DBpia

논문 01-26-7B-11 한국통신학회논문지 '01-7 Vol.26 No.7B

Rayleigh 페이딩 채널에서 하이브리드 DS/CDMA 다중사용자 검파 알고리즘의 성능분석

정회원 강 환 민*, 조 성 호*

Performance Analysis of Various Hybrid DS/CDMA Multiuser Detection Algorithms in Rayleigh Fading Channels

Hwan Min Kang*, Sung Ho Cho* *Regular Members*

요 약

현재 상용화된 CDMA (code division multiple access) 방식은 사용자가 증가함에 따라 다중 사용자 간섭에 의해 통화품질 향상 및 가입자 수용 용량 증대에 한계를 가지고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 다양한 형태의 다중 사용자 검파 알고리즘이 제안되었다. 본 논문에서는 여러 형태의 알고리즘들 가운데, 역상관 (decorrelating) 검파기와 병렬 간섭 제거 (parallel interference cancellation, PIC) 검파기, 연속 간섭 제거 (successive interference cancellation, SIC) 검파기와 PIC 검파기, zero-forcing decision-feedback (ZF-DF) 검파기와 PIC 검파기를 하이브리드 형태로 구성하는 방법을 제시하였고, Rayleigh 페이딩 환경에서 성능분석 및 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 성능 비교를 하였다. 컴퓨터 모의시험 결과, 본 논문에서 제안한 세 가지 하이브리드 검파기 모두 기존 검파기에 비하여 우수한 성능을 보였다.

ABSTRACT

The conventional code division multiple access (CDMA) detectors show severe degradation in communication quality as the number of active users increase due to multiple access interference (MAI). This problem restricts the user capacity, and various algorithms have been proposed to overcome the MAI problem. In this paper, three hybrid forms of multiuser detection scheme are presented for the purpose of good performance and simple hardware complexity. The decorrelating and the parallel interference cancellation (PIC) detectors, the successive interference cancellation (SIC) and the PIC detectors, and the zero-forcing decision-feedback (ZF-DF) and the PIC detectors are respectively coupled. In Rayleigh fading channels, performances of these hybrid schemes are compared, and their validity and usefulness are demonstrated by computer simulations.

Ⅰ. 서 론

최근의 통신 기술은 유선에서 무선으로, 아날로그 방식에서 디지털 방식으로, 음성 위주의 서비스에서 비음성 부가 서비스를 추가하는 방향으로 급속하게 발전하고 있다. 특히, 최근에는 CDMA 방식인 IS-95B가 널리 보급되어 있고, 음성, 데이터, 비디오, 텍스트 등 다양한 미디어 서비스를 통합적으로 제공될 IMT-2000이 크게 부각될 것으로 예측된다. 이러한 무선통신 환경을 구축하기 위한 차세대 무선통신 기술은 대용량 고속 무선 정보 통신의 특징을 수용할 수 있는 기술이어야 하며, 그 중 CDMA 통신 서비스는 날로 가입자 수가 증가하고 있으며, 무선 채널에서 페이딩 영향에 강하고 대용량 수용에 적합한 특성 등이 차세대 무선통신 기술로서 주목 받고 있다.

* 한양대학교 전자공학과
논문번호 : 010002-0216, 접수일자 : 2001년 2월 16일

www.dbpia.co.kr

그러나 기존 CDMA 시스템은 다중 사용자에 의한 간섭의 영향 즉, MAI (multiple access interference)에 대해 적극적인 대책을 고려하지 않고 설계되었다[1]. MAI는 DS-CDMA (direct-sequence CDMA) 시스템의 용량과 성능에 영향을 주는 요소로써 각각의 사용자 사이에 발생하는 간섭 현상이다. 따라서 한 사용자가 발생하는 MAI는 작지만 사용자가 늘어남에 따라 MAI가 더욱 많이 발생하여 잡음 성분이 그만큼 늘어나게 된다. 이 MAI의 증가는 시스템의 용량 한계에도 많은 영향을 주며, 성능 감소의 주된 요인이 된다[2,3]. 또한 원근 (near-far) 문제를 해결하지 못하면 시스템 성능이 더욱 악화된다. 그러므로 이러한 문제점들을 해결하기 위해 MAI를 제거하고 진폭 추정이 필요 없는 다중 사용자 검파 방법이 제시되었다.

