

信息不可见混合式接入网络纳什均衡问题的研究^①

刘 俊^② 余 靖^③ 齐佳兴 金顺福

(燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

摘 要 为了合理评价混合式接入网络的系统性能,基于信息不可见情形,在离散时域下建立服务状态可变的马尔可夫排队系统。运用矩阵几何解方法求解系统的稳态分布,给出移动用户平均响应时间的表达式;根据“收益-支出”结构,分别从个人和系统的角度建立预期收益函数。进行数值实验和仿真实验,揭示纳什均衡和系统最优的进队策略之间的内在关系,以此为基础,给出社会最优收费方案,以实现混合式接入网络系统收益的最大化。

关键词 混合式接入网络;马尔可夫排队系统;服务状态可变;矩阵几何解;信息不可见;纳什均衡

0 引 言

随着移动电子设备的普及,移动用户希望在任意时间和任意地点访问互联网,因此对混合式接入网络的需求越来越大^[1]。如何科学、高效和均衡地使用混合式接入网络,成为相关领域的研究热点。

针对 cellular 网络、Wi-Fi 网络和混合式接入网络的传输过程,相关学者研究了网络资源管理算法。文献[2]为消除微蜂窝型基站传输功率对网络服务质量消极的影响,给出一种启发式搜索算法(power search algorithm,PSA),提高了 cellular 网络的传输效率,并降低了微蜂窝型基站的传输功耗。文献[3]考虑 Wi-Fi 网络致密化情况,设计了一种具有灵活、可伸缩和易扩展特点的高效管理密集 Wi-Fi 接入网络的控制架构(control architecture for efficient management of dense Wi-Fi access networks, CAD-WAN-A),提升了 Wi-Fi 网络的传输性能。文献[4]针对可用合法频谱稀缺致使网络资源分配出现混乱的问题,研究一种基于软件定义蜂窝网络(software defined cellular networks,SDCN)的分布式资源分配

算法,增大了混合式接入网络的资源使用率。文献[5]通过研究多覆盖 Wi-Fi 接入点组成的异构网络中的下行 Wi-Fi 模型,提出一种面向混合式接入网络的分布式资源分配算法,增加了流量传输效率。以上算法专注于网络传输过程的研究,但是缺少对用户接入行为的研究。

部分学者将排队博弈理论和网络传输理论相结合,从系统性能出发,研究了移动用户的行为策略。文献[6]利用排队模型和博弈论研究了认知无线网络(cognitive radio network,CRN)的决策问题,将移动用户之间的决策行为视为一种非合作博弈,并根据 CRN 的平均等待时间,给出 CRN 中用户访问的最优行为及纳什均衡策略,实现了 CRN 用户之间的资源合理分配。文献[7]考虑移动终端用户之间的资源竞争现象,构建一种非合作博弈排队模型,证明了纳什均衡的存在性,给出用户最优策略,提升了移动终端无线通信的性能。文献[8]考虑无线传感网络中的资源竞争问题,给出一种基于博弈思想的多任务调度策略,不仅满足了移动用户多样化的需求,而且提升了节点和链路资源的利用率。文献[9]针

① 国家自然科学基金(61872311, 61973261)和河北省自然科学基金(F2017203141)资助项目。

② 男,1994 年生,硕士生;研究方向:计算机网络性能分析;E-mail: ml8503350230@163.com

③ 通信作者,E-mail: xyj@ysu.edu.cn

(收稿日期:2019-12-01)

对可开闭异构网络,提出基于纳什均衡的离散粒子群算法,以用户和基站为博弈参与方建立博弈模型,给出非合作博弈条件下的纳什均衡策略和社会最优策略。以上文献从排队论和博弈论的角度,研究了移动用户的接入行为,但是缺少对混合式接入网络传输过程的研究,尤其是对社会最优策略的研究。

本文基于信息不可见情况,考虑数据传输与网络连接状态的特点,在离散时域下,建立具有 2 种工作状态单服务台的马尔可夫排队系统。采用矩阵几何解方法获得系统的稳态分布,给出移动用户平均响应时间的封闭解。按照混合式接入网络工作原理进行仿真实验,给出系统性能指标统计结果。权衡移动用户回报与损耗,构造预期收益函数,分别从个人与社会角度给出移动用户的纳什均衡进入策略与社会最优进入策略。改进灰狼智能寻优算法,以最大化系统收益为目标,获得社会最优到达率和纳什均衡到达率。针对不同系统参数,面向移动用户给出合理收费方案。

