

소형셀 네트워크 전송용량 향상을 위한 분산 파일저장 및 커버리지 확장 기법

홍준표*

Distributed File Placement and Coverage Expansion Techniques for Network Throughput Enhancement in Small-cell Network

Jun-Pyo Hong*

Department of Information and Communications Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

본 논문은 제한된 백홀 용량으로 발생하는 소형셀 네트워크에서의 트래픽 병목현상을 완화하기 위한 분산 파일저장 기술과 커버리지 확장 기술을 제안하였다. 제안 기법은 한정된 메모리 용량으로 백홀 망의 부하를 최소화하기 위해 파일의 인기도와 기지국의 메모리 용량에 따라 기지국의 커버리지와 파일 저장방법을 결정한다. 즉, 메모리 공간이 작거나 이용자들로부터 요청되는 파일이 다양할 경우 개별 기지국에 저장된 파일로 이용자를 서비스할 수 있는 확률이 낮아지므로 커버리지를 확장하고 기지국 사이 저장 파일의 중복을 줄여 커버리지 중첩지역에 있는 이용자가 다수의 기지국에 저장된 다양한 파일로 서비스 받을 수 있게 한다. 시뮬레이션을 통한 기존 배타적인 커버리지를 갖는 소형셀 네트워크에서의 파일저장 기법과의 전송용량 비교를 통해 제안 기법이 메모리 공간이 작거나 이용자들로부터 요청되는 파일이 다양한 상황에서 높은 성능 이득을 가짐을 보였다.

ABSTRACT

This paper proposes distributed file placement and coverage expansion techniques for mitigating the traffic bottleneck in backhaul for small-cell networks. In order to minimize the backhaul load with limited memory space, the proposed scheme controls the coverage and file placement of base station according to file popularity distribution and memory space of base stations. In other words, since the cache hit ratio is low when there is small memory capacity or widespread file popularity distribution, the base stations expand its coverage and cache different set of files for the user located in overlapped area to exploit multiple cached file sets of base stations. Our simulation results show that the proposed scheme outperforms the conventional cache strategy in terms of network throughput when there is small memory capacity or widespread file popularity distribution.

키워드 : 캐싱, 커버리지 확장, 소형셀 네트워크, 전송전력 제어

Key word : Caching, coverage expansion, small-cell network, transmit power control

Received 28 November 2017, Revised 01 December 2017, Accepted 08 December 2017

* Corresponding Author Jun-Pyo Hong (E-mail:jp_hong@pknu.ac.kr, Tel:+82-51-629-6227)

Department of Information and Communications Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2018.22.1.183>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

짧은 통신 거리로 인한 통신 속도향상, 작은 셀 커버리지로 인한 높은 주파수 재사용율, 그리고 기지국 설치비용 절감 등의 이유로 최근 소형셀 네트워크에 관한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이는 5G 이동통신 시스템에서의 높은 트래픽을 감당하고 클라우드 무선 접속망(Cloud radio access network)을 구현하기 위한 효과적인 기술로 고려되고 있다[1]. 하지만 이러한 소형셀 네트워크 구현에서 제한된 백홀(Backhaul) 용량이 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 다수의 소형셀들로부터 발생하는 높은 트래픽 부하를 현재 백홀로는 감당할 수 없으며, 백홀의 추가 설치에는 높은 비용이 요구되기 때문이다.

제한적인 백홀 용량으로 인한 소형셀 구현의 문제점을 완화하기 위해 최근 다양한 기술들이 연구되고 있다. 백홀 설치에 드는 비용을 절감할 뿐만 아니라 백홀 망의 확장성 재구성성(Reconfigurability)을 추가로 제공하기 위한 밀리미터 웨이브(Millimeter wave) 통신기반의 무선 백홀 기술이 연구되었다 [2-4]. 이와는 다른 방법으로 통신 기기가 갖는 메모리를 활용한 캐싱(Caching) 기술이 최근 연구되고 있다. 이는 각 통신 기기가 요청될 확률이 높은 파일들을 메모리에 미리 저장해 두고 해당 파일에 대한 요청이 있을 때 저장된 파일로 서비스함으로써 백홀 트래픽 부하를 줄이는 방법이다[5, 6]. 본 논문에서 백홀 트래픽 부하를 줄이기 위해 제안하는 기법은 메모리를 이용한 두 번째 접근 방법에 해당한다.

