

다중 사용자 증폭재전송 MIMO 중계 시스템을 위한 블록 대각화 기반 프리코딩 기법

*이관형 **이재홍

서울대학교 전기컴퓨터공학부, 뉴미디어통신공동연구소

*leeph@snu.ac.kr

Block diagonalization precoding scheme for a multiuser
amplify-and-forward MIMO relay system

*Panhyung Lee **Jae Hong Lee

Department of Electrical Engineering and INMC, Seoul National University

요약

본 논문에서는 다중 사용자 증폭재전송(amplify-and-forward) MIMO 중계 시스템을 위한 프리코딩(precoding) 기법을 제안한다. 제안된 프리코딩 기법에서는 블록 대각화(block diagonalization)를 통해 사용자간 간섭(inter-user interference)을 제거하고 기지국과 중계기에서의 전송전력(transmit power) 제한을 만족하면서 사용자 데이터 전송률(data rate)의 합이 최대화 되도록 한다. 모의실험결과를 통해 제안된 기법이 기존 기법에 비해 더 높은 사용자 데이터 전송률의 합을 달성함을 보이고 있다.

1. 서론

무선 통신에서 MIMO(multiple input multiple output) 시스템은 독립적인 데이터 신호를 서로 다른 송신 안테나(antenna)를 통해 동시에 전송하는 공간 다중화(spatial multiplexing) 기법으로 높은 주파수 효율(spectral efficiency)을 달성한다 [1]. 중계(relay) 시스템은 하나 또는 그 이상의 중계기를 통해 기지국으로부터 전송된 신호를 사용자에게 재전송함으로써 높은 신뢰성(reliability)을 제공한다 [2].

MIMO 중계 시스템은 다중 안테나를 가지는 중계기를 이용함으로써 더 향상된 주파수 이득과 신뢰성을 얻는다 [3]. 단일 사용자 증폭 재전송 MIMO 중계 시스템을 위해 [4]에서는 중계기 프리코딩 기법이 제안되었고, [5]에서는 기지국과 중계기의 프리코딩 기법이 제안되었다. [6]에서는 단일 안테나를 가지는 다중 사용자 증폭재전송 MIMO 중계 시스템에서의 기지국과 중계기의 프리코딩 기법이 연구되었다.

본 논문에서는 다중 안테나를 가지는 다중 사용자 MIMO 중계 시스템에서 기지국과 중계기의 프리코딩 기법을 제안한다. 기지국과 중계기에서 전송전력 제한을 만족하면서 사용자 데이터 전송률의 합을 최대화하는 최적화 문제를 도출하고 사용자간 간섭을 제거하기 위해 블록 대각화 기반 기지국과 중계기의 프리코딩 기법을 제안한다.

2. 시스템 모델

다중 사용자 증폭재전송 MIMO 중계 시스템에서 하나의 기지국, 하나의 중계기 그리고 K 명의 사용자를 고려한다. 기지국, 중계기, 사용자는 각각 N_s , N_r , N_d 개의 안테나를 가지고 있고, 중계기는 신호를 동시에 전송하고 수신할 수 없음을 가정한다. 기지국과 사용자 간 직접 전송 링크(direct transmission link)는 없으며 무선 채널(channel)은 주파수 비선택적임을 가정한다.

기지국과 중계기는 두 개의 시간 슬롯(slot)을 통해 신호를 전송한다. 첫 번째 슬롯에서 기지국이 신호를 전송하면 중계기에서 수신되는 신호는 다음 식과 같다.

$$y_r = \mathbf{H}\mathbf{T}\mathbf{b} + \mathbf{z}_r \quad (1)$$

여기서 \mathbf{H} 는 기지국과 중계기간 채널 행렬이고, $\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1 \cdots \mathbf{T}_K]$ 는 기지국에서의 프리코딩 행렬이고, $\mathbf{b} = [\mathbf{b}_1 \cdots \mathbf{b}_K]$ 는 데이터 신호 벡터이고, \mathbf{z}_r 는 평균이 0 분산이 1인 중계기에서의 백색가우시안 잡음이다.

