

다중사용자 시스템의 Sum-Rate 최적점에서의 상향링크 및 하향링크 송신 전력 변수 비교

유대성, 김준범, 이훈*, 박석환
전북대학교, *부경대학교

imcreative93@jbnu.ac.kr, junbeom@jbnu.ac.kr, *hlee@pknu.ac.kr, seokhwan@jbnu.ac.kr

Comparison Between Uplink and Downlink Transmit Power Variables at Sum-Rate Optimal Points for Multi-User Systems

Daesung Yu, Junbeom Kim, Hoon Lee*, and Seok-Hwan Park
Jeonbuk National University, *Pukyong National University

요약

다중사용자 시스템의 상향링크와 하향링크 시스템은 같은 전체 송신전력 제한 조건 하에서 획득 가능한 데이터 전송률 영역의 쌍대성(duality)을 갖는다. 특히 같은 전송률 tuple 을 획득하는 상향링크 및 하향링크 송신 전력 변수 간의 쌍대성 변환 공식이 밝혀진 바 있다. 본 논문은 특히 sum-rate 최적점에서 상향링크와 하향링크 송신 전력 간의 관계를 분석하고, 그 값들이 거의 일치함을 수치적으로 관찰한다.

I. 서론

다중사용자 시스템의 상향링크와 하향링크 시스템에서 동일한 송신전력 제한조건을 가질 경우, 획득 가능한 데이터 전송률의 영역이 서로 일치함이 밝혀진 바 있고, 이를 빔포밍 쌍대성(duality)라고 부른다 [1]. 특히 특정 Pareto 경계점에서 동일 전송률 tuple 을 획득하는 상향링크 및 하향링크 전력 변수 간의 관계식이 [1]에 규명이 되었다.

본 논문은 여러 Pareto 경계점 중 sum-rate 최적점에서 상향링크 및 하향링크 전력 변수 값들이 거의 일치함을 수치적으로 관찰하고, 이를 딥러닝 기반 빔포밍 최적화 기법에서 핵심 특징 변수 개수를 줄이는데 활용한 연구결과를 소개한다 [2].

II. 시스템 모델

다중사용자 시스템을 고려하며, 기지국은 M 개의 안테나를 사용하고 K 개의 모바일 사용자는 각각 단일 안테나 모바일을 사용한다고 가정한다. 사용자 인덱스 집합을 $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 와 같이 정의하고, 상향링크 및 하향링크 모두 전체 송신전력 값을 P 로 제한한다.

상향링크 및 하향링크 송신전력 변수들을 각각 $\mathbf{q} = \{q_k\}_{k \in \mathcal{K}}$ 와 $\mathbf{p} = \{p_k\}_{k \in \mathcal{K}}$, 사용자 k 의 채널벡터 및 빔포밍(하향)/결합(상향) 방향벡터를 \mathbf{w}_k ($\|\mathbf{w}_k\|^2 = 1$), 채널벡터를 \mathbf{h}_k , 잡음신호 분산을 σ^2 로 표기하면, 사용자 k 의 상향링크 및 하향링크 신호대간섭잡음비(SINR)은 아래와 같이 주어진다.

$$\text{SINR}_k^{\text{ul}}(\mathbf{q}, \mathbf{w}_k) = \frac{q_k |\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_k|^2}{\sigma^2 + \sum_{l \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} q_l |\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_l|^2},$$

$$\text{SINR}_k^{\text{dl}}(\mathbf{p}, \mathbf{w}) = \frac{p_k |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2}{\sigma^2 + \sum_{l \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} p_l |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_l|^2}.$$

빔포밍/결합 방향벡터 $\mathbf{w} = \{\mathbf{w}_k\}_{k \in \mathcal{K}}$ 와 목표 SINR $\boldsymbol{\gamma} = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_K\}$ 이 고정될 경우, 송신전력을 최소화하는 최적 상향/하향링크 전력 변수들은 아래와 같이 주어진다 [1].

