软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2012,23(2):215−229 [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04142]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

基于软件的无线网绿色代理系统*

刘 晨+, 陆佳亮, 孔令和, 吴凤刚, 吴 强, 伍民友

(上海交通大学 计算机科学与工程系,上海 200240)

Software-Based Green Proxy System for Wireless Networks

LIU Chen+, LU Jia-Liang, KONG Ling-He, WU Feng-Gang, WU Qiang, WU Min-You

(Department of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

+ Corresponding author: E-mail: justinprc@sjtu.edu.cn, http://www.sjtu.edu.cn

Liu C, Lu JL, Kong LH, Wu FG, Wu Q, Wu MY. Software-Based green proxy system for wireless networks. *Journal of Software*, 2012,23(2):215−229. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4142.htm

Abstract: This paper suggests the green proxy software system to keep wireless devices accessible while saving the energy. It is a system that uses a proxy server to build virtual NICs and virtual images for wireless devices in the same WLAN, so that the devices can sleep during idle time while their functionality are pretended to be carried on by the virtual image in the proxy. If a network request is sent to a device, the proxy server will wake up the device. Using this software system does not require any changes to hardware system or network topology; therefore, it has strong flexibility and universal applicability. The green proxy software system is deployed in a test bench with 11 wireless or wired computers, and real-time measurements of energy consumption are provided to sense and record the energy consumption of the system. The results show significant energy reduce that reaches 60% of the total PCs energy consumption. The economic benefit is obvious if the system is widely deployed.
Key words: green proxy; power saving; wireless network

摘 要: 提出了一种基于软件架构的无线网绿色节能代理系统.针对无线网络的特点，通过在代理服务端创建网内其他终端的虚拟网卡和虚拟镜像,配合针对终端移动的代理服务器切换机制与重发机制,使得无线终端在节能时快速进入休眠状态,在响应请求时快速、有效地被唤醒.该软件系统不对原有网络拓扑或硬件系统做任何改变,所以具有普适性和可移植性强的特点.该系统被实际部署到一个包括11台有线与无线上网的计算机测试平台上.通过长时间的监测,整个网络功耗节省了超过60%,充分说明了该系统在实际应用中的经济价值.
关键词: 绿色代理;节能;无线网络
中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

在全球能源危机的大背景下,信息技术的突飞猛进与大规模的应用产生了高附加的能耗开销.在美国,商业建筑用电占全美用电的 36%[1],其中,照明用电与信息技术(又称 IT)设备用电所占权重最大.而在加州大学,一项调查[2]表明,IT 设备用电占到该校总用电的 50%~80%.可见,在能源愈加紧缺的今天,人们对 IT 设备,特别是处理终端(例如个人电脑、手提电脑和移动设备等)日益增长的需求会加剧全球能源危机.所以,针对 IT 设备的节能

* 基金项目: 国家自然科学基金(61073158); 英特尔 ERO 项目(CN071510)
收稿时间: 2011-07-15; 修改时间: 2011-09-06; 定稿时间: 2011-11-14

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

技术的研究与开发迫在眉睫,绿色信息技术(又称绿色 IT)应运而生.绿色 IT 技术是符合社会进步与环境保护要求,满足经济可持续性发展目标,能够达到国际节能、环保标准,并能进一步推进更高标准制定的信息技术.绿色 IT 在 2009 年与 2010 年均被列为五大战略技术领域之一.

计算机工业界一直在提升硬件上的节能技术,但由于元件性质的限制渐渐步入瓶颈期.而从软件角度入手,改变软件的架构或运行机制进行节能,从而带来更大的能耗节约.一个可行的机制是,使空闲的计算机进入一个低功耗的睡眠状态往往可以带来显著的节能效果.但是很多先前的研究表明,用户经常会将计算机保持在运行状态,即使计算机基本上都处于空闲状态[3,4].所以,节能的主要问题在于,如何让计算机在维持网络连通性的同时,可以在空闲时进入睡眠状态.

计算机有两种情况需要维持网络的连通性.一种情况是向外界提供服务时.比如提供监控服务的无线摄像头,为了保证可以即时响应外界的监控服务的请求,摄像头在空闲时也不能进入睡眠状态;再比如提供数据服务的无线节点等.另一种情况是需要长时间等待外界回复时.比如一台提交了云计算请求的笔记本,在收到回复前都需要保持网络的连通性,而不能进行移动或者进入睡眠;再比如等待离线下载服务完成的智能手机等.而无线设备保持网络连通性是非常耗电的,所以这些无线设备更需要高效的节能,使得它们可以更长时间提供服务或有足够的时间等待外界的回复.

有一些相关的研究[5−8]提出使用一个代理服务器充当多台计算机网卡上的低功耗处理器,即这个代理服务器为多台睡眠的计算机代理了部分网络服务,使得对外界而言这些睡眠的计算机一直处于正常的运行状态.这些工作主要针对有线以太网,并没有考虑到无线网络中无线终端的移动性、无线网络结构的动态性与无线通信的不可靠性等特性,所以并不适合于目前得到越来越广泛使用的无线网络.

本文中的绿色节能代理系统很好地解决了这些问题.它特别针对无线网络的环境.该系统采用虚拟网卡和虚拟镜像技术,使服务器可以自适应地代替无线终端对网络中的各种请求进行回复.它针对终端移动的代理服务器切换和镜像迁移功能.它针对无线通信不可靠性,利用重发与回执机制来提高唤醒的准确率.同时,该系统并不改变原有的网络架构和计算机硬件,可以透明地在无线网上部署,因此对于有大规模部署需求的企业环境具备很高的可操作性.

本文第 1 节主要介绍该领域的相关工作.第 2 节详细介绍无线网绿色代理系统的结构与分析.第 3 节介绍系统中各部分的详细实现.第 4 节给出实验结果并进行分析.第 5 节对本文进行总结并阐述下一步的工作.

1 相关工作

在面对全球性的能源危机,特别是信息技术设备巨大的能源消耗的背景下,信息技术领域中关于能耗效率的研究也越来越多.而这些研究的方向也主要可以归为 4 大类别:第 1 种技术手段直接从设备本身入手,通过更高效地使用设备从而降低能耗,比如文献[9,10];第 2 种技术手段是通过使用更低功耗组建从而使计算机更加节能,比如文献[11],但是这种技术受到元件的物理化学性质的局限;第 3 种节能技术主要通过在不同机器间进行工作迁移来达到节能的目的,比如通过工作迁移使得更少的服务器在工作状态[12],或者将工作迁移到电费更低的地域[13],这种技术更多地用在数据中心里;最后一种能耗管理技术考虑的是让子系统在空闲或使用量低的时候进入低功耗的状态,这里的子系统可以是无线天线[14−16],或是网络基础组建[17,18],甚至是整个计算机[19−21].本文中的无线网绿色节能代理系统属于第 4 种节能技术.

