

移动社会中基于活动的消息机会转发*

张胜¹, 王瑜¹, 包晓玲², 姚明辉¹, 黄毅¹, 时招军¹



¹(南昌航空大学 信息工程学院, 江西 南昌 330063)

²(南昌航空大学 外国语学院, 江西 南昌 330063)

通讯作者: 张胜, E-mail: zwxzs168@126.com

摘要: 针对移动社会中节点移动形成的成簇特性和节点参与活动表现的周期特点, 提出了一种基于活动的消息机会转发算法(activity-based message opportunistic forwarding, 简称 AMOF). 算法思想是: 当消息携带节点与目的节点存在相同活动时, 选择消息交付概率高的中继节点转发消息; 当消息携带节点与目的节点不存在相同活动时, 选择消息间接交付概率高的链路来转发消息. 仿真结果表明, 与经典路由算法(如 Epidemic, PRoPHET, CMOT 和 CMTS)比较, 所提出的路由算法不仅能够提高消息的传输成功率, 还能有效地降低传输时延和网络负载.

关键词: 移动社会网络; 消息转发; 时空特性; 活动; 交付概率

中文引用格式: 张胜, 王瑜, 包晓玲, 姚明辉, 黄毅, 时招军. 移动社会中基于活动的消息机会转发. 软件学报, 2017, 28(Suppl. (1)): 71-84. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17008.htm>

英文引用格式: Zhang S, Wang Y, Bao XL, Yao MH, Huang Y, Shi ZJ. Activity-Based message opportunistic forwarding in mobile social networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017, 28(Suppl. (1)): 71-84 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17008.htm>

Activity-Based Message Opportunistic Forwarding in Mobile Social Networks

ZHANG Sheng¹, WANG Yu¹, BAO Xiao-Ling², YAO Ming-Hui¹, HUANG Yi¹, SHI Zhao-Jun¹

¹(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

²(School of Foreign Language, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In mobile social networks, nodes are clustered by their interests and hobbies, and take part in some activities periodically. This paper puts forward an activity-based message opportunistic forwarding algorithm (AMOF) for the network characteristics. The main idea is that the biggest delivery probability node is selected and message is transferred to it, if the source node and destination node are both present in the same activities. While they are not in the same activities, the best link of the indirect delivery probability is found, and message will be transferred to it. Simulation results show that the proposed routing algorithm can not only improve the success of message delivery, but also reduce the network delay and overhead, compared with classical routing algorithms, such as Epidemic, PRoPHET, CMOT and CMTS.

Key words: mobile social network; message forwarding; time-space characteristics; activity; delivery probability

移动社会网络(mobile social network, 简称 MSN)是由具有社会属性的用户通过移动通信设备构成的延迟容忍网络(delay tolerant network, 简称 DTN). 随着便携移动终端的普及, 有关移动社会网络的应用也越来越多, 如机会计算(opportunistic computing)^[1]、车联网(vehicular adhoc network)^[2]、口袋交换网络(pocket switched network)^[3]等. MSN 服务将增强人们的社会联系, 增加信息获取方式的多样性.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61162002, 61661037); 江西省自然科学基金(20151BAB207038); 南昌航空大学研究生创新专项基金(YC2016012)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61162002, 61661037); Jiangxi Province Natural Science Foundation (20151BAB207038); Nanchang Hangkong University Graduate Innovation Special Foundation (YC2016012)

收稿时间: 2017-05-15; 采用时间: 2017-09-23

移动社会网络的节点通信具有机会网络的特征,间歇且不确定的节点连接使得数据转发面临挑战.在移动社会网络中,节点的移动是其携带者行为的体现,因此,移动社会网络通常利用人类行为和社会关系研究路由^[4].研究者通过挖掘节点行为特征,移动模式,前后相关的时空信息来设计消息转发策略.目前,针对移动社会网络社会特性的消息转发策略研究较多,但是社会属性更多地通过社区概念来反映,只体现出节点的空间联系.本文从节点移动的时空特性出发,提出一种基于活动的消息机会转发算法(activity-based message opportunistic forwarding,简称 AMOF).

1 相关工作

移动社会网络是一种特殊的机会网络.目前,机会网络路由算法的研究已经取得了一些成果,Epidemic^[5]、PRoPHET^[6]、MaxProp^[7]等经典的算法通过增加消息的副本数量,虽然可以提高消息的传输成功率,降低延迟,但是也会增加网络的负载,消耗网络资源.

针对节点的社会属性,文献[8]提出了基于社区机会网络的消息传输算法,通过将信息转发给活跃节点来提高转发质量;采用多拷贝方式,使消息能够尽可能多地与目标节点接触.文献[9]提出了机会网络节点兴趣社区检测及路由策略.该策略首先根据节点兴趣将节点划分成不同的社区,然后综合考虑节点的社区属性和节点间历史接触信息,设计了兴趣社区路由算法,由与目标节点接触多的节点转发消息.这些算法考虑节点的社会属性,提高了消息传输成功率,但社会属性一般比较复杂,很难全面考虑,因此这些算法都存在一定的局限性,并不能很好地反映机会网络的本质特征.

针对节点运动的周期性规律,研究者也提出了许多算法.文献[10]假设周期性循环运动的节点在每个周期相同时段的相遇概率相同,进而算出节点相遇概率随时隙的离散分布,基于此获得一个周期内的传输概率分布矩阵,据此控制消息转发,但此假设过于理想化,不符合实际.

文献[11]提出了DTN中基于时空和社会性的概率路由算法.算法通过多个位置固定的门卫节点统计本区域内节点在不同时间段内的相遇情况,总结出每个节点以及节点之间在特定时间段和地理区域上的相遇概率较大的几个节点组成的表和共同朋友节点表,以此作为转发依据,提高了消息传输成功率.但算法的地理区域是固定的,严重依靠位置固定的门卫节点进行相遇情况的总结,且算法也没有很好地标示节点的社会属性.

本文针对移动社会网络节点移动具有的周期性成簇的时空特性,构建基于活动的移动模型,提出了基于活动的消息转发算法.算法的基本思想是:通过节点相遇概率、消息 TTL 和节点相遇周期动态地预测消息到达目标节点的可能性,计算出消息交付概率,根据此概率选择最优传输路径.

2 网络模型及假设

2.1 网络模型

定义 1(网络模型). 将节点数为 n ,活动数为 m 的网络表示为 $G=(A,T,P)$,其中, $A=\{a_1,a_2,\dots,a_m\}$, $m \geq 1$,表示网络中活动集合; $T=\{T_{a_1},T_{a_2},\dots,T_{a_m}\}$ 表示节点参与各个活动的周期集合,其中, T_{a_x} 是一个 $n \times n$ 相遇周期表; $P=\{P_{a_1},P_{a_2},\dots,P_{a_m}\}$ 表示节点在各个活动中的相遇概率集合,其中, P_{a_x} 是一个 $n \times n$ 相遇概率表.

