

基于软件定义的未来网络节能算法

孙冬冬, 杨龙祥

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要:随着网络用户的急剧增长和网络规模的不断扩大,网络的能耗已经成了越来越严重的问题,所以网络节能成为了人们关注的问题。但是,在传统的网络架构的基础上,进行网络的节能研究不是有效的,因为没有集中的控制和管理机制。因而提出了 SDN 的未来网络架构,其分离了设备的控制层和数据层,其控制层能够获得整个网络设备的信息,从而为网络的节能带来了方便。SDN 是在全局网络的基础上提供了一种新的绿色网络节能技术:它能收集整个网络的拓扑和每个设备的实时流量信息。在 SDN 的基础上,提出了二进制节能算法和贪婪算法,通过 SDN 集中的管理和预处理流量,得到了更好的节能效果。通过仿真结果可以看出,提出的算法的确要好于传统的算法。

关键词:软件定义网络;能量消耗;节能;二进制整数规划算法;贪婪算法

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)03-0070-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.03.015

Future Network Energy Saving Algorithm Based on Software Definition

SUN Dong-dong, YANG Long-xiang

(College of Communication and Information Engineering, Nanjing University of
Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: With the rapid growth of network users and the continuous expansion of the network scale, energy consumption of the network has become more and more serious problem, so the network energy saving has become the focus. However, on the basis of the traditional network architecture, energy conservation research of the network is not effective, because there is no centralized control and management mechanism. Thus the future network SDN architecture is presented which separates control layer and data layer of devices. Control layer can obtain information of the whole network devices which is convenient to network of energy saving. On the basis of the global network, SDN provides a new green network energy saving technology which can collect the entire network topology and real-time traffic information of each equipment. On the basis of SDN, the binary energy-saving algorithm and greedy algorithm are put forward. Through centralized management and preprocessing traffic by SDN, the better energy efficiency is achieved. Finally, the simulation results can be seen that the proposed algorithm is indeed better than traditional one.

Key words: SDN; energy consumption; energy saving; binary integer programming algorithm; greedy algorithm

1 概述

近年来,能量消耗的增长已经变成越来越严重的问题。大部分主要的能源是非可再生的,在不远的将来就会耗尽。同时,今天使用的能量大部分来自化石燃料的燃烧,大量的能量消耗就会产生大量的温室气体,从而导致全球变暖和一系列消极的影响。但是最近几年,网络消耗的能量和产生的温室气体在快速增长。因此,网络能量的消耗是不能被忽视的,如何节省网络的能量变成了一个重要的话题^[1]。数据中心网作为计算、存储和多种服务的提供者扮演着重要的角色。

为了保证数据中心网的可靠性,网络中有许多冗余的交换机和服务。数据中心网络中有周期性的能量变化,但是能量消耗确是相对恒定的,也就是设备能量消耗和它的链路利用率不成比例,从而引起了巨大的能量浪费^[2]。

从经营者的角度,有三种方法可以实现节能:

- (1)减少不合理的网络重复,通过网络规划和资源联合优化。
- (2)购置能量有效性设备。
- (3)智能休眠或者合理优化来动态提供网络的能力。

收稿日期:2016-04-22

修回日期:2016-08-11

网络出版时间:2017-02-17

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2013CB329104)

作者简介:孙冬冬(1990-),男,硕士,研究方向为移动通信与无线技术;杨龙祥,教授,博士生导师,研究方向为移动无线通信与物联网。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170217.1628.040.html>

量基于商业的要求。

前两种方法是静态的。因为一经实现,能量节省就是固定的,不能继续优化,大部分经营者和设备提供商现在采取这种节能方案。而文中根据第三种方法^[3]设计了节能优化算法。第三种节能方法是动态节能方案。因为路由器是网络中运行的主要设备,而目标是在整个网络中节省路由的能量消耗。存在的路由节能技术主要关注两个优化方面:局部优化和全局优化。

一方面,大部分有关路由能量的研究是在链路层或设备层的局部优化,即把路由器作为独立设备,注重硬件设备层的节能。Gupta 等^[4]提出使网络子元件如线卡休眠,当它们空闲时或在低速率下运行。他们后来探索不协调的休眠节能技术在局域网的链路层^[5-7]。Nedevschi 等^[8]提出通过减小突发流量使网络元件有更多的机会休眠(当空闲时)和使网络操作率适应工作负载。然而,数据包的到达间隔时间限制了这种局部优化方法。

