

DS/CDMA 시스템에서의 제한된 처리 지연 시간을 고려한 다단계 간섭 제거 방식에 대한 성능 분석

正會員 황 선 한*, 강 충 구**

Performance Analysis of Multistage Interference Cancellation Schemes for a DS/CDMA System Subject to Delay Constraint

Sun-Han Hwang*, Chung G. Kang** *Regular Members*

※본 연구는 정보통신 연구 관리단에서 주관하는 대학 기초 연구 지원 사업으로 수행되었습니다(과제번호 : 96018-RT-12).

요 약

직렬 및 병렬 간섭 제거 방식은 기존의 상관 수신기를 기본적인 구성요소로 하는 단순한 구조의 다단계 간섭 제거 방식으로서, 다중 접속 환경에서 DS/CDMA 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 방안으로 제시되었다. 본 논문에서는 해석적 분석을 통해 가우시안 채널에서는 병렬 방식이 직렬 방식에 비해 성능이 항상 우수한 반면, 페이딩 채널에서는 성능 및 복잡도 등을 동시에 고려할 때 직렬 간섭 제거 방식이 보다 유리하다는 결과를 확인한다. 또한, 음성 및 동영상 등 실시간 전송을 요구하는 응용에서 허용 가능한 처리 지연 시간을 만족하기 위해서 제거 단계의 수를 제한한 그룹별 직렬 간섭 제거 방식에 대한 성능을 분석한다. 이 결과에 따르면 그룹별 간섭 제거 방식을 통해 제한된 간섭 제거 단계로 인한 성능 열화에 효율적으로 대응할 수 있음을 확인할 수 있고, 특히 각 제거 단계에서 동시에 제거하는 사용자 수는 시스템 내의 전체 사용자 수에 따라 최적의 값이 존재함을 알 수 있다.

ABSTRACT

The successive and parallel interference cancellation schemes are two well-known types of multi-stage interference cancellation schemes using the conventional correlator receivers as a basic building block, which has been known to significantly improve the performance of DS/CDMA system in the multiple access communication. Performance comparison between these two schemes is made strictly based on the analytical approach and it has been shown

*SK Telecom 중앙연구원

**고려대학교 전기·전자·전파공학부

論文番號:96400-1223

接受日字:1996年 12月 23日

that the successive interference cancellation (SIC) scheme is more resistant to fading than the parallel interference cancellation (PIC) scheme. We further investigate the performance of the successive IC scheme subject to the delay constraint, which may be imposed typically on most of service applications with a real-time transmission requirement, including speech and video applications. Our analysis demonstrates that the performance may be significantly improved by the groupwise successive interference cancellation (GSIC) scheme, which can be properly optimized to meet the given delay constraint.

I. 서 론

Direct Sequence CDMA 방식은 용량 및 페이딩 채널에서의 성능 등 여러가지 측면에서 다른 접속 방식보다 유리한 점이 부각되고 있으며 특히, 개인휴대통신(PCS)을 포함한 차세대 이동통신 시스템에 적합한 접속 방식으로 인식되고 있다[1]. 그러나, 이와 같은 DS/CDMA 시스템에서의 용량은 채널을 통과한 후 신호 수열(Signature Sequence)들간의 직교성 불일치로 인하여 발생하는 사용자간 다중 접속 간섭(Multiple Access Interference: MAI)에 의해 크게 제한을 받는다. 또한, 현재 상용 단말기의 경우 기지국으로부터 이동국 간의 근원 문제(Near-far Problem)로 인하여 상대적으로 약한 전력을 가진 신호 성분의 검출에 취약한 단점이 있다. CDMA 시스템에서는 이와 같은 근원 문제를 극복하면서 사용자간의 간섭을 줄임으로써 가입자 용량을 증가시키는 것이 가능하며, 이는 곧 시스템의 성능을 결정하는 중요한 요인이 된다. 현재의 상용 시스템에서는 정확한 전력 제어(Power Control)를 통해 이와 같은 근원 문제로 인한 간섭에 대응하고자 하지만, 채널 특성이 복잡하게 변화하는 이동통신 환경하에서는 실시간에 엄격한 전력 제어를 구현하는데 한계가 있다.

이와 같은 근원 문제는 실질적으로 CDMA 시스템이 갖는 본질적인 단점이 아니라, 이에 적용되는 단일 가입자 지향적 상관관계에 근거한 기존의 수신 기법이 다중 접속 환경에서는 최적의 수신 방법이 아니라는 측면에서 볼 수 있다[2]. 한편, MLSE(Maximum Likelihood Sequence Estimation) 기법을 기반으로 한 최적 다중사용자 수신기법(Optimum Multiuser Detection)을 통해 근원 문제를 원천적으로 제거할 수 있으며 나아가, 완벽한 전력 제어 상황에서 예측한 성능보다 높은 이득을 얻을 수 있다는 사실이 S. Verdu에 의해 제시되었다[3]. 그러나, 이와 같은 최적 수신 기

법은 다중 사용자의 수에 따라 복잡도가 지수적으로 증가하므로 실제 구현이 매우 어려운 단점이 있다. 이와 같은 구현의 복잡도를 줄이기 위해 제안된 준최적 다중사용자 수신(Suboptimum Multiuser Detection) 기법으로서 선형 탈상관 검출기(Linear Decorrelating Detector)[4, 5], 다단 간섭 제거 기법(Multi-stage Interference Cancellation Scheme)[6, 7], 결정 궤환 다중사용자 검출기(Decision Feedback Multiuser Detector)[8] 등이 제안되었다.

선형 탈상관 검출(Linear Decorrelating Detector) 기법은 각 사용자로부터 수신된 신호의 전력 크기를 이용하지 않기 때문에, CDMA 시스템에서의 근원 문제를 극복할 수 있으나 잡음 증폭 효과가 발생하므로 성능 향상에 한계가 있다. 한편, 다단 간섭제거 기법은 각 사용자의 수신된 전력을 추정한 후 각 사용자에 할당된 신호 수열을 사용하여 송신된 신호의 추정치를 재생하고, 수신된 전체 신호로부터 검출하고자 하는 사용자 신호를 제외한 사용자의 재생된 간섭 신호를 제거하는 기법이다. 이와 같은 간섭 제거 기법은 다단 또는 결정 궤환 형태 등의 다양한 구조로 구현이 가능하다. 또한, 선형 탈상관 검출 기법과 다단 간섭 제거 기법을 결합한 형태의 수신 기법도 제안되었다[7]. 특히, [9, 10]에서 제안하는 간섭 제거 기법은 기존의 단일 사용자 수신 기법을 다단계에 걸쳐 적용함으로써 구현상의 용이성을 확보하면서 성능을 보다 향상시킬 수 있는 준최적 다중사용자 수신 기법으로서 제안되었으며, 이 기법은 각 간섭 제거 단계에서 제거되는 다중사용자 간섭 신호의 형태에 따라 크게 직렬 간섭 제거 방식(Successive Interference Cancellation Scheme)과 병렬 간섭 제거 방식(Parallel Interference Cancellation Scheme)으로 분류할 수 있다. 이와 같은 다단 간섭 제거 방식이 선형 탈상관 검출 기법보다 복잡도가 비교적 낮음에도 불구하고 시뮬레이션의 결과에 따르면 가산성 가우시안 채널에서