定义 2(活动). 活动是指在特定时间和特定地点周期性发生的节点行为.网络中任一节点可以参与若干个不同的活动,也可以不参与任何活动,但同一时刻节点不会参与 2 个及以上活动.本文通过活动来表征网络中节点的时空特性.

2.2 假设

1. 网络中节点同构,且缓存空间有限.每个节点不拒绝为其他节点转发数据.
2. 网络中活动的发生具有严格的周期性,而节点参与活动可能不按时,甚至“缺席”某次活动.为便于叙述,表 1 汇总了文中主要变量符号.

Table 1 Variable symbols

表 1 变量符号表

符号名	符号含义	符号名	符号含义
$P_{a_x}(i,j)$	节点 i,j 在活动 a_x 中的相遇概率	$P_m^a(i,j)$	消息交付概率近似表达式
$T_{a_x}(i,j)$	节点 i,j 在活动 a_x 中的相遇周期	$P_l(i,j)$	节点 i,j 在链路中的相遇概率
TTL_r	待转发消息的剩余生存期	$T_l(i,j)$	节点 i,j 在链路中的相遇周期
a_s^e	与目标节点相遇概率最大的活动	l^p	与目标节点相遇概率最大的链路
a_s^t	与目标节点相遇周期最短的活动	l^t	与目标节点相遇周期最短的链路
a_s^e	与目标节点相遇概率最大且相遇周期最短的活动	l^e	与目标节点相遇概率最大且相遇周期最短的链路
$N_{a_s^e}^e$	在 TTL_r 内 a_s^e 发生的次数	$N_{l^e}^e$	在 TTL_r 内 l^e 存在的次数
$N_{a_s^t}^t$	在 TTL_r 内 a_s^t 发生的次数	$N_{l^p}^p$	在 TTL_r 内 l^p 存在的次数
$N_{a_s^e}^e$	在 TTL_r 内 a_s^e 发生的次数	$N_{l^t}^t$	在 TTL_r 内 l^t 存在的次数
$N_{a_s^e}^e$	在活动 a_s^e 不发生的间歇, a_s^e 发生的次数	$N_{l^e}^e$	在链路 l^e 不存在的间歇, 链路 l^e 存在的次数
$P_{rm}(i,j)$	消息交付概率	$P_m^l(i,j)$	消息间接交付概率

3 AMOF 路由算法

3.1 基于活动移动模型

人们由于不同的目的会参与不同的活动,在同一个活动中人们以较高的概率相遇,而在活动外以较低的概率相遇.本文以节点的时空特性和节点的移动特征设计了基于活动移动模型.该模型描述如下:

1. 节点 i 参与若干个活动(可以为 0),构成活动集合 A_i .
2. 每个活动在特定时间和特定地点周期性发生.

3. 当节点参与活动时,节点在特定地点的移动符合 RWP(random way point)模型;当节点不参与活动时,节点在仿真区域按 RW(random walk)模型随机移动.

3.2 节点参与活动的判定

节点 i 维护一个长度为 λ 的队列 Q_i^t ,记录最近 λ 次相遇情况,将相遇节点 ID 写入队列,实时更新队列.节点 i, j 不参与活动, Q_i^t 与 Q_j^t 差异较大;若节点 i, j 存在相同活动 ($A_i \cap A_j \neq \emptyset$),当 i, j 参与相同活动时, Q_i^t 与 Q_j^t 有较高相似度,且节点参与活动时其运动范围限制在特定地点,故通过相似性函数及节点运动范围判断节点此刻是否参与活动.

相似性函数 $F(Q_i^t, Q_j^t)$ 为

$$F(Q_i^t, Q_j^t) = \left[\frac{|Q_i^t \cap Q_j^t|}{|Q_i^t \cup Q_j^t|} - \alpha \right] (0 < \alpha < 1 \text{ 且 } Q_i^t \neq \emptyset \text{ 且 } Q_j^t \neq \emptyset),$$

其取值范围为 $\{0,1\}$,判定阈值 α 用来控制 Q_i^t 与 Q_j^t 的相似程度.本实验 α 取 0.5.

当 $F(Q_i^t, Q_j^t) = 0$ 时,表明节点此时不参与活动;当 $F(Q_i^t, Q_j^t) = 1$ 且节点 i, j 在特定地点运动时,表明节点参与活动.

3.3 AMOF消息传输策略

若源节点与目标节点存在相同活动 ($A_s \cap A_d \neq \emptyset$),则只需在这些相同活动中找出最佳转发节点,这样消息只会在相同活动的若干个节点之间转发,避免了消息扩散到其他活动中,减少了网络资源消耗;若源节点和目标节点不存在相同活动 ($A_s \cap A_d = \emptyset$),则在参与活动的节点中寻找到达目的节点的最优多跳路径.因此,AMOF 路由算法分为存在相同活动的消息传输策略和不存在相同活动的消息传输策略.

3.3.1 存在相同活动的消息传输策略

每个节点建立基于活动的相遇概率表与相遇周期表,分别存储该活动中节点相遇概率和节点相遇周期. AMOF 将这种节点间的周期性概率关系作为考查的重点,通过考虑节点相遇概率、节点相遇周期、消息剩余 TTL 这 3 个因素,计算出消息交付概率,动态地评价节点转发消息给目标节点的能力.

1) 节点相遇概率

当节点 i 和节点 j 在活动 a_x 中相遇时,根据公式(1)计算 i, j 之间的相遇概率.式(1)保证了在活动 a_x 中经常相遇的两个节点相遇概率随着相遇次数的增加而增加.

$$P_{a_x}(i, j) = P_{a_x}^{old}(i, j) + (1 - P_{a_x}^{old}(i, j)) \times P_{init} \quad (1)$$

其中, P_{init} 为初始化常数,本文取值 0.75, $P_{a_x}^{old}(i, j)$ 为节点 i, j 相遇概率更新前的概率值.

若节点 i 和 j 在一个时间单元内没有相遇,则其相遇概率逐渐老化,由公式(2)计算.

$$P_{a_x}(i, j) = P_{a_x}^{old}(i, j) \times \gamma^k \quad (2)$$

其中, $\gamma \in [0, 1]$ 是一个初始化常数, k 是经过的时间单元数.本文设 $\gamma = 0.99$.

2) 节点相遇周期

图 1 展示了节点 i, j 多次参与活动 a_x 的历史相遇周期.

