

최근 사용자 중심 네트워크 및 클러스터링 기법에 관한 연구

이윤성, 송치현, 오준석, 조성래

중앙대학교 컴퓨터공학과

yslee@uclab.re.kr, chsong@uclab.re.kr, jscho@uclab.re.kr, srcho@uclab.re.kr

Recent Advances in User-Centric Network and Clustering Schemes

Yunseong Lee, Chihyun Song, Junsuk Oh, and Sungrae Cho

Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang Univ.

요약

최근 많은 데이터 트래픽 수요에 대한 대응과 데이터 전송의 연결성 보장을 위해 사용자 중심 네트워크 구조가 연구되고 있다. 해당 네트워크에서는 사용자가 하나의 기지국이 아닌 다수의 기지국으로부터 데이터를 동시에 전송 받아 높은 데이터 처리량과 안정적인 연결성을 보장한다. 이러한 장점을 극대화 하기 위해서는 효율적인 클러스터링 기법이 필요하며, 본 논문에서는 사용자 중심 클러스터링 기법들을 소개한다.

I. 서론

무선 데이터 트래픽의 폭발적인 증가가 고조됨에 따라, 차세대 무선 통신 시스템의 발전이 가속화되고 있다 [1]. 기존의 무선 네트워크는 셀 기반 (cell-centric) 아키텍처를 중심으로 설계되어, 사용자가 지리적으로 가장 가까운 기지국 또는 액세스 포인트(AP)와 연결되는 구조를 채택해 왔다. 그러나 이러한 연결 방식은 네트워크의 밀도 증가나 사용자 이동성 증가에 따라 트래픽 부하의 불균형, 셀 가장자리의 성능 저하, 빈번한 핸드오버 등의 문제를 초래한다.

이러한 한계를 극복하기 위해 최근 주목받고 있는 개념이 사용자 중심 네트워크이다. 이 패러다임은 기존의 셀 중심 구조와 달리, 네트워크가 고정된 셀이 아닌 사용자를 중심으로 동적으로 구성된다. 각 사용자는 단일 AP에 고정적으로 연결되는 것이 아니라, 실시간 채널 상태, 거리, QoS 요구사항 등을 기반으로 복수의 AP로 구성된 클러스터로부터 서비스를 제공한다. 이러한 구조는 자원 할당의 유연성을 제공하고, 핸드오버 빈도를 낮추며, 높은 데이터 처리량을 가능하게 한다. 본 논문에서는 이러한 사용자 중심 네트워크에서의 다양한 클러스터링 기법들을 소개한다.

II. 본론

[2]에서는 사용자 중심 협력 네트워크에서 클러스터 크기를 최적화하기 위해 핸드오프율과 데이터 전송률 사이의 트레이드오프를 이론적으로 분석한다. 두 가지 클러스터링 방식인 고정 개수 기반과 거리 기반을 비교하며, 각 방식에 대한 핸드오프율 및 평균 데이터율을 확률기하학적으로 모델링한다. [3] 연구에서는 사용자 중심 협력 전송 기반의 그룹 셀 핸드오프 기법을 통해 초밀집 네트워크에서 핸드오프 빈도를 효과적으로 줄이는 방안이 제안되었다. 본 기법은 사용자 이동 궤적과 AP 밀도, 협력 클러스터 크기에 따른 핸드오프율과 시그널링 오버헤드 간의 트레이드오프를 확률기하학적으로 분석한다. [4]에서는 사용자 중심 광무선통신 네트워크에서 셀 형성과 자원 할당을 동시에 최적화하기 위한 피드백 기반 반복 프레임워크를 제안하였다. 초기 클러스터링은 k-means 기반 유전 알고리즘을 활용하며, 이후 멀티유저Q-learning 알고리즘을 통해 변조 방식 및 전력

할당을 효율적으로 수행한다. [5]에서는 실내 가시광무선통신 시스템을 위한 사용자 중심 AP 클러스터링을 효율적으로 구현하기 위해, 안정적인 사용자 - AP 매칭 기반의 저복잡도 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방식은 시스템 총 전송률 극대화를 목표로 하며, 스왑 매칭을 통해 안정성과 성능을 동시에 확보한다. [6]에서는 셀프리 네트워크에서 사용자 중심의 AP 클러스터링과 업링크 전송 전력 제어를 동시에 최적화하는 방식을 제안한다. 제안된 알고리즘은 각 수신기의 간섭 제거 능력에 따라 최적의 클러스터 구성 조건을 분석한다. 이를 통해 최소 전력 소모로 사용자별 SINR 목표를 달성하는 반복 최적화 구조를 수립하고, 해당 알고리즘의 수렴성을 이론적으로 보장한다. [7] 연구는 셀프리 아키텍처에서 사용자 중심 클러스터링과 제한적 협력의 성능을 이론적으로 분석한다. 복합 페이딩 채널과 클러스터 반경, 협력 임계값이 사용자 데이터율에 미치는 영향을 포괄적으로 모델링하며, 확률기하 기반의 분석을 통해 다양한 사용자 유형별 평균 전송률을 유도한다. 특히, 빈 셀 확률, 협력 여부 판단 기준, 협력 AP 수에 따른 사용자 분류 모델을 제시하고, Laplace 변환을 통해 간섭 모델링의 정확도를 향상 시켰다. [8] 연구는 셀프리 중앙 집중식 클라우딩 무선 액세스 네트워크에서 복합 페이딩 채널 하의 사용자 중심 클러스터링 성능을 분석한다. 사용자와 AP의 위치를 각각 하드코어 포인트 프로세스와 포아송 포인트 프로세스로 모델링하고, 이를 근사하여 Laplace 변환 기반의 간섭 해석을 수행한다. 특히 보이드 셀의 존재 여부가 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하며, 클러스터 반경, 채널 페이딩 변수 등이 성능에 미치는 영향을 이론적 및 시뮬레이션 기반으로 평가한다. 분석 결과, 보이드 셀을 고려하지 않을 경우 성능 저하를 과소평가할 수 있으며, 네트워크 파라미터 설정에 따라 클러스터 크기와 AP밀도의 최적값이 존재함을 보인다. 이 연구는 복합 페이딩 조건과 사용자 밀도 하에서의 실용적 클러스터 설계에 중요한 기준을 제시한다. [9] 연구는 테라헤르츠 (THz) 대역에서 빔 비정렬 문제가 시스템 성능에 미치는 영향을 완화하기 위해 사용자 중심의 AP 클러스터링 방식을 도입한다. 제안된 방식은 적응형 클러스터링을 통해 사용자에게 가장 강한 신호를 제공하는 AP를 중심으로 협력 클러스터를 구성하며, 빔 비정렬 확률, 안테나 빔폭, 클러스터 반경 등을 고려한 수학적 모델을 구축한다. 중앙극한정리에 기반한 간섭

