

基于移动预测的高效机会网络路由算法

牛建伟¹, 郭锦锐¹, 刘燕², 童超¹

(1. 北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100191; 2. 北京大学 软件与微电子学院, 北京 102600)

摘要: 针对现有机会网络的研究较少考虑节点移动的社会特性, 采用改进的马尔可夫模型建模节点的移动过程, 提出了一种基于移动预测的高效机会网络路由算法 PreS(predict and spray)。PreS 算法更加准确地反映了节点实际的移动过程。仿真实验表明, PreS 算法的数据传输成功率接近 Epidemic 算法的性能, 但网络开销明显减少; 与目前该领域主流的相关路由算法 SF(spray and focus)、PER(predict and relay)等相比, 数据传输成功率和传输延迟性能都有明显提高。

关键词: 机会网络; 延时容忍网络; 社会网络; 马尔可夫模型; 移动模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)9A-0073-08

PreS: an efficient routing algorithm for opportunistic networks based on mobility prediction

NIU Jian-wei¹, GUO Jin-kai¹, LIU Yan², TONG Chao¹

(1. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Software and Microelectronics, Peking University, Beijing 102600, China)

Abstract: The existing routing algorithms for opportunistic networks rarely consider the social characteristics of the nodes, and therefore the mobility models in these algorithms cannot accurately describe users' real traces. PreS was proposed, an efficient routing algorithm for opportunistic networking, which employed an adapted Markov chain to model the node mobility process, and to describe the node mobility features by considering the nodes' social characteristics. A comparison with the state-of-the-art algorithms reveals that PreS can provide better performance on both the delivery ration and delivery latency, and approaches the performance of Epidemic with less resource consumption.

Key words: opportunistic networks; delay tolerant networks; social networks; Markov chain; mobility model

1 引言

机会网络 (opportunistic networks)^[1] 是一种延时容忍网络 (DTN, delay tolerant networks)^[2], 特点是源节点和目的节点之间通常没有端到端的连

通路径, 消息传输采用“存储—携带—转发”的模式, 利用节点移动形成的相遇机会进行路由, 直至遇到目的节点。机会网络有许多典型的应用场景, 如野生动物检测网络^[3]、自组车载网络^[4]、移动设备自组织网络^[5]等。

收稿日期: 2010-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60873241, 60933011, 60702031); 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (2008AA01Z217); 软件开发环境国家重点实验室基金资助项目 (SKLSDE-2010ZX-13)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60873241, 60933011, 60702031); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2008AA01Z217); The Research Fund of the State Key Laboratory of Software Development Environment (SKLSDE-2010ZX-13)

数据转发(路由)是机会网络组网的关键问题之一,高效的路由算法需要对每个消息确定合适的转发节点和转发时机。研究人员已经提出了许多算法,如 Epidemic Forwarding^[6]、2-HOP^[7]、Seek and Focus^[8]、Spray and Wait^[9]、PROPHET^[10]、Spray and Focus^[11]等。文献[6]提出的 EF(epidemic forwarding)算法类似于洪泛算法,每个节点都维护一个消息队列,当 2 个节点相遇时,相互转发对方队列中没有的消息。随着时间推移,消息就能够被转发给网络中几乎所有的节点。在不考虑资源消耗的情况下,EF 算法理论上可以达到最佳的性能,但由于实际网络节点的带宽和缓存等资源有限,一旦网络节点增多,算法性能因洪泛导致的拥塞会急剧下降。所以,EF 算法很少在实际中应用,一般用作衡量其他算法性能的基准。文献[7]提出了 2-HOP 算法,源节点将消息拷贝给最先遇到的 L 个转发节点,接着由这些节点携带消息在移动中转发给目标节点,消息只能够通过两跳到达目标节点,网络中只有 $(L+1)$ 个消息副本,避免了 EF 算法因洪泛导致的拥塞。在文献[9]中, Spyropoulos 等提出了 SW(spray and wait)算法。SW 算法在源节点指定消息允许的最大拷贝数 L ,并使用基于二叉树的策略选择 L 个转发节点,算法由 2 个阶段组成。Spray 阶段,源节点 A 遇到 B 节点, A 将消息拷贝给 B 节点,并将剩下的消息转发拷贝任务一分为二,节点 B 完成 $\lfloor (L-2)/2 \rfloor$,节点 A 完成剩下的 $\lceil (L-2)/2 \rceil$,然后节点 A 和 B 各自按这一策略继续转发,直至所有携带此消息的节点都只剩下一份拷贝任务时,节点转入 Wait 阶段,等待直至遇到目标节点时把消息转发给目标节点。相比只允许源节点分发消息拷贝的 2-HOP 算法,SW 算法能够更加快速地在网络中“撒下” L 份消息拷贝,减少了消息分发过程的时间。

