

다중 데이터율을 지원하는 DS/CDMA 시스템에서의 직·병렬 혼합 간섭 제거 기법

정회원 김성기*, 박상규**

Hybrid Serial/Parallel Interference Cancellation Scheme in Multi-Rate DS/CDMA Systems

Sung Kee Kim*, Sang Kyu Park** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 다중 데이터율(multi-rate)을 지원하기 위하여 다중 처리 이득 기법을 사용하는 DS/CDMA 시스템에서 원근 문제를 해결하기 위한 간섭 제거 기법을 제안한다. 제안된 간섭 제거 방식의 간섭 제거 과정을 설명하고 각 데이터율의 사용자에 대한 일반화된 결정 변수의 분산값을 구한다. 이 간섭 제거 방식을 사용하였을 때 각 데이터율에 따른 비트 오류 확률을 레일리 페이딩 채널 환경하에서 이론적으로 유도한다. 그리고, SNR(dB), 동시 사용자수, stage수 등을 변화시키면서 기존의 간섭 제거 방식과 제안된 간섭 제거 방식의 성능을 비교 분석한다.

ABSTRACT

In this paper, we propose an interference cancellation(IC) scheme in order to overcome the near-far problem in multi-rate DS/CDMA with multi processing gain scheme.

We explain the cancellation procedure of a proposed IC scheme and obtain the generalized variance of each rate user's decision variable. The each rate user's BER performances using this IC scheme are analytically derived under Rayleigh fading channel. And we compare the proposed IC scheme with conventional IC schemes by changing SNR(dB), the number of user and stage.

I. 서론

정보화 시대인 요즘 앞으로 전개될 차세대 개인 이동 통신 시스템에 대한 논의가 활발하게 진행되고 있다. 현존하는 이동 통신 시스템은 음성 서비스를 주로 제공하고 있으며 차세대 시스템에서도 음성 서비스를 포함하여 화상 및 데이터 전송등 다양한 멀티 미디어 서비스가 기대된다.^[1]

차세대 개인 이동 통신을 위한 대표적인 시스템 들로는 미국에서 주도하고 있는 IMT-2000과 유럽에서 주도하고 있는 Univers'al Mobile Telephone

Systems(UMTS)등을 들 수 있다. 이 시스템들은 다양한 형태의 서비스를 위해 최대 2Mbps의 데이터율을 지원하도록 되어 있다^[2].

다중 데이터율을 지원하는 시스템 설계에는 여러 가지 방법이 있다. 현재 쓰이고 있는 반복 부호 기법은 낮은 데이터율에서 사용 가능하지만 높은 데이터율에서는 적합하지가 않다^[1]. 보다 적합한 방법으로 다중 처리 이득 기법, 다중 변조 기법, 다중 부호 기법등이 있으며, 본 논문에서는 다중 데이터율을 지원하는 DS/CDMA 시스템의 무선 접속 구현에 있어서 가장 유력시되고 있고 다른 기법들에

* 삼성전자 정보통신총괄 무선 사업부 개발3G

** 한양대학교 전자통신공학과(skpark@email.hanyang.ac.kr)

논문번호 : 98082-0223 접수일자 : 1998년 2월 23일

비해 하드웨어적으로 간단한 다중 처리 이득 기법을 고려한다^[1].

다중 처리 이득 기법을 시스템 모델로 채택할 경우 데이터율이 달라도 비트당 에너지를 동일하게 하므로 높은 데이터율의 사용자가 낮은 데이터율의 사용자에 비해 보다 높은 전력으로 전송한다. 따라서 완벽한 전력 제어를 하더라도 원근 문제가 발생해서 시스템의 성능 저하를 초래한다^[2]. 원근 문제를 줄이기 위해서는 전력이 서로 다르게 전송되는 사용자들의 간섭을 제거해야만 한다^[3]. 이 다중 사용자 간섭을 제거하기 위한 간섭 제거 방식은 크게 직렬 간섭 제거 방식과 병렬 간섭 제거 방식이 소개되어 있다^[4].

직렬 간섭 제거 방식은 수신된 전력의 순서대로 한 사용자의 간섭을 순차적으로 제거하는 방법이다. 직렬 간섭 제거 방식의 단점은 이미 선택된 상관기의 출력이 차후의 간섭 제거 과정에서 아무런 역할을 하지 못하며 다른 사용자의 간섭 성분이 제거되지 않은 채 상당한 양의 간섭 성분을 포함하고 있는 신호에 의해 결정 변수가 얻어지고 결정 변수로 토대로 추정 신호를 재생하는 것이다. 예를 들어 가장 강한 전력으로 수신된 사용자의 상관기가 선택되면 사용자에 대한 추정 신호가 재생된다. 이 신호는 다른 사용자의 간섭이 상당량 포함되어 있으며 이 신호에 의해 결정 변수가 결정되고 추정 신호를 재생하는 것이다. 따라서 정확한 추정 신호를 재생할 수 없고 불완전한 채널 파라미터와 결정 변수가 얻어지므로 성능 저하를 가져오게 된다.

병렬 간섭 제거 방식은 모든 사용자의 상관기의 출력으로 신호를 추정하여 재생하고 기존 사용자를 제외한 모든 다른 사용자의 신호들을 제거하는 방식이다. 이 방식의 단점은 전력이 서로 다르게 수신되는 페이딩 환경의 경우 약한 전력을 가진 사용자들의 상관기에서 잘못된 채널 파라미터로 신호가 추정되고 재생되므로 직렬 간섭 제거 방식보다 성능은 더욱 나빠지게 된다.

본 논문에서는 각 방식들의 단점들을 보완하고 다중 처리 이득 기법의 사용으로 인해 원근 문제가 심각하게 발생하는 환경에서 직·병렬 혼합 간섭 제거 기법을 제안하여 성능을 크게 향상시킨다. 2장에서는 다중 데이터율을 지원하는 DS/CDMA 시스템의 전송 모델과 직·병렬 혼합 간섭 제거기의 시스템 모델에 대해서 논하고 3장에서는 느린 주파수 비선택적 레일레이 페이딩 채널 환경에서 직·병렬 혼합 간섭 제거기를 사용하였을 경우 각 데이터율

의 사용자에 대한 성능을 분석하여 오류 확률을 유도한다. 그리고 4장에서는 비교·분석 및 고찰을 하고 5장에서는 분석 결과를 토대로 결론을 내린다.

