

비동기 복조 DS/CDMA 역방향 링크에서 채널 추정 및 다중 사용자 검파를 이용한 성능 개선

Performance Improvement for Noncoherent DS/CDMA Reverse Links using Channel Estimation and Multiuser Detection

홍대기 · 윤석현 · 홍대식 · 강창언

Dae Ki Hong · Suk Hyon Yoon · Dae Sik Hong · Chang Eon Kang

요 약

본 논문에서는 M-ary 직교 변조를 사용하는 직접 확산 코드 분할 다중 접속 (DS/CDMA : Direct Sequence/Code Division Multiple Access) 시스템을 위한 최대 근사 (Maximum Likelihood : ML) 결정 제한 채널 추정 (Decision Feedback Channel Estimation : DFCE) 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 결정 제한 정보로서 RAKE 수신기의 최대 결합 출력을 사용한다. 제안된 시스템으로부터 추정된 채널 값을 이용하면 파일럿의 삽입 없이 RAKE 수신기에서 동기 검파 (coherent demodulation)를 할 수 있고, 동시에 최대 비 결합 (Maximum Ratio Combining : MRC) 기법을 사용할 수 있다. 그러나 제안된 DFCE는 다중 사용자 환경에서 다중 사용자 간섭 (Multiple Access Interference : MAI)으로 인해 심각한 성능의 저하가 발생한다. 이런 문제를 해결하기 위해 다 단 병렬 간섭 제거기 (Multistage Parallel Interference Cancellation : PIC)를 제안된 시스템과 결합해 본다. 제안된 DFCE에서 추정된 정확한 채널 값은 동기식 검파뿐 아니라 PIC에서 다중 사용자 간섭 신호의 재생성 (regeneration)을 위해서도 쓰인다. 이럴 경우 PIC와 DFCE간에 서로 도움을 주는 이중 효과를 얻게 된다. 실험 결과에 의하면 제안된 시스템은 기존의 비동기 검파 (noncoherent demodulation) 방식에 비해 다단 PIC를 쓰지 않은 동기 검파의 경우 $1E-02$ 의 E_b/N_0 에서 수용 가능한 사용자 수가 5명에서 약 10명으로 2배 증가함을 확인할 수 있었으며, 다단 PIC를 사용한 동기 검파의 경우 약 30명으로 6배 정도가 증가함을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, we propose maximum likelihood (ML) decision feedback channel estimation (DFCE) for M-ary orthogonal modulation in direct sequence/code division multiple access (DS/CDMA) systems. The proposed DFCE uses the maximum combiner output in a RAKE receiver as decision feedback information, enabling M-ary orthogonal signals to be demodulated coherently and a RAKE receiver to use a maximal ratio combining (MRC) scheme. However, the performance of the proposed DFCE in the multiuser environment is severely degraded due to multiple access interference (MAI). To overcome this problem, a multistage parallel interference cancellation (PIC) scheme is combined with the proposed DFCE for multiuser environments. Accurate knowledge of the channel coefficient estimated by the proposed DFCE is used to regenerate the signal of each user for the multistage PIC scheme. According to the results of our simulations, the performance of coherent demodulation using the proposed system is significantly improved in comparison with conventional noncoherent demodulation.

「본 논문은 산업자원부 및 교육부의 두뇌 한국 21사업 핵심 분야 지원에 의하여 수행되었습니다」
연세대학교 공과대학 전기전자공학과(Dept. of Electrical and Computer Engineering, Yonsei University)
· 논문 번호 : 20010327-038
· 수정완료일자 : 2001년 5월 15일

I. 서 론

직접 수열/코드 분할 다중 접속 (Direct Sequence / Code Division Multiple Access : DS/CDMA) 기술에 기반하는 셀룰러 시스템은 현재 상업적인 무선 통신을 위해 사용되고 있으며, Qualcomm에서 제안한 IS (Interim Standard)-95는 DS/CDMA 시스템의 좋은 예이다^[1]. DS/CDMA 시스템은 다중 경로 페이딩 (multipath fading)에 강한 특성 및 주파수 재사용 (frequency reuse) 기법, 그리고 소프트 핸드오프 (soft handoff)의 가능으로 인해 사용자 용량을 증가시킬 수 있다는 장점을 갖고 있다^[2].

IS-95 시스템은 역 방향 링크에서의 변조 방식으로서 64진 왈쉬 직교 변조 (Walsh orthogonal modulation)를 사용하며, 수신기에서는 비동기 복조 (non-coherent demodulation)를 하게 된다^[1]. 이러한 방식은 수신기에서 요구되는 비트 당 요구되는 에너지를 최소화하기 위해 제안되었다^[3]. 64진 비동기 직교 변조를 사용하는 DS/CDMA 시스템의 다 경로 페이딩 채널에서의 성능은 참고 문헌^{[4],[5]}에서 분석된 바 있다. 그러나 M진 직교 변조를 사용하는 DS/CDMA 시스템이 비동기로 복조될 경우의 성능은 동기 복조 (coherent demodulation)되는 경우에 비해 현저히 떨어진다. 더군다나, 수신 신호의 크기 정보를 사용하지 못하는 비동기 복조기의 경우에는 RAKE 수신기에서 최적의 결합 (combining)방식인 최대 비 결합 (Maximal Ratio Combining : MRC) 방식 대신에 준 최적의 결합 방식인 동일 이득 결합 (Equal Gain Combining : EGC) 방식을 사용하므로 성능의 저하가 발생한다^{[5],[6]}. 이러한 문제점을 해결하기 위해 여러 가지의 동기 복조 방식이 제안되었다^{[7]~[12]}.