IT 终端设备的睡眠技术是能耗管理技术的基础.睡眠是指设备处于一个低功耗状态,并保存了进入睡眠前的瞬时状态,使得从睡眠中恢复后可以继续正常运行.比如,现代的台式计算机都支持的 ACPI 接口(高级配置与电源接口)中的 S3 状态(睡眠/待命状态).该状态可以减少电量 95%甚至更多的消耗[22].现代绝大多数操作系统对这种睡眠功能的使用方法就是当系统空闲了一段时间之后进入低功耗状态.目前,针对有线以太网卡的 Wake-on-Lan(即局域网唤醒)技术就被大多数操作系统所支持.尽管这项技术非常重要,但是它并没有解决一个关键的问题,即系统何时被唤醒.如果每一个到来的数据包都使得网卡对系统进行唤醒,那么就不可能达到节能的效果,甚至可能更耗能;相反地,如果对数据包有太强的过滤,就会使得在很多情况下系统不会从睡眠中被唤

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

醒,无法正常工作.所以,Wake-on-Lan 技术只是一个初步的设备唤醒技术,并不具备单独在网络中实现实际节能的能力.

最近的一些在特定硬件或软件上采用的技术试图解决上面提出的问题.比如,Intel 公司的远程唤醒技术可以让服务器软件拥有唤醒能力,就好比一台 VoIP 服务器可以唤醒与它连接的客户端计算机[23].Apple 公司“请求时唤醒”技术采用了一种简单的方法,使得所有与 Apple AirPort 基站相连的运行着 Snow Leopard 的 Apple 计算机在收到访问本地共享项目的请求时可以被唤醒来处理请求[24].尽管这两种技术的动态触发机制保证了对用户与程序的透明性,但它们都不够普及,而且这些技术都需要特定的硬件解决方案才能实现.

在网卡上添加额外的低功耗处理器[19,21]也是一种可行的实现能耗管理的方案.当系统处于低功耗的睡眠状态时,来自网络中的请求都会被该处理器解析与评估.甚至由于这种处理器的普遍性,它们可以代替系统处理这些请求而不是唤醒系统让系统处理,这样就可以将节能最大化.不过,由于需要对网卡进行改动,这种方法面临重要的部署障碍.

使用一个代理服务器充当多台计算机网卡上的低功耗处理器是一种不需要修改硬件的方案.这个代理服务器为多台睡眠的计算机代理了部分网络服务,使得对外界而言,这些睡眠的计算机一直处于正常的运行状态.最近,多项研究[5−8]都是基于这样的机制.网络连接代理(NCP)[6]提出,可以对 socket 层进行一些修改,使得 TCP 连接在计算机睡眠与恢复的转换中可以被保持住.睡眠服务器(SleepServer)[8]提出了一种在不改变硬件、软件、协议的环境下,为有线以太网中的计算机提供的睡眠网络代理.

以上所有的研究都主要考虑在有线以太网内的睡眠唤醒情况,并没有对无线网络进行考虑.如今,无线网络技术被越来越广泛地使用,所以基于网线网络的节能研究也变得越来越重要.在不远的将来,信息技术中的能量消耗也会以无线网络为主.然而在无线网络中,由于无线终端的移动性、无线网络结构的动态性与无线通信的不可靠性,致使能耗管理技术面临更多的挑战.在本文中,我们设计开发的无线网绿色代理系统针对无线 802.11 协议网络且与有线以太网相兼容,具有更好的前瞻性.

2 无线网绿色节能代理系统结构

2.1 系统结构全景

根据我们在文章前面部分的分析,面向无线绿色节能代理系统(green proxy system,简称 GP-System)需要具备以下功能愈特性:

第一,GP-System 必须具备一套面向无线终端的远程管理机制,比如开启关闭无线终端被代理功能、查询特定终端的状态等,并且针对无线通信的不可靠性,采用加强的回执与重发机制.

第二,GP-System 必须考虑到现有无线网结构的动态性,必须对终端用户和网络设备(路由器、交换机)透明,并且要保证可以便捷地部署,所有的功能由软件实现,不能额外添加硬件或改动现有的系统.

第三,GP-System 需具备良好的可扩展性,一台绿色节能代理服务器(green proxy server,简称 GP- Server)要具备为整个无线子网中的无线终端服务的能力,并且需要考虑 GP-Server 之间服务切换与迁移的问题来满足无线终端的移动性要求.

第四,GP-System 能够隔绝为不同终端提供服务的进程,为不同终端保证安全性.

图 1 给出了我们设计的 GP-System,其兼容无线与有线网络(网络中可以用多个 GP-Server($S1$ 与 $S2$)).在企业级局域网的环境下,可能存在多个 GP-Server,如图中的 $S1$ 与 $S2$.这些 GP-Server 与它们代理的终端应在统一广播域中,并且在多个 GP-Server 之间可以使用虚拟局域网(VLAN)技术,使其与其代理的终端之间保持隔离.而 GP-Server 之间的终端注册信息的迁移,也可以在此基础上建立.

GP-Server 的结构如图 2 所示,服务器端的软件架高于操作系统之上,通过绿色节能代理服务器控制器(GP-server controller)模块进行全局控制;系统使用虚拟网卡控制器(VNIC controller)模块对所有的虚拟网卡进行全局控制;虚拟镜像控制器(image controller)模块对所有的虚拟镜像进行控制.每一个被代理的终端在服务器上都有一个虚拟网卡或者虚拟镜像,它们都是为了代替睡眠中的终端无线终端(以下简称终端)进行网络的响

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

应.这里,虚拟网卡是指使用操作系统内的一个虚拟的网卡以及一个处理进程来模拟终端的网络表现.它是一种非常轻量级的实现.该处理进程包含了一些基本的网络协议的支持(比如 ARP,ICMP,TCP/IP 等)以及对一些特殊数据包的后续处理,比如,对于特定的协议可以唤醒代理的终端.虚拟镜像是指通过虚拟机的方式实现终端的镜像.虚拟机支持基本的网络协议,还可以便捷地添加对其他网络协议的支持,而且虚拟机可以很好地解决镜像之间的隔离问题.更重要的是,虚拟机中可以加入特定的扩展代码,对有状态的特定的应用通信(比如下载应用、即时通信等)进行支持.然而,使用虚拟机使得每一个虚拟镜像都需要占用较大的资源,所以如果不需要对特定的应用通信进行支持,则可以只使用虚拟网卡对终端进行代理.

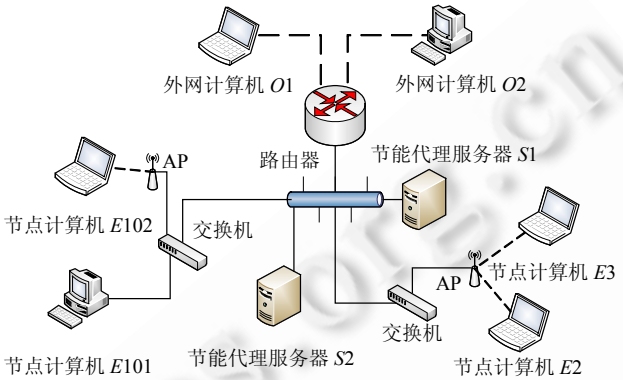


Fig.1 An example deployment of GP-System in an enterprise setting

图 1 一个 GP-System 的企业级样例

Fig.2 An example GP-Server serving $m+n$ PCs

图 2 GP-Server 的示例,代理 $m+n$ 个节点计算机

每一个使用代理的终端都需要安装一个软件客户端 Green Proxy Client(简称 GP-Client),以支持与 GP-Server 的通信.GP-Client 负责与 GP-Server 进行连接,并且将终端上的 IP、MAC 地址、有线或无线等网络参数都发给 GP-Server 进行注册.GP-Client 会持续对终端上面的运行的网络应用进行分析,将其信息也发给 GP-Server.用户可以选择在睡眠时是否支持有状态的特定的应用通信,GP-Server 会根据用户的选择来决定是为该终端建立一个虚拟网卡还是虚拟镜像.GP-Server 中建立的虚拟网卡或者虚拟镜像的网络参数都与终端一致.当终端睡眠时,GP-Client 会通知 GP-Server,这时,Server 会启动对应的虚拟网卡或者虚拟镜像.然后,虚拟网卡或者虚拟镜像就可以代替终端来响应各种网络请求.如果虚拟网卡或者虚拟镜像发现有必要唤醒终端,GP-Server 中的 GP-Server Controller 就会将终端唤醒,并关闭对应的虚拟网卡或虚拟镜像.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

