

基于移动热点共享的物联网激励机制研究

刘怀哲, 高林

(哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院, 广东 深圳 518055)

摘要: 物联网中的许多设备, 尤其是能量受限的传感器设备, 通常缺乏高效的网络连接方式。若采用基于移动热点共享的组网方式, 则可以高效实现大面积网络覆盖。该组网方式的基本思想是激励蜂窝网中的部分移动节点(如智能手机和其他智能设备的持有者)开启移动热点, 为资源受限节点提供 Wi-Fi 连接, 满足这些节点的通信需求, 从而实现移动互联网的高效接入。在这种组网方式中, 如何激励移动用户贡献热点是关键。主要研究移动热点共享网络中的激励机制及其对网络性能的影响, 并设计了一套新颖的激励机制, 使部分用户可以通过贡献 Wi-Fi 热点获取一定收益。首先, 研究了该激励机制下不同类型用户的最优共享决策以及不同用户之间决策的影响; 然后, 分析了用户行为和网络整体状态随时间的演化规律以及系统的均衡状态。仿真结果表明, 在系统均衡状态下, 移动热点贡献者的数量随免费流量配比的增大而增大, 因此导致热点使用者数量增大。若单位流量价格过高, 则使用者数量将减少, 不利于网络运行。此外, 与无热点共享网络相比, 采用移动热点共享的组网方式可使网络性能最高提升 148%。

关键词: 物联网; 移动热点共享; 激励机制

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00093

Research on incentive mechanism for IoT based on mobile hotspot sharing

LIU Huaizhe, GAO Lin

School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China

Abstract: Many devices in the Internet of things, especially energy-constrained sensor devices, often lack efficient network connectivity. If the networking method based on mobile hotspot sharing is adopted, large-area network coverage can be realized efficiently. The basic idea of the networking mode is to activate some mobile node in the cellular network (such as the holders of smart phones and other smart devices) to open mobile hotspot, provide Wi-Fi connections for resource-constrained node, and satisfy the communication needs of these node, so as to achieve efficient access to the mobile Internet. In this networking mode, how to encourage mobile users to contribute hotspot is the key. The incentive mechanism in mobile hotspot sharing network and the impact on network performance was studied mainly, and a novel incentive mechanism was designed to enable some users to obtain certain benefits by contributing Wi-Fi hotspot. Firstly, the optimal sharing decision of different types of users under the incentive mechanism and the influence of decision-making among different users were studied. Then, the evolution of user behavior, the overall state of the network with time and the equilibrium state of the system were analyzed. The simulation results show that under the equilibrium state of the system, the number of mobile hotspot contributors increases with the increase of free traffic ratio, which also leads to an increase in the number of hotspot. If the price of unit traffic is too high, the number of users will be reduced, which is not conducive to the operation of the network. In addition, compared with the non-hotspot sharing network, if the mobile hotspot sharing networking mode is adopted, the network performance can be increased by up to 148%.

Key words: Internet of things, mobile hotspot sharing, incentive mechanism

收稿日期: 2019-02-10; 修回日期: 2019-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61771162)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61771162)

1 引言

“万物互联”时代将至，移动终端设备数量激增，全球移动数据流量呈爆发式增长。思科公司预测，2022 年全球互联网用户数量将达 41 亿，连网设备和连接数量将达 263 亿，网络数据流量每月将达 4.8 ZB^[1]。不难看出，人们对移动网络的需求持续攀升，提升网络容量的任务迫在眉睫。针对这一问题，传统解决方案如缩小单个蜂窝的规模^[2]或通过 Wi-Fi 接入点、家庭蜂窝等方式，可提高单位面积的网络接入能力^[3]，并缓解蜂窝网拥塞。如韩国的 KT、LG 和 SK 电信投资 4 400 万美元，在首尔部署了 10 000 个固定热点，成本昂贵^[4]。因此，如何以较低的成本部署热点，实现更高的网络覆盖面是值得研究的问题。

文献[5]中通过整合大量家庭 Wi-Fi 热点实现网络覆盖的方式，既节约了部署成本，又提高了网络覆盖面^[6]。目前，FON 是成功运营家庭 Wi-Fi 热点共享网络的商业案例^[7]，但此方式灵活性差，无法适应移动节点动态组网的需求。因此，有研究者提出了一种新思路，即对移动设备所提供的移动 Wi-Fi 热点进行整合，从而得到更灵活且具有动态拓扑的移动热点共享网络。

Karma 是一个成功的移动热点共享网络的商业案例^[8]。该公司的运营对象是移动 Wi-Fi 热点共享网络，其思想是激励移动智能设备的持有者成为热点的贡献者，将 3G/4G 信号转换为 Wi-Fi 信号从而满足其他智能设备用户的上网需求。Karma 公司的激励机制如下^[9]：当某个注册用户启动 Karma 定制的 Wi-Fi 路由器后，设备网络将根据该用户的 Karma 账户设置网络名称。然后此网络将自动变成一个不设密码的开放 Wi-Fi 热点，任何“蹭网者”在使用贡献者的 Wi-Fi 带宽时，该贡献者的 Karma 账户都会增加 100 MB 数据流量。因此，只要成为 Karma 会员，就有机会赚取大量免费流量，从而减少自己的上网开销。此网络由 Karma 运营商集中控制，即用户无法根据自身意愿来决定是否让其他人接入、让多少人或多少设备接入，也无法控制自己贡献带宽的方式。因此，Karma 所运营的网络缺乏由用户自身情况决定带宽贡献的分布式激励机制。

移动热点共享网络在满足灵活性的同时，其运营也更具挑战性^[10]。在该网络中，节点的功能多种多样，移动模式也不同，从而导致对网络连接的需

求差异很大。对网络运营者来说，节点分类和网络拓扑建模是一项具有挑战性的工作。两项重要技术的进步为移动热点共享网络的兴起提供了必要条件：1) 硬、软件的技术进步使得移动设备智能化，且具有较强的计算能力和充足的存储资源^[11]；2) 近年来，4G 网络已经普及，终端用户拥有足够的网络带宽。因此，移动设备的持有者就能拥有富裕的资源如移动数据流量和电池电量，为其他用户提供网络连接服务，社交网络的兴起也促进了终端用户通过共享移动热点满足彼此的利益需求。