처음으로 다중 사용자 검파 방법은 가우시안 잡음 채널 환경에서 최적의 성능을 발휘할 수 있는 방안이 제안되었다[4]. 이것은 단일 사용자 검파에 비해 엄청난 성능 향상을 가지고 왔으나 복잡도 문제로 실제의 시스템을 구현하기가 불가능하여, 그 후 현재까지 [4]의 성능에 근접하려는 연구가 계속되고 있다[5-9].

다중 사용자 검파기는 크게 선형 간섭 제거 검파기와 감산 간섭 제거 검파기의 두 가지로 나눌 수 있다[1]. 역상관 검파기는 선형간섭 제거 알고리즘의 대표적인 것으로 [5]에서 알 수 있듯이, 기존 검파기의 soft 출력에 선형 변환인 역상관 검출, 즉 상관 행렬의 역행렬을 선형 연산자로 사용하여 MAI 성분을 줄이는 것이다. 이 검파기의 특성은 MAI 성분이 완벽하게 제거되어 성능은 크게 향상된다. 그러나 잡음 성분의 증가를 가지고 오고, 역행렬을 구해야 하는 단점을 가지고 있다. 감산 제거 검파기의 영역으로는 연속 간섭 제거 검파기[6-7], 병렬 간섭 제거 검파기[8], 그리고 Zero-forcing decision-feedback (ZF-DF) 검파기[9]가 있다. SIC 검파기는 각 단을 거치면서 가장 파워가 센 성분을 순차적으로 제거함으로써 상대적으로 파워가 약한 사용자의 신호를 재생하는데 유리하고, 구조도 비교적 간단하다. 그러나 이러한 알고리즘의 단점으로는 각 단마다 하나의 사용자 정보를 검출하면서 한 비트의 지연 시간이 발생하여 사용자가 많아지면 그만큼의 지연시간 또한 늘어나게 된다. 따라서 처음에 최대 파워 사용자의 정보 비트를 결정함에 있어서 그 정확성에 따라 그 이후의 다른 사용자 정보 검출을 하는데 정확성에 영향을 미치게 된다. PIC 검파기는 기존 정합필터의 출력 신호로부터 각 사용자의 신호를 재생하는 방법은 SIC 검파기와 동일하나, 이를 각 사용자 모두에 대하여 자신의 신호 성분만을 제외하고 부분 합산기에 의해 간섭 신호를 발생시켜 동시에 모든 처리를 한다는 점에서 차이가 있다. 따라서 추가되는 지연시간이 짧다는 장점을 가지고 있지만, 각 사용자의 초기 검출값에 대한 영향과 각 사용자의 진폭 등의 정보가 필요하고, 하드웨어적으로 SIC 알고리즘에 비해 복잡하다. 마지막으로 ZF-DF 검파기는 역상관 검파기와 SIC 검파기의 중간형태로써, Cholesky decomposition을 적용해서 복잡도를 줄이는 것을 적용했다. 그러나 역상관 검파기와 마찬가지로 역행렬을 구해야 하는 문제와 진폭 추정을 잘해야 하는 부담을 갖고 있다.

본 논문에서는 이러한 다중 사용자 검파 알고리즘들의 장점을 하이브리드 형태로 한 역상관+PIC (D-PIC) 검파기, SIC+PIC (S-PIC) 검파기, ZF-DF+PIC (Z-PIC) 검파기를 구성하는 방법을 제시하였고, 각각의 알고리즘에 대한 계산량의 복잡도 및 지연시간에 대한 비교를 하였으며, Rayleigh 페이딩 환경에서 성능 분석 및 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 비트 오류 확률을 비교하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 수신 신호 모델에 대한 설명을 하였고, Ⅲ장에서는 이러한 하이브리드 형태의 알고리즘에 대한 구조와 성능 비교 및 분석을 하였다. Ⅳ장에서는 컴퓨터 모의 실험에 의한 하이브리드 알고리즘과 다른 알고리즘들과의 비교 결과를 나타내었었고, 마지막으로 Ⅴ장에서는 결론을 맺는다.

