

引用格式: 吴勇, 耿海军. 基于流量矩阵的节能路由研究[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(3): 82-86. [WU Yong, GENG Hai-jun. Research on energy-saving routing based on traffic matrix[J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(3): 82-86.]

基于流量矩阵的节能路由研究

吴 勇, 耿海军

(山西大学 软件学院, 山西 太原 030013)

摘 要: 随着互联网规模的日益扩大, 如何降低网络能耗, 已经成为亟待解决的一个科学问题. 当前已有的路由节能方案不同程度存在降低网络性能, 路由可用性和网络链路负载不均衡等诸多问题. 因此本文提出了一种基于网络流量矩阵的互联网路由节能算法. 该方法根据网络中的实时流量矩阵和最大链路利用率动态的关闭网络中的链路, 从而达到节能的目标. 实验结果表明, 该算法在保证网络效率基础上, 能够将网络链路利用率最小化, 同时降低网络能耗.

关键词: 绿色网络; 链路利用率; 流量矩阵; 节能算法

中图分类号: TP393.02

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2019)03-0082-05

Research on energy-saving routing based on traffic matrix

WU Yong, GENG Hai-jun

(School of Software Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

Abstract: With the expansion of the Internet scale, how to reduce the network energy consumption has become a scientific problem to be solved urgently. Current existing routing energy-saving solutions to different degrees exist to reduce the network performance, availability and uneven distribution of flow routing and other issues, so this paper proposes a Internet routing energy-saving algorithm based on traffic matrix. The method dynamically shuts down the links in the network according to the real-time traffic matrix and maximum link utilization so as to achieve the goal of energy saving. The experiment results show that the algorithm is based on the guarantee efficiency of the network, to minimize the network link utilization and energy consumption.

Key words: green network; flow matrix; link utilization; energy saving routing algorithm

1 引言

伴随着计算机网络技术的飞速发展, 当今社会已经全面步入信息化, 随着互联网规模日益扩大, 网络能耗问题越来越多的引起人们的重视. 计算机网络设备的能源消耗大约占全世界总能源消耗的 2%^[1]. 当前计算机网络面临着能耗高、效率低、链路利用率低等问题, 这些问题已经成为制约计算机网络进一步发展的瓶颈. 为了增强计算机网络可靠性, 从而使网络能够承受突发峰值负载, 传统的网络设

计是为网络系统提供超额资源配给, 进行网络结构冗余化设计. 据统计, 当前网络繁忙时最大平均链路利用率不足 30%, 很多网络空闲时利用率不足 5%, 并且绝大部分网络设备 7×24 h 全速工作^[2-3]. 因此为了使网络效率提高, 并且减少能量损耗, Gupta 等人首次提出互联网节能方案^[4], 即绿色网络的概念, 指出在今后的网络发展过程中, 网络节能的重要性. 通过研究网络节能技术, 优化网络节能机制, 最终实现绿色网络, 降低能耗的目标.

对于如何提高网络能效, 学界做了大量研究. 目

前的研究大致可归为两类:其一是在假设网络中的流量会持续增长的情况下,提升网络传输能力,提高网络能效,降低网络能耗;其二相反,假设网络中的流量增长的程度可能改变的情形下,实现网络高效率运行、提高网络能效,降低网络能耗. 对于第一类研究具体可以通过(1)升级网络中单一的硬件设备以及优化相应的配置策略,来提高网络传输能力和能效. 如高效率以太网(energy efficient ethernet, EEE)^[5,6]、自适应链路速率(adaptive link rate, ALR)^[7,8]等技术.(2)将网络中的设备和链路看成一个整体,通过设备和链路之间的协作来决定网络的能耗,典型的即能耗感知路由(energy aware routing, EAR)^[4,9-10].

当前,绿色节能网络的一个热门研究方向即能耗感知路由技术. 能耗感知路由技术是对资源进行整合,将整个网络流量合理分配到网络中的部分链路和设备上,进而关闭使用频率较少或空闲的链路和设备,实现网络节能,提高网络能效^[11].

