

机载视频点播服务中的路由请求算法研究

万剑雄¹, 向旭东¹, 陈昕²

(1. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083; 2. 北京信息科技大学计算机学院, 北京 100101)

摘要: 机载视频点播中的路由选择问题是有效保证点播服务用户体验的重要技术之一。该问题可抽象为一个受控离散时间排队系统, 包括一个分发器与一些 VoD 服务器。该系统可用马尔科夫决策过程进行建模。由于马尔科夫决策过程存在状态空间爆炸问题, 因此给出了一种基于贪心策略的启发式算法。该启发式算法较为简单, 且可以在线执行。最后进行了大量仿真实验, 说明启发式算法较为有效。

关键词: 机载视频点播; 请求路由; 贪心近似算法

中图分类号: V271.4; TN956 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)03-0081-03

On the Request Routing Algorithm in Onboard Video-on-Demand Service

WAN Jianxiong¹, XIANG Xudong¹, CHEN Xin²

(1. School of Computer and Communication Engineering, Univ. of Sci. & Tech., Beijing 100083, China;

2. School of Computers, Beijing Univ. of Information Sci. & Tech., Beijing 100101, China)

Abstract: In this paper we investigate the request routing problem in the onboard Video-on-Demand (VoD) service, which is a key to provide good user experience. We model the system as a controlled queuing system including a dispatcher and several VoD servers. The system is formulated by Markov Decision Process (MDP). Since the MDP formulation suffers from the so-called “the curse of dimensionality” problem, we then develop a greedy heuristic approximate algorithm, which is simple and can be implemented online. The effectiveness of the approximation algorithm is evaluated through extensive simulations.

Key words: on board VoD; request routing; greedy approximation algorithm

0 引言

机载通信与计算机技术的发展使得机载多媒体应用成为可能。多媒体应用系统中一个重要的应用领域是视频点播 (Video-on-Demand, VoD) 业务。本文研究的是机载 VoD 系统中的请求路由问题。请求路由问题是 VoD 业务中的核心问题之一, 国内外已经进行了一些研究^[1-4]。在这些研究工作中, 有些着重于通过网络测量的方法探寻路由算法背后的设计原则, 并对其有效性进行评价^[5-6]; 另一些则从理论角度入手^[7-10]。本文采用了动态优化而非静态优化的方法对 VoD 系统的请求路由问题进行了研究。机载 VoD 业务

中的请求路由问题可归结为一个标准的马尔科夫决策过程 (Markov Decision Processes, MDP) 问题。理论上说, MDP 问题都可以使用经典算法进行求解。但是, 请求路由 MDP 却存在“状态空间爆炸”问题, 使得经典算法根本无法应用。为了解决这个问题, 本文给出了一种贪心启发式近似求解算法。利用仿真实验评价两种算法的性能。仿真数据说明利用贪心算法可以得到近似最优的请求路由策略。

1 系统建模与求解

本文所研究的机载 VoD 系统模型如图 1 所示, 包含一个分发器与多个 VoD 服务器, 以离散时间模式工作。分发器为一个集中控制部件, 收集所有 VoD 请求并将其重定向到合适的服务器。令时间槽长度为 T , 在一个时间槽内, VoD 服务器将视频流媒体数据传送到其对应的终端用户。在时间槽末尾, 一些终端用户会选择关闭流媒体连接并离开 VoD 系统, 而另一些终

收稿日期: 2012-12-02

修回日期: 2013-01-17

基金项目: 国家 973 计划项目 (2010CB328105); 国家自然科学基金 (60973107)

作者简介: 万剑雄 (1982—), 男, 陕西西安人, 博士生, 研究方向为计算机系统的优化控制。

端用户则仍然继续观看视频节目。每接受一个终端用户的 VoD 视频请求,VoD 提供商都会得到一些经济利益。本文的目标是找出最优或近似最优的请求路由策略,以使一段时间内的累积利益最大化。

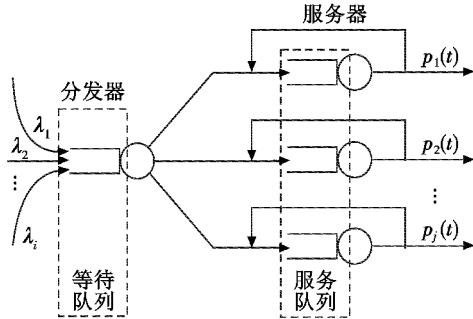


图1 VoD 服务系统模型

Fig.1 The model for VoD system

将用户按照所观看的文件进行分类。在每个时间槽,到达分发器的第*i*类终端用户请求数 λ_i 是个随机变量。如前所述,在VoD服务中,可以认为 λ_i 服从某一稳态分布,即其为一个平稳随机过程。服务器*j*所拥有的资源数(如网络带宽等)为 C_j 。假设*i*类终端用户请求消耗 ω_i 单位的资源,一个服务器群中的所有终端用户所消耗的资源总量不能超过该服务器群所拥有的资源总量。

