

移动社会网络中基于社区的最优能效路由策略研究

彭颖, 王淦, 王高才

(广西大学计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 提出基于社区的最优能效路由策略, 在给定的延时约束下最小化网络能耗。首先利用马尔可夫链获取信息在连通网中传递的期望能耗和期望延时, 然后构建信息从源节点传递到目的节点的能耗和延时综合成本函数, 以及中继节点传递信息对综合成本的优化函数, 从而得到中继节点的报酬函数, 最后利用最优停止理论获得最优中继节点的最优期望报酬, 实现最优能效路由策略。在仿真实验中, 将提出的路由优化策略与相关文献的路由策略在平均能耗、平均延时和平均传递率各指标上进行对比, 结果表明所提的路由策略具有较小的平均能耗、较低的平均延时和较高的平均传递率, 取得较好的能耗优化效果。

关键词: 移动社会网络; 最优能效路由; 社区; 最优停止; 最优中继节点

中图分类号: TP302

文献标识码: A

Optimal energy efficiency routing strategy based on community in mobile social network

PENG Ying, WANG Nao, WANG Gao-cai

(School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: An optimal energy efficiency routing strategy based on community was proposed, which minimized the network energy consumption under the given delay constraint. Firstly the expected energy consumption and delay of message delivery in the connected network were obtained through Markov chain. Then the comprehensive cost function for delivering message from source node to destination node was designed, which was combined with energy consumption and delay. Thus, the optimization function to comprehensive cost of relay node delivering message was obtained, and further the reward function of relay node was gotten. Finally the optimal expected reward of optimal relay node was achieved using the optimal stopping theory, so as to realize the optimal energy efficiency routing strategy. In simulations, the average energy consumption, the average delay and the average delivery ratio of routing optimization strategy were compared with those of other routing strategies in related literatures. The results show that the strategy proposed has smaller average energy consumption, shorter average delay and higher average delivery ratio, gaining better energy consumption optimization effect.

Key words: mobile social network, optimal energy efficiency routing, community, optimal stopping, optimal relay node

1 引言

近年来, 随着移动网络不断发展, 新的移动网络技术(如宽带无线技术、定位技术、路由技术等)得到持续发展和提高, 便携式无线设备(如智能电

话、iPad、移动 PC 及车载传感器等)也迅速普及。通常在移动网络中, 无线设备在缺乏网络基础设施的情况下进行通信; 另一方面, 无线设备频繁移动引起无线连接的快速变化和端到端路由的经常改变, 而传统无线路由协议是面向网络始终连通设计

收稿日期: 2016-10-08; 修回日期: 2017-03-23

通信作者: 王淦, 7482227@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61562006, No.61262003); 广西自然科学基金资助项目(No.2016GXNSFBA380181, No.2015GXNSFBA139249, No.2013GXNSFGA019006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61562006, No.61262003), The Natural Science Foundation of Guangxi Province (No. 2016GXNSFBA380181, No.2015GXNSFBA139249, No.2013GXNSFGA019006)

的，在一定程度上不适应间歇性连接的端到端路径和不断变化的拓扑结构，从而导致信息从源节点传递到目的节点的延时较长，丢失概率较大。因此，在连接不断变化的移动网络中，无线设备以携带一转发方式传递信息，按照移动网络的间歇性连接特征设计路由策略以保证信息传递所需的服务质量（QoS, quality of service）成为移动网络发展的必然要求。另外，无线设备选择能效高、延时短的下一跳中继节点来传递信息是满足移动网络 QoS 和节省移动网络能耗的关键，也是一个极具挑战性的问题。

在移动网络中，2 个无线设备进入彼此传输范围并建立连接后就能相互通信，而利用无线设备的随机相遇机会传递信息的路由策略称为机会路由。机会路由策略确保信息在无线设备的随机联系中被传递。为了提高机会路由的 QoS（如减小延时、增大传递率等），无线设备实行多个副本信息的冗余传递。但是，传递的副本数量受缓冲区容量和带宽大小的约束，机会路由需要平衡 QoS 和冗余。另外，无线设备的电池能量有限，传递信息的多个副本极大地浪费电池能量，对绿色移动网络的构建产生严重影响^[1]。因此，在通信过程中只传递信息的单个副本成为减少传递能耗成本的较佳选择。然而，路由策略不仅要减少传递能耗，而且要减小传递延时和提高传递可靠性，从而保证信息在移动网络中的有效传递。

在移动网络中，大量的无线设备由人携带，携带无线设备的人称为移动用户。移动用户的行为具有明显的社会模式，其行为特征保持越长久，移动用户之间的社会关系越牢固^[2,3]。具有社会属性的移动用户构成的移动网络称为移动社会网络。研究者们提出利用移动社会网络的固有社会属性引导信息传递，从而更加有效地控制信息传递的副本数量，保证 QoS。在移动社会网络中，不同移动用户之间联系的时刻、位置、频率和持续时间称为联系历史。如果能够有效分析移动用户之间的联系历史，准确预测移动用户之间的联系情况和移动行为，那么就能根据预测信息来获得路由选择最优中继节点的标准，最小化传递能耗，保证信息传递的 QoS，从而促进信息的高效和可靠传递。例如网络中与其他移动用户联系更频繁的某个移动用户，会拥有更多机会将信息发送给不同的移动用户，更适合作为传递信息的中继节点。

在移动社会网络中，多个移动用户因共同兴趣

或需要频繁地访问相同的地方，如同班级的学生经常在同一个教室学习相同课程、相同兴趣的顾客总是去相同的商店购物。移动用户以较高的概率在某个地方联系一群特定的移动用户，该群体结构保持稳定，其联系的地方称为社区^[4]。访问同一社区的移动用户在该社区内拥有更强的联系，具有更多的信息传递机会。

因此，本文利用移动用户的社会属性研究移动社会网络中基于社区的单副本信息传递路由策略。文献[5,6]也提出基于社区的路由策略。其中，文献[5]通过时齐半马尔可夫（time homogeneous semi-Markov）模型准确预测移动用户在社区内的相遇时刻和概率来选择路由中继节点，提高传递率，降低传递延时，文献[6]通过反向 Dijkstra 算法计算最短路由路径，实现减小传递延时和增大传递率的目标。本文引入文献[6]的方法构建基于社区的连通网络，利用马尔可夫链模型分析信息在连通网中传递的过程，然后构建最优能效路由选择最优中继节点的最优停止规则问题，最后利用最优停止理论求解该问题，获得最优中继的最优期望报酬，实现最优能效路由策略。

2 相关研究工作

在移动网络中，路由策略设计是一个非常活跃的研究领域。自移动网络的经典路由策略 Epidemic^[7]于 2000 年提出以来，相当多的研究者关注移动网络的路由策略设计。如 Epidemic 路由^[7]采用相遇就复制的洪泛传递机制，其特点是延时小、开销大。为了减小路由开销，基于历史相遇和传递信息概率的路由策略——PROPHET^[8]于 2004 年被提出。文献[9]提出限制信息传递的副本数量以减小能耗的喷雾等待（spray and wait）路由。更进一步，文献[10]提出改进的喷雾聚焦（spray and focus）路由，减小路由延时。随着研究的不断深入，研究者发现移动用户的移动特征具有强烈的社会聚集性。因此，研究者利用移动用户的社会属性来设计信息传递的路由策略。

文献[11]提出基于小世界动力学的 SimBet 路由，该路由利用社会相似度（similarity，即移动用户与目的节点具有的相同邻居数量）和预估关联度（betweenness，即移动用户与其他移动用户的联系强度值）构成的加权和函数作为选择中继节点的功效函数，从而减小信息传递开销。文献[12]提出基

于社区的洪泛传输机制,设计一个利用临时信息形成强联系社区的分布式算法,通过选择和删除社区联系门户以控制冗余,减少传递数据分组的跳数,提高数据分组的传递率。文献[13]利用移动社会网络的社会和结构机制——集中性(centrality)和社区性(community),设计基于社会结构的信息传递算法——BUBBLE,提高信息传递率,减少传递成本。文献[14]通过侦测移动用户之间的联系规律,获得每个移动用户的直接和间接联系的移动用户集,利用移动用户集中移动用户联系的不同周期性规律来传递信息,提高传递能效和传递率。文献[15]提出社会移动意识路由策略(SMART, social and mobile-aware routing strategy),利用分布式社区划分算法将网络分割成与用户位置和日常交互相关的小社区,社区内的路由策略采用衰减的社会相似度和中心度卷积值,避免出现盲区和死胡同问题,社区间采用边缘节点作为中继节点,有效减少平均成本,提高传递率。文献[16]通过分析社交网络节点的移动模型,提出基于分簇结构的社交延时网络路由协议,有效控制数据分组冗余副本的产生,减小传递延时,提高传递率。文献[17,18]提出利用社区家来扩散信息的社区家扩散路由算法,社区家有更高的优先权扩散给定数量的信息副本到网络,获得更小的传递延时和更高的传递率。文献[19]提出集中式和分布式单副本信息传递算法,利用分布式的递归最大似然法估计相遇概率减小传递延时、提高传递率。文献[20]推导具有最小能耗的最优传递副本、最优目标热点集合和最优路由路径,减少能耗和延时。文献[21]证明移动用户的有限探索能提高网络性能,提出基于预期理论和预期效用理论的探索机制,模拟结果证明该方法能提高信息传递率。

研究者们针对不同的场景和不同的网络模型,提出基于各种优化目标的路由策略和算法以改进信息在移动网络中传递的效率,其主要目标是减少传递延时^[5-7,10,16-19]、降低传递能耗^[8,9,11-15]、提高传递率^[5-7,12-19]。

上述路由策略分为以下几类:1)按是否记录历史信息可分为不记录历史信息^[7,9-11,17,18]和记录历史信息^[5,6,8,12-16,19-21];2)按信息副本的数量可分为传递信息的单个副本^[5,6,8,11,14,15,19,21]和传递信息的多个副本^[7,9,10,12,13,16-18,20];3)按利用的因素可分为利用移动用户的相遇概率^[8,19]、利用移动用户的传递功效^[10,11]和利用移动用户的社会属性^[5,6,12-18,20,21]。

本文利用移动用户的社会属性研究在移动社会网络中传递单副本信息的能耗最小化问题,提出基于社区的最优能效路由策略。文献[22]也利用最优停止理论获取机会网络的最优路由,提出的路由策略利用的是移动用户之间相遇的平均时间向量,而本文的路由策略采用移动用户访问社区的概率。在实际应用中,移动用户的移动行为呈现强烈的社会属性,具有社会聚集性,所以本文利用移动用户聚集的社区特征实现最优能效路由策略。概率是描述行为的有效数据,经常被用于各种情景下的问题表征,具有直观、方便和实用的特点。因此,本文通过移动用户访问社区的概率来设计信息传递的能效路由策略。