II. 다중 처리 이득 기법이 사용되는 DS/CDMA 시스템과 간섭 제거 기법

1. 다중 처리 이득 기법

차세대 이동 통신 시스템은 음성뿐 아니라 화상, 데이터등 다양한 서비스를 지원해야 하며 각각의 서비스가 요구하는 데이터율은 10Kbps에서 2Mbps 까지 다양하다. 따라서 다중 데이터율로 전송하는 DS/CDMA 시스템을 구현하기 위해 다중 처리 이득 기법을 사용하며 다음과 같은 가정을 한다.

- 서로 다른 n개의 데이터율을 지원하는 n개의 부시스템(subsystem)이 존재

$$\left(R_1 = \frac{1}{T_1} > R_2 = \frac{1}{T_2} > \dots > R_n = \frac{1}{T_n} \right)$$

- 모든 n개의 부시스템은 같은 주파수 대역을 사용
- 모든 사용자는 BPSK 변조 방식을 사용하고 동일한 chip duration (T_c)을 사용
- j번째 부시스템은 $N_j = \frac{T_i}{T_c}$ 의 처리 이득을 갖음
- 모든 사용자는 동일한 비트 에너지를 가지고 전송

$$(E_b = P_1 T_1 = P_2 T_2 = \dots = P_n T_n)$$

- 따라서 높은 데이터율의 사용자가 더 높은 전력으로 전송

앞으로는 각각의 데이터율이 R_1 Kbps와 $R_2 \left(= \frac{R_1}{L} \right)$ Kbps인 두 개(n=2)의 부시스템이 존재하는 비동기 DS/CDMA을 고려한다. 데이터율이 R_1 Kbps인 시스템을 부시스템 1이라 하고 데이터율이 R_2 Kbps인 시스템을 부시스템 2라고 하면 j번째 부시스템의 k번째 사용자의 송신 신호 $s_k^{(j)}(t)$ 는 식 (1)과 같다.

$$s_k^{(j)}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_j}} b_k^{(j)}(t) c_k^{(j)}(t) \cos(\omega_c t + \phi_k^{(j)}) \quad (1)$$

여기서,

ω_c : 반송파 주파수

$\phi_k^{(j)}$: j번째 부시스템의 k번째 사용자 신호의 위상

T_j : j번째 부시스템의 비트 간격

식(1)은 정보 부호 $b_k^{(j)}(t)$ 와 확산 부호 $c_k^{(j)}(t)$ 의 곱으로 표현된다. 정보 부호와 확산 부호는 식(2)와 식(3)으로 주어진다.

$$b_k^{(j)}(t) = \sum_i b_{k,i}^{(j)} P_{T_j}(t - IT_j) \quad (2)$$

$$c_k^{(j)}(t) = \sum_i c_{k,i}^{(j)} P_{T_c}(t - IT_c) \quad (3)$$

여기서,

$c_{k,i}^{(j)}$: j번째 부시스템의 k번째 사용자에게 할당된 확산 부호의 l번째 칩

$b_{k,i}^{(j)}$: j번째 부시스템의 k번째 사용자 정보 부호의 l번째 비트

T_c : 칩 간격으로 $T_j = N_j T_c$ 인 관계가 성립하며, N_j 는 j번째 부시스템의 처리 이득

$P_{T_j}(t)$: 간격이 T_j 인 정현파

2. 간섭 제거 기법

직·병렬 혼합 간섭 제거 방법은 그림 1처럼 직렬과 병렬 간섭 제거기의 혼합된 형태로서 먼저 수신된 사용자 신호의 결정 변수의 크기 순서대로 정렬한다(모든 사용자의 상관기의 출력으로 정할 수 있다). 그 후 가장 강한 신호에 대한 상관기의 출력으로 이 신호를 추정 및 재생하여 간섭을 제거한 뒤 다음 단계에서는 가장 강한 신호가 제거된 수신 신호가 입력이 되며, 두 번째로 강한 신호에 대해서 검출하고 추정하고 재생하여 간섭을 제거한다. 이상의 단계를 반복하여 가장 약한 신호까지 직렬 간섭 제거를 거친 각 사용자의 결정 변수를 이용하여 모든 사용자의 신호를 다시 추정하고 재생하여 수신하고자 하는 기준 사용자의 신호를 원래의 수신 신호 $r(t)$ 에서 빼 준 뒤에 기준 사용자에 대해서 복조하는 병렬 간섭 제거를 s번째 stage까지 반복한다.

위의 과정을 수행하면 이미 선택된 상관기의 출력이 다음의 간섭 제거 과정에서 아무런 역할을 하지 못하는 단점이 병렬 간섭 제거 방식으로 보완이 되고 전력이 낮은 사용자 신호의 채널 파라미터와 결정 변수를 잘못 판단하는 단점을 직렬 간섭 제거 과정으로 어느 정도 보완할 수 있다.

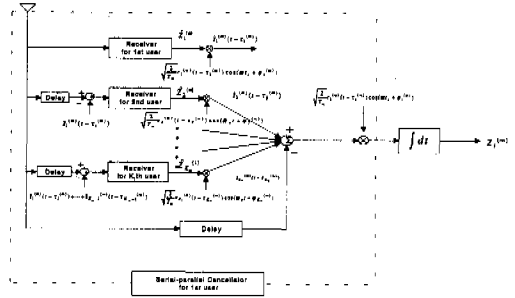


그림 1. 가장 강한 신호로 수신된 R_m Kbps 사용자에 대한 직·병렬 혼합 간섭 제거기법

다중 처리 이득 기법을 적용하여 서로 다른 두 가지 데이터율을 사용하는 경우 직·병렬 혼합 간섭 제거기의 전체 시스템 블록도를 살펴보면, 그림 2처럼 L배 빠른 데이터율(R_1 Kbps)의 사용자가 느린 데이터율(R_2 Kbps)의 사용자보다 L배의 전력으로 전송되므로 데이터율이 느린 사용자가 빠른 데이터율의 사용자에게 미치는 간섭 영향은 빠른 데이터율의 사용자가 미치는 간섭 영향에 비해 거의 영향을 미치지 못한다고 생각하고 R_1 Kbps 사용자(부시스템 1)에 대해서는 R_1 Kbps 사용자에 대해서만 간섭을 제거한다. 그리고 R_2 Kbps 사용자(부시스템 2)에 대해서는 R_1 Kbps 사용자가 R_2 Kbps 사용자에게 간섭을 미치는 데이터 비트가 모두 제거된 후 다시 R_2 Kbps 사용자에 대해서 간섭을 제거한다.

