



异构网络中两种边缘缓存策略的能耗分析

孙毅^{1,2}, 王鸿^{1,2}, 宋荣方^{1,2}

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学江苏省通信与网络技术工程研究中心, 江苏 南京 210003)

摘要: 研究了两层异构网络在两种不同缓存策略下的能量消耗。首先, 对支持缓存的异构网络能耗的各个组成部分分别进行了建模; 其次, 在一定中断概率条件下, 推导了异构网络能量消耗与小基站分布密度、用户负载及缓存容量之间的关系表达式。仿真结果表明, 边缘缓存技术的引入能够有效降低异构网络的能量消耗, 而对于不同的小基站分布密度和用户负载, 两种缓存策略的优劣性是不同的。两种缓存策略的总能耗和平均能耗分别随小基站分布密度和小基站用户负载的增加而降低。小基站的缓存容量也会对系统能量消耗产生不可忽视的影响。

关键词: 异构网络; 边缘缓存; 能量消耗; 齐次泊松点过程

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018035

Analysis of energy consumption of two kinds of edge caching strategies in heterogeneous networks

SUN Yi^{1,2}, WANG Hong^{1,2}, SONG Rongfang^{1,2}

1. College of Telecommunications & Information Engineering,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Jiangsu Engineering Research Center of Communication and Network Technology,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: The energy consumption of a two-tier heterogeneous network under two different caching strategies was analyzed. Firstly, the energy consumption of each network components was modelled, and the relationship between the energy consumption of heterogeneous networks and the distribution density of small cell, user load per cell and caching capacity was investigated. The simulation results show that edge caching can effectively reduce the energy consumption of heterogeneous networks and the performance of the two caching strategies are different under different density of small base station and user load. Specifically, the energy consumption of both the network and per user under the two caching strategies are reduced with the increase of the density of small base station and the user load per cell, respectively. Furthermore, the influence of small base station's caching capacity can not be neglected in total energy consumption.

Key words: heterogeneous network, edge caching, energy consumption, homogeneous Poisson point process

收稿日期: 2017-07-11; 修回日期: 2017-11-22

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20170910); 南京邮电大学江苏省通信与网络技术工程研究中心开放课题

Foundation Items: Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (No. BK20170910), Open Research Fund of Jiangsu Engineering Research Center of Communication and Network Technology, NJUPT



1 引言

思科预测, 2015—2020 年全球移动蜂窝数据流量将会以每年 53% 的增长率快速增长, 到 2020 年总的流量将会增长 10 倍, 平均每个月的数据流量达到 30.6 艾可萨字节 (ExaByte, EB), 且未来的 10 年中民众对视频流量的需求将会增加 500 倍^[1]。这些需求也促使了移动网络运营商重新设计现有的网络架构, 寻找更加高效和复杂的网络架构来实现蜂窝网络容量的爆炸式增长^[2]。

异构网络, 即在传统宏基站信号覆盖范围内叠加部署大量的小蜂窝^[3], 是一种新型的网络架构, 能够有效地提高蜂窝网络容量^[4]。此外, 由于服务距离变短, 异构网络也可以大幅提高小区边缘用户的服务质量 (quality of service, QoS)。但为每个小蜂窝部署一个高速的回传链路接入核心网是不切实际的, 因此, 有限速率的回传链路成为异构网络容量的提升瓶颈^[5]。研究表明, 蜂窝网络中大部分传输的移动数据是重复的^[6,7], 例如一些流行的节目视频。在蜂窝网络中, 通过回传链路向不同用户重复发送同样的内容严重浪费了网络资源, 也容易造成网络的阻塞和用户服务高时延。如果将用户需求的内容分散存储在小蜂窝基站中, 使内容离用户更近, 就可以有效地解决网络传输高峰时段高时延和高阻塞问题^[8], 这就是所谓的边缘缓存技术^[9]。基于以上因素, 异构网络与边缘缓存技术的结合可以有效缓解网络回传链路的负载, 降低异构网络的服务时延^[10]。

由于未来无线网络数据传输量的急速增长, 网络的能量消耗已经成为整体性能重要的指标。因此, 未来的无线网络需要更高的能量效率, 保持网络的能量消耗处在合理水平^[11,12]。不同的缓存策略, 即在网络边缘缓存不同的内容, 对蜂窝网络的能量消耗有着很大的影响。在现有的研究

中, 等概率随机缓存^[13]和流行度优先缓存^[14]是比较常用的缓存策略。参考文献[15]研究了一种基于文件流行度的分级缓存方法, 采用编码技术, 并对文件按流行度分级后按照一定的规则进行缓存来提升网络性能。参考文献[16]研究的单个蜂窝小区设置有多具备缓存能力的接入节点, 并且用户设备也具备缓存能力。用户在请求相关文件时, 依次检查用户设备本身和接入节点的缓存中是否存储所需要的内容, 如果没有, 则需要从远端宏基站获取。参考文献[16]中通过接入节点与用户设备协作缓存合适的用户内容来最小化小区的能量消耗。参考文献[5]研究了两种不同频谱利用方案下两层异构网络的能量效率及吞吐量, 其缓存策略为: 宏基站 (macro base station, MBS) 和小基站 (small base station, SBS) 的缓存单元中都存入最流行的视频文件。为了简洁, 下文将参考文献[5]中缓存策略记为缓存策略 1。