1 系统模型与模型分析

1.1 系统模型

移动用户交替使用的 cellular 网络和 Wi-Fi 网络可以看作是一个混合式接入网络。在混合式接入网络系统中,cellular 网络和 Wi-Fi 网络被视为 2 种不同的服务状态。假设移动用户发送访问请求后不会反悔,发出的数据包可能会在 cellular 网络下传输完成,也可能在 Wi-Fi 网络下传输完成。考虑 cellular 网络和 Wi-Fi 网络交替出现,建立服务台状态可变的系统排队模型。

假设用户数据包的到达服从参数为 Λ 的二项分布,Wi-Fi 连接的持续时间 x_w 服从参数为 p_w 的几何分布,Wi-Fi 连接的间断时间 x_c 服从参数为 p_c 的几何分布。假设用户发出的数据包在 Wi-Fi 网络持续连接状态下所需的传输时间 S_w 服从参数为 μ_w 的几何分布,在 cellular 网络持续连接状态下所需的传输时间 S_c 服从参数为 μ_c 的几何分布。实际应用中,Wi-Fi 网络下的传输速度往往比 cellular 网络下的传输速度快,规定 $\mu_w > \mu_c$ 。

1.2 转移概率矩阵

将 t 时刻系统中数据包的数量表示为 $L(t) = i$, $i \in \{0, 1, 2, \dots\}$, 称为系统水平,将 t 时刻接入网络的状态表示为 $J(t) = j$, $j \in \{0, 1\}$, 其中 $j = 0$ 表示 cellular 网络, $j = 1$ 表示 Wi-Fi 网络。 $\{L(t), J(t), t \geq 0\}$ 构成了一个二维离散时间马尔可夫链,其状态空间表示为

$$\Omega = \{(i, j) \mid i \in \{0, 1, 2, \dots\}, j \in \{0, 1\}\} \tag{1}$$

假设 $\{L(t), J(t), t \geq 0\}$ 的一步状态转移概率矩阵为 $\mathbf{P}$,系统由水平 $i(i = 0, 1, 2, \dots)$ 至水平 $k(k = 0, 1, 2, \dots)$ 的一步转移概率子阵为 $\mathbf{P}_{i,k}$ 。接下来分析子阵 $\mathbf{P}_{i,k}$ 的 5 种表现形式。

(1) 当 $i = 0, k = 0$ 时,表明系统未发生用户数据包的到达。一步转移概率子阵 $\mathbf{P}_{0,0}$ 为

$$\mathbf{P}_{0,0} = \bar{\lambda} \begin{bmatrix} \bar{p}_c & p_c \\ p_w & \bar{p}_w \end{bmatrix} \tag{2}$$

(2) 当 $i = 0, k = 1$ 时,表明系统到达了一个用户数据包。一步转移概率子阵 $\mathbf{P}_{0,1}$ 为

$$\mathbf{P}_{0,1} = \lambda \begin{bmatrix} \bar{p}_c & p_c \\ p_w & \bar{p}_w \end{bmatrix} \tag{3}$$

(3) 当 $k = i - 1(i \geq 1)$ 时,表明系统未发生用户数据包的到达,且有一个用户数据包离去。一步转移概率子阵 $\mathbf{P}_{i,i-1}$ 为

$$\mathbf{P}_{i,i-1} = \bar{\lambda} \begin{bmatrix} \mu_c & \\ & \mu_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_c & p_c \\ p_w & \bar{p}_w \end{bmatrix} \tag{4}$$

(4) 当 $k = i(i \geq 1)$ 时,表明系统未发生用户数据包的到达和离去,或者系统发生一个用户数据包的到达和一个用户数据包的离去。一步转移概率子阵 $\mathbf{P}_{i,i}$ 为

$$\mathbf{P}_{i,i} = \left(\bar{\lambda} \begin{bmatrix} \bar{\mu}_c & \\ & \bar{\mu}_w \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} \mu_c & \\ & \mu_w \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \bar{p}_c & p_c \\ p_w & \bar{p}_w \end{bmatrix} \tag{5}$$

