

利用用户移动提高 WiFi 业务分担能力的用户激励机制研究

蔡世杰^{*①②③} 肖立民^{②③} 王京^{②③} 周世东^{①③}

^①(清华大学电子工程系 北京 100084)

^②(清华大学信息技术研究院 北京 100084)

^③(清华大学信息科学与技术国家实验室 北京 100084)

摘要: WiFi 网络可以分担蜂窝网络的通信业务压力,缓解其拥塞状况。然而, WiFi 网络的业务分担只能在其覆盖范围内进行。由于用户具有移动性,如果通过提供一些奖励引导 WiFi 网络覆盖范围之外的用户延迟其在蜂窝网络中的业务、直至其进入 WiFi 覆盖区再接受服务, WiFi 网络的业务分担能力将得到显著提升。该文探讨了运营商通过激励机制鼓励用户延迟其蜂窝网络业务转而接入 WiFi 网络的过程,并将其建模为两阶段斯塔克博格(Stackelberg)博弈。在该博弈中,运营期望采取最优的奖励方案,能够兼顾蜂窝网络拥塞和付出的用户奖励。该文推导出了运营商的最优奖励方案。数值结果表明,所提激励机制可以有效降低包括蜂窝网络拥塞代价和奖励用户代价在内的运营商总代价。

关键词: 蜂窝网络; WiFi 覆盖; 业务分担; 用户移动; 激励机制

中图分类号: TN929.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5859(2015)10-2431-07

DOI: 10.11999/JEIT150285

Incentive Mechanism Design for WiFi Offloading with Users' Mobility

Cai Shi-jie^{①②③} Xiao Li-min^{②③} Wang Jing^{②③} Zhou Shi-dong^{①③}

^①(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^②(Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^③(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: WiFi network helps offload the traffic pressure in cellular networks and alleviate its traffic congestion. However, it can merely offload the traffic within its coverage. In view of the mobility of users, if the users beyond WiFi coverage are incentivized with certain rewards to postpone their present cellular network services, and wait till they enter WiFi coverage, the traffic offloading capacity of WiFi Network will be significantly enhanced. This paper discusses an incentive mechanism for the operator to encourage users to delay their cellular network services and switch to WiFi network, and formulates the problem as a two-stage Stackelberg game. In this game, an operator expects to adopt an optimum reward solution, giving considerations to the extent of cellular network congestion and the required reward for users. Optimal reward mechanisms for the operators are proposed. According to the research result, the proposed incentive mechanism can effectively reduce the total costs of operators including the cellular network congestion costs and the user reward costs.

Key words: Cellular network; WiFi coverage; Traffic offloading; Users' mobility; Incentive mechanism

1 引言

在蜂窝网络中,移动数据业务在快速增加,

Cisco 预测,数据业务从 2011 年至 2016 年将增长 18 倍^[1]。单靠容量有限的蜂窝网络,难以满足激增的业务需求,因此网络运营商正在考虑将蜂窝业务大规模地转移到 WiFi 网络。例如,韩国 SK 运营商计划在 2016 年转移约 65% 的移动业务到 WiFi 网络。由于 WiFi 网络只能分担其覆盖范围内的蜂窝用户业务,运营商尝试拓展 WiFi 覆盖范围,大量的 WiFi 接入点(AP)已经部署。在 WiFi 普及的地区,如香港,电讯盈科(PCCW)运营商已部署数十万 WiFi 接入点。美国 AT&T 公司和英国 Orange 公司也在其市场范围内部署了大量接入点^[2-4]。然而,实现 WiFi 网络的无缝覆盖需要相当高的部署成本,不具备现实可行性。

收稿日期: 2015-03-09; 改回日期: 2015-06-01; 网络出版: 2015-07-06

*通信作者: 蔡世杰 caishijie.2003@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61201192, 61321061), 国家 863 计划项目(2014AA01A703), 国家 973 计划项目(2012CB316002), 国家重大专项(2013ZX03001008-004), 清华大学与爱立信的横向合作和东南大学重点实验室基金(2012D02)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61201192, 61321061); The National 863 Program of China (2014AA01A703); The National 973 Program of China (2012CB316002); The National S&T Major Project (2013ZX03001008-004); The Operation Agreement Between THU and SEC; The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2012D02)

