

RAN슬라이싱기반CF-mMIMO에서슬라이스내서비스차등화를위한 QoS - 인지AP-UE연결정책

^{1,2}김자은, ^{1,2}동기창, ^{1,2}최민혁, ^{1,2}정혜윤, ^{1,2}정영균, ^{1,2}송형규*

¹세종대학교 정보통신공학과, ²세종대학교 지능형드론융합전공

thinkdana@sju.ac.kr, tongjohn@sju.ac.kr, alsgruk@sju.ac.kr, zalfenz@sju.ac.kr,

20010892@sju.ac.kr, *songhk@sejong.ac.kr

QoS-Aware AP-UE Association Policy for Intra-Slice Service Differentiation in RAN-Sliced CF-mMIMO Systems

^{1,2}Ja-Eun Kim, ^{1,2}Ki-Chang Tong, ^{1,2}Min-Hyeok Choi, ^{1,2}Hye-Yoon Jeong,

^{1,2}Yeong-Gyun Jung, ^{1,2}Hyoung-Kyu Song*

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

요약

본 논문은 CF-mMIMO RAN 슬라이싱 환경에서 다운링크 전력전략을 비교군 간 동일하게 고정한 상태로, AP-UE 연결정책의 순수 효과를 공정하게 식별한다. 기존 상위이득 기반 매핑과 대비하여, QoS·프로파일 인지형 그리디 연결정책을 제안하며, 이는 per-AP/슬라이스 용량 제약, 슬라이스 우선순위, 선호 마스크, 프로파일별 목표 연결 수를 통합하고 동일 AP 내 파일럿 충돌을 후처리로 완화한다. 제안 설계는 AP 다이버시티 확대와 혼잡 AP 회피를 통해 전력전략을 변경하지 않고도 꼬리(아웃터지) 신뢰도와 URLLC 지연 특성을 개선하는 경향을 보인다.

I. 서론

Cell-Free Massive MIMO(CF-mMIMO)는 분산된 다수의 액세스 포인트(AP)가 협력하여 사용자 장치(UE)를 공동 서비스함으로써, 넓은 영역에서 균일하고 높은 체감 성능을 제공하는 차세대 무선 접속 기술이다 [1]. 한편, RAN 슬라이싱은 URLLC(초고신뢰·저지연), eMBB(초고속 모바일 광대역), mMTC(대규모 사물통신) 등 이질적 QoS 요구를 단일 물리 인프라에서 동시에 충족하기 위한 핵심 구현 기술이다[2].

이러한 고도화된 환경에서 AP-UE 연결정책(association/mapping)은 링크 다이버시티, 간섭 구조, 파일럿 충돌 가능성, 후속 스케줄링 부하에 직접 작용한다. 따라서 연결정책은 평균 성능뿐 아니라 아웃터지(꼬리) 성능, 지연, 공정성과 같은 핵심 지표를 좌우하는 근본 요소다.

그럼에도 다수의 선행연구는 전력할당·스케줄링·연결정책을 동시에 조정하여 성능을 보고하는 경향이 있어[3], 연결정책 자체의 순수 효과를 분리·정량화하기 어렵다. 본 논문은 이를 해소하기 위해 다운링크 전력할당을 모든 비교군에서 동일하게 고정하고, 연결정책만 교체하여 영향을 분석하는 공정 비교 프레임워크를 제안한다.

II. 본론

2.1 시스템 모델

본 논문은 L 개 AP와 K 개의 UE로 구성되며, 각 AP는 N 개의 안테나를 갖는 CF-mMIMO 하향링크 시스템을 가정한다. 래핑 사각 영역(높이 차 10 m)에서 시간자원은 $\tau_d = \tau_c - \tau_p$ 로 분할하며, AP별 DL 전력은 ρ_{tot}

로 제한한다. 채널은 $h_{l,k} = \sqrt{\beta_{l,k}} g_{l,k}$, $g_{l,k} \sim \mathcal{CN}(0, R_{l,k})$; 채널추정은 UL 파일럿 τ_p 개($K > \tau_p$ 시 재사용)를 사용하며, 마스터-AP 기반 최소간섭 배정과 MMSE 추정을 사용한다[1].

슬라이스는 {URLLC, eMBB, mMTC}로 구성하고 각 슬라이스는 2개 프로파일로 세분한다: URLLC {U_Crit, U_Norm}, eMBB {E_Stream, E_Peak}, mMTC {M_Crit, M_Batt}. 연결행렬 D 는 (i) 상위이득 기반 기준 매핑 또는 (ii) QoS·프로파일 반영 그리디(목표 M_k , per-AP/슬라이스 용량)로 결정한다. 전력할당은 비교군 간 동일(eMBB 가중비례, URLLC 프로파일별 max-min, mMTC max-min+cap)하며 $\sum_k \rho_{l,k} \leq \rho_{tot}$ 제약을 만족한다. 프로파일 정보는 연결·전력 양 단계에 반영되어 슬라이스별 QoS 특성을 보존한다.