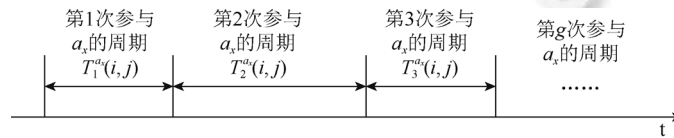


Fig.1 Encounter cycle of nodes

图 1 节点相遇周期示意图

节点相遇周期根据历史多次相遇周期取加权平均值计算得出,如公式(3)所示.节点在活动 a_x 中的加权平均相遇周期(文中均简称节点相遇周期)为

$$T_{a_x}(i, j) = \sum_{f=1}^g w_f^{a_x} T_f^{a_x}(i, j), f \leq g \quad (3)$$

其中, $T_f^{a_x}(i, j)$ 为节点 i, j 第 f 次参与活动 a_x 的相遇周期, $w_f^{a_x}$ 为第 f 次参与活动 a_x 的相对权重.将各次相遇周期按时间先后排列,排名第 R_f 项的相遇周期的权值由公式(4)计算.

$$w_f^{a_x} = \begin{cases} \frac{1}{2^{g-1}}, & R_f = 1 \\ \frac{2^{R_f-2}}{2^{g-1}}, & R_f \geq 2 \end{cases} \quad (4)$$

这里考虑最近几次相遇周期对 $T_{a_x}(i, j)$ 影响较大,即对应权值较大.

3) 消息交付概率

考虑到节点参与活动的时空特性以及消息 TTL 对消息转发的限制,可通过公式(5)计算消息交付概率,动态地预测节点交付消息给目的节点的能力.

$$P_{rm}(i, j) = \sum_{a_x^s \in S} \left[P_{a_x^s}(i, j) \times \prod_{a_x^s \in S'} (1 - P_{a_x^s}(i, j)) \right] \quad (5)$$

其中, $P_{rm}(i, j)$ 表示节点在待转发消息 TTL 耗尽前通过参与活动直接转发消息给目的节点的概率,其中, S 为当前时刻至 TTL 耗尽节点 i, j 共同参与的活动序列,记 a_x^s 为 S 中的活动; S' 为当前时刻至活动 a_x^s 发生前节点 i, j 共同参与的活动序列,记 $a_x^{s'}$ 为 S' 中的活动. $P_{a_x^s}(i, j)$ 表示在活动 a_x^s 中的相遇概率, $P_{a_x^{s'}}(i, j)$ 表示在活动 $a_x^{s'}$ 中的相遇概率.

通过式(5)能够准确地计算出消息交付概率,但计算开销极大.因此通过基于活动的相遇概率表和相遇周期表,寻找对消息转发影响较大的两类活动:① 与目标节点相遇周期最短的活动;② 与目标节点相遇概率最大的活动.通过这两类活动,求得 $P_{rm}(i, j)$ 的近似表达 $P_m^a(i, j)$, $P_m^p(i, j)$ 是消息交付概率的近似表达式(文中均简称消息交付概率).

(1) 若这两类活动为不同活动,为了区分这两类活动,记 a_x^p 为与目标节点相遇概率最大的活动,记 a_x^a 为与目

标节点相遇周期最短的活动.节点不可能在同一时刻参与不同活动,故每个活动周期性发生且互不干扰,则 a_x^p 不发生间歇 a_x^r 发生次数恒定,记为 M .为了方便推导且形成统一表达式,记 a_x^r 发生的次数为 N ,并且假定在每个 a_x^r 发生前 a_x^r 发生 M 次,则消息交付概率计算如下:

$$\begin{aligned}
P_m^a(i,j) &= P_{a_x^r}^a(i,j) + P_{a_x^r}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j)) + P_{a_x^r}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^2 + \dots + P_{a_x^r}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^{M-1} + \\
&\quad P_{a_x^p}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M + \dots + P_{a_x^p}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^{M(N-1)}(1-P_{a_x^p}^a(i,j))^{N-1} + \\
&\quad P_{a_x^p}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^{M(N-1)-1}(1-P_{a_x^p}^a(i,j))^{N-1} + \dots + P_{a_x^p}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^{MN-1}(1-P_{a_x^p}^a(i,j))^{N-1} + \\
&\quad P_{a_x^p}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^{MN}(1-P_{a_x^p}^a(i,j))^{N-1} \\
&= \frac{P_{a_x^r}^a(i,j) + P_{a_x^r}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j)) + \dots + P_{a_x^r}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^{M-1} + P_{a_x^p}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M}{1-(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M(1-P_{a_x^p}^a(i,j))} \times \\
&\quad \left\{ 1 - \left[(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M(1-P_{a_x^p}^a(i,j)) \right]^N \right\} \\
&= \frac{P_{a_x^r}^a(i,j) \left(1 - (1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M \right)}{1-(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M(1-P_{a_x^p}^a(i,j))} + P_{a_x^p}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M \times \left\{ 1 - \left[(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M(1-P_{a_x^p}^a(i,j)) \right]^N \right\} \\
&= \frac{1-(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M + P_{a_x^p}^a(i,j)(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M}{1-(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M(1-P_{a_x^p}^a(i,j))} \times \left\{ 1 - \left[(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M(1-P_{a_x^p}^a(i,j)) \right]^N \right\} \\
&= 1 - \left[(1-P_{a_x^r}^a(i,j))^M(1-P_{a_x^p}^a(i,j)) \right]^N,
\end{aligned}$$

其中, N 可通过 $N_r^a = \left\lfloor \frac{TTL_r}{T_{a_x^r}^a(i,j)} \right\rfloor$ 近似计算, N_r^a 表示在 TTL_r 内 a_x^r 发生的次数; M 可通过 $N_{rr}^a = \left\lfloor \frac{T_{a_x^p}^a(i,j)}{T_{a_x^r}^a(i,j)} \right\rfloor$ 近似计算, N_{rr}^a 表

示 a_x^p 不发生的间歇 a_x^r 发生的次数.

令 $N_r^a = \left\lfloor \frac{TTL_r}{T_{a_x^r}^a(i,j)} \right\rfloor$, 表示在 TTL_r 内 a_x^r 发生的次数. 若计算 $N_p^a = 0$ 且 $N_r^a \neq 0$, 则 $P_m^a(i,j) = 1 - (1 - P_{a_x^r}^a(i,j))^{N_r^a}$. 若

计算 $N_p^a = 0$ 且 $N_r^a = 0$, 则 $P_m^a(i,j) = P_{a_x^p}^a(i,j)$. 故任意时刻消息交付概率 $P_m^a(i,j)$ 如式(6)所示.

$$P_m^a(i,j) = \begin{cases} 1 - \left[(1 - P_{a_x^r}^a(i,j))^{N_{rr}^a} (1 - P_{a_x^p}^a(i,j)) \right]^{N_p^a}, & N_p^a \neq 0 \\ 1 - (1 - P_{a_x^r}^a(i,j))^{N_r^a}, & N_r^a \neq 0 \text{ 且 } N_p^a = 0 \\ P_{a_x^p}^a(i,j), & N_p^a = 0 \end{cases} \quad (6)$$

