

그룹화 알고리즘을 바탕으로 개선된 혼합형 다중 사용자 간섭제거 기법

정회원 정수정*, 김형명**

An Improved Hybrid Multiuser Interference Cancellation Scheme Based on the Clustering Algorithm

Soojung Jung*, Hyung-Myung Kim** *Regular Members*

요 약

동일 그룹에 속하는 사용자들의 신호 크기가 다른 경우에 대하여 혼합형 다중 사용자 간섭제거 기법에 대한 성능 분석을 하였다. 이를 바탕으로, 기존의 혼합형 간섭제거 기법은 전력 제어를 하지 않거나 전력 제어가 완벽하지 않은 상황에서, 동일 그룹에 속하는 사용자들의 신호 크기 차이가 크게 날 경우, 사용자들간의 큰 신호 크기 차이로 인해 전체적인 성능이 떨어지게 됨을 보였다. 이 논문에서 제안한 기법은 신호의 크기를 고려하여 그룹화 알고리즘을 적용하도록 함으로써, 그룹에 속하는 사용자들의 신호 크기 차이가 적도록 그룹을 형성함으로써 혼합형 간섭제거 기법의 성능을 개선하였다. 그룹의 수가 같은 경우 제안된 기법과 기존의 기법의 성능을 비트 오류율을 지표로 하여 성능이 개선됨을 확인하였다.

ABSTRACT

We analyze the performance of the hybrid multiuser interference cancellation scheme when each user in the same group has different received signal power. On the basis of this analysis, it is shown that the conventional HIC which divides the active users into several groups of the equal size experiences a performance degradation due to the great difference in received signal powers when the power control is not applied or imperfect. In this paper, we propose a new improved HIC scheme that divides the active users into groups of variable size according to their received powers using clustering algorithm. Numerical examples illustrate that the BER performance of the proposed HIC scheme is superior to that of the conventional HIC in the case of the imperfect power control or no power control.

I. 서론

대역 확산 기술에 기반을 둔 부호분할 다중접속 방식은 이동통신에서 중요한 다중접속 방식으로 이용되고 있다. 그 중에서도 직접수열 부호분할 다중접속 방식이 기존의 IS-95와 GSM(Global Service for Mobile Communication) 이동 시스템의 한계를 극복하기 위한 제 3세대 이동 통신 사업인 IMT-2000에

서 다중화 방식으로 제안되고 있다.

직접수열 부호분할 다중접속 방식은 다수의 사용자가 시간과 주파수를 공유하고 서명 수열로 사용자가 구분된다. 그러나, 사용자 서명 수열 사이에 완전한 직교성이 이루어지지 않아 서명 수열 사이의 교차상관이 존재하게 되고, 이것으로 인한 사용자 사이의 간섭이(Multiple access interference, MAI) 시스템의 용량 및 성능을 제한하게 된다. 또한 사용

* 한국과학기술원 전자전산학과 전기 및 전자 전공 (crystal@csplab.kaist.ac.kr),

** 한국과학기술원 전자전산학과 전기 및 전자 전공 (hmkim@csplab.kaist.ac.kr)

논문번호 : K01090-0228, 접수일자 : 2001년 2월 28일

* 본 연구는 KAIST MICROS 센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의하여 수행되었습니다.

자들의 신호 전력의 차이로 인해 발생하는 근원 문제가 (Near-far problem) 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 사용자 사이의 간섭을 제거할 수 있는 다중 사용자 검파 방법이 제안되었다^[1]. 이 검파 방식 중 최적 검파기는 성능은 뛰어나나 복잡도가 사용자 수에 따라 지수적으로 증가하므로 실제 구현은 불가능하다. 따라서 성능은 떨어지더라도 복잡도가 작은 준 최적 검파기들이 연구되어 왔다^{[2][3]}. 준 최적 검파기 중 간섭제거 검파기는 선형 검파기와 달리, 교차상관 행렬에 대한 역행렬 계산을 필요로 하지 않아 선형 검파기보다 구현이 쉽고, 그 구조에 따라 순차적 간섭제거 (Successive interference cancellation, SIC) 기법과 병렬 간섭제거 (Parallel interference cancellation, PIC) 기법으로 나뉘어진다^{[4]-[6],[8]-[10]}. 모든 사용자의 신호를 크기 순으로 정렬한 뒤, 순차적으로 추정해 다시 생성한 뒤, 수신 신호에서 제거해 나가는 순차적 간섭제거 기법은 좋은 비트 오류율을 (Bit error rate, BER) 나타내지만, 사용자 수에 비례하여 지연 시간이 증가한다. 병렬 간섭제거 기법은 병렬적으로 모든 사용자의 신호를 한꺼번에 추정하여, 자기 신호를 제외한 나머지 사용자의 다시 생성된 신호를 수신 신호에서 제거한 뒤 검출하는 방식으로, 지연 시간이 짧은 반면, 좋은 성능을 얻기 위해서는 다단으로 (Multi stage) 사용해야 하므로 복잡도가 높아지는 단점이 있다. 또한, 근원 문제를 해결해 주는 전력 제어가 완벽한 경우는 병렬 간섭제거 기법이 순차적 간섭제거보다 좋은 성능을 보이고, 전력 제어가 완벽하지 못한 경우에는 순차적 간섭제거 기법이 병렬 간섭제거보다 더 좋은 성능을 나타낸다^[9].

이런 순차적 간섭제거와 병렬 간섭제거의 특징들의 좋은 점을 고려하여 사용자를 몇 개의 그룹으로 나누어, 동일 그룹에 속하는 사용자들은 병렬 간섭제거 기법을 적용하고 각 그룹들 사이에는 순차적 간섭제거 기법을 적용하는 방식이 혼합형 간섭제거 (Hybrid interference cancellation, HIC) 혹은 그룹형 순차적 간섭제거 (Group-wise successive interference cancellation, G-SIC) 기법이다^{[11]-[13]}. 기존의 혼합형 간섭제거 기법은 그룹에 속하는 사용자 수가 동일하게 그룹을 만들는데, 전력 제어를 하지 않거나 전력 제어가 완벽하지 않은 상황에서, 동일 그룹에 속하는 사용자들의 신호 크기 차이가 크게 날 경우, 그룹에서 신호가 작은 사용자들은 보다 많은 사용자 사이의 간섭의 영향을 받게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 사용자들의 신호 크기를

고려해서 동일 그룹 안에 존재하는 사용자들의 신호 크기의 차이가 적도록 그룹을 만들어야 한다.