(5) 当 $k = i + 1(i \geq 1)$ 时,表明系统发生一个用户数据包的到达,且没有用户数据包离去。一步转移概率子阵 $\mathbf{P}_{i,i+1}$ 为

$$\mathbf{P}_{i,i+1} = \lambda \begin{bmatrix} \bar{\mu}_c \bar{p}_c & \bar{\mu}_c p_c \\ \bar{\mu}_w p_w & \bar{\mu}_w \bar{p}_w \end{bmatrix} \tag{6}$$

由以上分析可知,系统的状态转移仅发生于相邻水平且状态转移从水平 $i \geq 1$ 开始重复。令 $A_0 = P_{0,0}, C_0 = P_{0,1}, A = P_{i,i}, B = P_{i,i-1}, C = P_{i,i+1}$, 给出一步转移概率矩阵 P 的分块三对角形式的系统如下式所示。

$$P = \begin{bmatrix} A_0 & C_0 & & \\ B & A & C & \\ & B & A & C \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.3 稳态概率分布

令 $\pi_{i,j}$ 表示稳态下混合式接入网络水平为 i 、网络连接状态为 j 的概率分布,则有:

$$\pi_{i,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{L(t) = i, J(t) = j\} \quad i = 0, 1, 2, \dots, j = 0, 1 \quad (8)$$

令 π_i 表示稳态下系统水平为 i 的概率向量,则有:

$$\pi_i = \{\pi_{i,0}, \pi_{i,1}\} \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

二维马尔可夫链 $\{L(t), J(t), t \geq 0\}$ 的稳态分布 Π 为

$$\Pi = \{\pi_0, \pi_1, \pi_2, \dots\} \quad (10)$$

由一步转移概率矩阵 P 的结构可知 $\{L(t), J(t), t \geq 0\}$ 是一个拟生灭过程^[10] (quasi birth and death process, QBD), 通过高斯-赛德迭代法^[11] 与矩阵几何解^[12] 求解其稳态分布。

构造二次矩阵等式:

$$R^2 B + R(A - I) + C = 0 \quad (11)$$

其中,设 R 为率阵。式(11)具有非负解且最小非负解小于 1,即谱半径^[13] (spectral radius, SR) 小于 1, QBD $\{L(t), J(t), t \geq 0\}$ 正常返具有稳态分布。

构造方程组如下:

$$\begin{cases} (\pi_0, \pi_1) \begin{bmatrix} A_0 & C_0 \\ B & A + RB \end{bmatrix} = (\pi_0, \pi_1) \\ \pi_0 e + \pi_1 (I - R)^{-1} e = 1 \end{cases} \quad (12)$$

其中, I 为单位矩阵, e 为全 1 列向量。

使用高斯-赛德方法求解式(12)可得 π_0 和 π_1 , 基于矩阵几何解的形式,进一步得到:

$$\pi_k = \pi_1 R^{k-1} \quad k \geq 1 \quad (13)$$

2 系统响应性能

假设移动用户发送的每个数据包因传输完成所获得的回报为 M , 因逗留在系统中(包括进队等待和接受服务的时间)的单位时间损耗为 N 。假设 $\min\{\mu_c, \mu_w\} \geq \frac{N}{M}$, 以确保混合式接入网络可以正常工作。

数据包的平均逗留时间 D 定义为数据包从进入系统开始到服务完成为止的平均时间长度。在潜在到达率 Λ 一定的情形下,数据包平均逗留时间与数据包进入系统的概率 q 有关,表示为

$$D(q) = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} i(\pi_{i+1,0} + \pi_{i+1,1})}{q\Lambda} \quad (14)$$

其中, $\pi_{i+1,0}, \pi_{i+1,1}$ 为有效到达率 $\lambda = q\Lambda$ 条件下的系统稳态分布。

以 $p_c = 0.4, p_w = 0.6$ 为例,揭示了数据包的进队概率 q 对平均逗留时间 $D(q)$ 的影响。理论分析实验在 Matlab R2016a 的环境下实现,仿真统计实验在 MyEclipse 2017 CI 环境下使用 Java 语言实现。计算机操作系统为 Windows 10 企业版,处理器为 Intel Core i5-6 500 3.20 GHz,内存为 4 GB。图 1 揭示了不同 cellular 网络服务率 μ_c 和 Wi-Fi 网络服务率 μ_w 下,平均逗留时间 $D(q)$ 随数据包的进队概率 q 的变化趋势。

