

Massive MIMO 시스템에서 저복잡도의 랜덤 사용자 그룹 기반 결합 스케줄링 및 빔포밍 기법

김 태 형[°]

Low Complexity Joint Scheduling and Beamforming Method Based on Random User Grouping in Massive MIMO Systems

Taehyoung Kim[°]

요 약

본 논문에서는 massive MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에서 낮은 복잡도의 랜덤 사용자 그룹 기반의 결합 빔포밍 및 스케줄링 기법에 대한 성능 평가를 수행한다. 본 논문에서 고려한 기법에서는 전체 사용자를 임의로 복수개의 그룹으로 나누고 각 그룹별로 낮은 복잡도를 갖는 스케줄링을 적용한다. 그룹 간 간섭 제거를 위한 목적으로 블록 대각화 프리코딩을 적용하였고, 그룹 내 빔포밍을 위하여 MF(Matched Filter)를 적용하였다. 본 논문에서 고려한 기법은 종래 기술 대비 낮은 복잡도를 가지며, 채널 추정 오차에 강인한 성능을 보여주었다.

Key Words : Massive MIMO, scheduling, beamforming, MF, BD, user grouping

ABSTRACT

In this letter, a low complexity joint beamforming and scheduling method based on random user grouping is proposed for massive multiple-input

multiple-output (MIMO) system. In the proposed scheme, users are divided into multiple user groups and scheduling is performed per user group. After that, block diagonalization (BD) strategy is applied for inter-group beamforming and matched filter (MF) is used for inner-group beamforming. It is verified that the proposed scheme has lower computational complexity and robustness against channel estimation error compared to the conventional beamforming and scheduling schemes.

1. 서 론

Massive MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 기술은 기지국에서 수십 내지 수백 개의 안테나를 활용함으로써 채널 용량을 크게 증대시킬 수 있는 5세대 이동통신 핵심 기술 중 하나이다^[1]. Massive MIMO의 성능 향상을 위하여, 다양한 스케줄링 및 빔포밍(beamforming) 기술이 연구되었다^[2-4]. 대표적으로 [2]에서는, ZF(Zero-Forcing) 빔포밍 환경에서, 채널 직교성이 높은 사용자를 우선적으로 선택하는 SUS(Semi-orthogonal User Selection)가 제안되었다. [3]에서는 사용자 그룹 기반의 결합 공간 다중화(JSDM, Joint Spatial Division Multiplexing) 기술이 제안되었다. JSDM에서는 K-평균 알고리즘으로 그룹화를 수행한 후, 그룹 내 스케줄링을 위해 SUS가 적용되었고, ZF 빔포밍이 사용되었다. 하지만, 종래의 SUS 알고리즘은 기지국 안테나 수에 따라 복잡도가 크게 증가하고, ZF 빔포밍은 채널 추정 오차에 성능이 크게 하락하는 단점이 존재한다.

본 논문에서는 채널 오차에 강인한 낮은 복잡도의 사용자 그룹 기반의 결합 스케줄링 및 빔포밍 기법에 대한 성능 평가를 수행한다. 먼저 전체 사용자를 랜덤하게 복수의 그룹으로 나누고 각 그룹별로 추가적인 스케줄링을 수행한다. 그룹 간 간섭 제거를 위해 블록 대각화 프리코딩을 적용하고, 그룹 내 빔포밍으로써 MF(Matched Filter)를 적용하였다. MF 빔포밍은 ZF에 비하여 낮은 복잡도를 가지면서도 채널 추정 오차에 강인한 이점이 있다^[1]. 그룹내 스케줄링 알고리즘으로 MF에 효과적인 신호 대 간섭비(SIR,

※ 이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2022R1F1A1064106)

[°] First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-6986-4729) Soonchunhyang University, Department of Information and Communication Engineering, th.kim@sch.ac.kr, 조교수, 정회원

논문번호 : 202206-112-A-LU, Received June 2, 2022; Revised June 8, 2022; Accepted June 8, 2022

