

# 基于拍卖的网络带宽分配方法的研究

魏蛟龙, 张 驰

(华中科技大学电子与信息工程系, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 基于拍卖的网络带宽分配方法的研究日益受到学术界的重视, 主要集中在具有激励兼容性的 Vickrey 拍卖上. 本文首先分析并比较了目前最具代表性的两种 Vickrey 拍卖方案(灵活市场模型和改进的第二价格拍卖), 指出其在网络可扩展性、工程效率等方面的不足. 然后提出了一种新的基于统一价格拍卖的资源分配算法, 论证了其在网络这一特定环境中具有激励兼容性. 该算法具有与网络状态无关的特性和更高的运行效率. 最后, 用 NS-2 仿真平台验证了该算法的有效性.

**关键词:** 网络资源分配; 基于使用的计费; Vickrey 拍卖; 灵活市场模型; 改进的第二价格拍卖; 统一价格拍卖  
**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 06-0891-04

## Research on Auction-Based Bandwidth Allocation for Computer Networks

WEI Jiao-long, ZHANG Chi

(Dept. of Electronic and Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** It has been widely accepted that auctioning is a proper tool to manage scarce network resources. Previous works focus on Vickrey auction which is incentively compatible. The most representative Vickrey auction-based mechanisms (smart market model and progressive second price auction) are introduced and their faults in scalability and engineering efficiency are also pointed out. Then the paper presents a new resource allocation algorithm based on uniform-price auction, which is stateless and efficient in engineering, and proves its incentive compatibility in the network environment. Finally, simulation experiments with NS-2 (Network Simulator) are conducted to evaluate performances of the proposed algorithm.

**Key words:** network resource allocation; usage-based pricing; vickrey auction; smart market model; progressive second price auction; uniform-price auction

### 1 引言

近几年来,网络(IP网或ATM)上承载的通信业务除了在数量上持续快速地增长外,其构成也在沿着多样化的方向演进,已成为包括基于TCP/IP的数据业务和多媒体与实时业务在内的综合业务量.这种迅速的、前所未有的变化使得对网络资源分配(resource allocation)的研究面临新的前提:一是用户对网络资源的总需求大大超过了网络的供给,企图在网络规划阶段即通过超量供给(over-provisioning)来同时为所有业务提供足够的带宽是不现实的.网络资源已成为了一种典型的稀缺资源.二是不同的业务之间,不同的用户之间对网络资源的需求存在很大的差异,这意味着在它们之间均分资源既不公平也无效率,因而分配策略的制定成为一个关键的问题.三是业务的多元化也促进了用户的多元化,Internet已从一个为科研服务的网络转变为商业性质的网络.不同的用户之间,用户与网络服务提供商(ISP)之间在网络资源分配的问题上必然存在利益冲突,过去那种假设用户间通过合作(cooperation)来实现分配策略是不现实的.必须引入对策论(game theory)<sup>[1]</sup>来考察分配策略在非合作环境(non-cooperation environment)下的可行性<sup>[2]</sup>.

如何更有效地分配稀缺资源,从而最大限度地实现资源的潜在价值,正是经济学研究的主题.这是我们在网络资源分

配中引入经济学方法的内在依据.通过在用户、网络间建立市场机制,利用价格杠杆来调节用户需求和控制资源分配,从而优化系统效率和提高用户满意度.

本文首先论述了为什么采用拍卖作为利用市场机制实现网络资源有效配置的首选方案,并比较目前最具代表性的拍卖方法,指出其不足.然后给出我们建议的统一价格拍卖方案,并讨论其“激励兼容”性,并在仿真平台上验证了统一价格拍卖方案的有效性.最后我们提出了该方案还存在的问题,并提出将其与衍生市场机制相配合,解决资源预留与价格波动间的矛盾,实现一个可预测、低风险、易于用户决策的完善的市场机制.

### 2 拍卖及其在网络资源分配中的应用

网络资源大致可分为带宽、缓冲区、CPU等几类.其中,带宽是造成网络拥塞与延迟的最主要因素,而且最能反映用户满意度.因此,为减少计算的复杂性,本文主要以带宽资源为主,并将网络抽象为瓶颈带宽进行讨论.

