

고정 전송률 상향링크 NOMA 시스템에서 K-Plus 안티클러스터링 기반 사용자 그룹핑 기법

강민철, 김준수, 김수민*
한국공학대학교

E-mail: {swrkdalscjf, junsukim, *suminkim}@tukorea.ac.kr

K-Plus Anti-Clustering-Based User Grouping Scheme in Uplink NOMA Systems with Fixed-Rate Transmissions

Min Chul Kang, Junsu Kim, and Su Min Kim*
Tech University of Korea

요약

본 논문에서는 고정 전송률 사용자들의 상향링크 비직교 디중첩속 (NOMA) 환경에서 순차간섭제거 (SIC)의 디코딩 성능을 향상시키기 위한 K-Plus 안티클러스터링 기반 사용자 그룹핑 기법을 제안하였다. 제안 방식은 그룹 내 채널 이득의 다양성을 극대화하면서 그룹 간 평균 채널이득 분포를 균등하게 유지하여 NOMA 전송을 위한 SIC 수행 시, 그룹 내 신호 세기의 차이를 키우면서 디코딩 성공 확률을 높이면서도 그룹들의 평균 성능을 고르게 향상시킨다.

I. 서 론

비직교 디중첩속 (non-orthogonal multiple access, NOMA)는 동일 한 시간 주파수, 공간 자원 상에 두 대 이상의 단말에 대한 데이터를 동시에 전송하는 방식으로 차세대 6G 디중첩속 기술로서 주목을 받고 있다 [1]. NOMA 에서는 순차간섭제거 (successive interference cancellation, SIC) 기법을 이용하여 동일한 주파수 대역에서 다수의 사용자가 동시에 전송한 신호를 수신기에서 단계적으로 분리 및 디코딩 한다. 이 때, SIC 디코딩 성능은 사용자 간 수신 신호 세기의 차이에 직접적으로 의존한다. 즉, 강한 신호와 약한 신호 간의 채널이득 차이가 충분히 클 경우에는 간섭 제거가 용이하지만, 반대로 신호 세기가 유사한 경우에는 간섭 제거 과정에서의 오류 전파로 인하여 디코딩 성능이 급격히 저하된다 [1]. 또한, 네트워크 내 사용자 수가 과도하게 많아질 경우, SIC 의 복잡도와 디코딩 실패 확률 증가로 인해 오히려 전체 시스템 효율이 저하되어 NOMA 는 적정 사용자 규모 (환경에 따라 약 3~5 명 정도)에서 가장 높은 전송 효율을 보인다 [2]. 따라서 시스템 관점에서 전체 사용자를 다수 그룹으로 분할하고, 그룹 내에서는 NOMA, 그룹 간에는 직교 디중첩속 (orthogonal multiple access, OMA)을 적용하는 접근이 유효하다. 이러한 그룹 기반 NOMA 환경에서의 성능 향상을 위해 다양한 사용자 그룹핑 방법이 제안되었고, 채널이득이 가장 강한 사용자와 가장 약한 사용자를 페어링하는 방식이 대표적이다 [3]. 그러나 이러한 기존 방법들은 사용자 간 채널이득 차이는 최대화 하지만, 시스템 관점에서 그룹 간 채널 이득이 얼마나 균등하게 분포되는지에 해당하는 그룹의 성능 형평성은 고려하지 않는다. 이에 본 논문에서는 그룹 간 평균 뿐만아니라 분산 차이까지 고려하면서 그룹 내 채널 이득의 다양성을 극대화하는 K-Plus 안티클러스터링 알고리즘 기반의 사용자 그룹핑 기법을 제안하고 디코딩 성능을 평가한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1 과 같이 하나의 기지국과 균일하게 분포된 K 명의 사용자로 구성된 상향링크 NOMA 시스템 모델을 고려한다. 전체 사용자 집합은 G 개의 그룹으로 분할되며, 그룹당 사용자 수는 동일하게 할당한다. 일반화 손실 없이 K 는 G 의 배수로 가정한다.

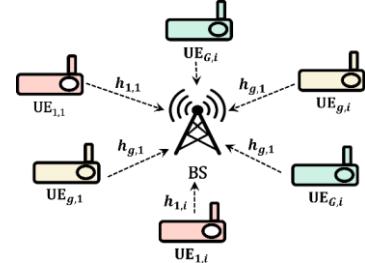


그림 1. 그룹 기반 상향링크 NOMA-OMA 시스템

g 번째 그룹의 i 번째 사용자의 송신신호는 (1)과 같이 표현된다.

$$x_{g,i} = \sqrt{P_{g,i}} s_{g,i}, \quad \forall i \in \{1, \dots, \bar{K}\}, g \in \{1, \dots, G\}, \quad (1)$$

여기서 그룹당 사용자 수 $\bar{K} = K/G$. 그룹 내에서는 NOMA로 그룹 내 모든 사용자가 동일한 주파수 자원 상에서 동시에 신호를 전송한다. 따라서 기지국에서 그룹 g 의 수신 신호는 (2)와 같이 표현된다.

