

Rayleigh 페이딩 채널에서 하이브리드 다중사용자 검파 알고리즘의 성능분석

강 환 민, 김 성 수, 김 신 원, 조 성 호

한양대학교 전자공학과

Performance Analysis of the Hybrid Multiuser Detection Algorithms in Rayleigh Fading Channel

Hwan-Min Kang, Sung-Soo Kim, Sin-Won Kim, Sung Ho Cho

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

Phone : 031-408-7969

E-mail : hmkang@casp.hanyang.ac.kr

요 약

현재 상용화된 CDMA (code division multiple access) 방식은 사용자가 증가함에 따라 다중 사용자 간섭 (multiuser interference)에 의해 통화품질 향상 및 가입자 수용 용량 증대에 한계를 가지고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 다양한 다중 사용자 간섭 제거 알고리즘이 제안되었다 [1-5]. 본 논문에서는 여러 형태의 알고리즘들 가운데, 역상관, successive interference cancellation(SIC), zero-forcing decision-feedback(ZF-DF) 검파기와 parallel interference cancellation(PIC) 검파기를 하이브리드 형태로 구성하는 방법을 제안하였고, 그에 따른 성능 분석 및 Rayleigh 페이딩 환경에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 성능비교를 하였다. 컴퓨터 모의실험 결과, 본 논문에서 제안한 3가지 하이브리드 검파기 모두 기존 검파기에 비하여 우수한 성능을 보였다.

1. 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 PCS가 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.

그러나 기존 CDMA 시스템은 다중 사용자에 의한

간섭의 영향 즉, MAI(multiple access interference)에 대해 적극적인 대책을 고려하지 않고 설계되었다. 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. 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[1]. 이것은 단일 사용자 검파에 비해 엄청난 성능 향상을 가지고 왔으나 복잡도 문제로 실제의 시스템을 구현하기가 불가능하여, 그 후 현재까지 [1]의 성능에 근접하려는 연구가 계속되고 있다[2-5].

본 논문에서는 이러한 다중 사용자 검파 알고리즘 가운데, 역상관 검파기(decorrelating detector, DD), SIC detector, ZF-DF 검파기와 PIC 검파기를 하이브리드 형태로 구성하는 방법을 제안하고, 성능 분석 및 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 비트 오류 확률을 비교하였다. II장에서는 수신 신호 모델에 대한 설명을 하였고, III장에서는 이러한 하이브리드 형태의 알고리즘에 대한 구조와 성능 분석을 하였다. IV장에서는 컴퓨터 모의 실험에 의한 하이브리드 알고리즘과 다른 알고리즘들과의 비교 결과를 나타내었고, 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 수신 신호 모델

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

$$y(t) = \sum_{k=1}^K |A_k| e^{j\phi_k} s_k(t) b_k + n(t) \quad (1)$$

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

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

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

$$y_k = \langle y, s_k \rangle = \int_0^T y(t) s_k^*(t) dt \quad (2)$$

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

$$y = RA b + n \quad (3)$$

K 사용자 시스템에서 벡터 b , n , y 는 각각 데이터, 잡음, 정합필터의 출력 신호를 가지고 있는 K 벡터이다. 그리고 행렬 A 는 사용자 수신 진폭이 대각행렬로 구성되어 있고, R 은 $K \times K$ 의 상관행렬이다.

III. 하이브리드 다중 사용자 검파 알고리즘

서론에서 언급했듯이 MAI를 제거하는 것이 시스템의 성능을 향상시키는 방법이다. 그래서 기존의 단일 사용자 검파를 하면서 MAI를 줄이는 방법으로는 크게 4가지로 분류 할 수가 있다. 첫째는 사용자마다 다르게 부여되는 확산 코드(spreading code)를 최대한 직교성(orthogonality)이 유지되도록 코드를 설계하는 것이다. 둘째는 이동국에서 기지국으로 들어오는 파워 제어를 잘하여 기지국에서 먼 거리에 있는 약한 신호를 정확하게 검파하는 방법이다. 셋째로, 여러 정정 기술을 도입하는 것이고, 마지막으로 안테나의 지역 할당을 분할하는 방법으로 수신되는 신호를 검파하는 것이다. 그러나 이 네가지 기술로는 미래의 이동 통신 영역을 발전 시키는데 한계가 있다. 이러한 한계들을 극복 할 수 있는 방법이 바로, 다중 사용자 검파 기술이다.