Ⅱ. 수신 신호 모델

동기식 (synchronous) 단일 경로 BPSK 채널에서 K의 direct sequence 사용자가 있다고 가정하면 수신 신호 $y(t)$는 아래의 식으로 표현 할 수 있다.

$$y(t)=\sum_{k=1}^{K}|A|_k e^{i\phi_k} s_k(t) b_k + n(t) \tag{1}$$

여기서 A_k, $s_k(t)$, b_k는 k번째 사용자에 대한 신호의 진폭, 확산 부호 (spreading sequence), 정보 비트를 나타낸다. 신호의 진폭은 Rayleigh 페이딩 분포를 갖는다. 그리고 $n(t)$는 평균이 0이고 양쪽 파워 스펙트럴 밀도 (two sided power spectral density = $N_0/2$)인 복소 가산성 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN) 이다. 또한 ϕ_k는 k

www.dbpia.co.kr

번째 사용자에 대한 위상을 나타낸다. 이러한 정보 비트와 확산 부호는 사각 파형이고, 그 값들은 ±1의 확률이 모두 0.5인 독립적이고, 동일한 분포를 갖는다.

식 (1)의 수신신호는 정합필터 뱅크를 거쳐서 역확산 되는데, 아래의 식과 같이 표현된다.

$$y_k = \langle y, s_k \rangle = \frac{1}{T_b}\int_0^{T_b} y(t)s_i^*(t)dt \tag{2}$$

여기서 T_b는 비트 주기를 나타낸다. 또한, 식 (2)를 벡터 형태로 표현하면 아래의 식과 같다[1].

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{RAb} + \boldsymbol{n} \tag{3}$$

K 사용자 시스템에서 벡터 b, n, y는 각각 데이터, 잡음, 정합필터의 출력 신호를 가지고 있는 K 벡터이다. 그리고 행렬 A는 사용자 수신 진폭이 대각행렬로 구성되어 있고, R은 $K \times K$의 상관행렬 이다.

Ⅲ. 하이브리드 다중 사용자 검파 알고리즘

그림1은 하이브리드 형태의 검파기 구조를 나타낸 것이다. 여기서 모든 사용자 수를 K 라 하고, 첫번째 검파기에서 MAI가 제거 되는 사용자 수를 L 이라고 하자. 그리고 PIC 검파기에 의해서 K-L의 사용자 MAI가 제거 된다. 그림 1의 구조에 대한 설명은 다음과 같다. (i) 수신되는 신호를 파워가 센 순서대로 나열 한다. (ii) 첫째 단에서 제거할 MAI 사용자 수를 결정하기 위해서 수신된 신호에 대한 평균 파워를 구한다. (iii) 사용자 파워의 평균보다 큰 파워를 가진 사용자는 첫번째 단으로 보내진다. (iv) 역상관 검파기, SIC 검파기, 그리고 PIC 검파기에서 L 사용자에 대한 MAI를 제거한다. (v) 마지막으로 PIC 검파기로 K-L 사용자에 대한 MAI를 제거한다. 이러한 과정이 모두 끝나면 검파가 완료된다.

각각의 알고리즘에 대한 성능 분석을 위해 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio, SNR)를 라 하고, 평균적인 신호 대 잡음 비 (average SNR)를 라 하자. 또한 $1 \le i \le L$, $L+1 \le j \le K$ 라고 하자.

1. 역상관+ PIC (D-PIC) 검파기

역상관 검파기에 의해 정보 비트를 검파하는 방법으로는 식 (1)에 상관행렬의 역행렬을 곱하는 것으로 아래 식과 같이 쓸 수 있다 [10].

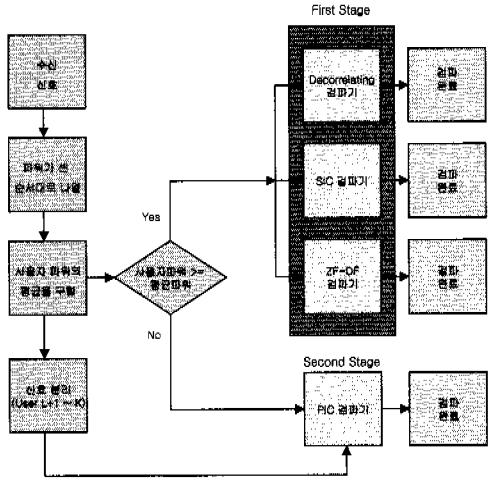


그림 1. 하이브리드 다중 사용자 알고리즘의 순서도

$$\hat{b}_i = \mathrm{sgn}(\mathrm{Re}\{(\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{y})_i \; e^{-j\theta_i}\}) \tag{4}$$

식 (4)에 의해 역상관 검파기를 통과하면, 식 (3)을 아래의 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{Ab} + \boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{n} \tag{5}$$