는 성능이 보다 뛰어난 것으로 분석되었다[11]. 한편, 참조문헌 10에서는 해석적 방법을 통해 직렬 제거 방식에 대한 성능 분석을, 그리고 병렬 제거 방식에 대해서는 시뮬레이션을 통해 성능 분석을 수행함으로써 두 방식간의 성능을 비교 및 분석하였다. 참조문헌 12에서는 가산성 백색 가우시안 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise) 채널에서의 병렬 제거 방식에 대한 비트 오류 확률(BER: Bit Error Probability)을 해석적으로 계산하였으나, 페이딩 채널에서의 분석 및 직렬 제거 방식과의 비교 분석이 고려되지 않았다.

직렬 간섭 제거 방식은 병렬 간섭 제거 방식에 비해 구조상의 단순성에도 불구하고 처리지연 시간이 사용자 수에 비례하는 단점이 있다. 특히, 음성 및 동영상 등과 같은 실시간 전송을 요구하는 응용에서는 처리 지연 시간이 제한되므로 이와 같은 병렬 간섭 제거 방식의 적용이 매우 제한적일 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 처리 지연 시간이 제한된 응용에 적합한 방식으로 참조문헌 13에서 간섭제거기의 구현상 복잡도를 단순화할 수 있는 방안으로서 제안된 그룹별 직렬 간섭 제거(Groupwise Successive Interference Cancellation: GSIC) 방식을 고려한다. 이 방식은 처리 지연 시간을 감소시키기 위해 연속적인 각 제거 단계에서 두 개 이상의 사용자 간섭 신호를 동시에 제거하는 방법이다. 또한, 이 방식은 직렬 방식과 부분적인 병렬 방식을 혼합한 형태로써 구조적인 측면에서 가장 일반화된 방식으로 간주할 수 있다. 본 논문에서는 해석적 방법을 통해 이 방식에서 모든 사용자들의 평균 비트 오류 확률을 최소화하기 위해 각 제거 단계에서 동시에 제거할 최적의 사용자 수를 분석한다. 또한, 이 해석적 분석 결과를 확장하여 기존의 분석 결과에서 확인되지 않았던 페이딩 채널에서의 직렬 및 병렬 방식간의 성능에 대한 상호 비교를 수행한다.

2절에서는 본 논문에서 다루고자 하는 직렬 및 병렬 간섭 제거 방식에 대한 동작 원리를 설명하며, 보다 일반화된 형태의 그룹별 직렬 간섭 제거 방식을 소개한다. 3절에서는 처리 지연 시간이 제한된 경우의 그룹별 직렬 간섭 제거 방식에 대한 성능 분석을 제시하였으며, 4절에서는 수치적 예를 통해 제시된 방식들의 성능을 비교 분석하였으며, 성능을 최적화

하기 위한 방안을 도출한다. 마지막으로 5절에서는 본 논문의 결론을 요약한다.

II. 다단계 간섭 제거 방식

다단계 간섭 제거 방식은 크게 직렬 및 병렬 간섭 제거 방식으로 구분할 수 있다[9, 10]. 이 방식들은 기존의 상관 수신기를 기본적인 구성 요소로 하기 때문에, 탈상관 검출 방식에 비해 구현이 단순한 것이 특징이다.

직렬 간섭 제거기의 기본적인 동작 원리는 수신된 전체 신호에서 검출하고자 하는 신호보다 더 강한 전력을 가진 신호의 추정치를 단계별로 제거하는 것이다[9]. 또한 기존의 상관기 기반의 수신기로 구성되며, 매 간섭 제거 단계마다 상관기에서 출력된 결정변수에 이용하여 수신 신호의 전력을 추정한다. 예를 들어, 상관 수신기의 출력 값을 라고 나타내면, 해당 신호의 수신 전력을 Unbiased Estimate에 의해 $\hat{P} = Z^2$ 로 추정할 수 있다[12]. 이때, 수신 신호의 전력 추정값이 가장 강한 사용자를 선택하여 정보 비트를 검출하고, 이 추정 전력값을 이용하여 해당 사용자의 간섭 신호를 재생할 수 있다. 한 단계의 간섭제거는 이와 같이 재생된 간섭 신호를 전체 수신 신호에서 제거함으로써 완료된다. 이와 같은 간섭제거 단계는 가장 약한 신호가 검출될 때까지 반복된다. 따라서, 매 간섭제거 단계에서 가장 강한 사용자에 대한 정보 비트가 검출되므로, 모든 사용자에 대한 정보 비트가 검출될 때까지의 간섭제거 단계의 수는 다중 접속 사용자 수에 의해 결정된다.

한편, 병렬 간섭 제거기도 직렬 간섭 제거기와 마찬가지로 기존의 상관 수신기를 기본적인 구성 요소로 하고 있다[10, 12]. 병렬 간섭 제거의 각 단계에서는 각 사용자 별로 상관 수신기에서 출력된 결정변수를 이용하여 각 사용자의 수신 전력값을 동시에 추정하고, 이를 이용하여 각 사용자의 간섭 신호를 재생한다. 전체 수신 신호에서 검출하고자 하는 사용자에 대한 다중 접속 간섭 신호들을 동시에 제거함으로써 잔여 신호에서 해당 정보 비트를 검출할 수 있다. 이와 같은 사용자 별 제거 과정이 모든 사용자 신호에 대해서 동시에 병렬로 진행된다. 또한, 이와 같은 병렬 제거 과정 후 잔여 신호에 대해 동일한 과정을 적

용하는 다단계 제거 방식의 구현이 가능하며, 이를 통해 성능 향상을 예상할 수 있다.

이상과 같은 다단계 간섭 제거 방식들의 성능은 다중접속 간섭 신호의 재생을 위한 수신 전력 추정값의 정확도에 주로 의존하게 된다. 기준 파일럿 심볼의 전송을 통해 이에 대한 정확도를 향상시키는 방안도 고려할 수 있다[16].