고정된 소형 기지국과 이용자 사이의 무선 연결 상태에서 파일의 인기도를 고려한 기지국의 파일저장 기술에 대해 [7-9]에서 연구되었다. 즉, 한정된 파일저장 공간에서 백홀의 사용을 최소화시킬 수 있는 파일들을 선택적으로 저장하는 기법에 대해 논의하였다. 기지국에서의 파일저장과 유사하게, 이용자가 파일을 직접 저장하게 되면 저장된 파일에 대해서는 기지국을 거치지 않고 원하는 파일을 얻을 수 있게 되어 백홀 사용을 줄일 수 있다. 즉, 이용자들의 메모리에 저장된 파일을 D2D 통신(Device-to-Device communication)으로 공유함으로써 백홀 사용을 줄인 기술이 [10, 11]에서 연구되었고 모바일 비디오 스트리밍 서비스로 인한 백홀 부하와 평균 재생 지연 시간을 최소화하는 이용자 파일 분할 저장

기술이 [12, 13]에서 연구되었다.

기존 연구들은 고정된 송수신단 연결 상황에서 백홀 망의 부하를 줄이기 위해 캐시 적중률(Cache hit rate)을 최대화할 수 있도록 하는 파일저장 기법에 대한 것이었다. 예를 들어 기지국 파일저장 기법에 대해 살펴본 [7-9]의 경우 고정된 기지국과 이용자의 배치 및 연결 상황에서 최적 파일저장에 대해 살펴보았다. 하지만 이러한 연구결과는 기지국과 이용자들의 연결 상태 변화에 따라 저장 파일들을 재구성해야 하므로, 이용자들의 이동이 빈번한 네트워크에서는 비효율적인 특성을 갖는다. 그뿐만 아니라 파일저장을 위한 기지국의 메모리 용량이 작거나 이용자의 요청 파일들이 다양할 경우, 개별 기지국의 캐시 적중률이 낮아 효과적인 백홀 부하 감소 효과를 보기 어렵다 [14].

본 논문은 개별 기지국이 파일저장을 위한 충분한 메모리를 갖고 있지 않은 환경에서, 백홀 부하 감소 및 네트워크 데이터처리량 증가를 위한 셀 커버리지 확장 및 파일저장 기법을 제안한다. 즉, 기지국의 커버리지를 넓히고 인접 기지국 간 중복으로 저장되는 파일의 비중을 줄임으로써 커버리지가 중첩되는 지역에 있는 이용자가 다수의 기지국에 저장된 다양한 파일로 서비스를 받을 수 있게 한다. 따라서 커버리지 확장을 통한 인위적인 커버리지 중첩과 기지국 간 배타적인 파일저장으로 기지국 메모리 용량이 늘어난 것과 같은 효과를 볼 수 있게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 환경과 기존 파일저장 기법에 관해 설명한다. 3장에서는 제안 기법을 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통해 기존 파일 저장기법 대비 성능 이득에 대해 살펴본다.

II. 시스템 모델 및 기존 기법

그림 1은 본 논문에서 고려하고 있는 소형셀 네트워크를 보여주고 있다. 이용자 배치는 밀도 λ_u 를 갖는 2차원 Poisson point process(PPP) Φ_u 를 따르며, 소형셀 네트워크 내 총 N 개의 기지국은 서로 같은 거리를 두고 격자형으로 배치되어 있다. 기지국들은 2차원 평면상에 위치함을 가정하고 위치는 2차원 벡터로 표시된다. 기지국 위치의 세트(set)는 Φ_b 로 나타낸다. 기지국들은 백

