

绿色主干网络中一种高效的节能路由算法

陈若宾¹⁾ 王兴伟¹⁾ 马连博¹⁾ 黄敏²⁾

¹⁾(东北大学软件学院 沈阳 110004)

²⁾(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

摘 要 随着互联网规模不断扩大,当前的网络为了能够支持最大的用户访问量并且能够同时保证服务质量,出现了过度供给的情况,正是这种过度供给的现象导致能耗问题日益严重.因此,以降低能耗为目标的绿色互联网的概念被提出,ICT部门也积极投身于相关研究工作当中.该文基于流量整合的思想,提出了一种高效的节能路由算法,具有节能效率高、节能效果好且不会使优化目标陷入局部最优的特点.该文首先对绿色互联网国内外的研究现状进行了综述和分析,通过对当前节能算法的分析,该文发现目前的一些节能算法容易陷入局部最优解,另外一些算法在寻路的过程中花费了大量时间.针对以上两个问题,该文基于捆绑链路设计了网络模型、功耗参数和数学模型,设计并实现了绿色互联网中的一种高效的节能路由算法.最后该文使用了CERNET2的网络拓扑和实际流量对算法进行了仿真实验和性能评价,并且与最短路优先算法、快速贪心启发式算法进行了对比.实验结果表明,该文设计的算法在真实流量需求下最多可以节省整个网络56.3%的能耗,在节能效果方面相比快速贪心启发式算法有较大幅度的提升,与最短路优先算法相比也有一定程度的提升,在运行时间和路由请求满足率方面也均明显优于快速贪心启发式算法和最短路优先算法.

关键词 绿色互联网;路由算法;捆绑链路;最短路优先算法

中图法分类号 TP18 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2018.02612

An Energy-Efficient Routing Algorithm in Green Networks

CHEN Ruo-Bin¹⁾ WANG Xing-Wei¹⁾ MA Lian-Bo¹⁾ HUANG Min²⁾

¹⁾(Department of Software, Northeastern University, Shenyang 110004)

²⁾(Department of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract In recent years, with the rapid development of internet technologies, the increasing demand of customers on the network causes the expanded scale of internet. Current networks are typically over-provisioned to support the maximum number of customers whilst meeting their Quality of Service. This redundant design, however, has led to greenhouse gas emissions, and the increasingly serious problem of energy consumption. Therefore, the concept of the Green Networks is proposed to save energy consumption. Currently, the study on Green Networks has been the focus of domestic and international attention. This paper firstly analyzes the research prospects of the Green Networks. We focus our problem on the routing algorithm in backbone based on bundle links. According to our scenarios, network model, parameters of power consumption and the mathematical model are designed. Through the analysis of the current algorithms, we find that some of current algorithms are easy to trap in local optimum which affects the energy conservation results while others cost lots of time on finding paths. Secondly, an energy-efficient

收稿日期:2017-11-06;在线出版日期:2018-07-06. 本课题得到辽宁省高校创新团队支持计划资助项目(LT2016007)、国家自然科学基金重点国际合作研究项目(71620107003)、国家杰出青年科学基金资助项目(71325002)、国家自然科学基金资助项目(61572123)、教育部-中国移动科研基金资助项目(MCM20160201)资助. 陈若宾,男,1994年生,硕士研究生,主要研究方向为绿色互联网、网络安全. E-mail: chenruobine@yeah.net. 王兴伟(通信作者),男,1968年生,博士,教授,博士生导师,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究领域为未来互联网、云计算、网络空间安全等. E-mail: wangxw@mail.neu.edu.cn. 马连博,男,1981年生,博士,教授,主要研究领域为智能优化算法与软件工程. 黄敏,女,1968年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为物流与供应链管理、智能算法设计与优化、调度理论与方法等.

routing algorithm is proposed. The algorithm considers the problem of shutting down a subset of bundled link during the off-peak period, and make part of the ports, line cards and chassis to sleep. The main idea of the algorithm is to route each requirement in order. In the process of finding path, we try to choose the occupied path to integrate the flow. Thirdly, the algorithm is improved by the routing strategy. The improved algorithm is fast while avoiding the shortcoming that the greedy algorithm is easy to trap in local optimum. After that, we analyze the time complexity of algorithm. It shows that the proposed algorithm has low time complexity, and can also be implemented easily. Finally, we evaluate our algorithm based on the CERNET2 network topology and the actual network traffic. The results show that the proposed algorithm can reduce the energy consumption of the whole network devices on CERNET2 topology by up to 56.3%. In order to better evaluate our algorithm, we choose the Shortest Single Path First algorithm and Fast Greedy Heuristic algorithm as comparison algorithms. Shortest Single Path First algorithm is a heuristic algorithm based on link bundling and the main idea is to close the cables in network iteratively until all the cable can not be closed. Fast Greedy Heuristic algorithm is a an excellent heuristic algorithm based on greedy algorithm. Compared with the Shortest Single Path First algorithm and Fast Greedy Heuristic algorithm, the proposed algorithm has better energy saving effect. Furthermore, it is better than the Shortest Single Path First algorithm in terms of the running time and the routing success rate.

Keywords green networks; routing algorithm; bundled links; Shortest Single Path First (SSPF)

1 引言

近年来,随着互联网的飞速发展,人们对网络的需求不断增加,导致互联网的规模不断扩大,网络的能耗问题也愈发严重,降低网络能耗已经成为人们的重要目标之一^[1]. VECC-MEP 机构在“2050 年减半世界碳排放”的报告中指出:2020 年世界碳排放量将会达到峰值.在 2009 年的哥本哈根气候峰会上,降低二氧化碳排放量成为了会议的首要讨论任务.中国作为一个发展中大国,承诺到 2020 年二氧化碳排放量比 2005 年下降 40%.于是,降低网络能耗、构建绿色网络不仅成为计算机领域一个重大问题,也成为了影响国家可持续发展的一个重要因素^[2-3].

当前的网络为了能够支持最大的用户访问量并且能够同时保证服务质量 QoS(Quality of Service),大多出现了过度供给的情况.例如,为了能够支持随时增加的网络功能并且满足平均每 18 个月就会增长 2.5 倍的网络流量需求^[4],一些高端的 IP 路由器使用了复杂的多架结构.然而这些高度工程化的网络链路大多是冗余的,当前主干网络中的链路冗余率大约在 30%~40%^[5].针对这些问题,很多学

者和机构开展了绿色互联网的相关研究.

文献[6]中最早提出了以降低网络能耗为目的的绿色互联网的概念.文献[5]中提到了美国的贝尔实验室倡导组建的“绿色沟通”联盟.为了降低网络功耗,电子电气工程师协会批准了 802.3az EEE 标准规范(Energy Efficient Ethernet).如果硬件设备支持该标准,就可以在互联网使用或者以太网活动处于空闲状态的时候降低网络连接两端的能耗,开始正常传输数据的时候则恢复正常供电,这样网络系统的总能耗就会下降,相同能耗下就可以部署更多的网络设施,提高整个网络的可扩展性.由此可见,构建绿色互联网对社会和网络的可持续发展将产生深远的影响.

