

지연 민감 큐-인지 모바일 에지 컴퓨팅 네트워크를 위한 확률기하 모델링 및 분석

정구선, 이인규
고려대학교

rntjs300@korea.ac.kr, inkyu@korea.ac.kr

Stochastic Geometry Modeling and Analysis of Latency-Sensitive Queue-Aware Mobile Edge Computing Networks

Gusun Joung, Inkyu Lee
Korea Univ.

요약

본 연구는 기지국과 사용자 단말의 위치를 각각 독립적인 PPP (Poisson point process)로 모델링한 대규모 큐-인지 MEC (mobile edge computing) 네트워크 프레임워크를 제시하고, 통계적 지연 QoS (quality of service)와 큐 안정성 관점에서 오프로딩 전략 설계를 위한 핵심 성능 지표를 분석한다.

I. 서론

데이터 트래픽 수요의 급증은 무선 네트워크 환경을 크게 변화시켰으며, 지연 민감 애플리케이션의 확산으로 인해 요구 데이터 전송률이 빠르게 증가하면서 네트워크에 상당한 부담이 가중되고 있다. 이러한 문제를 완화하기 위한 대안으로 MEC (mobile edge computing)이 주목받고 있으며, MEC 네트워크는 기지국에 배치된 MEC 서버로 계산 작업 (task)을 오프로딩하여 처리함으로써, 서비스 지연과 사용자 단말의 연산 부담을 경감한다 [1].

한편, 오프로딩 전략을 설계할 때, 큐 (queue) 안정성은 반드시 고려해야 하는 핵심 이슈다. 과도한 오프로딩은 MEC 서버 측 큐에 부하를 집중시켜 큐 오버플로 (overflow)를 유도할 수 있으며, 반대로 오프로딩을 지나치게 보수적으로 수행하면 사용자 단말의 로컬 연산 큐에 작업이 누적되어 로컬 큐 오버플로로 이어질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 지연 및 큐 오버플로 발생 확률을 효과적으로 모델링하고 큐 길이 및 지연을 유한하게 유지하기 위한 방법으로 통계적 QoS (quality of service) 보장 기법 [2]이 중요한 접근법으로 부상하였다.

또한 현실적인 MEC 네트워크 설계를 위해서는 대규모 네트워크 환경에서의 성능 분석이 필수적이다. 이 때, 확률기하(stochastic geometry)는 네트워크 토플로지의 공간적 랜덤성을 체계적으로 반영하면서도 해석 가능한 성능식을 제공할 수 있어, 대규모 MEC 네트워크에 대한 효과적인 분석 프레임워크를 구축하는 핵심 이론 도구로 활용된다 [3].

본 논문에서는 기지국과 사용자 단말의 위치를 각각 독립적인 PPP (Poisson point process)으로 모델링한 지연 민감 큐-인지 MEC 네트워크 프레임워크를 제시하고, 통계적 지연 QoS 보장 및 큐 안정성 관점에서의 핵심 성능 지표에 대한 분석 결과를 도출하여 오프로딩 전략 설계에 대한 실질적인 통찰력을 제공한다.

II. 시스템 모델

지연 민감 큐-인지 대규모 MEC 네트워크를 위한 시스템 모델을 고려하며, 네트워크 동작은 슬롯 길이 τ 로 구성된 T 개의 시간 슬롯으로 이산화 되며, τ 는 무선 채널의 코히어런스 시간 (coherence time)에 부합하도록 설정한다. MEC 서버를 탑재한 기지국의 위치는 밀도 λ_{BS} 의 homogeneous PPP Φ_{BS} 를 따르며, 사용자 단말의 위치는 밀도 λ_{UE} 의 homogeneous PPP Φ_{UE} 로 모델링 된다. 모든 사용자 단말은 하나의 같은 연산 작업을 처리한다고 가정하며, 사용자 단말의 제한된 연산 능력 및 배터리 성능으로 인해, 계산량이 크고 지연에 민감한 작업은 MEC 서버로 오프로딩한다. 이후 MEC 서버는 요청된 작업을 처리한 뒤, 무선 링크를 통해 해당 사용자 단말에 계산 결과를 반환한다.

본 논문에서는 사용자 단말 관점에서 오프로딩 과정의 지연 QoS 보장과 큐 안정성을 중심으로 제안한 프레임워크를 분석한다. 각 사용자 단말은 로컬에서 처리될 작업 데이터를 저장하는 로컬 연산 큐와, MEC 서버로 전송하기 위해 대기하는 작업 데이터를 저장하는 오프로딩 큐를 가진다. 또한 모든 노드의 큐 관리는 기본적으로 FIFO (first-in first-out) 방식으로 수행한다고 가정한다.