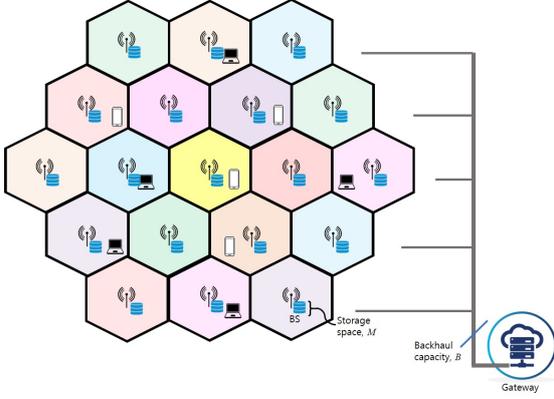


Fig. 1 System model

호를 통해 인터넷으로 연결되어 원하는 파일을 받을 수 있지만 동시에 최대 B 개의 파일만 전달할 수 있다. 백홀 용량 B 는 기지국의 수 N 보다 훨씬 작아 캐시를 이용하지 않을 경우 제한된 백홀 용량 때문에 네트워크 데이터 처리량이 제한됨을 가정한다. 각 기지국은 메모리에 최대 M 개의 파일을 저장할 수 있다. 각 이용자는 파일 인기도 분포에 따라 인근 기지국에 파일을 요청한다. 파일들을 인기도 순으로 정렬했다고 가정했을 때, 이용자가 m 번째 파일 f_m 을 요청할 확률은 다음과 같은 Zipf 분포에 의해 결정된다고 가정한다.

$$p_r(m) = \frac{1/m^{\gamma_r}}{\sum_{l=1}^L 1/l^{\gamma_r}}, \quad (1)$$

여기서 L 은 요청 가능한 총 파일의 수를 나타내고, γ_r 는 분포의 특성을 나타내는 지수 값이다. γ_r 값이 커질수록 인기도가 소수의 파일들에 집중됨을 의미한다.

커버리지 내 이용자가 저장된 파일을 요청할 경우, 기지국은 백홀을 거치지 않고 저장된 파일로 이용자를 서비스할 수 있다. 만약 다수의 이용자로부터 파일 요청이 있으면 백홀 부하를 줄이기 위해 저장된 파일을 요청한 이용자를 우선으로 스케줄링하여 서비스한다. 이용자로의 파일 전송 시 기지국 간 간섭을 피하고자 인접한 기지국들은 서로 다른 주파수를 사용한다. 채널 j 를 사용하는 기지국 $b \in \Phi_{b,j}$ 가 이용자로 파일전송 시, 이용자의 성공적인 파일수신 확률은 다음과 같이 결정

된다.

$$p_{succ} = \Pr \left[W \log_2 \left(1 + \frac{|h_b|^2 d_b^{-\alpha} P}{I_j + WN_0} \right) > R \right] \quad (2)$$

여기서 d_b 는 송신 기지국 b 과 이용자 사이 거리, α 는 감쇠지수, h_b 는 기지국 b 과 이용자 사이 링크의 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널 이득 값, W 는 전송 채널의 대역폭, P 는 전송전력, R 은 파일전송을 위한 목표 데이터율, I_j 는 채널 j 를 사용하는 기지국으로부터의 간섭전력을 나타낸다. 즉 간섭전력 I_j 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_j = \sum_{i \in \Phi_{b,j}} |h_i|^2 d_i^{-\alpha} P \quad (3)$$

여기서 $\Phi_{b,j}$ 는 채널 j 를 사용하는 기지국 세트이다.

기지국 커버리지의 반지름이 r 로 주어졌을 때, 기지국의 전송전력은 커버리지 외곽에서 간섭과 페이딩의 영향 없이 목표 데이터율 R 달성에 필요한 최소 전력의 상수배로 결정된다.

$$P = \Gamma_0 \cdot (2^{R/W} - 1) WN_0 r^\alpha = \Gamma r^\alpha \quad (4)$$

여기서 $\Gamma_0 \geq 1$ 는 전송전력 마진(power margin)을 나타내며, $\Gamma \equiv \Gamma_0 WN_0 (2^{R/W} - 1)$. 수식 (3), (4)를 통해 기지국의 커버리지가 넓어질수록 더 높은 전송전력을 사용하며 간섭의 크기가 늘어나 이용자의 파일 수신 성공확률이 낮아지는 것을 알 수 있다.

