

基于有向无环图的互联网域内节能路由算法

耿海军¹ 施新刚² 王之梁² 尹 霞³ 尹少平¹

(山西大学软件学院 太原 030006)¹ (清华大学网络科学与网络空间研究院 北京 100048)²

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100048)³

摘 要 互联网在快速发展的过程中面临新的挑战,其中网络能耗问题尤为突出。学术界提出了大量用于解决网络能耗问题的方案,然而这些方案都考虑了网络中的实时流量数据,计算复杂度较高,不利于实际部署。对此,提出一种基于有向无环图的互联网域内节能路由算法(Energy-efficient Intra-domain Routing Algorithm Based on Directed Acyclic Graph,EEBDAG),该方法利用有向无环图来解决因链路关闭造成的路由环路和网络性能下降等问题,仅须考虑网络拓扑结构,不需要考虑网络中的实时流量数据。实验结果表明,EEBDAG 不仅具有较低的节能比率,而且具有较低的链路利用率,为 ISP 解决互联网节能问题提供了一种全新的方案。

关键词 域内路由,能耗,绿色网络,有向无环图

中图分类号 TP309.7 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.04.017

Energy-efficient Intra-domain Routing Algorithm Based on Directed Acyclic Graph

GENG Hai-jun¹ SHI Xin-gang² WANG Zhi-liang² YIN Xia³ YIN Shao-ping¹

(School of Software Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)¹

(Institute for Network Sciences and Cyberspace, Tsinghua University, Beijing 100048, China)²

(Department of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100048, China)³

Abstract With the rapid development of Internet, it is facing lots of challenges, in which the problem of network energy consumption is particularly prominent. Therefore, the academics put forward a large number of schemes to solve the problem. However, all of these methods need to consider the real-time traffic data in the network, and the computation complexity is very high, which is inconvenient to the actual deployment. Therefore, this paper proposed an energy-efficient intra-domain routing algorithm based on directed acyclic graph, which merely relies on network topology, without traffic awareness. The proposed scheme builds a directed acyclic graph for each node in the network, for the purpose of avoiding routing loops and alleviating the network performance degradation caused by cutting off links. Experimental results show that EEBDAG not only has lower energy-saving ratio, but also has lower link utilization, which provides an efficient solution for the ISP solving the Internet energy saving problem.

Keywords Intra-domain routing, Energy consumption, Green network, Directed acyclic graph

研究表明,温室气体会导致全球变暖,对气候变化具有灾难性的影响,因此减少温室气体的排放量是每个国家的责任和义务。低碳节能已经成为一个全球性的话题,中国作为一个发展中国家,一直提倡绿色节能,因此绿色节能也是一个重要的科学问题。信息与通信技术(Information Communications Technology, ICT)中设备的能耗占全球能耗的 2%^[1],并呈现逐年增加的趋势。

随着互联网规模的逐渐扩大,在互联网中部署的网络设备逐渐增加,网络能耗也不断增加,进而导致温室气体的排放

量与日俱增,因此如何降低网络能耗成为一个重要的研究课题^[2]。在设计之初,互联网采用了网状拓扑结构来应对网络中的突发故障和峰值流量^[3]。然而,目前互联网部署的域内路由协议采用最短路径转发报文,没有充分利用网络中的冗余链路。已有研究表明,骨干网在流量达到峰值时的链路利用率仅为 30%,多数时间的链路利用率不到 5%^[4],这为研究互联网节能机制提供了契机。

针对目前网络中存在的能耗较高的问题,学术界已经对网络节能算法^[5-6]做了深入的研究。根据解决问题时输入参

到稿日期:2017-02-03 返修日期:2017-04-18 本文受国家重点基础研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2015AA016105),国家自然科学基金资助项目(61702315)资助。

耿海军(1983-),男,博士,讲师,主要研究方向为网络体系结构和路由算法等,E-mail:ghj123025449@163.com(通信作者);施新刚 男,博士,副研究员,主要研究方向为 SDN、路由算法、网络安全等;王之梁 男,博士,副研究员,主要研究方向为数据中心、SDN、网络体系结构等;尹霞 女,博士,教授,主要研究方向为网络体系结构、路由算法、SDN、协议测试;尹少平 男,副教授,主要研究方向为路由算法、网络安全、网络体系结构等。

