

Fronthaul Capacity 제한이 있는 Cell-Free massive MIMO 환경에서 Massive Access를 위한 AP Clustering 알고리즘에 관한 연구

^{1,3}김진우, ²최성균, ^{1,3}송형규*

¹세종대학교 정보통신공학과, ²세종대학교 전자정보통신공학과, ³세종대학교 지능형드론융합전공
kjwccm@naver.com, sk4753611@naver.com, *songhk@sejong.ac.kr

A Study on the Access Point Clustering Algorithm for Massive Access in Cell-Free massive MIMO System with Finite Fronthaul Capacity

^{1,3}Jin-Woo Kim, ²Seong-Gyun Choi, ^{1,3}Hyoung-Kyu Song*

¹Department of Information and Communication Engineering ²Electronic Information and Communication Engineering and ³Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University, Seoul, 209 Neungdong-ro, 05006, Korea

요약

본 논문은 모든 Access Point (AP)들이 Fronthaul link를 통해 하나의 Central Process Unit (CPU)에 연결된 Cell-Free massive Multiple-Input Multiple-Output(MIMO)의 uplink 시스템에서 fronthaul capacity에 제한이 있을 때 spectral efficiency (SE) 성능을 향상시킬 수 있는 AP clustering 알고리즘을 제안한다. Cell-Free massive MIMO는 많은 AP들이 협력하여 user들을 지원하기 때문에 기존의 셀룰러 시스템보다 더 좋은 성능을 낼 수 있어 Beyond Fifth-generation(B5G) 및 Six-generation (6G)의 주요 관심 분야로 주목받고 있다. 하지만 이 시스템은 많은 fronthaul capacity를 요구하기 때문에, user-centric Cell-Free massive MIMO 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대부분의 user-centric Cell-Free massive MIMO 연구들은 AP의 수가 user의 수보다 매우 많은 상황을 가정하지만 본 논문에서는 massive Machine Type Communications (mMTC)를 위해서 user의 수가 AP의 수와 비슷하거나 더 많은 상황을 가정하였다. 본 논문에서는 유한한 fronthaul capacity를 만족하기 위해서 low resolution ADC를 사용하는 시스템을 구성하며 user가 많은 상황에서 AP와 user의 연결을 보장하기 위해 각 user는 large scale fading coefficient (LSFC) 값이 가장 큰 AP와 먼저 연결되고, 이후 각 AP에서는 user간 LSFC를 비교하여 더 큰 값을 가진 user와 연결하는 방식의 clustering을 제안한다. 이를 통해서 기존의 user-centric clustering 기법보다 SE 성능이 향상되었음을 확인하였다.

I. 서론

Beyond Fifth-generation (B5G) 및 Six-generation (6G)의 주요 기술로 연구되고 있는 Cell-Free massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)는 기존의 Cellular 시스템과는 다르게 coverage area 내의 다수의 Access Point (AP)들이 협력하여 user들을 지원하기 때문에 더 좋은 성능을 보장한다. Cell-Free massive MIMO는 서비스 지역 내의 AP들이 분산되어 있고, fronthaul link를 통해 Central Process Unit (CPU)와 연결되어 있는 구조이다. CPU에서는 신호처리를 담당하여 AP들이 협력해서 user들을 지원할 수 있게 한다. [1]

전통적인 Cell-Free massive MIMO 시스템은 user의 수가 증가할수록 복잡도가 높아지고, CPU의 fronthaul load가 커진다는 문제점이 존재한다. 이를 개선하기 위해서 모든 AP들이 협력하는 것이 아닌 일부의 AP들이 cluster를 구성하여 해당 cluster에 연결된 user를 각각 지원하는 user-centric Cell-Free massive MIMO 시스템이 제안되었다.

