

多接口移动主机最优化费用和性能方法研究

张春燕¹⁾ 徐 恪¹⁾ 王保进²⁾ 沈 蒙¹⁾

¹⁾(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

²⁾(解放军信息工程大学信息工程学院 郑州 450002)

摘 要 目前移动主机普遍具有多个网络接口,可以由这些接口通过不同的网络服务提供商(ISP)接入到 Internet 中.因此,移动主机与 Internet 之间就可能存在多条路径,通信的费用和性能取决于 ISP 的收费策略和网络通信性能.文中首先对移动主机与 Internet 通信进行建模,然后提出一种基于主动探测可用路径的最优化费用和性能的流量分配方法.最后,对此方法进行仿真,并与几种常见流量分配方法进行对比.结果表明本文所提出的方法能根据主机对费用和性能的需求合理分配和控制流量.

关键词 多网络接口;移动主机;费用和性能最优化;主动探测;流量分配

中图法分类号 TP393 DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2011.02176

Optimizing Cost and Performance in Multiple Interface Mobile Hosts

ZHANG Chun-Yan¹⁾ XU Ke¹⁾ WANG Bao-Jin²⁾ SHEN Meng¹⁾

¹⁾(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

²⁾(Institute of Information and Engineering, PLA Information and Engineering University, Zhengzhou 450002)

Abstract Nowadays, more and more mobile hosts have multiple network interfaces, through which the hosts can connect to different ISPs and access the Internet. In this situation, there are multiple paths between the mobile hosts and the Internet. The cost and performance of these paths depends on the ISP charging strategy and the network communication capability. This paper models the communication between mobile hosts and the Internet, and then proposes a flow distribution method for optimizing cost and performance based on available path exploration. At the end, simulation on the method is presented. Compounded with other methods, our method can better distribute and control traffic flow according to the mobile hosts' s needs for cost and performance.

Keywords multiple network interface; mobile hosts; cost and performance optimization; active detection; traffic distribution

1 引 言

随着互联网的高速发展,最初的设计理念已不

再适应当前的应用需求.互联网设计的最初假设是每个主机只有一个接入网络和一个默认网关.但经过几十年的发展,尤其是移动互联网时代的到来,连接到 Internet 的手段更加多样化:有线接入、Wi-Fi

收稿日期:2011-08-29;最终修改稿收到日期:2011-09-15. 本课题得到国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2008AA01A323, 2009AA01A324, 2009AA01A334)、新世纪优秀人才支持计划资助.张春燕,女,1987年生,硕士研究生,主要研究方向为无线网络、物联网体系结构和路由. E-mail: cyzhang87@gmail.com. 徐 恪,男,1974年生,博士,教授,主要研究领域为下一代互联网、交换和路由结构、P2P网络、overlay网络、物联网.王保进,男,1974年生,博士,讲师,主要研究方向为宽带信息网络、嵌入式系统.沈 蒙,男,1988年生,博士研究生,主要研究方向为网络流量工程、P2P与覆盖网络.

网络、GPRS/EDGE、3G 网络等,网络已经向着异构网络融合的趋势演进;连接到 Internet 的设备也多种多样:从 PC 机到手机,到万物均可联网的物联网等。可以说,终端和网络环境的变化远超出了在 20 世纪 80 年代人们设计 TCP/IP 协议和模型时候的想象。在这种场景下,具有多个网络接口的移动主机应运而生,这些移动主机不仅包括手机,还包括各种各样的 PDA、GPS 设备等。

而以 IPv6^[1-2]为标志的下一代互联网的出现为移动主机带来了很大的便利。下一代互联网的目标是使网络向更大、更快、更安全的方向发展,针对当前 IP 地址资源日益枯竭的现象,提出了 IPv6 协议。这个协议 IP 地址资源丰富,使得点到点的通信真正成为现实。IPv6 将地址空间从 32 位扩充到了 128 位,因此完全可以实现为移动设备分配地址这一需求。而且 IPv6 具有的邻居发现机制、安全机制等为移动网络解决了许多后顾之忧。

目前,固定主机也大都具有多个网络接口,但多接口移动主机与固定主机有着较大的区别。首先,由于固定主机地理位置固定,所以不会很频繁地在网络接口间进行切换,而移动主机具有移动性,通常会因为地理位置的改变而引起网络的切换和通信质量的改变;其次,固定主机接入网络都具有高可靠的服务质量保障,而移动主机不能很好地保证其链路的可靠性和容错能力,因此应该实时寻找多条好的路径;最后,移动主机接入的网络具有丰富性,不仅可以接入移动网络,还可以接入为固定主机提供服务的网络中。现在对于多接口固定主机的研究主要集中在多宿主(multihoming)^[3]的设计实现和优化上,但由于固定主机和移动主机的区别,移动主机不能完全借鉴固定主机的做法。

多接口移动主机在接入网络后,与 Internet 之间就存在着多条路径,这些路径的费用和性能取决于网络服务提供商的收费策略和网络通信性能,因此不能简单地选择其中一条或者多条路径。本文通过对移动主机与 Internet 通信进行建模,针对移动主机通信的特点,对其费用和性能通过两个步骤进行最优化:第 1 步,探测通过 ISP 的可用路径集;第 2 步,在该可用路径集中,求解使得费用和性能最优的流量分配方案。最后,本文对此最优化方案进行仿真。仿真表明,移动主机不能做到费用和性能均为最优。当费用最优时,性能较差,当性能最优时,费用较高,因此只能取两者的折中方案。而 ISP 的容量也对费用和性能有一定的影响,在相同的收费策略和链

路性能条件下,应该选取较大容量的 ISP。另外,本文所提出的费用和性能最优方案虽然计算稍微复杂,但计算出的分配方案能够较好满足移动主机的需求。这个研究也可以用于多接入站点的性能和代价的优化。

本文第 2 节介绍当前国内外相关工作;第 3 节对多接口移动主机的通信场景进行抽象和建模;第 4 节介绍求解该模型最优化费用和性能的方案;第 5 节对该模型进行仿真,测量多接口移动主机分配方案的性能和费用,并与常见的几种流量分配方案进行对比和分析,最后结合本文所提方案给出一个实际应用的例子;第 6 节对本文工作进行了总结,并指出进一步的工作。

2 相关工作

为了解决多接口移动主机的相关问题,IETF 于 2008 年成立了 MIF 工作组(Multiple Interface Working Group)^①,进行多接口 IP 模型标准化工作。MIF 工作组对多接口的定义是移动主机利用多个接口接入一个或者多个供给域,并为其分配来自不同域的 IP 地址,主机可以利用这些地址同时并独立地进行通信。目前 MIF 工作组的主要工作集中在移动主机多接口通信机制上,主要包括多接口虚拟化^②、多接口 API^③及连接管理器^④等。

在多接口移动主机费用和性能优化方面的研究较少,但多宿主主机的优化问题和策略配置研究较为成熟,主要关注点是多宿主主机的实现技术^[3-4]、宿主路径选择^[5]和费用性能优化^[6-8]以及与覆盖网络的比较^[10]。从本质上讲,多宿主主机是一台具有多个网络连接的主机,在 Internet 中,多宿主连接系统是一个连接到两个上游服务提供商的系统。

在文献[6]中对多宿主机的费用和性能进行了优化分析,提出了 4 种优化场景和策略,主要做法是通过在费用的约束条件下最优化性能的思想,将问

① MIF. <http://www.ietf.org/dyn/wg/charter/mif-charter>.