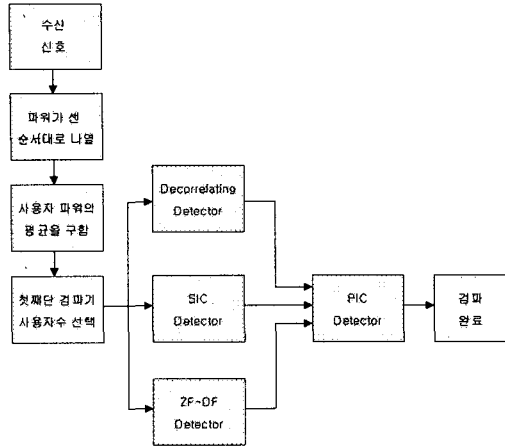
다중 사용자 검파 기술을 셀룰라 개념의 무선 통신에 응용할 경우에는 잊점과 함께 문제점도 가지고

있다. 먼저 주요 잊점으로는 주변 가입자 성분도 다중 사용자 검파 알고리즘에 포함시킴으로써 가입자 용량의 한계를 늘일 수 있고, uplink에서 처리 이득(processing gain)을 추가적으로 얻을 수 있으므로 uplink 스펙트럼을 좀 더 효율적으로 사용할 수 있으며, 파워 제어를 정확하게 해야 하는 부담을 줄일 수 있다. 따라서 이는 곧 이동국의 송신 출력을 좀 더 효율적으로 사용할 수 있도록 한다. 반면, 주요 단점으로는 다중 사용자 알고리즘이 성능을 제대로 발휘하기 위해서는 다른 셀로부터의 MAI 성분이 알고리즘에 포함되어야 하고, downlink에서의 이러한 알고리즘 적용은 단말기의 가격, 크기, 무게 등에 심각한 문제를 야기시킨다. 따라서 uplink인 기지국에서만 이 기술을 사용하는 것이 바람직하다.

다중사용자 검파 방법으로는 크게 두 범주로 나누어 보면 기존 검파기의 soft 출력이 선형 변환을 사용하여 MAI를 줄이는 선형 다중 사용자 검파 기법과 MAI를 직접 추정하여 이를 수신 신호에서 빼 줌으로써 간섭을 줄이는 감산 간섭 제거 기법(Subtractive Interference Cancellation Detection) 계열로 분류된다.

먼저, 선형 검파기에 속하는 역상관 검파기는 선형 연산자로서 상관행렬의 역행렬을 사용하는데, MAI를 완전히 제거할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 잡음 성분이 늘어나는 단점과 사용자가 많아지면 계산량이 복잡해지는 단점을 가지고 있다. 감산 간섭 검파기에 속하는 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. ZF-DF 검파기는 Cholesky decomposition에 의해 상관행렬을 하향 삼각행렬로 분리하여, 부분 역상관 기법과 연속 간섭 제거 기법을 동시에 사용하는 방법이다. 즉, 역상관 검파기와 SIC 검파기의 중간형태의 검파기라 할 수 있다. 그러나 사용자가 늘어날수록 복잡도가 늘어나고, 지연시간도 늘어난다. 마지막으로, PIC 검파기는 기존 정합필터의 출력 신호로부터 각 사용자의 신호를 재생하는 방법은 SIC 알고리즘과 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.

본 논문에서는 위에서 나열한 검파기들의 장단점을 조화롭게 결합하여 하이브리드 형태의 검파 기술을 제안하고, 그 방법은 그림 1과 같다.



(그림 1) 하이브리드 다중 사용자 알고리즘의 순서도

그림 1에서 알 수 있듯이, 수신된 신호를 파워가 센 순서대로 나열하고, 사용자 파워의 평균을 구해서 첫번째 검파기에서 사용할 사용자 수를 결정한다. 본 논문에서는 평균이상이 되는 것을 첫번째 검파기인 역상관 검파기, SIC 검파기, ZF-DF 검파기를 사용하였고, 나머지 사용자를 PIC 검파기로 처리하였다.

각각의 알고리즘에 대한 성능 분석을 위해 첫번째 단의 검파기에서 검파되는 사용자 수를 L 이라 하고, 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio, SNR)를 r_b 라 하고, 평균적인 신호 대 잡음 비(average SNR)를 \bar{r}_b [6]라 하자. 또한 $1 \leq i \leq L, L+1 \leq j \leq K$ 라고 하자.

