

다중안테나 하향채널에서의 Vector Perturbation기반 사용자 선택 기법

*이병주 **임채희 ***심병호

고려대학교

*bjlee@ipl.korea.ac.kr

**chlim@ipl.korea.ac.kr

***bshim@korea.ac.kr

A Vector Perturbation based user selection for multi-antenna downlink channels

*Lee, Byungju

**Lim, Chaehee

***Shim, Byonghyo

Korea University

요약

최근 다중 사용자 전송 기술에 관한 연구는 단일 사용자 MIMO 시스템에서의 선형적 용량증가가 다중 사용자 MIMO 시스템에도 적용 될 수 있다는 것을 보여 주었다. 본 논문에서는 다중사용자 하향 채널에서 Vector Perturbation을 통해 성능 향상을 이끌어 내는 기법을 제안한다. 우리는 동시에 최대 다수의 사용자의 연결을 어느 정도 포기함으로써 서비스의 질(QoS)을 향상시키는데 중점을 두었다. 이렇게 희생한 사용자의 정보와 Perturbation 벡터를 적절히 이용하여 비트당에러율(BER)에서 큰 이득을 얻을 수 있었다. 모의 실험을 통해 Standard Vector Perturbation을 이용한 제안된 방법이 상당한 성능상 이득을 가져오는 것을 확인 할 수 있다.

1. 서론

동시에 다수의 사용자가 이용 할 수 있는 다중입출력 하향 채널에서 채널간 간섭은 수신단 간의 협력에 의해 관리되기 쉽지 않고, 송신단에서의 선형 처리를 통해 간섭이 없는 채널에 근접한 성능을 이끌어 낼 수 있기 때문에 송신단에서의 간섭 선형 상쇄(pre-cancellation)가 주목을 받고 있다. 최근 Hochward의 연구[1]에 의하면 적절하게 설계된 Perturbation 벡터를 정보 벡터에 더해 줌으로써 상당한 성능 향상을 이끌어 낼 수 있음이 증명되었다.

본 논문에서는 Sum Rate의 최대화를 포기하고 비트당에러율(BER)성능을 향상 시키려는 접근을 시도하였다. 구체적으로, 미사용 상태의 특정한 사용자의 채널을 나머지 사용중인 사용자의 신뢰도를 높이는데 이용하고자 하는데, 이를 위해 우리는 미사용 상태의 사용자들중 신호대 간섭잡음비를 향상시키기 위한 가상의 사용자를 선택하여 접근하는 방법을 제안한다. 본 논문의 다음 부분에서는 우선 시스템 모델을 제시하고 Vector Perturbation기법에 관해 간단히 정리 후, 제안된 기법을 제시한다. 마지막으로는 모의실험을 통해 제안된 기법의 성능을 확인한다.

2. 시스템 모델 및 지난 연구

기지국에서 M 개의 송신 안테나가 각각 하나의 수신 안테나를 사용하는 $K(\leq M)$ 개의 사용자에게 정보를 전송한다고 할 때, flat-fading 채널이라는 가정하에 수신 신호 벡터 $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_K]^T$ 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

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

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2010-0012525 & No.2010-0027541)과 '2단계 BK21사업'의 지원을 받아 수행된 연구임.

여기서 $\mathbf{H} = [h_1^T, \dots, h_K^T]^T$ 는 $K \times M$ 채널 행렬이고, $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_K]^T$ 는 정규화(normalize)된 송신신호벡터이다. 그리고 $\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_K]^T$ 은 복소 가우시안 잡음 벡터이다 ($\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_v^2 \mathbf{I})$).

Channel Inversion과 Vector Perturbation을 적용한 송신 신호 벡터 \mathbf{x} 는 다음과 같이 표현 될 수 있다

$$\mathbf{x} = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} (\mathbf{u} + \boldsymbol{\pi}) . \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_K]^T$ 는 PSK, QAM등의 변조를 거친 심볼 벡터이고, $\gamma = \|\mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} (\mathbf{u} + \boldsymbol{\pi})\|^2$ 는 단위 전력 전송을 위해 이용된다. \mathbf{u} 는 $\boldsymbol{\pi}$ 에 의해 perturbation이 이루어지고 여기서 $\boldsymbol{\pi} \in \mathbf{R}^+$ 와, $l = l_{re} + jl_{im}$ ($l_{re}, l_{im} \in \mathbf{Z}^K$)는 K 차원 벡터이다. l 은 γ 를 최소화 하기 위한 값으로 선택 되고, 따라서,

$$l = \operatorname{argmin} \|\mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} (\mathbf{u} + \boldsymbol{\pi}')\| \quad (3)$$

로 표현된다. 이 최소 제곱문제는 스피어 인코더[1]라고 불리는 최소 근접 격자점을 찾는 방법을 통해 해결 될 수 있다. l_{re}, l_{im} 는 정수이기 때문에 수신단에서는 modulo연산[1]을 이용해 $\boldsymbol{\pi}$ 항을 제거한다.