이 논문에서는 혼합형 간섭제거 기법에서 그룹 내 신호 크기의 차이가 미치는 영향을 분석하고, 그림화 알고리즘을 이용해 그룹에 속하는 사용자들의 신호 크기 차이가 적도록 그룹을 형성하는 개선된 혼합형 간섭제거 기법을 제안하였다. 동일 그룹 수일 경우 제안된 기법과 기존의 기법의 성능을 비트 오류율을 지표로 하여 성능이 개선됨을 확인하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전체 시스템 모형과 다중 사용자 간섭제거 검파기의 혼합형 간섭제거 기법에 대한 기존 연구를 요약하였다. 3장에서는 기존의 혼합형 간섭제거 기법에 대한 분석과 그룹을 만드는데 이용되는 알고리즘에 대해 소개한다. 그리고 그림화 알고리즘을 혼합형 간섭제거 기법에 적용한 새로운 기법을 제안한다. 4장에서는 모의 실험과 분석을, 그리고 마지막 5장에서는 결론을 내렸다.

II. 시스템 모형

1. 수신 신호 모형

이산 신호 동기 직접수열 부호분할 다중접속 시스템에서 역 방향 링크를 생각한다. 동기화된 채널에서는 모든 사용자들의 모든 비트가 동시에 수신기에 들어오므로 다른 심볼 구간 신호들은 서로 독립적이다. 따라서 한 심볼 구간에 대해서만 고려한다. 그리고, 데이터 변조 방식은 이진 위상 천이 키잉 (Binary phase shift keying, BPSK) 방식을 사용하며, 모든 반송파의 위상은 0이라 가정한다. 또한, 별도의 채널 추정에 의해 사용자들의 신호 크기는 알고 있다고 가정한다. K명의 사용자 신호들이 평균이 0이고 분산이 $\sigma^2 = N_0/2$ 인 가산성 백색 정규 잡음이 (Additive white gaussian noise, AWGN) 더해지는 채널을 통과한다고 가정하면, 칩 단위로 표본화 한 수신 신호는 식 (2.1)과 같다.

$$r = SWd + n, \quad r \in R^N \quad (2.1)$$

여기서 S, W, d, n은 아래와 같이 정의된다.

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_K) \in \left\{ \frac{-1}{\sqrt{N}}, \frac{1}{\sqrt{N}} \right\}^{N \times K}$$

$$s_k^T s_k = 1, \quad s_i^T s_j = \rho_{ij}$$

$$W = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_K) \in R^{K \times K}$$

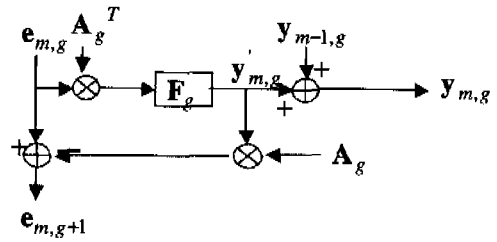
$$d = (d_1, d_2, \dots, d_K)^T \in \{-1, 1\}^K$$

$$n : \text{AWGN}$$

즉, k 번째 사용자의 정규화 된 서명 수열 벡터를 s_k , 신호 크기를 w_k , 그리고 데이터 비트를 d_k 라 할 때, 행렬과 벡터를 이용해 수신 신호를 나타내면, 수신 신호는 각 열의 성분이 사용자의 서명 수열로 이루어진 행렬인 S 와 사용자들의 신호 크기를 나타내는 대각행렬 W , 데이터 벡터를 나타내는 d 의 곱에 잡음 벡터 n 이 더해진 형태이다. 이 때 N 은 처리 이득을 나타내고 K 는 전체 사용자 수를 나타낸다.

2. 혼합형 다중 사용자 간섭제거 검파기

다른 사용자의 신호를 추정하여 다시 발생 시킨 신호 성분을 수신 신호에서 제거한 뒤, 자기 신호를 결정하는 다중 사용자 검파 방식을 간섭제거 기법이라 한다. 그 구조에 따라 순차적 간섭제거와 병렬 간섭제거로 나눌 수 있고, 이 두 기법을 혼합하여 이용하는 것이 혼합형 간섭제거이다. 이 방식은 먼저 사용자를 몇 개의 그룹으로 나누어서, 각 그룹에 속하는 사용자들은 병렬 간섭제거 기법을 적용하고, 각 그룹 사이에는 순차적 간섭제거 기법을 적용하는 간섭제거 방식이다. 혼합형 간섭제거 기법의 체계적인 설명을 위해, 먼저 모든 간섭제거 기법의 기본 요소인 간섭제거 단위를 (Interference cancellation unit, ICU) 정의한다^{[12][13]}. 사용되는 변수는 x_g 형태의 변수인 경우 아래 첨자는 그룹 인수를 나타내고, $x_{m,g}$ 형태인 경우에는 첫 번째 아래 첨자는 단을 나타내는 인수, 다음의 아래 첨자는 그룹을 나타내는 인수로 정의한다. 그림 1은 m 번째 단의 g 번째 그룹에 대한 간섭제거 단위를 나타낸다. 입력은 이전 그룹에 속하는 사용자들의 추정 신호가 수신 신호에서 제거된 나머지 신호 성분인 $e_{m,g}$ 이다. 현 그룹에 속하는 사용자들의 신호 추정이 정합 여파기 A_g 에 의해 이루어진다. 변환행렬 F_g 는 그룹에 속하는 사용자들의 병렬 간섭제거 방식을 나타낸다. 다음으로, 병렬 간섭제거 기법에 의해 간섭을 제거한 뒤의 사용자들의 신호는 $y_{m,g}$ 로 나타내며, 각 단에서 그룹 내 사용자들의 신호 판정은 이전 $m-1$ 단에서의 결과인 $y_{m-1,g}$ 에 $y_{m,g}$ 을 더한 것을 연 판정 (Soft decision) 한다. 다음 그룹에 들어가는 입력은 병렬 간섭제거에 의해 간섭제거 된 추정 신호를 다시 발생시켜서 현 그룹의 입력에서 빼준 신호가 된다. 각 그룹에 해당되는 간섭제거 단위에서는 동일한 과정이 수행된다.



$e_{m,g}$: input residual to the g th group at the m th stage
 A_g : signature sequence subset for the g th group
 F_g : transform matrix for the g th group

그림 1. 간섭제거 단위

그룹 수가 G 인 경우, 이 간섭제거 단위를 이용한 다단 혼합형 간섭제거기의 전체 블록 구성은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 각 그룹에 속하는 사용자의 수를 1로 할 경우는 다단의 혼합형 간섭제거 기법은 일반적인 다단의 순차적 간섭제거 기법과 같고, 각 그룹에 속하는 사용자 수가 전체 사용자 수와 같은 경우는 일반적인 다단의 병렬 간섭제거와 같게 된다.

