

互联网路由设备与协议节能研究综述

商云飞^{1,2,3}, 徐明伟^{1,3}, 李 丹^{1,3}

(1. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084; 2. 91655 部队, 北京 100036; 3. 清华信息科学与技术国家实验室(筹), 北京 100084)

摘 要: 当前互联网规模正随着用户数量的快速增长和网络应用的不断丰富而迅速扩大. 互联网在追求高性能和高可靠性目标的同时带来了巨大能耗和能量使用低效等新问题, 不但增加了互联网运营成本、制约其规模扩展, 而且其碳足迹的快速增长加剧了对环境的破坏影响, 为此研究人员已经提出了多种应用于互联网的节能技术. 本文首先概述互联网节能的意义、可行性以及研究范围; 之后聚焦于互联网路由设备节能技术和节能路由协议, 对其中典型的方案进行综述、分析和比较; 同时给出路由设备能耗模型, 并利用权衡分析手段来指导互联网路由设备和协议的节能研究; 最后结合当前研究存在的问题和难点, 指出该领域下一步研究的重点与方向.

关键词: 路由设备节能技术; 节能路由协议; 能耗模型; 数据中心网络

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 11-2290-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.11.023

Research on Energy-Saving Routing Devices and Protocols in the Internet

SHANG Yun-fei^{1,2,3}, XU Ming-wei^{1,3}, LI Dan^{1,3}

(1. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;

2. Force 91655, Beijing, 100036, China; 3. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (TNList), Beijing 100084, China)

Abstract: Along with the expansion of Internet users and the innovation of Internet applications, the scale of the Internet increases rapidly. High performance and reliability requirements of the Internet will bring in the huge power consumption and inefficient energy usage, which increases operation costs of the Internet and restricts its scale. Moreover, the rapidly increasing carbon footprint of the Internet will aggravate global warming. Researchers have proposed many energy-saving technologies in the Internet. This paper first presents the significance, feasibility and research scope of energy conservation in the Internet; We then focus on studying the energy-saving technologies for routing devices and protocols in the Internet, and survey, analyze and compare some of typical schemes in details; Meanwhile, we propose the power consumption model of routing devices and leverage the tradeoff analysis to guide the research of energy-saving routing devices and protocols in the Internet; Finally, some open issues and future directions in this area are discussed.

Key words: energy-saving technology for routing devices; energy-aware routing protocol; power consumption model; data center network

1 引言

随着互联网规模的不断扩大, 互联网的能耗问题日益突显. 据统计, 2007 年互联网中网络设备、服务器和数据中心所产生的总能耗达到 8700 亿千瓦时, 占全球总能耗的 5.3%, 并且该能耗还将以每年 20% ~ 25% 的速度继续增长^[1,2]. 当前互联网除了能耗巨大之外, 能量使用也十分低效. 为了应对互联网上突发的网络流量

以及各种网络设备和链路故障, 当前互联网普遍采用网络带宽超额提供和网络资源冗余部署的方式来满足网络峰值负载的需求. 然而大部分时间内互联网的负载都远低于峰值负载, 使得互联网中存在大量空闲或低利用率的网络资源. 由于设备固有能耗开销的存在以及硬件技术的制约, 当前互联网设备和部件的能耗受负载变化的影响较小, 其在低负载时的能耗与满负载时能耗相近, 导致网络设备在全天全时的工作方式下消耗着大量

无效的能量.因此在互联网领域迫切需要行之有效的节能技术,以降低互联网总能耗和改善能量使用效率,而互联网当前的部署、运行方式及能耗特性为其提供了可行性和节能空间.

互联网节能技术的研究能够带来经济和环境双方面的效益.从经济角度看,当前互联网电能支出费用十分巨大,已经影响到其营运成本和规模的扩展^[3];从环境角度看,互联网的能耗直接反映其二氧化碳排放量和对“温室效应”的加重程度.据 GeSI 统计^[4],2007 年全球信息通信技术产业的温室气体排放量为 8.3 亿吨,占全球温室气体排放总量的 2%,预计到 2020 年将达到 14.3 亿吨.因此研究互联网节能技术对于降低成本和节能减排都具有重要意义.

本文针对互联网有线网络领域内的节能技术展开研究,将研究重点放在路由设备节能机制和节能路由协议上.我们首先明确本文的研究范围与技术分类;之后针对当前互联网路由设备和协议中典型的节能技术方案进行深入地分析比较,研究相关的问题模型、解决方法、节能效果以及负面影响,并利用权衡分析等手段来辅助问题求解;最后给出该领域亟待解决的问题及未来的发展方向.

2 研究范围与分类

信息技术(ICT, Information and Communication Technology)领域的能耗设备可以大致分为两类:一类是主机终端设备,包括:PC 主机、服务器、打印机等;另一类是网络设备,包括用于互联网有线网络和无线网络中的路由交换等设备.目前关于前一类设备的节能技术已经发展的较为成熟,已有相关的标准和产品^[5].互

联网无线网络包含多种类型,如:传感器网络、蜂窝网络、无线局域网等.由于无线移动设备需要考虑处理能力和电池寿命等方面的约束,因此在节能技术研究上与有线网络有着不同的节能目标和实现手段.目前已有大量关于无线网络节能技术的研究^[6-8],文献^[9,10]对其进行了综述.互联网有线网络的能耗来自核心网、汇聚网和有线接入网中各种网络通信设备,占 ICT 总能耗的 22%^[11].近年来随着互联网的规模扩大和性能提升,该部分能耗急剧增长,因此有线网络的节能技术已经成为

目前研究的焦点.本文将重点研究有线网络领域中路由设备的节能技术和节能路由协议.对于主机终端设备、无线网络领域的节能技术不属于本文的研究范畴.