이용자의 분포는 PPP를 따르기 때문에, 반지름이 r 인 커버리지 내 이용자 수 k_b 는 평균이 $\lambda_{ub} = r^2 \pi \lambda_u$ 인 Poisson 분포를 따른다.

$$p_{k_b}(k) = \frac{\lambda_{ub}^k e^{-\lambda_{ub}}}{k!} \quad (5)$$

2.1 기존 파일 저장 기법

본 절에서는 제안기법의 성능이득 분석을 위해 비교 대상이 될 기존 파일 저장기법에 대해 설명한다. 기

존의 일반적인 셀룰러 이동통신 시스템과 같이 기지국의 커버리지는 서로 겹치지 않도록 설정되어 있다. 이러한 환경에서는 각 기지국이 요청될 확률이 가장 높은 M 개의 파일들을 저장하는 것이 캐시 적중률을 최대화하여 백홀 부담을 최소화 할 수 있기 때문에 모든 기지국은 파일 $\{f_1, f_2, \dots, f_M\}$ 을 동일하게 저장한다. 따라서 네트워크의 캐시 적중률은 다음과 같다.

$$p_{hit} = \sum_{m=1}^M p_r(m) \quad (6)$$

한 기지국에서 저장된 파일을 이용해 처리하는 평균 데이터 처리량은 다음과 같이 나타내진다.

$$T_c = Rp_{suss} p_{Creq} = Rp_{suss} \left(\sum_{k=1}^{\infty} p_{k_b}(k) \cdot (1 - (1 - p_{hit})^k) \right) \quad (7)$$

여기서 p_{Creq} 는 기지국 커버리지 내에서 저장된 파일을 요청한 사용자가 한 명이라도 있을 확률을 나타낸다. 수식 (7)을 이용해 소형셀 네트워크에서의 평균 데이터 처리량은 다음과 같이 나타내진다.

$$T = NT_c + Rp_{suss} \sum_{k=1}^B k(1 - p_{Breq})^{N-k} p_{Breq}^k + Rp_{suss} \sum_{k=B+1}^N B(1 - p_{Breq})^{N-k} p_{Breq}^k \quad (8)$$

여기서 $p_{Breq} = 1 - p_{Creq} - e^{-\lambda_{ub}}$ 는 사용자가 요청한 파일이 기지국에 저장되어 있지 않아 백홀을 통해 요청 파일을 받아와야할 확률을 나타낸다.

III. 제안 기법

본 장에서는 제안하는 커버리지 확장과 분산 파일 저장기법에 대해 설명한다. 그림 2는 백홀의 전송 용량 $B=1$, 파일 저장 공간 $M=1$ 인 간단한 환경에서의 동작 예시를 보여주고 있다. 각 기지국은 커버리지를 확대하여 커버리지가 확대되는 구간이 인위적으로 발생

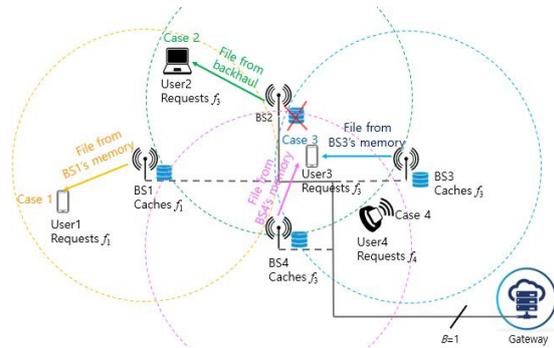


Fig. 2 Proposed scheme

하게 만든다. 각 기지국은 다음 확률 분포에 따라 임의의 M 개의 파일을 저장한다.

$$p_c(m) = \frac{1/m^{\gamma_c}}{\sum_{l=1}^L 1/l^{\gamma_c}} \quad (9)$$

커버리지 확장에 맞춰 인접 기지국 사이 중복 저장되는 파일의 양을 줄이기 위해 각 기지국은 파일 저장 분포 $p_c(m)$ 의 지수 값 γ_c 을 감소시킨다.