III. 다중 데이터율을 지원하는 DS/CDMA 시스템에서 직·병렬 혼합 간섭 제거 기법의 성능

각 부시스템의 사용자 수가 각각 K_1, K_2 명 이라고 하고 느린 주파수 비선형적 후 수신기에 수신된 신호 $r(t)$ 는 식(4)와 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K_1} 1^2 \sum_{k=1}^{K_2} \left\{ a_k^{(j)} \sqrt{\frac{2E_b}{T_j}} b_k^{(j)}(t - \tau_k^{(j)}) \times c_k^{(j)}(t - \tau_k^{(j)}) \cos(\omega_c t + \theta_k^{(j)}) \right\} + n(t) \quad (4)$$

여기서

$$\theta_k^{(j)} : (\omega_c \cdot \tau_k^{(j)} + \phi_k^{(j)}) \bmod 2\pi$$

$$\tau_k^{(j)} : j번째 부시스템의 k번째 사용자의 시간 지연$$

연

$\alpha_k^{(j)}$: 식 (5)와 같은 Rayleigh 확률 분포를 갖고 제곱의 평균값인 $E[(\alpha_k^{(j)})^2]$ 는 $2\sigma^2$ 이다.

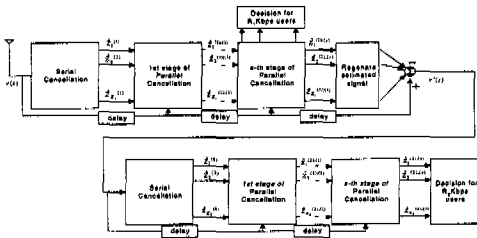


그림 2. 다중 데이터율을 지원하는 DS/CDMA 시스템의 직·병렬 혼합 간섭 제거기법

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad x \geq 0 \quad (5)$$

$n(t)$: 전력 밀도가 $\frac{N_0}{2}$ 인 가산 백색 가우시안 잡음이다.

그리고, $n(n=1,2)$ 번째 부시스템의 j 번째 사용자가 $m(m=1,2)$ 번째 부시스템 k 번째 사용자에게 미치는 간섭 성분은 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$I_{j,k}^{(n,m)}(\tau_{j,k}^{(n,m)}, \theta_{j,k}^{(n,m)}) = \frac{\cos(\theta_k^{(m)} - \theta_j^{(n)})}{\sqrt{T_m T_n}} \times \int_{\tau_j^{(n)} - T_n}^{\tau_j^{(n)} + T_n} b_k^{(m)}(t - \tau_k^{(m)}) c_k^{(m)}(t - \tau_k^{(m)}) c_j^{(n)}(t - \tau_j^{(n)}) dt \quad (6)$$

여기서, $\tau_{j,k}^{(m,n)}$ 는 m 번째 부시스템의 k 번째 사용자와 n 번째 부시스템의 j 번째 사용자의 상대적 지연이고 $\theta_{j,k}^{(m,n)}$ 는 m 번째 부시스템의 k 번째 사용자와 n 번째 부시스템의 j 번째 사용자의 상대적 위상차이다.

식 (6)의 간섭 성분의 평균과 분산은 식 (7)과 식 (8)로 구해진다⁽¹⁾.

$$E[I_{j,k}^{(n,m)}(\tau_{j,k}^{(n,m)}, \theta_{j,k}^{(n,m)})] = 0 \quad (7)$$

$$Var[I_{j,k}^{(n,m)}(\tau_{j,k}^{(n,m)}, \theta_{j,k}^{(n,m)})] = \frac{1}{3N_m} \frac{R_n}{R_m} \quad (8)$$

식 (4)의 수신 신호가 그림 2의 직·병렬 혼합 간섭 제거기로 입력되면 먼저 가장 강한 전력으로 수신된 R_1 Kbps 사용자의 신호로 동기된 상관기로 출력이 나오게 된다. 이 결정 변수는 식 (9)과 같이 표현된다. (편의상 결정 변수의 크기에 따라 결정

변수를 $Z_1^{(1)}, \dots, Z_{K_1}^{(1)}$ 로 한다)

$$Z_1^{(1)} = \alpha_1^{(1)} \sqrt{E_b} b_1^{(1)} + \sum_{k=2}^{K_1} \alpha_k^{(1)} \sqrt{E_b} I_{k,1}^{(1,1)}(\tau_{k,1}^{(1,1)}, \theta_{k,1}^{(1,1)}) + \sum_{k=1}^{K_1} \alpha_k^{(2)} \sqrt{E_b} I_{k,1}^{(2,1)}(\tau_{k,1}^{(2,1)}, \theta_{k,1}^{(2,1)}) + N_1^{(1)} \quad (9)$$

여기서,

$$N_1^{(1)} = \sqrt{\frac{2}{T_1}} \int_{\tau_1^{(1)}}^{\tau_1^{(1)} + T_1} n(t) c_1^{(1)}(t - \tau_1^{(1)}) \cos(\omega_c t + \theta_1^{(1)}) dt$$

이고 평균은 0이고 분산은 $\frac{N_0}{2}$ 이다.

따라서 결정 변수 $Z_1^{(1)}$ 의 평균과 분산은 구해 보면 식 (10)과 식 (11)과 같다.

$$E[Z_1] = \alpha_1^{(1)} \sqrt{E_b} b_1^{(1)} \quad (10)$$

$$Var[Z_1^{(1)}] = \frac{E_b}{3N_1} \sum_{k=2}^{K_1} E[(\alpha_k^{(1)})^2] + \frac{E_b}{3N_1} \frac{R_2}{R_1} K_2 2\sigma^2 + \frac{N_0}{2} \quad (11)$$

그리고, 식(11)에서 순서적으로 배열된 $E[(\alpha_k^{(1)})^2]$ 값은 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$E[(\alpha_k^{(1)})^2] = \int_0^{\infty} x^2 f_{p_k}(x) dx \quad (12)$$

여기서, $f_{p_k}(x)$ 는 k 번째 센 에너지로 수신된 사용자의 확률 분포 함수로 식 (13)과 같은 식으로 표현된다⁽⁴⁾.

$$f_{p_k}(x) = \frac{K_1!}{(K_1 - k)! (k - 1)!} F^{K_1 - k}(x) [1 - F(x)]^{k-1} f(x) \quad (13)$$