这类算法都是随机选择转发节点,另外一类算法则是基于相遇概率预测来选择转发节点。文献[10]提出了 PROPHET 算法,每个节点都维持着与网络内其他节点的下一次相遇概率,节点只有在遇到到达目标节点的概率比自身高的节点时,才将消息转发给该节点。因此,PROPHET 算法能有效地降低传染转发引起的拥塞。在文献[11]中, Spyropoulos 等又提出了 SF(spray and focus)算法。SF 算法改进了 SW 算法的 Wait 阶段, Spray 阶段将消息分发到 L 个转发节点后, SW 算法中转发节点将等待直到遇到目标节点,而 SF 算法引入效用值预测,消息

不断地从效用值低的节点转发到效用值高的节点,直到遇到目标节点。当节点效用值在网络分布适当时, SF 算法可明显提高网络传输性能。这些基于相遇概率预测的算法也有其局限性,这类算法仅考虑了节点与其他节点的相遇概率,而没有考虑相遇的时间。

上述算法大都假定网络节点是随机移动的,但在文献[12]中, Ghoshd 等指出在一定社会区域内的机会网络,节点移动不是完全随机的;相反,节点通常围绕几个其频繁访问的场所转移。本文将这种节点频繁访问的场所称之为“主场所”。文献[13]指出,节点会对区域内少量的“主场所”产生特殊的兴趣偏好,而较少访问其他“主场所”。文献[14]进一步指出在某些社会区域(如大学校园等)中,节点在其“主场所”之间的转移有着几乎确定的规律,即每个节点都会按照其特定的时间表在“主场所”之间转移。在文献[15]中, Yuan 等人提出了 PER(predict and relay)算法,根据节点移动具有的这种社会属性,利用历史移动数据同时预测节点之间的相遇时间和相遇概率,传输性能比其他基于预测的算法都有明显的提高。

但 PER 算法模型假定节点在“主场所”之间的转移是不需要时间的(即在瞬间完成),这显然是与实际情况不相符合的。如果不考虑转移时间,会严重影响建模的准确性,导致算法不能很好地应用于实际场景。其次,上述算法均没有考虑综合利用相遇时间和多拷贝机制的优点,准确地预测相遇时间能够降低传输延时。针对这些问题,本文提出了一种基于移动预测的机会网络路由算法——PreS(predict and spray)算法。PreS 算法采用改进的马尔可夫模型建模节点的移动过程,并引入了 2 个重要的矩阵:节点转移时间矩阵和逗留时间概率矩阵,更加准确地反映节点移动的社会特性。同时,PreS 算法采用改进的 Binary Spraying 策略设计了多拷贝路由机制,综合了基于复制和基于预测算法的优点,使得算法的传输性能比目前主流算法有了明显提高。

论文组织如下:在第 2 节中详细阐述了 PreS 算法;第 3 节中给出了仿真实验和结果分析;第 4 节是结束语。

2 Predict and Spray 算法

2.1 算法假设

本文重点关注由人携带有无线通信接口的便

携设备（如手机、笔记本、平板电脑等）组成的机会网络。文献[12~14]指出这类网络的节点随人移动，具有社会网络的属性。如大学校园网络中，每名携带手机或者笔记本电脑的学生都可以看作一个节点，学生们每天会在寝室、教室、食堂、实验室等之间有规律地转移。因此，在设计这类机会网络路由算法时应该考虑节点移动的社会属性。

在机会网络中，假定每个移动节点都有唯一的ID号。节点围绕几个其特定的“主场所”转移，“主场所”是指网络中节点最经常访问的那些场所，如大学校园网络中的教室，实验室，寝室等。每个“主场所”也都有唯一的ID号。节点处在某一“主场所”时，能够获得该“主场所”的ID号。两节点一旦在同一“主场所”相遇或者在移动途中相遇（2个节点的距离小于某一阈值，如30m），即可通过Wi-Fi等无线链路建立连接，完成消息传输。处在不同“主场所”的节点之间不能直接通信，并且假定节点在“主场所”之间的转移相互独立。PreS算法是基于多拷贝的路由算法，网络中同时存在有限个消息副本。每个消息头部包含有生存期TTL（time-to-live）字段，TTL体现一个消息的时效性，随着时间递减，过期的消息会被节点自动删除。

