

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.211202005

引用格式:姚玉坤,任丽丹,张本俊,等.软件定义小蜂窝网络中平衡调度缓存方案[J].电讯技术,2023,63(5):669-675.[YAO Y K,REN L D,ZHANG B J,et al.A balanced scheduling cache scheme in software-defined small cell network[J].Telecommunication Engineering,2023,63(5):669-675.]

软件定义小蜂窝网络中平衡调度缓存方案*

姚玉坤,任丽丹,张本俊,周 杨,何 亮

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065)

摘要:在软件定义小蜂窝网络(Software-defined Small Cell Network,SDCN)中,面对小蜂窝间的干扰问题,现有基于编码和协作的缓存资源管理方案均未结合网络拓扑进行研究,也未考虑用户设备(User Equipment,UE)的接收缓存数,使得资源分配依旧面临不平衡的严峻挑战。针对上述问题,基于SDCN中的拓扑管理功能,运用贪婪算法以是否存在重叠干扰为判定条件对小基站(Small Base Station,SBS)进行划分。此外,以平衡UE接收编码缓存数量为目标,建立平衡调度缓存模型来调节不同区域SBS的分发时间,并借助二分搜索算法寻找其最优解。最后,通过设计自适应编码缓存策略,以应对网络负载的变化。仿真结果表明,所提方案在平衡资源分配与自适应方面性能优势明显,节约了网络资源,增加了网络的吞吐量。

关键词:软件定义小蜂窝网络(SDCN);平衡调度;拓扑管理;资源缓存

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2023)05-0669-07

A Balanced Scheduling Cache Scheme in Software-defined Small Cell Network

YAO Yukun,REN Lidan,ZHANG Benjun,ZHOU Yang,HE Liang

(School of Communication and Information Engineering,Chongqing University of Posts and Telecommunications,Chongqing 400065,China)

Abstract:In the software-defined small cell network(SDCN),there exists the problem of interference between small cells,the existing caching resource management schemes based on coding and cooperation neither combine with network topology,nor consider the receiving caching of user equipment(UE).Thereby,the resource allocation still faces severe challenges of imbalance.In response to these problems,based on the topology management function of the SDCN,the greedy algorithm is used to divide the small base station(SBS) according to whether there is overlapping interference as the judgment condition.In addition,to balance the UEs receiving code caching as the goal,a balanced scheduling cache model is established to adjust the distribution time of SBS in different regions,and its optimal solution is found through a binary search algorithm.Finally,an adaptive coding cache strategy is designed to cope with changes in network load.The simulation results show that the proposed scheme has obvious performance advantages in balancing resource allocation and self-adaptation,and it saves network resources and increases network throughput.

Key words:software-defined small cell network(SDCN);balanced scheduling;topology-management;resource caching

* 收稿日期:2021-12-02;修回日期:2022-01-24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61971080)
通信作者:姚玉坤

0 引言

随着移动通信量的急剧增长,蜂窝网络^[1-2]的容量和传输效率也需要增加,以应对移动流量的需求。小蜂窝网络^[3]由于其发射功率小、能耗小、成本低、易部署等特点被认为是解决该问题的有效方法之一。另一方面,网络体系架构也随着网络流量的增加而发生变化。软件定义网络(Software-defined Network, SDN)^[4]打破了传统网络中软硬件一体化的固有模式,通过将决策控制平面和底层数据平面隔离,即实现底层设备更高性能的专业化存储/转发和上层软件更高智能的灵活控制调度,同时将控制平面转移到集中式实体中,集中感知网络拓扑、状态、服务要求和用户体验等,在虚拟化资源的基础上弹性地按需配置资源,凭借其强大集中式管理与可编程组网思想被广泛研究与应用。