식 (13)에서 $f(x)$ 는 식 (5)의 Rayleigh P.D.F.이고 $F(x) = 1 - e^{-x^2/2\sigma^2}$ 인 Rayleigh C.D.F.이다. 따라서 결정 변수 $Z_1^{(1)}$ 은 식 (14)가 된다.

$$Var[Z_1^{(1)}] = \frac{E_b}{3N_1} \sum_{k=2}^{K_1} Q_1(k) + \frac{E_b}{3N_1} \frac{R_2}{R_1} K_2 2\sigma^2 + \frac{N_0}{2} \quad (14)$$

여기서,

$$Q_1(k) = \frac{K_1! \cdot 2\sigma^2}{(K_1 - k)! (k - 1)!} \sum_{r=0}^{K_1 - k} (-1)^r \frac{\binom{K_1 - k}{r}}{(r + k)^2}$$

이다.

이 결정 변수를 가지고 가장 강한 전력으로 수신된 사용자의 신호를 식 (15)와 식 (16)과 같이 추정한다⁶⁾.

$$\hat{z}_1^{(1)} = \hat{a}_1^{(1)} \sqrt{E_b} \hat{b}_1^{(1)} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \hat{s}_1^{(1)}(t - \tau_1^{(1)}) &= \hat{a}_1^{(1)} \sqrt{\frac{2E_b}{T_1}} \hat{b}_1^{(1)}(t - \tau_1^{(1)}) \\ &\times c_1^{(1)}(t - \tau_1^{(1)}) \cos(\omega_c t + \theta_1^{(1)}) \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)의 추정 신호를 원래 수신 신호 $r(t)$ 에서 빼 주면 두 번째로 강한 전력으로 검출된 사용자의 결정 변수는 식 (17)이 된다.

$$\begin{aligned} \hat{z}_2^{(1)} &= \int_{\tau_2^{(1)}}^{\tau_1^{(1)} + T_1} \{r(t) - \hat{s}_1^{(1)}(t - \tau_1^{(1)})\} \\ &\times \sqrt{\frac{2}{T_1}} c_2^{(1)}(t - \tau_2^{(1)}) \cos(\omega_c t + \theta_2^{(1)}) dt \\ &= a_2^{(1)} \sqrt{E_b} b_2^{(1)} + \sum_{k=1}^{K_1} a_k^{(1)} \sqrt{E_b} I_{k,2}^{(1)}(\tau_{k,2}^{(1,1)}, \theta_{k,2}^{(1,1)}) \\ &+ \sum_{k=1}^{K_1} a_k^{(2)} \sqrt{E_b} I_{k,2}^{(2,1)}(\tau_{k,2}^{(2,1)}, \theta_{k,2}^{(2,1)}) + N_2^{(1)} \\ &+ a_1^{(1)} \sqrt{E_b} I_{1,2}^{(1,1)}(\tau_{1,2}^{(1,1)}, \theta_{1,2}^{(1,1)}) \\ &- \hat{a}_1^{(1)} \sqrt{E_b} \hat{I}_{1,2}^{(1,1)}(\tau_{1,2}^{(1,1)}, \theta_{1,2}^{(1,1)}) \end{aligned} \quad (17)$$

이 결정 변수의 평균과 분산은 식 (18)과 식 (19)로 표현된다.

$$E[\hat{z}_2^{(1)}] = a_2^{(1)} \sqrt{E_b} b_2^{(1)} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} Var[\hat{z}_2^{(1)}] &= \frac{E_b}{3N_1} \sum_{k=1}^{K_1} Q_1(k) + \frac{E_b}{3N_1} \frac{R_2}{R_1} K_2 2\sigma^2 \\ &+ \frac{1}{3N_1} Var[a_1^{(1)} \sqrt{E_b} - \hat{a}_1^{(1)} \sqrt{E_b}] + \frac{N_0}{2} \\ &= \frac{E_b}{3N_1} \sum_{k=1}^{K_1} Q_1(k) + \frac{E_b}{3N_1} \frac{R_2}{R_1} K_2 2\sigma^2 \\ &+ \frac{1}{3N_1} Var[\hat{z}_1^{(1)}] + \frac{N_0}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

위의 식 $Var[a_1^{(1)} \sqrt{E_b} - \hat{a}_1^{(1)} \sqrt{E_b}]$ 에서 $\hat{a}_1^{(1)} \sqrt{E_b}$ 는 $a_1^{(1)} \sqrt{E_b}$ 의 추정 값이므로 $a_1^{(1)} \sqrt{E_b}$ 는 상수로 생각할 수 있다.

따라서,

$$\begin{aligned} Var[a_1^{(1)} \sqrt{E_b} - \hat{a}_1^{(1)} \sqrt{E_b}] &= Var[\hat{a}_1^{(1)} \sqrt{E_b}] \\ &= Var[\hat{z}_1^{(1)}] \end{aligned}$$

이다. 식 (19)의 결정 변수를 가지고 식 (15)와 식 (16)처럼 두 번째로 강한 사용자의 수신 신호를 추정하여 강한 사용자의 추정 신호를 뺀 원래의 수신 신호에서 다시 빼 준다. 이 과정을 반복해서 수행하면 i 번째로 강한 전력으로 수신된 신호의 결정 변수는 식 (20)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{z}_i^{(1)} &= \int_{\tau_i^{(1)}}^{\tau_1^{(1)} + T_1} \{r(t) - \sum_{k=1}^{i-1} \hat{s}_k^{(1)}(t - \tau_k^{(1)})\} \\ &\times \sqrt{\frac{2}{T_1}} c_i^{(1)}(t - \tau_i^{(1)}) \cos(\omega_c t + \theta_i^{(1)}) dt \\ &= a_i^{(1)} \sqrt{E_b} b_i^{(1)} \\ &+ \sum_{k=i+1}^{K_i} a_k^{(1)} \sqrt{E_b} I_{k,i}^{(1,1)}(\tau_{k,i}^{(1,1)}, \theta_{k,i}^{(1,1)}) \quad (20) \\ &+ \sum_{k=1}^{K_i} a_k^{(2)} \sqrt{E_b} I_{k,i}^{(2,1)}(\tau_{k,i}^{(2,1)}, \theta_{k,i}^{(2,1)}) + N_i^{(1)} \\ &+ \sum_{k=1}^{i-1} \{a_k^{(1)} \sqrt{E_b} I_{k,i}^{(1,1)}(\tau_{k,i}^{(1,1)}, \theta_{k,i}^{(1,1)}) \\ &- \hat{a}_k^{(1)} \sqrt{E_b} \hat{I}_{k,i}^{(1,1)}(\tau_{k,i}^{(1,1)}, \theta_{k,i}^{(1,1)})\} \end{aligned}$$

