

Cell-Free Massive MIMO 네트워크에서의 전력 효율 향상을 위한 중앙 집중형 AP 전력 할당 최적화 기법 연구

^{1,2}최윤주, ^{1,2}서승환, ^{1,2}최성균, ^{1,2}유지희, ^{1,2}송형규*

¹세종대학교 정보통신공학과, ²세종대학교 지능형드론융합전공

jj010513@naver.com, buffalo1997@naver.com, sk4753611@naver.com, wlgml5974@naver.com, *songhk@sejong.ac.kr

Study on centralized AP power allocation optimization for enhancing power efficiency in Cell-Free massive MIMO networks

^{1,2}Yoon-Ju Choi, ^{1,2}Seung-Hwan Seo, ^{1,2}Seong-Gyun Choi, ^{1,2}Ji-Hee Yu, ^{1,2}Hyoung-Kyu Song*

¹Department of Information and Communication Engineering and ²Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University, Seoul, 209 Neungdong-ro, 05006, Korea

요약

본 논문은 Cell-Free Massive MIMO 네트워크에서 전력 효율 향상을 위한 중앙 집중형 AP 전력 할당 최적화 기법을 제안한다. Cell-Free Massive MIMO 네트워크는 분산된 AP들이 협력하여 다수의 사용자를 지원하며 전력 할당의 최적화는 에너지 효율성 및 사용자 간 균일한 성능을 보장하는데 중요하다. 본 연구에서는 균등 전력 할당, 거리 기반, 적응형 기법과 제안된 최적화 알고리즘을 비교하여 데이터 전송률을 최대화하고 전력 효율을 최대화하는 방법을 제시한다. 시뮬레이션 결과, 제안된 기법이 기존 방식들에 비해 전력 효율성과 네트워크 성능이 크게 향상함을 확인하였다. 이 연구는 중앙 집중형 최적화 알고리즘이 Cell-Free Massive MIMO 네트워크에서 스펙트럼 효율과 에너지 활용이 개선되는 것을 입증한다.

I. 서론

기존의 셀룰러 네트워크는 사용자 장치(User Equipment, UE)가 각 셀의 기지국에만 연결되어 데이터를 송수신하므로 셀 경계에 위치한 사용자는 신호가 약해져 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 이와 비교하여 Cell-Free massive MIMO 네트워크는 여러 분산된 Access Point(AP)들이 중앙 처리 장치(CPU)에 의해 통합 관리되어 모든 AP가 협력하여 UE에 데이터를 전송하는 방식이다. 이를 통해 셀 경계 문제를 해결하고 사용자 간 신호 품질 및 커버리지 차이를 최소화할 수 있다. [1]

Massive MIMO 시스템은 다수의 AP를 활용하기 때문에 전력 자원을 효율적으로 배분하는 것이 중요하다. AP의 수가 많은 상황에서 AP와 사용자 간의 거리나 채널 상태를 고려하지 않고, 전력을 균등하게 할당하면 불필요한 에너지 소비가 증가할 수 있다. 이를 해결하기 위해 CPU에서 각 AP에 동적으로 전력을 할당하여 자원을 분배하는 연구가 진행 중이며 이를 통해 전력 효율성을 높이고 네트워크 전송 성능이 향상할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Cell-Free massive MIMO 네트워크에서 균등 전력 할당과 거리 기반 전력 할당 기법과 비교하여 전력 효율성을 향상시킨 중앙 집중형 AP 적응형 전력 할당과 최적화 기반 전력 할당 기법을 제안한다.

II. 본론

A. 시스템 모델

본 논문에서 다루는 Cell-Free Massive MIMO 시스템은 M 개의 AP가 K 명의 단일 안테나 사용자에게 데이터를 전송하는 분산형 네트워크 구조이다. AP의 수가 user의 수보다 많은 $M \gg K$ 를 가정하고, 모든

