

# 概率路由中基于连接时间的机会转发算法

段宗涛, 杨 阳, 樊 娜, 朱依水  
(长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 概率预测 PRoPHET 路由没有考虑到转发节点的有效性, 存在多个中继节点预测性相同的情况时, 移动性会使得节点间的连接时间不同而导致消息投递率低和网络负载过大的缺点. 因此, 预测概率还需考虑节点相遇持续时间对消息数据完整传递的影响, 本文提出了一种基于连接时间的概率路由算法 (PRoPHET-CT), 增加了节点间连接时间占空比的影响因素. 对比实验结果表明在节点密度较大的机会网络环境中, 该改进算法有着较高的投递概率, 同时降低了网络负载以及节点的平均跳数.

**关键词:** 机会网络; PRoPHET 路由; 预测概率; 连接时间

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000—7180(2018)12—0050—05

## Opportunistic Forwarding Algorithm Based on Connection Time in Probabilistic Routing

DUAN Zong-tao, YANG Yang, FAN Na, ZHU Yi-shui

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In probabilistic prediction PRoPHET routing the effectiveness of the forwarding node was not considered. There are disadvantages that in the case of the same predictability of the multiple relay nodes, mobility will cause the connection time between nodes to be different, resulting in the low message delivery rate and excessive network load. Therefore, the influence of the node encounter duration on the complete transmission of message data should be considered when calculating the prediction probabilities. This paper proposes a probabilistic routing algorithm based on Connection Time (PRoPHET-CT), which incorporates the factors that influence the duty cycle of the connection time between nodes. The comparison experimental results show that the improved algorithm has a higher probability of delivery in the network environment with high node density. And also, this algorithm can reduce the network load and the average hops of the nodes.

**Key words:** opportunity network; PRoPHET routing; predicted probability; connection time

### 1 引言

AndersLindgred, Avri Doria 和 Olov Schelen 提出了 PRoPHET 路由算法<sup>[1]</sup>, 该算法基于对现实中节点移动行为的分析来决定是否转发数据消息<sup>[2]</sup>. 在众多改进算法中, 文献[3]提出了一种考虑双向车辆通信的二维 VANETs 传播策略, 利用反向车辆来加速消息传播, 并且消息可以很大程度上

遵循所选择的路径, 但是该算法忽略了节点间的通信延迟. 延迟容忍网络 (DTN)<sup>[4-5]</sup> 是机会网络的一种, 其中文献[6]在具有 DTN 功能的 VANETs 中实现了具有成本效益和可靠性的路由, 并提出了一种实时感知的轨迹数据挖掘算法来预测节点的位置, 根据预测结果构建时间-空间图. 文献[7]提出了一种基于权重的缓冲区调度管理方法, 并根据消息的属性 (消息大小, 剩余生存时间, 队列中的消息停

**收稿日期:** 2018—04—20; **修回日期:** 2018—05—15

**基金项目:** 陕西省重点科技创新团队项目 (2017KCT-29); 陕西省重点研发计划项目 (2017GY-072, 2018GY-136, 2018GY-032); 陕西省国际科技合作计划项目 (2017KW-015); 陕西省工业科技攻关项目 (2015GY002)

留时间,跳数和复制次数)动态地调整消息权重标准,从而找到最适合丢弃的消息.文献[8]以减少中继消息的数量来优化 PRoPHET 路由性能,并考虑基于多个参数的消息的延迟和开销的动态丢弃策略.

综上,传统的机会转发路由协议没有考虑转发节点的有效性,认为两个节点在任何时刻或链路状态下相遇时,消息都可以被成功投递和接收,显然这样的假设在现实环境中无法保障.因此,本文提出了基于节点间相遇持续时间的概率路由算法 (PRoPHET-CT),不仅考虑了消息的高效传输性能,同时也考虑两节点相遇时消息的可靠性传输问题,从而较好的提高了算法的投递率,降低了网络负载以及平均跳数.