下图 1 给出本文对互联网路由设备与协议节能机制的分类及研究方法.(1)路由设备节能技术是从硬件设计和实现角度出发,研究如何降低单个路由设备能耗的技术方法.该类技术仅关注设备自身的能耗因素,不考虑对互联网中其它设备能耗所造成的影响.需要说明的是,本文中所指的路由设备广义上包括路由器、交换机等具备网络路由转发功能的设备;(2)节能路由协议是从网络规划和协议设计的角度出发,研究如何设计和使用面向节能目标的网络路由机制,有效降低整个网络的总能耗.与路由设备节能技术不同,节能路由协议需要互联网各路由设备之间能够互相配合协调地工作.针对不同的网络规模,在广域网领域内重点研究域内节能路由协议,而对于域间节能路由协议,由于目前很难在不同 ISP 之间进行统一的节能策略协调和部署,缺少相应的节能技术方案,因此本文没有涉及这方面的研究;在局域网领域内重点研究当前能耗开销巨大、具有代表性的一类局域网:数据中心网的节能路由协议.

3 路由设备节能技术研究

3.1 路由设备能耗模型

Mahadevan 等人^[12]使用标准测试系统对各种模块化路由设备进行能耗测试实验,结果表明路由设备能耗与其硬件配置参数和网络流量速率相关.典型的模块化路由设备由多个部件构成,包括:设备背板、网络线卡以及网络接口等,其总能耗为各部件能耗之

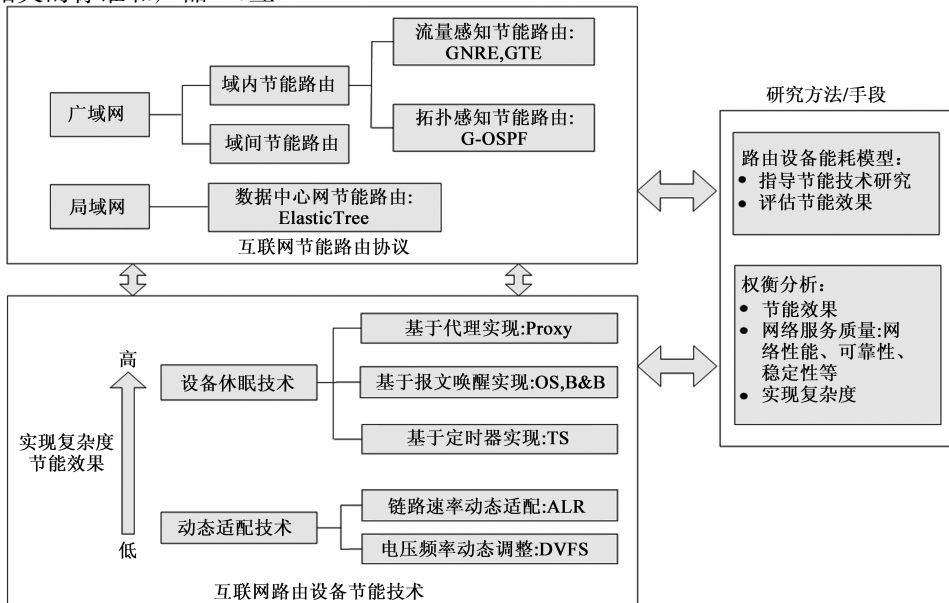


图1 互联网路由设备与协议节能研究分类及方法

和^[13~15]. 等式(1)给出模块化路由设备的能耗计算公式:

$$Power_R = Power_{fixed} + \sum_{j=1}^{LN} Power_{linecard}(j) + \sum_{i \in I} (Num(i) * Power_{port}(i) * PU_i) \quad (1)$$

其中 $Power_R$ 表示模块化路由设备 R 的总能耗, 由三部分组成: (1) $Power_{fixed}$ 表示路由设备的固有能耗开销, 包括: 路由计算开销、TCAM 和 RAM 存储开销、散热系统开销等; (2) 代表路由设备线卡总能耗, $Power_{linecard}(j)$ 为第 j 块线卡产生的能耗, LN 为处于开启状态的线卡数量; (3) 代表网络接口总能耗, 其中 I 表示接口可选配置速率的集合, $Num(i)$ 为处于开启状态、速率为 i 的接口数量, $Power_{port}(i)$ 为速率为 i 的接口满负载时的能耗. 由于网络接口能耗受其负载大小的影响, 因此使用反映接口利用率的比例因子 PU_i 来更准确地计算该接口的实际能耗.

根据上述能耗模型能够得出两点启示: (1) 路由设备能耗与处于开启状态的网络线卡和接口数量相关, 将空闲的网络设备或部件休眠能够大幅降低能耗; (2) 路由设备能耗与其配置相关, 根据设备负载变化来动态调整配置参数, 如: 接口速率、处理器电压频率等能够提高网络设备的能效. 下面我们将分别从这两方面来综述当前已有的路由设备节能技术方案.