移动用户在共享自己的热点为其他用户提供网络接入并转发数据的过程中，其自身的用户体验可能会下降，同时设备的电池电量消耗也会加剧。如果不给予贡献者一定的补偿，则移动用户成为贡献者的意愿可能会减弱，热点共享网络也很难继续运行。因此，制定合理的激励机制来激励用户贡献自己的热点至关重要。现有的激励机制大多针对固定热点共享网络，如家庭 Wi-Fi 或公共场所的 Wi-Fi 热点，移动热点共享网络中的激励机制尚不存在。

针对上述问题，本文提出了分布式的激励机制，其基本思想是：以博弈论为理论框架，使用效用函数对各类用户节点的行为决策进行描述，使整个网络在用户节点演化的过程中逐渐达到均衡状态。进一步分析了在该激励机制下，用户节点的最优共享决策、不同用户之间决策的影响，以及在不同激励机制下不同的系统均衡状态。届时，移动热点网络中公平、高效的网络连接将实现。

本文的主要贡献如下。

1) 研究了新型的基于移动热点共享的网络接入方式，可以有效提高物联网中异构节点接入网络的能力。

2) 提出了基于数据流量折扣的激励机制，将对 Wi-Fi 热点的贡献者给予奖励，并激励用户根据自身资源掌握情况（数据流量、电池电量等）贡献热点和带宽。

3) 利用演化博弈理论系统地分析了在基于数据流量折扣激励机制与不同带宽分配方式下，移动热点共享网络中用户决策行为的演化和网络的均衡状态。

2 移动热点共享网络

2.1 网络架构模型

基于移动热点共享的网络架构如图 1 所示。该

网络可以被建模为一个多跳、多路径的 Mesh 网络，管理因特网和不同用户之间的多个单播会话，确保每个设备能在单个或多个频率信道上发送/接收数据。在网络中，每个异构节点都配备 Wi-Fi 网络接口，以实现短距离 D2D 通信，只有部分节点配备互联网接口（如蜂窝接口）。每个用户的网络连接（通过蜂窝或 Wi-Fi 连接）容量、电池电量、上传或下载使用流量的开销等都可以参数化。

在该网络中，用户可以选择成为贡献者或使用者。运营商通过收取用户基于使用量的费用并制定合理的激励机制，以维持网络运营。每个用户需要在网络构建的初始时刻，从策略集{贡献者，使用者，不参与者}中选择角色。如图 1 所示，绿色手机代表贡献者，其在向运营商支付基于使用量的费用后，可以直接连接 4G 蜂窝网，贡献者可以作为移动热点与使用者分享其互联网接入点。在此过程中，贡献者仅作为数据通道，使用者承担自己的数据流量费用。蓝色手机代表使用者，其通过贡献者打开的 Wi-Fi 接入点连接网络，并向运营商支付自己的数据流量费用。

在本文研究的热点共享网络中，上述“费用”是影响用户策略选择的重要因素，所有用户都希望将自己的上网费用最小化。本文将运营商的激励机制定义为单位流量价格 p 和免费流量配比 δ ，即 (p, δ) 。这两个变量都是有界值，其中 $p \in [0, p_{MAX}]$ ， $\delta \in [0, 1]$ 。

p 用于描述贡献者和使用者为了满足自身需求所耗费的传输成本， δ 用于描述运营商对贡献者流量使用开销的折扣力度。只有在免费流量配比的激励下，用户才有成为贡献者的意愿。

由于移动设备计算和通信资源限制，每个贡献者的服务能力有限，贡献者的所有资源不一定都能用来为使用者服务。因此，贡献者有两种资源分配策略。

在每个时隙内，固定划分部分带宽为使用者转发数据（静态带宽分配方式）；在保障自己上网需求的前提下，以一定的概率贡献自己的带宽为使用者转发数据（动态带宽分配方式）。

本文研究以下两种网络情况和相应的用户关系选择均衡。

- 1) 贡献者在服务能力约束下，以静态带宽分配方式为使用者服务。
- 2) 贡献者在服务能力约束下，以动态带宽分配方式为使用者服务。

在每个时隙内，用户都可以变更自己在下一个时隙的策略。运营商对单位流量价格的制定以及对贡献者的流量奖励配额，将对用户的策略造成影响^[13]。此外，每个用户自身的资源存储量（如电池电量和计算内存等）会影响用户的角色选择。