2.2 연결정책 정의

본 논문에서 비교하는 연결정책은 다음과 같이 정의된다. 먼저, 기존 매핑(legacy)은 UE별 채널 이득이 큰 AP를 우선 선택하는 상위 이득 기반 방식(또는 master - per-pilot 기준으로 각 AP가 해당 파일럿에서 가장 이득이 큰 UE를 선택하는 절차)으로 구성된다. 즉, 연결행렬 $D \in \{0, 1\}^{L \times K}$ 의 각 열(UE)에 대해 정규화된 채널 이득이 큰 AP를 우선 배정하거나, 각 AP가 파일럿별로 최상 이득 UE를 선택하여 협력 집합을 형성한다.

반면, 제안 매핑(QoS-aware 그리디)은 슬라이스·프로파일 정보를 활용해 접수 기반으로 AP를 선택한다. UE k 에 대해 AP l 의 접수는

$$score_{lk} = w_g \tilde{g}_{lk} + w_d \tilde{d}_{lk} + w_l LoadAvail_l + w_p Pref_{l,s(k)} + w_q QoSProxy_l \quad (1)$$

로 정의하며, 여기서 \tilde{g}_{lk} 는 정규화 채널 이득, \tilde{d}_{lk} 는 근접도(거리의 역규모 정규화), $LoadAvail_l$ 는 AP l 의 잔여 용량 비율, $Pref_{l,s(k)}$ 는 UE의 슬라이스 $s(k)$ 에 대한 AP 선호마스크(비선호 시 감쇠 계수 적용), $QoSProxy_l$ 는 QoS 관련 가용성 지표이며, $\{w_g, w_d, w_l, w_p, w_q\}$ 는 비음수 가중치다.

알고리즘은 슬라이스 우선순위를 반영하여 UE를 처리하면서, 각 UE에 대해 점수가 큰 순서로 프로파일별 목표 AP 수 M_k 가 채워질 때까지 AP를 그리디하게 선택한다. 이때 모든 선택은 (i) per-AP 총 용량 제약 $\sum_k D_{lk} \leq cap_{total}$, (ii) per-slice 용량 제약 $\sum_{k \in k_s} D_{lk} \leq cap_{slice}(s)$ 을 동시에 만족해야 하며, (iii) 각 UE의 연결 차수는 $|\{l : D_{lk} = 1\}| \approx M_k$ 가 되도록 한다.

선택 후 동일 AP에서 동일 파일럿을 공유하는 UE가 존재하면, 해당 파일럿군에서 최대 이득 UE만 남기고 나머지를 해제하는 후처리를 통해 파일럿 충돌을 저감한다. 제안 방식은 연결행렬만 변경하고 전력 전략은 비교군 간 동일하게 유지되어, 평균 정책의 순수 효과를 공정하게 평가할 수 있다.

2.3 시뮬레이션

평가는 평균 5% 아웃티지 SE, URLLC p95: 1 ms 초과율을 사용하였다. 전력할당은 두 정책에서 동일하게 고정하고 연결정책만 바꿔 100×100 몬테카를로로 측정하였다. 기존 대비 QoS-프로파일 반영 그리디 연결정책의 슬라이스별 SE 변화는 다음과 같다: URLLC 평균 SE가 4.95→5.30 bps/Hz(+6.9%), 5% 아웃티지 SE 3.48→3.76 bps/Hz(+8.0%); eMBB 평균 SE 4.79→5.28(+10.4%), 5% 아웃티지 SE 1.41→1.82(+28.9%), mMTC 평균 SE 2.21→2.22(+0.3%), 5% 아웃티지 SE 0.94→0.78(-17.0%)

이러한 경향은 그림 1에서도 확인된다. 제안한 연결정책은 프로파일 정보를 반영해 혼잡 AP를 회피하고 AP다이버시티를 확장하며, 동일 AP 내 파일럿 충돌을 후처리로 줄여 전력전략을 바꾸지 않고도 꼬리 구간을 개선한다. 반면 우선순위·배터리 제약을 강하게 적용할수록 mMTC 꼬리 성능의 감소가 뒤따를 수 있어, 목표 M_k 와 슬라이스별 예산(전력·대역폭·cap)의 공동 튜닝이 필요하다. 전반적으로 본 결과는 슬라이싱된 CF-mMIMO에서 연결정책 설계 자체가 신뢰성 지표를 좌우하는 핵심 레버임을 시사한다.