한편, 직렬 간섭 제거 방식은 매 제거 단계별로 가장 강한 신호에 해당하는 한 개의 정보 비트만 검출하므로 다중접속 가입자 수에 따라 처리 지연 시간이 증가하는 반면, 병렬 간섭 제거 방식에서는 처리 지연 시간이 제거 단계의 수에 비례한다. 따라서, 직렬 간섭 제거 방식은 병렬 간섭 제거 방식에 비해 구조상의 단순성에도 불구하고 처리 지연 시간이 상대적으로 긴 단점이 있다. 특히, 실시간 전송을 요구하는 특정 응용 서비스에서의 엄격한 지연 요구 사항을 만족시키기 위해서는 모든 제거 단계를 순차적으로 수행해야 하는 직렬 간섭 제거 방식이 부적절하다. 따라서, 직렬 방식으로 이와 같은 실시간 전송 요구 사항을 만족시키기 위해서는 제거 단계의 수를 제한하는 것이 필요하며, 매 비트마다 허용 가능한 최대의 지연 요구 조건을 만족할 수 있는 한계 내에서 제거 단계의 수를 선택해야 한다.

본 논문에서는 이와 같은 요구 사항을 만족하기 위해 참조문헌 13에서 간섭 제거기의 구현상 복잡도를 단순화할 수 있는 방안으로 제안된 그룹별 직렬 간섭 제거(Groupwise Successive Interference Cancellation) 방식을 고려한다. 기존 직렬 간섭 제거 방식에서는 각 제거 단계에서 수신 전력이 가장 큰 가입자에 해당하는 간섭 신호를 제거하는 반면에 그룹별 제거 방식에서는 수신 전력이 가장 큰 순으로 한 개 이상의 간섭 신호를 동시에 제거하는 것이 기본적인 동작 원리이다. 이와 같이 다수 개의 간섭 신호를 동시에 제거함으로써 가장 약한 신호를 제거할 때까지 요구되는 제거 단계의 수를 줄일 수 있다. 이 때, 각 단계에서 부분적인 병렬 제거 방식이 적용되므로 이 방식은 직렬 및 병렬 방식을 혼합한 방식으로 볼 수 있다. 이는 구조상으로 볼 때 가장 일반화된 형태로서 기존의 직렬 및 병렬 간섭 제거 방식은 이 방식의 특수한 경우로 간주할 수 있다.

본 논문에서는 허용된 지연 시간을 만족시킬 수 있

는 간섭 제거 단계 수를 제한할 때, 비트 오류 성능을 극대화하기 위해 각 제거 단계에서 동시에 제거해야 할 가입자의 수를 결정하기 위한 분석을 수행한다. 우선 이와 같은 성능 분석에 필요한 파라미터들을 다음과 같이 정의한다. 각 정보 비트 처리에 있어서 최대 허용 가능한 직렬 간섭 제거 단계의 수를 *delay constraint factor*라 정의하고 N_C 로 나타낸다. 이 때, 전체 시스템에서 허용하는 최대 지연 시간을 D_{max} 로 나타내고 각 간섭제거 단계의 처리 지연 시간을 상대적으로 무시할 수 있다면, 데이터 비트 당 허용 가능한 간섭 단계의 수는 $N_C \approx \left\lfloor \frac{D_{max}}{T} \right\rfloor$ 으로 주어진다. 한편, (s)

번째 제거 단계에서 동시에 제거되는 가입자들의 수를 *group-wise factor*라고 정의하고 $N_G(s)$ 로 나타낸다. 이는 (s-1)번째의 간섭 제거 단계 후 잔여 신호로부터의 상관기 출력 결정 변수 값이 큰 순서대로 $N_G(s)$ 에 해당하는 수 만큼 동시에 제거시켜 주는 것을 의미한다. 한편, 각 제거 단계에서 $N_G(s)$ 에 해당하는 수의 간섭 신호들을 제거한 후, 최종 단계에서는 잔여 신호에서 이 때까지 검출되지 않은 사용자 신호들에 대해서 병렬 제거 방식을 적용하거나 또는 더 이상의 제거 과정이 없이 바로 검출하게 된다. 본 논문에서는 실제 구현상의 복잡도를 고려하여 각 단계별 $N_G(s)$ 를 모두 동일한 값으로 설정하며[13], 이 때 다음과 같은 관계식들이 성립한다.

$$N_G(1) = N_G(2) = \dots = N_G(N_C) = n_K$$

마지막 제거 단계까지 검출되지 않은 사용자 수는 $K - n_K \cdot N_C$ 로서, 이에 해당하는 데이터 심볼들은 간섭 제거 과정 없이 검출되는 것으로 설정한다. 예를 들어, $K=7$ 이고 $N_C=2$ 및 $n_K=2$ 인 경우는 첫번째 간섭 제거 단계에서 가장 강한 두 개의 사용자 신호를 재생하여 총 수신 신호로부터 동시에 제거하고, 다음 단계에서 검출된 또 다른 강한 두 개의 신호를 재생하여 이를 전 단계의 간섭 제거 후 잔여 신호로부터 제거한다. 이 두 단계에 걸쳐 검출되지 않은 나머지 3개의 사용자 신호는 마지막 단계에서 상관 수신기에 의해 각각 검출된다.

그룹별 직렬 간섭 제거 방식에서는 허용된 처리 지연 시간 한계로 인하여 성능 저하가 불가피하다. 그

러나 주어진 간섭 제거 단계의 수(N_C)에서 이와 같은 성능 저하의 정도는 실제 n_g 값에 따라 그 정도가 달라질 것이며, 이는 궁극적으로 각 사용자의 수신 전력 분포에 의해 결정된다. 따라서 시스템의 평균 성능은 n_g 에 따라 민감하게 영향을 받을 것으로 예상되며 이에 대한 정확한 분석이 요구된다. 예를 들어 $N_C \ll K$ 인 상황에서 $n_g=1$ 과 $n_g=2$ 의 경우를 비교하면 n_g 에 따른 득실 관계를 보다 명확히 볼 수 있다. 즉, $n_g=1$ 에서는 허용된 제거 단계 내에서 강한 간섭 신호가 우선적으로 제거되는 반면에 최종 단계에서 한꺼번에 검출되어야 하는 사용자 신호의 수가 상대적으로 많다. 한편, $n_g=2$ 에서는 각 단계에서 제거되는 사용자간의 상대적인 간섭이 고려되지 않은 상태에서 동시에 제거되므로 이에 따른 성능 저하가 예상되지만 최종 단계에서 동시에 검출되어야 하는 가입자 신호의 수가 $n_g=1$ 의 경우보다 상대적으로 작으므로 이에 따른 이득이 동반된다. 따라서, 이와 같은 상황을 동시에 고려하기 위해서는 주어진 N_C 값에 대해 n_g 값의 설정에 따른 성능을 비교 분석하는 것이 시스템 설계상의 매우 중요한 공학적 문제로 인식된다.