두 번째 슬롯에서 중계기가 수신된 신호를 증폭 후 재전송하면 k 번째 사용자에서 수신되는 신호는 다음 식과 같다.

$$y_k = \mathbf{G}_k \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{T} \mathbf{b} + \mathbf{G}_k \mathbf{F} \mathbf{z}_r + \mathbf{z}_k \\ = \mathbf{G}_k \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{T}_k \mathbf{b}_k + \sum_{j \neq k} \mathbf{G}_k \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{T}_j \mathbf{b}_j + \mathbf{G}_k \mathbf{F} \mathbf{z}_r + \mathbf{z}_k \quad (2)$$

여기서 \mathbf{G}_k 는 중계기와 k 번째 사용자간 채널 행렬이고, \mathbf{F} 는 중계기에서의 프리코딩 행렬이고, \mathbf{z}_k 는 평균이 0 분산이 1인 k 번째 사용자에서의 백색가우시안 잡음이다.

k 번째 사용자의 데이터 전송률은 다음 식과 같다.

$$R_k = \frac{1}{2} \log \det (\mathbf{I}_{N_d} + \mathbf{G}_k \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{T}_k^\dagger \mathbf{H}^\dagger \mathbf{F}^\dagger \mathbf{G}_k^\dagger \times (\sum_{j \neq k} \mathbf{G}_j \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{T}_j^\dagger \mathbf{H}^\dagger \mathbf{F}^\dagger \mathbf{G}_j^\dagger + \mathbf{G}_k \mathbf{F} \mathbf{F}^\dagger \mathbf{G}_k^\dagger + \mathbf{I}_{N_r}))^{-1} \quad (3)$$

기지국과 중계기에서의 전송전력 제한은 다음 식으로 각각 주어진다.

$$\text{tr}(\mathbf{T} \mathbf{T}^\dagger) \leq P_s \quad (4)$$

$$\text{tr}(\mathbf{F}(\mathbf{H} \mathbf{T} \mathbf{T}^\dagger \mathbf{H}^\dagger + \mathbf{I}_{N_r}) \mathbf{F}^\dagger) \leq P_r \quad (5)$$

3. 블록 대각화 기반 프리코딩 기법

사용자 데이터 전송률의 합을 최대화하는 최적화 문제는 다음과 같이 도출된다.

$$R^* = \max_{\mathbf{T}, \mathbf{F}} \sum_{k=1}^K R_k \quad (6)$$

st. (4), (5)

특이값 분해(singular value decomposition)에 의해 기지국과 중계기 사이의 채널 행렬은 $\mathbf{H} = \mathbf{U}_H \mathbf{A}_H \mathbf{V}_H^\dagger$ 로 분해된다. 기지국에서의 프리코딩 행렬은 다음 식과 같이 주어진다 [5].

$$\mathbf{T} = \mathbf{V}_H \mathbf{A}_T \quad (7)$$

여기서 \mathbf{A}_T 는 대각행렬이다.

사용자간 간섭을 제거하기 위해 블록 대각화 기법을 [7] 이용하면 중계기에서의 프리코딩 행렬은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{\Psi} \mathbf{\Phi} \mathbf{A}_F \mathbf{U}_H^\dagger \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{\Psi} = [\mathbf{\Psi}_1 \dots \mathbf{\Psi}_K]$ 는 사용자간 간섭을 제거하는 행렬이고, $\mathbf{\Phi} = [\mathbf{\Phi}_1 \dots \mathbf{\Phi}_K]$ 는 중계기와 사용자간 유효 채널을 위한 프리코딩 행렬이고, \mathbf{A}_F 는 대각행렬이다.

k 번째 사용자를 제외한 중계기와 사용자간 채널은 다음 식과 같이 정의된다.

$$\tilde{\mathbf{G}}_k = [\mathbf{G}_1^T \dots \mathbf{G}_{k-1}^T \mathbf{G}_{k+1}^T \dots \mathbf{G}_K^T]^T \quad (9)$$