위에서 설명된 내용을 행렬과 벡터를 이용해 정리해 보면 다음과 같다.

K 명의 사용자를 가정하고 각 그룹의 사용자 수는 동일하게 $u=K/G$ 로 한다. 첫 단의 경우, 첫 번째 간섭제거 단위의 입력 신호 $e_{1,1}$ 은 수신 신호인 r 과 같고, 이전 단에 의해 판정된 값이 없으므로 $y_{0,g}=0$ 이다. I 는 크기가 $N \times N$ 인 단위행렬 이고, 변환행렬 F_g 은 크기가 $u \times u$ 이며, 내림차순 행렬 곱을 $\prod_{j=k}^1 X_j = X_k X_{k-1} \dots X_1$ 라 하면, 각 그룹의 입력 신호와 그룹에 속하는 사용자들에 대한 신호 판정은 일반화된 식 (2.2)와 식 (2.3)으로 나타낸다.

$$e_{1,g} = \prod_{j=g-1}^1 (I - A_j F_j A_j^T) r = \Phi_{g-1} r \tag{2.2}$$

$$y_{1,g} = y_{1,g} = F_g A_g^T e_{1,g} = F_g A_g^T \Phi_{g-1} r \tag{2.3}$$

이 때 $\Phi_{g-1} = \prod_{j=g-1}^1 (I - A_j F_j A_j^T)$, $F_g = \sum_{j=0}^1 (I - A_j^T A_j)^j$ 으로 정의된다. 위의 식 (2.3)을 살펴보면, 첫 단의 혼합형 간섭제거 기법은 수신 신호에 선형 여파기를 (Linear filter) 나

타내는 행렬을 곱해주는 것과 같음을 알 수 있다. 모든 그룹들의 판정 값을 한 벡터를 이용해 표시하면 식 (2.4)와 같다.

$$y_1 = [y_{1,1}^T, y_{1,2}^T, \dots, y_{1,G}^T]^T \quad (2.4)$$

그리고, 각 그룹의 선형 여파기를 나타내는

$G_{1,g} = [F_g \ A_g^T \ \phi_{g-1}]^T$ 를 크기가 $N \times K$ 행렬 $G_1 = [G_{1,1}, G_{1,2}, \dots, G_{1,G}]$ 로 나타내면, 식 (2.4)는 식 (2.5)로 다시 쓸 수 있다.

$$y_1 = G_1^T r \quad (2.5)$$

첫 단과 동일한 과정이 다단에서도 반복된다. 다만, 다단일 경우는 첫 단을 통과한 나머지 신호들이 같은 과정을 반복하므로, 각 간섭제거 단위에서의 신호 판정은 사용자들의 남아 있는 신호 성분의 추정이며, 그 성분의 제거가 각 간섭제거 단위에서 수행된다. 따라서 다단에서의 신호 판정은 이전 단에서의 판정 값과 현재 단의 값의 합을 이용하게 된다. 번째 단 그룹에 대해 일반화하여 정리하면, 식 (2.6)과 식 (2.7)이 된다.

$$e_{m,g} = \phi_{g-1} \ \phi_G^{m-1} r \quad (2.6)$$

$$y_{m,g} = y_{m,g} + y_{m-1,g} = F_g \ A_g^T \ \phi_{g-1} \sum_{i=0}^{m-1} \phi_G^i r \quad (2.7)$$

그리고, 식 (2.5)와 같이 m 번째 단의 판정 값들도 각 그룹의 선형 여파기를 나타내는

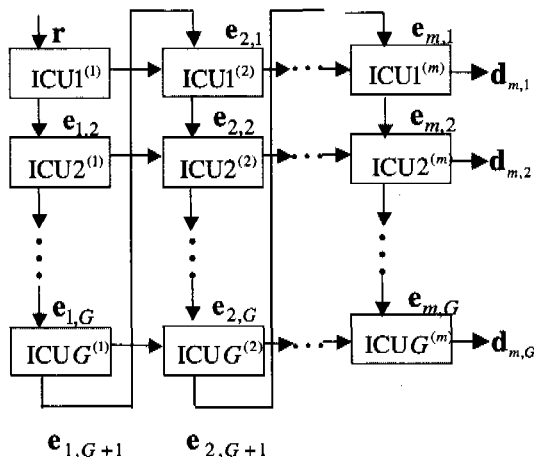


그림 2. 다단 혼합형 간섭제거기의 구조

$G_{m,g} = \sum_{i=0}^{m-1} (\phi_G^T)^i \phi_{g-1}^T A_g F_g^T$ 들로 이루어진 $N \times K$ 크기의 행렬

$G_m = [G_{m,1}, G_{m,2}, \dots, G_{m,g}]$ 을 이용해 식 (2.8)로 나타낼 수 있다.

$$y_m = G_m^T r \quad (2.8)$$

위의 모든 혼합형 간섭제거 과정을 정리해보면, 사용자들의 서명 수열 정보와 그룹 정보를 이용해 선형 여파기를 구성할 수 있고, 수신 신호를 이 선형 여파기를 통과시켜 각 사용자들의 신호를 결정한다.

III. 혼합형 간섭제거 기법의 성능 분석과 제안한 혼합형 간섭제거 기법

1. 혼합형 간섭제거 기법의 SINR

전력 제어가 완벽하지 않거나 전력 제어를 하지 않아 사용자들의 신호 크기 사이에 차이가 있을 경우, 그 차이가 성능에 미치는 영향을 분석해본다. 이를 위해 먼저 혼합형 간섭제거 기법의 각 그룹 내부의 방식인 병렬 간섭제거 기법에 있어, 전력 제어가 완벽하지 않거나 이루어지지 않은 경우 사용자가 신호 크기 차이가 성능에 미치는 영향을 분석한다. 다음으로 혼합형 간섭제거 기법에서 그룹에 속하는 사용자 신호 크기의 차이가 성능에 미치는 영향을 분석한다. 분석할 성능의 지표는 복잡하여 수식적으로 유도가 힘든 비트 오류율 대신, 동일한 의미와 경향을 갖는 신호 대 간섭과 잡음의 비를 (Signal to interference and noise ratio, SINR) 이 용한다.

참고 문헌 [5]에 의하면 전력 제어가 완벽한 경우 병렬 간섭제거 기법이 순차적 간섭제거 기법보다 성능이 좋다. 이는 사용자들의 신호 크기가 비슷할수록 병렬 간섭제거의 성능이 좋은 것을 의미한다. 다음에서 사용자들 신호와 사용자들 평균 신호 크기와의 차이에 대하여 성능이 변화하는 것을 수식적으로 유도하도록 한다.