本文的主要贡献如下:1)利用移动用户的社会属性研究移动社会网络的路由策略,分析移动用户访问社区的概率对信息传递的能耗和延时影响;2)构建基于移动用户访问概率的社区连通网,利用马尔可夫链获取信息在连通网中传递的期望能耗和期望延时;3)构建最小化能耗和保证延时的最优能效路由停止规则问题,获得最优中继节点的最优期望报酬,利用最优停止理论形成基于社区的最优能效路由策略。

3 网络模型和问题描述

3.1 网络模型

在一个移动社会网络中,假设存在 U 个移动用户和 H 个社区。其中,移动用户集 $\mu = \{1, 2, \dots, u, \dots, U\}$, 社区集 $\eta = \{1, 2, \dots, h, \dots, H\}$, 且 $H \ll U$ 成立。假定每个移动用户频繁地访问其中某些社区,对其他社区则较少访问。该假定符合实际情况,如某班级的学生经常去某些教室上课,到某些实验室做实验,其他不相关的教室和实验室则较少去。假定每个社区都存在一个用于存储社区信息(如访问社区的移动用户编号、移动用户访问社区的概率、社区间的联系概率等)的虚拟投掷盒。虚拟投掷盒是长时间置于社区的无线接入设备,如移动车载网络的路边单元(RSU, road side unit)、Wi-Fi网络的接入点(AP, access point)。文献[6,17]也采用虚拟投掷盒来存储社区信息。假定网络系统的时间被划分成长度固定为 τ 的时隙周期,移动用户访问社区的时间间隔服从时隙周期 τ 上的概率分布,且每次访问社区的持续时间长度大于该移动用户与社区内其他移动用户或虚拟投掷盒交换信息所需要的时间。

间长度。移动用户在社区外相遇时的联系持续时间短，所以无法传递信息。本文基于社区的网络模型如图 1 所示。

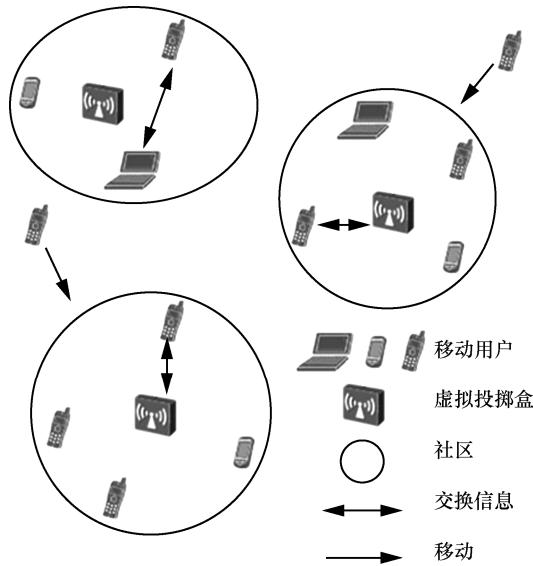


图 1 基于社区的网络模型

3.2 问题描述

本文研究信息从源节点传递到目的节点的路由问题。源节点携带信息到达某个社区，将选择同一时间访问该社区的其他高效(能耗低、延时小)的移动用户作为中继节点来传递信息。如果一直未发现满足要求的中继节点，那么源节点在离开社区时将该社区的虚拟投掷盒作为中继节点，或继续携带信息到下一个社区。接收该信息的中继节点仍然选择下一个高效的中继节点来传递信息，直到信息到达目的节点。在基于社区的移动社会网络中，信息通过移动用户访问不同的社区进行传递。因此，路由中的源节点 S 、目的节点 D 和中继节点 I 都与社区密切相关。源节点 S 产生信息时所在的社区为源节点社区；目的节点 D 的访问概率最大的社区是目的节点社区；中继节点 I 接收信息后所访问的下一个社区为中继节点社区。显然，路由策略需要获得信息在社区间传递的期望能耗和期望延时，确保携带信息的节点总是选择期望能耗低、期望延时小的中继节点来传递信息，促进信息在没有确定端到端路径的情况下，沿着最优能效路径被传输，直到目的节点。

4 基于社区的最优能效路由策略

在移动社会网络中，移动用户以一定的概率访

问不同的社区。访问概率值随着移动用户的移动行为变化而不断改变，直到移动用户形成稳定的行为规律后趋于恒定。如果移动用户的行为规律产生新的变化，那么移动用户将更新后的概率值发送给相应社区的虚拟投掷盒。因此，本文通过移动用户访问社区的概率来构建基于社区的连通网（简称社区连通网）。

4.1 社区连通网的构建

定义频繁访问同一社区的所有移动用户为该社区的移动用户集 $M_h = \{u | \lambda_{u,h} \geq \varepsilon, u \in \mu, h \in \eta\}$ 。其中， $\lambda_{u,h}$ 是移动用户 u 访问社区 h 的概率，通常根据历史联系进行估计， ε 是预先设定的概率阈值。移动用户 u 频繁访问社区 h 称为移动用户 u 属于社区 h ，定义移动用户 u 所属的社区数量为 Q_u 。一个移动用户至少访问一个社区，也会因不同兴趣或需要访问多个社区，因此， $Q_u \geq 1$ 。移动用户访问不同社区促进信息的有效传递，形成在社区间传递信息的桥梁。移动用户 u 访问社区 h 后再访问社区 h' ，将社区 h 的信息传递到社区 h' 。定义访问社区 h 和 h' 的移动用户 u 为社区 h 和 h' 的联系，则社区 h 和 h' 的所有联系称为联系集 R ，且 $R = M_h \cap M_{h'}$ 。因此，以社区为顶点，以联系集为弧，一个移动社会网络成为一个基于社区的连通网络。假定移动用户访问社区的时间间隔服从指数分布，根据文献[6]，社区 h 和 h' 之间的联系概率 $r_{h,h'}$ 如式(1)所示。一个社区数量 H 为 4 的社区连通网如图 2 所示。

$$r_{h,h'} = \frac{\sum_{u \in R} \lambda_{u,h}}{1 + \sum_{u \in R} \left(\frac{\lambda_{u,h}}{\lambda_{u,h'}} \right)} \quad (1)$$

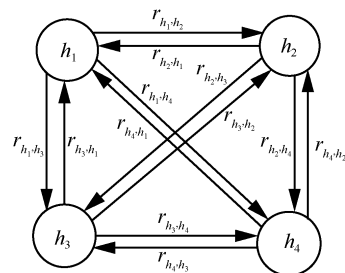


图 2 基于社区的连通网

4.2 社区连通网中传递信息的期望能耗和期望延时

在社区连通网中，携带信息的移动用户到达某个社区，将在该社区内选择最优中继节点来传递信息；接收信息的中继节点继续选择下一个最优中继

节点来传递信息，直到信息到达目的节点。其中，最优中继节点是指该移动用户或虚拟投掷盒能在保证传递延时的前提下，最小化信息传递能耗的中继节点。因此，选择最优中继节点需要获取信息在社区连通网中传递的期望能耗和期望延时。在社区连通网中，信息的位置由移动用户从一个社区转移到另一个社区，其位置变化是一个在时间上连续的过程。所以时间连续的马尔可夫链模型被用来分析信息在连通网中传递的过程，从而获得信息在连通网中传递的期望能耗和期望延时。在马尔可夫链中，状态描述某一事件在某个时刻（或时期）出现的结果。在社区连通网中，信息的传递是主要事件，信息位置的改变是事件的结果。根据 3.2 节的分析，社区是信息所处的位置，包括源节点 S 、中继节点 I 和目的节点 D ，因此，社区连通网中的社区与马尔可夫链中的状态密切相关。定义信息经过的所有社区为社区集，则社区集是马尔可夫链的状态，社区集的元素是状态的元素。信息到达一个新社区称为一种状态，信息从一个社区传递到另外一个社区称为状态转移。目的节点接收信息的状态称为吸引状态，信息在源节点或中继节点时的状态称为非吸引状态，包含所有状态的集合称为状态空间。在一个社区数量 H 为 4 的社区连通网中，信息从源节点传递到目的节点的状态转移过程如图 3 所示。

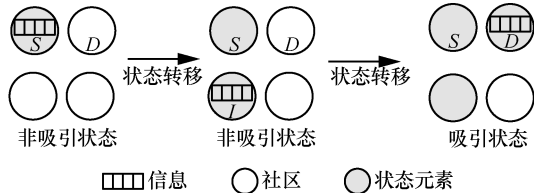


图 3 信息传递的状态转移过程

信息从一个社区传递到另外一个社区对应非吸引状态 π 转移到另外一个状态 π' 。若到达的社区是目的节点，则状态 π' 是吸引状态；否则是非吸引状态。状态 π 转换到状态 π' 的速率称为状态转移速率，其值为

$$\varphi_{\pi,\pi'} = \sum_{x \in \pi, y \in \pi'} r_{x,y}, \quad |\omega|=1, |\pi'| - |\pi|=1, \text{且 } D \notin \pi \quad (2)$$

其中， $\omega = \pi' - \pi$ ， $|\omega|$ 、 $|\pi|$ 和 $|\pi'|$ 分别是状态 ω 、 π 和 π' 包含的社区元素数量。若不满足式(2)的条件，则 $\varphi_{\pi,\pi'}$ 的值为 0。 $r_{x,y}$ 是社区 x 与社区 y 的联系概率，也是信息从社区 x 传递到社区 y 的概率，在式(1)中定义。

在实际应用中，多数移动用户愿意相互帮助以快速传递信息，从而减小自己所需信息的传递延时，但也存在不愿意传递信息的少数移动用户，如电池能量即将耗尽的移动用户、自私的移动用户等。假定移动用户或虚拟投掷盒传递信息的概率为 p_y (若 y 是目的节点，则 p_y 的值为 1)。根据文献[23]，一种状态 π 转换到其他任何一种状态 π' 的概率 $\Phi_{\pi,\pi'}$ 如式(3)所示。

$$\Phi_{\pi,\pi'} = \begin{cases} \frac{\sum_{x \in \pi, y \in \pi'} p_y r_{x,y}}{\bar{\varphi}_\pi}, & \bar{\varphi}_\pi \neq 0, |\omega|=1, \\ & |\pi'| - |\pi|=1, \text{且 } D \notin \pi \\ 1 - \sum_{\pi' \in \Omega} \Phi_{\pi,\pi'}, & \bar{\varphi}_\pi \neq 0, \text{且 } \pi = \pi' \\ 1, & \bar{\varphi}_\pi = 0, \text{且 } \pi = \pi' \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中， Ω 是状态空间域， $\bar{\varphi}_\pi = \sum_{\pi' \in \Omega} \varphi_{\pi,\pi'}$ 是从一种状态 π 转换到 Ω 空间域中其他所有状态 π' 的状态转移速率之和。根据式(3)获取所有非吸引状态之间的转移概率矩阵 \tilde{E} ，以及从所有非吸引状态到所有吸引状态的转移概率矩阵 \tilde{A} 。若单位矩阵为 \hat{I} ，则矩阵 $\hat{N} = (\hat{I} - \tilde{E})^{-1}$ 的元素表示从一种非吸引状态转移到另外一种非吸引状态的期望次数。信息从源节点 S 传递到目的节点 D 的期望能耗 $E_{S \rightarrow D}$ 是信息从源节点产生开始，通过其他中继节点传递到目的节点的期望能耗之和，其值为

$$E_{S \rightarrow D} = \sum_{x \neq D} \tilde{E}_{x,D} \quad (4)$$

其中， $\tilde{E}_{x,D}$ 是以社区 x 为中继节点来传递信息到目的节点 D 的期望能耗，其值如式(5)所示。

$$\tilde{E}_{x,D} = \sum_{\pi' \in \Omega_T} (E n_x^{\pi'} n_{\pi_S, \pi'}), \quad x \neq D \quad (5)$$