2.2 移动用户的相遇概率模型

当热点共享网络中任意两个用户的距离足够近时，即进入彼此的 Wi-Fi 热点覆盖半径内，才有

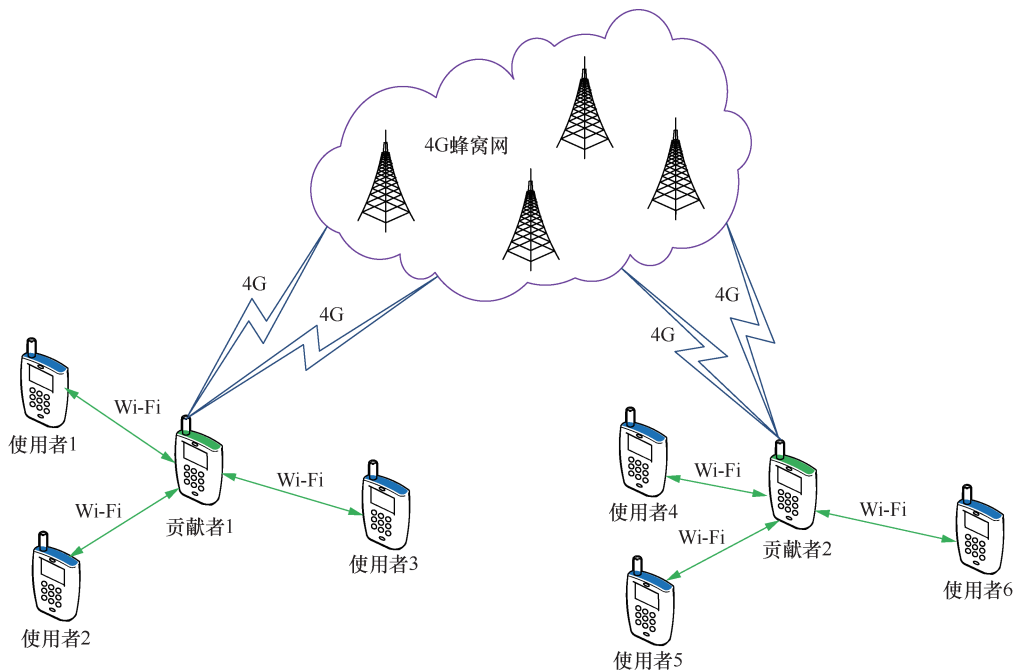


图 1 基于移动热点共享的网络架构

通过 Wi-Fi 互连的可能。因此，本文将上述过程定义为“相遇”，它是组网的基础。下面将对相遇概率模型进行分析。

在每个时隙内，网络中的用户节点可能改变自己的位置，使得网络中的使用者节点在不同时隙与不同的贡献者节点相遇，这将对整个网络的拓扑结构及通信链路产生影响。只有当特定使用者在某一时刻内与至少一个贡献者相遇，并且选择其中一个贡献者的热点接入时，组网才有可能成功。假设在热点共享网络中，用户节点总数为 N ， $N = \{1, 2, \dots, N\}$ ，移动用户节点在某个区域随机移动，每个节点在各个时隙内遇到其他任意一个节点的概率均为 $\rho \in (0, 1)$ ，且不随时间变化。任意一个用户在每个时隙内遇到的平均近邻用户数量为 λ ，则 $\lambda \triangleq N \cdot \rho$ ， λ 为有界值。

假设网络中的用户节点以服务请求概率 θ 进行 Wi-Fi 连接， θ 取决于用户的角色选择，角色选择相同的用户，其服务请求概率 θ 也相同。假设 θ 服从均匀分布，即 $f(\theta) = 1$ ， $\theta \in [0, 1]$ 。在给定网络环境下，每个用户会从策略集 $s \in \{H, C, A\}$ 中选择相应角色。 H 、 C 、 A 分别代表贡献者、使用者和不参与者，用 $\{\Theta_H, \Theta_C, \Theta_A\}$ 表示贡献者、使用者和不参与者构成的集合，用 μ_H 、 μ_C 、 μ_A 分别表示网络中贡献者、使用者和不参与者所占总人数的比例。显然， $\Theta_A \cup \Theta_B \cup \Theta_C = [0, 1]$ ， $\mu_A + \mu_B + \mu_C = 1$ ，并且 3 种角色的服务请求概率可表示为

$$\bar{\theta}_s = \frac{1}{\mu_s} \sum_{\theta \in \Theta_s} \theta \cdot f(\theta), s \in \{H, C, A\} \quad (1)$$

若使用者能成功连接 Wi-Fi 热点，则该使用者必须在当前时隙内与至少一个贡献者相遇^[12]，假设概率为 β_H ，则有

$$\beta_H = 1 - (1 - \rho \cdot \mu_H)^{N-1} \quad (2)$$

当 $N \rightarrow \infty$ 时， $\rho \rightarrow 0$ ，因此，式(2)可以表示为

$$\beta_H = \lim_{N \rightarrow \infty} 1 - \left(1 - \frac{\lambda}{N} \cdot \mu_H\right)^{N-1} = 1 - e^{-\mu_H \lambda} \quad (3)$$

假设在当前时隙内，任意贡献者 i 的 Wi-Fi 热点被 Z_C 个使用者连接。在同一时隙内，假设任意使用者 j 会从其所相遇的贡献者中选择一个贡献者进行 Wi-Fi 连接，则贡献者 i 被使用者 j 连接的概率为

$$\beta_C^{\text{CON}} = 1 \cdot \beta_H^{(0)} + \frac{1}{2} \cdot \beta_H^{(1)} + \dots + \frac{1}{N-1} \cdot \beta_H^{(N-2)} \quad (4)$$

其中， $\beta_H^{(k)}$ 表示使用者 j 与其他 k 个（除去贡献者 i ）贡献者相遇的概率，因此不难看出

$$\beta_H^{(k)} = \binom{N-2}{k} \cdot (\rho \mu_H)^k \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{N} \mu_H\right)^{N-2-k} \quad (5)$$

当 $N \rightarrow \infty$ ， $\rho \rightarrow 0$ 时，则有

$$\begin{aligned} \beta_H^{(k)} &= \lim_{N \rightarrow \infty} \binom{N-2}{k} \cdot \left(\frac{\lambda}{N} \mu_H\right)^k \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{N} \mu_H\right)^{N-2-k} \\ &= \frac{(\mu_H \lambda)^k}{k!} \cdot e^{-\mu_H \lambda} \end{aligned} \quad (6)$$

式(4)可以表示为

$$\beta_C^{\text{CON}} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{N-2} \frac{1}{k+1} \cdot \frac{(\mu_H \lambda)^k}{k!} \cdot e^{-\mu_H \lambda} = \frac{1}{\mu_H \lambda} \cdot (1 - e^{-\mu_H \lambda}) \quad (7)$$

显然，贡献者 i 在任意时隙内遇到的平均使用者数量为 $(N-1) \cdot \rho \mu_C$ 。因此，连接贡献者 i 的平均使用者数量如式(8)所示。

$$Z_C = \frac{\mu_C}{\mu_H} \cdot (1 - e^{-\mu_H \lambda}) = \frac{\mu_C}{\mu_H} \cdot \beta_H \quad (8)$$

