

移动 Ad Hoc 网络下协作缓存策略研究

蒋 泉,潘沛生

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘 要:缓存是提高数据访问效率的一种常用技术。协作缓存技术,在多节点间实现缓存数据的共享,发掘缓存技术的潜能。移动 Ad Hoc 网络中缓存的基本问题是:缓存放置、缓存发现以及缓存替换。根据两种基本缓存的优点,结合 Ad Hoc 网络环境的动态变化,提出一种效率更高的 Adaptive 缓存放置策略。同时由于 Ad Hoc 网络资源有限性,文中对现有的 COOP 缓存发现策略引入了核心节点概念,提出一种改进的 E-COOP 策略。仿真结果表明,相比其他现有的缓存方案,Adaptive 缓存放置策略配合改进的 E-COOP 缓存发现策略,在查询延迟、能量损耗、数据吞吐量等方面具有显著优势。

关键词:协作缓存;Ad Hoc 网络;Adaptive 缓存放置;核心节点

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2018)06-0174-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2018.06.039

Research on Cooperative Caching Strategy in Mobile Ad Hoc Networks

JIANG Quan,PAN Pei-sheng

(School of Telecommunication & Information Engineering,Nanjing University of Posts and
Telecommunications,Nanjing 210003,China)

Abstract:Caching is a common technique to improve the performance of data access. Cooperative caching, which allows the sharing and coordination of cached data among multiple nodes, can further explore the potential of the caching techniques. The basic issues of caching in mobile Ad Hoc networks are about cache placement, cache discovery and cache replacement. For this, we propose an efficient adaptive cache placement strategy based on the advantages of two basic caches and the dynamic changes of Ad Hoc networks environment. At the same time, due to the limited resources of Ad Hoc networks, the existing COOP cache discovery strategy is introduced into the core node concept, and an improved E-COOP strategy is proposed. Then, the adaptive cache placement is combined with the improved E-COOP cache discovery scheme in a caching system compared to the existing caching scheme. Simulation shows that the proposed schemes can significantly reduce the query delay, energy consumption and improve network throughput.

Key words:cooperative caching;Ad Hoc networks;adaptive caching placement;core nodes

0 引 言

移动自组织网络^[1](mobile Ad Hoc networks, MANET),是一种与传统的有基站网络相对的无中心移动网络,MANET 网络可以应用在无法架设基础设施或者基础设施昂贵的环境中,因此,开展 MANET 的研究具有很高的科学价值,同时也能够产生较好的社会效益。目前,国内外对于 MANET 的研究重心大多放在动态路由协议的开发上。例如, Maheswary A 等^[2]提出在路由协议中添加加密信件来确保 MANET 路由协议的安全;Dodke S 等^[3]研究了无线自组网按需平面向量协议(Ad Hoc on-demand distance vector

routing, AODV)^[4]和动态源路由协议(dynamic source routing, DSR)^[5],在不同节点密度的条件下,对比了两者在端到端延迟、能耗以及数据包传递率等性能上的优劣。

作为 MANET 网络的最终目的,保持移动节点对数据的访问能力,保证网络中数据的可用性,依然是研究 MANET 网络的重要内容。协作缓存^[6],允许在多个节点间共享和协调缓存数据,以提高 Web 性能。由于无线连接的成本不同于有线连接,所以决定在哪缓存数据,如何获得缓存数据将是研究 MANET 缓存的重要部分。

收稿日期:2017-06-20

修回日期:2017-10-24

网络出版时间:2018-02-24

基金项目:江苏省高校自然科学基金基础研究计划重大项目(08KJD510001)

作者简介:蒋 泉(1992-),男,硕士研究生,研究方向为无线通信的缓存;潘沛生,教授,硕导,研究方向为无线异构系统的干扰管理和资源管理、MIMO 下链路通信系统及有限反馈。

网络出版地址: <http://cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180224.1519.056.html>

文中对支持 MANET 数据访问的协作缓存放置策略及发现策略进行设计和评估。提出了两种基本的缓存放置方案:Data-Cache、Path-Cache,然后根据两种基本缓存方案提出一种集基本方案优势于一身的 Adaptive 缓存放置方案;同时,也将对已有的 COOP 缓存策略^[7]进行改进优化,引入核心节点的概念,以降低缓存发现的响应延迟和能量损耗,提高网络吞吐量。