由于计算 $P_m^a(i,j)$ 时对模型进行了合理假设,故 $P_m^a(i,j)$ 和 $P_{rm}(i,j)$ 最多相差 $M+1$ 个活动误差,通过计算幂级数收敛性,可得:

$$\lim_{N_p^a \rightarrow \infty} \frac{1 - \left[(1 - P_{a_x^r}^a(i,j))^{N_{rr}^a} (1 - P_{a_x^p}^a(i,j)) \right]^{N_p^a + 1}}{1 - \left[(1 - P_{a_x^r}^a(i,j))^{N_{rr}^a} (1 - P_{a_x^p}^a(i,j)) \right]^{N_p^a}} = 1 \quad (7)$$

在消息刚产生时, $TTL_r \approx TTL$ ($TTL \gg T_{a_x^E}(i, j) > T_{a_x^E}(i, j)$), 此时 N_p^a 为较大数, 又由于 $1 - \left[(1 - P_{a_x^E}(i, j))^{N_{pr}^a} (1 - P_{a_x^E}(i, j)) \right]^{N_p^a} \leq P_{rm}(i, j) \leq 1 - \left[(1 - P_{a_x^E}(i, j))^{N_{pr}^a} (1 - P_{a_x^E}(i, j)) \right]^{N_p^a + 1}$, 此时 $P_m^a(i, j)$ 与实际误差
不大. 随着 TTL 耗尽, $P_m^a(i, j)$ 误差会变大.

(II) 若这两类活动为同一活动, 则为了方便表述记为 a_x^E . 若 S 中有 N 个活动 a_x^E , 则 S' 中有 $N-1$ 个活动 a_x^E , 则消息交付概率为

$$P_m^a(i, j) = P_{a_x^E}(i, j) + (1 - P_{a_x^E}(i, j))P_{a_x^E}(i, j) + (1 - P_{a_x^E}(i, j))^2 P_{a_x^E}(i, j) + \dots + (1 - P_{a_x^E}(i, j))^{N-1} P_{a_x^E}(i, j) = 1 - (1 - P_{a_x^E}(i, j))^N \quad (8)$$

其中, N 可通过 $N_E^a = \left\lfloor \frac{TTL_r}{T_{a_x^E}(i, j)} \right\rfloor$ 近似计算, N_E^a 表示在 TTL_r 内 a_x^E 发生的次数. 若计算 $N_E^a = 0$, 则 $P_m^a(i, j) = P_{a_x^E}(i, j)$.

故任意时刻消息交付概率 $P_m^a(i, j)$ 如式(9)所示.

$$P_m^a(i, j) = \begin{cases} 1 - (1 - P_{a_x^E}(i, j))^{N_E^a}, & N_E^a \neq 0 \\ P_{a_x^E}(i, j), & N_E^a = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由于计算 $P_m^a(i, j)$ 时, N 由 N_E^a 近似计算得到, 有关精度损失的分析类似于(I)中的分析, 不再赘述.

4) 消息转发过程

存在相同活动的消息转发思想为: 若相遇节点的消息交付概率大于当前节点的消息交付概率, 则将消息转发给相遇节点, 否则不转发. 具体步骤如图 2 所示.

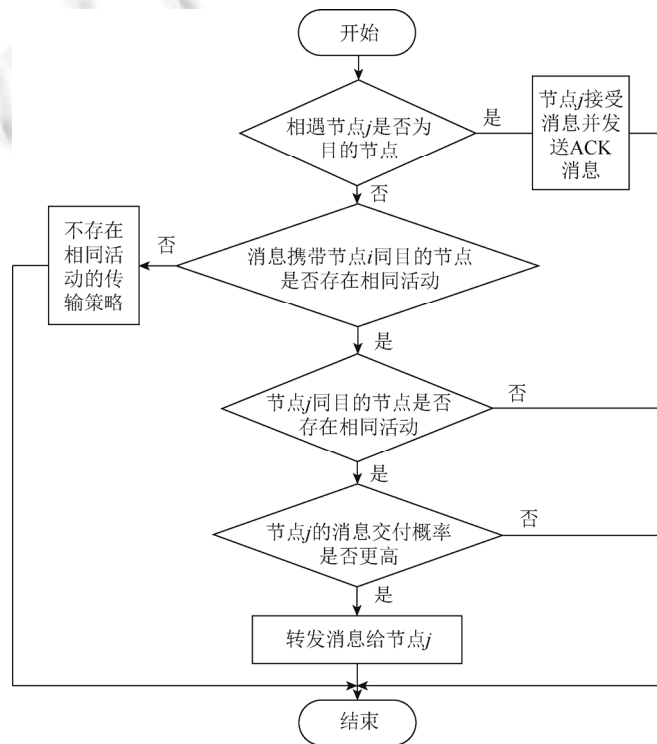


Fig.2 Message forwarding flow chart that there are the same activities of source node and destination node

图 2 存在相同活动的消息转发流程

3.3.2 不存在相同活动的消息传输策略

参与不同活动的节点本身已为不同活动中的节点建立了间接联系,而不参与活动时,节点的随机运动又使得节点能够接触其他节点.不存在相同活动的消息传输就是寻找至目标节点的最佳间歇多跳链路.

1) 链路发现

(i) 相遇节点与消息携带节点参与相同活动又和目标节点参与相同活动.

在(i)中通过相遇节点构成消息携带节点和目的节点的间接相遇链路,利用公式(10)可以得到两个节点在链路中的相遇概率.

$$P_l(i,j)=P_{a_x}(i,h)\times P_{a_y}(h,j) \quad (10)$$

其中, a_y 为节点 h,j 参与的活动.

利用公式(11)可以得到两个节点在链路中的相遇周期.

$$T_l(i,j)=\begin{cases} \max\{T_{a_x}(i,h),T_{a_y}(h,j)\}, & T_{a_x}(i,h)\leq T_{a_y}(h,j) \\ z\times T_{a_y}(h,j)\geq T_{a_x}(i,h), & T_{a_x}(i,h)>T_{a_y}(h,j) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $T_{a_y}(h,j)$ 为节点 h,j 在活动 a_y 中相遇周期, $z=\min\{N^*\}$.

(ii) 相遇节点同消息携带节点无相同活动,与目标节点参与相同活动.

在(ii)中,消息携带节点在不参与活动时和相遇节点接触,用公式(12)可得两个节点在链路中的相遇概率:

$$P_l(i,j)=P(i,h)\times P_{a_x}(h,j) \quad (12)$$

其中, $P(i,h)$ 表示节点 i 不参与活动时同节点 h 相遇概率.利用公式(13)可以计算此概率.

$$P(i,h)=\frac{\sum h}{\sum total} \quad (13)$$

其中, $\sum h$ 表示 i 在不参与活动时同 h 相遇次数; $\sum total$ 表示 i 在不参与活动时相遇节点总次数.