② Hong Y, Youn J. Virtual interface for multiple interfaces in a host draft-hong-mif-virtual-interface-02. <http://tools.ietf.org/html/draft-hong-mif-virtual-interface-02>. October 25, 2010.

③ Liu D, Ismailov Y, Cao Z. Socket API Extension for MIF Host draft-liu-mif-api-extension-03. <http://tools.ietf.org/html/draft-liu-mif-api-extension-03>. October 25, 2010.

④ Seite P, Feige G, Melia T. Connection Manager requirements draft-seite-mif-connection-manager-02. <http://tools.ietf.org/html/draft-seite-mif-connection-manager-02>. October 25, 2010.

题转换成最小花费多物网络流(Minimum-Cost Multicommodity Flow, MCMCF)的线性规划问题. 但该文针对的是固定主机, 没有考虑主机移动性带来的频繁探测和切换网络的问题, 并且算法复杂, 对于移动主机而言计算量过大. 文献[7]提出了一种在线服务提供网络(Online Service Provider Networks, OSPN)中优化费用和性能的算法. 它首先使用一种新颖的路由注入方法探测可用路径, 这种方法能不影响正在使用路径的情况下探测出新路径的性能; 然后根据代价、性能等因素计算费用和性能最优的流量分配方案. 但由于该文针对的场景是 OSPN 网络, 包含网络服务器和数据中心, 提供从数据中心到用户的路径, 且由于连接的 ISP 数量庞大, 因此与多接口移动主机的多路径有着本质区别.

3 多接口移动主机通信模型

移动主机可以具有多个网络接口(如 Wi-Fi, GPRS/EDGE, 3G 网络等), 每个接口可在某一时刻与一个 ISP 连接, 通过与 ISP 协商获取该接口的配置信息(包括 IP 地址、网关信息等), 这样一台移动主机就可以通过不同的接口接入到 Internet 中. 当移动主机需要访问 Internet 中的某个资源时, 可以通过不同的接口和不同的 ISP 产生不同的路由访问该资源.

图 1 是多接口主机的应用场景图. 图中有两种通信方式: 一种是移动主机间的通信, 如图中左下角的 iPhone 与右下角手机间的通信; 另外一种移动主机和固定主机或者服务器的通信, 如图中 iPhone 与右上角服务器间的通信. 移动主机通常具有多个接口, 如图 1 中左下角 iPhone 有 IF_1 的 Wi-Fi 接

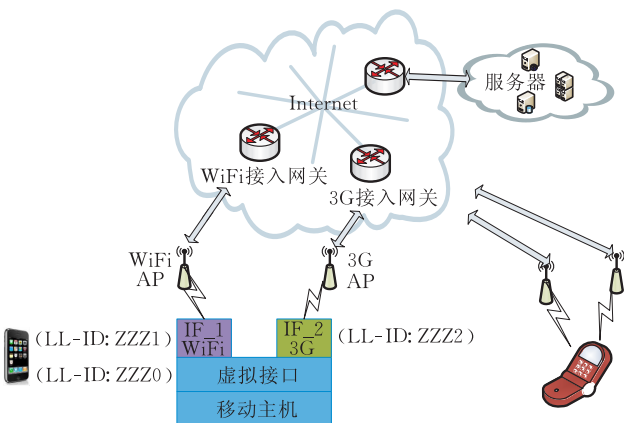


图 1 多接口移动主机通信场景

口和 IF_2 的 3G 网络接口, 并且各自具有不同的链路层标识(LL_ID, Link Layer Identifier). 为了能够灵活高效地操作多个接口, IETF MIF 工作组的做法是在物理接口之上建立一个虚拟接口, 这个接口对网络层透明, 通过连接管理器管理这些接口.

基于图 1, 本文对所研究问题进行如下假设:

(1) 无论是移动主机间通信还是移动主机与服务器或者固定主机通信, 将另外一个被通信节点抽象为一个位于 Internet 中的目的通信节点, 记为 Node.

(2) 在某一时刻, 移动主机的一个接口只能连接一个 ISP, 这也是移动主机通常的做法; 在与一个 ISP 断连之后, 可以尝试连接其他 ISP.

(3) 在某一时刻, 可以有多个 ISP 提供从移动主机到目的通信节点的链路.

(4) 移动主机与通信节点通信是双向的, 即移动主机既有上游通信流量(Upstream), 也有下游通信流量(Downstream). 收费的通信量记录的是双向的通信流量, 而不管是上游流量还是下游流量. 因此, 为了方便建立模型, 将这两种方向的流量都标记为上游通信流量.

抽象出的多接口移动主机通信模型如图 2 所示. 图中, Host 表示移动主机节点, Node 表示目的通信节点. 图中的连线和箭头表示 Host 产生的网络流量. Host1 可以通过 ISP1、ISP4 和 ISP5 访问目的节点 Node1; Host2 可以通过 ISP1、ISP2 和 ISP3 访问目的节点 Node2.

将图 2 的通信场景简化模型进行抽象, 得到多接口移动主机的流量分配模型. 假设主机和 ISP 无连接可视为链路上分配的流量为零, 则主机和每个 ISP 之间可以建立关系图, 如图 3 所示. 在图 3 这个模型中, 由于只关心 Hosts 和 ISPs 间的流量分配, 所以可以忽略目的通信节点 Nodes. 在这个模型中, 可抽象出 3 个集合, 分别是多接口移动主机(左边节

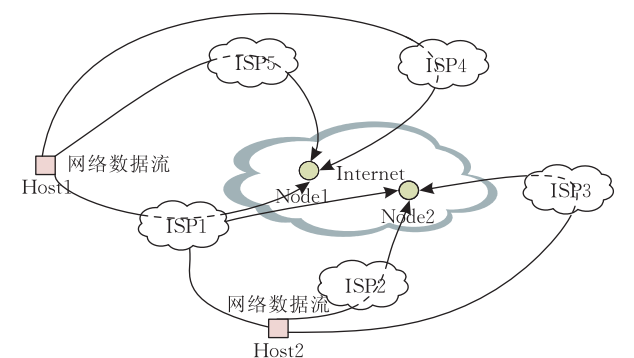


图 2 多接口移动主机通信场景简化模型

点)组成的 Host 集、为移动主机提供接入服务的 ISP(中间节点)组成的 ISP 集、移动主机和 ISP 间的链路组 Link 集. 由于移动主机具有移动性、数据需求实时性、接入网络丰富性等特点,这 3 个集合很有可能实时变化,这也是移动主机不同于固定主机的地方.