2.3 贡献者的带宽分配模型

在带宽服务能力有限的情况下，贡献者无法在满足自身上网需求的同时响应所有使用者的服务需求。如果在同一时隙内，某个贡献者同时收到多个使用者的服务请求，则其总服务能力会下降。因此，如何合理地分配热点贡献者的带宽资源用于自身需求和他人需求，成为一个重要的问题。

在热点共享网络中，使用者的数据总需求量 $\bar{\gamma}_C$ 将影响使用者的带宽分配，该值与用户占比 μ_C 、 μ_H 以及服务请求概率 θ 相关，因此

$$\bar{\gamma}_C = \frac{\mu_C}{\mu_H} (1 - e^{-\mu_H \lambda}) \cdot \bar{\theta}_C = Z_C \cdot \bar{\theta}_C \quad (9)$$

假设贡献者的带宽为 B ，将该值归一化，即 $B = 1$ 。其中，在单位时隙内，用于满足贡献者自身上网需求的带宽为 B_H ，用于为使用者转发数据的带宽为 $B_C = 1 - B_H$ 。

由于贡献者的服务能力有限，因此假设在单位

时隙内, 贡献者为使用者转发的实际数据量为 $G(B_C, \bar{\gamma}_C)$ 。当某贡献者需要为使用者转发的总数据量大于贡献者自身带宽时, 贡献者将使用自身的所有带宽为使用者转发数据, 由此可得

$$G(B_C, \bar{\gamma}_C) = \begin{cases} \bar{\gamma}_C, & \bar{\gamma}_C \leq B_C \\ B_C, & \bar{\gamma}_C > B_C \end{cases} \quad (10)$$

单位时隙内能被贡献者转发的实际使用者的数据量为 $g(B_C, \bar{\gamma}_C)$, 由此可得

$$g(B_C, \bar{\gamma}_C) = \frac{G(B_C, \bar{\gamma}_C)}{\bar{\gamma}_C} = \begin{cases} 1, & \bar{\gamma}_C \leq B_C \\ \frac{B_C}{\bar{\gamma}_C}, & \bar{\gamma}_C > B_C \end{cases} \quad (11)$$

2.4 移动用户节点的效用函数模型

效用函数用于衡量用户节点在当前时隙内的收益, 每个用户的效用函数是所获得的收益与所产生的成本之间的差额。将用户节点的收益记为 $U_\theta(s)$ 。其中, s 是注册用户选择的角色, θ 是该角色下的服务请求概率。为了激励用户参与并选择适合自己的角色, 运营商制定了基于使用量的单位流量价格为 p , 用于奖励贡献者的免费流量配比为 δ 。

假设在服务能力有限的情况下, 贡献者将以动态或静态的带宽分配方式代替使用者转发数据。在此条件下, 不参与者、贡献者和使用者有不同形式的效用函数模型。

2.4.1 静态带宽分配方式下的效用函数模型

在静态带宽分配方式下, 每个时隙内贡献者将固定比例的带宽服务于使用者, 剩下的带宽用于满足自己的上网需求。因此, 不参与者、贡献者和使用者的效用函数如下。

1) 不参与者: 选择成为该角色的用户不订购运营商的服务, 即不连接到网络。该用户的收益函数为 0, 即

$$U_\theta(A) = 0 \quad (12)$$

2) 贡献者: 贡献者可以随时通过自己的移动设备连接 4G 蜂窝网。此外, 该类用户还可以打开自己的 Wi-Fi 热点, 为使用者接入蜂窝网提供通道, 从而获得数据流量奖励。在此过程中, 贡献者只与使用者分享 Wi-Fi 接入点, 使用者所消耗的流量费用由自身承担。若任意一个贡献者的服务请求

概率为 θ , 用户选择成为贡献者的成本为 X_H , 单个使用者的平均数据使用量为 V_H , 贡献者用于满足自身上网需求的数据传输成本为 L_H , 用于帮助使用者转发数据的传输成本为 L_{HC} , 则贡献者消耗单位数据量的平均效用为 $\Pi_H(p) = V_H - L_H - p \cdot (1 - \delta)$, 贡献者替使用者转发单位数据量从而产生的平均效用为 $\Pi_{HC}(p, \delta) = \delta \cdot p - L_{HC}$, 故贡献者的期望收益为

$$U_\theta(H) = \theta \cdot \Pi_H \cdot B_H + \Pi_{HC} \cdot (1 - B_H) \cdot G(B_H, \bar{\gamma}_C) - X_H \quad (13)$$

3) 使用者: 使用者只能通过近邻贡献者开启的 Wi-Fi 热点上网, 使用者连接 Wi-Fi 的概率取决于使用者与贡献者相遇的概率。若任意一个使用者的服务请求概率为 θ , 单个使用者的平均数据使用量为 V_C , 使用者的平均传输成本为 L_C , 用户选择成为使用者的成本为 X_C , 使用者消耗单位数据量的平均效用为 $\Pi_C = V_C - L_C - p$, 因此, 任意一个使用者的效用函数为

$$U_\theta(C) = \theta \cdot \beta_H \cdot \Pi_C \cdot (1 - B_H) \cdot g(B_H, \bar{\gamma}_C) - X_C \quad (14)$$

2.4.2 动态带宽分配方式下的效用函数模型

与静态带宽分配方式不同, 在动态带宽分配方式下, 每个时隙内贡献者的带宽先被用于满足自身的上网需求, 剩下的带宽用于替使用者转发数据。

1) 不参与者: 不参与者的效用函数为 0, 可以表示为

$$U_\theta(A) = 0 \quad (15)$$

2) 贡献者: 假设贡献者自身的服务请求概率为 θ , 则贡献者用剩余带宽为使用者转发数据的概率为 $1 - \theta$, 与式(13)类似, 由此可得贡献者的效用函数为

$$U_\theta(H) = \theta \cdot \Pi_H + \Pi_{HC} \cdot (1 - \theta) \cdot G(B_C, \bar{\gamma}_C) - X_H \quad (16)$$