另一方面,剩余的路由能量管理是在网络层的全局优化。现今,高的路径冗余和低的链路利用率网络为能量感知流量工程提供了机会。Gupta 等^[4]提出当低活动期时,改变路由使流量聚合到更少的路由上,从而使空闲的设备休眠。然而,他们没有提出实际的网络层算法。Heller 等^[9]提出弹性树方法来得到更好的能量有效性。其主要思想是依靠流量负载找到正确交换机和链路的集合,充分利用数据中心的胖树拓扑结构和简单的保留根树结构。但是,该方法不能应用在一般的网络拓扑中。文献[10]提出了 EATe 来减少能量消耗,其工作结合休眠,速率自适应和路由协调局部措施。然而,在软件定义网络中,因为集中控制器,这些措施都是没有必要的。文献[11]提出了一种最新的全局流量工程机制 GreenTE。GreenTE 通过分离的方式重新路由来最大化空闲链路的总的节能,在最大链路利用率和网络延时条件下,提出了一个混合整数规划问题,商业软件 Cplex 用来解决这个问题(在 300 s 限制时间内)。在限制时间内,该方法不能确保一个灵活的解决方案,也没有提出实际的算法。然而提出的算法是更实际的,能扩展到任何网络拓扑,尤其是在不能手工关闭的大型复杂网络中。

以上研究的网络节能算法都是基于传统的网络架构,但在 SDN 的基础上,进行算法的研究还很少。文中主要研究基于 SDN 网络架构的二进制节能算法和贪婪算法,通过 SDN 集中的管理和预处理流量,得到了更好的节能效果。

2 数据中心网的能量消耗

对于数据中心网,主要还是网络设备带来的能量

消耗,即网络服务器、交换机、路由器和链路。为了保护设备,数据中心网也包括冷却系统,其消耗了相当大的能量。其他的变压器、供电设备和照明设备消耗了很小的一部分能量。

数据中心网的能量消耗主要集中在网络的设备和冷却系统上^[12]。其中,网络设备占总能量消耗的 1/3。文中只考虑网络设备的能量消耗。

对于一个交换机来说,一个端口仅仅消耗 1~2 W 的能量。而交换机从空闲到满负载的状态仅仅提升 8% 的能量消耗。因此,只要交换机一打开,将要消耗大量的能量。

表 1 显示了不同配置的 48 端口的交换机的能量消耗。交换机 A,B,C 分别是 Cisco、ProCurve 和 Brocade 类型交换机^[13]。

表 1 交换机的能量消耗

Port state	Traffic	Switch A/W	Switch B/W	Switch C/W
Off	0	151	133	76
On	0	184	170	97
On	1 Gbps	195	175	102

文中主要处理网络设备(交换机、服务器)的节能,而不是控制器,冷却系统和能量提供系统的节能。这主要是由于 SND 的控制器是不能被关闭的,且 SDN 控制非网络设备很困难。处理网络流量和控制网络设备的开关将要获得节能的目的。

3 SND 的简单介绍

3.1 SDN 的结构

SDN 是一个新的网络架构,主要分为三个部分^[14]:SDN 物理层、SDN 控制层和 SDN 应用层。

在物理层,主要是 SDN 交换机的物理设备。SDN 控制层主要包含 SDN 控制器,其主要负责集中管理物理层的硬件,然后能优化网络的能效和吞吐率。SDN 应用层包含了一些以 SDN 为基础的应用软件。文中节能模型主要建立在 SDN 的控制层,核心算法配置在控制器中。因此,可以使用 SDN 控制器获得网络信息,通过控制路径流量和控制网络设备的开关来达到节能的目的。

3.2 SDN 中节能的功能

通过流量表和集中管理,SDN 提供了以下功能来实现节能:

- (1) 控制器可以获得当前的网络拓扑;
- (2) 控制器可以获得网络设备的特性;
- (3) 网络设备定期地报告它们的流量负载到控制器;