文献[7-8]总结了目前国内绿色互联网中的节能策略,目前主流的节能策略主要有:低功率闲置策略、动态速率调节策略和捆绑链路策略.文献[9]中对目前 ICT 相关的节能方法进行了总结,常用的办法包括资源整合^[10]、选择性断开连接^[11]、虚拟化^[12]和比例计算^[13].在本文中,我们的研究主要使用了资源整合和选择性断开的节能方法.

在本文中,我们提出了一种高效的节能路由算法.它的核心思想是根据当前网络中的资源占用情况,在根据流量需求进行寻路时直接进行流量整合,

通过这种方式使尽可能多的网元设备处于空闲状态,进而使这些网元设备休眠,从而降低网络的总功耗.

本文在第 2 节简述绿色互联网中节能算法的研究现状;第 3 节介绍本文构建的网络、节点、链路以及能耗模型,并给出本文的优化目标;第 4 节介绍本文提出的算法;第 5 节对本文提出的算法进行性能评价;第 6 节对整篇文章进行总结.

2 相关工作

在本节中将简单介绍绿色互联网中节能算法的研究现状.

Gupta 等人是最早开始互联网节能的研究工作的,他们对网络设备进行了仔细研究,并且详细讨论了当其进入休眠状态时对整个网络的影响,进而针对有线局域网提出了节能方法,但由于骨干网络中包到达的间隙较短,所以他们的方法并不适用于主干网络^[5].

Vasic 和 Kostic 发明了一种既能保证和以前一样的流速,又能降低网络功耗的方法^[14],在他们的方法中借鉴了能源感知型流量工程的相关优化方法(既包括分布式协作优化方法,又包括集中式的优化方法).但是他们的方法假设了固定的端到端路径,缺乏灵活性,很难应用到实际当中.

文献[15]中提出了一种认知网络中的能源感知协议,但是这种方法也具有一定的局限性,只能应用在认知分组型网络中.在上述研究的基础上,Cuomo 等人提出了一种集中式算法,这种算法可以利用网络的代数连通性来寻找可以进入休眠状态的链路的集合^[16],但是这种面向拓扑的算法是一个计划性的操作,只能由网络管理员静态的完成(需要网络管理员定期的录入流量需求矩阵信息).

文献[17]的作者提出了一种域内的流量工程机制 GreenTF. GreenTF 可以在保证最大化链路利用率和最小化分组延迟的情况下,使尽量多的链路进入休眠状态,进而降低网络功耗.他们将整个问题进行了建模,提出了一种启发式算法,并使用了 AMPL/CPLEX 进行求解,但是他所考虑的网络中的链路是由单根光缆组成的,并且此算法求解时间较长.

文献[18]中认为网络中的核心路由器之间由一根或多根相互独立的光缆组成,这些光缆可以独立的进行开关,但是文献[18]中提到的算法由于需要经过多次迭代,时间复杂度高,消耗的计算资源多,

并不能达到高效节能的效果.

在本文中,我们针对文献[18]中出现的问题,设计了一种高效的节能路由算法.在本文提出的算法中,我们设计和文献[18]相同的捆绑链路,并且通过打开尽可能少的链路和路由器对网络中的流量进行路由的方式达到节能的效果.相比未添加任何节能策略的路由算法,本文算法大大降低了网络能耗;相比文献[18]中提出的算法,本文算法在最初寻路的过程中放弃了多次迭代的尝试,大大增加了算法的效率;相比文献[10]中提出的 OSPF 算法和传统的贪心算法,本文算法不会陷入局部最优的困境.

此外,本文路由算法需要一定的硬件支持.经研究表明,网络中的线卡和路由器的功耗和它们的负载有一定关系,但是有些网络设备功耗和负载关系较小^[19],因此本文参考了文献[18]的做法,假设了网络中的路由器和线卡的功耗和它们的负载无关,所以可以在它们不被利用时使它们进入休眠状态来降低整个网络的功耗.具有这样特点的网络元件在文献[18]中已有介绍,例如 Intel 公司提出了 OBASE-X 的概念——线卡可以迅速地由活跃状态(在这种状态下数据可以快速地传输)转换为闲置状态来降低能量^[20],这种概念在低利用率链路的节能方面有着很好的效果.本文中假设网络中的线卡具有上述的活跃和闲置状态.综上所述,本文设计了一种时间复杂度较低并且不易陷入局部最优解的高效路由算法,详细的算法流程将在第 3 节进行介绍.

3 问题描述

3.1 网络模型

本文建立的网络模型可以简化为连通图 $G(V, E)$. V 表示了图中顶点的集合,顶点代表了网络中的节点; E 表示了图中边的集合,边代表了网络中的链路(本文使用 CERNET2 网络拓扑结构为例进行仿真实验,如图 1 所示).

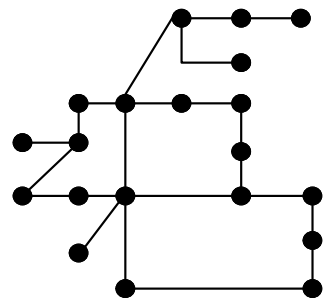


图 1 网络模型示意图

3.2 节点模型

由于文献[13]的应用场景与本文类似,所以本文参照文献[13]中第3部分的节点结构建立了节点模型. 本文的核心工作是路由算法设计,节点中的物理器件控制过程并非本文工作重点,故节点中物理设备的控制过程请读者参考文献[13].

本文的节点模型如图2所示,节点模型中主要包括了主控引擎,转发引擎,交换矩阵等. 主控引擎用来对整个路由器进行控制,在 主控引擎中包含一个休眠控制模块,休眠控制模块用于控制底架和端口,使它们在闲置状态下进入休眠状态. 主控引擎除了对路由表进行控制以外,还要对端口组转发表进行控制. 端口组转发表的作用是把所有连接相同的下一跳节点的端口分到一组,这样转发数据包的时候根据不同的下一跳节点转发给不同的端口组,从而加快转发的速度. 转发引擎用于完成数据的输入、存储与转发、报头分析、查询路由表等功能. 交换矩阵用于连接路由器内部输入和输出的端口.

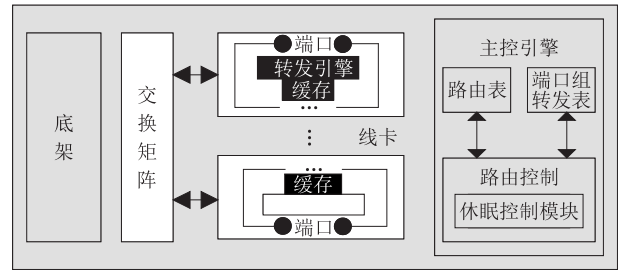


图2 节点模型示意图

3.3 链路模型

本文网络中的链路是捆绑链路,网络中的核心路由器之间由多根相互独立的光缆组成,这些光缆可以相互独立地进行开关.