이 i 번째 강한 전력으로 수신된 사용자의 결정 변수의 평균과 분산은 식 (21)과 식 (22)와 같다.

$$E[\hat{z}_i^{(1)}] = a_i^{(1)} \sqrt{E_b} b_i^{(1)} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} Var[\hat{z}_i^{(1)}] &= \frac{E_b}{3N_1} \sum_{k=i+1}^{K_i} Q_1(k) + \frac{E_b}{3N_1} \frac{R_2}{R_1} K_2 2\sigma^2 \\ &+ \frac{1}{3N_1} \sum_{k=1}^{i-1} Var[a_k^{(1)} \sqrt{E_b} - \hat{a}_k^{(1)} \sqrt{E_b}] + \frac{N_0}{2} \\ &= \frac{E_b}{3N_1} \sum_{k=i+1}^{K_i} Q_1(k) + \frac{E_b}{3N_1} \frac{R_2}{R_1} K_2 2\sigma^2 \\ &+ \frac{1}{3N_1} \sum_{k=1}^{i-1} Var[\hat{z}_k^{(1)}] + \frac{N_0}{2} \end{aligned} \quad (22)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Var[\hat{z}_k^{(1)}] &= \frac{E_b}{3N_1} \sum_{g=k+1}^{K_i} Q_1(g) \\ &+ \sum_{g=1}^{k-1} \sum_{x=i+1-k}^{K_i} \frac{E_b Q_1(g)}{(3N_1)^{k-1}} \\ &+ \left(\frac{E_b}{3N_1} \frac{R_2}{R_1} K_2 2\sigma^2 + \frac{N_0}{2} \right) \sum_{g=1}^{k-1} \frac{1}{(3N_1)^k} \end{aligned}$$

이다.

이 결정 변수로 i 번째로 강하게 수신된 사용자의 추정 신호를 생성한다. 이 과정을 가장 약한 신호 사용자까지 반복해서 수행한다. 이렇게 해서 모든 사용자에게 대한 추정 신호를 생성할 수 있다. 그리고 나서 병렬 간섭 제거기로 수신하고자 하는 사용자

를 제외한 모든 사용자의 추정 신호(직렬 간섭 제거로 만들어진)를 합해서 원래의 수신 신호 $r(t)$ 에서 빼 주고 수신 사용자에 대한 기준 코드로 역확산하여 정보 부호를 판별한다. 즉, i 번째로 강한 전력으로 수신한 사용자의 병렬 간섭 제거의 첫 번째 단을 거치고 난 후의 결정 변수는 식 (23)과 같다.

$$\begin{aligned} Z_i^{(1):(1)} &= \int_{t_i^{(1)}}^{t_i^{(1)}+T_1} \left\{ r(t) - \sum_{k=1, k \neq i}^{K_1} \hat{s}_k^{(1)}(t - \tau_k^{(1)}) \right\} \\ &\quad \times \sqrt{\frac{2}{T_1}} c_i^{(1)}(t - \tau_i^{(1)}) \cos(\omega_c t + \theta_i^{(1)}) dt \\ &= a_i^{(1)} \sqrt{E_b} b_i^{(1)} + \sum_{k=1, k \neq i}^{K_1} \{ a_k^{(1)} \sqrt{E_b} I_{k,i}^{(1,1)}(\tau_{k,i}^{(1)}, \theta_{k,i}^{(1)}) \\ &\quad - \hat{a}_k^{(1)} \sqrt{E_b} \hat{I}_{k,i}^{(1,1)}(\tau_{k,i}^{(1)}, \theta_{k,i}^{(1)}) \} \\ &\quad + \sum_{k=1}^{K_2} a_k^{(2)} \sqrt{E_b} I_{k,i}^{(2,1)}(\tau_{k,i}^{(2)}, \theta_{k,i}^{(2)}) + N_i^{(1)} \end{aligned} \quad (23)$$

이 결정 변수 $Z_i^{(1):(1)}$ 의 평균과 분산은 식 (24), 식 (25)와 같다.

$$E[Z_i^{(1):(1)}] = a_i^{(1)} \sqrt{E_b} b_i^{(1)} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} Var[Z_i^{(1):(1)}] &= \frac{1}{3N_1} \sum_{k=1, k \neq i}^{K_1} Var[\hat{Z}_k^{(1)}] \\ &\quad + \frac{E_b}{3N_1} \frac{R_2}{R_1} K_2 2\sigma^2 + \frac{N_0}{2} \end{aligned} \quad (25)$$

그리고, 병렬 간섭 제거기의 stage수를 몇 개의 stage로 확장할 수 있다. 본 논문에서는 직렬 간섭 제거와 s-stage 병렬 간섭 제거를 적용한다. 먼저 첫 번째 stage의 결정 변수로 다시 추정 신호를 만든다. 수신하고자 하는 사용자를 제외한 모든 추정 신호를 합하여 원래의 수신 신호 $r(t)$ 에서 빼고 그 수신하고자 하는 사용자의 기준 코드로 역확산시킨다. 이 과정을 s번째 stage까지 수행하고 난 후 i 번째로 강한 전력으로 수신된 신호의 결정 변수, 평균과 분산은 식 (26)~ 식 (28)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Z_i^{(1):(s)} &= \int_{t_i^{(s)}}^{t_i^{(s)}+T_1} \left\{ r(t) - \sum_{k=1, k \neq i}^{K_1} \hat{s}_k^{(1):(s-1)}(t - \tau_k^{(1)}) \right\} \\ &\quad \times \sqrt{\frac{2}{T_1}} c_i^{(1)}(t - \tau_i^{(1)}) \cos(\omega_c t + \theta_i^{(1)}) dt \\ &= a_i^{(1)} \sqrt{E_b} b_i^{(1)} + \sum_{k=1, k \neq i}^{K_1} \{ a_k^{(1)} \sqrt{E_b} I_{k,i}^{(1,1)}(\tau_{k,i}^{(1)}, \theta_{k,i}^{(1)}) \\ &\quad - \hat{a}_k^{(1):(s-1)} \sqrt{E_b} \hat{I}_{k,i}^{(1,1):(s-1)}(\tau_{k,i}^{(1)}, \theta_{k,i}^{(1)}) \} \\ &\quad + \sum_{k=1}^{K_2} a_k^{(2)} \sqrt{E_b} I_{k,i}^{(2,1)}(\tau_{k,i}^{(2)}, \theta_{k,i}^{(2)}) + N_i^{(1)} \end{aligned} \quad (26)$$

