다중안테나 하향채널에서의 Vector Perturbation 기반 사용자 선택 기법

이 병 주^{a)}, 임 채 희^{a)}, 심 병 효^{a)†}

A Vector Perturbation Based User Selection for Multi-antenna Downlink Channels

Byungju Lee^{a)}, Chaehee Lim^{a)}, and Byonghyo Shim^{a)†}

요 약

최근 다중사용자 전송 기술에 관한 연구를 통하여 단일 사용자 MIMO 시스템에서의 선형적 용량증가가 다중사용자 MIMO 시스템에도 적용 될 수 있다는 것을 보여 주었다. 본 논문에서는 다중사용자 하향 채널에서 벡터 섭동기법을 활용하여 시스템의 신뢰도를 향상시키기 위한 기법을 제안한다. 제안하는 기법에서는 최대 다수의 사용자를 통신에 참여시키는 대신에, 이 중 일부를 다른 사용자의 서비스 품질(QoS)을 향상시키기 위하여 활용하는 것을 특징으로 하고 있다. 회생되는 사용자의 원 신호정보 및 섭동벡터를 적절히 이용할 때 비트에러율(BER)의 이득을 얻을 수 있다. 모의실험을 통해 표준화된 벡터섭동 기법에 비하여 제안하는 기법이 상당한 성능 이득을 가져오는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

Recent works on multiuser transmission techniques have shown that the linear growth of capacity in single user MIMO system can be translated to the multiuser MIMO scenario as well. In this paper, we propose a method pursuing performance gain of vector perturbation in multiuser downlink systems. Instead of employing maximum number of mobile users for communication, we use small part of them as virtual users for improving reliability of users participating communication. By controlling parameters of virtual users including information and perturbation vector, we obtain considerable improvement in the effective SNR, resulting in large gain in bit error rate performance. Simulation results on the realistic multiuser downlink systems show that the proposed method brings substantial performance gain over the standard vector perturbation with marginal overhead in computations.

Keyword : Multiuser MIMO, vector perturbation, non-integer least square, sphere encoding, virtual users

1. 서 론

최근 LTE-A 표준을 중심으로 다중사용자 다중안테나

(multi-user MIMO; MU-MIMO) 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. MU-MIMO시스템은 단일사용자 MIMO (single-user MIMO)시스템에 비해서 동일한 주파수대역에서 높은 채널 용량을 달성할 수 있기 때문에 높은 전송률이 요구되는 스마트폰 시대의 핵심기술로 특별히 많은 주목을 받고 있다. MU-MIMO시스템을 구현할 때의 문제점은 동시에 다수의 사용자에게 신호를 전송하는 관계로 사용자간 간섭(inter-user interference; IUI)이 발생하고 수

a) 고려대학교 정보통신대학 컴퓨터·전자통신공학과
School of Information and Communication

† 교신저자 : 심병효 (bshim@korea.ac.kr)

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2011-0012525), 지식경제 전력산업원천기술개발과제 (No. 2011T100100011), '2단계 BK21사업'의 지원을 받아 수행된 연구임.
· 접수일(2011년9월6일), 수정일(2011년11월10일), 게재확정일(2011년11월10일)

신기법으로 IUI를 제어하기 어렵다는 점이다. 이를 해결하기 위하여 송신단에서 간섭을 미리 제거하는 소위 프리코딩이라 불리는 부호화 기법이 많이 연구되고 있다. DPC (dirty paper coding) 기법을 사용할 때 다중사용자 하향링크에서 채널의 합 용량(sum rate)을 얻을 수 있다는 것은 잘 알려져 있다^{[1][2][3]}. 하지만 DPC 기법은 인코딩 및 디코딩의 복잡도로 인해 그다지 현실적이지 못하다^[4].

벡터 섭동(vector perturbation)기법은 DPC에서 얻는 합 용량의 상당한 부분을 얻어내는 점에서 주목을 받고 있다^[5]. 벡터 섭동기법은 정보 벡터에 적절하게 설계된 섭동 벡터를 더해 줌으로써 채널 역변환(channel inversion)이나 정규화된 채널 역변환(regularized channel inversion)과 같은 선형 프리코딩 방법에 비해 상당한 성능 향상을 이끌어 낼 수 있다. 이 기법은 하향채널의 용량을 최대화하는데 효율적이긴 하나, 4세대 혹은 그 이후의 이동통신 시스템에서 요구되는 서비스 품질(QoS)을 맞추기 위해서는 보다 높은 신뢰도가 요구된다.