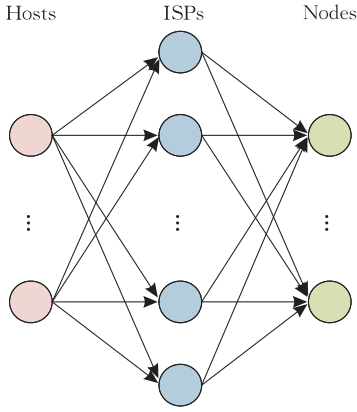


图 3 多接口移动主机流量分配模型

在为移动主机多个接口分配流量时,需要经过两个步骤:首先,由于链路易失效,ISP 集和 Link 集易变,因此在每次分配流量之前,都需要首先探测可用路径.第 2 步,在所有可用路径上,求解使得费用和性能最优的流量分配方案.

4 最优化费用和性能的分配方案

首先对本文中所用到的标记和变量进行说明.在未提前声明情况下,本文所使用符号意义均参照表 1 中的解释.

表 1 标记和变量声明

符号	描述
$Cost$	移动主机总的费用描述
$PerfMeasurement$	移动主机总的性能描述
K	ISP 的数量, k 为 ISP 的索引
I	可引发数据流的移动主机数量, i 为主机索引
$C_k(x)$	ISP $_k$ 的收费函数, x 是收费变量,是分段线性非递减函数
Vol_i	移动主机 i 的流量
$Price_k$	ISP $_k$ 的计费单价
$f_{i,k}$	移动主机 i 到 ISP $_k$ 分配的流量比例
Cap_k	ISP $_k$ 的容量,即 ISP 所能承受的最大流量
$RTT_{i,k}$	移动主机 i 分配给 ISP $_k$ 流量经历的 RTT
α	ISP 的不能超出正常容量的常量
P	网络的总体性能指标

4.1 探测可用路径

在不影响移动主机正常通信的情况下,搜索新的路径,并计算这条新路径的性能指标,加入到

Link 集中,同时还需要实时更新 Link 集中的链路性能值.

参考文献[7]中介绍了一种路由注入的探测方法,它可在不改变当前流量分配的路径的情况下,测量新路径性能.文献[11]提出了一种主动探测覆盖网络路由的方法,它针对覆盖网络的特点,如底层网络变化带来的拓扑变化、网络负载的实时变化,主动地在选定的节点上注入流量,测量其在可用路径上的性能.上层网络需要根据探测出的底层改变,调整其路由策略.该方法可以主动寻找和探测节点带宽,测量尺度比较丰富.文献[12]提出一种基于包排队方式的双步长网络路径可用带宽探测方法,通过检测包的排队延时来获取可用带宽,减少了探测次数和运行时间,降低了探测开销.

根据移动主机自身和接入网络的特点,本文采用主动探测路径性能的方法,性能尺度将在 4.3 节性能评估模型中进行介绍.探测过程是:首先,检测移动主机所在范围内的可提供服务的 ISP.主机的可用接口在与 ISP 建立连接时,ISP 会返回网络的配置信息;其次,借鉴文献[7]中的方法,在不影响当前流量分配的情况下,测量该连接的性能.

在探测出可用路径集后,就可以对所有移动主机在其可用路径上计算流量分配方案.接下来分别介绍移动主机采用的费用模型和性能模型.

4.2 费用模型

目前国内 ISP 主要有 3 家:中国电信、中国网通和中国移动.接入方式主要有 ADSL、GRPS、3G 网络等.其资费方式各不相同,并且因地域差异和各人喜好也有不同的收费标准.但这些收费方式都有一个共同特点:均包含两个部分,一定流量或者时间的固定费用和超出流量或者时间的可变费用.将计费流量或者时间记为 ω ,常量部分记为 $ConstPayment$,超出部分记为 $ExcessPayment$,可用下面公式表示:

$$Cost(\omega) = ConstPayment + ExcessPayment(\omega).$$

通常,这个超出部分的费用是关于流量或者时间的线性函数,将常量部分流量或者时间的阈值记为 ω_0 ,超出部分的费用可表示为

$$ExcessPayment(\omega) = Price \times (\omega - \omega_0), \omega > \omega_0.$$

当未超过阈值时,新增流量或时间不会收费,可视为 $Price$ 为 0;当超过阈值时,新增流量或时间按线性收费.对于需要分配的流量或时间 x , $Cost$ 可简单归纳为

$$Cost = Price \times x,$$

其中,

$$Price \begin{cases} = 0, & \omega \leq \omega_0 \\ > 0, & \omega > \omega_0 \end{cases}$$

国外一种最常用的 ISP 计费方法是 95th percentile, 它是一种广泛使用的衡量网络规律和持续利用率的数学计算方法. 使用这种方法可以避免因不正常使用或者网络突发事件而导致的突发高流量现象. 使用方法是在取样间隔内(例如 300 s)计算平均带宽, 计算方法是数据流量/间隔时间(300 s), 在一段时间(如一个月)后, 对这些间隔带宽进行从高到低排序, 去掉最高的 5%, 剩下的最高的数据作为这个月的计费带宽.

将计费带宽记为 x , 则费用函数为

$$Cost = Price \times x.$$

无论是国内还是国外的计费方式, 总的费用都是将各个 ISP 的收费累加. 求费用的最优解可写为

$$\min Cost = \sum_{k=1}^K Cost_k(x_k) = \sum_{k=1}^K (Price_k \times x).$$

本文使用的流量计量方式将基于此公式, 根据各个 ISP 收费单价的不同计算费用.

4.3 性能模型

文献[6]介绍了几种衡量网络性能的方法, 网络性能的尺度包括网络延时、吞吐率、可利用带宽、通信质量(丢包率)等. 由于移动主机硬件资源有限, 而且需要实时探测路径, 探测路径不能过于复杂, 因此采用 RTT 延时度量网络性能.

在度量网络性能时, 需要兼顾每条链路的性能和分配的流量情况, 可由如下公式计算得到:

$$P = \frac{\sum_i \sum_k (f_{i,k} \times Vol_i \times RTT_{i,k})}{\sum_i Vol_i},$$

其中: P 值越小, 总体性能越好; 反之, P 值越大, 总体性能越差.