$$E[Z_i^{(1):(s)}] = a_i^{(1)} \sqrt{E_b} b_i^{(1)} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} Var[Z_i^{(1):(s)}] &= \frac{1}{3N_1} \sum_{k=1, k \neq i}^{K_1} Var[\hat{Z}_k^{(1):(s-1)}] \\ &\quad + \frac{E_b}{3N_1} \frac{R_2}{R_1} \sum_{k=1}^{K_2} E[(a_k^{(2)})^2] + \frac{N_0}{2} \\ &= \frac{(-1)^{s-1}}{(3N_1)^s} \sum_{k=1, k \neq i}^{K_1} Var[\hat{Z}_k^{(1)}] \\ &\quad + \sum_{k=1}^{K_1} \frac{(K_1-1)^{s-1} (-1)^{s-1}}{(3N_1)^s} \sum_{k=1, k \neq i}^{K_1} Var[\hat{Z}_k^{(1)}] \\ &\quad + \left(2\sigma^2 K_2 \frac{E_b}{3N_1} \frac{R_2}{R_1} + \frac{N_0}{2} \right) \sum_{k=1}^{K_2} \frac{(K_1-1)^{s-1}}{(3N_1)^{s-1}} \end{aligned} \quad (28)$$

위의 평균과 분산으로부터 직렬 간섭 제거와 s-stage의 병렬 간섭 제거한 i 번째로 강한 신호로 수신된 R_1 Kbps 사용자의 SNR과 평균 오류 확률은 식 (29), 식 (30)이 된다.

$$SNR_i^{(1):(s)} = \frac{(a_i^{(1)})^2 E_b}{Var[Z_i^{(1):(s)}]} \quad (29)$$

$$P_e^{(1):(s)}(i) = \int_0^\infty Q\left(x \sqrt{\frac{E_b}{Var[Z_i^{(1):(s)}]}}\right) f_{Z_i^{(1):(s)}}^{(1)}(x) dx \quad (30)$$

여기서 $f_{Z_i^{(1):(s)}}^{(1)}(x)$ 는 i 번째 강하게 수신된 사용자의 확률 분포 함수로 식 (13)과 같은 식이다. 따라서, 평균 오류 확률은 모든 사용자의 오류 확률을 평균 취하면 식 (31)과 같이 구해진다.

$$P_e^{(1):(s)} = \frac{1}{K_1} \sum_{i=1}^{K_1} P_e^{(1):(s)}(i) \quad (31)$$

이제 R_2 Kbps 사용자에 미치는 R_1 Kbps의 모든 사용자들의 데이터 비트들이 직렬 간섭 제거와 s 번째 stage 까지의 병렬 간섭 제거된 후의 결정 변수로 추정된 신호는 $\sum_{k=1}^{K_1} \hat{s}_k^{(1):(s)}(t - \tau_k)$ 이다. R_1 Kbps의 사용자에 대해서 간섭이 제거된 후의 수신 신호 $r'(t)$ 는 식 (32)와 같다.

$$\begin{aligned} r'(t) &= \sum_{k=1}^{K_1} \{ a_k^{(1)} b_k^{(1)}(t - \tau_k^{(1)}) \\ &\quad - \hat{a}_k^{(1):(s)} \hat{b}_k^{(1):(s)}(t - \tau_k^{(1)}) \} \\ &\quad \times \sqrt{\frac{2E_b}{T_1}} c_k^{(1)}(t - \tau_k^{(1)}) \cos(\omega_c t + \theta_k^{(1)}) \quad (32) \\ &\quad + \sum_{k=1}^{K_2} \left\{ \sqrt{\frac{2E_b}{T_2}} a_k^{(2)} b_k^{(2)}(t - \tau_k^{(2)}) c_k^{(1)}(t - \tau_k^{(2)}) \right. \\ &\quad \times \cos(\omega_c t + \theta_k^{(2)}) + n(t) \} \end{aligned}$$

이 수신 신호를 바탕으로 R_1 Kbps 사용자에서와 같이 R_2 Kbps 사용자에 대해서 직렬 간섭 제거를 하고 s-stage 병렬 간섭 제거의 과정을 거친다. 그러면 직렬 간섭 제거에 의해서 i번째로 강하게 수신된 신호의 결정 변수, 평균과 분산은 식 (33)~식 (35)가 된다.

$$\begin{aligned} \hat{Z}_i^{(2)} &= \int_{\tau_i^{(2)}}^{\tau_i^{(2)}+\tau_1} \left\{ r(t) - \sum_{k=i+1}^{K_2} \hat{s}_k^{(2)}(t - \tau_k^{(2)}) \right\} \\ &\quad \times \sqrt{\frac{2}{T_2}} c_i^{(2)}(t - \tau_i^{(2)}) \cos(\omega_c t + \theta_i^{(2)}) dt \\ &= a_i^{(2)} \sqrt{E_b} b_i^{(2)} + \sum_{k=i+1}^{K_2} \sqrt{E_b} I_{k,i}^{(2,2)}(\tau_{k,i}^{(2,2)}, \theta_{k,i}^{(2,2)}) \\ &\quad + \sum_{k=i}^{K_1} \{ a_k^{(2)} \sqrt{E_b} I_{k,i}^{(2,2)}(\tau_{k,i}^{(2,2)}, \theta_{k,i}^{(2,2)}) \\ &\quad - \hat{a}_k^{(2)} \sqrt{E_b} \hat{I}_{k,i}^{(2,2)}(\tau_{k,i}^{(2,2)}, \theta_{k,i}^{(2,2)}) \} \\ &\quad + \sum_{k=i}^{K_1} \{ a_k^{(1)} \sqrt{E_b} I_{k,i}^{(1,2)}(\tau_{k,i}^{(1,2)}, \theta_{k,i}^{(1,2)}) \\ &\quad - \hat{a}_k^{(1):(s)} \sqrt{E_b} \hat{I}_{k,i}^{(1,2):(s)}(\tau_{k,i}^{(1,2)}, \theta_{k,i}^{(1,2)}) \} \\ &\quad + N_i^{(2)} \end{aligned} \quad (33)$$

$$E[\hat{Z}_i^{(2)}] = a_i^{(2)} \sqrt{E_b} b_i^{(2)} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[\hat{Z}_i^{(2)}] &= \frac{E_b}{3N_2} \sum_{k=i+1}^{K_2} Q_2(k) \\ &\quad + \frac{1}{3N_2} \sum_{k=i}^{K_1} \text{Var}[\hat{Z}_k^{(2)}] \\ &\quad + \frac{1}{3N_2} \frac{R_1}{R_2} \sum_{k=i}^{K_1} \text{Var}[\hat{Z}_k^{(1):(s+1)}] + \frac{N_0}{2} \end{aligned} \quad (35)$$

여기서,

$$Q_2(k) = \frac{K_2! \cdot 2\sigma^2}{(K_2 - k)! (k-1)!} \sum_{r=0}^{K_2-k} (-1)^r \frac{\binom{K_2-k}{r}}{(r+k)^2} \text{이다.}$$

이렇게 직렬 간섭 제거로 만들어진 모든 R_2 Kbps 사용자의 결정 변수를 기초로 해서 s-stage 병렬 간섭 제거한 결정 변수와 분산은 식 (36), 식 (37)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{Z}_i^{(2):(s)} &= \int_{\tau_i^{(2)}}^{\tau_i^{(2)}+\tau_1} \left\{ r(t) - \sum_{k=i}^{K_2} \hat{s}_k^{(2):(s-1)}(t - \tau_k^{(2)}) \right\} \\ &\quad \times \sqrt{\frac{2}{T_2}} c_i^{(2)}(t - \tau_i^{(2)}) \cos(\omega_c t + \theta_i^{(2)}) dt \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[\hat{Z}_i^{(2):(s)}] &= \frac{1}{3N_2} \sum_{k=i, k+i}^{K_2} \text{Var}[\hat{Z}_k^{(2):(s-1)}] \\ &\quad + \frac{1}{3N_2} \frac{R_1}{R_2} \sum_{k=i}^{K_1} \text{Var}[\hat{Z}_k^{(1):(s)}] + \frac{N_0}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(-1)^{s-1}}{(3N_2)^s} \sum_{k=i}^{K_2} \text{Var}[\hat{Z}_k^{(2)}] \\ &\quad + \sum_{k=i}^{K_1} \frac{(K_2-1)^{s-1} (-1)^{s-j-1}}{(3N_2)^s} \sum_{k=i}^{K_2} \text{Var}[\hat{Z}_k^{(2)}] \\ &\quad + \left(\frac{1}{3N_2} \frac{R_1}{R_2} \sum_{k=i}^{K_1} \text{Var}[\hat{Z}_k^{(1):(s)}] + \frac{N_0}{2} \right) \\ &\quad \times \left\{ \sum_{j=1}^s \frac{(K_1-1)^{j-1}}{(3N_2)^{j-1}} \right\} \end{aligned} \quad (37)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \text{Var}[\hat{Z}_k^{(2)}] &= \frac{E_b}{3N_2} \sum_{g=k+1}^{K_2} Q_2(g) \\ &\quad + \sum_{g=k+1}^{K_1} \sum_{h=k+1}^{K_1} \frac{E_b Q_2(g)}{(3N_2)^{g-h}} \\ &\quad + \left\{ \left(\frac{1}{3N_2} \frac{R_1}{R_2} \sum_{k=i}^{K_1} \text{Var}[\hat{Z}_k^{(1):(s)}] + \frac{N_0}{2} \right) \right. \\ &\quad \times \left. \sum_{k=i}^{K_1} \frac{1}{(3N_1)^k} \right\} \end{aligned}$$

이다.

위의 평균과 분산으로부터 직렬 간섭 제거와 s-stage의 병렬 간섭 제거한 R_2 Kbps 사용자의 i번째로 강하게 수신된 신호의 SNR과 평균 오류 확률을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{SNR}_i^{(2):(s)} = \frac{(a_i^{(2)})^2 E_b}{\text{Var}[\hat{Z}_i^{(2):(s)}]} \quad (38)$$

$$P_b^{(2):(s)}(i) = \int_0^\infty Q\left(x \sqrt{\frac{E_b}{\text{Var}[\hat{Z}_i^{(2):(s)}]}}\right) f_{P_i^{(2)}(x)} dx \quad (39)$$

여기서 $f_{P_i^{(2)}(x)}$ 는 i번째 강하게 수신된 사용자 신호의 확률 분포 함수이다. 따라서, 평균 오류 확률은 모든 사용자의 오류 확률을 평균하여 식 (40)과 같이 구해진다.

$$P_e^{(2):(s)} = \frac{1}{K_2} \sum_{i=1}^{K_2} P_b^{(2):(s)}(i) \quad (40)$$

IV. 비교 및 분석

본 장에서는 앞에서 유도한 식을 이용하여 성능 분석을 하기 위해 확산 대역폭을 5MHz, 각 데이터율을 128Kbps와 8Kbps로 한다.

그림 3과 그림 4는 평균 SNR(\bar{E}_b/N_0)이 25dB이고 8Kbps 사용자를 15명으로 고정시키고 128Kbps 사용자수를 변화시켜 가면서 성능 분석을 한 것이다. 그림 3에서는 직·병렬 혼합 간섭 제거기(직렬+

병렬 s-stage)의 병렬 간섭 제거 stage 수에 따른 성능으로서 stage 수가 늘어날수록 사용자 수가 증가해도 거의 성능 저하가 나타나지 않음을 알 수 있다. 그림 4는 기존의 직렬 간섭 제거기, 병렬 간섭 제거기(1-stage)와 직·병렬 혼합 간섭 제거기(직렬+병렬 1-stage)의 성능을 비교한 것으로 기존의 간섭 제거의 경우보다 성능이 우수하고 직렬 간섭 제거와 병렬 간섭 제거의 단점이 보완되었음을 보여주고 있다.