AP는 CPU에 fronthaul로 연결되어 중앙에서 제어된다. AP들은 동일한

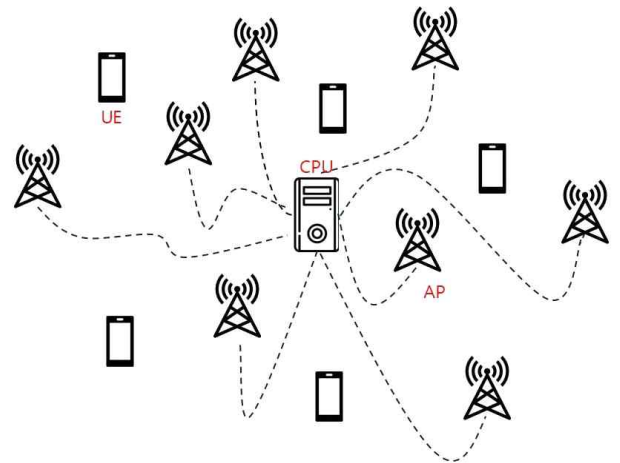


그림 1 Cell-Free massive MIMO 시스템 모델

시간 및 주파수 자원을 공유하며 AP는 CPU로부터 제공받은 전력을 기반으로 사용자들에게 데이터를 전송한다.

AP와 사용자 간의 거리는 난수 기반으로 생성되며 아래 식 (1)로 표현된다.

$$d_{m,k} = \|AP_m - UE_k\| \quad (1)$$

이 시스템은 Rayleigh Fading 채널을 고려하며 AP와 사용자 사이의 거리 shadowing을 고려한 통신 환경을 가정한다. 아래의 식 (2)와 같이 채널을 나타낸다.

$$h_{m,k} = g_{m,k} \cdot s_{m,k} \quad (2)$$

거리와 채널 정보를 바탕으로 AP는 중앙 처리 장치로부터의 전력 할당을 받는다.[2] 본 연구에서는 네트워크의 전력 효율성과 데이터 전송률을 향상시키기 위해 다양한 전력 할당 방식을 비교 분석한다.

B. 중앙 집중형 전력 할당 기법

1. 균등 전력 할당

네트워크 안에 있는 모든 AP에 동일한 전력을 할당하는 가장 간단한 방식이다. 이 기법에서는 AP와 사용자 간의 거리나 채널 상태를 고려하지 않으며 전체 전력을 AP에 균등하게 분배한다.

$$P_m = \frac{P_{total}}{M}, \quad \forall m \in 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

P_m 은 AP m 에 할당된 전력이고, P_{total} 은 총 전력이다.

2. 거리 기반 전력 할당

각 AP와 사용자 간의 거리를 기반으로 AP에 할당되는 전력을 결정한다. AP와 가까운 사용자들에게 더 많은 신호를 전달할 수 있는 AP는 더 적은 전력을 할당받고 더 먼 사용자들에게 신호를 전달하는 AP는 더 많은 전력을 할당받는다. 이 방식은 AP와 사용자 간의 거리만을 고려하여 비교적 간단하게 구현할 수 있다.

$$P_m = P_{total} \cdot \frac{\sum_{k=1}^K \frac{1}{d_{m,k}}}{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{1}{d_{m,k}}} \quad (4)$$

3. 적응형 전력 할당

AP와 사용자 간의 거리뿐만 아니라 사용자 실시간 전송률을 반영하여 각 AP에 동적으로 전력을 할당하는 기법이다. 이 방식은 AP와 사용자 간의 거리가 멀고 전송률이 낮은 사용자에게 더 많은 전력을 할당하여 성능을 보완하는 역할을 한다. 네트워크의 상황에 따라 전력 할당이 변화하므로 더 높은 전력 효율을 제공한다.

$$P_m = P_{total} \cdot \left(\frac{1}{\text{mean}(d_{m,k}) + \sigma^2} \right) \cdot \frac{\text{mean}(R_k)}{\sum_{k=1}^K R_k} \quad (5)$$

σ^2 은 잡음 전력, R_k 는 사용자 k 의 전송률을 의미한다.

4. 최적화 기반 전력 할당

채널 상태와 잡음 전력 요소를 반영하여 시스템의 전송률을 최대화하는 것을 목표로 하는 기법이다. 제약 조건 하에 전송률을 최대화하는 목적 함수를 설정하고, 이를 해결하기 위해 scipy 라이브러리의 'minimize' 함수를 사용한 최적화 기법을 적용하였다. 최적화 문제는 아래 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\max_{P_m} \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_m |H_{m,k}|^2}{\sum_{m' \neq m}^M P_{m'} \cdot |H_{m',k}|^2 + \sigma^2} \right) \quad (6)$$

$$\text{subject to } \sum_{m=1}^M P_m = P_{total} \quad (7)$$

C. 시뮬레이션 결과

그림 2는 Achievable Rate(bps/Hz)의 비교를 나타내며 최적화 기반 전력 할당이 가장 높은 전송률을 보였으며 이는 전력 효율이 가장 잘 반영되었음을 의미한다. 반면 균등 전력 할당은 가장 낮은 전송률을 나타내며 CPU-AP 할당이 이루어지지 않았을 때의 성능 저하를 보여준다.