2.2 节点移动模型

本文采用改进的马尔可夫链对节点移动过程进行建模，提出了基于“主场所”的移动模型，更加准确地反映了实际移动情形。

本文假定节点的转移具有马尔可夫性，即节点将来的位置只与现在的位置有关，而与过去的位置无关。于是，节点在“主场所”之间的转移可以用定义在状态空间 Ω 上的时齐马尔可夫链 (X_n) 来描述：

$$\begin{aligned} P(X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) \\ = P(X_{n+1} = j | X_n = i) = p_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

其中， Ω 表示节点的“主场所”集合，每个节点都有一个特定的 Ω 。 X_n 表示节点在 n 时刻所处的“主场所”。 p_{ij} 表示从“主场所” i 转移至“主场所” j 的概率。模型采用离散时间，记一个单位时间为一个时隙，时隙值大小与建模的准确程度有密切的关系，需要根据实际场景决定。这样，节点在其“主场所”集合内的转移过程可以表示成一个转移概率矩阵：

$$P = \{p_{ij}\} \quad (2)$$

理论上，如果 P 涵盖了节点的所有转移，则

$\sum_{j=1}^l p_{ij} = 1$ 。实际的机会网络中，节点可能有偶然的原因转移至其“主场所”集合之外的场所，故允许 $\sum_{j=1}^l p_{ij} < 1$ 。节点“主场所”集合的提取是建模的关键。用马尔可夫链中的“常返性”定义来提取节点的“主场所”。

对于任何“主场所” i, j ， $f_{ij}^{(n)}$ 表示节点从 i 出发经 n 个时隙后首次到达 j 的概率，则有：

$$f_{ij}^{(n)} = P\{X_n = j, X_{n-1} \neq j, \dots, X_1 \neq j | X_0 = i\} \quad (3)$$

令 $f_{ij} = \sum_{n=1}^{\infty} f_{ij}^{(n)}$ ，若 $f_{ij} = 1$ ，则称 j 为该节点的“主场所”，表示节点从 j 出发，经过有限个时隙将以概率1返回 j 。因此可以根据节点的历史移动信息，选取具有常返性质的场所作为该节点的“主场所”。

文献[14]指出节点在“主场所”的逗留时间和在“主场所”之间的转移时间都是相对稳定的。本文引入了2个矩阵： T 矩阵和 S 矩阵。 T 矩阵表示节点转移时间矩阵， t_{ij} 表示节点从“主场所” i 转移至“主场所” j 的时间。 S 矩阵是一个 $l \times h$ 的矩阵，表示节点在“主场所”上的逗留时间概率， l 表示节点的“主场所”数目， h 表示节点在“主场所”逗留的最长时隙， s_{ij} 表示节点在“主场所” i 的逗留时间不超过 j 个时隙的概率。

文献[14]指出节点在“主场所”的逗留时间和在“主场所”之间的转移时间都是相对稳定的。本文引入了2个矩阵： T 矩阵和 S 矩阵。 T 矩阵表示节点转移时间矩阵， t_{ij} 表示节点从“主场所” i 转移至“主场所” j 的时间。 S 矩阵是一个 $l \times h$ 的矩阵，表示节点在“主场所”上的逗留时间概率， l 表示节点的“主场所”数目， h 表示节点在“主场所”逗留的最长时隙， s_{ij} 表示节点在“主场所” i 的逗留时间不超过 j 个时隙的概率。

$$T = \begin{pmatrix} 0 & t_{12} & \dots & t_{1l} \\ t_{21} & 0 & \dots & t_{2l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{l1} & t_{l2} & t_{l3} & 0 \end{pmatrix}, S = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1h} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2h} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{l1} & s_{l2} & s_{l3} & s_{lh} \end{pmatrix} \quad (4)$$

2.3 节点相遇概率和相遇时刻

本节给出了两节点下一次相遇概率和相遇时刻的计算方法。记 $L_{ij}(k)$ 表示节点现在处在“主场所” i ，在 k 时刻，节点在“主场所” j 的概率，有：

$$L_{ij}(k) = P(X_k = j | X_0 = i) \quad (5)$$

为计算 $L_{ij}(k)$ ，首先分析最简单的情况，假定0到 k 时间段，节点除“主场所” i 与 j 之外，没有转移至其他任何一个“主场所”，则有：

$$L_{ij}(k) = p_{ij} S[i][k - t_{ij}] \quad (6)$$

考虑在此时间段内，节点中途有转移至另外“主场所”的情况，假设节点离开“主场所” i 以后，在 τ 时刻，节点首先转移至“主场所” r ，则：

$$L_{ij}(k) = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i \\ r \neq j}}^l \sum_{\tau=1}^{k-1} L_{ir}(\tau) L_{rj}(k-\tau) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)联合得到:

$$L_{ij}(k) = p_{ij} S[i][k-t_{ij}] + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i \\ r \neq j}}^l \sum_{\tau=1}^{k-1} L_{ir}(\tau) L_{rj}(k-\tau) \quad (8)$$