光缆结构如图3所示,每根光缆中包含了前置光放大器、中继光放大器、光再生器、后置光放大器等. 前置光放大器用于提高光发射的功率,中继光放大器用于延长光信号的传输距离,光再生器用于对光信号进行修整,后置光放大器用于转换信号的功率.

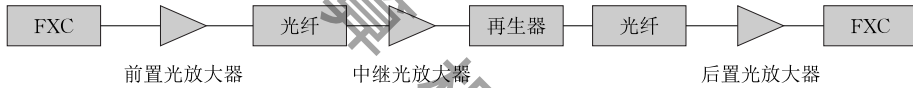


图3 链路模型示意图

3.4 目标函数

本节对绿色互联网中的能耗问题进行了建模. 目标函数如式(1)所示.

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^V (P_{\text{node}}^i \times NS_i) + \sum_{ij=1}^E (P_{\text{link}}^{ij} \times LS_{ij}) \right) \quad (1)$$

其中, P_{node}^i 为节点 i 的功率, NS_i 为节点 i 的开关状态, P_{link}^{ij} 为链路 ij 的功率, LS_{ij} 为链路 ij 的开关状态.

从式(1)中我们可以看出,本文的目标是使整个网络的功耗降到最低,即所有节点与链路的功耗总和降到最低. 接下来式(2)和(3)描述了节点和链路的功耗计算公式.

节点功耗计算公式如式(2)所示,式(2)表明,节点功耗由主控引擎功耗、底架功耗、线卡功耗和端口功耗组成. 其中,端口功耗与流量无关.

$$P_{\text{node}}^i = \left(P_{cl}^i + \sum_{k=1}^{N_{cs}^i} \left(P_{cs}^i \times CS_k^i + \sum_{l=1}^{N_{ld}^k} \left(P_{fw}^i \times LS_k^l + \sum_{p=1}^{N_{pt}^l} \left(P_{pt}^i \times PS_l^p \right) \right) \right) \right) \quad (2)$$

其中, P_{cl}^i 为核心路由器 i 中主控引擎的功耗, P_{cs}^i 为核心路由器 i 中一个底架的功耗, P_{fw}^i 为核心路由器

i 中转发引擎的功耗, P_{pt}^i 为核心路由器 i 中一个端口的功耗, N_{cs}^i 为核心路由器 i 中底架的数量, N_{ld}^k 为核心路由器 i 中底架 k 上的线卡数量, N_{pt}^l 为底架 k 的线卡 l 上端口的数量, CS_k^i 为核心路由器 i 中底架的状态, LS_k^l 为核心路由器 i 中线卡 l 的状态, PS_l^p 为底架 k 的线卡 l 上端口 p 的状态.

链路功耗计算公式如式(3)所示,式(3)表明,链路功耗由前置光放大器功耗、中继光放大器功耗、光再生器功耗和后置光放大器功耗组成. 并且链路功耗与链路上实际打开光缆的数目有关.

$$P_{\text{link}}^{ij} = (P_{\text{front}} + P_{\text{rep}} \times N_{\text{rep}}^{ij} + P_{\text{reg}} \times N_{\text{reg}}^{ij} + P_{\text{rear}}) \times a_{ij} \quad (3)$$

其中, P_{front} 为前置光放大器的功耗, P_{rep} 为中继光放大器的功耗, P_{reg} 为光再生器的功耗, P_{rear} 为后置光放大器的功耗, N_{rep}^{ij} 为链路 ij 上中继光放大器的个数, N_{reg}^{ij} 为链路 ij 上中继光放大器的个数, a_{ij} 为链路 ij 的开关状态.

4 路由算法设计

在这一部分,首先介绍了整个最短占用路径优

先算法的设计思想,然后给出了算法的流程,最后对算法进行了分析,其中包括了对算法的时间复杂度的分析.

4.1 算法设计思想

本文提出的算法为一种集中式算法.路由算法的主要设计思想如下:首先,在已知流量需求集合的前提下,对流量需求根据流量大小进行排序.对流量最大的需求优先进行路由,在路由第一条需求的时候,使用 Dijkstra 算法寻找最短路径.在路由下一条需求时,优先选择需要新打开光缆数目最小的路径,也就是说尽量选择之前已经走过的路径,通过这种方法来进行流量的整合,将那些网络中未被选择使用的端口和链路进行休眠,达到降低网络能耗的目的.

在寻路的过程中,会遇到两条候选路径需要新打开光缆数目相同的情况,此时使用不同的选路策略会对最终的寻路结果造成很大影响,相应的也会影响整个网络的功耗和路由请求满足率.本文算法在遇到这种情况时优先选择最短的路径,从而最大化的节省链路的容量,为其他流量需求寻路时提供更多的选择.

以上的做法有可能使算法陷入局部最优的窘境,因此,在算法的最后我们尝试打开一根光缆,判断是否可以在满足流量需求的前提下,通过打开这根光缆进而关闭更多光缆.通过这种方法使我们的算法跳出局部最优的情况.

4.2 算法流程

算法的流程如下:

最短占用路径优先算法(Algorithm SOPF)

输入:流量需求集合 D

输出:寻路结果集合 P

BEGIN

$P \leftarrow \emptyset, Dr \leftarrow \emptyset, TP \leftarrow \emptyset$ //initialize

(1) $Dr = \text{quicksort}(D)$;

//sort the demand set according traffic in descending order

(2) $p = \text{Dijkstra}(Dr.getfirst())$;

Store p into P ;

//Use Dijkstra to generate the first demand

(3) While ($Dr.hasNext()$) do

$d = Dr.getnext()$;

Find all the path to route d and store into TP ;

int N ; //minimum number of newly opened cables

While $|TP| > 0$

$tp = TP.getfirst()$;

Calculate newly opened cables number n ;

If p has enough capacity to route d then

If $n < N$

$p = tp$;

$N = n$;

End-If

Else if $n = N$

Choose the shortest path p ;

End-If

End-If

Else

Remove tp from TP ;

End-Else

End-While

Store p into P ;

End-While//restart step (3)

(4) $R \rightarrow$ closed cable set

While ($R.hasNext()$) do

$r = R.next()$;

Find n of cables that can be closed if r is opened;

If $n.number > 1$

Open r and close n ;

Else

Close r ;

End-While

End

我们在已知流量需求集合 D 的前提下,定义了用于装载寻路结果的集合 P ,用于装载排序后的需求集合 Dr 和用于装载临时路径的集合 TP ,算法的流程如图 4 所示.

在算法的第(1)步中对流量需求集合根据流量的大小进行了排序.为了更好地做到流量的整合,本文设计的算法选择了从流量最大的需求开始路由.