- Case 1: 기지국 1의 커버리지 내에는 두 사용자가 있으나 저장 파일을 요청한 사용자 1를 저장되지 않은 파일을 요청한 사용자 2보다 우선적으로 서비스한다.
- Case 2: 기지국 2의 커버리지 내의 두 사용자 모두 저장되어 있지 않은 파일을 요청하였다. 사용할 수 있는 백홀 용량이 남아있다면 백홀을 통해 둘 중 임의의 이용자를 서비스 한다.
- Case 3: 세 기지국들의 커버리지가 중첩된 곳에 위치한 사용자 3의 요청파일을 기지국 3와 4가 저장하고 있다. 기지국 3과 4는 저장된 파일을 요청한 사용자들 중 임의로 서비스할 이용자를 선택하는데, 두 기지국 모두 사용자 3을 서비스할 경우 사용자 3은 두 기지국으로부터의 신호 중 더 수신 상태가 더 좋은 수신신호를 선택하여 전송 파일을 복원한다.
- Case 4: 어느 기지국에도 스케줄링되지 못한 사용자 4는 요청 파일을 얻을 수 없다.

커버리지에 임의의 이용자 $u' \in \Phi_u$ 포함하는 기지국의 세트를 $\Phi_{cover,u'} = \{b' : b' \in \Phi_b, \|u' - b'\| \leq r\}$ 라고 했을 때, 캐시 적중률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{hit,u'} = \sum_{m \in \mathbb{M}_{cover,u'}} p_r(m) \quad (10)$$

여기서 $\mathbb{M}_{cover,u} = \bigcup_{b' \in \Phi_{cover,u}} \mathbb{M}_{b'}$ 은 이용자 u' 인근 기지국들이 저장하고 있는 파일의 세트를 나타내는 것으로, $\mathbb{M}_{b'}$ 는 기지국 b' 가 저장하고 있는 파일의 세트이다. 따라서 커버리지가 많이 중첩된 곳에 위치한 이용자 일수록 다수의 기지국에 저장된 파일을 이용할 수 있게 되므로 기지국의 메모리가 늘어난 것과 같은 효과를 볼 수 있다. 하지만 동시에 커버리지 확장은 같은 주파수를 사용하는 다른 셀로의 간섭 크기 또한 증가시켜 이용자의 파일 수신확률 p_{succ} 저하를 야기하므로 커버리지 확장으로 인한 캐시 적중률 향상과 파일 수신확률 저하를 함께 고려하여 커버리지 범위를 결정해야 한다.

제안 기법의 경우 기존 기법과는 달리 서로 다른 기지국이 동시에 같은 이용자를 서비스하는 경우(case 4)가 생길 수 있어 데이터 처리량의 분석 및 수식 표현이 복잡하게 표현된다. 하지만 제안 기법에서는 중첩된 커버리지 면적이 넓어질수록 인접한 기지국 사이 중복되지 않는 파일을 저장하고 이용자가 밀집한 지역에서는 인접 기지국들이 동일한 이용자를 스케줄링할 확률이 낮기 때문에 case 3과 같은 상황을 무시하여 네트워크 데이터 처리량을 근사할 수 있다. 따라서 기지국 $b' \in \Phi_b$ 에서 저장 파일을 이용해 처리하는 평균 데이터 처리량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{c,b'} &= Rp_{succ} p_{Creq,b'} \\ &= Rp_{succ} \left(\sum_{k=1}^{\infty} p_{k_b}(k) \cdot (1 - (1 - p_{hit,b'})^k) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $p_{hit,b'}$ 는 임의의 한 이용자가 기지국 b' 에 저장되어 있는 파일 $m \in \mathbb{M}_{b'}$ 을 요청할 확률로써, 기지국마다 다른 파일들을 저장하기 때문에 캐시 적중률은 다음과 같다.

$$p_{hit,b'} = \sum_{m \in \mathbb{M}_{b'}} p_r(m) \quad (12)$$

각 기지국에 대해 이용자가 저장되지 않은 파일을 요청할 확률이 다르기 때문에 소형셀 네트워크에서의 평균 데이터 처리량은 다음과 같이 나타내진다.

$$\begin{aligned} T &= Rp_{succ} \left(\sum_{\forall S \subset \Phi_b, |S| \leq B} \left(\prod_{\bar{b} \in S} 1 - p_{Breq,\bar{b}} \right) \left(\prod_{\bar{b} \in S^c} p_{Breq,\bar{b}} \right) \right) \\ &\quad + \sum_{b' \in \Phi_b} T_{c,b'} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $p_{Breq,\bar{b}}$ 는 임의의 한 이용자가 요청한 파일이 기지국 \bar{b} 에 없을 확률을 나타낸다.