式(8)表明 $L_{ij}(k)$ 是通过迭代计算完成的, $L_{ij}(k)$ 计算依赖先前得到的 $L_{rj}(k-\tau)$ 值, 计算的精度与时隙值有关, 时隙值越小, 迭代的粒度越细, 计算精度越高。

本文建模采用时齐马尔可夫模型, 因为非时齐的马尔可夫链可以通过变换改造成等价的时齐马尔可夫链。因此如果知道 k_0 时刻, 节点处在“主场所” i , 则在 $k > k_0$ 时刻, 节点在“主场所” j 的概率即可通过计算 $L_{ij}(k-k_0)$ 得到。假设节点 a 在 k_a 时间处于“主场所” v_a , 节点 b 在 k_b 时刻处于“主场所” v_b , 则在 $k(k > k_a, k > k_b)$ 时刻, 节点 a 和 b 在“主场所” i 相遇的概率为

$$F_{ab}^i(k) = L_{v_a i}^a(k-k_a) L_{v_b i}^b(k-k_b) \quad (9)$$

在 k 时刻, 节点 a, b 在任何一个“主场所”相遇的概率为

$$F_{ab}(k) = \sum_{i=1}^l F_{ab}^i(k) \quad (10)$$

2.4 算法实现

本节将详细描述 PreS 算法实现, 算法示意如图 1 所示。首先, 源节点 s 产生一个新消息 M , 同时对生成一标记值 N 。 N 表示该消息 M 需要复制转发的总拷贝数, N 值的计算与 Spray and Focus 算法类似, 参见文献[11]。源节点 s 计算其所处“主场所”中所有邻居节点的预测函数 $f(x)$ (包括 s 本身)。 $f(x)$ 表示节点 x 与目标节点在未来一定时间内相遇的概率, 值越大表示节点 x 越适合作为消息 M 的转发节点。源节点 s 选择其中 $f(x)$ 值最大的 2 个节点, 如节点 u 和 v 。源节点 s 分别将消息 M 转发给节点 u 和 v , 并删除自身的消息 M 。同时, 节点 u 的标记值设置为 $\lceil (N-2)/2 \rceil$, 节点 v 的标记值设置为 $\lfloor (N-2)/2 \rfloor$ 。本文将这一策略称之为 ABS(adapted binary spraying) 转发策略。然后节点 u, v 按同样的 ABS 策略选择新的转发节点, 直至携带消息 M 的转发节点的标记值为 1。当节点携带消息副本并且标记值等于 1 时, 节点只需要计算与其相遇节点的 $f(x)$,

然后把消息转发给最合适的节点, 即 $f(x)$ 最大的节点, 直至遇到目标节点完成消息传输为止。

```

1 Source node  $s$  creates a new message and a token  $N$ ;
2 while (the token > 1) {
    1) Node exchanges and updates the history mobility information of its neighbor nodes;
    2) Node calculates the prediction function  $f(x)$  to pick two neighbors with biggest  $f$ , e.g.  $u$  and  $v$ ;
    3) Node forwards the message to  $u$  and  $v$ , and the token of  $u$  is set to  $\lceil (N-2)/2 \rceil$ , the token of  $v$  is set to  $\lfloor (N-2)/2 \rfloor$ ;
    4) Node  $u$  and  $v$  continue this process until the token becomes 1 or the message is forwarded to the destination node;
}
3 while (the message is not forwarded to destination)
{
    1) If (the token == 1)
        Node calculates  $f(x)$  to pick the most appropriate neighbor as the relay node;
    2) Node forwards the message to the chosen node until the message is forwarded to destination;
}

```

图 1 PreS 算法

预测函数 $f(x)$ 的计算是 PreS 算法的关键环节之一。下面给出 $f(x)$ 的计算方法。假定一个消息的当前生存时间 TTL 为 D , s 表示消息的目的节点, n_c 表示待选择的邻居节点, 则有:

$$f(x) = \max_{n_c} \sum_{k=1}^D F_{n_c s}(k) U(k) \quad (11)$$

其中,
$$U(k) = \frac{1}{\ln(1+k)} \quad (12)$$

$U(k)$ 是一个时间效用函数, 随时间增大而递减。本文用 $U(k)$ 作归一化处理, 表示不同的时间 k 值对于预测的贡献程度, k 值越小, 时延越小, 贡献越大。 $f(x)$ 表示是在 $[1, D]$ 内, 候选邻居节点的最大平均相遇概率。