本文在能耗感知路由技术基础之上,提出了一种基于流量矩阵的互联网路由节能算法(EEBTM, An Energy Efficient Routing Algorithm Based on Traffic Matrix)该算法的特点如下:

(1)计算网络中任一个结点到其它结点最短路径,从而保证网络的可用性(即保证网络中无断路和环路).

(2)按照网络链路利用率从小到大排序,每次剔除链路利用率最小的链路,从而降低能耗.

(3)该算法支持增量部署,其路由转发与现有的互联网域内路由协议的转发行为一致,因此具有实际的应用价值.

2 网络结构模型和问题分析

2.1 网络结构模型:

用无向图 $G = (V, E)$ 来表示网络, V 定义为网络中所有节点集合,网络中所有边(链路)^[12-13] 的集合用 E 定义. $(x, y) \in E$ 定义为网络中任意两个节点 x 与 y 之间的一条无向边,它表示在节点 x 和节点 y 之间存在一条路径即 x 与 y 连通.

举例说明该描述,图 1 表示由 4 个节点和 5 条边组成的一个网络拓扑. 每个边上的数值代表该边的代价. 图 2 是分别以 a, b, c, d 四个顶点为根生成的最短路径树.

2.2 问题分析

本文试图通过关闭网络中相关的一些链路来达

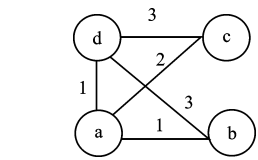


图 1 网络拓扑

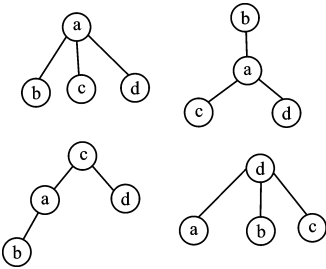


图 2 最短路径树

到降低网络能耗的目标,然而在进行链路关闭的时候就可能会出现诸如路由环路和路由中断^[14]等问题,这些问题都会直接或间接影响、降低路由的可用性和整个网络的性能,所以在删除链路,降低能耗的同时,还必须考虑对网络性能的影响.

从 2.1 节的例子可以看出,给定一个网络拓扑结构,就可以构造出以某节点为根的所有最短路径树^[15]. 本文主要研究已知一个网络拓扑图和流量矩阵的情况下,如何尽可能多的关闭该网络中链路利用率低的那些链路并且在关闭链路同时对网络性能的影响要最小化. 形式化描述该问题如下:

INPUT :网络拓扑图 $G=(V, E)$
OUTPUT: 将要关闭的链路集合 Q
TARGET: $\text{MAX}|Q|$
CONDITIONS: 链路利用率

3 算法

3.1 算法描述

为了使得关闭链路的数量最大化,而且不会影响数据包的转发. 该算法要对如下两方面的问题予以解决:

- (1)要关闭哪些链路.
- (2)关闭链路后流量重新分配的问题.

对于问题(1)按照网络链路利用率从小到大升序排序,关闭链路利用率最小的链路.

公式(1)用来描述链路 l 的链路利用率,该利用率用 $U(l)$ 表示. $U(l)$ 的大小直接代表链路利用率的高低,其值越大则链路利用率越高,越小则链路利用率越低, $F(l)$ 表示链路的流量, $B(l)$ 表示链路 l 的

带宽. 如式(1) 所示.

$$U(I) = F(I)/B(I) \quad (1)$$

对于问题(2) 关闭链路后, 要求经过该链路的流量最短路径重新分配, 且分配后网络拓扑的链路利用率不应大于 50%.

3.2 EEBTM 算法

构造以网络中的任意节点 $v_i \in V$ 为根的最短路径树记为 $T(v_i)$, 按照式(1) 计算该网络中所有链路的链路利用率, 并且根据链路利用率对链路从小到大排序, 将排序后的链路存储在优先级队列 M 中. 为了确定最终需要关闭的链路, 算法需要经历一系列迭代过程.