在此基础上, 本文提出了另一种不同的缓存策略: 在 SBS 存储空间中缓存最流行的视频文件, 而在 MBS 中缓存除 SBS 缓存内容外次流行的视频文件, MBS 和 SBS 缓存内容不重复, 并将其记为缓存策略 2。这两种方案区别在于缓存策略 1 将 MBS 和 SBS 分别考虑, 都存入最流行的内容, 以提高其承载用户需求的本地命中概率。而缓存策略 2 则是将 MBS 缓存看成 SBS 缓存的补充, 以提高异构网络缓存内容的多样性。基于网络节点随机分布特性, 本文推导了在两种缓存策略下异构网络能量消耗的分析表达式。数值计算和仿真比较了两层异构网络在不同 SBS 分布密度、用户负载及缓存容量条件下两种不同缓存策略的系统能量消耗特性, 并展现了不同场景下两种缓存策略的优劣性。

2 系统模型

2.1 异构网络模型

本文考虑一种两层结构的异构网络, 包含一

个 MBS 和多个 SBS，整体网络架构如图 1 所示。网络中，MBS 与 SBS 均配备一定的缓存空间，其中 MBS 可以缓存 N_m 个视频文件，SBS 可以缓存 N_s 个视频文件。不失一般性，假设所有视频文件的大小都相同，为 F bit，远端服务器文件库中共有 N_f 个视频文件。在该异构网络中，MBS 与 SBS 均可以直接与后端的核心网相连，即 MBS 与 SBS 都可以直接向远端服务器请求内容服务。网络采用封闭式接入（closed-access）策略，只有 SBS 授权用户才可以连接 SBS，非 SBS 授权用户不可以连接 SBS，即使该用户离 SBS 很近。但是 SBS 授权用户却可以与 MBS 建立连接。为了避免层间干扰，假设 MBS 与 SBS 所使用的频谱资源正交，这样宏蜂窝与小蜂窝之间不存在跨层干扰。MBS 的服务半径为 R_m ，其服务范围以内称为宏小区（macro cell），MBS 的发射功率为 P_m 。SBS 的服务半径为 R_s ，其服务范围以内称为小小区（small cell），SBS 发射功率为 P_s 。宏蜂窝与小蜂窝重叠覆盖，且 SBS 在宏小区中的分布服从密度为 λ_s 的齐次泊松点过程（HPPP）。本文中，所有网络节点的发射单元均为单天线，且半双工工作模式。此外，本文主要关注宏小区内的干扰问题，并没有考虑宏小区之间的干扰，这也有待于未来进一步研究。

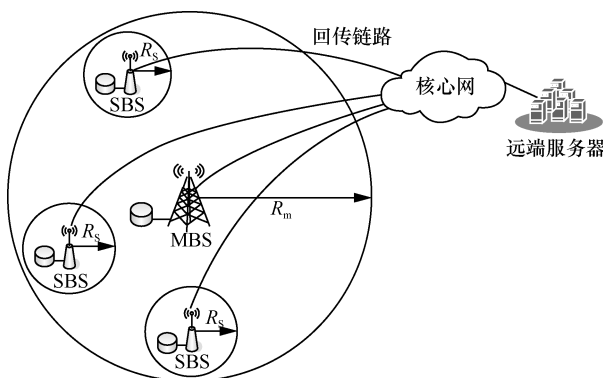


图 1 具有缓存能力的两层异构网络架构

2.2 信道模型

首先考虑路径损耗模型，包括路径损耗与小

尺度衰落。在这种模型中，信号功率随 r 以 $r^{-\alpha}$ 的速度衰减，其中， r 为传输距离， α 为路径损耗指数，取值范围一般为 $2 \sim 4$ ^[17]。本文假设宏小区和小小区均具有相同的路径损耗指数。此外，还要考虑小尺度衰落模型。因此，用户接收到基站 x 的信号功率为 $P_x |d|^{-\alpha} g_x$ ，其中， g_x 为基站 x 到用户之间的小尺度衰落， P_x 为基站的发射功率， d 为用户与基站 x 之间的距离。各链路的小尺度衰落独立同分布，均服从单位均值的指数分布。背景噪声为加性高斯白噪声，功率为 σ^2 。

2.3 缓存模型

在具备边缘缓存能力的异构网络中，可以将一些最流行的视频文件复制存储到基站的存储单元中。设文件的流行程度服从 Zipf 分布^[18]，即用户请求最流行的第 f 个文件的概率为：

$$P_{N_f}(f) = \frac{f^{-v}}{\sum_{n=1}^{N_f} n^{-v}} \quad (1)$$

其中， v 是这种分布的成形参数，一般取值为 $0.5 \sim 1.5$ 。假设所有用户对文件库中文件请求概率服从相同的分布。

本文选择将最流行的内容缓存到基站当中，并考虑以下两种不同的缓存策略。

- 缓存策略 1：在 SBS 中缓存最流行的 N_s 个文件，在 MBS 中缓存最流行的 N_m 个文件。
- 缓存策略 2：在 SBS 中缓存最流行的 N_s 个文件，在 MBS 中缓存最流行的第 N_s+1 到 N_s+N_m 个文件。