$$y_g = \sum_{i=1}^{\bar{K}} h_{g,i} x_{g,i} + n_g, \quad (2)$$

여기서 $h_{g,i}$ 는 g 그룹의 i 번째 사용자의 기지국 간 채널 이득, n_g 는 평균 0, 분산 σ^2 인 백색 가우스 잡음이다. 상향링크 NOMA 시스템에서 기지국은 i 번째 사용자의 신호를 디코딩할 때, 해당 사용자 신호 이후 순서로 디코딩되는 모든 사용자 신호는 간섭으로 간주한다. 따라서 NOMA 시스템에서 각 사용자의 SINR 은 해당 메시지보다 우선순위가 낮은 수신신호들의 간섭으로 결정된다. 일반적으로 높은 SINR 을 먼저 디코딩하여 g 그룹의 i 번째 사용자의 SINR 은 (3)과 같다.

$$\gamma_{g,i} = \frac{|h_{g,i}| \rho_{g,i}}{\sum_{l \in Q_{g,i}} |h_{g,l}| \rho_{g,l}}, \quad (3)$$

여기서 $Q_{g,i} = \{l : \pi_{g,l} > \pi_{g,i}\}$ 는 i 번째 사용자 보다 디코딩 우선순위가 낮은 사용자 집합이고, $\pi_g = \{\pi_{g,1}, \dots, \pi_{g,\bar{K}}\}$ 는 그룹 g 내

사용자들의 디코딩 순서로 π_1 은 첫 번째 디코딩 사용자의 인덱스를 의미한다. $\rho_{g,i}$ 는 g 그룹의 i 번째 사용자의 송신 SNR 이다. 이 때, g 그룹의 i 번째 사용자의 데이터 전송률은 (4)와 같이 주어진다.

$$R_{g,i} = \log_2(1 + \gamma_{g,i}). \quad (4)$$

III. 제안 K-Plus 안티클러스터링 기반 사용자 그룹핑 기법

본 장에서는 그룹 기반 상향링크 NOMA 시스템에서 SIC 성능을 향상시키기 위한 K-Plus 안티클러스터링 기반 사용자 그룹핑 기법을 제안한다. 기존의 강-약 사용자 페어링 방식은 사용자 간 채널 이득 차이를 고려하지만, 그룹 간 채널이득 분포의 균형은 고려하지 않는다. K-Plus 안티클러스터링은 대표적인 K-means 클러스터링과는 대조적으로 그룹 내 사용자의 채널이득이 통계적으로 가장 넓게 분포되도록 하여 분산을 증가시키는 동시에 그룹 간 평균 채널이득의 세기와 분산이 균등하게 유지되도록 할 수 있다 [4]. 이를 통해 자원 배분의 균형을 이루면서도 각 그룹 내 SIC 과정에서 신호 분리가 명확해져 디코딩 성공률을 높이고 오류 전파를 효과적으로 줄일 수 있다.

본 논문에서는 각 사용자가 고정 전송률을 갖는 IoT 센서 노드로 가정하여 모든 사용자는 동일한 목표 전송률 \bar{R} 를 가지며 시스템의 성능은 이를 성공적으로 만족하는 사용자 수와 고정 전송률의 곱으로 평가된다. 이에 따라 최적화 문제는 다음과 같이 형성된다.

$$\begin{aligned} & \max_{\boldsymbol{\pi}_g} \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^K \bar{R} \cdot \mathbb{I}\{R_{g,i}(\boldsymbol{\pi}_g) \geq \bar{R}\}, \\ & \text{s.t. } \boldsymbol{\pi}_g = \{\pi_{g,1}, \dots, \pi_{g,K}\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\mathbb{I}\{\cdot\}$ 는 조건이 참이면 1, 거짓이면 0을 반환하는 지시함수이고, 최적화 목표는 고정 전송률 \bar{R} 이상을 달성하는 시스템 전체 사용자 수를 최대화하는 그룹 구성을 찾는 것이다. 또한 SIC 과정에서 비록 개별 사용자가 목표 전송률을 만족하더라도 이전 단계의 디코딩 실패가 발생하면 오류 전파로 인해 디코딩에 모두 실패한다고 가정한다. 이는 실제 SIC 수행 시의 직관적인 수신기 동작 과정을 반영한다. 제안 기법에서는 K-plus 안티클러스터링 알고리즘을 적용하여 채널 이득의 분산 정보 기반으로 그룹 내 채널 이득 차이를 극대화하면서 그룹 간 평균 이득을 균등하게 유지하도록 사용자 그룹핑 결과를 도출한다.