在算法的第(2)步中使用了 Dijkstra 算法对流量最大的需求进行路由.由于这是路由的第一条需求,所以网络中所有的光缆都没有被打开,这时候使用 Dijkstra 算法来选择最短路径进行路由,可以尽可能地打开光缆.

在算法的第(3)步中,我们需要判断在集合 D 中是否存在仍然没有被路由的需求.如果有,那么我们开始路由这条需求.首先,我们找到所有可以从需求的源节点到目的节点的路径,然后选出这些路径中有足够的剩余容量来路由这个需求的路径.最后在这些路径中选择需要新打开光缆数目最少的路径.如果多条路径需要新打开光缆数目相同则优先选择最短路径.通过这种方式,我们在为新的需求寻路时尽量选择之前其他需求已经使用的路径,达到

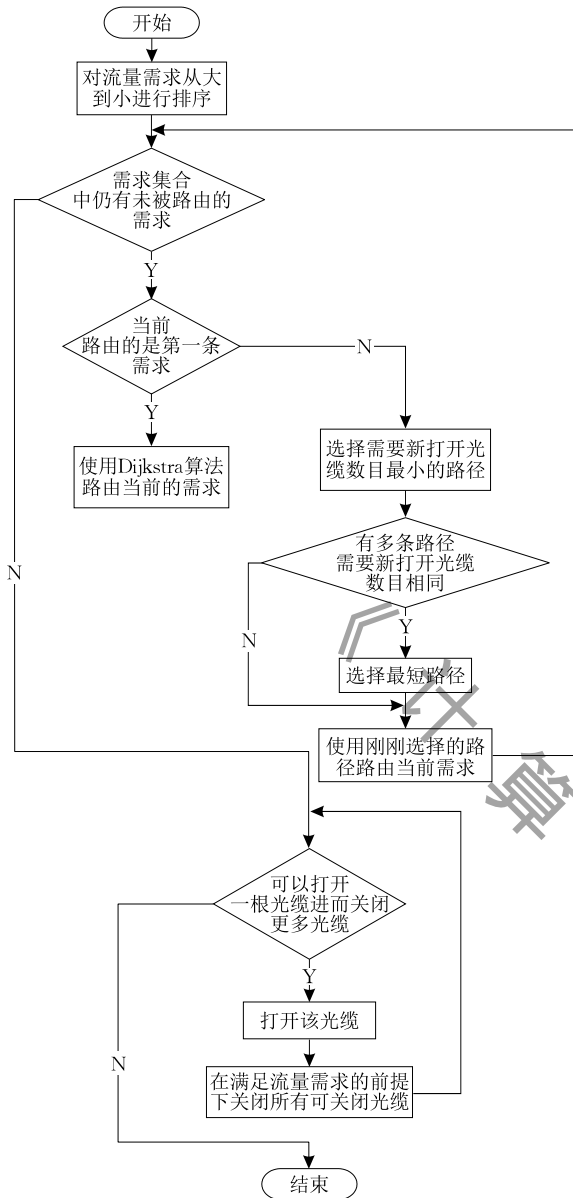


图4 最短占用路径优先算法流程图

流量整合的目的,从而在网络中使更多的光缆进行休眠,降低整个网络的能耗。

算法的前三步由于算法只考虑了当前的最佳选择,可能使本文定义的目标函数得到一个局部最优解,于是在第(4)步中我们尝试打开一根已经被关闭的光缆,判断能否因为打开了这一根光缆而可以关闭两根或以上的光缆,同时满足当前网络的流量需求。如果可以满足上述要求,我们便打开这根光缆,进而关闭更多光缆,达到降低网络能耗的效果。通过此方法,我们对所有已经关闭的光缆进行尝试,直至所有光缆都不符合我们打开它的要求,我们通过此方法使目标函数的解跳出局部最优的情况。

至此,整个算法结束。

为了使读者更清晰地理解本文提出的算法,本文将在这里举出一个简单的例子并使用本文算法进行路由。

假设网络拓扑结构如图5所示,包含0~10共11个节点,每条链路的容量为10,由两根完全相同的物理光缆组成,即每条光缆的容量为5。已知共有8条流量需求,分别为(0,2,4,2),(0,5,1.05),(0,6,0.95),(0,7,2.25),(0,10,8.5),(4,5,3.35),(4,6,4.35),(10,5,1.55)。接下来将使用本文算法进行路由。

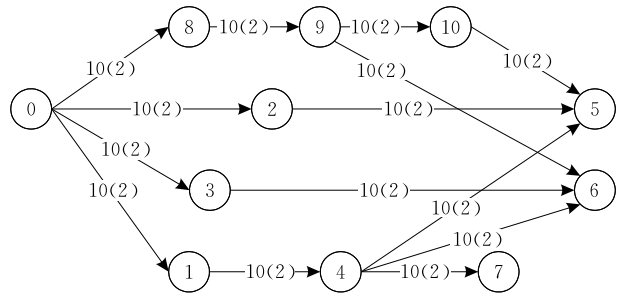


图5 网络结构示意图

最初,我们使网络中所有光缆处于关闭状态。算法的第(1)步中,我们对流量需求集合根据流量的大小由大到小进行排序。排序后得到的流量需求集合为{(0,10,8.5),(4,6,4.35),(0,2,4.2),(4,5,3.35),(0,7,2.25),(10,5,1.55),(0,5,1.05),(0,6,0.95)}。

在算法的第(2)步中使用 Dijkstra 算法对流量最大的需求进行路由,即对流量需求(0,10,8.5)进行路由,得到的寻路结果为(0,8,9,10)。由于需要通过的流量为8.5,每根光缆的容量为5,故将此路径经过的链路上分别打开 $8.5/5=2$ 根光缆,以满足流量需求。如图6所示,目前网络中已打开光缆的集合为{(0,8,2),(8,9,2),(9,10,2)}。

