

멀티캐리어 NOMA를 위한 부채널 할당 알고리즘

김동현, 이인호*, 정해준

경희대학교, *한경국립대학교

{dhkim3988, haejoonjung}@khu.ac.kr, *ihlee@hknu.ac.kr

Subchannel Allocation Algorithm for Multi-Carrier NOMA

Donghyeon Kim, In-Ho Lee*, Haejoon Jung

Kyunghee Univ., *Hankyong National Univ.

요약

본 논문은 멀티캐리어 비직교 다중접속(multi-carrier non-orthogonal multiple access, MC-NOMA) 시스템에서 데이터 전송률을 최대화하기 위한 부채널 할당 알고리즘을 제안한다. MC-NOMA에서 부채널 할당은 mixed-integer non-linear programming (MINLP) 문제이기 때문에 기존의 접근법으로는 차선책의 결과만을 도출할 수 있다. 따라서, 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 MINLP 문제를 이진 결정 문제로 치환하고 해당 문제를 풀 수 있는 알고리즘을 제안해 기존의 부채널 할당 알고리즘 대비 높은 데이터 전송률 및 정전 성능을 보장할 수 있는 기법을 제안한다.

I. 서론

비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access, NOMA)은 기존의 다중 접속 대비 주파수 자원을 효율적으로 활용할 수 있어 자원 할당 측면에서 큰 관심을 받고 있다. 특히, 멀티캐리어 NOMA(multi-carrier NOMA, MC-NOMA)는 다수의 사용자들이 밀집되어 있는 환경에서 successive interference cancellation (SIC) 복잡도가 높아지는 문제를 효율적으로 해결할 수 있다 [1]. 따라서, 기존의 많은 휴리스틱 알고리즘들이 제안되었지만, MC-NOMA에서의 자원 할당은 mixed-integer non-linear programming (MINLP) 문제로 분류되고, 균등 전력 할당 기반을 가정하며 부채널을 할당하기 때문에 최적의 성능을 보장하기 어렵다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 MINLP 문제를 동등하게 변환한 이진 결정 문제를 제시한다. 그 후, 제시된 문제를 해결할 수 있는 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 알고리즘이 높은 데이터 전송률 및 정전 성능을 기존 알고리즘 대비 향상시킬 수 있는지를 보인다.

II. 시스템 모델 및 제안된 부채널 할당 알고리즘

본 논문에서는 U 명의 사용자들이 기지국에게 서비스를 제공받는 MC-NOMA 시스템을 가정한다. 여기서, 기지국은 B 의 대역폭을 균등하게 나눈 N 개의 부채널을 활용하고, 사용자 및 기지국은 모두 단일 안테나를 사용한다. 또한, 기지국과 사용자 간의 채널이 경로 손실 및 Rayleigh fading 기반으로 구성된다고 가정할 때, 부채널 n 에서 사용자 u 가 갖는 채널 대 잡음비는 \tilde{h}_u^n 라고 표기한다. 여기서, s_u^n , p_u^n , 그리고 Φ_u^n 를 각각 부채널 및 전력 할당 지수 그리고 SIC 디코딩 이후 남은 간섭을 일으키는 사용자의 집합이라 했을 때, MC-NOMA에서의 데이터 전송률은 다음과 같이 표현된다.

$$R_u^n = \frac{B}{N} \log_2 \left(1 + \frac{\tilde{h}_u^n s_u^n p_u^n}{\tilde{h}_u^n \sum_{m \in \Phi_u^n} s_m^n p_m^n + 1} \right). \quad (1)$$

본 논문에서는 각 사용자들이 최소 데이터 전송률 R_{\min} 을 충족하면서 총 데이터 전송률을 최대화 하는 다음과 같은 최적화 문제를 고려한다.

$$\max \sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{u \in \mathbb{U}} s_u^n R_u^n, \quad (2a)$$

$$\text{s.t.} \sum_{u \in \mathbb{U}} s_u^n \leq U_{\max}^n, \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad (2b)$$

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} s_u^n \leq 1, \quad \forall u \in \mathbb{U}, \quad (2c)$$

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{u \in \mathbb{U}} s_u^n p_u^n \leq P_{\max}, \quad (2d)$$

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} s_u^n R_u^n \geq R_{\min}, \quad \forall u \in \mathbb{U}, \quad (2e)$$