IV. 시뮬레이션 및 성능분석

Table. 1 Simulation environment

Parameter	Value [unit]
Pathloss exponent, α	3.6
Distance between nearby BSs	200 [m]
Number of Files, L	1000 [files]
File storage space, M	20 [files]
Exponent of file popularity dist., γ_r	0.8
Channel bandwidth, W	20 [MHz]
Target rate, R	2 [Mbps]
Transmit power margin, Γ_0	2
Noise power density, N_0	-174 [dBm]
Backhaul capacity, B	30 [streams]
Number of BSs, N	121
User density, λ_u	600 [users/km ²]

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 기존 파일저장 기법 대비 제안 기법의 성능 이득에 대해 살펴보도록 한다. 모든 시뮬레이션은 Matlab을 통해 이루어졌으며 10,000회의 독립 시행 (이용자 배치, 파일 요청, 기지국 파일 저장, 채널 페이딩)으로 얻어진 수치를 평균한 결과이다. 시뮬레이션 환경은 표 1과 같다.

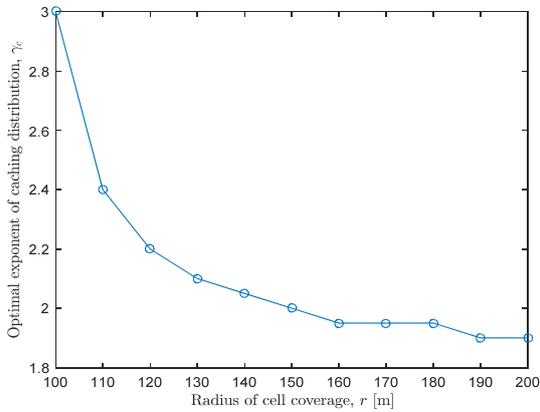


Fig. 3 Optimal caching exponent with respect to cell coverage

그림 3은 커버리지 반경 r 에 따른 최적의 파일 저장 분포 지수 값 γ_c 을 보여주고 있다. 반경 r 이 커질수록 커버리지 중첩되는 면적이 넓어지기 때문에, 커버리지 중첩 지역에서의 캐시 적중률을 증가시키기 위해 인접한 기지국 사이에 중복되어 저장되는 파일의 비율을 낮추는 것이 좋다. 따라서 반경 r 이 증가함에 따라 최적의 지수 값 γ_c 이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 기지국의 커버리지 반경 r 에 따른 네트워크 데이터 처리량을 보여주고 있다. 파일 저장 분포의 지수 값 γ_c 은 시뮬레이션을 통해 결정한 최적의 값으로 설정되어 있다. 커버리지 반경 r 이 커짐에 따라 커버리지 중첩지역에 있는 이용자의 캐시 적중률이 증가하는 장점이 있는 반면 다른 기지국으로부터의 간섭 또한 증가하는 단점이 있다. $r < 140$ [m] 구간에서는 커버리지 증가에 따른 간섭 증가가 네트워크 데이터 처리량 손해보다 캐시 적중률 향상으로 인한 이득이 커 네트워크 처리량이 r 에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면 $r > 140$ [m] 구간에서는 저장된 파일을 통한 캐시 적중률 이득보다 간섭의 증가로 인한 전송성공 확률의 손실이 커 네트워크 데이터 처리량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 기지국이 밀집한 소형셀 네트워크에