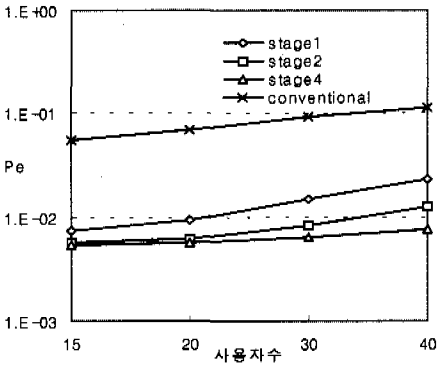


그림 3. 128Kbps 사용자수에 따른 직·병렬 혼합 간섭 제거기법의 성능

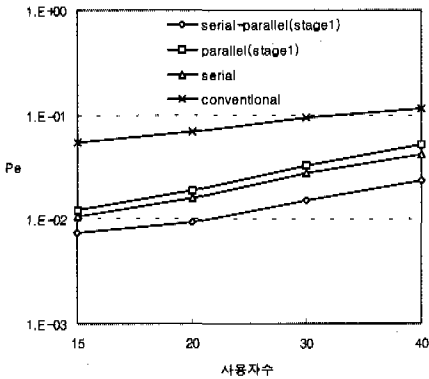


그림 4. 128Kbps 사용자에 대한 직렬, 병렬 간섭 제거기와 직·병렬 간섭 제거 기법의 성능

그림 5와 그림 6은 앞의 경우와 마찬가지로 8Kbps 사용자에 대한 성능을 나타낸 것이다. 그림 5에서 보듯이 8Kbps 사용자의 경우 stage 수가 증가해도 거의 같은 성능을 나타내고 있다. 그림 6은 기존의 두 간섭 제거기 보다 좋은 성능을 나타내지만 128Kbps 사용자에서보다는 그렇게 성능 차이가

나지 않는다. 즉, 다른 데이터율을 사용하는 사용자의 간섭이 제거된 후에는 기존의 두 간섭 제거기와 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

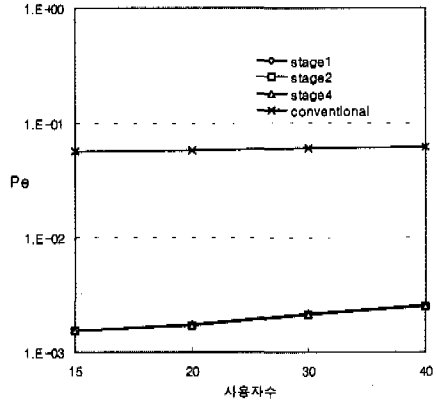


그림 5. 8Kbps 사용자수에 따른 직·병렬 혼합 간섭 제거기의 성능

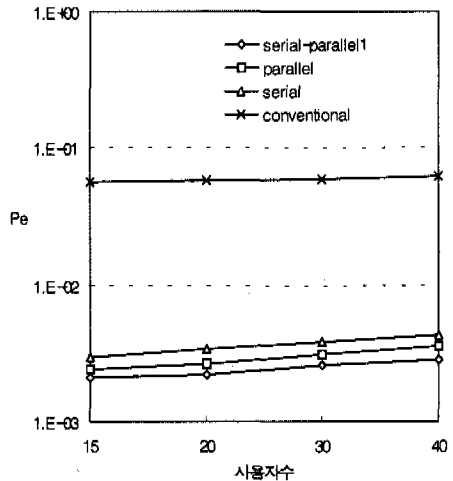


그림 6. 8Kbps 사용자에 대한 직렬, 병렬 간섭 제거기와 직·병렬 간섭 제거기의 성능

V. 결론

본 논문에서는 다중 처리 이득 기법으로 인해 발생하는 심각한 원근 문제를 해결하기 위해 직·병렬 혼합 간섭 제거기를 제안하였다. 이 간섭 제거기는 저속 및 고속 데이터율에서 기존의 직렬 또는 병렬 간섭 제거기보다 원근 문제를 크게 줄일 수 있고 병렬 간섭 제거기의 stage 수를 증가시키면 사

용자 수가 증가하더라도 성능 저하가 거의 나타나지 않으므로 시스템 용량 증대를 가져올 수 있다. 따라서 제안한 간섭 제거 방식은 멀티미디어 서비스를 제공하기 위해 고속 및 저속 데이터율로 전송되는 환경에서 적절한 간섭 제거 기법이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] T. Ottosson and A. Svensson, "Multi-rate Performance in DS/CDMA Systems," *Tech. Report* no. 14, ISSN 0283-1260, Dept. of Information Theory, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, March, 1995

[2] A. Baier, U.-C. Fiebig, W. Granzow, W. Koch, P. Teder, and J. Thielecke, "Design Study for a CDMA-Based Third-Generation Mobile Radio System", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, pp. 733-743, May, 1994

[3] A. Johansson and A. Svensson, "Successive Interference Cancellation Schemes in Multi-rate DS/CDMA Systems," *Proceedings of VTC '95*, pp. 704-708, July 1995

[4] P. Patel and J. Holtzman, "Performance Comparison of a DS/CDMA System Using a Successive Interference Cancellation(IC) Scheme and a Parallel IC Scheme under Fading," *Proceedings of ICC*, pp. 510-514, May, 1994

[5] A. M. Mood, F. A. Graybill, and Duane C. Boes, *Introduction to the Theory of Statistics*, Third Edition, McGraw-Hill, 1974

[6] 최진우, 김석규, 박상규 "간섭 제거기와 불완전한 전력 제어를 갖는 DS/CDMA 시스템의 성능 분석," *JCCI*, vol 1, pp. 385~389, 19

김 성 기(Sung Kee Kim)

정회원



1996년 2월 : 한양대학교 공과대학 전자통신과(공학사)

1998년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신공과(공학석사)

1998년 1월~현재 : 삼성전자 정보통신총괄 무선 사업부 개발3G 근무중
<주관심 분야> 디지털통신, 확산대역통신, PCS, IMT-2000

박 상 규(Sang Kyu Park)

정회원



1974년 2월 : 서울대학교 전기공학 (공학사)

1980년 5월 : Duke University 통신공학(공학석사)

1987년 5월 : University of Michigan 통신공학(공학박사)

1976년 7월~1978년 10월 : 국방과학연구소

1990년 8월~1991년 8월 : University of Southern California 객원교수

1987년 3월 ~현재 : 한양대학교 공과대학 전자전기공학부 교수

<주관심 분야> 디지털통신, 확산대역통신, 부호이론, PCS, IMT-2000
e-mail:skpark@email.hanyang.ac.kr