由于小蜂窝(Small Cell, SC)间的干扰,存在资源分配不均等问题,给系统性能提升带来了严峻的挑战。现阶段,缓存技术在一定程度上为资源分配提供了良好的解决方案。文献[5]通过比较非编码和编码缓存方案中用户获取文件的开销问题,表明编码缓存优于非编码缓存,开启了借助网络编码提高缓存网络中内容分发效率的新征程。随后,文献[6]研究了在回程受限的无线小蜂窝网络中的最佳编码缓存问题,根据瞬时请求结合历史需求,为用户提供内容选择性卸载。紧接着,文献[7]就异构蜂窝网络中的内容请求分配策略、带宽负载和缓存管理间的复杂相互作用通过确定路由机制和缓存更新规则,解决了带宽负载平衡和内容可用性之间的最佳权衡关系。在此基础上,文献[8]联合优化能耗驱动下的小基站(Small Base Station, SBS)中内容缓存和推送机制。与此同时,协作缓存借助于蜂窝网络集成存储空间的优势,在无线网络中释放出更大的潜力。文献[9]以最小化能耗为目标,设计了一种次优缓存策略,实现中继节点和终端设备合作缓存内容。文献[10]就异构蜂窝网络流量在时间与空间中波动性大的特征,制定联合缓存与基站激活策略,从而最小化特定时间范围内的整体能耗。后来,文献[11]面对异构蜂窝小区中 SBS 的重叠覆盖问题,考虑缓存和 SBS 休眠的相互耦合,寻找到了低复杂度的次优缓存睡眠解决方案。在此前研究的基础上,文献[12]创新性地联合编码缓存和协作缓存,提出了一种协作编码缓存方案,从而提高了异构蜂窝网络中内容交付效率并增强终端用户的体验质

量(Quality of Experience, QoE)。基于此,文献[13]着眼于网络能耗问题,从新的视角提出了一种节能合作缓存方案来提高异构小蜂窝网络的性能。文献[14]专注于编码内容缓存、内容交付和能源合作机制,设计出了一种智能的多维资源分配机制,实现共同优化。

然而,上述的研究不论是基于编码还是协作抑或是联合的缓存机制,均未结合 SDN 蜂窝网络中的拓扑结构进行深入研究,也未从用户设备(User Equipment, UE)接收缓存的角度出发。面对瞬息万变的网络拓扑,同时考虑到 SDN 技术对于拓扑更加集中感知管理的特性,本文意在结合网络拓扑联合协作编码缓存机制,解决 SBS 之间的重叠干扰的问题,以优化网络资源的分配。为此,本文提出了一种基于拓扑管理的平衡调度自适应缓存方案(Balance-scheduling Adaptive Caching Based on Topology-management Scheme, BACT),建立了拓扑管理平衡调度自适应缓存模型,通过借助 SDN 控制器收集到的网络拓扑结构,弹性地调节处于不同区域的 SBS 的传输时间,从而平衡 UE 接收到的编码缓存。

1 系统模型以及问题描述

在软件定义小蜂窝网络中,宏小区(Macro cell, MC)被划分为多个 SC,每个 SC 都由 SBS 控制,宏基站(Macro-cell Base Station, MBS)和 SBS 均可以缓存其覆盖范围内 UE 所需要的数据内容。本文中,考虑该网络中有一个 MBS, s 个 SBS, 被表示为 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_x, \dots, b_s\}$; 有 h 个 UE, 被表示为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_h\}$; p 个数据包, 被表示为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_p\}$ 。假设 UE 和 SBS 在网络区域中随机分布,允许并发传输,由于 SBS 的覆盖范围存在重叠,因此当 UE 移动到不同的 SBS 重叠覆盖范围时,会存在传输干扰,即位于 SBS 交叉覆盖区域的 UE 无法成功接收到任何数据包。UE 首先会向其所属蜂窝小区中的 SBS 发送请求,进而向 MBS 请求,通过上行链路传输到服务器,服务器根据请求分发内容。但是由于信道质量、干扰、噪声等影响,数据包在传输过程中可能会丢失,以至 UE 无法接收到所请求内容,此时需要重传丢失数据包,而位于非重叠区域的 UE 将会因重传接收到更多的冗余数据包,因此造成不同区域 UE 接收缓存的不平衡,浪费网络资源。

1.1 平衡调度缓存模型

从 SBS 缓存分发内容角度出发,为确保 SBS 之间不会互相干扰,并且使得处于干扰和非干扰区域的 UE 均可接收到 k 个编码缓存包,因此,考虑通过优化不同区域 UE 接收到编码缓存包的数量,降低非干扰区域 UE 接收缓存数,增加干扰区域 UE 接收缓存数,以此来平衡传输。