EEBTM 算法的伪代码描述如下:

Algorithm1EEBTM

Input: $G, \mathbf{N}$

其中 G 表示任意网络, $\mathbf{N}$ 表示流量矩阵.

Output: L

L 表示关闭链路集合

具体过程描述如下:

```

1: For  $e \in E$  do
2: 计算链路  $e$  的链路利用率  $u(e)$ 
3: EndFor
4: 将链路按照  $u(e)$  进行升序排序
5: 将排序后的链路存储在链表  $M$  中
6: While  $M$  is not empty do
7: 从  $M$  中取出第一个元素  $l$ 
8:  $M = M - \{l\}$ 
9:  $G' \leftarrow G(V, E - M)$ 
10: If connect( $G'$ ) then
11:  For  $e \in E$  do
12:  $u(e) \leftarrow \text{Compute}(e)$ 
13: End For
14:  If  $\forall u(e) < \theta$  then
15:   $L \leftarrow L \cup \{l\}$ 
16: else
17: 执行步骤 7
18:  End If
19:  End If
20: End While
21: return  $L$ 

```

该算法解释如下:

按照给定的网络拓扑图和流量矩阵, 使用式(1) 计算每条网络链路的链路利用率, 按链路利用率由小到大顺序排序, 将排序后的边存储在链表 M 中(算法第 1 ~ 5 行).

(1) 在链表 M 中选择链路利用率最小边 l , 进行

删除, 同时将边 l 从网络图 G 中剔除, 生成新的网络拓扑结构 G' (算法第 7 ~ 9 行);

(2) 判断新的网络拓扑是否连通 connect(G'), 如果网络连通, 则重新计算每条链路的链路利用率 $u(e), e \in E$ (算法第 10 ~ 13 行);

(3) 如果每条链路利用率 $u(e), e \in E$ 是在 50% 以下, 则该链路 l 可以删除, 将 l 添加到关闭链路集合 L 中(算法第 14 ~ 15 行). 否则将上述步骤(1) 中删除的边 l 加回到图 G 中, 执行步骤 7(算法第 17 行).

4 实验结果

本节将通过实验来评价算法 EEBTM 的性能, 并且与算法 Random^[16] 进行比较, 评价的度量包括节能比率, 路径拉伸度和链路利用率. 算法 Random 表示随机关闭网络中的链路. 比如一个网络中有 20 条链路, 并对这些链路进行 1 ~ 20 的编号, 利用 rand() 函数产生 1 ~ 20 的随机数, 然后每次关闭相应编号的链路, 在关闭链路的时候对网络连通性进行检测. 为了对不同算法的节能比率进行评价, 假设网络中的线卡主要包括四种类型: OC-3, OC-12, OC-48 和 OC-192, 它们消耗的能量分别为 60 Watts, 80 Watts, 140 Watts 和 174 Watts; 并且假设链路消耗的能量与流量无关. 我们选择在 Abilene^[17-18] 拓扑结构如图 3 运行上述两个算法, 之所以从大量的拓扑结构中选择这个作为实验拓扑, 是因为这个拓扑结构公布了真实的流量数据.

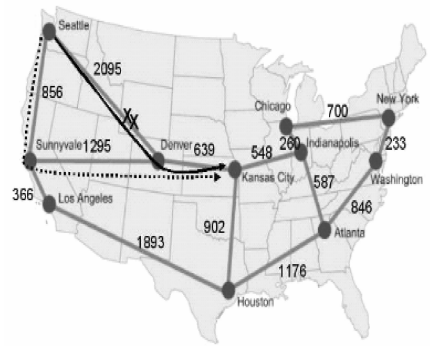


图 3 Abilene 拓扑结构图

(1) 节能比率

节能比率^[19] 可以定义为关闭链路节省的能量与网络中所有链路消耗的能量之比, 从该定义可以看出节能比率越大, 算法节省的能量越多. 图 2 描述了 EEBTM 和 Random 在拓扑 Abilene 中的实验结果. 实验中流量数据的采集时间是 2004 年 3 月 8 日凌晨 0 点, 横坐标的单位为秒. 从图 4 中可以看