#### 2.1 基于拍卖的定价策略

为网络带宽设计具体的定价机制时,需考虑以下两个因素:经济效率.理想的市场出清价格(clean price)可自动调节用户的需求,使之与供给达到均衡,实现资源最优配置.以此价格进行计费称为基于使用的计费(Usage-Based Pricing,

UBP)。由于用户对资源的需求是不断变化的,因而理想价格必然是时间的函数。在实际应用中,常把网络考虑成一离散时间系统,取固定时间间隔,称为计费时区。每经历一个计费时区才更新一次价格。显然,计费时区越短,价格更新就越能跟上需求的变化,对带宽的配置就越有效率。工程效率。在网络上模拟市场机制以提高经济效率的同时,一般要以工程效率的损失为代价。这包括为实施这一机制而对网络软硬件进行改造的成本,以及维持其正常运作给网络管理和通信带来的额外负担。

在这两个因素中,经济效率与工程效率往往是冲突的,因而定价机制的设计目标是在二者间取得一个合理平衡,并使之成为用户友好的。目前已提出的三种主要定价机制是:基于特定用户模型的:网络方假定一个用户模型,规定需求与价格的关系,然后测量网络的拥塞水平,当拥塞增强时依据用户模型提高价格<sup>[3]</sup>。由于用户的多元化,一个固定的用户模型很难符合实际状况,而要实时更新用户模型就需要辅助的信息传递机制。而且在现有网络上测量拥塞也不容易。基于协商的:网络方与用户方通过信令就价格进行反复协商,直到供需达到均衡<sup>[4]</sup>。此时,收敛到均衡的时间没有上限,这对现代高速信息网络是不可想象的。而且信令协商对本来就稀缺的网络带宽带来了过大的额外开销。基于拍卖法的:拍卖是所需信息最少的定价方式。因而在定价时需传输以及网络核心路由器需处理的信息均较少。在每一个计费时区中,用户端向网络提出所需带宽数量及其支付意愿,网络据此分配带宽并进行计费。如果用户端的出价是真实的,等于其对所需带宽的真实评价,那么网络方就可据此做出最优的资源配置,因而一个好的拍卖规则应当具有“激励兼容 (incentive compatibility)”性,形成让用户讲真话 (truth-telling) 的激励机制。在现代经济学的拍卖理论中,广义的 Vickrey 拍卖 (将资源首先分配给出价最高者,直到分配完为止,对获得资源的用户,按其所得资源的机会成本收费) 具有激励兼容性。而且“讲真话”是用户的占优策略 (Dominant strategy), 即不论其它用户如何,自己讲真话都是最有利的。即 Nash 均衡不但是系统最优的,还具有稳定性<sup>[1]</sup>。因而,目前提出的拍卖规则均为 Vickrey 拍卖。

## 2.2 灵活市场模型

Mackie-Mason 和 Varian 于 1995 年提出的最早的拥塞计费方法:灵活市场 (Smart Market, SM) 模型<sup>[5]</sup>。其具体方案为:用户端每发送一个分组时在其包头设置“出价”(bid) 信息,表明用户愿意为该分组支付的价格  $b_i$ 。网络上路由器采用基于优先级的分组调度机制。即分组按照出价的高低排序,出价高的分组优先处理。假设某一路由器最多同时只能处理  $m$  个分组,在某一时刻,到来  $n$  个分组。若  $n \leq m$ , 没有分组被丢弃(都受到服务),也没有分组被计费(机会成本为零)。若  $n > m$ , 不失一般性,设  $b_1 \geq b_2 \geq \dots \geq b_m \geq b_{m+1} \geq \dots \geq b_n$ , 则前  $m$  个分组接收服务并被计费,价格为  $b_{m+1}$ , 余下分组被丢弃。最终到达目的端的分组所付费用是其在每个路由器上价格之和。

由于每个分组在每一个路由器上所付价格等于其机会成本  $b_{m+1}$  (即当路由器不为这一分组提供服务时所能获得的最大收益), 因而在每个路由器上对每个分组都进行了 Vickrey

拍卖。价格设置的颗粒度是在分组水平。因而 SM 模型在理论上可达到最高的经济效率。但也给路由器带来了过重的负担, 严重影响了网络的工程效率, 这主要表现在: 要求用户逐个分组地出价几乎是不可能的。一般应用所需发送的分组数目大得惊人, 比如传一个 Web 页面就可能要用 1500 个分组。在路由器上对分组按出价高低进行排序, 以及逐个分组逐个路由器地计费对于现代高速网络都是不可想象的。用户在对带宽进行评价时是基于端到端的, 是基于整个应用的。而逐个分组逐个路由器进行的 Vickrey 拍卖不但加大了用户决策的难度, 也使得应用所获得的整体服务性能得不到保障。