사용자 단말 $k \in \Phi_{UE}$ 에서 오프로딩 큐는 시간 슬롯 $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ 에서의 큐 길이 $Q_{o,k}^{(t+1)} = \max\{Q_{o,k}^{(t)} + I_{o,k}^{(t)} - O_{o,k}^{(t)}, 0\}$ 으로 나타낼 수 있으며, 이는 잘 알려진 큐 동역학에 따라 모델링 된다. 사용자 단말에서의 작업 데이터 도착 과정 $A_k^{(t)}$ 는 평균 도착률 λ_{task} 를 갖는 포아송 분포 (Poisson process)를 따른다고 가정한다. 따라서, 오프로딩 큐의 입력 과정은 수학적으로 다음과 같이 표현된다.

$$I_{o,k}^{(t)} = A_k^{(t)} \delta_k^{(t)},$$

여기서 $\delta_k^{(t)} \in \{0, 1\}$ 은 사용자 단말 k 의 작업 데이터에 대한 오프로딩 정책을 나타내며, $\delta_k^{(t)} = 0$ 일 때, 작업 데이터를 사용자 단말에서 처리하며, $\delta_k^{(t)} = 1$ 일 때, MEC 서버에서 원격으로 처리한다. 한편, 오프로딩 큐의 출력 과정은 수학적으로 다음과 같이 표현된다.

$$O_{o,k}^{(t)} = \frac{\tau W}{N} \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,i} \|r_{k,i}\|^{-\alpha} |h_{k,i}^{(t)}|^2}{\sum_{s \in \Phi_{UE} \setminus \{k\}} P_{s,i} \|r_{s,i}\|^{-\alpha} |h_{s,i}^{(t)}|^2 + \sigma^2} \right),$$

여기서 W 는 상향링크 채널 대역폭을 나타내며, N 는 무선 자원의 개수이다. 각 사용자 단말은 최근접 기지국에 연결된다. 사용자 단말 k 의 기지국 i 로의 채널 이득은 $|h_{k,i}^{(t)}|^2 \sim \exp(1)$ 을 따르며, $r_{k,i}$ 는 사용자 단말 k 와 기지국 i 사이의 거리를 나타내며, 그리고 α 는 경로순실 지수를 나타낸다. 송신 전력 $P_{k,i}$ 는 다음과 같이 셀룰러 네트워크의 모델링을 따른다 [4].

$$P_{s,i} = \begin{cases} \rho_0 D_s^\alpha, & \text{if } \rho_0 D_s^\alpha \leq P_{\max}, \\ P_{\max}, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

여기서 D_s 는 사용자 단말 s 와 최근접 기지국 연결 기반으로 연결된 기지국 사이의 거리를 나타내며, ρ_0 는 결합된 기지국에서 요구되는 평균 수신전력을 의미한다.

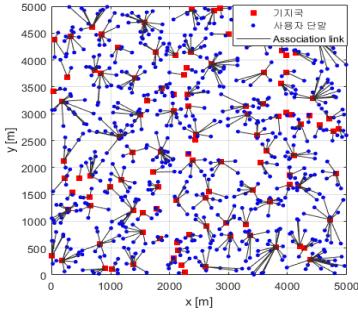


그림 1. 최근접 기지국 연결 기반 기지국과 사용자 단말 연결 그래프

III. 지역 QoS 보장 및 큐 안정성 모델링

지역 QoS 보장 및 큐 안정성을 다루기 위해, 우리는 사용자 단말의 오프로딩 큐의 지역 위반 확률을 $\Pr(D_{o,k}^{(t)} \geq d) \leq \beta$ 으로 고려한다. 통계적 QoS 보장 이론 [2]에 따르면, EB (effective bandwidth) $\mathcal{A}(\theta) = \frac{1}{\theta T} \ln \{ \mathbb{E}[\exp(\theta \sum_{t \in T} I^{(t)})] \}$ 및 EC (effective capacity) $\mathcal{B}(\theta) = \frac{1}{\theta T} \ln \{ \mathbb{E}[\exp(-\theta \sum_{t \in T} O^{(t)})] \}$ 의 표현과 함께, 오프로딩 큐의 지역 위반 확률은 $\mathcal{B}_{o,k}(\theta_{o,k}) \geq \mathcal{A}_{o,k}(\theta_{o,k}) = -\frac{\ln \beta}{\theta_{o,k} d}$ 으로 엄격하게 근사화 된다. 이를 정리해보면, 큐 안정성 및 지역 QoS 보장을 위해서는, EC 가 EB 보다 높아야 함을 알 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 결론