먼저 연 판정을 하는 병렬 간섭제거 기법은 수신 신호를 선형 여파기를 통과시키는 것과 동일하다^[10]. 따라서, 병렬 간섭제거 기법의 검파기 출력은 식 (3.1)과 같다.

$$y = G^T r = \left(\sum_{i=1}^2 (I - S^T S)^{i-1} S^T \right) r \quad (3.1)$$

k번째 사용자의 출력 y_k 에 대해 식 (3.1)을 다시 쓰면 식 (3.2)와 같다.

$$y_k = \left(\mathbf{s}_k^T - \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki} \mathbf{s}_i^T \right) \times \left(w_k d_k \mathbf{s}_k + \sum_{j=1, j \neq k}^K w_j d_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n} \right) = w_k d_k \left(1 - \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki}^2 \right) + \left(\sum_{j=1, j \neq k}^K w_j d_j \rho_{kj} - \sum_{j=1, j \neq k}^K w_j d_j \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki} \rho_{ij} \right) \right) + \left(\mathbf{s}_k^T - \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki} \mathbf{s}_i^T \right) \mathbf{n} \quad (3.2)$$

식 (3.2)의 첫 번째 항은 k번째 사용자의 신호 성분을 나타내고, 두 번째 항은 간섭제거 뒤에 남아 있는 다른 사용자들에 의한 간섭 성분을, 그리고, 나머지 항은 선형 여파기를 거친 잡음을 나타낸다. k번째 사용자의 신호 대 간섭과 잡음 비를 구해보면 식 (3.3)과 같다.

$$SINR_k = \frac{E \left[\left(w_k d_k \left(1 - \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki}^2 \right) \right)^2 \right]}{E \left[\left(\left(\sum_{j=1, j \neq k}^K w_j d_j \rho_{kj} - \sum_{j=1, j \neq k}^K w_j d_j \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki} \rho_{ij} \right) \right) + \left(\mathbf{s}_k^T - \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki} \mathbf{s}_i^T \right) \mathbf{n} \right)^2 \right]} \quad (3.3)$$

동일 확률의 BPSK 변조일 때 신호 전력에 해당하는 분자를 계산해보면 식 (3.4)로 나타난다.

$$E \left[\left(w_k d_k \left(1 - \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki}^2 \right) \right)^2 \right] = w_k^2 \left(1 - \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki}^2 \right)^2 \quad (3.4)$$

다른 사용자들의 남아 있는 간섭과 잡음 전력을 나타내는 분모의 경우는, 신호와 잡음이 서로 독립적이고 사용자들의 신호도 서로 독립적이므로, 식 (3.5)와 식 (3.6)의 합으로 나타난다.

$$E \left[\left(\sum_{j=1, j \neq k}^K w_j d_j \rho_{kj} - \sum_{j=1, j \neq k}^K w_j d_j \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki} \rho_{ij} \right) \right)^2 \right] = \sum_{i=1, i \neq k}^K w_i^2 \times \left(\rho_{ki} - \left(\sum_{j=1, j \neq k}^K \rho_{ki} \rho_{ij} \right) \right)^2 \quad (3.5)$$

$$E \left[\left(\mathbf{s}_k^T - \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki} \mathbf{s}_i^T \right) \mathbf{n} \mathbf{n}^T \left(\mathbf{s}_k - \sum_{j=1, j \neq k}^K \rho_{kj} \mathbf{s}_j \right) \right] = \sigma^2 \left(1 - 2 \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki}^2 + \sum_{i=1, i \neq k}^K \sum_{j=1, j \neq k}^K \rho_{ki} \rho_{kj} \rho_{ij} \right) \quad (3.6)$$

식 (3.4)와 식 (3.5) 그리고 식 (3.6)을 이용해 식 (3.3)을 나타내면 다음과 같다.

$$SINR_k = \frac{w_k^2 \left(1 - \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki}^2 \right)^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K w_i^2 \alpha_i^2 + \sigma^2 \gamma} = \frac{\left(1 - \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki}^2 \right)^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \frac{w_i^2}{w_k^2} \alpha_i^2 + \frac{\sigma^2 \gamma}{w_k^2}} \quad (3.7)$$

여기서 α_i 와 γ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_i = \rho_{ki} - \sum_{j=1, j \neq k}^K \rho_{kj} \rho_{ij} \quad \gamma = 1 - 2 \sum_{i=1, i \neq k}^K \rho_{ki}^2 + \sum_{i=1, i \neq k}^K \sum_{j=1, j \neq k}^K \rho_{ki} \rho_{kj} \rho_{ij}$$

평균 신호 크기와 사용자들 신호 크기의 차이가 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 평균 신호 크기 \bar{w} 와 사용자 신호 크기 w_k 를 다음과 같이 정의하자.

$$w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_k \quad w_k = \bar{w} + \delta_k$$

이 때 신호 크기에 의하여 성능에 미치는 영향을 분석하므로, 서명 수열 사이의 교차상관 값은 신호 대 간섭과 잡음 비에 영향을 미치지 않도록 잘 선택되었다고 가정한다. 다음으로 신호 대 간섭과 잡음 비의 분모에 나타나는 k번째 사용자와 다른 사용자들의 전력 비의 합을 살펴보면 식 (3.8)과 같다.

$$\sum_{i=1, i \neq k}^K \left(\frac{w_i}{w_k} \right)^2 = \frac{1}{w_k^2} \left\{ (K-1) \bar{w}^2 + \sum_{i=1, i \neq k}^K \delta_i^2 - 2 \bar{w} \delta_k \right\} \quad (3.8)$$

따라서, 식 (3.7)의 신호 대 간섭과 잡음 비는 $\sum_{i=1, i \neq k}^K \delta_i^2 - 2 \bar{w} \delta_k$, 즉, 평균 신호와의 차이 제곱에 반비례하는 것을 알 수 있다. 그러므로, 병렬 간섭 제거 기법의 경우 사용자들 신호 크기가 평균 신호 크기에 대해 변화량이 클수록 신호 대 간섭과 잡음 비가 낮음을 알 수 있다. 이로써 전력 제어가 완벽할 경우, 병렬 간섭제거 기법의 성능이 좋은 것을 설명할 수 있다.