数的不同,可以将节能算法分为两种类型:基于流量感知的节能算法^[7-9]和基于拓扑感知的节能算法。基于流量感知的节能算法的输入参数为网络拓扑结构和网络中的实时流量数据,可以将该问题归结为整数线性规划问题或者复合整数线性规划问题,即将其归结为一个 NP-Complete 问题,然后利用启发式算法得到近似解。然而,准确的实时流量数据不仅难以测定,而且变化频繁,导致上述方案无法实际部署。基于拓扑感知的节能算法的输入参数为网络拓扑结构,不需要实时流量数据。该方案的实现方式简单,易于实际部署;但已有的方法基本都是基于流量感知的节能算法,很少有深入研究基于拓扑感知的节能算法。

鉴于此,本文提出一种基于有向无环图的互联网节能路由算法,该算法有以下几个重要特点:

- 1) 每个节点计算自身到目的地址的多个下一跳,可以缓解由于关闭部分链路造成的网络性能下降问题。
- 2) 每个节点构造以目的地址为根的有向无环图,保证报文在转发过程中不会出现路由环路。
- 3) 该算法的转发方式与目前互联网部署的域内路由协议的转发方式相同,支持增量部署,更具实际价值。

本文第 1 节介绍了网络模型和问题描述;第 2 节给出了具体的算法描述;第 3 节对算法进行了评测;最后总结全文,并且提出下一步的研究方向。

1 网络模型和问题描述

1.1 网络模型

网络可以用有向图 $G=(V,E)^{[10]}$ 来表示,其中 V 表示网络中节点的集合, E 表示网络中边(链路)的集合。对于网络中的任意一条有向边 $(x,y) \in E$ (其中 x 为该边的起点, y 为该边的终点),用 $w(x,y)$ 表示该链路的代价。对于网络中的任意一个节点 v , $N(v)$ 表示该节点的所有邻居节点的集合; $rSPT(v)$ 表示以节点 v 为根的反向最短路径树(汇聚树),该树包含了所有节点到节点 v 的最短路径; $DAG(v)$ 表示以节点 v 为根的有向无环图,该图包含了所有节点到节点 v 的无环路径。

下面通过一个实例来解释上述定义。图 1 表示一个包含 4 个节点、12 条边的网络拓扑结构,边上的数值表示该边的代价。图 2 表示以节点 d 为根的反向最短路径树,其中节点 c 到节点 d 的最短路径为 (c,d) 。图 3 给出了以节点 d 为根的两个有向无环图,图 3(a) 中节点 c 到节点 d 的路径有 (c,a,d) , (c,b,d) 和 (c,a,b,d) ,图 3(b) 中节点 c 到节点 d 的路径有 (c,b,d) , (c,d) 和 (c,a,b,d) 。

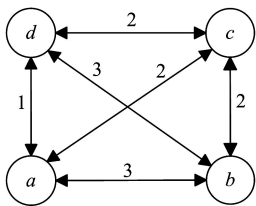


图 1 网络拓扑结构
Fig. 1 Network topology

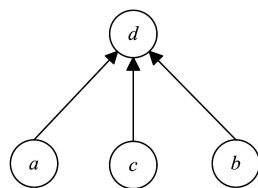


图 2 以节点 d 为根的反向最短路径树
rooted node d

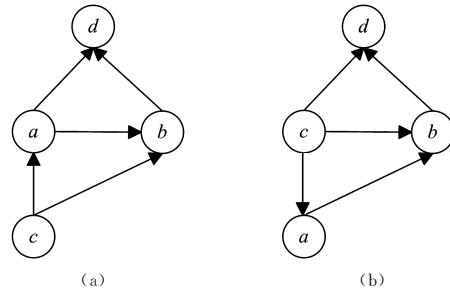


图 3 以节点 d 为根的有向无环图

Fig. 3 Directed acyclic graph rooted at node d

1.2 问题描述

本文通过关闭网络中的链路来达到节能效果,但关闭链路可能出现路由环路,使路由由可用性和网络性能降低。因此,在解决节能问题时必须考虑网络的性能。在 $rSPT(v)$ 中,任意节点到节点 v 只有一条最短路径;然而,在 $DAG(v)$ 中,任意节点到节点 v 可能存在多条路径。因此,利用有向无环图可以增加路径的多样性,并提高路由可用性。