其中， Ω_T 是所有非吸引状态构成的空间域； $n_{\pi_S, \pi'}$ 是矩阵 \hat{N} 的元素，表示从初始的非吸引状态 π_S (包含源节点 S 的初始状态) 转移到其他非吸引状态 π' 的期望次数； $E n_x^{\pi'}$ 是在状态 π' 下以社区 x 为中继节点的期望能耗，包括 2 种情况：1) 若状态 π' 包含社区 x ，则 $E n_x^{\pi'}$ 是以社区 x 为中继节点发送信息的期望能耗(发送终端期望消耗的能量)，其值为信息从社区 x 传递到社区 y 的概率与发送能耗累加的乘积，

即 $E n_x^{\pi'} = \sum_{y \in (\pi' - \pi')} \left(\frac{p_y r_{x,y}}{\bar{\varphi}_{\pi'}} E f_{x,y} \right)$ ， $E f_{x,y}$ 是从社区 x 传递

单位信息到社区 y 的发送能耗；2) 若状态 π' 不包含社区 x ，则 $En_x^{\pi'}$ 是以社区 x 为中继节点接收信息的期望能耗（接收终端期望消耗的能量），其值为信息从社区 y 传递到社区 x 的概率与接收能耗累加和的乘积，即 $En_x^{\pi'} = \sum_{y \in \pi'} \left(\frac{p_y r_{y,x}}{\bar{\varphi}_{\pi'}} Er_{x,y} \right)$ ， $Er_{x,y}$ 是从社区 y 传递单位信息到社区 x 的接收能耗。其中， p_x 是社区 x 愿意传递（即接收）信息的概率（若 x 是目的社区，则 p_x 的值为 1）， $\bar{\varphi}_{\pi'} = \sum_{\pi \in \Omega} \varphi_{\pi, \pi'}$ 。

于是有

$$En_x^{\pi'} = \begin{cases} \sum_{y \in (\pi' - \pi)} \left(\frac{p_y r_{x,y}}{\bar{\varphi}_{\pi'}} Ef_{x,y} \right), & x \in \pi' \\ \sum_{y \in \pi'} \left(\frac{p_y r_{y,x}}{\bar{\varphi}_{\pi'}} Er_{x,y} \right), & x \notin \pi' \end{cases} \quad (6)$$

定义从源节点 S 传递信息到目的节点 D 的期望延时 $T_{S \rightarrow D}$ 为

$$T_{S \rightarrow D} = \sum_{\pi \in \Omega} t_{\pi} n_{\pi_S, \pi'} \quad (7)$$

其中， t_{π} 是信息停留在非吸引状态 π' 的持续时间，其值是状态 π 转换到其他状态 π'' 的转移速率之和的倒数，即 $t_{\pi} = \left(\sum_{\pi'' \in \Omega} \varphi_{\pi, \pi''} \right)^{-1}$ 。

综上，信息在社区连通网中传递的期望能耗和期望延时已在式(4)和式(7)中定义。

4.3 最优能效路由与最优停止问题的关联

在移动社会网络中，信息通过移动用户在不同社区间的移动进行传递，而传递需要消耗能量，所以节省能量是最优能效路由设计的重点。同时，信息具有生命周期，超出延时未被传递到目的节点的信息将被丢弃，满足延时约束是设计有效路由的关键。在移动社会网络中，相同比特的信息在不同的移动用户之间传递会消耗同等能量。节省传递能耗就必须减少信息传递的跳数，即减少中继节点的数量。然而，为了获得更高效（即传递信息到目的节点的更少跳数）的中继节点，移动用户将携带信息等待更长时间，从而增加信息传递的延时，减小信息到达目的节点的概率。这里存在 2 种极端方法：1) 不考虑能耗因素，移动用户将信息分发给每个相遇且未接收过该信息的其他移动用户，这是一种简单的洪泛传输机制，该机制的传递延时最短，传递率和传递能耗最高；2) 不考虑延时因素，源节点一

直携带信息，直到遇见目的节点才发送信息，该机制的传递能耗最小，但传递延时长，大量信息因超出延时被丢弃，传递率小。移动社会网络的路由需要兼顾节省能耗和增大传递率。因此，本文研究在满足给定延时约束的前提下，最小化网络能耗的路由策略。

在移动社会网络中，移动用户根据自己的兴趣或需要访问特定的社区，访问概率服从某种分布。当携带信息的移动用户到达一个社区，该移动用户将同时访问该社区的其他移动用户作为中继节点的选择目标，选择标准是移动用户是否具有更优的能效和更少的延时，从而获得更小的能耗和延时综合成本。若社区当前存在愿意传递信息的最优中继节点，则将信息发送给该中继节点；否则继续携带信息。若移动用户一直未发现愿意传递信息的最优中继节点，则在离开社区时将信息发送给该社区的虚拟投掷盒，或继续携带信息到下一个社区，或因信息超出延时将其丢弃。若虚拟投掷盒接收信息，则从当前访问所在社区的移动用户中选择能耗和延时综合成本最小且愿意传递信息的中继节点来传递信息。若虚拟投掷盒一直未发现满足要求的中继节点，则信息因超出延时被丢弃。显然，移动用户或虚拟投掷盒持续侦测当前社区的其他中继节点传递信息到目的节点的期望能耗和期望延时的综合成本，获得最小化期望综合成本的观察停止时刻，然后发送信息以实现最小化综合成本的期望目标。这是最优停止理论中关于决策者基于连续观察到的随机变量，以最大化报酬或最小化成本为目标，决定选择一个合适的时刻以采取给定行为^[24]的最优停止问题。所以，移动用户或虚拟投掷盒选择最优中继节点的问题被转换为一个最优停止规则问题。该问题的各要素与最优停止问题的各要素对应关系如图 4 所示。

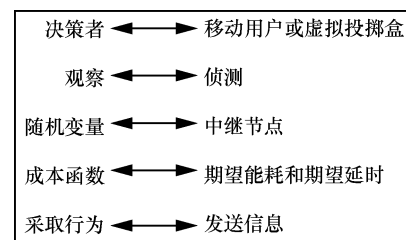


图 4 最优中继节点选择的最优停止问题要素

4.4 最优能效路由的最优停止规则问题构建

最优能效的路由必须在保证传递延时的前提

下, 最小化传递能耗。因此, 定义信息从源节点 S 传递到目的节点 D 的路由综合成本 $C_{S \rightarrow D}$ 为

$$C_{S \rightarrow D} = \alpha B E_{S \rightarrow D} + \beta T_{S \rightarrow D} \quad (8)$$

其中, B 表示信息的大小; $\alpha \geq 0$ 和 $\beta \geq 0$ 是能耗和延时的权重系数, 表征其重要程度。若 $\alpha = 0$, 则路由成本不考虑能耗; 若 $\beta = 0$, 则路由成本不考虑延时。式(8)也适用于计算中继节点 I 传递信息的综合成本, 即假设中继节点 I 为新的源节点 S 。

如果源节点 S 产生或接收到目的节点为 D 的信息后等待中继节点 I 的持续时间为 $N\tau$ (N 是等待的时隙周期数量), 那么中继节点 I 对综合成本的优化值 (即减小值) X_N 为

$$\begin{aligned} X_N &= C_{S \rightarrow D} - (C_{S \rightarrow I} + C_{I \rightarrow D}) \\ &= \alpha B E_{S \rightarrow D} + \beta T_{S \rightarrow D} - (\alpha B (E_{f_{S,I}} + \\ &\quad E_{r_{S,I}} + E_{I \rightarrow D}) + \beta T_{I \rightarrow D}) \\ &= \alpha B (E_{S \rightarrow D} - E_{f_{S,I}} - E_{r_{S,I}} - \\ &\quad E_{I \rightarrow D}) + \beta (T_{S \rightarrow D} - T_{I \rightarrow D}) \end{aligned} \quad (9)$$

为了获得最优中继节点, 源节点 S 不断侦测与其相遇的所有中继节点。定义源节点 S 在第 n 个时隙周期的侦测变量序列 $O_n = \{t_n, X_n\}$ 。其中, t_n ($t_n = n\tau$) 为侦测的持续时间序列, X_n (参见式(9)) 是侦测到的优化值序列。设源节点 S 至少侦测一个时隙周期, 定义时隙周期数量 N 为源节点 S 停止侦测的时间编号 (简称时间), 则 $1 \leq n \leq N$ 。定义源节点 S 停止侦测的时间集 $N^+ = \{N: N \geq 1\}$ 。源节点 S 对传输范围内的所有中继节点持续侦测 $N\tau$ 时长后, 选择优化值为 X_N 的中继节点来传递信息, 获得期望报酬 Y_N 。

$$Y_N = X_N - N\tau \quad (10)$$

最优能效路由的目标是最大化期望报酬 Y_N , 即

$$\begin{aligned} \max E[Y_N] \\ = \max E[\alpha B (E_{S \rightarrow D} - E_{f_{S,I}} - E_{r_{S,I}} - E_{I \rightarrow D}) + \\ \beta (T_{S \rightarrow D} - T_{I \rightarrow D}) - N\tau] \end{aligned} \quad (11)$$

最大化问题式(11)的目标是找到最优停止时间 N^* , 获得信息传递的最优综合成本, 在保证传递延时的前提下最小化传递能耗。因此, 移动用户或虚拟投掷盒选择最优中继节点的问题转化为最优停止规则问题。该问题的最优停止时间 N^* 为

$$N^* = \arg \sup_{N \in N^+} E[X_N - N\tau] \quad (12)$$

4.5 最优能效路由的最优停止规则存在证明与问题求解

求解最优停止规则问题式(11), 首先要证明式(11)存在最优停止规则。因此, 本文先给出命题 1。

命题 1 式(11)存在最优停止规则。

证明 根据文献[24], 如果满足

- 1) $E[\sup_n Y_n] < \infty$
- 2) $\lim \sup_{n \rightarrow \infty} Y_n \leq Y_\infty$ a.s.