4.4 计算费用和性能的最优化方案

上文介绍了费用和性能模型, 下面介绍如何获取费用和性能的最优化流量分配方案.

4.4.1 节给出了一种在性能约束 P 下的费用最优的流量分配方案, 并进一步研究了性能约束 P 与最优费用的关系; 4.4.2 节在 4.4.1 节计算出的性能和费用关系基础上, 给出一种根据用户要求定制的费用和性能的多约束优化方案.

4.4.1 费用最优方案

首先求解在性能一定条件下的费用最优线性规划问题. 目标函数是总费用最小, 即对于所有移动主机的分配给所有 ISP 流量的费用之和最小.

目标函数:

$$\min Cost = \sum_{k=1}^K (Price_k \times \sum_{i=1}^I (f_{i,k} \times Vol_i)).$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^I (f_{i,k} \times Vol_i) \leq \alpha \times Cap_k \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (f_{i,k} \times Vol_i \times RTT_{i,k}) \leq \sum_{i=1}^I Vol_i \times P \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K f_{i,k} = 1 \quad (3)$$

$$\forall i, k, \quad i \in [1, 2], k \in [1, k], 0 \leq f_{i,k} \leq 1 \quad (4)$$

约束条件(1)是对每个 ISP 的容量建立的约束, 所有移动主机分配给 ISP_k 的流量之和不能超过 ISP_k 容量的 α 倍. 约束条件(2)是针对性能建立的约束, P 值可调. 约束条件(3)保证了每个移动主机分配的流量都可到达 ISP. 约束条件(4)确定了解区间的正确范围.

在这组线性规划表达式中, $Price_k, \alpha, Cap_k$ 是可以从日常数据中提取的常量, $Vol_i, RTT_{i,k}$ 可以在实际应用中测得, 因此可以计算出在性能约束为 P 的条件下, 移动主机为每个 ISP 分配的流量比例 $f_{i,k}$.

改变 P 值, 得出最优的费用, 可得出一条费用和性能的曲线. 不同的移动主机和 ISP 的参数得到的曲线有所不同, 如图 4 所示. 可知费用和性能是相互约束的, 当性能较好时, 费用会较高; 当费用较少时, 性能会较差.

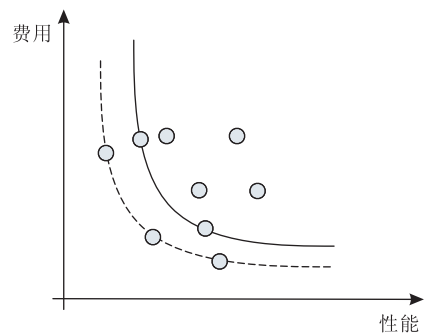


图 4 费用和性能关系

4.4.2 最优化费用和性能方案

4.4.1 节中介绍的方案只是在性能一定的条件下求解最优的费用, 而没有很好地将两者结合起来. 而实际情况是在大多数情况下, 无法确定一个实际的性能值. 为了能更好地解决这个问题, 借鉴 4.4.1 节已经得出的结论, 设计一种包含费用和性能的双变量的目标函数:

$$\min Z = Cost + \lambda \times PerfMeasurement, \lambda \in [0, \infty)$$

其中: $PerfMeasurement$ 是将 4.4.1 节中性能指标 P 改为连续变量后的移动主机性能描述量。 λ 是费用和性能的折中参数,根据移动主机的需求而定。 λ 取值越小,说明用户越注重费用;反之 λ 越大,说明用户越注重性能。

考虑到 λ 取值范围太大,将其归一化到 $[0,1]$ 之中。归一化的好处在于使得用户更能理解这个调节费用和性能的参数。当这个参数接近 0 时,说明看重费用最优,当接近 1 时,说明看重性能最优。

在众多归一化方法中,选择反正切函数对 λ 进行归一化。归一化后的参数记为 γ ,公式如下:

$$\lambda = L \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2}\gamma\right), \gamma \in [0,1]$$

其中, L 为归一化常量,可以由统计数据给出。

这是一个多目标的线性规划问题。但由于这个目标函数里只有两个决策变量,可采用直观的图解法进行求解。该问题的可行域是在 4.4.1 节中已经求解出的不同场景下最优化的费用和性能关系曲线,利用图解法可以求出目标函数与相应曲线的交点,通过计算费用和性能曲线和目标函数 $Z = Cost + \lambda \times PerfMeasurement$ 相切交点的费用和性能取值,从而可求出对应的流量分配方案,如图 5 所示。

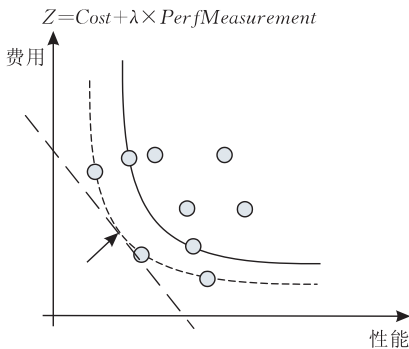


图 5 λ 约束下的最优费用和性能

综上所述,计算费用和性能的最优化流量分配方案的具体过程有两步:第 1 步,在若干个单位时间间隔后探测可用路径,获得该 ISP 的容量、价格等信息,并测量出该移动主机到 ISP 间的 RTT;第 2 步,根据获得的这些信息,计算最优费用和性能的流量分配方案。在第 2 步中又分为 3 个步骤,首先需要计算某特定场景下的费用和性能曲线 $Cost = Fun(PerfMeasurement)$;其次,求解该费用和性能曲线与目标函数相切的交点;最后,按照这种分配方案为每个移动主机分配流量。

这个过程的伪代码描述如下:

//第 1 步:探测可用路径

```
ExploreAvailablePaths();
//第 2 步:计算最优费用和性能流量分配方案
//输入:ISP, Cap, RTT, Price, TrafficFlow, lambda
//输出:流量分配方案 f, 并分配流量
OptCostAndPerformance (ISP, Cap, RTT, Price,
TrafficFlow, lambda){
    //首先计算费用和性能曲线
    For each P from 0 to P_max
        Do Cost[i] = LinearProgram(P[i], ISP, Cap,
RTT, Price, Vol);
    End
    //根据 P 和 Cost 的取值,拟合 Fun 函数, A 为计算
//所得的 Fun 费用和性能函数的系数
A = FunctionFitting('Fun', P, Cost);
//其次求解费用和性能曲线与目标函数相切的交
//点,转换为求费用和性能曲线的斜率为 -lambda 时的
//费用、性能取值以及流量分配方案 f
FunDiff = diff(Fun); //求 Fun 函数的导数
Compute(FunDiff, -lambda), get P, Cost, and f;
//最后按照这种分配方案为每个移动主机分配流量
For each host[i]
    VolISP[i, j] = Vol[i] * f[i, j];
End
}
```