从 1.1 节中的实例可以看出,给定一个网络拓扑结构,以某节点为根的有向无环图并不是唯一的。因此,本文主要研究在给定一个网络拓扑结构的情况下,如何构造特定结构的有向无环图来使得关闭链路的数量最大化,并且尽可能减小关闭链路对网络性能的影响。该问题可以形式化表示为:

输入:网络拓扑结构 $G=(V,E)$;输出:关闭链路集合 P ;
目标:Maximize $|P|$;条件:无路由环路。

2 基于有向无环图的互联网域内节能路由算法

2.1 算法描述

为了在不影响报文转发过程的情况下最大程度地关闭网络中的链路,须解决两个方面的问题:1) 关闭哪些链路;2) 关闭链路后的重路由路径环路问题。

针对问题 1),基于链路的重要性进行升序排列,优先关闭链路重要性较小的链路。本文用式(1)来衡量链路 l 的重要程度,其中 $A(l)$ 表示链路 l 的重要性,该值越大则链路越重要; $B(l)$ 表示链路 l 的介数; $E(l)$ 表示链路 l 消耗的能量。

$$A(l) = \begin{cases} B(l), & \alpha = 1 \\ \frac{1}{E(l)}, & \alpha = 0 \\ \frac{\alpha B(l)}{(1-\alpha)E(l)}, & 0 < \alpha < 1 \end{cases} \quad (1)$$

针对问题 2),假设关闭链路 l ,则可以将链路从原来的拓扑结构中去掉,即 $G'=G-l$,然后在 G' 中重新计算路由。然而,这种方案的计算代价较大。为了降低算法的复杂度,本文利用无环路条件(Loop-free Condition, LFC)来解决该问题。

定义 1 在 $rSPT(v)$ 中,对于任意节点 $x \in V$,如果将链路 $(x,y) \notin rSPT(v)$ 加入 $rSPT(v)$ 后可以使 $rSPT(v)$ 转化为有向无环图 $DAG(v)$,则称链路 (x,y) 满足 LFC 条件;否则称该链路 (x,y) 不满足 LFC 条件。

当需要关闭链路 l 时,找出所有包含该链路的最短路径树,如果在这些所有最短路径树中都可以找到满足 LFC 的链路,则可以关闭该链路,否则不能关闭该链路。

2.2 算法的执行过程

算法 1 详细描述了 EEBDAG 的执行过程。对于网络中

的任意节点 $v_i \in V$, 构造以该节点为根的最短路径树, 并将其标记为 $A(v_i)$ (第 1-3 行)。根据链路的重要性公式计算网络中所有链路的重要程度, 并据此对链路进行排序, 然后将排序后的链路存储在优先级队列 Q 中, 同时初始化变量 P (第 4-5 行)。为了确定最终需要关闭的链路, 需要经历一系列的迭代过程: 首先从优先级队列 Q 中选择链路重要性最低的一条边 (u, v) , 将所有包含该边的 $A(v_i)$ 存储在集合 A 中 (第 7-14 行); 对于集合 A 中的任意 $A(v_i)$, 如果不存在链路 (u, w) (其中 $w \in Neighbor(u)$) 满足 LFC 条件, 并且在 $D(v_i)$ 中, 如果任意节点到节点 v_i 都是连通的, 则更新变量 $IsLFC$, $A(v_i)$ 和链路重要性 (第 17-21 行), 否则执行第 23 行; 对于集合 A 中的任意 $A(v_i)$, 如果存在链路 (u, w) (其中 $w \in N(u)$) 满足 LFC 条件, 则将所有满足 LFC 条件的链路加入到 $A(v_i)$ 中, 并且将变量 $IsLFC$ 修改为 1 (第 25-29 行); 如果变量 $IsLFC$ 的值为 1, 则可以在网络中删除链路 (u, v) , 并将其存储在变量 P 中, 根据式 (1) 重新计算链路的重要程度 (第 31-33 行)。