2.2 状态变化处理过程

GP-System 的基本工作流程是以终端的状态变化为核心的.当一个运行着 GP-Client 的终端进入睡眠状态之前,会向 GP-Server 发送消息.随后,GP-Server Controller 就会开启该终端对应的虚拟网卡或虚拟镜像.为了使局域网内发给该终端的包可以正常路由到 GP-Server 上的节点的虚拟网卡或虚拟镜像上,该虚拟网卡或虚拟镜像会广播一个 ARP 包,使得局域网内的所有计算机以及交换机都了解到这种变化.然后,该虚拟网卡或者虚拟镜像就可以代替终端进行响应工作.

类似地,当一个睡眠中的终端从睡眠中恢复时,GP-Client 会给 GP-Server 发送一条消息,GP-Server Controller 就会关闭其对应的虚拟网卡或虚拟镜像.然而在关闭虚拟镜像前,如果虚拟镜像有多余的消息需要传递给终端,可以通过 GP-Server Controller 将信息发给 GP-Client.然后,GP-Client 会广播一条 ARP 消息,使得交换机可以了解到这种改变.

当一个无线终端从一个子网移动到另一个子网,而两个子网分别部署了两个 GP-Server,当无线终端发送节能请求时,该请求回首先被无线接入点转发到本网的 GP-Server,由其与终端原来子网的 GP-Server 发起切换请求,把原来 GP-Server Controller 的注册信息迁移到目前的 GP-Server 上.之后,由当前子网 GP-Server 通知无线终端更新 GP-Server 信息,并进入休眠状态.需要指出的是,上面的机制只针对无线终端在工作时的移动情况.当一台电脑在睡眠情况下移动到另一个网络时,我们可以采取两种策略:一种是不再支持绿色代理机制,因为无法定位到该机终端,采取等待该终端自行启动时,重新注册节能服务的策略;另一种是在有请求的情况下,在企业网全网推送该终端的幻数据包,强制唤醒终端,并进行 GP-Server 切换流程.第 2 种方法开销较大,但是适合用在重要的企业级的服务上.

2.3 绿色代理服务器

2.3.1 服务器控制器

GP-Server Controller 是 GP-Server 的重要组成部分.它负责如下任务:(1) 服务器程序的初始化与终止.服务器在开启时,需要初始化虚拟网卡控制模块(VNIC controller)以及虚拟镜像控制模块(image controller),还需要开启一个用于接收控制消息的 Socket 端口.(2) 响应所有终端的消息,比如终端上的状态切换的信息、终端的基本属性等消息.(3) 建立与销毁虚拟网卡或虚拟镜像.根据 GP-Client 的选择,为终端建立起对应的虚拟网卡或虚拟镜像.(4) 开启或关闭虚拟网卡或虚拟镜像.终端在状态切换之后,GP-Server 上对应的虚拟网卡或虚拟镜像就需要马上开启,保证在网络中的表现上尽量无缝.(5) 向 GP-Client 传输特定数据,比如使用了虚拟镜像,支持有状态的应用通信,在终端醒来后就有可能将应用相关的数据传输给终端.(6) 管理终端.对终端进行管理可以保证系统的安全性,比如遇到故障时的处理、管理终端的权限等.(7) 对远程管理工具的请求做出响应,以实现远程管理.

网络唤醒的工作由 GP-Server Controller 负责,可以使用被大多数计算机广泛支持的 Wake-on-LAN 技术,也可以使用一些其他的新技术,比如 Intel AMT.通常,Wake-on-LAN 技术都已唤醒幻数据包(magic-packet)作为唤醒时发送的数据格式,可以在局域网内唤醒睡眠、休眠以及关闭状态的计算机.

2.3.2 无状态(stateless)应用控制

无状态的应用通信是指在通信过程中没有太长时间的会话,也没有持久开放的连接.比如,远程访问的 RDP 或 SSH 应用、共享文件应用 SMB、Web 服务器访问等都属于无状态的应用通信.对于这种通信,无论是虚拟网卡或者是虚拟镜像,都会采取两种策略:(1) 对于一些基本的不需要复杂回复的请求,虚拟网卡或虚拟镜像都可以代替终端回复,比如 ARP 请求与 ICMP 请求等;(2) 对于一些复杂的请求,比如远程连接,虚拟网卡或虚拟镜像会通知 GP-Server Controller 需要唤醒终端,然后,GP-Server Controller 会禁用对应的虚拟网卡或虚拟镜像,然后唤醒终端.由于一般的应用都带有重传机制,所以再唤醒终端后,终端可以再去响应重新发送的请求.

2.3.3 有状态(stateful)应用控制

有状态的应用通信是指在通信过程中拥有连续的状态,需要保证连接的存活或者端口的长期开放,比如即

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

时通信应用、下载应用、P2P 软件等.所以,有状态的应用通信不能通过虚拟网卡来实现,因为虚拟网卡是用线程实现的,而且资源紧缺,所以不能简单地扩展.然而使用虚拟镜像就可以很好地解决这个问题:首先,虚拟镜像使用虚拟机的方式实现,采用的是工业标准架构,可以使用大量为标准 PC 提供的库文件;其次,由于虚拟镜像是以虚拟机的方式实现的,所以可以动态地调整其资源.

由于需要在虚拟镜像上支持其他应用的有状态的应用通信,所以需要相应的代码与终端上的应用配合起来,所以需要为专门的应用开发对应的镜像应用.比如在虚拟镜像上运行即时通信软件的镜像,并且在终端从睡眠中恢复时,将收到的消息发给终端;再比如虚拟镜像运行离线下载的应用,在终端从睡眠中恢复之后,将下载的数据再发回给终端.我们称这样的应用镜像为应用存根.

2.3.4 可扩展与资源共享

GP-Server 的可扩展性亦称为可伸缩性,是指 GP-Server 中可以同时代理多少个节点服务器,这不仅与 GP-Server 的开销有关,而且与电能的节约有关.所以,GP-Server 中应该尽可能多地代理终端.所以,我们应该保证每个终端对应的虚拟网卡或虚拟镜像占用尽可能少的资源.

除了处理器的性能以外,GP-Server 潜在的可扩展性的瓶颈主要在内存以及网络带宽上.一个虚拟镜像占用的内存会在 64MB 以上,而一个虚拟网卡占用的内存只小于 10MB,所以,GP-Server 应尽可能地以使用虚拟网卡的方式为终端提供代理.如果一个服务器的内存是 2G,除了基本的操作系统以及 GP-Server Controller 可能会占用将近 300MB 以外,还可以代理 170 多个终端.然后,如果全部使用虚拟镜像,那么可以代理 27 台终端.

