

셀룰러 환경에서의 L4S 지원을 위한 전송 계층 혼잡 제어에 관한 연구

허수빈, 박세웅*
서울대학교

sbhuh@netlab.snu.ac.kr, *sbahk@snu.ac.kr

A Study on Transport Layer Congestion Control for L4S Support in Cellular Environments

Huh Subin, Bahk Saewoong *
Seoul National Univ.

요 약

본 연구에서는 셀룰러 환경에서 환경을 구축하였다. 스케줄러의 동작을 고려하여, 지연 대신 처리량 추정치를 지표로 사용하는 ECN 기반 혼잡 제어 방법론을 제안하였다. 제안하는 방법론은 지연 시간을 기준으로 하는 ECN 신호법이 달성하는 포화 곡선으로 수렴한다. 제안하는 기법은 오픈소스 소프트웨어인 OAI 에 기반한 실험실 환경에서 검증되었고, 지연 기반 신호법과 다르게 응용 계층 서비스의 요구사항에 따라 파라미터를 조정함으로써 적응적으로 적용될 수 있다.

I. 서론

초연결 시대의 셀룰러 네트워크는 다양한 서비스의 요구사항을 충족시켜야 한다. 특히 실시간 통신과 같이 지연에 민감한 애플리케이션을 지원하기 위해서는 낮은 지연(latency)과 충분한 처리량(throughput)을 동시에 보장할 필요가 있다. 이를 위해 IETF 에서는 L4S (Low Latency, Low Loss, Scalable Throughput) 표준을 새로이 제안하였다.

본 논문에서는 명시적인 혼잡 신호법인 ECN(Explicit Congestion Notification)을 활용, 셀룰러 환경에서 L4S 를 효율적으로 지원하기 위한 전송 계층 혼잡 제어 메커니즘을 제안한다. 제안하는 방법론은 셀룰러 네트워크의 MAC 스케줄러 동작을 고려한 보다 정확하게 혼잡을 감지하는 방법과, 저지연성과 처리량 사이의 등가 교환(tradeoff)을 고려하여 성능을 최적화할 수 있는 ECN 마킹 방식 설계로 이루어져 있다.

II. 방법론

A) 혼잡의 정의와 문제점

본 연구에서는 일반적인 혼잡의 정의를 차용하였다. 혼잡은 TCP 송신자가 최적의 혼잡 윈도우보다 많은 패킷을 전송할 때 발생한다. 혼잡이 발생하면 패킷의 일부가 네트워크 장치의 버퍼에서 대기하게 되고, 지연이 증가하거나 패킷 손실까지 발생할 수 있다. 최적의 혼잡 윈도우는 병목 처리량(bottleneck tput)과 왕복 시간(Round Trip Time; RTT)의 곱인 BDP(Bandwidth-Delay Product)로 알려져 있다.

B) 스케줄링 인식 혼잡 감지 (Scheduling Aware Congestion Detection)

대부분의 무선 기지국 스케줄러는 규칙 기반(rule-based)으로 동작하며, 대표적인 알고리즘으로는 PF (Proportional Fair) 스케줄링 기법이 있다. PF 스케줄링은 최대 처리량과 공정성의 가중 합을 최적화하는 알고리즘으로, 처리량이 수렴한다는 것이 보장되어 있다. 단기적으로는 처리량이 크게 진동할 수 있지만 점진적으로 처리량은 수렴한다. 따라서, PF 알고리즘을 충분히 오랫동안 여러 라운드에 걸쳐 실행하면 미래의 처리량을 예측할 수 있다. 이러한 특성을 활용하여 처리량 추정치(throughput estimate)를 혼잡 지표로 사용할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 스케줄링 인식 혼잡 감지 방식은 다음과 같이 작동한다. A) 현재 처리량과 MCS 값을 기억한다. B) MCS 값이 변하지 않는다고 가정하고 일정 시간(기본값: 2 프레임) 동안의 미래에 대해 PF 스케줄링 알고리즘을 실행, 각 UE 의 미래 처리량에 대해 추정한다. C) 현재 처리량과 추정된 미래 처리량을 비교하여 ECN 마킹 비율을 결정한다. 미래 MCS 값에 대한 추정 모델이 제공된 경우, B)에서 MCS 값에 해당하는 입력을 기존 MCS 값을 그대로 쓰는 대신 추정된 값으로 대체할 수 있다. ECN 마킹 비율은 다음과 같이 정의된다.

$$[\text{Marking Rate}] = \gamma \frac{\theta_{in} - \hat{\theta}_{out}}{\hat{\theta}_{out}}$$

여기서 θ_{in} 는 현재 큐에 유입되는 데이터의 처리량, $\hat{\theta}_{out}$ 는 PF 스케줄링을 미리 적용해 봄으로써 추정한 미래 처리량이다. 기지국에서 측정한 값인 θ_{in} 와 달리 추정된 값이라는 점을 분명하기 하기 위해 $\hat{\theta}_{out}$ 에 hat notation을 붙여 구분하였다. γ 는 처리량 차이에 얼마나 민감하게 반응할 것인지를 결정하는 하이퍼파라미터이다. 마킹 비율은 ECN 비트에 CE(Congestion Experienced) 표시가 된 채로 전송되는 ACK 대 전체 ACK의 비율이다.