식 (5)에서 잡음 성분에 대한 분산을 구하면 아래의 식과 같다.

$$E[(\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{n})(\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{n})^T] = E[\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{n}\boldsymbol{n}^T\boldsymbol{R}^{-1}]$$
$$= \sigma^2\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{R}\boldsymbol{R}^{-1} = \sigma^2\boldsymbol{R}^{-1} \tag{6}$$

여기서 T는 행과 열의 변환을 나타낸다. 그러므로 역상관 검파기와 PIC 검파기를 통과한 후의 신호대 잡음 비를 수식으로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$r_b = \frac{|A_i|^2 + |A_j|^2}{\sigma^2 R_{ii}^{-1} + \beta\sum_j |A_j|^2} \tag{7}$$

식 (7)에서 분자에 있는 항은 각각 역상관 검파기와 PIC 검파기를 통과한 후의 원 신호에 대한 분산을 나타내고, 분모에 있는 첫번째 항은 식 (6)인 상관행렬의 역행렬이 첨가된 잡음에 대한 분산이고, 둘째 항은 PIC 검파기에 의해 완전히 제거되지 않은 MAI 성분이다. 여기서 β 는 $0 < \beta < 1$의 값을 나타내고, PIC 검파기의 성능을 나타내는 요소이다.

또한, A_k가 Rayleigh 페이딩 분포를 이루므로 식 (7)에 대한 평균적인 신호 대 잡음비를 나타내면 아래의 식과 같이 쓸 수 있다.

www.dbpia.co.kr

$$\bar{r}_b = \frac{E\left[|A_i|^2\right] + E\left[|A_j|^2\right]}{\sigma^2 R_{ii}^{-1} + \beta \sum_j E\left[|A|_j^2\right]} = \frac{2A_i^2 + 2A_j^2}{\sigma^2 R_{ii}^{-1} + 2\beta \sum_j A_j^2} \tag{8}$$

여기서 $E\left[|A|_k^2\right] = 2A_k$을 나타낸다.

2. SIC+PIC (S-PIC) 검파기

위에서 설명 했듯이 SIC 검파기를 통과하면 MAI 성분은 제거 되지만, 잡음 성분은 그대로 남아 있다. 그러므로 i번째까지 제거된 후의 r_b와 $\overline{r_b}$을 각각 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{b(i+1)} = \frac{|A|_{i-1}^2 + |A|_j^2}{\frac{1}{N}\sum_{k=i+2}^{K} |A|_k^2 + \sigma^2 + \beta \sum_j |A|_j^2} \tag{9}$$

$$\bar{r}_{b(i+1)} = \frac{2A_{i-1}^2 + 2A_j^2}{\frac{2}{N}\sum_{k=i+2}^{K} A_k^2 + \sigma^2 + 2\beta \sum_j A_j^2} \tag{10}$$

식 (9)와 (10)에서 $N = T_b / T_c$이고, T_b는 chip 주기를 나타낸다.

3. ZF-DF+PIC (Z-PIC) 검파기

Cholesky decomposition에 의해서 식 (3)을 하향 삼각행렬 F로 아래의 식과 같이 분해할 수 있다 [10].

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{RAb} + \boldsymbol{n} = \boldsymbol{F}^T \boldsymbol{FAb} + \boldsymbol{n} \tag{11}$$

여기서 T는 행과 열의 변환을 나타내고, 수식의 편의성을 위해 다음과 같이 정의하자.

$$\boldsymbol{F}^{-T} \triangleq \left(\boldsymbol{F}^T\right)^{-1} \tag{12}$$

ZF-DF 검파기의 사용자 정보 비트를 검파하는 방법은 아래의 식과 같이 행렬식으로 쓸 수 있다 [10].

$$\hat{\boldsymbol{b}} = \mathrm{sgn}\left(\boldsymbol{F}^{-T}\boldsymbol{y} - \left(\boldsymbol{F} - diag\{\boldsymbol{F}\}\right)\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{b}}\right) \tag{13}$$

ZF-DF 검파기에 의해 검파된 후의 잡음 잡음 성분에 대한 분산은 아래의 식과 같다.

$$E\left[\boldsymbol{F}^{-T}\boldsymbol{n}\boldsymbol{F}^{-1}\boldsymbol{n}^T\right] = \sigma^2 \boldsymbol{F}^{-T}\boldsymbol{R}\boldsymbol{F}^{-1} = \sigma^2 \boldsymbol{I} \tag{14}$$

여기서 I는 identity 행렬을 나타낸다. 역상관 검파기에서와 마찬가지로, 성능 분석을 위해 r_b와 $\overline{r_b}$을 각각 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_b \geq \frac{|A|_i^2 F_{ii}^2 + |A|_j^2}{\sigma^2 + \beta \sum_j |A|_j^2} \tag{15}$$

$$\bar{r}_b \geq \frac{2A_i^2 F_{ii}^2 + 2A_j^2}{\sigma^2 + 2\beta \sum_j A_j^2} \tag{16}$$

위의 식 (15)와 (16)는 lower bound에 의한 분석이다.