근사 분석을 통해 커버리지 확률을 정밀하게 도출하고, 이론 해석과 몬테 카를로 시뮬레이션을 통해 결과를 검증하였다. [10] 연구는 실내 가시광 통신시스템에서 간섭 최소화 및 자원 활용 극대화를 위해 사용자 중심 네트워크 전략을 제안한다. AP-UE 매칭 기반의 클러스터 구성을 시작으로, 스펙트럴 클러스터링을 통해 네트워크를 여러 서브네트워크로 분할하고, 각 서브네트워크 내에서 정교한 서브채널 할당을 수행한다. 간섭 기반 그래프 모델을 활용해 클러스터 간 상호 간섭을 정량화하고, 이를 기반으로 효율적인 분할 및 자원 재사용 전략을 설계하였다. 제안 기법은 K-means 그래프 컬러링, 라운드로빈 기법 대비 높은 수율과 간섭 억제 성능을 보여 주며, 특히 AP 밀도 증가 시에도 우수한 적응성과 성능을 유지한다. [11]은 Sub-6GHz, mmWave, THz 대역이 공존하는 하이브리드 네트워크에서 사용자 중심 클러스터링 및 기지국 협력 방식을 제안한다. 사용자 채널 상태에 따라 각 대역별로 동적으로 클러스터를 형성하고, 최대 데이터 전송률을 기준으로 최적의 클러스터를 선택한다. 확률기하학적 분석을 통해 대역별 커버리지 거리 분포, SINR 및 전송률 커버리지 확률을 도출하고 빔포밍 특성을 반영하여 정확도를 높였다.

III. 결론

본 논문에서는 사용자 중심 클러스터링에 관한 최근 동향을 소개하고 각 클러스터링이 진행될 때 무엇을 기준으로 실행되는지 조사하였다. 본 연구팀은 추후 연구에서 강화학습을 기반으로 한 이기종 네트워크에서 사용자 중심 클러스터링을 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2022-00156353, 50% / IITP-2025-RS-2023-00258639, 50%)

참 고 문 헌

[1] J. Kim, G. Caire and A. F. Molisch, "Quality-Aware Streaming and Scheduling for Device-to-Device Video Delivery," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 24, no. 4, pp. 2319-2331, Aug. 2016.

[2] Bao, Wei, and Ben Liang. "Optimizing Cluster Size through Handoff Analysis in User-Centric Cooperative Wireless Networks." IEEE Transactions on Wireless Communications 17.2 (2017): 766-778.

[3] Kibinda, Nyaura Mwinyi, and Xiaohu Ge. "User-Centric Cooperative Transmissions-enabled Handover for Ultra-Dense Networks." IEEE Transactions on Vehicular Technology 71.4 (2022): 4184-4197.

[4] Feng, Simeng, *et al.* "A Cross Q-Learning Assisted Resource Allocation for User-Centric Optical Wireless Communication Networks." IEEE Transactions on Green Communications and Networking (2025).

[5] Su, Yuhan, *et al.* "Efficient user-centric AP clustering through stable UE-AP matching for indoor VLC systems." IEEE Wireless Communications Letters (2024).

[6] Jayawardane, Achini, *et al.* "Optimal Power Allocation and Clustering in Cell-Free Wireless Networks." IEEE Transactions on Wireless Communications (2025).

[7] Jiang, Yi, *et al.* "Performance Analysis of User-Centric Clustering and Limited Cooperation in Cell Free Architecture." IEEE Transactions on Communications (2024).

[8] Huang, Wei, *et al.* "Performance analysis of user-centric clustering under composite fading channels." IEEE Transactions on Wireless Communications 22.6 (2022): 3687-3697.

[9] Humadi, Khaled, *et al.* "Terahertz User-Centric Clustering in the Presence of Beam Misalignment." IEEE Transactions on Vehicular Technology (2024).

[10] Su, Yuhan, *et al.* "User-Centric Networking for Indoor Visible Light Communication Systems: A Spectral Clustering-Based Approach." IEEE Transactions on Industrial Informatics (2024).

[11] Humadi, Khaled, *et al.* "User-centric cluster design and analysis for hybrid sub-6GHz-mmWave-THz dense networks." IEEE Transactions on Vehicular Technology 71.7 (2022): 7585-7598.