[3]에서는 기존의 cluster 방식인 AP간의 거리를 기준으로 미리 cluster를 overlap되지 않도록 구성하는 disjoint cluster방식과 user를 cluster 중앙에 두는 user at center 방식을 소개한다. 해당 논문에서는 먼저 AP들을 overlap되지 않도록 disjoint cluster를 구성한 뒤, 근처의 일부 AP들을 cluster에 더 추가한다. disjoint cluster를 core cluster라고 가정하며, 이 core의 주변으로 추가된 AP가 둘러싸고 있는 형태이다. 후 UE들은 가장 큰 LSFC를 가지는 AP와 연결되고 해당 AP가 속한 core의 다른 AP들과도 연결된다. 하지만 해당 논문에서는 user의 수가 매우 많은 상황을 고려

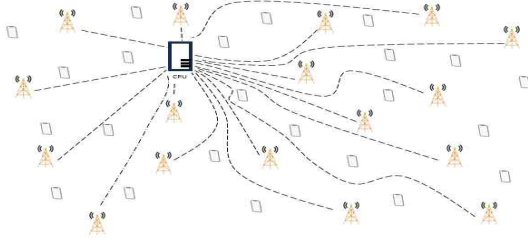
하지 않았고, fronthaul capacity에 제한을 두지 않은 이상적인 상황에서의 clustering이라는 한계가 존재한다. [2]에서는 user의 수가 AP수의 근접한 환경에서 massive access를 위한 user centric AP clustering 알고리즘과 user group based pilot assignment를 제안하였다. 하지만 user의 수가 AP의 수보다 매우 많은 상황에서는 Spectral Efficiency (SE)성능을 보장할 수 없고, fronthaul capacity에 대한 고려를 하지 않았다. 이를 개선하기 위해서 fronthaul-constrained user-centric massive MIMO 시스템을 제안한다. 미래 무선 통신 환경에서 generic services 중 하나인 mMTC를 지원할 수 있는 환경을 위해 AP보다 user의 수가 더 많은 환경을 가정하며 fronthaul capacity가 유한하기 때문에 이를 만족시키기 위해 low resolution adc를 사용할 것이며, 이에 따라 Additive Quantization Noise Model (AQNM) 모델을 통해 Quantization noise를 고려할 것이다. 또한 user간의 경쟁을 통해 AP를 선택하여 user에 따라 유동적으로 cluster를 구성할 수 있도록 user-centric 기반의 cluster를 구성할 것이다.

II. 본론

A. 시스템 모델

본 논문에서는 single 안테나를 가진 K 명의 유저가 존재하는 cell-free massive MIMO 환경을 고려한다. 모든 AP들은 하나의 CPU에 연결되어 있으며, Fronthaul capacity에 제한이 있다고 가정한다. AP l 과 UE k 사이의 채널은 h_{kl} 로 표현하며 h_{kl} 은 τ_c block 동안 channel 상태가 변하지 않는 block fading 모델을 사용한다. 각 블록에서 h_{kl} 은 correlated

Rayleigh fading을 겪으며, spatial correlation matrix와 AP들의 지리적 위치들과 같은 모든 deterministic 정보들을 CPU에서 알고 있다고 가정한다.



[그림 1] Cell-Free Massive MIMO 시스템 모델

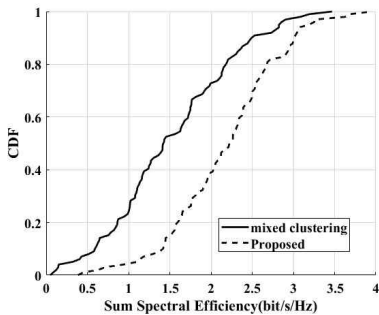
B. clustering 알고리즘

AP l 과 UE k 사이의 연결은 A_{kl} 행렬을 통해 표현하며, $A_{kl} = 1$ 인 경우, AP l 과 UE k 는 서로 연결되었다고 가정한다. 또한 User-centric cell-free massive MIMO를 가정했기 때문에, UE k 를 지원하는 AP들의 집합을 $M_k = \{l : A_{kl} = 1, l \in \{1, \dots, L\}\}$ 로 표현하며, AP l 이 지원하는 UE들의 집합을 $D_k = \{k : A_{kl} = 1, k \in \{1, \dots, K\}\}$ 로 표현한다.