由于采用封闭式接入策略，MBS 授权用户不可以与 SBS 建立连接，所以 MBS 授权用户只能利用 MBS 的缓存内容。而 SBS 授权用户可以与 MBS 和 SBS 建立连接，当 SBS 授权用户所请求的内容在 SBS 缓存中时，SBS 直接从缓存中获取文件，并通过 SBS 天线直接发送给用户，当 SBS 授权用户请求的文件在 MBS 缓存中时，MBS 直接从 MBS 缓存中获取文件并发送给 SBS



授权用户。

当异构网络采用缓存策略1时,令 $P = \sum_{n=1}^{N_f} n^{-\nu}$,

则 MBS 授权用户请求文件命中 MBS 缓存内容的概率为 $P_{\text{hit}}^m = \sum_{f=1}^{N_m} f^{-\nu} / P$, SBS 授权用户请求文件命

中 SBS 缓存的概率为 $P_{\text{hits}}^s = \sum_{f=1}^{N_s} f^{-\nu} / P$, SBS 授权

用户请求文件在 MBS 缓存中,而不在 SBS 缓存中的概率为 $P_{\text{hitm}}^s = \sum_{f=N_s+1}^{N_m} f^{-\nu} / P$ 。

当异构网络采用缓存策略2时, MBS 授权用户请求文件命中 MBS 缓存内容的概率为 $\hat{P}_{\text{hit}}^m = \sum_{f=N_s+1}^{N_s+N_m} f^{-\nu} / P$, SBS 授权用户请求文件命中 SBS 缓存

的概率为 $\hat{P}_{\text{hit}}^s = P_{\text{hits}}^s = \sum_{f=1}^{N_s} f^{-\nu} / P$, SBS 授权用户请求

文件命中 MBS 缓存的概率为 $\hat{P}_{\text{hitm}}^s = \sum_{f=N_s+1}^{N_s+N_m} f^{-\nu} / P$ 。

2.4 网络能量消耗模型

本文主要研究具备缓存能力的异构网络在采用不同的缓存策略时的总体网络耗能情况。因此,需要考虑以下3个方面的能量消耗。

(1) 基站的能量消耗

基站能量消耗包括基站的静态能量消耗和发送能量消耗。由于本文只考虑一个宏蜂窝情况,所以 MBS 的静态工作能量消耗对于整体网络的能量消耗性能没有影响,而 SBS 的静态运行成本可以做到非常低,所以本文不考虑 MBS 和 SBS 的静态工作时的能量消耗,只考虑基站发送数据时所产生的能量消耗。设 MBS 发送 1 bit 数据的能量消耗为 e_m (J/bit), SBS 发送 1 bit 数据的能量消耗为 e_s (J/bit)。

(2) 缓存存储能耗

数据缓存时也会产生能量消耗,且随缓存内容增多而增大。假设 MBS 与 SBS 的缓存成本相同,设基站缓存成本为 e_c (J/bit)。则一个缓存周

期内网络的总体缓存能量消耗为:

$$E_c = (N_m F + S_n N_s F) e_c \quad (2)$$

其中, S_n 表示小基站数量。

(3) 回传链路数据传输的能量消耗

当用户所请求的文件不在本地基站时,就需要到远端服务器中获取所需要的文件,由此产生了回传链路传输的能量损耗。本文假设 MBS 与 SBS 获取远端服务器内容所产生的能耗相同,均为 e_{ba} (J/bit)。

3 性能分析

本文对整体网络的中断概率及能量消耗进行分析。首先,分别推导了 MBS 用户与 SBS 用户的中断概率。其次,根据推导的结果,计算出在一定中断概率条件下系统的能量消耗。

3.1 中断概率

只考虑下行链路中断概率。由于 MBS 与 SBS 采用相互正交的频谱资源,这样避免了不同类型基站发出信号之间的干扰,即 SBS 对 MBS 不会产生干扰。因此,宏小区边缘用户接收信号的信噪比为:

$$\gamma_m = \frac{P_m R_m^{-\alpha} g_m}{\sigma^2} \quad (3)$$

其中, g_m 表示信道增益,设接收端的接收信噪比门限为 Γ_m ,则宏小区用户的中断概率为:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^m &= \Pr \left(\frac{P_m R_m^{-\alpha} g_m}{\sigma^2} < \Gamma_m \right) \\ &= 1 - \exp \left(-\frac{\Gamma_m \sigma^2 R_m^\alpha}{P_m} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