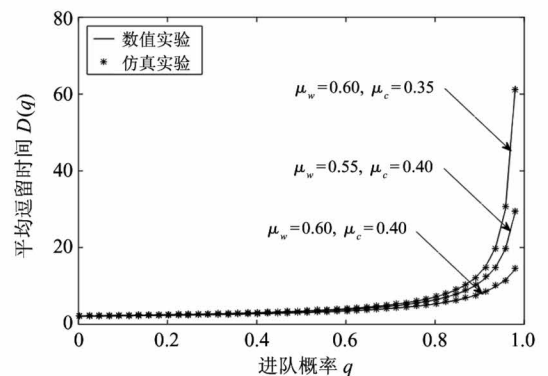


图 1 数据包平均逗留时间的变化趋势

从图 1 中可以看出,当数据包的进队概率 q 较低(如 $q < 0.6$)时,平均逗留时间 $D(q)$ 随进队概

率 q 的变化趋势平缓,而且 Wi-Fi 网络服务率 μ_w 和 cellular 网络服务率 μ_c 对平均逗留时间 $D(q)$ 的影响很小。当数据包的进队概率 q 适中(如 $0.6 < q < 0.8$)时,平均逗留时间 $D(q)$ 随进队概率 q 的变大呈现逐步增长的态势,而且随着 Wi-Fi 网络服务率 μ_w 和 cellular 网络服务率 μ_c 的变化,平均逗留时间 $D(q)$ 的 3 条曲线开始出现分散,只是分散幅度不大。当数据包的进队概率 q 较高(如 $q > 0.8$)时,平均逗留时间 $D(q)$ 随进队概率 q 的变化趋势快速增长,且 Wi-Fi 网络服务率 μ_w 或 cellular 网络服务率 μ_c 越小,该趋势增长越强。

3 纳什均衡与社会最优

3.1 纳什均衡进队概率

一个数据包进入系统后的平均收益 $Y_p(q)$ 是回报 M 与逗留期间成本 $D(q)N$ 的差,则

$$Y_p(q) = M - D(q)N \tag{15}$$

标记到达混合式接入网络的一个数据包,根据该数据包收益情况讨论其均衡进队概率 q_e ^[14]。

(1) 如果 $M < D(0)N$, 则数据包进入系统后,预期收益是负值。因此进队概率 $q_e = 0$ 是唯一的均衡策略。

(2) 如果 $M > D(1)N$, 则数据包进入系统后,预期收益是正值。因此进队概率 $q_e = 1$ 是唯一的均衡策略。

(3) 当 $M - D(0)N < M < M - D(1)N$ 时,若 $q = 1$, 数据包进入系统的预期收益为负,因此, $q = 1$ 不是均衡策略;若 $q = 0$, 预期收益是正值,但是数据包不进入系统,因此, $q = 0$ 也不是均衡策略。此时,存在唯一的均衡策略 q_e 满足:

$$M = D(q_e)N \tag{16}$$

以 $p_c = 0.4, p_w = 0.6$ 为例,图 2 揭示了不同 cellular 网络服务率 μ_c 和 Wi-Fi 网络服务率 μ_w 下,数据包的收益 $Y_p(q)$ 随进队概率 q 的变化趋势。

从图 2 中可以看出,数据包的收益 $Y_p(q)$ 随进队概率 q 的增加呈现单调递减的趋势。当进队概率 q 较低(如 $q < 0.6$)时,数据包的收益 $Y_p(q)$ 随进队概率 q 的增加呈现缓慢下降的趋势,

