

무선 채널 변동 하에서 안정적인 응용 수준 지연 보장을 위한 맞춤형 무선 자원 스케줄링 프레임워크

김세래, 진성현, 김태현, 이경한*

서울대학교

seraekim@snu.ac.kr, sunghyunjin@snu.ac.kr, taehunkim@snu.ac.kr *kyunghanlee@snu.ac.kr

A Tailored Radio Scheduling Framework for Reliable Application-level Latency under Dynamic Wireless Channels

Serae Kim, Sunghyun Jin, Taehun Kim, Kyunghan Lee

Seoul National University.

요 약

시간 민감형(time-critical) 애플리케이션을 안정적으로 지원하는 것은 URAN(Ultra Reliable Aerial Network)과 같은 차세대 무선 환경에서 중요한 과제다. 그러나 기존 RAN(Radio Access Network) 시스템은 처리량이나 패킷 지연과 같은 네트워크 지표를 중심으로 설계되어 있어, 실제 애플리케이션의 동작 요구를 충분히 반영하지 못한다. 본 연구는 애플리케이션의 동작 단위인 ADU(Application Data Unit)에 착안하여, ADU 단위의 전송 지연을 직접적으로 보장해야 애플리케이션의 시간 요구를 충족할 수 있음을 보인다. 특히, ADU는 작업별로 크기와 마감 지연이 유동적으로 변하며, 실시간으로 변동하는 무선 채널 상태 및 요청 도착 시점의 불확실성까지 함께 고려해야 하므로, 전송 지연 보장은 더욱 복잡한 문제로 이어진다. 이를 해결하기 위해, 본 논문은 ADU 중심으로 정보를 받아 무선자원을 스케줄링하여 최종적으로 사용자의 QoE(Quality of Experience)를 최대화하는 RAN 시스템을 제안한다. 이는 ADU 기반 자원 관리 모듈과 불확실성 보장 모듈로 구성되며, OpenAirInterface 상에 구현되어 실제 5G NR 채널 환경에서 검증되었다. 실험 결과, 본 연구는 다양한 불확실성 하에서도 ADU 전송 지연을 안정적으로 제어하면서 자원 효율성까지 달성함을 확인하였다.

I. 서 론

초신뢰 공중 네트워크(Ultra Reliable Aerial Network, URAN)와 같이 고신뢰·저지연이 동시에 요구되는 환경에서는, 시간에 민감한 애플리케이션을 위한 데이터 전송을 정밀하게 제어할 수 있는 무선 시스템이 필요하다 [1]. 그러나 현재의 셀룰러 무선 접속망(Radio Access Network, RAN)은 처리량(throughput)이나 패킷 지연(packet latency)과 같은 네트워크 중심의 지표가 애플리케이션 요구를 충분히 설명할 수 있다는 가정을 기반으로 설계되어 있으며, 이러한 방식은 실제 애플리케이션 동작의 적시성을 보장하는 데 한계가 있다.

이 문제의 핵심은, 시간 민감형 애플리케이션이 특정 작업을 수행하기 위해 완전한 단위의 데이터 집합을 요구한다는 점이다. 이러한 단위를 애플리케이션 데이터 단위(Application Data Unit, ADU)라 정의하며, ADU의 전송이 완료되어야만 애플리케이션의 동작이 가능하고 사용자의 QoE(Quality of Experience)를 최대화할 수 있다. ADU는 작업 종류나 처리 결과에 따라 크기의 변동성이 그림 1과 같이 매우 크고 마감 지연(target latency) 또한 유동적으로 변화하며, 전송 지연이 곧 애플리케이션 지연으로 직결되는 특성을 지닌다. 따라서, RAN은 개별 ADU 전송 지연을 직접적으로 제어할 수 있어야 하며, 이는 기존 지표 기반 방식으로는 대응이 어렵다.

II. 본론

본 연구는 ADU 기반의 전송 지연을 직접 제어하기 위해, ADU 단위로 무선 자원을 할당하는 문제를 정의하고 이를 해결하는 시스템을 제안한다. 이때 무선 자원은 매 전송시간간격 (Transmission Time Interval, TTI)마