事件 SBS b_x 在 y 时隙传输被表示为 t_{xy} ($t_{xy} \in \{0,1\}$),当 b_x 在 y 时隙传输时, $t_{xy}=1$;否则, $t_{xy}=0$ 。对于 u_i ($u_i \in U$) 来说,覆盖 u_i 的 SBS 集合表示为 $C(u_i)$,则 u_i 在 y 时隙从 b_x 中接收到编码包事件可以表示为

$$R_{iyx} = t_{xy} (t_{xy} - \max_{b_{x'} \in |C(u_i) \setminus b_x|} t_{x'y})。 \quad (1)$$

式(1)中,针对 $R_{iyx}=0$,有两种可能,分别为 $t_{xy}=0$ 和 $t_{xy}=1$ 、 $\max_{b_{x'} \in |C(u_i) \setminus b_x|} t_{x'y}=1$,代表 b_x 未在 y 时隙传输以及 u_i 由于处于干扰区域而丢失编码缓存包。在相同的条件下, $R_{iyx}=1$,是由于 $t_{xy}=1$ 和 $\max_{b_{x'} \in |C(u_i) \setminus b_x|} t_{x'y}=0$,代表 u_i 在非干扰区域,成功接收到编码包。

基于上述分析,为了平衡处于不同区域的 UE 接收到的编码缓存,即优化干扰区域 UE 接收编码缓存数,降低非干扰区域 UE 接收编码缓存数,考虑链路不稳定存在丢包的情况, u_i 在 y 时隙中从 b_x 接收到编码缓存数的目标函数为

$$\max_{u_i \in U} \min_{b_x} \sum_{b_x} \sum_{y=1}^S \frac{R_{iyx} p_x}{1-\varepsilon}。 \quad (2)$$

式中: R_{iyx} 为 b_x 分发缓存的时间分数, $R_{iyx} \in \{0,1\}$; p_x 为 b_x 在 y 时隙分发的编码缓存数; ε 为链路丢包率; S 为总时隙数; x 为 SBS 的索引值; y 为时隙索引值; i 为 UE 的索引值。

1.2 自适应编码缓存模型

考虑到蜂窝网络中的不同用户所请求的内容不同,且在不同的时间范围流量会有很大的差异,为了优化缓存分发过程中的端到端传输,使资源的分配能够自动适应网络负载的变化,利用随机线性网络编码(Random Linear Network Coding, RLNC)^[15] 将文件分解成多个数据块,从足够大的数域中随机地选择编码系数进行编码,在 SBS 中生成和存储编码包,待到合适的时间将缓存的编码包分发出去。因此,每个 UE 仅需要接收到足够多线性独立的分组而不必等待特定的分组即可重建原始数据包。编码缓存包被表示为

$$K = \sum_{i=1}^g \delta_i p_i。 \quad (3)$$

式中: g 为需要编码的数据包的数量; δ_i 为在大小为 2^8 ^[16] 随机域中选取的随机系数。为了使得 UE 成功解码,通常需要将编码系数附加在编码包头部,因此,使用 RLNC 组合不同数据包时操作如图 1 所示。

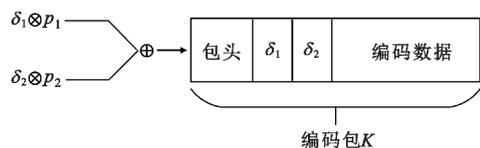


图 1 编码包生成示意图

在该缓存分发模型中,基于图 2 所示的网络架构,首先从 SDN 控制器中获取网络拓扑信息,根据拓扑结构划分存在干扰以及无干扰的 SBS 集合,进而确定不同干扰集的缓存分发时间,同时依据网络流量合理地调整编码缓存速率,使得资源分配可以及时适应网络负载的变化,从而减轻网络负担,优化缓存分发过程中的端到端传输。编码缓存速率可以被表示为

