

# 城市车辆自组织网络中基于预测的地理位置路由协议

黄德玲<sup>1,2</sup> 严余松<sup>1</sup> 彭大芹<sup>2</sup>

(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 610031)<sup>1</sup> (重庆邮电大学软件工程学院 重庆 400065)<sup>2</sup>

**摘要** 车辆自组织网络的拓扑结构变化迅速,使得节点之间的无线连接不稳定,因此基于贪婪转发的地理位置路由协议经常由于连接断开而失败。针对这个问题,提出一种判断连接可靠性的方法。该方法通过计算每个邻居节点的链路稳定性因子和距离衰减因子等来评估传输连接的可靠性,设计的相应路由协议采用可靠性最高的连接形成路由,从而增加包投递成功率。同时,针对路由环路问题,提出一种预测路口节点的算法,使得数据包能选择性地利用交叉路口协调节点来确定数据传输路径,从而有效避免路由环路,提高转发效率。实验结果表明,提出的算法在包投递成功率、端到端时延和包转发次数等方面都取得了较好的路由性能。

**关键词** 车辆自组织网络,地理位置服务,贪婪转发策略,基于预测的算法,路由协议

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.07.011

## Geographic Routing Protocol Based on Prediction for Urban Vehicular Ad Hoc Networks

HUANG De-ling<sup>1,2</sup> YAN Yu-song<sup>1</sup> PENG Da-qin<sup>2</sup>

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)<sup>1</sup>

(School of Software Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The topology of vehicular ad hoc networks changes rapidly, which makes wireless connection between nodes unstable. Therefore, greedy forwarding based location routing protocols often fail because of the disconnection between nodes. Aiming at this problem, this paper proposed a method to judge the reliability of link. In this method, the reliability of transmission links is evaluated by calculating link stability factor and distance attenuation factor of each neighbor node. As a result, this paper designed a routing protocol in which the highest reliability links are used to form the route, consequently increasing the packet delivery success ratio. At the same time, this paper presented an algorithm to predict the intersection nodes, which makes the data packet selectively utilize the intersection coordinators to determine the data transmission path, enhancing the routing efficiency. Simulation results show that the proposed algorithm achieves better routing performance in terms of packet delivery success rate, end-to-end delay and packet forwarding times.

**Keywords** Vehicular ad hoc networks, Location based services, Greedy forwarding strategies, Prediction based algorithms, Routing protocols

## 1 引言

作为一个特殊的移动自组织网络,车辆自组织网络(Vehicular Ad Hoc Network, VANET)在交通领域有广泛的应用,在其支撑下可实现交通拥塞控制、道路安全提示和在途娱乐等,对加强交通安全、增加人们出行舒适度起着极其重要的作用。在城市环境下,车辆的运动轨迹受限于道路的形态与布局,本文主要的研究目的为利用城市环境下车辆节点可预测的运动轨迹,提前预测一些有助于进行路由决策的因素,包括预测数据包的传递路径和下一跳中继节点的位置等。通过提前预测来最优化数据包的途经道路,增强通信节点之间连接的稳定性,适应城市环境下快速变化的车载自组织网络拓

扑,提高路由性能。

大多数现有的车联网是在有固定通信基础设施的支撑下运行的,然而一些缺乏固定通信基础设施的城乡结合区域以及灾后恢复的场合等仍然需要车联网正常、可靠地运行,这要求车联网的组网方式不依赖于固定通信基础设施,需要车与车灵活、快速地自组织形成VANET<sup>[1]</sup>。因此,VANET的路由算法也必须适应这种无固定基础设施的环境,而设计这样的路由协议极具挑战性。近年来,基于地理位置的路由协议被研究者所认识,并逐步发展成为VANET路由的主流技术<sup>[2]</sup>。

当前基于地理位置的路由协议大多数采用GPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing)<sup>[3]</sup>协议提出的朴素贪婪

收稿日期:2018-05-25 返修日期:2018-07-20

黄德玲(1978-),女,博士生,讲师,主要研究方向为车辆自组织网络,E-mail:huangdl@cqupt.edu.cn;严余松(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为交通运输信息及网络、交通信息工程及控制,E-mail:yanyusong@263.com(通信作者);彭大芹(1969-),男,硕士生导师,正高级工程师,主要研究方向为移动互联网和交通大数据处理。

转发的思想,节点会把数据包转发给地理位置上更接近于目的节点的邻居,以此增大每次转发的步进长度,使数据包到达目的节点所经历的转发次数最少。但这种转发方式需要依靠准确的位置信息,而车联网中节点的高速移动性使得位置信息很容易失效。Naumov 提出了 AGF 算法<sup>[4]</sup>来克服 GPSR 应用于 VANET 中的两个问题,该方法在信标包中加入了速度和方向信息来过滤节点邻居表中的过期信息,同时加入移动时间来更好地估计目的节点的当前位置。

GPCR (Greedy Perimeter Coordinator Routing)<sup>[5]</sup>也对 GPSR 协议进行了改进,它根据车辆节点的移动受限于道路形态的特点来转发数据包。所有的数据包在遇到交叉路口时都要强制做一次存储计算再转发,在路口计算的目的是为了根据目的节点的地理位置,计算出数据包接下来应该选择的道路。这样的优化使得 GPCR 能够避免 GPSR 遭遇的路由回路问题。

