

# 一种基于 QoE 量化评估的服务选择算法

李春林<sup>1</sup>, 廖 丹<sup>2</sup>, 熊 玲<sup>3</sup>, 黄月江<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第三十研究所, 四川成都 610041; 2. 西南交通大学, 四川成都 610031;  
3. 电子科技大学, 四川成都 611731)

**摘 要:** 针对如何为互联网用户从多个相同或相似的服务中进行选择的问题, 提出了一种新的服务选择算法: 基于 QoE(Quality of Experience)量化评估的服务选择算法(A Service Selecting Algorithm Based on Quantified QoE Evaluation, ASSABQ). 该算法基于一种层次化评分模型, 从历史评分中学习获取用户偏好, 根据多种评价因素计算每个可用服务的满意度, 并选择满意度最高的服务给用户. 与已知算法相比, ASSABQ 算法的复杂度从  $O(n^2)$  下降到  $O(n)$ . 仿真实验结果表明, 在相同应用场景下, 采用 ASSABQ 算法得到的用户满意度比已知算法提高约 10%.

**关键词:** 服务选择; 层次化模型; 体验质量; 用户偏好

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2015)11-2145-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.002

## A Service Selection Algorithm Based on Quantified QoE Evaluation

LI Chun-lin<sup>1</sup>, LIAO Dan<sup>2</sup>, XIONG Ling<sup>3</sup>, HUANG Yue-jiang<sup>1</sup>

(1. No. 30 Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. Southwest Jiaotong University of China, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of selecting a better service with the same or similar functions, one method is considering the users' experiences on the service quality. Then an algorithm called A Service Selecting Algorithm Based on Quantified QoE Evaluation (ASSABQ) is proposed. The algorithm is deduced from a hierarchy rating model and the corresponding user preferences. User preferences can be acquired from analyzing the statistical data of users' satisfaction feedbacks. Each service is rated with a satisfaction score according to the algorithm. The highest scored service will be selected to the user. Experiments compare the algorithm with both different configurations and algorithms. Compared to FCE\_RS algorithm, the algorithm complexity of ASSABQ is improved from  $O(n^2)$  to  $O(n)$ , and the user satisfaction ratio is elevated by 10% in the same simulation scenario.

**Key words:** service selection; hierarchy model; quality of experience (QoE); user preference

## 1 引言

随着互联网应用的不断丰富和发展, 尤其是移动应用终端与计算机网络的逐渐融合, 网络出现了许多功能相同或相似但在内容和服务质量等方面存在差异的服务<sup>[1-3]</sup>. 这也使得用户获取服务的环境处于动态变化中, 因此需要根据服务可达性、带宽等限制调整服务以满足用户的需求. 如何从多个可用服务中选择最能满足用户需求的服务成为当前需要解决的重要问题之一.

文献[4]提出体验质量 QoE(Quality of Experience)的概念, 通过将用户的体验考虑在内来解决上述问题. 目

前针对 QoE 的研究通常考察影响用户体验的各种因素以及用户对这些因素的偏好, 建立用户的满意度函数以量化的方法来表示用户的满意程度<sup>[5]</sup>. 为了解决互联网应用涉及的大量影响用户体验的因素的建模问题, 文献[6]提出一种基于品牌、可用性、功能性和内容的层次化评分模型. 文献[7]采用一种 3 层的评分模型, 并引入了用户偏好, 从而给出一种基于加权求和的满意度计算方法, 但该模型采用 AHP 算法计算用户偏好导致算法效率较低. 文献[8]采用专家的意见预设用户偏好提高了算法效率, 但由于不能动态学习用户偏好, 该方法难以适应移动等应用场景的要求.