여기서, U_{\max}^n 그리고 P_{\max} 는 각각 부채널 n 에 할당할 수 있는 최대의 사용자 수 및 기지국의 최대 전력이고, 제시된 최적화 문제 (2)는 MINLP 문제로 간주되어 높은 성능을 보장하기 어렵다. 하지만, [1] 연구에서 제시된 것과 같이 (2a), (2b), (2d), 그리고 (2e) 들은 다음과 같이 n 번 째 부채널이 사용할 수 있는 총 송신 전력 q_n , $\forall n \in \mathbb{N}$ 에 대한 문제로 동등하게 변환될 수 있다.

$$\max \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{B}{N} \log_2 (1 + \Omega_n \tilde{h}_{U_{\max}^n}^n), \quad (3a)$$

$$\text{s.t.} \sum_{u \in \mathbb{U}} s_u^n \leq U_{\max}^n, \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad (3b)$$

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} s_u^n \leq 1, \quad \forall u \in \mathbb{U}, \quad (3c)$$

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} q_n = P_{\max}, \quad (3d)$$

$$q_n \geq Q_{\min}^n, \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad (3e)$$

여기서, $U_{\max}^n = \lceil U/N \rceil$ 는 각 부채널의 최대 사용자 수의 최적값이고,

$$\Omega_n = \left[(1 - \beta)^{U_{\max}^n - 1} \left(q_n - \sum_{m=1}^{U_{\max}^n - 1} \frac{\beta}{\tilde{h}_m^n (1 - \beta)^m} \right) \right]^+, \quad \text{이때, } \beta =$$

$$\frac{2^{R_{\min} N/B} - 1}{2^{P_{\min} N/B}} \quad \text{이며, } Q_{\min}^n = \sum_{m=1}^{U_{\max}^n} \frac{\beta}{\tilde{h}_m^n (1 - \beta)^m} \quad \text{은 부채널 } n \text{의 사용자들}$$

이 R_{\min} 을 모두 만족하기 위한 최소의 q_n 값이다.

제시된 문제 (3)에서 (3e)의 제약조건은 $\tilde{h}_{U_{\max}}^n \Omega_n \geq \frac{\beta}{1-\beta}$ 로 동등하게 변환이 가능하다. 여기서, $\beta/(1-\beta)$ 는 상수이기 때문에 결과적으로 (3a)와 (3e)는 동등한 관계임을 알 수 있고, 결론적으로 목적함수 (3a)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{B}{N} \log_2(1 + \Omega_n \tilde{h}_{U_{\max}}^n) \\ & \equiv \sum_{n \in \mathbb{N}} \left(q_n - \sum_{m=1}^{U_{\max}^*} \frac{\beta}{\tilde{h}_{U_{\max}}^n (1-\beta)^m} \right) = P_{\max} - \sum_{n \in \mathbb{N}} Q_{\min}^n, \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 전력 할당 지수가 (3d)와 (3e)를 만족한다고 가정하고 P_{\max} 는 상수값이기 때문에 MC-NOMA에서 데이터 전송률을 최대화하기 위한 최적화 문제 (2)는 다음과 같은 이진 결정 문제로 동등하게 변환된다.

$$\min \sum_{n \in \mathbb{N}} Q_{\min}^n, \quad \text{s.t. (3b) - (3c)}. \quad (5)$$

본 논문에서는 제안하는 최적화 문제 (5)를 풀기 위한 [2] 연구에서 제시된 매칭 알고리즘 기반의 부채널 할당 알고리즘을 제안한다. 예시로, $N=2$, $U=4$, 그리고 $U_{\max}^*=2$ 일 때, 제약조건 (3b)와 (3c)를 만족시킬 수 있는 부채널 할당 지수 $\mathbf{u}=[1,1,2,2]$ 를 사용한다. 여기서, \mathbf{u} 는 사용자 1과 2는 1번 부채널 그리고 나머지 사용자들은 2번 부채널을 할당 받음을 의미한다. 제시된 \mathbf{u} 는 다음과 같은 비용함수 $f_i = \sum_{n \in \mathbb{N}} Q_{\min}^n$ 을 최소화 할 수 있도록 각 사용자들의 부채널을 다른 사용자의 부채널과 교환하는 매칭 알고리즘 기반으로 최적화 되고, $f_i = f_{i-1}$ 이 될 경우 (이전 반복과 동일한 결과가 나올 경우) 알고리즘은 종료된다. 제시된 알고리즘은 [2]연구와 같은 매칭 알고리즘 기반의 기법이지만, 기존 연구는 균등 전력 할당을 기반으로 한 (1)의 데이터 전송률을 최대화 하기 위해 부채널 할당 지수가 최적화 되고, 이는 결국 차선책의 결과만을 도출한다. 하지만 제시된 알고리즘은 기존 MINLP문제를 동등하게 변환시킨 이진 결정 문제를 고려하기 때문에 최적에 가까운 성능을 얻을 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