则最优停止规则存在。

根据式(10)的定义可得在第 n 个时隙周期停止侦测的期望报酬 Y_n 的值为

$$Y_n = \alpha B (E_{S \rightarrow D} - E_{f_{S,I}} - E_{r_{S,I}} - E_{I \rightarrow D}) + \beta (T_{S \rightarrow D} - T_{I \rightarrow D}) - n\tau$$

根据式(4)得, $E_{S \rightarrow D} < \infty$, $E_{I \rightarrow D} < \infty$ 。根据式(6)得, $E_{f_{S,I}} < \infty$, $E_{r_{S,I}} < \infty$ 。根据式(7)得 $T_{S \rightarrow D} < \infty$, $T_{I \rightarrow D} < \infty$ 。

所以, $\alpha B (E_{S \rightarrow D} - E_{f_{S,I}} - E_{r_{S,I}} - E_{I \rightarrow D}) + \beta (T_{S \rightarrow D} - T_{I \rightarrow D}) < \infty$, 即 $Y_n < \infty$ 。

所以, $E[\sup_n Y_n] < \infty$ 成立, 条件 1) 满足。

当 $n \rightarrow \infty$, 存在 $-n\tau \rightarrow -\infty$, 则 $Y_n \rightarrow -\infty$ 。

显然, $Y_\infty = -\infty$ 。

则 $\lim \sup_{n \rightarrow \infty} Y_n \leq -\infty = Y_\infty$, 条件 2) 满足。

证毕。

根据文献[24], 当移动用户获得最优期望报酬 $V^* = \sup_{N \in N^+} E[Y_N]$ 时, 停止时间 N 是最优停止规则问题式(11)的解。因此, 最优停止时间 N^* 为

$$N^* = \min \{N \geq 1: Y_N \geq V^*\} \quad (13)$$

其中, 最优期望报酬 V^* 满足最优等式为

$$V^* = E[\max(X_N, V^*)] - \tau \quad (14)$$

该最优等式考虑移动用户或虚拟投掷盒携带信息时侦测和等待中继节点所耗费的时间成本, 该时间成本为时隙周期 τ 。式(14)将侦测获得的优化值 X_N 与最优期望报酬 V^* 的较大者作为新的最优期望报酬, 且优化值 X_N 在所有停止时间 N 上存在相同分布。于是, 式(14)转变为

$$\tau = E[\max(X_N - V^*, 0)] \quad (15)$$

该固定点等式利用文献[22]中的方法进行计算。该最优期望报酬 V^* 是携带信息的移动用户或虚拟投掷盒选择最优中继节点的依据。移动社会网络中的每条信息都通过最优中继节点来传递, 从而实现信息从源节点传输到目的节点的整条路由上传递能耗的最小化目标, 同时保证传递延时, 提高信息传递率。

4.6 最优能效路由策略

在移动社会网络中，移动用户以一定的概率访问网络中的社区。当移动用户 A 携带目的节点 D 的信息到达某个社区后，侦测该社区内当前其他移动用户传递信息到目的节点 D 的综合成本，获取其传递信息的期望报酬。如果移动用户 A 发现移动用户 B 的期望报酬大于或等于最优期望报酬 V^* ，且移动用户 B 愿意传递信息，则移动用户 A 停止侦测，将目的节点 D 的信息发送给移动用户 B。若移动用户 A 在该社区内一直未发现满足要求的移动用户，且信息未超时，则在离开社区时比较传递信息给虚拟投掷盒的期望报酬和携带信息进入下一个社区的期望报酬的大小，采取期望报酬大的行为；否则，丢弃信息。在移动社会网络中，移动用户或虚拟投掷盒根据该路由策略选择最优中继节点来发送信息，确保信息在最节省能耗和延时的路由上被传递，实现在保证延时前提下的最优能效效果。基于社区的最优能效路由策略描述如下。

- 1) 虚拟投掷盒收集移动用户访问社区的概率。
- 2) 根据式(1)计算社区间的联系概率。
- 3) 根据式(4)和式(7)计算信息在社区间传递的期望能耗和期望延时。
- 4) 若移动用户或虚拟投掷盒接收到目的节点为 D 的信息，则根据式(15)计算其最优中继节点的最优期望报酬 V^* ，执行步骤 5)；若移动用户访问社区的概率产生变化，则返回步骤 1)。
- 5) 若是移动用户携带信息，则执行步骤 6)；若是虚拟投掷盒携带信息，则执行步骤 7)。
- 6) 若移动用户在当前社区内发现期望报酬大于或等于最优期望报酬 V^* 的中继节点，且该中继节点愿意传递信息，则发送信息给中继节点；若移动用户在等待最优中继节点过程中信息超时，则丢弃信息；若在离开当前社区时未发现最优中继节点，则比较信息携带到下一个社区和传递给当前社区虚拟投掷盒的期望报酬的大小，采取相应的行为以获得更大的期望报酬。
- 7) 若虚拟投掷盒发现期望报酬大于或等于最优期望报酬 V^* 的中继节点，且该中继节点愿意传递信息，则发送信息给中继节点；若一直未发现最优中继节点且信息超时，则丢弃信息。

上述路由策略的时间复杂度主要集中在 2 个阶段，第 1 阶段是计算信息在社区间传递的期望能耗和期望延时；第 2 阶段是求解最优中继的最优期望报酬 V^* 。其中，第 1 阶段的信息在社区间的传递既

包括信息在一个社区间的直接传递，也包括信息通过其他社区中转的间接传递，其时间复杂度与整个网络的社区数量相关，为 $O(2^H)$ ， H 为社区数量。第 2 阶段的最优期望报酬 V^* 受最大延时约束，因为信息的等待时长不超过最大延时，其时间复杂度与最大延时相关，为 $O(D_m)$ ， D_m 为信息的最大延时。因此，最优路由策略问题的时间复杂度与求解第 1 阶段问题的时间复杂度直接相关。

然而，信息在社区间传递的期望能耗和期望延时通过社区间的联系概率进行求解，而社区间的联系概率根据移动用户访问社区的概率获得。移动用户访问社区的概率又根据历史联系信息求得，具有一定的稳定性，不会频繁变化。因此，期望能耗和期望延时的值不需要频繁求解。并且，其值可以通过离线的方式求解。此外，在一个移动社会网络中，社区数量 H 的值通常不会太大。如模拟实验中所取的社区数量 H 最大值为 14。

5 仿真结果与分析

本节对提出的基于社区的最优能效路由策略 (OEERBC, optimal energy efficiency routing strategy based on community) 进行仿真实验，并与相关文献的其他 3 种路由策略进行比较，分析和评价在社区数量 H 、移动用户数量 U 和最大延时 D_m 3 个参数值变化时平均能耗、平均延时和平均传递率的对比结果。

本文用于比较的 3 种路由策略分别是：1) 经典洪泛路由 (Epidemic)^[7]——该路由由传递信息的多个副本，移动用户分发信息给相遇且未接收该信息的每个移动用户，使网络中更多移动用户拥有该信息，从而增大信息传递到目的节点的概率，减小传递延时；2) 基于关联度和相似度功效的路由 (SimBet)^[11]——该路由传递信息的单个副本，当 2 个移动用户相遇，携带信息的移动用户将信息发送给另一个功效值更大（功效值的描述如文献[11]的第 2 节所示）的移动用户，并从自身的存储空间移除信息，减小能耗；3) 社区意识的机会路由 (CAOR, community-aware opportunistic routing)^[6]——该路由传递信息的单个副本，路由利用移动用户访问社区的概率获取社区间传递信息的最短延时，然后通过反向 Dijkstra 算法计算信息在社区之间传递的最短延时路径，减少延时。

在 OEERBC 中，能耗权重系数 α 和延时权重系数 β 的值对能耗效果产生影响。当延时权重系数 β 为 1，社区数量 H 为 14，移动用户数量 U 为 1 200，最大延时 D_m 为 100τ 时，能耗权重系数 α 对平均能

耗的影响曲线如图 5 所示。从图 5 中得出， α 值较小则平均能耗较高， α 值较大时平均能耗较低。在综合成本函数中，能耗值是从源节点 S 传递信息到目的节点 D 所消耗的总能量，延时值是信息从源节点 S 到目的节点 D 所经历的时隙周期 τ 的总数，能耗值的数量级别远小于延时值的数量级别。能耗权重系数 α 的值越大，能耗值在综合成本中所占的比重越大，表征减小能耗对综合成本的减少越重要。因此， α 值越大，路由的节能效果越好。

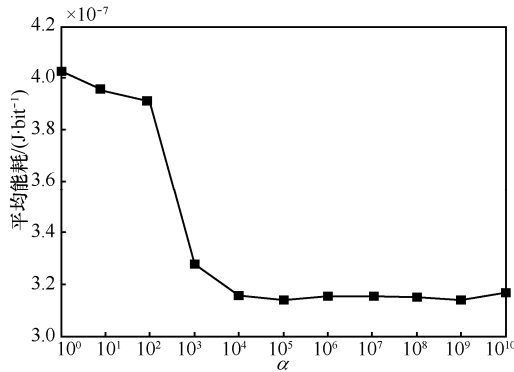


图 5 α 对平均能耗的影响

表 1 是模拟仿真实验中设置的参数值。其中，帮助概率 p_y 是指第 4.2 节中移动用户或虚拟投递盒 y 愿意传递信息的概率； Q_u 是第 4.1 节中移动用户 u 访问社区 h 的数量，即移动用户 u 所属的社区数量，其值为 1~5 的随机数； $\lambda_{u,h}$ 是第 4.1 节中移动用户 u 访问社区 h 的概率，其值为 0.1~0.2 的随机数。每条信息的大小分别为 1 000 byte、2 000 byte、3 000 byte、4 000 byte 和 5 000 byte，其大小值和产生时间随机。模拟实验中的信息总数量为 1 000 条，模拟时间总长度为 10 000 个时隙周期(τ)。

表 1 模拟仿真实验中设置的参数值

参数	描述	值
α	能耗权重系数	10 ⁴
β	延时权重系数	1
E_r	接收能耗/(J·bit ⁻¹)	10 ⁻⁹
E_f	发送能耗/(J·bit ⁻¹)	10 ⁻⁷
H	社区数量	8~14
U	移动用户数量	800~1 200
D_m	最大延时[τ]	80~120
p_y	帮助概率	1
Q_u	所属社区数量	1~5
$\lambda_{u,h}$	访问概率	0.1~0.2