기존의 직렬 간섭 제거 방식은 $N_C = K-1$ 및 $N_C(s) = 1, s=1, 2, \dots, K-1$ 에 해당하는 그룹별 간섭 제거 방식의 특수한 경우로 볼 수 있다.

III. 다단계 간섭 제거 시스템 모델 및 성능 분석

본 논문에서는 BPSK 변조 방식을 적용하는 비동기식(Asynchronous) DS/CDMA 시스템을 고려하며, 시스템 내의 다중 접속 가입자 수를 K 명으로 가정한다. 여기서 k 번째 사용자의 이진 데이터 신호를 다음과 같이 표현하며

$$b_k(t) = \sum_l A_{k,l} p_T(t-lT)$$

여기서 $A_{k,l} \in \{1, -1\}$ 은 k 번째 사용자의 l 번째 데이터 비트이며, $p_T(t)$ 는 길이가 T 이고 단위 전력값을 갖는 정형파이다. k 번째 사용자의 l 번째 확산수열을 $C_{k,l}$ 로 나타내고 각 확산수열의 길이를 T_c 로 나타내면, 확산수열 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_k(t) = \sum_l C_{k,l} p_{T_c}(t-lT_c)$$

본 논문에서는 $C_{k,l}$ 를 주기가 N 이며 1과 -1 의 값을 균일한 분포로 갖는 랜덤 수열(Random Sequence)로 가정한다. 각 데이터 비트 구간에서 k 번째 사용자의 수신 신호 전력과 초기위상을 각각 P_k 및 θ_k 로 표시하면, k 번째 사용자의 송신 신호는 $s_k(t) = \sqrt{2P_k} c_k(t) b_k(t) \cos(\omega_c t + \theta_k)$ 로 나타낼 수 있다. 이상적인 평균 전력 제어를 가정하면, 즉 페이딩이 없는 상황에서 모든 신호가 동일한 전력값으로 수신된다고 가정하면, 전체 수신 신호를 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{2P_k} c_k(t - \tau_k) / b_k(t - \tau_k) \cos(\omega_c t + \phi_k) + n(t) \quad (1)$$

(1)식에서 τ_k 는 k 번째 가입자가 채널상에서 겪는 지연 시간을 나타내는 확률변수로서 한 비트 구간 $[0, T)$ 상에서 균일한 확률분포를 가진다고 가정한다. 또한, (1)식에서 ϕ_k 는 $\phi_k = (\theta_k - \omega_c \tau_k) \bmod 2\pi$ 이며, 지연 시간으로 인한 위상 변화를 나타내는 확률변수로서 $[0, 2\pi)$ 상에 균일하게 분포한다고 가정한다. 실제 동작에서는 정확한 추적을 통해 이와 같은 지연 시간과 위상에 대한 정보를 알고 있다고 가정한다. 한편, (1)식에서 ω_c 는 반송 주파수이고 $n(t)$ 는 $N_0/2$ 의 전력 스펙트럼 밀도를 가지는 가산성 백색 가우시안 잡음이다. 이 때, 모든 사용자에 대한 확산수열은 알고 있으나 각 사용자 신호의 에너지는 수신단에서 미리 알 수 없다고 본다.

직렬 간섭제거 방식에서는 매 간섭제거 단계에서 가장 강한 n_g 개의 사용자 신호에 대한 데이터 비트가 검출되고, 그 사용자 신호들이 남은 신호에서 제거된다. 따라서, (s) 번째 간섭제거 단계에서는 아직 데이터 비트가 검출되지 않은 $K - (s-1)n_g$ 개의 약한 사용자 신호 중에서 가장 강한 n_g 개의 사용자 신호를 검출하게 된다. 다음에서는 분석의 단순화를 위해 모든 사용자들의 수신 신호 크기가 사용자 인덱스에 따라 감소하는 순으로 정해져 있고, 이에 따라 각 제거 단계에서의 역확산 상관기에서 출력되는 결정변수도 이 크기 순으로 정해져 있다고 가정한다. $(s-1)$ 번째 간섭제거 단계 이전에 남은 신호를 $r^{(s-1)}(t)$ 로 나타내면 $(s-1)$ 번째 간섭제거 단계에서는 지금까지 검출되지 않은 사용자 신호들 중 강한 n_g 개의 신호들에 대한 역확산 상관기를 통해 결정변수를 결정하게 된다.

$$Z_{k,l}^{(s-1)} = \frac{1}{T} \int_{T+\tau_k}^{(l+1)T+\tau_k} r^{(s-1)}(t) c_k(t-\tau_k) \cos(\omega_c t + \phi_k) dt,$$

$$k = (s-1)n_g + 1, (s-1)n_g + 2, \dots, sn_g \quad (2)$$

(2)식은 사용자 인덱스가 수신 전력 크기에 의해 정해진다. 가정과 더불어 $Z_{(s-1)n_g+1, l} > Z_{(s-1)n_g+2, l} > \dots > Z_{k, l}$ 의 관계가 모든 간섭제거 단계에서 성립한다는 가정을 전제로 한 것이다. (2)식의 결정 변수를 이용하여 수신 전력을 다음 (3)식과 같은 Unbiased Estimate을 통해 적응적으로 추정할 수 있다[12].

$$\hat{P}_{k,l}^{(s-1)} = 2(Z_{k,l}^{(s-1)})^2. \quad (3)$$

이와 같이 추정된 수신 전력과 경관정 $\hat{A}_{k,l}^{(s-1)} = \text{sgn}(Z_{k,l}^{(s-1)})$ 에 의해 검출된 값을 이용하여 (s-1)번째 단계에서 제거될 간섭신호를 다음 (4)식과 같이 재생할 수 있다.

$$\hat{s}_k^{(s-1)}(t) = \sum_l \sqrt{2\hat{P}_{k,l}^{(s-1)}} \hat{A}_{k,l}^{(s-1)} p_r(t-\tau_k) c_k(t-\tau_k) \cos(\omega_c t + \phi_k),$$

$$k = (s-1)n_g + 1, (s-1)n_g + 2, \dots, sn_g \quad (4)$$

(4)식에 따라 (s-1)번째 간섭제거 단계 이후에 남은 신호는 다음 (5)식과 같이 주어진다.

$$r^{(s)}(t) = r^{(s-1)}(t) - \sum_{j=1}^{n_g} \hat{s}_{(s-1)n_g+j}^{(s-1)}(t-\tau_{(s-1)n_g+j}) \quad (5)$$