最近, 业界提出一种被称为延迟 WiFi 业务分担的机制, 可增强 WiFi 网络的业务分担能力^[5-8]。这一机制鼓励 WiFi 覆盖范围外的用户延迟一些可被延迟的业务(如电影下载、应用程序升级以及电子邮件更新), 直至进入 WiFi 覆盖区再重新接受网络服务。这一机制利用了用户的移动性, 使 WiFi 网络得以为其覆盖范围外的用户提供服务。文献[5]表明, 如果用户可容忍 30 min 的业务延时, WiFi 网络可以分担 80% 的蜂窝网络业务。该机制所带来的业务延时将不可避免地影响用户服务质量, 一些研究试图对此做出权衡^[6-8]。然而, 所有这些工作都假定用户总是会同意合作, 延迟其蜂窝网络业务。实际上, 用户往往不愿意合作, 即便其业务可以延迟。

为了解决这一问题, 本文考虑运营商通过激励机制鼓励用户延迟其在蜂窝网络中的业务, 转而接入 WiFi 网络, 以降低蜂窝网络拥塞。我们把蜂窝网络拥塞和付出的奖励视为运营商的代价, 运营商的目的在于使这两个代价之和达到最小化。运营商的最优奖励求解和激励效果评估即为本文的研究内容。

2 系统模型和问题建模

接下来, 我们考虑一个含有 WiFi 接入点的蜂窝网络, 如图 1 所示。WiFi 覆盖范围内的用户可以直接得到 WiFi 网络服务^[9,10]。我们关注的是 WiFi 覆盖范围之外的用户, 期望激励其接入 WiFi 网络(见图 1 中用户“ i ”的案例)。我们把这些 WiFi 覆盖范围之外的用户用集合 $M = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示。假定 WiFi 接入点符合密度为 λ 的均匀泊松点过程(HPPP), 每个 WiFi 接入点都可为与之距离小于 r_0 的用户提供服务。我们暂时不考虑 WiFi 接入点的容量限制。

本文把运营商和用户之间的相互作用建模为两阶段斯塔克博格(Stackelberg)博弈^[11,12]:

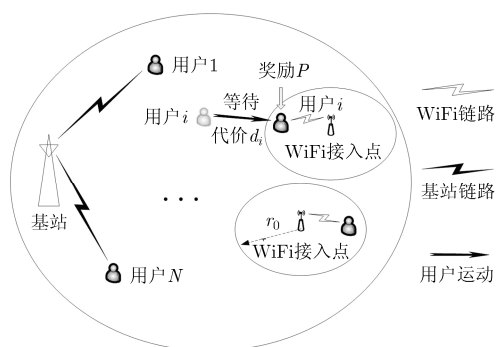


图 1 系统模型

在第 1 阶段, 运营商向当前蜂窝网络中的全部 N 个用户声明提供一致的奖励 P , 并且鼓励他们延迟当前的业务以获取 P 。奖励 P 可以是为用户订购的服务套餐方案提供的价格折扣或退款。

在第 2 阶段, 每位用户都决定合作与否, 这取决于奖励 P 的数额、蜂窝网络的拥塞程度及其对于 WiFi 连接等待代价的预估。

然后, 我们按照从第 2 阶段到第 1 阶段的顺序直观地解释该模型的意义及其合理性。

在第 2 阶段中, 获知运营商提出的奖励 P 后, 每一位用户都要做出决策, 留在当前蜂窝网络中, 还是停止当前业务直至转入 WiFi 覆盖区接受网络服务。注意到如果用户留在当前蜂窝网络中, 将会遭遇不同程度的蜂窝网络拥塞。网络拥塞程度与其他用户的决策结果有关, 所以每一个用户在决策时, 需要预测其他用户的决策。本文假设所有用户都是“最聪明的”, 在用户之间的博弈中能够从自身角度出发做出最优的决策。举一个典型用户为例, 他在做决策时, 由于知道其他用户都是“最聪明的”, 并且了解他们的决策代价(下文将分情况讨论这一点), 因而可以预测其他用户的决策, 并据此为自己做出最优决策。在其后的决策执行阶段, 其他用户的行动将符合该典型用户的预测结果, 因此, 我们可以得出, 该典型用户的决策确实是最优的。当所有用户均为自己做出最优决策时, 我们称用户之间达到了纳什均衡。每个用户将按照纳什均衡做出决策并予以执行。

在第 1 阶段, 由于运营商知道所有用户都是“最聪明的”, 并且了解他们的决策代价(下文也将分情况讨论这一点), 所以可以预测出在声明任意奖励 P 后用户达到的纳什均衡, 进而预测出自己的总代价(下文将加以定义)。这样, 运营商就可以选择一个可使总代价最小化的奖励 P 。在之后的决策执行阶段, 用户的行动将符合运营商的预测结果, 因此, 我们可以得出, 运营商的决策确实是最优的。