Cluster 구성 과정은 먼저 각 AP는 pilot contamination을 줄이기 위해 pilot 길이만큼의 user를 지원할 수 있다고 가정하고, 각 user는 차례대로 자신을 지원할 수 있는 AP에 연결된다. 이때 AP가 지원할 수 있는 user의 수(pilot 길이)를 초과한 상태에서 다른 user가 연결되기를 원한다면, 지원하고 있는 user들과 새로 연결되기 원하는 user 사이의 LSFC를 비교하여 가장 작은 LSFC를 가지는 user를 해당 AP의 연결에서 제외한다. 또한 제외된 user는 경쟁에서 졌으므로 해당 AP의 black list로 등록되어 이후 다시 연결을 요청하지 않게 한다. 이 과정을 모든 user가 자신을 지원할 수 있는 AP가 없을 때까지 반복하며, 모든 AP의 black list가 된 user의 경우 해당 유저에게 가장 큰 LSFC를 가지는 하나의 AP와 연결되는 것으로 Clustering이 종료된다.

C. 시뮬레이션 결과

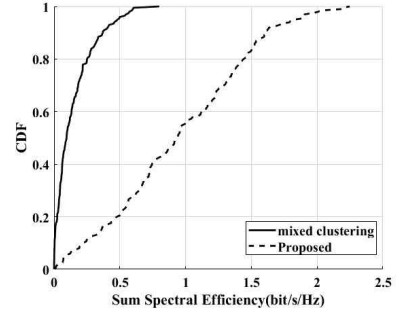
본 논문에서는 50개의 AP와 K 명의 유저가 0.5km X 0.5km coverage 지역 내에 독립적이고 균일하게 분포되어 있다고 가정한다. 또한 3GPP TS 36.814 표준 문서의 Urban microcell모델을 large scale propagation에 적용하였다. UE의 최대 전송 전력은 100mW이며, 대역폭은 20MHz, τ_c 는 200, τ_p 는 10으로 설정하였다. 파일럿 할당 방식은 [2]의 User-Grouping 방식을 이용하였다. clustering 알고리즘의 성능 비교는 [3]의 mixed clustering 기법에 AQNM 모델을 적용한 시뮬레이션 결과와 비교를 진행한다.



[그림 2] $K=100$ 일 때의 Sum SE

K 가 100명일 때의 성능 결과는 [그림 2]와 같다. 제안하는 기법이 기존의 mixed clustering 기법보다 더 좋은 Spectral Efficiency 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

[그림 3]에서 K 가 200명으로 AP의 수보다 더 많을 경우 기존의 mixed clustering 기법은 매우 낮은 성능 결과를 보여주지만 제안하는 기법은 SE 더 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.



[그림 3] $K=200$ 일 때의 Sum SE

III. 결론

Cell-Free massive MIMO는 B5G 및 6G의 중요한 기술로 주목받고 있다. 하지만 Cell-Free massive MIMO는 fronthaul load가 커진다는 단점이 있으며, 이를 개선하기 위해서 low-resolution ADC를 사용하였다. 대부분의 연구들은 user의 수가 AP의 수보다 적다는 가정을 하지만 mMTC를 고려하기 위해 user의 수가 AP의 수보다 같거나 많은 환경을 적용하였으며, 이때 기존의 clustering 방식보다 SE측면에서 더 좋은 성능을 보이는 clustering 기법을 제안하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A6A1A03038540). This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. NRF-2021R1A2C2005777).

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송 혁신인재양성(메타버스융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었음(IITP-2023-RS-2023-00254529)

참고 문헌

- [1] H. A. Ammar, R. Adve, S. Shahbazpanahi, G. Boudreau and K. V. Srinivas, "User-Centric Cell-Free Massive MIMO Networks: A Survey of Opportunities, Challenges and Solutions," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 1, pp. 611-652, Firstquarter 2022, doi: 10.1109/COMST.2021.3135119.
- [2] S. Chen, J. Zhang, E. Björnson, J. Zhang and B. Ai, "Structured Massive Access for Scalable Cell-Free Massive MIMO Systems," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 39, no. 4, pp. 1086-1100, April 2021, doi: 10.1109/JSAC.2020.3018836.
- [3] S. S. Galougah, H. Masoumi and M. J. Emadi, "User Management in Cell-Free Massive MIMO Systems with Limited Fronthaul Capacity," 2021 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, Islamic Republic of, 2021, pp. 853-858, doi: 10.1109/ICEE52715.2021.9544413.