$f(x)$ 的计算依赖于转移概率矩阵 \mathbf{P} , 转移时间矩阵 \mathbf{T} , 逗留时间概率矩阵 \mathbf{S} , 下面分别给出相应的计算方法。

转移概率矩阵 $\mathbf{P} = \{p_{ij}\}$, p_{ij} 表示节点从“主场所” i 转移至“主场所” j 的概率。数学上, 当观察样本足够大时, 概率就可以通过计算样本出现的频率得到, 即:

$$p_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (13)$$

其中, N_i 表示节点在过去一段时间内转移进入“主

场所” i 的总次数, N_{ij} 表示过去一段时间内节点从“主场所” i 转移至“主场所” j 的总次数。显然, $N_{ij} \leq N_i$, $p_{ij} \leq 1$ 。故通过记录 N_i 、 N_{ij} , 节点可以产生并随时更新自己的 P 矩阵。

转移时间矩阵 $T = \{t_{ij}\}$, t_{ij} 表示节点从“主场所” i 转移至“主场所” j 所需要的时间, 可以由式 (14) 计算得到。

$$t_{ij} = \frac{\sum_{q=1}^{N_{ij}} t_{ij}^{(q)}}{N_{ij}} \quad (14)$$

其中, $t_{ij}^{(q)}$ 表示节点第 q 次从“主场所” i 转移至“主场所” j 所用的时间, t_{ij} 表示前 N_{ij} 次转移的平均时间。节点通过记录并不断更新前 q 次的转移时间之和 $Z^{(q)}$ 来计算前 N_{ij} 次的转移时间总和:

$$Z^{(q)} = Z^{(q-1)} + t_{ij}^{(q)} \quad (15)$$

$$\sum_{q=1}^{N_{ij}} t_{ij}^{(q)} = Z^{(N_{ij})} \quad (16)$$

逗留时间概率矩阵 $S = \{s_{ij}\}$, s_{ij} 表节点在“主场所” i 的逗留时间不大于 j 个时隙的概率, 记 α_i 表示节点在“主场所” i 的逗留时间, 有:

$$s_{ij} = P(\alpha_i < j) = \sum_{n=1}^{j-1} P(\alpha_i = n) \quad (17)$$

节点通过记录过去一段时间内在“主场所”的逗留时间分布 $\{\alpha_i\}$, 根据式 (17) 来计算 s_{ij} 。

节点的历史移动信息用一个四元组表示: $\langle P, T, S, t_{rec} \rangle$, 前三项表示计算 $f(x)$ 时用到的 3 个矩阵, t_{rec} 表示这条记录产生的时间。节点相遇时交换各自的历史信息, 每个节点在本地数据库中保存所遇到的邻居节点的四元组信息, 并根据 t_{rec} 值大小进行更新。

3 仿真与性能分析

3.1 仿真环境

本文采用 ONE (opportunistic network environment) 网络仿真软件验证分析 PreS 算法的性能。ONE 是针对机会网络开发的仿真工具, 有良好的可视化界面, 并集成了目前机会网络 (DTN 网络) 领域内典型的路由算法和移动模型, 如 DirectDelivery、Epidemic、PROPHET、Spray and Wait、RWP、

MapBased、ShortestPathMapBased 等。同时, ONE 也为第三方提供了开发路由算法和移动模型的接口。

移动模型描述节点的移动模式, 包括位置、速率等特征的变化, 传统的 DTN 网络研究和仿真大都采用 Random waypoint 模型。PreS 算法的主要应用场景是人携带智能手持设备的自组织机会网络, RWP 模型不能反映节点移动的社会特性。因此, 重写了 ONE 内置的 MapRouteMovement 模型, 改造成基于“主场所”的移动模型。定义一个节点轨迹偏移度 d , 用来仿真节点移动的社会特性, 表示节点会以 $1-d$ 的概率从当前位置出发转移至某个“主场所”, 只会以 d 的概率转移至其他“主场所”。于是, 当 $d=0$ 时, 节点的移动轨迹就能够完全确定, 但与节点移动完全随机一样, 这种网络移动模型也不能反映节点实际的移动规律。但如果 d 取一个比较小的值时, 则能够表示节点以较大的概率在其有偏好的几个“主场所”之间转移。 d 越大, 表示节点的移动越随机。在仿真中, d 在 $[0:0.5]$ 区间上取值, 用来分析 PreS 算法在不同 d 值下的传输性能。