注意, 以上把整个模型分为两个阶段, 只是为了便于分析说明。在实际操作中, 运营商的决策是在一瞬间完成的, 之后立即声明决策得出的奖励 P ; 用户获知奖励 P 后, 相互之间的博弈决策也是在一瞬间完成的, 之后各个用户分别执行各自的决策。以上整个过程是由运营商发起的, 运营商通过向用户声明奖励启动博弈过程。

2.1 用户移动性与代价模型

在第 2 阶段, 获知运营商声明的奖励之后, 用户有两个选择: 继续使用蜂窝服务或者延迟该服务

直至移动至 WiFi 覆盖再接受 WiFi 服务。接下来，我们进行建模并比较用户在两种选择下的代价。

2.1.1 切换的用户 要获得奖励 P ，用户 $i \in M$ 必须承受等待代价 $d_i \geq 0$ ，这取决于其进入最近的 WiFi 接入点覆盖区域的等待时间。这一代价可以被视为其到达 WiFi 覆盖区边缘的运动距离。本文假定所有 N 个用户的等待代价 d_i 相互独立，并且服从相同的概率分布，均值为 μ ，累积分布函数 (CDF) 为 $F(\cdot)$ 。本文将所有用户的等待代价 d_i 表示为一个向量 $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]$ 。

对于 WiFi 覆盖范围之外的某一个用户 $i \in M$ ，其等待代价 $d_i \geq 0$ 的累积分布函数可以推导为^[13]

$$F(d_i) = 1 - \exp(-\lambda\pi(2r_0d_i + d_i^2)) \quad (1)$$

这表明用户 i 的期待等待代价随着接入点密度 λ 和半径 r_0 的增大而减少。

综合考虑奖励 P 和等待代价 d_i ，用户 i 接受延迟请求的代价为 $d_i - P$ ，其中 d_i 遵循式(1)中的分布。

2.1.2 留候的用户 留在蜂窝网络中的用户将不能获得奖励 P ，且会遭遇一定程度的蜂窝网络拥塞，这与用户转向 WiFi 服务的数量有关。我们以 $n \leq N$ 表示切换用户的数量。那么存在 $N - n$ 个留候用户。我们将蜂窝网络拥塞表达为 n 的函数， $G(n)$ ，并考虑文献[14~17]中的线性方程 $G(n) = (N - n) / B$ ，其中 B 为蜂窝网络容量。

通过选择切换或留候，用户 i 的代价为

$$C_i(n) = \begin{cases} d_i - P, & \text{切换} \\ G(n), & \text{留候} \end{cases} \quad (2)$$

通过比较式(2)中的两个代价项，用户 i 在 $d_i - P \leq G(n)$ 的情况下将会选择切换。值得一提的是这一决定也会受到其他用户的选择和数目 n 的影响。

2.2 运营商的代价模型

为了保证蜂窝业务的服务质量，运营商会努力减轻拥塞 $G(n)$ ，这对 $N - n$ 个留候用户有益。但是，作为这种激励机制的代价，运营商为 n 个切换用户每人提供奖励 P 。切换用户的数目 n 应随着 P 的增加而增加。综上，运营商的总代价为

$$C(P) = (N - n)G(n) + nP \quad (3)$$

在式(3)中，总拥塞代价(第 1 项)随着 P 的增加而减少，而总奖励代价(第 2 项)随着 P 的增加而增加。因此，运营商需要在决定 P 时做出最优权衡。接下来，我们推导完整信息、对称不完整信息以及非对称不完整信息 3 种情境下的最优激励机制，如表 1 所示。

表 1 不同的信息可获取性情境

情境	运营商一方	用户一方
完整信息(第 3 节)	全部信息	全部信息
对称不完整信息(第 4 节)	部分信息	部分信息
不对称不完整信息(第 5 节)	部分信息	全部信息

3 完整信息情境研究

首先考虑完整信息的情境，在这一情境下，运营商和用户了解每位用户 $i \in M$ 的等待成本 d_i 。如果运营商能够实时检查用户的 GPS 定位，并计算用户距离最近 WiFi 热点的距离，上述情境将会发生。运营商可以向所有用户广播该信息。与式(1)不同，在完整信息情境下，所有 d_i 均为确定值。不失一般性地，我们重新排列所有用户，使得 $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_N$ 。

接下来，我们通过逆向归纳分析斯塔克博格博弈(定义见第 2 节)。先从第 2 阶段开始，分析任意奖励 P 下用户的均衡决策，然后通过预测用户接下来的反应，分析第 1 阶段中运营商的奖励决策。通过这一包含两个阶段的分析可以得到整个博弈的均衡。