(5)식을 이용하여 (2)식과 같이 다음 (s)번째 간섭제거 단계의 사용자 k에 대한 결정변수를 계산할 수 있으며, 이 값들은 다음과 같이 다중접속 간섭(Multiple Access Interference) 성분들을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$Z_{k,l}^{(s)} = \sqrt{\frac{P_{k,l}}{2}} + \sum_{\substack{j=(s-1)n_g+1 \\ j \neq k}}^K D_{j,k} + \sum_{j=1}^{(s-1)n_g} (D_{j,k} - \hat{D}_{j,k}^{(s-1)}) + \xi,$$

$$k = (s-1)n_g + 1, (s-1)n_g + 2, \dots, sn_g \quad (6)$$

(6)식에서 $A_{k,l} = 1$ 을 가정하였으며, 사용자 j와 사용자 k의 확산수열간의 상대적인 지연이 $\tau_{j,k}$ 일 때 두 수열간의 교차상관값(Cross-Correlation)을 다음과 같이 정의하면

$$I_{j,k}(\tau_{j,k}) = \frac{1}{T} \int_{T+\tau_k}^{(l+1)T+\tau_k} c_j(t-\tau_j) c_k(t-\tau_k) dt$$

(6)식의 $D_{j,k}$ 는 이로 인한 다중접속 간섭 성분으로서 다음과 같이 정의된다.

$$D_{j,k} = \left(\sqrt{\frac{P_{j,l}}{2}} \cos(\phi_j - \phi_k) \right) \cdot I_{j,k}(\tau_{j,k}) \quad (7)$$

또한, (6)식에서 $\hat{D}_{j,k}$ 는 (7)식의 추정치이며 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{D}_{j,k}^{(s-1)} = \left(\sqrt{\frac{\hat{P}_{j,l}^{(s-1)}}{2}} \cos(\phi_j - \phi_k) \right) \cdot I_{j,k}(\tau_{j,k})$$

한편, (6)식에서 ξ 는 다음과 같이 정의되는 가우시안 확률변수이다.

$$\xi = \frac{1}{T} \int_0^T n(t) c_k(t-\tau_k) \cos(\omega_c t + \phi_k) dt$$

이때 모든 사용자들의 확산수열들은 랜덤하며, 모든 사용자간에 상호 독립적인 것으로 가정하였으므로 모든 간섭 성분의 평균은 0으로 주어진다(즉, $E\{D_{j,k}\} = E\{\hat{D}_{j,k}^{(s-1)}\} = 0, \forall i \neq j$). 따라서, (6)식에서 페이딩에 의한 수신 전력이 주어졌을 때 (s)번째 제거 단계 후 사용자 j의 l번째 비트에 대한 결정변수의 조건부 평균은

$$E\{Z_{k,l}^{(s)} | P_{k,l}\} = \sqrt{\frac{P_{k,l}}{2}} \text{으로 주어진다.}$$

다음의 비트 오류 분석에서는 (6)식의 간섭 성분들은 상호 독립적인 가우시안 확률변수로 모델링한다. 사용자 수 K가 충분히 크거나 또는 처리이득이 충분히 클 경우 이와 같은 간섭에 대한 가우시안 근사화(Gaussian Approximation)의 정확도가 검증되었으며, 이는 참조분헌 9, 10, 12, 14 등을 비롯하여 일반적으로 비트 오류 확률을 계산하기 위한 통용되는 근사화이다. 다음에서는 이와 같은 가우시안 근사화에 의해 비트 오류 확률을 계산하기 위하여 간섭 성분의 분산값을 계산한다. 이때, 확산수열의 다른 사용자간 상관관계의 분산은 참조분헌 14에서 사용된 결과인 $\text{Var}\{I_{j,k}(\tau_{j,k})\} = 1/3N$ 를 이용한다. 또한, 오류 확률을 계산하고자 하는 사용자의 수신 전력이 주어졌다고 가정할 때, 조건부 분산 $\text{Var}\{Z_{k,l}^{(s)} | P_{k,l}\}$ 는 다음과 같은 재귀적 형태로 계산할 수 있으며

$$\text{Var}(Z_{k,l}^{(s)}|P_{k,l}) = \frac{N_0}{4T} + \frac{1}{6N} \sum_{j=m+1}^K E\{P_{j,l}\} + \frac{1}{3N} \sum_{j=1}^m \text{Var}(Z_{j,l}^{(s-1)}|P_{j,l})$$

$$s = \left\lceil \frac{k}{n_g} \right\rceil, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (8)$$

(8)식에서 $k \leq N_C \cdot n_g$ 이면 $m = \lfloor (k-1)/n_g \rfloor \cdot n_g$ 이고, 그렇지 않은 경우에는 $m = N_C \cdot n_g$ 로 주어진다. 이때, (8)식의 조건부 분산값은 실질적으로 어떤 사용자의 수신 전력과는 무관한 값으로 주어지는 것을 확인할 수 있다(즉, $\text{Var}(Z_{k,l}^{(s)}|P_{k,l}) = \text{Var}(Z_{k,l}^{(s)})$).

페이딩 채널 환경을 고려하여, 각 수신 신호 전력의 크기는 Rayleigh 분포를 가진다고 가정한다. 첫번째 사용자의 신호 전력이 가장 강하며 나머지 사용자의 전력 세기가 사용자 인덱스에 따라 모두 내림차순으로 분포된다고 가정하므로, 순서 통계량(Order Statistics)에 의하여 k 번째 사용자에 대한 신호 전력의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 주어진다[15].

$$f_{P_k}(x) = \frac{K!}{(K-k)!(k-1)!} (1 - e^{-2x})^{K-k} (e^{-2x})^{k-1} \cdot 2e^{-2x} \quad (9)$$

따라서, (8)식에서의 각 사용자 별 평균 수신 전력은 (9)식의 확률밀도 함수에 의해 결정된다. 따라서 직렬 제거 방식에서 (s)번째 제거 단계 후 k 번째 사용자 신호의 l 번째 비트에 대한 평균 비트 오류 확률은 다음 (10)식과 같다.

$$P_{b,k,l}^{(s)} = \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\frac{x/2}{\text{Var}(Z_{k,l}^{(s)})}}\right) \cdot f_{P_k}(x) dx, \quad s = \left\lceil \frac{k}{n_g} \right\rceil, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (10)$$

(10)식의 결과는 $N_C = K-1$ 및 $n_g = 1$ 일 때 비트 오류 확률식은 [9]에서 유도된 직렬 간섭 제거 방식에서의 결과와 동일함을 확인할 수 있다.