由于不同小小区中共用一个频谱资源块, SBS 之间会互相产生干扰,所以小小区边缘用户的接收信噪比为:

$$\gamma_s = \frac{P_s R_s^{-\alpha} g_s}{\sigma^2 + I_{ss}} \quad (5)$$

其中, g_s 表示信道增益, I_{ss} 表示小小区间干扰。设接收端的接收信噪比门限为 Γ_s ,则小小区边缘

用户的中断概率为^[5]:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}}^s &= \Pr\left(\frac{P_s R_s^{-\alpha} g_s}{\sigma^2 + I_{ss}} < \Gamma_s\right) \\
 &= 1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_s R_s^\alpha \sigma^2}{P_s}\right) E_{I_{ss}}\left[\exp\left(-\frac{\Gamma_s R_s^\alpha I_{ss}}{P_s}\right)\right] \\
 &= 1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_s R_s^\alpha \sigma^2}{P_s} - \frac{2\pi^2 \lambda_s (\Gamma_s)^\alpha R_s^2}{\alpha \sin\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)}\right)
 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, 最后一个等式是由 I_{ss} 的拉普拉斯变换得来的, E 表示数学期望。

由于 MBS 与 SBS 用户均存在中断可能, 为了满足一定的发送成功率, 在用户产生中断后, 系统应该选择立即重发, 直到接收端接收成功或者重发次数达到重发上限。文件发送时采用分组发送, 一个文件大小为 F bit, 假设被均分为 N_B 个数据分组, 每个数据分组大小为 $B=F/N_B$ bit。设 MBS 重发次数上限为 K_m , SBS 重发次数上限为 K_s , 为满足不同小区用户的服务公平性, 将用户的分组丢失率限制在可接受的范围以内, 重发次数应满足:

$$\begin{aligned}
 1 - P_{\text{out}}^m + P_{\text{out}}^m (1 - P_{\text{out}}^m) + \dots + (P_{\text{out}}^m)^{K_m-1} (1 - P_{\text{out}}^m) &\geq P_{\text{th}} \\
 1 - P_{\text{out}}^s + P_{\text{out}}^s (1 - P_{\text{out}}^s) + \dots + (P_{\text{out}}^s)^{K_s-1} (1 - P_{\text{out}}^s) &\geq P_{\text{th}}
 \end{aligned} \quad (7)$$

其中, P_{th} 表示 SBS 与 MBS 系统预先规定的发送成功率。

采用上述的发送策略是提高了网络数据传输的可靠性, 从整体网络的角度来看, 网络的数据发送成本也提高了。在该发送策略下, MBS 向一个用户发送一个视频分组所需要发送的平均比特数为:

$$\begin{aligned}
 M &= B(1 - P_{\text{out}}^m) + 2BP_{\text{out}}^m(1 - P_{\text{out}}^m) + \dots \\
 &\quad + (K_m - 1)B(P_{\text{out}}^m)^{K_m-2}(1 - P_{\text{out}}^m) + K_m B(P_{\text{out}}^m)^{K_m-1}
 \end{aligned} \quad (8)$$

同理, SBS 向用户发送一个数据分组所需要发送的平均比特数为:

$$\begin{aligned}
 S &= B(1 - P_{\text{out}}^s) + 2BP_{\text{out}}^s(1 - P_{\text{out}}^s) + \dots \\
 &\quad + (K_s - 1)B(P_{\text{out}}^s)^{K_s-2}(1 - P_{\text{out}}^s) + K_s B(P_{\text{out}}^s)^{K_s-1}
 \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 服务单个用户的能量消耗

由于网络采用封闭式接入策略, 需要将小区中的所有用户分为两类, 一类是 MBS 授权用户, 另一类是 SBS 授权用户。假设每个用户每次只请求一个文件, 首先考虑基站服务单个用户请求单个文件时所需要消耗的能量。

如果 MBS 授权用户请求的文件在 MBS 缓存中, MBS 可以直接从 MBS 缓存中获取用户请求文件并直接发送给 MBS 授权用户。如果 MBS 授权用户请求的文件不在 MBS 缓存中, 那么 MBS 需要从远端服务器经过回传链路获得用户所要求的文件, 并通过 MBS 天线发送给 MBS 用户。所以, 网络为一个 MBS 授权用户提供一文件传输服务时的平均能量消耗为:

$$e^m = N_B M (P_{\text{hit}}^m e_m + (1 - P_{\text{hit}}^m)(e_m + e_{\text{ba}})) \quad (10)$$

相比较而言, 网络服务 SBS 授权的用户能量消耗比较复杂一点。由于 SBS 授权的用户既可以与 SBS 建立连接, 也可以与 MBS 建立连接, 所以在评估小基站服务单个用户的能量消耗时需要考虑以下 3 种情况。

(1) SBS 缓存中有 SBS 授权用户请求的文件时, 服务这个用户所需要的能量消耗为 $e^{s1} = N_B S e_s$ 。

(2) SBS 缓存中没有 SBS 授权用户请求的文件, 而 MBS 缓存文件中有 SBS 授权用户请求的文件时, 服务这个用户所需要的能量消耗为 $e^{s2} = N_B M e_m$ 。

(3) SBS 与 MBS 缓存中均没有 SBS 用户所



请求的文件时 SBS 授权用户仍由 SBS 提供服务, 服务这个用户所需要的能量消耗为 $e^{s3} = N_b S(e_s + e_{ba})$ 。

由于以上 3 种情况是完备事件组, 依据条件概率公式, 网络为一个 SBS 授权用户提供文件传输服务的平均耗能为:

$$e^s = P_a e^{s1} + P_b e^{s2} + P_c e^{s3} \quad (11)$$

其中, P_a 、 P_b 、 P_c 分别表示情况 (1) (2) (3) 发生的概率。

对于第一种缓存策略, MBS 与 SBS 的缓存内容有重复的部分, $P_a = P_{hits}^s$, $P_b = P_{hitm}^s$, $P_c = 1 - P_{hit}^m$ 。