다 주파수 축으로 나뉘어진 리소스 블록(Resource Block, RB)으로 구성이

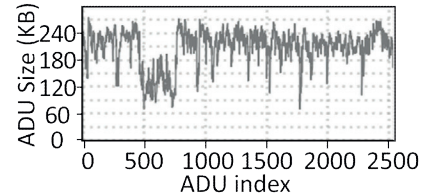


그림 1. 3D 랜더링의 데이터 셋에서의 시간에 따른 ADU 사이즈의 변화

되어 TTI t 에서 주파수 축 기준 f 순서에 있는 자원에 대해 각 RB를 $r_{t,f}^i$ 라고 정의한다. 문제의 목표는 각 ADU A^i 에 대해 마감 기한 d^i 까지에 필요한 전송량을 모두 전달할 수 있도록 RB $r_{t,f}^i$ 를 RB 하나당 전송 가능한 자원의 양 $c_{t,f}^i$ 를 고려하여 배분되 자원 전체 시스템 자원 한도를 초과하지 않으면서 자원 효율을 극대화하는 것이다. 이를 통해 애플리케이션이 요구하는 작업이 지연 없이 실행될 수 있도록 보장한다. 이를 수학적 최적화 문제로 공식화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}: \quad & \mathbf{z} = \min_{\mathbf{r}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{f \in \mathcal{F}} r_{t,f}^i \\ & \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{f \in \mathcal{F}} r_{t,f}^i \cdot c_{t,f}^i \geq A^i, \quad \forall i \in \mathcal{I}. \\ & r_{t,f}^i = \begin{cases} 1 & \text{if the RBG at } (t, f) \text{ is allocated to ADU } i, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \\ & \sum_{i \in \mathcal{I}} r_{t,f}^i \leq 1, \quad \forall t \in \mathcal{T}, f \in \mathcal{F}. \end{aligned}$$

여기서 각 ADU의 전송 지연을 제한하면서 자원 사용을 최소화하는 최적 자원 할당을 찾는 것은 단순하지 않다. 그 이유는 두 가지 동적 요인이 동시에 작용하기 때문이다. 첫째, ADU의 크기와 목표 지연 시간은 애플리케이션의 동작 특성에 따라 변화하며, 둘째, 동일한 전송량을 만족시키

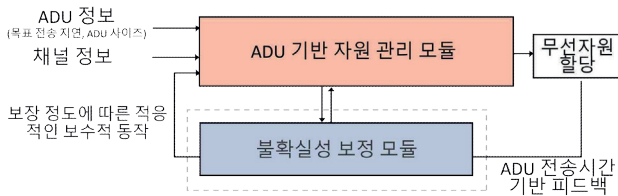


그림 2. 본 연구의 시스템 구조. ADU와 채널 정보를 고려하여, 각 ADU에 자원을 할당하고 그에 대한 전송 지연을 피드백으로 받는다.

기 위해 필요한 자원량은 무선 채널 상태에 따라 시시각각 달라진다. 이처럼 애플리케이션 계층과 물리 계층 모두에서의 동적성이 결합되어, 자원 할당 문제는 높은 계산 복잡도를 갖는 조합 최적화(combinatorial optimization) 문제로 수렴한다. 실제로, 이 문제는 NP-난해(NP-Hard)에 해당하며, 최적 해를 구하는 데에는 지수 시간의 계산 복잡도가 요구된다.

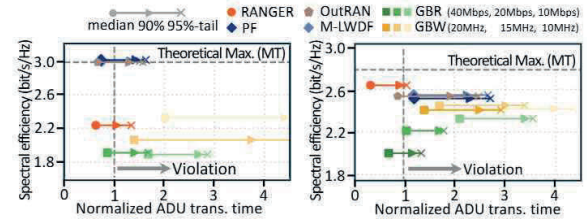
이러한 복잡성을 해결하기 위해, 그림 2에서 보여지듯이, 본 연구는 두 가지 기능적 요소로 구성된 ADU 기반 자원 관리 시스템을 설계한다. 제안하는 시스템은 상위 애플리케이션으로부터 각 ADU의 전송량(크기)과 목표 지연 시간 정보를 입력으로 받아 처리하며, ADU 단위의 자원 요청 인터페이스를 통해 동작한다. ADU 기반 자원 관리 모듈은 이러한 정보를 바탕으로 시간 단위의 자원 할당량을 결정하고, 각 시간 슬롯의 자원 제약을 만족시키는 동시에 모든 ADU가 마감 시간 내에 전송을 완료할 수 있도록 자원을 분배한다. 이때 자원 할당에 대한 결정을 빠른 시간 내에 내기 위해, 무선 자원 자체의 정수적인 특징을 완화하여 문제를 푸는 속도를 가속하였다. 또한, 시스템은 전송 과정에서 발생하는 실제 ADU 전송 지연 정보를 상위 계층에 피드백함으로써, 애플리케이션이 동작 여부를 판단하거나 이후 동작을 조정할 수 있도록 지원한다. 이와 함께, 채널 상태의 예측 오차나 요청의 불확실한 도착 시점을 고려하여 여유 자원을 동적으로 조정하고 보장하는 위험 완화 모듈이 함께 동작한다. 해당 모듈은 자원의 과도한 낭비 없이 안정적인 전송 보장을 가능하게 한다.