5.1 平均能耗

平均能耗是网络中发送和接收信息的总能耗(J)与传递信息总量(bit)的比值。其中，传递信息总量指网络中传递的所有信息的比特数，既包括到达目的节点的信息，也包括超出延时被丢弃的信息。因为被丢弃的信息在传递过程中仍消耗能量。平均能耗越小，表明传输每比特信息所消耗的能量越少，能耗优化效果越好。

图 6 是社区数量 H 变化(8~14)时的平均能耗对比。为了获得移动用户数量 U 和最大延时 D_m 这 2 个参数变化时的影响，设置 2 个参数为以下 4 种情况：1) $U=1\ 000$, $D_m=80\tau$ ；2) $U=1\ 000$, $D_m=120\tau$ ；3) $U=800$, $D_m=100\tau$ ；4) $U=1\ 200$, $D_m=100\tau$ 。

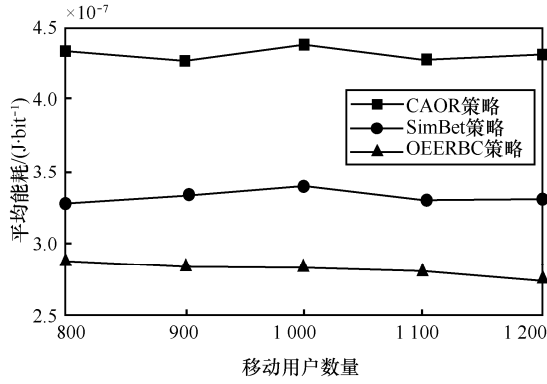
图 7 是移动用户数量 U 变化(800~1 200)时的平均能耗对比。为了获得社区数量 H 和最大延时 D_m 这 2 个参数变化时的影响，设置 2 个参数为以下 4 种情况：1) $H=8$, $D_m=100\tau$ ；2) $H=14$, $D_m=100\tau$ ；3) $H=10$, $D_m=80\tau$ ；4) $H=10$, $D_m=120\tau$ 。

图 8 是最大延时 D_m 变化(80 τ ~120 τ)时的平均能耗对比。为了获得移动用户数量 U 和社区数量 H 这 2 个参数变化时的影响，设置 2 个参数为以下 4 种情况：1) $U=1\ 000$, $H=8$ ；2) $U=1\ 000$, $H=14$ ；3) $U=800$, $H=10$ ；4) $U=1\ 200$, $H=10$ 。

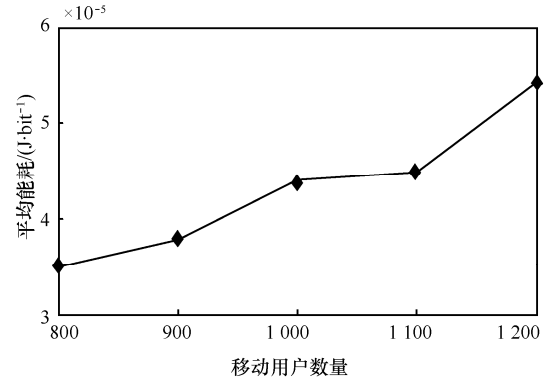
从图 6~图 8 中可观察到，OEERBC 的平均能耗最小，即具有最优的能效。OEERBC 以传递信息的期望能耗最小作为最优中继节点的选择标准，通过最优停止理论获得最优中继节点的最优期望报酬，即最小综合成本，从而实现传递能耗最小化的目标。Epidemic 的平均能耗最大，因为其相遇即传递的洪泛路由策略极大地增加传递信息的跳数，传递信息的跳数还随着移动用户数量的增加而增多。CAOR 不考虑传递信息的能耗成本，其主要目标是减小信息传递的延时，其平均能耗高于 OEERBC，但远小于 Epidemic。SimBet 选择功效值大的移动用户作为中继节点来传递信息，极大地减少传递信息的跳数，从而减小平均能耗，但其能耗高于 OEERBC。

5.2 平均延时

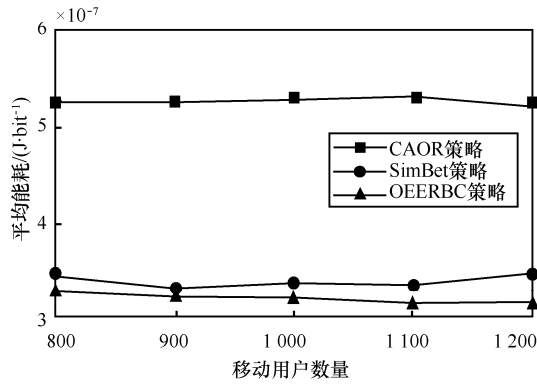
平均延时是传递延时总和(传递信息所耗费的时隙周期 τ 的数量)与传递信息总数的比值。其中，传递延时总和是网络中传递的每条信息的延时之和，传递信息总数指网络中传递的所有信息条数之和。网络中传递的信息既包括到达目的节点的信息，



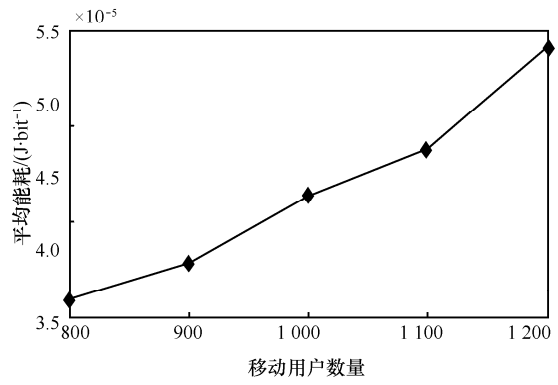
(a) $H=8, D_m=100r$, CAOR、SimBet和OEERBC策略



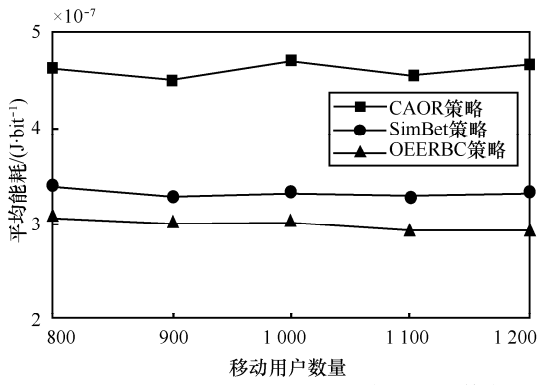
(b) $H=8, D_m=100r$, Epidemic策略



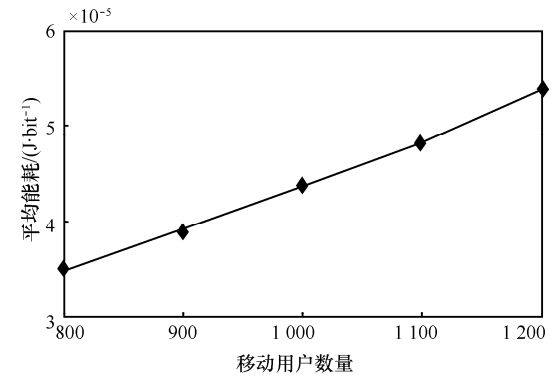
(c) $H=14, D_m=100r$, CAOR、SimBet和OEERBC策略



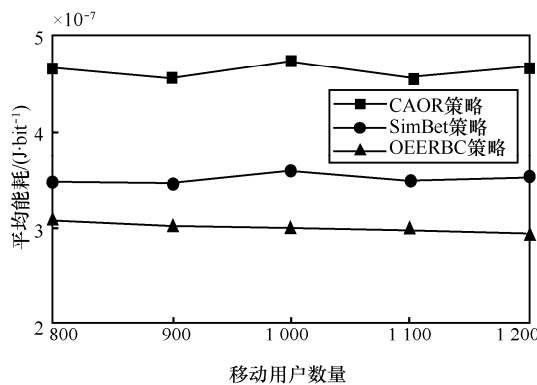
(d) $H=14, D_m=100r$, Epidemic策略



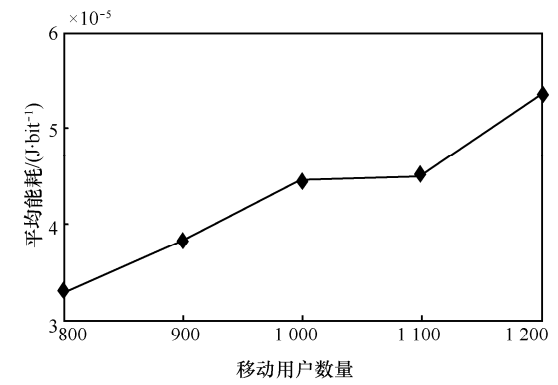
(e) $H=10, D_m=80r$, CAOR、SimBet和OEERBC策略



(f) $H=10, D_m=80r$, Epidemic策略

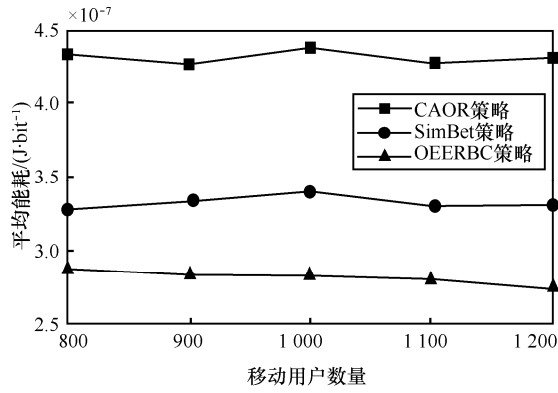


(g) $H=10, D_m=120r$, CAOR、SimBet和OEERBC策略

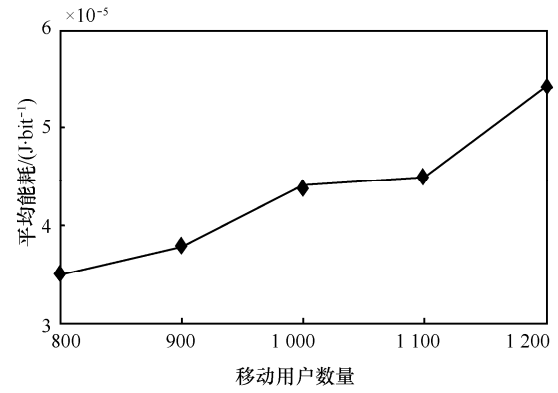


(h) $H=10, D_m=120r$, Epidemic策略

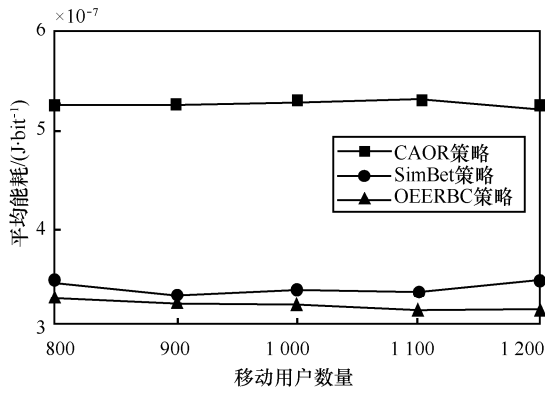
图 6 不同社区数量下的平均能耗对比



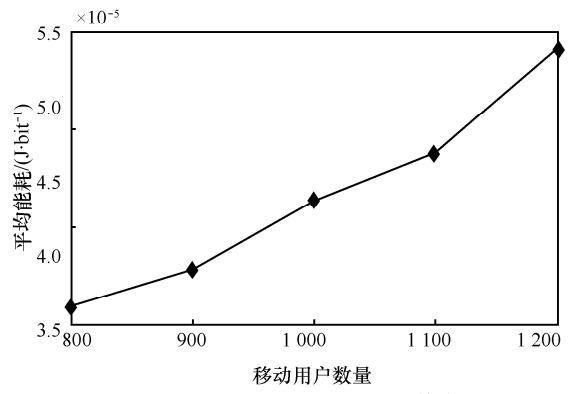
(a) $H=8, D_m=100\tau$, CAOR、SimBet和OEERBC策略