한편, 유사한 방법으로 병렬 간섭 제거 방식의 경우에는 (8)에 해당하는 식이 다음과 같은 형태로 주어지는 것을 알 수 있으며

$$\text{Var}(Z_{k,l}^{(s)}|P_{k,l}) = \frac{N_0}{4T} + \frac{1}{3N} \sum_{j=1, j \neq k}^K \text{Var}(Z_{j,l}^{(s-1)}|P_{j,l})$$

이때, 모든 사용자들의 수신 전력이 주어졌다고 했을 때, (s)번째 제거 단계 후 k 번째 사용자 신호의 l 번째 비트에 대한 조건부 평균 비트 오류 확률은 다음과 같은 식으로 주어진다[12].

$$Q\left(\sqrt{\frac{P_{k,l}/2}{\text{Var}(Z_{k,l}^{(s)})}}\right) = Q\left\{\left[\frac{1}{2(P_{k,l}T/N_0)} \frac{1 - \left(\frac{K-1}{3N}\right)^s}{1 - \left(\frac{K-1}{3N}\right)}\right] + \frac{1}{(3N)^s} \left[\frac{(K-1)^s - (-1)^s}{K} \frac{\sum_{j=1, j \neq k}^K E\{P_{j,l}\}}{P_{k,l}}\right] + (-1)^s\right\}^{-1/2} \quad (11)$$

직렬 및 그룹별 직렬 간섭 제거 방식에서와 마찬가지로 수신 전력이 가입자 인덱스에 따라 내림차순으로 주어진다고 가정하면, (11)식을 (10)식에 적용함으로써 페이딩 채널에서의 병렬 간섭 제거 방식에 대한 비트 오류 확률을 계산할 수 있다.

IV. 수치 해석 결과 및 성능 비교 분석

본 절에서는 앞 절의 분석 결과를 이용하여 직렬 및 병렬 간섭 제거 방식을 적용한 수신기의 비트 오류 확률을 통해 상호 비교하고, 그룹별 직렬 간섭 제거에 따른 성능 특성 분석을 통해 최적 시스템 구조를 도출하고자 한다. 사용자 수 또는 처리이득이 충분히 클 경우 다중 사용자 간섭에 대한 가우시안 근사화(Gaussian Approximation)의 유효성은 이미 검증되었으므로[9, 10, 12, 14], 본 논문에서는 이를 근거로 한 해석적 분석 결과만 제시한다. 또한, 본 논문에서 고려하고 있는 다단 간섭 제거 방식들에 대한 가우시안 근사화를 이용한 해석적 결과의 정확도는 이미 참고문헌 10 및 12에서 시뮬레이션 결과에서 검증되었다. 다만, 이들 분석에서는 직렬 방식의 해석적

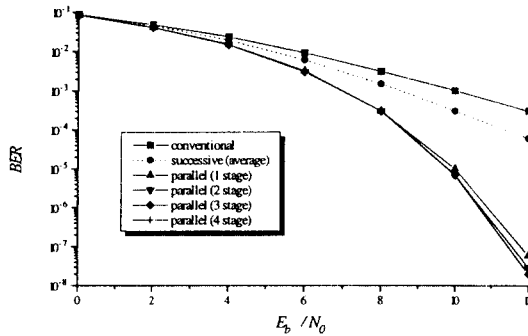


그림 1. AWGN 채널하에서의 신호 대 잡음비에 따른 비트 오류 성능 ($K=10, N=31, n_g=1$)

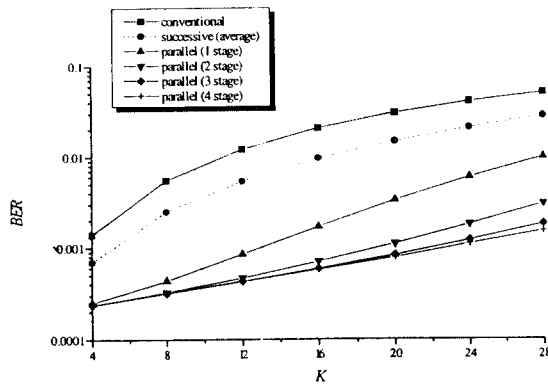


그림 2. AWGN 채널에서의 사용자 수에 따른 비트 오류 성능 ($E_b/N_0=8\text{dB}, N=31, n_g=1$)

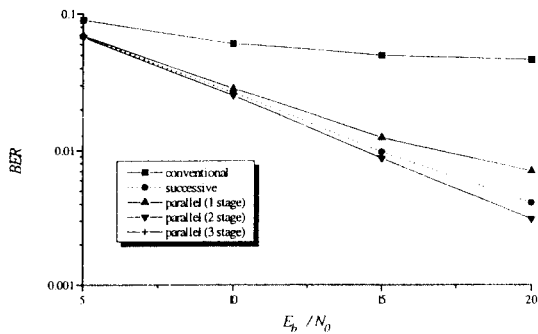


그림 3. 페이딩 채널에서의 신호 대 잡음비에 따른 비트 오류 성능 ($K=10, N=31, n_g=1$)

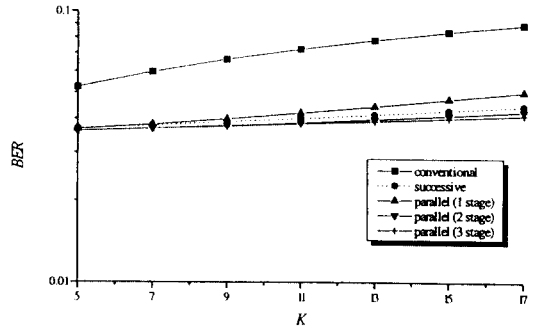


그림 4. 페이딩 채널에서의 사용자 수에 따른 비트 오류 성능 ($E_b/N_0=8\text{dB}, N=31, n_g=1$)

결과와 병렬 방식의 시뮬레이션 결과를 이용하여 두 방식간의 성능을 비교하고 있기 때문에 상대적으로 긍정적인 비교가 이루어지지 않았다는 점을 고려하여, 본 논문에는 순수한 해석적 분석 결과만을 토대로 하여 이 두 방식을 비교하고자 한다.