2) 消息间接交付概率

消息携带节点与目的节点联系的链路可能有多条,节点通过建立周期最小链路表存储相遇周期最小的链路,该链路记为 l^T ;建立概率最大链路表存储相遇概率最大的链路,该链路记为 l^P .通过这两类链路来动态地衡量节点交付消息给目的节点的能力,此能力用消息间接交付概率 $P_m^l(i,j)$ 表示,推导过程类似于第3.3.1节的(I),(II),这里直接给出结论.

(I) 若 l^T 和 l^P 是同一链路,为了方便表述,该链路记为 l^E ,则消息间接交付概率 $P_m^l(i,j)$ 的计算如下:

$$P_m^l(i,j)=\begin{cases} 1-(1-P_{l^E}(i,j))^{N_E^l}, & N_E^l \neq 0 \\ P_{l^E}(i,j), & N_E^l = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中, $N_E^l = \left\lfloor \frac{TTL_r}{T_{l^E}(i,j)} \right\rfloor$ 表示在 TTL_r 内 l^E 存在的次数.

(II) 若 l^T 和 l^P 不是同一链路,则消息间接交付概率 $P_m^l(i,j)$ 的计算如下:

$$P_m^l(i,j)=\begin{cases} 1-\left[1-P_{l^T}(i,j)^{N_{PT}^l}(1-P_{l^P}(i,j))\right]^{N_P^l}, & N_P^l \neq 0 \\ 1-(1-P_{l^T}(i,j))^{N_T^l}, & N_P^l = 0 \text{ 且 } N_T^l \neq 0 \\ P_{l^P}(i,j), & N_T^l = 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, $N_P^l = \left\lfloor \frac{TTL_r}{T_{l^P}(i,j)} \right\rfloor$ 表示在 TTL_r 内 l^P 存在的次数, $N_{PT}^l = \left\lfloor \frac{T_{l^P}(i,j)}{T_{l^T}(i,j)} \right\rfloor$ 表示在 l^P 不存在的间歇 l^T 存在的次

数, $N_T^l = \left\lfloor \frac{TTL_r}{T_{l^T}(i,j)} \right\rfloor$ 表示在 TTL_r 内 l^T 存在的次数.

3) 消息转发过程

不存在相同活动的消息转发思想为:当相遇节点的消息间接交付概率大于自身的概率时,将消息转发给相遇节点,否则不转发,直到转发给能与目的节点参与相同活动的相遇节点,采用存在相同活动的传输策略.具体步骤如图3所示.

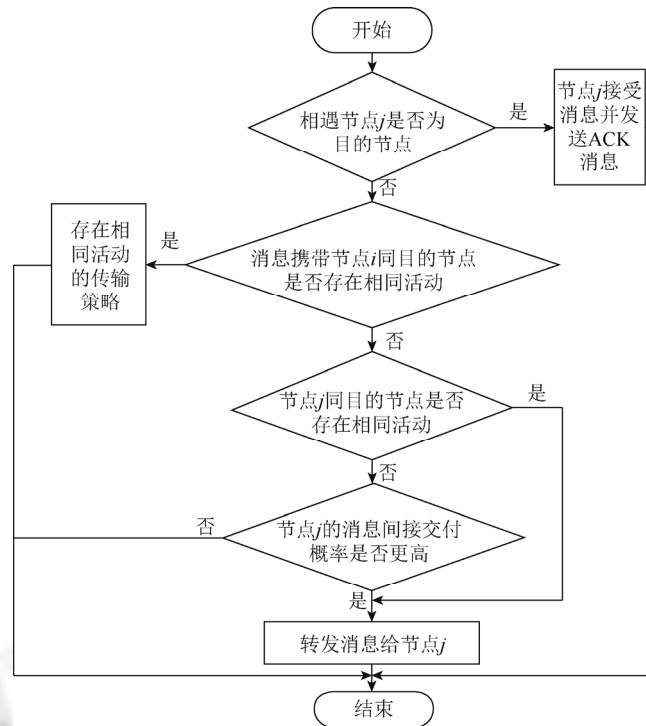


Fig.3 Message forwarding flow chart that there are not the same activities of source node and destination node

图3 不存在相同活动的消息转发流程

4 仿真结果

4.1 仿真环境设置

本文采用 ONE(opportunistic network environment)对所提出的路由算法进行性能分析,并与路由算法 PROPHET, Epidemic, CMTS 及 CMOT^[12]比较.为使仿真数据真实可靠,仿真开始前进行 1 000s 预处理.具体仿真参数见表 2.

Table 2 Parameters of simulation scenario

表 2 仿真参数设置

参数(单位)	参数值
仿真区域大小(m)	7500×7500
仿真时间(h)	12
活动发生地半径(m)	100/150/200/250/300/350
节点数(个)	64/112/160/208/256
节点移动速度(m/s)	3~9
消息大小(MB)	0.5~1
缓存大小(MB)	5/7.5/10/12.5/15/17.5/20
消息产生间隔(s)	25~35
TTL(min)	180/240/300/360/420/480

4.2 仿真结果及分析

4.2.1 活动发生地范围对消息转发的影响

本实验设置节点数量为 160,节点缓存为 20MB,消息 TTL 为 360min.实验通过控制半径来模拟活动发生地范围对 AMOF 性能的影响.

图 4 表明,随着活动发生地半径变大,考虑节点空间聚集特征的路由算法(CMTS,CMOT,AMOF)的传输成功率都有缓慢降低,半径增大使得节点在活动地点的相遇概率降低,不利于消息的转发.而 PRoPHET,Epidemic 不考虑节点的聚集性,只利用多拷贝来加速消息传递.当半径大于 300 m 时,AMOF 的传输成功率下降不明显,主要原因在于 AMOF 充分考虑节点间相遇周期的变化,将消息传递给与目标节点相遇稳定的节点.

图 5 中 CMTS,CMOT 及 AMOF 的负载随半径的增加保持稳定,表明三者的路由是高效的.CMTS 和 CMOT 均考虑节点的聚集特征来控制转发,CMOT 由于在社区内采用一跳转发,负载最低,但导致传输成功率及时延为 3 者中最差.AMOF 在负载不高的前提下,传输成功率比 CMTS,CMOT 分别提高了 15.77%,31.36%.

如图 6 所示,随着半径的增加,节点联系困难,导致传输时延增加,但 AMOF 的传输时延总体处在低水平,当半径大于 250m 时,曲线增长缓慢.