算法 1 EEBDAG

输入: 网络拓扑结构 $G=(V, e)$

输出: 关闭链路集合 P

```

1. For  $v_i \in V$ 
2.   构造  $spt(v_i)$ , 并将其标记为  $A(v_i)$ 
3. EndFor
4. 计算链路的重要性, 并按升序将链路存储在队列  $Q$  中
5.  $P = \text{null}$ 
6. While  $Q$  不为空 do
7.    $(u, v) = \text{ExtractMin}(Q)$ 
8.    $IsLFC = 0$ 
9.    $A = \text{null}$ 
10.  For  $v_i \in V$ 
11.   If  $(u, v) \in A(v_i)$  then
12.      $A = A \cup A(v_i)$ 
13.   EndIf
14. EndFor
15.  For  $A(v_i) \in A$ 
16.    $D(v_i) = A(v_i) - (u, v)$ 
17.   If 不存在链路满足条件 LFC
18.     If  $isConnect(D(v_i))$  then
19.        $IsLFC = 1$ 
20.        $A(v_i) = D(v_i)$ 
21.       更新链路的重要性
22.     else
23.       执行步骤 7
24.     EndIf
25.   else
26.     将所有满足 LFC 条件的链路加入  $A(v_i)$ 
27.     更新链路的重要性
28.      $IsLFC = 1$ 
29.   EndIf
30. EndFor
31. If  $IsLFC = 1$  then
32.    $P = P \cup (u, v)$ 
33. EndIf
34. EndWhile
    
```

2.3 算法举例

下面通过一个实例来解释上述算法。在图 1 中, 假设链路 (a, b) 消耗的能量为 2 W, 其余链路消耗的能量都为 1 W。构造以所有节点为根的反向最短路径树 $rSPT(a), rSPT(b), rSPT(c)$ 和 $rSPT(d)$ 。当 α 为 0.5 时, 链路 (a, b) 的重要性为 1, 其余链路的重要性为 2。因此, 首先考虑是否可以从网络中删除链路 (a, b) 。 $rSPT(a)$ 和 $rSPT(b)$ 包含链路 (a, b) , 在 $rSPT(a)$ 中, 如果删除链路 (a, b) , 则可以通过添加链路 (b, c) 和 (b, d) 将 $rSPT(a)$ 转化为 DAG (a) , 如图 4 所示。在 $rSPT(b)$ 中, 如果删除链路 (a, b) , 则可以通过添加链路 (a, c) 和 (a, d) 将 $rSPT(b)$ 转化为 DAG (b) , 如图 5 所示。因此, 可以在网络中删除链路 (a, b) 。

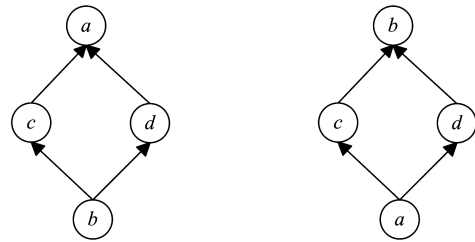


图 4 以节点 a 为根的有向无环图 图 5 以节点 b 为根的有向无环图

Fig. 4 Directed acyclic graph rooted at node a Fig. 5 Directed acyclic graph rooted at node b

2.4 算法复杂度分析

EEDBAG 算法需要维护一个优先级队列来保存网络中链路的重要性数值, 其存储空间为 $O(|E|)$, 因此该算法的空间复杂度为 $O(|E|)$ 。

EEDBAG 算法的第 1-3 行的时间复杂度为 $|V|O(|V| \lg|V| + |E|)$ 。另外, 该算法需要维护一个优先级队, 利用 ExtractMin 操作选取合适的边出队, 该操作的时间复杂度为 $O(\lg|V|)$, 判断网络连通性的时间复杂度为 $O(|V| + |E|)$, 因此算法第 6-34 行的时间复杂度为 $O(|V| \lg|V| + |E|)$ 。综上所述, EEDBAG 的时间复杂度为 $|V|O(|V| \lg|V| + |E|)$ 。相关文献^[11-12]表明, 拥有该时间复杂度的算法不会对目前互联网部署的路由器造成太大的负担, 因此该算法适合在互联网中实际部署。

