

# 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.

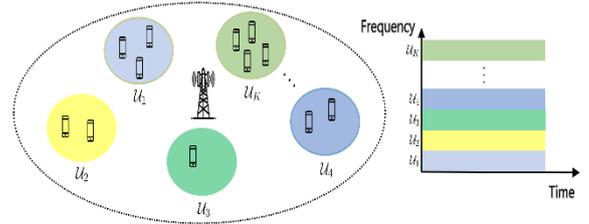


그림 1. 과부하 된 RSMA 다운링크 시스템의 유저 군집화

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

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

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  $\alpha$  를 최적화해 달성 가능한 총 전송률을 최대화한다.  $\alpha$  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

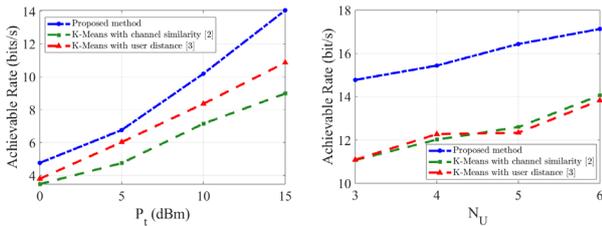


그림 2. 송신파워  $P_t$ (좌), 유저 수  $N_U$ 에 대한 합 전송률

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.