

마이크로 D2D 캐싱을 위한 초저 우선순위 통신

임민중, 김기현, 나영진
동국대학교

minjoong@dongguk.edu, rlsrlgus123@naver.com, dudwls976@naver.com

Ultra Low Priority Communication for Micro D2D Caching

Minjoong Rim, Ki-Hyeon Kim, Young-Jin Na
Dongguk University

요약

디바이스의 여유 저장 공간을 콘텐츠 캐시로 사용하는 D2D 캐싱 시스템에서는, 헬퍼라고 불리는 디바이스의 캐시에 주변 디바이스가 요구하는 콘텐츠가 있을 경우 이를 공급함으로써 무선 네트워크의 부담을 줄일 수 있다. 본 논문에서는, 주변 디바이스가 현재 시청하고 있는 콘텐츠 청크의 약간 뒤의 청크를 저장하는 마이크로 D2D 캐싱 시스템에서, 헬퍼가 마이크로 캐싱을 하기 위한 통신을 초저 우선순위 통신이라고 부른다. 일반적인 다중사용자 MIMO 나 NOMA 기술은 한 순간에 데이터를 요구하는 사용자 중에서 그룹을 지어야 하기 때문에 충분한 수의 사용자를 그룹 짓기 어려워 높은 효율성을 가지기 어렵지만, 초저 우선순위 통신에서는 긴 시간을 고려하기 때문에 무선 자원의 효율성을 증대시킬 수 있다.

I. 서론

무선을 이용한 고화질 비디오 스트리밍 서비스의 증가로 인해 무선 데이터 요구량이 급격히 증가하고 있다[1]. 모든 사용자에게 대해서 원하는 데이터 요구량을 만족시키기 위해서 더 많은 셀을 설치하고 각 셀의 유선 백홀 및 무선용량을 증대시키는 노력이 진행되고 있다[2]. 최근, 고주파 반송파를 사용하는 기술들이 개발됨에 따라 사용 가능한 무선 대역폭이 대폭 증가하였으며, 기지국 및 디바이스의 안테나 수를 늘려서 MIMO(Multi-Input Multi-Output) 성능을 향상시키고, 다중사용자 MIMO, NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access) 등에 의하여 주파수 효율을 향상시키기 위한 연구가 진행되었다[2].

그러나 고주파 반송파를 사용하는 셀은 커버리지가 작아서 모든 지역을 빠짐없이 고주파 광대역 커버리지 안에 들도록 무선 네트워크를 설치하는 것은 비용적인 문제가 있다. 주파수 효율을 증대시키는 다중사용자 MIMO, NOMA 기술 등은 많은 사용자들이 동시에 전송되는 그룹에 들어갈 수 있다면 주파수 효율이 크게 증대될 수 있지만, 셀의 크기가 작아지면서 한 셀에 한 순간에 데이터를 요구하는 사용자의 수는 충분하지 않으며, 다중 사용자 MIMO, NOMA 기술 등은 기대했던 것만큼 큰 효과를 얻지 못하고 있다[2].

디바이스의 여유 저장 공간을 캐시로 사용하는 D2D (Device-to-Device) 캐싱 시스템은 헬퍼라고 불리는 디바이스가 캐시에 콘텐츠를 저장하고 주변의 사용자가 요구하는 콘텐츠가 캐시에 있을 경우 D2D 통신을 이용하여 사용자에게 콘텐츠를 전달함으로써 무선 네트워크의 부담을 줄인다[1]. 인기 있는 콘텐츠들

저장하는 마이크로 D2D 캐싱은 사용자마다 취향과 선호도의 차이가 크며, 실제 비디오 콘텐츠의 수는 거의 무한히 많은 데 비해 디바이스가 가지고 있는 캐시는 크지 않기 때문에 원하는 오프로딩 성능을 얻기 어렵다.

본 논문에서는 헬퍼가 주변의 디바이스가 재생하고 있는 콘텐츠 청크의 약간 뒤의 청크를 프리페칭하여 저장하는 마이크로 D2D 캐싱 기술을 고려한다[3]. 마이크로 D2D 캐시에 비디오 청크를 공급하기 위한 통신을 본 논문에서는 초저 우선순위 통신이라고 부르며, 초고신뢰 초저지연 통신과 반대되는 개념으로 시간제한 요구조건이 매우 낮고 무선 자원의 여유가 별로 없다면 요청을 무시해도 될 정도로 저 신뢰도를 요구한다. 초고신뢰 초저지연 통신 기술이 주파수 효율을 다소 희생하더라도 고수준의 요구사항을 만족하는 개념이라면, 초저 우선순위 통신 기술은 긴 시간을 고려하여 다중사용자 MIMO, NOMA 등의 성능을 향상시키거나, 시간, 주파수, 공간축에서의 무선 공급량의 편차를 이용함으로써 일반적인 무선통신에서는 존재하지 않았던 빈 틈을 인위적으로 만들어 통신을 하는 기술이다.