4. Rayleigh 페이딩

신호의 세기가 Rayleigh 페이딩을 갖고, BPSK에 대한 비트 오류 확률은 [11]에 의해 아래의 식과 같이 쓸 수 있다.

$$P_b = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\bar{r}_b}{1+\bar{r}_b}}\right) \tag{17}$$

여기서 $\overline{r_b}$은 식 (8), (10), 그리고 (16)을 나타낸다.

5. 하이브리드 검파기의 성능 비교

본 절에서는 하이브리드 형태의 다중사용자 검파 알고리즘에 대한 계산량에 대한 복잡도와 동작하는데 소요되는 지연시간에 대한 비교를 하였다. 성능 비교를 위해 첫번째 단에서 동작하는 사용자수를 $K/2$라 하고, N개의 비트가 전송된다고 가정하자. 표1과 표2에는 각각 계산량에 대한 복잡도 (computational complexity)와 동작하는데 소요되는 지연시간 (operation delay)을 나타내었다. 그리고 표3은 Pentium-III 650MHz의 컴퓨터에서 MATLAB을 이용하여 $K = 10$이고, $N = 10000$일 때의 모든 수신되는 과정에 대한 시뮬레이션 시간을 나타낸 것이다.

표 1. 계산량에 대한 복잡도

MUD	Computational Complexity
Decorrelating 검파기	NK^3
SIC 검파기	$3(N-1)K$
PIC 검파기	$N(4K-1)$
ZF-DF 검파기	$N\left(\frac{K^3}{6} + K^2 - K\right)$
D-PIC 검파기	$N\left(\frac{K}{2}\right)^3 + N(2K-1)$
S-PIC 검파기	$3(N-1)\frac{K}{2} + N(2K-1)$
Z-PIC 검파기	$N\left(\frac{K^3}{48} + \frac{K^2}{4} + \frac{3}{2}K - 1\right)$

www.dbpia.co.kr

표1에서 알 수 있듯이 SIC 검파기가 계산량에 대한 복잡도가 가장 적음을 알 수 있고,본 논문에서 제시한 3가지 하이브리드 검파기 중에서 S-PIC 검파기가 가장 적은 계산량을 가진다. 표2에서는 PIC 검파기와 D-PIC 검파기가 가장 적은 시스템 지연시간을 가짐을 알 수 있다.

표 2. 시스템 지연시간

MUD	Operation Delay
Decorrelating 검파기	-
SIC 검파기	$(N-1)KT_b$
PIC 검파기	NT_b
ZF-DF 검파기	$\frac{K(K-1)}{2}NT_b$
D-PIC 검파기	NT_b
S-PIC 검파기	$(N-1)\frac{K}{2}T_b + NT_b$
Z-PIC 검파기	$\left(\frac{K^2-2K+8}{8}\right)NT_b$

표. 시뮬레이션에 의한 CPU 시간

MUD	Simulated CPU Time (10 users, 10000 data)
Decorrelating 검파기	13.518 sec
SIC 검파기	12.488 sec
PIC 검파기	12.638 sec
ZF-DF 검파기	13.468 sec
D-PIC 검파기	13.500 sec
S-PIC 검파기	12.949 sec
Z-PIC 검파기	13.499 sec

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

식 (1)의 수신 신호 모델을 기초로 하여 시뮬레이션 환경은 각각의 사용자가 100km/h로 움직이고, 전송 주파수가 1.8GHz인 Rayleigh 페이딩 채널에 의한 것이다.

