

Dense User-Centric Cell-Free Networks에서 Low Latency를 보장하는 Power Allocation Algorithm

^{1,2}신경호, ^{1,2}김진우, ^{1,2}박상욱, ^{1,2}유지희, ^{1,2}송형규*
¹세종대학교 정보통신공학과, ²세종대학교 지능형드론융합전공

shinkh1000@naver.com, kjwccm@naver.com, share1211@naver.com, wlgml5974@naver.com,
*songhk@sejong.ac.kr

Power Allocation Algorithm for ensuring the Low Latency in Dense User-Centric Cell-Free System

^{1,2}Kyung-Ho Shin, ^{1,2}Jin-Woo Kim, ^{1,2}Sang-Wook Park, ^{1,2}Ji-Hee Yu, ^{1,2}Hyoung-Kyu Song*

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

요약

본 논문은 dense user-centric scalable cell-free networks에서 각 유저의 queue backlog 정보와 effective data rate을 활용하여 네트워크 내의 UE(User Equipment)의 전력 할당을 하였다. 본 논문에서 제안한 전력할당 기법은 낮은 트래픽 환경에서 queue 안정화를 보장할 수 있다. 본 논문은 Lyapunov optimization과 SUS algorithm를 활용하여 queue 안정화와 throughput 성능을 보장할 수 있는 스케줄링을 진행한다. 스케줄링된 UE(User Equipment) 중에서 낮은 트래픽에서 queue backlog가 크며 effective data rate가 높은 UE에 많은 전력을 할당하는 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 모든 traffic 구간에서 queue 안정화를 유지할 수 있는 전력 할당 알고리즘은 저지연 성능을 요구하는 시스템에 적합하다.

I. 서론

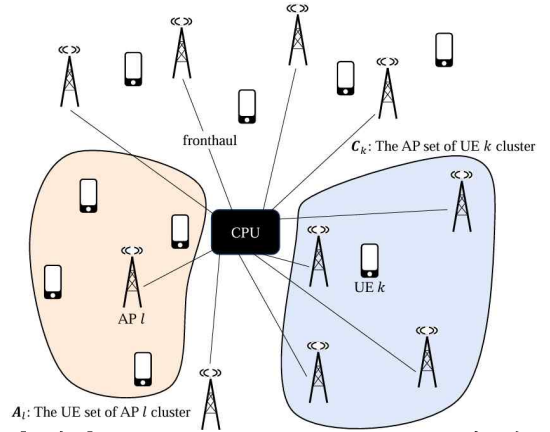
User-centric cell-free networks는 UE 주위에 분산되어 있는 AP(Access Point)가 공동으로 지원하는 네트워크이다[1]. 차세대 이동통신에서 급격한 device의 증가로 UE가 시스템 안테나보다 많은 환경이 구축될 가능성이 높다. 따라서 본 논문에서는 UE가 밀집되어있는 환경을 가정하여 효율적인 자원 할당에 관한 방식을 제안한다. CSI(Channel State Information)을 기반으로한 기존의 전력 할당 방식은 시스템 throughput 성능 높이기나 user-fairness를 달성하기 위한 방식이 대부분이었다. 하지만 본 논문에서는 random 또는 burst traffic에 상관없이 queue 안정성을 달성할 수 있는 전력할 할당 방식인 Queue-based FPA(Fractional Power Allocation)을 제안한다. 또한 밀집되어 있는 UE의 스케줄링을 위해 Lyapunov optimization을 활용하여 각 time-slot마다 CPU에서 UE의 QSI(Queue State Information)과 CSI(Channel State Information) 기반으로 스케줄링을 진행한다[2]. CPU에서 스케줄링한 후보 UE들이 각 AP의 안테나 개수를 초과한다면 SUS(semi-orthogonal user selection)을 활용하여 다시 스케줄링을 진행한다[3].