본 논문에서는 사용자들의 QoS 향상을 위해, 합 용량의 최대화를 포기하는 대신 비트에러율(BER)로 표현되는 신뢰도의 향상을 위한 방법론을 제시한다. 구체적으로, outage 조건하에 있는 사용자를 나머지 사용자들의 신뢰도를 높이는데 이용한다. 이를 위하여 미사용 상태의 사용자들 중 신호 대 간섭 잡음비(SINR)를 향상시키기 위한 가상의 사용자(virtual user)를 활용하여 신뢰도를 높이게 된다. 제안된 기법은 채널 페이딩에 맞서서 신뢰도를 향상시킨다는 측면에서는 다이버시티 기법 [6]과 동일하지만, 구체적인 방법론에서는 매우 상이하다. 기존의 다이버시티 기법은 송신 신호의 공간이나 시간축에서 정보를 반복적으로 송신하는 데 비해서, 제안된 기법은 용량의 합에 영향을 많이 미치지 못하는 사용자들을 활용하여 신뢰도를 향상시킨다. 가상 사용자들은 궁극적으로 통신에 참여하지 않으므로, 이들의 정보벡터, perturbation 벡터, 채널벡터는 자유롭게 선택될 수 있으며 적절한 최적화 기법을 사용할 때 SINR을 향상시키는 데 큰 도움을 줄 수 있다. 요약하면 제안하는 기법을 사용하여 합 용량에서 약간의 손실을 허용하지만 높은 신뢰도 향상을 얻어낼 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 서론에 이어 II장

에서 시스템 모델과 이전의 연구를 간략하게 소개하고, III장에서는 본 논문에서 제안하는 사용자 선택 기반의 Vector perturbation을 기술한다. 그리고 IV장에서는 모의실험의 결과를 기술한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델 및 이전의 연구

다중사용자 하향링크 시스템에서는 기지국에서 M 개의 송신 안테나가 각각 하나의 수신 안테나를 사용하는 K 명의 사용자에게 정보를 전송하게 된다. Flat fading 채널이라는 가정 하에 수신신호벡터 $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_K]^T$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{H} = [h_1^T, \dots, h_K^T]^T$ 는 $K \times M$ 채널 행렬이고, $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_M]^T$ 는 유닛파워 조건($\mathbf{E} \|\mathbf{x}\|^2 = 1$)에 의해 정규화된 송신신호벡터이다. 그리고 $\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_K]^T$ 은 복소 가우시안 잡음벡터이다 ($\mathbf{n} \sim CN(0, \sigma_n^2 \mathbf{I})$).

송신신호를 생성할 때, 잘 알려진 채널 역변환 기법은 송신단에서 간섭을 제거하기 위해 정보벡터에 채널 행렬의 슈도 역행렬인

$$\mathbf{P} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (2)$$

을 곱한다. 채널 역변환의 약점인 잡음 증가 효과를 개선한 정규화된 채널 역변환 기법도 제안되었다 ($\mathbf{P} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \alpha \mathbf{I})^{-1}$)^[7]. 이 기법에서 기지국에서의 송신신호벡터 $\mathbf{x}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{P}\mathbf{s}}{\sqrt{\gamma}} = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{s} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_K]^T$ 는 QAM등의 변조를 거친 심볼벡터이고, $\gamma = \|\mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} (\mathbf{s} + \boldsymbol{\pi})\|^2$ 는 유닛파워 전송을

위해 이용된다. 수신신호벡터는

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \mathbf{H}\mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4)$$

로 표현된다. 여기서, $\alpha > 0$ 이고 $\alpha = 0$ 일 때는 정규화된 역변환은 채널 역변환으로 된다.

Vector perturbation기법에서는, 정보벡터 $\mathbf{s}$ 는 정수 offset벡터인 $\boldsymbol{\pi}$ 에 의해 섭동이 이루어져서, $\tilde{\mathbf{s}} = \mathbf{s} + \boldsymbol{\pi}$ 의 형태로 되는데 여기서 $\tau \in \mathbb{R}^+$, $\mathbf{l} = \mathbf{l}_{re} + \mathbf{l}_{im}$ ($\mathbf{l}_{re}, \mathbf{l}_{im} \in \mathbb{Z}^K$)는 K 차원 벡터이다^[5]. 정규화된 채널 역변환 기법과 비슷하게, 이 방식에서의 송신신호는

$$\mathbf{x} = \frac{\tilde{\mathbf{P}}\mathbf{s}}{\sqrt{\gamma}} = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \alpha \mathbf{I})^{-1} \tilde{\mathbf{s}} \quad (5)$$

로 표현되며, 여기서 $\gamma = \|\tilde{\mathbf{P}}\mathbf{s}\|^2$ 이며, $\mathbf{l}$ 은 γ 를 최소화 하기 위한 값으로 선택되어,

$$\mathbf{l} = \arg \min_{\mathbf{l}} \|\mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \alpha \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{s} + \boldsymbol{\pi}')\|^2 \quad (6)$$