3) 使用者: 从使用者的角度来看, 贡献者剩余带宽为 $B - \bar{\theta}_H \cdot B$, 因此, 贡献者以 $\frac{B - \bar{\theta}_H \cdot B}{B} = 1 - \bar{\theta}_H$ 的概率将带宽分配给使用者, 此时使用者的效用函数为

$$U_\theta(C) = \theta \cdot \beta_H \cdot \Pi_C \cdot (1 - \bar{\theta}_H) \cdot \bar{g}(B_H, \bar{\gamma}_C) - X_C \quad (17)$$

3 网络演化分析

在整个热点共享网络的组建过程中，涉及运营商与用户节点之间利益的交互，运营商对单位流量价格 p 、免费流量配比 δ 的设定将对用户节点的效用函数产生影响。本文在时隙系统中，以斯塔克尔伯格博弈为理论基础，分析用户节点的演化与均衡。

3.1 二阶段博弈模型

二阶段的斯塔克尔伯格博弈可等效成买/卖方之间的博弈。第一阶段，卖方通过为买方设置最优产品价格来优化自身利润；第二阶段，当产品价格固定后，买方通过调整自身策略使自身的效用实现最大化^[14]。

在移动热点共享网络中，假设整个组网过程在一个时间步长为 1 的时隙内进行，即 $t=1,2,3,\dots$ 。运营商与用户的交互过程可以用二阶段的斯塔克尔伯格模型进行描述：第一阶段，运营商制定激励机制 (p,δ) ；第二阶段，用户节点根据激励机制选择成为贡献者或使用者，或者不参与。随着时间的推移，运营商在每个时隙内都会调整自己的激励机制，以优化自身利润。用户节点则根据运营商的策略变更来调整自身的策略，即改变角色。整个系统将处于演化状态，直至运营商和用户不改变自身策略为止。

因此，本文使用逆向分析法，先将 (p,δ) 固定，观察用户分布的演化过程，再按照一定步长分别更改参数 p 和 δ ，以观察定价策略对用户角色演化的影响。

3.2 用户决策分析

综合 2.4 节中的论述，做出如下假设。

1) 由于折扣因子 δ 的存在，与热点使用者相比，贡献者消费单位流量所产生的效用更高，即 $\Pi_H(p,\delta) > \Pi_C(p)$ 。

2) 由于开启移动热点为其他节点服务将加速电池电量的消耗，因此与使用者相比，贡献者的流量使用成本更高，即 $X_H > X_C$ 。

3) 热点贡献者总能为为使用者服务的过程中获得收益，即 $\Pi_{HC}(p,\delta) > 0$ 。

4) 贡献者将用更多流量满足自身的上网需求，而不是用于为使用者服务，因此有 $B_H > B_C$ ，从而可知 $\Pi_H(p,\delta)B_H > \Pi_C(p)B_C$ 。

因为 $\Pi_H > \Pi_C$ ，且 $\beta_H \leq 1$ ，因此，有 $\Pi_H > \beta_H \Pi_C$ 。

故基于以上 4 条假设，在静态带宽分配方式下，综合式(5)、式(6)和式(7)可知，当且仅当某个服务请求概率为 θ 的用户，在当前时隙的效用函数满足式(18)时，可以表示为

$$U_\theta(s=C) \geq \max\{0, U_\theta(s=H)\} \quad (18)$$

该用户将在下一时隙选择成为使用者，当且仅当某服务请求概率为 θ 的用户，在当前时隙的效用函数满足式(19)时，可以表示为

$$U_\theta(s=H) \geq \max\{0, U_\theta(s=C)\} \quad (19)$$

该用户将在下一时隙选择成为贡献者；当某个用户在当前时隙的效用函数不满足式(18)和式(19)时，该用户将在下一时隙成为不参与者。

同理可得，以上结论在动态带宽分配条件下仍然成立。在下一个时隙到来前，每个用户会根据当前的激励机制 (p,δ) 做出最佳行为决策，随后，系统中用户分布的比例会更新。

3.3 系统均衡分析

综上所述，用户会根据当前系统状态及自身条件在每个新时隙内做出能使自身效用函数增大的响应。因此，系统的用户类型分布会随时间的推移不断演化，直到纳什均衡状态，即系统中的节点不再改变决策。

假设在任意时隙 t 内，贡献者、使用者和不参与者的用户比例分别为 μ'_H 、 μ'_C 、 μ'_A 。则在 $t+1$ 时隙有

$$\mu_H^{t+1} = \mu'_H, \mu_C^{t+1} = \mu'_C, \mu_A^{t+1} = \mu'_A \quad (20)$$

这意味着，网络中各用户分布已经不随时间变化，即用户节点不再通过单方面更改策略的方式来优化自身的效用函数，网络中的用户选择达到均衡状态。式(20)可由如下引理推导^[15]。

引理 1 纳什均衡的存在性

如果所有节点只能从策略集中做出有限选择，那么整个网络系统中至少存在一个均衡点。

由于网络中所有用户节点的策略集为 $s \in \{H, C, A\}$ ，属于有限集，因此，整个网络系统中至少存在一个均衡点。

引理 2 纳什均衡的唯一性

在特定的初始条件下，整个网络系统的演化有且仅有一个稳定的均衡状态。

本文假设在网络运行的开始，用户分布比例分别为 $\mu_H = 0$ 、 $\mu_C = 0$ 、 $\mu_A = 1$ ，结合仿真结果进行分析。

4 仿真结果与分析

本章将对网络演化情况进行数值仿真，由此观察在不同激励 (p, δ) 下，网络中的用户分布情况，并进行分析。

4.1 固定激励机制下用户角色的演化仿真分析

假设在移动热点共享网络中有 10 000 个用户节点，且在网络组建时，所有用户的角色都是不参与者，服务请求概率 $\theta \in [0, 1]$ ，且服从均匀分布。用户之间的相遇概率为 0.000 5，即 $\lambda = 5$ ，激励机制 $(p = 2, \delta = 0.8)$ 。

固定激励机制下静态带宽分配的用户角色比例演化情况如图 2 所示。绿色、红色、蓝色 3 条曲线分别表示不参与者、使用者和贡献者占比。由图 2 可以看出，当整个网络经历了约 100 次时隙迭代后，用户角色占比趋于均衡。贡献者占比为 23.59%，使用者占比为 35.79%，不参与者占比为 40.62%。