$$\mathbf{q}^{\text{opt}} = \sigma^2 (\boldsymbol{\Omega}^T)^{-1} \mathbf{1}, \text{ and } \mathbf{p}^{\text{opt}} = \sigma^2 \boldsymbol{\Omega}^{-1} \mathbf{1}. \dots (1)$$

$\boldsymbol{\Omega}$ 는 $K \times K$ 정방행렬이며, (i, k) 번째 원소는 아래와 같이 주어진다.

$$\Omega_{i,k} = \begin{cases} -|\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_i|^2 & i \neq k \\ |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2 / \gamma_k & i = k \end{cases}. \dots (2)$$

III. Sum-Rate 최적점에서의 상향링크 및 하향링크 비교

본 절에서 sum-rate 최적점에서 (1)의 상향링크 및 하향링크 최적 전력 변수들 값을 비교한다. (1)과 (2)로부터 정방행렬 $\boldsymbol{\Omega}$ 이 대칭행렬일 경우, $\mathbf{p}^{\text{opt}} = \mathbf{q}^{\text{opt}}$ 의 등식이 성립함을 알 수 있다.

$\boldsymbol{\Omega}$ 이 실제 대칭행렬에 가까운지 확인하기 위해, 우선 기존의 non-convex 최적화 알고리즘을 통해 최적의 빔포밍/결합 방향벡터 \mathbf{w} 와 SINR 벡터 $\boldsymbol{\gamma}$ 을 구한다 (예: Weighted MMSE [3], Majorization Minimization

[4], Fractional programming [5]). 해당 \mathbf{w} 와 γ 로 행렬 $\mathbf{\Omega}$ 을 계산한 결과, 대칭행렬의 한 종류인 대각행렬에 가까움을 관찰했다. 정방행렬이 대각행렬에 근접함을 판단하는 기준으로 대각 우세도 (diagonal dominance)를 들 수 있고 [6], 다음과 같이 정의된다.

$$d(\mathbf{\Omega}) = \frac{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\Omega_{k,k}|}{\frac{1}{K(K-1)} \sum_{\substack{i,k=1 \\ i \neq k}}^K |\Omega_{i,k}|} = (K-1) \frac{\sum_{k=1}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2 / \gamma_k}{\sum_{\substack{i,k=1 \\ i \neq k}}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_i|^2}.$$

즉, $d(\mathbf{\Omega})$ 는 대각 원소들의 평균 절대값을 비대각 원소들의 평균 절대값으로 나눈 값이며, 클수록 대각행렬에 가깝다고 할 수 있다.

그림 1 은 $M=K=4$ 의 다중사용자 시스템의 상향링크 및 하향링크 sum-rate 최적점에서 행렬 $\mathbf{\Omega}$ 의 대각 우세도 $d(\mathbf{\Omega})$ 의 평균을 신호대잡음비(SNR) 변화에 따라 관찰한 그래프이다.

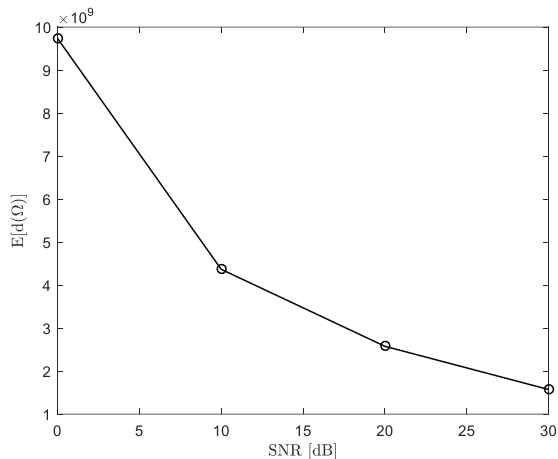


그림 1. SNR 증가에 따른 평균 대각 우세도

그림 1 은 $M=K=4$ 의 다중사용자 시스템의 상향링크 및 하향링크 sum-rate 최적점에서 행렬 $\mathbf{\Omega}$ 의 대각 우세도 $d(\mathbf{\Omega})$ 의 평균을 신호대잡음비(SNR) 변화에 따라 관찰한 그래프이다. SNR 증가에 따라 대각 우세도 값이 점차 감소하지만, 세로 축의 단위가 10^9 으로 매우 크다는 것을 알 수 있다.