Signal-to-Interference Ratio) 기반의 greedy 알고리즘⁵⁾을 사용함으로써, SUS 대비 복잡도를 낮추었다. 제안 기법은 종래 기술 대비 상대적으로 낮은 복잡도를 가짐과 동시에 채널 추정 오차에 강인한 성능을 보여준다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 M 개의 안테나를 가진 기지국이 단일 안테나를 가진 K 명의 사용자를 지원하는 단일 셀 환경을 고려한다^{1),2)}. 기지국은 스케줄링을 통해 셀 내의 전체 N 명의 사용자 중에서 K 명의 사용자를 선택하여 하향링크 데이터를 전송한다. k 번째 사용자의 수신 신호 y_k 는 하기와 같이 표현된다.

$$y_k = \sqrt{\rho} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k x_k + \sqrt{\rho} \sum_{j \neq k} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_j x_j + z_k \quad (1)$$

여기서 ρ 는 송신 파워, \mathbf{h}_k 는 기지국과 k 번째 사용자 사이의 $M \times 1$ 채널 벡터, \mathbf{w}_k 의 k 번째 사용자를 위한 $M \times 1$ 빔포밍 벡터, x_k 는 k 번째 사용자의 송신 데이터, z_k 는 $CM(0,1)$ 을 따르는 복소수 가산 백색 가우시안 (Gaussian) 잡음을 각각 의미한다. 수식 (1)로부터, 수신 SINR(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio)는 하기와 같이 표현된다.

$$\gamma_k = \frac{\rho |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2}{\rho \sum_{j \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_j|^2 + 1} \quad (2)$$

따라서, ergodic sum rate는 하기와 같이 표현된다.

$$R = E \left[\sum_{k=1}^K \log_2(1 + \gamma_k) \right] \quad (3)$$

III. 랜덤 사용자 그룹 기반 결합 스케줄링 및 빔포밍 기법

3.1 제안 기법

기지국은 먼저 셀 내의 N 명의 사용자들을 G 개의 사용자 그룹으로 그룹화를 수행한다. g 번째 그룹의 사용자 수를 N_g 로 표기한다. 사용자 그룹화 시, 복잡도를 낮추고 스케줄링 공정성(Fairness)을 증대시키기 위하여 RR(Round Robin) 방식을 채택하였다. 기지국

은 각 사용자 그룹별로 추가적인 스케줄링을 수행하여 g 번째 그룹의 N_g 명의 사용자 중에서 K_g 명의 사용자를 선택한다. 제안 기법에서 그룹 내 스케줄링을 위하여 낮은 복잡도를 갖는 신호대 간섭비 기반 사용자 선택(SIRUS, SIR User Selection) 알고리즘을 적용하였다⁵⁾. 여기서 g 번째 그룹의 k 번째 사용자에 대한 SIR은 하기와 같이 정의된다.

$$\eta_{kg} = \frac{\|\hat{\mathbf{h}}_{kg}\|^2}{\sum_{j \neq k} |\hat{\mathbf{h}}_{kg}^H \hat{\mathbf{h}}_{jg}|^2} \quad (4)$$

여기서 $\hat{\mathbf{h}}_{kg} = \sqrt{1 - \tau^2} \mathbf{h}_{kg} + \tau \mathbf{e}_{kg}$ 는 g 번째 그룹의 k 번째 사용자에 대한 추정 채널이고, \mathbf{e}_{kg} 채널 추정 오류 벡터, τ 는 오차율을 각각 의미한다¹⁾. SIRUS 방식은 SIR을 최대화하는 사용자를 우선적으로 선택하는 greedy 기반의 준최적 스케줄링 방식으로써, 낮은 복잡도를 가지며 MF 빔포밍에 효과적인 스케줄링 기법이다⁵⁾.

모든 사용자 그룹에 대하여 스케줄링을 완료한 후, 기지국은 각 단말에 적용할 빔포밍 벡터를 생성한다. 제안 기법에서 g 번째 그룹의 k 번째 사용자의 빔포밍 벡터 \mathbf{w}_{kg} 는 하기와 같이 2단계 구조로 구성된다.