- (4) 控制器可以控制网络设备的开关;
- (5) 控制器可以监控传输路径的流量。

4 SDN 的能量节能模型

提出两个模型来处理进入数据中心的流量。

以下是算法中将要用到的符号,其含义如表 2 所示。

表 2 符号所代表的含义

符号	符号所代表的含义
T	流量矩阵
R	需求矩阵
$P = \{P_1, P_2, \dots, P_S\}, S > 0$	总共需求对集合,其中 S 为网络总共的需求数量
$P_s = [i, j]$	传送数据需要在路径 i 和 j 之间
B_S	传输路径集合
$E = \frac{\text{power cost after optimization}}{\text{power cost before optimization}}$	节能比例

4.1 二进制整数线性规划模型

基于上面的假设,构成了一个二进制整数规划模型来处理流量。这个流量将要被聚合从而使用更少的网络设备,在每一个链路不超过链路容量的条件下,假设数据中心网络流量在某种程度上能被需求矩阵 R 表示。通过需求矩阵,能容易地计算需求对集合 P 。对于任意的 $P_s \in P, s = 1, 2, \dots, S$,能得到传输路径集 B_s 。这个模型的目标是决定最小的能量消耗在满足负载需求和每一个链路将不超过链路容量的条件下。

到此,能得到二进制整数规划模型:

$$\begin{cases} \min u = U(\text{Topo}) \\ \text{s. t.} \\ T_{ij} < C, \quad \forall i, j \in N \\ \sum_{j=1}^{L_i} x_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, S \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} \text{Topo} = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^{L_i} x_{ij} \times B_{ij} \\ T = \bigcup_{i=1}^S \bigcup_{j=1}^{L_i} x_{ij} \times B_{ij} \\ x_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{没有选择路径 } B_{ij} \\ 1 & \text{选择路径 } B_{ij} \end{cases} \end{cases} \tag{2}$$

从以上公式,使用二进制整数规划来找到最小数量的交换机和服务来满足当前网络要求。二进制整数规划将要探索所有可能的最优路径来获得最小能耗,因此这个结果一定是最优的。然后,可以得到数据中心能量消耗 $U' = u_{\min}$, 将其与 U 进行比较,得到节能比例: 万方数据

$$E = \frac{U'}{U} \tag{3}$$

尽管二进制整数规划模型能够得到最好的能量有效性网络,但是,它是困难地来处理大型网络,因为矩阵和图论的计算是相当复杂的。因此,它只能应用在相对小规模的网络中。因而,提出了贪婪算法来克服这个问题。

4.2 贪婪算法模型

二进制整数规划模型算法因为处理高复杂的大型网络是困难的,因此提出了一个贪婪算法模型来减少计算的花费。

贪婪算法模型主要是以逐步的方式来增加传输路径,每一步它将选择花费能量最少的路径。如果当前传输要求的数量是 S ,那么经过 S 次迭代,就能获得最终结果,其极大地简化了计算过程。

以下来描述贪婪式算法模型:首先定义迭代公式,每次迭代都能获得一个新的网络拓扑,其等于当前网络拓扑加上最优传输路径。如下所示:

$$\begin{cases} \text{Topo}^0 = 0 \\ \text{Topo}^k = \text{Topo}^{k-1} + B_{k, \text{opt}_k} \end{cases} \quad \text{opt}_k \in \{1, 2, \dots, S\} \tag{4}$$

为了保证这个增加的路径是最优的,其 opt_k 必须满足下面的条件:

$$\begin{aligned} &\forall i \in \{1, 2, \dots, L_k\} \\ &U(\text{Topo}^{k-1} + A_{k,i}) \geq U(\text{Topo}^{k-1} + A_{k, \text{opt}_k}) \end{aligned} \tag{5}$$

在每次迭代中,必须保证流量不能超过链路容量:

$$T_{ij}^k < C, \quad \forall i, j \in N, k = 1, 2, \dots, S \tag{6}$$

其中, T^k 代表由 k 次迭代后产生的流量矩阵。

经过 S 次迭代后,能够获得最终拓扑 Topo^S ,从而得到能量消耗 $U' = U(\text{Topo}^S)$, 其能够用来计算能量消耗比例 E 。

4.3 局部模型算法

在传统的网络架构中,没有集中控制和管理机制,路由和交换机只能根据自己的状态来收集信息。在这种情况下,每个设备感知自己的流量状况,然后独自决定是否关掉自己,从而获得节能的目的,称其为局部模型。