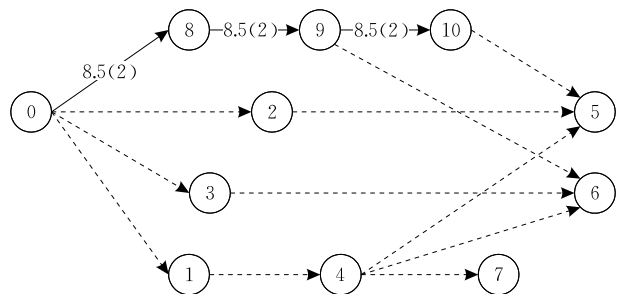


图6 SOPF第(2)步网络情况示意图

在算法的第(3)步中对流量需求集合中的需求按顺序进行路由。由于已经打开的光缆对第二条需

求(4,6,4,35)没有任何影响,故直接选择最短路径(4,6).同理第三、四、五、六条需求均可寻找最短路径,如图7所示,此时网络中已打开光缆的集合为 $\{(0,1,1), (0,2,1), (0,8,2), (1,4,1), (4,5,1), (4,6,1), (4,7,1), (8,9,2), (9,10,2), (10,5,1)\}$.此时对需求(0,5,1.05)进行路由,可以满足该流量需求的路径共有3条:(0,8,9,10,5)、(0,2,5)和(0,1,4,5).根据目前网络中的已打开光缆情况,路径(0,8,9,10,5)中(0,8)、(8,9)、(9,10)三条链路分别拥有 $10 - 8.5 = 1.5 > 1.05$ 的剩余容量,链路(10,5)拥有 $5 - 1.55 = 3.45 > 1.05$ 的剩余容量,故此路径需要新打开光缆数目为0;同理路径(0,2,5)需要新打开光缆数为1,路径(0,1,4,5)需要新打开光缆数为0.此时,本文算法优先选择需要新打开光缆数目最小的路径,即路径(0,8,9,10,5)或路径(0,1,4,5).由于出现了两条路径需要新打开光缆数目相同,故此时优先选择最短路径,即(0,1,4,5).接下来使用同样的方法对需求集合中的剩余需求进行路由.当所有需求路由完毕时,网络情况如图8所示,网络中已打开光缆的集合为 $\{(0,1,1), (0,2,1), (0,8,2), (1,4,1), (4,5,1), (4,6,1), (4,7,1), (8,9,2), (9,6,1), (9,10,2), (10,5,1)\}$.

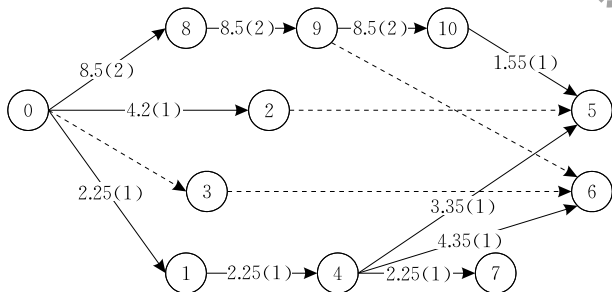


图7 SOPF第(3)步网络情况示意图(1)

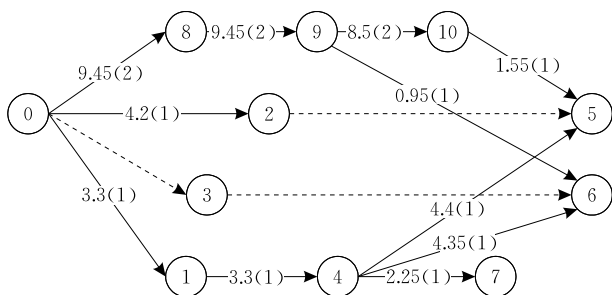


图8 SOPF第(3)步网络情况示意图(2)

在算法的最后一步中,本文算法尝试打开一根光缆,判断能否因为打开了这根光缆,进而关闭两根或更多的光缆,同时满足流量需求.然而在本文例子中,并不存在这样的情况.至此,整个算法结束,最终解决方案如图9所示.

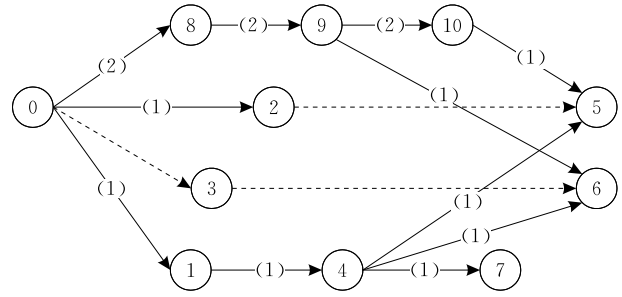


图9 SOPF最终方案示意图

4.3 时间复杂度分析

在算法的第(1)步中我们对所有流量需求进行了排序.我们使用了快速排序,时间复杂度理想情况下为 $O(|D| \times \log |D|)$,最差情况下是 $O(|D|^2)$.我们设 m, n 分别代表网络中的链路数和节点数,则有 $|D| < n \times (n-1)$,则第(1)步的时间复杂度最坏情况下为 $O(n^4)$.在算法的第(2)步中,由于我们只是对第一条需求进行了路由,所以在这里不计算它的时间复杂度.算法的第(3)步中,我们对每条需求选择了打开光缆数最少的路径,时间复杂度为 $O(D \times mn^2 \log n)$.算法的第(4)步中我们考虑已关闭光缆集合为 R ,则时间复杂度为 $O(R \times n^2 (m + \log n))$.所以,该算法的时间复杂度在最坏情况下可表示为 $O(n^4 + mn^4 \log n + R \times n^2 (m + n \log n)) = O(mn^4 \log n)$.SSPF算法的时间复杂度在最坏情况下可表示为 $O(mn^3 (m + n \log n))$ ^[18].故在时间复杂度上,本文算法相比SSPF算法有所降低.文献[18]中指出SSPF算法无法直接与快速贪心启发式算法(FGH)进行时间复杂度的比较,因为在FGH中使用了AMPL^①.本文情况与SSPF算法类似,故也无法与FGH算法在时间复杂度上进行比较.通过时间复杂度的分析,我们发现SSPF和本文算法的路由算法耗时都与流量需求集合的大小相关,并且在实验(详见5.5.2节)中我们发现本文算法和SSPF算法耗时均明显低于FGH算法.

5 性能评价

5.1 仿真环境

本文的系统开发环境如下:

硬件配置: Intel i5 处理器, 4 GB 内存;

操作系统: ubuntu;

① AMPL/CPLEX. <https://ampl.com/products/ampl>

仿真平台：NS-3；
开发语言：C++。

5.2 拓扑用例

仿真平台网络拓扑结构如图 1 所示,20 台原型路由器的拓扑参照 CERNET2 网络拓扑结构部署。

5.3 测试数据集

为了保证仿真实验的真实性与可靠性,本文选择在仿真实验中使用 CERNET2 的真实流量和在 CERNET2 真实流量的基础上加以处理的人工合成流量作为流量需求。

本文测试数据集的获取过程如下:首先获取了记录 2014 年 5 月 21 日 12 时 40 分 36 秒、2014 年

5 月 21 日 13 时 40 分 37 秒、2014 年 5 月 21 日 14 时 40 分 37 秒、2014 年 5 月 21 日 15 时 40 分 37 秒这四个时间的 CERNET2 的实际全网流量情况的 nfcapd 格式文件(测试数据共 16.2 GB)。接下来,将 nfcapd 格式的文件分别导入 NFDUMP 软件进行解析,获取了网络中的流量信息,如图 10 所示。然后,根据已知的 CERNET2 中所有节点的 IP 地址前缀,对导出的流量进行处理,便得到了 txt 格式的流量集合文件。然后在仿真程序中,读取已经处理好的 txt 格式文件,使用字符串分隔的相关方法,将文件中的流量需求导入到相应的需求数据结构中,便得到了流量需求集合 1。