5 仿真与分析

第 4 节介绍了费用和性能最优化的流量分配方案,接下来对该方案进行仿真和分析。

5.1 费用和性能的关系

实验仿真环境设置:有 3 台移动主机,分别设置流量为(100 bps, 200 bps, 300 bps);4 个 ISP,费用分别为(1CNY, 1.5CNY, 2CNY, 0.5CNY)。设计两种 ISP 带宽容量场景,第 1 种情况 ISP 容量(即表 1 中 Cap)有限,设置 ISP 容量均为 400 bps,第 2 种 ISP 容量足够容纳所有流量需求,设置 ISP 容量为 800 bps;已知已经探测得到从移动主机到每个 ISP 每条链路的链路状况 RTT, α 设定为 0.95, P 值从 0.5 取到 20,得到相应的最小费用。实验的目标是计算当 3 台主机分别有一定数量的数据请求发送时的流量分配策略 f 。

求解过程:根据 4.4.2 节最优化费用和性能方案中设计的伪代码求解过程,在探测出可用路径后,首先将参数(ISP, Cap, RTT, Price, TrafficFlow, λ)代入线性规划方程组中,求解出性能 P 和费用 $Cost$ 的数据,根据 P 和 $Cost$ 的取值,拟合出费用和性能的关系曲线的表达式;其次,求解费用和性能曲

线与目标函数相切的交点;最后根据交点求出流量分配方案 f .

测量结果如图 6 所示,第 1 组数据(x_1 和 y_1)是当 ISP 容量有限的情况下测得的,第 2 组数据(x_2 和 y_2)是当 ISP 的容量可以容纳所有流量需求时测得的.之后对这些数据使用数学工具进行拟合,通过多次测试,设计了一个较优的拟合函数: $y(x)=a+c/x+d/x^2+f/x^3+e/x^4$.图 6 中右上曲线是由第 1 组数据拟合得到的,左下曲线是由第 2 组数据拟合得到的.

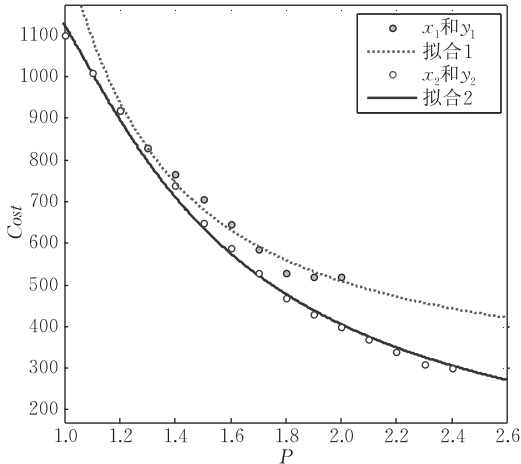


图 6 不同流量场景下得到的费用和性能关系图

5.2 最优费用和性能方案

在 4.4.2 节中介绍了求解最优费用和性能的方法.根据这个方法,当用户给定一个归一化参数 γ (如 $\gamma=0.5$) 时,则可以根据归一化公式计算出 λ (若已知归一化常量 $L=500$), $\lambda=500$.在图 6 求得的费用和性能关系曲线中,如果求在 ISP 容量较大条件下,取 $\lambda=500$ 时的费用和性能最优分配方案,即求图中左下曲线与 $Z=Cost+\lambda \times PerfMeasurement$ 的相切点(如图 7 所示),则根据在 4.4.2 节中给出的求解方法,求得 P 为 1.7,费用是 530,最优化分配方案是

$$f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

即移动主机 1 将流量全部分配给 ISP1,主机 2 将 60% 的流量分配给 ISP1,40% 分配给 ISP3,主机 3 将全部流量分配给 ISP3.

5.3 流量分配方案对比

为了测试本流量分配方案(为了与单路径区分,下面将本方案称之为多路径方案)的性能和费用的优劣,使用多路径($\gamma=0.5, \lambda=500$)方案、平均分配

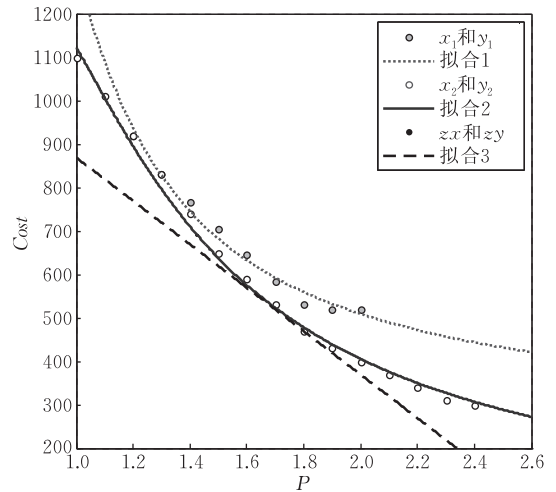


图 7 $\lambda=500(\gamma=0.5)$ 时最优的费用和性能

方案、多路径($\gamma=0, \lambda=0$)方案、单一路径(费用低)方案、多路径($\gamma=0.97, \lambda=10000$)方案和单一路径(性能好)方案进行测试,并将这 6 种方案进行对比.同时,为了体现出本分配方案在不同场景中的效果,分别设计了 4 种不同的流量场景.

(1) 3 台移动主机流量不相同,分别设置为 100 bps, 200 bps, 300 bps;

(2) 3 台移动主机流量相同,且总流量未超过任何 ISP 的容量,设置均为 100 bps;

(3) 3 台移动主机流量相同,且总流量超过了其中一个 ISP 的容量,但两台移动主机流量之和未超过任何 ISP 容量,设置均为 400 bps;

(4) 3 台移动主机流量相同,且总流量超过了其中任何一个 ISP 的容量,两台移动主机流量之和也超过了任何 ISP 的容量,设置均为 600 bps.

其中,多路径方案是指本文所设计的方案,分别取 λ 权衡费用和性能的情况以及 λ 的两种极值情况,由 γ 的取值可以对 λ 进行控制;平均分配方案是指每个移动主机将其流量在每个时刻都平均的分配给其连接的 ISP;单一路径(费用低)方案是指移动主机只选择其中一条路径分配流量,选择时兼顾所选的路径使得总体费用最低;单一路径(性能好)方案也是指移动主机只选一条路径,但选择时兼顾所选的路径使得总体性能最好.

表 2 是经过计算得到的各种流量分配方案的费用和性能描述值.按照表 2 分别对这 6 种方案的费用和性能进行绘图.横坐标表示 4 种流量场景,纵坐标分别表示费用或者性能.图中每种流量场景中的 6 个条形依次代表表 2 中的 6 种方案.这 6 种方案的费用对比如图 8 所示,性能对比如图 9 所示.