III. 실험 및 결과 분석

A) 실험 환경 구축

본 연구는 오픈소스 소프트웨어인 OpenAirInterface (이하 OAI)를 기반으로 한 테스트베드가 사용되었다 [3]. OAI 가 지원하는 RF 시뮬레이터를 사용하여 컴퓨팅 자원에 제약이 있는 환경에서도 PHY 프로세싱을 포함한 다중 UE 테스트가 가능하게 하였다. 또한, COTS UE 와 상용망에서 수집한 MCS 트레이스를 활용하였다.

본 연구에서 구축한 테스트베드는 단일 상용 서버(하드웨어 및 OS) 위에서 동작한다. 본 테스트베드는 가상화된 gNB, 5GCN 그리고 UE 간의 네트워킹이 완전히 5G 프로토콜을 준수하며 동작한다는 점이 보장된다.

B) 실험 설계

실험은 단일 UE 에 iperf3 유틸리티를 통해 생성된 풀버퍼(full buffer) TCP 트래픽을 10 초 동안 흘린 뒤 TCP 송신 단에서 RTT 및 처리량을 측정하는 방식으로 이루어졌다. TCP 송신 단의 혼잡 제어 알고리즘은 ECN 을 지원하는 혼잡 제어 알고리즘 중 가장 널리 쓰이는 BBRv3 을 채택하였다.

제안하는 스케줄링 인식 혼잡 감지 기법(약칭 PF_AWARE) 외에도 지연 임계값 기반 방법(약칭 TIMER_[]MS)을 비교 대상으로 채택했다. [] 안의 값이 밀리초 단위의 지연 임계값이다. 각 MAC SDU 가 큐의 제일 앞에서 대기한 시간을 측정하고, 그 시간이 주어진 임계값 이상이면 무조건 ECN 마킹을 하는 방식이다.

C) 실험 결과

RTT 와 처리량은 로그 함수와 유사한 포화 곡선(saturation curve) 그린다. RTT 와 처리량 사이에는 높은 처리량에는 길어진 RTT, 낮은 지연 시간에는 적은 처리량이라는 트레이드오프가 존재하며, 제안하는 PF_AWARE 방식도 이 포화 곡선 위에 위치한다. 구체적인 실험 결과는 아래 그림 1 과 같다.

IV. 선행 연구

셀룰러 네트워크에서는 무선 자원 할당과 스케줄링 메커니즘으로 인해 시간에 따라 변하는 비혼잡성 스케줄링 지연이 불가피하게 발생한다. 이러한 스케줄링 지연은 RTT 정보를 오염시켜, 딜레이 기반 CCAs 가 혼잡이 없는 상황에서도 혼잡 윈도우 크기를 부적절하게 조정하게 만든다. Copa 와 Vegas 같은 알고리즘은 낮은 지연성을 달성하지만 대역폭 활용도가 현저히 낮으며, BBR 역시 대역폭을 완전히 활용하지 못하는 점이 확인된 바 있다 [4].

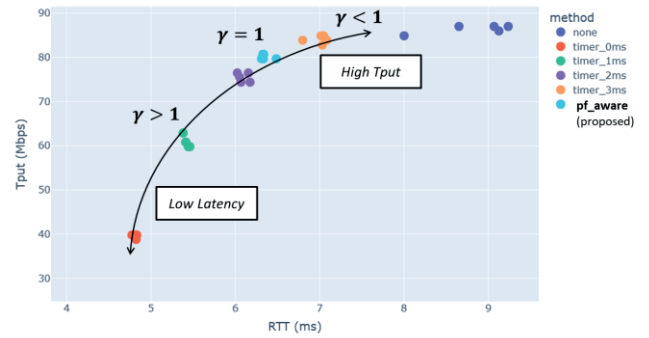


Fig 1. 도식화한 개별 혼잡 제어 기법의 RTT-Tput

라우터 측 혼잡 제어 방식으로는 Controlled Delay(CoDel) 등 활성 큐 관리(Active Queue Management; AQM) 기법이 있다 [2]. 그러나, AQM 은 기본적으로 지연이 발생한 경우 해당 패킷을 버리므로, 중단에서 지연이 발생했다는 것을 뒤늦게 알아차린다는 한계가 있다. 무선 AP 를 대상으로 하는 ECN 신호법 기반 혼잡 제어 방법론 역시 연구된 바 있으나 [1], 큐 대기 지연 (queueing delay)을 관찰하여 혼잡을 식별하므로 앞서 언급한 셀룰러 네트워크의 비혼잡성 스케줄링 지연을 고려하지 못한다는 한계가 있다.

V. 결론

본 연구의 결과는 궁극적으로 셀룰러 환경에서 RTC(Real-Time Communication)와 같은 지연에 민감한 애플리케이션을 위한 네트워크 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT). (IITP-2025-RS-2024-00398157)

참 고 문 헌

- [1] P. Goyal, A. Agarwal, R. Netravali, M. Alizadeh, and H. Balakrishnan, "ABC: a simple explicit congestion controller for wireless networks," in Proceedings of the 17th Usenix Conference on Networked Systems Design and Implementation, in NSDI'20. USA: USENIX Association, Feb. 2020, pp. 353– 372.
- [2] K. Nichols and V. Jacobson, "Controlling Queue Delay: A modern AQM is just one piece of the solution to bufferbloat," Queue, vol. 10, no. 5, pp. 20– 34, May 2012, doi: 10.1145/2208917.2209336
- [3] <https://openairinterface.org/>
- [4] J. Shin, G. Lee, J. Paek, and S. Bahk, "C sar: Cellular Resource Scheduling-Aware Congestion Control", to appear in IEEE INFOCOM 2025, London, United Kingdom, May. 19-22, 2025.