3.2 设备休眠技术

当路由设备或部件处于空闲状态时, 最直接的节能方式就是将其关闭. 然而路由设备的关闭和重新开启需要耗费较长时间, 将会带来网络正常服务中断和巨大的额外开销, 因此在设备开启和关闭状态之间引入一种新的低功耗状态, 称为“休眠”状态. 当路由设备需要处理和转发负载时将其置于工作模式, 全速地完成报文处理转发任务; 当路由设备空闲时将其快速切换至休眠模式以减少无效能耗浪费、提高能量使用效率. 设备休眠技术重点研究模式之间切换的时机以及休眠时对到达报文的处理方式, 它们影响着路由设备的能耗和网络的服务质量. 下面分别研究和讨论三类设备休眠技术.

3.2.1 基于定时器实现技术

基于定时器的设备休眠方案 (TS: Timer Sleeping) 通过设置定时器值来控制路由设备或部件的休眠时长. 当路由设备或部件准备休眠时首先设定并开启一个定时器, 在该定时器超时之前设备或部件将一直处于休眠模式, 对于在此期间内到达的报文将作丢弃处理. 当前大多数方案都使用负载预测机制来设置定时器以及决定设备是否休眠. 一种方式是基于对报文

到达时间间隔的预测^[16,17], 当报文到达的时间间隔大于设备模式切换时间, 且休眠所带来的能耗节省大于模式切换所需能耗时, 将设备切换至休眠模式; 另一种方式则是通过预测固定一段时间内到达报文的数量来决定模式切换时机^[14,18]. 此外, 为了减轻由设备休眠所引起的网络报文丢失问题, 实现时通常引入报文接收缓存机制, 存储定时器超时之前到达该设备的报文.

3.2.2 基于报文唤醒实现技术

基于报文唤醒实现技术的基本思想是: 在路由设备的网络接口处增加报文感知硬件, 当报文到达正在休眠的路由设备时将会被感知, 随后立即唤醒该设备完成报文的正常处理与转发. 该技术能够更加及时地处理到达报文, 避免定时器实现技术中由于休眠时长设置不合理所导致的报文大量丢失和延迟. 该技术有两种典型的方案: 机会休眠方案 (OS: Opportunistic Sleeping)^[17,19] 和缓存与流量整形配合方案 (B&B: Buffer-and-Burst)^[19]. OS 方案的思想较简单, 当空闲的路由设备或部件在一段时间内没有报文到来时将立即置于休眠模式, 直到有新报文到达再执行唤醒操作. OS 方案在网络重负载时可能引起路由设备模式的频繁切换, 为此 B&B 方案在此基础上引入了缓存和流量整形机制, 将分散到达的网络流量先集中为多个突发流量组再发送至网络中, 从而减少设备模式切换次数和延长休眠时间.

3.2.3 基于代理实现技术

当前互联网中存在很多周期性交互的报文, 如: 路由协议报文、ARP 报文等. 为处理这些报文路由设备很难长时间休眠, 使基于定时器和报文唤醒的休眠技术节能效果受到限制. Gunaratne 等人^[20] 提出基于代理实

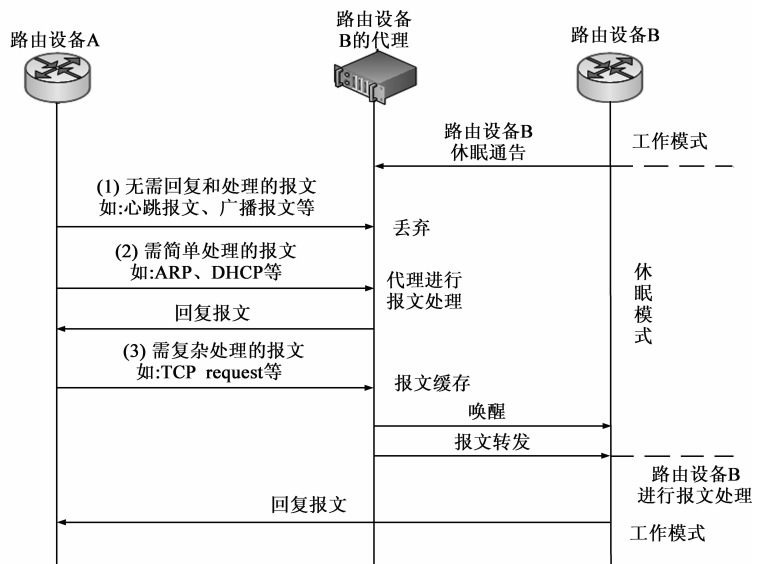


图2 基于代理实现的设备休眠方案示例

现的设备休眠方案(简称为 Proxy 方案),当路由设备和部件处于休眠模式时,使用耗电量相对较低的代理设备对到达报文进行分类,并根据不同报文类型选择不同的处理方式。Proxy 方案对报文处理的示例如图 2 所示。该方案将所收到的网络报文分为三类^[20,21]:(1)可以忽略的报文,当代理收到此类报文时直接将其丢弃,这类报文包括:心跳报文、网桥协议等广播报文;(2)由代理进行辅助处理和响应的报文,包括:ARP 报文、DHCP 等报文;(3)需要路由设备进行处理和响应的报文,代理收到后先将其进行缓存,之后唤醒路由设备并向其转发该报文,这类报文包括:TCP 连接请求报文、SNMP GET 报文等。Proxy 方案能够有效延长路由设备和部件的休眠时间、大幅提高节能效果,但同时也增加了代理实现的开销和硬件复杂度。