表 2 6 种流量分配方案在 4 种流量场景下的费用和性能

方案	描述值			
	(100 bps, 200 bps, 300 bps)	(100 bps, 100 bps, 100 bps)	(400 bps, 400 bps, 400 bps)	(600 bps, 600 bps, 600 bps)
多路径($\gamma=0.5$)方案	$C=530, P=1.7$	$C=410, P=1.2$	$C=920, P=1.82$	$C=1560, P=1.8$
平均分配方案	$C=750, P=1.9$	$C=375, P=1.8$	$C=1500, P=1.8$	$C=2250, P=1.8$
多路径($\gamma=0$)方案	$C=300, P=2.3$	$C=150, P=2.3$	$C=820, P=2.0$	$C=1560, P=1.8$
单一路径(费用低)方案	$C=300, P=2.3$	$C=150, P=2.3$	$C=1200, P=1.33$	$C=1800, P=1.67$
多路径($\gamma=0.97$)方案	$C=1100, P=1.0$	$C=500, P=1.0$	$C=1820, P=1.1$	$C=2190, P=1.3$
单一路径(性能好)方案	$C=1100, P=1.0$	$C=500, P=1.0$	$C=1200, P=1.33$	$C=2100, P=1.33$

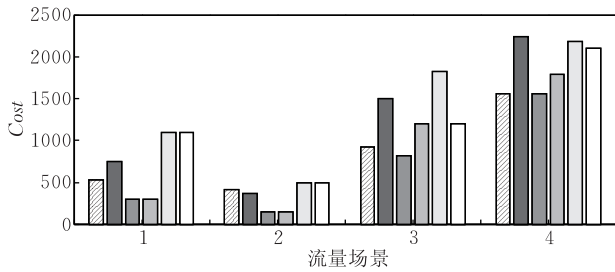


图 8 6 种流量分配方案在 4 种流量场景下的费用对比

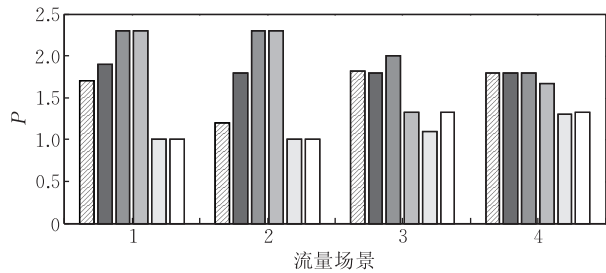


图 9 6 种流量分配方案在 4 种流量场景下的性能对比

从图 8 中可以看出,这 6 种分配方案在费用上差异较大.从总体来看,第 3 种和第 4 种方案费用较低,这是因为多路径($\gamma=0$)方案,折中参数 $\lambda=0$,即只考虑费用最优,与单一路径(费用低)方案目的相同;第 1 种和第 2 种方案费用较低;而第 5 种和第 6 种方案费用较高,这是因为多路径($\gamma=0.97$)方案折中参数 $\lambda=10000$,几乎只考虑了性能最优,忽略了费用的影响,与单一路径(性能好)方案目的相同.然后两两对比方案的费用.对比平均分配方案,多路径($\gamma=0.5, \lambda=500$)方案在费用上普遍较低;对比单一路径(费用低)方案,多路径($\gamma=0, \lambda=0$)方案费用要低;对比单一路径(性能好)方案,多路径($\gamma=0.97, \lambda=10000$)方案费用偏高.

从图 9 中可以看出,这 6 种分配方案的性能差异也较大.从总体上来看,第 5 种和第 6 种方案性能最好,这是因为($\gamma=0.97, \lambda=10000$)方案几乎只考虑了性能最优,而单一路径(性能好)方案也是只考虑了性能,第 1 种和第 2 种方案性能较好;而第 3 种和第 4 种方案的性能最差,这是因为这两种方案都只考虑了费用最优,而忽略了性能.然后两两对比方

案的性能.对比平均分配方案,多路径($\gamma=0.5, \lambda=500$)方案在性能上普遍要好;对比单一路径(费用低)方案,多路径($\gamma=0, \lambda=0$)方案性能稍差;对比单一路径(性能好)方案,多路径($\gamma=0.97, \lambda=10000$)方案性能要好.

由上面费用和性能的比较可得知,本文所述的多路径分配方案能更好地按照移动主机的需求分配和控制流量.由 λ 决定费用和性能之间的权衡关系.当 λ 取值较小时,多路径方案可以做到费用最低;当 λ 取值较大,多路径方案可以做到性能最好; λ 取中间值,多路径方案可以做到费用和性能两者的折中.

再对这些方案的复杂性进行分析.在多路径方案中,首先求解了一个线性规划问题,采用内点法时该问题具有多项式级 $O(n^3)$ 的复杂度^[13].然后是求解费用和性能曲线与目标函数的相切点,这两个函数都是多项式函数,因此具有多项式级 $O(n^4)$ 的复杂度.最后再通过费用和性能求解流量分配,这是一个多项式级 $O(n^2)$ 的复杂度问题.因此,多路径方案具有 $O(n^4)$ 的复杂度.平均分配方案可经过有限步将流量分配在各个链路上,因此是一个 $O(1)$ 的问题.单一路径的两种方案是一个单目标的整数规划问题,复杂度是 $O(n^2)$.但复杂性估算的是最坏情况,一般情况下线性规划的复杂度不会太高.下面对这几种方案进行进一步对比和分析.

从表 3 的对比可知,每种方案都有优缺点,但相比本文所提出的方案虽然计算稍微复杂,但给出的流量分配方案是最为合理的,且可以根据移动主机的需求分配和控制流量.

综上所述,从 5.1 节可知,移动主机不能做到费用和性能均为最优.当费用最优时,性能较差,当性能最优时,费用较高,因此只能取两者的折中方案.而 ISP 的容量也对费用和性能有一定的影响,在相同的收费策略和链路性能的条件下,应该选取较大容量的 ISP.从 5.2 节和 5.3 节可知,本文所提出的费用和性能最优方案虽然计算稍微复杂,但计算出的分配方案能够满足移动主机的需求.

对于优化费用和性能这个问题,选择合适的折中参数 λ 很重要,当需要费用较小时,选择较小的

λ ;当需要性能较好时,选择较大的 λ ;当既要考虑费用,又不能忽略性能时,选择适中的 λ .