3 实验

3.1 实验方法

实验中采用了多种拓扑结构, 包括 Rocket-fuel^[13] 的测量拓扑结构, 利用模拟软件 Brite^[14] 产生的拓扑结构。

1) 选择 Rocketfuel 拓扑结构中的 6 个作为实验拓扑, 其参数如表 1 所列。

表 1 Rocketfuel 的拓扑结构

Table 1 Topology of rocketfuel

AS 号码	AS 名称	节点数量	链路数量
1221	Telstra	108	153
1239	Sprint	315	972
1755	Ebone	87	162
3257	Tiscali	161	328
3967	Exodus	79	147
6461	Abovenet	128	372

2) Brite 拓扑的参数如表 2 所列。

表 2 Brite 生成拓扑结构的参数设置
Table 2 Parameters for Brite topology

模型	节点数量	HS	LS	链路节点比	NodePlacement	增长方式	alpha	beta	BWDist	BwMin-BwMax	模式
Waxman	1000	1000	100	2-10	Random	增量式	0.15	0.2	Constant	10.0-1024.0	路由器

3)线卡功耗

本文根据文献[15]设置不同线卡对应的功耗,并且假设线卡的功耗与流量无关[16]。不同类型的线卡的功耗如下:OC-3 的功耗为 60 W,OC-12 的功耗为 80 W,OC-48 的功耗为 140 W,OC-192 的功耗为 174 W。

4)流量矩阵

本文采用重力模型[17]产生流量,即:

$$f(x,y) = \frac{\sum_{z \in N(x)} c(x,z) \sum_{t \in N(y)} c(t,y)}{cost(x,y)^2}$$

其中, $f(x,y)$ 表示节点 x 和节点 y 之间的流量, $c(x,z)$ 表示链路 (x,y) 的带宽, $cost(x,y)$ 表示 x 到 y 的最短路径的代价。

5)评价指标

将节能比率和链路的平均利用率作为评价指标来对本文算法与 DLF 算法(Distributed Least Flow)[7]进行比较。DLF 采用贪心算法来确定可以关闭的链路集合,每次尝试关闭一条链路利用率最小的链路,直到无法关闭任何链路时为止。

基于 C++ 实现 DLF 和 EEBDAG,并利用 PC 机进行模拟实验,硬件配置为 CPU Intel i7,主频 1.7 GHz,内存 2 GB。每次实验中 α 的值为 0 到 1 之间的随机数,实验结果的最终值为 20 次计算结果的平均值。在计算链路利用率时,如果源节点到目的节点有多条路径,则采用 DEFT 方案[18]转发报文。

3.2 节能比率

本节采用节能比率来衡量不同算法节省的能耗。节能比率即为关闭的链路对应的网络能耗与网络总能耗的比值。图 6 给出了 DLF 算法和 EEBDAG 算法在 Brite 拓扑上的结果。从图中可以看出,EEBDAG 可以节省约 40% 的能量,并且基本不受拓扑规模的影响;DLF 在小拓扑结构中可以节省较多的能量,但是随着网络规模的增加,其节能效果迅速减弱。