## 2.3 改进的第二价格拍卖

Clark<sup>[6]</sup>最早建议对用户申请的期望带宽 (expected capacity) 而不是对用户实际使用的带宽收费。利用漏桶算法, 当实际使用带宽不超过期望带宽时, 服务得到保证。而实际发送分组超出期望带宽的部份在网络拥塞时被丢弃。Shenker<sup>[7]</sup>进一步给合网络管理技术和 IntServ, DiffServ, MPLS 技术的发展, 提出在网络 (往往是由同一个 ISP 控制的子网, 也称计费域) 边缘, 将一个子网抽象为带宽瓶颈, 再进行分配。从而为网络计费建立了一种新范式。

Lazar 和 Semret 等<sup>[8]</sup>将 Vickrey 拍卖建立在新的计费范式上, 提出适用于 VPN, 虚路径的改进的第二价格拍卖 (Progressive Second Price Auction, PSP)。假设在某一计费时区, 有  $n$  个用户竞争总量为  $Q$  的带宽, 用户  $i$  的出价为  $S_i = (q_i, p_i)$ ,  $i \in [1, n]$ 。

其中  $q_i$  为用户需求的带宽,  $p_i$  为用户愿支付的单位带宽价格。所有用户的出价构成出价组合 (Profile of bids):  $S = (S_1, \dots, S_n)$ 。记  $S_{-i} = (S_1, \dots, S_{i-1}, S_{i+1}, \dots, S_n)$  表示由除用户  $i$  外所有用户出价构成的向量, 这时出价组合又可记为  $S = (S_1, S_{-i})$ 。拍卖规则由下面公式给出:

$$a_i(S) = q_i \left[ Q - \sum_{k \neq i} p_k \right]^+ \quad (1)$$

$$c_i(S) = p_i [ a_j(0; S_{-i}) - a_j(S_i; S_{-i}) ] \quad (2)$$

其中  $a_i(s)$  是用户  $i$  分得的带宽,  $c_i(s)$  是用户  $i$  为此支付的总费用。为取最小值。上面二式的含义是: 按用户所报单价, 由高到低顺次分配带宽, 直至分配完毕。用户支付的费用这样计算: 若该用户退出拍卖, 则其分得的资源按同样规则分给其它用户所能实现的价值 (也就是该用户使用这部份带宽的机会成本)。因而 PSP 也是一种广义的 Vickrey 拍卖。

一般而言不同用户对带宽的需求是不同的, 由 (2) 式可知计费时不同用户为单位带宽支付的价格也不同。这是 PSP 法最大的缺陷: 单位带宽没有一个统一的价格, 有多少用户就可能有多少个价格, 价格的数目与业务流的数目相关, 这会严重影响网络扩展性。

## 3 统一价格拍卖法

以 Clark 的期望带宽和 Shenker 的边缘分配为基础, 针对 PSP 的缺陷, 本文提出一种新的更为简单的拍卖——统一价格拍卖 (Uniform Price Auction, UP), 这时, 在每一个计费时区中单位带宽只有一个价格。

### 3.1 统一价格拍卖规则

取与 PSP 同样的假设,但我们要求用户端  $i$  给出更详细的出价函数  $q_i(p)$ ,指出在不同的市场单位带宽价格  $p$  下,用户  $i$  愿意购买的带宽数量  $q_i$ . 拍卖所确定的单位带宽价格由

$$Q = \max \left\{ p \mid \sum_{i=1}^n q_i(p) \leq Q \right\} \quad (3)$$

$$\text{用户 } i \text{ 分得的带宽为: } a_i(Q) = q_i(Q) \quad (4)$$

$$\text{用户为此支付的费用为: } c_i = (Q) \cdot a_i(Q) \quad (5)$$

### 3.2 统一价格拍卖的性质

依据式(3) —(5) 给出的 UP 拍卖规则,首先纯粹从经济学的角度讨论其性质.