본 논문에서는 무선 네트워크 파라미터 변화에 따른 사용자 단말 오프로딩 큐의 근사 지역 위반 확률을 몬테카로로 컴퓨터 시뮬레이션으로 평가하고, 지역 QoS 제약 및 큐 안정성 조건이 만족되는 운용 구간을 분석한다. P_{\max} 은 30 dBm, W 는 10 MHz, τ 는 0.1 msec, σ^2 는 -100 dBm, α 는 4, 평균 오프로딩 확률 δ_k 는 0.8, 지역 위반 임계값 d 는 1 sec, 컷오프 임계값 ρ_0 은 -50 dBm 으로 설정한다. 기본적으로 기지국의 밀도는 $5/\text{km}^2$, 사용자 단말의 밀도는 $20/\text{km}^2$ 로 설정한다. λ_{task} 은 4 Mbps로 설정한다. 몬테카로로 컴퓨터 시뮬레이션은 10000 회 시행한다.

그림 2의 첫번째 그래프에서 지역 QoS 가 더 엄격할수록, 모든 컷오프 임계값에서 EB 가 EC 를 상회하여 큐 안정성 조건을 만족하지 못하므로 지역 QoS 보장이 불가능함을 확인할 수 있다. 그림 2의 두번째에서는 평균 오프로딩 확률이 증가할수록 큐 안정성 조건의 슬랙 (slack)이 증가하는 경향이 있다. 이는 송신전력 증가가 EC 개선으로 이어지지 않아, 지역 감소 없이 에너지 소모만 비효율적으로 증가할 수 있음을 시사한다.

그림 3에서는 지역 QoS가 엄격하거나 평균 오프로딩 확률이 감소할수록, 큐 안정성 조건을 만족하는 사용자 단말 수의 하한이 증가하는 경향을 보인다. 이는 사용자 단말 수가 큰 환경에서 지역 QoS 를 만족하기 위해서는 평균 오프로딩 확률을 증가시키는 방향의 제어가 필요함을 의미한다.

본 논문에서는 기지국과 사용자 단말의 위치를 독립적인 PPP로 모델링한 지역 민감 큐-인지 MEC 네트워크 프레임워크를 제시하고, 통계적 지역 QoS 및 큐 안정성 관점에서 EC 가 EB 보다 커야 한다는 조건을 기반으로 네트워크 설계에 대한 통찰을 도출하였다.

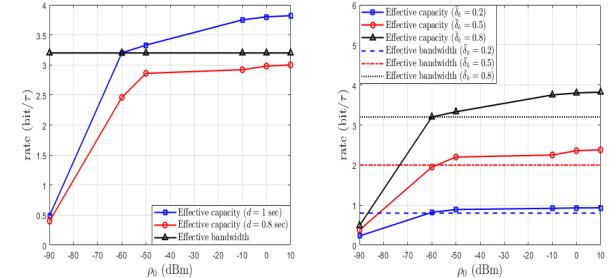


그림 2. 오프로딩 큐의 네트워크 컷오프 임계값에 따른 EB와 EC 성능

EB와 EC 성능

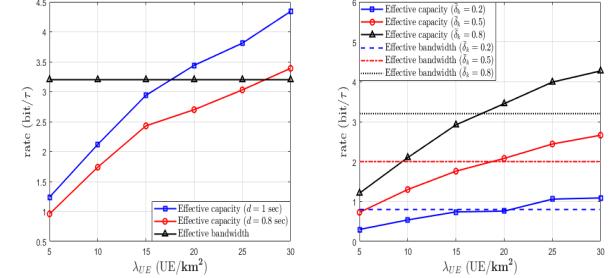


그림 3. 오프로딩 큐의 사용자 단말의 밀도에 따른 EB와 EC 성능

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단 및 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2022-NR070834).

참 고 문 헌

- [1] C. Shang, Y. Sun, H. Luo, and M. Guizani, "Computation offloading and resource allocation in NOMA-MEC: A deep reinforcement learning approach," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 17, pp. 15464–15476, Sep. 2023.
- [2] Y. Wang, X. Tao, Y. T. Hou, and P. Zhang, "Effective capacity-based resource allocation in mobile edge computing with two-stage tandem queues," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 67, no. 9, pp. 6221–6233, Sep. 2019.
- [3] Y. Gu, C. Yin, Y. Guo, B. Xia, and Z. Chen, "Communication-computation-aware user association in MEC HetNets: a meta-analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 12, pp. 8919–8933, Dec. 2023.
- [4] T. D. Novlan, H. S. Dhillon, and J. G. Andrews, "Analytical modeling of uplink cellular networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 6, pp. 2669–2679, Jun. 2013.