동기 복조 방식은 크게 다음의 둘 중 한가지 방식으로 구현된다. 첫 번째 방식은 이미 데이터를 알고 있는 파일럿 채널 (pilot channel) 혹은 파일럿 심벌 (pilot symbol)을 다중화 (multiplexing) 시켜 이것으로부터 채널 정보를 알아내는 방식이다. 참고 문헌 [7]과 [8]에서는 DS/CDMA에서 파일럿 채널 혹은 파일럿 심벌을 이용하는 이진 위상 변조 (Binary Phase Shift Keying : BPSK)의 성능을 레일리 (Ray-

leigh) 페이딩 채널에서 분석하였다. 또한 성능 개선을 위하여 파일럿 채널의 간섭을 제거하는 방식이 연구되기도 하였다^[9]. 두 번째 방식은 파일럿 없이 결정/비결정 궤환 루프를 이용하여 변조된 신호로부터 직접 채널 값을 얻는 방법이다^[10]. 참고문헌 [11]에서는 BPSK, 직교 위상 변조 (Quadrature PSK : QPSK), 그리고 16 직교 진폭 변조 (Quadrature Amplitude Modulation : QAM)에서 결정 궤환 채널 추정 방식을 연구하였다. 또한 M진 직교 변조에서 결정 궤환 채널 추정 방식은 참고 문헌[12]~[14]에서 연구되었다.

DS/CDMA 시스템에서는 여러 사용자의 송신 신호가 동일한 주파수 대역을 통과하므로 사용자간에 다중 사용자 간섭 (Multiple Access Interference : MAI)이 발생하게 된다. 이러한 MAI는 채널 추정 및 동기 검파의 성능에 악영향을 주게 된다. MAI에 대처하기 위한 가장 유용한 방법 중 하나가 간섭 제거 (Interference Cancellation : IC)이다. 간섭 제거기는 직렬^[15], 병렬^[16], 혼성, 혹은 파이프라인화된 방식^[17]으로 구현된다. 이중에 병렬 방식은 다단으로 구성되었을 때 비교적 적은 복호 지연을 가지면서 페이딩 채널에서 좋은 성능을 보인다. 병렬 간섭 제거기에서는 채널 추정 값이 필요하며¹⁾, 채널 추정 값의 정확도는 성능에 중요한 영향을 미치게 된다^[18].

본 논문에서는 M-ary 직교 변조를 사용하는 DS/CDMA에서 ML (Maximum Likelihood) DFCE를 제안한다. 제안된 시스템은 결정 궤환 정보로서 RAKE 수신기의 최대 결합 출력을 사용한다. 제안된 시스템으로부터 추정된 채널 값을 이용하면 파일럿의 삽입 없이 RAKE 수신기에서 동기 수신을 할 수 있고, 동시에 MRC를 사용할 수 있다. 그러나 제안된 DFCE는 다중 사용자 환경에서 MAI로 인해 심각한 성능의 저하가 발생한다. 이런 문제를 해결하기 위해 다단 PIC를 제안된 시스템과 결합해 본다. 제안된 DFCE에서 추정된 정확한 채널 값은 동기식 수신뿐 아니라 PIC에서 다중 사용자 간섭 신호를 재 생성하는데도 쓰인다. 이럴 경우 PIC와 DFCE간에 서로 도움을 주는 이중 효과를 얻을 수 있음을 예상할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 채널

1) 즉 기존의 IS-95 역 방향 링크에서는 비동기 검파를 하므로 IC를 이용할 수 없다.

널 및 수신 신호 모델을 개관하고, 3장에서는 제안된 DFCE 및 동기 복조 방식을 설명한다. 4장에서는 PIC를 결합한 DFCE에 대해 설명하고, 5장에서는 실험 결과를 제시하며, 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. 채널 및 수신 신호 모델

M-ary 직교 변조를 사용하는 DS/CDMA 시스템에서 전송하고자 하는 데이터는 먼저 M-ary 직교 변조가 이루어진다^{[4],[5]}. 그리고 I-, Q-채널에 대해 주어지는 랜덤 코드에 $a_k(t)^I$ 와 $a_k(t)^Q$ 에 의해 확산된다. 확산된 신호는 전송을 위해 반송파 주파수 ω 로 변조된다. 변조 방식은 IS-95와의 비교를 위해 QPSK를 사용하였다. 결국 k 번째 사용자의 송신 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$s(t) = \text{Re}\{\sqrt{P_k} \Psi_{k,m}(t) e^{-j\omega t}\}, \quad (1)$$

여기에서 굵은 기호는 복소수를 의미하며 (즉 $\Psi_{k,m}(t) = \Psi_{k,m}(t)^I + j \Psi_{k,m}(t)^Q$), $\Psi_{k,m}(t)^X$ 는 $z a_k(t)^X W_m(t)$ 이다. P 는 심벌 당 전송 전력이며, $W^m(t)$ 는 전송된 심벌을 나타내는 m 번째 Walsh 직교 함수이다.