$$\mathbf{w}_{kg} = \mathbf{W}_{1,kg} \mathbf{w}_{2,kg} \quad (5)$$

여기서, $\mathbf{W}_{1,kg}$ 는 $M \times (M - \sum_{g' \neq g} K_{g'})$ 크기를 갖는 그룹간 간섭 제거를 위한 빔포밍 행렬이고, $\mathbf{w}_{2,kg}$ 는 $(M - \sum_{g' \neq g} K_{g'}) \times 1$ 크기를 갖는 그룹내 다중사용자 빔포밍 벡터이다. 먼저, $\mathbf{W}_{1,kg}$ 는 $g' \neq g$ 일 때, $\hat{\mathbf{H}}_{g'}^H \mathbf{W}_{1,kg} = \mathbf{0}$ 을 만족하도록 설계한다. 여기서 $\hat{\mathbf{H}}_g$ 는 g 번째 사용자 그룹의 추정된 채널 행렬이고 $\mathbf{0}$ 은 0 행렬이다. 간섭 채널 $\tilde{\mathbf{H}}_g = [\hat{\mathbf{H}}_1, \dots, \hat{\mathbf{H}}_g, \hat{\mathbf{H}}_{g+1}, \dots, \hat{\mathbf{H}}_G]$ 에 대한 SVD(singular value decomposition)를 수행한 결과 하기와 같을 경우,

$$\tilde{\mathbf{H}}_g = \mathbf{U}_g \mathbf{S}_g \mathbf{V}_g^H = [\mathbf{U}_g^{(1)}, \mathbf{U}_g^{(0)}] \mathbf{S}_g \mathbf{V}_g^H \quad (6)$$

$\mathbf{W}_{1,kg} = \mathbf{U}_g^{(0)}$ 로 결정될 수 있다. 여기서 $\mathbf{U}_g^{(0)}$ 는 singular value가 0에 해당하는 left singular 행렬이다. 다음으로 그룹 내 빔포밍 벡터에 해당하는 $\mathbf{w}_{2,kg}$ 는

MF 방식을 이용하여 하기로 정의된다.

$$w_{2,kg} = (\hat{h}_{kg}^H W_{1,kg})^H = W_{kg}^H \hat{h}_{kg} \quad (7)$$

그룹 내 빔포밍 방식으로 간단한 MF를 활용함으로써 복잡도를 크게 낮출 수 있고, 채널 추정 오차에 대한 성능 열화를 최소화할 수 있다. 또한, 그룹 내 SIRUS를 통해 MF 성능을 극대화할 수 있다.

3.2 제안 기법의 복잡도 분석

제안 기법의 계산 복잡도는 크게 SIRUS 알고리즘 수행 복잡도와 빔포밍 벡터 연산 복잡도로 구성된다. 수식 (4)에 따라 SIRUS는 $O(NKM)$ 의 복잡도가 요구된다. 수식 (6)의 SVD 연산 복잡도는 $G \times (4M(K - K_g)^2 + 8(K - K_g)^2) \approx O(GK^2M)$ 로 주어진다⁶⁾. 수식 (7)의 연산 복잡도는 $G \times K_g \times O((K - K_g)M) = O(GK_gM)$ 으로 주어진다. 따라서, $N > GK$ 일 때, 제안기법의 총 복잡도는 $O(NKM)$ 으로 주어진다. ZF 빔포밍과 SUS 알고리즘을 사용할 때의 복잡도 $O(NKM^2)$ ¹²⁾와 비교했을 때, 제안 기법은 M 이 큰 massive MIMO 환경에서 훨씬 낮은 복잡도를 갖는다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 시뮬레이션을 통해 제안 기법의 우수성을 증명한다. 시뮬레이션을 위하여, $N=200$, $K=20$, $\rho=0$ dB를 가정하였다. 제안 기법에 대하여 $G=4$, 모

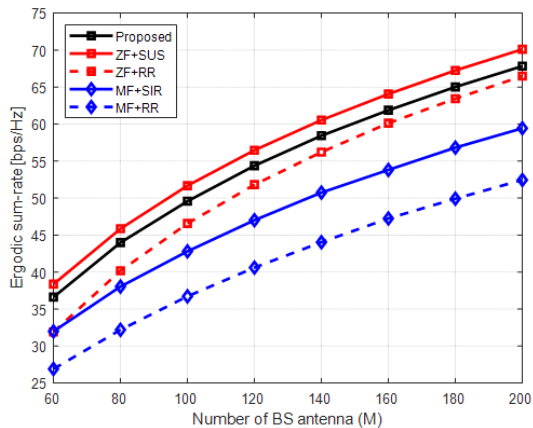


그림 1. 채널 추정 오차 $\tau=0$ 일 때, 기지국 안테나 수에 따른 ergodic sum-rate 성능 비교
Fig. 1. Ergodic sum-rate performance according to the number of antennas M when $\tau=0$.