II. 본론

단순한 논의를 위하여 콘텐츠 청크의 재생 시간은 T_{chunk} , 데이터 크기는 B_{chunk} 로 모두 같으며 전체 콘텐츠 청크의 수는 K_{total} 개, 헬퍼의 캐시의 크기는 K_{cache} 개라고 하자. 헬퍼의 커버리지 내에 활성화된 디바이스의 수는 헬퍼 포함 N_{device} 이며 프리페칭은 최대 $T_{prefetch}T_{chunk}$ 시간 전부터 이루어진다. 헬퍼의 프리페칭은 고속 MIMO, 다중사용자 MIMO, NOMA 등의 기술을 사용하거나 간헐적으로 부하가 적을 때 데이터를 수신하여 디바이스에게 직접 전송 대비 $\alpha(\geq 1)$ 의

주파수 효율로 이루어지며, $T_{prefetch}T_{chunk}$ 시간 내에 프리페칭이 완수될 확률은 $\beta(\leq 1)$ 라고 하자. 헬퍼는 N_{device} 의 디바이스 중 $n_0(\leq N_{device})$ 개의 디바이스의 마이크로 캐싱을 수행하며 이를 위해서 캐시를 $n_0T_{prefetch}(\leq K_{cache})$ 크기의 마이크로 캐시와 $K_{cache} - n_0T_{prefetch}$ 크기의 매크로 캐시로 나누어 사용한다.

디바이스에서 콘텐츠 청크의 요청이 있을 때 청크가 k 번째 콘텐츠 청크일 확률을 p_k^{macro} 이며 콘텐츠 청크는 p_k^{macro} 의 내림차순으로 정렬되어 있다고 하자. 만일 헬퍼가 캐시를 매크로 D2D 캐싱으로만 사용할 경우, 과부하 시간이 시작되기 전에 콘텐츠 청크를 캐시에 저장한다. 이 때 헬퍼의 커버리지 안에 있는 디바이스가 하나의 콘텐츠 청크를 요청하였을 때 무선자원 데이터 요구량은 다음과 같다.

$$\frac{D_{macro}}{B_{chunk}} = 1 - \sum_{k=1}^{K_{cache}} p_k^{macro} \quad (1)$$

디바이스 n 이 $T_{prefetch}T_{chunk}$ 시간 후에도 헬퍼의 D2D 커버리지 안에 있고 계속 같은 콘텐츠를 시청할 확률을 p_n^{micro} 라고 하며 디바이스 인덱스는 p_n^{micro} 의 내림차순으로 정렬되어 있다고 하자. 간단한 논의를 위하여 하나의 디바이스가 헬퍼의 커버리지를 넘어 이동해서 나갈 경우, 다른 하나의 디바이스가 커버리지 내로 이동해서 들어와 헬퍼의 커버리지 내에 항상 일정한 수의 디바이스가 유지된다고 가정한다. 헬퍼가 캐시 공간의 일부 $n_0T_{prefetch}$ 를 마이크로 D2D 캐싱을 위해서 사용한다고 할 때, 헬퍼의 커버리지 안에 있는 디바이스 n 이 하나의 콘텐츠 청크를 요청하였을 때 무선자원 데이터 요구량은 다음과 같다.

$$H_n^{\square}(n_0) = \beta p_n^{micro} + \sum_{k=1}^{K_{cache}-n_0T_{prefetch}} p_k^{macro} - \beta p_n^{micro} \sum_{k=1}^{K_{cache}-n_0T_{prefetch}} p_k^{macro} \quad (2)$$

$$\frac{D_n(n_0)}{B_{chunk}} = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} + 1 - H_n^{\square}(n_0) & \text{if } n \leq n_0 \\ 1 - \sum_{k=1}^{K_{cache}-n_0T_{prefetch}} p_k^{macro} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

무선자원 데이터 요구량이 최소가 되도록 n_0 가 결정된다.

$$D_{micro} = \min_{n_0} \frac{1}{N_{device}} \sum_{n=1}^{N_{device}} D_n(n_0) \quad (4)$$

실험에서는 콘텐츠 비디오 청크의 수 K_{total} 이 1,000,000 개이고, Zipf 계수 λ 는 0.6 또는 0.9 을 가지는 Zipf 분포를 가지며, 헬퍼의 캐시의 크기는 K_{cache} 는 100 으로 하였다. 프리페칭 시간 $T_{prefetch}$ 는 5, 프리페칭이 $T_{prefetch}T_{chunk}$ 시간 내에 완수될 확률 β 는 0.9, 디바이스의 수 N_{device} 는 11 개, 마이크로 D2D 캐싱이 된 콘텐츠 청크가 사용될 확률 p_n^{micro} 은 0.8~0.9 또는 0.6~0.9 사이에서 균등하게 분포하는 것을 고려하였다.

