

Cell-Free Networks에서의 AI 기반 적응형 CDRX Cycle을 통한 전력 효율 및 지연 시간 개선에 대한 연구

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

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

A Study on Improving Power Efficiency and Latency through AI-Based Adaptive CDRX Cycles in Cell-Free Networks

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

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

요 약

본 연구는 Cell-Free 네트워크에서 AI 기반 적응형 DRX(Discontinuous Reception) Cycle 조절 기법을 제안하여 전력 소모 및 지연 시간을 개선하는 데 중점을 두고 있다. DRX는 UE(User Equipment)의 전력 소비를 줄이기 위해 데이터를 불연속적으로 수신하게 하여, 수신하지 않는 시간 동안 전력 소모를 감소시키는 기술이다. 그러나 고정된 DRX Cycle은 다양한 트래픽 패턴을 가진 UE에 대해 비효율적인 전력 소비와 지연 시간을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 LSTM(Long Short-Term Memory) 기반의 AI 트래픽 예측 모델을 활용하여 각 UE의 트래픽 패턴을 분석하고, 이를 바탕으로 Inactivity Timer, Short Sleep Timer, Long Sleep Timer와 같은 DRX Cycle을 적응적으로 조정하는 방식을 제안한다. 시뮬레이션 결과, 제안된 AI 기반 적응형 DRX Cycle 조절 기법은 고정 DRX Cycle 기법에 비해 누적 활성 시간을 효과적으로 줄였으며, 이는 전력 소모 감소로 이어진다. 또한, 전체 네트워크의 지연 편차를 줄여, 일정 수준의 QoS(Quality of Service)를 보장하는 네트워크 안정성을 제공하는 것을 확인하였다.

I. 서 론

사용하는 주파수 대역이 높아지는 것은 사용자에게 더 빠른 데이터 전송 속도와 낮은 지연 시간을 제공하지만 동시에 UE의 에너지 소모를 크게 증가시킨다. [1] 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 DRX 메커니즘은 UE가 데이터를 불연속적으로 수신하도록 하는 기술이며, 수신하지 않는 구간에서 전력 소모를 줄일 수 있다. 반면, Cell-Free 네트워크는 다수의 AP (Access Point)가 협력하여 네트워크 전역에 걸쳐 사용자에게 균일한 서비스를 제공하는 혁신적인 구조이다. 기존의 셀 기반 네트워크와 달리 셀 경계 문제를 제거하고, 보다 높은 스펙트럼 효율을 제공할 수 있다. 이때 Cell-Free 네트워크의 CPU는 AI를 통해 각 UE의 트래픽 패턴을 분석하고, 그 결과를 기반으로 UE에게 적합하게 조절된 DRX Cycle을 AP에게 전달할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 서로 다른 트래픽 패턴을 가진 UE의 DRX Cycle을 적응적으로 조절하여 전력 소모 및 지연 시간을 개선하는 기법을 제안한다.

II. 본론

A. CDRX

RRC 연결 모드에서 사용되는 CDRX (Connected Mode DRX)는 [그림 1]과 같이 이루어지며, UE는 Sleep 상태로 들어가기 전에 onDuration Timer 동안 PDCCH(Physical Downlink Control Channel)를 모니터링한다. 패킷이 도착한 경우, InactivityTimer만큼 활성상태를 유지하며 만약 InactivityTimer가 만료되기 전에 새로운 패킷이 도착한다면

InactivityTimer는 갱신된다. 패킷이 도착하지 않으면 정해진 횟수의 Short-DRX-Cycle을 거친 후 long-DRX-Cycle로 전환되어 더 긴 시간 동안 수신을 꺼 전력 소모를 줄인다. [2]



[그림 1]. DRX 구성

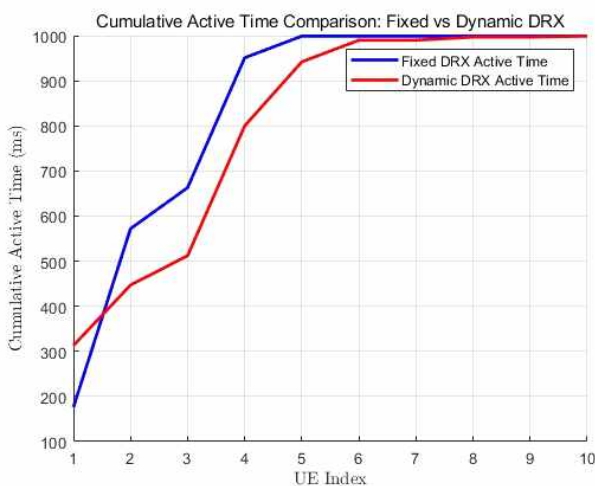
CDRX는 UE의 전력 소모를 줄일 수 있는 효과적인 방법이지만, 데이터를 제때 수신하지 못할 경우 전송 지연이 발생할 수 있다. 이러한 지연을 결정짓는 핵심 요소인 onDurationTimer, drx-InactivityTimer, longDRX-Cycle과 같은 파라미터들은 AP가 RRC를 통해 UE에게 전달하게 된다. [3] 이 파라미터들이 적절하게 설정되지 않으면 전력 절감 효과는 제한되고, 지연 시간이 늘어나 네트워크 성능에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 특히, UE의 트래픽 특성을 고려하지 않은 고정된 DRX Cycle은 전력 소모와 지연 시간을 증가시킬 가능성이 크다. 따라서 본 논문에서는 서로 다른 패킷 발생률(λ)을 가진 UE를 가정하고 LSTM 기반 AI 트래픽 예측 모델을 활용해 분석하고, 각 UE에 적합한 drx-InactivityTimer, short DRX-Cycle, longDRX-Cycle을 적용하는 기법을 제안한다.

B. 시스템 모델

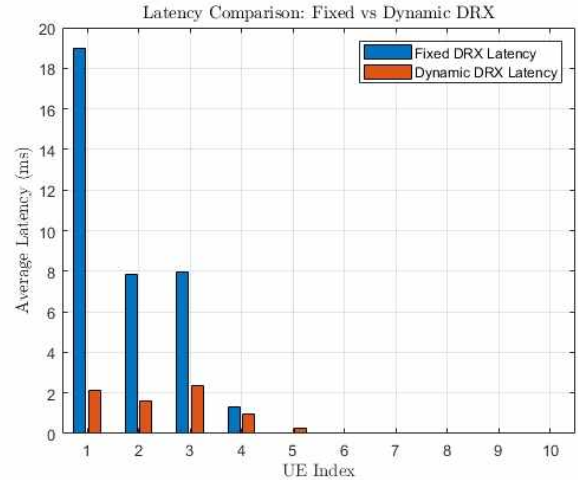
본 연구에서는 총 25개의 AP와 10개의 UE로 구성된 Cell-Free 네트워크 환경을 구현하였다. 각 AP는 4개의 안테나를 보유하고 있으며, UE는 Poisson 분포를 따르는 트래픽 패턴을 기반으로 패킷을 수신한다. 각 AP는 고정된 송신 전력을 사용하며, 시뮬레이션의 총 시간은 1000ms로 설정되었다. 시뮬레이션은 두 가지 방식으로 진행되었다. 첫 번째 방식은 고정된 DRX 주기를 사용하는 방식으로, 일정한 Inactivity Timer, Short Sleep Timer, Long Sleep Timer를 사용하여 각 UE가 데이터를 수신하도록 하였다. 두 번째 방식은 LSTM 기반의 AI 트래픽 예측 모델을 사용하는 방식으로 각 UE의 트래픽 패턴을 예측하고, 그에 따라 DRX 주기를 적응형으로 설정하였다. 이를 통해 각 UE의 트래픽 패턴에 최적화된 Inactivity Timer, Short Sleep Timer, Long Sleep Timer를 동적으로 조정하였다.

C. 시뮬레이션 결과

[그림 2]는 각 UE에 대해 고정 DRX Cycle방식과 적응형 DRX 방식의 누적활성시간을 비교한 그래프이며, [그림 3]은 두 방식에 따른 지연시간을 UE 인덱스별로 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 환경은 UE 인덱스가 증가할수록 트래픽 발생률이 높아지도록 설계되었으며, 이를 통해 다양한 트래픽 조건에서 두 DRX 방식의 성능 차이를 분석할 수 있다. [그림 2]를 통해 고정 DRX Cycle방식에 비해 적응형 DRX 방식이 전체적으로 더 낮은 누적활성시간을 갖는 것을 확인할 수 있다. 트래픽 발생률이 높아짐에 따라 누적활성시간이 증가하는 것은 당연한 결과이지만, [그림 2]에서 고정 DRX Cycle방식의 누적활성시간이 적응형 DRX 방식에 비해 빠르게 포화되는 것을 확인할 수 있다. 더 나아가 [그림 3]에서 볼 수 있듯이, 트래픽이 적은 UE에서는 고정 DRX 방식이 상당히 큰 지연 시간을 유발하며, 이는 트래픽 특성에 맞추어 유연하게 동작하지 못하는 고정 방식의 한계를 명확히 드러낸다. 반면, 적응형 DRX 방식은 트래픽 변화에 적응하여 지연시간의 편차를 줄이고 보다 안정적인 성능을 제공함으로써, 전체적으로 향상된 QoS(Quality of Service)를 달성한다.



[그림 2]. UE별 누적 활성시간 비교 그래프



[그림 3]. UE별 지연시간 비교 그래프

III. 결론

본 논문에서는 Cell-Free Network에서 AI를 활용한 적응형 DRX Cycle 조정 방식을 통해 전력 소비와 지연 시간을 동시에 개선할 수 있는 가능성을 제시했으며, 이를 통해 네트워크 운영 비용을 줄이고 사용자 경험을 향상할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 다양한 실시간 트래픽 패턴을 더 정확하게 반영하여, 실제 환경에 더욱 가까운 시뮬레이션과 평가가 이루어질 필요가 있다.

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-2024-RS-2023-00254529)

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-RS-2024-00438007)

참 고 문 헌

- [1] Höglund, Andreas, et al. "3GPP release 18 wake-up receiver: Feature overview and evaluations." *IEEE Communications Standards Magazine* 8.3 (2024): 10-16.
- [2] K. -H. Lin, H. -H. Liu, K. -H. Hu, A. Huang and H. -Y. Wei, "A Survey on DRX Mechanism: Device Power Saving From LTE and 5G New Radio to 6G Communication Systems," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 1, pp. 156-183, Firstquarter 2023, doi: 10.1109/COMST.2022.3217854.
- [3] 김태용, 조규성, 조성호. (2014-06-25). LTE 스마트폰의 배터리 절감을 위한 기지국의CDRX 적용 기법에 관한 연구. 한국통신학회 학술대회논문집, 제주.