채널 변수들이 적어도 한 심벌 구간 동안 일정할 정도로 느리게 변한다고 가정하면 k 번째 사용자에게 나타나는 채널 임펄스 응답의 복소 기저 대역 표현은 다음과 같이 나타난다^[10].

$$h(t) = \sum_{l=1}^L a_k^l e^{-j\theta_k^l} \delta(t - \tau_k^l) \quad (2)$$

여기에서 a_k^l , θ_k^l , τ_k^l 은 각각 k 번째 사용자에 대한 l 번째 다중 경로 성분의 크기 (amplitude), 위상 (phase), 지연 (delay)을 나타낸다. L 은 분해 가능한 다중 경로 성분의 총 수이다. 그러므로 수신기의 입력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sqrt{P_k} a_k^l \Psi(t - \tau_k^l) e^{j\theta_k^l} + \frac{1}{2} n(t) \quad (3)$$

여기에서 $n(t)$ 는 평균은 0, 양 대역 전력 밀도

(two-sided power spectral density)는 $N_0/2$ 인 가산성 백색 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise : AWGN)이다.

III. 비동기 검파기의 성능 개선을 위해 제안된 DFCE 및 동기 RAKE 수신기

그림 1에서는 i 번째 사용자를 위한 제안된 DFCE 및 동기 RAKE 수신기의 구조를 보여주고 있다. 본 논문에서는 완벽한 랜덤 코드의 동기 추적이 가능하다고 가정한다.

3-1 제안된 DFCE의 설계 과정

수신 신호에 i 번째 사용자에게 주어진 I-, Q-채널의 랜덤 코드를 곱하고, n ($1, 2, \dots, M$) 번째 Walsh 함수들을 상관시킴으로서 다음과 같이 i 번째 사용자 RAKE 수신기에서 j 번째 가지의 로그 근사 함수 (Log Likelihood Function : LLF)들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} A_n(a_i^j, \theta_i^j) &= \lambda_n(a_i^j, \theta_i^j)^I + j \lambda_n(a_i^j, \theta_i^j)^Q \\ &= \frac{1}{\sqrt{E_i T_b}} \int_{\tau_i}^{T_b + \tau_i} r(t) \Psi_{i,n}(t - \tau_i)^* dt \\ &= \begin{cases} a_i^j e^{j\theta_i^j} + ICI_{est} + MAI_{est} + N_{est} & n = m \\ ICI_{est} + MAI_{est} + N_{est} & n \neq m \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 *는 복소 공액을 의미하며, E_b 는 비트 에너지, T_b 는 비트 구간이다. 복소 신호 ICI_{est} , MAI_{est} 그리고 N_{est} 는 채널 추정 과정에서 채널 추정의 정확도를 저해하게 되는 간섭 성분으로서, 각각 칩간 간섭 (InterChip Interference : ICI), MAI, 그리고 AWGN이다. 위 식에서 LLF를 최대화 하도록 하는 Walsh 함수의 인덱스 m 은 제환 루프를 통하여 제환되는 RAKE 수신기의 최대 결합 출력 \hat{m} 에 의존한다. 그러므로 ICI와 MAI를 가우시안 잡음으로 근사할 경우 아래와 같은 순시 채널 추정기를 구현할 수 있다.²⁾

2) 이 근사는 항상 유효한 것은 아니지만 사용자 수가 많을 경우 중심 극한 정리에 의해 근사가 가능해진다.

$$\hat{a}_i^j(t) e^{j\theta_i^j} = A_m(\alpha_i^j, \theta_i^j) = \sqrt{[\lambda_m(\alpha_i^j, \theta_i^j)^I]^2 + [\lambda_m(\alpha_i^j, \theta_i^j)^Q]^2} \cdot \exp\left[j \tan^{-1}\left(\frac{\lambda_m(\alpha_i^j, \theta_i^j)^I}{\lambda_m(\alpha_i^j, \theta_i^j)^Q}\right)\right] \quad (5)$$

느리게 변하는 채널에서, 현재 채널 값은 이전 채널 값들과 서로 상관되어 있다^[10]. 그러므로 채널의 변화를 추적하기 위해서, 아래와 같은 저역 통과 필터를 이용할 수 있다.

$$\hat{c}_i^j(t) = \hat{c}_i^j(t)^I + \hat{c}_i^j(t)^Q = \beta \hat{c}_i^j(t) + (1 - \beta) A_m(\alpha_i^j, \theta_i^j) \quad (6)$$

여기서 $\hat{c}_i^j(t)$ 는 현재 추정된 채널 값이며, β 는 망각 인자이다. 망각 인자는 도플러 주파수에 따라 적절히 선택되어야 한다. 이는 5장의 실험 결과를 통하여 입증될 것이다. 실제로 채널을 추적하는 방법은 성능이 좋은 여러 가지 다른 알고리즘을 이용할 수도 있지만 이 논문의 논의 외이므로 간단한 1차 저역 통과 필터를 이용하였다.