다음으로 각 그룹에 속하는 사용자 수를 u 로 동일하게 하는 기존의 혼합형 간섭제거 기법의 g 번째 그룹에 속하는 사용자 신호 크기의 차이가 신호 대 간섭과 잡음 비에 미치는 영향을 분석해 보도록 한다. 전체 사용자 신호의 크기가 내림차순으로 정렬되어 있고, 사용자를 G 개의 그룹으로 나눈다고 하면, g 번째 그룹의 사용자는 다음과 같다.

$$w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_k, u = K/G$$

$$u(g-1) + 1 \leq k \leq ug$$

II장 2절에 의하면 g 번째 그룹의 간섭제거 단위에 의한 과정을 선형 여파기로 나타낼 수 있으므로, g 번째 그룹의 선형 여파기 출력 값은 병렬 간섭제거 방식과 유사하게 식 (3.9)로 나타낸다.

$$y_g = \mathbf{G}_g^{-1} \mathbf{e}_g \quad (3.9)$$

$$= \left(\prod_{i=1}^g (\mathbf{I} - \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i) \right)^{i-1} \mathbf{A}_g^T \mathbf{e}_g$$

병렬 간섭제거와의 차이점은 수신 신호 \mathbf{r} 대신 남아 있는 나머지 수신 신호 \mathbf{e}_g 가 입력이 되고, 전체 서명 수열 행렬 \mathbf{S} 대신 그룹에 속하는 사용자의 서명 수열 행렬 \mathbf{A}_g 가 쓰인다는 점이다. 그러므로, 병렬 간섭제거에서와 동일하게 g 그룹에 속하는 사용자 k 의 선형 여파기 출력 값은 식 (3.10)과 같다.

$$y_{g,k} = \left[\mathbf{s}_k^T - \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} \rho_{ki} \mathbf{s}_i^T \right]$$

$$\times \left[w_k d_k \mathbf{s}_k + \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} w_i d_i \mathbf{s}_i \right]$$

$$+ \sum_{i=ug+1}^K w_i d_i \mathbf{s}_i + \Delta \mathbf{I} + \mathbf{n} = w_k d_k$$

$$\times \left(1 - \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} \rho_{ki}^2 \right) +$$

$$\sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} w_i d_i \left(\rho_{ki} - \left(\sum_{j=u(g-1)+1, j \neq k}^{ug} \rho_{kj} \right) \right.$$

$$\times \left. \mathbf{s}_j^T \right) \mathbf{s}_i + \sum_{i=ug+1}^K w_i d_i \left(\rho_{ki} - \left(\sum_{j=u(g-1)+1, j \neq k}^{ug} \rho_{kj} \right) \right.$$

$$\times \left. \mathbf{s}_j^T \right) \mathbf{s}_i + \sum_{i=ug+1}^K w_i d_i \left(\rho_{ki} - \left(\sum_{j=u(g-1)+1, j \neq k}^{ug} \rho_{kj} \right) \right.$$

$$\times \left. \mathbf{s}_j^T \right) \left[\mathbf{s}_k^T - \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} \rho_{ki} \mathbf{s}_i^T \right]$$

$$\times (\Delta \mathbf{I} + \mathbf{n}) = w_k d_k \left(1 - \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} \rho_{ki}^2 \right) + \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} w_i d_i$$

$$\times \left(\rho_{ki} - \sum_{j=u(g-1)+1, j \neq k}^{ug} \rho_{kj} \rho_{ij} \right) + \sum_{i=ug+1}^K w_i d_i$$

$$\times \left(\rho_{ki} - \sum_{j=u(g-1)+1, j \neq k}^{ug} \rho_{kj} \rho_{ij} \right) + \left[\mathbf{s}_k^T - \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} \rho_{ki} \mathbf{s}_i^T \right] (\Delta \mathbf{I} + \mathbf{n}) \quad (3.10)$$

식 (3.10)의 첫 번째 항은 k 번째 사용자의 신호 성분을 나타내고, 두 번째 항은 동일 그룹에 속해 있는 사용자들의 간섭제거 뒤 남아 있는 간섭 신호 성분이며, 세 번째와 네 번째 항은 각각 g 그룹 다음의 그룹에 포함되는 사용자들에 의한 간섭 신호와 g 그룹 이전의 그룹에 포함되는 사용자들의 남아있는 간섭 신호 성분 $(\Delta \mathbf{I})$ 과 잡음의 합을 나타낸다. g 그룹보다 이전 그룹에서는 대부분의 간섭이 제거되었다고 가정하면 식 (3.10)으로 나타나는 k 번째 사용자 신호의 신호 대 간섭과 잡음 비를 동일 과정을 통해 구해보면 식 (3.11)이 얻어진다.

$$SINR_k = w_k^2 \left(1 - \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} \rho_{ki}^2 \right)^2$$

$$/ \left\{ \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} w_i^2 \tilde{\alpha}_i^2 + \sum_{i=ug+1}^K w_i^2 \times \left(\tilde{\alpha}_i^2 + \sigma^2 \tilde{\gamma} \right) \right\} \quad (3.11)$$

$$= \left(1 - \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} \rho_{ki}^2 \right)^2$$

$$/ \left\{ \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} \frac{w_i^2}{w_k^2} \tilde{\alpha}_i^2 + \sum_{i=ug+1}^K \frac{w_i^2}{w_k^2} \tilde{\alpha}_i^2 + \frac{\sigma^2 \tilde{\gamma}}{w_k^2} \right\}$$

여기에서 $\tilde{\alpha}_i$ 와 $\tilde{\gamma}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{\alpha}_i = \rho_{ki} - \sum_{j=u(g-1)+1, j \neq k}^{ug} \rho_{kj} \rho_{ij}$$

$$\tilde{\gamma}_i = 1 - 2 \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} \rho_{ki}^2$$

$$+ \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{ug} \sum_{j=u(g-1)+1, j \neq k}^{ug} \rho_{ki} \rho_{kj} \rho_{ij}$$

식 (3.11)을 살펴보면, 병렬 간섭제거 기법의 신호 대 간섭과 잡음 비를 나타내는 식 (3.7)과 유사하다. 다만, 간섭 신호 전력에 g 그룹에 속하는 다른 사용자와 g 그룹 다음의 그룹에 속하는 사용자의 성분이 있는 점이 다르다. g 그룹에 속하는 사용자 신호 크기의 차이에 의한 영향을 살펴보고자 하므로, g 그룹 다음의 사용자 신호 크기는 고려하지 않는다고 하면, 혼합형 간섭제거 기법은 병렬 간섭제거 기법과 동일하게 같은 그룹에 속하는 사용자들의 전력

비 $\sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{u(g-1)+g} \left(\frac{w_i}{w_k} \right)^2$ 에 반비례 하는 것을 알 수 있다. 그룹 사용자 신호 크기를 $w_i = \overline{w_g} + \delta_{gi}$ 로 평균과 차이 값의 합으로 정의하면, 같은 그룹에 속하는 사용자들의 전력 비는 다음의 식 (3.12)로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{u(g-1)+g} \left(\frac{w_i}{w_k} \right)^2 = \frac{1}{w_k^2} \left((u-1) \overline{w_g}^2 + \sum_{i=u(g-1)+1, i \neq k}^{u(g-1)+g} \delta_{gi}^2 - 2 \overline{w_g} \delta_{gi} \right) \quad (3.12)$$