$$R = \frac{g}{p}。 \quad (4)$$

式中: R ($0 \leq R \leq 1$) 为编码率; p 为原始数据包数量;编码包数量被表示为 g 。

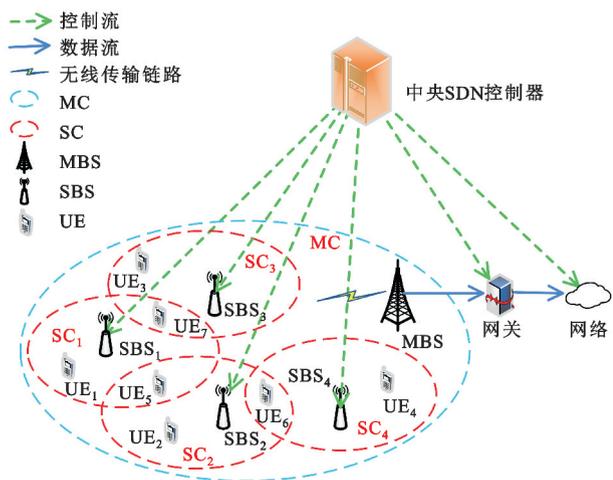


图 2 网络架构

2 方案设计

2.1 拓扑管理非干扰集贪婪策略

为将存在干扰与不存在干扰的 SBS 进行划分,需要收集网络拓扑信息。图 2 中,由于在 SDN 控制器中包含具有路由计算、状态监测、拓扑发现等功能的模块,因此,网络拓扑信息在 SDN 控制器中生成。

SC 中的 SBS 通过 OpenFlow 协议与 SDN 控制器进行通信,将自己的覆盖范围等信息通过控制流传输给 SDN 控制器,进而生成网络拓扑。在 SDN 控制器中,运用贪婪算法,以是否存在重叠覆盖区域为判定条件,寻找干扰集 $IB = \{B_n\}$ 和非干扰集 $NIB = \{B_m\}$,算法伪代码如下:

```

输入:  $V(G), NIB, m, B_m$ 
输出:  $NIB, IB$ 
初始化:  $m = 1, NIB \in \emptyset$ 
1 while  $V(G) \neq \emptyset$  then
2    $V(G) = 0$ ;
3   for  $v_x \in V(G)$  do
4      $B_m = \emptyset$ ;
5     if  $v_x \in V(G) \&\& v_x \notin B_m \&\& v_x = 0$  then
6       if  $v_x$  和  $B_m$  不存在重叠区域 then
7          $B_m = B_m \cup \{v_x\}$ ;
8          $V(G) = V(G) - v_x$ ;
9       else
10         $v_x = 1$ ;
11      else
12         $v_x = 0$ ;
13         $NIB = NIB \cup \{B_m\}$ ;
14         $m = m + 1$ ;
15    end for
16  end while
17  $IB = V(G) - NIB$ 

```

2.2 平衡调度缓存策略

若所有的 SBS 并行传输,则干扰区的 UEs 无法接收到编码缓存内容;若使得非干扰区的 SBS 并行传输,则位于干扰区的 UE 接收到的编码缓存数量会大于位于非干扰区的 UE。这两种情况均会使得部分 UE 由于接收到的编码缓存内容与所需编码包数不匹配而无法解码,造成更多的重传与冗余。基于上述分析,通过平衡不同区域 SBS 的传输时间,使得蜂窝内的所有 UE 均可以接收到所需的足够编码缓存,从而平衡网络资源的分配。

为了实现各 UE 接收编码缓存内容的平衡,通过调整不同区域 SBS 并行缓存分发时间,即存在干扰和不存在干扰的 SBS 在同一时隙的不同时间段内进行分发,使得蜂窝区域的 UE 均可接收到所需的编码缓存的同时整体接收到的缓存内容最多,如式(5)所示:

$$\max \sum_{m=1}^{|NIB|} \sum_{u_i}^{|C(u_i) \cap B_n|} \sum_{b_x}^{|C(u_i) \cap B_m|} \frac{t_r p_x}{1-\varepsilon} + \max \sum_{m=1}^{|NIB|} \sum_{u_i}^{|C(u_i) \cap B_n, C(u_i) \cap B_m|} \sum_{b_x}^{|C(u_i) \cap B_n|} \frac{\Gamma p_x}{1-\varepsilon} \quad (5)$$