仿真时间为 12h (ONE 内定时), 开始时节点均匀分布于各个“主场所”。由于 PreS 算法需要用历史移动数据预测节点将来的状态, 所以仿真开始时有一段学习时间, 积累历史信息, 设定仿真前 3 个小时为学习时间。消息由 ONE 自带的 MessageEventGenerator 产生, 具体参数设置如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数

仿真参数	值
仿真时间/h	12 (ONE 内部定时)
仿真区域面积 (宽, 高: m)	4 500, 3 400
移动节点数目	300
“主场所”数目	30
节点缓存/Mbyte	5
消息大小/byte	8
节点最小速度/(m·s ⁻¹)	0.5
节点最大速度/(m·s ⁻¹)	1.5
transmitRange/m	10
transmitSpeed/(kbyte·s ⁻¹)	250
SW/SF 算法拷贝数	6
PreS 算法学习时间/h	3
时隙值/m	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60
节点轨迹偏移度 d	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5
TTL 值/h	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
节点最大逗留时间(slot)	20

3.2 结果分析

在实验中，同时运行了 Epidemic、Spray and Wait、Spray and Focus、Predict and Relay 和 PreS 算法。为了使 Epidemic 算法能够取得最佳性能，在表 1 的仿真参数设置时保证了节点有足够的缓存，并且在运行 Epidemic 算法时，网络参数均设为理想条件。

我们主要从消息的传输成功率和端到端的传输延时两方面衡量各个算法的优劣。传输成功率指仿真结束时，目的节点收到的消息数与源节点所发消息数的比值。端到端的传输延时指消息从源节点到达目的节点的平均时间。实验中分别从不同时隙长度，不同节点轨迹偏移度，不同 TTL 值考察对算法传输性能的影响。

3.2.1 不同时隙对算法性能的影响

本组实验中，节点轨迹偏移度 d 取 0.2，TTL 值取 10h。

从图 2 中可以看出，在理想条件下，Epidemic 算法的传输成功率接近理论上限 100%。PreS 算法的传输成功率较 PER、SW、SF 等算法有较大提高。取时隙值在[1:20]内的值计算，PreS 算法的传输成功率比 PER 平均提高 18.4%。

图 2 表明随着时隙值的增大，PreS 和 PER 算法的传输成功率随之降低。这是由于 PreS 和 PER 算法都是基于离散时间，时隙越小，算法在进行迭代计算时的精度越高；相反，时隙越大，计算精度越差，算法在预测相遇概率时误差就越大，因此传输成功率就将降低。Epidemic、SW、SF 这 3 个算法都是基于连续时间，时隙值的增大不影响算法的传输成功率。

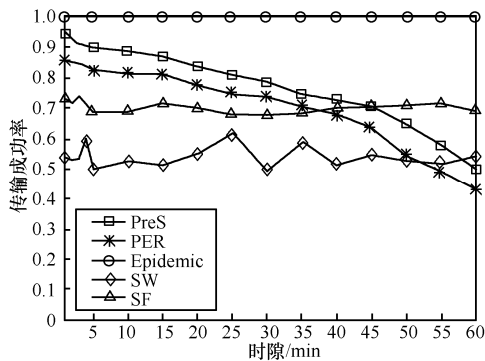


图 2 不同时间隙对传输成功率的影响

图 3 给出了不同时隙对端到端传输延时的影响。理想条件下，Epidemic 算法能够达到传输延时的下界，其传输延时明显小于其他算法。时隙值在

小于 35min 时，PreS 算法的传输延时比 PER、SW、SF 都要小，当时隙值在[1:20]范围内取值时，PreS 算法延迟比 SF 算法平均减少 21.7%。

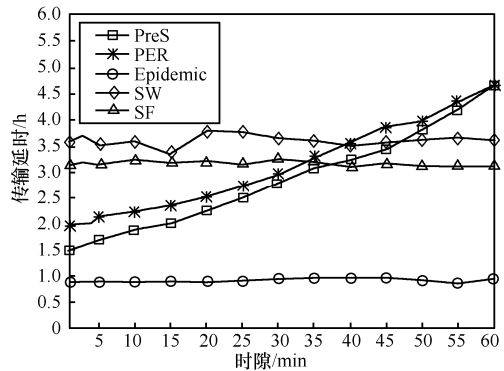


图 3 不同时间隙对传输延时的影响

随着时隙的增大，PreS 算法的传输延时随之增加，算法性能下降。图 2 和图 3 的实验表明，时隙值的大小明显影响 PreS 算法的性能。时隙值越小，迭代计算的“粒度”越细，建模的精度就越高，预测越准确，算法的传输性能就越高。

