

# 网络资源市场分配机制的分析<sup>\*</sup>

陶俊<sup>1</sup> 帅典勋<sup>1,2</sup>

(华东理工大学计算机科学与工程系 上海 200237)<sup>1</sup>

(清华大学智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084)<sup>2</sup>

**摘要** 为了能提供一定的 QoS(quality of service),网络必须为有 QoS 要求的应用分配相应的资源。目前,网络资源的分配主要是基于集中式的,本文运用微观经济学的研究方法,分析了集中分配机制的一些弊端,并引入了市场分配机制。市场分配机制通过价格杠杆来分配稀缺的网络资源,达到帕累托最优,其效率优于集中分配机制,并且其具有分布式的特点,便于在网络中实施。

**关键词** 资源分配, QoS, 市场机制, 生产函数

## The Analysis of Market Allocation Mechanism of Network Resource

TAO Jun<sup>1</sup> SHUAI Dian-Xun<sup>1,2</sup>

(Department of Computer Science and Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)<sup>1</sup>

(State Key Laboratory of Intelligence Technology and System, Tsinghua University, Beijing 100084)<sup>2</sup>

**Abstract** In order to provide QoS to some extent, network must allocate corresponding resource to the application which has QoS assurance. Now, the resource allocation of network is mostly based on centralization, this paper analyzes some disadvantages of centralized allocation mechanism by means of microeconomics and introduces market allocation mechanism. The later allocates the scarce network resource by using price leverage, so has Pareto efficiency and is prior to the former. At the same time, it is distributed and can be apply in network easily.

**Keywords** Resource allocation, QoS, Market mechanism, Production function

## 1 引言

现代网络的一个重要特征是提供包含语音、数据、图像、视频在内的综合业务,这些业务中的一些应用,如 IP 电话、视频会议、网络点播等都要求网络能提供一定的服务质量(QoS)<sup>[1]</sup>。为此,业界提出了 IP QoS 的概念,希望在 IP 网络上能对不同业务提供相应的 QoS 保证。目前,对于 IP QoS 的实现,国际上不同的组织和团体提出了不同的控制机制和策略,比较著名的有:ISO/OSI 提出的基于 ODP 分布式环境的 QoS 控制;ATM 论坛提出的 QoS 控制策略和实现;IETF 组织提出的综合业务模型(Int Serv)、区分业务模型(Diffe Serv),多协议标签交换(MPLS, Multi-Protocol Label Switching)技术,流量工程(traffic engineering)等多种控制和管理方案<sup>[2~5]</sup>。这些方案的实质是对有着不同 QoS 要求的应用分配与之相应的网络资源,或提供类似分配的一种保证。然而,现在的互联网平等地对待每个用户,并没有一种机制去约束用户对 QoS 的过分请求,这就很容易引起网络拥塞并使每个用户的 QoS 恶化,也即经济学上的“公地悲剧”<sup>[6]</sup>。导致这一现象的根本原因是没有对带宽、缓存等网络资源进行正确的定价。当前网络的计费方式主要是固定费率定价(Flat Rate Pricing)<sup>[7]</sup>,这种方式简单、易于实现,却没有提供一种激励去指导用户正确地使用网络资源。因而有必要在资源的分配过程中引入市场机制,使服务质量与支付代价相关,利用

价格杠杆调节供需,影响用户选择,控制资源分配,最终达到系统资源的最适度配置,使系统总的用户满意度最大。

## 2 集中式分配机制

### 2.1 定义

集中式分配机制中只有一个资源分配的决策者(即调度者),而各生产者无权参与资源分配,只是决策的接受者。这种机制类似于计划经济体制中的资源分配机制,调度者拥有资源分配的权威,生产者只能按照所分配的资源进行生产,而不能依据自己的生产需求进行合理的资源配置。同时,生产者为了获取更大的利益,往往会虚报自己对生产资料的需求。集中分配的主观目标是将有限的资源在各生产者间进行分配使其产生最大整体效益,但由于没有考虑到生产者的生产函数的异构性以及生产者的虚报行为,往往会产生一种低效益的分配方式。