5 仿真和测试

5.1 仿真设计

使用 Matlab 对提出的模型进行仿真,包括以下模块。

(1) 物理层模块。

物理层模块就是用来仿真物理层网络的。在两个不同的时间间隔,需求到达数量是独立的,因此用泊松

过程来描述流量到达过程^[15]。在每一单元时间,需求到达率为 λ ,需求到达数量 N 服从泊松分布,如下所示:

$$P(N=n)=e^{-\lambda}\frac{\lambda^n}{n!},n=0,1,2,\cdots$$

(7)

每一个数据中心网的流量分布显示出某种特征^[12],用 P_{ij} 来表示服务器 i 发送数据到服务器 j 的概率,其满足以下公式:

$$\sum_i^K\sum_j^KP_{ij}=1$$

(8)

每一个需求持续时间从一个服务器到另一个服务器是改变的。例如,一个视频网站的时间是长的,而新闻网站相对来说是短的。根据队列理论,假设需求持续时间服从指数分布,用参数 α 表示的公式如下:

$$P(T=t)=\frac{1}{\alpha}e^{-\frac{t}{\alpha}}$$

(9)

同时,每个需要传输需求的数量数据与服务类型密切相关,认为其服从统一分布,可以用如下公式表示:

$$F(X=x)=\frac{x}{C},0<x\leq C$$

(10)

以这种方式,能使用仿真来产生流量和需求。对于不同的网络,仅仅只需要根据网络的特性来调整网络参数就行。

(2) 流量处理模块。

在流量处理模型中,只需要依据先前提出的模型进行仿真。

(3) 设备控制模块。

对于设备控制模块,其与SDN网络操作密切相关,能用SDN控制器来控制设备和路由的流量。

5.2 仿真参数

(1) 数据中心网的拓扑。

考虑到大部分网络使用的拓扑结构,该仿真模型建立在三层树拓扑结构基础上,其有10台SDN交换机和8台服务器。

(2) 链路容量。

为了方便,认为每一个链路容量是相同的: $C=6$ 。

(3) 平均需求持续时间。

假设每个需求占5个单元时间,表达为 $\alpha=5$ 。这个参数直接和网络负载有关且能调节服务负载,即 α 越大,网络负载越重。

(4) 需求到达率。

令 $\lambda=1$,也可以使用这个参数来调整网络负载,这个值越大,网络的负载越重。

(5) 延迟。

延迟对这个测试网络非常重要。仿真中,考虑队列延迟,即在算法中,如果流量不能找到到达目标的路

径,将会被存储在交换机中,从而带来延时。文中将不考虑计算延时或者传输延时。

(6) 能量模型。

网络中设备的消耗是非常重要的,因此假设交换机打开时的消耗是0.9,链路是0.025,其都依据表2得出。

(7) 评价指标。

用 E 来评价该模型,同时也考虑延时。

5.3 仿真结果

仿真三个不同的节能模型(局部算法模型、二进制整数规划模型、贪婪算法模型)来评价该模型。

(1) 不同算法的节能效率。

仿真参数 $\alpha=5,\lambda=1$,进行仿真30次,每次持续100个单元时间。仿真结果如图1所示。

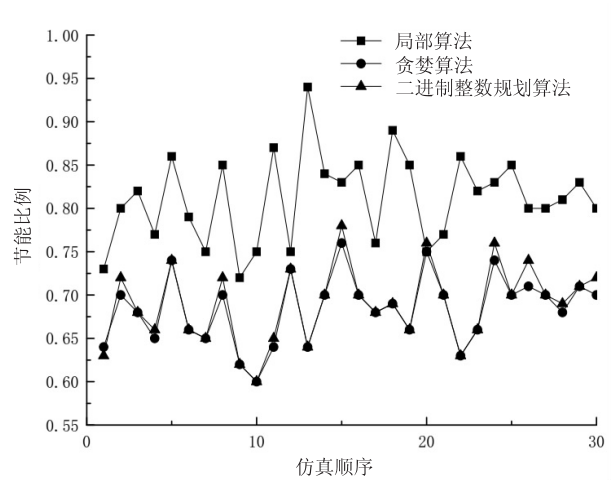


图1 不同算法的节能效率仿真图

从图中可得,文中提出算法的能效比传统的局部算法提高10%,贪婪算法节能效率和二进制算法基本相同,所以两条曲线几乎重合。如果网络规模比较大,就用贪婪算法模型来减少计算量。