IV. 성능 평가

제안 기법의 성능은 시뮬레이션을 통해 $\bar{R} = 0.5$ 일 때 (5)의 목적함수에 해당하는 평균 성공 사용자 수와 \bar{R} 의 곱으로 평가한다. 총 세 가지 사용자 그룹핑 방식인 (i) 제안 K-Plus 안티클러스터링 (K-Plus) 기법, (ii) sorted round-robin 그룹핑 (Sorted-RR) 기법, (iii) Random 그룹핑 (Random) 기법에 대해 성능비교를 수행한다. 여기서 Sorted-RR 기법은 채널이득을 오름차순으로 정렬한 뒤, 각 그룹에 순차적으로 배정하여 그룹 간 균형을 확보한다. Random 기법은 채널 정보를 고려하지 않고 사용자를 무작위로 배정하는 방식이다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같고, 소규모 페이딩은 Rayleigh 분포를 따른다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

항목	값
Area	[100 x 100](m)
Position of BS	[50, 50]
Path loss	$L_0 (d/d_0)^{-(\alpha)}$ ($\alpha = 2.2, L_0 = -15\text{dB}, d_0 = 1\text{m}$)
Average SNR	40 dB
Number of UEs (K)	60
Number of Groups (G)	15
Number of Trials	10000
Required Rate (\bar{R})	0.5 bps/Hz

그림 2는 세 가지 사용자 그룹핑 방식의 평균 합 전송률과 평균 그룹 내 사용자 SNR 표준편차를 나타낸다. 제안 K-Plus 기법이 평균 약 12

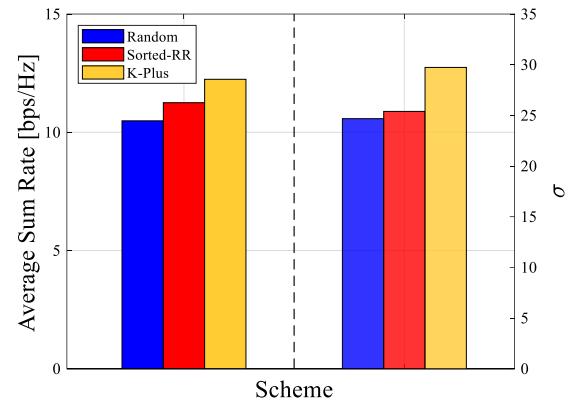


그림 2. 평균 합 전송률과 평균 그룹 내 SNR 표준편차 비교

2bps/Hz로 가장 우수한 성능을 보였다. 이 때, 그룹 내 표준편차는 약 29.7로 가장 크게 나타났는데 이는 제안 K-Plus 기법이 그룹 내 사용자 채널이득의 이질성을 증가시키기 때문이다. 또한, 제안 K-Plus 기법이 그룹 간 유사성 또한 동시에 증가시켜 특정 그룹에서만 SIC 성공 확률이 높은 것이 아니라 SIC 가 원활하게 되도록 그룹핑하는 것으로 해석된다. 반면, Random 기법은 평균 약 10.4 bps/Hz로 가장 낮은 성능을 보였으며, 그룹 내 표준편차도 약 24.6으로 가장 작아 채널 간 이질성이 낮은 것을 확인하였다. Sorted-RR 기법은 평균 약 11.2 bps/Hz, 표준편차 25.3으로 Random 기법보다 다소 향상된 성능을 보였지만 그룹 간 균등한 배정만 고려하여 그룹 내 채널이득 차이는 충분히 확보하지 못하는 경우가 많아 SIC 성공 확률이 제한적이라 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 그룹 기반 고정 전송률 상향링크 NOMA 시스템에서 그룹 간 형평성과 그룹 내 SIC 디코딩 성능을 동시에 개선하기 위해 K-Plus 안티클러스터링 기반 사용자 그룹핑 기법을 제안하였다. 제안 기법은 그룹 내 채널 이득의 분산은 극대화하고 그룹 간 평균 채널 이득의 균형은 유지함으로써 목적을 달성한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 평균 디코딩 성공 사용자 수 관점에서 복잡도 증가 없이 SIC 디코딩 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 하지만 선순위 디코딩 실패 시, 후순위 디코딩 실패는 오류 전파로 전체 시스템 성능의 저하를 초래할 수 있다. 제안 기법의 경우, 평균적으로 전체 사용자 수의 약 40%만 SIC에 성공하므로 SIC 성공률을 높이는 추가적인 개선방법이 필요하고, 이를 후속연구로 진행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부의 지원으로 정보통신기획평가원-학석사연계 ICT 핵심인재양성(IITP-2025-RS-2022-00156326, 50%)과 과학기술사업화 진흥원-대학기술경영촉진(TLO 혁신형)(RS-2024-00456813)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, "A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294–2323, 3rd Quart. 2018.
- [2] M.C. Kang, J.S. Kim, and S.M. Kim, "Opportunistic user scheduling for IRS-aided uplink rate-splitting multiple access," *Proc. Korean Institute of Communications and Information Sciences (KICS) Conf.*, Gangwon, Korea, Feb. 2025.
- [3] M. Bello, A. Chorti, and I. Fijalkow, "On the Optimal Power Allocation and User Pairing for Uplink Non-Orthogonal Multiple Access Networks," *arXiv preprint arXiv:2104.11679*, 2021.
- [4] M. Papenberg, "K-Plus antoclustering: An improved k -means criterion for maximizing between-group similarity," *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, vol. 77, no. 1, pp. 80–102, 2024, doi: 10.1111/bmsp.12315.