2.3.5 安全与企业级管理

安全与管理能力是企业级的系统非常关心的因素,所以本文的 GP-System 提供了管理的工具,管理员可以通过该工具了解到 GP-Server 的运行状况,比如代理的终端数、运行时间、新开启的代理以及新关闭的代理等;可以监视每个虚拟网卡或者虚拟镜像的运行状况以及每个终端的运行状况.由于知道每个计算机的睡眠与正常运行的时间,则可以估计出每个计算机节省的电能.管理工具还可以指定唤醒或挂起任何一个终端.如果某个终端的程序崩溃了,管理工具则可以根据 GP-Client 的响应异常了解到.

3 节约能量的量化

通过本文的无线网 GP-System 节约的电能可以使用公式简单地加以预测.节能节点的功率消耗不但与终端在睡眠与工作状态时的功率有关,而且还与处在睡眠与工作状态的时间有关.这样,节点的能耗节约率就应该与使用节能技术后的平均功率和正常工作的平均功率的比值有关,如下公式表达:

$$R_{\text{能耗节约率}} = 1 - \frac{W_{\text{绿色节能代理}}}{W_{\text{正常工作}}} \tag{1}$$

对于一般的服务,终端醒来的频率与外界请求服务的频率有关.而外界的请求到达通常是符合泊松过程的,尽管泊松过程的参数是个变化量,不同时间用户请求服务的频率不同.比如,一个中等热度的 Web 服务器,双休日的下午访问量应该较高,在工作日的早晨访问量通常较低.但是在较短时间内,泊松过程的参数趋于一个定值,比如,可以假定在工作时间用户使用远程桌面登陆个人电脑的频率为每小时 2 次,这样,请求的到达就满足参数λ为 2/3600 的泊松分布.再比如,一台中等热度的 Web 服务器在双休日的中午收到请求的频率为每分钟 5 次,那么便可以认为请求的到达满足参数λ为 5/60 的泊松分布.因此,只要合理地选择参数,就可以使用泊松过程来对节能的效果进行估计.

令 T 为每次请求时计算机处于工作状态的时间,即请求的处理时间与电脑空闲进入睡眠状态的超时时间之和,P_S 为计算机处于睡眠状态时的功率,P_N 为计算机处于正常工作状态时的功率,那么根据公式(1),采用 GP-System 的唤醒机制带来的能耗节约率可用如下的公式表达:

$$R_{\text{能耗节约率}} = 1 - \frac{\int_0^T \lambda e^{-\lambda s} s P_N \mathrm{d}s + \int_T^\infty \lambda e^{-\lambda s}[(s-T)P_S + TP_N]\mathrm{d}s}{\int_0^\infty \lambda e^{-\lambda s} s P_N \mathrm{d}s} \tag{2}$$

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

即

$$R_{能耗节约率} = e^{-\lambda T} - \frac{P_S}{P_N} e^{-\lambda T} \tag{3}$$

根据上面的公式,当知道一个终端的两种状态对应的功率时,就可以轻易得出请求到达的泊松过程参数λ以及维持工作状态的时间 T 对电能节约的影响.

比如,对于 DELL LATITUDE D430 笔记本,正常空闲状态的功率是 18.1W,睡眠状态的功率是 1.7W.如果λ取 1/600,即请求到达间隔的期望是 600s,选择不同的 T,就会有不一样的能耗节约率.从公式(3)中可以看到,λT作为一个整体影响能耗节约率.由于λ表示的是请求到达间隔时间期望的倒数,故 $1/\lambda T$ 表示的是请求到达时间的期望与系统处于工作状态的时间的比值.所以,终端管理员可以根据这个请求到达的不同频率设定计算机进入睡眠的速度,从而可以满足预期的能耗节约率.

图 3 展示了 $1/\lambda T$ 对于能耗节约率的影响.可见,当 $1/\lambda T$ 较小时,能耗节约率随其快速增长;当 $1/\lambda T$ 较大时,能耗节约率的增长就显得很不明显.所以,如果终端是 DELL LATITUDE D430 笔记本,则选择 $1/\lambda T$ 等于 8 较为合理,可以获得 80%的能耗节约率,也能使终端拥有较高的可访问性.

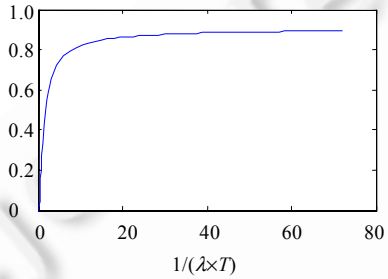


Fig.3 Power saving ratio against $1/\lambda T$

图 3 能耗节约率相对于 $1/\lambda T$ 的变化

4 实 现

本文在一台普通服务器上安装了 GP-Server,并在 11 台桌面计算机以及笔记本上安装了 GP-Client.本节主要对 GP-Server 的实现进行详细的说明,主要包括 GP-Client,GP-Server Controller 的细节功能、虚拟网卡与虚拟镜像和能耗监控系统的实现这 4 个部分.

4.1 Green Proxy Client客户端

本文介绍的 GP-Client 端基于 Windows 操作系统(Windows XP 以及 Windows 7)开发,可以与 Windows 的计算机拥有标准的电源管理对接,与 Windows XP,Vista,Windows 7,Windows Server 各个版本相兼容.针对 Linux 操作系统,我们设计的 GP-Client 结构也是可行的.但是,由于不同版本的 Linux 提供不同的电源管理接口,所以需要针对每种 Linux 开发相应版本的 GP-Client,在此不作介绍.

GP-System 可以支持多种低功耗的状态,比如休眠状态、关机状态以及待机状态,但是由于休眠状态与关机状态需要较长的恢复时间,而待机状态又不能明显地降低计算机的功率,所以我们主要采用的是睡眠状态(或称为挂起状态,即 ACPI 中的 S3 状态).

终端上的 GP-Client 需要负责侦听终端本身的电源状态的变化,比如进入睡眠状态或从睡眠状态中恢复;而且 GP-Client 需要将终端上的基本信息传给 GP-Server,比如 IP、MAC 地址、运行的应用等.

当代计算机基本都有超时睡眠机制,即用户可以设置计时器,当计算机一段时间内没有鼠标、键盘操作,或者 CPU 保持空闲时,系统会自动进入睡眠状态.安装了 GP-Client 终端的用户可以使用相同的方式或者其他各种方式使计算机进入睡眠状态,因为 GP-Client 使用电源管理接口可以响应 Windows 底层的系统事件(在 Linux

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

下也有类似的 ACPI 框架,可以用类似的方法响应系统的睡眠事件).但是通常情况下,用户总会禁用超时睡眠机制,因为他们想随时可以使用自己的计算机.而 GP-System 中,用户可以在计算机睡眠的时候仍然正常地访问,这也是我们认为基于代理的节能技术更容易被用户接受的依据.第 5 节将对两种情况的能耗进行对比.

4.2 绿色节能代理服务器控制器

本文中的 GP-Server 在一台 DELL VOSTRO 200 上实现,CPU 为 Intel® Core™ 2 Duo E8400,频率为 3.00GHz,内存为 2G,硬盘共 250G.所以并不是一台专用服务器,而是一台普通的计算机,最大功率仅为 225W,比一般服务器的能耗低很多.服务器的操作系统是 Ubuntu 10.10,安装了 Xen 4.1.1 作为虚拟机管理器.