그림 1 은 헬퍼가 디바이스보다 α 배의 주파수 효율 향상을 이룰 수 있을 때, 마이크로 D2D 캐싱을 통한 무선자원의 효율 향상도 D_{macro}/D_{micro} 를 보여준다. 헬퍼가 디바이스보다 안테나의 수가 많거나 혹은 긴 시간을 고려하여 다중사용자 MIMO 또는 NOMA 기술을 적용함으로써 디바이스보다 높은 주파수 효율로 콘텐츠 청크의 수신이 가능하다면 캐시의 공간 중 일부를 마이크로 D2D 캐싱으로 사용하여 미래 콘텐츠 청크를 미리 수신함으로써 성능 향상을 이룰 수 있다. 그림 2 는 캐시 중 마이크로 캐시가 차지하는 크기를 보여준다. α 가 작은 경우 마이크로 캐시를 사용하지 않지만 α 가 커질 경우에는 마이크로 캐시 영역의 비중이 커지는 것을 볼 수 있다.

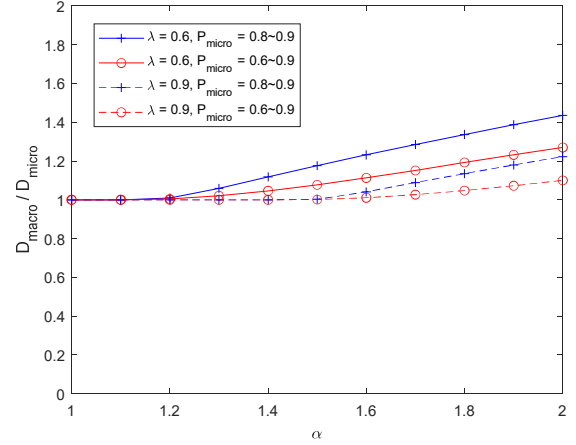


그림 1. 헬퍼가 디바이스보다 α 배의 주파수 효율을 얻을 때의 마이크로 D2D 캐싱을 통한 무선자원 효율 향상

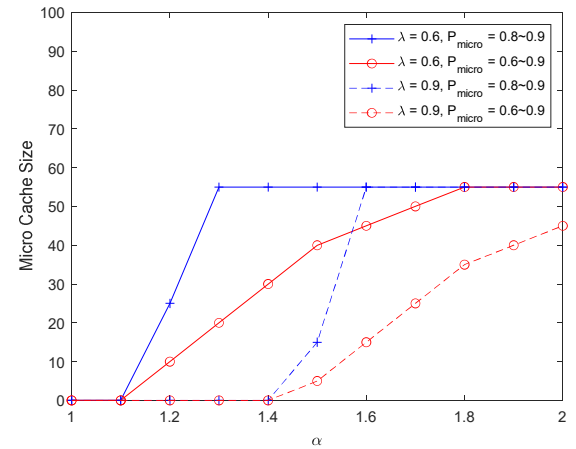


그림 2. 마이크로 캐시의 크기

III. 결론

본 논문에서는 마이크로 D2D 캐시에 비디오 청크를 공급하기 위한 초저 우선순위 통신을 사용하여 고속 MIMO, 다중사용자 MIMO, NOMA 등의 효율도를 높였을 때 얻는 이득에 대해서 살펴보았다. 초저 우선순위 통신은 신뢰도 및 시간제한에 대한 요구사항이 매우 낮으므로 일반적인 통신시스템에서는 사용하지 못했거나 효율적이지 못했던 기술들을 사용할 수 있으며 이를 통해 무선자원의 효율성을 향상시킬 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2022R1F1A1062987).

참고 문헌

- [1] L. Li, G. Zhao, and R.S. Blum, "A Survey of Caching Techniques in Cellular Networks: Research Issues and Challenges in Content Placement and Delivery Strategies," IEEE Communication Surveys & Tutorials, vol.20, no.3, pp.1710-1732, Third Quarter 2018.
- [2] J. Lee, M. Han, M. Rim, and C.G. Kang, "5G K-SimSys for Open/Modular/Flexible System-Level Simulation: Overview and Its Application to Evaluation of 5G Massive MIMO," IEEE Access, vol.9, pp.94017-94052, July 2021.
- [3] M. Rim, "Mixed Micro/Macro Cache for Device-to-Device Caching Systems in Multi-Operator Environments," Sensors, vol.24, pp.1-24, July 2024.