1. 역상관 검파기 + PIC 검파기

역상관 검파기에 의해 정보 비트를 검파하는 방법으로는 식 (1)에 상관행렬의 역행렬을 곱하는 것으로 아래 식과 같이 쓸 수 있다[5].

$$\hat{b}_i = \text{sgn}(\text{Re} \{ (R^{-1} y)_i, e^{-j\theta} \}) \quad (4)$$

식 (4)를 기본으로 역상관 검파기와 PIC 검파기를 통과한 후의 신호대 잡음 비를 수식으로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$r_b = \frac{|A_i|^2 + |A_j|^2}{\sigma^2 R_u^{-1} + \beta \sum_j |A_j|^2} \quad (5)$$

식 (5)에서 분자에 있는 항은 각각 역상관 검파기와 PIC 검파기를 통과한 후의 원 신호에 대한 분산을 나타내고, 분모에 있는 첫번째 항은 상관행렬의 역행렬이 첨가된 잡음에 대한 분산[5]이고, 둘째 항은 PIC 검파기에 의해 발생된 잡음 성분이다. 여기서 β 는 $0 < \beta < 1$ 의 값을 갖는 PIC 검파기의 요소성분이다.

또한, A_i 가 Rayleigh 페이딩 분포를 이루므로 식 (5)에 대한 평균적인 신호 대 잡음비를 나타내면 아래

의 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{r}_b = \frac{E[|A_i|^2] + E[|A_j|^2]}{\sigma^2 R_u^{-1} + \beta \sum_j E[|A_j|^2]} = \frac{2A_i^2 + 2A_j^2}{\sigma^2 R_u^{-1} + 2\beta \sum_j A_j^2} \quad (6)$$

여기서 $E[|A_i|^2] = 2A_i^2$ 을 나타낸다.

2. SIC 검파기 + PIC 검파기

위에서 설명 했듯이 SIC 검파기를 통과하면 MAI 성분은 제거 되지만, 잡음 성분은 그대로 남아 있다. 그러므로 i 번째까지 제거된 후의 r_b 와 \bar{r}_b 을 각각 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{i+1} = \frac{|A_{i+1}|^2 + |A_j|^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=i+2}^K |A_k|^2 + \sigma^2 + \beta \sum_j |A_j|^2} \quad (7)$$

$$\bar{r}_{i+1} = \frac{2A_{i+1}^2 + 2A_j^2}{\frac{2}{N} \sum_{k=i+2}^K A_k^2 + \sigma^2 + 2\beta \sum_j A_j^2} \quad (8)$$

식 (7)에서 $N = T/T_c$ 이고, T_c 는 chip 주기를 나타낸다.

3. ZF-DF 검파기 + PIC 검파기

Cholesky decomposition에 의해서 식 (3)을 하향 삼각행렬 F 로 아래의 식과 같이 분해할 수 있다[5].

$$y = RAb + n = F^T FAb + n \quad (9)$$

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

$$F^{-T} \triangleq (F^T)^{-1} \quad (10)$$

ZF-DF 검파기의 사용자 정보 비트를 검파하는 방법은 아래의 식과 같이 행렬식으로 쓸 수 있다[5].

$$\hat{b} = \text{sgn}(F^{-T} y - (F - \text{diag}\{F\})A\hat{b}) \quad (11)$$

역상관 검파기에서와 마찬가지로, 성능 분석을 위해 r_b 와 \bar{r}_b 을 각각 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_b \geq \frac{|A_i|^2 F_u^2 + |A_j|^2}{\sigma^2 + \beta \sum_j |A_j|^2} \quad (12)$$

$$\bar{r}_b \geq \frac{2A_i^2 F_u^2 + 2A_j^2}{\sigma^2 + 2\beta \sum_j A_j^2} \quad (13)$$

위의 식 (12)과 (13)은 lower bound에 의한 분석이다.

4. Rayleigh 페이딩

신호의 세기가 Rayleigh 페이딩을 갖고, BPSK에 대한 비트 오류 확률은 [6]에 의해 아래의 식과 같이 쓸 수 있다.

$$P_b = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{r}_b}{1 + \bar{r}_b}} \right) \quad (14)$$

여기서 \bar{r}_b 은 식(6), (8), (13)을 나타낸다.