表 3 6 种流量分配方案的对比

方案	费用	性能	计算复杂度	优点	缺点
多路径($\gamma=0.5$)方案	较低	较好	$O(n^4)$	费用和性能根据移动用户需求定制,都能做到较优	计算稍微复杂
平均分配方案	较高	较差	$O(1)$	费用和性能都较为均衡,计算量小	费用和性能都不好
多路径($\gamma=0$)方案	最低	最差	$O(n^4)$	费用最低	性能最差
单一路径(费用低)方案	较低	较差	$O(n^2)$	费用较低,计算稍微简单	性能较差
多路径($\gamma=0.97$)方案	最高	最好	$O(n^4)$	性能最好	费用最高
单一路径(性能好)方案	较高	较好	$O(n^2)$	性能最好,计算稍微简单	费用较高

5.4 一个实际应用的例子

设计一个实际应用场景:有 1 台移动主机(手机或 iPad 等);有 2 个 ISP 网络(GPRS 和 3G 网络)可供接入;收费方式是按月收费,每个 ISP 都有在一定流量或者时间范围的固定费用 $ConstPayment$ 和超出部分的可变费用 $ExcessPayment$. 实验采用如下资费标准:GPRS 选择的是每月 5 CNY 包 30 MB 流量的资费方式(假设带宽为 115 Kbps),超出部分流量 0.01 CNY/KB;3G 网络选择的是每月 50 CNY 包 600 MB 流量的资费方式(假设带宽为 2 Mbps,可随网络环境而变化),超出部分 0.1 CNY/MB. 假设已测得 3G 网络的 RTT 小于 GPRS 的 RTT . 每个月总的固定费用为 $5+50=55$ CNY,下面对每月超出费用进行计算.

移动主机可以实时统计主机对于各个 ISP 的网络使用情况.当某些 ISP 网络流量或者时间没有超过固定部分时,根据 4.2 节介绍的费用模型,相当于 $Price$ 为 0.若用户预测到本月剩余流量或者时间不能用完,可以调整折中参数 λ 取较大值($\gamma \rightarrow 1$).这样在费用不变的条件下,可以取得较好的性能.当所有 ISP 网络流量或者时间已经超过了固定部分时,每个 ISP 的收费价格 $Price$ 不为 0.若用户考虑到网络花费较少,则可以调整折中参数 λ 取较小值($\gamma \rightarrow 0$).若用户需要处理重要事务,需要让性能最好,而费用考虑较少,则仍然需要调整 λ 取较大值($\gamma \rightarrow 1$).一般情况下需要兼顾费用和性能,因此用户可以根据实际需要调整 λ 取中间值($0 < \gamma < 1$).移动主机上可以统计网络的使用情况.可能出现 3 种情况:第 1 种是两种网络都有余量;第 2 种是有某种网络的余量已经用完;第 3 种是所有网络的余量都已经用完.测量结果见表 4.

对于第 1 种情况,这种情况比较简单. ISP 价格都为零,这条费用和性能曲线的斜率为零,相当于不用考虑费用,只需要让性能达到最优.依据第 4 节的方法,首先探测可用路径,这时 GPRS 和 3G 网络都

可用.测量出这些路径的 RTT .一般情况下 3G 网络的 RTT 较小,实验结果是:当总流量小于或者等于 3G 网络的容量时,选择使用 3G 网络;当总流量大于 3G 网络的容量时,超过 3G 网络带宽部分选择使用 GPRS.若 GPRS 的 RTT 较小时,则实验结果与之相反.

第 2 种情况是当某种网络的固定流量已经用完,如 3G 网络的 600 MB 已用完,则 3G 网络的价格为 0.1 CNY/MB, GPRS 仍为 0 CNY.用户可调节 λ 的取值,选择合适的费用和性能取值.如某一时刻有 300 KB 的流量,计算出的费用性能曲线如图 10 所示.若用户想要费用最少,则选取较小的 λ ($\gamma \rightarrow 0$),如取 0 ($\gamma=0$) 时,费用为 0 CNY,性能为 2;若用户想要性能最好,则选取 λ 较大 ($\gamma \rightarrow 1$),如取 10 000 ($\gamma=0.97$),费用为 0.03 CNY,性能为 1;若用户想要均衡费用和性能,则可选择 $\lambda=500$ ($\gamma=0.5$) 时,费用为 0.15 CNY,性能为 1.5.

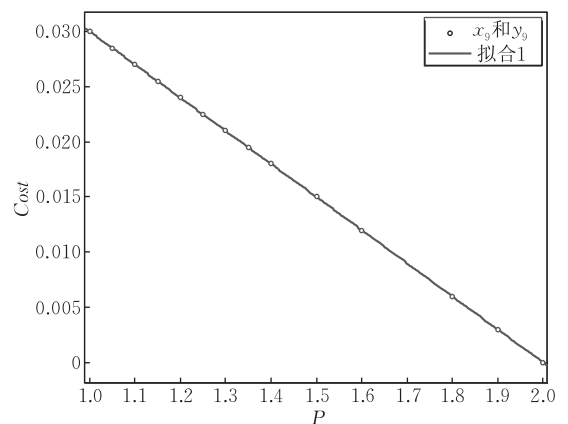


图 10 当 3G 流量用完时的费用和性能关系图

第 3 种情况是当两种网络流量都已经用完,则 GPRS 的价格为 0.01 CNY/KB, 3G 网络的价格为 0.1 CNY/MB.若有 300 KB 的流量,同样可求解出的曲线图如图 11 所示,由于 3G 网络的性能较好,价格低,因此无论 λ 取何值,都选择 3G 网络,费用都为 0.03 CNY,性能为 1.

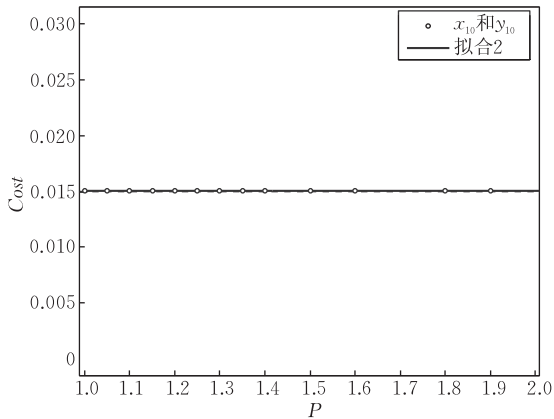


图 11 当两种网络流量用完时的费用和性能关系图

表 4 费用和性能实验结果

网络使用情况	λ 取较小值 费用低	λ 取较大值 性能好	λ 取中间值兼顾 费用和性能
第 1 种情况	$C=0, P$ 最优	$C=0, P$ 最优	$C=0, P$ 最优
第 2 种情况(如, 3G 网络用完)	$C=0, P=2$	$C=0.15, P=1.5$	$C=0.03, P=1$
第 3 种情况	$C=0.03, P=1$	$C=0.03, P=1$	$C=0.03, P=1$

6 总结和进一步工作

目前移动主机普遍具有多个网络接口,并可以由这些不同的接口通过不同的网络服务提供商接入到 Internet 中.而以 IPv6 为标志的下一代互联网的出现为移动主机带来了更大便利,解决了移动主机对于多个 IP 地址的需求和移动网络安全方面的问题.在这样的条件下,移动主机与 Internet 之间就可能存在多条路径,但这些路径的费用和性能取决于 ISP 的收费策略和网络通信能力,因此不能简单地选择其中一条或者多条路径.