当用户的出价  $q_i(p)$  是真实的,由(3) 得出的价格是市场出清价格,必然达到资源最优配置.但 Wilson 以及 Back 与 Zender(1993) 都证明,若  $n$  和  $Q$  是所有参与者的公共知识,且  $Q$  不变,则在统一价格拍卖的结果中存在这样的 Nash 均衡:其中用户有意压低报价,形成隐性串谋(implicit collusion)<sup>[9]</sup>. 由于用户的报价是不真实的,会导致最终分配结果的低效以及减少了 ISP 通过拍卖所能获得的收益.

现在首先假设网络方(ISP)在得到用户的报价后,有权调整要出售的带宽总量  $Q$ . 令 ISP 所能出售的最大带宽为  $\bar{Q}$ , ISP 最后确定的实际出售量  $Q \leq \bar{Q}$ ,以最大化其在拍卖中获得的收益.

$$Q = \arg \max [ \sum_{i=1}^n (Q) \cdot a_i(Q) ], Q \leq \bar{Q} \quad (6)$$

那么这时,用户串谋压低报价的行为并不能导致出售价格的下降,只是影响了  $Q$ ,这样用户就失去了压低报价的激励,从而可以消除这些不利的均衡.我们可以证明<sup>[10]</sup>,由式(3) —(6) 决定的 UP 拍卖,存在 Nash 均衡,且有如下性质:在 Nash 均衡中,卖方选择  $Q = \bar{Q}$ ; 市场出清价格不小于  $\frac{(n-1)v}{n}$  ( $v$  为单位带宽的实际价值).性质 表明在竞争较激烈( $n$  较大)的条件下,用户的报价逼近他们对带宽的真实评价.性质 保证了最终分配结果的效率.可以看到在 ISP 与用户对策中,调整  $Q$  只是 ISP 的一种威胁手段,以防止串谋行为的发生.

可以认为,UP 拍卖在网络中使用的实际效果,会比从数学中推导的性质要好.因为  $n$  和  $Q$  不可能成为所有用户的公共知识.在现代高速网络中,两轮拍卖间的时间间隔(计费时区)也会很短.用户搜集关于  $n$  和  $Q$  的信息既不可能,对用户而言也得不偿失.因而对用户的决策而言, $n$  和  $Q$  本身是不确定的.这都有利于迫使用户采用“讲真话”的策略<sup>[11]</sup>.经典的拍卖理论是从人的集中交易的情况下抽象出来的,暗含假设参与者间的信息交流不成问题.而我们之所以要使用通信网络,就是因为通信有障碍.因而在网络条件下,用户对 ISP 的信息优势(真实评价是用户的私有信息)受到抑制,就会比经典拍卖理论更有利于 UP.

### 3.3 统一价格拍卖在网络中实施的几个问题

我们通过和 PSP 对比来讨论 UP 实施中的问题. UP 实际上是一种最简单的拍卖方法,因而它在网络中实施时不会比 PSP 更复杂.问题在于,UP 为了防止用户的串谋行为,多了一

个调整  $Q$  的卖方优化算法(式 6). 首先,减少实际的可用资源以达到某些特定的优化目标在网络中并不少见,随机提前检测(Random Early Detection)就是通过拥塞前主动地丢弃分组(从而减少缓存容量)以提高服务性能.其次,ISP 有动机这样做,因为这保证了自己的利益.另外,在 ISP 与用户的对策中,调整  $Q$  只是一种威胁,事实上并未实施(在 Nash 均衡中  $Q = \bar{Q}$ ).关键在于,对用户而言威胁是否可信.网络的不确定性本身已经可部份地取代调整  $Q$  的作用,因而式(6)的优化行为不必完全实施.比如,只有当前业务流的数目小于某一临界值(由 ISP 设定)时才启动卖方优化算法,这样既保证了 UP 的激励兼容性,给网络带来的额外负担也很少了.

另一个区别在于,PSP 只允许用户的报价是其需求函数上的一个点,而 UP 则让用户更全面地描述其需求函数.当然 UP 也允许用户使用 PSP 的报价方式.事实上,用户对其需求函数描述越全面,无论是对用户自身还是资源优化配置都有好处. Semret 解释 PSP 的报价方式时认为:这样可减少拍卖过程中的额外通信量. UP 报价方式仅仅是增加了边缘路由器的负担.因为即使用户的报价是其需求函数的点,在边缘路由器上合成的总的需求函数也会是条曲线了. PSP 采用这种简化报价方式,关键原因在于 PSP 算法过于复杂,若用户给出过多的选择会大大加强算法的复杂度严重影响其可实施性.而 UP 算法相对简单,用户的需求是一个点还是曲线(多个点)并不影响其算法复杂度.当然,用户端如何给出完整的需求函数有时是一个较为困难的问题,我们在文献[12]中已有详细分析,限于篇幅这里不展开讨论.而且在第 4 节实验部分,就提出了一种具有普遍性的用户端给出需求函数的方法.