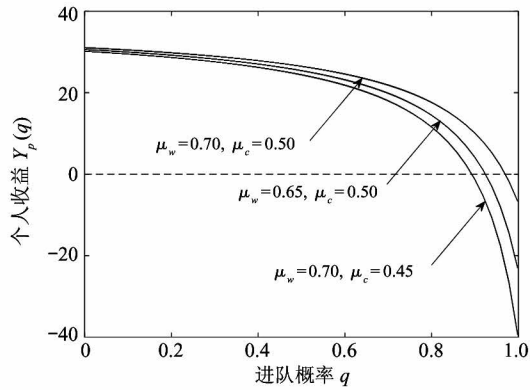


图 2 数据包个人收益的变化趋势

且个人收益 $Y_p(q)$ 的 3 条曲线之间的分散距离较小。当进队概率 q 较高(如 $q > 0.6$)时,数据包的收益 $Y_p(q)$ 随进队概率 q 的增加呈现快速下降的趋势,而且个人收益 $Y_p(q)$ 的 3 条曲线之间的分散距离逐渐加大,个人收益 $Y_p(q)$ 的 3 条曲线到达 0 点(纳什均衡点)的快慢也不相同。此时,若固定 Wi-Fi 网络服务率 μ_w , 增大 cellular 网络服务率 μ_c , 则个人收益 $Y_p(q)$ 随进队概率 q 的增加延后到达 0 点(纳什均衡点)。若固定 cellular 网络服务率 μ_c , 增大 Wi-Fi 网络服务率 μ_w , 则个人收益 $Y_p(q)$ 随进队概率 q 的增加延后到达 0 点(纳什均衡点)。此时,延后的程度较增大 cellular 网络服务率 μ_c 延后的程度小一些(免费使用的 Wi-Fi 网络,对比收费使用的 cellular 网络,减少了使用费用的支出,使得个人收益 $Y_p(q)$ 的下降趋势得以减缓)。因此,在相同条件下,适当增大 Wi-Fi 网络服务率 μ_w 或 cellular 网络服务率 μ_c , 可以有效提升数据包的收益 $Y_p(q)$ 及混合式接入网络的性能体验。

3.2 社会最优进队概率

混合式接入网络的社会收益 Y_s 定义为单位时间内进入系统的全部数据包在完成服务后所获收益的总和。混合式接入网络的社会收益 Y_s 为

$$Y_s(q) = q\lambda(M - ND(q)) \tag{17}$$

为了使社会收益 Y_s 最大,混合式接入网络的社会最优进队概率 q^* 为

$$q^* = \arg \max_{0 \leq q \leq 1} \{Y_s(q^*)\} \tag{18}$$

以 $p_c = 0.4, p_w = 0.6$ 为例,图 3 揭示了不同 cellular 网络服务率 μ_c 和 Wi-Fi 网络服务率 μ_w 下,混

合式接入网络的社会收益 $Y_s(q)$ 随进队概率 q 的变化趋势。

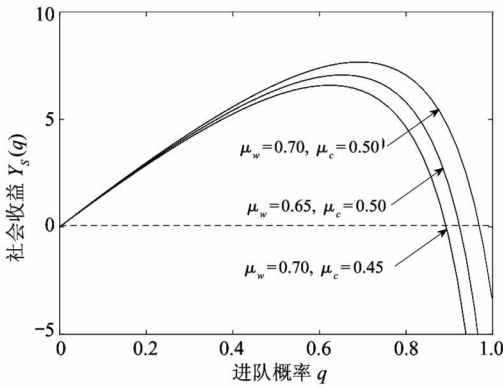


图3 混合式接入网络社会收益的变化趋势

由图3可知,混合式接入网络的社会收益 $Y_s(q)$ 随进队概率 q 从0开始快速增长,到达峰值后又呈现大幅下降的趋势。当进队概率 q 略低时,社会收益 $Y_s(q)$ 随进队概率 q 的加大呈现单调上升趋势,而且社会收益 $Y_s(q)$ 的3条曲线在前期分散程度不明显,在后期分散程度逐渐加大。当进队概率 q 略高时,社会收益 $Y_s(q)$ 随进队概率 q 的加大呈现单调下降趋势,并最终达到0点。在社会最优进队概率 q^* 下,会有最高的社会收益 $Y_s(q^*)$,也就是社会最优策略下的收益。

4 智能寻优算法和收费方案

4.1 智能寻优算法的数值结果

为了获得纳什均衡进队概率和社会最优进队概率,引入仿生群智能优化算法。灰狼智能优化算法^[15]是模拟自然界中灰狼种群抓捕猎物过程构造的随机群体算法。灰狼智能优化算法的求解精确度与灰狼群体位置的初始值、预判猎物位置的收敛性质及灰狼群体更新位置的方法密切相关。本文在原有灰狼智能优化算法的基础上,增加了混沌初始化,使得灰狼群体的初始位置分布更加均匀,从而提高全局搜索的精确度;在原有的非线性收敛函数基础上,增加了收敛性较高的对数函数,以提升全局最优解的确定速度。该算法的主要步骤如下。