3.1 第 2 阶段的分析：用户的均衡决策

了解运营商公布的奖励 P 后，每个用户必须做出决定：延迟蜂窝业务以接受奖励 P ，或留候在蜂窝服务中。通过分析式(2)中用户 i 在两种情况下的代价函数以及用户之间的相互作用(以确定拥塞代价 $G(n)$)，我们得到所有用户同时博弈的结果。直观地说，WiFi 等待代价较小的用户更愿意延迟，并切换到 WiFi 网络。

命题 1 完整信息情境下的第 2 阶段：给定第 1 阶段运营商公布的任意奖励 P ，第 2 阶段将达到以下纳什均衡。

全部合作 如 $P \geq d_N - 1/B$ ，全部 N 个用户(包括等待成本 d_N 最大的用户 N)选择切换与合作(即 $n^* = N$)。

部分合作 当 $\max\{0, d_1 - N/B\} \leq P < d_N - 1/B$ 时，至少有一个但并非全部用户会选择切换(即 $1 \leq n^* < N$)。 d_{th} 表示将所有 N 个用户按照等待代价从小到大排序时序列号为 n^* 的等待代价， $n^* = \max\{n \in M \mid P - d_n + (N - n + 1)/B \geq 0\}$ 。满足 $d_i \leq d_{th}$ 的用户 i 选择切换，剩余的 $N - n^*$ 个用户选择留候。

无合作 如果 $0 \leq P < \max\{0, d_1 - N/B\}$ ，用户都不会选择切换(即 $n^* = 0$)。

直观地讲，随着奖励 P 的增加，更多的用户将选择延迟蜂窝业务以获取奖励。当 P 高(低)到一定

程度时,全部(没有任何)用户将会选择切换。特别是,当用户数量 N 大到一定程度,使得 $d_1 - N/B \leq 0$ 时,命题 1 中无用户合作的均衡不存在。这是由于即使运营商不为用户提供奖励,蜂窝网络中的严重拥塞也能够激励一部分用户转向 WiFi 网络。

3.2 第 1 阶段的分析: 运营商的最优奖励

在第 2 阶段的均衡中,切换用户的数量 n^* 取决于奖励 P 。因此,可以将其表示为 $n^*(P)$ 。通过预测第 2 阶段中用户的最佳决策与纳什均衡,运营商在第 1 阶段选择 P 来实现代价最小化,即

$$\min_{P \geq 0} C(P) = (N - n^*(P)) \cdot G(n^*(P)) + n^*(P) \cdot P \quad (4)$$

其中,采用线性方程 $G(n) = (N - n)/B$ 作为拥塞成本。由于切换用户数量 $n^*(P)$ 是 P 的不连续函数,问题式(4)既不是 P 的连续问题,也不是凸问题,难以分析求解。因此,我们将决策变量从 P 改为 n^* ,以使问题可分析求解。实际上,在问题式(4)中,优化 P 等同于优化 n^* 。篇幅所限,这里不再给出具体求解过程,直接给出结果如下。

即使运营商声明提供的奖励 $P = 0$ 时,也有可能存在 \underline{n} 个用户由于严重的蜂窝网络拥塞而选择切换。从命题 1 中,可以得出:

$$\underline{n} = \begin{cases} 0, & d_1 - N/B > 0 \\ \max \left\{ n \in M \mid d_n - (N - n + 1)/B \leq 0 \right\}, & \\ d_1 - N/B \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

给定切换用户数量 $n^*(P)$,运营商将声明提供能够得出该数量的最小奖励:

$$P(n^*) = \begin{cases} 0, & n^* = \underline{n} \\ d_n - (N - n^* + 1)/B, & n^* = \underline{n} + 1, \dots, N \end{cases} \quad (6)$$

运营商现在只需在 $N - \underline{n} + 1$ 个选择中得出最优响应人数 n^* ,即

$$\min_{n^* \in \{\underline{n}, \dots, N\}} \frac{(N - n^*)^2}{B} + n^* P(n^*) \quad (7)$$

其中,奖励函数 $P(n^*)$ 由式(6)给出。问题式(7)可以通过 $N - \underline{n} + 1$ 个点的 1 维穷举搜索轻易求解。

备注 1: 完整信息情境下的第 1 阶段 运营商将声明提供最优奖励 P^* ,最终成功鼓励 N 个用户中等待代价最小的 n^* 个用户延迟其蜂窝业务转而接入 WiFi 网络。其中, n^* 为问题式(7)的解,最优奖励 P^* 通过将 n^* 代入式(6)得出。

4 对称不完整信息情境研究

与完整信息情境不同,在对称不完整信息条件下,运营商和用户并不知道各个用户的等待代价。在用户并未频繁报告其所处地点或者查询 WiFi 接

入点热点,且运营商并未从用户处获得上述信息的情况下,会出现对称不完整信息的情况。运营商和用户均仅能通过历史数据了解各个用户等待代价 $d_i, i \in M$ 的公共累积概率函数 $F(\cdot)$ 。