GP-Server Controller 运行在 Ubuntu 中.为了实现第 2.3.1 节中的所有功能,它对外开放了多个自定义的 UDP 和 TCP 端口,用于侦听终端上的 GP-Client 的各种消息,以及 GP-Server 管理工具的各种请求.GP-Server Controller 可以通过虚拟网卡或者虚拟镜像管理模块实现对每个虚拟网卡或虚拟镜像的监视与控制,比如读取所有虚拟网卡的状态、对每个虚拟网卡或虚拟镜像的配置作更改等.当有数据向 GP-Client 发送时,GP-Server Controller 负责与 GP-Client 发送数据.比如,虚拟镜像中的应用存根代替终端下载的数据,需要在终端从睡眠中恢复之后发送给终端.

GP-Server Controller 负责了所有终端的唤醒工作,使用 Wake-on-LAN 技术中的“幻数据包”来实现有线局域网或无线局域网中的计算机唤醒.如果终端在不同的 VLAN 中,那么 GP-Server Controller 也必须能被所有 VLAN 中的节点访问,这可以在无线网的交换机上进行设置.

GP-Server Controller 还负责记录全局的日志,用于在崩溃后可以对整个系统进行恢复.恢复时需要先恢复 GP-Server Controller 的状态,然后读取所有虚拟网卡以及虚拟镜像当时的状态,如果某些终端的镜像无法恢复,就对终端进行唤醒,并重新构造该终端的虚拟网卡或者虚拟镜像,然后在等待该终端睡眠时再开启镜像.

4.3 虚拟网卡与虚拟镜像

虚拟网卡控制器(VNIC controller)用来管理所有虚拟网卡的创建、开启、禁用、修改以及恢复工作.虚拟网卡控制器模块是一个用户态的进程,响应 GP-Server Controller 的命令进行工作.每一个虚拟网卡都有两个部分组成:一块操作系统内的虚拟网卡以及一个与虚拟网卡绑定的进程.如果需要创建一块虚拟网卡,那么 VNIC Controller 会先创建与该虚拟网卡绑定的进程,然后再调用操作系统的 TUN/TAP 模块创建一块虚拟网卡,并将二者相互关联,最后将虚拟网卡的基本参数(如 IP、MAC 地址)设置与终端一致.

虚拟网卡最开始是在禁用状态,当终端进入睡眠状态时,GP-Client 会向 GP-Server Controller 发送消息,GP-Server Controller 让 VNIC Controller 启用对应的虚拟网卡,之后,VNIC Controller 会启用与该终端对应的虚拟网卡,同时绑定的进程也开始进入工作.最后,附属进程向局域网内广播 ARP 包,使得交换机等网络设备识别这种改变.

这个附属进程可以响应 VNIC Controller 的命令,将虚拟网卡与本地网卡桥接,还以可发送数据包并对收到的数据包进行解析.每当附属进程发现需要唤醒终端时,就会通知 VNIC Controller,VNIC Controller 会记录下日志信息.

每一个虚拟镜像都是基于 Xen 虚拟机的一个 x86 架构的精简 Linux 系统.当初始化时,我们向每一个虚拟机分配 64MB 的内存以及 750MB 的硬盘空间.当虚拟机开启后,会有 40MB 以上的内存处于空闲状态.

每一个虚拟机中都有一些模块用来支持 GP-System 的工作,如网络模块(TCP/IP 栈、防火墙 iptables 等)、包解析模块等.其中,包解析模块主要用来分析一些无状态的应用通信,比如 SMB,RDP,SSH 请求,从而可以告知 GP-Server Controller 需要关闭该虚拟镜像并唤醒终端.

虚拟机中还可以安装各种应用存根,对有状态的应用通信进行支持.由于虚拟机是兼容的 x86 架构,所以可以使用现有的各种库进行开发.

例如,在实验系统中实现了一个视频监控的应用存根.该存根在终端睡眠时可以保存终端最近一次摄像头采集的监控图像.当外界请求时,可以将该图像作为回应,也可以根据外接的请求来决定是否要唤醒终端,并由

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

终端采集实时图像.

虚拟镜像管理器负责对所有的镜像统一管理,包括对虚拟机的创建、关闭、修改设置、恢复等工作.虚拟镜像管理器还会记录每个虚拟机的日志,使得在服务器崩溃后,可以接收 GP-Server Controller 的命令进行恢复.

4.4 能耗监控系统

传统的直流电路功率测量方法只要测得设备的瞬时电压以及瞬时电流,就可以计算获得设备的瞬时功率.我们采用的是上海鸿引电子的智能直流功率表,对这些仪器进行简单的改装之后就可以对计算机的整机功率以及网卡功率进行测量,并将结果传输到服务器上.

4.4.1 无线网卡

目前越来越多的移动终端的无线网络直接通过 mini-PCI 接口内置于终端中,所以,这里主要介绍对 mini-PCI 的无线网卡测量系统.

mini-PCI 的接口中有不同电压的引脚,而且有多个接地脚,这些复杂接口的精确功率测量方法只能是对不同电压的引脚单独测量其电压以及电流.由于这种方法的实际工程实现有很大的困难,我们采用了一种近似的测量方法:将所有的地线并联在一起,测量总的电流大小,然后取任意一根电压引脚作为总电压来计算总的功率.这样的近似方法虽然会产生误差,但是功率的变化趋势以及变化幅度都与真实值相同,所以可用来对功率的真实变化情况做相对精确的估计.由于无线网卡的能耗一般只占整机能耗的 10%,所以采用这种方法进行测试分析主要目的在于确立能耗变化的趋势.mini-PCI 的电压不超过 5V,电流不超过 1A,所以采用量程为 5V/1A 的功率计就可以精确监控.

4.4.2 计算机整体

对计算机整体进行能耗监控的方法较为简单.传统的台式计算机的电源线是 220V 或 110V 的,所以可以直接使用交流电功率测量的方式进行测量,比如接入电路中或者采用互感技术.而笔记本的电源通常会把高压的交流电转为较低压的直流电后再接入笔记本,所以可将电压表与电流表接入到直流部分中进行测量.

本文主要针对带有无线网卡的笔记本电脑,所以采用测量直流功率的方式.而笔记本电脑的电压一般都不会超过 20V,电流不会超过 5A,所以采用量程为 20V/5A 的功率计就可以精确地进行监控.

4.5 视频监控实例

在测试基本的网页服务等服务的基础上,我们还实现了一个视频监控的应用,使一个远程计算机可以使用本网中的摄像头进行监控,并获取实时照片.这个应用非常符合节能的要求,因为终端一直正常运行而远程的请求非常少的时候会相当耗电;而且还可以测试 GP-System 的相应时间,因为获取图片的实时性非常重要.

在实现上,用户可以选择使用了 GP-Server 的虚拟网卡或虚拟镜像模块对该应用进行支持.如果用户 GP-Client 中选择了虚拟网卡方式,那么 GP-Client 会立即通知 GP-Server,GP-Server Controller 就会指挥 VNIC Controller 去建立一个新的虚拟网卡.根据 GP-Client 提供的注册信息,GP-Server Controller 会让 VNIC Controller 设置虚拟网卡的属性.当终端要进入睡眠状态时,GP-Client 会告知 GP-Server,GP-Server Controller 就会让 VNIC Controller 开启虚拟网卡,然后虚拟网卡中的附属进程也会正常运行,并广播一个 ARP 包,让网络认识的这种变化.此时,虚拟网卡就可以代替终端对各种包进行回复.如果遇到了请求视频监控的包,附属进程通过解析发现这个包需要终端来解决,就告知 VNIC Controller 需要唤醒终端.然后,VNIC Controller 就会让 GP-Server Controller 通过发送幻数据包来唤醒终端,紧接着,VNIC Controller 也会关闭该虚拟镜像.当终端恢复了,GP-Client 就广播一个 ARP 包,让网络再次认识到这种变化.由于远程监控客户端的超时重传机制,终端会接到另一个请求,然后就会正常响应该请求.对于远程监控客户端而言,刚才图像只是稍稍卡了一下,在可接受范围之内.