3.3 动态适配技术

路由设备动态适配技术旨在根据网络实时负载和服务质量需求动态调整路由设备的负载处理能力,使路由设备或部件的能耗与其负载大小成比例。其中一类典型的方案是网络链路速率动态适配技术(ALR: Adaptive Link Rate),它通过动态调整网络接口的配置速率来适应网络负载变化,减少网络链路无效的能耗浪费。ALR 方案重点研究链路速率调整的条件与时机,既要满足能耗最优目标和服务质量约束,也要避免频繁速率调整所引起的网络振荡。文献^[22]提出一种双阈值队列策略,根据链路两端缓冲队列长度与高低两阈值的比较结果决定链路速率调整。Gunaratne 等人^[20,22]在上述策略基础上将链路利用率阈值作为速率调整的联合判断条件,有效避免了振荡问题,但同时增加了网络接口卡的硬件实现复杂度。一种折衷方案^[22]是将缓冲队列长度阈值与定时器相结合,限定链路处于某一速率的最短时长,以较低的

实现代价减少振荡发生的概率。另一类典型方案是电压频率动态调整技术(DVFS: Dynamic Voltage and Frequency Scaling)^[23],它根据路由设备的计算负载大小动态调整处理器电压和频率,提高处理器的能量使用效率。Bolla 等人^[24]在网络丢包率约束下给出电压与频率调整的最优策略,同时对网络设备转发性能和工作能耗进行了权衡分析。Zhai 等人^[25]通过分析电压调整与能耗的关系,提出在低负载时适度扩大处理器电压的调整范围能够实现更优的节能效果。

3.4 路由设备节能技术方案比较

各种路由设备节能技术方案有着不同的优劣性和适用场景,表 1 对其典型方案进行了分析和比较。从表 1 中可以看出,设备休眠技术比动态适配技术具有更好的节能效果,其中 Proxy 方案的节能效果最好,但额外硬件开销也最大。设备休眠方案更适合用于负载较轻的路由设备和部件上,以延长休眠时间、减少模式切换代价,而其中的 B&B 和 Proxy 方案可以使用了额外机制来改善重负载时的休眠时长。动态适配技术用于路由设备的接口和处理器上,对网络性能和鲁棒性的影响较设备休眠技术小,能够适应网络负载的突发变化。

4 节能路由协议研究

4.1 域内节能路由

域内节能路由技术主要研究在互联网自治系统内部如何使用最少的网络资源提供路由转发服务,以实现全网能耗最小化目标,同时确保网络的服务质量。在研究过程中,需要重点考虑两方面问题:(1)与现有互联网路由协议的兼容适配问题。为了将节能路由协议有效部署于当前互联网自治系统中,要求其不应影响现有路由协议的正常工作;(2)如何权衡节能效果与所

表 1 路由设备节能技术典型方案比较

方案分类	方案名称	基本思想	节能效果	额外硬件需求	负面影响	适用对象
设备休眠技术	TS	设置定时器值作为路由设备和部件的休眠时长,与缓存机制相结合以减轻由休眠造成的报文丢失。	中	定时器、报文接收缓存	定时器设置不合理将增大报文延迟和丢包率,或导致设备模式频繁切换。	轻负载的路由设备与部件
	OS	休眠处于空闲状态的路由设备,当有报文到达时立即唤醒设备。	中	报文感知电路	负载过重将会导致设备模式频繁切换,带来网络性能下降和较大的切换开销。	轻负载的路由设备与部件
	B&B	在 OS 方案基础上增加流量整形和缓存机制,使路由设备尽可能集中处理和转发网络流量。	中	报文感知电路、缓存、流量整形模块	缓存机制增大网络延迟,流量整形机制将加重硬件处理开销和实现复杂度。	路由设备与部件
	Proxy	当路由设备和部件休眠时,使用代理机制辅助其进行报文的分类和简单处理。	高	报文分类与处理代理	硬件实现复杂度大,增加了存储和计算开销。	路由设备与部件
动态适配技术	ALR	根据网络负载变化动态调整网络接口速率,减少路由设备无效的能量浪费。	低	速率适配模块、定时器、寄存器	负载快速变化容易引起速率频繁调整,将增大控制开销和导致网络性能下降。	路由设备的网络接口
	DVFS	根据计算负载动态调整路由设备和部件处理器的电压和频率,提高处理器能效。	低	支持 DVFS 技术的处理器	降低电压和频率将引起处理器性能下降,延长负载任务的处理时间。	路由设备和部件的处理器

带来的负面影响. 域内节能路由在降低网络能耗的同时会导致网络吞吐率和鲁棒性的下降、增大报文端到端延迟, 因此需要分析这些因素之间的影响关系. 下面我们按照节能路由计算与网络流量负载是否相关分别阐述两类节能路由机制.