II. 본론

A. 시스템 모델

본 논문에서는 dense user-centric scalable cell-free networks을 고려하며 1개의 CPU에 연결되어 있는 L 개의 AP가 M 개의 안테나를 장착한다. 그리고 UE는 K 개가 랜덤하게 분포되어 있으며 CPU에서 스케줄링을 진행한 후보 UE는 $K_{act,CPU}$ 로 표시한다. 또한 채널을 시간-주파수 영역에서 coherence interval에서 채널이 변하지 않는다고 가정할 수 있는 표준 block fading model을 채택했다.

그리고 CPU에는 AP에서 추정된 채널이 fronthaul을 통해 CPU로 전송되는 것을 가정하며 K 개의 UE의 QSI 정보를 time-slot마다 업데이트한다



[그림 1] dense user-centric scalable cell-free 시스템
다. CPU에서 QSI를 업데이트하는 과정을 수식 (1)에서 나타낸다.

$$Q_k(t+1) = \max[Q_k(t) - r_k(t), 0] + a_k(t) \quad (1)$$

$Q_k(t)$ 는 UE k 의 queue backlog 정보이며 $a_k(t)$ 는 arrival rate, $r_k(t)$ 는 departure rate이다. CPU에서 $r_k(t)$ 는 실제 전송 전에 정확히 알 수 없기 때문에 추정된 채널 정보를 기반으로 effective data rate을 도출하며 이를 $r_k^*(t)$ 로 표현한다.

$$r_k^*(t) = \mathbb{E}[r_k(t) | \hat{\mathbf{h}}_k] \quad (2)$$

B. CPU scheduler

CPU에서는 UE의 queue 안정성을 보장하며 throughput을 최대화하는 스케줄링을 수행한다. drift-plus-penalty 목적함수를 최소화하는 UE를

선택하여 지원하는 방식으로 스케줄링을 진행하며 다음과 같은 수식으로 나타나게 된다.

$$\begin{aligned} \max_{K_{act,CPU}} \quad & \sum_{k=1}^K Q_k(t)r_k^*(t) + V\log(1+r_k^*(t)) \\ \text{subject to} \quad & \sum_{k=1}^K s_k(t) < K_{act,limit} \end{aligned} \quad (3)$$

$K_{act,CPU}$ 를 AP에서 지원할 때 AP의 안테나 자원을 초과하는 문제가 발생한다. 이때 AP는 SUS algorithm을 활용하여 UE를 다시 스케줄링하며 최종적으로 K_{act} 의 UE를 스케줄링 한다. 그리고 AP l 에서 스케줄링된 UE는 \mathbf{s}_l 로 표현한다.

C. Queue-based FPA

AP에서 전력 할당을 진행할 때 AP는 각 UE의 queue backlog와 effective data rate을 고려하여 전력 할당을 진행한다. AP에서 전력 할당은 다음과 같은 수식으로 나타난다.

$$\rho_{kl} = \begin{cases} \rho_{\max} \frac{(Q_k(t)r_k^*(t))^\nu}{\sum_{i \in \mathbf{s}_l} (Q_i(t)r_i^*(t))^\nu}, & k \in \mathbf{s}_l \\ 0, & k \notin \mathbf{s}_l \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)에서 ρ_{\max} 는 AP에서 최대 전력 값이며 ν 는 전력 할당 전략을 결정하는 값으로 $-1 \leq \nu \leq 1$ 범위의 값을 가진다. 본 논문에서는 $\nu = 0.5$ 로 설정하였다.