그림 2 ~ 5에서는 기존 검파 방법과 제안된 다양한 하이브리드 검파기의 에 대한 10명의 사용자의 평균적인 비트 오류 확률을 나타내었다. 비트 오류 확률이 10^{-3}에서 Eb/No가 D-PIC, S-PIC, 그리고 Z-PIC 검파기는 각각 약 8.3dB, 7.2dB, 7.4dB를 나타내었다. 여기서 알 수 있듯이 비교적 적은 사용자

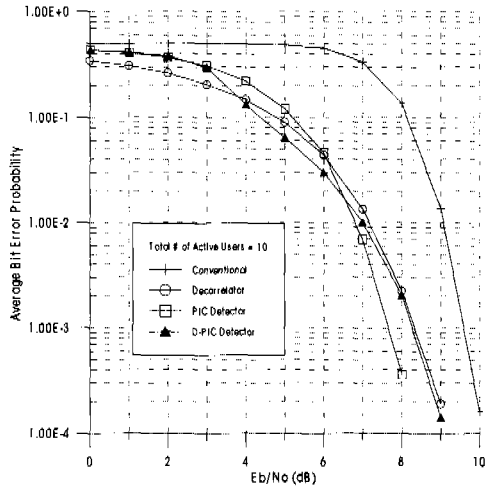


그림 2. D-PIC 검파기의 성능비교

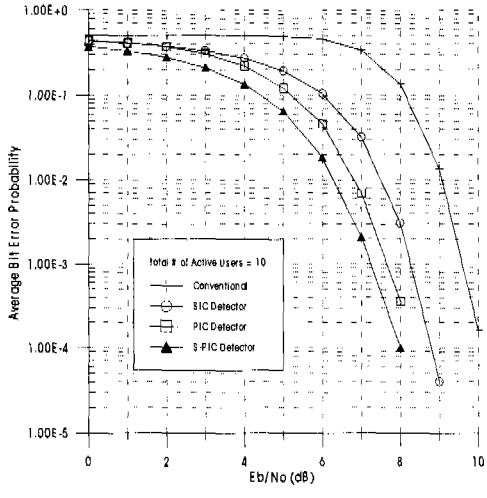


그림 3. S-PIC 검파기의 성능비교

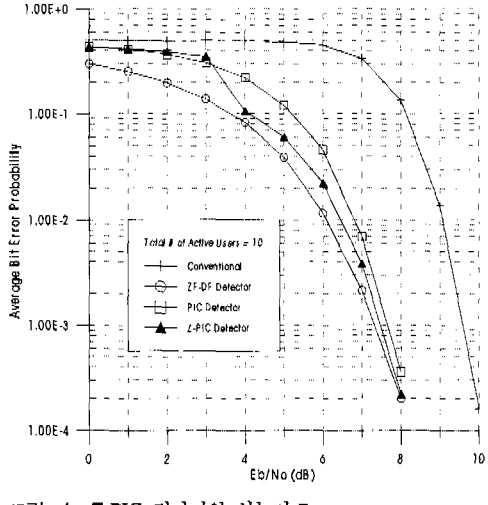


그림 4. Z-PIC 검파기의 성능비교

www.dbpia.co.kr

에 대해서는 S-PIC와 Z-PIC 검파기가 D-PIC 검파기에 비해 성능이 우수함을 알 수 있다.

그림 6에서는 $Eb/No = 10dB$일때 사용자 수에 따른 비트 오류 확률을 나타낸 것인데, 그림 5와는 달리 사용자수가 많아지면, S-PIC 검파기에 비해 D-PIC와 Z-PIC 검파기의 성능이 더 우수함을 알 수 있다.