4.1.1 流量感知节能路由

流量感知节能路由根据网络流量的实时变化来动态调整路由, 使得在网络连通性和网络性能等约束条件下所使用的网络资源最少. 通过深入研究[13, 26]等文献对流量感知节能路由问题的描述, 可以将该问题归属于多物品流类问题^[27], 因此其求解复杂度是 NP 难的. 一种直接的求解思路是使用最优化问题求解工具来获得该问题的最优解, Chabarek 等人^[13]使用通用代数建模系统 GAMS 和 CPLEX 工具来求解该问题. 然而当网络规模较大时该方法无法保证计算的实时性, 因此当前可行的方案大多采用近似算法进行求解. 下面分别介绍两种典型方案.

(1) 节能的网络资源删除方案 (GNRE: Green Network Resource Elimination) 计算节能路由的过程如下: 首先使用当前域内路由协议计算初始路由; 然后从初始路由中按照特定策略迭代地删除网络节点和链路, 每一次迭代过程中都需要进行拓扑更新、路由重新计算以及网络性能约束条件检查等工作; 当网络资源删除后无法继续满足约束条件时停止删除操作, 最终获得节能路由路径. 关于网络资源的迭代删除策略, 文献[26]提出根据网络节点的连接度和流量两个参数值递增顺序删除网络节点; 文献[28, 29]提出首先按照节点流量与能耗比值递增的顺序删除网络节点, 之后按照网络链路利用率递增顺序删除相应的链路; 文献[30]针对骨干网路由器之间的逻辑链路包含多条物理链路的场景, 提出分别按照链路可用带宽的递减顺序和对路径拉长影响度的递增顺序删除物理链路. GNRE 方案适用于网络负载相对稳定且可预测的场景, 对于网络流量剧烈变化的场景无法满足路由计算实时性需求, 且易引起网络振荡.

(2) 节能的流量工程方案 (GTE: Green Traffic Engineering) 针对每条网络流的多条路由路径, 在网络负载较轻时将网络流量集中到该路径集合的一个子集上进行传输, 从而将空闲路径上的网络节点和链路关闭实现节能目标. Zhang 等人^[31]提出一种适用于当前链路状态路由协议和 MPLS 协议的节能流量控制方案. 它根据网络拓扑和链路利用率信息, 使用最优化求解方法在网络流和网络性能约束下为每条流计算节能路由路径集合, 并在链路利用率约束下将网络流分配到这些路径上以实现网络节能和负载均衡的联合优化目标. Va-

sic 等人^[32]提出一种节能的流量聚集和转移策略, 在网络链路利用率约束下优先将最小流量节点和链路上的网络流转移到其它传输路径上, 同时配合设备休眠和链路速率调整等策略来实现能耗节省. 此外文献[33]提出一种能够实时响应负载变化的节能网络框架, 它将能量关键路径预先计算机制与在线流量动态调度机制相结合, 以较小的计算代价实现更好的节能效果. 与 GNRE 方案相比, GTE 方案能够有效减轻路由振荡及路由切换代价.

4.1.2 拓扑感知节能路由

拓扑感知节能路由仅根据网络拓扑信息计算节能路由路径, 而不考虑网络负载的变化, 因此能够避免因负载频繁变化所引起的路由振荡问题. 一种典型的方案是通过对现有域内路由协议: OSPF 协议进行轻量级修改而实现的节能路由方案 (G-OSPF: Green OSPF)^[34, 35]. 该方案将网络节点分为两类: 输出节点 ER 和输入节点 IR. 节点 ER 与普通 OSPF 协议中的节点相同, 按照 Dijkstra 算法计算以自己为根到其它节点的最短路径生成树; IR 节点使用修订路径树算法计算到其它节点的路由路径, 该路径所包含的链路最大程度地复用其邻居 ER 节点最短路径树上的链路. G-OSPF 方案中 IR 和 ER 节点的选取策略决定着节能效果和网络性能. 文献[34]提出优选连接度高的网络节点作为 ER, 要求 IR 节点为 ER 节点的邻居且 ER 节点之间互不相邻, 模拟实验表明该策略在 Rocketfuel^[36] 拓扑中能够关闭 60% 以上的网络链路.

4.2 数据中心网节能路由

上述域内节能路由技术在实现时需要考虑与现有互联网路由协议的兼容性问题, 而在数据中心网络中, 由于其拓扑的特殊性及网络资源分配和流量控制的灵活性, 数据中心节能路由的实现更加可管可控. 为了克服传统树形结构^[37]的可扩展性差和单点失效等问题, 近几年提出了许多新的拓扑结构, 如: Fat-Tree^[38]、BCube^[39]、DCCell^[40]等, 它们都使用充裕的网络设备和链路提供路由转发服务, 以获得更好的网络二分带宽和超额订购比^[38], 但这些“富连接”拓扑在低负载时的能效却十分低下. 数据中心网络节能路由的本质思想就是根据网络负载的变化计算和配置节能路由路径, 将部分空闲的冗余网络资源休眠来实现网络能耗节省. 网络冗余度的降低会引起数据中心网络性能和容错性的下降, 因此在研究时应权衡数据中心网络节能效果、网络性能和容错性之间的关系.