그림 3은 Energy Efficiency(에너지 효율성)를 나타낸다. 최적화 전력 할당 기법이 에너지 효율성 측면에서도 가장 우수한 성능을 보였으며 특히 균등 전력 할당과 비교했을 때 두드러진 차이를 내었다. 이 결과는 전력을 효율적으로 할당함으로써 전체 시스템의 에너지 효율성을 극대화할 수 있음을 나타낸다.

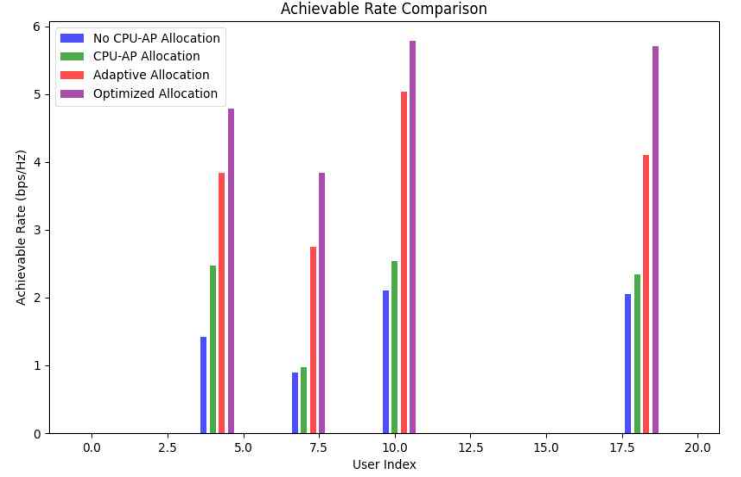


그림 2 기법별 Achievable Rate (bps/Hz)

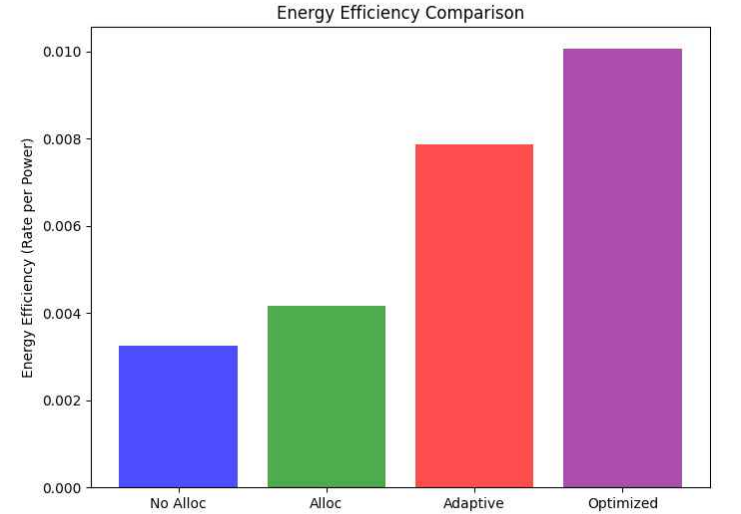


그림 3 기법별 Energy Efficiency

III. 결론

본 논문에서는 Cell-Free Massive MIMO 네트워크에서 전력 효율을 향상시키기 위한 중앙 집중형 AP 전력 할당 최적화 기법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 기법이 기존 방식에 비해 전력 효율성과 데이터 전송 성능이 크게 향상됨을 확인하였다. 향후 연구에서는 사용자 간 트래픽 정보 기반의 AP-UE 전력 할당까지 고려하여 전력 효율성을 더 높일 수 있는 방안에 대한 탐구가 필요한 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A6A1A03038540), 본 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송혁신인재양성(메타버스융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었음(IITP-2024-RS-2023-00254529), 본 논문은 과학기술정보통신부 및 정보

통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음
(IITP-2024-RS-2024-00437494)

참 고 문 헌

[1] Hengtao He." Cell-Free Massive MIMO for 6G Wireless
Communication Networks"
[2] Hamed Masoumi "Joint Pilot and Data Power Control in Cell-Free
Massive MIMO System"