

## 最小最大剩余服务时间的异构网络选择算法

杜白, 李红艳, 龙彦

(西安电子科技大学 综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 针对异构网络环境中的接入网选择问题, 使用李雅普诺夫优化理论对网络进行建模, 并提出了使不同接入网络的剩余服务时间差异最小的选择算法。该算法在保证网络稳定的基础上, 在长时间尺度内降低了网络的阻塞率。仿真表明, 该算法可以提高网络的利用率, 降低用户被拒绝的概率。

**关键词:** 异构网络; 网络选择; 剩余服务时间; 网络稳定性; 李雅普诺夫

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

## Network selection algorithm in heterogeneous wireless networks to minimize the maximum residual service time

DU Bai, LI Hong-yan, LONG Yan

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Due to the problem of how to select the most suitable access network for users at any time anywhere in heterogeneous wireless networks(HWN), a distributed algorithm to minimize the difference of residual service time between different access networks was proposed. The algorithm use the Lyapunov optimization to model the network and guarantee the stability of the network. Simulation results show that the proposed algorithm can decrease the rejection ratio and achieve a shorter queue length in access networks.

**Key words:** heterogeneous wireless networks; network selection; residual service time; stability of network; Lyapunov

### 1 引言

随着各种无线接入技术的发展, 现在的用户处在一种异构的无线通信环境之中。因此, 近年来提出了一个重要的概念。最佳网络接入(always best connected)<sup>[1]</sup>指在任意的时刻和地点, 给用户选择最合适的接入网, 使用户获得高质量的服务。最佳网络选择包含多部分的内容, 比如网络发现、网络选择和移动性管理与切换等。其中网络选择是一个关

键性问题, 对整个网络的能力有重要影响。因此, 本文主要研究网络选择的问题。

在数学上, 效应理论、博弈论、多目标优化和模糊逻辑是在网络选择问题中常用的建模工具<sup>[2]</sup>。在这些理论中, 博弈论很适用来均衡网络中用户之间、用户和网络之间、不同接入网之间的冲突。非合作博弈作为一种比较简单的博弈形式, 自然被广泛的使用<sup>[3,4]</sup>。Niyato 和 Hossain 使用进化博弈论来设计网络选择算法, 其中, 不同区域的用户分成

收稿日期: 2015-02-10; 修回日期: 2015-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91338115,61231008); 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX03005-004, 2011ZX03004-003, 2013ZX03004007-003, 2011ZX03005-003); 陕西省13115科技创新工程基金资助项目(2010ZDKG-26); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320404); 国家重点实验室基金资助项目(ISN1002005, ISN090305); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT0852)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China(91338115, 61231008); The National Important Science Technology Specific Project(2011ZX03005-004, 2011ZX03004-003, 2013ZX03004007-003, 2011ZX03005-003); The 13115 Science and Technology Immolation Project of Shiaanxi Province(2010ZDKG-26); The National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB320404); The State Key Laboratory Foundation(ISN1002005, ISN090305); The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(IRT0852)

不同的族群，同族群中的用户相互合作，不同族群之间则相互竞争<sup>[5]</sup>。文献[6]使用拥塞博弈来描述用户间的竞争，终端用户最终选择一个接入网使它的接入代价最小。文献[7]使用 Stackelberg 博弈来分析在认知无线电环境中，定价对最终网络选择结果的影响。接入网有多种不同的参数，比如带宽、时延、覆盖范围、价格等。不同接入网的各个参数都有很大差异，而且不同用户或同用户不同的业务对各个参数的要求也都不同。甚至这些参数之间还会相互矛盾，比如用户希望价格低但是却渴望获得更多带宽。因此怎么衡量不同参数之间的权重十分关键。层次分析法(AHP)、模糊逻辑和多目标优化就是在网络选择中常用的处理参数的数学方法<sup>[8-11]</sup>。