文中提出的路径确定算法提前判断交叉路口,并通过计算判断是否需要利用位于路口的协调节点进行包转发,有效提高了转发效率。本文改进了朴素贪婪转发的思想,提出了3个判断连接质量的因子,通过因子计算出可靠性最高的链路,有效避免了现有算法在数据转发过程中因为选择的链路稳定性较差而导致连接中断,显著提升了包投递成功率。

## 2 相关工作

近年来,许多研究都指出将朴素贪婪转发的方式应用在节点高速移动的车辆自组织网络中可能会导致数据包投递率下降<sup>[6]</sup>,这是因为节点的快速移动等因素会导致贪婪转发采用的位置信息不准确,连接也因此而频繁断开。因此,许多基于地理位置路由的相关研究致力于利用车联网中的一些信息来预测节点的地理位置信息,以增加传输的可靠性<sup>[7]</sup>。一方面,通过分享速度和方向等信息来预测节点位置的确可以增加连接的有效性,但会带来一些控制开销<sup>[8]</sup>;另一方面,如果对这些辅助路由决策的信息利用不当,反而会降低路由性能。因此,如何合理利用辅助路由决策的信息建立恰当的数学模型来进行预测,仍然是基于地理位置的路由协议的研究重点。

GROOV (Geographic Routing over VANETs) 协议<sup>[9]</sup>提出了在无车载地图的环境下,如何利用位置信息做相关预测,提高了基于地理位置的路由协议的可靠性和包投递成功率。通过深入研究发现,GROOV 协议主要存在如下缺点:1)网络中的每个节点会周期性地广播信标数据包,包括节点 ID、位置信息、发送时间戳、速度和方向信息,另外还包括一个状态信息,用于表示节点当前是否处于交叉路口。而周期性地广播这些信息较显著地增加了网络的路由控制开销。2)节点会为自己的所有邻居节点计算可行性  $P = m(Q + W)$ ,  $m$ ,  $Q$  和  $W$  3个因素的确定方式分别如下。节点把自己的无线通信范围分为以自己为中心的5个同心圆,半径分别为  $r/5$ ,  $2r/5$ ,  $3r/5$ ,  $4r/5$  和  $r$ ,如图1所示。所有邻居都按其所处的区域给出相应的权值  $W$ ,自圆心向外按顺序分别为 1, 2, 3, 5 和 4。按照这种方式赋予节点权值,将造成相差几十米的节点的权值没有任何区别。连接质量  $Q$  的值由节点的速度变化率来

确定,变化率越快的节点连接越容易断开, $Q$  值越小,即连接质量越低。然而事实上连接质量的高低取决于两个通信节点之间的相对速度。方向因子  $m$  的确定方式如下:如图1(b)所示, $S$  为源点, $D$  为目的节点,灰色区域为正方向, $m$  取值为 1,白色区域为负方向, $m$  取值为 -1。然而这种判定方向的方式并未考虑城市环境中的道路形态,在城市道路环境下会造成方向误判,甚至在极端情况下造成数据包兜圈。

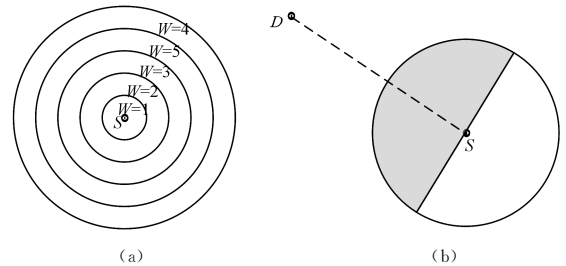


图1 GROOV 中  $W$  和  $m$  因子的确定<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Determination of  $W$  and  $m$  in GROOV

## 3 路由协议设计

本文对 GROOV 协议进行了优化改进,重新设计了转发和恢复算法,提出 PGR (Prediction-based Geographic Routing) 协议。该协议部署的前提条件是网络中的每个节点都具有车载 GPS 设备,可以获得其自身的地理位置信息,这个前提条件在如今的车联网中几乎是普及的,因此本文的研究也具有实际意义和价值。

### 3.1 信标消息

网络中的每个节点需要周期性地广播一个信标消息来通知邻居其地理位置信息,无论其位置信息是否有改变。信标消息主要包括自己的节点 ID、地理位置信息、发送时间戳和一个路口标志位 FLAG,以说明该节点是否位于交叉路口。

PGR 中的节点采用计算协相关系数的方法来判断自身是否位于交叉路口。网络中的每个节点计算其与邻居节点的地理位置之间的相关系数。这里定义  $x_i$  和  $y_i$  分别为节点  $i$  的横坐标和纵坐标。变量  $x$  和  $y$  分别代表所有的  $x_i$  和  $y_i$  的群。 $\bar{x}$  的均值用  $\bar{x}$  表示, $\bar{y}$  的均值用  $\bar{y}$  表示。 $\sigma_{xy}$  表示  $x$  和  $y$  的协方差, $\sigma_x$  表示  $x$  的标准差。因此相关系数的定义如式(1)所示。

$$\rho_{xy} = \left| \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \right| = \left| \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right| \quad (1)$$