본 장에서는 R_{\min} 의 변화에 따른 총 데이터 전송률 및 정전 확률에 대한 성능을 평가하기 위해 그림 1과 2와 같은 시뮬레이션 결과를 보여준다. 여기서, 셀의 반경은 500m, $B=2.5$ MHz, $U=10$, $N=5$, $P_{\max}=33$ dBm, 그리고 경로 손실 지수 4를 가정한다. 또한, 제안된 부채널 할당 (proposed subchannel allocation, Prop. SA) 기법과 비교하기 위해 [3] 연구의 유전 알고리즘 기반 부채널 할당 (genetic algorithm-based subchannel allocation, GA-SA), [1] 연구의 Suboptimal-SA, 그리고 최적 기법인 Exhaustive-SA 기법들이 사용된다. 이 때, 모든 기법들은 [1]에서 제안되는 최적 전력 할당 기법을 사용한다. 그림 1과 2에서 제시되는 것과 같이 모든 R_{\min} 의 영역에서 Prop. SA 기법의 총 데이터 전송률 및 정전 확률이 기존의 알고리즘들 대비 더 높은 성능을 달성하고, 최적의 기법과 매우 근접한 성능을 갖는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 MC-NOMA에서 총 데이터 전송률을 최대화 하기 위한 매칭 알고리즘 기반의 부채널 할당 알고리즘을 제안했다. 제안된 기법은

기존의 매칭 알고리즘 및 다른 휴리스틱 알고리즘 대비 제안된 이진 변환 문제를 기반으로 문제를 해결하여 최적 기법과 유사한 총 데이터 전송률 및 정전 확률 성능을 보였다. 따라서, 제안된 알고리즘을 기반으로 다수의 사용자가 밀집되어 있는 MC-NOMA 시스템에서 효율적으로 자원을 할당할 수 있음을 보인다.

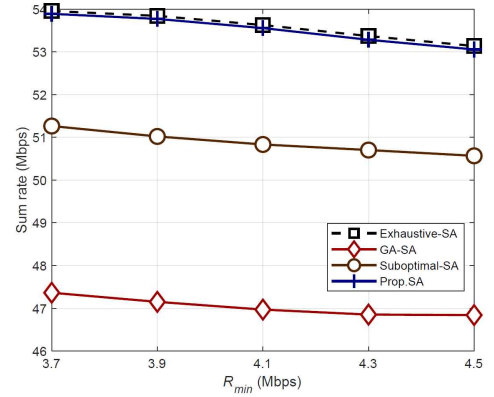


그림 1. R_{\min} 의 변화에 따른 총 데이터 전송률의 결과

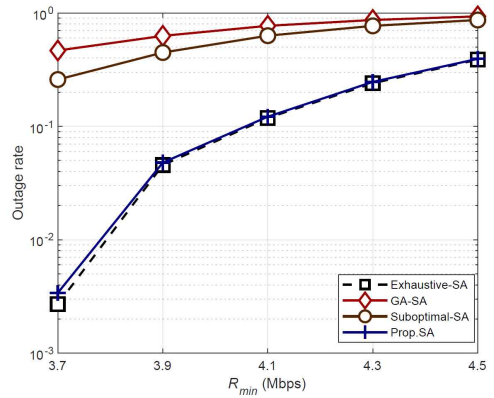


그림 2. R_{\min} 의 변화에 따른 정전 확률의 결과

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the MSIT, Korea, in part under the National Research Foundation of Korea grants (RS-2023-00303757, NRF-2022R1A2C1003388, and NRF-2022R1A4A3033401) and in part under the ITRC support programs (IITP-2024-2021-0-02046) supervised by the IITP.

참고 문헌

- [1] S. Rezvani, E. A. Jorswieck, R. Joda, and H. Yanikomeroglu, "Optimal power allocation in downlink multicarrier NOMA systems: Theory and fast algorithms," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 4, pp. 1162 - 1189, Apr. 2022.
- [2] H. Zhang, H. Zhang, K. Long, and G. K. Karagiannidis, "Deep learning based radio resource management in noma networks: User association, subchannel and power allocation," *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 2406 - 2415, Jun. 2020.
- [3] H. J. Park, H. W. Kim, and S. H. Chae, "Deep-learning-based resource allocation for transmit power minimization in uplink NOMA IoT cellular networks," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 9, no. 3, pp. 708 - 721, Jun. 2023.