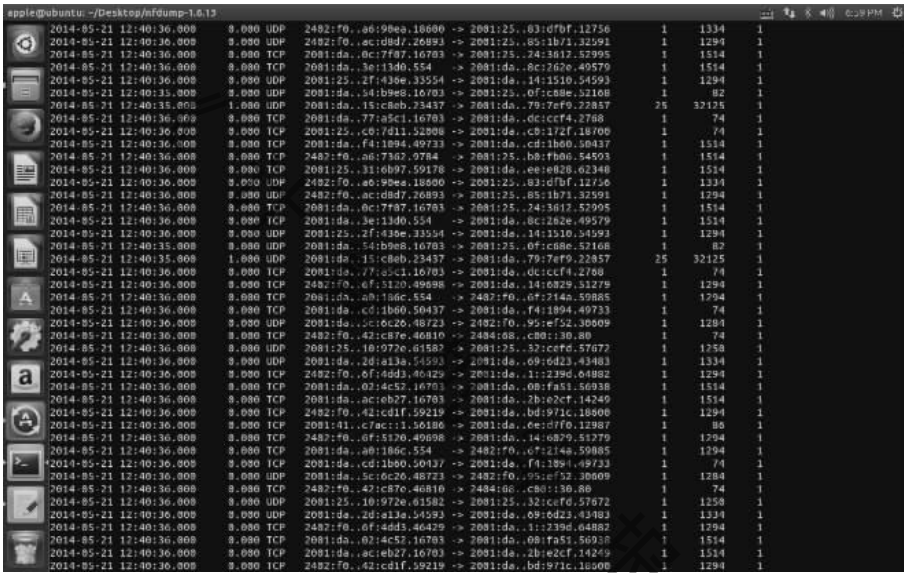


图 10 网络流量解析截图

在测试中发现,所得到的流量需求集合 1 的流量(此处流量并非指网络中的原始流量,而是经过聚合整理后的网络流量)具有以下特征:流量需求的个数较多且相应的每条需求的流量较小。这样的流量需求集合有一定的局限性,为了测试算法在不同特点的流量需求下所表现出的特性,本文的仿真实验中对 CERNET2 的真实流量进行了人工处理,使用人工合成流量生成了需求集合 2。对流量需求的处理过程如下:在真实流量的基础上,随机抽取个数为原流量集合的 1/10 的流量作为新的流量集合。被抽取到的相应的需求的流量都增长为原来的 10 倍。

5.4 对比算法

为了更准确地评价本文设计的绿色互联网路由算法,除了与不添加任何节能策略的 Dijkstra 算法进行网络功耗的比较以外,本文还选择了 FGH 算法以及 SSPF 算法作为对比算法(由于 SSPF 算法

包括 SSPF-1、SSPF-2 以及 SSPF-R 三个衍生版本,此处选择 SSPF-1 算法作为对比算法,此后简称 SSPF)。

SSPF 算法是文献[18]中提出的一种基于捆绑链路的能量感知型路由的高效启发式算法。在算法中使用了流量工程的方法对网络中的流量使用最少数目的光缆进行重路由。因为主干网中的路由器和路由器上的线卡的功耗和经过它们的流量无关,所以算法尽可能地关闭了所有利用率较低的路由器和线卡来降低功耗^[21]。

SSPF 算法的主要思想是:在已知流量需求集合的前提下,对网络中的流量进行整合。首先对所有流量需求使用 Dijkstra 算法进行寻路,然后关闭网络中的冗余链路。判断一条链路是否为冗余链路的方法是:只要网络中的剩余链路有足够的剩余容量来满足所有的流量需求,那么这条链路就可以被

视为冗余链路,该链路便可以被关闭。

5.5 实验结果分析

本文经过仿真实验,得到了以下实验结果,并且分别从全网功耗、路由算法耗时和路由请求满足率 3 个方面对本文中设计的算法进行了评价。

仿真中使用的参数参考思科 12000 系列路由器和文献[13]进行设置,如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	取值
节点中主控引擎功耗	356 W
节点中机架基础功耗	100 W
节点中转发引擎功耗	446 W
节点中线卡存储器功耗	12 W
节点中单个端口基准功耗	150 W
节点中机架架数目	4
节点中线卡数目	4
节点中端口数目	4
参考链路长度	80 km
参考链路基准功耗	1 kW

5.5.1 网络功耗

在流量需求为需求集合 1 的情况下,本文分别测得了使用 Dijkstra 算法、FGH 算法、SSPF 算法、SOPF 算法进行寻路后的整个网络功耗情况(网络功耗计算公式详见 3.4 节),如图 11 所示。

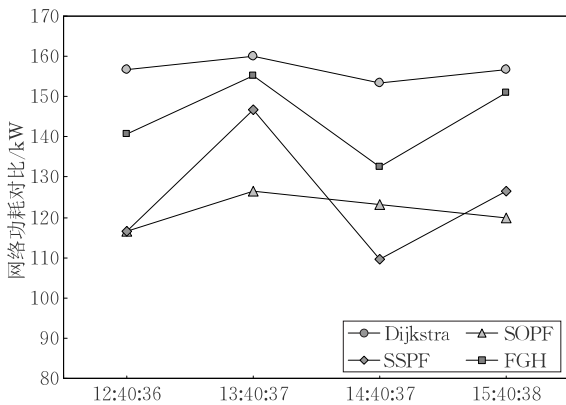


图 11 网络功耗对比图(流量集合 1)

从图中可以看出,端点为三角形的曲线所代表的本文设计的 SOPF 算法的功耗与 Dijkstra 算法相比功耗有着明显的降低,与 FGH 算法相比也有着更优秀的节能效果。与 SSPF 算法相比,本文算法在大部分情况下节能效果优于 SSPF 算法,且平均功耗也低于 SSPF 算法。出现这种情况的原因是对比算法 SSPF 所使用的贪心算法的思想在这种特点的流量需求下使它容易陷入局部最优的情况,而本文算法的最后一步可以使算法跳出局部最优解的情况,因此本文所设计的算法会有更好的节能效果。

在流量需求为需求集合 2 的情况下,分别测得了使用 Dijkstra 算法、FGH 算法、SSPF 算法、SOPF 算法进行寻路后的整个网络功耗情况,如图 12 所示。

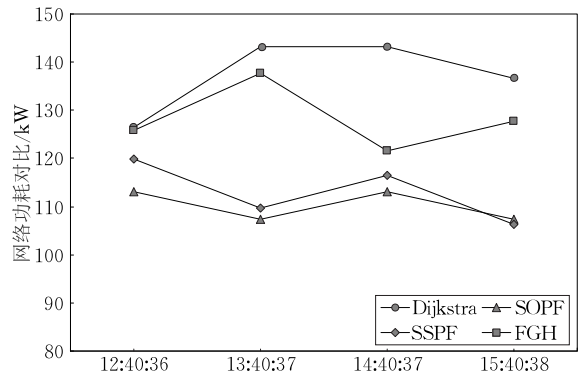


图 12 网络功耗对比图(流量集合 2)