上述工作仅考虑了网络选择的瞬时问题，即在用户到达的当前时刻，如何选择网络，使当前时刻在整个网络的性能最优。由于只优化网络的瞬时性能，没有考虑当前选择结果对未来用户到达的影响，因此，从长时间尺度上来看，这种瞬时网络选择算法可能导致后续的用户切换及未来到达用户无法接入，从而无法实现网络性能的长时最优。比如，在图 1 的例子中，有 2 个重叠覆盖的接入网  $N_1$  和  $N_2$ 。在  $t_1$  时刻，用户 A 到达  $N_1$  和  $N_2$  的重叠覆盖区域，此时， $N_1$  中有 2 个老用户， $N_2$  中有 3 个。由图 1 可以看出，在  $t_1$  时刻  $N_1$  能够为用户 A 提供更多的带宽。如果不考虑后续用户的情况，用户 A 将会选择  $N_1$ 。然而，当  $t_2$  时刻有用户 B 到达仅有  $N_1$  的覆盖区域时，由于用户 A 占用了  $N_1$  的带宽资源，导致  $t_2$  时刻没有足够的带宽剩余给用户 B，因此导致用户 B 被拒绝接入。相反，如果在  $t_1$  时刻进行网络选择时，能够考虑剩余服务时间这一长时特性，则由于网络  $N_2$  中老用户 1 和老用户 2 能够较快地被服务完，网络  $N_2$  将更快地空余出更多的网络资源，因此在  $t_1$  时刻应将用户 A 分配给网络  $N_2$ 。这种情况下，当后续用户 B 到达时，仍能够被网络  $N_1$  服务。

根据上述例子可知，在网络选择算法中考虑剩余服务时间的影响，将能够有效地刻画和优化网络的长时性能。

本文的主要贡献如下。

1) 针对异构环境下的网络选择问题，提出基于剩余服务时间的选择方法。剩余服务时间能够刻画网络的长时特性，实现网络的长时性能优化。

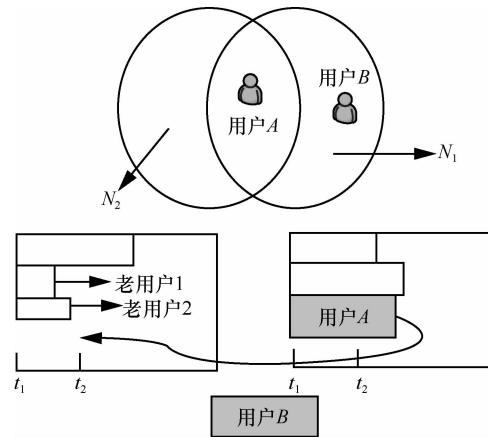


图 1 当前策略对后续用户的影响

2) 根据李雅普诺夫理论，提出长时网络选择问题的分布式求解 RST 算法。该算法保证了网络的长时稳定，且在无中心控制节点的情况下，各用户分布式进行最优的网络选择。

## 2 系统建模与 RST 算法

考虑如图 2 所示的异构网络场景，其中包含了蜂窝网  $N_1$  和无线局域网  $N_2$  和  $N_3$ 。

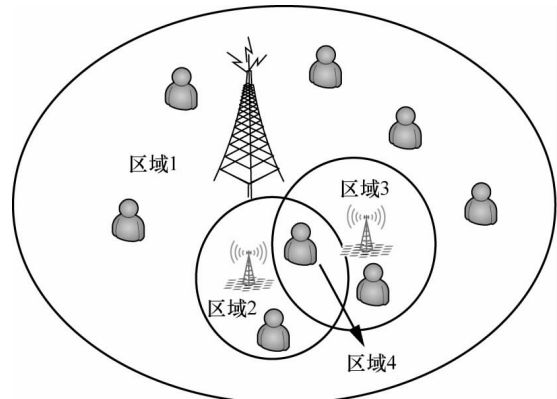


图 2 系统模型

根据 3 个接入网覆盖情况的不同，图 2 被分为 4 个区域。其中，区域 1 只被  $N_1$  覆盖，区域 2 和区域 3 被蜂窝网和一个无线局域网覆盖，区域 4 则被所有 3 个接入网覆盖。 $AN_k$  表示区域  $k$  中各接入网的集合。比如  $AN_4 = \{N_1, N_2, N_3\}$ 。

假设时间被分为长度相等的时隙。 $A_k(t)$  表示区域  $k$  在时隙  $t$  的业务到达率，且各区域业务到达率的均值表示为

$$\lambda_k \triangleq E\{A_k(t)\}, i=1,2,3,4$$

用户  $i$  用  $u_i$  表示。假设知道用户需要传输的数据量  $D_i$ ，并且假设到达过程是一个平稳遍历的，那

么数据到达率为

$$\lambda_j = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_i ar_{ij} D_i$$

其中,  $ar_{ij} = 1$  表示用户  $i$  在区域  $j$  中, 否则  $ar_{ij} = 0$ 。

对于新到达的用户  $i$ , 如为其选择接入网  $j$ , 则记  $sel_{ij} = 1$ , 否则  $sel_{ij} = 0$ 。在网络  $N_j$  中, 用户  $i$  传输的总数据量  $D_i$  已知, 则可计算得出在  $t$  时刻, 用户  $i$  剩余的待传输数据量  $Dl_i(t)$ 。因此,  $t$  时刻, 接入网  $N_j$  中所有用户的待传输数据总量为  $\sum_i sel_{ij} Dl_i(t)$ 。假设接入网  $N_j$  将其所有带宽分配给这些用户传输数据, 所得到的传输速率为  $R_j$ , 则  $t$  时刻, 网络  $N_j$  的总剩余服务时间为

$$Tl_j(t) \triangleq \frac{\sum_i sel_{ij} Dl_i(t)}{R_j}$$

剩余服务时间的更新公式为

$$Tl_j(t+1) = \max(Tl_j(t) - T_d(t), 0) + \frac{AN_j(t)}{R_j}$$

上式右边包含两部分。第一部分表示随时间流逝, 剩余服务时间减少。 $T_d(t)$  就是流逝的时间, 因为本文假设网络带宽全部分配出去, 所以  $T_d(t) = 1$ 。因为剩余服务时间必须大于等于 0, 所以这里第一部分使用了  $\max(Tl_j(t) - T_d(t), 0)$ 。第二部分表示网络  $N_j$  中, 在时隙  $t$  内新到达的用户所产生的数据服务时间, 其中,  $AN_j(t) = \sum_{\text{在 } t \text{ 时刻达到}} sel_{ij} D_i$ 。 $AN_j(t)$  的时间平均值为

$$\lambda N_j = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t AN_j(\tau)$$

为了方便, 本文中  $Tl(t) = (Tl_1(t), Tl_2(t), Tl_3(t))$ 。

根据上述定义可知, 剩余服务时间这一网络参数同时表征了接入网的负载情况以及对未来新到达用户的影响情况, 因此, 在网络选择算法中, 通过减小各接入网剩余服务时间的差异, 能够有效地均衡各接入网的业务负载。

在每个时隙中, 定义  $T(t) = \max_j (Tl_j(t))$ , 网络的选择就转化成为下面的优化问题

$$\begin{aligned} \min \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{i=0}^{t-1} T(i) \\ \text{s.t. } \lambda_j \leq R_j \quad j=1,2,3 \end{aligned} \quad (1)$$

可以看出  $T(i)$  是选择结果  $sel_{ij}$  的函数。因此可以通过控制用户的接入选择对其进行优化控制。其中限制条件是网络稳定的充要条件, 在第 3 节将会具体讨论这个限制条件。可以看出, 优化问题 (见式 (1)) 相当于在每个时隙统计各个接入网中最大的剩余服务时间, 然后是最小化其时间平均值, 所以起名为最小最大剩余服务时间。

### 3 RST 算法及算法性能分析

在本节中, 将给出求解长时优化模型 (见式 (1)) 的分布式求解算法以及该算法的性能分析。

#### 1) RST(residual service time)算法

① 对于在时隙  $t$  到达区域  $k$  的新到达用户  $i$ , 得到集合  $AN_k$ 。

② 对所有的  $AN_k \in N_j$ , 计算  $\frac{D_i}{R_j} Tl_j(t)$  和

$$T_j^*(i) = \max \{Tl_1(t), \dots, Tl_j(t) + \frac{D_i}{R_j}, Tl_{j+1}(t), \dots\}$$

③ 对于用户  $i$ , 选择使  $(\frac{D_i}{R_j} Tl_j(t) + V T_j^*(i))$

最小的  $N_j$  接入。

#### 2) RST 算法性能分析

##### ① 分布式特性

可以看出, RST 算法只需要  $Tl_j$  和  $R_j$ , 每个新到用户就可以决定自己接入哪个网络, 而不需要和其他新到用户进行交流。而  $Tl_j$  和  $R_j$  可以通过接入网广播得到, 所以 RST 算法是分布式的。其中, 参数  $V$  表示剩余服务时间的权重, 在优化中用来平衡网络稳定性和最小化最大剩余服务时间。

##### ② 最优性及稳定性分析

在这一节, 将通过李雅普诺夫优化理论<sup>[12]</sup> (Lyapunov optimization theorem) 对 RTS 算法进行最优性及稳定性分析。

首先, 给出几个李雅普诺夫优化理论中的基本概念及定义。

二次李雅普诺夫函数(quadratic Lyapunov function): 对于  $Tl(t) = (Tl_1(t), Tl_2(t), Tl_3(t))$ , 其二次李雅普诺夫函数定义为

$$L(Tl(t)) = \frac{1}{2} \sum_1^3 Tl_i(t)^2$$

则一次李雅普诺夫偏差(one-slot conditional

Lyapunov drift)  $\Delta(Tl(t))$  定义为

$$\Delta(Tl(t)) = E\{L(Tl(t+1)) - L(Tl(t)) | Tl(t)\}$$

稳定: 如果  $Tl(t)$  是有界的, 那么  $Tl(t)$  是稳定的。如果  $Tl(t)$  是一个随机过程, 且更新公式为  $Tl(t+1) = \max[Tl(t) - b(t), 0] + a(t)$ , 其中  $a(t)$  和  $b(t)$  是平稳的随机过程, 那么有  $Tl(t)$  是稳定的当且仅当  $a^{av} \leq b^{av}$ , 其中,  $a^{av} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} a(\tau)$  and  $b^{av} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} b(\tau)$ 。

通过稳定性的定义可以看出优化问题 (见式(1)) 中的限制条件部分保证了网络的稳定。

稳定域: 如果存在一种网络选择算法, 能够使网络在某个到达过程  $A(t)$  下稳定, 那么就说  $A(t)$  可以被稳定地服务。所有可能的  $A(t)$  集合用  $\Lambda$  表示, 那么  $\Lambda$  就是网络的稳定域。

现在要引入一个重要的定理。

**定理 1** 李雅普诺夫优化 (Lyapunov optimization): 如果有常数  $B \geq 0, V \geq 0, \varepsilon \geq 0$ ,  $y$  和它的最优值  $y^*$ , 在所有时隙  $\tau = 0, 1, 2, \dots$  和所有队列  $Q(t)$  的可能性下, 满足下面不等式

$$\Delta(Q(t)) + VE\{y(\tau) | Q(t)\} \leq B + Vy^* - \varepsilon \sum_{i=1}^n |Q_i(\tau)| \quad (2)$$

那么, 所有的队列  $Q_i(t)$  是稳定的。如果  $V > 0$  且  $\varepsilon > 0$ , 则有下面结论

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} E\{y(\tau)\} \leq y^* + \frac{B}{V} \quad (3)$$

可以看出, 当选择足够大的  $V$ ,  $y$  的均值就会和优化目标  $y^*$  足够接近。

现在开始证明 RST 算法可以解优化问题 (见式(1)), 对比式(1)和式(2), 可以发现其中队列  $Q_i(t)$  就是定义的  $Tl(t)$ , 因此想证明 RST 算法是优化问题 (见式(1)) 的解就需要证明 RST 算法满足以下不等式

$$\Delta(Tl(t)) + VE\{T(\tau) | Tl(t)\} \leq B + VT(\tau)^* - \varepsilon \sum_i |Tl_i(\tau)| \quad (4)$$

现在开始证明, 因为剩余服务时间的更新公式为

$$Tl_j(t+1) = \max(Tl_j(t) - T_d(t), 0) + \frac{AN_j(t)}{R_j} \quad (5)$$

又因为当  $Q \geq 0, b \geq 0, A \geq 0$  时,  $(\max[Q - b, 0] + A)^2 \leq Q^2 + A^2 + b^2 + 2Q(A - b)$

可以计算出

$$\begin{aligned} L(Tl(t+1)) - L(Tl(t)) &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 [Tl_j(t+1)^2 - Tl_j(t)^2] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \left[ \left( \max(Tl_j(t) - T_d(t), 0) + \frac{AN_j(t)}{R_j} \right)^2 - Tl_j(t)^2 \right] \\ &\leq \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \left[ \left( \frac{AN_j(t)}{R_j} \right)^2 + T_d^2(t) + 2Tl_j(t) \left( \frac{AN_j(t)}{R_j} - T_d(t) \right) \right] \end{aligned}$$

由于  $AN_j(t)$ 、 $R_j$ 、 $T_d(t)$  均有界, 则上式可以进一步简化为

$$L(Tl(t+1)) - L(Tl(t)) \leq B + \sum_{j=1}^3 Tl_j(t) \left( \frac{AN_j(t)}{R_j} - T_d(t) \right) \quad (6)$$

其中,  $B$  是一个常数, 且满足

$$\frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \left[ \left( \frac{AN_j(t)}{R_j} \right)^2 + T_d^2(t) \right] \leq B$$

根据式(6)可得

$$\begin{aligned} \Delta(Tl(t)) + VE\{T(\tau) | Tl(t)\} \\ \leq E \left\{ \left( B + \sum_{j=1}^3 Tl_j(t) \left( \frac{AN_j(t)}{R_j} - T_d(t) \right) \right) | Tl(t) \right\} + \\ VE\{T^*(sel_{ij}) | Tl(t)\} \quad (7) \end{aligned}$$

这里希望使不等式左边最小化。在右边部分只有  $E \left\{ \sum_{j=1}^3 Tl_j(t) \left( \frac{AN_j(t)}{R_j} \right) | Tl(t) \right\}$ 、 $VE\{T^*(sel_{ij}) | Tl(t)\}$  和用户选择接入网的结果有关系, 所以只需要选择一个接入算法来最小化  $\sum_{j=1}^3 Tl_j(t) \left( \frac{AN_j(t)}{R_j} \right) + T^*(sel_{ij}(t))$ 。

本文假设用户的到达是泊松过程, 所以当时隙选择够小的时候, 在一个时隙中, 只会会有一个用户到达。那么如果当前时隙  $t$  到达的用户为用户  $i$ , 如果它选择了接入网  $k$ , 可以算出

$$\sum_{j=1}^3 Tl_j(t) \left( \frac{AN_j(t)}{R_j} \right) + T^*(sel_{ij}(t)) = Tl_k(t) \frac{D_i(t)}{R_k} + T^*(sel_{ij}(t))$$

这里之所以简化, 是因为只有一个用户到达,

对于接入网  $k$  有  $AN_k(t) = D_i(t)$ , 而对于其他接入网, 因为没有新用户到达, 所以有  $AN_j(t) = 0 (j \neq k)$ 。

在每一个时隙  $t$ , 选择一个接入网  $i$ , 使

$$Tl_k(t) \frac{D_i(t)}{R_k} + T(sel_{ij}(t)) \text{ 最小。}$$

RST 算法的步骤③, 正是选择令

$$Tl_k(t) \frac{D_i(t)}{R_k} + T(sel_{ij}(t)) \text{ 最小的接入网。}$$

根据之前的分析, 可以得到 RST 算法最小化了

$$E \left\{ \left[ \sum_{j=1}^3 Tl_j(t) \left( \frac{AN_j(t)}{R_j} \right) + T(sel_{ij}(t)) \right] | Tl_j(t) \right\}。$$

Neely 已经在文献[12]中证明了如果用户到达率  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  在稳定域中, 那么肯定存在一种选择算法可以使网络稳定并且是令优化目标  $y$  达到  $y^*$ 。这里, 用  $sel_{ij}(t)$  来标记这个特殊的算法, 用  $\dot{AN}_j(t)$  来表示在这个算法下新的到达。结合式(7), 可以得到

$$\begin{aligned} & \Delta(Tl(t)) + VE \{ T(\tau) | Tl(t) \} \\ & \leq E \left\{ \left( B + \sum_{j=1}^3 T_j(t) \left( \frac{\dot{AN}_j(t)}{R_j} - T_d(t) \right) | T_j(t) \right) + \right. \\ & VE \{ T(sel_{ij}(t)) | Tl(t) \} \\ & = B - \varepsilon \sum_{j=1}^3 T_j(t) + V y^* \end{aligned} \quad (8)$$

上式满足定理 1, 所以证明了 RST 算法可以解优化问题 (见式(1)), 并且在整个稳定域内, 都可以使网络稳定。

### 4 仿真结果

本节通过仿真, 研究了权重  $V$  的取值, 并对比 RST 算法和其他 2 种算法的性能。一个是简单地把用户分到具有最大剩余带宽的网络中, 另一个是 Niyato 和 Hossain 在文献[3]中提出的使用博弈论的算法, 在仿真图中分别用 Band 和 Game 代表。使用图 1 作为仿真的场景, 蜂窝网和无线局域网的带宽取常用 10 Mbit/s 和 54 Mbit/s。用户到达是泊松过程。

在 RST 和 Band 算法中, 按照用户的最小带宽需求来分配带宽。比如, 用户  $u_1$ 、 $u_2$  和  $u_3$  都接入了  $N_1$ 。它们需要的最小带宽分别为  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 。 $N_1$  的

总带宽为  $B$ 。那么给每个用户分的带宽为

$$b_{i1} = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^3 b_i} B$$

其中,  $b_{i1}$  为网络 1 给用户  $i$  分配的带宽。

网络中用户分为 2 种, 一种是业务大小是 2~20 Mbit/s 的均匀分布, 比如浏览网页、聊天等; 另外一些用户的业务大小则是 50~200 Mbit/s 的均匀分布, 仿真中让这部分占 30%。所有用户需要的最小带宽为 0.5~5 Mbit/s 的均匀分布。如果新用户到达时, 所有网络都不能给它提供满足其最小带宽需求的资源, 那么这个用户就被网络拒绝。

图 3 和图 4 显示了  $V$  分别取值 1、3 和 5 的仿真结果。其中, 用户到达率从 0 增长到 1。这里的用户到达率是归一化的, 表示单位时隙内用户的平均到达数。最大队长是所有接入网中最大队列长度的时间平均值。仿真结果显示, 当  $V$  取值变大时, 最大队长变短, 而用户的拒绝概率也降低。这是因为  $V$  表示在优化时, 队长部分的权重。同时, 最大队长的降低, 表示业务在各个网络中分配得更加均匀, 因此, 用户被拒绝的概率也就降低了。从式(3)也可以看出,  $V$  的增加可以使最终结果更加接近最优的情况。同时仿真表明, 随着  $V$  的增加, 最大队长以及拒绝概率的改善都变得越来越小,  $V=5$  网络的性能已经足够好, 后面的仿真中, 都取  $V=5$ 。

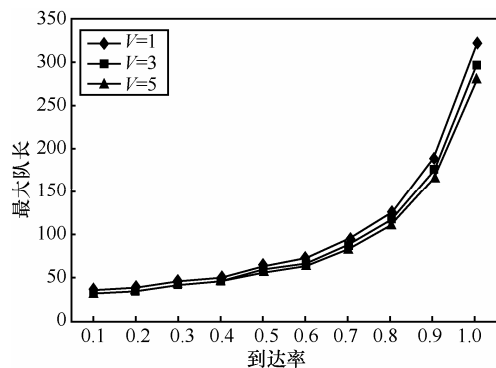


图 3 不同  $V$  取值的最大队列长度

图 5 比较了 RST、Game 和 Band 算法下网络中排队长度的不同。可以看出 RST 算法可以最小化网络的最大队长, 这也是本文的优化目标, 所以这说明 RST 算法发挥了作用。

从图 6 可以看出, 在这 3 种算法下, RST 算法的用户拒绝概率也是最低的。这是因为通过剩余服务时间体现当前行为对后续用户的影响, 所以在长

时间尺度上, 把用户业务更加均匀地分配到了不同的接入网络之中。

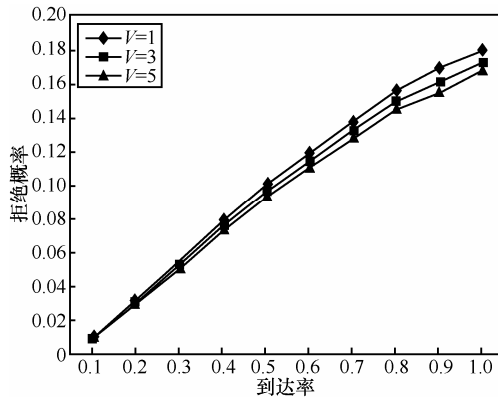


图 4 不同  $V$  取值的拒绝概率

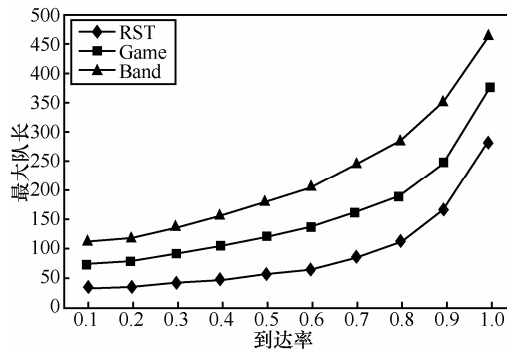


图 5 不同算法下的最大队列长度

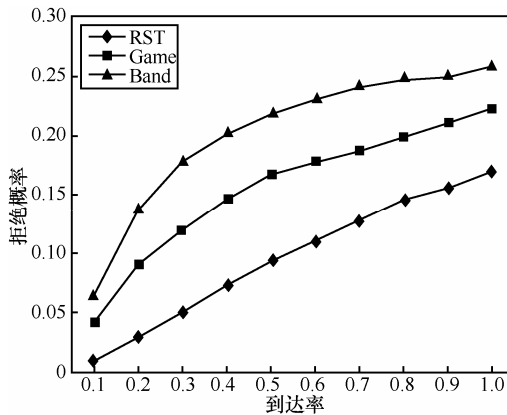


图 6 不同算法下的拒绝概率

## 5 结束语

本文提出了分布式的 RST 算法, 在长时间尺度上给每个用户选择最合适的接入网, 并证明了 RST 算法可以在整个稳定域中使网络稳定。RST 算法引入了剩余服务时间的概念, 用它反映老用户对后续用户的影响, 从而达到比只考虑带宽更好的网络性能。仿真结果表明 RST 算法可以使接入网的平均队长更短, 降低用户的阻塞概率。

## 参考文献:

- [1] GUSTAFSSON E, JONSSON A, RESEARCH E. Always best connected[J]. IEEE Wireless Commun, 2003, 10(1): 49-55.
- [2] WANG L S, KUO G S. Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks a tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 15: 271-292.
- [3] NIYATO D, HOSSAIN E. A noncooperative game-theoretic framework for radio resource management in 4G heterogeneous wireless access networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(3): 332-345.
- [4] CESANA M, GATTI N, MALANCHINI I. Game theoretic analysis of wireless access network selection: models, inefficiency bounds, and algorithm[A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering)[C]. 2008.6.
- [5] NIYATO D, HOSSAIN E. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: an evolutionary game approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4):2008-2017.
- [6] MALANCHINI I, CESANA M, GATTI N. Network selection and resource allocation games for wireless access networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(12): 2427-2440.
- [7] ELIAS J, MARTIGNON F, ALTMAN E. Joint pricing and cognitive radio network selection: A game theoretical approach[A]. The 10th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)[C]. 2012.49-53.
- [8] LAHBY M, CHERKAOU L, ADIB A. Network selection algorithm based on Diff-AHP and TOPSIS in heterogeneous wireless networks[A]. 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)[C]. 2012.485-490.
- [9] KANG S H, KIM J H. QoS-aware network selection for seamless multimedia service[A]. 2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)[C]. 2012. 544-547.
- [10] NGUYEN-VUONG Q T, AGOULMINE N, CHERKAOU E H, et al. Multicriteria optimization of access selection to improve the quality of experience in heterogeneous wireless access networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(4): 1785-1800.
- [11] HOU J, O'BRIEN D. Vertical handover-decision-making algorithm using fuzzy logic for the integrated radio-and-OW system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(1): 176-185.
- [12] NEELY M J. Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems[J]. Synthesis Lectures on Communication Networks, 2010, 3(1): 1-211.

## 作者简介:



杜白 (1986-), 男, 河南郑州人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为无线网络、网络选择等。

李红艳 (1966-), 女, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线网络、认知无线电、异构网络融合、自组织网络等。

龙彦 (1988-), 女, 贵州遵义人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为无线网络、认知无线电等。