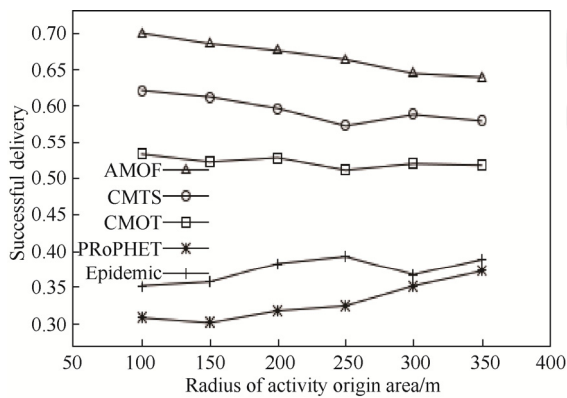


Fig.4 Comparison of delivery ratio in different radii

图 4 不同半径传输成功率比较

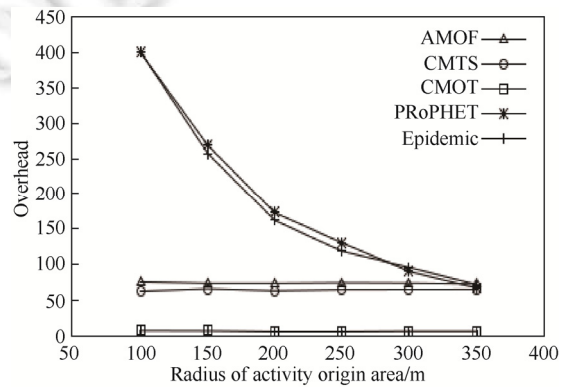


Fig.5 Comparison of overhead ratio in different radii

图 5 不同半径网络负载比较

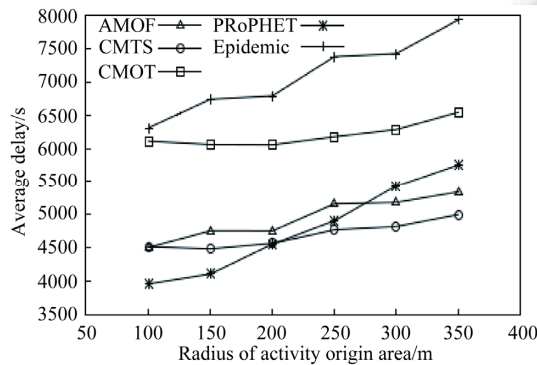


Fig.6 Comparison of average transmission delay in different radii

图 6 不同半径平均传输时延比较

4.2.2 缓存大小对消息转发的影响

本实验设置节点数量为 160,特地点半径为 100m,消息 TTL 为 360min.

图 7 表明 AMOF 的高传输率同节点缓存无关,通过对转发条件的严格控制,避免了消息交付率低的节点转发消息,节省了宝贵的存储空间.CMTS 通过控制社区内消息的拷贝数也节约了缓存,但由活跃节点盲目携带转发消息,传输成功率不及 AMOF.

从图 8 的曲线可以看出,CMOT,CMTS 及 AMOF 的网络负载对节点缓存不敏感,其中 CMOT 网络负载最低,原因是其在社区内由消息携带节点一跳转发给目的节点;而 AMOF 没有一跳转发的限制,但通过严格的转发条件,减少交付率低的消息转发的可能,取得较低的网络负载.

图 9 反映出 AMOF 的路由策略相当高效,当节点缓存达到 8MB 后,其传输成功率及传输时延几乎不变,这说明本算法选择中继节点的条件是合理的.而且在节点缓存极小时,都能保持高传输成功率、较低的时延,这反映出消息交付概率的动态预测方法是正确的.

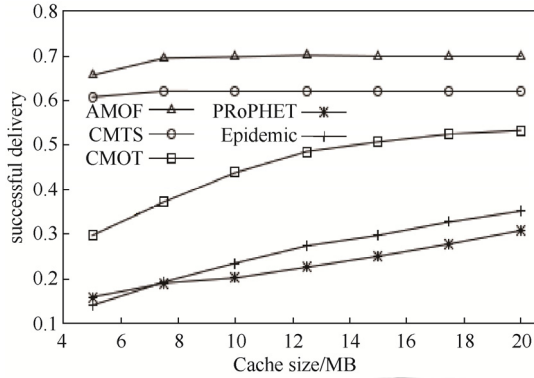


Fig.7 Comparison of delivery ratio in different caches

图 7 不同缓存大小传输成功率比较

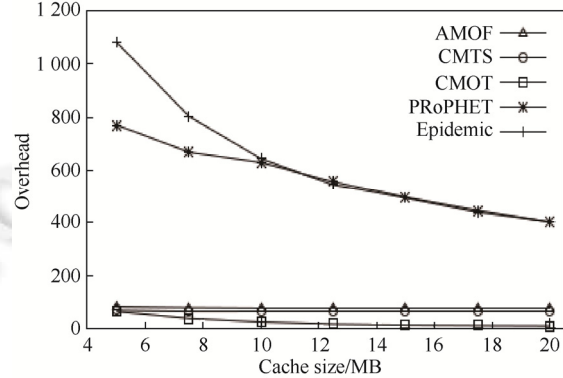


Fig.8 Comparison of overhead ratio in different caches

图 8 不同缓存大小网络负载比较

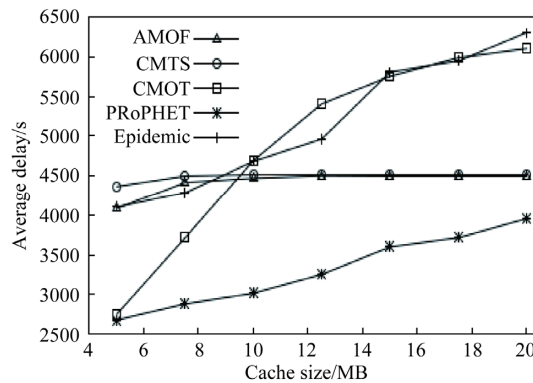


Fig.9 Comparison of average transmission delay in different caches

图 9 不同缓存大小平均传输时延比较

4.2.3 节点密度对消息转发的影响

实验设置节点缓存为 20MB,特定地点半径为 100m,消息 TTL 为 360min.

图 10 表明,随着节点数量的增加,节点聚集现象更加明显,节点间相遇的可能性在变大,各路由算法的传输成功率都得以提高.其中,AMOF,CMTS,CMOT 由于考虑到节点聚集的空间特征,传输成功率增长明显.此外,AMOF 还考虑了节点相遇周期,选择相遇稳定的中继节点,故 AMOF 传输成功率比 CMTS,CMOT 分别提高了

13.58%,30.63%.

从图 11 的曲线可看出,节点数量增加使得待转发消息增加,导致网络负载增加.节点数量增加对考虑节点聚集特征的算法(AMOF,CMTS,CMOT)而言,影响不显著.其中 CMOT 采用社区内一跳转发策略,故网络负载最低.

如图 12 所示,AMOF 算法的传输时延对节点数量的改变最不敏感,与 CMTS 和 CMOT 相比,AMOF 算法还考虑了节点相遇的周期性.选择相遇周期稳定的节点转发消息能够显著改善时延.PRoPHET 以相遇频率为转发效用值控制转发副本,降低传输时延,但缺乏对低传输成功率副本的控制,导致传输成功率和负载较差.