从图中可以看出,在这种特点的流量需求下,本文设计的 SOPF 算法功耗相比 Dijkstra 算法和 FGH 算法功耗仍然有明显的下降,并且平均功耗低于对比算法 SSPF。相比流量需求集合 1,本文算法的节能效果更好。

从以上两组实验中得出结论:本文算法的节能效果可最多节约全网 56.3% 的能耗。相比 Dijkstra 算法和 FGH 算法,本文算法都有较大幅度的节能效果提升,与 SSPF 算法相比也有更好的节能效果。并且在不同特点的流量需求集合下,本文的实验得出了类似的结果,即 SOPF 算法具有更出色的节能效果。

5.5.2 路由算法耗时

本文在两种流量需求下分别测量了 SOPF 算法、SSPF 算法和 FGH 算法的路由算法耗时,如图 13 和图 14 所示。由于本文设计的算法中直接对网络中的流量进行整合分配,减少了迭代的尝试关闭链路的次数,所以运行时间明显减少。从图中可以明显看出,本文设计的 SOPF 算法的运行时间明显低于 SSPF 算法,这也验证了本文 4.3 节中得出的结论。

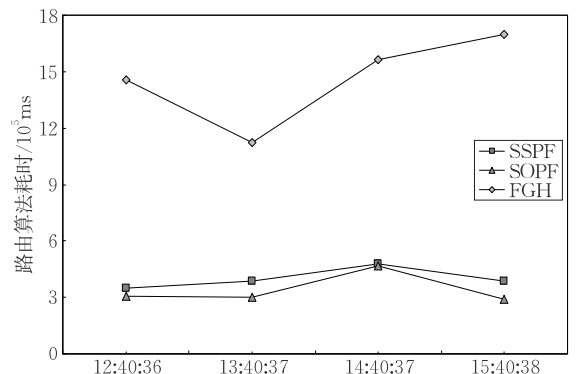


图 13 运行时间对比图(流量集合 1)

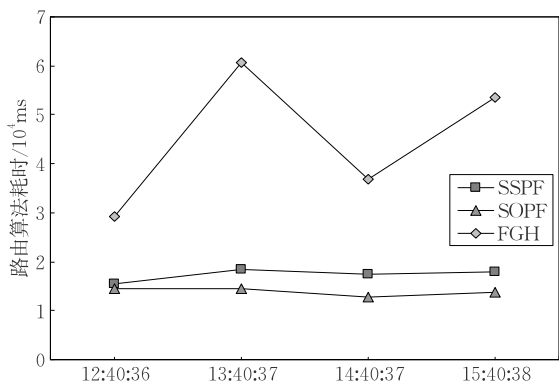


图 14 运行时间对比图(流量集合 2)

5.5.3 路由请求满足率

随着业务数量个数的增加和需求流量的增大,路由请求的满足率会不断下降.为了测试算法的健壮性,本文还对路由请求满足率进行了测试.

路由请求满足率定义如下:

$$R_{\text{succ}} = \frac{N_{\text{succ}}}{N_{\text{total}}} \times 100\%$$

其中, R_{succ} 为路由请求满足率, N_{succ} 为可以被成功路由的需求个数, N_{total} 为流量需求集合中的需求总个数.

测试结果如图 15 所示,我们可以看出,随着需求数量的增加,网络资源逐渐显现不足,不能为所有需求找到合适的路径,路由成功率逐渐降低.从图中可以看出, SOPF 算法的路由成功率高于 SSPF 算法,这是因为 SSPF 算法聚集流量至同一链路上,导致该链路占用资源过多,而 SOPF 算法的聚集过程相对分散,当有大量请求到来时,网络资源可能不够用,路由成功率随之降低.

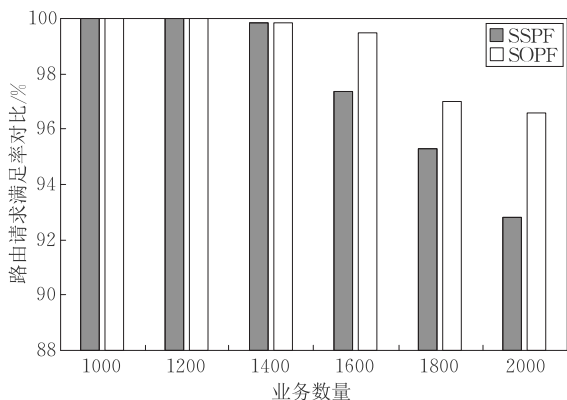


图 15 路由请求成功率对比图

6 结束语

本文在对当前绿色互联网节能机制和策略研究

的基础上,通过对现有节能路由算法的分析,发现当前算法普遍存在易陷入局部最优或算法耗时长等缺陷.针对以上问题,本文综合运用了绿色互联网中的睡眠-唤醒节能机制和捆绑链路节能机制,加入流量整合的思想,设计了绿色主干网络中的一种高效的节能路由算法.本文算法在寻路过程中直接进行流量整合,解决了算法耗时长的问题;在算法的最后增加了全局最优优化,解决了算法易陷入局部最优的问题.综上所述,本文提出了绿色主干网络中的一种具有节能效率高、节能效果好并且不易陷入局部最优的路由算法.

本文使用了流量采集解析软件,解析出 CERNET2 网络中 2014 年 5 月 21 日下午的真实流量,通过仿真实验对本文设计的 SOPF 算法进行了评价,得出以下结论:在运行时间和路由请求满足率两方面, SOPF 算法要优于 SSPF 算法;在网络功耗方面,若流量集合中需求个数较多但流量较小, SOPF 可以保证在大部分时间功耗低于 SSPF 算法,但是功耗降低程度并不十分明显;若流量集合中需求个数较少但流量较大, SOPF 的功耗会在大部分时间低于 SSPF 算法,并且功耗降低程度较为明显.

本文的仿真实验中发现,针对不同特点流量需求采取不同的路由顺序可以影响网络功耗,在流量需求个数较少但每个需求的流量较大时,优先路由流量大的需求网络功耗更低;在流量需求个数较多但每个需求的流量较小时,优先路由流量小的需求网络功耗更低,但是究竟如何根据流量需求集合定量地判断使用哪一种路由顺序仍然是有待进一步考虑的问题.