3.2.2 不同 TTL 值对算法性能的影响

本组实验中，时隙值取 15min，节点轨迹偏移度 d 取 0.2。图 4 表明，TTL 值较小时，各算法的传输成功率均较差，随着 TTL 值增大，各算法的传输成功率随之提高。

机会网络本质上是一类延迟容忍网络，一般情况下对消息传输的实时性要求较为宽松。TTL 越小，消息就更加可能因 TTL 减小到 0 而被中转节点删除。随着 TTL 值增大，有更多的消息被成功传输到目标节点，因此算法的传输成功率也随着提高。

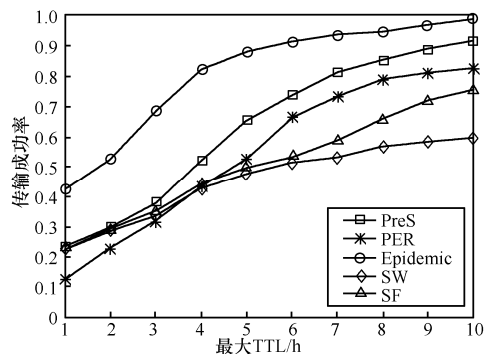


图 4 不同 TTL 值对传输成功率的影响

图 5 表明，TTL 较小时，各个算法的传输延时较大。因为此时有很多消息中途被节点丢弃了，没

有被成功传输，理论上它们的传输延时为无穷大，仿真计算时取 25h。随着 TTL 值增大，有更多的消息在生存期结束前被成功传输到目标节点，于是算法的传输延时也随之降低。

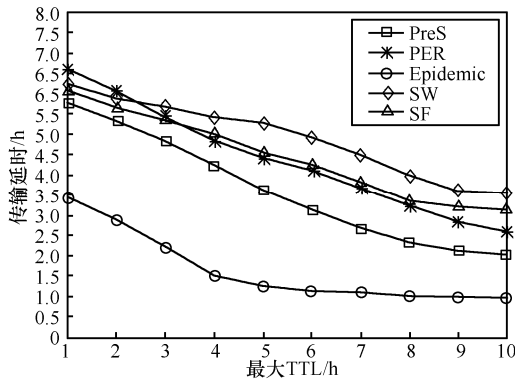


图5 不同 TTL 值对传输延时的影响

图 4 和图 5 表明，无论是在传输成功率还是在传输延时上，PreS 算法都比 SW、SF、PER 算法有明显的提高。如果 TTL 取值为 10h，PreS 算法在传输成功率和传输延时上都接近了 Epidemic 算法的性能。

3.2.3 不同节点偏移度 d 对算法性能的影响

本组实验中，时隙值取 15min，TTL 取值 10h。

图 6 表明，PreS、PER、SF 3 个算法的传输成功率都随着偏移度 d 的增大而降低。这是因为这些算法都是基于预测的， d 越大表明节点的移动越随机，预测的准确性越差。SW、Epidemic 算法的传输成功率与偏移度 d 没有明显的相关性。在节点的转移轨迹稳定的应用场景中 (d 取 0.2 以内)，PreS 算法的传输成功率明显高于 PER 和 SF 算法。

