

基于分布式网络资源的网络带宽分配方法^{*})

王建华 季伟东 张 军

(哈尔滨师范大学计算机科学系 哈尔滨 150025)

摘要 本文针对计算机网络资源的带宽分配问题提出一种分配求解方法,该方法根据用户提出的带宽资源需求和系统可用资源的状况,按用户满意度最佳和系统效率最佳的原则制订价格,并通过用户的价格参数进行带宽资源的协商与分配。分析表明,该方法可以达到优化系统效率和提高用户满意度的目标。

关键词 网络资源,资源分配,带宽分配

An Approach to Allocate Bandwidth for Computer Networks Based on Distributed Network Resources

WANG Jian-Hua JI Wei-Dong ZHANG Jun

(Department of Computer&Science, Harbin Normal Univ., Harbin 150025)

Abstract An approach to the problem of allocating bandwidth for computer networks is presented in this paper. This method is based on the bandwidth demand of users and the bandwidth usage of the network system, which is used together with users' price parameters to regulate bandwidth allocation along their routes. Then a bandwidth allocation algorithm by employing users' price parameters is proposed. We prove its effectiveness in improving users' satisfaction and the system's utilization through analysis.

Keywords Network resources, Resources allocation, Bandwidth allocation

1 引言

随着 Internet 的迅速发展,Internet 已成为开放性的巨复杂分布式系统^[1]。分布式多媒体应用的需求急剧增加,越来越多的应用要求网络提供良好的服务质量(QoS)。保证 QoS 的一种方法,是为每个请求 QoS 的连接预留足够的资源。然而,许多分布式多媒体应用具有数据压缩、大容量、突发性等特点,而且用户往往希望自己获得的网络资源越多越好,这就很容易引起网络拥塞并使应用 QoS 恶化。如何对宝贵的网络资源进行分配和管理,便成为当前的一大难题。目前国际上利用价格手段来进行网络资源分配的研究主要有基于优先级定价^[2]、基于自由市场定价^[3]和基于边界定价的资源分配^[4]等,这些方法虽然从一定程度上提高了资源利用率,但仍存在无法动态反映不同应用的资源需求和系统资源的使用情况等问题,从而无法让网络资源得到更充分利用。

本文首先介绍网络中的市场模型框架,然后基于该框架,根据用户带宽需求和系统可用带宽资源的状况,以用户满意度最佳和系统效率最佳为目标,计算出带宽资源的市场价格。文中给出了基于该市场模型、利用用户的价格参数进行带宽资源的协商与分配算法及其有效性证明。

2 分布式市场模型

2.1 网络中的分布式市场模型框架

下面给出在分布式市场模型下的概念。

定义 把互联网上的每一个网络实体看作是一个有活性的生长基,称为实体母基。实体母基所拥有的网络资源,称为元类基。实体母基又可分为需求类基和供给类基。

供给类基表示网络上的某类实体,如主机服务器、路由器和宽带链路等。资源可以是网络上的主机服务器或路由器的处理能力、链路的带宽、Web 服务器上的信息,或者是网络上可用的其他资源。优化求解网络带宽分配问题,就是各个供给类基之间通过竞争、协作和诱导等各种复杂的社会交换行为,力求自身利益的最大化。同时,各个需求类基将根据局势不断调整其价格策略,最终得出在某种环境下的最优的资源分配。

网络中的分布式市场模型框架尽管各应用可能希望自己获得的带宽等资源越多越好,但实际上分布式多媒体应用通常存在一定的资源要求限度,超出了该限度则对其 QoS 提高甚微。因此,我们要求在某种机制下约束用户的需求情况,公平地竞争带宽等有限的系统资源。如何根据各应用资源需求情况,以及网络与端系统可用资源的多少,协调、调度和分配网络与端系统资源,从而尽可能满足用户要求和提高资源使用效率呢?我们把用户看作购买商品的顾客,称为需求类基;把网络和计算机资源看作商品,称为供给类基,并采用微观经济学中的价格杠杆作为约束机制来调节用户需求和控制资源分配,则可以建立如图 1 所示的一个市场模型框架。

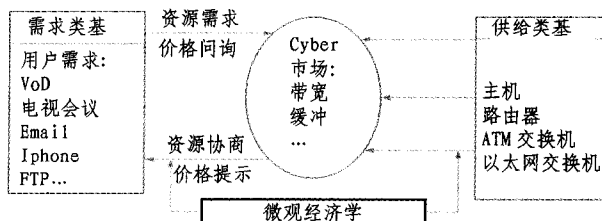


图 1 网络中的市场模型框架

^{*})黑龙江省智能教育与信息工程重点实验室基金、黑龙江省教育厅重点学科(081203)、黑龙江省教育厅科研项目资助。王建华 教授,博士生导师,主要研究方向:计算机辅助教学、虚拟现实等。

该模型中,系统根据需求类基的资源需求以及资源使用状况,给网络系统的供给类基的资源设置市场价格,并让该价格随着需求类基的资源需求以及资源的增减(使用和回收)而变化。当需求类基较多或供给类基较少时,其价格上涨;而需求类基较少或供给类基较多时,其价格下调,从而抑制用户对网络资源的集中使用。下面讨论市场价格的确定策略。

2.2 定价策略

供给类基所拥有的资源主要是网络上的主机服务器或路由器的处理能力、链路的带宽、Web 服务器上的信息,或者是网络上可用的其他资源。其中,带宽是造成网络拥塞与延迟的最主要因素,且最能反映用户满意度。因此,为了减少计算的复杂性,本文主要以带宽资源为主进行定价和分配。我们采取以经验定价范围为参考,根据带宽使用和用户需求情况,按以用户满意度最佳和系统效率最佳为优化目标得到定价公式和相关参数的定价策略。

(1)符号和定义

本文研究广域网环境下的带宽分配问题,其中用到的符号意义如下。

N :当前发出请求的新需求类基数目, N 为自然数。 M :当前网络链路的总条数, M 为自然数。 $\{A_{ij}\}_{NM}$:当前发出请求的各应用的路由矩阵($N \times M$ 阶),其中若第 j 条链路在第 i 个应用的路由上,则 $A_{ij}=1$;否则 $A_{ij}=0$ 。 L_j :网络中第 j 条链路的带宽容量大小, $j=1,2,\dots,M$ 。 X_j :当前网络第 j 条链路的可用带宽大小, $j=1,2,\dots,M$ 。 x_i :第 i 个用户向网络请求的带宽大小, $i=1,2,\dots,N$ 。 Y_j :网络第 j 条链路带宽资源占用率, $0 \leq Y_j \leq 1$, $Y_j = (\sum_{i|A_{ij}=1,1 \leq i \leq N} x_i + L_j - X_j) / L_j$, $j=1,2,\dots,M$ 。 λ_i :第 i 个应用的分组到达率, $i=1,2,\dots,N$ 。 d_i :第 i 个应用的分组端到端平均延迟, $i=1,2,\dots,N$ 。 k_i :第 i 个应用对分组平均延迟的敏感系数, k_i 为正的常数, $i=1,2,\dots,N$ 。 T_i :第 i 个应用允许的分组平均延迟的最大值, $i=1,2,\dots,N$ 。 p_i :第 i 个用户消费单位容量带宽资源的价格, $i=1,2,\dots,N$ 。 q_j :第 j 条链路的单位容量带宽资源的价格, $j=1,2,\dots,M$ 。 a, b :定价经验常数, $a, b > 0$ 。显然,

$$P_i = \sum_{j|A_{ij}=1,1 \leq j \leq M} q_j, i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

为研究方便,假定分组进入网络的规律服从泊松到达,而分组的处理时间服从与到达率无关的负指数分布,则各应用分组服从 $M/M/1$ 排队规律,且^[5]

$$d_i = d_i(x_i) = 1 / (x_i - \lambda_i) \quad (2)$$

[用户需求假定]第 i ($i=1,2,\dots,N$) 个用户的资源需求函数 $x_i = D_i(p_i)$ 是关于服务价格 p_i 的单调减函数。即如果价格上涨,用户将减少对资源的消费量;若价格下调,用户将增加对资源的消费量。

定义 1(第 i 个应用的效用函数 u_i) u_i 为第 i 个应用对所获得性能的满足程度,用第 i 个应用的端到端平均延迟的对数和该应用对端到端平均延迟的敏感系数表示如下:

$$u_i = u_i(d_i) = V_i - k_i \ln d_i, i=1,2,\dots,N \quad (3)$$

其中 V_i 为常数。记网络中已进入服务状态各用户的总效用为 u_0 。

由式(2),我们可将式(3)改写为

$$u_i = u_i(x_i) = V_i - k_i \ln(x_i - \lambda_i), i=1,2,\dots,N \quad (4)$$

定义 2(第 j 条链路的资源使用成本函数 c_j) c_j 为第 j 条链路在带宽占用率为 Y_j 时的使用成本,表示如下:

$$c_j = c_j(Y_j) = a[1 / (1 - Y_j)^b - 1], j=1,2,\dots,M \quad (5)$$

其中, a, b 为经验值(正数)。式(5)的物理含义是,随着带宽占用率的增大,资源的使用成本也在增加。当资源达到饱和时,使用成本将增至无穷大(因易造成拥塞或死锁)。

微观经济学中采用均衡来描述各经济主体得到最大利益的状态^[6]。我们把它应用于网络系统,并作以下定义:

定义 3(网络系统的均衡和均衡解) 如果网络系统同时满足以下三个条件,则称它处于均衡状态。条件 I ~ III 被称为均衡条件,满足系统均衡条件的向量 $\langle x_1^*, \dots, x_N^*, Y_1^*, \dots, Y_M^* \rangle$ 称为系统的均衡器。这里,带上标 * 的量表示相应变量在均衡状态下的值。

I:用户满意度最佳。各请求用户消费带宽而获得的效用与为之付出的代价之差越大越好,即

$$\text{Max}[u_i(x_i) - p_i x_i], i=1,2,\dots,N \quad (6)$$

II:系统效率最佳。系统为各用户提供带宽资源而产生的总效用与相应使用成本之差越大越好,即

$$\text{Max}[u_0 + \sum_{i=1}^N u_i(x_i) - \sum_{j=1}^M c_j(Y_j)] \quad (7)$$

III:每条链路上消耗的带宽资源总和应不超过系统的可用带宽资源容量,即

$$\sum_{i|A_{ij}=1,1 \leq i \leq N} x_i \leq X_j, j=1,2,\dots,M \quad (8)$$

定义 4(带宽分配算法的有效性) 如果一个带宽分配算法能使网络系统到达均衡状态,则称该分配算法是有效的。

(2)定价策略

设当前需求类基有 N 个,由路由算法得到这些需求类基的路由情况 $\{A_{ij}\}_{NM}$ 后,我们希望通过制订相应的价格来促进需求类基选择合理的 $x_i, i=1,2,\dots,N$ 和系统选择合理的带宽占用率 $Y_j, j=1,2,\dots,M$ 从而提高用户的满意度和系统效率,即均衡条件 I、II。由它们的一阶条件,分别有

$$\partial u_i / \partial x_i - p_i = 0, i=1,2,\dots,N \quad (9)$$

$$\partial u_i / \partial x_i - \sum_{j|A_{ij}=1,1 \leq j \leq M} \frac{1}{L_j} \frac{\partial c_j}{\partial Y_j} = 0, i=1,2,\dots,N \quad (10)$$

从而有

$$p_i = \sum_{j|A_{ij}=1,1 \leq j \leq M} \frac{1}{L_j} \frac{\partial c_j}{\partial Y_j}, i=1,2,\dots,N \quad (11)$$

再由(5), $\frac{\partial c_j}{\partial Y_j} = \frac{a}{(1 - Y_j)^{b+1}}$,代入式(11),可得

$$p_i = \sum_{j|A_{ij}=1,1 \leq j \leq M} \frac{1}{L_j} \frac{a}{(1 - Y_j)^{b+1}}, i=1,2,\dots,N \quad (12)$$

对比式(11)与式(12),可得

$$q_j = \frac{1}{L_j} \frac{a}{(1 - Y_j)^{b+1}}, j=1,2,\dots,M \quad (13)$$

由此可见,对某链路带宽资源的定价实际考虑了该条链路的所有用户应用的总带宽使用情况。服务价格则为应用在它所经路由上各带宽价格的和。

我们采用文[7]中有关分段价格的经验假设,即带宽价格分为三个范围:高价区、正常区和低价区,将经验统计中有 90% 以上和 20% 以下潜在用户使用的情况分别定为高价区和低价区,其余为正常区。若某链路(对应带宽容量为 L)在只有潜在用户的 20% 使用,占用率很低(设为 η_0)时,设置资源偏低价为 π_0 ;在存在潜在用户的 90% 使用,占用率很高(设为 η_1)时,设置资源偏高价为 π_1 。我们将其作为确定各链路的资源价格的参考点,从而确定经验参数 a, b 。

根据容量为 L 的链路单位带宽的合理定价范围 $[\pi_0, \pi_1]$ 与合理资源占用率范围 $[\eta_0, \eta_1]$,由式(13),我们有

(下转第 120 页)

类型体系的基础上给出了构建中间模型类型体系的方法。中间件方法是目前异构信息集成的主流思想。通过定义普通类型体系与公共类型体系的映射关系,可以保证异构信息源在模式集成和信息交换过程中在数据类型方面的准确性。

参考文献

- Smith A C,McBrien P. Inter Model Data Exchange of Type Information via a Common Type Hierarchy. DISWeb06, Universitaires de Namur, Luxembourg, 2006. 307~321
- Boyd M,McBrien P. Comparing and Transforming Between Data Models via an Intermediate Hypergraph Data Model. Computer Science, 2005(3730):69~109
- Chen S K,Lo M L, Wu K L, et al. A practical approach to extracting DTD-conforming XML documents from heterogeneous data

- sources. Information Sciences, 2006,176 (7):820~844
- Garcia-Molina H,Papakonstantinou Y, Quass D, et al. The tsmis approach to mediation: Data models and languages. J Intell Inf Syst,1997, 8 (2): 117~132
- Lawrence R,Barker K. Unity-A Database Integration Tool. Department of Computer Science, University of Manitoba, 2000
- McBrien P,Poulovassilis A. Schema Evolution in Heterogeneous Database Architectures. In: A Schema Transformation Approach. In: CAiSE02, Springer Verlag LNCS, Toronto Canada, 2002. 484~499
- McBrien P,Poulovassilis A. A Uniform Approach to Inter-Model Transformations. In: CAiSE'99, Springer, Heidelberg Germany, 1999. 333~348
- Rahm E, Bernstein P A. A survey of approaches to automatic schema matching. VLDB J,2001, 10 (4): 334~350

(上接第 55 页)

$$\pi_0 = (1/L)(a/(1-\eta)^{b+1}) \quad (14)$$

$$\pi_1 = (1/L)(a/(1-\eta_1)^{b+1}) \quad (15)$$

从而可得

$$a = \exp \left\{ \frac{\ln \pi_1 - \ln \pi_0}{\ln(1-\eta) - \ln(1-\eta_1)} - \ln(\pi_0 L) \right\} \quad (16)$$

$$b = \frac{\ln \pi_1 - \ln \pi_0}{\ln(1-\eta) - \ln(1-\eta_1)} - 1 \quad (17)$$

式(12)、(13)与(16)、(17)一起,即为我们的定价公式。其中式(12)为服务定价公式,式(13)为资源定价公式。根据式(12)可知,各用户应用的价格与它所经路由上带宽资源的使用情况有关;如果某应用在其路由上带宽资源的占用率较低,则价格将被设置为较低值,这将刺激用户的消费;如果某应用在其路由上带宽资源的占用率过高(容易拥塞),则价格将被设置为较高值,这将抑制用户的消费。

3 基于市场模型的宽带分配

系统基于市场模型计算得到带宽的市场价格后,就可以利用该价格作为带宽分配的一个参数进行带宽协商、分配和动态调整等工作。其方法是由带宽管理程序实时监测新用户在当前价格下的带宽需求和带宽实际使用情况,并根据用户对价格的承受力及实时性要求的不同,进行带宽资源协商及分配,从而使网络带宽资源平衡使用和建立端到端的适时通道。基于市场模型的带宽分配的基本过程如下:

(1)各用户提出带宽需求 $\langle x_1, \dots, x_N \rangle$ 和各自可承受的价格上限 $\langle W_1, \dots, W_N \rangle$ 。

(2)系统分析用户的带宽需求和网络可用带宽的情况 $\langle X_1, \dots, X_M \rangle$,并按式(12)、(13)计算价格 $\langle P_1, \dots, P_N \rangle$,设所有满足 $P_i \leq W_i$ (即愿意接受其服务价格)的用户集为 U 。

(3)系统用价格进行市场供需调控和资源分配:

如果 $\forall j \in [1, M] \sum_{(i|A_{ij}=1, i \in U)} x_i \leq X_j$,则让这些用户全部得到资源;否则,与路由上经过各满足 $\sum_{(i|A_{ij}=1, i \in U)} x_i \leq X_j$ 的链路 j 的实时性要求低的各应用进行协商,降低其带宽量,直至带宽可以容纳所有愿意接受该价格和新的(较低)带宽量的用户,然后进行资源分配和调度。

(4)系统监测在当前价格的作用下用户带宽需求和各链路资源变化信息,转(2)。

其中,价格杠杆的动态调整过程始终以用户满意度提高和系统效率最优为出发点,以系统均衡为目标,然后收集资源供求的最新反馈信息,变动现有的价格体系,实施价格的杠杆调节。而根据用户的带宽需求和系统的可用资源情况,制订合理的价格,根据用户需求假定,价格高时用户将降低其需求,价格低时用户将增大其需求。这样,通过资源的协商和价

格杠杆的调整,可以使相对集中的用户需求调控到相对空闲时段,用户满意度得到提高,系统效率趋于最佳,从而使供求双方最终达到均衡状态。

4 基于市场模型的带宽分配方法的有效性证明

我们利用数理经济学原理来证明本文提出的带宽分配方法的有效性。由于我们的带宽分配算法的核心在于第2节给出的定价策略,这里只需证明在该定价策略作用下网络系统存在均衡解即可。

引理 u_i 在 $x_i \in [\lambda_i, +\infty]$ 上是关于 x_i 可微、单调增的凹函数。

证明:由式(4),我们有 $\partial u_i / \partial x_i = k_i / (x_i - \lambda_i)$

$$\partial^2 u_i / \partial^2 x_i = -k_i / (x_i - \lambda_i)^2$$

由于 $k_i > 0$,故 $\partial u_i / \partial x_i > 0, \partial^2 u_i / \partial^2 x_i < 0$,所以 u_i 在 $x_i \in [\lambda_i, +\infty]$ 上是关于 x_i 可微、单调增的凹函数。

定理 在 L_j 一定且满足用户需求假定的条件下,系统存在均衡解。

证明:由引理, $\forall i \in [1, k], u_i$ 在 $x_i \in [\lambda_i, +\infty]$ 上是关于 x_i 连续、单调增的凹函数,而式(8)的约束条件构成的可行解区域是凸集。根据一般均衡理论^[1],只要用户需求假定成立,则在第2节给出的价格杠杆作用下,必存在资源的最优分配 $\langle X_1, \dots, X_N, Y_1, \dots, Y_M \rangle$ 满足均衡条件 I ~ III,即系统存在均衡解 $\langle X_1, \dots, X_N, Y_1, \dots, Y_M \rangle$ 。

小结 本文基于市场模型,根据用户提出的带宽资源需求和系统可用资源的状况,按用户满意度最佳和系统效率最佳的原则制订价格,同时给出利用价格实现带宽分配和管理的方法,并分析其有效性。该方法可用于网络拥塞控制和资源管理等。

参考文献

- 操龙兵,戴汝为. 集智慧之大成的信息系统——Internet [J]. 模式识别与人工智能,2001,14(1):1~8
- Gupta A, Stahl D, Whinston A. Priority Pricing of Integrated Services Networks. In: Mc Knight W, Bailey J, eds. Internet Economics, Cambridge, MA: MIT Press, 1997
- Mac Kie-Mason J K, Varian H R. Pricing the Internet. In: Proc and Int'l Conf Telecom Syst Model Anal. Nashville, TN, Mar. 1994
- Shenker S, Clark D, Estrin D, et al. Pricing in computer networks: Reshaping the research agenda. Computer Communications Review, 1996, 26(2): 19~43
- Daigle J N. Queuing Theory for Telecommunications. Readings, MA: Addison Wesley, 1992
- Arrow J, Intriligator M D. Handbook of Mathematical Economics. Amsterdam: North Holland, 1982
- 富川,青木. イーサネソトケテムのQos制御の機能設計と試験. 研究所技術二エース, 富士通研究所, Mar. 1995