3. 제안된 기법

위의 Vector Perturbation을 이용하면 Sum Capacity에 가까운 비트당에러율을 얻을 수 있지만, γ 는 모든 사용자의 신호대잡음비에 동일하게 영향을 미치기 때문에 특정 사용자의 심한 fading에 의해 채널 행렬이 나쁜 상태(ill-conditioned)일 경우 전체 사용자가 성능 저하를 겪게 된다. 이러한 문제의 해결을 위해 우리는 활성 사용자의 성능 향상을 위해 가상의 사용자를 이용하는 방법을 제안한다. 가상 사용자의 성능은 우리의 관심사가 아니기 때문에 활성화된 사용자의 성능 이득

최대화를 위하여 가상 사용자의 지표(Parameters)들을 과감하게 조정하도록 한다.

제안된 기법과 일반적인 Vector Perturbation의 차이점은 1) 특정 사용자의 채널이 ill-conditioned 상태일 때 가상의 사용자를 선택 2) 가상의 유저의 채널 벡터를 이용하여 채널 행렬 \mathbf{H} 를 좋은 상태(well conditioned)로 설정 3) 가상 사용자의 비정수 perturbation된 입력 신호 $\mathbf{u}_v + \mathbf{r}_v$

을 수정된 스피어 인코더를 이용하여 설정하는 것으로 정리 할 수 있다.

가상 사용자의 선택은 먼저 최소 활성 사용자($N_{a,\min}$) 이상의 활성 사용자(N_a , $N_{a,\min} \leq N_a \leq K$)가 선택된 뒤 나머지 $K - N_a$ 의 가상 사용자가 선택 된다. 활성 사용자는 $R = \log(1 + SNR)$ 이 한계값 η 을 초과하는 사용자를 택한다. $N_a = K$ 인 경우를 제외하고 한 명 이상의 가상 사용자가 선택되고 나면 가상 사용자의 채널 \mathbf{h}_k 을 어떻게 설정하여 채널 행렬 \mathbf{H} 를 구성할지가 문제가 된다. 새롭게 생성된 채널 행렬을 원래의 채널 \mathbf{H} 와 구분하기 위해 $\tilde{\mathbf{H}}$ 로 두면,

$$\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}(\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}})^{-1} = \begin{bmatrix} I_{N_a} & \mathbf{0} \\ \mathbf{X}_0 & \mathbf{X}_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

로 나타 낼 수 있다. 여기서 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_0 \ \mathbf{X}_1]$ 는 실제 활성 사용자의 수신 신호에는 영향을 주지않는 행이다. 위의 $\tilde{\mathbf{H}}$ 을 이용해 사전코딩된 신호의 수신 신호를 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H (\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1} \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{n}. \quad (5)$$

제안된 기법의 γ 를 $\gamma' = \|\tilde{\mathbf{H}}^H (\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1} \tilde{\mathbf{u}}\|^2$ 로 두고 이 γ' 를 최소화 하기 위한 $\tilde{\mathbf{H}}$ 를 찾는다 이를 위해 고유값 분해 ($\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H = \mathbf{Q}\mathbf{\Lambda}\mathbf{Q}^H$) 를 이용하여 γ' 를 정리해 보면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\gamma' = \sum_{i=1}^M \frac{|\tilde{v}_i|^2}{\lambda_i} \quad (6)$$

여기서 λ_i 는 $\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H$ 의 i 번째 고유값이고, $\tilde{v}_i = \mathbf{q}_i^H \tilde{\mathbf{u}}$ 는 $\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{Q}^H \tilde{\mathbf{u}}$ 의 i 번째 원소이다. 위 식에서 $0 \leq \lambda_i \leq 8M$ [2]이고, $\sum |\tilde{v}_i|^2 = \|\tilde{\mathbf{u}}\|^2$ 이기 때문에, 분자의 의한 γ' 의 변화는 분모에 의한 것에 비해 상당히 미미하기 때문에 γ' 를 최소화 하는 $\tilde{\mathbf{H}}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{H}} = \operatorname{argmax} \sum_i \frac{1}{\lambda_i} \quad (7)$$