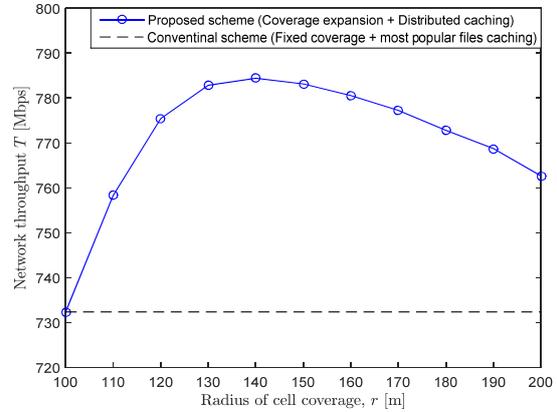


Fig. 4 Network throughput with respect to cell coverage

서 제한된 백홀 용량으로 인한 데이터 처리량의 병목현상을 완화하기 위한 커버리지 확장 및 분산 파일 저장 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 기존 기법대비 성능 이득을 살펴보았다. 제안기법은 기지국의 메모리 용량이 작아 파일 저장으로 인한 백홀 부하 감소효과가 크지 않은 환경에서 기존 기법대비 높은 성능 이득을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 향후 제안 기법의 수학적 분석을 통해 네트워크 데이터 처리량 최대화를 위한 커버리지와 파일저장 분포를 증명할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Institute for Information & Communications Technology Promotion (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.2015-0-00820, A research on a novel communication system using storage as wireless communication resource)

REFERENCES

- [1] Global mobile Supplier Association. Small cell network white paper [Internet]. Available: <http://www.huawei.com/>

- minisite/hwmbbf16/insights/small_cell_solution.pdf.
- [2] S. Hur, T. Kim, D. J. Love, J. V. Krogmeier, T. A. Thomas, and A. Ghosh, "Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 10, pp. 4391-4403, Oct. 2013.
- [3] Z. Gao, L. Dai, Z. Wang, M. A. Imran, and M. Z. Shakir, "Mmwave massive-MIMO-based wireless backhaul for the 5G ultra dense network," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 13-21, Oct. 2015.
- [4] S. Singh, M. N. Kulkarni, A. Ghosh, and J. G. Andrews, "Tractable model for rate in self-backhauled millimeter wave cellular networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 10, pp. 2196-2211, Oct. 2015.
- [5] N. Golrezaei, A. F. Molish, A. G. Dimakis, and G. Caire, "Femtocaching and device-to-device collaboration: a new architecture for wireless video distribution," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 4, pp. 142-149, Apr. 2013.
- [6] E. Bastug, M. Bennis, and M. Debbah, "Living on the edge: the role of proactive caching in 5G wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 8, pp. 82-89, Aug. 2014.
- [7] N. Golrezaei, K. Shanmugam, A. G. Dimakis, A. F. Molish, and G. Caire, "FemtoCaching: wireless video content delivery through distributed caching helpers," in *Proceeding of IEEE International Conference on Computer Communications 2012*, Orlando: FL, pp. 25-30, 2012.
- [8] K. Shanmugam, N. Golrezaei, A. G. Dimakis, A. F. Molish, and G. Caire, "FemtoCaching: wireless content delivery through distributed caching helpers," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 59, no. 12, pp. 8402-8413, Dec. 2013.
- [9] J. Song, H. Song, and W. Choi, "Optimal content placement for wireless femto-caching network," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 7, pp. 4433-4444, Jul. 2017.
- [10] N. Golrezaei, A. G. Dimakis, A. F. Molish, "Scaling behavior for device-to-device communications with distributed caching," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 60, no. 7, pp. 4286-4298, Jul. 2014.
- [11] M. Gregori, J. Gomez-Vilardebo, J. Matamoros, and D. Gunduz, "Wireless content caching for small cell and D2D networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 5, pp. 1222-1234, May 2016.
- [12] J. -P. Hong and W. Choi, "User prefix caching for average playback delay reduction in wireless video streaming," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 377-388, Jan. 2016.
- [13] G. -U. Kim and J. -P. Hong, "Wireless caching techniques based on content popularity for network resource efficiency and quality of experience improvement," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 21, no. 8, pp. 1465-1473, Aug. 2017.
- [14] V. Srinidhi, "Classification of user behavior in mobile Internet," *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange*, vol. 2, no. 2, pp. 9-18, Jun. 2016.



홍준표(Jun-Pyo Hong)

2014년 KAIST 전기및전자공학과 박사
 2014년~2015년 KAIST 전자정보연구소 연수연구원
 2015년 ETRI 통신인터넷연구소 연구원
 2015년~현재 국립부경대학교 정보통신공학과 조교수

※관심분야 : 정보통신 보안, 차세대 이동통신 시스템, wireless caching networks 등