4.1 第 2 阶段的分析: 用户的均衡决策

由于用户仅了解其等待代价 d_i 的累积概率函数 $F(\cdot)$,他们决策(切换与否)时会计算出相应代价的期望(即 $E_d[C_i(n)], i \in M$)。通过计算用户获知奖励 P 后相互博弈的结果,我们得到如下第 2 阶段结果:

命题 2 对称不完整信息情境下的第 2 阶段 给定第 1 阶段的任意奖励 P ,第 2 阶段的均衡如下:

全部合作 如果 $p \geq \mu - 1/B$,全部 N 个用户选择切换合作(即 $n^* = N$)。

部分合作 当 $\max\{0, \mu - N/B\} \leq P < \mu - 1/B$ 时, $n^* = \lfloor N - (p - \mu)B + 1 \rfloor$ 个用户会选择切换,同时其余的 $N - n^*$ 个用户选择留候。切换用户的数量 n^* 满足 $1 \leq n^* < N$ 。

无合作 如果 $0 \leq P < \max\{0, \mu - N/B\}$,将没有任何用户切换(即 $n^* = 0$)。

4.2 第 1 阶段的分析: 运营商的最优奖励

在第 1 阶段,运营商选择 P 以期其代价的期望达到最小化。这里的优化问题与第 3 节中的问题式(4)相似,但是这里的函数关系 $n^*(P)$ 是由命题 2 决定的。与第 3 节相似,为简化分析,我们将决定变量从 P 变为 n^* 。本案例中数目 n^* 的区间为 \underline{n} 至 N ,最低值 \underline{n} 可以通过式(8)得出:

$$\underline{n} = \begin{cases} 0, & \mu - N/B > 0 \\ \lfloor N - B\mu + 1 \rfloor, & \mu - N/B \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。我们可以搜索所有 n^* 种可能性,获得产生最小期望代价的最优奖励 P^* 。

定理 1 对称不完整信息情境下的第 1 阶段: 这一斯塔克博格博弈将获得如下均衡。

无奖励 如果 $(3N - \mu B + 1)/4 \leq \underline{n} + 1/2$, 已有足够的用户切换至 WiFi 网络,运营商不会声明给予任何奖励(即, $P^* = 0$)。在这种情况下,在第 2 阶段, $n^* = \underline{n}$ 个用户将选择切换。运营商的预期代价为 $E[C(P^*)] = (N - \underline{n})^2/B$ 。

有奖励 如果 $\underline{n} + 1/2 < (3N - \mu B + 1)/4$, 在第 1 阶段,运营商声明给予奖励 $P^* = \mu - (N - \text{round}((3N - \mu B + 1)/4) + 1)/B$ 。在第 2 阶段, $n^* = \text{round}((3N - \mu B + 1)/4)$ 个用户选择切换。运营商预期代价为 $E[C(P^*)] = (N - n^*)^2/B + n^* P^*$ 。 $\text{round}(x)$ 代表距离 x 最近的整数。

5 非对称不完整信息情境研究

在非对称不完整信息情境下,每位用户 $i \in M$

可准确获知自己的等待代价, 但该信息为私人信息, 不为运营商和其他用户所知。运营商和其他用户仅仅知道该用户的累积概率函数 $F(\cdot)$ 。如果用户使用定位服务得到自己距 WiFi 热点的距离, 且运营商并未从用户处获得这一信息, 就会出现上述情况。

5.1 第 2 阶段的分析: 用户的均衡决策

给定运营商在第 1 阶段声明提供的奖励 P , 在第 2 阶段会达到以下纳什均衡。

命题 3 非对称不完整信息情境下的第 2 阶段: 用户 $i \in M$ 会选择切换, 当且仅当其等待代价低于一个公共判决阈(即 $d_i \leq \gamma^*(P)$)。该判决阈 $\gamma^*(P)$ 与奖励 P 有关, 为式(9)的唯一解:

$$P - \gamma + \frac{N - (N-1)F(\gamma)}{B} = 0 \quad (9)$$

判决阈值 $\gamma^*(P)$ 满足 $P + 1/B \leq \gamma^*(P) < P + N/B$ 。

由于一些用户距 WiFi 覆盖区域非常近, 我们假定用户的最低可能等待代价为 0, 将累积概率函数 $F(\cdot)$ 中的最大可能等待代价表示为 \bar{d} 。运营商声明提供的奖励不会高于 $\bar{d} - 1/B$, 这是因为这个数值已经足以激励所有用户切换。当 $0 \leq P \leq \bar{d} - 1/B$ 时, 式(9)的解 $\gamma^*(P)$ 的存在性和唯一性可以证明。