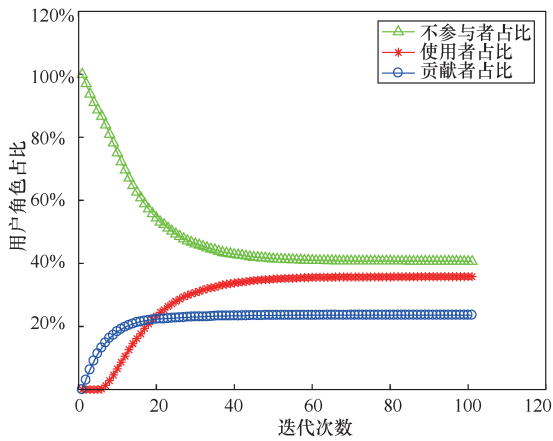


图 2 固定激励机制下静态带宽分配的用户角色比例演化情况

固定激励机制下动态带宽分配的用户角色比例演化情况如图 3 所示。当整个网络经历约 80 次时隙迭代后，网络中的用户角色占比趋于均衡。此时，贡献者占比为 62.97%，使用者占比为 11.73%，不参与者占比为 25.3%。

4.2 激励机制对网络演化的影响分析

当运营商采用不同激励机制时，用户节点将相应地改变策略来优化自身效用。本节探讨激励机制 (p, δ) 在网络达到均衡状态后对用户角色占比的影响。

4.2.1 静态带宽分配方式下 (p, δ) 的影响分析

在静态带宽分配方式下，先将参数设置为 $\delta = 0.1$ ， $\lambda = 5$ ，研究单位流量价格 p 对均衡的影响，再令 $p = 2$ ，研究 δ 对均衡的影响。

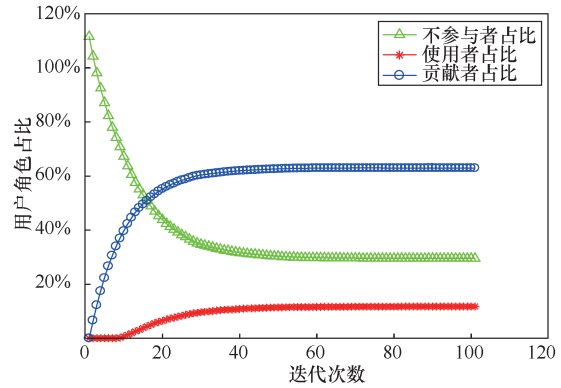


图 3 固定激励机制下动态带宽分配的用户角色比例演化情况

静态带宽分配方式下单位流量价格的影响如图 4 所示，随着单位流量价格的提高，贡献者和使用者占比先呈单调下降趋势然后趋于稳定。由此可见，单位流量价格的变化会对使用者造成直接影响，而对贡献者的影响不大。当单位流量价格 $p = 5$ 时，使用者占比为 0，系统崩溃。因此，过高的单位流量价格将成为网络演化的不利因素。

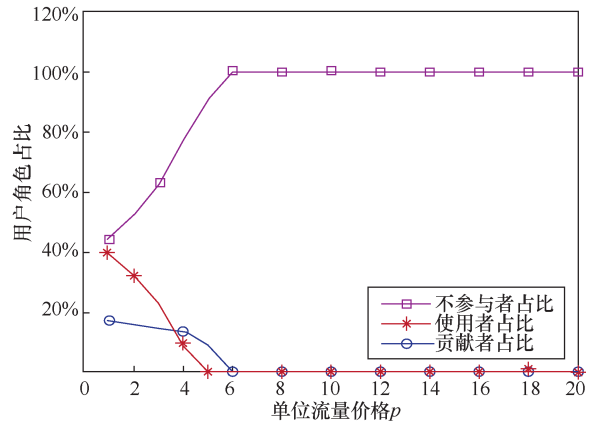


图 4 静态带宽分配方式下单位流量价格的影响

静态带宽分配方式下免费流量配比的影响如图 5 所示，随着免费流量配比的提高，贡献者直接从中获益，占比随之递增；使用者占比先呈现小幅度提高，在 $\delta = 0.5$ 后出现下降；不参与者占比随 δ 单调递减。从直观上看，贡献者对 δ 的响应更强烈。