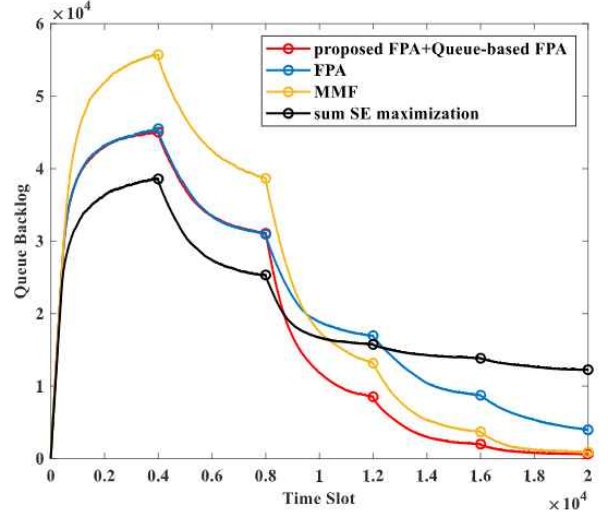
Queue-based FPA 방식의 전력 할당 방식은 각 UE의 queue backlog를 효과적으로 제거할 수 있으며 이는 low-latency가 요구되는 시스템에 효과적이다.

D. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 시뮬레이션 환경은 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 에 $L = 45$, $M = 4$, $K = 200$ 으로 UE가 밀집된 환경을 가정했다. $K_{act,CPU} = \frac{LM}{2} = 90$ 으로 제한하여 시스템 throughput을 최대화할 수 있는 스케줄링 UE의 수를 설정하였다. coherence interval은 $\tau_c = 200$ 이며, 채널 추정에 필요한 파일럿 길이는 $\tau_p = 10$ 으로 설정하였다. 각 UE의 arrival rate는 $a_k(t) = \text{Bernoulli}(p_k) \times A_{\max}$ 으로 설정하였으며 $\text{Bernoulli}(p_k)$ 는 time-slot마다 데이터가 p_k 확률로 queue에 들어오는 것을 의미하며 4000 time-slot 마다 $A_{\max} = 4\tau_c, 3\tau_c, 2\tau_c, 1.5\tau_c, 1\tau_c$ 로 바뀌는 환경을 가정하였다.

[그림 2] 전력 할당 방식에 따른 queue stabilization 성능

높은 traffic에서 FPA를 활용하며 낮은 traffic에서 본 논문에서 제안한 Queue-based FPA를 활용한 전력 할당 방식은 전 구간에서 적절한 queue backlog 제거 능력을 보여준다. 특히 낮은 traffic 구간에서 가장 좋은 queue backlog 제거 능력을 보여줘 low-latency를 달성할 수 있다. sum SE maximization 방식은 높은 traffic에서 가장 우수한 queue backlog 제거 능력을 보여주는데 이는 모든 UE가 queue backlog가 높아 throughput 성능이 가장 좋은 전력 할당 방식이 queue backlog 제거 능력이 가장 좋다. MMF(max-min fairness)는 UE간의 공정한 전력 할당을 최적화했기 때문에 높은 traffic 구간에서 가장 좋지 않은 성능을 보여주



며 낮은 traffic 구간에서는 channel 상태가 좋지 않은 UE에 전력을 많이 할당하여 모든 UE에 공평한 queue backlog 제거에 기여한다.

III. 결론

본 논문은 dense user-centric scalable cell-free networks에서 queue 안정화 성능을 보장하기 위해서 Queue-based FPA를 제안했다. 시뮬레이션 결과를 통해서 낮은 traffic 구간에서 다른 전력 할당 기법보다 우수한 queue backlog 제거 성능을 보여줌을 확인하였다. 따라서 low-latency가 요구되는 시스템에서는 본 논문에서 제안한 Queue-based FPA를 적용하는 것이 고려될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A6A1A03038540).

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송 혁신인재양성(메타버스융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었음 (IITP-2024-RS-2023-00254529).

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2022-00154678).

참고 문헌

- [1] Demir, T.; Björnson, E.; Sanguinetti, L. Foundations of User-Centric Cell-Free Massive MIMO; 2021.
- [2] Neely, M. Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems; Vol. 3, 2010. <https://doi.org/10.2200/S00271ED1V01Y201006CNT007>.
- [3] Yoo, T.; Goldsmith, A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 2006, 24, 528 - 541. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2005.862421>.