낮은 SNR 영역: 충분히 크지 않은 SNR 로 인해, 송신 전력 값들을 최적화할 경우, water-filling 알고리즘의 원리로 인해 채널 상태가 좋지 않은 사용자에게 대응하는 전력 값은 0 으로 off 되는 현상이 자주 발생한다. 이로 인해 해당 사용자의 SINR 값이 $\gamma_k \approx 0$ 으로 수렴하고, (2)의 일부 대각 원소 값이 10^9 로 발산하면서 대각 우세도가 매우 큰 값으로 얻어진다.

높은 SNR 영역: SNR 이 충분히 큰 영역에서는 사용자 간 간섭을 완전히 제거하는 zero-forcing (ZF) 빔포밍 혹은 ZF 수신 기술이 최적에 가까운 성능을 획득하는 것으로 알려져 있다. ZF 솔루션으로 \mathbf{w} 이

고정될 경우, (2)의 모든 비대각 원소들이 0 이기 때문에 대각 우세도가 매우 큰 값으로 관찰되는 것으로 해석할 수 있다.

결과적으로 sum-rate 최적점에서 (2)의 행렬 $\mathbf{\Omega}$ 가 대각 행렬에 가깝기 때문에 $\mathbf{\Omega} \approx \mathbf{\Omega}^T$ 이 성립하며, (3)에서 정의된 상향링크 및 하향링크 송신 전력 변수들은 $\mathbf{p}^{\text{opt}} \approx \mathbf{q}^{\text{opt}}$ 의 관계를 만족함을 알 수 있다.

V. 결론

다중사용자 상향링크 및 하향링크 시스템의 sum-rate 최적점에서 상향 및 하향링크 송신 전력 변수들이 서로 거의 같은 값으로 수렴함을 관찰했다. 이 결과는 하향링크의 빔포밍 최적화 과정에서 핵심 변수 개수를 줄이는 데 활용될 수 있다. 특히 딥러닝 기반 빔포밍 최적화에서 뉴럴네트워크의 출력 변수 개수를 줄이는 데 활용된 바 있다 [2].

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1C1C1006557, 2019R1F1A1060648, 2019R1A6A1A09031717).

참 고 문 헌

- [1] H. Boche and M. Schubert, "Duality theory for uplink and downlink multiuser beamforming," Ch. 27 in *Smart Antennas: State of the Art*, Eds. T. Kaiser and et al, pp. 545-576, 2005.
- [2] J. Kim, H. Lee, S.-E. Hong and S.-H. Park, "Deep learning methods for universal MISO beamforming," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 11, pp. 1894-1898, Nov. 2020.
- [3] D. Yu, J. Kim and S.-H. Park, "An efficient rate-splitting multiple access scheme for the downlink of C-RAN systems," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 8, no. 6, pp. 1555-1558, Dec. 2019.
- [4] H. Lee, C. Song, J. Moon, and I. Lee, "Precoder Designs for MIMO Gaussian Multiple Access Wiretap Channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 66, No. 9, pp. 8563-8568, Sept. 2017.
- [5] S.-H. Park, S. Jeong, J. Na, O. Simeone and S. Shamai, "Collaborative Cloud and Edge Mobile Computing in C-RAN Systems With Minimal End-to-End Latency," *IEEE Trans. Signal Inf. Process. Netw.*, vol. 7, pp. 259-274, 2021, doi: 10.1109/TSIPN.2021.3070712.
- [6] D. Greene and P. Cunningham, "Practical solutions to the problem of diagonal dominance in kernel document clustering," in *Proc. ICML 2006*, pp. 377-384, Jun. 2006.