如果用户在 GP-Client 中选择了虚拟镜像方式,那么 GP-Client 会立即通知 GP-Server,GP-Server Controller 就会通知 Image Controller 去建立一个虚拟镜像.接着,GP-Client 会将终端的 IP、MAC 地址等基本信息发给 GP-Server,然后,GP-Server Controller 会让 Image Controller 设置虚拟网卡的属性.当终端要进入睡眠状态时,

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

GP-Client 会告知 GP-Server,GP-Server Controller 就会让 Image Controller 开启对应的虚拟镜像,同时,GP-Client 还会将睡前的监控画面打包给 GP-Server Controller.当虚拟机完全起来后,会广播一个 ARP 包,让网络认识到这种变化.然后,GP-Server Controller 会将那幅画面给虚拟机中的视频监控应用存根.如果收到了请求视频监控的包,那么视频监控应用存根会判断该请求是否需要严格的实时图像.如果不是,应用存根就会把之前保存的图像发给请求来源;如果是,就会告知 Image Controller 需要唤醒终端,之后,Image Controller 会关闭虚拟镜像,然后通知 GP-Server Controller 使用幻数据包唤醒终端.接下来的过程与虚拟网卡模式的过程相同.

5 实验结果及分析

为了说明本文的无线网 GP-System 可以带来显著的节能效果,我们做如下的评估:首先,简单对终端及其网卡的功率等特性进行测试;然后,对终端状态切换时的性能做评估;最后,对一个终端上使用与不使用 GP-System 在开启两种不同服务时的长时间能耗进行测量与对比分析,以及多个终端使用与不使用 GP-System 的长时间能耗进行测量与对比分析.

5.1 终端性能

我们在 11 台电脑上安装了客户端,使它们成为系统中的终端.然后,对其中一台进行了详细的节能评估.该计算机是 DELL LATITUDE D430 笔记本电脑,安装了 Intel® PRO/无线 3945ABG 网卡,该网卡支持无线唤醒功能.该笔记本电脑的 CPU 是 Intel® Core™ 2 CPU,频率是 1.2GHz,内存 2GB,安装了 Windows 7 操作系统.

表 1 显示了 DELL LATITUDE D430 笔记本电脑在各种状态下的功率、待机时间、状态转换时间等参数.可以看出,睡眠状态与空闲状态的功率相差了将近 10 倍,有极大的节能空间,节能后可以使待机时间大大增加.而进入睡眠状态与从睡眠中恢复的平均时间仅为 4s,这个时间较短,一般会在网络服务的超时时间内,所以可以达到无缝连接.表 2 中显示了 Intel® PRO/无线 3945ABG 网卡的功率消耗情况,网卡的功率占用了电脑总功率的 6%~7%,而在睡眠状态可以节省将近 99%的电能.

Table 1 Power consumption, battery lifetime and the time to change power states of DELL LATITUDE D430 under various conditions

表 1 DELL LATITUDE D430 在多种状态下的能量消耗、电池时间以及状态变换的时间

状态	DELL LATITUDE D430
空闲(W)	16.7
关闭屏幕(W)	11.2
睡眠状态(S3)(W)	1.67
电池容量(Wh)	42
普通待机时间(h)	2.51
睡眠待机时间(h)	25.1
进入睡眠时间(s)	4
从睡眠中恢复时间(s)	4

Table 2 Power consumption of Intel® PRO/wireless 3945ABG under various conditions

表 2 Intel® PRO/无线 3945ABG 网卡在多种情况下的功率消耗

状态	Intel® PRO/无线 3945ABG
空闲(W)	1.10
最大速率传输(W)	1.17
禁用网卡(W)	0.55
睡眠状态(S3)(W)	0.01

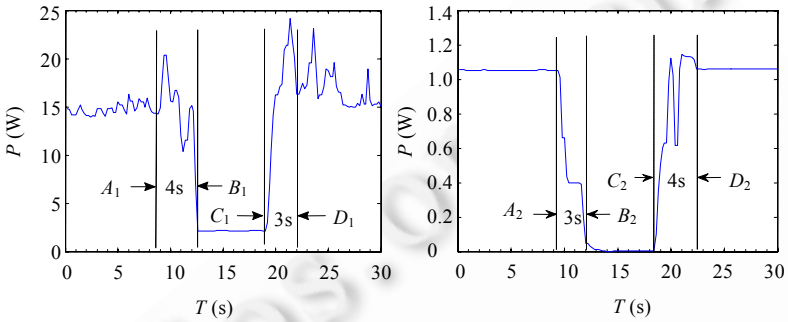
5.2 状态切换

在终端在正常工作状态与睡眠状态之间切换时,需要一定的时间.图 4 以 DELL LATITUDE D430 笔记本电脑为例,显示了状态切换时的功率变化与时间的关系.在图 4(a)中,A_1 表示计算机开始进入睡眠状态,B_1 表示计算

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

机完全进入了睡眠状态,其间共用了 4s.而在图 4(b)中,A_2 与 B_2 的相隔时间仅为 3s,则说明计算机的睡眠操作并不与网卡的睡眠操作完全同步.从 A_2 开始,网卡就失去了与外界通信的能力.从 C_1 时间开始,计算机开始从睡眠中恢复,直到 D_1 计算机整体已经可以正常地进行计算,中间经过了 3s.然而当到达 D_1 时,计算机还不能正常地通信,因为网卡还没有与无线接入点建立连接.C_2 与 C_1 几乎发生在同一时刻,到达 D_2 时,网卡已经可以与外界正常地通信,在 D_2 前有一段与无线接入点建立连接的过程.所以,DELL LATITUDE D430 笔记本进入睡眠状态用时需 4s,从睡眠状态唤醒(直到可以与外界正常通信)用时也需要 4s.

从图 4 中可以看出,在状态切换时,整个计算机的功率会比空闲状态高出许多.如果状态切换的过于频繁,则可能会导致没有节能反而增加了能耗.这一点与第 3 节中能耗节约率的假设是相悖的,但是如果状态切换的频率比较低,这样的误差就可以忽略不计.对于较长时间的实验分析,见第 5.3 节的详细分析.



(a) 整机功率变化图 (b) 无线网卡功率变化图

Fig.4 Power consumption and state transitions for DELL LATITUDE D430

图 4 DELL LATITUDE D430 切换状态时的功率变化

5.3 终端详细节能分析

为了对终端的实际节能效果进行分析,我们首先分析了一台终端在各种状态下的能耗情况并进行统计,然后对 11 台终端使用 GP-System 以及不使用 GP-System 两种情况的总体能耗进行测量与统计.