$\rho_{xy}$  值在  $[0, 1]$  区间内变化,该值越接近 1 表示节点位于直路段的中央,越接近 0 表示当前节点的位置与邻居节点的位置没有线性相关性,从而判定该节点位于交叉路口。算法设置一个门限值  $\epsilon$ ,节点通过调节  $\epsilon$  的值来判定是否位于路口。当  $\rho_{xy} \geq \epsilon$  时,节点位于直路段;当  $\rho_{xy} < \epsilon$  时,节点位于路口范围内。考虑到直路段上的节点之间的线性相关性较高,在研究过程中,本文设置了一个较大的  $\epsilon$  值,为 0.9。

网络中的节点会周期性地广播信标包,而其中通过上述方法判断出自己位于路口范围内的节点将自己的信标包中的 FLAG 字段设置为 1,以此来通知周围邻居其路口协调节点

的身份,当其驶离路口范围时再将该字段重置为 0。PGR 改进了现有基于速度信息来预测位置的路由协议将速度与方向信息放于信标包中进行周期性广播的方式,在信标包中删除此二者,改为由接收到信标包的节点自己来计算速度和方向信息。在车辆自组织网络中,节点能源的存储资源是较为充足的,因此给节点增加计算工作对路由协议的运行基本没有影响,但减少广播信标包的大小会明显节约有限的无线带宽资源。

网络中的节点只要连续收到两个及以上的来自于同一节点的信标包,就可以很容易地计算出该节点的速度  $speed$  和方向  $\theta$  的信息,如式(2)和式(3)所示:

$$speed_i = \frac{\sqrt{(x_{i2} - x_{i1})^2 + (y_{i2} - y_{i1})^2}}{timestamp_{p_{i2}} - timestamp_{p_{i1}}} \quad (2)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left[ \frac{y_{i2} - y_{i1}}{x_{i2} - x_{i1}} \right] \quad (3)$$

其中,  $(x_{i2}, y_{i2})$  是节点  $i$  的信标包中携带的当前位置信息,可以从信标包中读取到其产生的时间为  $timestamp_{p_{i2}}$ 。  $(x_{i1}, y_{i1})$  是当前节点在自己的邻居信息表中读出的节点  $i$  在上一时刻的位置信息,其信标包产生时间为  $timestamp_{p_{i1}}$ 。

信标包不携带节点的速度和方向信息除了可以减小网络中的控制信息开销以外,还可以增强网络的安全性。由于速度和方向信息将用于评估该节点的转发性能,若从信标包中去掉这两个信息,非法节点则无法通过故意发送虚假的速度和方向信息来获取转发数据包的高优先权。该算法只需要已有的邻居信息表中的位置信息和收到的信标包,不会给计算节点带来额外的存储开销。

### 3.2 邻居信息表

网络中的每个节点需要维系一张邻居信息表,其中存放着从邻居节点发来的信标包中获取到的节点 ID、位置信息、路口节点标志 FLAG 和时间戳信息,另外,还有计算出的速度和方向信息。每次收到信标消息,节点便执行相关计算,同时更新邻居表中的内容。算法要求每个节点周期性地检查自己的邻居节点表,如果发现某邻居的时间戳信息连续 6 个周期均没有任何改变,则认为该条信息为过期信息,并将该邻居从邻居信息表中删除。邻居信息表的内容除了包括上述信息外,还包括传输可靠性  $Q$ ,  $Q$  值的具体计算方法将在 3.3 节中进行详细阐述。

### 3.3 直路段模式

与传统的基于地理位置的路由协议不同,PGR 没有直接使用贪婪的数据转发方式。由于贪婪转发所选择的节点是当前节点无线通信范围内最远的节点,而此节点很可能正好位于无线通信范围的边缘地带,这样的节点也很可能在两次信标包的间隙时间由于移动导致超出了节点的无线通信范围,如果此时数据包仍然以此节点作为目的节点,则无法建立连接完成转发。基于此,PGR 采用了折衷贪婪转发机制来完成数据包的转发工作。

PGR 引入了链路稳定性因子  $S$ 、距离衰减因子  $F$  和方向因子  $Dir$  这 3 个判断因子,并通过它们来计算传输可靠性  $Q$ ,利用  $Q$  评估一下跳中继节点的可靠度。

#### 3.3.1 链路稳定性因子

链路稳定性因子是基于车辆的速度  $v$  来定义的。假设车

辆速度符合标准分布,则  $v$  的概率密度函数  $f(v)$  为:

$$f(v) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-((v-\mu)^2)/(2\sigma^2)} \quad (4)$$

则相应概率分布函数  $F(v)$  应为:

$$F(v \leq v_0) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{v_0} e^{-((v-\mu)^2)/(2\sigma^2)} dv \quad (5)$$

其中,  $\mu$  为速度的均值,  $\sigma^2$  为速度的方差。而在  $T$  时间内数据通信的概率密度函数为:

$$f(T) = \frac{4R}{T^2 \sigma_{\Delta v} \sqrt{2\pi}} e^{-(((v-\mu)^2)/(2\sigma_{\Delta v}^2))} \quad (6)$$