3-2 DFCE로부터 추정된 채널 값을 이용하는 동기 RAKE 수신기

DFCE로부터 추정된 채널 값을 이용하면, 그림 1에서와 같이 수신 신호의 반송파를 복원할 수 있게 된다.

$$d_i^j(t) = r(t) \hat{c}_i^j(t)^* \quad (7)$$

반송파 복원된 신호에 i 번째 사용자에게 주어진 I-, Q-채널의 랜덤 코드를 곱하고, n (1, 2, ..., M)

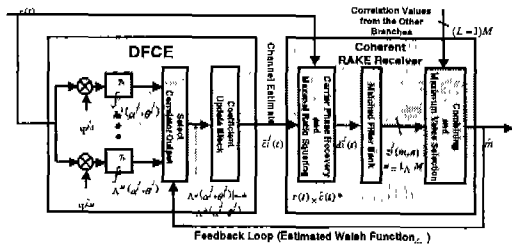


그림 1. 제안된 DFCE 및 i 번째 사용자를 위한 동기 RAKE 수신기의 j 번째 가지의 구조

번째 왈쉬 함수들을 상관시킴으로써 i 번째 사용자 RAKE 수신기의 번째 가지의 결정 변수를 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$z_i^j(m, n) = \frac{1}{\sqrt{T_b}} \int_{\tau_i}^{\tau_b + \tau_i} d_i^j(t) \Psi_{i,n}(t - \tau_i)^* dt = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha_i^j)^2 e^{jn/4} \sqrt{E_i} + ICI_{coh} \\ + MAI_{coh} + N_{coh} & n = m \\ ICI_{coh} + MAI_{coh} + N_{coh} & n \neq m \end{cases} \quad (8)$$

복소 신호 ICI_{est} , MAI_{est} , 그리고 N_{est} 는 동기 검파 과정에서 결정 변수의 정확도를 저해하게 되는 간섭 성분으로서, 각각 칩간 간섭 (InterChip Interference : ICI), MAI, 그리고 AWGN이다. 이런 결정 변수들은 최종적으로 RAKE 수신기 내에 결합기로 입력되고 최대 비로 결합되며 이렇게 결합된 결정 변수들 중에 최대 값을 아래와 같이 선택함으로써 왈쉬 인덱스 \hat{m} 을 얻게 된다.

$$\hat{m} = \arg \max_n [z_i^j(m, n)] = \arg \max_n \left[\sum_{l=1}^L (z_i^j(m, n)^I + z_i^j(m, n)^Q) \right] \quad (9)$$

이렇게 추정된 왈쉬 인덱스 \hat{m} 은 다음의 채널 추정을 위해 궤환 루프를 통하여 DFCE로 궤환 된다. 그러나 제안된 DFCE도 다중 사용자 환경에서는 식 (4) 및 식 (9)에서 보는 바와 같이 간섭 성분의 증가로 인해 그 성능이 저하됨을 예상할 수 있다. 이 이유는 다음과 같은 정 궤환의 문제 때문이라고 유추해 볼 수 있다. 동기 RAKE 수신기에서 간섭의 증가로 인하여 발생하는 결정 값의 오류는 다시 DFCE로 궤환 되고, 이로 인해 다음 심벌의 결정을 위한 채널 추정 값의 정확도를 저해하게 되며, 결국 부정확한 채널 값은 다음 심벌 값의 결정에 큰 오류를 발생시키게 된다. 사용자가 증가할수록 이러한 문제는 더욱 심각해진다.

IV. 다중 사용자 환경에서 간섭 문제의 해결을 위해 결합된 다단 PIC와 DFCE

3장 2절에서 언급한 정 궤환의 문제는 제안된

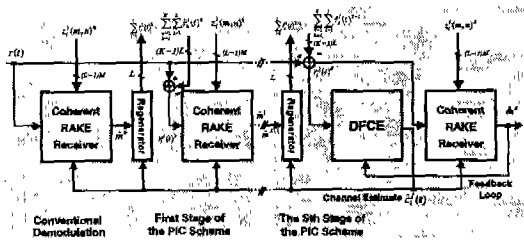


그림 2. 제안된 DFCE와 PIC가 결합된 구조

DFCE와 다단 PIC와 같은 다중 사용자 검파기를 결합하여 피할 수 있다. 두 가지 구조가 결합된 시스템에서는 다음과 같은 시너지 효과를 얻을 수 있다. 즉 DFCE는 다단 PIC에 의해 간섭이 제거된 신호로부터 채널 추정을 하게 되어 정확한 채널 추정 값을 얻을 수 있고, 또한 이렇게 얻은 채널 값은 다단 PIC가 정확하게 MAI를 재 생성하여 간섭 제거를 수행하는데 도움을 주게 된다. 최종적으로 간섭 제거된 신호가 DFCE로 입력되게 되므로 DFCE는 더욱 정확한 채널 값을 추정할 수 있게 된다. 위와 같은 사고의 유효성은 다단 PIC가 채널 추정 값의 정확도에 민감하다는 사실^[18]로부터 더욱 자명하다.