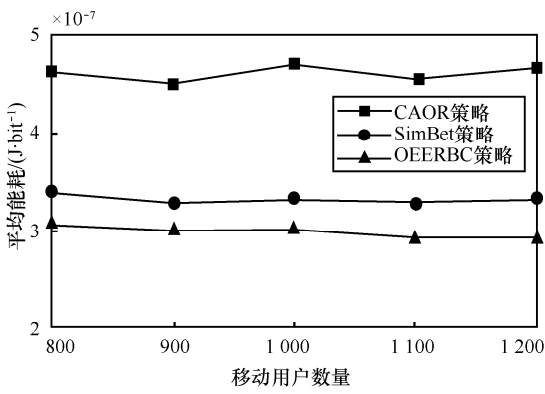
(b) $H=8, D_m=100\tau$, Epidemic策略



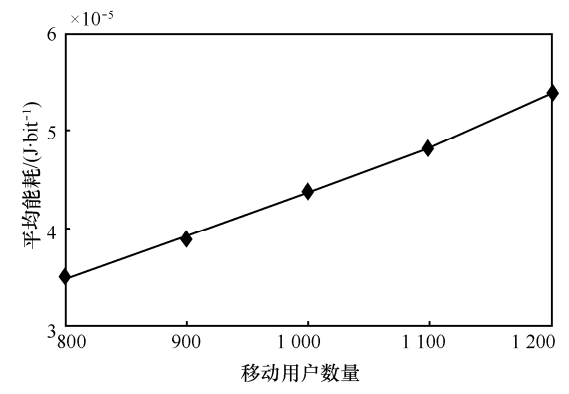
(c) $H=14, D_m=100\tau$, CAOR、SimBet和OEERBC策略



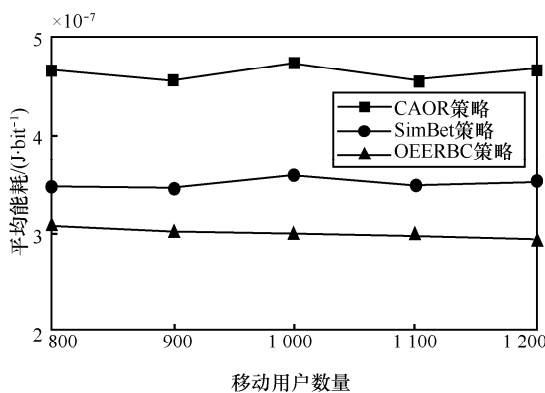
(d) $H=14, D_m=100\tau$, Epidemic策略



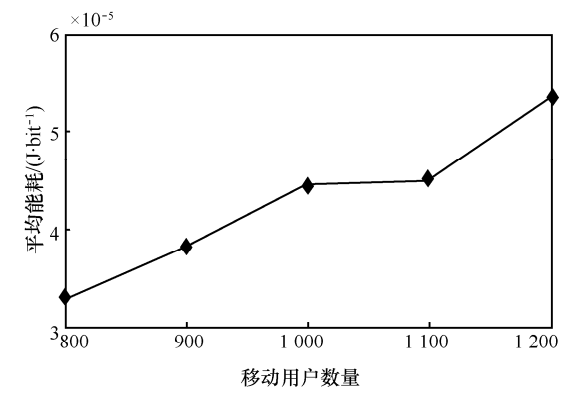
(e) $H=10, D_m=80\tau$, CAOR、SimBet和OEERBC策略



(f) $H=10, D_m=80\tau$, Epidemic策略



(g) $H=10, D_m=120\tau$, CAOR、SimBet和OEERBC策略



(h) $H=10, D_m=120\tau$, Epidemic策略

图 7 不同移动用户数量下的平均能耗对比

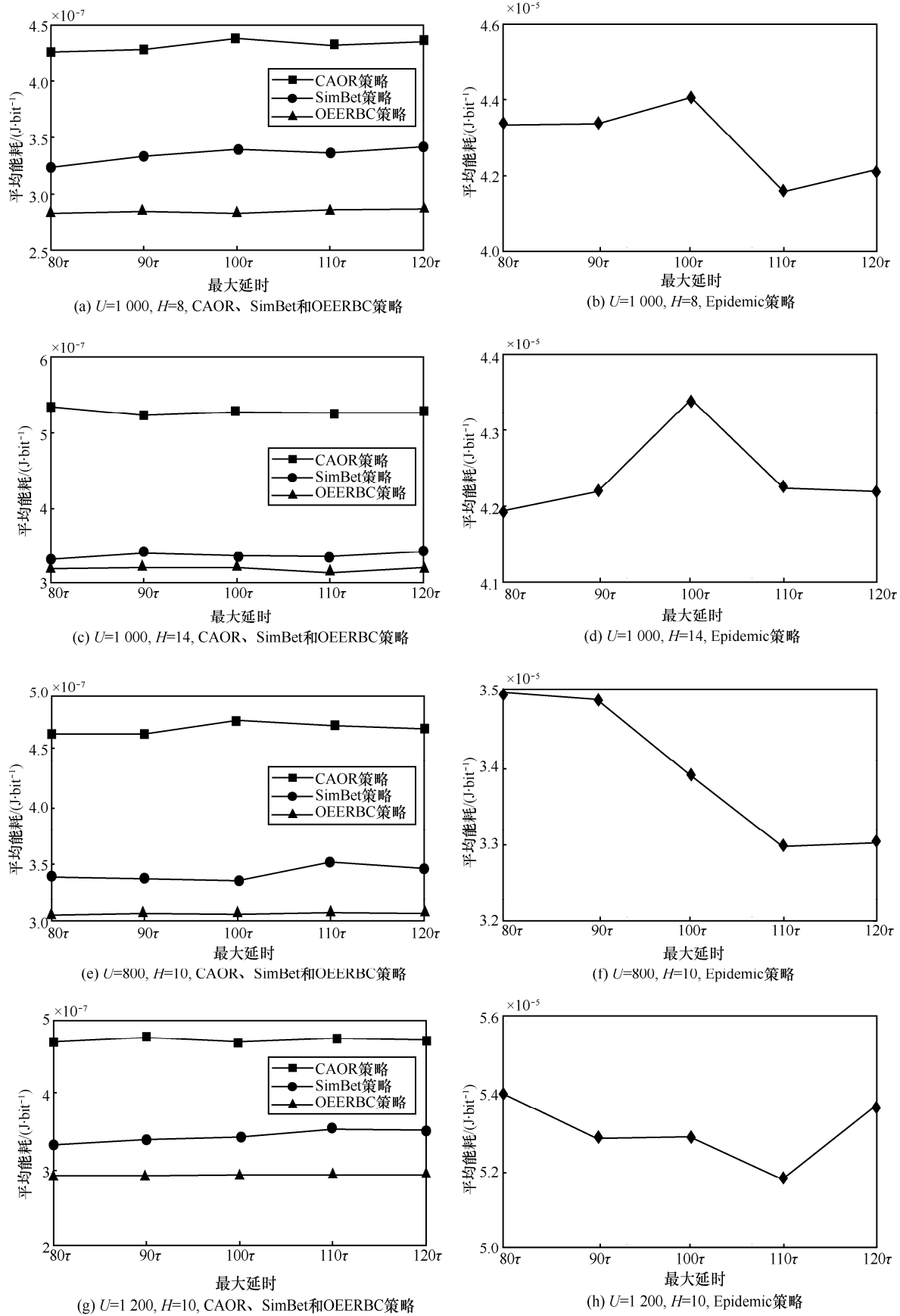


图 8 不同最大延时下的平均能耗对比

也包括超出延时被丢弃的信息。平均延时越小，表明从源节点传递信息到目的节点的时间越短，信息超出延时的概率越小。图 9~图 11 分别给出 3 个参数值变化时的平均延时对比结果，其参数设置对应图 6~图 8 的参数设置。

从图 9~图 11 中可观察到，Epidemic 的平均延时最小，SimBet 的平均延时最大，OEERBC

与 CAOR 的平均延时远小于 SimBet，但大于 Epidemic。Epidemic 中的移动用户利用与其相遇的其他每个移动用户来传递信息，极大地缩短信息的传递延时，因此，具有最小平均延时。OEERBC 将传递信息的期望延时作为选择最优中继节点成本函数的组成部分，从而将平均延时控制在较小范围内。SimBet 中的移动用户选择