이 관계식에 따르면, 동일 그룹에 속하는 사용자들의 사용자들의 신호 크기 차이가 클수록 신호 대 간섭과 잡음 비가 떨어지는 관계임을 알 수 있다. 다른 그룹에 대해서도 각 그룹 평균 신호 크기와 평균과의 차이를 이용해 동일한 형태로 나타낼 수 있다. 다음으로 식 (3.11)을 살펴보면, 각 그룹 신호들의 합으로 식이 표현되고, 각 그룹의 신호는 평균 신호와 그 차이의 합수로 나타내어지므로, 각 그룹의 평균 신호와의 차이가 크면 신호 대 간섭과 잡음 비가 떨어지는 것을 알 수 있다. 그러므로 혼합형 간섭제거 기법의 경우, 각 그룹에 속하는 사용자들의 신호 크기 차이가 작은 값이 되도록 그룹을 만들어야 하는 것을 알 수 있다.

2. 제안한 혼합형 간섭제거 기법

III장 1절에서 성능 분석을 통해 동일 그룹에 속해 있는 사용자들의 신호 크기의 차이가 작을수록 혼합형 간섭제거 기법의 성능이 좋음을 알 수 있었다. 기존의 혼합형 간섭제거 기법은 사용자의 신호 크기를 고려하지 않고 그룹마다 동일한 사용자 수를 가지도록 그룹을 만들어 간섭을 제거하였다. 따라서, 전력 제어가 완벽하지 않거나 또는 전력 제어를 하지 않아 사용자들의 신호 크기가 동일하지 않은 경우에는, 기존의 혼합형 간섭제거 기법은 동일 그룹에 속하는 사용자들의 신호 크기가 차이가 클 경우 전체적으로 성능이 나빠진다. 그러므로 전력 제어가 완벽하지 않거나 또는 전력 제어를 해주지 않아 사용자들의 신호 크기가 동일하지 않을 경우, 사용자들의 신호 크기를 고려하여 그룹을 만들어 간섭제거를 하면 성능이 좋아질 수 있다.

K-평균 그룹화 알고리즘은 그룹에 속하는 원소들이 중심값 (또는 평균)과의 차이가 적도록 그룹을 만드는 알고리즘이다. 이 그룹화 알고리즘은 기준 함수로 제곱 오류의 합을 (Sum of squared errors)

정의한다. n개의 표본 x_1, x_2, \dots, x_n 으로 이루어진 집합 S가 K개 부분 집합 s_1, s_2, \dots, s_K 로 분할 되었다고 가정하자. n_i 를 부분 집합 s_i 의 표본들의 개수, m_i 를 s_i 에 속하는 표본들의 평균값이라고 하면

$$m_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in s_i} x \quad (3.13)$$

로 나타나고, 이 때 제곱 오류의 합은 식 (3.14)으로 정의된다.

$$J_e = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in s_i} \|x - m_i\|^2 \quad (3.14)$$

한편, 주어진 부분 집합 s_i 에 대하여 평균값 m_i 는 $\sum_{x \in s_i} \|x - m_i\|^2$ 를 최소화하는 의미에서 s_i 의 대표값 또는 중심값이라고 할 수 있다. 따라서 J_e 는 n개의 표본들이 중심값에 대하여 얼마나 다른지를 나타내는 척도가 된다. J_e 는 집합이 어떻게 분할되었는지에 따라 달라지게 되는데, 최적의 분할을 얻기 위해서는 이 값을 최소화해야 한다. 그리고 n개 표본을 가지는 전체 집합을 K개의 부분 집합으로 분할하는데 있어 최적의 결과를 얻기 위해서는 분할 가능한 모든 경우를 고려해야 한다. 그 경우의 수는 K^n 이므로 분할되는 모든 경우의 수를 고려한다는 것은 n이 작은 경우를 제외하고는 불가능하기 때문에, 정의한 기준함수 값을 조금씩 줄여 나가는 반복적 최적화 방법 (Iterative optimization) 사용한다. 즉, 먼저 초기 상태에서 임의의 분할로 나누고 중심값을 찾는다. 이들 중심값을 기준으로 재분할한다. 이 때, 각 표본들은 거리가 가까운 중심값 쪽으로 할당된다. 재분할이 이루어지면 중심값이 바뀌면서 기준 함수 J_e 값은 줄어든다. 이런 식으로 계속 반복해 나갈 경우 J_e 는 최소값으로 수렴하게 되므로 최적 분할을 구할 수 있다. 그러나 반복적 최적화 방법은 각 단계별 최적은 (Local optimum) 보장 할 수 있지만 전체적 최적은 (Global optimum) 보장하지 못한다. 즉, 국소 최소 지점으로 (Local minimum) 수렴할 수도 있기 때문에 시작점에 따라 다른 결과를 얻을 수도 있는 한계점이 있다. 정리하면, K-평균 그룹화 알고리즘은 반복적 최적화 방법으로 중심값들에 대한 표본들의 차이가 가장 적도록 그룹을 만들어 준다. 따라서 K-평균 그룹화 알고리즘의 특성을 이용해 사용자들의

신호 크기를 고려하여 그룹을 만들어 간섭제거를 하는 개선된 혼합형 간섭제거 기법을 제시한다.

그림 3에 제안한 개선된 혼합형 간섭제거 기법의 시스템을 나타내었다. 기존의 혼합형 간섭제거 기법과 달리 신호 크기를 고려하여 주어진 사용자들의 그룹을 결정하는 부분을 첨가하였다.

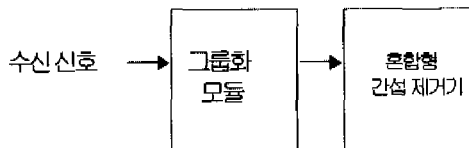


그림 3. 제안된 혼합형 간섭제거 기법 시스템의 구조

전력 제어가 완벽하지 않거나 전력 제어를 하지 않아 기존의 혼합형 간섭제거 기법으로 그룹을 나누면 동일 그룹에 속하는 사용자들 사이에 신호 크기 차이가 크게 나는 경우에, 새로운 그룹화 알고리즘을 이용해 새롭게 그룹이 이루어졌다고 가정하자. 각 그룹의 사용자 수는 각각 u 명이고, $g+1$ 그룹에 속하는 k 번째 사용자가 $g+1$ 그룹의 평균 신호 크기보다 훨씬 큰 값을 가진다고 하자. 사용자들은 내림차순으로 정렬되어 그룹이 이루어지므로, k 번째 사용자는 $ug+1$ 번째 사용자라고 할 수 있다. 이와 같은 상황을 그림으로 나타내면 그림 4와 같다.