5.2 第 1 阶段的分析: 运营商的最优奖励

在第 1 阶段, 运营商选择奖励 P 以使其代价的期望达到最小化, 即

$$\min_{P \geq 0} E_n \left[\frac{(N-n)^2}{B} + n \cdot P \right] \quad (10)$$

其中, 切换用户数量 n 为随机变量, 它服从二项分布 $\mathbf{B}(N, F(\gamma^*(P)))$ 。

为了便于分析, 接下来我们假定 $F(\cdot)$ 是 $[0, \bar{d}]$ 之间的均匀分布。

定理 2 非对称不完整信息情境下的第 1 阶段: 这个斯塔克伯格博弈将会达到以下均衡。

无奖励 如果 $\bar{d} < (N+1)/B$, 表明最大等待代价 \bar{d} 较小或者业务量 N 较重, 运营商的最优策略是不提供奖励(即 $P^* = 0$)。严重的网络拥塞促使部分用户容忍相对较小的等待代价, 并切换至 WiFi 网络。用户的判决阈为 $\gamma^* = N\bar{d}/(N-1+B\bar{d})$, 满足 $d_i \leq \gamma^*$ 的用户将延迟其蜂窝业务切换至 WiFi 网络。

有奖励 如果 $\bar{d} \geq (N+1)/B$, 表明最大等待代价 \bar{d} 较大或者业务量 N 较轻, 那么, 在第 1 阶段, 运营商将会声明提供奖励 $P^* = (N\bar{d} - N^2 - B\bar{d} + 1)/(4NB - 4B + 2B^2\bar{d})$ 。在第 2 阶段, 用户将计算出均衡判决阈 $\gamma^* = \bar{d}(3N-1)/(4N-4+2B\bar{d})$, 满足 $d_i \leq \gamma^*$ 的用户将切换至 WiFi 网络。

P^* 作为 N 与 \bar{d} 的函数的数值结果, 如图 2 所示。

用 C^{IM} 表示运营商应用激励机制能够达到的最小代价, 包括蜂窝网络拥塞代价和奖励用户所付出的代价。作为对比, 同样计算出在没有激励机制的情况下(即 $P^* = 0$)运营商的代价, 这仅包括蜂窝网络拥塞代价。我们把没有激励机制情况下运营商的代价表示为 $C^{\text{Non-IM}}$ 。定义运营商的归一化代价为 $C^{\text{IM}}/C^{\text{Non-IM}}$, 图 3 表示其与 N 和 \bar{d} 的关系。从该图可以看出, 运营商可以通过本文提出的激励机制使总代价降低 23%。这表明, 该激励机制可以有效缓解蜂窝网络拥塞。

6 考虑用户随机性的扩展研究

现实中存在一些用户拒绝参与博弈过程而执意留在蜂窝网络中, 我们称用户的这一不确定性为切换意愿的随机性。另外, 用户的运动轨迹具有不确定性, 我们称用户的这一不确定性为移动的随机性。接下来, 我们将用户的这两种随机性引入到我们的问题中。

6.1 考虑用户移动随机性的扩展研究

在第 3 节关于完整信息情境、第 4 节关于对称不完整信息情境的研究中, 决策过程和决策结果分别基于用户等待代价 d_i , $i \in M$ 的具体数值、用户等待代价的均值 μ (与累积概率函数 $F(\cdot)$ 的具体形式无关), 也适用于考虑用户随机移动性后的情况。在第 5 节关于非对称不完整信息情境的研究中, 网络侧和用户侧的决策过程和决策结果与累积概率函数 $F(\cdot)$ 的具体形式有关, 不能用来解决考虑了用户移动随机性的扩展问题, 因为此处累积概率函数 $F(\cdot)$ 的具体形式已改变。如果用户等待代价的统计特性(即累积概率函数 $F(\cdot)$)较稳定, 网络侧只需要在较长的时间段内计算一次奖励方案即可, 从而可以采取计算复杂度较高的数值搜索。具体来讲, 先搜索找到一个使式(11)较小的 γ^* :

$$C(\gamma) = (2N^2F^2(\gamma) - 3N^2F(\gamma) - 2NF^2(\gamma) + NF(\gamma) + N^2)/B + \gamma NF(\gamma) \quad (11)$$

然后将 γ^* 代入式(12)就可以找到较优的奖励 P^* :

$$P(\gamma) = \gamma - (N - (N-1)F(\gamma))/B \quad (12)$$

用户收到网络侧广播的累积概率函数 $F(\cdot)$ 以及奖励 P^* 后, 可以通过二分法试探出式(13)的解:

$$\gamma + (N-1)F(\gamma)/B = P^* + N/B \quad (13)$$

即得到了均衡判决阈 γ^* , 进而可以做出自己的决策。

6.2 考虑用户切换意愿随机性的扩展研究

在 WiFi 覆盖范围之外, 有 N 个用户愿意参与博弈, 通过计算代价选择切换至 WiFi 网络还是留

在蜂窝网络中,我们还考虑有 N_0 个用户拒绝参与博弈,执意留在蜂窝网络中接受服务。此时,蜂窝网络拥塞代价改写为 $G(n) = (N_0 + N - n)/B$, 将其代入式(2)并进一步化简,得到新问题中用户的等价决策代价为

$$C_i(n) = \begin{cases} d_i - (P + N_0/B), & \text{切换} \\ (N - n)/B, & \text{留候} \end{cases} \quad (14)$$

将 $G(n) = (N_0 + N - n)/B$ 代入式(3)可以得到新问题中运营商的总代价为

$$C(P) = (N - n)^2/B + n \cdot (P + N_0/B) - n \cdot 3N_0/B + (N_0^2 + 2N_0N)/B \quad (15)$$

如果令 $P + N_0/B = P'$, 新问题中用户的等价决策代价式(14)与原问题(将 $G(n) = (N - n)/B$ 代入式(2))相同,运营商的优化目标式(15)与原问题(将 $G(n) = (N - n)/B$ 代入式(3))十分类似,只是多了常数项和 n 的一次项,而原优化目标中本来就有 n 的一次项,且在最小化问题中常数项可以忽略。因此,完全可以用与原优化问题相同的解决思路和推导方法来处理新问题。

6.3 实际场景下的仿真

在边长为 10 km 的正方形内随机布置有 WiFi

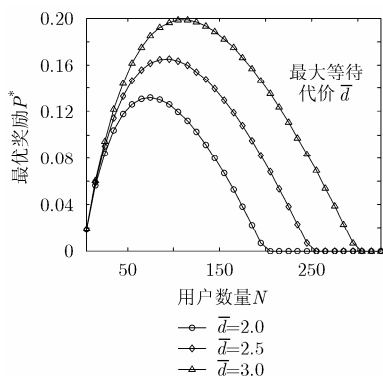


图2 最优奖励 P^* 作为用户数量 N 与最高等待代价 \bar{d} 的函数

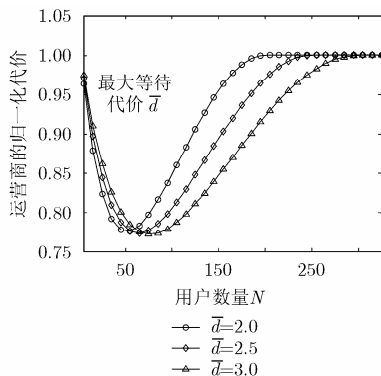


图3 运营商归一化代价 C^{IM}/C^{Non-IM} 作为用户数量 N 与最高等待代价 \bar{d} 的函数

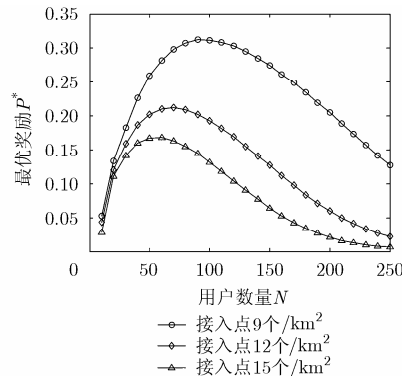


图4 最优奖励 P^* 作为用户数量 N 与接入点密度的函数

接入点,每个 WiFi 接入点都可服务距离其小于 $r_0 = 50$ m 的用户。我们关注布置于正方形中央的一个宏蜂窝和其中的用户,并研究它们之间的博弈过程。蜂窝半径设为 1 km。在宏蜂窝内 WiFi 覆盖范围外,随机安置了 $N_0 + N$ 个用户,其中 N 个用户愿意参与博弈,另外 $N_0 = 10$ 个用户拒绝参与博弈,而执意留在宏蜂窝网络中接收服务。对于愿意参与博弈的 N 个用户来说,每个用户有特定的运动方向,该运动方向在 360° 内随机产生。用户 $i \in M$ 的等待代价 d_i 为其沿着该用户运动方向到达第 1 个 WiFi 热点的移动距离,该 WiFi 热点可以在宏蜂窝内,也可以在宏蜂窝外。我们假设上述等待代价 $d_i, i \in M$ 为运营商和每个用户所了解,并给出完整信息情境下最优奖励 P^* 作为用户数量 N 和接入点密度的函数的数值结果,如图 4 所示。

随着 WiFi 接入点密度的降低,用户将会承担更高的平均等待代价,导致其切换意愿降低。因此,运营商需要声明提供更高的奖励 P^* 作为切换补偿。当用户数量 N 较小时,随着蜂窝网络业务量 N 的增加,运营商需要声明提供更高的奖励 P^* 来鼓励更多的用户切换。当用户数量 N 较大时,奖励 P^* 会随着 N 的增加而降低,这是因为此时蜂窝网络中严重的网络拥塞也可以激励用户切换至 WiFi 网络。

7 结束语

为了降低蜂窝网络拥塞,本文考虑运营商通过激励机制鼓励用户延迟其在蜂窝网络中的业务,移动至 WiFi 网络覆盖区域以切换至 WiFi 服务,并将这一过程建模为两阶段斯塔克伯格博弈。考虑到运营商方和用户方对用户移动性与其等待代价信息的了解程度存在多种可能性,本文研究了各种用户等待代价的可获取性情境,并分别得出相应的最优奖励机制。数值结果表明,本文提出的激励机制可以有效降低包括蜂窝网络拥塞代价和奖励用户付出代

价在内的运营商总代价。

参考文献

- [1] Cisco Systems Inc. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2011-2016[R]. San Jose, CA, USA, 2012.
- [2] Bennis M, Simsek M, Czylikw A, et al. When cellular meets WiFi in wireless small cell networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(6): 44-50.
- [3] Liu Q, Li X R, Xu W J, et al. Empirical analysis of ZigBee and WiFi coexistence[C]. The 2014 International Conference

- on Innovative Design and Manufacturing (ICIDM), Montreal, QC, 2014: 117–122.
- [4] Farshad A, Marina M K, and Garcia F. Urban WiFi characterization via mobile crowdsensing[C]. IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS), Krakow, 2014: 1–9.
- [5] Kim Y, Lee K, and Shroff N B. An analytical framework to characterize the efficiency and delay in a mobile data offloading system [C]. MobiHoc, Philadelphia, PA, USA, 2014: 139–149.
- [6] Zhuo X, Gao W, Cao G, *et al.* Win-coupon: an incentive framework for 3G traffic offloading[C]. 19th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), Vancouver, BC Canada, 2011: 206–215.
- [7] Cheung M H and Huang J W. Optimal delayed Wi-Fi offloading[C]. 11th International Symposium and Workshops on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt), Tsukuba Science City, Japan, 2013: 564–571.
- [8] Lee J, Yi Y, Chong S, *et al.* Economics of WiFi offloading: trading delay for cellular capacity[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(3): 1540–1554.
- [9] Lee K, Lee J, Yi Y, *et al.* Mobile data offloading: how much can WiFi deliver [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2013, 21(2): 536–550.
- [10] 刘莉, 荆涛, 付立. 一种分层蜂窝网中基于用户分类的建模分析方法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2235–2238.
- Liu Li, Jing Tao, and Fu Li. A user-classified method for modeling and analysis of hierarchical cellular networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(9): 2235–2238.
- [11] Tseng C C, Peng C S, Lo S H, *et al.* Co-tier uplink power control in femtocell networks by Stackelberg game with pricing[C]. 4th International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (VITAE), Aalborg, 2014: 1–5.
- [12] Fan L F, Friesz T L, Yao T, *et al.* Strategic pricing and production planning using a Stackelberg differential game with unknown demand parameters[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2013, 60(3): 581–591.
- [13] Andrews J G, Baccelli F, and Ganti R K. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(11): 3122–3134.
- [14] Gibbens R, Mason R, and Steinberg R. Internet service classes under competition[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(12): 2490–2498.
- [15] Li C T, Wang J K, Wang B, *et al.* Cross-layer congestion control algorithm based on compressed sensing in wireless sensor networks[C]. 33rd Chinese Control Conference (CCC), Nanjing, 2014: 5830–5833.
- [16] Mohammadzadeh N and Zhuang W H. Cooperation of heterogeneous wireless networks in end-to-end congestion control for QoS provisioning[C]. IEEE International Conference on Communications (ICC), Budapest, 2013: 6454–6458.
- [17] Islam M, Rahman M L, and Mamun M. Load adaptive congestion control and rate readjustment for wireless mesh networks [C]. 5th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), Beijing, 2014: 1088–1092.
- 蔡世杰: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为网络经济学、绿色通信。
- 肖立民: 男, 1967年生, 副教授, 研究方向为数据传输、扩频通信、干扰抑制算法等。
- 王京: 男, 1958年生, 教授, 研究方向为4G网络、调制解调、信道编码、多用户检测、MIMO、分布式无线通信系统等。