出,EEBTM 的节能效果明显优于 Random 的效果,EEBTM 的节能比率不随时间的变化而变化,始终保持在 32%以上,Random 的节能比率随着时间的变化而变化。

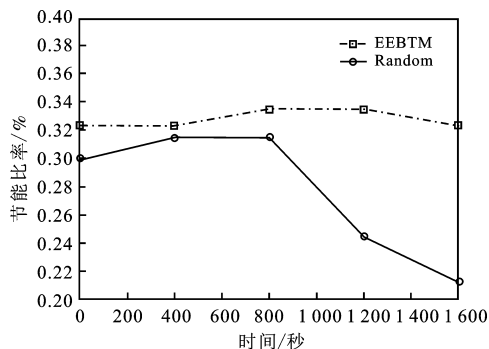


图4 节能比率随时间变化规律图

(2) 路径拉伸度

当运行节能算法时,网络中的部分链路将会被关闭。当关闭链路后,节点间的重路由路径的代价将会增加。路径拉伸度^[20]可以定义为重路由路径和最短路径代价的比值。利用 EEBTM 计算出的重路由路径可能会出现重复节点,导致路径拉伸度增加。因此,为了降低网络中节点之间的路径拉伸度,在实验中我们消除了重复路径。从图 5 可以看出 EEBTM 的路径拉伸度始终保持在 1.4 左右,Random 的路径拉伸度随着时间的变化而变化,并且其数值远远大于 EEBTM。

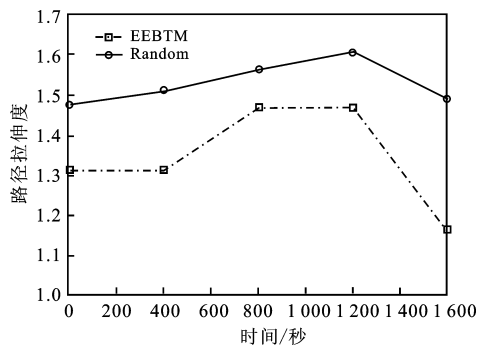


图5 路径拉伸度随时间变化规律图

(3) 链路利用率

本节通过最大链路利用率来衡量网络的性能。图 5 表示 EEBTM 和 Random 在拓扑 Abilene 中的链路利用率的实验结果。从图 6 可以看出,二者的最大链路利用率基本相似,但是在第 0 s 的时候 Random 的最大链路利用率达到了 52% 以上,而 EEBTM 仅仅为 14% 左右。

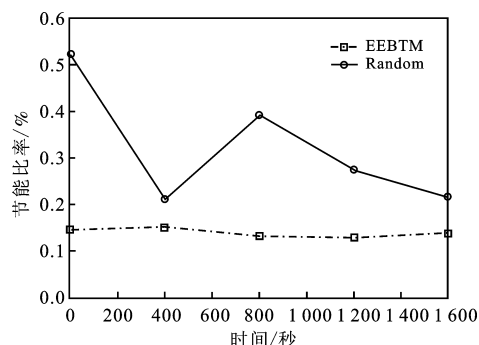


图6 链路利用率随时间变化规律图

5 结束语

本文提出一种基于流量矩阵网络节能算法,算法通过计算网络拓扑中每条链路的链路利用率以及保证网络质量的相关条件来决定要关闭的链路,并且在关闭过程中,不会出现路由中断与路由环路引起的网络性能大幅振荡等问题。文中最后通过实验与 Random 算法进行了对比,结果显示本文所提算法可以在保证网络质量前提下,得到较好的网络节能效果。本文在关闭链路时主要考虑的是链路利用率,下一步研究能否在关闭链路时加入其它链路参数以获得更好的节能效果。