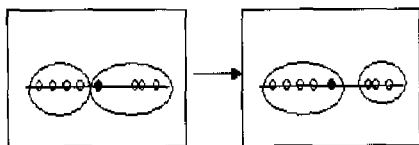


그림 4. 새로운 그룹화의 보기

이렇게 사용자의 그룹간 이동이 발생하면, 신호 대 간섭과 잡음 비의 변화가 생기는 사용자는 g 그룹에 속하는 사용자와 $g+1$ 번째 그룹에 속하는 사용자들이다. 실제적으로 비트 오류율 성능의 경우, 그룹을 새로 만들어 혼합형 간섭제거 기법을 적용하는 것은 그룹에 속하게 되는 사용자들의 변화로 인해, 먼저 A_g 와 A_{g+1} 이 바뀌게 되고, 그로 인해 수신 신호가 통과하는 선형 여파기 G_m 의 변화를 가져와 성능 변화가 생긴다.

IV. 모의 실험과 분석

III장에서 제안한 시스템의 성능을 확인하기 위해,

사용자들의 신호 크기가 서로 다른 근원 환경과 사용자의 신호 크기가 동일한 완벽하게 전력 제어가 된 환경에서 모의 실험을 하도록 한다. 먼저 전력 제어를 하지 않지 않거나 완벽하게 되지 않아 사용자들의 수신 신호 크기가 서로 다른 근원 환경을 가정한다. 처리 이득은 32이고 사용자의 신호 크기에 의한 영향만을 고려하고자 하므로, 상관 값이 작은 코드 수열을 이용하였다. 그림 5는 혼합형 간섭제거 기법의 성능을 다른 간섭제거 기법과 비교한 그림이다. 사용자 수는 12인 경우이고, 2 stage로 구성되었으며, 나누어 주는 그룹 수는 4이다. c-hic는 기존의 그룹에 속하는 사용자 수를 동일하게 하는 방식을 나타내고, p-hic는 사용자들의 신호 크기가 비슷하도록 그룹을 나눈 제안한 방식을 나타낸다. 그리고 제안된 그룹화 방식에서 초기의 그룹은 기존의 동일 사용자수로 나눈 것을 이용한다. 사용자들의 신호 크기가 차이가 나는 상황이므로, 순차적 간섭제거 기법이 성능이 가장 좋음을 확인할 수 있다. 그리고 다음으로 그룹 별로 순차적 간섭제거가 이용되는 혼합형 간섭제거 기법이 성능이 좋음을 알 수 있고, 신호 크기에 대한 고려 없이 간섭제거를 하는 병렬 간섭제거 기법이 성능이 가장 나쁨을 알 수 있다. 혼합형 간섭제거 기법들 중에는 동일 그룹의 신호 크기 차이가 적도록 하는 제안된 방식이 성능이 더 좋음을 알 수 있다. 20dB를 지나면서 기존의 혼합형 간섭제거는 성능이 수렴되어 더 증가되지 않는 반면, 제안한 혼합형 간섭제거의 경우 순차적 간섭제거 성능에 근접해 가는 것을 확인할 수 있다. 순차적 간섭제거와 제안한 혼합형 간섭제거의 경우는 20dB 이상에서 성능의 수렴이 일어난다.

그림 6은 혼합형 간섭제거 기법에서 나누어주는 그룹 수에 따른 성능의 변화를 보여준다. 신호 크기 사이에 차이가 있으므로 순차적 간섭제거 방식에 근접할수록 성능이 좋다. 따라서 그룹 수가 증가할수록 성능이 좋아짐을 알 수 있다. 그림에서는 12명의 사용자를 2그룹과 4그룹으로 나누는 경우를 비교하고 있다. 4그룹으로 크기를 고려하여 그룹을 나누는 경우는 성능이 수렴하기 전인 12dB 정도에서 2dB 정도 성능이 더 좋다. 2그룹으로 나누는 경우는 4그룹으로 나누는 경우보다는 작은 1dB 정도의 개선이 있다.

그림 7은 사용자 수가 변함에 따른 성능의 변화이다. 이 때 그룹 수는 4이다. 사용자 수가 증가함에 따라 제안된 혼합형 간섭제거 기법에 의해 얻어지는 성능의 개선 정도가 작아짐을 알 수 있고, 전

체적으로 사용자 수가 증가함에 따라 성능이 떨어 짐을 알 수 있다.

다음으로 전력 제어가 완벽하게 이루어져 사용자 들의 수신 신호 크기가 모두 동일한 환경을 가정한

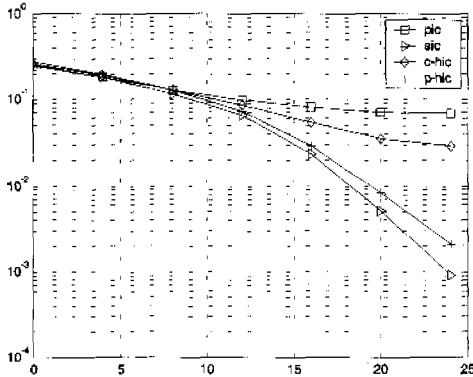


그림 5. 간섭 제거 기법들 사이의 성능 비교 (N=32, K=12, G=4)

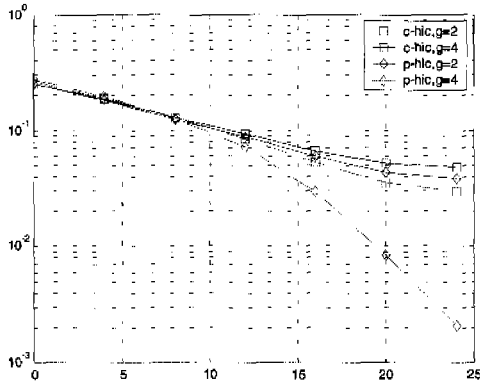


그림 6. 그룹 수에 따른 BER 변화 (N=32, K=12, G=2, 4)

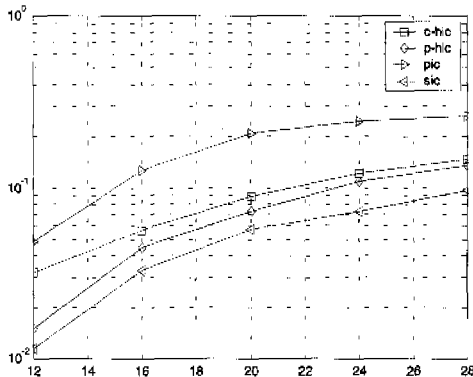


그림 7. 사용자 수에 따른 BER 변화 (N=32, G=4)