式中: $|NIB|$ 为 SBS 的非干扰集合数; t_r 为非干扰集 B_m 的传输时间分数, $0 \leq t_r \leq 1$; Γ 为干扰集 B_n 的传输时间分数, $0 \leq \Gamma \leq 1, t_r + \Gamma \leq 1$; $\sum_{u_i}^{|C(u_i) \cap B_n|} \sum_{b_x}^{|C(u_i) \cap B_m|} \frac{t_r p_x}{1-\varepsilon}$ 为非干扰区的 UE 在 t_r 中接收到的编码缓存包的数量; $\{C(u_i) \cap B_m\}$ 为既覆盖 u_i 又属于非干扰集 B_m 中 SBS 的数量; $\sum_{u_i}^{|C(u_i) \cap B_n, C(u_i) \cap B_m|} \sum_{b_x}^{|C(u_i) \cap B_n|} \frac{\Gamma p_x}{1-\varepsilon}$ 为干扰区 UE 在 Γ 中接收到的编码缓存包数量, $\{C(u_i) \cap B_n, C(u_i) \cap B_m\}$ 为覆盖 u_i 的 SBS 同时属于干扰集和非干扰集 B_n 和 B_m 的数量; n 为干扰集的索引值; m 为非干扰集的索引值。

为了确定不同区域 SBS 的缓存分发时间,首先确定非干扰集 B_m 的传输时间分数 t_r ,进而确定干扰集 B_n 的传输时间分数 Γ 。

基于式(2),当链路丢包率为 ε 时,UE 通过 b_x 在 y 时隙中接收到的数据包数量的目标函数应为

$$\max_{u_i \in U} \min \sum_{m=1}^{|NIB|} \sum_{b_x}^{|C(u_i) \cap B_m|} \frac{t_r p_x}{1-\varepsilon} \quad (6)$$

由于网络拓扑在 SDN 控制器中生成,因此,在 SDN 控制器中设计平衡调度算法,首先借助二分查找算法得到 t_r ,然后依据式(5)得到 Γ ,从而找到平衡调度缓存模型的最优解。算法伪代码如下:

```

输入:  $U, NIB, \{r_i\}, \{p_x\}, \text{left} = 0, \text{right} = 0, \text{MAX} = 0, \text{sum} = 0$ 
输出: left
1 for  $i \in |U|$  do
2    $r[i] = \sum_{m=1}^{|NIB|} \sum_{b_x}^{|C(u_i) \cap B_m|} \frac{t_r p_x}{1-\varepsilon}$ ;
3    $\text{sum} += r[i]$ ;
4   if  $r[i] > \text{MAX}$  then
5      $\text{MAX} = r[i]$ ;
6   end for
7  $\text{left} = \text{MAX}, \text{right} = \text{sum}$ ;
8 while  $\text{left} < \text{right}$  do
9    $\text{mid} = \frac{\text{left} + \text{right}}{2}$ ;
10   $\text{cnt} = 1$ ;
11   $\text{sum} = 0$ ;
12  for  $i \in |U|$  do
13     $\text{sum} += r[i]$ ;
14    if  $\text{sum} > \text{mid}$  do
15       $\text{sum} = r[i]$ ;
16       $\text{cnt} ++$ ;
17    end for
18    if  $\text{cnt} \leq |NIB|$  then
19       $\text{right} = \text{mid} - 1$ ;

```

```

20     else
21         left = mid + 1;
22     end while

```

2.3 速率自适应编码缓存策略

考虑到蜂窝网络中的流量随着 UE 和时间有着明显的差异,基于自适应编码缓存模型,通过优化编码缓存中的编码速率,达到适应网络负载变化需求的目标。在 SDN 小蜂窝网络中,SDN 控制器可以实时地收集到网络拓扑,并告知其他节点,因此,当感知到蜂窝网络中流量变化时,SBS 利用 RLNC 生成和存储编码缓存内容的速率会相应地变化,从而更加智能地分发缓存。对于每组编码缓存包而言,其与随机生成的编码系数相乘得到编码分组,将编码向量及其他标识符字段放在数据包头部与编码分组组成新的编码包发送出去。基于 RLNC 的特点 UE 不必等到特定的编码包,一旦接收到足够数量的线性独立编码包即可立即解码以重建原始数据。速率自适应编码缓存算法伪代码如下:

输入: $R, |P|, g$ // R 编码率, $|P|$ 原始数据包数量, g 编码包的数量

输出: R

```

1  $R = \frac{g}{|P|}$ ;
2 for  $l \in g$  do
3     生成随机编码向量  $\delta_l$ ;
4     while  $\delta_l$  非独立 do
5         生成随机编码向量  $\delta_l$ ;
6     end while
7      $K = \sum_{l=1}^g \delta_l p_l$ ;
8     更新编码包头;
9     转发编码包;
10 end for
11 更新编码速率  $R$ 。

```

3 算法复杂度分析

针对缓存内容的分发过程,本节对所提 BACT 方案三个阶段中相对应的策略算法复杂度进行分析。在系统的初始化阶段,由于 SDN 控制器中含有拓扑发现模块,可以实时获取网络的拓扑结构(包含 SBS、UE、缓存信息等),因此,主要考虑方案具体实施过程中的计算开销。考虑该网络中有 k 个 SBS、 h 个 UE、 p 个数据包的情况,具体分析如下。

(1) 拓扑管理非干扰集贪婪策略

该策略中利用非干扰集贪婪算法将蜂窝网络中

存在干扰与不存在干扰的 SBS 进行划分,其时间复杂度为 $O(s^2)$ 。

(2) 平衡调度缓存策略

该策略中首先利用平衡调度缓存二分查找算法寻找非干扰集的传输时间,进而确定干扰集的传输时间,得到平衡调度缓存模型的最优解,其时间复杂度为 $O(h+h \times \lg(\text{sum-MAX}))$ 。

(3) 速率自适应编码缓存策略

该策略中提出的速率自适应编码缓存算法通过调节编码缓存的速率,以达到适应网络负载变化的目的,其时间复杂度为 $O(g)$ 。

SDN 控制器具有拓扑管理功能,其基于 OpenFlow 协议通过控制层集中管理并下发命令,使得转发层的各设备执行相应的指令,因而,本文所设计的策略均在 SDN 控制器中顺次执行。综上,本文所提方案 BACT 方案总体的算法复杂度为 $O(s^2+h+h \times \lg(\text{sum-MAX})+g)$ 。

4 仿真分析

仿真网络模型参考图 2 所示的 SDN 蜂窝网络架构,其中半径为 70 m 的 SC 被随机部署在半径为 350 m 的 MC 覆盖范围内^[17],并负责为其范围内的 UE 提供服务,同时 MBS 和 SBS 在相同的工作频段上分别以不同的频谱效率工作。

仿真模拟中,假设 UE 的请求数以及到达时间均服从泊松分布^[18],设置每个 SBS 中的缓存大小均相同,且文件被分成的片段大小为 32 个数据包,采用 RLNC 在大小为 2^8 的随机域中随机选取编码系数,当 UE 接收到足够多线性独立的编码缓存包后即可解码获的原始数据包。考虑到传输可能会受链路质量等影响,此处设置传输成功率不低于 95%。由于本文着重考虑缓存方案的平衡性,因此主要以 UE 接收到的编码缓存数为考量依据,同时结合能耗和端到端传输时延进行综合评估,仿真结果为多次实验得出的平均值。

图 3 表示 UE 的数量对接收编码缓存数量的影响。当 $\varepsilon=0.1$,网络中有 15 个 SBS 时,随着 UE 数量的增加,在采用了平衡调度缓存方案下 UE 接收到的编码缓存数更接近于 32。这是由于协调干扰集和非干扰集中 SBS 的传输时间,使得系统中 UE 接收到的编码缓存尽可能满足解码的需求(设置一代编码包的数量为 32),因此 UE 至少接收到 32 个线性独立的编码包可解码获得原始数据包。但是在

非平衡调度缓存方案中,部分 UE 接收到的缓存数量则远远多于 32,造成了很多的冗余传输,降低了业务性能,而其他用户可能会由于没有接收到足够数量的缓存而无法解码出原始数据包,导致更多的重传,浪费了网络资源。总之,平衡调度缓存方案相比于非平衡调度性能提高了 30.9%,而编码缓存的自适应性对 UE 所接收到缓存数影响较小。