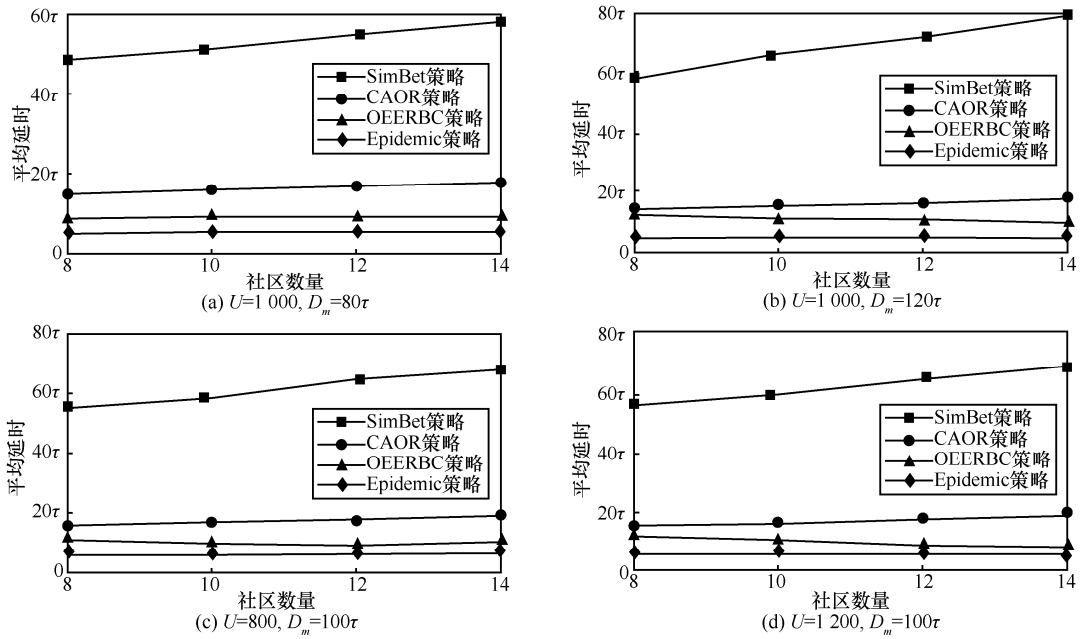


图 9 不同社区数量下的平均延时对比

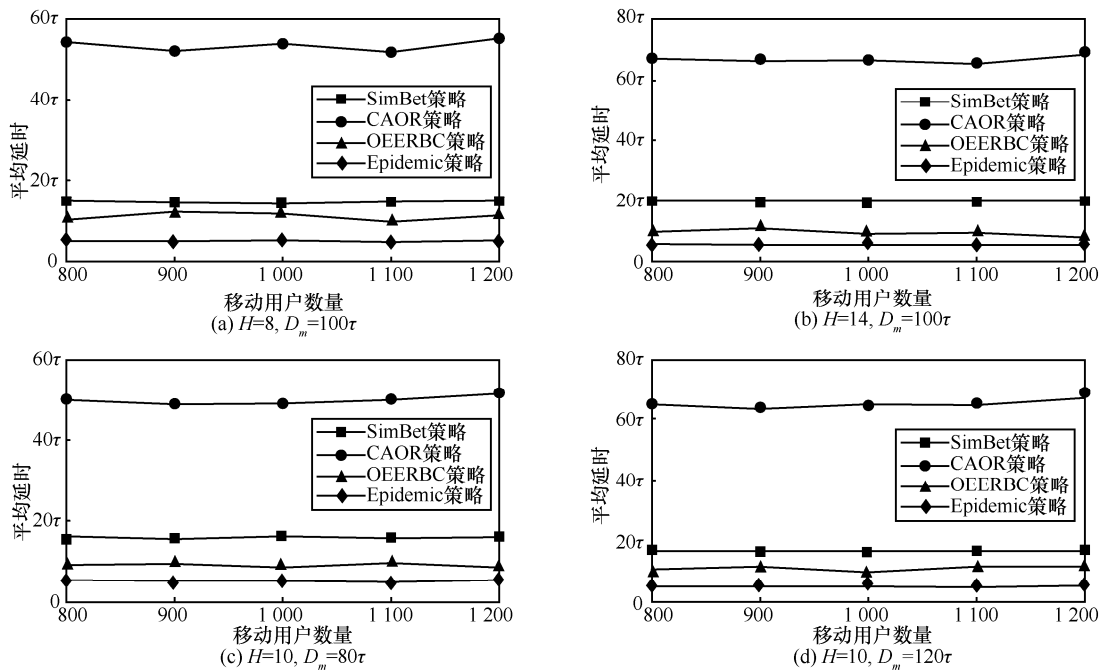


图 10 不同移动用户数量下的平均延时对比

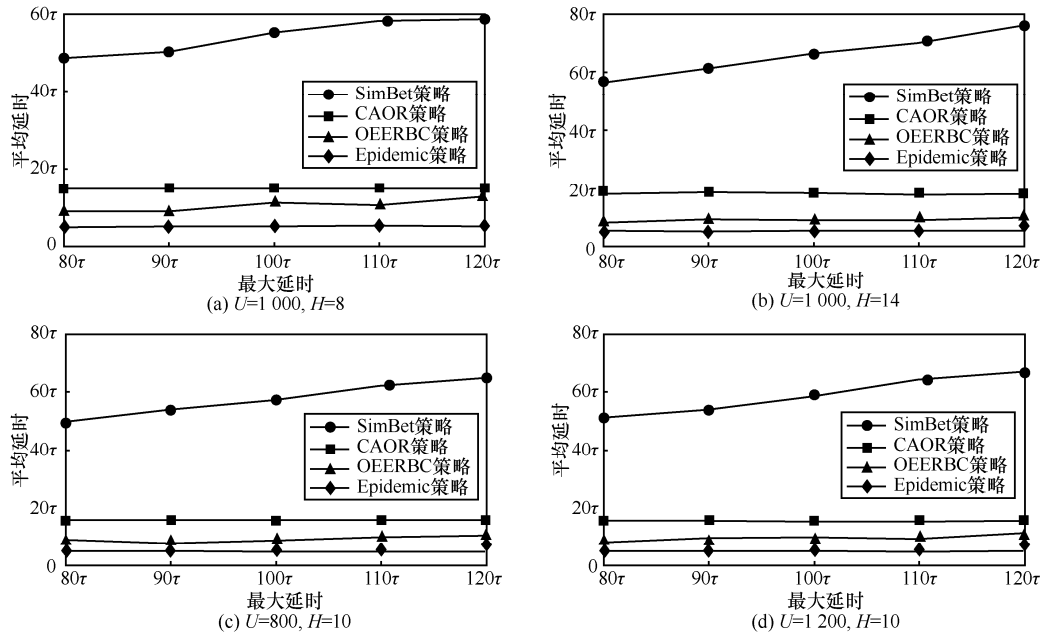


图 11 不同最大延时下的平均延时对比

功效值更大的其他移动用户来传递信息。因此，携带信息的移动用户需要等待更长时间以获得理想中继节点，甚至不能在最大延时时内相遇功效值更大的移动用户，使信息超出延时被丢弃，从而延长传递延时。

5.3 平均传递率

平均传递率是网络中到达目的节点的信息总量(bit)与传递的信息总量(bit)的比值。平均传递率越大，表明信息因超出延时被丢弃的数量越少。

图 12~图 14 分别给出 3 个参数值变化时的平均传递率对比结果，其参数设置对应图 6~图 8 的参数设置。

从图 13 和图 14 中可观察到，Epidemic 和 CAOR 的平均传递率最大，SimBet 的平均传递率最小，OEERBC 的平均传递率略差于 Epidemic，但远优于 SimBet。在 OEERBC 中，携带信息的某些移动用户因最优中继节点一直未出现而无法传递信息，从而导致某些信息不能在给定的延时时内到达目的节