로 표현된다. 이 최소 제곱문제는 스피어 인코더 [5]라고 불리는 최소 근접 격자점을 찾는 방법을 통해 해결될 수 있다. Vector perturbation기법은 γ 를 최소화하기 위한 $\mathbf{l}$ 을 $\{\mathbf{s} + \boldsymbol{\pi} | \mathbf{l} \in \mathbb{Z}^K + j\mathbb{Z}^K\}$ 로부터 찾기 때문에, Vector perturbation의 γ 값은 정규화된 채널 역변환 기법에 비해 작거나 같다 ($\mathbf{l} = \mathbf{0}$). $\mathbf{l}_{re}, \mathbf{l}_{im}$ 는 정수이기 때문에, 수신단에서 modulo 연산 [5]에 의해 $\boldsymbol{\pi}$ 항을 제거할 수 있고 이때의 수신신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}' = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} (\sqrt{\gamma} \mathbf{y} \bmod \tau) + \mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (7)$$

III. 사용자 선택에 기반한 Vector perturbation

비록 Vector perturbation기법을 이용하면 하향링크 채널의 최대 용량에 가까운 비트에러율을 얻을 수 있지만, 특정

사용자가 심한 fading에 의해 채널 행렬이 ill-conditioned과 같은 실제 시나리오에서는 γ 가 모든 사용자의 신호 대 잡음비에 동일하게 영향을 미치기 때문에 전체 사용자들이 성능 저하를 겪게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 우리는 통신에 실제 참여하는 사용자(활성 사용자)들의 성능 향상을 위해 가상의 사용자를 이용하는 방법을 제안한다. 가상 사용자의 성능은 우리의 관심사가 아니기 때문에 활성화된 사용자의 성능 이득 최대화를 위하여 가상 사용자의 파라미터들을 자유롭게 조정하도록 한다. 제안된 기법과 기존의 Vector perturbation의 차이점은 1) 특정 사용자의 채널이 ill-conditioned 상태일 때 가상의 사용자를 선택하는 점, 2) 가상의 사용자의 채널벡터를 이용하여 채널 행렬 $\mathbf{H}$ 를 좋은 상태(well-conditioned)로 설정하는 것, 3) 가상 사용자의 비정수 perturbation 입력신호 $\mathbf{s}_v + \boldsymbol{\pi}_v$ 를 수정된 스피어 인코더를 이용하여 설정하는 것으로 정리할 수 있다.

1. 가상 사용자 선택

이 절에서는 가상 사용자 선택에 대하여 알아본다. 적어도 한 사용자의 상태가 outage 조건인 경우(ill-conditioned일 경우), 가상 사용자를 선택하고 프리코딩에 사용될 채널 행렬을 구성한다. 첫 단계에서는, 각 사용자들에 대해 outage 조건을 시험해보고 활성 사용자수 N_a ($N_{a,\min} \leq N_a \leq K$)를 정한다. 여기서 $N_{a,\min}$ 은 시스템이 요구하는 최소한의 활성 사용자 수를 말한다. 다음 단계에서는 $N_a < K$ 인 경우 (가상 사용자가 적어도 1명 이상 선택된 경우), $K - N_a$ 가상 채널을 생성하여 outage 조건 하에 있는 사용자들의 채널 행렬을 대신한다.

구체적으로 살펴보면, 첫 단계에서는 사용자가 outage 상태에 있는지의 여부를 체크한다. 용량 threshold값이 ϵ 로 주어졌을 때, 사용자의 용량 R 이 ϵ 보다 작은 경우 사용자가 ϵ -outage 상태에 있다고 말한다. 사용자 j 의 용량은 $R_j = \log(1 + \text{SNR}_j)$ 로 주어진다. 모든 사용자가 ϵ -outage가 아닌 경우 모두 활성사용자가 된다 ($N_a = K$). 그렇지 않으면 최대 $K - N_{a,\min}$ 만큼의 가상 사용자를 선택한다.

적어도 한 명의 가상 사용자가 선택되면, 채널 행렬 $\mathbf{H}$ 를

구성할 때 고려할 점은 가상 사용자 k 의 채널 $\mathbf{h}_k$ 를 어떻게 설정하는지 이다. $\mathbf{h}_k$ 를 랜덤으로 생성하지 않고 통신에 참여하지 않는 사용자들의 행렬을 후보로 둔다. 즉, $\mathbf{H}$ 의 희생 사용자들의 채널 행이 후보들 중 선택된 채널 행으로 대체된다. 새롭게 생성된 채널 행렬을 원래의 채널 $\mathbf{H}$ 와 구분하기 위해 $\tilde{\mathbf{H}}$ 로 두었다. $\tilde{\mathbf{H}}$ 의 활성 사용자의 채널에 해당하는 N_a 행들은 $\mathbf{H}$ 의 N_a 행들과 같고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H(\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{N_a} & \mathbf{0} \\ \mathbf{X}_0 & \mathbf{X}_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{I}_{N_a}$ 의 사이즈는 $N_a \times N_a$, $\mathbf{X}_0$ 의 사이즈는 $(K-N_a) \times N_a$, $\mathbf{X}_1$ 의 사이즈는 $(K-N_a) \times (K-N_a)$ 이며, $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_0 \ \mathbf{X}_1]$ 는 실제 활성 사용자 $y_j (j=1, \dots, N_a)$ 의 수신신호에는 영향을 주지 않는 행들이다. 위의 $\tilde{\mathbf{H}}$ 을 이용해 프리코딩을 하면 활성 사용자의 수신벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_a = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \tilde{\mathbf{s}} + \mathbf{n} \quad (9)$$