그림 2는 DFCE와 다단 PIC가 결합된 구조를 보여주고 있다. 그림 2에서 보는 것처럼 다단 PIC와 DFCE가 결합된 구조는 크게 기존 검파 블록 (conventional demodulation block)과 간섭 제거 블록 (Interference Cancellation block : IC block)으로 나누어 볼 수 있다. 수신된 복소 신호 $r(t)$ 와 DFCE로부터 추정된 채널 값 $\hat{c}_i^j(t)$ 는 먼저 기존의 검파 블록으로 입력된다. 여기서 채널 값은 다단 PIC의 최종 단의 출력 $\hat{r}_i^j(t)^S$ 로부터 추정된다는 사실에 유의하여야 한다. 이는 다중 사용자 환경에서 간섭이 충분히 제거된 신호로부터 채널 값을 추정하는 것이 더욱 정확할 것이라는 개념을 두고 있다. 만일 기존 검파 블록의 출력으로부터 채널 값을 추정할 경우에는 성능 개선을 얻기가 힘들 것이며 이는 5장의 실험 결과를 통해 입증될 것이다. 기존 검파 블록의 출력은 결정된 Walsh 코드의 인덱스이다. 재 생성기에서는 결정된 Walsh 코드의 인덱스 및 채널 값을 입력으로 받아 재 생성 신호를 발생시키고 이것을 수신 신호로부터 제거하면 다음과 같은 간

섭이 제거된 신호를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{r}_i^j(t)^1 &= r(t) - \sum_{k \neq i} \sum_{l=1}^L \hat{r}_i^k(t)^0 \\ &= \psi_{i, m^s}(t - \tau_i^j) \hat{c}_i^j(t). \end{aligned} \quad (10)$$

위와 같은 간섭 제거 과정은 더욱 정확한 Walsh 인덱스를 얻고 DFCE에 더 신뢰성 있는 수신 신호를 공급하기 위해 다단으로 반복될 수도 있다. 최종적으로 마지막 단계에서는 간섭 제거된 신호가 DFCE의 입력으로 들어가게 되므로 DFCE는 다단 PIC가 없는 경우보다 더욱 정확한 채널 추정을 할 수 있게 된다.

V. 실험 및 결과 분석

본 장에서는 M-ary 직교 변조를 사용하는 DS/CDMA 시스템에서 제안된 DFCE의 성능과 DFCE로부터 추정된 채널 계수를 이용하는 동기 검파의 성능 그리고 MAI 문제를 제거하기 위해 다단 PIC가 DFCE에 적용되었을 때의 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통하여 살펴보고자 한다. 실험 환경은 IS-95와 동일하게 RAKE 수신기의 가지 수 N 은 3개, 데이터율 R_b 는 28,000 bps (bit per second)로 하였으며, 직교 변조를 위한 Walsh 코드의 차원은 64로 하였다.

5-1 DFCE와 동기 검파기의 성능 및 비동기 검파기와의 성능 비교

그림 3에서는 시간 경과에 따른 레일리 페이딩 채널의 실제 값과 제안된 DFCE로 추정된 값을 서로 비교하고 있다. 이 그림에서 f_d 는 도플러 주파수이고, $f_d/R_b (= f_d T_b)$ 는 데이터율 R_b 로 정규화된 도플러 주파수이며, 느리게 변하는 굵은 실선이 실제 채널 값의 변화이고 빠르게 변하는 얇은 실선이 추정된 채널 값의 변화이다. 사용자가 한 명일 경우와 사용자가 30명일 경우 모두 추정된 채널 값은 대체로 실제 채널 값을 잘 따라가고 있다. 그러나 그림 3 (b)에서 보는 것처럼 사용자가 30명일 경우에는 전술했던 MAI의 정 제환 효과 때문에 채널 추정의 정확도가 떨어지므로 다중 사용자 검파 기법이 요구된다고 할 수 있다.

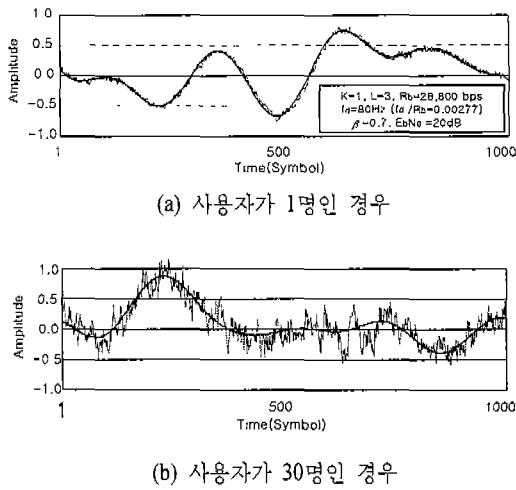


그림 3. 시간 경과에 따른 레일리 페이딩 채널의 실제 값과 제안된 DFCE로 추정된 값의 비교

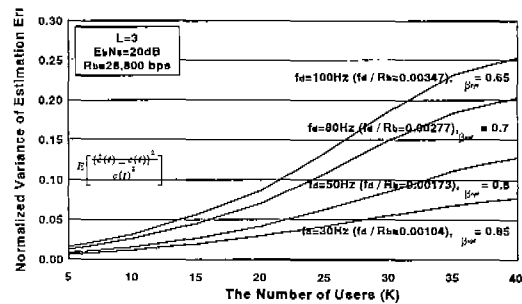
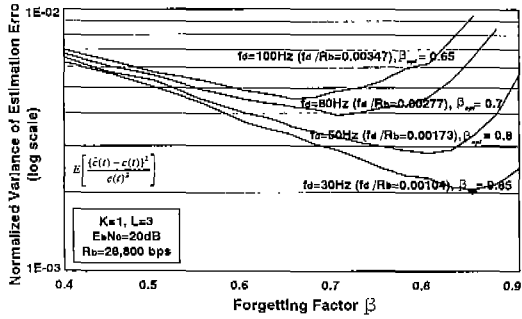