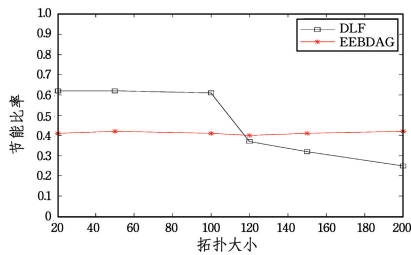


图 6 生成拓扑中的节能比率
Fig. 6 Energy saving ratio for generated topologies

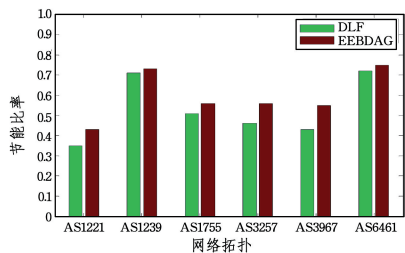


图 7 测量拓扑中的节能比率
Fig. 7 Energy saving ratio for measured topologies

图 7 描述了 DLF 算法和 EEBDAG 算法在测量拓扑上的结果。从图 7 可以看出,EEBDAG 可以节省 40% 以上的能量,节能效果优于 DLF。

接下来描述不同算法中流量对节能比率的影响。图 8 描述了在 Sprint 拓扑中最大链路利用率和节能比率的对应关系。从图 8 可以看出,EEBDAG 基本不受网络流量的影响,这是因为它没有考虑网络流量的因素。在链路利用率较低时,DLF 的节能效果明显优于 EEBDAG;而随着流量的增加,DLF 的节能效果迅速减弱。

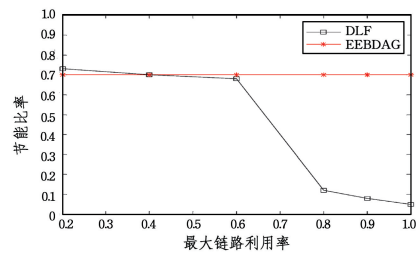


图 8 Sprint 拓扑中的节能比率
Fig. 8 Energy saving ratio for Sprint topology

3.3 链路利用率

本节通过链路利用率来评价不同算法对链路的利用情况。链路的利用率即为链路的实际负载与链路带宽的比值。图 9 描述了不同算法在 Sprint 拓扑中对应的链路利用率的分布结果。

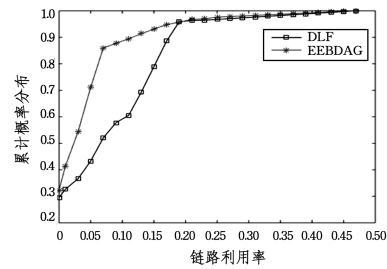


图 9 Sprint 拓扑中链路利用率的累计概率分布
Fig. 9 Cumulative probability distribution of link utilization on Sprint topology(CDF)

在 Sprint 拓扑结构中,EEBDAG 和 DLF 的节能比率相似,但是 DLF 的链路利用率明显高于 EEBDAG。这是因为,DLF 采用最短路径转发报文;而本文算法则采用多路径转发报文,可以很好地均衡网络中的流量。

结束语 本文提出了一种基于拓扑感知的节能算法,该算法利用链路的介数和能耗来确定链路的重要程度,利用 DAG 保证关闭链路后不会引起路由环路和网络性能下降等问题。实验结果表明,与 DLF 算法相比,本文算法不仅可以提供较好的节能效果,并且具有较低的链路利用率。