(2) 不同流量负载的节能。

这个测试主要讨论当网络负载增加时,能量比例的改变。为了测试到达率对节能的影响,设置到达率 λ 从1到2.5,每步增加0.05,平均需求持续时间固定为 $\alpha=4$ 。仿真31次,每次测试持续100单元时间,仿真结果如图2所示。

从图中可以看到,随着到达率的增加,节能变得相对困难。主要是因为当流量负载变得重时,大部分网络设备被占用,在这种情况下能效比较低。也可以看到曲线有抖动,这是因为仿真时间是被限制的,可以仿真多次得到平均值来消除抖动。同时,可以看到有时贪婪算法得到比二进制整数规划模型更好的能效,这是因为贪婪算法给流量带来了延时。

对需求持续时间对节能的影响进行评价,其和到达率非常相似。仿真中,设置 $\lambda=1$,需求持续时间从4

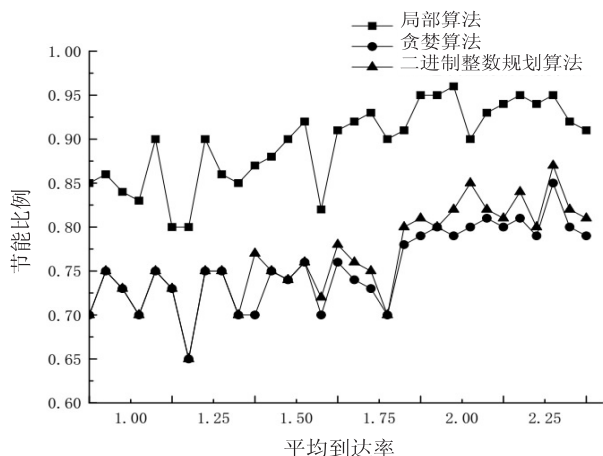


图2 不同到达率下节能效率仿真图

增加到6,每步增加0.1。仿真21次,每次仿真100单元时间,仿真结果如图3所示。

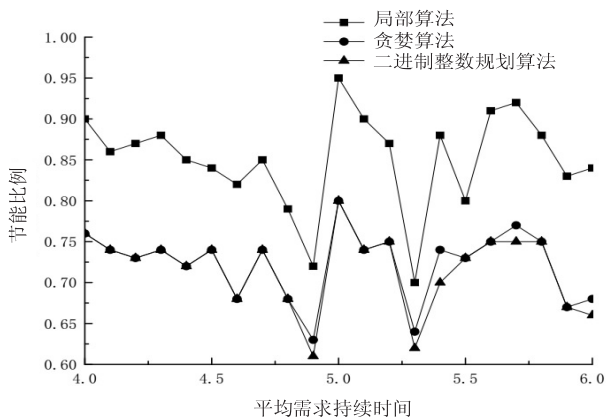


图3 不同需求持续时间下的节能效率仿真图

从图中可以看出,随着需求持续时间的增长,节能越来越困难。

(3) 不同算法下的延时情况。

这部分比较三种不同算法在流量负载相对较重时的延时。为了得到重的负载流量,令 $\lambda = 1.5$, $\alpha = 8$ 。仿真20次,每次100单元时间,仿真结果如图4所示。