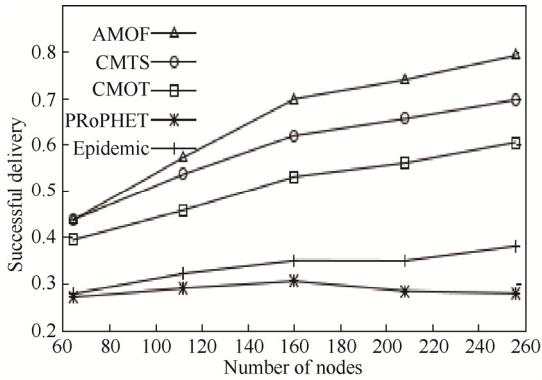


Fig.10 Comparison of delivery ratio in different node densities
图 10 不同节点密度传输成功率比较

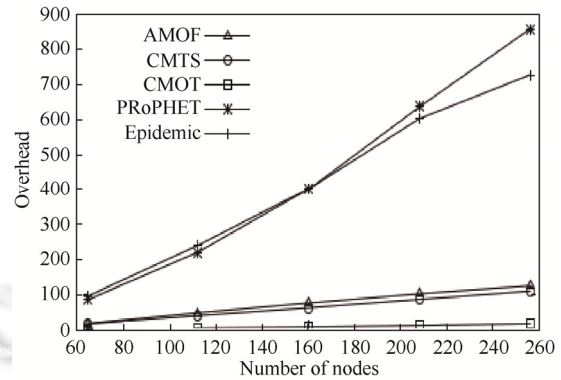


Fig.11 Comparison of overhead ratio in different node densities
图 11 不同节点密度网络负载比较

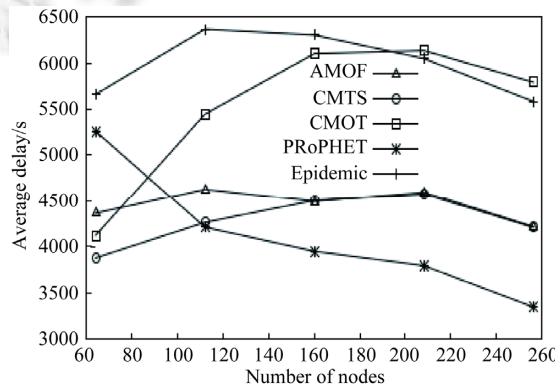


Fig.12 Comparison of average transmission delay in different node densities
图 12 不同节点密度平均传输时延比较

4.2.4 消息 TTL 对消息转发的影响

本实验设置节点数量为 160,特定地点半径为 100m,节点缓存为 20MB.

图 13 表明,随着消息 TTL 的增大,Epidemic 和 PRoPHET 由于缺乏控制消息冗余的措施,导致传输成功率下降,加重网络负载.而 AMOF,CMTS,CMOT 均考虑避免低传输率的消息副本产生,在提高传输成功率的同时也控制了网络负载.图 14 的网络负载曲线也印证了上述说法.

图 14 表明,AMOF,CMTS,CMOT 通过合理的转发条件,控制无效的消息转发.并且 AMOF 的负载率比 PRoPHET 和 Epidemic 分别降低了 83.39%和 82.99%.

如图 15 所示,TTL 对路由算法的平均时延影响较大.TTL 变长使得节点可以消耗更多的时间等待更优的中

继节点,导致传输时延增加.整体来看,AMOF 算法的传输时延居中.

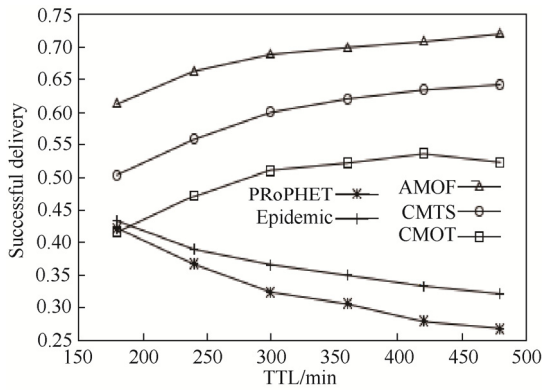


Fig.13 Comparison of delivery ratio in different TTLs

图 13 不同 TTL 传输成功率比较

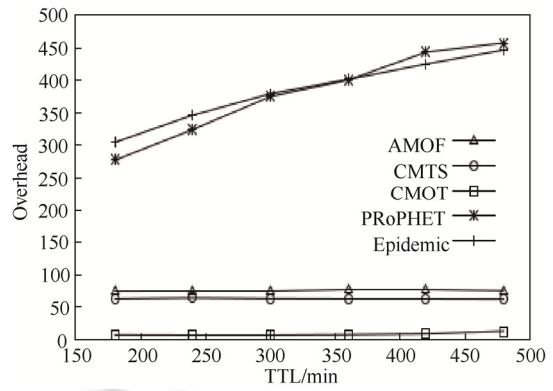


Fig.14 Comparison of overhead ratio in different TTLs

图 14 不同 TTL 网络负载比较

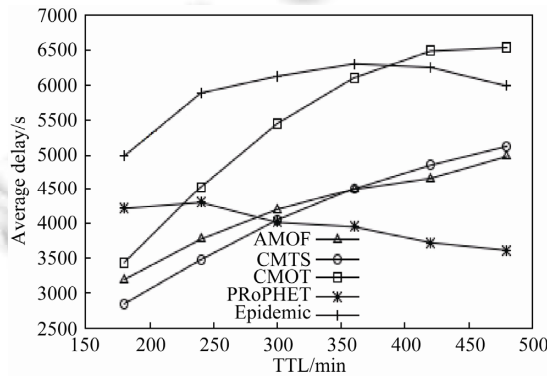


Fig.15 Comparison of average transmission delay in different TTLs

图 15 不同 TTL 平均传输时延比较

4.2.5 消息产生间隔对消息转发的影响

本实验设置节点数量为 160,特定地点半径为 100m,节点缓存为 20MB,消息 TTL 为 360min.

为了分析 AMOF 在不同网络负载下的表现,本文通过控制消息产生间隔来模拟不同的网络负载状态下的路由性能.图 16 表明,随着消息产生间隔的增加,网络中待转发消息将减少,导致传输成功率增加.AMOF 综合评价节点移动的时空特性,合理选择中继节点,与 CMTS,CMOT,PRoPHET 和 Epidemic 相比,其传输成功率分别提高了 15.56%,43.84%,63.30%,58.71%.

从图 17 可看出,由于节点缓存有限,消息数越多,消息在网络中的副本数就越少,AMOF,CMTS,CMOT 均严格控制转发条件,故负载率变化不明显,其负载曲线的增长率分别为 2.047%,7.931%,5.297%.

图 18 表明,在具有周期特性的网络中,消息产生间隔的变化对算法的时延总体影响不大.消息数量的减少使得消息被中继节点转发的机会增加,提高了传输成功率,但由于节点移动的周期特性,时延改变总体不明显.