本文主要解决了多接口移动主机的最优化费用和性能的流量分配问题.首先,对移动主机与 Internet 通信进行建模,然后针对移动主机通信的特点,对其费用和性能通过两个步骤进行最优化:第 1 步,探测通过 ISP 的可用路径集;第 2 步,在该可用路径集中,建立费用和性能的双目标线性规划,按照移动主机的需求求解,获得费用和性能最优的流量分配方案.最后,本文对此最优化方案进行仿真,并与几种流量分配方式进行对比.分析表明分配方案虽然计算稍微复杂,但能够根据移动主机需求分配和控制流量.

本文在一些方面还存在着不足,需要继续进行研究.

(1) 机制设计问题.由于当前没有一个统一的

多接口通信标准,使得通信机制比较混乱.差的机制不仅会使通信质量降低,而且会浪费网络和硬件资源.同时,还有 DNS 服务器的选择、路由的选择、源和目的地址的选择等,这些通信过程是多接口移动主机与之前单一接口所不同的地方.

(2) 根据高层业务流区分服务的流量分配.在未来的工作中,可以针对高层不同的业务选择适当的链路进行流量分配.

(3) 路由膨胀问题.由于移动主机具有多个接口,而且访问每个目标地址具有多条路由,因此会导致主干网络的路由剧增问题.而 IPv6 的引入稍微缓解了这个问题,但是需要寻找对症下药的解决途径.

参 考 文 献

- [1] William Stallings. Ipv6: The new Internet protocol. IEEE Communication Magazine, 1996, 34(7): 96-108
- [2] Troels Walsted Hansen. Multihoming with Internet protocol version 6[M. S. dissertation]. University of Tromso, Tromso, Norway, 2000
- [3] Pekka Savola, Tim Chown. A survey of IPv6 site multihoming proposals//Proceedings of the 8th International Conference of Telecommunications (ConTEL 2005). Zagreb, Croatia, 2005: 41-48
- [4] Kim Hyong-Jun, Hong Yong-Geun, Kim Sang-Ha. IPv6 multihoming for NGN//Proceedings of the 8th International Conference Advanced Communication Technology (ICACT 2006). Phoenix Park, Korea, 2006: 2144-2147
- [5] Tao Shu, Xu Kuai, Xu Ying et al. Exploring the performance benefits of end-to-end path switching//Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP 2004). Berlin, Germany, 2004: 304-315
- [6] Goldenberg D K, Qiu Li-Li, Xie Hai-Yong et al. Optimizing cost and performance for multihoming//Proceedings of the 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM'04). Portland, USA, 2004: 79-92
- [7] Zhang Zheng, Zhang Ming, Greenberg A, Hu Y C, Mahajan R, Christian B. Optimizing cost and performance in online service provider networks//Proceedings of the 7th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'10). Boston, USA, 2010: 3-3
- [8] Akella A, Maggs B, Seshan S et al. A measurement-based analysis of multihoming//Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM'03). Karlsruhe, Germany, 2003: 353-364
- [9] Wang Hao, Xie Hai-Yong, Qiu Li-Li et al. Optimal ISP subscription for Internet multihoming: Algorithm design and implication analysis//Proceedings of the 24th Annual Joint Con-

ference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005). Miami, USA, 2005; 2360-2371

- [10] Akella A, Pang J, Shaikh A et al. A Comparison of overlay routing and multihoming route control//Proceedings of the 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM'04). Portland, USA, 2004; 93-106
- [11] Zhang Xin-Xin. Dynamic overlay routing based on active probing measurements [M. S. dissertation]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009(in Chinese)
(张欣欣. 基于主动探测的覆盖网动态路由技术研究[硕士学位论文]. 上海交通大学, 上海, 2009)



ZHANG Chun-Yan, born in 1987, M. S. candidate. Her main research interests include wireless network, Internet of Things architecture and routing.

XU Ke, born in 1974, Ph. D. , professor, Ph. D. supervisor. His main research interests include Next Generation

Background

This paper solves the problem of optimizing cost and performance with multiple paths connecting to the Internet ISP in the multiple interface mobile hosts. Compared with the fixed hosts, the multiple interface mobile host also have multiple internet interfaces, but there are many significant differences between them. Until now, there have been a lot of researches in the area of multihoming for non-mobile hosts, but little of them considered mobility.

With the rapid development of internet, this work has been increasingly important, for simple mechanism can't reduce the cost and improve its performance at the same time. In this paper, it modeled the communication between mobile hosts and the Internet, and optimized the cost and performance with two steps: first, exploring all the available path set; second, finding the best traffic distribution method to optimizing the cost and performance on the set. At the end, the paper simulated and analysis the optimizing method, and

- [12] Zhu Shang-Ming, Gao Da-Qi, Zhuang Xin-Hua. An approach to the available bandwidth measurement for network paths based on packet queuing. Computer Science, 2007, 34(10): 48-58(in Chinese)
(朱尚明, 高大启, 庄新华. 一种基于包排队方式的网络路径可用带宽探测方法. 计算机科学, 2007, 34(10): 48-58)
- [13] Xing Wen-Xun, Xie Jin-Xing. Modern Optimum Calculating Method. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University, 2005(in Chinese)
(邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2005)

Internet (NGI), switching and routing structure, P2P network, overlay network and Internet of Things.

WANG Bao-Jin, born in 1974, Ph. D.. His main research interests include broadband information network and embedded systems.

SHEN Meng, born in 1988, Ph. D. candidate. His main interests include network traffic engineering, P2P and overlay network.

concluded that it could achieve better cost and performance compared with other methods. Although the method is a little complicated, it can distribute the traffic in a reasonable and efficient way according to the requirement of hosts.

To improve our work, we will assign traffic flow according to different services in the future.

Our IPv6 Next Generation Internet lab has purchased basic multiple interface devices, and already achieved a lot of success in this related research field. For example the architecture, protocol stack of Internet of Things, routing in the wireless sensor network and so on.

This work has been supported in part by the National High Technology Research and Development Program (863 Program) under grant Nos. 2008AA01A323, 2009AA01A324, 2009AA01A334, and Program for New Century Excellent Talents in University.