5.3.1 单终端节能分析

我们选择了一台 DELL LATITUDE D430 笔记本电脑作为终端,其无线网卡的型号为 Intel® PRO/无线 3945ABG.终端上面运行着两种应用:一个视频监控应用和一个 Web 服务器.外界会持续请求这两个应用,请求的到达满足泊松过程.其中,对视频监控应用的请求基本满足参数为 1/3600 的泊松过程,即平均每 1 个小时会有 1 个请求到达;而对 Web 服务器的请求基本满足参数为 1/300 的泊松过程,即平均每 5 分钟会有 1 个请求到达.终端的总功率以及无线网卡的功率一直被测量并被记录下来.

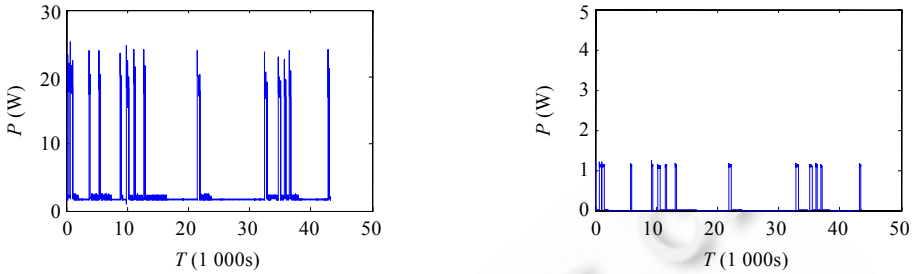
整个测量的过程是:首先,让终端处于正常运行状态并开启两种应用运行 12 小时;然后,让终端保持睡眠状态;最后,再让终端使用 GP-System 代理来响应请求,先只开启视频监控应用运行 12 小时,再仅仅开启 Web 服务器运行相同时间.其间一直有两种应用的请求到达.

终端正常工作一天并且一直运行着视频监控服务时,实验表明,整机的功率一直在 20W 左右不停地波动.经过分析得到:终端处于工作状态时的平均功率为 18.15W;当终端处于睡眠状态时,功率并没有显著的变化,基本保持在 2W 以下的固定值.经过统计,终端在睡眠状态下的平均功率为 1.67W.

图 5 中,终端使用 GP-System 功能,图 5(a)显示整个终端的功率变化,而图 5(b)显示其无线网卡的功率变化图.外界的服务请求以泊松过程到达,所以可以从图中看出请求的个数为 14 个,与期望的 12 个有一定的误差.终端被设置为空闲 5 分钟后进入睡眠状态,经过统计,每次请求到达到计算机进入睡眠的平均时间为 321.6s,也就是说,每次请求使得终端有大约 21s 左右的忙碌时间.经过统计,使用 GP-System 代理后,终端的平均功率为 3.45W.那么根据公式(2)可得,实验结果为终端的能耗节约率为 R=1–(3.45/18.15)=80.97%.如果使用公式(3),我们

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

可以估计出能耗节约率的理论值为 R=83.04%.即,理论与实际的相对误差为 2.56%.由于 DELL LATITUDE D430 的电池容量为 42Wh,则可以维持的时间为 12.17h,比原待机时间延长了 9.66h.并且从图 5(b)可以看出,网卡功率变化趋势与计算机本身一致.网卡在正常工作时的平均功率为 1.07W,在睡眠状态下的功率几乎为 0,总的平均功率为 0.11W.网卡的功率消耗占到了节电计算机总功率消耗的 6.5%.



(a) 整机功率变化图 (b) 无线网卡功率变化图

Fig.5 Power of the end device running video monitor application using GP-System in one day

图 5 终端开启视频监控应用并使用 GP-System 工作一天的功率变化

误差的产生原因主要是因为每次从睡眠中唤醒时,实际功率会在短时间内比正常运行功率高出很多,而且用户请求到达的平均值并不是每 3 600s 一次,如果延长实验时间,会将误差降低很多.

当终端仅开启 Web 服务器并使用 GP-System 时,就可以得到如图 6 所示的功率变化图.此图中的请求到达的速度与图 5(a)相比快了很多.在请求到达比较密集的时段,终端会保持较长时间不进入睡眠状态.根据统计,终端的平均功率为 5.7827W,终端的能耗节约率为 R=68.14%.

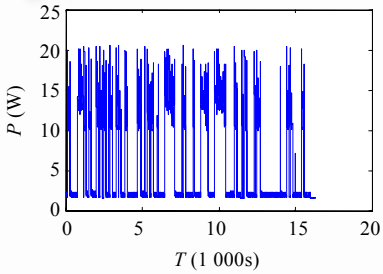


Fig.6 Power of the end device running Web server using GP-System

图 6 终端开启 Web 服务器并使用 GP-System 的功率

在上面 3 种情况下,对其能量消耗情况进行统计后可以得到如图 7 所示的能量消耗图,普通情况的功耗最大,因为终端在空闲时也处于正常运行的状态.Web 服务器与视频监控服务的能量消耗都偏低.由于 Web 服务的请求数较多,所以比视频监控服务更为耗电.而由于视频监控的单词请求的处理耗电比 Web 服务大,所以视频监控服务的能量消耗曲线的波动更大.总之,在这两种差异较大的应用中,使用 GP-System 都可达到 60%以上的能耗节约率,甚至可以达到 80%以上.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

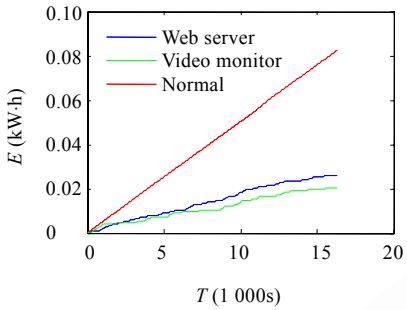


Fig.7 Energy consumption of the end device in three different cases

图 7 终端在 3 种情况下的能量消耗

5.3.2 多终端能耗分析

在 11 台终端中,有 5 台笔记本电脑(Thinkpad X201i 两台、DELL LATITUDE D430 两台、HP Pavilion 7 一台),6 台台式机(DELL OPTIPLEX 380 两台、DELL VOSTRO 200 两台、DELL OPTIPLEX 760 两台).实验选取了两个工作日的下午 1 时 30 分~5 时这两个时间段作为实验时间,这些终端的使用者在这两个时间段内始终按照他们日常的习惯去使用.不同之处在于,实验场景 1 只测量所有终端的能量消耗,而实验场景 2 则在所有终端使用 GP-System 情况下测量能耗.

测量的结果如图 8 所示,由于终端数目较多,而且实验时段保持在工作时间中,使用者行为没有太大的变化,所以两条数据线都比较平稳.测量结果显示,11 台终端在正常情况下 4 个半小时耗电会达到 6.9158kW·h,而在使用了 GP-System 以后,4 个半小时的耗电只有 1.8024kW·h,能耗节约率 R=73.94%.