在VoD服务中,终端用户的请求会“驻留”在服务器中。假设每个终端用户请求至少在系统中驻留一个时间槽,且所有请求离去都发生在时间槽的末尾。每个服务器群都不记录每个视频请求的状态。假设在每个时间槽内同属一个类型的请求的离去概率相同,可近似地得到*i*类用户的离去概率为 $p_i \approx \Gamma/T_i$ 。其中, T_i 为*i*类用户在系统中的平均驻留时间。

2 VoD 请求路由 MDP 问题

VoD 请求路由问题可以归结为一个标准的离散时间马尔科夫决策过程模型。在时间点*t*,分发器采集系统的状态,包括:1)系统到达向量 $\boldsymbol{\lambda}(t) = \{\lambda_i(t)\}, i \in I$,描述了等待队列中*i*类终端用户请求的数量;2)服务器负载矩阵 $\mathbf{N}(t) = \{n_{ij}(t)\}, i \in I$,描述了数据中心*j*中*i*类终端用户请求的数量。决策行为是一个矩阵 $\mathbf{a}(t) = \{a_{ij}(t)\}$,描述了重定向到数据中心*j*上*i*类终端用户请求的数量。

1) 状态。令系统的状态空间为*S*,其中一个元素即为 $(\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{N})$ 。

2) 决策时间。决策时间为时间槽的开始。

3) 行为。决策 $\mathbf{a}(t)$ 受以下条件约束:

$$\sum_{j \in J} a_{ij}(t) \leq \lambda_i(t), \forall i \in I \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} \omega_i (a_{ij}(t) + n_{ij}(t)) \leq C_j, \forall j \in J \quad (2)$$

其中:约束(1)为流守恒约束;约束(2)为数据中心的资源(带宽)限制。

4) 状态转移概率。状态变量中的*N*的系统动态方程为 $\mathbf{N}(t+1) = \mathbf{N}(t) + \mathbf{a}(t) - \mathbf{y}(t)$ 。其中, $\mathbf{y}(t) = \{y_{ij}(t)\}$,为时间槽*t*的末尾离开数据中心*j*的*i*类终端用户请求的数量。令 $g_{ij}^t(n)$ 为 $y_{ij}(t)$ 的分布函数,则 $g_{ij}^t(n)$ 的表达式为

$$g_{ij}^t(n) = \begin{cases} \binom{n_{ij}(t) + a_{ij}(t)}{n} (1-p_i)^{n_{ij}(t) + a_{ij}(t) - n} \cdot p_i^n, & n \leq n_{ij}(t) + a_{ij}(t) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

令 λ_i 服从某种离散概率分布函数 $f_i(n)$,则系统转移概率可表达为

$$\Pr((\mathbf{N}(t+1), \boldsymbol{\lambda}(t+1)) | (\mathbf{N}(t), \boldsymbol{\lambda}(t)), \mathbf{a}(t)) = \begin{cases} 0, & \text{if } \forall j, n_{ij}(t+1) > n_{ij}(t) + a_{ij}(t) \\ \prod_{i \in I} f_i(\lambda_i(t+1)) \cdot \prod_{j \in J} \prod_{i \in I} g_{ij}^t(n_{ij}(t) + a_{ij}(t) - n_{ij}(t+1)), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

5) 回报。系统回报由基础设施提供商定义,通用的表达形式为 $r - c$,其中, r 与 c 分别为每服务一个终端用户请求所得到的收入与成本,与终端用户在系统内的驻留时间有关。在第*t*个时间槽所得的收益为 $R(\mathbf{N}(t), \boldsymbol{\lambda}(t), \mathbf{a}(t)) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (n_{ij}(t) + a_{ij}(t)) \cdot (r_i - c_{ij})$ (5) 式中: $n_{ij}(t) + a_{ij}(t)$ 是在第*t*个时间槽内数据中心*j*中*i*类终端用户请求的数量; $r_i - c_{ij}$ 为数据中心*j*每服务一个*i*类终端用户请求所得的净利润。

6) 优化目标。该问题的优化目标是最大化累计回报的期望,目标函数为

$$\mathbf{E} \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \delta^t R(\mathbf{N}(t), \boldsymbol{\lambda}(t), \mathbf{a}(t)) \right\} \quad (6)$$

其中, $0 \leq \delta \leq 1$ 为一个折扣因子。这种形式的目标函数在文献[8]中也用到过。

MDP 问题的值函数可表示为

$$V(\mathbf{N}(t), \boldsymbol{\lambda}(t)) = \max_{\mathbf{a}(t)} \left\{ R(\mathbf{N}(t), \boldsymbol{\lambda}(t), \mathbf{a}(t)) + \delta \mathbf{E} \{ V(\mathbf{N}(t+1), \boldsymbol{\lambda}(t+1)) \} \right\} \quad (7)$$

可以用经典的值迭代算法或策略迭代算法对该请求路由MDP问题进行求解。但是,该MDP问题显然存在“状态空间爆炸”问题。因此,还需要设计其他方法来对请求路由MDP问题进行近似求解。

贪心算法是最简单的近似算法之一,其优化目标是使当前时间槽内的回报最大化,而非一段时间内的累计回报。利用贪心算法,VoD 请求路由问题

可以归纳为式(8)所示的一个整数线性规划问题

$$\begin{aligned} \max_{a(t)} & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_{ij}(t) \cdot (r_i - c_{ij}) & (8) \\ \text{Subject to:} & \\ & \sum_{j \in J} a_{ij}(t) \leq \lambda_i(t), & \forall i \in I \\ & \sum_{i \in I} \omega_i(a_{ij}(t) + n_{ij}(t)) \leq C_j, & \forall j \in J \\ & a_{ij}(t) \in \mathbf{Z}^+, & \forall i \in I, j \in J \end{aligned}$$

3 性能评价

在本小节中研究了一个示例系统,包含两种终端用户请求类型与两个 VoD 服务器。类型 1 与类型 2 终端用户请求的期望驻留时间分别为 2000 s 与 1000 s。若决策时间槽长度为 5 s,则根据公式,两种请求的离去概率分别为 0.0025 与 0.005。其他参数的设置如表 1 与表 2 所示。

表 1 参数设置表

Table 1 Parameter settings

服务器	类型 1 终端用户请求		类型 2 终端用户请求	
	S1	S2	S1	S2
成本	2	2.5	1	2
回报	12		10	
期望驻留时间/s	2000		1000	
驻留时间上界/s	2500		1200	

表 2 到达与离去分布

Table 2 Arrival and departure distributions

	类型 1 终端用户请求		类型 2 终端用户请求	
到达数量	0	1	0	1
到达概率	0.8	0.2	0.9	0.1
离去概率	0.0025		0.005	

为了衡量贪心算法的性能,采用有界参数 MDP (Bounded-parameters MDP, BMDP) 方法^[11]对第 2 节中的 MDP 问题进行近似求解。BMDP 求解的核心思想在于将 MDP 状态空间聚合,借以得到一个小型 MDP。在这个小型 MDP 中可求得一个原 MDP 问题最优解的上下界,通过对比上下界与贪心算法所得到的目标函数数值来进行性能评价。

本文使用以下指标来评价贪心策略的性能:MDP 问题中贪心策略的近似值函数 V_{greedy} 与 BMDP 问题中区间值函数 $[V_{\downarrow opt}, V_{\uparrow opt}]$ 的实际值,如图 2 所示。两种终端用户请求的到达概率的变化范围为 $[0.01, 0.2]$ 。

BMDP 问题的上下界与贪心策略的值函数都随着终端用户请求到达强度的增大而趋于稳态。此外,贪心策略比 BMDP 值函数的下界性能要好,且在一些情况下与 BMDP 值函数的上界性能极为接近。这说明在该示例系统中,贪心策略的性能较好。其次,对于 BMDP 问题,其可能的最差性能 $V_{\downarrow opt}$ 约能达到可能的最好

性能 $V_{\uparrow opt}$ 的 65% ~ 80%。对于贪心策略,其值函数约能达到可能的最好性能 $V_{\uparrow opt}$ 的 80% ~ 95%。图中还可看出,当终端用户请求到达强度越大,则贪心策略的性能越好。而在大多数情况下, $V_{\downarrow opt}$ 约为 $V_{\uparrow opt}$ 的 80% 左右。

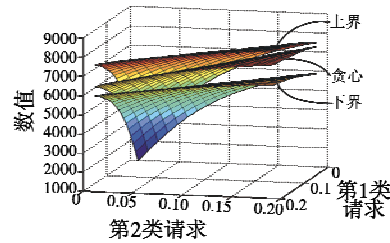


图 2 V_{greedy} 与 $[V_{\downarrow opt}, V_{\uparrow opt}]$ 和到达概率的关系

Fig. 2 V_{greedy} vs. $[V_{\downarrow opt}, V_{\uparrow opt}]$

4 结束语

本文研究了机载视频点播中的动态请求路由问题。动态请求问题可建模为一个马尔科夫决策过程,并应用经典迭代算法可求得其最优解。然而,实际系统规模庞大,使得 MDP 问题存在“状态空间爆炸”问题,经典算法无法应用。为了解决这一问题,文中给出了一种贪心策略的启发式近似求解算法。仿真分析说明,这种启发式算法得到的解具有较好的性能。

参考文献

- [1] ZHANG Zheng, ZHANG Ming, GREENBERG A, et al. Optimizing cost and performance in online service provider networks [C]//The 7th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, USENIX, 2010:1-15.
- [2] ANDREWS M, SHEPHERD B, SRINIVASAN A. Clustering and server selection using passive monitoring [C]//The 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM) IEEE, 2002, 3:1717-1725.
- [3] ARDAIZ O, FREITAG F, NAVARRO L. Improving the service time of web clients using server redirection [J]. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2001, 29:39-44.
- [4] WENDELL P, JIANG J W, FREEDMAN M J, et al. Donar: Decentralized server selection for cloud services [C]//Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for computer communications (SIGCOMM). ACM, 2010:231-242.
- [5] TORRES R, FINAMORE A, KIM J, et al. Dissecting video server selection strategies in the youtube CDN [C]//Proceedings of the 31st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS) IEEE, 2011:248-257.