그림 1-4에서는 AWGN 및 페이딩 채널에서의 직렬 및 병렬 간섭 제거 방식($n_g=1$ 인 경우)에 대한 평균 비트 오류 성능을 비교한다. 본 논문에서 제시된 비트 오류 성능 결과들은 모든 사용자들에 대한 성능의 평균값으로서, 수신 전력의 크기가 매우 작은 사용자의 개별 BER 성능이 상대적으로 열악하기 때문에 전체 평균 성능은 이와 같은 사용자들의 성능에 의해 주로 의존하게 되는 것이 일반적이다. AWGN 채널에서의 분석은 완벽한 전력 제어(Power Control)를 가정하여, 모든 가입자의 수신 전력은 동일한 것으로 가정하였다. 이와 같이 가정은 간섭 제거의 효율성을 결정하는 여러 가지 요소 중에서 MAI가 미치는 영향만을 분리하여 고찰하기 위한 것이다. 이 분석 결과에서는 AWGN 채널에서는 병렬 방식이 직렬 방식보다 항상 성능이 항상 우수함을 보여준다. 그러나, 그림 3 및 4에서 보는 바와 같이 페이딩 채널에서는 직렬 방식이 한번의 제거 단계를 거친 병렬 방식보다 성능이 우수한 것으로 나타난다. 이와 같은 결과는, 완벽한 전력 제어를 가정하는 AWGN 채널에서는 잡음에 의한 수신 전력의 변이가 페이딩 채널에서와 비교할 때 상대적으로 적으므로 수신 전력의 크기 차에 따라 순차적으로 제거하는 직렬 방식의 효율이 페이딩 채널에서 보다 높기 때문이다. 또한 그림 4

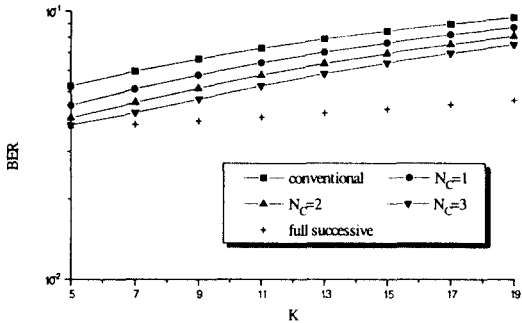


그림 5. 페이딩 채널에서의 의 변화에 따른 직렬 간섭 제거 방식의 비트 오류 성능 ($E_b/N_0=8\text{dB}$, $N=31$, $n_g=1$)

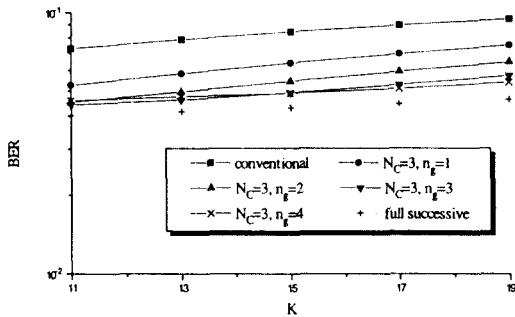


그림 6. 페이딩 채널에서의 의 변화에 따른 그룹별 직렬 간섭 제거 방식의 비트 오류 성능 ($E_b/N_0=8\text{dB}$, $N=31$)

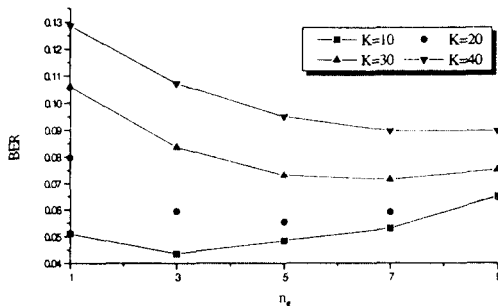


그림 7. 페이딩 채널에서의 총 사용자 수에 따른 최적의 그룹화 계수 ($N_c=3$)

과 그림 2를 비교할 때 페이딩 채널에서의 직렬 방식의 비트 오류 확률은 가입자 수의 증가에 비교적 덜 민감할 뿐만 아니라, AWGN 채널에서는 가입자 수가 증가함에 따라 성능이 급격하게 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 직렬 방식이 페이딩 상황에서 병렬 방식에 비해 다중 접속 간섭에 대한 제거 효율이 상대적으로 높다는 사실을 반영하는 것으로, 이는 참조문헌 10에서의 분석과 유사한 결과이다. 한편, 병렬 방식의 경우 제거 단계가 증가할수록 성능 향상의 폭이 급격히 둔화되며, 특히 3단계 이상의 다단계 제거에서는 무시할 수 있을 만큼 작은 폭으로 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다.

그림 5에서는 $n_g=1$ 로 고정시킨 상황에서 다양한 값의 N_c 에 대하여 직렬 간섭 제거기의 평균 비트 오류 확률을 관찰한다. 이 결과에서는 가입자 별 제거 단계를 거친 직렬 간섭 제거기(즉, $N_c=K-1$ 및 $n_g=1$)의 성능이 사용자 수의 증가에 크게 영향을 받지 않는 반면, 지연 시간이 제한된 직렬 방식의 성능은 사용자의 수에 민감하게 반응함을 알 수 있다. 따라서 부과된 지연 제한 조건에 의해 시스템의 성능이 심각하게 저하될 수 있으며, 이는 특히 사용자의 수에 매우 민감하게 종속된다는 것을 알 수 있다.

그림 6에서는 제한된 제거 단계 수($N_c=3$)에 대하여 n_g 를 변화시키면서 평균 비트 오류 확률을 관찰한다. 이 경우에는 그룹별 직렬 간섭 제거 방식의 성능이 n_g 의 증가에 따라 급격하게 향상됨을 알 수 있으며, 궁극적으로 기존의 직렬 간섭 제거 방식의 성능에 접근하는 것을 볼 수 있다. 또한 시스템의 성능은 n_g 에 의존하는데, 이는 시스템에 존재하는 사용자의 수에 따라 결정되는 것을 볼 수 있다. 그림 9에서, $K < 14$ 인 경우에 $n_g=3$ 은 $n_g=4$ 보다 우수한 성능을 나타내는 반면에 $K > 14$ 인 경우는 $n_g=4$ 일 때가 보다 우수한 성능을 나타낸다. 이러한 결과로부터 시스템에서의 사용자 수에 따라 최적의 n_g 값이 존재함을 유추할 수 있다.

이상과 같은 수치적 결과들을 분석해 볼 때, 지연 시간이 제한된 상황에서의 시스템 용량을 극대화시키기 위한 최적의 n_g 값은 크게 다음과 같은 두 가지 요소에 의해 좌우된다. 첫 번째 요소로는 마지막 제거 단계 후 남아있는 사용자 신호들의 수이다. 이는 전체적인 평균 비트 오류 확률이 주로 마지막 그룹에

속한 약한 전력을 가진 사용자 신호들의 비트 오류 확률에 의해 좌우되기 때문이다. 또 다른 요소로는 매 제거 단계에서 동시에 제거되는 사용자 신호들 사이의 간섭의 양이다. 즉, 같은 제거 단계에 속한 사용자들 사이에 존재하는 MAI는 제거되지 않기 때문에 n_g 값이 커짐에 따라 전체 비트 오류 성능은 저하된다. 이러한 두 가지 요소는 상호 득실 관계에 있기 때문에 최적의 n_g 값을 선택하는데 있어서는 이 두 가지 요소를 동시에 고려해야 한다. 따라서 그림 7에서는 시스템 복잡도를 고려한 총 사용자 수에 따른 최적의 그룹화 계수가 존재함을 예로 보여준다. 만일 총 사용자의 수가 $K=20$ 이고 간섭 제거 단계의 수가 3단계로 제한될 때($N_c=3$), $n_g=5$ 에서 최적의 성능을 나타내고 $n_g \geq 6$ 이상일 때는 하드웨어의 복잡도가 증가할 뿐만 아니라 시스템 성능도 $n_g=5$ 보다 열등함을 알 수 있다. 결론적으로, 이와 같은 n_g 값의 증가를 통해 얻을 수 있는 성능 향상 이득은 부분적인 병렬 간섭 제거 방식의 도입을 통한 하드웨어의 복잡성을 수반하게 되므로, 이들 간의 적절한 득실 관계가 고려되어야 한다.