위의 식을 통해 $\tilde{\mathbf{H}}$ 을 찾기 위해서는 각 $\tilde{\mathbf{H}}$ 후보의 $\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H$ 행렬의 고유값들을 일일이 계산해 줘야 하기 때문에 상당한 부담이 된다. 이러한 부담을 줄이기 위해 $\lambda_1 < \dots < \lambda_M$ 일 때,

$$\sum \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_1} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + \dots + \frac{\lambda_1}{\lambda_M} \right) \approx \frac{1}{\lambda_1} \quad (8)$$

임을 이용하여 근사화 하면

$$\tilde{\mathbf{H}} = \operatorname{argmax} \lambda_{\min} \quad (9)$$

위와 같이 나타 낼 수 있고 계산 부담을 상당히 줄일 수 있다. 그림 1.을 통해 확인해 보면 낮은 신호대잡음비에서는 (7)을 이용한 경우 γ'

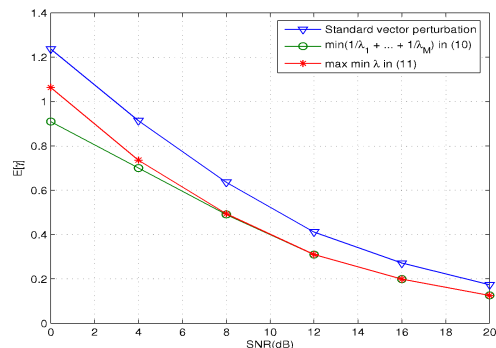


그림 1. 4x4 다중사용자 MIMO채널에서 일반적인 벡터 Perturbation과 제안된 기법에서 수식 (7), (9)를 각각 적용했을 경우의 $E[\gamma]$

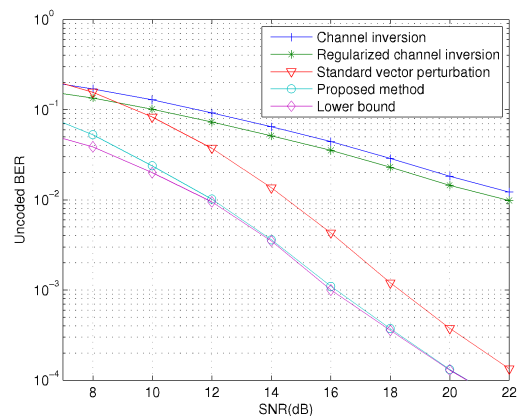


그림 2. 4x4 다중 사용자 MIMO 시스템에서의 제안된 기법과 기존 기법의 비트당에러율 성능 비교

의 기대값이 (9)를 이용한 경우에 비해 작긴 하지만 신호대잡음비가 증가 함에 따라 점점 근접해 감을 확인 할 수 있다. 이는 이러한 근사화가 중간 또는 고 신호대잡음비에서 효율적임을 말해 준다.

3. 모의실험 결과

제안된 기법의 성능을 확인하기 위해 본 논문에서는 Rayleigh fading($h_{ij} \sim \mathbf{CN}(0,1)$)이 적용되는 4x4 다중사용자 하향채널을 모의 실험 대상으로 QPSK 변조를 사용하여 비트당에러율성능을 확인하여 보았다. 비활성 한계값은 일반적 벡터 Perturbation에서의 Sum rate를 R_{org} 라고 했을 때 $\eta = 0.15R_{org}$ 로 설정하였다. 그림 2.에서 일반적인 벡터 Perturbation 기법과 제안된 기법의 비트당 에러율 성능을 비교해 보았고 기존의 기법에 비해 모든 신호대잡음비에서 2dB 이상의 이득을 얻었다.

참고자료

- [1] B. M. Hochwald, C. B. Peel, and A. Lee Swindlehurst, "A vector-Perturbation technique - Part II: Perturbation." IEEE Trans. Commun., vol. 5, pp. 537-544, March 2005.
- [2] A. Edelman, "Eigenvalues and condition numbers of random matrices", SIAM J. of Matrix Anal. and Applic. 9 (1998), pp. 53-560.