步骤1 设定初始迭代次数为 $t = 1$, 最大迭代

次数为 $t_{\max}$, 灰狼种群数量为 n , 搜索空间上界为 ub 、下界为 lb 。

步骤2 采用混沌 logistic 映射初始化第1次迭代 ($t = 1$) 灰狼种群位置 $X_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。

$$X_1(t) = rand$$

%rand 表示(0, 1)之间的随机生成数%

for $i = 2:n$

$$X_i(t) = uX_{i-1}(t)(1 - X_{i-1}(t))$$

%u 为混沌因子,设定 $u = 3.5\%$

endfor

步骤3 计算灰狼种群的适应度,依次找出最好的3个灰狼 α 、 β 、 γ , 位置分别为 $X_\alpha(t)$ 、 $X_\beta(t)$ 、 $X_\gamma(t)$ 。

%在纳什均衡下,适应度绝对值最小的位置为最佳位置%

%在社会最优下,适应度最大的位置为最佳位置%

步骤4 计算影响灰狼移动的协同系数。

$$A(t) = \log_2(3 - 2^{\frac{t}{t_{\max}}})^2(2rand - 1)$$

$$C(t) = 2rand$$

步骤5 更新灰狼种群的位置。

for $i = 1:n$

$$Y_1 = X_\alpha(t) - A(t) \mid C(t)X_\alpha(t) - X_i(t) \mid$$

$$Y_2 = X_\beta(t) - A(t) \mid C(t)X_\beta(t) - X_i(t) \mid$$

$$Y_3 = X_\gamma(t) - A(t) \mid C(t)X_\gamma(t) - X_i(t) \mid$$

$$X_i(t+1) = \frac{1}{3}(Y_1 + Y_2 + Y_3)$$

if $X_i(t+1) < lb \parallel X_i(t+1) > ub$

$$X_i(t+1) = X_i(t)$$

endif

endfor

步骤6 判断迭代过程是否结束。

if $t < t_{\max}$

$$t = t + 1$$

转到步骤3

else

输出灰狼 α 的位置 $X_\alpha(t_{\max})$ 。

%在纳什均衡条件下, $X_\alpha(t_{\max})$ 作为纳什均衡进队概率 $q_e\%$

% 在社会最优条件下, $X_{\alpha}(t_{\max})$ 作为社会最优进队概率 q^* %

endif

设定 $t_{\max} = 50$ 、 $n = 12$ 、 $ub = 1$ 、 $lb = 0$, 利用改进的灰狼智能优化算法, 给出不同 cellular 网络服务率 μ_c 和 Wi-Fi 网络服务率 μ_w 下的纳什均衡进队概率 q_e 和社会最优进队概率 q^* , 如表 1 所示。

表 1 纳什均衡与社会最优进队概率

cellular 服务率 μ_c	Wi-Fi 服务率 μ_w	纳什均衡 进队概率 q_e	社会最优 进队概率 q^*
0.5000	0.7000	0.9702	0.6928
0.5000	0.6500	0.9234	0.6539
0.4500	0.7000	0.8961	0.6247

4.2 社会最优进队概率

从表 1 中, 可以看出纳什均衡进队概率 q_e 普遍要比社会最优进队概率 q^* 大。为确保社会收益的最大化, 需调整纳什均衡进队概率 q_e , 使其与社会最优进队概率 q^* 保持一致。因此, 需要征收额外的接入费用支付给网络服务商。假设接入费用为 f , 数据包进入系统后的平均收益变更为

$$Y_p(q) = M - D(q)N - f \tag{19}$$

令 $Y_p(q) = 0$, 可得网络用户的接入费用为

$$f = M - D(q)N \tag{20}$$

将表 1 中社会最优进队概率 q^* 带入式 (20), 得到不同 cellular 网络服务率 μ_c 和 Wi-Fi 网络服务率 μ_w 下的接入费用 f , 如表 2 所示。

表 2 接入费用

cellular 服务率 μ_c	Wi-Fi 服务率 μ_w	接入费用 f
0.5000	0.7000	7.6732
0.5000	0.6500	7.0700
0.4500	0.7000	6.5908

5 结 论

在互联网接入系统中, cellular 网络一般收费使用, Wi-Fi 网络则对特定用户免费使用。移动用户通常根据实际情况, 交替使用 cellular 网络和 Wi-Fi