## 2 算法描述

### 2.1 PRoPHET 路由算法

PRoPHET (Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity) 算法<sup>[1]</sup>的节点预先估计到达目的节点每条链路的传送预测概率,并利用该概率值来决定是否应该存储该消息以等待更好的转发机会,以及决定由哪些节点来实现转发.例如节点 a 给节点 b 转发消息,公式 (1) 的传送预测概率  $p_{(a,b)}$  计算节点 a 能够发送信息到节点 b 的概率.当两节点相遇时,它们将相互交换各自的预测向量表,其中预测向量表包含了该节点到达其它所有节点的传送预测概率信息.

$$P_{(a,b)} = P_{(a,b)\text{old}} + [(1 - P_{(a,b)\text{old}})] \times P_{\text{init}} \quad (1)$$

$P_{\text{init}} \in [0,1]$  为初始常量,  $P_{(a,b)\text{old}}$  为 a 和 b 两个节点上一次更新的传送概率值.由此公式可知,两节点相遇的次数越多,节点间的传输预测概率越大.

若两节点在一段时间内彼此再没有相遇,则该传输预测概率值将逐渐衰减,具体计算如公式 (2)

$$P_{(a,b)} = P_{(a,b)\text{old}} \times \gamma^K \quad (2)$$

式中,  $\gamma \in [0,1]$  是一个衰减常数;  $K$  是两个节点从最后一次相遇到当前的时间量化.

### 2.2 PRoPHET 路由算法的问题描述

如下图场景所描述的 PRoPHET 路由过程,源节点 S 基于上一小节所述的传递概率预测值来选择哪个节点作为其消息的转发者到目的地节点 d.

图 1 中假设节点 a 与节点 b 的相遇概率预测值相同.因此,当遇到的节点度量相等并且没有考虑相遇持续时间时,节点 S 遵循传统 PRoPHET 算法将它的消息转发给节点 a 和 b.这样会导致更多的网

络资源消耗,因为节点 a 和节点 b 将消息转发给其他邻居节点,导致消息在网络上重复传播.

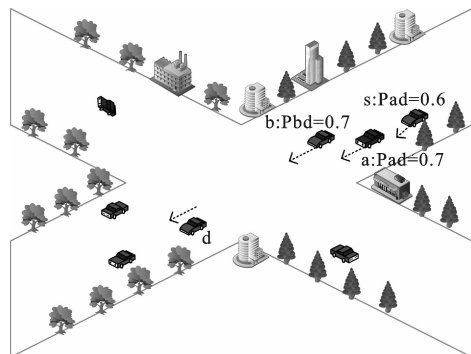


图 1 不同通信范围的相同概率预测

图 2 节点 a 与节点 b 的传输概率预测值近似相等.因此,如理论所述,源节点 S 选择节点 b 作为中继节点.但是节点 b 正在远离节点 S 的通信范围,使得两个节点数据传输功率可能会减少,而导致数据传输延迟和性能下降,也可能随着节点 b 进一步移动使得传输失败.综上,总结如下缺点:

- 如果邻居节点具有相同的传输概率预测值,则源节点在选择中继节点会产生偏差,可能消耗更多的网络资源.
- 如果源节点 S 选择节点 b,则会导致投递率下降以及延迟增加,因为节点 b 距离源节点 S 更远导致连接时间更短.
- 在车辆节点移动的情况下,如果节点 b 正在移出源节点 S 的通信范围,则将数据包传送到节点 b 的链路会快速中断,并且可能传输失败.

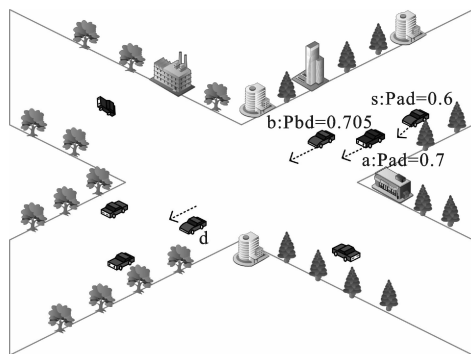


图 2 相似概率预测

## 3 基于相遇持续时间的概率路由算法

为了解决上节所述的 PRoPHET 缺点,应考虑节点之间的相遇持续时间.因此,本文提出了一种基于节点间相遇持续时间的改进型 PRoPHET-CT 路由协议.

3.1 相遇持续时间定义

相遇持续时间表示的是两节点之间建立通信链路能持续连接状态的时间,该连接时间是根据节点间相遇的历史信息得到.通过节点间相遇的历史信息求解出节点相遇持续时间的平均值(权值).两个节点多次历史相遇过程用图 3 表示.

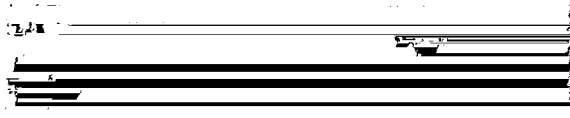


图 3 两节点的  $n$  次相遇过程

图 3 中,  $n$  表示在一个链路状态更新周期内,两节点相遇并建立通信链路的总次数,  $T_i$  表示两节点建立的通信链路能够持续连接状态的时间.按照统计规律判断,如果两节点在过去很长一段时间内有着较长的相遇持续时间的平均值,若两节点再次接触时,彼此之间能够保持较长持续通信时间的可能性也就越大.

3.2 改进型 PROPHET-CT 路由协议

当两个节点相遇不久后再次相遇的情况下,用概率更新公式(3)计算一个周期内的转发概率值,改进后的概率受节点历史相遇信息和节点相遇持续时间共同影响

$$P_{(r,d)} = P_{(r,d)old} + [(1 - P_{(r,d)old}) \times P_{init} \times k^\mu] \tag{3}$$

式中,  $P_{init} \in [0,1]$  为初始常量;  $P_{(r,d)old}$  为  $r$  和  $d$  两个节点上一次更新的概率值.  $k(k > 1)$  为相遇持续时间对投递概率的影响因素,  $\mu$  如公式(4)

$$\mu = \frac{\sum_{q=1}^w T_{rd}(q)}{(\sum_{x=1}^n T_{rx} + \sum_{y=1}^m T_{dy}) - \sum_{q=1}^w T_{rd}(q)} \tag{4}$$

式中,  $\sum_{q=1}^w T_{rd}(q)$  表示转发节点  $r$  和目的节点  $d$  连接  $q$  次的总时长;  $\sum_{x=1}^n T_{rx}$  表示节点  $r$  与网络中其他节点之间连接的总时长;  $\sum_{y=1}^m T_{dy}$  表示节点  $d$  与网络中其他节点之间连接的总时长.

公式(3)中的  $k^\mu$  如指数函数,当  $k > 1$  时,  $\mu$  取  $(0,1)$  该函数是递增函数,也就是中继节点  $r$  与目的节点  $d$  的相遇连接时间在整个节点之间连接时间占的比例越大,则该影响因子越有效,对于转发概率  $p_{(r,d)}$  的影响就越大.如果  $P_{(r,d)} > 1$ ,则对其进行归一化处理使得预测概率值映射在  $(0,1)$ ,如公式(5).

$$P_{(r,d)}^* = \frac{P_{(r,d)} - P_{(r,d)min}}{P_{(r,d)max} - P_{(r,d)min}} \tag{5}$$

节点之间的相遇连接时间可以从网络拓扑结构变化中获取,它是影响传统 PROPHET 概率路由度量值的因素之一.因此,本文通过计算相遇节点与目的节点在历史过程中的连接时间占空比,可以预测出更加有效的中继节点,使得该改进协议可以将消息转发给那些具有相对稳定通信连接的相邻节点,这些节点的信号强度非常强,可以加快消息传送速度,提高传送比率,从而减少传送跳数以及降低网络负载.

4 仿真实验与分析

本文使用开源的 ONE 仿真器进行仿真实验.模拟场景是赫尔辛基市地图,以及基于最短路径地图移动模型,尺寸为  $4\,500\text{ m} \times 3\,400\text{ m}$ ,仿真时长为  $43\,200\text{ s}$ .

4.1 参数设置

通过在该区域设置不同节点数量进行对比实验,并将这些节点分成六组,具体参数见表 1 以及表 2.

表 1 仿真常数设置列表

| 常数         | 值    |
|------------|------|
| $p_{init}$ | 0.75 |
| $\beta$    | 0.25 |
| $\gamma$   | 0.98 |
| $k$        | 2    |

表 2 仿真参数设置列表

| 参数类型      | 参数设置    |
|-----------|---------|
| 消息的生成时间间隔 | 25~35 s |
| 数据包大小     | 1 M     |
| 仿真车辆总数    | 36~546  |
| 数据包生存周期   | 300 s   |
| 节点通信范围    | 10 m    |
| 广播周期      | 30 s    |

4.2 仿真实验与分析

本文对 Epidemic、PROPHET、改进的 PROPHET-CT 路由协议进行了对比仿真实验.设置车辆节点数量从 36~546 进行多次仿真,节点的移动速度取更加接近城市车辆移动场景的  $24\text{ km/h} \sim 37\text{ km/h}$ ,节点的缓存大小设置为 15 M,通过实验分析不同车辆移动节点数量对该算法的投递率、网络开销以及平均跳数影响.经过几次模拟运行后,得到如图 4 所示结果.

图 4 中,当网络中节点数量较少时,由于车辆节

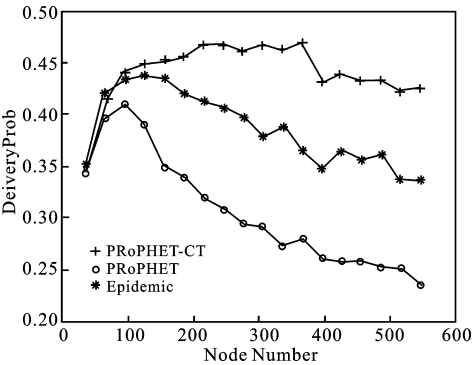


图4 节点数量与投递率的关系

点分布密度太过稀疏,节点之间可用于数据传输的通信链路太少且频繁中断,导致数据包难以成功的传输并转发到目的节点,投递率非常低.当节点数目大于100个时,改进后的PRoPHET-CT协议投递率不断增加,而其他两个经典协议投递率开始下降,因为如果在PRoPHET中没有考虑连接时间,节点可能会因其概率度量发生显著变化而作出错误传递决策.然而当车辆数目继续不断增加时,由于网络中的可用中继节点越来越多,消息副本不断增加,网络的负载过重影响投递率性能.实验结果表明改进后的PRoPHET-CT协议投递率明显增加,并且适用于例如车辆密度较大的城市道路交通环境.

随着节点数目的增加,网络负载率逐渐增大.当场景中车辆数较少时,数据包转发次数不多,整个网络中的副本消息数和需要消耗的缓存也较小,故整体的网络负载率也同样较小,如图5所示.从实验结果分析,改进后的PRoPHET-CT协议的网络负载明显降低,因为加入连接时间的判断机制,使得能够找到更加合适的中继节点,消息到达目的节点的平均跳数减少,从而减少网络资源的消耗.

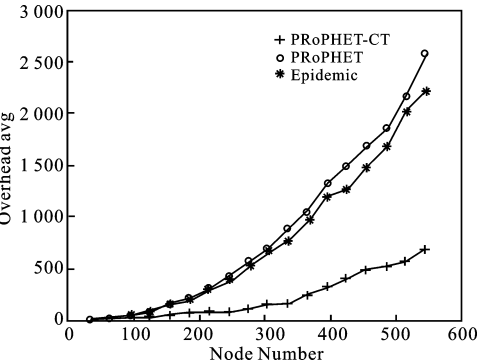


图5 节点数量与网络负载的关系

随着车辆节点数量增加,由于满足转发条件的中继节点的数量也随之增加,所以消息转发的跳数

会增多,从实验结果分析,改进后的PRoPHET-CT协议的平均跳数明显比其他两个经典协议少,从而足够的消息转发中继节点数量保证了较好的投递率,如图6所示.

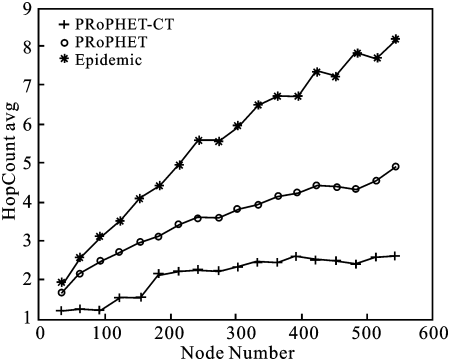


图6 节点数量与平均跳数的关系

5 结束语

本文主要分析了基于概率预测的PRoPHET路由协议,由于该协议会发生两个或两个以上相邻节点携带相等或接近相等的传送可预测性值时的转发决策失误.为了避免这一问题带来的影响,本文考虑了节点之间的连接时间作为另一附加因素,在传输预测值的更新过程中引入可靠性影响设计,使用该算法能够选择出更加有效的中继节点,以更加接近真实场景来决策消息的转发.通过实验分析表明,改进后的协议在节点密度较大例如城市交通场景中有较高的投递率,同时降低了节点转发的平均跳数,从而减少了网络资源的消耗.

参考文献:

[1] 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.

[2] Pathak S, Gondaliya N, Raja N. A survey on PROPHET based routing protocol in delay tolerant network[C]//International Conference on Emerging Trends & Innovation in ICT. Skopje, Macedonia, 2017:110-115.

[3] He J, Cai L, Pan J, et al. Delay analysis and routing for two-dimensional vanets using carry-and-forward mechanism[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017 (99):1830-1841.

[4] Amirthavalli R, Dhaya R, Chandrasoodan M S. A survey of routing algorithms in delay tolerant networks [C]//International Conference on Applied and Theo-

retical Computing and Communication Technology. Tumkuru,Karnataka,India, IEEE, 2017:469-473.

[5] Salvador Gonzalez, Victor Ramos. A delay tolerant broadcast protocol for VANETs [C]//International Conference on Broadcast Technology and Multimedia Communication[s.l.]. 2010.

[6] Qi W, Song Q, Wang X, et al. Trajectory data mining-based routing in DTN-enabled vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Access, 2017 (99):24128-24138.

[7] Rashid S, Ayub Q, Abdullah A H. Reactive weight based buffer management policy for DTN routing protocols[J]. Wireless Personal Communications, 2015, 80(3): 993-1010.

[8] Sati S, Probst C, Graffi K. Implementing forward and drop policies for improving PROPHET's routing performance[C]// International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks. Chengdu, China, IEEE. 2017:236-242.

作者简介:

段宗涛 男,(1977-),博士,教授. 研究方向为服务计算、交通信息处理与泛在交通信息服务.

杨 阳 男,(1993-),硕士研究生. 研究方向为交通信息通信技术.

樊 娜 女,(1978-),博士,副教授. 研究方向为无线传感器网络安全技术.

朱依水(通讯作者) 女,(1981-),博士,讲师. 研究方向为交通信息服务技术. E-mail:yszhu@chd. edu. cn.

(上接第 49 页)

[5] Cong H, Zhi L, Chuanpei X. Test scheduling for network-on-chip using XY-direction connected subgraph partition and multiple test clocks[J]. Journal of Electronic Testing,2016,32(1): 31-42.

[6] Iyengar V, Chakrabarty K, Marinissen E J. Test wrapper and test access mechanism CO-Optimization for system-on-chip[J]. Journal of Electronic Testing, 2002,18(2): 213-230.

[7] 许川佩, 李克梅. 基于粒子群算法的多约束 3DNoC 协同测试规划[J]. 仪器仪表学报,2017,38(3): 765-772.

[8] 谭营, 郑少秋. 烟花算法研究进展[J]. 智能系统学报, 2014,8(5): 515-528.

[9] 王勇臻, 陈燕, 于莹莹. 求解多旅行商问题的改进分组遗传算法[J]. 电子与信息学报,2017,17(1): 198-205.

[10] Ahn J H, Kang S. Test scheduling of NoC - based SoCs using multiple test clocks [J]. ETRI Journal, 2006,28(4): 475-485.

作者简介:

许川佩 女,(1968-),博士,教授. 研究方向为集成电路测试、自动测试总线与系统.

郭 荣(通讯作者) 女,(1993-),硕士研究生. 研究方向为集成电路测试. E-mail:guorong\_chn@163. com.