IV. 시뮬레이션 결과

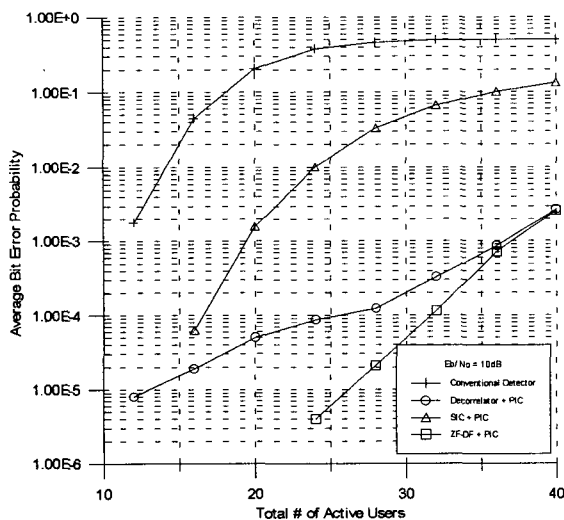
식 (1)의 수신 신호 모델을 기초로 하여 각각의 사용자가 100km/h로 움직이고, 전송 주파수가 1.8GHz인 Rayleigh 페이딩 채널에 의한 것이다.

그림 2에서는 기존 검파 방법과 제안된 다양한 하이브리드 검파기의 E_b/N_0 에 대한 10명의 사용자의 평균적인 비트 오류 확률을 나타내었다. 비트 오류 확률이 10^{-3} 에서 E_b/N_0 가 역상관+PIC, SIC+PIC, 그리고 ZF-DF+PIC 검파기는 각각 약 8.3dB, 7.2dB, 7.4dB를 나타내었다. 여기서 알 수 있듯이 비교적 적은 사용자에 대해서는 SIC+PIC와 ZF-DF+PIC 검파기가 역상관+PIC 검파기에 비해 성능이 우수함을 알 수 있다.

그림 3에서는 $E_b/N_0 = 10dB$ 일때 사용자 수에 따른 비트 오류 확률을 나타낸 것인데, 그림 2와는 달리 사용자수가 많아지면, SIC+PIC 검파기에 비해 역상관+PIC와 ZF-DF+PIC 검파기의 성능이 더 우수함을 알 수 있다.

V. 결론

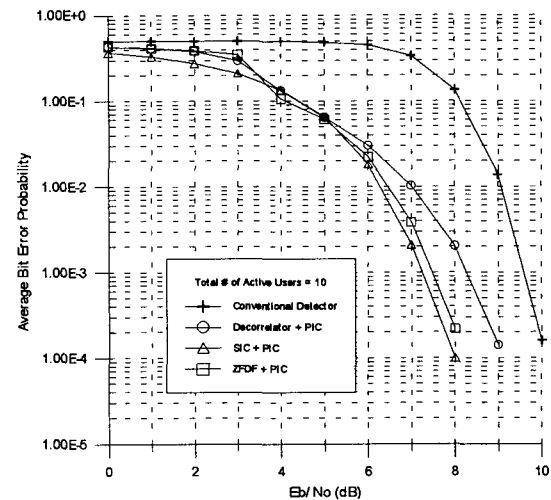
본 논문에서는 동기식 Rayleigh 페이딩 채널 환경에서의 다양한 형태의 하이브리드 다중 사용자 알고리즘



를 제안하였고, 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 SIC+PIC 검파기가 성능이 우수하고, 사용자가 늘어남에 따라 ZF-DF+PIC 검파기가 우수한 성능을 보인다. 시스템 측면에서 볼 때, 가입자의 용량, 지연시간, 복잡도 등을 복합적으로 고려하여 tradeoff 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.

참고문헌



- [1] S. Verdú, "Minimum Probability of Error for Asynchronous Gaussian Multiple-Access Channels," *IEEE Trans. On Information Theory*, vol. IT-32, pp. 85-96, Jan. 1986.
- [2] Shimon Moshavi, "Multi-User Detection for DS-SS Communications," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 34, pp.124-136, Oct. 1996.
- [3] R. Lupas and S. Verdú, "Near-Far Resistance of Multi-User Detectors in Asynchronous Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 38, no. 4, pp. 496-508, Apr. 1990.
- [4] P. Patel and J. Holtzman, "Analysis of a Simple Successive Interference Cancellation Scheme in a DS/SS System," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 796-807, June 1994.
- [5] Sergio Verdú, *Multiuser Detection*, Cambridge, 1998.
- [6] John G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 3rd Edition.

(그림 2) Hybrid 알고리즘의 성능비교

(그림 3) 사용자 수에 따른 비트 오류 확률