그림 4. DFCE의 정규화된 채널 추정 오류의 변화

망각 인자 β 에 따른 정규화된 채널 추정 오류 ($E[(\hat{c}(t) - c(t))^2 / c(t)^2]$)는 그림 4(a)에 나타나 있

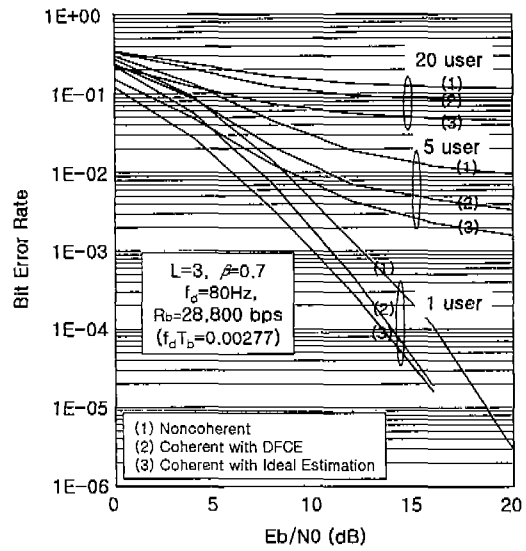


그림 5. 다중 경로 페이딩 환경에서 사용자가 1명, 5명, 20명일 때 DFCE를 사용하는 동기 검파기의 성능

다. 그림에서 도플러 주파수가 증가함에 따라 최적의 망각 인자의 값이 감소함을 알 수 있으며, 이는 도플러 주파수가 빠를수록 채널 값의 추정 속도를 빠르게 하기 위해 최근의 추정 값에 많은 신뢰도를 주어야 하기 때문이다. 그러나 이렇게 될 경우 3장 1절에서 언급한 바와 같이 저역 통과 필터의 대역폭이 증가하기 때문에 일정 값 이하가 되면 오히려 성능이 저하되게 된다. 최적의 망각 인자의 값에서 사용자의 증가에 따른 정규화된 채널 추정 오류의 변화는 그림 4 (b)에 나타나 있으며, 이로서 간섭 성분의 증가가 DFCE의 성능 저하의 주요요인을 쉽게 예상할 수 있다.

그림 5에서는 다중 경로 페이딩 환경에서 사용자가 1명, 5명, 20명일 때 DFCE를 사용하는 동기 검파기의 비트 오류 (Bit Error Rate : BER)성능을 보여주고 있다. E_b/N_0 가 높을 때 동기 검파기는 비동기 검파기에 비해 성능의 개선이 있음을 알 수 있다. 또한 사용자가 한 명밖에 없는 환경에서는 간섭 성분이 존재하지 않으므로 E_b/N_0 가 매우 높으면 이상적인 채널 추정 값을 사용하는 경우에 거의 근접함을 알 수 있다. 그러나 E_b/N_0 가 작을 때는 동기 검파기의 성능이 비동기 검파기의 성능에 근접

할 정도로 저하되는 것을 알 수 있다. 이는 E_b/N_0 가 작아질수록 제한 되는 왈쉬 인덱스의 정확도가 낮아지기 때문이다.

본 절의 일련의 실험 결과에서 보여주듯 제안된 DFCE는 페이딩 채널의 변화를 충분히 쫓아갈 수 있었고 이를 이용한 동기 검파기의 성능은 비동기 검파기의 성능에 비해 월등함을 알 수 있었다. 그러나 사용자가 많아져 MAI 성분이 증가하면 채널 추정 정확도가 떨어지고, 이에 따라 동기 검파기 성능의 열화를 겪게 된다. 그러나 여전히 제안된 시스템이 기존의 비동기 검파기보다는 성능의 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

5-2 다단 PIC와 결합된 DFCE의 성능

본 절에서는 MAI에 의한 정제환의 문제를 해결하기 위해 다단 PIC를 제안된 DFCE에 적용한 경우의 성능을 알아본다. 그림 6은 사용자가 30명인 환경에서 3단의 PIC를 사용한 경우에 추정된 채널 값의 변화를 보여주고 있다. 그림 3 (b)에서는 추정된 값이 실제 값을 잘 따라 가지 못하였지만 다단 PIC를 사용한 경우에는 실제 값을 잘 따라감을 보여주고 있으며, 이는 다단 PIC의 간섭 제거 단수가 증가할수록