V. 결 론

본 논문에서는 DS/CDMA 시스템에서의 다중 사용자간 간섭을 효과적으로 제거할 수 있는 간단한 구조의 직렬 및 병렬식 간섭 제거 방식에 대한 해석적 분석을 통해 그 성능을 비교 분석하였다. 가산성 백색 가우시안 잡음(AWGN) 채널에서는 병렬 간섭 제거 방식이 직렬 간섭 제거 방식에 비해 성능이 항상 우수한 반면, 레일리 플랫 페이딩 환경에서의 성능 및 복잡도 등을 동시에 고려할 때 직렬 간섭 제거 방식이 보다 유리하다는 기존의 결과를 재확인할 수 있으며, 이와 같은 결과는 기존의 분석과는 달리 해석적 접근에 기반을 두고 있다. 이와 같은 직렬 간섭 제거 방식의 장점에도 불구하고 상대적으로 동작 지연 시간이 길기 때문에 실시간 전송을 요구하는 서비스에 직접 적용할 경우 단점이 될 수 있다. 따라서 허용된 처리 지연 시간을 만족하기 위하여 간섭 제거 단계가 제한된 경우에 대하여 그룹별 직렬 간섭 제거(Groupwise Successive Interference Cancellation) 방식을 고려하였으며, 처리 지연 시간의 제한에 따른

성능을 분석하였다. 이 분석 결과에 따르면 그룹별 직렬 간섭 제거 방식을 통해 제한된 간섭 제거 단계의 수로 인한 성능 열화에 효율적으로 대응할 수 있음을 확인할 수 있었고, 특히 각 제거 단계에서 동시에 제거하는 사용자 수는 시스템 내의 전체 사용자 수에 따라 최적의 값이 존재함을 알 수 있다. 본 논문에서의 분석 결과를 통해 시스템의 성능 예측 뿐만 아니라, 다단계 간섭 제거기의 최적 구조를 결정하는데 직접 적용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. S. G. Glisic and Pentti A. Leppanen (editors), *Code Division Multiple Access Communications*, Kluwer Academic Publisher, 1995.
2. S. Verdu, "Adaptive Multiuser Detection," *Code Division Multiple Access Communications*, pp. 97-116, Kluwer Academic Publisher, 1995.
3. S. Verdu, "Minimum Probability of Error for Asynchronous Gaussian Multiple-Access Channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. IT-32, No.1, pp.85-96, January 1986.
4. R. Lupas and S. Verdu, "Linear Multiuser Detectors for Synchronous Code-division Multiple-access Channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.35, No.1, pp.123-136, January 1989.
5. R. Lupas and S. Verdu, "Near-Far Resistance of Multiuser Detectors in Asynchronous Channels," *IEEE Transactions on Communications*, Vol.38, 3, March 1990.
6. M. K. Varanasi and B. Aazhang, "Multistage Detection in Asynchronous Code-Division Multiple-Access Communications," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, Vol.38, No.4, pp.509-519, April 1990.
7. M. K. Varanasi and B. Aazhang, "Near-Optimum Detection in Synchronous Code-Division Multiple-Access Communications," *IEEE Transactions on Communications*, pp.725-736, May 1991.
8. A. Duel-Hallen, "Decorrelating Decision-feedback Multiuser Detector for Synchronous Code-Division

- Multiple-Access Channel," *IEEE Transactions on Communications*, Vol.41, No.2, pp.285-290, February 1993.
9. P. Patel and J. Holtzman, "Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in DS/CDMA system," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.12, No.5, pp.796-807, June 1994.
 10. 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 IEEE ICC '94*, pp.510-514, 1994.
 11. P. Kempf, "On Multi-User Detection Schemes for Synchronous Coherent CDMA Systems," *Proceeding of IEEE ICC'95*, 1995.
 12. A. Kaul and B. D. Woerner, "An Analysis of Adaptive Multistage Interference Cancellation for CDMA," *Proceedings in IEEE VTC'95*, 1995.
 13. F. van der Wijk, G. M. J. Janssen and R. Prasad, "Groupwise Successive Interference Cancellation in a DS/CDMA System," *Proceedings in IEEE PIMRC '95*, pp.742-746, 1995.
 14. M. B. Pursley, "Performance Evaluation for Phase-coded Spread Spectrum Multiple Access Communication-Part I: System Analysis," *IEEE Trans. Comm.*, Vol.25, No.8, pp.795-799, August 1977.
 15. A. Papoulis, "Probability, Random Variables, and Stochastic Processes," (3rd Edition), *McGraw-Hill*, 1991.
 16. O. Nesper and P. Ho, "A Reference Symbol Assisted Interference Cancelling Hybrid Receiver for an Asynchronous DS/CDMA System," *Proceedings of IEEE PIMRC '96*, pp.108-112, 1996.



黃 宣 漢(Sun H. Hwang) 정회원

1995年: 광운대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)

1997年: 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1997年 1月~현재: SK Telecom 중앙연구원 FPLMTS 개발그룹 주임연구원

※주관심분야: 이동통신 시스템 성능분석, 다중 사용자 수신 기법, IMT-2000 시스템 설계

姜 忠 求(Chung G. Kang)

정회원

1987년 6월: Univ. of California, San Diego, Dept. of Electrical Engineering 졸업(BS)

1989년 9월: Univ. of California, Irvine, Dept. of Electrical & Computer Engineering 졸업(MS)

1993년 3월: Univ. of California, Irvine, Dept. of Electrical & Computer Engineering 졸업(Ph.D)

1991년 7월~1992년 5월: Aerospace Corp. 연구원

1993년 4월~1994년 2월: Rockwell International 연구원

1994년 3월~현재: 고려대학교 전기·전자·전파공학부 조교수

※주관심분야: 무선 통신망 설계 및 최적화, 무선 ATM, 위성 이동통신 시스템