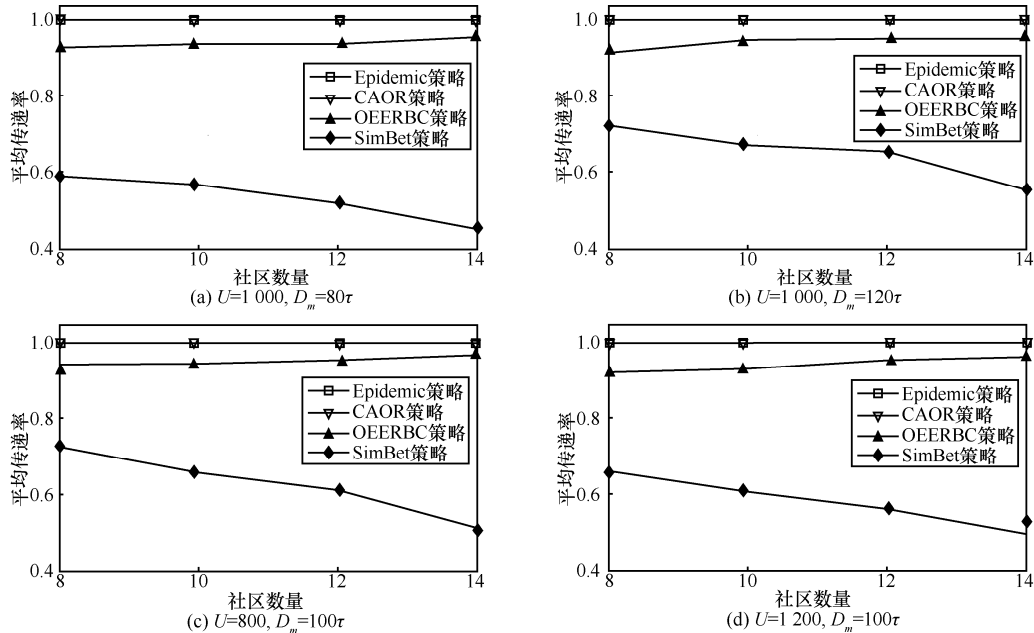


图 12 不同社区数量下的平均传递率对比

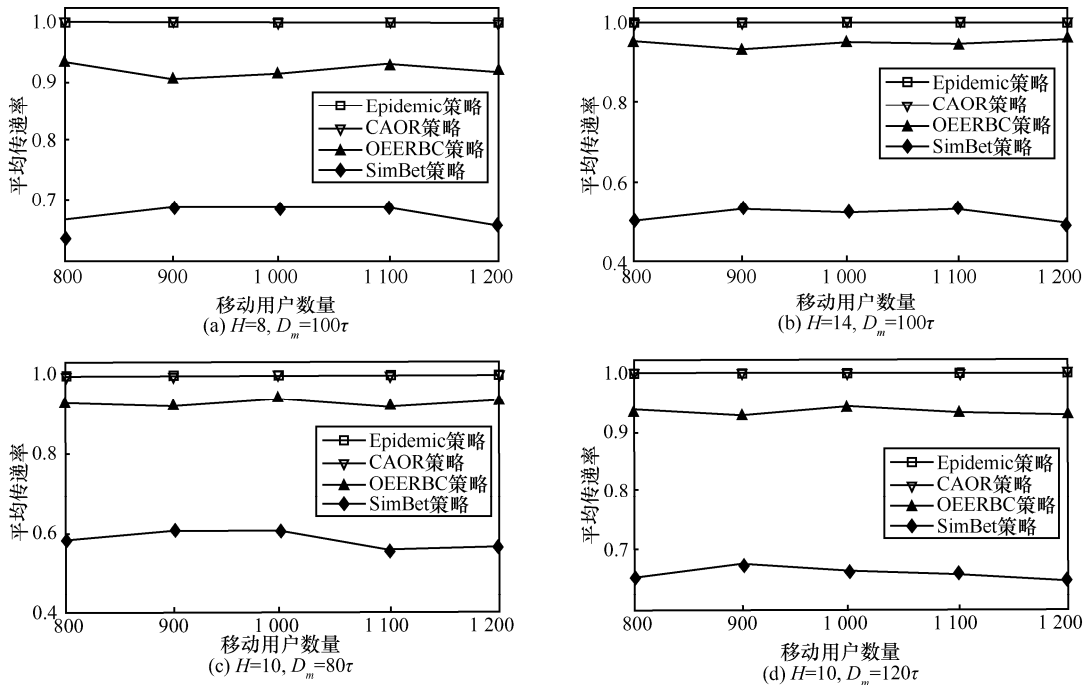


图 13 不同移动用户数量下的平均传递率对比

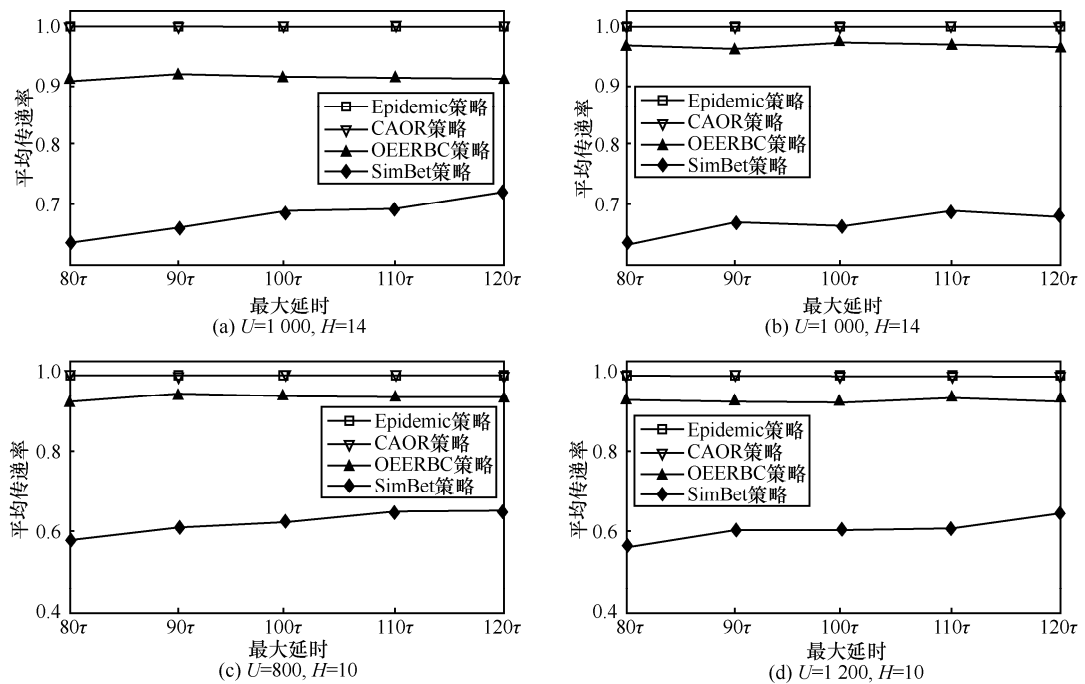


图 14 不同最大延时下的平均传递率对比

点而被丢弃。同时，最优中继节点的选择以移动用户的历史访问概率为基础，若移动用户的访问概率发生变化但未及时更新，则信息因未通过正确的最优中继节点传递而超出延时被丢弃。SimBet 的移动用户利用功效值来选择中继节点，如果携带信息的移动用户一直未遇到功效值更高的移动用户，那么

信息因超出延时被丢弃。同时，移动用户的随机移动行为极大地增加了无法获得更大功效值中继节点的概率，从而极大地减小了平均传递率。

综上所述，本文提出的基于社区的最优能效路由策略（OEERBC）在满足延时约束的前提下有效减少传递能耗，增大传递率，在保证网络性能的基础

基础上优化网络能效。OEERBC 首先利用马尔可夫链获得信息从源节点 S 传递到目的节点 D 的期望能耗和期望延时, 将该期望能耗和期望延时的加权和函数作为综合成本函数, 得到中继节点 I 传递信息对综合成本的优化(减小)值, 最后利用最优停止理论获得源节点 S 选择最优中继节点的最优期望报酬(优化值与等待时长的差值)。该最优期望报酬表征中继节点 I 传递信息的最小期望综合成本。因此, 携带信息的移动用户或虚拟投掷盒持续侦测传输范围内的所有中继节点, 选择达到最优期望报酬且愿意传递信息的最优中继节点来传递信息, 从而减小信息传递的综合成本, 即减少传递能耗和降低传递延时。

6 结束语

在不能及时补充能源的移动网络中, 能量是非常重要的资源。本文研究移动社会中信息传递的节能问题, 研究目标是在满足传递延时约束的前提下, 最小化传递能耗。在移动社会中, 移动用户存在明显的社会属性, 移动用户根据自己的兴趣或需要频繁地访问某些称为社区的地方。本文提出基于社区的最优能效路由策略, 对信息传递的能效和延时进行优化。最优能效路由策略的核心是携带信息的移动用户或虚拟投掷盒持续侦测当前社区内其他中继节点传递信息对综合成本的优化(减小)值, 然后选择优化值最大(即期望报酬最大)的最优中继节点来传递信息。另一方面, 最优停止理论是解决基于连续观察变量的最优停止问题的有力工具, 为最优能效路由获得最优期望报酬提供了理论基础和实际方法。因此, 本文构建关于选择具有最优期望报酬的最优中继的最优停止规则问题, 并提供问题的可行解, 获得路由的最优中继节点选择标准, 形成基于社区的最优能效路由策略。本文提出的路由策略在满足传递延时前提下最小化传递能耗, 增大传递率, 实现较好的节能效果。

更进一步, 在满足传输延时的前提下均衡移动用户的负载和能耗是今后的研究工作。

参考文献:

- [1] 张法, ANTONIO F A, 王林, 等. 网络能耗系统模型及能效算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(3): 603-615.
ZHANG F, ANTONIO F A, WANG L, et al. Network energy consumption models and energy efficient algorithms[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(3): 603-615.
- [2] ZHU Y, XU B, SHI X H, et al. A survey of social-based routing in delay tolerant networks: positive and negative social effects[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 387-401.
- [3] WEI K M, LIANG X, XU K. A survey of social-aware routing protocols in delay tolerant networks: applications, taxonomy and design-related issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 556-578.
- [4] 黄永锋, 董永强, 张三峰, 等. 基于社会特征周期演化的机会移动网络路由转发策略[J]. 通信学报, 2015, 36(3): 151-162
HUANG Y F, DONG Y Q, ZHANG S F, et al. Message forwarding based on periodically evolving social characteristics in opportunistic mobile networks[J]. Journal on Communications, 2015, 36(3): 151-162.
- [5] YUAN Q, CARDEI I, WU J. An efficient prediction-based routing in disruption-tolerant networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(1):19-31.
- [6] XIAO M J, WU J, HUANG L S. Community-aware opportunistic routing in mobile social networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2014, 63(7): 1682-1695.
- [7] AMIN V, DAVID B. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. technical report, CS-2000-06[R]. Durham, North Carolina: Duke University, 2000: 1-16.
- [8] LINDGREN A, DORIA A, SCHELÉN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2004, 3126(1): 252-259.
- [9] THRASYVOULOS S, KONSTANTINOS P, CAULIGI S R. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[C]//The 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. Pennsylvania. 2005: 252-259.
- [10] THRASYVOULOS S, KONSTANTINOS P, CAULIGI S R. Spray and focus: efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and correlated mobility[C]//The Fifth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. 2007: 79-85.
- [11] ELIZABETH D, MADS H. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETS[C]//The 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). 2007: 32-40.
- [12] FENG L, WU J. LocalCom: a community-based epidemic forwarding scheme in disruption-tolerant networks[C]//The SECON '09 6th Annual IEEE Communications Society Conference. 2009: 1-9
- [13] PAN H, JON C, EIKO Y. Bubble rap: social-based forwarding in delay-tolerant networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(11):1576-1589.
- [14] BULUT E, SZYMANSKI B K. Exploiting friendship relations for efficient routing in mobile social networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(12): 2254-2265.
- [15] ZHU K L, LI W Z, FU X M. Smart: a social- and mobile-aware routing strategy for disruption-tolerant networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(7): 3423-3434.
- [16] 李陟, 李千目, 张宏, 等. 基于最近社交圈的社交时延容忍网络路由策略[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(6): 1185-1195.
LI Z, LI Q M, ZHANG H, et al. Cosely social circuit based routing in social delay tolerant networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(6): 1185-1195.

- [17] WU J, XIAO M J, HUANG L S. Homing spread: community home-based multi-copy routing in mobile social networks[C]//The IEEE INFOCOM. 2013: 2319-2327.
- [18] XIAO M J, WU J, HUANG L S. Home-based zero-knowledge multi-copy routing in mobile social networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26(5): 1238-1250.
- [19] SHAGHAGHIAN S, COATES M. Optimal forwarding in opportunistic delay tolerant networks with meeting rate estimations[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2015, 1(2): 104-116.
- [20] WANG X, LENG S P, YIN J C, et al. ESD: an energy saving data delivery scheme in mobile social networks[C]//The Global Communications Conference (GLOBECOM). 2015: 1-6.
- [21] SAHA B K, MISRA S, PAL S. Utility-based exploration for performance enhancement in opportunistic mobile networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2016, 65(4): 1310-1322.
- [22] 张三峰, 黄迪, 陈州, 等. 一种面向机会网络路由的最优停止决策方法[J]. 软件学报, 2014, 25(6):1291-1300.
ZHANG S F, HUANG D, CHEN Z, et al. Optimal stopping decision method for routing of opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2014, 25(6):1291-1300.
- [23] AKKARAJITSAKUL K, HOSSAIN E, NIYATO D. Cooperative packet delivery in hybrid wireless mobile networks: a coalitional game approach [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(5): 840-854
- [24] ZHENG D, GE W Y, ZHANG J S. Distributed opportunistic scheduling for ad hoc networks with random access: an optimal stopping approach[J]. IEEE Transactions on Information Theory,

2009, 55(1): 205-222

作者简介:



彭颖(1980-),女,湖南汉寿人,博士,广西大学讲师,主要研究方向为移动网络能耗及性能优化。



王淖(1977-),女,湖南长沙人,广西大学讲师,主要研究方向为网络优化。



王高才(1976-),男,广西桂林人,博士,广西大学教授、博士生导师,主要研究方向为计算机网络、系统性能评价和随机方法。