이제 가상 사용자 선택에 대해 본격적으로 살펴보기

로 한다. 제안된 기법의 γ 를 $\gamma' = \|\tilde{\mathbf{H}}^H(\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1}\tilde{\mathbf{s}}\|^2 = \tilde{\mathbf{s}}^H(\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1}\tilde{\mathbf{s}}$ 로 두고 이 γ' 를 최소화하기 위한 $\tilde{\mathbf{H}}$ 를 찾는다. 이를 위해 $\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H = \mathbf{Q}\Lambda\mathbf{Q}^H$ 의 고유값 분해를 이용하면, γ' 는 $\gamma' = \tilde{\mathbf{s}}^H\mathbf{Q}\Lambda^{-1}\mathbf{Q}^H\tilde{\mathbf{s}}$ 이 되고 $\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{Q}^H\tilde{\mathbf{s}}$ 라 하면 γ' 은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma' = \tilde{\mathbf{v}}^H \Lambda^{-1} \tilde{\mathbf{v}} = \sum_{i=1}^M \frac{|\tilde{v}_i|^2}{\lambda_i} \quad (10)$$

여기서 λ_i 는 $\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H$ 의 i 번째 고유값이고, $\tilde{v}_i = \mathbf{q}_i^H \tilde{\mathbf{s}}$ 는 $\tilde{\mathbf{v}}$ 의 i 번째 원소이다 ($\mathbf{q}_i$ 는 $\mathbf{Q}$ 행렬의 i 번째 열에 해당한다). 위 식에서 $0 < \lambda_i \leq 8M$ [8]이고 $\sum_{i=1}^M |\tilde{v}_i|^2 = \|\tilde{\mathbf{s}}\|^2$ 이기 때문에 [5], $|\tilde{v}_i|^2$ 간의 변화는 λ_i 간의 변화에 비해 상당히 작기 때문에 γ' 를 최소화 하는 $\tilde{\mathbf{H}}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{H}} = \arg \min_{\tilde{\mathbf{H}}} \sum_i \frac{1}{\lambda_i} \quad (11)$$

여기서 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 는 j 번째 후보 행렬이고 $\lambda_i^{(j)}$ 는 $\tilde{\mathbf{H}}_j \tilde{\mathbf{H}}_j^H$ 행렬의

그림 1. 4×4 다중사용자 다중안테나 채널에서 기존의 Vector perturbation과 제안된 기법에서 수식 (12), (13)을 각각 적용했을 경우의 $E[\gamma]$

Fig. 1. $E[\gamma]$ of the proposed method (using (12) and (13) and $N_{a,\min} = 3$) as well as standard vector perturbation for 4×4 multiuser downlink system

i 번째 고유값이다. 위의 식을 통해 $\tilde{\mathbf{H}}$ 을 찾기 위해서는 각 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 후보의 $\tilde{\mathbf{H}}_j \tilde{\mathbf{H}}_j^H$ 행렬의 고유값들을 일일이 계산해야 하기 때문에 상당한 부담이 된다. 이러한 부담을 줄이기 위해 $\lambda_1 < \dots < \lambda_M$ 일 때, $\sum \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_1} (1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + \dots + \frac{\lambda_1}{\lambda_M}) \approx \frac{1}{\lambda_1}$ 임을 이용하여 근사하면

$$\tilde{\mathbf{H}} = \arg \max_{\tilde{\mathbf{H}}_j} \lambda_{\min}^{(j)} \quad (12)$$

와 같이 나타낼 수 있어 계산 부담을 상당히 줄일 수 있다.

그림 1을 통해 확인해 보면 낮은 신호 대 잡음비에서는 (12)를 이용한 경우 γ' 의 기대값이 (13)을 이용한 경우에 비해 작긴 하지만 신호 대 잡음비가 증가함에 따라 점점 근접해 감을 확인 할 수 있다. 이는 이러한 근사화가 중간 및 고 신호 대 잡음비에서 효율적임을 말해 준다.