对于第二种缓存策略, 由于 MBS 与 SBS 缓存内容完全不同, 所以 $P_a = \hat{P}_{hits}^s$, $P_b = \hat{P}_{hitm}^s$, $P_c = 1 - \hat{P}_{hits}^s - \hat{P}_{hitm}^s$ 。

3.3 系统的总体能耗

假设在系统中一个缓存更新周期(例如: 24 h)内, 每个用户在只请求一个文件。 U_m 表示 MBS 授权用户数, U_s 表示一个 SBS 授权用户数, 也即 SBS 的用户负载。由于 SBS 分布服从齐次泊松点过程, 则一个宏小区范围内 SBS 数量期望为 $S_n = \lceil \pi R_m^2 \lambda_s \rceil$, 其中 $\lceil A \rceil$ 表示对 A 向下取整。则系统在一个缓存更新周期内的平均总体能量消耗为:

$$E_{all} = U_m e^m + S_n U_s e^s + (N_m F + S_n N_s F) e_c \quad (12)$$

4 数值结果

下面对图 1 所展示的具有缓存能力的异构网络的能量消耗进行仿真并分析仿真结果。本文会讨论 SBS 分布密度对中断概率的影响, 并对两种缓存策略在不同 SBS 分布密度、用户负载及缓存容量情况下的能量消耗进行对比, 探索这两种不同缓存策略的最佳应用场景。为了简洁, 表 1 列出了所有数值计算所需要的参数及取值。

表 1 计算所需参数与取值

参数	物理意义	取值
R_m	MBS 服务半径/m	300
R_s	SBS 服务半径/m	15
N_f	服务器中视频文件总数	20 000
N_m	MBS 缓存大小	5 000
N_s	SBS 缓存大小	1 000
P_m	MBS 发送功率/W	20
P_s	SBS 发送功率/W	0.1
N_a	加性高斯白噪声功率/dBm	110
Γ_s	SBS 中断 SINR 阈值/dB	0
Γ_m	MBS 中断 SINR 阈值/dB	0
ν	文件流行分布成形系数	0.8
N_B	一个视频文件所包含的数据分组数	1 000
F	一个视频文件大小/bit	10^7
α	衰减指数	4
e_m	MBS 发送 1 bit 能耗/(J·bit ⁻¹)	10^{-8}
e_s	SBS 发送 1 bit 能耗/(J·bit ⁻¹)	5×10^{-10}
e_{ba}	回传链路传输 1 bit 的能耗/(J·bit ⁻¹)	10^{-8}
e_c	缓存器缓存 1 bit 能耗/(J·bit ⁻¹)	10^{-10}
U	异构网络服务的总用户数	10 000
U_s	SBS 用户负载	140

图 2 展示了 MBS 与 SBS 向用户发送数据时的中断概率。其中 P_{mout} 表示 MBS 的中断概率, P_{sout} 表示 SBS 的中断概率。可以发现, SBS 分布密度 λ_s 的变化并不会改变 MBS 的中断概率, 但 SBS 的中断概率会随着 SBS 分布密度增加而增大。原因是 MBS 与 SBS 使用的是相互正交的频谱资源, 所以 SBS 分布密度增加不会使 MBS 用户受到的干扰增加, 接收端信噪比不变, 因此 MBS 的中断概率保持不变。而由于不同的 SBS 采用相同的频谱资源块, 所以 SBS 分布密度增加则会使 SBS 之间的干扰增加, 接收端信干噪比下降, 所以 SBS 的中断概率会随 λ_s 增大而增大。由式(9)可知, SBS 中断概率的上升也会导致其向用户

发送一个数据分组时,所需要发送的平均比特数上升。

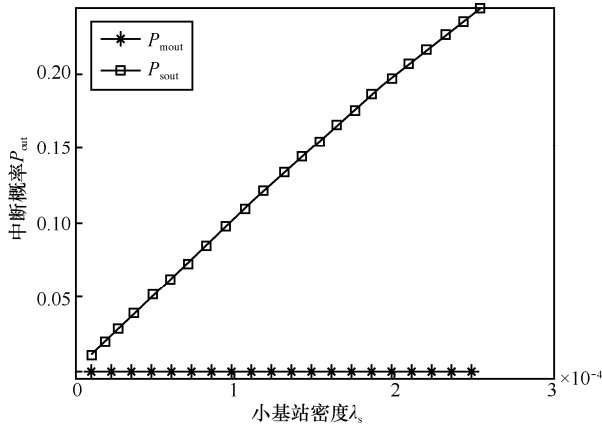


图2 MBS与SBS向用户发送数据时的中断概率

图3展示了有缓存和无缓存情况下两层异构网络的能量消耗,其中有缓存时缓存策略采用随机缓存策略。可以发现,在所提出的异构网络缓存策略中,缓存的引入可以有效降低系统的能量消耗。且系统能量消耗随着SBS分布密度的增大而减少。这是由于在异构网中引入缓存系统,当用户请求文件存在于基站缓存中时,基站可以直接向用户发送内容,而不需要通过回传链路向远端服务器请求数据传输,从而节省了回传链路的能量消耗。当然,在一定密度范围以内,随着SBS密度越大,用户获得SBS服务的可能性也就越大,节省的能量消耗也就越多。