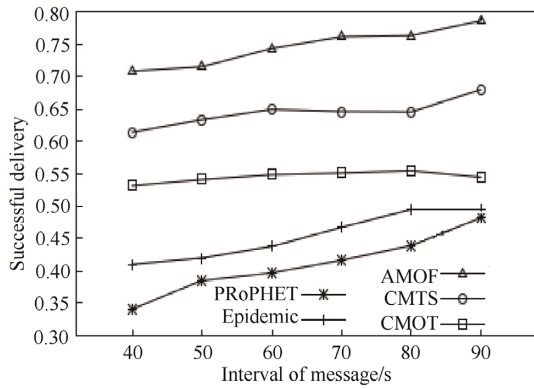


Fig. 16 Comparison of delivery ratio in different message intervals

图 16 不同消息产生间隔传输成功率比较

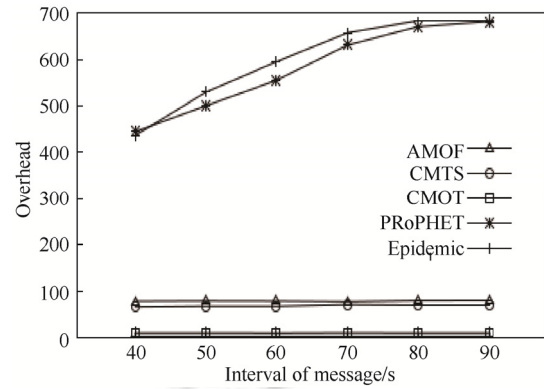


Fig. 17 Comparison of overhead ratio in different message intervals

图 17 不同消息产生间隔负载率比较

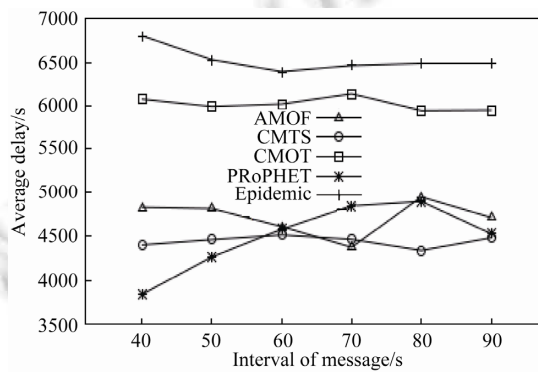


Fig. 18 Comparison of average transmission delay in different message intervals

图 18 不同消息产生间隔平均传输时延比较

5 结论

本文针对移动社会中节点移动的时空特点,提出了基于活动的消息机会转发算法(AMOF),目的是在此类应用场景中提高消息传输成功率,降低网络负载,减少传输时延.本文首先介绍移动社会的传输特点及发展现状,分析经典路由算法存在的问题,然后根据该网络中节点移动具有的周期性成簇的时空特性,抽象出基于活动移动模型,并基于此模型提出移动社会中基于活动的消息机会转发算法(AMOF).实验结果表明,AMOF算法始终能够取得最佳传输成功率;在传输时延及网络负载方面,也维持在较低水平.

References:

- [1] Lu R, Lin X, Shen X. SPOC: A secure and privacy-preserving opportunistic computing framework for mobile-healthcare emergency. *IEEE Trans. on Parallel & Distributed Systems*, 2013,24(3):614-624.
- [2] Soares VNGJ, Rodrigues JJPC, Farahmand F. GeoSpray: A geographic routing protocol for vehicular delay-tolerant networks. *Information Fusion*, 2014,15(1):102-113.
- [3] Ma C, Yang Y, Du Z, Zhang C. Overview of routing algorithm in pocket switched networks. In: *Proc. of the 9th Int'l Conf. on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*. IEEE, 2015. 42-46.
- [4] Kolodziej J, Khan SU, Wang L, Minallah N, Madani SA, Ghani N, Li H. An application of Markov jump process model for

- activity-based indoor mobility prediction in wireless networks. In: Proc. of the Frontiers of Information Technology. IEEE Computer Society, 2011. 51–56.
- [5] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks [Ph.D. Thesis]. Durham: Duke University, 2000.
- [6] Lindgren A, Doria A, Schelén O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. ACM Sigmobile Mobile Computing & Communications Review, 2004,7(3):19–20.
- [7] Burgess J, Gallagher B, Jensen D, Levine BN. MaxProp: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In: Proc. of the INFOCOM 2006. IEEE Int'l Conf. on Computer Communications. IEEE, 2007. 1–11.
- [8] Niu JW, Zhou X, Liu Y, Sun LM, Ma J. A message transmission scheme for community-based opportunistic network. Journal of Computer Research and Development, 2009,46(12):2068–2075 (in Chinese with English abstract).
- [9] Liu QL, Hu CF, Zhu DL, Li Y, Zhao WL. Interest community detecting method and routing scheme in opportunistic networks. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014,37(3):62–66 (in Chinese with English abstract).
- [10] Wu L, WU DA, Liu M, Wang XM, Gong HG. Periodic intermittently connected-based data delivery in opportunistic networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013,24(3):507–525 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4227.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04227]
- [11] Jia JX, Liu GZ, Xu M. Probability routing algorithm in DTN based on time and space and sociality. Computer Science, 2016,43(S1):295–300, 309 (in Chinese with English abstract).
- [12] Zhang S, Liu XD, Bao XL, Guo SY, Wang X. Community-Based message opportunistic transmission scheme in mobile social networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015,26:29–38 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15004.htm>

附中文参考文献:

- [8] 牛建伟,周兴,刘燕,孙利民,马健.一种基于社区机会网络的消息传输算法.计算机研究与发展,2009,46(12):2068–2075.
- [9] 刘期烈,胡春风,朱德利,李云,赵为粮.机会网络节点兴趣社区检测及路由策略.北京邮电大学学报,2014,37(3):62–66.
- [10] 吴磊,武德安,刘明,王晓敏,龚海刚.机会网络中面向周期性间歇连通的数据传输.软件学报,2013,24(3):507–525. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4227.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04227]
- [11] 贾建鑫,刘广钟,徐明.DTN中基于时空和社会性的概率路由算法.计算机科学,2016,43(S1):295–300,309.
- [12] 张胜,刘小冬,包晓玲,郭水英,汪昕.移动社会网络中基于社区的消息机会传输策略.软件学报,2015,26:29–38. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15004.htm>



张胜(1968—),男,湖北罗田人,博士,副教授,CCF高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,机会网络,人工智能,数据挖掘,GPS/GIS.



王瑜(1992—),男,硕士生,主要研究领域为机会网络.



包晓玲(1973—),女,工程师,主要研究领域为无线传感器网络,数据挖掘.



姚明辉(1991—),男,硕士生,主要研究领域为机会网络.



黄毅(1993—),男,硕士生,主要研究领域为移动传感网络.



时招军(1976—),男,博士,讲师,主要研究领域为机会网络,智能计算.