参考文献:

- [1] WEBB M. Smart 2020: Enabling the low carbon economy in the information age[R]. London: The Climate Group, 2008.
- [2] 张法,王林,侯晨颖,等.网络能耗系统模型及能效算法[J].计算机学报,2012(35):603-615.
- [3] 周城新,网络节能算法研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2012.
- [4] GUPTA M, SINGH S. Greening of the internet[C]// Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. Karlsruhe, Germany, ACM, 2003: 19-26.
- [5] IEEE P802. 3az energy efficient Ethernet task force [EB/OL]. [2018-06-15]. <http://www.ieee802.org/3/az>
- [6] CHRISTENSEN K, REVIRIEGO P, NORDMAN B, et al. IEEE 802. 3az: The road to energy efficient Ethernet[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48 (11):50-56. doi: 10.1109/MCOM.2010.5621967
- [7] GUNARATNE C, CHRISTENSEN K, NORDMAN B, et al. Reducing the energy consumption of Ethernet with adaptive link rate (ALR) [J]. IEEE Trans. on

- Computers, 2008, 57(4):448461. doi: 10.1109/TC.2007.70836
- [8] VISHWANATH A, SIVARAMAN V, ZHAO Z, et al. Adapting router buffers for energy efficiency[C] // Proc. of the 7th Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM Press, 2011. doi: 10.1145/2079296.2079315
- [9] ADDIS B, CAPONE A, CARELLO G, et al. Energy management through optimized routing and device powering for greener communication networks[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2014, 22(1):313-325. doi: 10.1109/TNET.2013.2249667
- [10] BROWN DJ, REAMS C. Toward energy efficient computing[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(3):50-58. doi: 10.1145/1666420.1666438
- [11] ZHANG G Q. Research on green network theory and technology[J]. Journal of Software 2016, 27(3) 736-759.
- [12] FANG C, YU F R, HUANG T, et al. Energy-Efficient distributed in-network caching for content-centric networks[C]//Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications Workshops. Osnabrück, Germany, IEEE, 2014. 91-96.
- [13] SPRING N, MAHAJAN R, WETHERALL D, et al. Measuring isp topologies with rocketfuel [R]. Konstanz, Germany, University of Konstanz, 2004:2-16.
- [14] CHABAREK J, SOMMERS J, BARFORD P, et al. Power awareness in network design and routing[C]// The 27th Conference on Computer Communications, INFOCOM 2008. Phoenix, AZ, USA, 2008.
- [15] RAHMAN M M, SAHA S, CHENGAN U, et al. IP traffic matrix estimation methods: comparisons and improvements[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC 2006. Istanbul, Turkey, 2006:90-96.
- [16] LUCA C, MELLIA M, NERI F. Minimizing ISP network energy cost: formulation and solutions [C]// IEEE/ACM Transactions on Networking. Piscataway, NJ, 2012: 463-476.
- [17] XU D H, CHIANG M, REXFORD J. Link-state routing with hop-by-hop forwarding can achieve optimal traffic engineering [C]//INFOCOM 2008. Phoenix, AZ, USA, :1717-1730.
- [18] NETWORK A B. Advanced networking for research and education [EB/OL]. [2018-06-10]. <http://abilene.internet2.edu>, 2003.
- [19] 林闯, 田源, 姚敏. 绿色网络和绿色评价: 节能机制、模型和评价[J]. 计算机学报, 2011, 34(4):593-612.
- [20] CHIARAVIGLIO L, CIULLO D, MELLIA M, et al. Modeling sleep mode gains in energy-aware networks [J]. Computer Networks, 2013(57):3501.

作者简介:

吴 勇 男, (1981-), 硕士, 讲师. 研究方向为计算机网络. E-mail: wuyong@xsu.edu.cn.

耿海军 男, (1983-), 博士, 讲师. 研究方向为计算机网络.