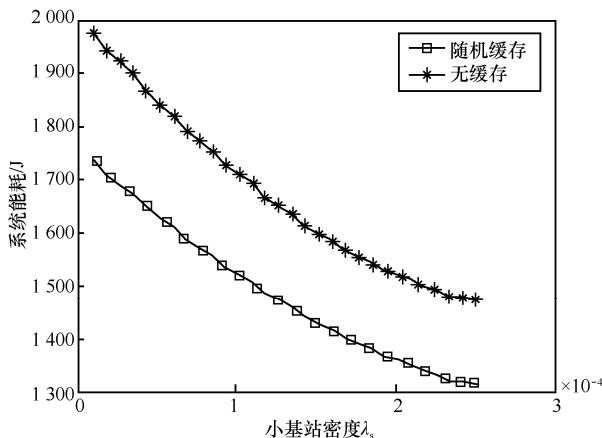


图3 无缓存和采用随机缓存情况下异构网络的能量消耗

图4展示了两种不同缓存策略的系统能量消耗,并将随机缓存作为对比。数值计算结果表明,在不同的SBS分布密度条件下,前文所提的两种缓存策略的能量消耗性能均优于随机缓存。这是由于相比于随机缓存,将一些在用户中流行度比较高的视频文件缓存到基站中可以提高用户请求文件命中基站缓存内容的概率,使基站缓存得到更加充分的利用,进而减少了回传链路传输,减少系统总体能量消耗。在一定分布密度范围内($\lambda_s=1 \times 10^{-5} \sim 2.5 \times 10^{-4}$),两种缓存策略的能量消耗均随着SBS密度增加而下降。这是由于随着SBS分布密度的增大,宏小区中SBS的数量变多,从而提高系统中用户获得SBS服务的概率,而SBS的发送相同数据的能量消耗要比MBS小得多,所以随着 λ_s 变大,系统的总体耗能减少。在SBS分布密度比较低时,缓存策略1具有更好的能量消耗性能。而当密度继续上升到一定程度时,缓存策略2的能耗性能开始慢慢好于缓存策略1。原因在于,当SBS分布密度较小时,SBS服务的用户相对于系统的总用户来讲还很少,因此系统中大部分用户只能接入MBS来请求数据服务,这时选择在SBS和MBS缓存中均存储最流行的视频文件,虽然SBS与MBS的缓存内容有重复,但这种策略可以最大程度地减少这些数量众多的MBS用户回传链路传输的要求,因此此时缓存策略1更具优势。而随着SBS数量的增加,网络中可接入SBS的用户越来越多,MBS服务的用户数越来越少,此时,将MBS的缓存作为SBS缓存的补充,存储更多SBS缓存中没有的文件,能够更好地服务SBS授权用户,虽然MBS用户请求文件命中MBS缓存的概率变低了,但从整体网络的角度看,缓存策略2更能减少回传链路的传输数据量,因此能量消耗也就更低。

此外,单个SBS的用户负载也会对系统能耗产生影响。将参数表中的SBS用户负载视为变量,图5展现了SBS分布密度为 6×10^{-4} 时异构网络中

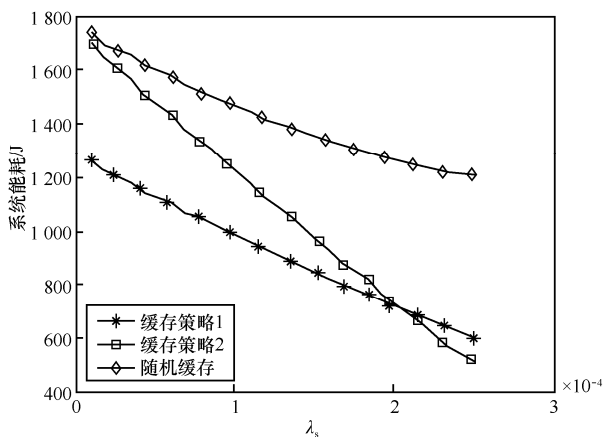
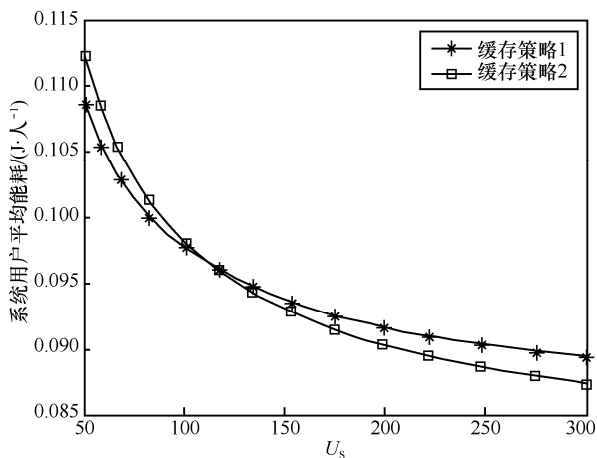