基于弹性树的节能路由 (ElasticTree)^[41]是其中一种典型方案, 它研究在数据中心网拓扑结构中如何通过动态调整和维护用于路由转发的拓扑子集来实现网络

节能目标.若在网络性能和容错性约束下求解该最小拓扑子集,则问题的求解复杂度是 NP 难的.一种可行的解法是在分配网络流路径时采用贪婪装箱算法^[41]:对于给定的网络拓扑和流量需求,计算网络流多条可选路径上的剩余带宽值,选择该值与网络流的流量需求之差最小的路径作为该网络流的节能路由路径.该方法能够实时、增量地计算路由路径,但无法确保最优的节能效果.此外,文献[42]基于带宽约束的网络流模型提出一种节能路由方案,在数据中心网络吞吐率约束下使用尽可能少的路由设备转发网络流量以实现网络节能目标.

4.3 节能路由协议方案比较

下表 2 比较了各种典型的节能路由协议方案.按照实时性特点,当前节能路由方案可以分为离线路由和在线路由两类.离线路由方案需要预先获取全网的流

量需求信息来计算最优节能路由;而在线路由方案仅根据当前的拓扑和流量信息为网络流实时计算和分配节能路由路径.兼容性是指节能路由协议方案与现有网络协议的兼容程度,由于当前互联网域内路由协议普遍采用拓扑感知路由,因此 G-OSPF 方案能够与其较好的兼容,而域内流量感知节能路由方案的兼容性较差.GTE 方案由于采用了更加灵活的流量控制机制,故兼容性优于 GNRE 方案.在数据中心网中,目前通常采用 OpenFlow 等机制提供方便灵活的路由控制和流量管理,ElasticTree 方案能够与其较好地兼容.在方案局限性方面,通常节能路由协议的使用会以牺牲网络性能和可靠性为代价.对于拓扑感知的节能路由,由于没有考虑流量变化因素,在重负载时易对网络性能造成较大影响;对于流量感知的节能路由,在网络流量急剧变化时容易造成网络路由振荡,影响网络的稳定性.

表 2 节能路由协议典型方案比较

方案分类	方案名称	基本思想	实时性	兼容性	局限性	适用对象
域内流量感知节能路由	GNRE	根据网络拓扑和流量矩阵信息,在网络性能约束下按照一定策略从拓扑中迭代删除网络节点和链路,获得节能路由.	离线路由	低	当网络负载快速变化时无法满足实时性需求、易引起网络振荡,同时节能路由将导致网络性能和鲁棒性的下降.	域内路由协议
	GTE	在网络链路利用率约束下,将网络流量集中到多条可用路径的一个子集上进行传输,实现节能流量控制.	离线/在线路由	中	计算复杂度较高,可扩展性差,且会引起网络性能的轻微下降.	支持流量工程机制的域内路由协议
域内拓扑感知节能路由	G-OSPF	轻量级修改 OSPF 协议,使用各节点所计算的最短路径树并集合的一个子集提供路由服务.	在线路由	高	影响网络的鲁棒性,重负载时将会导致网络性能的严重下降.	域内路由协议
数据中心网络节能路由	ElasticTree	根据流量需求变化动态调整和维护用于路由转发的拓扑子集,使数据中心网络能耗与负载大小成比例.	在线路由	高	节能路由将导致数据中心网络性能和鲁棒性的轻微下降,适用于通用拓扑的启发式节能路由算法无法获得最优的节能效果.	数据中心网络路由协议

5 总结和展望

本文重点关注于互联网中路由设备节能技术和节能路由协议,分别从路由设备硬件设计与实现角度和网络规划与协议设计角度出发,对当前典型的节能方案进行深入研究、分析和比较.路由设备节能技术的研究可以借鉴主机终端已有的节能机制,其技术发展水平相对成熟;与之相比节能路由协议的研究还处于初始阶段,目前虽然已有一些初步的研究方案和原型系统,但还没有得到有效应用和大规模部署.互联网路由设备节能技术和节能路由协议有待进一步研究的关键问题包括:

(1)建立能效评估标准体系.当前路由设备的能耗参数仅给出设备的最大额定功率,缺少关于各模块、部件的细粒度能耗数据以及不同负载下能耗的变化趋势数据.需要研究路由设备能耗的标准化测量方法和计算模型,构建统一的网络能量使用效率评估体系,为路由设备与协议节能技术研究和节能效果评估提供基础

和依据.

(2)节能路由协议局限性分析.节能路由的使用会对网络性能、可靠性及稳定性造成不同程度的影响,当前方案在实施时通常将其作为节能路由计算的约束条件,但仍缺少对节能路由负面影响和部署代价等方面的理论分析和量化评估.此外,当前关于互联网域间节能路由的研究仍处于空白阶段,有待补充和完善.

(3)路由设备节能技术标准化.为了便于不同厂商节能路由设备之间的交互以及对其进行统一配置和管理,规范和加速节能技术的发展,应尽快完成路由设备节能技术体系框架的制定和交互接口、协议等方面的标准化工作.