4.2.2 动态带宽分配方式下 (p, δ) 的影响分析

本节的分析方法与上一节相同，在动态带宽分配方式下，系统对 δ 的取值较敏感。因此，在分析单位流量价格 p 时，令 $\delta = 0.1$ 。

动态带宽分配方式下单位流量价格的影响如图 6 所示，随着单位流量价格的提高，贡献者和使用者占比先呈单调下降趋势然后趋于稳定。因此，

无论贡献者以动态方式还是静态方式分配带宽，单位流量价格对系统的影响相同。对比图 4 和图 6 可知，在动态带宽分配方式下，单位流量价格对使用者的影响更强烈。

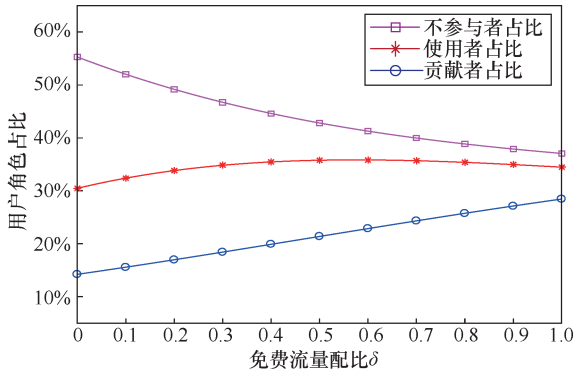


图 5 静态带宽分配方式下免费流量配比的影响

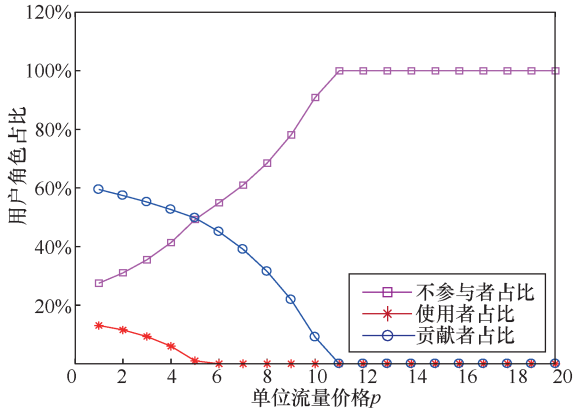


图 6 动态带宽分配方式下单位流量价格的影响

动态带宽分配方式下免费流量配比的影响如图 7 所示，在动态带宽分配方式下，随着免费流量配比的提高，贡献者占比和不参与者占比的单调性与图 5 相同，但是变化幅度较平缓，使用者占比缓慢下降。因此，无论网络中贡献者以何种方式分配带宽，该类用户都会成为 δ 的直接使用者。

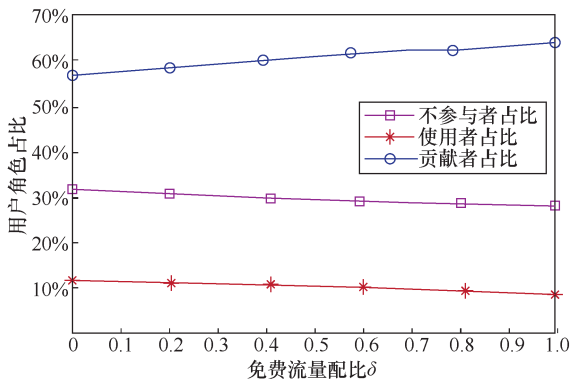


图 7 动态带宽分配方式下免费流量配比的影响

4.3 激励机制下的网络性能分析

从前文可以看出，激励机制有效促进了网络演化。此外，适当的激励机制还能提升网络性能。本节以网络中的数据需求量为网络性能的评判指标，研究激励机制下网络性能的变化。仿真结果表明，在动态带宽分配方式和静态带宽分配方式中，过高的单位流量价格 p 会导致系统崩溃，而提高免费流量配比 δ 能提升网络性能。

静态带宽分配方式下单位流量价格对网络性能的影响如图 8 所示，热点共享网络中的数据需求量远大于无热点共享网络的数据需求量，但是随着单位流量价格的上升，热点共享网络的性能逐渐下降。当单位流量价格 $p=1$ 时，热点共享网络的数据需求量为 4 162，无热点共享网络的数据需求量为 1 177，激励机制使网络性能提升 253.61%；随着单位流量价格的提高，网络性能下降。当 $p=6$ 时，热点共享网络与无热点共享网络的数据需求量均为 9.995；当 $p=7$ 时，热点共享网络与无热点共享网络的数据需求量均为 0，系统崩溃。

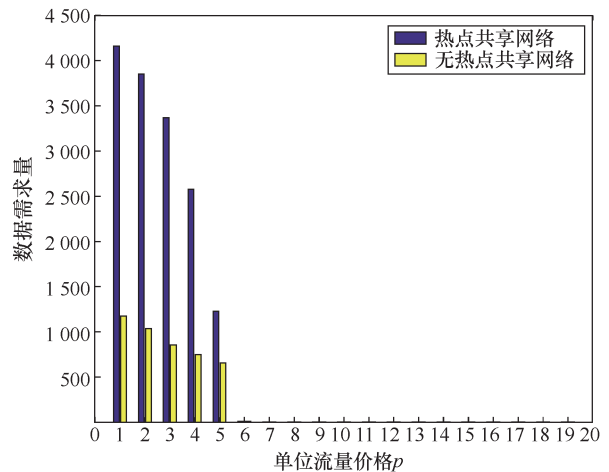


图 8 静态带宽分配方式下单位流量价格对网络性能的影响

动态带宽分配方式下单位流量价格对网络性能的影响如图 9 所示，在动态带宽分配方式下，适当提高流量价格对提高网络性能有促进作用。当 $p=1$ 时，热点共享网络的数据需求量为 4 178；当 $p=2$ 时，热点共享网络的数据需求量为 4 519，性能提升 7.546%；当 $p=6$ 时，热点共享网络与无热点共享网络的性能相同，数据需求量均为 3 491；当 $p=11$ 时，热点共享网络与无热点共享网络的数据需求量均为 0，系统崩溃。

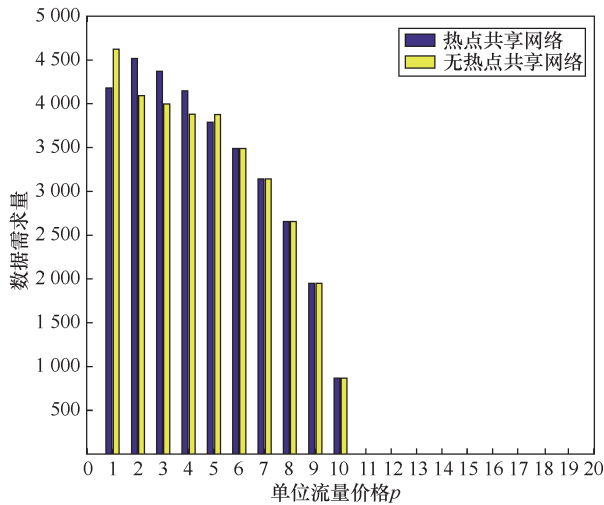


图9 动态带宽分配方式下单位流量价格对网络性能的影响

静态带宽分配方式下免费流量配比对网络性能的影响、动态带宽分配方式下免费流量配比对网络性能的影响分别如图10、图11所示，在 δ 的激励下，热点共享网络的性能总优于无热点共享网络的性能。