图4 缓存策略1、缓存策略2和随机缓存的能量消耗

所有用户的平均能耗。其中, MBS 用户在宏小区内服从均匀分布, 分布密度为 5×10^{-3} 。仿真结果表明, 随着 SBS 用户负载逐渐增加, 网络中所有用户的平均能耗随之降低。随着 SBS 用户负载逐渐增大, 缓存策略 2 的平均能耗将低于缓存策略 1 的平均能耗。显然, 随着 SBS 用户负载变大, 网络中 SBS 服务的用户数越来越多, 而将 MBS 缓存看作 SBS 缓存的补充能够极大地减少 SBS 用户能耗, 从而降低系统的平均能耗, 使缓存策略 2 平均能耗低于缓存策略 1。当然, SBS 用户负载的提高涉及更多的问题, 在现实中的实现可能并不容易。由仿真结果可见, 缓存策略 2 更适合于 SBS 密度较高、用户负载较大的场景下, 缓存策略 1 与之相反。

图5 SBS 用户负载对系统用户平均能耗的影响 ($\lambda_s=6 \times 10^{-4}$)

除了 SBS 的分布密度和用户负载会对异构网络能耗产生影响外, SBS 的缓存容量也会影响网络的整体能耗。图 6 展示了 SBS 分布密度为 2×10^{-4} 且单个 SBS 用户负载一定时, SBS 缓存能力对系统的整体能耗的影响。图 6 中, 当 SBS 的缓存容量比较小时, 随着 SBS 缓存容量的增加, 两种缓存策略的系统整体能耗快速降低。然而, 随着缓存容量的进一步增加, 系统能耗减少的速率变慢。当缓存容量大于一定值时 (对于缓存策略 1, N_s 约为 2 400, 对于缓存策略 2, N_s 约为 2 700), 系统的整体能耗将会转为增加, 并且缓存策略 2 的能耗开始慢慢优于缓存策略 1。这是由于当 SBS 的缓存容量足够大时, 其带来的巨大缓存能耗也是不容忽视的, 且相比于缓存策略 1, 缓存策略 2 能够更有效地降低 SBS 用户能耗, 当 SBS 用户比较多时, 增加 SBS 缓存容量可以进一步降低 SBS 用户能耗, 使缓存策略 2 能耗性能优于缓存策略 1。可见, 对于本文中的两种缓存策略, SBS 的缓存能力并不是越大越好, 而且, 一定的 SBS 分布密度条件下, 当 SBS 缓存容量比较大时, 缓存策略 2 比缓存策略 1 具有更好的能耗性能。

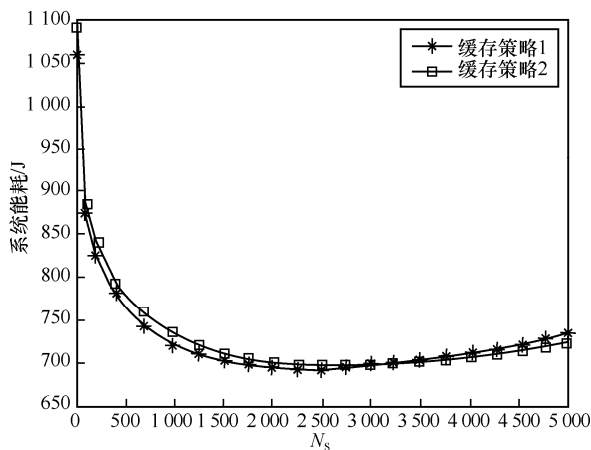


图6 SBS 缓存容量对系统能耗的影响

由上面的仿真结果可以发现, SBS 的分布密度、用户负载及缓存容量均会对系统能耗产生影响。缓存策略 1 适合用于 SBS 分布密度较低、SBS

用户负载较小的情形。这种情形下 SBS 用户数相对于 MBS 用户数还比较少, 而 MBS 中缓存最流行的视频文件能够很大程度上降低这些 MBS 用户耗能, 从而使此异构网络的整体或者人均能耗性能优于缓存策略 2。缓存策略 2 适用于 SBS 分布密度较高、SBS 用户负载较大的情形。这种情形下, SBS 用户能耗已经成为系统能耗的主要部分, 将 MBS 缓存作为 SBS 缓存的补充, 有效地降低了 SBS 用户能耗, 进而降低网络的整体能耗。进而, 可以对缓存机制提出建议: 对于具备缓存能力的异构网络, 不同类型的基站应根据异构网络中不同类型基站各自服务的用户数量来决定缓存相同或相异的内容。对于 SBS 缓存容量的选择, 并不是越大越好。在一个宏蜂窝中, SBS 缓存容量越大, 虽然 SBS 用户请求文件命中缓存的几率越高, 但缓存成本也随之变高。因此, 需要为 SBS 选择一个合适的缓存容量, 从而进一步降低系统的整体能耗。