## 4 仿真实验

我们用 NS-2<sup>[13]</sup>对 UP 拍卖法进行了仿真实验,以验证本文提出的 UP 拍卖的有效性.

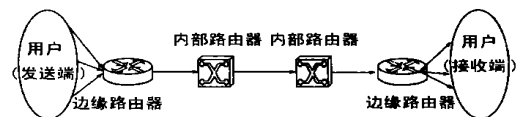


图 1 仿真实验中的网络拓扑

实验使用的网络拓扑结构如图 1 所示.网络采用与 Diff-Serv 相似的结构:在边缘路由器实施基于 UP 拍卖规则的接纳控制,并确保被接纳的总流量不超出其购买的带宽.用户端到路由器链路带宽为 100Mbps,传输时延 1ms;两路由器间链路带宽为 10Mbps,传输时延 10ms.分组大小都固定为 1000bytes.

以 80kbs(10pps)为最小的分配单位带宽.实验中用户的出价策略如下:设用户  $i$  在每个时间片的总支付有一上限  $p_i$ ,时间片  $N$  中带宽(kb)价格为  $p_N$ ,那么在下一时间片  $N+1$  中用户要求的单位带宽数为:  $l_i = \lfloor p_i / (p_N \cdot 80) \rfloor + 1$ ,用户  $i$  为每个单位带宽设置的支付意愿为  $p_i / l_i$ ,此时用户的需求函数是由  $p_i / l_i$  和  $l_i$  决定的一个阶梯函数.实验中用户的行为互相独立,且其出价策略随网络拥塞状态不断变化,这样就可以较为真实地模拟现实网络中瓶颈负载的变化情况.

每个用户均为 CBR 的 UDP 流,速率  $l_i$  80kbs.时间片(拍

卖周期)取 1 秒. 实验时间 100 秒(考察 100 次拍卖). 边缘路由器实施基于 UP 拍卖规则的接纳控制. 作两次实验, 每次实验中的用户参数如表 1 所示.

表 1 实验中的用户参数

实验序号	用户数目	用户的总支付上限
1	2	10,20
2	4	1,3,5,7

实验结果如图 2-3 所示. 带宽以 80kbps 为单位. 图中绘出了每个用户获得的实际带宽随时间变化的曲线. 用户序号越大, 其支付意愿越大(见表 1). 可看出, 在一开始有一小段时间, 用户在不断地调整出价策略, 寻求资源最佳分配的 Nash 均衡解. 随后, 流量呈现确定的规律, 波动趋于平缓, 说明用户的出价策略已稳定, 资源分配达到均衡, 网络状态趋于稳定. 在稳定状态, 用户的支付意愿越大, 获得的带宽也越大, 且支付意愿与获得的带宽两者成正比, 这表明资源分配是最佳的, 有效率的. 由此可见, UP 拍卖能够对资源进行有效配置.

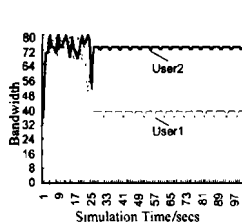


图 2 仿真 1 中用户获得的实际带宽

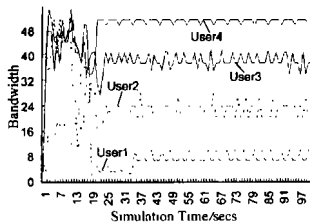


图 3 仿真 2 中用户获得的实际带宽

## 5 总结与分析

利用价格杠杆来调控网络资源分配, 使之达到最优配置时, 不可避免地给网络的管理和通信加上额外负担, 造成工程效率的损失. 为此, 本文选择了拍卖这一需要信息最小的定价方式. 统一价格拍卖虽然是拍卖中规则最简单的, 但经典的拍卖理论认为其分配结果并不能保证是有效率的. 因而, 先前的研究主要集中在具有激励兼容性的 Vickrey 拍卖上. 本文提出了基于 UP 拍卖的资源分配算法, 论证了该算法在网络这一特定环境中具有激励兼容性, 并在 NS-2 上模拟并验证了 UP 拍卖的有效性.