(4)多种节能技术联合使用.将互联网中已有的多种节能技术结合起来使用能够获得更好的节能效果.例如:在研究节能路由协议时可以结合路由设备节能技术的特点,制定更加有效的网络能耗联合优化策略;传输层与应用层节能技术同样也可以与节能路由协议联合使用进一步优化互联网能耗.因此如何将各类节

能技术相结合、协调使用以实现联合节能目标将是一个很有意义的研究方向。

参考文献

- [1] Hu C C, Wu C M, Xiong W, Wang B Q, Wu J X, Jiang M. On the design of green reconfigurable router toward energy efficient internet [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(6): 83 – 87.
- [2] Koomey J G. Estimating total power consumption by servers in the U. S. and the world [EB/OL]. <http://www.greenbiz.com/sites/default/files/document/CustomO16C45F77412.pdf>, 2007.
- [3] Roy S N. Energy logic: A road map to reducing energy consumption in telecommunications networks [A]. In Proc of INTELEC'08 [C]. San Diego: IEEE Press, 2008. 1 – 9.
- [4] Global e-Sustainability Initiative (GeSI). SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age [R/OL]. http://www.smart2020.org/_assets/files/02_Smart2020Report.pdf, 2008.
- [5] Hewlett-Packard Corporation, et al. Advanced configuration and power interface specification [S/OL]. <http://www.acpi.info/DOWNLOADS/ACPIspec50.pdf>, 2011.
- [6] 卢文伟, 朱艺华, 陈贵海. 无线传感器网络中基于线性网络编码的节能路由算法[J]. *电子学报*, 2010, 38(10): 2309 – 2314.
Lu Wen-wei, Zhu Yi-hua, Chen Gui-hai. Energy-efficient routing algorithms based on linear network coding in wireless sensor networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(10): 2309 – 2314. (in Chinese)
- [7] 宋超, 刘明, 陈贵海, 龚海刚. 非均匀数据产生率的传感器网络的节能算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(4): 791 – 795.
Song Chao, Liu Ming, Chen Gui-hai, Gong Hai-gang. Energy-efficient algorithm in sensor networks with non-uniform data generating rate [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(4): 791 – 795. (in Chinese)
- [8] 沙超, 王汝传, 黄海平, 孙力娟. 一种基于多目标遗传优化的无线多媒体传感器网络节能覆盖方法[J]. *电子学报*, 2012, 40(1): 19 – 26.
Sha Chao, Wang Ru-chuan, Huang Hai-ping, Sun Li-juan. An energy-saving coverage scheme based on multi-objective genetic algorithms in wireless multi-media sensor networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(1): 19 – 26. (in Chinese)
- [9] Jones C E, Sivalingam K M, Agrawal P, Chen J C. A survey of energy efficient network protocols for wireless networks [J]. *Wireless Networks*, 2001, 7(4): 343 – 358.
- [10] Pantazis N A, Vergados D D. A survey on power control issues in wireless sensor networks [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2007, 9(4): 86 – 107.
- [11] Kumar R, Mieritz L. Conceptualizing 'green' IT and data center power and cooling issues [R]. America: Gartner, 2007. No. G00150322.
- [12] Mahadevan P, Sharma P, Banerjee S, Ranganathan P. A power benchmarking framework for network devices [A]. In Proc of IFIP Networking'09 [C]. Aachen: Springer Press, 2009. 795 – 808.
- [13] Chabarek J, Sommers J, Barford P, Estan C, Tsiang D, Wright S. Power awareness in network design and routing [A]. In Proc of INFOCOM'08 [C]. Phoenix: IEEE Press, 2008. 457 – 465.
- [14] Ananthanarayanan G, Katz R H. Greening the switch [A]. In Proc of HotPower'08 [C]. San Diego: USENIX Association, 2008. 7 – 11.
- [15] Mahadevan P, Banerjee S, Sharma P. Energy proportionality of an enterprise network [A]. In Proc of the 1st SIGCOMM Workshop on Green Networking [C]. New Delhi: ACM Press, 2010. 53 – 60.
- [16] Gupta M, Singh S. Greening of the Internet [A]. In Proc of SIGCOMM'03 [C]. Karlsruhe: ACM Press, 2003. 19 – 26.
- [17] Gupta M, Grover S, Singh S. A feasibility study for power management in LAN switches [A]. In Proc of ICNP'04 [C]. Berlin: IEEE Press, 2004. 361 – 371.
- [18] Gupta M, Singh S. Using low-power modes for energy conservation in ethernet LANs [A]. In Proc of INFOCOM'07 [C]. Anchorage: IEEE Press, 2007. 2451 – 2455.
- [19] Nedeveschi S, Popa L, Iannaccone G, Ratnasamy S, Wetherall D. Reducing network energy consumption via sleeping and rate-adaptation [A]. In Proc of NSDI'08 [C]. San Francisco: USENIX Association, 2008. 323 – 336.
- [20] Gunaratne C, Christensen K, Nordman B. Managing energy consumption costs in desktop PCs and LAN switches with proxying, split TCP connections, and scaling of link speed [J]. *International Journal of Network Management*, 2005, 15(5): 297 – 310.
- [21] Nedeveschi S, Chandrashekar J, Liu J, Nordman B, Ratnasamy S, Taft N. Skilled in the art of being idle: reducing energy waste in networked systems [A]. In Proc of NSDI'09 [C]. Boston: USENIX Association, 2009. 381 – 394.
- [22] Gunaratne C, Christensen K, Nordman B, Suen S. Reducing the energy consumption of ethernet with an adaptive link rate (ALR) [J]. *IEEE Trans. on Computers*, 2008, 57(4): 448 – 461.
- [23] Herbert S, Marculescu D. Analysis of dynamic voltage/frequency scaling in chip-multiprocessors [A]. In Proc of ISLPED'07 [C]. Portland: IEEE/ACM Press, 2007. 38 – 43.
- [24] Bolla R, Bruschi R, Davoli F. Energy-aware performance optimization for next generation green network equipment [A]. In Proc of PRESTO'09 [C]. Barcelona: ACM Press, 2009. 49 –