지연 측면에서도 그림 2의 URLLC 결과가 이를 뒷받침한다. p95 기준 지연이 U_Crit에서 0.499→0.461 ms(-7.5%), U_Norm 0.746→0.641 ms(-14.0%)로 감소하였으며, 1 ms 초과율 역시 낮아졌다.

III. 결론

본 논문은 CF-mMIMO RAN 슬라이싱에서 전력전략을 동일하게 고정한 체 AP-UE 연결정책만 교체하여 순수 효과를 평가하였다. 제안한 QoS-프로파일 반영 그리디 평균은 기존 대비 URLLC/eMBB의 평균·5% 아웃티지 SE를 개선하고, URLLC p95 지연과 1 ms 초과율을 감소시켰다. mMTC 꼬리 성능의 제한적 하락은 우선순위·배터리 제약에 따른 트레이드오프이며 평균·공정성은 대체로 유지되었고, 향후 동적 M_k /가중치 적용 및 분산 구현을 과제로 남긴다.

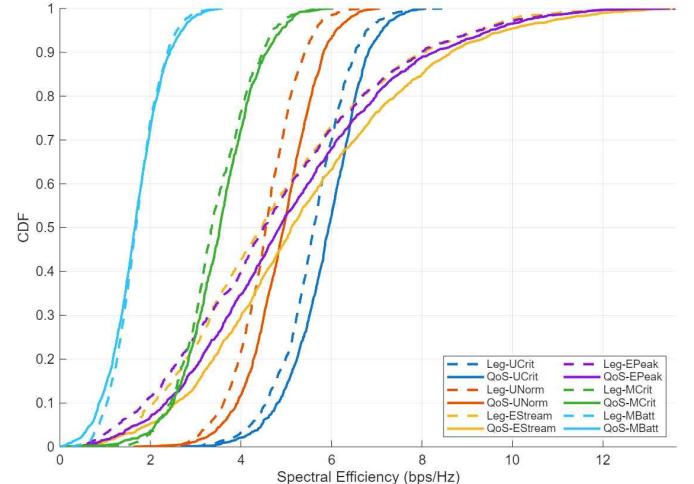


그림 1. 프로파일별 스펙트럼 효율 CDF 그래프: Legacy(점선) vs 프로파일-인지(실선)

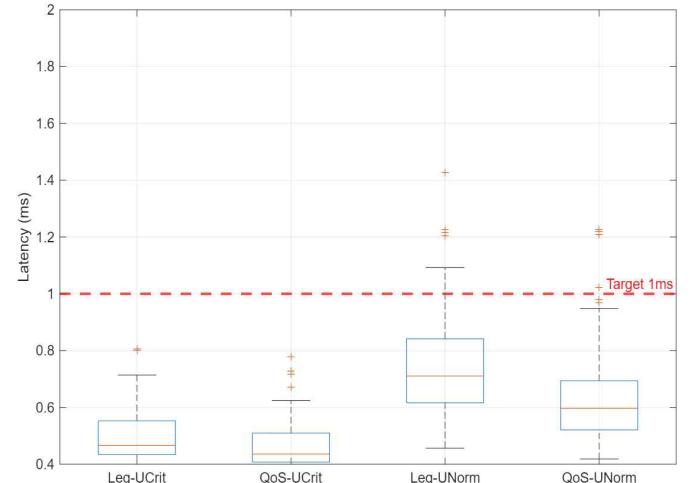


그림 2. URLLC 지연률 그래프

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A6A1A03038540)본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송혁신인재양성(메타버스융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었음(IITP-2025-RS-2023-00254529)본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT 연구센터사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2025-RS-2024-00437494)

참고 문헌

- [1] O. T. Demir, E. Björnson, and L. Sanguinetti, "Foundations of User-Centric Cell-Free Massive MIMO," *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 14, no. 3-4, pp. 162 - 472, 2021.
- [2] S. E. Elayoubi, S. B. Jemaa, Z. Altman, and A. Galindo-Serrano, "5G RAN Slicing for Verticals: Enablers and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 1, pp. 28 - 34, Jan. 2019
- [3] M. Karbalaei Motalleb, V. Shah-Mansouri, S. Parsaeefard, and O. L. Alcaraz López, "Resource Allocation in an Open RAN System Using Network Slicing," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 20, no. 1, pp. 471 - 485, Mar. 2023.