

다운링크 전송률 분할 통신을 위한 자원 할당 및 유저 군집화 통합 최적화

박상욱, 정성아*, 강준혁
한국과학기술원, 서울시립대학교*

psangpsang0@kaist.ac.kr, seongah@uos.ac.kr, jkang@kaist.edu

Joint Resource and User Clustering Optimization for RSMA Downlink System

Park Sang Uk, Jeong Seung Ah*, Kang Joonhyuk
KAIST, University of Seoul*.

요약

본 논문은 다운링크 전송률 분할 다중접속 (Rate-splitting multiple access, RSMA) 환경에서 유저간 간섭 제어로 합 전송률을 최대화하는 자원 할당 및 유저 군집화 통합 최적화 알고리즘을 제안한다. 과부하 채널에서 유저들을 같은 대역으로 서비스 시 유저간 간섭은 증가한다. 이는 유저 군집화를 통해 각 그룹 내 유저 수와 조합을 조정하고 각 군집에 소속된 유저에 맞는 빔 포밍 벡터를 사용하는 것으로 제어할 수 있다. 이를 해결하기 위해 교차 엔트로피 최적화 (Cross entropy optimization, CEO)를 통한 군집화와 가중 최소 평균제곱오차 바탕 빔포밍 벡터 최적화를 적용한 결과, 기존의 다중접속 기술에 활용된 군집화 알고리즘보다 향상된 성능 얻는다

I. 서론

미래 통신 환경은 과거에 비해 많은 수의 단말들을 서비스하며 전송률 분할 다중접속 (Rate-splitting multiple access, RSMA)이 주목 받고 있다. RSMA는 송신 메시지를 공통, 개인 메시지로 분할하여 전송한다. 수신자는 공통 메시지를 디코딩해 순차적 간섭 제거 (Successive interference cancellation, SIC)를 한 후 남아있는 개인 메시지를 디코딩해 유저간 간섭 제어에 효과적이다 [1]. 하지만 과부하 된 채널 환경에서는 간섭의 증가로 유저들을 군집화해 직교하는 주파수 대역으로 서비스를 해서 간섭을 제어해야 한다. 하지만 RSMA의 유저 군집화 알고리즘은 기존 다중접속 기술에서 활용한 유저 군집화를 그대로 사용하는 등 많은 연구가 진행되지 않았다. 본 논문은 교차 엔트로피 최적화 (Cross entropy optimization, CEO) [4]를 활용한 유저 군집화를 제안하여 기존 군집화 알고리즘 대비 RSMA 적용 시 향상된 합 전송률을 얻는 것이 목표이다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 N_T 개의 안테나를 사용하는 기지국에 N_U 개의 단일 안테나 유저를 서비스하는 다운링크 RSMA 시나리오를 고려한다. 이때 $N_U > N_T$ 로 과부하 된 채널 환경을 가정한다. N_U 명의 유저들은 K 개의 군집으로 나눠져 각 군집은 균일하고 직교하는 주파수 대역폭으로 서비스가 된다. 유저, 군집들의 집합은 $\mathcal{U} = \{1, 2, \dots, N_U\}$, $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 로 정의된다.

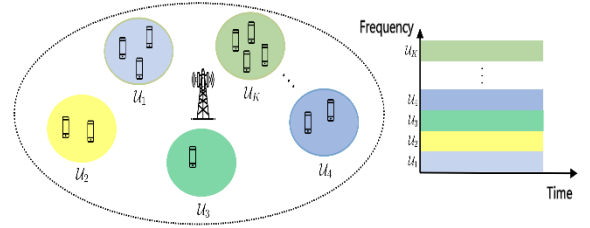


그림 1. 과부하 된 RSMA 다운링크 시스템의 유저 군집화

기지국은 각 군집 k 내의 유저 u 의 메시지를 공통 메시지 $W_{k(u),c}$ 와 개인 메시지 $W_{k(u)}$ 로 분할한다. 군집 내의 공통 메시지들은 공통 메시지 $W_{k,c}$ 로 합쳐 공통 스트림 $s_{k,c}$ 로 인코딩 된다. $W_{k(u)}$ 는 각각 $s_{k(u)}$ 로 인코딩이 된다. 빔포밍 벡터들을 이용해 송신된 신호는

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{p}_{k,c} s_{k,c} + \sum_{u \in \mathcal{U}_k} \mathbf{p}_{k(u)} s_{k(u)} \quad (1)$$

이며 $\mathbf{p}_{k,c} \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ 와 $\mathbf{p}_{k(u)} \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ 는 공통, 개인 스트림의 빔포밍 벡터이다.