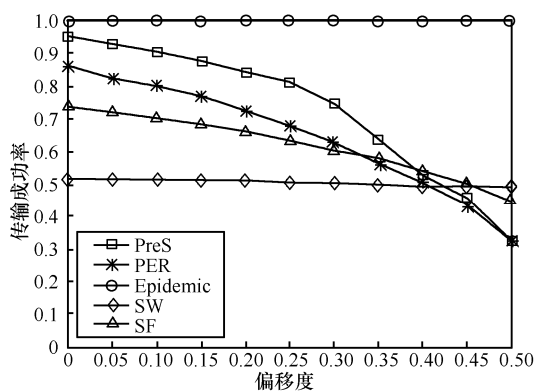


图 6 不同轨迹偏移度对传输成功率的影响

从图 7 中可以看出，偏移度 d 越小，PreS 算法的传输延时越接近 Epidemic 算法的传输延时。因为

此时节点的移动越有规律，PreS 算法对节点间的相遇时间和相遇概率预测越准确。

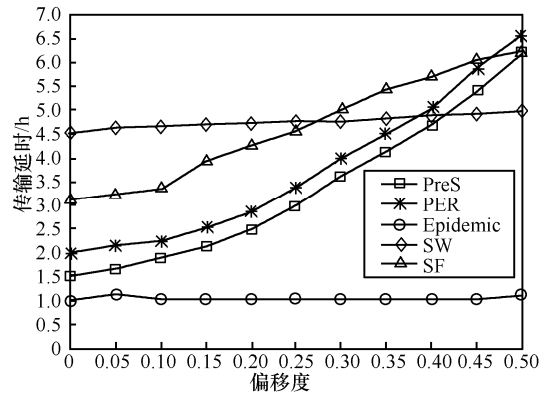


图 7 不同轨迹偏移度对传输延时的影响

图 6 和图 7 表明，PreS 算法在偏移度 d 较小的应用场景中，传输成功率和传输延时性能比 PER、SF 算法都有明显提高。

4 结束语

由人携带的具有短距离通信接口的移动设备所组成的机会网络具有社会网络属性，本文针对这种属性，采用改进的离散马尔可夫模型对节点的移动轨迹进行建模，提出了 PreS 路由算法。PreS 算法综合了基于复制和概率预测算法的优点，理论分析和实验结果表明 PreS 算法比目前主流的机会网络路由算法更加准确反映了机会网络的实际移动特性，显著提高了消息传输成功率，降低了端到端的传输延时。下一步工作将考虑采用连续的马尔可夫过程模型并引入偶然“因子”建模节点的移动过程，以使模型更加全面地反映机会网络的实际特性。同时拟将 PreS 算法在校园中实际部署观察，更加客观地考察 PreS 算法在实际应用场景中的性能，并对其进行优化改进。

参考文献:

- [1] 熊永平, 孙利民, 牛建伟等. 机会网络[J]. 软件学报, 2009, 20(1):124-137.
XIONG Y P, SUN L M, NIU J W, *et al.* Opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(1):124-137.
- [2] FALL K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM[C]. Karlsruhe, 2003.27-34.
- [3] JUANG P, OKI H, WANG Y, *et al.* Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with zebra-net[A]. Proceedings of the 10th ASPLOS[C]. New York, 2002.96-107.

- [4] AVRI D, MARIA U, DURGA P. Providing connectivity to the saami nomadic community[A]. Proceedings of the 2nd Int Conf on Open Collaborative Design for Sustainable Innovation[C]. Bangalore, 2002. 132-140.
- [5] PAN H, CHAINTREAU A, SCOTT J, *et al.* Pocket switched networks and human mobility in conference environments[A]. Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking[C]. Philadelphia, 2005. 244-251.
- [6] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks[R]. Durham, NC: Duke University, CS-2000-06, 2000.
- [7] GROSSGLAUSER M, TSE D. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2002, 10(4):477-486.
- [8] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C. Single-copy routing in intermittently connected mobile networks[A]. Proceedings of IEEE SECON, 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference[C]. Santa Clara, 2004.235-244.
- [9] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networking (WDTN)[C]. Philadelphia, 2005. 252-259.
- [10] LINDGREN A, DORIA A, SCHELÉN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2003, 7(3):19-20.
- [11] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C. Spray and focus: efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and correlated mobility[A]. Proceedings of Fifth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops[C]. New York, 2007. 79-85.
- [12] GHOSH J, PHILIP S, QIAO C. Sociological Orbit Aware Location Approximation and Routing (solar) in DTN[R]. Buffalo: State University of New York, 2005.
- [13] YOON J, NOBLE B, LIU M, *et al.* Building realistic mobility models from coarse-grained traces[A]. Proceedings of ACM MobiSys 2006[C]. Uppsala, 2006.177-193.
- [14] LIU C, WU J. Routing in a cyclic mobispace[A]. Proceedings of ACM MobiHoc, 2008[C]. New York, 2008.351-360.
- [15] YUAN Q, CARDEI L, WU J. Predict and relay: an efficient routing in disruption tolerant networks[A]. Proceedings of ACM MobiHoc'09[C]. Louisiana, 2009.95-104.

作者简介:



牛建伟 (1969-), 男, 河南郑州人, 博士, 北京航空航天大学副教授, 主要研究方向为嵌入式与移动计算、移动流媒体。



郭锦铠 (1985-), 男, 浙江上虞人, 北京航空航天大学硕士生, 主要研究方向为机会网络。



刘燕 (1971-), 女, 湖南长沙人, 博士, 北京大学副教授, 主要研究方向为计算机网络、软件工程。



童超 (1978-), 男, 重庆人, 博士, 北京航空航天大学讲师, 主要研究方向为移动计算、计算机网络。