1 Adaptive 缓存策略

1.1 系统模型

图 1 显示了自组织网络的一部分,其中的一些移动节点具有类似于卫星网络中连接其他网络的外部接口。这些接口可用作网关,允许其他节点与外部网络进行通信。数据中心可以驻留在 MANET 内部或者外部,移动节点可以从数据中心读取数据。

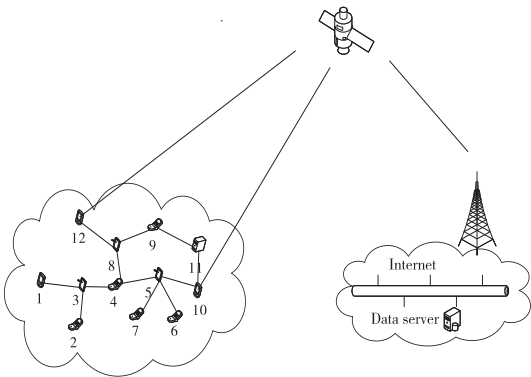


图 1 MANET 网络系统模型

在 MANET 网络中,当节点发出一个数据请求时,一般会通过多跳的方式传到数据中心,由数据中心发回所需要的数据包。AODV、目标序列距离路由矢量算法(destination sequenced distance vector, DSDV)^[8]是适用于 MANET 网络的两种底层路由协议,它们可以在路由层寻找到达目的节点的最佳路径,尽可能减少带宽损耗和访问延迟,但是本身也会存在一些限制。为此,提出两种基本的协作缓存方案:Data-Cache 和 Path-Cache。

1.2 基本协作缓存

Data-Cache 是指节点缓存流经该节点中流行度较高的数据项。根据图 1,假设 N_6 和 N_7 先后向数据中心请求了数据项 d_i ,在响应过程中都经过了节点 N_5 , N_5 判断此数据项当前的流行度较高,于是缓存在本地。此后如果 N_3 、 N_4 或者 N_5 有同样的请求,就可以直接由 N_5 来服务。在数据项到达时,节点会首先判断数据项的流行度,再决定是否缓存,但是无论在何种情况下,请求节点本身都是会缓存所请求的数据项。

Path-Cache 的思想同样可以用图 1 的模型来说明。节点 N_1 向数据中心请求了数据项 d_i ,在数据源

发回数据包时经过节点 N_3 ,如果 N_3 缓存了节点 N_1 的路径,此后若 N_2 请求 d_i 时, N_3 可以计算出其距离数据中心有三跳而距离 N_1 只有短短的一跳(AODV 和 DSR 等都具有计算源节点到目的节点跳数的功能),这样 N_3 就会响应 N_1 ,从而节省了带宽和延迟。当网络拓扑相对稳定,数据更新率较低时,假设节点与请求节点的距离用 $H(i,j)$ 表示,与数据中心的距离用 $H(i,C)$ 表示, $H(i,j)$ 应该小于 $H(i,C)$,表示如下:

$$H_{\text{save}} = H(i,C) - H(i,j)$$
 (1)

其中, H_{save} 为减少的跳数,系统的阈值称为 T_H , H_{save} 在大于 T_H 时可以选择 Path-Cache 方案。

每个从数据中心发出的数据项都会被分配一个生存时间值^[9](time to live, TTL),并且使用 TTL 方案来保持客户端缓存和数据中心缓存的一致性。只要缓存时间未超过 TTL 值,数据项就被认为是有效的。

1.3 Adaptive 缓存算法

Data-Cache 和 Path-Cache 都只能适用于一种特殊的 MANET 环境,当面临它们不擅长的环境时,基本方案不仅发挥不了它们的优势,有时更是适得其反,增加了网络的拥塞,降低网络的吞吐量,增加了查询延迟和能量损耗。

为此,在结合两种基本缓存方案优势的基础上,提出了一种 Adaptive 缓存放置策略。该策略的思想为,当数据项到达节点时,该节点可以动态地依据某些标准来采用 Data-Cache 方案或者 Path-Cache 方案,或者是不进行缓存而转发。这些标准应该包括数据项的大小 S_i ,TTL 持续时间 TTL_i 以及 H_{save} 。系统会分配给每个节点有关这三个标准的阈值^[10],分别为: T_s , T_{TTL} , T_H 。

由此,提出了 Adaptive 缓存放置算法,见图 2。

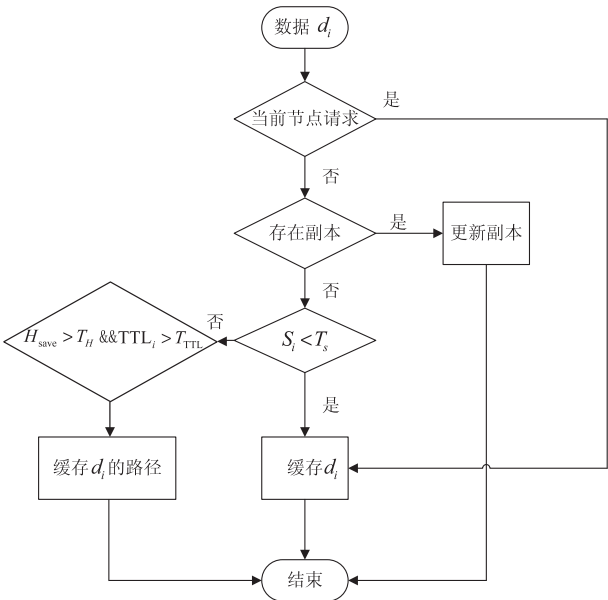


图 2 Adaptive 算法流程

2 E-COOP 缓存策略

在缓存系统中,有一种常用的缓存发现策略是 Hop-by-Hop 策略,当数据请求在被转发至数据中心的过程中,转发节点先检查其本地的缓存,如果转发节点本地有该请求的缓存,则响应请求节点,否则,继续转发至数据中心。但是随着请求节点与数据中心的跳数增加,网络连接的可靠性和吞吐量将会下降。而 COOP 缓存发现策略,利用了兴趣局部性原理,即相邻节点间可能存在同样的需求,请求节点先以限制性洪泛法在其邻居节点中查找数据,如果没有,再以 Hop-by-Hop 的方案查找。E-COOP 缓存发现策略是对 COOP 缓存发现策略的改进,它不仅发挥了协作缓存提取数据的优势,更是引入了核心节点,提高缓存的发现效率。

COOP 方案中节点的协作区域由 1-Hop 范围内的邻节点组成。其执行过程如下:请求节点发出请求,若本地缓存持有请求数据,则会直接响应;否则请求节点在 1-Hop 区域内广播请求信息;如果请求数据不在协作区域内,请求节点进行 Hop-by-Hop 方案将请求消息发往数据中心。

2.1 E-COOP 系统架构

E-COOP 系统架构如图 3 所示,它驻留在网络层与应用层之间,为应用层的用户请求和网络层的通信提供代理作用。

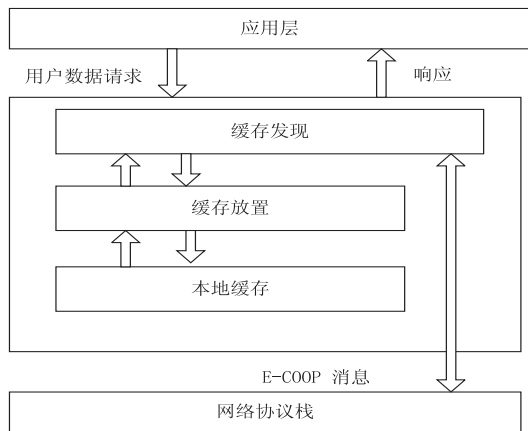


图 3 E-COOP 系统架构

E-COOP 的执行过程如下:当节点发出一个数据请求时,其先在本地缓存中查找,如果本地缓存能够提取数据,则用户直接访问,否则,请求节点在协作区域内广播数据请求,如果数据不在协作区域内,请求信息以 Hop-by-Hop 方案转发至数据中心。如果在转发过程中,节点为核心节点,则查询该节点 1-Hop 范围内邻节点的缓存目录,发现请求数据时,响应请求节点并停止转发。

2.2 核心节点选择模型

假设节点集合 $\{u, \dots, v_N\}$ 是 MANET 网络中节点的

集合, λ_{uv} 为节点 u 和节点 v 之间最短路径的条数, $\lambda_{uv}(\omega)$ 为从节点 u 到节点 v 最短路径且经过节点 $w \in V$ 的条数。节点 $w \in V$ 的重要程度为:

$$K(w) = \sum_{u \neq v, w \in V} \frac{\lambda_{uv}(w)}{\lambda_{uv}} + \gamma E_w \quad (2)$$

其中, E_w 为节点 w 剩余的能量; γ 为大于等于 0 的常数,对于能量敏感的 MANET 网络, γ 的值可以设得较大。一个节点的重要程度越大,说明这个节点可以以相对短的路径到达其他节点并且这个节点的剩余能量相对较高。

在 MANET 中,每个节点都可以获取其一跳范围内的其他邻节点信息(通过周期性的请求数据包获得),包括周围节点所持有的数据项 ID、数据项的 TTL 值、节点的剩余能量等。节点会周期性计算周围节点和本节点的重要程度 K ,如果本节点与周围其他节点相比重要度较大,则该节点是核心节点,否则为普通节点。

2.3 E-COOP 缓存替换策略

由于缓存空间的有限性,当一个新的数据项要被缓存,而缓存空间不足时,必然要有旧的缓存被踢出,缓存替换策略^[11]就是研究如何替换旧的缓存。缓存替换的目的是增加系统缓存的命中率,这很大程度上取决于缓存的容量,对于协作缓存而言,缓存替换考虑的不仅仅是本地缓存的命中率,而是整个 MANET 缓存系统。因此,E-COOP 缓存替换策略试着减少协作区域中缓存数据的副本数量,从而最优化缓存系统。由于在 Adaptive 缓存放置算法中,当节点需要缓存的数据项事先存在于节点时,节点只会更新其 TTL 值而不会实际再次缓存数据副本,这样做的好处之一就是节省了缓存控件,减少冗余。

E-COOP 策略会将缓存数据标记为主要副本和次要副本。当节点获取到数据时,如果该数据来自协作区域以外,则该数据标记为主要副本。否则,如果该数据来自协作区域内,需要进一步考虑其主次性:如果在之前的请求,该数据已经被标记为主要副本,考虑到减少副本的数量,所以这次的请求标记其为次要副本。另一方面,该数据前一次请求时被标记为次要副本,则本次请求被标记为主要副本。E-COOP 区分缓存数据的原因是减少缓存缺失的成本,跟随节点的流行趋势而应需缓存。E-COOP 缓存替换执行过程如下:(1)当缓存空间满时,先踢出空间中的次要副本,如果剩余空间能够满足新的缓存数据,则进行缓存,否则进入(2);(2)节点为每个缓存空间中的主要副本 i 计算成本函数 $\text{cost}(i)$,如下:

$$\text{cost}(i) = \frac{S_i}{\text{TTL}_i} \cdot \frac{T_{\text{now}} - T_{k_n - \text{access}}}{K} \quad (3)$$

其中, S_i 为数据项 i 的大小; TTL_i 为数据项的生存值; $T_{k_{a-access}}$ 为主要副本 i 第 k 次被访问的时间戳。

选择 $cost(i)$ 值最大的副本进行替换。将该副本被替换的消息发送给核心节点,由核心节点更新 1-Hop 邻节点缓存目录。

3 仿真与性能分析

在 Linux 平台上使用 NS-2^[12] 仿真器中的 CMU 无线扩展模型^[13] 进行网络仿真,仿真区域为 500 m × 1 500 m,50 个节点在区域内随机移动,节点移动速度范围在 0 ~ 20 m/s,信道的带宽为 2 Mb/s,节点的通信范围为 250 m,无线传播模型为 Two Ray Ground,节点采用全向天线(OmniAntenna),队列为 PriQueue,底层路由协议为 AODV,MAC 层协议为 IEEE802.11^[14],数据项的大小范围在 1 ~ 10 KB 之间,邻节点范围为 1-Hop。Adaptive 缓存的阈值设置为: $T_H = 2$, $T_S = 4.4$, $T_{TTL} = 5\ 000$ (阈值根据相同环境仿真得来)。

客户端访问模型基于 Zifp-like^[15] 函数,每个节点产生一个可读查询,产生时间服从均值为 T_{query} 的指数分布。Zifp-like 经常用来模拟不均匀的分布模型,在 Zifp-like 模型中,节点缓存第 i ($1 \leq i \leq n$) 个来访数据项的概率遵循:

$$P_{\alpha_i} = \frac{1}{i^\theta \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^\theta}} \quad (0 \leq \theta \leq 1) \quad (4)$$

其中, n 为数据中心的第 n 个数据项,当 $\theta = 1$ 时,访问模型遵循严格的 Zipf 分布,当 $\theta = 0$ 时,访问模型遵循均匀分布, θ 越大,分布函数越“扭曲”。

从图 4 可以看出,随着缓存空间的增大,所有方案的平均延迟都会减小,因为缓存空间可以存储更多的数据项,在请求发往数据中心的过程中,更加容易命中,所以响应的延迟就会缩短。同时,由于引入核心节点,E-COOP 缓存策略要优于其他三种方案。E-COOP 与 COOP 缓存策略两条曲线近似平行,说明在 E-COOP 缓存策略中引入核心节点,缓存系统整体平均延迟有所降低,而并非在特定的某个点。

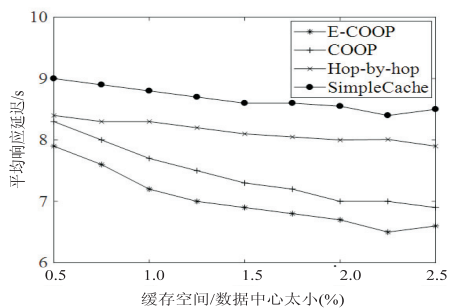


图4 平均响应延迟的比较

从图 5 可以看出,缓存空间越大,能量的消耗就越

小,因为节点可以缓存更多的数据项,高概率地在本节点或者转发节点处获得请求数据。同时,E-COOP 缓存策略能耗低于 COOP 缓存策略的能耗,前者的响应延迟又比后者低,所以经过仿真表明,E-COOP 缓存策略的确比现有的 COOP 缓存策略更具有优越性。

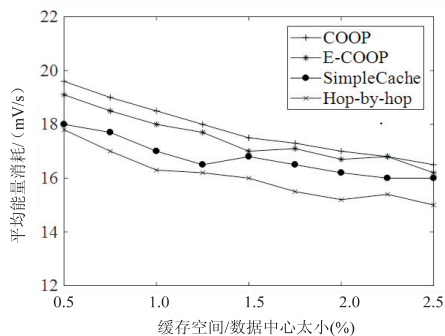


图5 平均能耗的比较

4 结束语

Adaptive 缓存放置策略很好地结合了 Data-Cache 以及 Path-Cache 的优势,同时规避了它们的缺点,在缓存放置方面,充分考虑了相邻节点可能具有相同需求的实际情况,各移动节点相互协作,数据共享,推进整体网络性能的提升,其中包括网络吞吐量的提升,链路断裂概率的降低等。E-COOP 缓存发现策略在现有的 COOP 缓存发现策略的基础上引进了核心节点,提升普通节点发现请求数据的概率。在保证不增加能量的前提下,尽可能地降低缓存发现的延迟。同时,E-COOP 缓存替换策略通过减少数据项副本的方法,减少冗余,提高请求响应效率。两种方案相结合,在缓存放置和发现过程都充分利用了邻节点资源,提升了移动 Ad Hoc 网络的缓存性能。

参考文献:

- [1] 张 鹏,孙 磊,崔 勇,等. 移动自组网安全技术研究[J]. 计算机科学,2009,36(7):1-7.
- [2] MAHESWARY A, BASKAR S. Letter to shape encryption for securing MANET routing protocols[C]//IEEE international conference on computational intelligence and computing research. Chennai, India; IEEE, 2016.
- [3] DODKE S, MANE P B, VANJALE M S. A survey on energy efficient routing protocol for MANET[C]//2nd international conference on applied and theoretical computing and communication technology. Bangalore, India; IEEE, 2016:160-164.
- [4] 王忠恒,张曦煌. 移动 Ad Hoc 网络 AODV 路由协议的改进[J]. 计算机应用,2010,30(2):333-336.
- [5] 王北光,李立新,谢 涛. 移动 Ad Hoc 网络 DSR 路由协议的改进[J]. 计算机技术与发展,2011,21(8):121-124.
- [6] 刘银龙,汪 敏,马 伟,等. PSP 缓存系统中总开销最小

(下转第 183 页)

MCP 算法和 EOSWCA 算法。

4 结束语

针对云环境下任务调度的问题,在前期研究的基础上,从执行时间、处理机数目及利用率方面作了进一步的研究,提出一种基于阈值的任务复制策略。该策略对复制任务的方法做了优化,通过设置阈值的方式,判断是否需要任务复制以减少任务的等待时间;然后对得到的任务集进行合理调度。实验结果表明,该算法在提前任务的完成时间、降低处理机的使用数目及提高处理机利用率等方面有很大的改善。下一步将对云环境下科学工作流的数据复制策略进行研究。

参考文献:

[1] CHEN Wanghu,ALTINTAS I,WANG Jianwu,et al. Enhancing smart re-run of kepler scientific workflows based on near optimum provenance caching in cloud [C]//IEEE world congress on services. Anchorage, AK, USA; IEEE, 2014:378-384.