제안한 시스템의 동작 특성과 효과는 OpenAirInterface [2] 상에 구현되었고, 성능 검증은 실제 측정된 5G New Radio (NR) 채널 트레이스 [3]를 기반으로 구성된 RF 시뮬레이션 환경과, 실제 무선 환경에서의 Over-the-Air (OTA) 테스트베드를 통해 평가하였다. 이때, 주행 하에서의 3D 이미지 위주의 애플리케이션 트레이스 [4]를 함께 활용하여 현실적인 조건을 반영하였다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 다양한 크기 및 지연 요구를 갖는 ADU 요청에 대해 기존 방식들의 낮은 보장 확률에 비해, 제안 방식은 최대 95%까지 보장하며 낮은 지연 테일 분포를 달성하였다. 또한, 본 연구는 채널 품질을 사용자 간에 효과적으로 다중화함으로써 기존 대비 높은 스펙트럼 효율(최대 2.63 bits/s/Hz)을 기록하였다. 이는 제안한 구조가 다양한 무선 조건과 트래픽 요구에 대해 자원 보장성과 효율성을 동시에 달성할 수 있음을 보여준다.

III. 결론

초신뢰 공중 네트워크는 고신뢰·저지연이 동시에 요구하는 환경으로, 시간에 민감한 애플리케이션을 위한 정밀한 데이터 전송 제어가 요구된다. 본

연구는 시간 민감형 애플리케이션의 실행을 지원하기 위한 무선 접속망 시스템을 제안하였다. 애플리케이션마다 상이한 지연 및 전송량 요구를 갖는 ADU(Application Data Unit)를 중심으로, 무선 접속망이 갖추어야 할 핵심 속성을 분석하고 이를 기반으로 한 자원 제어 방식을 설계하였다. 제안된 시스템은 ADU 및 채널 정보를 명시적으로 활용함으로써, 다양한 요구 조건을 만족하는 자원 분배가 가능하며, 기존 방식들이 갖는 ADU 크기와 지연



(a) OTA testbed (single UE) (b) RF simulation (multiple UEs)

그림 3. 본 논문과 기존 기법들의 스펙트럼 효율 및 정규화된 ADU 전송 지연의 중앙값 및 테일 비교. 본 논문은 전송 지연의 테일을 낮게 억제하며, (b)에서는 채널 다중화를 통해 가장 높은 스펙트럼 효율을 달성한다.

간의 선형적인 의존에서 벗어난 전송 유연성을 제공한다. 또한, 제안한 시스템의 동작 특성과 효과는 실제 무선 환경의 OTA 테스트베드와 5G NR 채널 기반 RF 시뮬레이션을 통해 평가되었다. 이때, 주행 하에서의 3D 이미지 위주의 애플리케이션 트레이스[4]를 함께 활용하여 현실적인 조건을 반영하였다. 본 연구는 ADU 단위의 전송 성능을 직접적으로 보장하는 첫 연구로 여겨지고, 향후에는 트래픽 유형에 대한 확장성과 상위 계층 정보와의 연계를 통해 더욱 일반화된 무선 자원 제어 방안으로 발전시킬 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 ITRC 지원사업(IITP-2021-0-02048)의 지원을 받아 정보통신기획평가원(IITP)의 지도 아래 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] Azari, Mohammad Mahdi, et al. "Ultra reliable UAV communication using altitude and cooperation diversity." IEEE Transactions on Communications 66.1 (2017): 330-344.
- [2] Navid Nikaein, Mahesh K Marina, et al. "OpenAirInterface: A flexible platform for 5G research." ACM SIGCOMM Computer Communication Review 44, 5 (2014) : 33-38.
- [2] ACCUVER. "XCAL: PC based advanced 5G network optimization solution." (2024)
<https://accuver.com/sub/products/view.php?idx=6>
- [3] Guorun Yang, Xiao Song, Chaoqin Huang, et al. "Drivingstereo: A large-scale dataset for stereo matching in autonomous driving scenarios." In Proc. of the IEEE/CVF CVPR (2019): 899-908