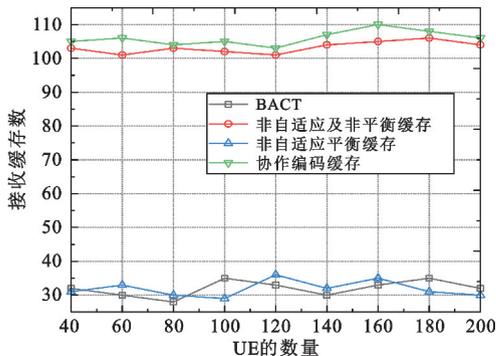


图 3 接收缓存数与 UE 数

图 4 表示 SBS 的数量对 UE 接收编码缓存数量的影响。当 $\epsilon = 0.1$, 网络中有 50 个 UE 时,随着 SBS 数量的增多,UE 接收编码缓存数逐渐下降,后趋于平缓。这是因为当 SBS 数量增多时,SBS 之间的协作缓存会发挥更加强大的功能,使得网络中资源分配更加合理。然而由于带宽和频谱资源的限制,当 SBS 数量增加到一定程度后,接收缓存数趋于饱和但均不低于 UE 可以解码的最小编码缓存数。此外,由于本文所提方案结合网络拓扑合理地划分存在干扰和不存在干扰的 SBS,在平衡调度缓存方案下网络中的冗余明显低于协作编码缓存方案以及非平衡调度下的缓存方案,在一定程度上优化了网络资源的分配。

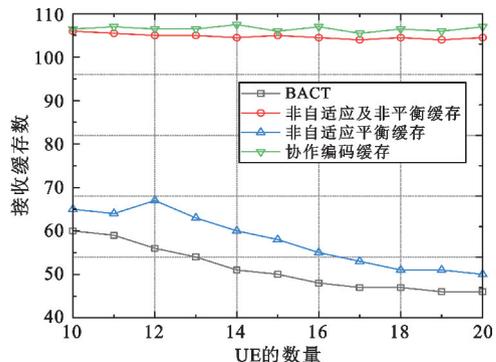


图 4 接收缓存数与 SBS 数

图 5 表示丢包率对端到端时延的影响。当网络

中设置有 15 个 SBS 和 50 个 UE 时,随着 ϵ 的增加,端到端时延均增长,其中本文所提方案的端到端时延低于非速率自适应与非平衡调度下的端到端时延。这是由于网络环境的干扰和链路的不稳定对分发造成一定的影响,因此当 ϵ 越大时,缓存分发中丢失的数据包越多,引发更多重传,增加网络的负担,进一步影响网络的可靠性,消耗带宽,造成更大的传输延迟。然而,在自适应编码缓存方案下,由于编码缓存率随着网络负载而动态变化,更加灵活地分配网络资源,因此,相较于非自适应的方案,其端到端时延更低,性能更优。

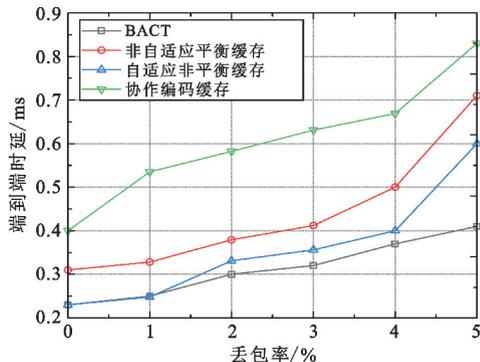


图 5 端到端时延与丢包率

5 结论

本文主要研究软件定义小蜂窝网络中的缓存资源管理问题,通过结合网络拓扑信息联合考虑协作编码缓存,提出了一种拓扑管理平衡调度自适应缓存方案。首先为便于拓扑管理,将 SBS 划分为干扰集和非干扰集;在此基础上,通过调节干扰集和非干扰集的传输时间,建立了平衡调度缓存模型,并设计平衡调度缓存二分查找算法;此外,提出了一种自适应缓存模型来优化缓存分发过程中的端到端传输。仿真结果表明,所提方案很好地平衡了资源缓存的分配,同时具有良好的自适应性。

参考文献:

[1] YANG Y. Topology management for 5G small-cell communications [C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Macau:IEEE,2020:1-5.