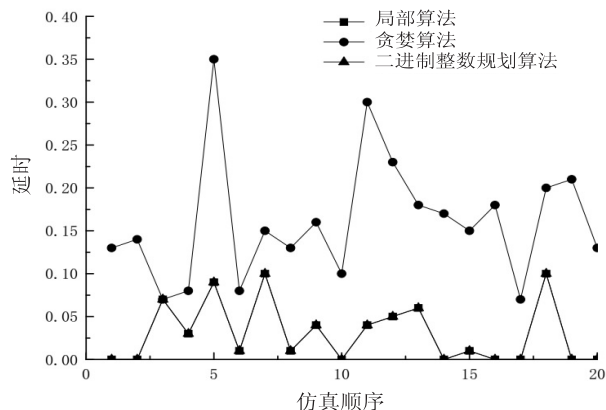


图4 不同算法的延时情况仿真图

从图中可以看出,二进制整数规划模型和局部算法模型的延时几乎相同,且在相对较低的水平。但是贪婪算法的延时是高的,这是因为贪婪算法得经过一

步步的迭代去找到最优传输路径。当负载较重时,贪婪算法不能找到满足容量限制的路径,所以导致了延时。因此,二进制整数规划模型更适合要求低延时的网络。

6 结束语

文中提出了新的未来网络架构 SDN,其网络的控制层从网络的转发层分离出来交给控制器来管理。SDN 允许网络的逻辑控制层从全局网络观点来设计和操作网络。因此 SDN 开辟了一种新的绿色节能方法,可以收集整个网络的拓扑结构和设备的实时流量信息。因此,基于 SDN 提出了二种不同的节能算法:二进制整数规划算法和贪婪算法。其能够应用在不同的数据中心网。通过仿真比较,可以明显地看到提出算法在节能上要好于传统的局部算法。

但是,二进制整数规划算法的计算是复杂的,不适合使用在复杂的网络中,而贪婪算法当网络负载重时延时较高,将来可以对这两种算法进行更深入的探索,使它们更加优化。

经过节能后的网络,流量是相对集中的,所以网络容易受到链路失败和突然的流量风暴的影响。然而到目前为止,还没有这方面的研究,即在研究网络节能的同时研究网络的可靠性,这将是未来的研究方向。

参考文献:

- [1] Hu C, Wu C, Xiong W, et al. On the design of green reconfigurable router toward energy efficient internet [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 83-87.
- [2] Internetenergy consumption [EB/OL]. 2013. <http://www.thebigdata.cn/YeJieDongTai/4274.html>.
- [3] Wang R, Jiang Z, Gao S, et al. Energy-aware routing algorithms in software-defined networks [C]//World of wireless, mobile and multimedia networks. [s. l.]: IEEE, 2014: 1-6.
- [4] Gupta M, Singh S. Greening of the internet [C]//Conference on applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. [s. l.]: ACM, 2003: 19-26.
- [5] Gupta M, Grover S, Singh S. A feasibility study for power management in LAN switches [C]//IEEE international conference on network protocols. [s. l.]: IEEE Computer Society, 2004: 361-371.
- [6] Gupta M, Singh S. Dynamic Ethernet link shutdown for energy conservation on Ethernet links [C]//IEEE international conference on communications. [s. l.]: IEEE, 2007: 6156-6161.
- [7] Gupta M, Singh S. Using low-power modes for energy conservation in Ethernet LANs [J]. Thin Solid Films, 2003, 437(1-2): 51-56.
- [8] Nedevschi S, Popa L, Iannaccone G, et al. Reducing network

sistent hashing 的分布式协作缓存策略有效降低了增加或者移除路由器时造成的影响,却使得算法的复杂度大幅提升,从而降低了网络的整体性能。综上所述,CCN 仍有诸多理论和技术问题有待解决,需要深入的研究。

参考文献:

[1] Xylomenos G, Ververidis C N, Siris V, et al. A survey of information-centric networking research [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2): 1024-1049.

[2] Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, et al. Networking named content [C]//International conference on emerging networking experiments & technologies. [s. l.]: ACM, 2011: 1-12.

[3] 胡 骞, 武穆清, 郭 嵩. 以内容为中心的未来通信网络研究综述[J]. 电信科学, 2012, 28(9): 74-80.

[4] 夏春梅, 徐明伟. 信息中心网络研究综述[J]. 计算机科学与探索, 2013, 7(6): 481-493.

[5] Newman M. Pareto distributions and Zipf's Law [J]. Contemporary Physics, 2004, 46(5): 323-351.