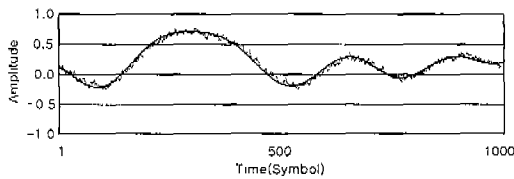


그림 6. 사용자가 30명인 환경에서 3단의 PIC를 쓴 경우에 추정된 채널 값의 변화

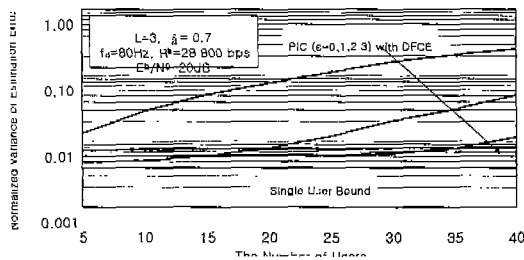


그림 7. 다단 PIC를 사용하였을 때 사용자 수에 따른 정규화된 채널 추정 오류

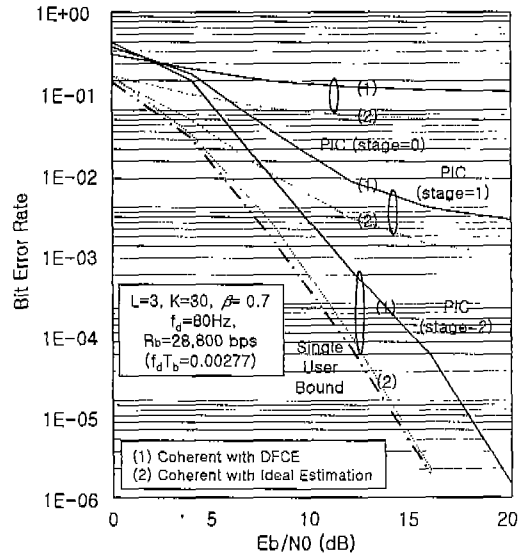


그림 8. 다단 PIC를 사용할 때 동기 검파기의 비트 오류 성능

채널 추정의 정확도가 개선되고 있기 때문이다.

그림 7은 다단 PIC를 사용하였을 때 사용자 수에 따른 정규화된 채널 추정 오류를 보여주고 있다. 이 그림에서 다단 PIC는 DFCE의 성능 열화 요인인 MAI를 효과적으로 제거하고 있음을 알 수 있다. 그러나 단수가 계속 증가함에 따라 오히려 채널 추정의 정확도가 떨어지는 부분이 발생한다. 이는 간섭 제거기가 다단으로 동작함에 따라 DFCE가 바이어스화 되기 때문이다.

다단 PIC에 의한 BER에 있어서의 동기 검파기의 성능 개선이 그림 8에 나타나 있다. 단수가 증가함에 따라 성능은 점점 단일 사용자의 성능에 근접하며 특히 2단 정도에서 BER의 성능 개선 폭이 최대임을 알 수 있다. 그러나 완벽히 단일 사용자의 성능에 접근하지는 못하며, 이는 PIC가 준 최적 다중 사용자 검파기이기 때문이다.

그림 9는 사용자 수에 따라 제안된 시스템의 BER 성능을 보여주고 있다. 다단 PIC를 쓰지 않는 동기 검파기의 성능은 비동기 검파에 비해 우수하지만 사용자 수가 증가함에 따라 성능 이득이 줄어들게 되며, 이는 앞서 언급한 간섭 성분의 증가 때문이다. 이러한 문제는 다단 PIC에 의해 해결될 수 있음을 그래프에서 보여주고 있다. 별표가 표시되어

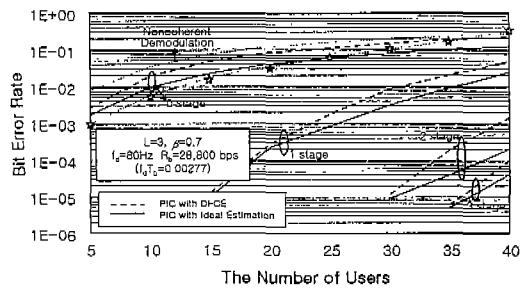


그림 9. 다단 PIC를 쓸 때 사용자 수에 따른 동기 검파기와 비동기 검파기의 비트 오류 성능

있는 그래프는 3단의 PIC를 쓰되 채널 값을 기존의 검파 블록에서 직접 추정했을 경우를 나타낸다. 이런 경우 성능 개선의 정도가 미약함을 알 수 있다. 이러한 결과는 4장에서 전술한 바와 같이, 채널 추정은 항상 마지막 단의 출력, 즉 충분히 간섭이 제거된 수신 신호로부터 채널 값을 추정하여야만 성능의 이득을 얻을 수 있다는 것을 보여주고 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 M-ary 직교 변조를 사용하는 DS/CDMA에서 ML DFCE를 제안하였다. 제안된 시스템은 결정 궤환 정보로서 RAKE 수신기의 최대 결합 출력을 사용하였다. 실험 결과에 의하면 제안된 시스템은 기존의 비동기 검파 방식에 비해 다단 PIC를 쓰지 않았을 경우 1E-02의 Eb/N0에서 수용 가능한 사용자 수가 5명에서 약 10명으로 2배 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 사용자 용량의 증가는 제안된 DFCE부터 추정된 채널 값을 이용하여 동기 검파를 할 수 있기 때문이다. 그러나 제안된 DFCE는 사용자 수가 증가할수록 간섭 성분이 증가하여 비동기 검파의 성능에 근접할 정도로 성능이 떨어지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 다단 PIC를 제안된 DFCE와 결합하여 시너지 효과를 얻을 수 있었다. 실험 결과에 의하면 다단 PIC를 사용할 경우 비동기 검파 방식에 비해 1E-02의 Eb/N0에서 수용 가능한 사용자 수가 약 30명으로 6배 정도가 증가함을 확인할 수 있었다. 다단 PIC를 사용할 수 간섭 제거 단수가 증가함에 따라 결합된 구조의 성능은 개선되었지만 단일 사용

자의 성능에 접근하지는 못하였다. 이는 다단 PIC가 부 최적적인 다중 사용자 검파기이기 때문이다.