5 结束语

本文对一个两层结构的异构网络的能量消耗进行建模和分析, 网络中所有基站均具备缓存能力。通过分析不同 SBS 分布密度、用户负载和缓存容量时两种不同缓存策略下网络的能量消耗性能, 可以发现, 异构网络总用户数一定时, 这两种不同的缓存策略适合不同的 SBS 分布密度条件下的异构网络。当 SBS 密度很低时, 缓存策略 1 的能量消耗比较低; 当 SBS 密度比较高时, 缓存策略 2 在能量消耗上更具有优势。这对具有缓存能力的异构网络中 SBS 的部署具有重要的指导意义。与此同时, 努力提高 SBS 的用户负载, 也可以有效地降低用户的平均能耗。此外, 从能耗角度来讲, SBS 的缓存容量并不是越大越好, 缓存容量的增大也会导致网络的缓存成本的上升。因此, 要根据网络的实际情况选择合适的缓存容量, 从而实现系统耗能最低。

参考文献:

- [1] Cisco. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2015-2020 white paper[R]. 2016.
- [2] 张建敏, 谢伟良, 杨峰义, 等. 移动边缘计算技术及其本地分流方案[J]. 电信科学, 2016, 32(7): 132-139.
ZHANG J M, XIE W L, YANG F Y, et al. Mobile edge computing and application in traffic offloading[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(7): 132-139.
- [3] 韦炜, 周峰, 陆蓓隽. 基于分布式微微基站的室内覆盖创新解决方案及应用推广[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 144-149.
WEI W, ZHOU F, LU B J, et al. Innovation in-building coverage solutions based on indoor distributed pico base stations and their application and promotion[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 144-149.
- [4] HU L, SANCHEZ L, MATERNI A M, et al. Heterogeneous LTE-advanced network expansion for 1000× capacity[C]//IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Jun 2-5, 2013, Dresden, Germany. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [5] YAN Z, CHEN S, OU Y, et al. Energy efficiency analysis of cache-enabled two-tier HetNets under different spectrum deployment strategies[J]. IEEE Access, 2017(5): 6791-6800.
- [6] WANG X, CHEN M, TALEB T, et al. Cache in the air: exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 131-139.
- [7] ZHANG X, YI Z, YAN Z, et al. Social computing for mobile big data[J]. IEEE Computer, 2016, 49(9): 86-90.
- [8] BORST S, GUPTA V, WALID A. Distributed caching algorithms for content distribution networks[C]//IEEE INFOCOM, Mar 15-19, 2010, San Diego, USA. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-9.
- [9] 尹博南, 艾元, 彭木根. 雾无线接入网: 架构、原理和挑战[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 20-27.
YIN B N, AI Y, PENG M G. Fog computing based radio access networks: architecture, principles and challenges[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 20-27.
- [10] GOLREZAEI, SHANMUGAM K, DIMAKIA G, et al. FemtoCaching: Wireless video content delivery through distributed caching helpers[C]//IEEE INFOCOM, Mar 25-30, 2012, Orlando, USA. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1107-1115.
- [11] LLORCA J, TULINO A M, VARVELLO M, et al. Energy efficient dynamic content distribution[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(12): 2826-2836.
- [12] ZAPPONE A, SANGUINETTI L, BACCI G, et al. A framework for energy-efficient design of 5G technologies[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC), Jun 8-12, 2015, London, UK. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1845-1850.
- [13] TAMOOR-UL-HASSAN S, BENNIS M, NARDELLI P H J, et al. Modeling and analysis of content caching in wireless small cell networks[C]//2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Aug 25-28, 2015, Brussels,



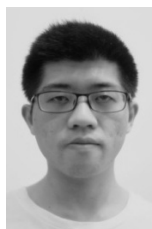
Belgium. Piscataway: IEEE Press, 2016: 56-60.

- [14] WANG L, BAO Y, LIU X, et al. On the design of relay caching in cellular networks for energy efficiency[C]//2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Apr 10-15, 2011, Shanghai, China. Piscataway: IEEE Press, 2011: 259-264.
- [15] HACHEM J, KARAMCHANDANI N, DIGGAVI S N. Coded caching for multi-level popularity and access[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2017, 63(5): 3108-3141.
- [16] YANG C, CHEN Z, YAO Y, et al. Energy efficiency in wireless cooperative caching networks[C]//2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), Jun 10-14, 2014, Sydney, NSW, Australia. Piscataway: IEEE Press, 2014: 4975-4980.
- [17] RAPPAPORT T S. Wireless communication principles and practice[M]. Englewood: Prentice-Hall, 2002.
- [18] BRESLAU L, CAO P, FAN L, et al. Web caching and Zipf-like distributions: evidence and implications[C]// IEEE Joint Conf Comput Commun Soc (INFOCOM), Mar 21-25, 1999, New York, USA. Piscataway: IEEE Press, 1999: 126-134.

[作者简介]



孙毅（1992-），男，南京邮电大学硕士生，主要研究方向为异构网络与边缘缓存技术。



王鸿（1989-），男，博士，南京邮电大学通信与信息工程学院讲师，主要研究方向为蜂窝网络密集化、非正交波形、非正交接入、干扰对齐等。

宋荣方（1964-），男，南京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为宽带无线通信理论与技术。