网络, 即混合式接入网络访问互联网。基于信息不可见的情形, 研究了混合式接入网络的纳什均衡策略和社会最优策略。结合系统中数据包数量和接入网络状态建立马尔可夫链, 利用矩阵几何解方法给出了移动用户的平均响应时间表达式。通过建立收益函数, 从移动用户个体出发, 给出了纳什均衡进队策略, 综合考虑混合式接入网络的服务提供者与移动用户全体, 给出了社会最优进队策略。针对不同 cellular 网络服务率和 Wi-Fi 网络服务率进行系统实验, 揭示出纳什均衡进队概率高于社会最优进队概率。改进灰狼智能寻优算法, 给出了纳什均衡进队概率和社会最优进队概率数值结果。面向数据包制定收费方案, 实现了纳什均衡进队概率和社会最优进队概率的统一。本文的研究为混合式接入网络的控制与管理提供了理论依据, 同时也为排队理论和博弈理论在混合式接入网络中的应用提供了有效途径。

参考文献

[1] 刘欢, 范亚芹, 梁乃生. 基于网络信息的混合推荐算法研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2018, 36(3): 120-125

[2] Kundu A, Majumder S, Misra I S, et al. Distributed heuristic adaptive power control algorithms in femto cellular networks for improved performance[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2018, 29(5):1-19

[3] Gallo P, Kosek S K, Szott S, et al. CADWAN: a control architecture for dense Wi-Fi access networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(1):194-201

[4] Xu J, Wu S, Xu L, et al. Green-oriented user-satisfaction aware Wi-Fi offloading in HetNets[J]. *IET Communications*, 2018, 12(5):501-508

[5] Pan C, Yin C, Beaulieu N C, et al. Distributed resource allocation in SDCN-based heterogeneous networks utilizing licensed and unlicensed bands[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(2):711-721

[6] Safwat M A, Hesham E. Strategic behavior for spectrum access in hybrid overlay/underlay cognitive radio networks[J]. *IET Communications*, 2018, 12(9):1108-1115

[7] Wu H, Wolter K. Stochastic analysis of delayed mobile

offloading in heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, 17(2):461-474

- [8] 王汝言, 李宏娟, 吴大鹏. 基于 Stackelberg 博弈的虚拟化无线传感网络资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(2):128-135
- [9] 章辉, 吕沅宏. 基于能量消耗和负载均衡的异构网络基站开闭策略研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(3):80-85
- [10] 王秀双, 金顺福. 基于新型休眠机制的云任务调度策略的研究[J]. 高技术通讯, 2018, 28(11-12): 907-914
- [11] 陈亮, 孙德锋, 卓金全. 退化情形下高斯-赛德尔迭代法的几个问题[J]. 数值计算与计算机应用, 2019, 40

(2):98-110

- [12] 金顺福, 郝闪闪, 王宝帅. 融合双速率和工作休眠的虚拟机调度策略及参数优化[J]. 通信学报, 2017, 38(12):10-20
- [13] 陈媛媛, 王国平. 三圈图的无符号拉普拉斯谱半径[J]. 运筹学学报, 2019, 23(1):81-89
- [14] 李继红, 岳艳萍. 基于互补性服务的 Geom/Geom/1 排队顾客均衡策略研究[J]. 系统科学与数学, 2018, 38(5):605-612
- [15] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer[J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 69(3): 46-61

On the Nash equilibrium in hybrid access network based on unobservable scenario

Liu Jun, Yu Jing, Qi Jiaxing, Jin Shunfu

(School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

In the Internet access system, cellular network is generally without charge and Wi-Fi network is free for specific users. Mobile users often alternatively use cellular network and Wi-Fi network, namely hybrid access network, to access the Internet according to actual situation. In order to reasonably evaluate the system performance of the hybrid access network, a Markov queueing system with multiple server states is established in discrete-time domain based on unobservable scenario. By using matrix-geometric solution method to solve the steady-state distribution of the system model, the expression for the average response time of mobile users is given. According to a revenue-expenditure structure, the expected income functions are constructed from the view of individuals and system, respectively. Experiments with analysis and simulation are carried out to reveal the internal relationship between the Nash equilibrium and socially optimal queueing strategies. Furthermore, a charging policy is presented from the view point of the whole system, and the benefits of the hybrid access network is maximized.

Key words: hybrid access network, Markov queueing system, variable server states, matrix-geometric solution, unobservable scenario, Nash equilibrium