군집 k 의 유저 u 가 수신 받는 신호는

$$y_{k(u)} = \mathbf{h}_{k(u)}^H \mathbf{x}_k + n_{k(u)} \quad (2)$$

이며 $\mathbf{h}_{k(u)} \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ 는 기지국과 유저 u 사이 채널, $n_{k(u)} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 은 유저 u 의 가산성 백색 가우스 잡음 (Additive white Gaussian noise, AWGN)을 나타낸다.

다른 개인 메시지들을 잡음으로 취급하며 [2] 각 유저는 개인 메시지를 디코딩 시 달성 가능한 전송률은

$$R_{k(u),c}(\mathbf{P}_c, \mathbf{P}_u) = \log_2 \left(1 + \gamma_{k(u),c}(\mathbf{P}_c, \mathbf{P}_u) \right) \quad (3)$$

로 공통 메시지의 신호 대 간섭 잡음비는

$$\gamma_{k(u),c}(\mathbf{P}_c, \mathbf{P}_u) = \frac{|\mathbf{h}_{k(u)}^H \mathbf{p}_c|^2}{\sum_{u' \in \mathcal{U}_k} |\mathbf{h}_{k(u)}^H \mathbf{p}_{k(u')}|^2 + \sigma^2} \quad (4)$$

이며 $\mathbf{P}_c = \{\mathbf{p}_c\}_{k \in \mathcal{K}}$ 와 $\mathbf{P}_u = \{\mathbf{p}_{k(u)}\}_{k \in \mathcal{K}, u \in \mathcal{U}}$ 로 정의된다. 각 군집에서 달성 가능한 공통 메시지 전송률은 소속된 유저들의 전송률 중 최솟값이다.

$$R_{k,c}(P_c, P_u) = \min_{u \in \mathcal{U}_k} (R_{k(u),c}(P_c, P_u)) \quad (5)$$

SIC 를 통해 유저가 공통 메시지를 완전히 제거한 후 개인 메시지를 디코딩하며, 이때 달성 가능한 전송률과 개인 메시지의 신호 대 간섭 잡음비는 아래와 같다.

$$R_{k(u)}(\mathbf{P}_u) = \log_2 \left(1 + \gamma_{k(u)}(\mathbf{P}_u) \right) \quad (6)$$

$$\gamma_{k(u)}(\mathbf{P}_u) = \frac{|\mathbf{h}_{k(u)}^H \mathbf{p}_{k(u)}|^2}{\sum_{u' \in \mathcal{U}_k, u' \neq u} |\mathbf{h}_{k(u)}^H \mathbf{p}_{k(u')}|^2 + \sigma^2} \quad (7)$$

III. 최적화 알고리즘

제안된 최적화 문제는 빔포밍 벡터, 공통 메시지 할당량 \mathbf{r} , 군집화 결과 α 를 최적화해 달성 가능한 총 전송률을 최대화한다. α 를 구성하는 $\alpha_{k(u)}$ 는 군집 k 내의 유저 u 가 존재할 경우 1, 아닐 경우 0 의 값을 갖는다.

$$\begin{aligned} \max_{P_c, P_u, \mathbf{r}, \alpha} & \frac{1}{K} \sum_{u=1}^{N_U} \sum_{k=1}^K \alpha_{k(u)} (r_{k(u),c} + R_{k(u)}(P_u)) \\ \text{s.t.} & \alpha_{k(u)} \in \{0,1\}, \forall k \in \mathcal{K}, u \in \mathcal{U}, \\ & \sum_{k=1}^K \alpha_{k(u)} = 1, \forall u \in \mathcal{U}, \\ & \sum_{u=1}^{N_U} \alpha_{k(u)} = |\mathcal{U}_k| \forall k \in \mathcal{K}, \\ & \sum_{u=1}^{N_U} \alpha_{k(u)} r_{k(u),c} \leq R_{k,c}(P_c, P_u), \forall k \in \mathcal{K}, \\ & r_{k(u),c} \geq 0, \forall k \in \mathcal{K}, u \in \mathcal{U}, \\ & |\mathbf{p}_{k,c}|^2 + \sum_{u=1}^{N_U} \alpha_{k(u)} |\mathbf{p}_{k(u)}|^2 \leq \frac{P_t}{K}, \forall k \in \mathcal{K}, \\ & R_u(P_u, \mathbf{r}, \alpha) \geq R_{\min}, \forall u \in \mathcal{U}. \end{aligned} \quad (8)$$