其中,  $\Delta v$  表示连接的发起车辆  $V_1$  和接收车辆  $V_2$  之间的相对速度,而  $\sigma_{\Delta v}$  和  $\sigma_{\Delta v}^2$  分别表示此相对速度  $\Delta v$  的均值和方差。  $R$  是车辆节点的无线通信距离,所以  $2R$  为一次通信可以覆盖的路段长度。

设通信中的车辆节点  $V_1$  和  $V_2$  的坐标分别为  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ , 则两个通信节点之间的距离可以表示为  $\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ 。如果在某一时刻两个车辆节点之间能互相接收到对方的信标包,假设此刻建立连接,该连接能有效持续的时间记为  $t_{avail}$ , 则  $V_2$  的稳定性因子  $S$  的计算式为:

$$S = \int_0^{t_{avail}} f(T) dT \quad (7)$$

$V_1$  和  $V_2$  之间的连接可用时间  $t_{avail}$  的取值有以下几种情况:

$$t_{avail} = \begin{cases} \frac{R - \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{|v_1 - v_2|}, & V_1 \text{ 和 } V_2 \text{ 同向, 且前车速度较大} \\ \frac{R + \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{|v_1 - v_2|}, & V_1 \text{ 和 } V_2 \text{ 同向, 且前车速度较小} \\ \frac{R + \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{v_1 + v_2}, & V_1 \text{ 和 } V_2 \text{ 相向而行} \\ \frac{R - \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{v_1 + v_2}, & V_1 \text{ 和 } V_2 \text{ 背向而行} \end{cases}$$

#### 3.3.2 距离衰减因子

城市环境复杂,车辆周围的建筑、桥梁、绿化带和隧道等都会给无线传输带来一定的影响,导致信号接收质量较差,链路质量不稳定。多径反射会降低接收到的信号强度和数量,且节点周围移动的节点,无论是发送者还是接收者,也会对信号的衰减产生一定影响。因此,DSRC 信道模型需要考虑距离产生的路径损耗和信道衰减。研究发现 Nakagami 分布符合 DSRC 信道信号传输的振幅包络<sup>[10]</sup>。Nakagami 衰减中信号振幅  $y$  的概率密度函数为:

$$f(y, \omega, m) = \left( \frac{2m^m y^{2m-1}}{\Gamma(m) \omega^m} \right) \left( \frac{my^2}{\omega} \right)^{-m}, y \geq 0, \omega \geq 0, m \geq 1/2 \quad (8)$$

其中,  $m$  是衰减参数,  $\omega$  为平均接收功率。这两个参数的值是由通信节点之间的距离来决定的。根据车联网络环境中的经验数据<sup>[11]</sup>,在视距范围条件下,衰减参数  $m$  在距离 50 m 以内约为 3,在 50~150 m 的范围内约为 1.5,在 150 m 以外的范围

为1。而路径损耗模型可以表示为:

$$\frac{\omega(d_0)}{\omega(d)} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^\gamma \quad (9)$$

其中,  $\omega(d_0)$  和  $\omega(d)$  分别是距离发送点  $d_0$  处和距离发送点  $d$  处的平均接收功率;  $\gamma$  为距离损耗指数, 由研究测量来确定。通常,  $\gamma$  在自由空间取值为2, 在直线传播环境中取值范围为1.6~1.8, 在具有建筑等障碍物的城市环境中取值范围为2.7~5。

对 Nakagami 分布, 衰减参数  $m$  取正整数, 给定平均功率  $\omega$ , 得出发送功率为  $y$  的信号的相应累积分布函数:

$$F_{cd}(y, m, \omega) = \frac{m^m}{\Gamma(m)\omega^m} \int_0^y z^{m-1} e^{-(m/\omega)z} dz \quad (10)$$

由此, 在没有干扰的情况下, 接收点可以成功接收到数据包的概率即是数据包信号比接收门限值  $TR_y$  大的概率:

$$\begin{aligned} P_F(y > TR_y) &= 1 - F_{cd}(TR_y, m, \omega) \\ &= 1 - \frac{m^m}{\Gamma(m)\omega^m} \int_0^{TR_y} z^{m-1} e^{-(m/\omega)z} dz \end{aligned} \quad (11)$$

根据 Friis 模型中定义的二次路径损耗<sup>[12]</sup>, 离发送节点距离为  $R$  处的接收门限为:

$$TR_y = \frac{T_p}{R^2} G \quad (12)$$

其中,  $T_p$  表示选定的传输功率;  $G$  是一个常数, 其值为:

$$G = \frac{G_t G_r \lambda_w}{(4\pi)^2 L} \quad (13)$$

其中,  $G_t$  是发送方的天线增益,  $G_r$  是接收方的天线增益,  $\lambda_w$  是传输信号的波长,  $L$  是路径损耗因子(通常设置为1)。再次使用 Friis 模型来确定离发送点距离  $x$  处的接收功率  $\omega(x)$ :

$$\omega(x) = \frac{T_p}{x^2} G \quad (14)$$

将式(12)中的  $TR_y$  和式(14)中的  $\omega(x)$  代入式(11), 可以推导出距离发送点  $x$  处成功接收到数据包的期望概率为:

$$P_F(x) = 1 - \frac{(x^2 m)^m}{\Gamma(m)} \int_0^{1/R^2} z^{m-1} e^{-x^2 m z} dz \quad (15)$$