- 54.
- [25] Zhai B, Blaauw D, Sylvester D, Flautner K. Theoretical and practical limits of dynamic voltage scaling [A]. In Proc of DAC'04 [C]. San Diego: ACM Press, 2004. 868 – 873.
- [26] Chiaraviglio L, Mellia M, Neri F. Reducing power consumption in backbone networks [A]. In Proc of ICC'09 [C]. Dresden: IEEE Press, 2009. 1 – 6.
- [27] Even S, Itai A, Shamir A. On the complexity of time table and multi-commodity flow problems [A]. In Proc of SFCS '75 [C]. Berkeley: IEEE Press, 1975. 184 – 193.
- [28] Chiaraviglio L, Mellia M, Neri F. Energy-aware backbone networks: a case study [A]. In Proc of ICC Workshops'09 [C]. Dresden: IEEE Press, 2009. 1 – 5.
- [29] Gelenbe E, Silvestri S. Optimisation of power consumption in wired packet networks [J]. Quality of Service in Heterogeneous Networks, 2009, 22(12): 717 – 729.
- [30] Fisher W, Suchara M, Rexford J. Greening backbone networks: reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links [A]. In Proc of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking [C]. New Delhi: ACM Press, 2010. 29 – 34.
- [31] Zhang M G, Yi C, Liu B, Zhang B C. GreenTE: power-aware traffic engineering [A]. In Proc of ICNP'10 [C]. Kyoto: IEEE Press, 2010. 21 – 30.
- [32] Vasic N, Kostic D. Energy-aware traffic engineering [A]. In Proc of e-Energy'10 [C]. Passau: ACM Press, 2010. 169 – 178.
- [33] Vasic N, Bhurat P, Novakovic D, Canini M, Shekhar S, Kostic D. Identifying and using energy-critical paths [A]. In Proc of CoNEXT'11 [C]. Tokyo: ACM Press, 2011. 18: 1 – 18: 12.
- [34] Cianfrani A, Eramo V, Listanti M, Marazza M, Vittorini E. An energy saving routing algorithm for a green OSPF protocol [A]. In Proc of INFOCOM'10 Workshops [C]. San Diego: IEEE Press, 2010. 1 – 5.
- [35] Cianfrani A, Eramo V, Listanti M, Poverini M. An OSPF enhancement for energy saving in IP networks [A]. In Proc of INFOCOM'11 Workshops [C]. Shanghai: IEEE Press, 2011. 325 – 330.
- [36] Spring N, Mahajan R, Wetherall D, Anderson T. Measuring ISP topologies with Rocketfuel [J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2004, 12(1): 2 – 16.
- [37] Cisco Systems. Cisco Data Center Infrastructure 2.5 Design Guide [EB/OL]. http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/netsol/ns107/c649/ccmigration_09186a008073377d.pdf, 2007.
- [38] Al-Fares M, Loukissas A, Vahdat A. A scalable, commodity data center network architecture [A]. In Proc of SIGCOMM'08 [C]. Seattle: ACM Press, 2008. 63 – 74.
- [39] Guo C X, Lu G H, Li D, et al. BCube: a high performance, server-centric network architecture for modular data centers [A]. In Proc of SIGCOMM'09 [C]. Barcelona: ACM Press, 2009. 63 – 74.
- [40] Guo C X, Wu H T, Tan K, et al. DCell: a scalable and fault-tolerant network structure for data centers [A]. In Proc of SIGCOMM'08 [C]. Seattle: ACM Press, 2008. 75 – 86.
- [41] Heller B, Seetharaman S, Mahadevan P, et al. ElasticTree: saving energy in data center networks [A]. In Proc of NSDI'10 [C]. San Jose: USENIX Association, 2010. 249 – 264.
- [42] Shang Y F, Li D, Xu M W. Energy-aware routing in data center network [A]. In Proc of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Green Networking [C]. New Delhi: ACM Press, 2010. 1 – 8.

作者简介



商云飞 男, 1981 年生于新疆乌鲁木齐. 91655 部队工程师, 清华大学博士生. 研究方向为计算机网络体系结构、数据中心网络、绿色网络.
E-mail: shangyunfei@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn



徐明伟 男, 1971 年生于辽宁朝阳. 博士, 现任清华大学计算机系教授, 博士生导师. 主要研究领域为未来互联网体系结构、大规模路由和网络虚拟化.
E-mail: xmw@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn



李丹 男, 1981 年生于四川阆中. 博士, 现任清华大学计算机系副教授. 主要研究方向为下一代互联网体系结构设计、云计算与数据中心网络、绿色网络.
E-mail: lidan@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn