

## 基于节点相似性的容迟网络概率路由算法

宋有美<sup>1</sup>, 李建波<sup>1</sup>, 和天玥<sup>2</sup>, 徐吉兴<sup>1</sup>

(1. 青岛大学 信息工程学院, 山东 青岛 266071; 2. 南京邮电大学 海外教育学院, 南京 210023)

**摘 要:** 在容迟网络(DTN)中节点密度稀疏和节点移动导致网络拓扑结构频繁割裂,消息在传递时无法始终存在一条端到端的连通路径,因此 DTN 路由算法通常采用存储-携带-转发机制将消息从源节点投递至目的节点。针对上述情况,结合节点间相似性与消息生存时间内节点到达目的节点的概率值,提出一种基于节点相似性的概率路由算法(SBPR),包含消息复制与消息转发 2 种策略。当持有消息的节点与其他节点相遇时,将消息复制给消息节点相似性较小的节点以提高消息投递率。对于与其相似性较大的邻居节点,如果该邻居节点到达目的节点的概率更大,将消息转发至邻居节点以节省网络资源消耗。实验结果表明,在节点缓存不足的情况下,SBPR 在消息投递率、网络负载率及消息丢包数等方面的表现均优于 Epidemic,Prophet 和 First Contact 路由算法。

**关键词:** 容迟网络;路由算法;消息复制;节点相似性;概率转发

**中文引用格式:**宋有美,李建波,和天玥,等. 基于节点相似性的容迟网络概率路由算法[J]. 计算机工程,2016,42(9):63-70.

**英文引用格式:**Song Youmei,Li Jianbo,He Tianyue,et al. Probabilistic Routing Algorithm in Delay Tolerant Network Based on Node Similarity[J]. Computer Engineering,2016,42(9):63-70.

### Probabilistic Routing Algorithm in Delay Tolerant Network Based on Node Similarity

SONG Youmei<sup>1</sup>,LI Jianbo<sup>1</sup>,HE Tianyue<sup>2</sup>,XU Jixing<sup>1</sup>

(1. College of Information Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China;

2. College of Overseas Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**[Abstract]** In Delay Tolerant Network(DTN), due to the frequent network partitions caused by sparse node density and node mobility, there is not always a connected end-to-end path in the process of message delivery. Thus, the routing algorithms in DTN generally adopt a store, carry and forward mechanism so as to deliver a message from a source to a destination. For the above problems, a Similarity-based Probabilistic Routing (SBPR) algorithm is proposed, which combines the concept of node similarity with the delivery probability to the destination during the messages' Time to Live(TTL). Both message replication and message forwarding strategies are adopted in SBPR. Concretely, on one hand, when a node holding messages encounters other nodes, it replicates the message to the neighboring node which has a smaller inter-node similarity, so as to increase the message delivery ratio. On the other hand, if a neighboring node has a larger node similarity and delivery probability to the destination node, it forwards the message to this neighboring node for the purpose of saving the network resource consumption. Experimental result shows that the proposed SBPR outperforms Epidemic, Prophet and First Contact (FC) routing algorithms in terms of delivery ratio, network overhead ratio and message dropping ratio in the case of insufficient node buffer.

**[Key words]** Delay Tolerant Network(DTN); routing algorithm; message copy; node similarity; probabilistic forwarding  
**DOI:**10.3969/j.issn.1000-3428.2016.09.012

## 1 概述

在传统 Internet 中, TCP/IP 协议通常假设源节

点到目的节点有一条完整的连通路径<sup>[1]</sup>, 数据率双向对称, 丢包率和传输时延较低。然而近年来, 用于发展中国家偏远地区通信和 Internet 接入服务的信

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(61502261,61572457,61379132);山东省自然科学基金资助项目(ZR2013FQ022);山东省教育厅高校科技计划基金资助项目(J14LN85)。

**作者简介:**宋有美(1991-),女,硕士研究生,主研方向为容延网络、路由算法;李建波(通讯作者),教授、博士、CCF 会员;和天玥,本科生;徐吉兴,硕士研究生。

**收稿日期:**2015-09-06 **修回日期:**2015-10-23 **E-mail:**songyoumei513@163.com

息网络、水下传感器网络<sup>[2-3]</sup>、车载自组网 (Vehicular Ad Hoc Network, VANET)<sup>[4-5]</sup>、手持设备网 (Pocket Switched Network, PSN)<sup>[6-7]</sup> 以及移动社交网<sup>[8-9]</sup> 等许多新型挑战网络广泛兴起。由于这类网络的特点是节点密度稀疏、节点移动性强、消息传输时延长、节点资源有限、网络拓扑频繁割裂<sup>[10]</sup>、异构互连<sup>[11]</sup> 以及高误码率等, TCP/IP 协议在此类复杂的挑战网络中已经不再适用。

在 DTN 路由协议中, 一方面为了提高消息投递率, 选择将消息复制给尽可能多的邻居节点以并行传输; 另一方面, 由于在实际 DTN 环境中, 每个节点的缓存容量有限, 同一消息多个副本的洪泛传输容易造成节点缓存溢出, 这反而增加了消息丢包数, 降低路由性能。为了克服上述问题并有效分配消息副本, 在节点相遇时间间隔小于消息生存周期的情况下, 结合节点相似性及节点到达目的节点的概率值, 提出一种基于节点相似性的概率路由 (Node Similarity-based Probabilistic Routing, SBPR) 算法。本文利用 ONE (Opportunity Networking Environment) 模拟器对 SBPR, Epidemic<sup>[12]</sup>, Prophet<sup>[13]</sup> 及 First Contact (FC)<sup>[14]</sup> 路由算法进行大量仿真实验并比较路由性能。

## 2 相关工作

研究人员为了应对因节点移动导致的网络拓扑频繁割裂, 而造成在消息源节点与目的节点间很难存在一条稳定路径用于消息传输的问题, 基于携带-存储-转发消息投递机制, 提出大量路由算法。近年来, 为了研究方便, 文献[15]将容迟网络 (Delay Tolerant Network, DTN) 路由协议进行归类, 分为单播路由、多播路由及任播路由 3 种路由类型, 进而将单播路由分为消息复制与洪泛策略、转发策略、历史与预测策略、概率策略、编码策略和拓扑知识策略 6 种, 多播路由根据 DTN 区域的不同可分为基于域内和基于域间的多播路由。

早期路由算法只是简单地对消息进行复制, 完全不考虑中继节点的选择问题。传染路由算法 Epidemic 是该类算法的典型。在 Epidemic 算法中, 每个携带消息的节点将消息洪泛复制给与其接触的所有节点, 直至该消息到达目的节点。Epidemic 完全不需要预先知道网络的拓扑信息, 并且在节点缓存不受限的情况下, 消息投递率最高。而在现实 DTN 环境中, 节点缓存容量有限, 洪泛路由使节点缓存溢出、消息丢弃概率增大, 进而造成路由算法性能低下。为减少复制消息的盲目性并控制消息副本数量, 文献[13]提出 Prophet 算法, Prophet 利用节点间相遇的历史信息和传递性定义一个投递预测值指

标来描述节点之间成功传输消息的概率, 每当 2 个节点相遇时, 选择到达目的节点概率更高的节点作为消息的中继节点, 直至消息到达目的节点, 但是 Prophet 本质上仍是消息复制路由, Epidemic 的路由缺陷在 Prophet 的路由性能中仍有体现。文献[14]不采取选择中继节点进行消息复制的策略, 而是提出消息转发路由协议 FC。源节点携带某个消息随机运动, 直到与网络中的其他节点随机相遇, 携带该消息的节点将该消息的唯一副本转发给相遇节点。FC 虽然产生少量的消息副本冗余, 消耗较少网络资源, 但是由于其没有对中继节点通过相关效用函数进行适当选择, 消息在传递过程中可能出现携带消息的节点与目的节点背向而驰、消息路径产生环路等问题, 造成消息投递率较不理想。

上述路由协议都是采用随机移动模型描述节点运动状态, 然而在一些容迟网络中, 节点的移动具有典型的“时间”和“空间”属性, 例如由人随身携带的手持设备自组形成的手持设备网以及通过车载无线通信设备实现车辆间信息数据共享的车载自组网均属于此类网络。在此类网络中, 节点具有典型的社会属性, 文献[16]基于节点的社会属性提出根据效用值转发消息的路由算法 SimBet。SimBet 借鉴自我网络<sup>[17]</sup> 的概念, 定义由中介度和相似性度量的效用函数, 来估算容迟网络中每个节点的中心性, 并选择 SimBet 值较大的节点作为下一跳节点。文献[18]在节点间相遇时间间隔服从指数分布的基础上, 提出社区感知机会路由 (Community-aware Opportunistic Routing, CAOR)。CAOR 基于节点间的社区属性提出一种社区感知模型, 通过 Dijkstra 算法计算社区家园间最小延时期望, 从而选择有效的中继节点, 但上述 2 种算法较为复杂, 不易实现。事实上, 文献[19-21]研究表明节点在同一位置中重复出现是有规律可循的, 同时指出幂律分布能更准确地表现出节点间相遇时间间隔的规律。本文在节点相遇时间间隔小于消息生存周期的情况下, SBPR 利用幂律分布计算节点到达目的节点的概率值, 进而有效选择消息的中继节点。

## 3 SBPR 算法

为追求较高的消息投递率、较低的网络负载和较少的消息丢包数等目标, SBPR 根据 2 个效用值: 节点间相似性与节点到达目的节点的概率值进行路由选择。在详细介绍 SBPR 算法前, 做出如下假设:

(1) 节点间的相遇时间间隔服从幂律分布, 但是节点的运动轨迹是随机的, 下一跳的选择并不能提前确定。

(2) 每个节点的缓存容量有限, 因为在 DTN 环

境中每个节点的缓存容量不能无限大。

(3) 节点间的连接没有基础设施辅助路径选择, 消息传输需通过一跳或多跳中继节点的辅助才能到达目的节点。

### 3.1 节点相似性

在 DTN 中, 如果 2 个节点在过去某个时间相遇, 那么在未来的某个时间点, 它们仍有可能再次相遇。节点间过去接触越频繁, 未来相遇的概率越大。节点的历史邻居节点很有可能就是未来即将相遇的节点, 所以, 通过记录节点的历史相遇节点信息来估计节点的运动轨迹, 进而计算节点间的相似性。

在 DTN 中, 尽管消息多副本策略增加了消息投递率, 但由于每个节点的缓存容量有限, 若节点接受所有相遇节点携带而自己持有的消息, 路由性能反而会因为节点缓存溢出而降低。为合理利用节点缓存, 减少消息副本积压, 携带消息的节点选择将消息复制给彼此运动轨迹相似性较小的邻居节点。例如在教室上课的学生将一天大部分时间花费在学校里, 同一班级的学生 A 与学生 B 在校时间内, 各自接触的人基本是同班同学与老师, 所以, 学生 A 与 B 会有很多共同熟人, 即学生 A 与学生 B 的社交圈存在很大重叠性。当学生 A 要传达消息给其他人时, 既然 A 与 B 接触的人基本相同, 为避免消息在同一区域内重复传递而造成消息副本积压, 只需让 A 或 B 保留一份消息。为更直观描述, 抽象出 DTN 局部节点相似示意图, 如图 1 所示。当源节点 S 向目的节点 D 进行消息传输时, 节点 S 与 D 之间无法直接连接, 需借助中继节点完成消息通信。邻居节点 i 与源节点 S 的共同邻居节点较多, 说明源节点 S 同样可能遇到与节点 i 相遇的节点。为减少因消息副本积压而造成不必要的网络流量消耗, 应尽可能避免让节点 S 与节点 i 同时携带消息。

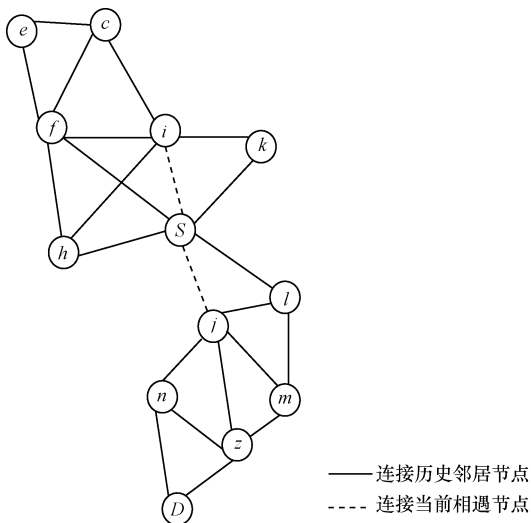


图 1 DTN 局部节点相似示意图

节点  $i$  为携带消息节点, 对于节点  $i$  的历史邻居节点集合, 用  $N_i$  表示。

$$N_i = \{v \mid encounter_{(v,i)} \geq 1\} \quad (1)$$

其中,  $encounter_{(v,i)}$  表示节点  $i$  与节点  $v$  的相遇次数。当节点  $v$  与节点  $i$  相遇次数大于等于 1 时, 认为节点  $v \in N_i$ 。

$N_i, N_j$  及  $N_r$  分别表示节点  $i, j$  与  $r$  的历史邻居节点集合, 集合的交集表示节点间共同的历史邻居节点集, 用  $E_{i,j}$  表示。

$$E_{i,j} = N_i \cap N_j \quad (2)$$

节点  $i$  与节点  $j$  间的相似性表示如式(3)所示。

$$S_{(i,j)} = \frac{|E_{i,j}|}{|N_j|} \quad (3)$$

因此, 计算图 2 中节点  $i$  与  $j$  的相似性  $S_{i,j}$  及节点  $i$  与  $r$  的相似性  $S_{i,r}$ 。

$$S_{i,j} = \frac{1}{6}$$

$$S_{i,r} = \frac{3}{4}$$

节点间的相似性间接表现出 2 个节点的中继与投递能力的相似程度, 如图 2 所示。

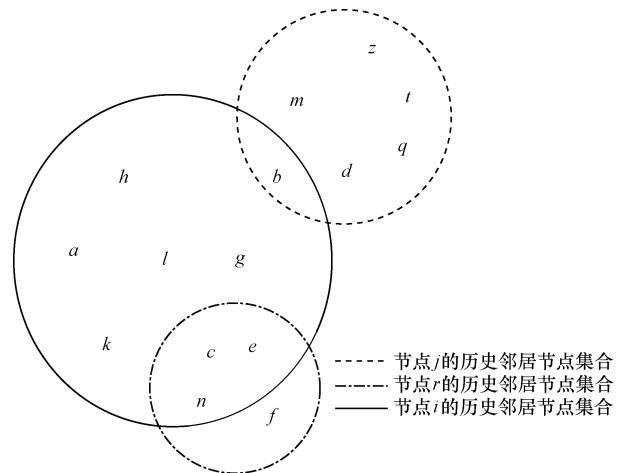


图 2 节点的历史邻居节点

当携带消息的节点  $i$  遇到节点  $j$  与节点  $r$  时,  $S_{i,r}$  越大, 说明节点  $i$  与节点  $r$  通信范围的重合部分可能越大。若相似性  $S_{i,r}$  大于阈值  $\tau$  时, 为控制消息冗余, 在节点  $i$  与节点  $r$  之间只需保留一份消息副本; 若  $S_{i,j}$  小于阈值  $\tau$ , 说明节点  $i$  与节点  $j$  可能并不在同一社区, 为尽可能实现消息多副本并行广泛扩散, 此时节点  $i$  应该将消息复制一份传递至节点  $j$ 。因为节点密度、节点运动轨迹等属性随环境的不同而不同,  $\tau$  值的设定应适应具体情况。若  $\tau$  很大趋向 1 时, 节点间相似性基本小于阈值  $\tau$ , 此时 SBPR 执行消息复制策略, 其算法本质等同于传染路由 Epidemic; 当  $\tau$  很小趋向 0 时, 此时任意 2 个节点间的相似性基本

都大于  $\tau$ , SBPR 实质上基本等同于基于概率值的单副本转发路由。因此,  $\tau$  的设定尤为关键, 应考虑具体场景进行多次实验取最优值。

### 3.2 基于概率的消息转发

在消息投递过程中, 需要经过多个中间节点的中继和转发直到携带消息的节点到达目的节点的通信范围, 其中存在 2 种情况可能会造成消息丢失: (1) 节点因携带大量消息副本超出节点的存储容量, 节点遵循一定的缓存管理机制将消息删除; (2) 由于节点连接的频繁中断, 传输延时大于消息的生存周期, 消息因失去实时有效性而被删除。因此, 在消息生存周期内, 选择到达目的节点的概率值较大的节点作为下一跳, 是为在减少消息丢包数的前提下降低消息的投递时延、增大消息投递率。因此, 在当前时间  $t$  到与目的节点相遇时刻的时间间隔小于消息生存周期的条件下, SBPR 选择让携带消息的节点将消息转发给到达目的节点概率值较大的相遇节点。

设节点  $i$  与节点  $j$  最近一次相遇时间为  $T_{i,j}^1$ , 下一次相遇时时间为  $T_{i,j}^2$ , 则节点  $i$  与节点  $j$  最近一次的相遇时间间隔为  $I_{i,j} = T_{i,j}^2 - T_{i,j}^1$ 。又因为节点相遇时间间隔服从指数为  $\alpha$  的幂律分布, 所相遇时间间隔大于  $I_{i,j}$  的概率如式(4)所示。

$$P(X \geq I_{i,j}) = I_{i,j}^{-\alpha} \quad (4)$$

由于节点间的异质性, 因此每对节点之间的  $\alpha$  有所不同, 为叙述方便, 只对一对节点进行详细分析。取节点  $i$  和目的节点  $d$  的  $n$  个相遇时间间隔样本, 按照递增顺序排列为  $I_{i,d}^1, I_{i,d}^2, \dots, I_{i,d}^n$ 。对每个  $I_{i,d}^k$  有:

$$P_i(X \geq I_{i,d}^k) = (I_{i,d}^k)^{-\alpha_i} = \frac{n-k+1}{n} \quad (5)$$

$$\alpha_i = \frac{\ln n - \ln(n-k+1)}{\ln I_{i,d}^k} \quad (6)$$

由上述推导容易计算出节点  $i$  在消息生存周期内到达目的节点  $d$  的概率如式(7)所示。

$$P_{(i,d)}(X \leq t + TTL_m) = 1 - (t + TTL_m)^{-\alpha_i} \quad (7)$$

其中,  $t$  是节点  $i$  与目的节点  $d$  在上次相遇后到当前时间的的时间间隔。利用幂律分布的数学模型, 在不超过消息生存周期的条件下, 计算相遇节点到达目的节点的概率值, 携带消息节点选择在当前时刻到达目的节点概率较大的相遇节点作为下一跳中继节点, 进行消息转发。这样既能有效降低消息的丢包数, 同时使得消息被尽快、准确传递到目的节点, 减少系统的能量消耗。

### 3.3 SBPR 算法的实现

**算法 1** SBPR 算法

输入 node  $i, j$ , message  $M$

输出 node  $j$

```

1. if j is newNeighbor do
2.   add j to  $N_i$ ; add i to  $N_j$ ;
3. end if
4. j.intervalTime ← currentTime - lastTime;
5. j.lastTime ← currentTime;
6. Similarity( $i, j$ ) ←  $|E_{i,j}| / |N_j|$ ;
7. if j is destination
8.   transmit M to j;
9. else
10.  if Similarity < =  $\tau$ 
11.    copy M to j;
12.  else
13.    if
14.      j.Probability(destination) > = i.Probability(destination)
15.    forward M to j;

```

算法 1 给出了具体算法的实现策略。为方便描述 SBPR, 假定节点  $i$  携带消息。当节点  $i$  与节点  $j$  相遇时, 判断节点  $i$  的消息列表中是否有到达  $j$  的消息, 如果有, 则将消息传递给  $j$ , 如第 7 行、第 8 行所示。同时判断彼此是否是新的邻居节点  $newNeighbor$ , 若两节点的历史相遇次数为 0, 则加入各自的邻居节点集合  $N_i, N_j$ , 如算法 1 中第 1 行、第 2 行所示。同时通过计算两节点间的相似性  $Similarity(i, j)$ , 当  $Similarity(i, j)$  小于阈值  $\tau$  时, 节点  $i$  与节点  $j$  的共同历史邻居节点相对较少, 社交圈的相似度较低, 节点  $i$  将消息复制给节点  $j$ , 使得节点  $i$  和  $j$  同时携带消息并进行并行传递; 当  $Similarity(i, j)$  大于等于阈值  $\tau$  时, 节点  $i$  与节点  $j$  在消息中继与投递方面能力相当, 为减少消息冗余, SBPR 在节点  $i$  和  $j$  中选择到达目的节点概率值  $Probability(destination)$  较大的节点携带消息, 如第 10 行 ~ 第 14 行所示。

SBPR 将节点间的相似性与消息的生存周期结合, 一方面利用相似性避免将消息传递给与携带消息节点社会行为相似的节点, 减少了消息冗余以及不必要的网络流量消耗; 另一方面, 在消息生存周期内, 选择到达目的节点概率较大的相遇节点作为下一跳的中继节点, 增加了消息投递率, 降低了消息丢弃数。

## 4 仿真实验与结果分析

无论是节点间毫无关联的 DTN, 还是节点间社会属性较强烈的社会网络, 在消息生存周期内, 选择到达目的节点概率值大的节点作为下一跳中继节点是 SBPR 实现较高消息投递率的保障。同时, 根据相遇节点间的相似性控制消息的副本数, 有效降低不必要的网络流量消耗。在节点间毫无关联的 DTN 中, 相遇节点间的共同邻居节点较少, 此时通过降低阈值  $\tau$ , 增加网络中携带消息副本的节点数, 以保证实施消息多副本并行传递, 提高消息投递率。在社交网络中, 移动泛在网络的节点行为呈现社群现象, 在同一社区

中的节点间相似性较高,此时通过调高  $\tau$  值,避免消息副本在同一社区内传递冗余,消耗过多网络流量,增加网络负载,从而有效提高消息投递率。

由赫尔辛基科技大学网络实验室开发的基于代理离散时间模拟器 ONE,采用 Java 语言编写,并广泛应用于 DTN 路由方案的模拟分析。为了衡量 SBPR 算法的性能,通过 ONE 模拟器对本文算法 SBPR 及 Epidemic, Prophet, FC 算法进行仿真实验,并对各个算法因缓存空间、消息生存时间、消息生成间隔及节点个数的变化而产生的性能表现进行具体分析,得出 SBPR 与其他算法的优劣势。节点的缓存空间是指节点携带的设备中用于高速数据交换的存储器容量。每个消息都有自己的消息生存时间 (Time to Live, TTL),只有在消息生存时间内,消息呈有效状态。消息生成时间间隔是指 2 次消息创建时间的间隔。通过大量实验证明,在节点缓存不足的情况下,SBPR 的消息投递率、消息丢包数、网络负载及平均节点跳数明显优于 Epidemic, Prophet 及 FC 算法。实验具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	默认值	取值范围
仿真面积/m <sup>2</sup>	4 500 × 3 400	
节点数	40	40 ~ 140
初始拓扑	均匀分布	
通信半径/m	20	20 ~ 80
消息大小	500 KB ~ 1 MB	
消息生成时间间隔/s	40	10 ~ 60
节点数据发送率/(KB · s <sup>-1</sup> )	250	
节点移动速度/(m · s <sup>-1</sup> )	0.5 ~ 1.5	
节点缓存空间/MB	12	4 ~ 18
生存时间/h	3	1.5 ~ 4.0
仿真时间/h	12	

衡量算法路由性能的指标有:消息投递率,网络负载率,消息丢包数,平均跳数。

**定义 1** 消息投递率是指由源节点生成并成功传递的消息总数与网络中生成的所有消息(不包括路由转发过程中由中继节点复制转发生成的消息)数的比值。

**定义 2** 网络负载是指需要投递的消息被发送的总次数占成功到达目的节点的消息数的比值。

**定义 3** 丢包数是指所有节点在网络模拟时间内丢弃的消息总数。

**定义 4** 平均跳数是指所有成功传递的消息所经历的跳数总和与网络中生成的所有消息数的比值。

#### 4.1 缓存空间

图 3 体现了节点缓存容量的改变对各个算法在消息投递率、消息丢包数等性能方面的影响。

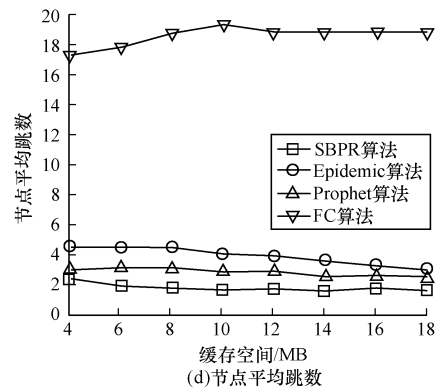
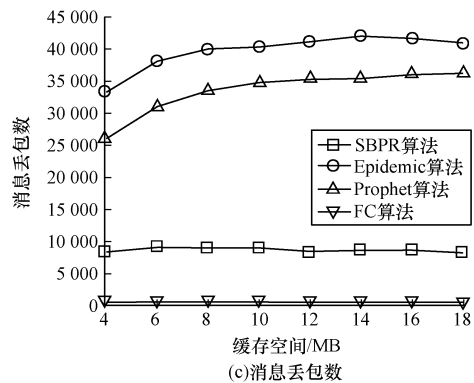
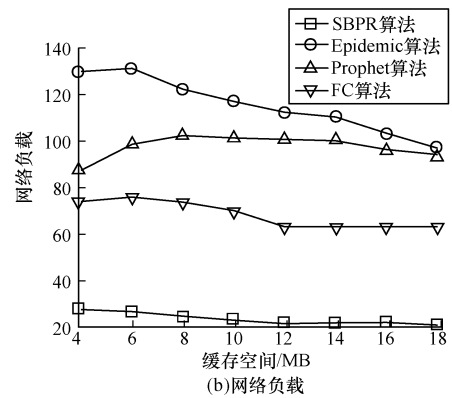
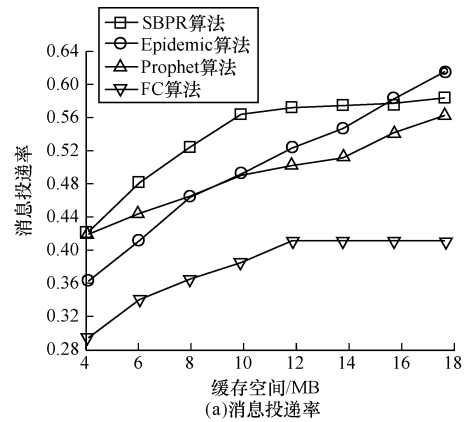


图 3 节点缓存空间对算法性能的影响

由图 3(a) 可以看出,随着缓存容量的增加,各个算法的消息投递率都有所改善,但是在缓存不足情况下,其他路由算法的消息投递率急剧下降,而 SBPR 仍维持较高投递率。当缓存大于 16 MB 时, Epidemic 在投递率方面的优势逐渐显现。虽然,

Epidemic 在缓存大于 16 MB 时,消息投递率逐渐高于 SBPR,但在节点缓存不够大的情况下,由于 Epidemic 执行洪泛传路由协议,任意两节点相遇即产生消息复制,节点因缓存有限而造成对消息不断丢弃,消息丢包数、网络负载增加,网络有效利用效率降低,从而影响消息投递率。而 SBPR 依据节点的相似性有目的地选择中继节点,减少了消息副本冗余,网络资源不会因节点不断丢弃消息而消耗过多,同时 SBPR 实行概率转发策略,因此,在消息投递率方面表现较好。Epidemic 对缓存的改变要比其他算法更敏感。因此,Epidemic 适用于负载能力强、节点缓存资源充足的网络。从图 3(b)可以看出,各个算法的网络负载率随着缓存增大而降低,而 SBPR 的网络消耗较少。Prophet 本质仍是洪泛路由,存在大量消息副本冗余、网络流量消耗较多等一般洪泛路由具有的缺点。FC 算法是基于一个消息副本进行转发,虽对网络资源要求最低,但是投递率也最低。从图 3(c)可以看出,SBPR 在控制消息丢包数方面取得显著效果,比 Epidemic 的消息丢包数至少降低了 75%,FC 是基于一个消息副本进行转发,由于节点缓存不足而造成消息失效的可能性较小,因此 FC 的丢包数最少。Epidemic 实行洪泛路由,节点将消息传递给每个与其相遇的节点,大量消息冗余副本占据节点缓存容易造成节点因缓存不足而丢弃更多消息,所以,其丢包数较大。在节点平均跳数方面,从图 3(d)可以看出,各算法的曲线变化都较平稳,但 SBPR 的平均跳数最少,基本在 3 跳左右;FC 是单副本路由且中继节点的选择没有任何衡量标准,而在 DTN 中节点间的通信是靠节点间的随机移动,因此,其在平均跳数方面表现相对较差。

#### 4.2 消息生存时间

由图 4 可以看出,即便在消息生存时间较低的网络,SBPR 算法仍表现出较好的适应性。在图 4(a)中,随着消息生存时间的增长,Epidemic 和 Prophet 的投递率逐渐降低,而 SBPR 与 FC 的投递率呈增长趋势,在消息生存时间为 160 min 左右,SBPR 的投递率超过其他算法。虽然随着消息生存时间的增加,消息在缓存内因停留时间延长可以在被节点删除之前得到更多的转发机会,但是节点缓存有限,对于 Epidemic 来说,节点存储传输的所有消息,从而节点很容易因缓存不足而对消息频繁丢弃,导致路由性能降低,从图 4(a)~图 4(c)中可以得到验证。SBPR 通过比较节点相似性,有效控制消息积压,消息投递率也随着消息被转发机会的增多而增大。由图 4(b)~图 4(d)中 TTL 对网络负载的影响来看,SBPR 相对于其他算法消耗的网络负载较低,起伏较平稳;在控制消息丢包方面相对于 Epidemic,Prophet 算法更为有效,并且随着 TTL 的增长,SBPR 的平均跳数一直保持较低,基本处于 3 跳左右。相对于 SBPR,消息生存时间

的改变对 FC 的影响相对较大,消息生存时间的增长,降低了消息因失去有效性而被丢弃的可能,所以,FC 平均跳数增加。

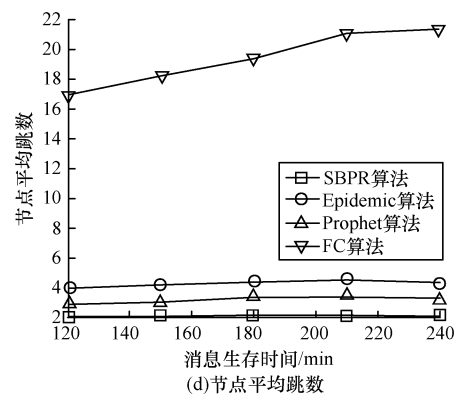
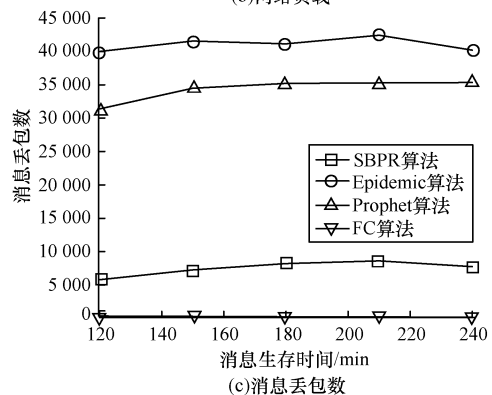
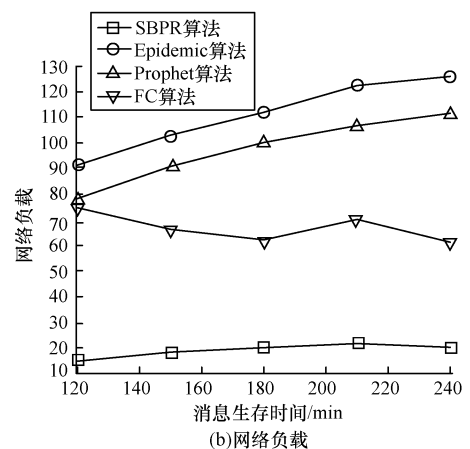
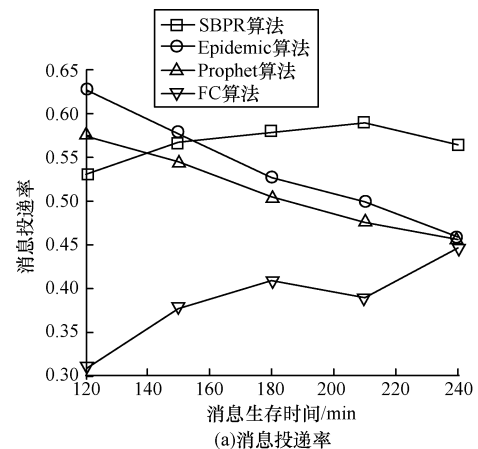


图 4 消息生存时间对算法性能的影响

### 4.3 消息生成时间间隔

当消息生成时间间隔增加时,即消息生成速率降低,节点携带的消息副本争夺节点缓存的冲突得到缓和,从而因节点缓存不足而丢弃消息副本的可能性降低,如图 5 所示。

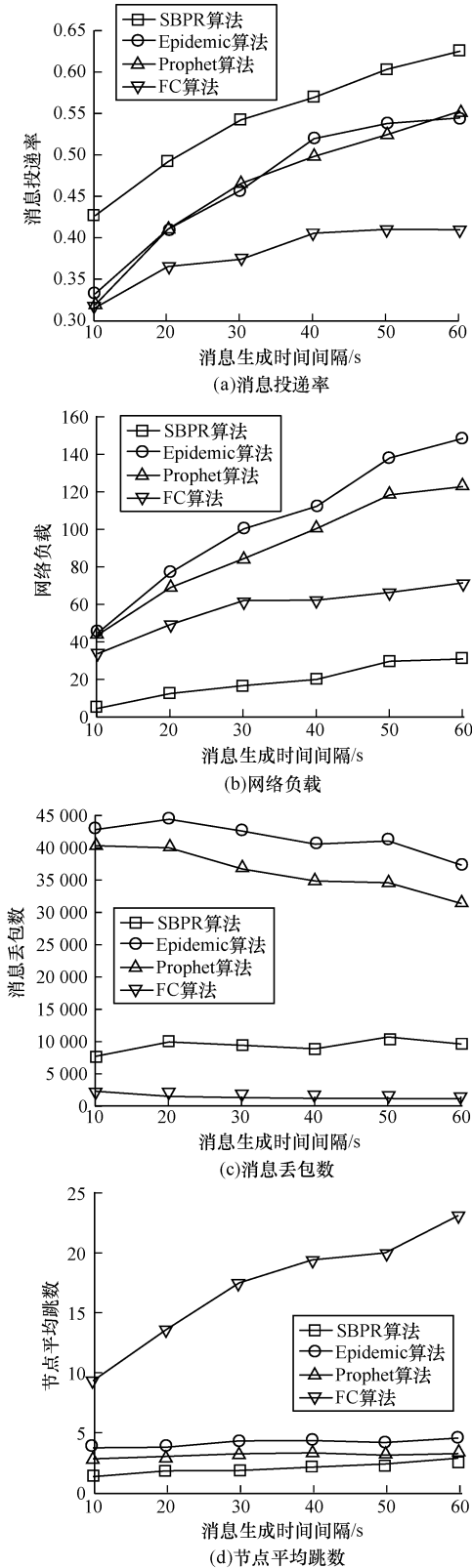


图 5 消息生成时间间隔对算法性能的影响

由图 5 (a)、图 5 (b) 所示, Epidemic, Prophet 以及 FC 在消息投递率和网络负载率方面随着消息生成时间间隔的增大而增大。Epidemic 虽依靠多消息副本并行传递,但消息由于节点缓存受限而不断被丢弃,造成网络资源有效利用率降低,反而降低消息投递率,并且相对于 Epidemic, SBPR 对中继节点的选择更准确,更有目的性。因此, SBPR 在消息投递率方面优于 Epidemic, 同时在控制网络负载率方面更有效。在图 5 (c)、图 5 (d) 中, 由于消息生成时间间隔增大, 节点中因缓存有限造成的消息拥挤得到缓解, 因此基于复制策略的 Epidemic 及 Prophet 的消息丢包数减少; 在消息丢包数方面 SBPR 保持较平稳状态, 且相对其他算法, SBPR 消息丢包数相对较低。FC 实行随机转发消息策略, 消息生成速率的降低使每个消息在到达目的节点之前, 被中继节点携带的时间延长, 所以, 平均跳数随着消息生成时间间隔的增大而剧增。

### 5 结束语

在 DTN 路由算法中, 合理选择消息的中继节点是实现高效通信的关键。SBPR 将基于节点相似性进行消息复制和基于概率值进行消息转发 2 种策略结合, 既提高了消息投递率, 又控制消息副本冗余并降低网络负载。理论和仿真结果表明, 在节点缓存不足的情况下, SBPR 投递率明显高于 Epidemic, Prophet 和 FC 算法, 网络负载、节点平均跳数较其他算法低, 并且随着消息生存周期的变化, SBPR 表现出较好的适应性和伸缩性。下一步工作可将节点社会属性运用于路由算法设计中, 以此提高路由算法的消息投递率、降低网络资源消耗。

### 参考文献

- [1] Spyropoulos T, Rais R N B, Obraczka T T K, et al. Routing for Disruption Tolerant Networks: Taxonomy and Design[J]. Wireless Network, 2010, 16(8): 2349-2370.
- [2] Partan J, Kurose J, Levine B N. A Survey of Practical Issues in Underwater Networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing Communications Review, 2007, 11(4): 23-33.
- [3] Guo Z, Wang B, Cui J H. Generic Prediction Assisted Single-copy routing in Underwater Delay Tolerant Sensor Networks[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3): 1136-1149.
- [4] Soares V N G J, Rodrigues J J P C, Farahm F. GeoSpray: A Geographic Routing Protocol for Vehicular Delay-tolerant Networks[J]. Information Fusion, 2014, 15(1): 102-113.

- [ 5 ] Pereira P R, Casaca A. From Delay-tolerant Networks to Vehicular Delay-tolerant Networks [ J ]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2012, 14(4) : 1166-1182.
- [ 6 ] Erramilli V, Chaintreau A, Crovella M, et al. Diversity of Forwarding Paths in Pocket Switched Networks [ C ] // Proceedings of the 7th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. New York, USA: ACM Press, 2007: 161-174.
- [ 7 ] Hui P, Chaintreau A, Scott J, et al. Pocket Switched Networks and Human Mobility in Conference Environments [ C ] // Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking. New York, USA: ACM Press, 2005: 244-251.
- [ 8 ] Kayastha N, Niyato D, Wang P, et al. Applications, Architectures, and Protocol Design Issues for Mobile Social Networks: A Survey [ J ]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(12) : 2130-2158.
- [ 9 ] Vastardis N, Yang K. Mobile Social Networks: Architectures, Social Properties, and Key Research Challenges [ J ]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(3) : 1355-1371.
- [ 10 ] Chuah M C, Cheng L, Davison B D. Enhanced Disruption and Fault Tolerant Network Architecture for Bundle Delivery [ C ] // Proceedings of GLOBECOM ' 05. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2005: 807-812.
- [ 11 ] Cao Y, Sun Z. Routing in Delay/Disruption Tolerant Networks: A Taxonomy, Survey and Challenges [ J ]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(2) : 654-677.
- [ 12 ] 张 龙, 周贤伟, 王建萍, 等. 容迟与容断网络中的路由协议 [ J ]. 软件学报, 2010, 21(10) : 2554-2572.
- [ 13 ] Vahdat A, Becker D. Epidemic Routing for Partially-connected Ad-Hoc Networks, Cs-2000-06 [ R ]. New Orleans, USA: Duke University, 2000.
- [ 14 ] Lindgren A, Doria A, Schelen O. Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks [ J ]. Mobile Computing and Communications Review, 2003, 7(3) : 19-26.
- [ 15 ] Jain S, Fall K, Patra R. Routing in a Delay Tolerant Networks [ J ]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(4) : 145-158.
- [ 16 ] Daly E M, Haahr M. Social Network Analysis for Routing in Disconnected Delay-tolerant Manets [ C ] // Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing. New York, USA: ACM Press, 2007: 32-40.
- [ 17 ] Everett M, Borgatti S P. Ego Network Betweenness [ J ]. Social Networks, 2005, 27(1) : 31-38.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] Hsu W, Spyropoulos T, Psounis K, et al. Modeling Time-variant User Mobility in Wireless Mobile Networks [ C ] // Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 758-766.
- [ 20 ] Leguay J, Friedman T, Conan V. Evaluating Mobility Pattern Space Routing for DTNs [ C ] // Proceeding of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006: 1-10.
- [ 21 ] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Performance Analysis of Mobility-assisted Routing [ C ] // Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York, USA: ACM Press, 2006: 49-60.

编辑 陆燕菲

~~~~~  
(上接第 62 页)

- [ 7 ] Li Deying, Zhu Qinghua, Du Hongwei, et al. Conflict-free Many-to-one Data Aggregation Scheduling in Multi-channel Multi-hop Wireless Sensor Networks [ C ] // Proceedings of ICC ' 11. Kyoto, Japan: IEEE Press, 2011: 135-143.
- [ 8 ] Li Hongxing, Wu Chuan, Hua Qiangsheng, et al. Latency-minimizing Data Aggregation in Wireless Sensor Networks Under Physical Interference Model [ J ]. Ad Hoc Networks, 2011, 23(2) : 123-135.
- [ 9 ] Wan Pengjun, Alzoubi K M, Frieder O. Distributed Construction of Connected Dominating Set in Wireless Ad Hoc Networks [ C ] // Proceedings of IEEE INFOCOM ' 02. New York, USA: IEEE Press, 2002: 345-354.
- [ 10 ] Xiao Shiliang, Huang Jingchang, Cheng Yongbo. On Centralized and Distributed Algorithms for Minimizing Data Aggregation Time in Duty-cycled Wireless Sensor Networks [ J ]. Wireless Networks, 2014, 20(7) : 1729-1741.
- [ 11 ] Xu Xiaohua, Li Xiangyang, Mao Xufei, et al. A Delay-efficient Algorithm for Data Aggregation in Multihop Wireless Sensor Networks [ J ]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(1) : 163-175.
- [ 12 ] di Francesco M, Das S K, Anastasi G. Data Collection in Wireless Sensor Networks with Mobile Elements: A Survey [ J ]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2011, 8(1) : 1-7.
- [ 13 ] Jain K, Padhye J, Padmanabhan V N. Impact of Interference on Multi-hop Wireless Network Performance [ J ]. Wireless Networks, 2005, 11(4) : 471-487.
- [ 14 ] Incel O D, Ghosh A, Krishnamachari B, et al. Fast Data Collection in Tree-based Wireless Sensor Networks [ J ]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(1) : 86-99.
- [ 15 ] Goussevskaia O, Wattenhofer R, Halldo M M, et al. Capacity of Arbitrary Wireless Networks [ C ] // Proceedings of IEEE INFOCOM ' 09. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 1456-1464.

编辑 索书志