### 2.2 经济模型

对网络资源的集中式分配我们可以建立以下经济模型:唯一的资源分配决策者是连接用户的边缘路由器,用户既是生产者又是消费者,其接受调度者分配的资源生产出自己需要的应用进行消费。网络资源大致可分为带宽、缓冲区、CPU 几类,用资源集  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_M\}$  来表示网络中  $M$  个资源的集合,网络资源的稀缺性用资源能力向量  $c = (c_1, c_2, \dots, c_M)$  表示,其中  $c_j$  给出资源  $R_j$  的全部能力。用户集  $I = \{1, 2,$

<sup>\*</sup> 基金项目:国家重点基础研究发展规划 973 资助项目(G1999032307);国家自然科学基金重点资助项目(60135010);国家自然科学基金资助项目(60073008);清华大学智能技术和系统国家重点实验室开放题基金资助项目。陶俊 博士生,研究方向:计算机网络仿真与网络行为。帅典勋 博士,教授,博士生导师,研究方向:人工智能、分布并行计算、人工生命、网络系统及网络信息利用。

..., N}表示网络中 N 个用户的集合,用  $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_M^i)$  表示分配给用户 i 的资源向量,其中  $x_j^i$  表示用户 i 获取 j 类资源的量。 $\phi_i(x^i)$  为用户 i 的生产函数,  $v$  为价值系数向量,那么使有限资源量  $c$  产生最大整体效益的问题可用描述如下:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^N \langle v, \phi_i(x^i) \rangle \\ \text{s. t.} & \\ & \sum_{i=1}^N x_j^i \leq c_j \\ & x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_M^i), x_j^i \geq 0, i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (1)$$

这里  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  为向量内积符。式中  $\langle v, \phi_i(x^i) \rangle$  实际上表示用户 i 在分配资源  $x^i$  后产生的效益,  $\sum_{i=1}^N \langle v, \phi_i(x^i) \rangle$  就是整体效益。由于生产函数的单调性,上述非线性规划问题实际上是一个帕累托优化问题,即在相应的约束条件下,求解  $\bar{x} = (\bar{x}^1, \bar{x}^2, \dots, \bar{x}^N)$ , 对任意的  $x = (x^1, x^2, \dots, x^N)$ , 有  $\sum_{i=1}^N \langle v, \phi_i(\bar{x}^i) \rangle \geq \sum_{i=1}^N \langle v, \phi_i(x^i) \rangle$ 。

### 2.3 效率

在传统的 TCP/IP 网络中,网络资源调度者认为所有用户的生产函数  $\phi_i(\cdot)$  都是相同的。在这种假设下,由生产函数的凹性,式(1)的最优解为  $x^1 = x^2 = \dots = x^N = C/N$ , 即网络只提供“一视同仁”的尽力型服务<sup>[8]</sup>。这种分配方式否认了用户生产函数上的异构性,达不到帕累托最优,其分配结果不能满足用户不同的效用需求,是一种经济意义上的不平等行为。

在 IP QoS 网络中,资源调度者根据用户的 QoS 需求进行资源分配,如果调度者真实拥有各用户的生产函数  $\phi_i(\cdot)$ , 那么调度者就能按照式(1)来确定资源的最优配置方式。然而,根据经济学中关于“经济人”的理论,在经济活动中人的一切行为都是为了获取最大的利益或满足<sup>[9]</sup>。因此,在用户报告自己的生产函数时,一旦发现谎报有利可图,则必然会谎报。由于生产函数随生产资料单调增加,在网络资源稀缺的环境下,理性的用户必将夸大自己的 QoS 需求,从而获得更多的利益。按照边际报酬递减规律<sup>[10]</sup>,用户从夸大自己的 QoS 需求中获得的效用将越来越小,因而,这种行为不仅损害了他人的利益,而且也极大地浪费了宝贵的网络资源。同时,由于用户竞相谎报,也易引发“公地悲剧”。

## 3 市场分配机制

### 3.1 定义

为了给生产者提供充分的经济信息,我们引入了市场分配机制,其具有分布式的特点:各生产者以独立的决策者出现,其基于一定的经济信息做出自己的理性的资源需求决策。在这种机制中,调度者不再直接确定有限资源在不同生产者之间的分配,而是通过价格杠杆使系统整体的供需达到平衡;各生产者根据资源的市场价格以及自己的生产函数来确定资源的需求量,最大化自己的利益;最终,所有生产者的这种分布式配置将促使整个系统的效益达到最大。