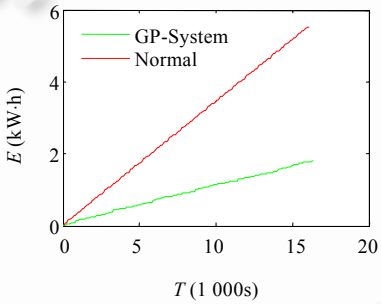


Fig.8 Energy consumption of 11 end devices using GP-System

图 8 11 台终端使用 GP-System 的能量消耗

5.4 绿色节能代理服务器能耗分析

GP-Server 占用资源少,使用普通的计算机就可以实现.我们实验中选取的计算机为 DELL VOSTRO 200,其 CPU 为 Intel® Core™ 2 Duo E8400,频率为 3.00GHz,内存为 2G,硬盘共 250G.平均功率为 174.3W.在第 5.3.2 节中的实验中,我们测得笔记本计算机在一般运行状态下功率平均为 54.2W,使用 GP-System 后,平均功率为 16.7W,台式计算机一般运行状态下的功率平均为 162.5W,使用 GP-System 后的平均功率为 43.9W.所以,如果 GP-System 只为笔记本计算机提供节能服务,那么至少需要 5 台笔记本才能保证有节能效果.如果只为台式计算机提供服务,则至少需要 2 台台式机.我们在第 5.3.2 节的实验环境中为 11 台计算机提供服务,包含 GP-Server 的耗电后,4 个半小时耗电 2.587kW·h,总的能耗节约率为 R=62.59%.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

6 结束语

信息技术领域已经成为最大的能源消耗领域之一,而计算机的能耗在其中占相当大的比重.尽管操作系统与硬件向用户提供了低能耗的模式,但是用户为了保证计算机的可访问性,而让计算机保持高能耗的空闲状态.本文中实现了一个绿色节能代理系统,在不改变计算机软硬件、网络拓扑结构的情况下,可以让局域网中的计算机进入低功耗的睡眠状态,同时保证了计算机的可访问性.当有外界请求时,目标计算机可以通过在绿色节能代理服务器中的虚拟网卡或虚拟镜像代替目标计算机进行响应,或者在必要时及时唤醒睡眠中的目标计算机.本文将该软件系统部署在一个拥有 11 台计算机的局域网中,并对使用该绿色节能代理的计算机进行了实时的功耗测量,其结果显示,该软件系统可以节省高达 60%的电能.

References:

[1] DOE. Buildings energy data book. Department of Energy, 2010. http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/

[2] Agarwal Y, Weng T, Gupta RK. The Energy dashboard: Improving the visibility of energy consumption at a campus-wide scale. In: Proc. of the BuildSys 2009. 2009. [doi: 10.1145/1810279.1810292]

[3] Allman M, Christensen K, Nordman B, Paxon V. Enabling an energy-efficient future Internet through selectively connected end systems. In: Proc. of the 6th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets). ACM Press, 2007.

[4] Roberson J, Webber C, McWhinney M, Brown R, Pinckard M, Busch J. After-Hours power status of office equipment and inventory of miscellaneous plug-load equipment. Technical Report, LBNL-53729, Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.

[5] Allman M, Christensen K, Nordman B, Paxon V. Enabling an energy-efficient future Internet through selectively connected end systems. In: Proc. of the 6th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets). 2007.

[6] Jimeno M, Christensen K, Nordman B. A network connection proxy to enable hosts to sleep and save energy. In: Proc. of the IEEE IPCCC 2008. 2008. [doi: 10.1109/PCCC.2008.4745133]

[7] Nedevschi S, Chandrashekar J, Liu JD, Nordman B, Ratnasamy S, Taft N. Skilled in the art of being idle: Reducing energy waste in networked systems. In: Proc. of the USENIX NSDI 2009. 2009.

[8] Agarwal Y, Savage S, Gupta R. SleepServer: A software-only approach for reducing the energy consumption of PCs within enterprise environments. In: Proc. of the USENIX Annual Technical Conf. (USENIX ATC 2010). 2010.

[9] Flinn J, Satyanarayanan M. Managing battery lifetime with energy-aware adaptation. ACM Trans. on Computer System, 2004, 22(2):137−179. [doi: 10.1145/986533.986534]

[10] Nedevschi S, Popa L, Iannaccone G, Ratnasamy S, Wetherall D. Reducing network energy consumpton via sleeping and rate-adaptaton. In: Proc. of the USENIX NSDI 2009. 2009.

[11] Flautner K, Reinhardt SK, Mudge TN. Automatic performance setting for dynamic voltage scaling. In: Proc. of the MobiCom 2001. 2001. [doi: 10.1145/381677.381702]

[12] Chase JS, Anderson DC, Thakkar PN, Vahdat AM, Doyle RP. Managing eenergy and server resources in hosting centers. In: Proc. of the SOSP 2001. 2001. [doi: 10.1145/502034.502045]

[13] Qureshi A, Weber R, Balakrishnan H, Guttag J, Maggs B. Cutting the electric bill for Internet-scale systems. In: Proc. of the SIGCOMM. 2009. [doi: 10.1145/1592568.1592584]

[14] Agarwal Y, Chandra R, Wolman A, Bahl P, Chin K, Gupta R. Wireless wakeups revisited: Energy management for VoIP over Wi-Fi smartphones. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Mobile Systems (MobiSys 2007). Applications and Services, 2007. [doi: 10.1145/1247660.1247682]

[15] Pering T, Agarwal Y, Gupta R, Want R. CoolSpots: Reducing the power consumption of wireless mobile devices with multiple radio interfaces. In: Proc. of the MobiSys 2006. 2006. [doi: 10.1145/1134680.1134704]

[16] Shih E, Bahl P, Sinclair MJ. Wake on wireless: An event driven energy saving strategy for battery operated devices. In: Proc. of the 8th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2002). New York, 2002. 160−171. [doi: 10.1145/570645.570666]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[17] Gupta M, Singh S. Greening of the Internet. In: Proc. of the 2003 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM 2003). 2003. [doi: 10.1145/863955.863959]

[18] Nedevshi S, Popa L, Iannaccone G, Ratnasamy S, Wetherall D. Reducing network energy consumption via sleeping and rate-adaptation. In: Proc. of the USENIX NSDI 2008. 2008.

[19] Agarwal Y, Hodges S, Chandra R, Scott J, Bahl P, Gupta R. Somniloquy: Augmenting network interfaces to reduce PC energy usage. In: Proc. of the USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2009). 2009.

[20] Meisner D, Gold BT, Wenisch TF. PowerNap: Eliminatong server idle power. In: Proc. of the ASPLOS 2009. New York: ACM Press, 2009. [doi: 10.1145/1508244.1508269]

[21] Sorber J, Banerjee N, Corner MD, Rollins S. Turducken: Hierarchical power management for mobile devices. In: Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys 2005). 2005. [doi: 10.1145/1067170.1067198]

[22] ACPI. Advanced Configuration and Power Interface Specification. Revision 4.0. 2009.

[23] Intel. Intel remote wake technology. http://www.intel.com/support/chipsets/rwt/

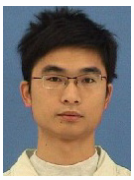
[24] Apple. Wake on demand. http://support.apple.com/kb/HT3774

刘晨(1988－),男,陕西西安人,硕士生,主要研究领域为无线网络,高能效系统.

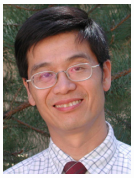
陆佳亮(1981－),男,博士,助理研究员,CCF 会员,主要研究领域为无线网络,无线传感器网络,无线体域网,高能效系统.

孔令和(1983－),男,博士生,主要研究领域为无线传感器网络.

吴凤刚(1987－),男,硕士生,主要研究领域为无线网络,传感器网络,车载网络.



吴强(1987－),男,硕士生,主要研究领域为可重构计算.



伍民友(1954－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为高性能计算并行计算,无线网络,无线传感器网络,智能交通系统.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn