

# 基于 Stackelberg 博弈论的 Multi-Homing 负载均衡研究

陈前斌 张 宝 唐 伦 王彩霞 李 云

(重庆邮电大学移动通信技术重点实验室 重庆 400065)

**摘 要** 阐述了 Stackelberg 博弈的基本理论和模型,并将其应用于多主接入网络的负载均衡问题中,给出了一种基于 Stackelberg 博弈理论的多主接入网络带宽分配模型。考虑网络 and 用户之间的供需平衡,采用线性和非线性价格方案,给出了更加合理的带宽分配策略。仿真结果证明了算法是有效的,Stackelberg 博弈模型能够合理有效地利用带宽资源,实现了负载均衡。

**关键词** 多主接入,负载均衡,博弈论,完美子博弈均衡

中图分类号 TN92 文献标识码 A

## Research on Load Balancing Based on Stackelberg Game Theory for Multi-Homing in Heterogeneous Wireless Networks

CHEN Qian-bin ZHANG Bao TANG Lun WANG Cai-xia LI Yun

(Research Laboratory of Mobile Communications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract** The essential theory and model of Stackelberg game theory were described, and then Stackelberg game theory based bandwidth distribution model was presented for load balancing of Multi-Homing networks. A linear strategy and a nonlinear strategy were proposed to solve the problem according to the balance between supply and demand of networks and users, which presented a more reasonable bandwidth allocation. Simulation results show the effectiveness of the algorithm, which can utilize the bandwidth efficiently, and achieve the balance of load.

**Keywords** Multi-Homing, Load balancing, Game theory, Subgame-perfect equilibrium

随着移动网络的逐步成熟和应用,人们对业务量的需求日益增大,这就要求网络运营商必须有效地提高现有网络资源的利用率,实现利益最大化。如何在多个网络之间实现合理的资源分配,使之不至于出现某一网络超载,而另一网络未能充分发挥处理能力的情况,负载均衡机制因此应运而生。在通常的研究工作中,负载均衡问题常常归结为最优化问题,并应用遗传算法等软计算方法来处理,如基于混合策略的负载均衡机制<sup>[1]</sup>、基于再生理论的动态负载均衡方法<sup>[2]</sup>,以及跨频率分配移交法<sup>[3]</sup>等。

本文针对移动网络多主接入中的负载均衡问题,将经济学中的博弈理论应用到带宽分配中,提出了一种基于 Stackelberg 博弈论的解决方案。在多主接入网络中应用 Stackelberg 博弈模型分配带宽资源,不同的网络提供方构成博弈中的局中人,期望获得较高的效益并付出较低成本。网络按照某种策略分配带宽,不同策略为用户带来不同收益,用效用值的大小来衡量网络收益。运用博弈论,网络灵活调整带宽分配策略,可获得改善的期望效用。同时,在获得最优策略时,负载的均衡分布也使得系统中各网络的资源得以均衡利用。

## 1 多主接入网络负载均衡和 Stackelberg 博弈论

### 1.1 多主接入网络负载均衡

对于融合多主接入网络的下一代异构系统,用户对接入网络(RAN)的选择会随着时间、地点的差异而不同,另外收费方面的考虑也会促使用户自由选择不同的网络。这种选择标准的多样性通常使网络选择和带宽分配有很大的随机性。负载均衡就是在这种背景下提出的一种策略或机制,它建立在网络结构之上,能以较低成本消除网络瓶颈,有效解决网络拥塞问题,提高网络频谱、信道资源的利用率,从而为用户提供更好的服务质量,提高网络性能,增加网络鲁棒性(robustness)。

负载均衡机制利用一些工具实时分析、掌握网络中的流量状况,当如价格、用户选择等因素的变更破坏当前的均衡状态时,新一轮的负载分配过程随即产生。因此可以预见,对于处理融合多主接入网络的异构系统的负载均衡问题,具有解决利益冲突能力的博弈论是一种有效的研究方法。

### 1.2 Stackelberg 博弈论

Stackelberg 博弈理论最初是由经济学家 H. von Stackel-

到稿日期:2008-06-30 本文受国家自然科学基金(60702055),新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0778),重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2007BB2390),重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ070501)资助。

陈前斌(1967-),男,教授,主要研究方向为通信网理论与技术、无线通信、多媒体信息传输与处理;张 宝(1983-),男,硕士生,主要研究方向为无线接入网络,E-mail:zhangbao1999@126.com;唐 伦(1973-),男,讲师,主要研究方向为无线接入网络;王彩霞(1983-),女,硕士生,主要研究方向为无线接入网络;李 云(1974-),男,讲师,主要研究方向为无线信息网络。

berg 于 1952 年在研究静态经济问题时提出来的。Stackelberg 博弈中<sup>[4]</sup>，至少有两个决策者，其中之一处于一种优势和权威的地位，它可以获得比另一方更多的关于系统的信息，它可以在决策之前选择并宣布自己的策略。另一方则在这个策略之下再选择使自己最优的策略。这样，博弈就可以依照具有优势地位的一方的意愿进行，所以又叫做主从博弈。

假设  $p_0$  为博弈主方，设  $E_0, E_1$  分别为主从双方的信息集， $r_i \in \Gamma_i$  为  $E_i$  到  $U_i$  的一个映射 ( $i=0, 1$ )，则双方的决策为信息量的函数，即  $u_i = r_i(e_i), e_i \in E_i, i=0, 1$ 。

不同的信息结构产生的博弈问题也不尽相同，但无论是哪种 Stackelberg 博弈问题，其基本思想是一致的，它们都必须满足：

- (1) 主方在博弈之前宣布其所选择的策略  $r_0$ ；
- (2) 在博弈过程中，主方必须遵守诺言，按其已经宣布的策略行事。

主从博弈的这些基本假设是必要的，有力地体现了这一博弈均衡解概念的特点。假若第一条不成立，则就不称其为从主博弈了；假若第二条不成立，即主方不遵守所宣布的策略，则博弈结果将可能趋向 Nash 均衡解，而非由 Stackelberg 博弈所得的完美子博弈均衡 (subgame-perfect equilibrium) 解。

## 2 负载均衡的 Stackelberg 博弈模型

综上所述，从 Stackelberg 博弈论的观点来看，可以将多主接入网络选择合理带宽进行分配看成是一个博弈过程，利用博弈论的均衡促使网络做出判决，从而实现合理策略下的负载均衡。首先我们将按照经典博弈论的三要素 (局中人 player、策略 strategy、收益函数 profit function) 来构造负载均衡的 Stackelberg 博弈模型。

- 局中人 (player)：参与带宽分配的不同网络  $i$ ；
- 策略 (strategy)：每个局中人向用户提供的带宽，定义为  $b_i$  (非负)；
- 收益 (profit)：每个局中人从分配的带宽中所获得的收益，定义为  $U_i(b)$ 。

考虑到用户对多主接入网络的需求会随着时间、地点的差异而不同，本节将从两种价格方案讨论：其一是线性的价格方案，其二是非线性的价格方案。

### 2.1 线性 Stackelberg 博弈模型

在线性 Stackelberg 博弈模型中，假设网络  $i$ 、网络  $j$  提供的带宽分别为  $b_i, b_j$ 。首先由网络  $i$  选择带宽  $b_i$ ，网络  $j$  观测到网络  $i$  所选策略后选择提供  $b_j$  的带宽。在网络带宽需求量大时，带宽的定价  $p(B)$  为线性函数，即

$$p(B) = a - kB \quad (1)$$

其中  $a$  为常量， $B = b_i + b_j$ 。 $k$  为价格惩罚因子，由主方来确定。

网络提供  $b_i$  的带宽所付出的成本为  $C_i(b_i) = cb_i$ ，其中  $c$  为每单位带宽的成本支出。因此，网络  $i$  的收益函数  $U_i(b_i, b_j)$  表示为

$$U_i(b_i, b_j) = p(B)b_i - C_i(b_i) = [a - k(b_i + b_j)]b_i - cb_i \quad (2)$$

同理，网络  $j$  的收益函数  $U_j(b_i, b_j)$  表示为

$$U_j(b_i, b_j) = p(B)b_j - C_j(b_j) = [a - k(b_i + b_j)]b_j - cb_j \quad (3)$$

采用逆向归纳法 (backward induction) 求解完美子博弈

均衡解。逆向归纳法的思路是通过逆向归纳的方法，先集中解决局中人在面临任何可能情况下的最终行为策略的最优选择问题，然后逐步向前推导计算前一步的最优选择<sup>[5]</sup>。基于逆向归纳法的思路，我们首先集中解决网络  $j$  在面临网络  $i$  提供任意带宽  $b_i$  下的最佳响应函数，然后由此推导网络  $i$  的最优选择。网络  $j$  的最佳响应函数推导如下：

$$\frac{\partial U_j(b_i, b_j)}{\partial b_j} = 0 \Rightarrow a - 2kb_j - kb_i - c = 0 \quad (4)$$

通过对式 (4) 的求解，可以得到网络  $j$  所提供的带宽  $b_j$  对于任何  $b_i$  的响应  $R_j(b_i)$  为

$$R_j(b_i) = b_j(b_i) = \frac{1}{2k}(a - kb_i - c) \quad (5)$$

此时，网络  $i$  的效用函数  $U_i(b_i, b_j)$  可描述为

$$\begin{aligned} U_i(b_i, b_j) &= [a - k(b_i + R_j(b_i))]b_i - cb_i \\ &= [a - k(b_i + \frac{1}{2k}(a - kb_i - c))]b_i - cb_i \end{aligned} \quad (6)$$

为了获得网络  $i$  最大效用，对网络  $i$  的效用函数求导，求解出网络  $i$  获得最大效用时所提供的带宽  $b_i^* = \frac{1}{2k}(a - c)$ ，即该模型的完美子博弈均衡解。由式 (5) 得，网络  $j$  获得最大效用时所提供的带宽  $b_j^*(b_i) = \frac{1}{4k}(a - c)$ 。

此时，网络  $i$  的最大效用为：

$$\max U_i(b_i, b_j) = [a - k(b_i^* + b_j^*)]b_i^* - cb_i^* = \frac{1}{8k}(a - c)^2 \quad (7)$$

同理，网络  $j$  的最大效用为

$$\begin{aligned} \max U_j(b_i, b_j) &= [a - k(b_i^* + b_j^*)]b_j^* - cb_j^* \\ &= \frac{1}{16k}(a - c)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.2 非线性 Stackelberg 博弈模型

当网络需求量小时，线性价格策略显然变化比较缓慢，不能起到预期的激励效果。在这种情况下，为了达到供需平衡，网络需采用刺激用户更多使用带宽的策略，即用户所使用的带宽量在一定范围内越大，其价格降低得越快。而当用户所使用的带宽超过某一定量时，价格会保持在一定的额度不再下降，这是为了防止用户对网络的过度使用，造成网络资源的浪费。

在这里，考虑带宽价格采用一种非线性函数：

$$p_i(b_i) = a + \frac{\omega \log(b_i + \beta b_j)}{b_i} \quad (9)$$

其中  $a$  为常量， $\omega$  为大于零的价格惩罚因子， $\beta$  为网络之间相互影响的系数。此时，网络  $j$  的收益函数  $U_j(b_i, b_j)$  表示为

$$U_j(b_i, b_j) = [a + \frac{\omega \log(b_i + \beta b_j)}{b_j}]b_j - cb_j \quad (10)$$

通过对式 (10) 的求导，可以得到网络  $j$  所提供的带宽  $b_j$  对于任意  $b_i$  的响应  $R_j(b_i)$  为

$$\frac{\partial U_j(b_i, b_j)}{\partial b_j} = 0 \Rightarrow R_j(b_i) = b_j(b_i) = \frac{\omega}{(c - a)} - \beta b_i \quad (11)$$

此时，网络  $i$  的效用函数  $U_i(b_i, b_j)$  可描述为

$$\begin{aligned} U_i(b_i, b_j) &= [a + \frac{\omega \log(b_i + \beta(R_j(b_i)))}{b_i}]b_i - cb_i \\ &= ab_i + \omega \log[b_i + \beta(\frac{\omega}{(c - a)} - \beta b_i)] - cb_i \end{aligned} \quad (12)$$

网络  $i$  获得最大效用时所提供的带宽  $b_i^* =$

$\frac{\omega(1-\beta+\beta^3)}{(c-a)(1-\beta^2)^2}$ , 由式(11)得网络  $j$  获得最大效用时所提供的带宽  $b_j^* = \frac{\omega(1-\beta-\beta^2)}{(c-a)(1-\beta^2)^2}$ 。

### 3 仿真结果及分析

仿真中,参数的设置如下: $a=4.5$ ,线性价格惩罚因子  $k=1/14$ ,非线性价格惩罚因子  $\omega=5$ ,网络之间相互影响的系数  $\beta=0.1$ ,线性价格方案下单位带宽的成本支出  $c=2.5$ ,非线性价格方案下单位带宽的成本支出  $c=5$ 。

图1描述了带宽之间以及带宽与效用的关系。图中左上部分描述的是网络  $i$  与网络  $j$  所提供带宽之间的关系,从图中可以看出网络向用户提供的带宽量是一个“此消彼长”的现象,这就避免了网络之间由于盲目竞争而造成带宽资源的浪费。

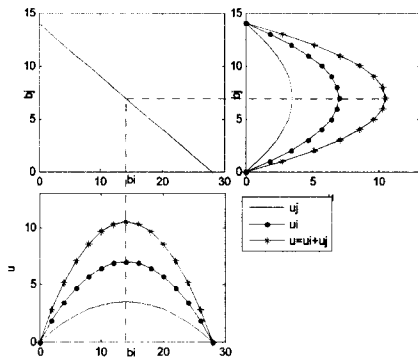


图1 带宽之间以及带宽与效用的关系图

左下部分图描述的是网络  $i$  所提供的带宽与效用函数之间的关系,由图可知网络  $i$  所提供的带宽  $b_i^* = 14$  的时候,保证了各网络以及网络整体取得最大效用。观察到网络效益随着带宽的增加而增大,当效益达到某一最大值后就会衰减,这是因为当所提供带宽不断提高后,网络对带宽的定价就会随之降低,以吸引更多的“购买者”,从而使网络获得的收益降低。基于这方面考虑,Stackelberg 博弈避免了网络无限度地增加所提供的带宽量,从而提高了网络的利用率。同理,右上部分图描述的是网络  $j$  所提供的带宽与效用函数之间的关系。

另外,从图1可知网络  $i$  保证各网络在  $b_i^* = 14$  时取得最大效用,对应于网络  $j$  的带宽  $b_j^* = 7$ 。根据 Stackelberg 博弈的主从关系可知,网络在  $b_j^* = 7$  时同样取得最大效用,图中仿真结果证明了理论推导的正确性。这是因为网络  $j$  是在观测到网络  $i$  所选策略(保证效用最大时的带宽量)后选择提供  $b_j$  的带宽,因此它一定能保证在对应时刻网络效用取得最大。

由图2得知,当采用非线性价格策略时,价格在带宽比较小的时候就能很快降下来,从而刺激用户更多地使用带宽。当带宽增加到一定程度时,价格的下降速度就明显地慢

了下来,这就避免了用户因为过于廉价而无限地购买带宽造成网络资源的浪费,从而达到了合理利用网络资源的目的。

图3对比了在分别采用线性和非线性价格策略时,网络所获得的效用。由图可知,当采用线性价格策略时,在达到最大效用以前效用曲线比较平滑,激励效果比较小。相比之下,采用非线性价格策略,网络效用能够在达到最大值之前以指数形式陡增,激励作用明显。因此,在网络带宽供大于求的时候适合采取非线性价格策略,激励用户更多地购买带宽。

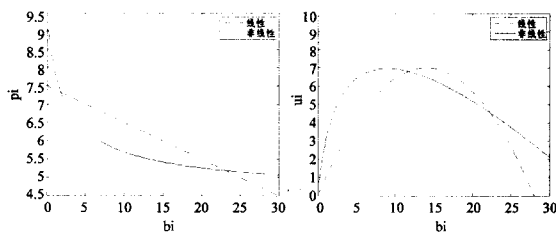


图2 线性/非线性价格曲线

图3 线性/非线性效用曲线

结束语 负载均衡对于提高网络性能,保证业务 QoS 是非常重要的。本文利用 Stackelberg 博弈模型解决了多主接入(Multi-Homing)中的负载均衡问题,从线性和非线性价格方案两个角度,实现了网络效用最大化,扩大了算法的适用范围。仿真结果表明,完美子博弈均衡解能够保证网络获得最大收益值,实现了带宽资源的合理分配。本文中为了使仿真结果更加具有直观性,价格惩罚因子的选取具有特殊性。如何选取合适的价格惩罚因子,将是实际应用中需要做进一步研究的工作。

### 参考文献

- [1] Lu Kai, Zomaya A Y. A hybrid policy for job scheduling and load balancing in heterogeneous computational grids[C]//IEEE Parallel and Distributed computing, 2007. ISPDC '07. sixth international Symposium. July 2007
- [2] Dhakal S, Hayat M M, Jorge E, et al. Dynamic load balancing in distributed systems in the presence of delays: a regeneration-theory approach[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(4): 485-497
- [3] Lee Sang Hoon, Han Youngnam. A novel Inter-FA handover scheme for load balancing in IEEE 802.16e system [C]//Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th. April 2007: 763-767
- [4] Niyato D, Hossain E. Integration of WiMAX and WiFi: optimal pricing for bandwidth sharing [J]. IEEE Communication Magazine, 2007, 52(7): 140-146
- [5] Fudenberg D, Tirole J. Game Theory[M]. 北京:中国人民大学出版, 2003: 59-120

(上接第 67 页)

- [3] Wu Xiaoping, Shen Zhidong, Zhang Huanguo. The Mobile Agent Security Enhanced by Trusted Computing Technology[C]//The 2nd International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. Wuhan, IEEE Press, 2006
- [4] Borselius N. Mobile agent security[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 2002(10)
- [5] Lee R, Kwan P, McGregor J P, et al. Architecture for Protecting Critical Secrets in Microprocessors[C]//Proceedings of the 32nd International Symposium on Computer Architecture (ISCA 2005). June 2005

- [6] Lee H, Alves-Foss J, Harrison S. The Use of Encrypted Functions for Mobile Agent Security[C]//Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE Press, 2004
- [7] Zhong S, Yang Y R. Verifiable Distributed Oblivious Transfer and Mobile Agent Security, Mobile Networks and Applications [J]. Springer Science, 2006(11): 201-210
- [8] Foster D, Varadarajan V. Security and Trust Enhanced Mobile Agent based System Design[C]//Proceedings of the Third International Conference on Information Technology and Applications (ICITA'05). IEEE Press, 2005