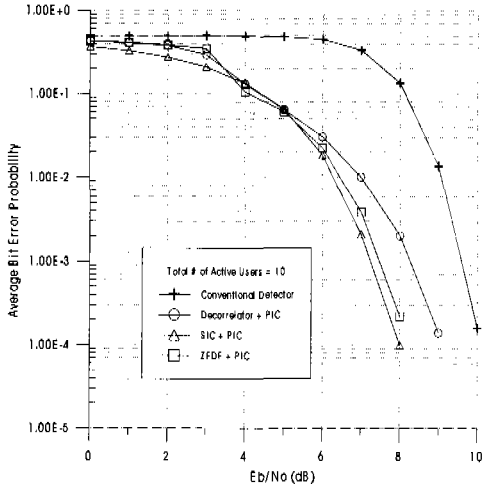


그림 5. D-PIC, S-PIC, Z-PIC 검파기의 성능비교

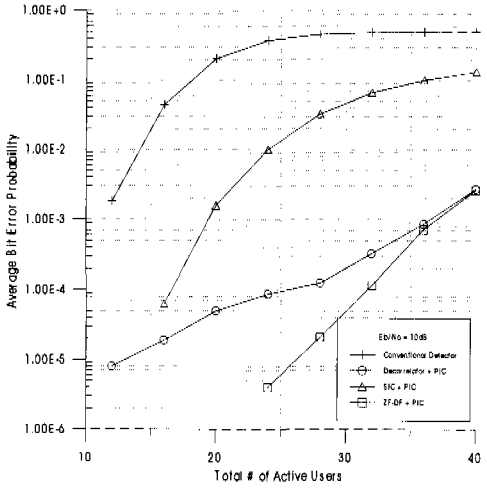


그림 6. 사용자 수에 따른 비트 오류 확률

V. 결 론

본 논문에서는 동기식 Rayleigh 페이딩 채널 환경에서의 다양한 형태의 하이브리드 다중 사용자 알고리즘을 제시하였고, 그에 따른 성능 분석과 알고리즘 간의 성능 비교로 평가를 하였다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 하이브리드 알고리즘은 기존 검파기에 비해 크게 우수함을 알 수 있었고, 적은 사용자에 대해서는 S-PIC 검파기가 성능이 우수하고, 사용자가 늘어 남에 따라 Z-PIC 검파기가 우수한 성능을 보인다. 시스템 측면에서 볼 때, 가입자의 용량, 지연시간, 복잡도 등을 복합적으로 고려하여 trade-off 관계를 시스템에 잘 적용해야 한다. 그러므로 더욱더 늘어나는 이동통신 가입자를 수용하고, 차세대 통신기술인 IMT-2000, Software Defined Radio(SDR)같은 멀티미디어 통신에 적용하는 것이 성능 향상에 많은 도움이 되리라 생각된다.

참 고 문 헌

[1] S. Moshavi, "Multi-user detection for DS-CDMA communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 34, pp. 124-136, Oct. 1996.

[2] K. S. Gilhousen, et. al., "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 40, no. 2, pp. 303-311, May 1991.

[3] R. Lupas and S. Verdu, "Near-Far resistance of multi-user detectors in asynchronous channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 38, no. 4, pp. 496-508, Apr. 1990.

[4] S. Verdu, "Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels," *IEEE Trans. On Information Theory*, vol. IT-32, pp. 85-96, Jan. 1986.

[5] R. Lupas and S. Verdu, "Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple-access channels," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 35, no. 1, Jan. 1989, pp. 123-36.

[6] P. Patel and J. Holtzman, "Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in a DS/CDMA system," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 796-807, Jun. 1994.

[7] Andrew L. C. Hui, and K. B. Letaief, "Successive interference cancellation for multi-user Asynchronous DS/CDMA detectors in multipath fading links," *IEEE Trans. Commun.* vol. 46, no. 3, pp. 384-391, Mar. 1998.

[8] M. K. Varanasi and B. Aazhang, "Multistage detection in asynchronous code-division

www.dbpia.co.kr

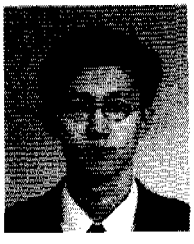
multiple-access communications," *IEEE Trans. Commun.* vol. 38, no. 4, pp. 509-519, Apr. 1990.

[9] A. Dual-Hallen, "A family of multiuser decision-feedback detectors for asynchronous code-division multiple access channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 421-434, Feb./Mar./Apr. 1995.

[10] Sergio Verdu, *Multiuser Detection*, Cambridge, 1998.

[11] John G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 3rd Edition.

강 환 민(Hwan Min Kang) 정회원



1997년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1999년 2월 : 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
1999년 3월~현재 : 한양대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중

<주관심 분야> 디지털 통신, 이동통신 시스템, Software Defined Radio

Email : hmkang@casp.hanyang.ac.kr

조 성 호(Sung Ho Cho) 정회원

1982년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1984년 12월 : University of Iowa 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업(공학석사)
1989년 8월~University of Utah 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업(공학박사)
1992년 9월~1997년 8월 : 한양대학교 전자 컴퓨터 공학부 조교수
1997년 9월~현재 : 한양대학교 정보통신대학원 부교수

<주관심 분야> 신호처리, 적응필터, 디지털통신, 무선통신, 정보통신시스템

Email : shcho@casp.hanyang.ac.kr

www.dbpia.co.kr