본 문제는 2 개의 하위 문제로 나눠 최적화를 진행한다. 유저 군집화는 CEO [4] 방식으로 유저가 각 군집에 속할 확률 분포와 준최적해를 샘플링하는 확률 분포 간 교차 엔트로피를 감소시켜 군집 해를 최적화한다. 빔포밍 벡터와 공통 메시지 할당량은 가장 최소 평균제곱오차를 바탕으로 한 최적화 대체 방안 [5]을 활용해 최적화한다.

IV. 실험결과

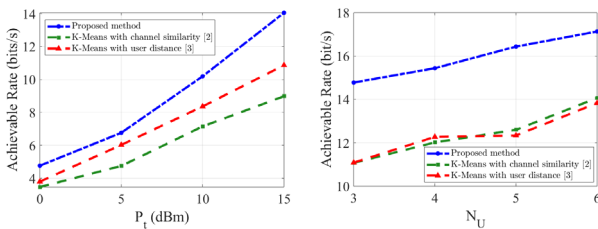


그림 2. 송신파워 P_t (좌), 유저 수 N_U 에 대한 합 전송률

실험 결과 CEO 방식을 활용한 유저 군집화가 기존 다중접속 기술에 활용되는 채널 유사도, 유저간 거리 기반 K-means 방식에 비해 같은 송신 파워, 유저 수에 대해 합 전송률이 향상됨을 확인할 수 있다. CEO 방식이 과부하 채널, 송신 파워 제한 시나리오 등 다양한 간섭 패턴에 대해 분할률을 조정해 유저하는 RSMA 의 장점을 부각하는 것으로 해석된다. 이는 단순히 채널 유사도,

유저간 거리 등 하나의 지표로만 시나리오를 평가하며 최종 그룹 수를 유연하게 바꾸지 못하는 K-means 의 한계를 해소한 것으로 분석할 수 있다.

V. 결론

본 논문은 과부하 된 채널 환경에서 합 전송률을 증가시키는 RSMA 의 효과를 극대화하는 CEO 기반 유저 군집화를 제안한다. 교차 엔트로피 기반의 알고리즘은 하나의 지표로 표현되기 어려운 RSMA 의 특성에 알맞은 기법임을 확인했다. 또한 지수 함수의 복잡도를 가진 완전 탐색에 선형적 복잡도를 가져 빠르게 최적에 가까운 해를 얻는 장점이 있는 알고리즘임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2024-2020-0-01787 및 IITP-2024-RS-2023-00259991)

참고 문헌

- [1] B. Clerckx et al., "A Primer on Rate-Splitting Multiple Access: Tutorial, Myths, and Frequently Asked Questions," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 41, no. 5, pp. 1265-1308, May 2023.
- [2] H. Zhang et al., "Energy Efficient User Clustering, Hybrid Precoding and Power Optimization in Terahertz MIMO-NOMA Systems," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, no. 9, pp. 2074-2085, Sept. 2020.
- [3] M. Katwe, et al., "Rate-Splitting Multiple Access and Dynamic User Clustering for Sum-Rate Maximization in Multiple RISs-Aided Uplink mmWave System," in IEEE Transactions on Communications, vol. 70, no. 11, pp. 7365-7383, Nov. 2022.
- [4] R. Y. Rubinstein et al., The Cross-Entropy Method: A Unified Approach to Combinatorial Optimization, Monte-Carlo Simulation and Machine Learning. Cham, Switzerland: Springer, 2013.
- [5] S. Christensen, et al., "Weighted sumrate maximization using weighted MMSE for MIMO-BC beamforming design," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, no. 12, pp. 4792-4799, Dec. 2008.