 영향을 보여 주고 있다. 모든 경로에 대하여 $L=3$, 근원문제에 의해서 발생하는

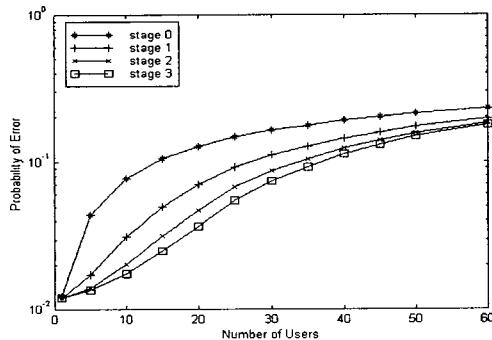


그림 3 사용자수의 변화에 따른 에러확률($L_k=3$, $E_i/N_0=13\text{dB}$, $E_k/E_i=4\text{dB}$)

Fig 3 The probability of error versus number of users ($L_k=3$, $E_i/N_0=13\text{dB}$, $E_k/E_i=4\text{dB}$)

전력의 차이를 $E_k/N_0=17\text{dB}$, $E_i/N_0=13\text{dB}$ 로 모의 실험을 하였다. 사용자가 적은 범위에서 직렬 간섭 제거

방식이 근원문제에 효과가 있음을 보여주고 있다.

VI. 결 론

확산대역 통신의 CDMA방식에서 발생하는 동일채널의 다중 사용자 간섭, 근원문제 등을 해결하기 위하여 소프트 검출방식을 이용하는 직렬 간섭 제거기에 대한 성능을 분석하였다. 모의실험 결과 완전한 전력제어가 되었을 때, 기존의 수신기에 비해 제거 단계가 증가할수록 간섭 제거로 인한 성능 향상을 보여 주고 있으며, 근원문제에 있어서도 어느 정도 간섭 제거능력이 있으나, 사용자 수의 증가함에 따라 보다 안정적인 전력 제어가 필요함을 알 수 있다.

향후 간섭의 조건에 따라 적용성을 갖는 제거기의 실시간 적용 가능성 및 다이버시티 기능에 의한 간섭 제거에 대한 연구 및 성능분석을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] R. L. Pickholts, D. L. Schilling and L. B. Milstein, "Theory of spread spectrum communication-A tutorial", IEEE Trans. on Comm., vol com-30, No. 5, pp 855-884, May 1982
- [2] Ahmed Saifuddin, R. Kohno and H. Imai, "Cascaded combination of cancelling co-channel interference and decoding of error-correcting codes for CDMA", IEEE 3rd Internat. Sympo. on SS techniques, pp 171-175, July 1994
- [3] S. Verdu, "Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels ", IEEE Trans. Inform. Theory, IT-32, No.1 pp 85-96, Jan. 1986
- [4] C. Y. Yoon, R. Kohno and H. Imai, "A spread spectrum multi-access system with cochannel interference cancellation for multipath fading channels" IEEE J. Select Areas Comm., Vol. SAC-11, No. 7, pp1067-1075, Sept. 1993
- [5] M. K. Varanasi and B Aazhang, "Multistage detection in asynchronous code-division multiple-access communications", IEEE Trans. Comm., Vol. 38, pp 509-519, Apr. 1990
- [6] Andrew K. C. Hui and Khaled Ben Letaief, "Successive interference cancellation for multiuser asynchronous DS/CDMA detectors in multipath fading links", IEEE Trans. Comm., Vol. 46, pp384-391, Mar. 1998
- [7] A. W. Lam and S. Tantaratan, "Theory and Application of Spread Spectrum Systems", IEEE Inc., 1994