其中, 在车联网环境下  $m$  的取值是接收点离发送点距离  $x$  的函数:

$$m(x) = \begin{cases} 3, & x < 50 \text{ m} \\ 1.5, & 50 \text{ m} \leq x < 200 \text{ m} \\ 1, & 200 \text{ m} \leq x \end{cases} \quad (16)$$

因此, 本文中  $F$  的取值为式(15)所示的概率值, 数据包在每一次转发的过程中会在原有的贪婪转发的基础上对参与转发的节点计算  $F$  值, 并用于随后对节点稳定性  $Q$  的计算。通过计算距离衰减因子, 本文提出的算法在确保单跳步进长度尽可能大的基础上, 放弃选择信号衰减特别严重的节点作为转发节点, 从而提高转发成功率。

### 3.3.3 方向因子

方向因子  $Dir$  决定了节点可靠性  $Q$  的符号。本文设置目的节点所在的方向为正方向, 位于正方向上的节点  $Dir$  的值为1, 反之,  $Dir$  的值为-1。由于车辆的行驶方向受道路形态约束, 因此方向因子的确定也随道路形态而定。图2(a)说明了 GROOV 等现有路由协议未考虑道路形态, 使得  $N_1$  相对于  $N_2$  更容易被误选为下一跳转发节点, 造成数据包回传,

导致传输总跳数和端到端传输时延增加, 甚至在  $N_1$  与  $S$  相对静止时, 引起数据包的转发在一段时间内陷入  $N_1$  和  $S$  形成的循环圈。因此本文采用如图2(b)所示的方式设置方向因子  $Dir$ , 由此图2(a)中的节点  $N_1$  将被分配方向因子  $Dir = -1$ , 节点  $N_2$  将被分配方向因子  $Dir = 1$ 。

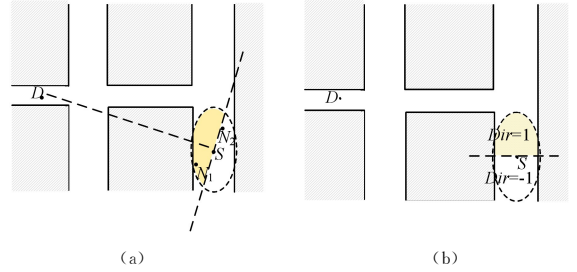


图2 方向因子的设置

Fig. 2 Setting of directional parameter

网络中每个节点在转发数据包之前, 先按照式(17)计算部分邻居节点的可靠性  $Q$ , 这部分邻居节点与发送节点的距离大于或等于200m, 然后选择  $Q$  值最大的节点作为下一跳转发节点, 将这种方式称为折衷贪婪转发方式。

$$Q = Dir(S+F) \quad (17)$$

如果这个范围内没有节点, 再用朴素的贪婪转发方式选择邻居节点作为下一跳中继节点。

### 3.4 交叉路口模式

因为楼房建筑、绿化带等障碍物会阻断无线信号, 且数据包在直路段的传递过程比较简单, 只能沿着路段前进, 然而当数据包到达路口时, 却面临两个或者两个以上的方向选择, 若在路口范围内不考虑数据包接下来的传递方向, 则有可能导致数据包绕行从而增加转发总跳数。

图3给出一个很普遍的例子, 图中节点  $S$  是当前节点,  $D$  是目标节点。如果采用直路段所用的转发方式, 数据包将会被传递给  $N_1$ , 进而传给  $N_2$ , 然后在  $N_2$  处遭遇局部最优, 启动恢复模式, 传回给  $N_3$ , 经  $N_3$  传给  $N_4$ , 继续前进。如果  $S$  能预先感知自己即将到达路口, 进而提前判断出数据包接下来的转发方向, 则可以避免这种错误。如图3所示, 在路口范围内不经判断地采用贪婪转发将导致数据包经历虚线箭头多出的两次转发, 预先判断转发方向, 数据包将直接按照实线箭头前行。

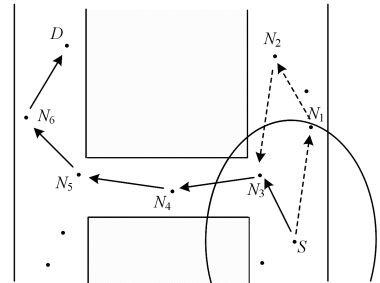


图3 应用实例

Fig. 3 Application example

因此有研究把判断数据包接下来转发方向的任务交给路口节点, 因为转发方向的变化只能发生在路口, 所以直路段的节点不用关心数据包接下来的路径, 所有直路段的节点遇到

路口节点,就把数据包转发给它,这样便避免了上述问题。然而这种方式却带来了新的问题,如果所有数据包都必须转发给路口节点,则对于那些接下来不改变方向的数据包来说,这次转发则是多余的。

PGR 要求网络中的每个节点在广播自己的位置信息时,如果发现自己处于路口,则需在信标包中把路口节点的标志位设置为 1,如 3.1 节所述。当一个节点收到一个来自路口节点的信标包时,说明该节点邻近路口。此时,该节点启动一个预测算法来判断该数据包在通过即将到达的这个路口时是否需要改变前进方向。只有预测出需要改变方向时才把数据包传递给路口协调节点,从而改变转发方向;否则直接穿越路口,绕过路口协调节点。如图 4 所示,S 和 D 分别为源节点与目标节点,实线箭头是启用预测功能的转发路径,虚箭头是未启用预测功能的转发路径。

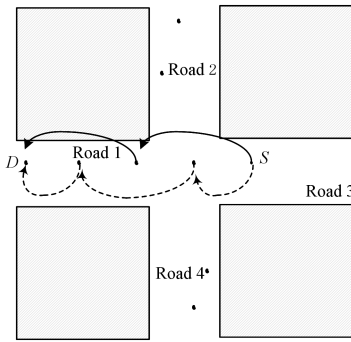


图 4 采用预测后的转发过程

Fig. 4 Delivery process after using prediction

PGR 设置交叉路口模式的算法流程如图 5 所示。

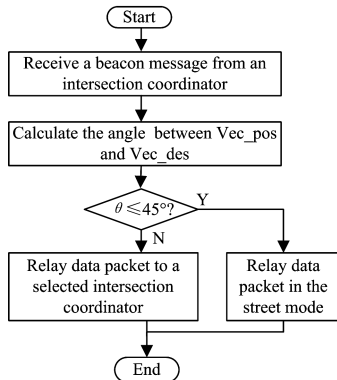


图 5 启动交叉路口模式的算法流程

Fig. 5 Algorithm process of starting intersection mode

### 3.5 克服局部最优的恢复方案

虽然在转发数据包时采用了折衷贪婪转发策略,然而数据包仍然有陷入局部最优的可能性,因此仍然需要设计一个能及时从局部最优中恢复的方案。使用图 6 对恢复方案进行说明,具体如下:一个以  $D$  为最终目的节点的数据包在节点  $S$  处遭遇了局部最优,则  $S$  节点转换到边缘模式,按照著名的右手规则来引导数据包的转发绕过空洞,从局部最优中恢复。右手规则会引导数据包抵达节点  $N_1$ ,使其能恢复到 3.3 节所述的折衷贪婪数据转发方式,最终经过路口模式和直路段模式成功抵达目的节点  $D$ 。

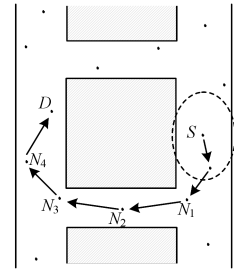


图 6 遭遇局部最优后启用右手规则的恢复模式

Fig. 6 Recovery mode after suffering local optimization with right-hand-rule

## 4 实验与分析

实验采用 NS-2 来仿真网络协议,选用 VANetMobiSim 的 IDM\_IM 模型来产生车辆的运动轨迹。实验环境是一个边长为 1500m 的正方形区域,媒体控制协议 (Medium Access Control, MAC) 采用 802.11p,用打包的方式将 802.11p 的实现代码集成到 NS-2 中,将概率性信道衰减模型 Nakagami 在所安装的 802.11p 中实现。每一次仿真运行中,随机选择网络中 20% 的节点作为发送和接收的通信节点对,仿真参数的设置如表 1 所列。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Setting of simulation parameters

Parameter	Value
Network simulator	NS-2
Mobility simulator	VANetMobiSim
Dimension/m <sup>2</sup>	1500×1500
Simulation time/s	600
Routing protocol	GPSR, GyTAR <sup>[18]</sup> , PGR, GROOV
Average vehicle speed/(km/h)	50
Transmission power/W	0.005
802.11p rate/mbps	6
Source-destination pairs	Random
Packet Size/Byte	512

### 4.1 包投递成功率

在实验环境下,应用层的 CBR 设定为每秒产生 4 个数据包,然后调整网络的节点密度,观测其对包投递成功率的影响,得到图 7(a) 所示的结果。由图可知,当网络中的车辆节点密度较大时,4 种路由协议下的包投递增长率都显示出增长的趋势,这是因为节点密度大,网络的联通性好,丢包率便随之降低。本文提出的 PGR 协议较其余 3 种协议在各种情况下都显示出更好的包投递成功率。而 GyTAR 所采用的转发机制在高交通流密度情况下会遭遇大量冲突,导致丢包率上升;另外,该算法未考虑路口信号灯的作用,导致其在判断道路连通性时会做出错误评估。

在保持 CBR 和 150 个节点参与实验的同时,其他实验环境保持不变,设置最高车速在 15~90 km/h 内变化,以测试数据包投递成功率受车辆行驶速度的影响,结果如图 7(b) 所示。所有协议的性能都会受到车辆移动速度增大的影响,然而 PGR 所受影响最小,因为其利用准确的预测模型减少了车辆行驶速度对车与车之间连接可用性的不良影响。高移动性对 GPSR 的包投递成功率的影响最大,当速度达到 90 km/h

时,其包投递率仅为 PGR 成功率的 72%,这是因为 GPSR 的贪婪转发方式不具有预测功能,高移动性使得朴素贪婪算法计算出的节点失效的概率大大增加,从而导致包投递成功率降低。