[6] 闵二龙, 陈 震, 许宏峰, 等. 内容中心网络 CCN 研究进展探析[J]. 信息安全, 2012(2): 6-10.

[7] 张国强, 李 杨, 林 涛, 等. 信息中心网络中的内置缓存技术研究[J]. 软件学报, 2014, 25(1): 154-175.

[8] Jiang A, Bruck J. Optimal content placement for en-route web caching [C]//IEEE international symposium on network computing & applications. [s. l.]: IEEE Computer Society, 2003.

[9] Laoutaris N, Syntila S, Stavrakakis I. Meta algorithms for hierarchical web caches [C]//IEEE international conference on performance, computing, and communications. [s. l.]: IEEE, 2004: 445-452.

[10] Psaras I, Chai W K, Pavlou G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks [C]//Proceedings of the second edition of the workshop on information-centric networ-

king. [s. l.]: ACM, 2012: 55-60.

[11] Megiddo N, Modha D S. Outperforming LRU with an adaptive replacement cache algorithm [J]. Computer, 2004, 37(4): 58-65.

[12] Petev P G, Wintergerst M. Least frequently used eviction implementation; U. S. , 7 552 284 [P]. 2009-06-23.

[13] Kim D, Lee S W, Ko Y B, et al. Cache capacity-aware content centric networking under flash crowds [J]. Journal of Network & Computer Applications, 2015, 50(C): 101-113.

[14] Chai W K, He Diliang, Psaras I, et al. Cache "less for more" in information-centric networks (extended version) [J]. Computer Communications, 2013, 36(7): 758-770.

[15] Wassermann S, Faust K. Social network analysis: methods and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

[16] Bernardini C, Silverston T, Festor O. MPC: popularity-based caching strategy for content centric networks [C]//IEEE international conference on communications. [s. l.]: IEEE, 2013: 3619-3623.

[17] Xu Y, Li Y, Lin T, et al. A dominating set-based collaborative caching with request routing in content centric networking [C]//IEEE international conference on communications. [s. l.]: IEEE, 2013: 3624-3628.

[18] Guha S, Khuller S. Approximation algorithms for connected dominating sets [J]. Algorithmica, 1998, 20(4): 374-387.

[19] Li Z, Simon G. Time-shifted TV in content centric networks: the case for cooperative in-network caching [C]//IEEE international conference on communications. [s. l.]: IEEE, 2011: 1-6.

[20] 刘外喜, 余顺争, 蔡 君, 等. ICN 中的一种协作缓存机制 [J]. 软件学报, 2013, 24(8): 1947-1962.

[21] Thar K, Oo T Z, Pham C, et al. Efficient forwarding and popularity based caching for content centric network [C]//International conference on information networking. [s. l.]: IEEE, 2015: 330-335.

(上接第 74 页)

energy consumption via rate-adaptation and sleeping [C]//Proceedings of the 5th USENIX symposium on networked systems design and implementation. [s. l.]: USENIX Association, 2008: 323-336.

[9] Heller B, Seetharaman S, Mahadevan P, et al. ElasticTree: saving energy in data center networks [C]//NSDI. [s. l.]: [s. n.], 2010: 249-264.

[10] Vasi G N, Kosti G D. Energy-aware traffic engineering [C]//International conference on energy-efficient computing and network. [s. l.]: [s. n.], 2008: 169-178.

[11] Zhang M, Yi C, Liu B, et al. GreenTE: power-aware traffic engineering [C]//IEEE international conference on network protocols. [s. l.]: IEEE Computer Society, 2010: 21-30.

[12] Tu R, Wang X, Yang Y. Energy-saving model for SDN data centers [J]. Journal of Supercomputing, 2014, 70(3): 1477-1495.

[13] Mahadevan P, Sharma P, Banerjee S, et al. A power benchmarking framework for network devices [M]//Networking. Berlin: Springer, 2009: 795-808.

[14] OpenFlow switch specification 1. 4. 0 [EB/OL]. 2013. <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow/openflow-spec-v1.4.0.pdf>.

[15] Ryu B, Cheney D, Braun H W. Internet flow characterization: adaptive timeout strategy and statistical modeling [C]//Workshop on passive and active measurement. [s. l.]: [s. n.], 2001.