[2] CHAUDHRY A U,JACOB N,GEORGE D,et al. On the interference range of small cells in the wireless backhaul of 5G ultra-dense networks [C]//Proceedings of 2020 Wireless Telecommunications Symposium. Washington

- DC:IEEE,2020:1-6.
- [3] YANG W, ZHANG J, ZHANG J. On performance of ultra-dense neighborhood small cell networks in urban scenarios [J]. IEEE Communications Letters, 2020, 25 (4): 1378-1382.
- [4] CHO S, LEE S H, PANICHPATTANAKU W, et al. Architecture for SDN-independent gateway [C]// Proceedings of 2019 23rd International Computer Science and Engineering Conference. Phuket: IEEE, 2019:76-81.
- [5] ALTMAN E, AVRACHENKOV K, GOSELING J. Coding for caches in the plane [EB/OL]. (2013-09-03) [2022-01-20]. <http://arxiv.org/abs/1309.0604>.
- [6] BLASCO P, GÜNDÜZ D. Learning-based optimization of cache content in a small cell base station [C]// Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications. Sydney: IEEE, 2014:1897-1903.
- [7] NAVEEN K P, MASSOULIE L, BACCELLI E, et al. On the interaction between content caching and request assignment in cellular cache networks [C]// Proceedings of the 5th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications and Challenges. New York: ACM, 2015:37-42.
- [8] GONG J, ZHOU S, ZHOU Z, et al. Joint optimization of content caching and push in renewable energy powered small cells [C]// Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications. Kuala Lumpur: IEEE, 2016:1-6.
- [9] YANG C, CHEN Z, YAO Y, et al. Energy efficiency in wireless cooperative caching networks [C]// Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications. Sydney: IEEE, 2014:4975-4980.
- [10] POULARAKIS K, IOSIFIDIS G, TASSIULAS L. Joint caching and base station activation for green heterogeneous cellular networks [C]// Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications. London: IEEE, 2015:3364-3369.
- [11] LI R, WANG W, HUANG A, et al. Content caching at sleeping-enabled base stations in heterogeneous networks [C]// Proceedings of 2016 8th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Yangzhou: IEEE, 2016:1-5.
- [12] JIA Q, XIE R, HUANG T, et al. Energy-efficient cooperative coded caching for heterogeneous small cell networks [C]// Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Atlanta: IEEE, 2017:468-473.
- [13] KHAN B S, JANGSHER S, QURESHI H K, et al. Energy efficient caching in cooperative small cell network [C]// Proceedings of 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas: IEEE, 2019:1-6.
- [14] YIN F, ZENG M, ZHANG Z, et al. Coded caching for smart grid enabled HetNets with resource allocation and energy cooperation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69 (10): 12058-12071.
- [15] BRAHIMI M A, MERAZKA F. On reducing the encoding complexity of random linear network coding [C]// Proceedings of 2020 International Conference on Electrical Engineering. Istanbul: IEEE, 2020:1-5.
- [16] WU R Y, MA J M, TANG Z X, et al. A generic secure transmission scheme based on random linear network coding [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2022, 30 (2): 855-866.
- [17] FOROUZAN N, RABIEI A M, VEHKAPERÄM, et al. A distributed resource allocation scheme for self-backhauled full-duplex small cell networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70 (2): 1461-1473.
- [18] CUI Q, YU X, WANG Y, et al. The SIR meta distribution in Poisson cellular networks with base station cooperation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 66 (3): 1234-1249.

作者简介:

姚玉坤 女,1964 年生于重庆,1990 年获硕士学位,现为教授,主要研究方向为网络管理与应用、网络编码。

任丽丹 女,1996 年生于山西吕梁,2019 年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为软件定义网络、网络编码。

张本俊 男,1997 年生于安徽六安,2019 年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为飞行自组网路由协议。

周 杨 男,1997 年生于重庆,2019 年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为太赫兹双信道 MAC 协议。

何 亮 男,1995 年生于四川绵阳,2019 年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为低功耗有损网络路由协议。