在基于评分和偏好的 QoE 模型中,可以有多种方法将这些评分和偏好聚合到一个统一的满意度函数中.加权和法是最简单的一种方法,比如文献[7]用该方法评估不同云计算副本节点分值、文献[9]用该方法评估不同的网络路径等.但该方法要求评分项之间具有独立性和完全可补偿性.幂函数法<sup>[10]</sup>解决了不可补偿性问题,但又不适用于具有可补偿性的评分项.此外 PROMETHEE 算法<sup>[11]</sup>、TOPSIS 算法<sup>[12]</sup>也是聚合各评分项的有效方法,但他们的算法较为复杂.上述方法各有优缺点,并没有哪一种方法适用于各种场景.由于加权和法最简单,且不可补偿性等问题可以通过适当的预处理解决<sup>[13]</sup>,因此是一种较为常用的方法.

综上所述,针对基于 QoE 的服务选择问题,本文提出一种层次化、可伸缩的评分模型,和一种适用于层次化评分模型、算法复杂度为  $O(n)$  的用户偏好动态获取方法,并采用一种基于加权和方法的对用户满意度进行量化.在此基础上,设计了一种新的服务选择算法:基于 QoE 量化评估的服务选择算法.在相同应用场景下,该算法得到的用户满意度比已知算法提高约 10%,同时有效降低了计算复杂度.

## 2 层次化评分模型

针对互联网应用丰富多样、评分因素各异的特点,本文提出一种具有可伸缩性的层次化评分模型.该评分模型由最上层的服务总评分向下延伸,根据具体的应用可扩展到多个评分层次,且每个评分层次可包含多个评分项.图 1 给出一种可适用于在线视频服务的评分三层模型.第一个层次为总评分,反映了用户对服务的满意程度.第二层将服务分解为品牌、可用性、功能和内容四个方面.第三层次再进一步细分更容易量化的评分项,比如将可用性展开为网络带宽等.

假设所有评分均为整数,最大取  $G$ ,最小取 0.若第  $i$  层的评分项  $q^{(i)}$  包含  $m$  个子评分,记为  $q_j^{(i+1)}$ ,  $j \in [1, m]$ .则定义  $q^{(i)}$  与其子评分的关系如下

$$q^{(i)} = \sum_{j=1}^m \theta_j^{(i+1)} q_j^{(i+1)} \quad (1)$$

其中  $\theta_j^{(i+1)}$  为加权系数,且  $\theta_j^{(i+1)} \geq 0, \sum \theta_j^{(i+1)} = 1$ .需要指出的是,针对线性加权方法中的不可补偿问题,比如

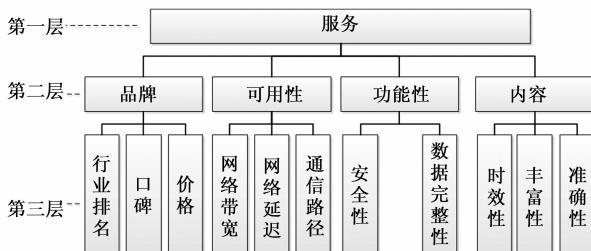


图1 层次化评分模型

当一个服务带宽不满足在线视频的基本要求但其他评分项得分很高时,其总评分可能超过其他可用服务的评分从而被错误的选中的问题.本文将这一类服务称为不可用服务,并作为例外进行处置,后续的讨论中若无特别的说明,则认为服务是可用的.

假设评分模型包含  $n$  个最底层评分项,第  $l$  个评分项记为  $x_l$ .令总评分为  $f$ ,由于  $q^{(i)}$  与  $q^{(i+1)}$  是线性关系,则经过迭代可得  $f$  与  $x_l$  的关系为:

$$f = \sum_{l=1}^n \mu_l x_l \quad (2)$$

且  $\mu_l > 0, \sum \mu_l = 1$ .其中  $\mu_l$  与各层加权系数有关,取值因人而异.