到目前为止, 我们讨论的拍卖在时间轴上是以计费时区为单位进行的. 在不同的计费时区, 带宽价格是变化的. 因而对带宽的拍卖在空间上虽然是端到端的, 在时间上却不是基于业务的. 但用户对网络资源的评价却往往是基于一个个业务的: 完成一个通信业务有一个预算. 一个通信业务往往要跨越几个计费时区(比如一个 IP 电话可能持续几十分钟), 在用户决定是否使用网络时除了要看当前时刻的价格还要预测后面价格的变化, 这增加了用户负担. 而且即使用户能够正确预测, 也会有实际情况与预测不符带来的超出预算的风险. 这一问题并非拍卖法所独有, 任何 UBP 都会面临同样的困难.

针对这一问题我们在文献[14]中建议用衍生市场机制配合统一价格拍卖来实施跨越多个计费时区的预留计费(reservation pricing), 让网络方来提供预测. 网络方有条件比用户预测得更准确些, 并可通过大批量地提供这种服务, 把风险减到

最少. 注意到衍生市场机制不适合于 PSP, 因为 PSP 在一个固定时刻甚至没有一个统一的市场价格, 此时, UP 的优越性能能够更进一步地体现出来.

## 参考文献:

- [1] D Fudenberg, J Tirole. Game Theory [M]. Cambridge: MIT Press, 1991.
- [2] P B Key, D R McAuley. Differential QoS and pricing in networks: where flow control meets game theory [J]. Software, IEE Proceedings, 1999, 146(1): 39 - 43.
- [3] Y A Korilis, T A Varvarigou, S R Ahuja. Incentive compatible pricing strategies in noncooperative networks [A]. In Proc. IEEE INFOCOM 98 [C]. San Francisco, 1998. 439 - 446.
- [4] 傅晓明, 张尧学, 马洪军, 赵艳标. 一种基于市场模型的网络带宽分配方法[J]. 电子学报, 1999(9): 127 - 129.
- [5] J K MacKie-Mason, H R Varian. Pricing the internet [A]. In B. Kahin and J. Keller, editors, Public Access to the Internet [C]. London, UK: Prentice Hall, 1994.
- [6] D Clark. Internet cost allocation and pricing [A]. L W McKnight, J P Bailey, editors. Internet Economics [C]. Cambridge: MIT Press, 1997.
- [7] S Shenker et al. Pricing in computer networks: reshaping the research agenda [J]. Computer Comm. Rev, 1996, 26(2): 123 - 133.
- [8] A A Lazar, N. Semret. Design and analysis of the progressive second price auction for network bandwidth sharing [A]. Telecommunication Systems, Special issue on Network Economics [C]. New York: Prentice Hall, 1999.
- [9] Back K, Zender J F. Auctions of divisible goods: on the rationale for the Treasury experiment [J]. Review of Financial, 1993, Studies 6: 733 - 764.
- [10] Back K, Zender J F. Auctions of divisible goods with endogenous supply [J]. Economics Letters, 2001, 73: 610 - 616.
- [11] J Swinkels. Efficiency of large private value auctions [J]. Econometrica, 2001, 69: 37 - 68.
- [12] Wei Jiaolong, Zhang Chi. Auction-based bandwidth allocation in the internet [A]. SPIE International Symposium on Information Technologies and Communication (ITCom 2002) [C]. Boston, Massachusetts USA, 29 July-1 August 2002. 138 - 144.
- [13] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> [OL].
- [14] Zhang Chi, Wei Jiaolong. An economic model for QoS guarantee in the Internet [J]. Proceedings of SPIE, September 2001, 4556: 116 - 121.

## 作者简介:



魏蛟龙 男, 1965 年生于江西省南昌市, 1990 年从华中科技大学毕业后留校任教至今, 电子与信息工程系副教授, 在职博士生, 主要研究领域为广域网拥塞控制、IP 网服务质量保障、故障测试与诊断等, 获国家科技进步三等奖、部科技进步一等奖、三等奖各一次, 发表论文 10 余篇.

张 驰 男, 1977 年生于湖北省, 博士研究生, 主要研究领域为网络拥塞和流量控制.