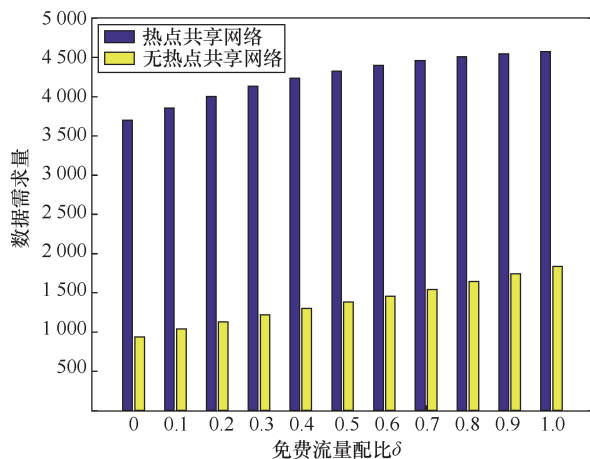


图10 静态带宽分配方式下免费流量配比对网络性能的影响

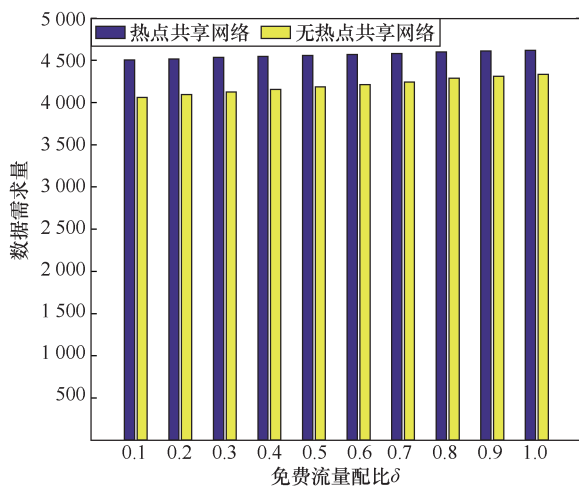


图11 动态带宽分配方式下免费流量配比对网络性能的影响

如图10所示，若采用热点共享网络，在静态带宽分配方式下，当 $\delta=1$ 时（即免去贡献者的流量费用），热点共享网络与无热点共享网络的数据需求量分别为4575、1837。因此，若在网络中实行热点共享，则网络性能可提高148.91%。在动态带宽分配方式下，性能提升则不明显。

如图11所示，当 $\delta=1$ 时，无热点共享网络的数据需求量为4334，热点共享网络的数据需求量为4618，若采用热点共享网络，则网络性能可提高6.55%。综合图10和图11可知， δ 能促进网络性能提高。但在实际情形中，运营商为了优化自身利益，对 (p, δ) 的选择会格外慎重。

5 结束语

在物联网中，基于移动热点共享的组网方式可有效提升网络性能，在这类网络中，适当的激励机制至关重要。本文以博弈论为理论框架，将用户节点行为作为切入点，为热点共享网络设计了激励机制。仿真结果表明，在激励机制作用下，移动热点的贡献者采取静态或动态的带宽分配方式都能使网络达到稳定状态，且适当的激励机制可将网络性能最高提升148%，能够实现移动互联网的高效接入。

在未来的工作中，可以对智能设备与用户节点进行更细化的分类，对网络演化过程进行更精确的描述，从而制定更贴合实际情况的激励机制。

参考文献:

- [1] CISCO. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update 2016–2021 white paper[S]. 2017.
- [2] MA Q, GAO L, LIU Y F, et al. A contract-based incentive mechanism for crowdsourced wireless community networks[C]//Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc and Wireless Networks. 2016: 1-8.
- [3] ZHANG Y, LIU L, GU Y, et al. Offloading in software defined network at edge with information asymmetry: a contract theoretical approach[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2016, 83(2): 241-253.
- [4] DUAN L, KUBO T, SUGIYAMA K, et al. Motivating smart phone collaboration in data acquisition and distributed computing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(10): 2320-2333.
- [5] SHI J, GUI L, KOUTSONIKOLAS D, et al. A little sharing goes a long way: the case for reciprocal Wi-Fi sharing[J]. Scopus, 2015: 6-10.
- [6] SOFIA R C, MENDES P. User-provided networks: consumer as provider[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(12): 86-91.
- [7] ZHANG Y, JIANG C, SONG L, et al. Incentive mechanism for mo-

- bile crowdsourcing using an optimized tournament model[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(4): 880-892.
- [8] DUAN L, HUANG J, SHOU B, et al. Pricing for local and global Wi-Fi markets[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(5): 1056-1070.
- [9] SHI D H. Overlay networks in the West and the East: a techno-economic analysis of mobile virtual network operators[J]. Telecommunication Systems, 2008, 37(4): 157-168.
- [10] KHALILI M M, GAO L, HUANG J, et al. Incentive design and market evolution of mobile user-provided networks[J]. Conference on Computer Communications Workshops, 2015: 498-503.
- [11] ROLLA V G, CURADO M. Enabling wireless cooperation in user provided networks[C]//2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM). IEEE, 2015: 1114-1121.
- [12] MA Q, GAO L, LIU Y, et al. A game-theoretic analysis of user behaviors in crowdsourced wireless community networks[J]. Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc and Wireless Networks, 2015: 355-362.
- [13] DECI E L, RYAN R M. Intrinsic motivation and self-determination in human behavior[J]. Encyclopedia of Applied Psychology, 2004, 3(2): 437-448.
- [14] RABIN M. Incorporating fairness into game theory and economics[J]. The American Economic Review, 1993, 83(5): 1281-1302.

- [15] 王增. 基于博弈论的蜂窝网络功率控制与多维效率优化研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- WANG Z. Research on power control and multidimensional efficiency optimization of cellular networks based on game theory[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.

[作者简介]



刘怀哲（1994- ），男，广西桂林人，哈尔滨工业大学（深圳）电子与信息工程学院硕士生，主要研究方向为博弈论在无线网络中的应用。



高林（1980- ），男，浙江金华人，博士，哈尔滨工业大学（深圳）电子与信息工程学院副教授，主要研究方向为物联网、移动互联网、边缘计算、网络经济学和博弈论等。