本文在计算链路的重要性时考虑了链路的介数和链路消耗的能量,下一步将研究如何加入更多的参数来衡量链路的重要性,从而得到最佳的节能效果;本文提出的 EEBDAG 是

一种近似算法,下一步将从理论上分析该算法与最优解之间的差距。

参考文献

- [1] The Climate Group. Smart 2020: Enabling the low carbon economy in the information age[R]. London, 2008.
- [2] LANGE C, KOSIANKOWSKI D, WEIDMANN R, et al. Energy Consumption of Telecommunication Networks and Related Improvement Options[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(2): 285-295.
- [3] CLARK D. The design philosophy of the DARPA internet protocols [C] // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 1988: 106-114.
- [4] FISHER W, SUCHARA M, REXFORD J. Greening backbone networks: reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links[C] // Proceedings of the First ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking. 2010: 29-34.
- [5] MINERAUD J, WANG L, BALASUB RAMANI A M S, et al. Hybrid renewable energy routing for ISP networks[C] // IEEE Conference on Computer Communications. 2016: 1-9.
- [6] YANG Y, WANG D, PAN D, et al. Wind Blows, Traffic Flows: Green Internet Routing under Renewable Energy [C] // IEEE Conference on Computer Communications. 2016.
- [7] CHIARAVIGLIO, LUCA, MELLIA M, et al. Minimizing ISP Network Energy Cost: Formulation and Solutions [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(2): 463-476.
- [8] LI Q, XU M, YANG Y, et al. Safe and Practical Energy-Efficient Detour Routing in IP Networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(6): 1925-1937.
- [9] ZHANG M, YI C, LIU B, et al. GreenTE: Power-aware traffic engineering [C] // IEEE International Conference on Network Protocols. IEEE Computer Society, 2010: 21-30.
- [10] KRIST P. Scalable and Efficient Multipath Routing: Complexity and Algorithms [C] // 2015 IEEE 23rd International Conference on Network Protocols (ICNP). IEEE, 2015: 376-385.
- [11] OHARA Y, IMAHORI S, METER R V, MARA. Maximum Alternative Routing Algorithm [C] // Proceedings of IEEE INFOCOM. 2009: 298-306.
- [12] KWONG K W, GAO L, ZHANG Z L, et al. On the feasibility and efficacy of protection routing in IP networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 19(5): 1543-1556.
- [13] SPRING N, MAHAJAN R, WETHERALL D, et al. Measuring isp topologies with rocketfuel [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 12(1): 2-16.
- [14] <http://www.cs.bu.edu/brite>.
- [15] Power Management for the Cisco 12000 Series Router [OL]. http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_0s/feature/guide/12spower.html.
- [16] CHABAREK J, SOMMERS J, BARFORD P, et al. Power-Awareness in Network Design and Routing [C] // INFOCOM 2008. 2008.
- [17] RAHMAN M M, SAHA S, CHENGAN U, et al. IP Traffic Matrix Estimation Methods: Comparisons and Improvements [C] // ICC 2006. 2006: 90-96.
- [18] XU D H, CHIANG M, REXFORD J. Link-state routing with hop-by-hop forwarding can achieve optimal traffic engineering [C] // INFOCOM 2008. 2008: 1717-1730.
- [18] BALAKRISHNAN P, THAM C K. Energy-Efficient Mapping and Scheduling of Task Interaction Graphs for Code Offloading in Mobile Cloud Computing [C] // IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing. IEEE, 2014: 34-41.
- [19] KOVACHEV D, YU T, KLAMMA R. Adaptive Computation Offloading from Mobile Devices into the Cloud [C] // International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications. IEEE, 2012: 784-791.
- [20] NIR M, MATRAWY A, ST-HILAIRE M. An energy optimizing scheduler for mobile cloud computing environments [C] // IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications Workshops. IEEE, 2014: 404-409.
- [21] BARBAROSSA S, SARDELLITTI S, LORENZO P D. Computation offloading for mobile cloud computing based on wide cross-layer optimization [C] // Future Network and Mobile Summit. IEEE, 2013: 1-10.
- [22] RUBIN P. [OL]. <http://orinanobworld.blogspot.de/2010/10/binary-variables-and-quadratic-terms.html>.

(上接第 99 页)

- [13] ZHANG W, WEN Y, WU D O. Collaborative Task Execution in Mobile Cloud Computing Under a Stochastic Wireless Channel [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(1): 81-93.
- [14] HUANG D, WANG P, NIYATO D. ADynamic Offloading Algorithm for Mobile Computing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(6): 1991-1995.
- [15] CHUN B G, IHM S, MANIATIS P, et al. Clone Cloud: elastic execution between mobile device and cloud [C] // Conference on Computer Systems. ACM, 2011: 301-314.
- [16] MAHMOODI S E, SUBBALAKSHMI K P, SAGAR V. Cloud offloading for multi-radio enabled mobile devices [C] // IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2015: 5473-5478.
- [17] MAHMOODI S E, UMA R N, SUBBALAKSHMI K P. Optimal Joint Scheduling and Cloud Offloading for Mobile Applications [J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2016, PP(99): 1.