2. 개선된 스피어 인코딩

기존의 Vector perturbation 기법에서의 스피어 인코딩 (sphere encoding)은

$$\min_{\mathbf{l} \in \mathbb{U}^M} \|\mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1} (\mathbf{s} + \boldsymbol{\pi})\|^2 \quad (13)$$

를 풀어야 한다. 여기서 $\mathbb{U} = \mathbb{Z} + j\mathbb{Z}$ 인데, 대부분의 경우 실수 및 허수의 $\mathbf{l}$ 값이 0이나 1이기 때문에 실제로 $\mathbb{U} = \{z + jz | z = 0, \pm 1\}$ 가 이용된다 (± 2 의 확률은 굉장히 작다 [9]). 제안한 기법에서 $\tilde{\mathbf{s}}$ 는 $\tilde{\mathbf{s}} = \mathbf{s} + \boldsymbol{\pi} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_a \\ \mathbf{s}_v \end{bmatrix} + \tau \begin{bmatrix} \mathbf{l}_a \\ \mathbf{l}_v \end{bmatrix}$

로 표현할 수 있다. 여기서 $\mathbf{s}_a$ 의 사이즈는 $N_a \times 1$ 이고 $\mathbf{s}_v$ 의 사이즈는 $(K - N_a) \times 1$ 이다. 제안된 기법의 스피어 인코딩에서는 가상 사용자 선택을 통해 이루어지기 때문에 스피어 인코딩을 위해 $\mathbf{l}$ 이외에 추가적인 제어 변수 $\mathbf{s}_v$ 를 가지게 되어 최적화 문제는

$$\min_{\mathbf{l} \in \mathbb{U}^M, \mathbf{s}_v \in \mathbb{V}^{N_v}} \|\tilde{\mathbf{H}}^H (\tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1} (\mathbf{s} + \boldsymbol{\pi})\|^2 \quad (14)$$

가 된다. 여기서 $\mathbb{V}^{N_v}$ 는 가상 사용자에 대한 변조 집합이다.

이를 일반적 최소자승법으로 변환하기 전에 $\mathbf{s} + \boldsymbol{\pi}$ 을

$$\mathbf{s} + \boldsymbol{\pi} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_a \\ \mathbf{s}_v \end{bmatrix} + \tau \begin{bmatrix} \mathbf{l}_a \\ \mathbf{l}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_a \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \tau \begin{bmatrix} \mathbf{l}_a \\ \mathbf{s}_v / \tau + \mathbf{l}_v \end{bmatrix} \quad (15)$$

과 같이 재배열한다. 여기서 $\mathbf{s}_a$ 와 $\mathbf{l}_a$ 는 각각 활성 사용자의 정보 및 perturbation 벡터이다. $\tilde{\mathbf{l}}_v = \frac{\mathbf{s}_v}{\tau} + \mathbf{l}_v$ 로 나타

내면 (16)식은 $\mathbf{s} + \boldsymbol{\pi} = \mathbf{s}' + \boldsymbol{\pi}'$ 로 다시 쓸 수 있고, 여기서 $\mathbf{s}' = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_a \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$ 와 $\mathbf{l}' = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_a \\ \tilde{\mathbf{l}}_v \end{bmatrix}$ 이다. $\mathbf{r} = \tilde{\mathbf{H}}^H (\tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1} \mathbf{s}'$, $\mathbf{B} = -\tau \tilde{\mathbf{H}}^H (\tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1}$ 로 나타내면 (15)는

$$\gamma' = \min_{\mathbf{l}_a \in \mathbb{U}^{N_a}, \tilde{\mathbf{l}}_v \in \tilde{\mathbb{V}}^{N_v}} \|\mathbf{r} - \mathbf{B} \mathbf{l}'\|^2 \quad (16)$$

이 된다. $\mathbf{l}_a$ 에 대해서는 정수 조건이 부과되지만, 가상 사용자의 심볼은 관심사가 아니므로 $\tilde{\mathbf{l}}_v$ 에 대해서는 이러한 조건이 필요하지 않다. 따라서, γ' 을 최소화하기 위해서는 N_v 차원의 복소평면 ($\tilde{\mathbb{V}} = \mathbb{C}$)에서 $\tilde{\mathbf{l}}_v$ 를 선택하면 되고, $\mathbb{U}^{N_a}$ 에서 $\mathbf{l}_a$ 를 선택하면 된다. 최종적 문제는 다음과 같은 정수와 비정수 최소자승문제가 된다.

$$\gamma' = \min_{\mathbf{l}_a \in \mathbb{U}^{N_a}, \tilde{\mathbf{l}}_v \in \mathbb{C}^{N_v}} \|\mathbf{r} - \mathbf{B}_1 \mathbf{l}_a - \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{l}}_v\|^2 \quad (17)$$

여기서 $\mathbf{B}_1 \in \mathbb{C}^{M \times N_a}$ 과 $\mathbf{B}_2 \in \mathbb{C}^{M \times N_v}$ 는 $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \mathbf{B}_2]$ 의 분할된 부분 행렬이다.

위 문제는 2단계로 나누어 풀게 된다. 첫 단계에서는 일반적 최소자승법을 이용하여 각 $\mathbf{l}_a$ 에 대해 최적의 $\tilde{\mathbf{l}}_v$ 를 계산하는 것이다. 그러면, $\tilde{\mathbf{l}}_v$ 는 $\mathbf{l}_a$ 의 함수, 즉 $\tilde{\mathbf{l}}_v = f(\mathbf{l}_a)$ 로 표현된다. $g(\mathbf{l}_a) = \min_{\tilde{\mathbf{l}}_v \in \mathbb{C}^{N_v}} \|\mathbf{r} - \mathbf{B}_1 \mathbf{l}_a - \mathbf{B}_2 f(\mathbf{l}_a)\|^2$ 와 같이 나타내면 (18)는

$$\gamma' = \min_{\mathbf{l}_a \in \mathbb{U}^{N_a}} g(\mathbf{l}_a) \quad (18)$$

으로 된다. 두 번째 단계에서는 정수 최소자승문제를 스

피어 인코딩으로 풀게된다. 특히, $\mathbf{l}_a$ 가 주어진 경우(즉, $\mathbf{r} - \mathbf{B}_1 \mathbf{l}_a$ 가 고정된 경우) 비정수 최소자승문제의 최적의 해는 최소 놈(norm) 해 [10]로 다음과 같이 된다.

$$\tilde{\mathbf{l}}_v = (\mathbf{B}_2^H \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{B}_2^H (\mathbf{r} - \mathbf{B}_1 \mathbf{l}_a) \quad (19)$$

(20)을 (18)에 넣고 정리하면 식 (21)을 얻는다.

$\Gamma = \mathbf{I} - \mathbf{B}_2 (\mathbf{B}_2^H \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{B}_2^H$ 라 하면 (21)은

$$\gamma' = \min_{\mathbf{l}_a \in \mathbb{U}^{N_a}} \|\Gamma \mathbf{r} - \Gamma \mathbf{B}_1 \mathbf{l}_a\|^2 \quad (21)$$

이 된다. 이 때 $\Gamma \mathbf{r}$ 은 $\mathbf{r}$ 을 $T = \text{span}\{\mathbf{b}_{2,i}\} (\mathbf{b}_{2,i}$ 는 $\mathbf{B}_2$ 의 i 번째 열벡터)의 상보부분공간에 투영시킨 것이다. $\Gamma \mathbf{B}_1 \mathbf{l}_a$ 도 비슷한 방식으로 해석할 수 있다. $\mathbf{r}$ 과 $\mathbf{B}_1 \mathbf{l}_a$ 벡터들을 상보부분공간 T 에 투영시킨 후 $\mathbf{l}_a$ 를 찾기 때문에 제안된 방법에서 탐색공간은 K 차원의 정수 격자에서 N_a 차원의 정수격자로 축소된다 ($N_a < K$). 이렇게 하면 γ' 값이 감소되는 것에 외에 추가적으로 복잡도가 감소되는 이점이 있다. (22)에서 $\bar{\mathbf{r}} = \Gamma \mathbf{r}$, $\bar{\mathbf{B}}_1 = \Gamma \mathbf{B}_1$ 로 두면,

$$\gamma' = \min_{\mathbf{l}_a \in \mathbb{U}^{N_a}} \|\bar{\mathbf{r}} - \bar{\mathbf{B}}_1 \mathbf{l}_a\|^2 \quad (22)$$

이 된다. 이러한 과정은 표준 최소자승문제에 해당하므로 γ' 과 $\mathbf{l}_a$ 는 스피어 인코딩을 통해 얻을 수 있다. $\mathbf{l}_a$ 가 얻어지면 이 $\mathbf{l}_a$ 를 (20)에 넣어 $\tilde{\mathbf{l}}_v$ 를 얻을 수 있다.

3. 오류 확률 및 합 용량 분석

기존의 Vector perturbation기법에 비해 제안된 기법이 가지는 장점을 분석하기 위해 QPSK변조를 이용한 오류 확률을 고려하기로 한다. 제안된 기법과 기존의 Vector perturbation기법의 오류 확률을 각기 P_e' 및 P_e 라 하면 둘 사

이의 관계는 $P_e' = \beta P_e$ 로 쓸 수 있는데 여기서 β 는 감쇄상수로 오류의 개선 효과를 나타낸다. QPSK 변조의 오류 확률은 $Q(\sqrt{2SNR})$ 로 나타낼 수 있기 때문에 P_e 와 P_e' 는 각기 $Q(\sqrt{\frac{c}{\gamma}})$ 와 $Q(\sqrt{\frac{c}{\gamma'}})$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 $c = \frac{2}{\sigma_n^2}$ 이다. Q-function의 특성 [11]을 이용하여 $P_e \leq \frac{1}{2} \exp(-\frac{c}{2\gamma})$ 와 $P_e' > \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\gamma'}{c} (1 - \frac{\gamma'}{c}) \exp(-\frac{c}{2\gamma'})$ 를 얻는다. 이 두 식을 $P_e' = \beta P_e$ 에 대입하면, 감쇄상수 β 는 다음과 같은 하한을 가진다.

$$\beta > \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\gamma'}{c} (1 - \frac{\gamma'}{c}) \exp(-\frac{c}{2\gamma} (1 - \frac{\gamma'}{\gamma})) \quad (23)$$

이 결과는 제안된 방법에서의 이득이 γ' 에 크게 의존함을 말한다. 제안된 방법의 전체적 과정은 표 1과 같다.

표 1 제안된 기법의 과정

Table 1 Operation of the proposed method

입력	$\mathbf{H}, \mathbf{s}$
출력	$\mathbf{l}, \gamma = \ \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \alpha \mathbf{I})^{-1} \tilde{\mathbf{s}}\ ^2$
변수	j 는 사용자 인덱스를 나타낸다 K 는 사용자 수를 나타낸다 ϵ 은 주어진 threshold를 나타낸다
과정 1:	기존의 Vector perturbation기법의 γ 를 계산한다
과정 2:	사용자의 rate $R_j = \log(1 + SNR_j)$ 를 계산한다 ($SNR_j = \frac{E \ \mathbf{s}_j\ ^2}{E \gamma \ \mathbf{n}_j\ ^2}$)
과정 3:	사용자가 outage 조건 하에 있을 경우 ($R_j < \epsilon$) $\tilde{\mathbf{H}} = \arg \max_{\mathbf{H}_j} \lambda_{\min}^{(j)}$ 를 사용하여 가상 채널 행렬을 구성한다 $\gamma' = \ \tilde{\mathbf{H}}^H (\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1} \tilde{\mathbf{s}}\ ^2$ 를 계산한다 $\mathbf{x} = \frac{1}{\sqrt{\gamma'}} \tilde{\mathbf{H}}^H (\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1} (\mathbf{s}' + \mathbf{n}')$ 를 전송한다 아닐 경우 $\mathbf{x} = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} (\mathbf{s} + \mathbf{n})$ 를 전송한다

$$\gamma' = \min_{\mathbf{l}_a \in \mathbb{U}^{N_a}} \|\mathbf{I} - \mathbf{B}_2 (\mathbf{B}_2^H \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{B}_2^H \mathbf{r} - (\mathbf{I} - \mathbf{B}_2 (\mathbf{B}_2^H \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{B}_2^H) \mathbf{B}_1 \mathbf{l}_a\|^2 \quad (20)$$

기존의 Vector perturbation 기법에 의해 달성되는 sum rate는

$$R_{org} = \sum_{j=1}^K R_j = \sum_{j=1}^K \log(1 + SNR_j) \quad (24)$$

로 주어지는데 여기서 $SNR_j = \frac{E \| \mathbf{s}_j \|^2}{E \gamma \| \mathbf{n}_j \|^2}$ 이다. $R_1 > \dots > R_K$ 로 가정하면, 가상 사용자 선택 전략에 의해 최대 $K - N_{a,min}$ 의 outage 조건하에 있는 사용자를 선택하게 된다 ($R_j < \epsilon$). 이 때 주어진 ϵ 이 0보다 클 경우, 제안된 기법은

$$R_{prop} > R_{org} - (K - N_{a,min})\epsilon \quad (25)$$

를 만족한다. 구체적으로 살펴보면, (25)식으로부터 $R_{org} = \sum_{j=1}^{N_{a,min}} R_j + \sum_{j=N_{a,min}+1}^K R_j$ 임을 알 수 있다. 그리고 제안된 기법의 sum rate은 $R_{prop} = \sum_{j=1}^{N_a} \log(1 + SNR'_j)$ 로 나타낼 수 있다 ($SNR'_j = \frac{E \| \mathbf{s}_j \|^2}{E \gamma' \| \mathbf{n}_j \|^2}$). $N_a \geq N_{a,min}$, $\gamma < \gamma'$ 이기 때문에 다음과 같이 된다.

그림 2. 4×4 다중사용자 하향링크 시스템에서의 sum rate ($\epsilon = 0.15R_{org}$)
Fig. 2. Sum rate of 4×4 multiuser downlink system ($\epsilon = 0.15R_{org}$)

$$\begin{aligned} R_{prop} &\geq \sum_{j=1}^{N_{a,min}} R_j = R_{org} - \sum_{j=N_{a,min}+1}^K R_j \\ &> R_{org} - (K - N_{a,min})\epsilon \end{aligned} \quad (26)$$

IV. 모의실험과 논의

제안된 기법의 성능을 확인하기 위해 본 논문에서는 4×4 다중사용자 하향링크 시스템에서의 sum rate와 비트에러율 (BER)을 확인하였다. QPSK 변조와 Rayleigh fading ($h_{ij} \sim CN(0,1)$)의 하향채널을 고려하였다.

먼저, 4명의 사용자 중 하나가 다른 사용자의 성능을 개선시키는 경우를 고려한다 ($K=4$, $N_{a,min}=3$). 비교를 위해 채널 역변환, 정규화된 채널 역변환 및 기존의 Vector perturbation 기법을 고려한다. 그림 2에 제안된 기법과 기존의 Vector perturbation에 대해 SNR의 함수로서 sum rate를 비교하였다. 비활성 threshold 값은 기존의 Vector perturbation에서의 sum rate를 R_{org} 라고 했을 때 $\epsilon = 0.15R_{org}$ 로 설정하였다. 그림에서 보듯이 두 방법에서 sum rate의 차이는 그리 크지 않고 거의 일정하다. 그리고, SNR이 증가함에 따라 sum rate의 퍼센트 손실인 ($\frac{R_{org} - R_{prop}}{R_{org}}$)는 감소하여

그림 3. 4×4 다중사용자 하향링크 시스템에서의 비트에러율 ($\epsilon = 0.15R_{org}$)
Fig. 3. BER of 4×4 multiuser downlink system ($\epsilon = 0.15R_{org}$)

SNR이 20dB일때 12%의 손실을 보여주고 있다. 그림 3에서 기존의 Vector perturbation 기법과 제안된 기법, 그리고 다른 방법들에 의한 비트에러율 성능을 비교해 보았다. Sum rate 손실에 의한 비용으로 기존의 기법에 비해 제안된 기법은 10-2 BER에서 2.5 dB의 이득을 얻었다. 그리고 (24)식에 의해 얻어진 하한이 중간 및 고 신호 대 잡음비에 있어 타이트함을 볼 수 있다. 따라서 설계 단계에서도 고성능을 얻을 것으로 예측한다.

V. 결 론

본 논문에서는 Vector perturbation 하에서 다중사용자 하향링크의 성능을 개선시키기 위한 기법을 연구하였다. 벡터 perturbation에서 γ 가 모든 사용자의 SNR에 똑같은 영향을 주기 때문에 링크 안의 전체 이동통신 사용자들이 성능감소를 겪게 된다는 사실에 착안하여, 사용하지 않는 일부분의 사용자를 희생시켜 나머지 대부분의 사용자의 비트에러율 성능을 향상시키는 기법을 제안하였다. 이렇게 하여 실제 이동통신 시스템의 QoS를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 제안된 기법의 장점은 송신 프리코딩을 수정하더라도 수신 동작에 전혀 영향을 주지 않으며, 송신단에서 부가적인 복잡도가 상당히 작다는 점이다.

참 고 문 헌

- [1] H. Weingarten, Y. Steinberg, and S. Shamai, "The capacity region of the Gaussian MIMO broadcast channel", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 52, pp. 3936-3964, Sept. 2006.
- [2] S. Vishwanath, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Duality, achievable rates, and sum-rate capacity of Gaussian MIMO broadcast channel", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 49, pp. 2658-2668, Oct. 2003.
- [3] W. Yu and J. M. Cioffi, "Sum capacity of Gaussian vector broadcast channels", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 50, pp. 1875-1892, Sept. 2004.
- [4] M. Costa, "Writing on dirty paper", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 29, pp. 439-441, May 1983.
- [5] B. M. Hochwald, C. B. Peel, and A. Lee Swindlehurst, "A vector-perturbation technique for near-capacity multi-antenna multiuser communication-part II: perturbation", IEEE Trans. Commun., vol. 53, pp. 537-544, March 2005.
- [6] L. Zheng and D. Tse, "Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple antenna channels", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 49, pp. 1073-1096, May 2003.
- [7] C. B. Peel, B. M. Hochwald, and A. Lee Swindlehurst, "A vector-perturbation technique for near-capacity multi-antenna multiuser communication-part I: channel inversion and regularization", IEEE Trans. Commun., vol. 53, pp. 195-202, Jan. 2005.
- [8] A. Edelman, "Eigenvalues and condition numbers of random matrices", SIAM J. of Matrix Anal. and Applic. 9 (1988), pp. 543-560.
- [9] C. Yuen and B. M. Hochwald, "How to gain 1.5dB in vector precoding", in Proc. GLOBECOM, Nov. 2006.
- [10] W. S. Chua, C. Yuen, and F. Chin, "A continuous vector-perturbation for multi-antenna multi-user communication", VTC-Spring, Dublin, Ireland, 2007.
- [11] S. Verdú, Multiuser Detection, Cambridge University Press, 1998.

저 자 소 개

이 병 주

- 2008년 : 고려대학교 전파통신공학과 학사
- 2010년 : 고려대학교 컴퓨터-전파통신공학과 석사
- 2010년 ~ 현재 : 고려대학교 컴퓨터-전파통신공학과 박사과정
- 주관심분야 : Signal processing, Wireless communications, Information theory

저 자 소 개

임 채 희

- 2011년 : 고려대학교 전파통신공학과 학사
- 2011년 ~ 현재 : 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과 석사과정
- 주관심분야 : Information theory, Relay, Wireless communications

심 병 호

- 1995년 : 서울대학교 제어계측공학과 학사
- 1997년 : 서울대학교 제어계측공학과 석사
- 2004년 : University of Illinois at Urbana-Champaign Mathematics 석사
- 2005년 : University of Illinois at Urbana-Champaign Electrical and Computer Engineering 박사
- 2005년 ~ 2007년 : 미 퀄컴사 선임 및 책임연구원
- 2007년 ~ 현재 : 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과 부교수
- 주관심분야 : Information theory, Signal processing, Wireless communications