对用户主观给出的评分  $x_l$ ,假定存一个客观的评分标准对应评分为  $c_l$ ,令  $\eta_l = x_l/c_l$ ,则称  $\eta_l$  为主观因子,其代表不同用户的主观差异.同时称  $c_l$  为基准评分,取值与用户无关,其评分标准通常由专家研究制定.则式(2)可重写为

$$f = \sum_{l=1}^n \mu_l \eta_l c_l \quad (3)$$

将主观因子和加权系数合并,令  $w_l = \mu_l \eta_l$ ,由式(3)可得

$$f = \sum_{l=1}^n w_l c_l \quad (4)$$

其中  $w_l > 0$ .这里称  $w_l$  为用户对评分项  $l$  的偏好.采用矢量化的表示方式,记  $\mathbf{C} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ ,  $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ,则式(4)可表示为:

$$f = \mathbf{C} \cdot \mathbf{W}^T \quad (5)$$

式(5)称为 QoE 的量化评估函数.

## 3 偏好获取算法推导

本节将基于公式(5)推导用户偏好的获取方法.由于总评分是离散的整数,而公式中  $f$  的值域是连续的,可引入模糊数学的理论对两者进行映射.令总评分为  $g$ ,记  $\mu_g(f)$  为  $f$  属于总评分  $g$  的隶属度,给出如下两条公理:

**公理 1** 如果  $g = 0$ ,则由  $f_i < f_j \Rightarrow \mu_0(f_i) \geq \mu_0(f_j)$ .

**公理 2** 如果  $g = G$ ,则由  $f_i < f_j \Rightarrow \mu_G(f_i) \leq \mu_G(f_j)$ .

分别取  $\mu_0$  的  $\alpha$  截集  $A(\mu, \alpha)$  和  $\mu_G$  的  $\beta$  截集  $A(\mu, \beta)$ ,且有  $\mu_G(\lambda) = \alpha, \mu_0(\varphi) = \beta$ ,由公理 1 和公理 2 有

**定理 1** 由  $f \leq \lambda \Rightarrow \mu_0(f) \in A(\mu, \alpha)$ .

**定理 2** 由  $f > \varphi \Rightarrow \mu_G(f) \in A(\mu, \beta)$ .

定义向量空间  $\mathbf{C}'$  和  $\mathbf{C}''$ ,对于给定偏好向量  $\mathbf{W}_c$ ,对任意向量  $\mathbf{C}_i$  若有:

(1)  $\mathbf{C}_i \cdot \mathbf{W}_c^T \leq \lambda$ , 则  $\mathbf{C}_i \in \mathbf{C}'$ ;

(2)  $\mathbf{C}_i \cdot \mathbf{W}_c^T > \varphi$ , 则  $\mathbf{C}_i \in \mathbf{C}''$ .

基于向量空间  $\mathbf{C}'$  和  $\mathbf{C}''$ ,可以得出推导用户偏好的相关定理.

**定理 3** 若  $C'$  包含  $m'$  个向量,每个向量有  $n$  个分量,对  $C'$  中所有的向量求和,令

$$S' = \sum_{j=1}^{m'} C_j \quad (6)$$

则对  $l, k \in [1, n]$ , 有

$$w_l \leq w_k \Leftrightarrow s'_l \geq s'_k \quad (7)$$

当且仅当  $w_l = w_k$  时  $s'_l = s'_k$ .

**证明**

(1) 先证

$$w_l \leq w_k \Rightarrow s'_l \geq s'_k$$

令  $n=2$  且  $w_1 > w_2$ , 从而有  $w_1 c_{1j} + w_2 c_{2j} < \lambda$ . 则图 2 所示, 所有的向量  $(c_{1j}, c_{2j})$  在由顶点  $(0, \lambda/w_2)$ ,  $(0, 0)$  和  $(\lambda/w_1, 0)$  构成的三角形内. 画分割线  $c_1 = c_2$ , 如果所有的向量都在顶点  $(c, c)$ ,  $(0, \lambda/w_1)$ ,  $(0, 0)$  和  $(\lambda/w_1, 0)$  构成的区域内, 且所有向量和为  $(s_1^*, s_2^*)$ . 可证  $s_1^* = s_2^*$ . 显然任何在由  $(c, c)$ ,  $(0, \lambda/w_2)$  和  $(0, 0)$  构成的区域内的点  $(c_x, c_y)$  有  $c_x > c_y$ , 所以可以证明其内所有向量和  $(s'_1, s'_2)$  有  $s'_1 < s'_2$ . 如果  $w_1 = w_2$  则  $\lambda/w_1 = \lambda/w_2$ . 所以有  $s'_1 = s'_2$ . 因此  $n=2$  时的情形得证.

当  $n > 3$  时, 对任意  $l, k \in [1, n]$ , 可以重写  $\sum_{i=1}^n w_i c_{ij} < \lambda$

为  $w_j c_{ij} + w_k c_{kj} < \sum_{i=1, i \neq l, i \neq k}^n w_i c_{ij}$ , 转换为  $n=2$  的情形证明.

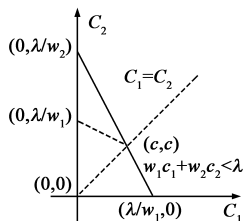


图 2  $n=2$  时的向量分布图

(2) 再证

$$w_l \leq w_k \Leftrightarrow s'_l \geq s'_k$$

$W$  和  $C$  是对称的, 只需要将  $W$  和  $C$  互换即可构成 (1) 的形式, 从而得证.

**定理 4** 若  $C''$  中包含  $m''$  个解向量, 每个向量有  $n$  个分量, 对  $C''$  中所有的向量求和

$$S'' = \sum_{j=1}^{m''} C_j \quad (8)$$

对  $l, k \in [1, n]$ , 有

$$w_l \geq w_k \Leftrightarrow s''_l \geq s''_k \quad (9)$$

当且仅  $w_l = w_k$  时  $s''_l = s''_k$ .

定理 4 的证明跟定理 3 的证明类似, 不再叙述. 由定理 3 和定理 4 可给出如下推论:

**推论 1**  $l, k \in [1, n]$ , 对  $S'$  和  $S''$  中的分量  $s'_l, s'_k, s''_l$  和  $s''_k$ , 令  $\overline{s'_l} = s'_l / m', \overline{s'_k} = s'_k / m', \overline{s''_l} = s''_l / m''$  和  $\overline{s''_k} =$

$s''_k / m''$ , 则有:

$$w_l \leq w_k \Leftrightarrow \overline{s'_l} - \overline{s''_l} \geq \overline{s'_k} - \overline{s''_k} \quad (10)$$

当且仅当  $w_l = w_k$  时  $\overline{s'_l} - \overline{s''_l} = \overline{s'_k} - \overline{s''_k}$ .

**定理 5**  $l \in [1, n]$ , 对推论 1 中定义的  $\overline{s'_l}$  和  $\overline{s''_l}$ , 若  $w_l = 0$ , 则有:

$$w_l = 0 \Leftrightarrow \overline{s'_l} - \overline{s''_l} = 0 \quad (11)$$

**证明 充分性**

如果  $w_l = 0$ , 有两种可能. 一种是用户不关心该参数, 另一种是该参数值是固定的. 对于前者,  $c_l$  所有的值均会出现在  $C'$  和  $C''$ , 可证  $\overline{s'_l} = \overline{s''_l}$ . 对另一种情况, 则显然  $\overline{s'_l} = \overline{s''_l}$ .

**必要性**

如果  $\overline{s'_l} - \overline{s''_l} = 0$ . 若  $w_l > 0$ , 则存在  $w_k$ , 且  $w_l > w_k \geq 0$ . 从而有  $\overline{s'_k} - \overline{s''_k} > \overline{s'_l} - \overline{s''_l} = 0$ . 当  $w_k = 0$  时, 有  $\overline{s'_k} - \overline{s''_k} = 0$ . 这跟推论 1 矛盾, 所以有  $w_l = 0$ . 证毕.

由推论 1 可通过  $\overline{s'_l} - \overline{s''_l}$  和  $\overline{s'_k} - \overline{s''_k}$  的大小推断用户不同偏好的大小, 并能根据定理 5 确定偏好取 0 的情况. 要获取用户偏好排序还需要确定阈值  $\lambda$  和  $\varphi$ , 本文给出如下方法:

计算用户的总评分平均值  $E$  和方差  $D$ , 给定系数  $\delta \in [0, 1]$ , 则有

$$\lambda = E - \delta D \quad (12)$$

$$\varphi = E + \delta D \quad (13)$$

选取平均值  $E$  可以增强  $C'$  和  $C''$  空间中采样样本平衡性, 方差  $D$  和  $\delta$  用于控制采样的样本数量在合理的范围内.

得到用户偏好序后, 需要进一步量化用户偏好. 可以采用线性、非线性等多种变换方式, 本文给出一种线性变换方法. 具体方法为:

(1) 分别获取属于  $C'$  和  $C''$  的服务评分向量.

(2) 对属于  $C'$  的向量求平均, 结果记为  $E_1$ ; 对属于  $C''$  的向量求平均, 结果记为  $E_0$ . 对于任意分量  $i$ , 令函数:

$$h(i) = E_1^{(i)} - E_0^{(i)} \quad (14)$$

(3) 令  $s = \Delta_{i=1, h(i) > 0}^n h(i)$ ,  $n$  为向量  $C$  包含的分量数目, 则分量  $C_i$  的偏好  $w_i$  按如下方式取值

$$w_i = \begin{cases} h(i)/s, & h(i) > 0 \\ 0, & h(i) \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

## 4 服务选择算法

基于式(5)的满意度函数, 在讨论了评分模型和用户偏好的获取方法后, 给出 ASSABQ 算法的伪代码描述如下:

### 算法 1

输入: 用户申请 User\_Apply, 用户评价 User\_Eval, 服务状态向量 Svr\_

Stat

输出:可用服务号 Svr\_ID,用户偏好 New\_Ur\_Pref

```

1: if the user is applying a service User_Apply > 0 then
2:   searching the user's preference Ur_Pref in user database
3:   if Ur_Pref == Null then
4:     Ur_Pref ← Init_Ur_Pref // with n rating elements Init_Ur_Pref =
       [1/n 1/n]
5:   end if
6:   Nor_Svr_Stat ← get the basic service rates of Svr_Stat
7:   QoE_Value ← Ur_Preff * Nor_Svr_Stat
8:   Svr_ID ← ID of the service with max QoE_Value. // If there are more
       than one service has the max QoE_Value, the service with lower Svr_
       ID will be selected.
9: end if
10: if User_Eval > 0 then
11:   New_Ur_Pref ← following the steps in chapter 3
12:   refresh the user preference in the database
13: end if
    
```

## 5 实验分析与验证

### 5.1 实验准备

实验场景为一种同时存在 WiFi 和 3G 网络的接入环境,包括 100 个模拟用户和 5 个可用服务.实验采用三层评分模型,由图 1 的模型保留二层的可用性、功能性及其子评分项构成.第三层评分项基准评分标准参考文献[7,14,15]给出如表 1 所示的标准.每一个模拟用户预置五种对应的偏好值,基于式(5)向下取整给出对各服务的总评分.

实验采用随机服务选择算法、FCE\_RS 算法与 ASSABQ 进行对比分析,以满意度作为实验的评价指标.满意度定义为用户评分大于给定阈值 Sa 的(即满意的)次数占所有评分次数的比例.

用于对比的服务选择选择算法原理如下:

(1)随机服务选择:当用户提出请求时,随机选择一个可用服务给用户.

(2)FCE\_RS:基于表 1 获得基准评分,采用基于

AHP 算法的原理进行用户偏好分析,基于该偏好对服务进行评分,选择得分最高的服务提供给用户.

表 1 用户评分标准

| 评分因素  | 度量值      | 满意度评分 |         |          |           |      |
|-------|----------|-------|---------|----------|-----------|------|
|       |          | 5     | 4       | 3        | 2         | 1    |
| 网络带宽  | Mbps     | ≥20   | [8,20)  | [2,8)    | [1,2)     | <1   |
| 网络延迟  | ms       | <10   | [10,50) | [50,100) | [100,500) | ≥500 |
| 通信路径  | 可用路径     | ≥5    | 4       | 3        | 2         | 1    |
| 安全性   | 安全策略数    | >9    | [6,9)   | [4,6)    | [1,3)     | 0    |
| 数据完整性 | RAID 阵列数 | ≥5    | 4       | 3        | 2         | 1    |

### 5.2 有效性实验

实验通过对比 Sa 取不同值时用户的满意度,验证算法的有效性.由于 δ 对满意度影响不大,这里取固定值 0.图 3 为 Sa 分别取 3、4 和 5 时的用户满意度.从试验结果可以看出,ASSABQ 算法对随机选择算法的优势尤为明显,对 FCE\_RS 算法则最高提升约 10%,从而证明了算法的有效性.随着 Sa 的增大,同一时间学习的样本减少,则满意度趋于稳定的时间随之增加,也符合理论分析的结果.

### 5.3 算法性能分析

FCE\_RS 算法和 ASSABQ 算法的复杂度均取决于用户偏好获取算法的复杂度.对 n 个评分项,FCE\_RS 的用户偏好获取算法需要计算一个 n × n 的矩阵,因此其算法复杂度为 O(n<sup>2</sup>).基于第 3 节给出的偏好获取算法,ASSABQ 算法获取用户偏好需要执行 T(4n) 次计算,算法复杂度为 O(n).图 4 为评分项从 3 个增加到 9 个时两种算法的运算时间.可以看出,FCE\_RS 算法运算时间增速明显高于 ASSABQ 算法.图中 FCE\_RS 算法运算时间增长曲线拟合函数为 y = (0.35x<sup>2</sup> - 1.3x + 27.8) × 10<sup>-5</sup>,ASSABQ 算法拟合函数为 y = (0.8605x + 6.611) × 10<sup>-5</sup>,与理论分析结论一致.

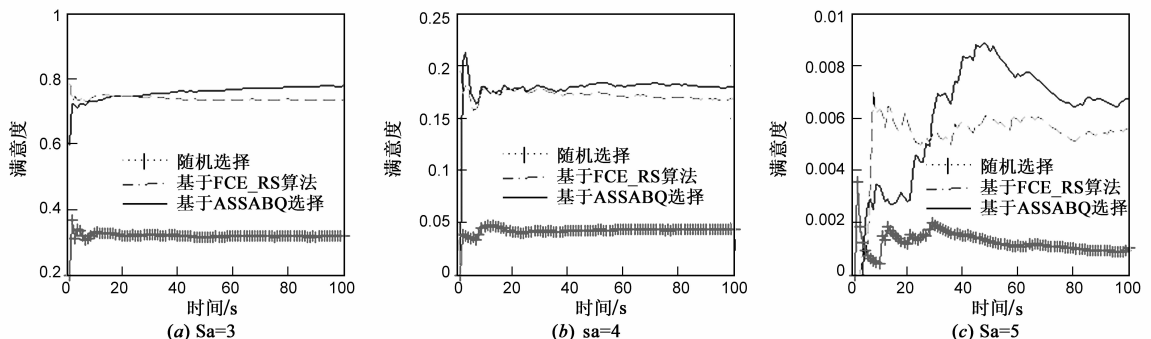


图 3 Sa取不同值时用户满意度

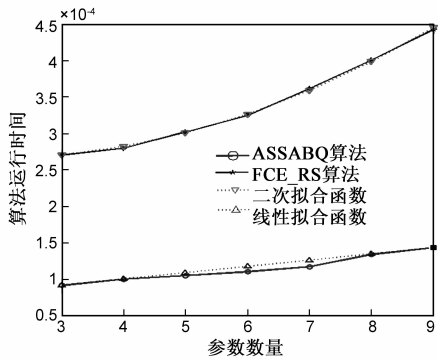
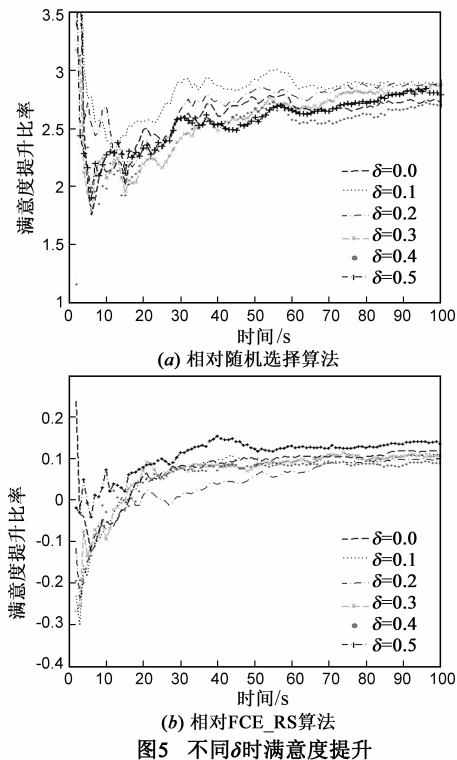


图4 ASSABQ算法与FCE\_RS算法运算时间对比

### 5.4 $\delta$ 参数分析

$\delta$  参数主要影响用于学习的样本数量,进而影响满意度趋于稳定的速度,而对满意度没有明显的影响.实验选取了从 0 开始按 0.1 递增到 0.5 的 6 个值,分别对比 ASSABQ 算法相对其他两种算法的满意度的提升情况.

图 5 为  $\delta$  分别取 0 到 0.6 时满意度随时间的变化情况.可以看出,在经过初始阶段(时刻 10 以前)的学习后,不同  $\delta$  取值下的满意度较随机选择算法和 FCE\_RS 的满意度提高值分别稳定在 260% 和 10% 附近,可见其对满意度的影响较小.而满意度提升比率的稳定时间则随着  $\delta$  的增大从 50 开始逐渐增加到 90,符合理论分析结果.因此在实际的应用中,可以根据样本的特征和数量适当的  $\delta$ ,在算法效率和稳定速度上做出平衡.

图5 不同 $\delta$ 时满意度提升

## 6 结论

本文通过建立可伸缩的层次化评分模型并基于该模型推导了一种用户偏好获取方法,进而提出一种基于 QoE 量化评估的服务推送选择算法,最后通过实验证明了该算法在满意度提升方面优于 FCE\_RS 算法,且算法复杂度和对人机交互的依赖程度上都得到了明显的改进.基于该方法可以为用户推送更加符合用户需求的应用服务,从而有效提高了用户体验.且算法复杂度仅为  $O(n)$ ,可应用到海量用户偏好挖掘的场合,因此具有广阔的应用前景.

本文通过基于用户历史平均评分获取偏好信息,这种方法简单、高效,且有利于排除无效数据的干扰,但代价需要更长的时间发现用户的偏好变化.如何优化算法从而实现对用户偏好变化的快速发现将是后续工作的重点.同时,随着用户和服务的不断增长,现有方法需要基于单一用户逐一进行处理,将消耗大量的运算资源.针对大量数据处理时如何将用户个人偏好与群体偏好相结合,从而为服务选择提供更好的决策支持也是下一步的重要工作.

### 参考文献

- [1] Do TMT, Gatica-Perez D. By their apps you shall understand them: Mining large-scale patterns of mobile phone usage[A]. In: Proc. Of the 9th Int'l Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia[C]. New York: ACM Press, 2010. 1 - 27.
- [2] 周宁, 谢俊元. 基于定性多用户偏好的 Web 服务选择[J]. 电子学报, 2011, 39(4): 729 - 735.  
Zhou Ning, Xie Jun-yua. Select web services based on qualitative multi-users preferences [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 729 - 735. (in Chinese)
- [3] Chiu PH, Kao GYM, Lo CC. Personalized blog content recommender system for mobile phone users[J]. Int'l Journal of Human-Computer Studies, 2010, 68(8): 496 - 507.
- [4] Jain Ramesh. Quality of experience [J]. IEEE Multimedia, 2004, (1 - 3): 95 - 96.
- [5] 黄菁, 王文东. 一种可量化用户 QoE 的业务实施技术方案 [J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(4): 106 - 109.  
Huang Jing, Wang Wen-dong. A service implementation scenario measuring users' QoE [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(4): 106 - 109. (in Chinese)
- [6] Robert R. How to quantify the user experience [J/OL]. <http://www.sitepoint.com/article/quantify-user-experience/>. 2009.
- [7] 熊润群, 罗军舟, 宋爱波, 等. 云计算环境下 QoS 偏好感知的副本选择策略 [J]. 通信学报, 2011, 32(7): 93 - 102.  
Xiong Run-qun, Luo Jun-zhou, Song Ai-bo, et al. QoS prefer-

- ence-aware replica selection strategy in cloud computing[J]. Journal on Communications, 2011, 32(7): 93 – 102. (in Chinese)
- [8] Viedmaherrera Enrique, Chiclana Francisco, Herrera Francisco et al. Group decision-making model with incomplete fuzzy preference relations based on additive consistency[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 2007: 176 – 189.
- [9] M Shamim Hossain, Abdulmotaleb El Saddik. QoS requirement in the multimedia transcoding service selection process[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(6): 1498 – 1506.
- [10] 郭辉, 徐浩军, 刘凌. 基于区间数的预警机作战效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(5): 1007 – 1010.  
Guo Hui, Xu Hao-jun, Liu Ling. Measurement of combat effectiveness of early-warning aircraft based on interval number[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(5): 1007 – 1010. (in Chinese)
- [11] Wu Xiaona Li Bixin Li Chao. A personalized trustworthy service selection method[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2013, 29(1): 16 – 21.
- [12] Long Xu, Yi Li. A network selection scheme based on TOPSIS in heterogeneous network environment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2014, 21(1): 43 – 48.
- [13] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 科学出版社 2003. 206.  
Yue Chao-yuan. Decision Theory and Methodology[M]. Science Press, 2003. 206. (in Chinese)
- [14] 闫斌, 周小佳, 王厚军, 等. 基于虚拟网络的无线传感器网络高可靠性路由[J]. 软件学报. 2009, 20(6): 1951 – 1600.  
Yan Bin, Zhou Xiao-jia, Wang Hou-jun, et al. High reliability routing for wireless sensor networks based virtual grid[J]. Journal of Software, 2009, 20(6): 1951 – 1600. (in Chinese)
- [15] Meddeb Aref. Internet QoS: pieces of the puzzle[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, (1): 86 – 94.

#### 作者简介



**李春林(通信作者)** 男, 1984年4月出生  
于四川省资阳市, 现为中国电子科技集团公司第  
三十研究所博士研究生, 研究方向为通信系统、  
认知网络。

E-mail: li.chl@foxmail.com



**廖丹** 男, 1980年7月出生  
于重庆市, 现为电子科技大学副教授, 工学博士, 研究方向为  
下一代互联网, 网络优化设计。

E-mail: liaodan@uestc.edu.cn