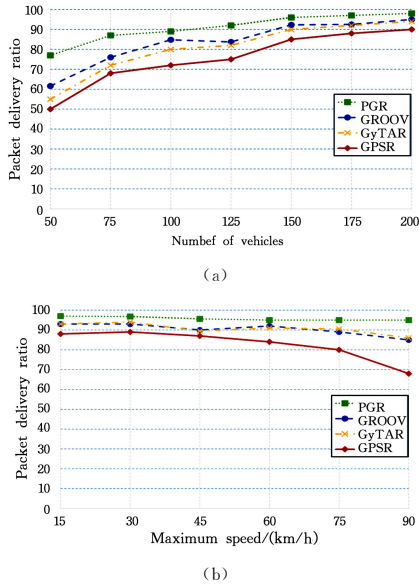


图 7 包投递成功率  
Fig. 7 Packet delivery ratio

相对于 GROOV, PGR 不仅考虑了接收节点速度变化的快慢,还考虑了信号的衰减对传输成功率的影响,并且在选择节点时考虑了道路形态对路由的影响,准确设置方向因子,因此比 GROOV 能更准确地筛选出稳定的节点,避免错误切换到边缘转发模式,或甚至因此导致丢包,这是 PGR 性能比 GROOV 有较大提升的重要原因之一。

#### 4.2 平均传输时延

在实验环境下,我们监测到 4 种协议的平均端到端传输时延随网络密度变化的变化情况,如图 8(a)所示,4 种协议的端到端传输时延都会随着密度的增加而有所降低。这是因为密度越大,网络断开的概率就越小,数据包绕路转发的可能性越低,因此端到端传输时延降低。PGR 协议在各种情况下的端到端时延都最低,这是因为其考虑了道路形态对数据转发路径的影响,遭遇局部最优的可能性比其他 3 种算法都低,所以数据包进入边缘转发模式的概率也降低,进而端到端时延降低。此外还有一个很重要的原因,GROOV 中的数据包必然会在路口做一次转发。然而 PGR 进入路口之前会提前判断数据包接下来的转发方向,这个预判使得数据包在相当一部分情况下均可直接穿越路口,在路口节约一次转发。而 GyTAR 和 GPSR 这类不对路口进行判断的算法有可能导致数据包绕行,直到进入局部最优时再返回路口重新选择。其次,PGR 算法的计算量与 GROOV 是相当的,在时间复杂度上也小于 GyTAR 和 GPSR,具有较小的计算开销和端到端时延。

图 8(b)给出了目的节点收到数据分组的平均端到端时延随车辆移动速度变化的变化情况。当节点移动速度增加时,车辆之间通信链路断开的概率就会增加,分组冲突和竞争的概率也会随之增加,由图可知,4 种协议下的平均端到端时

延均随着节点移动速度的增加而增加。其中,由于 PGR 具有科学的预测模型,在节点移动速度较高时仍能准确选择传输质量较高的节点转发数据分组,因此其转发过程在 4 种协议中最为稳定,端到端传输时延受节点移动速度增加的影响最小。

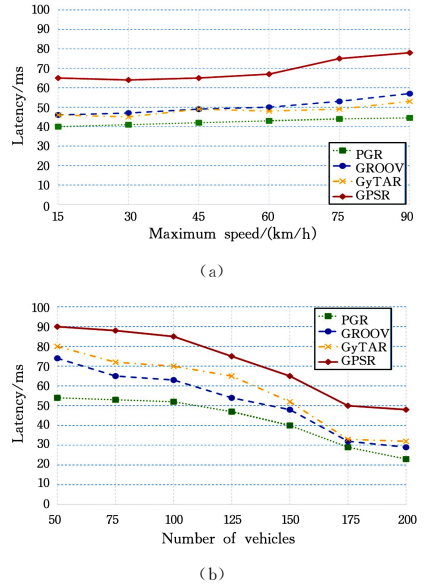


图 8 端到端时延  
Fig. 8 End-to-end delay

#### 4.3 路由开销

设置数据分组的产生周期为 0.2 s, 4 种路由协议的路由控制数据包随节点密度的变化情况如图 9(a)所示。

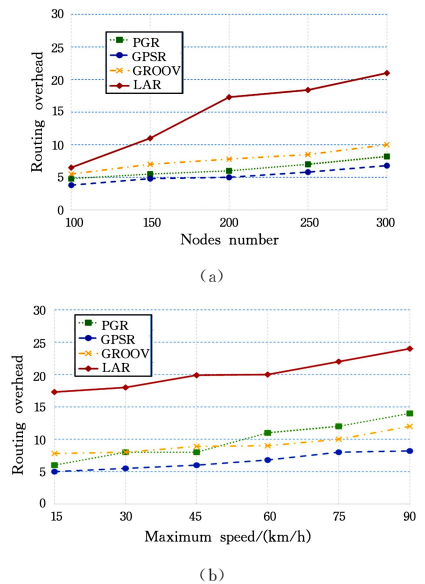


图 9 路由开销  
Fig. 9 Routing overhead

总的来说, LAR<sup>[14]</sup> 的控制开销高于 GROOV 和 PGR。因为 LAR 有 3 种类型的控制消息,包括路由请求、路由应答和路由出错报告, LAR 依靠这些信息来发现和维持路由信息,而在节点高速移动的 VANET 中,由于拓扑持续变化,这些控制信息变化很容易被触发,进而频繁地产生路由控制消息。GROOV, GPSR 和 PGR 均是只需要信标数据包便可以

维系路由信息的路由协议,周期性的信标广播也使得路由开销较为稳定。而LAR的路由开销增长率会随着密度的增加而略有减少,因为在高密度的车辆环境中,拓扑的变化减慢,随之被触发的路由控制信息的增长量也有所减少。图9(b)是将网络中节点个数固定为200的情况下,路由开销受车速影响的结果。当车速增加时,节点之间连接断开的概率增加,4种情况下路由控制信息均随之增加。然而,GROOV与PGR由于具有预测功能,需要在信标包中携带一些用于计算的附加信息,导致大多数情况下的路由开销略大于GPSR。同样具有预测功能的PGR的控制信息开销比GROOV少,这是因为PGR转发算法使数据包经历更少的转发跳数,同时在设计信标数据包时省略了车辆速度等信息,减小了周期性共享的信标数据包的数据量,也在一定程度上减少了网络控制开销。

**结束语** 本文提出的PGR改进了GROOV算法,由于车辆自组织网络中节点的高速移动会导致拓扑发生变化,这种改进能够使算法预测一些变化,进而能够适应车联网拓扑的快速变换。将朴素的贪婪算法改进为折衷的贪婪算法,在选择下一跳转发节点时,尽量选择稳定性高的节点,这样的节点能较好地维系转发路径,避免由于节点移动和信号衰减造成的连接中断。折衷贪婪算法能通过节点的速度和方向信息估计下一跳节点的位置信息,避免使用的位置信息不准确导致连接中断。本文还给出了判断路口的方式,在数据包接近路口时能提前预判数据包接下来选择的道路,基于此来确定数据包是否需要在路口处转发。这种预测在很大程度上减少了数据包在到达目的节点之前的总转发跳数,也在一定程度上避免了数据包绕路的情况,从而有效降低了数据的端到端时延。此外,本文提出的算法的前提是只需要车载GPS设备,不需要预先建设基础设施,也不需要预先装载好电子地图,能够很好地在城市环境中工作。由于车载能源的充沛性,本文没有讨论算法的能源问题,将来可以对所提算法的能耗问题进行相关研究,使其同时可以适用于其他能量受限的移动自组织网络。

## 参考文献

- [1] BI X D, YANG B L. Improved AODV routing protocol based on multi-objective optimization [J]. *Computer Engineering and Design*, 2017, 38(4): 898-902. (in Chinese)  
毕晓东, 杨柏林. 基于多目标优化的改进 AODV 路由协议[J]. *计算机工程与设计*, 2017, 38(4): 898-902.
- [2] LIU Q L, JIA M F, CHEN L, et al. Routing protocol for urban vehicular ad hoc networks [J]. *Computer Engineering and Application*, 2017, 53(9): 121-126. (in Chinese)  
刘期烈, 贾梦芳, 陈林, 等. 城市环境中车载自组织网络路由算法
- [J]. *计算机工程与应用*, 2017, 53(9): 121-126.
- [3] KARP B, KUNG H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]// *International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM, 2000: 243-254.
- [4] NAUMOV V, BAUMANN R, GROSS T. An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces [C]// *ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. Florence: MOBIHOC, 2006: 108-119.
- [5] LOCHERT C, MAUVE M, FUBLER H, et al. Geographic routing in city scenarios[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2005, 9(1): 69-72.
- [6] ABBAS M, KHADER S A, RABBANI M A. Comparative analysis of packet delivery in vehicular ad hoc networks[J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8(1): 343-353.
- [7] HUANG D L, YAN Y S. A contention-based routing protocol for VANET[J]. *Telecommunication Computing Electronics and Control*, 2016, 14(1): 319-325.
- [8] WU L C, SHI Y, ZHANG H Q, et al. The Improvement of GPSR Protocol Based on the Node Density of the Next Hop's Forwarding Region[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2017, 41(3): 474-478. (in Chinese)  
伍龙昶, 石英, 张焕清, 等. 基于下一跳前向转发节点密度的GPSR改进协议[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2017, 41(3): 474-478.
- [9] DHURANDHER S K, OBAIDAT M S, BHARDWAJ D, et al. GROOV: A geographic routing over VANETs and its performance evaluation [C]// *Global Communications Conference*. IEEE, 2012: 1670-1675.
- [10] BRAVO-TORRES J F, LOPEZ-NORES M, BLANCO-FERNANDEZ Y, et al. Optimizing Reactive Routing Over Virtual Nodes in VANETs [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(4): 2274-2294.
- [11] BHUYAN N H M. The Effect of Radio Channel Modeling on the Network Performance in VANET[D]. Lund: Lund University, 2015.
- [12] BAI F, HARTENSTEIN H, GRUTESER M, et al. Special Section on Vehicular Networks and Communication Systems: From Laboratory into Reality [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(9): 4146-4149.
- [13] JERBI M, SENOUCI S M, MERAIHI R, et al. An improved vehicular ad hoc routing protocol for city environments [C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2007: 3972-3979.
- [14] KO Y, VAIDYA N. Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks [C]// *IEEE MOBIKOM'98*. Dallas, USA: ACM, 1998: 66-75.