[2] 李强,郝沁汾,肖利民,等. 云计算中虚拟机放置的自适应管理与多目标优化[J]. 计算机学报,2011,34(12):2253-2264.

[3] ALI M,KHAN S U,VASILAKOS A V. Security in cloud computing:opportunities and challenges[J]. Information Sciences,2015,305:357-383.

[4] ZHU Nuo,SHAO Chunfu. Vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up based on the improved genetic algorithm[C]//Fourth international conference on genetic and evolutionary computing. Shenzhen, China; IEEE, 2010: 312-316.

[5] CHAHARSOOGHI S K,KERMANI A H M. An effective ant colony optimization algorithm (ACO) for multi-objective resource allocation problem (MORAP) [J]. Applied Mathematics & Computation,2008,200(1):167-177.

(上接第177页)

的协作缓存策略[J]. 通信学报,2015,36(3):86-93.

[7] DU Yu,GUPTA S K S. COOP;a cooperative caching service in MANETs [C]//Joint international conference on autonomic and autonomous systems and international conference on networking and services. Papeete, Tahiti, French Polynesia; IEEE,2005.

[8] 许重球,李腊元. MANET 典型路由协议的性能分析与仿真[J]. 计算机工程,2008,34(12):97-99.

[9] KARAULIA D S,BHAROT N. Dynamic TTL variance foretelling based enhancement of AODV routing protocol in MANET [C]//Fourth International conference on communication system and network technologies. Bhopal, India; IEEE, 2014:248-253.

[6] TAGHIYEH S,XU Jie. A new particle swarm optimization algorithm for noisy optimization problems[J]. Swarm Intelligence,2016,10(3):161-192.

[7] BAJAJ R,AGRAWAL D P. Improving scheduling of tasks in a heterogeneous environment[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems,2004,15(2):107-118.

[8] RANAWEEERA A,AGRAWAL D P. Task duplication based scheduling algorithm for heterogeneous systems [C]//Proceedings of 14th international parallel and distributed processing symposium. Cancun, Mexico; IEEE,2000:445-450.

[9] PARK C I,CHOE T Y. An optimal scheduling algorithm based on task duplication[C]//Eighth international conference on parallel and distributed systems. [s. l.]; IEEE, 2001:9-14.

[10] LIU Chun-Hsien,LI Chia-Feng,LAI Kuanchou,et al. A dynamic critical path duplication task scheduling algorithm for distributed heterogeneous computing systems [C]//Proceedings of the 12th international conference on parallel and distributed systems. Washington, DC, USA; IEEE, 2006:365-374.

[11] 潘志舟. 基于任务复制和插入的分布式任务调度算法研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2015.

[12] 李静梅,尤晓非,韩启龙. 基于任务复制的多关键路径任务调度算法 [J]. 计算机工程与设计,2014,35(5):1639-1645.

[13] 段菊,陈旺虎,王润平,等. 云环境下基于聚簇的科学工作流执行优化策略 [J]. 计算机应用,2015,35(6):1580-1584.

[14] 陈旺虎,段菊,俞茂义. 允许违反局部时间约束的科学工作流调度策略 [J]. 计算机工程与科学,2016,38(11):2165-2171.

[15] 何婧媛. 云计算仿真工具 CloudSim 的研究与应用 [J]. 科技资讯,2016,14(2):32-33.

[16] 刘彦君,金飞虎. JavaEE 开发技术与案例教程 [M]. 北京:人民邮电出版社,2014.

[10] YIN Liangzhong,CAO Guohong. Supporting cooperative caching in Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2006,5(1):77-89.

[11] 杨春贵,吴产乐,彭鸿雁. 一种有效的 Web 代理缓存替换算法 [J]. 计算机工程,2007,33(3):43-44.

[12] 陈亚军,肖建华. 基于 NS-2 的网络仿真与扩展 [J]. 计算机系统应用,2005,14(5):84-87.

[13] 王辉. NS-2 网络模拟器的原理和应用 [M]. 西安:西北工业大学出版社,2008.

[14] 李浩,高泽华,高峰,等. IEEE802.11 无线局域网标准研究 [J]. 计算机应用研究,2009,26(5):1616-1620.

[15] 游荣彦. Zipf 定律与汉字字频分布 [J]. 中文信息学报, 2000,14(3):60-65.