참 고 문 헌

- [1] R. Padovani, "Reverse link performance of IS-95 based cellular systems," *IEEE Personal Commun.*, vol. 1, no. 3, pp.28-34, 1994.
- [2] K. Gilhousen, I. Jacobs, R. Padovani, A. Viterbi, L. Weaver and C. Wheatley III, "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 40, no. 2, pp. 303-311, May 1991.
- [3] A. J. Viterbi, "Very low rate convolutional code for maximum theoretical performance of spread spectrum multiple access channels", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 40, no. 8, pp.641-649, May 1990.
- [4] K. Kim, "On the error probability of a DS/SSMA system with a noncoherent m-ary orthogonal modulation", in *Proc. IEEE VTC92*, pp. 482-485, 1992.
- [5] L. Jalloul and J. Holtzman, "Performance analysis of DS/CDMA system with noncoherent M-ary orthogonal modulation in multipath fading channels", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, no. 5, pp.862-870, June 1994.
- [6] A. Feltstrom and K. Zigangirov, "On coherent reception of uplink transmitted signals in the DS/CDMA system", *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 45, no. 7, pp.2655-2661, Nov. 1999.
- [7] P. Schramm, "Analysis and optimization of pilot-channel-assisted BPSK for DS/CDMA systems", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 9, pp.1122-1124, Sep. 1998.
- [8] P. Schramm and R. Muller, "Pilot symbol assisted BPSK on Rayleigh fading channels with diversity : Performance analysis and parameter optimization", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 12, pp.1560-1563, Dec. 1998.
- [9] R. Fantacci and A. Galligani, "An efficient

- RAKE receiver architecture with pilot signal cancellation for downlink communications in DS/CDMA indoor wireless networks", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 6, pp.823-827, June 1999.
- [10] John G. Proakis, "Digital Communications," 3rd Ed., McGraw Hill, 1995.
- [11] F. Adachi, "BER analysis of 2PSK, 4PSK, and 16QAM with decision feedback channel estimation in frequency-selective slow Rayleigh fading," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp.28-34, 1994.
- [12] Jin-il Kim, Suk-hyon Yoon, Sung-jin Kang and Chang-eon Kang, "A channel estimation technique in a DS/CDMA system with noncoherent M-ary orthogonal modulation in multipath fading channel", in *Proc. IEEE VTC98*, pp.2383-2387, Nov. 1998.
- [13] Suk-hyon Yoon, Dae-Ki Hong, Daesik Hong, and Chang-Eon Kang, "Maximum likelihood decision feedback channel estimation for M-ary orthogonal modulation in a DS/CDMA system", submitted to *IEEE Commun. Letters*.
- [14] Suk-hyon Yoon, Dae-Ki Hong, Daesik Hong, and Chang-Eon Kang, "Interference free decision feedback channel estimation for M-ary orthogonal modulation in a DS/CDMA system", to be published in *IEEE ICC'01*.
- [15] Y. C. Yoon, R. Kohno and H. Imai, "A spread spectrum multiaccess system with cochannel interference cancellation for multipath fading channels", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 11, no. 9, pp.1067-1075, Sep. 1993.
- [16] P. Patel and J. Holtzman, "Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in a DS/CDMA", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, no. 7, pp.796-807, June 1994.
- [17] Dae-Ki Hong, Ha-Young Yang, Young-Hwan You and Chang-Eon Kang, "Analysis of a pipelined successive interference cancellation scheme for a DS/CDMA system", *IEEE Commun. Letters*, vol. 3, no. 1, pp.1-3, Jan. 2000.
- [18] R. Michael, A. Kaul, S. Striglis and B. D. Woerner, "Analysis of DS-CDMA parallel interference cancellation with phase and timing errors", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 14, no. 10, pp.1522-1534, Oct. 1996.

홍 대 기



1997년: 광운대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
 1999년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1999년~현재: 연세대학교 전기·전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 정보통신, 이동통신

윤 석 현



1994년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 8월: 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 (공학박사)
 현재: LG전자 정보통신 차세대통신연구소

[주 관심분야] 이동통신시스템, 채널코딩, 디지털 신호처리

홍 대 식



1983년: 연세대학교 전자공학과
(공학사)
1985년: 연세대학교 전자공학과
(공학석사)
1991년~현재: Purdue Univ. (Ph.D)
연세대학교 교수

[주 관심분야] 디지털 통신, OFDM, Neural Networks

강 창 언



1960년: 연세대학교 전기공학과
(공학사)
1965년: 연세대학교 전기공학과
(공학석사)
1969년: 미시건 주립대 전자공학과
(공학석사)

1981~현재: 미시건 주립대 전자공학과(공학박사), 연세대학교 교수, 한국통신학회 명예회장, 대통령 자문위원 등

[주 관심분야] 디지털 통신, 정보이론, 이동통신, 멀티미디어 통신