当前的节能策略可以分为集中式和分布式两种模式.集中式管理策略需要获取网络拓扑的全局信息,各个网元之间并不需要互相配合,只需要由中心管理设备根据全局信息进行分析并作出决策,进而向各个网元下达命令.这种管理策略的优点在于有利于根据全局信息作出全局最优的决策,但是它的缺点也较为明显:首先抗攻击性较差,一旦核心控制器被攻击,整个系统便会处于瘫痪状态;其次,若网络规模较大,则控制器的计算负担便会大大加重,加重信息获取的滞后性;最后,若网络场景经常发生变化,集中式管理策略也很难进行快速应对.综上,集中式管理策略仅在主干网络中较为适用,但主干网也不是一成不变的,若发生网络变化或者网络拓扑结构数据较大时,集中式策略便会暴露它的不足之

处,如何解决这些不足之处,可以作为未来的研究方向.

此外,绿色互联网的节能方法分为基于静态方法和动态方法.本文所研究的算法是基于静态方法的,本文默认了已知网络流量需求的前提.考虑本文算法在网络需求动态地进行变化时的应对策略可以作为下一步工作.

致 谢 感谢匿名审稿专家和编辑们对本文提出的宝贵意见和建议!

参 考 文 献

- [1] Idzikowski F, Chiaraviglio L, Cianfrani A, et al. A survey on energy-aware design and operation of core networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 18(2): 1453-1499
- [2] Lin Chuang, Tian Yuan, Yao Min, et al. Green network and green evaluation: Mechanism, modeling and evaluation. *Chinese Journal of Computers*, 2011, 34(4): 593-612 (in Chinese)
(林闯, 田源, 姚敏. 绿色网络和绿色评价: 节能机制、模型和评价. *计算机学报*, 2011, 34(4): 593-612)
- [3] Zhang Fa, Antonio Fernandez Anta, Wang Lin, et al. Network energy consumption models and energy efficient algorithms. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(3): 603-615 (in Chinese)
(张法, Antonio Fernandez Anta, 王林等. 网络能耗系统模型及能效算法. *计算机学报*, 2012, 35(3): 603-615)
- [4] Bianzino A P, Chaudet C, Rossi D, et al. A survey of green networking research. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 14(1): 3-20
- [5] Kim Y M, Lee E J, Park H S, et al. Ant colony based self-adaptive energy saving routing for energy efficient Internet. *Computer Networks the International Journal of Computer & Telecommunications Networking*, 2012, 56(10): 2343-2354
- [6] Gupta M, Singh S. Greening of the internet//*Proceedings of the 2003 ACM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*. Karlsruhe, Germany, 2003: 19-26
- [7] Lee S S W, Tseng P K, Chen A. A distributed link management algorithm for energy efficient IP networks//*Proceedings of the Global Telecommunications Conference*. Houston, USA, 2011: 1-5
- [8] Wang X, Zhang J, Huang M, et al. A green intelligent routing algorithm supporting flexible QoS for many-to-many multicast. *Computer Networks*, 2017, 126: 229-245
- [9] Mineraud J, Wang L, Balasubramaniam S, et al. Hybrid renewable energy routing for ISP networks//*Proceedings of the IEEE INFOCOM 2016—The IEEE International Conference on Computer Communications*. San Francisco, USA, 2016: 1-9
- [10] Cianfrani A, Eramo V, Listanti M, et al. An energy saving routing algorithm for a green OSPF protocol//*Proceedings of the INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops*. San Diego, USA, 2010: 1-5
- [11] Bolla R, Bruschi R, Cianfrani A, et al. Enabling backbone networks to sleep. *Network IEEE*, 2011, 25(2): 26-31
- [12] Barroso L A, Hölzle U. The case for energy-proportional computing. *Computer*, 2007, 40(12): 33-37
- [13] Zhang Jin-Hong, Wang Xing-Wei, Huang Min, et al. A distributed topology management scheme for energy saving in green Internet. *Chinese Journal of Computers*, 2017, 40(7): 1517-1529 (in Chinese)
(张金宏, 王兴伟, 黄敏等. 绿色互联网中面向节能的分布式拓扑管理机制. *计算机学报*, 2017, 40(7): 1517-1529)
- [14] Vasic N, Kostic D. Energy-aware traffic engineering//*Proceedings of the International Conference on Energy-efficient Computing & Networking*. New Delhi, India, 2010: 169-178
- [15] Mahmoodi T. Energy-aware routing in the cognitive packet network. *Performance Evaluation*, 2011, 68(4): 338-346
- [16] Cuomo F, Cianfrani A, Polverini M, et al. Network pruning for energy saving in the Internet. *Computer Networks: The International Journal of Computer & Telecommunications Networking*, 2012, 56(10): 2355-2367
- [17] Zhang M, Yi C, Liu B, et al. GreenTE: Power-aware traffic engineering//*Proceedings of the IEEE International Conference on Network Protocols*. Kyoto, Japan, 2010: 21-30
- [18] Lin Gongqi. Efficient heuristics for energy-aware routing in networks with bundled links. *Computer Networks*, 2013, 57(8): 1774-1788
- [19] Vishwanath Member A, Hinton K, Ayre R W A, et al. Modeling energy consumption in high-capacity routers and switches. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(8): 1524-1532
- [20] Liu B, Ren F, Lin C, et al. Performance analysis of sleep scheduling schemes in sensor networks using stochastic Petri net//*Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*. Beijing, China, 2008: 4278-4283
- [21] Wang X, Qu D, Huang M, et al. Multiple many-to-many multicast routing scheme in green multi-granularity transport networks. *Computer Networks*, 2015, 93(P1): 225-242



CHEN Ruo-Bin, born in 1994, M. S. candidate. His current research interests include green networks and cyber-security.

WANG Xing-Wei, born in 1968, Ph.D., professor, Ph.D. supervisor. His current research interests include

future Internet, cloud computing and cyber-security.

MA Lian-Bo, born in 1981, Ph. D., professor. His current research interests include intelligent optimization algorithm and software engineering.

HUANG Min, born in 1968, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. Her current research interests include intelligent algorithms design and optimization, scheduling theories and methods, etc.

Background

With the rapid development of internet, people's demand on the network is increasing and it causes the scale of internet has been expanded. The power consumption issue of the Internet has become one of the hottest research topics concerned by ICT(Information and Communication Technology) academy and industry in recent years.

This paper firstly analyzes the research prospects of the Green Networks, and then, network model, parameters of power consumption and the mathematical model are designed. Secondly an energy-efficient routing algorithm is proposed. The algorithm considers the problem of shutting down a subset of bundled link during the off-peak period, and make part of the ports, line cards and chassis to sleep. Finally, the

algorithm is evaluated on the CERNET2 network topology and the actual network traffic. The results show that the proposed algorithm can reduce the energy usage of the whole network devices on CERNET2 topology by up to 56.3%.

This work is supported by the Program for Liaoning Innovative Research Term in University under Grant No. LT2016007, the Major International (Regional) Joint Research Project of NSFC under Grant No. 71620107003, the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China under Grant No. 71325002, the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 61572123, the MoE and China Mobile Joint Research Fund under Grant No. MCM20160201.