$\mathbf{\Psi}_k$ 와 $\mathbf{\Phi}_k$ 는 특이값 분해에 의해 각각 다음과 같이 결정된다.

$$\tilde{\mathbf{G}}_k = \mathbf{U}_{\tilde{\mathbf{G}}_k} [\mathbf{A}_{\tilde{\mathbf{G}}_k} \mathbf{0}] \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{\tilde{\mathbf{G}}_k}^\dagger \\ \mathbf{\Psi}_k^\dagger \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{G}_k \mathbf{\Psi}_k = \mathbf{U}_k \mathbf{A}_k \mathbf{\Phi}_k^\dagger \quad (11)$$

기지국과 중계기의 전송전력 제한을 만족하면서 사용자 데이터 전송률의 합이 최대화 되도록 대각행렬 \mathbf{A}_T 와 \mathbf{A}_F 를 결정하며 각각 대각행렬의 성분 값은 Convex 최적화를 통해 구한다 [8].

4. 모의실험결과

본 절에서는 제안된 기법에 대한 사용자 데이터 전송률의 합을 모의실험을 통해 알아본다. 사용자의 수는 2명으로 가정하고 기지국의 안테나 수는 4개, 중계기의 안테나수는 4개, 각 사용자에서의 안테나 수는 2개로 가정한다. 제안된 기법의 성능을 비교하기 위해 중계기에서만 프리코딩을 적용한 기법과 기존 증폭재전송 기법의 성능을 함께 나타내었다.

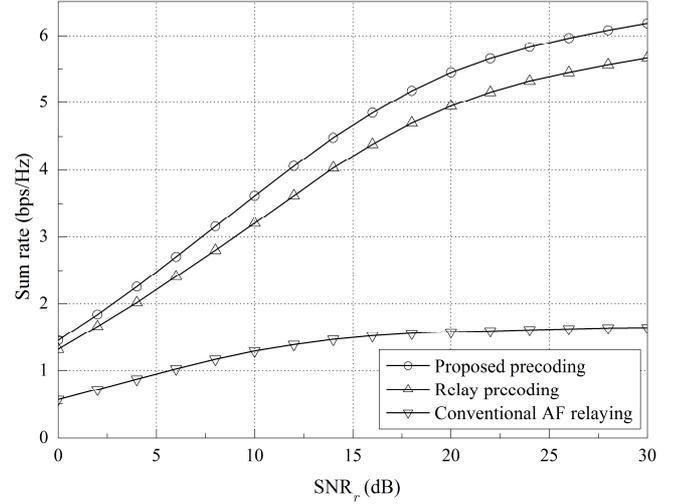


그림 1. 중계기에서의 전송전력대잡음비에 대한 데이터 전송률 ($\text{SNR}_s = 10 \text{ dB}$)

5. 결론

본 논문에서는 다중 사용자 증폭재전송 MIMO 중계 시스템을 위한 프리코딩 기법을 제안하였다. 모의실험을 통해 제안된 기법이 더 높은 데이터 전송률을 달성함을 보여 제안된 기법의 우수성을 확인하였다.

6. 참고 문헌

- [1] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Commun.*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [2] J. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [3] H. Bolcskei, R. U. Nabar, O. Oyman, and A. J. Paulraj, "Capacity scaling laws in MIMO relay networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 6, pp. 1433-1444, June 2006.
- [4] Y. Fan and J. Thompson, "MIMO configurations for relay channels: Theory and practice," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 5, pp. 1774-1786, May 2007.
- [5] Y. Rong, X. Tang, and Y. Hua, "A unified framework for optimizing linear nonregenerative multicarrier MIMO relay communication systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 57, no. 12, pp. 4837-4851, Dec. 2009.
- [6] W. Xu, X. Dong, and W. Lu, "Joint precoding optimization for multiuser multi-antenna relaying downlinks using quadratic programming," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 5, pp. 1228-1235, May 2011.
- [7] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 461-471, Feb. 2004.
- [8] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.