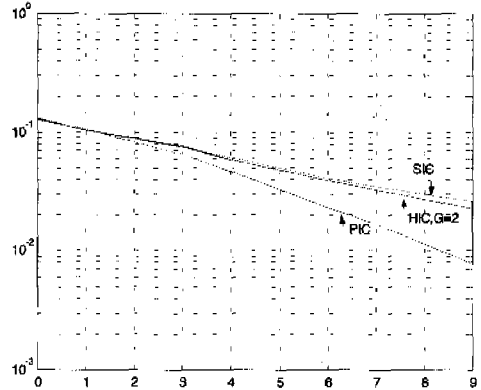


그림 8. 전력 제어가 완벽한 경우 간섭 제거 기법들 사이의 성능 비교 (N=32, K=8, G=2)

다. 근원 환경과 동일하게 처리 이득은 32이고 코드 수열을 사용한다. 사용자 수는 8명을 가정했다. 완벽하게 전력 제어가 된 경우, 참고 문헌 [5]에서 볼 수 있듯이 병렬 간섭제거 성능이 혼합형 간섭제거 성능 보다 좋음을 알 수 있다. 그리고 그룹을 나누어 간섭제거를 하는 혼합형 간섭제거 방식이 순차적 간섭제거 기법의 성능에 더 가깝고, 동일 그룹 수를 가정하면 기존의 방식과 제안된 방식은 동일한 방식이 되며 같은 성능으로 나타난다.

V. 결론

그룹 안의 사용자 수를 동일하게 그룹을 나누는 기존의 혼합형 간섭제거 방식은, 전력 제어가 완벽하지 않거나 전력 제어를 하지 않을 경우, 동일 그룹에 속하는 사용자들 사이의 큰 신호 크기 차이에 의해 성능이 떨어질 수 있다. 이 논문에서는 먼저 혼합형 간섭제거 기법은 동일 그룹의 사용자들 신호 크기의 차이가 클수록 성능이 떨어짐을 수식적으로 보였다. 다음으로 그룹화 알고리즘을 이용하여 사용자들의 신호 크기를 고려하여 그룹을 만드는 새로운 혼합형 간섭제거 기법을 제안하였다. 모의 실험을 통해 같은 그룹 수로 사용자를 나누는 경우에, 동일 그룹에 속하는 사용자들 신호가 비슷한 크기를 갖도록 그룹을 만들어 혼합형 간섭제거 기법을 이용하는 것이 기존의 혼합형 간섭제거 기법보다 성능이 더 나아짐을 확인하였다.

참고 문헌

[1] S. Verdu, "Minimum probability of error for asynchronous gaussian multiple-access channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 32, pp. 85-96, Jan. 1986.

[2] R. Lupas and S. verdu, "Linear multi-user detectors for synchronous code-division multiple-access channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 35, pp. 123-136, Jan. 1989.

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

[4] R. Patel and J. M. Holtzman, "Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in a DS/CDMA system," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, pp. 796-807, June 1994.

[5] P. R. Patel and J. M. Holtzman, "Performance comparison of a DS/CDMA system using a successive interference cancellation (IC) scheme and a parallel IC scheme under fading," *IEEE ICC*, New Orleans, Louisiana, U.S.A., vol.1, pp. 510-514, May 1994.

[6] F. Wijk, G. M. J. Janssen, and R. Prasad, "Groupwise successive interference cancellation in a DS/CDMA system," *IEEE PIMRC*, Toronto, Canada, vol. 2, pp. 742-746, Sept. 1995.

[7] M. K. Varanasi and B. Aazhang, "Near-optimum detection in synchronous code-division multiple access systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 39, pp. 725-736, May 1991.

[8] D. Divsalar, M. K. Simon, and D. Raphaeli, "Improved parallel interference cancellation for CDMA," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, pp. 258-268, Feb. 1998.

[9] L. K. Rasmussen, T. J. Lim, and A. ?L. Johansson, "A matrix-algebraic approach to successive interference cancellation in CDMA," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, pp. 145-151, Jan. 2000.

[10] D. Guo, L. K. Rasmussen, S. Sun, and T. J. Lim, "A matrix-algebraic approach to linear parallel interference cancellation in CDMA," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, pp. 152-161, Jan. 2000.

[11] S. Sun, L. K. Rasmussen, H. Sugimoto, and T. J. Lim, "A hybrid interference canceller in CDMA," *IEEE ISSSTA*, Sun City, South Africa, vol. 1, pp. 150-154, Sept. 1998.

[12] S. Sun, L. K. Rasmussen, T. J. Lim, and H. Sugimoto, "A matrix-algebraic approach to linear hybrid interference cancellation in CDMA," *IEEE ICUPC*, Florence, Italy, vol. 2, pp. 1319-1323, Feb. 1998.

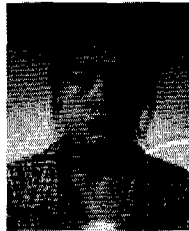
[13] A. L. Johansson and L. K. Rasmussen, "Linear group-wise successive interference cancellation in CDMA," *IEEE ISSSTA*, Sun City, South Africa, vol. 1, pp. 121-126, Sept. 1998.

[14] S. Verdu, *Multiuser Detection*, NJ: Cambridge Press, 1998.

[15] H. V. Poor and S. Verdu, "Probability of error in MMSE multiuser detection," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 43, pp. 858-871, May 1997.

정 수 정(Soojung Jung)

정희원

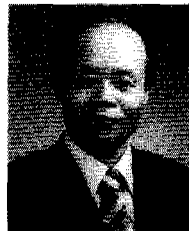


1998년 8월 : 고려대학교 전자
공학과 졸업
2001년 2월 : 한국과학기술원
전자전산학과 전기 및
전자 전공 석사
2001년 2월~현재 : 한국전자
통신연구원 연구원

<주관심 분야> 통신 이론, 이동 통신 기술 분야

김 형 명(Hyung-Muyung Kim)

정희원



1974년 2월 : 서울대학교 전자
공학과
1982년 4월 : 미국 Pittsburgh
대학 전기공학과 석사
1985년 12월 : 미국 Pittsburgh
대학 전기공학과 공학박사

1986년 4월~1992년 8월 : 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 조교수
1992년 9월~2000년 2월 : 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 부교수

2000년 3월~현재 : 한국과학기술원 전자전산학과
교수

<주관심 분야> 디지털 신호와 영상 처리, 다차원시
스템 이론, 비디오신호 전송, 통신 이론,
이동 통신 기술 분야