### 3.2 经济模型

对网络资源的市场分配机制的经济模型描述如下:资源集、用户集等定义如同集中式分配机制,不同之处在于:调度者是资源价格的设定者,其对网络资源做出的价格决策用价格向量  $p = (p_1, p_2, \dots, p_M)$  表示,其中  $p_j$  表示 j 类资源的市场价格。设用户 i 对价格向量  $p$  做出的反应为  $x^i$ , 则 i 得到

的效益为  $\langle v, \phi_i(x^i) \rangle$ , 同时为得这些资源 i 必须支付的费用代价为  $\langle p, x^i \rangle$ , 故 i 的净效益为  $\langle v, \phi_i(x^i) \rangle - \langle p, x^i \rangle$ 。于是对于给定的价格向量  $p$ , 用户 i 的规化问题如下:

$$\begin{aligned} & \max \langle v, \phi_i(x^i) \rangle - \langle p, x^i \rangle \\ \text{s. t.} & \\ & p = (p_1, p_2, \dots, p_M) p_j > 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中的经济信息对 i 来说是充分的:  $p$  和  $v$  是已知的公共信息,  $\phi_i(x^i)$  为 i 自己的生产函数, 因而 i 能够做出自己的最优决策。同时,作为理性的用户, i 只会用真实的生产函数进行决策, 因为采用任何虚假的生产函数都会使他的最大净效益受损。

### 3.3 均衡与效率

在网络环境中,资源的供给在一定时段内是固定不变的,但对资源的需求却随用户应用、资源价格等因素而变化。根据市场机制中的需求规律:在其它因素不变时,商品的需求量随其价格的上升而减少;随其价格的下降而增加。因而调度者可以综合网络中资源与用户的状况,通过调节资源的价格使用户对资源的总需求与资源的总供给相等,即在某一价格下,没有超额需求,也没有资源浪费,经济学上称这一价格为“市场出清价”。

若调度者设定网络资源价格为市场出清价,并且用户按照(2)式进行资源决策,则网络处于瓦尔拉斯均衡(Walrasian Equilibrium)状态。设市场出清价为  $\bar{p}$ , 用  $i$  户对  $\bar{p}$  的最优决策为  $\bar{x}^i$ , 其它决策为  $x^i$ , 则瓦尔拉斯均衡的两个充分条件描述如下:

$$\begin{aligned} (1) & \text{市场供需平衡 } \sum_{i=1}^N \bar{x}^i = c \\ (2) & \text{用户效益最优 } \langle v, \phi_i(\bar{x}^i) \rangle - \langle \bar{p}, \bar{x}^i \rangle \geq \langle v, \phi_i(x^i) \rangle - \langle \bar{p}, x^i \rangle \quad i=1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

根据微观经济学,瓦尔拉斯均衡与帕累托最优是一致的<sup>[11]</sup>。即用户按照(2)式进行的最优决策  $\bar{x} = (\bar{x}^1, \bar{x}^2, \dots, \bar{x}^N)$  亦是(1)式的最优解。下面给予证明:

由瓦尔拉斯均衡条件(2),对所有用户有:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N (\langle v, \phi_i(\bar{x}^i) \rangle - \langle \bar{p}, \bar{x}^i \rangle) & \geq \sum_{i=1}^N (\langle v, \phi_i(x^i) \rangle - \langle \bar{p}, x^i \rangle) \\ \sum_{i=1}^N \langle v, \phi_i(\bar{x}^i) \rangle - \sum_{i=1}^N \langle v, \phi_i(x^i) \rangle & \geq \langle \bar{p}, \sum_{i=1}^N \bar{x}^i - \sum_{i=1}^N x^i \rangle \\ \sum_{i=1}^N \bar{x}^i = c & \sum_{i=1}^N x^i \leq c \\ \sum_{i=1}^N \langle v, \phi_i(\bar{x}^i) \rangle & \geq \sum_{i=1}^N \langle v, \phi_i(x^i) \rangle \end{aligned}$$

故  $\bar{x}$  为(1)式的最优解。

上述结论揭示了网络资源市场分配机制与集中分配机制的本质联系,即市场分配机制的均衡价格系统能实现集中分配机制的最大整体效益。

**结论** 通过对网络资源的集中式分配机制与市场分配机制的建模与分析,可以看出:

(1) 市场分配机制中,调度者通过价格向用户传递资源稀缺性信息,并利用需求量与其价格之间的反向变化关系而达到有效配置稀缺资源,实现最大整体效益的目的。

(2) 市场分配机制能反映不同用户独立选择的行为,各用户根据自己利益做出独立决策,克服了集中分配机制中完全由调度者代替用户做出决策的弊端。

(3) 市场分配机制中用户决策所需要的经济信息是真实可靠的,保证了决策的正确性;而调度者的任务只是设定均衡价格并提供给所有用户,减少了分配机制的复杂性。

## 参考文献

- 1 Shenker S. Fundamental design issues for the future internet. IEEE J-SAC, 1995, 13(7): 1176~1188
- 2 RFC 1633. Integrated Services in the Internet Architecture: An Overview
- 3 RFC 2475. An Architecture for Differentiated Services
- 4 RFC 2474. Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers
- 5 RFC 2702. Requirements for Traffic Engineering Over MPLS

- 6 张维迎. 博弈论与与信息经济学. 上海: 上海人民出版社, 1996. 82~85
- 7 Lee W. Mcknight, Jahangir Boroumand, Pricing Internet services: approaches and challenges. Computer, 2000, 33(2)
- 8 Gibbens R J, Kelly F P. Resource pricing and the evolution of congestion control. Automatica, 1999, 35
- 9 贝克尔. 人类行为的经济分析. 上海: 上海三联书店, 1993
- 10 周惠中. 微观经济学. 上海: 上海人民出版社, 1997
- 11 张远超, 董长瑞. 微观经济学. 山东: 山东人民出版社, 1998

(上接第 54 页)

从这些图中不难发现, 对 3.6 的 MOS 要求来说, G. 729 在各种情况下都能提供与 G. 711 相等或者更高的通信容量。这是由于在一个给定的 BER 情况下, 由于 G. 729 产生的分组长度比 G. 711 更短, 因此分错误率更低, 重传的机率更小。虽然理论上说, 可以把分组成得更小, 以进一步降低分组错误率, 但是在 802.11 网络的应用中, 这个方法要受到限制, 因为 802.11 的 MAC 数据报大小不得低于门限值 256 字节。实际上, 仿真试验也证明, 把分组成得更小, 并不能提供比最佳分组长度更高的通信容量。

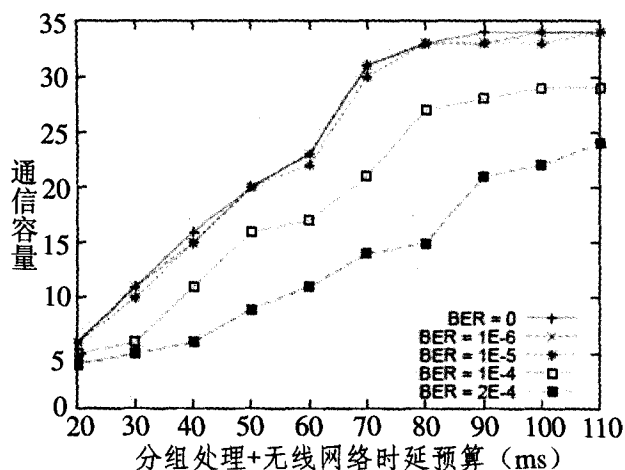


图 6 MOS $\geq$ 3.6 时 G. 729 支持的话路数

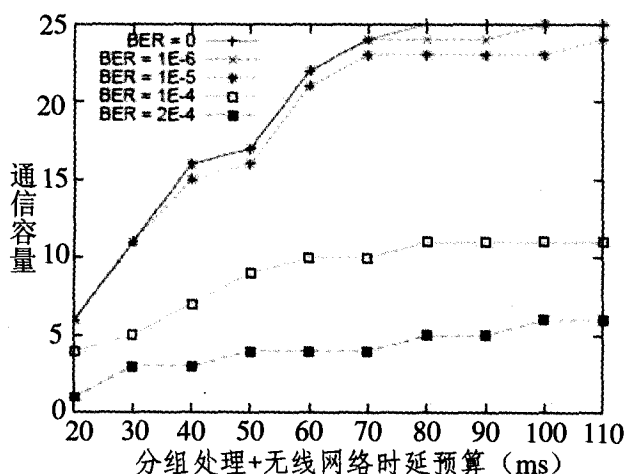


图 7 MOS $\geq$ 4.0 时 G. 711 支持的话路数

在大多数信道条件下, BER $<10^{-4}$ , 时延主要是分组处理延迟。这种情况下, 最佳分组长度的选择可以不考虑信道质量, 直接选择小于时延预算的最大分组长度。但是在表 6 中可以看到, 对于更高的 BER, 情况就不是这样了。

## 4.3 讨论

从前面给出的结果来看, 语音网络可以假定一种固定的播放方案, 其端到端时延为 150ms。但这个值并不总是最组合值。文[9]中指出, 如果对这个时延取值的增加量在 50ms 之内, MOS 的下降将会非常小。例如, 如果时延增为 170ms, MOS 下降则不到 0.1。

从前面还可以看到, 通信容量与时延限制关系非常大。如果放松时延限制条件, 即增加播放时限, 则可以在尽可能不降低 MOS 的情况下, 增加通话路数。为了最大程度提高通话容量和保证足够高的音质, 实际应用中需要仔细制定播放方案, 但对这个论题的讨论就已经超出本文的范围了。

**结论** 本文首先计算了运载语音 IP 电话的 IEEE 802.11b 网络的通信容量上界, 并证明了在信道质量很好、时延限制很低甚至没有的情况下, 网络的实际容量非常接近这个上限。

其后, 本文用仿真试验演示了信道容量与分配给分组处理和无线网络延迟的时延预算呈高度相关。在非理想信道质量情况下, 实验演示了对 BER 值小于  $10^{-5}$  时, 容量接近于无错信道; BER 高于这个数值时, 随着信道质量下降, 通信容量也显著下降; 当 BER $\geq 10^{-3}$  时, 通信容量降到零。根据时延预算和信道质量适当选择分组长度, 可以使通信容量达到最大。不过, 在大多数情况下, 最佳分组长度的选择可以忽略信道条件。

所有的情形下, G. 729 编码方案都可以比 G. 711 提供更高的通信容量, 除非要求 MOS 大于 3.65 的通话质量, 这时不能使用 G. 729 编码器。

## 参考文献

- 1 ISO/IEC and IEEE Standard. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications (as supplemented). 1999
- 2 ETSI Technical Report. Actual measurements of network and terminal characteristics and performance parameters in TIPHON networks and their influence on voice quality. ETSI TR 101 329-6, V2. 1. 1 (2002-02), 2002
- 3 Crow B P, Widjaja J, Kim J G, et al. IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks. IEEE Communications Magazine, September 1997
- 4 Kopsel A, Wolisz A. Voice transmission in an IEEE 802.11 WLAN based access network. In: Proc of ACM Workshop on Wireless Mobile Multimedia, July 2001
- 5 Smavatkul N, Chen Y, Emeott S. Voice Capacity Evaluation of IEEE 802.11a with Automatic Rate Selection. Proc. of GLOBECOM, 2003
- 6 Garg S, Kappes M. Can I add a VoIP call?. IEEE Int Conf on Communications, 2003 (ICC '03)
- 7 Garg S, Kappes M. An experimental study of throughput for UDP and VoIP traffic in IEEE 802.11b networks. IEEE Wireless Communications and Networking, 2003
- 8 Rosenberg J G. 729 Error Recovery for Internet Telephony; [Technical Report]. CU-CS-01. Columbia University 6-01, 2001
- 9 ITU-T Recommendation G. 107 The Emodel, a computational model for use in transmission planning. 1998