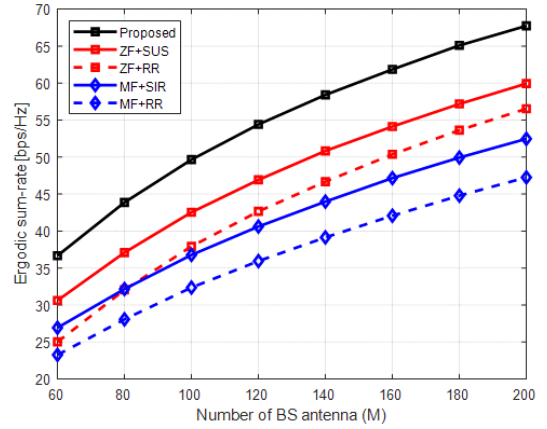


그림 2. 채널 추정 오차 $\tau=0.2$ 일 때, 기지국 안테나 수에 따른 ergodic sum-rate 성능 비교
Fig. 2. Ergodic sum-rate performance according to the number of antennas M when $\tau=0.2$.

든 그룹에 대하여 $K_g=NG$ 를 가정하였다. 성능 비교를 위하여, 빔포밍 기술로 ZF과 MF를 고려하였고 스케줄링 기술로 SUS, SIRUS, RR을 고려하였다.

그림 1과 그림 2는 각각 채널 추정 오차가 $\tau=0$ 과 $\tau=0.2$ 일 때의 제안 기법과 기존 기법의 ergodic sum rate를 비교한 결과이다. $\tau=0$ 일 때, 제안 기법은 SUS 기반 ZF과 RR 기반 ZF 사이의 성능을 보여주었다. $\tau=0.2$ 일 때, 제안 기법은 가장 우수한 성능을 보이며, SUS 기반 ZF에 비하여 약 10%~15%의 성능 향상을 보여주었다. 이는 제안 기법이 그룹 내 빔포밍으로 채널 추정 오차에 강한 MF를 사용한 것에 따른 효과로 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 massive MIMO 시스템에서 사용자 그룹 기반 결합 빔포밍 및 스케줄링 기법을 제안하였다. 제안 기법은 사용자를 다수의 그룹으로 나누어 각 그룹별로 스케줄링을 수행하고, MF 기반의 그룹 내 빔포밍, SVD 기반의 그룹 간 빔포밍을 적용하였다. 이를 통해, 종래 기술 대비 낮은 복잡도를 갖으면서도 채널 추정 오차에 강인한 성능을 달성할 수 있었고 massive MIMO 시스템에서 효과적인 기술임을 확인하였다.

References

[1] T. Kim, K. Min, M. Jung, and S. Choi, "Scaling laws of optimal training lengths for

- TDD massive MIMO systems,” *IEEE Trans. on Vehic. Tech.*, vol. 67, no. 8, pp. 7128-7142, Aug. 2018.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2827935>)
- [2] T. Yoo and A. Goldsmith, “On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 528-541, Mar. 2006.
(<https://doi.org/10.1109/JSAC.2005.862421>)
- [3] J. Nam, A. Adhikary, J.-Y. Ahn, and G. Caire, “Joint spatial division and multiplexing: Opportunistic beamforming, user grouping and simplified downlink scheduling,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 876-890, Oct. 2014.
(<https://doi.org/10.1109/JSTSP.2014.2313808>)
- [4] J. Min and S. Choi, “Optimal numbers of base station antennas and users in multiuser massive MIMO systems with pilot overhead,” *J. KICS*, vol. 41, no. 11, pp. 1630-1638, 2016.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2016.41.11.1630>)
- [5] T. Kim and S. Park, “Scaling laws of scheduling gain for uplink massive MIMO systems: Is user scheduling still beneficial for massive MIMO?,” *Electron.*, vol. 9, no. 10, 1650, Oct. 2020.
(<https://doi.org/10.3390/electronics9101650>)
- [6] G. H. Golub and C. Feinsch, “Singular value decomposition and least squares solutions,” *Numer. Math.*, vol. 14, pp. 403-420, 1970.
(<https://doi.org/10.1007/BF02163027>)