

路口中继辅助车载自组织网络路由算法

孙海峰 宋丽丽

(西南科技大学计算机科学与技术学院 四川 绵阳 621010)

摘要 车载自组织网络具有节点移动速度快、链路拓扑结构变化剧烈等特点,传统的城市道路环境车载自组织网络路由算法在路口经常会遇到局部最大化问题。根据城市道路环境的特点,利用路口的交通信号灯系统提供的空间支撑和供电条件,提出了路口中继辅助路由算法 IRAR。该算法通过建立消息在道路上的转发时延统计模型,得到全局最优转发路径,并利用路口中继辅助路由设施解决路口局部最大化问题。另外,针对消息位于路口和道路的不同情况,分别设计路口转发模式和贪婪直路转发模式。最后,通过仿真实验将所设计的算法与典型算法进行对比。实验结果表明,所提出的路由算法实现了较高的投递成功率和较低的投递时延。

关键词 车载自组织网络,中继辅助,路由算法,局部最大化,统计模型

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.05.013

Intersection-relay-assisted Routing Scheme in VANETs

SUN Hai-feng SONG Li-li

(School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract For the characteristics of fast moving vehicles and rapid changing network links in vehicular Ad hoc networks, local maximum is often happened at road intersections in previous routing schemes. Based on road characteristics in urban environments, and supported by physical infrastructure and electronic conditions of the traffic light system, an intersection-relay-assisted routing (IRAR) scheme was proposed. By building a stochastic model of the road message delay, the global optimum forwarding path is got for each message, and local maximum is solved by relay assisted infrastructure. Furthermore, intersection forward mode and greedy straight way mode are designed according to the intersection location and straight way location of messages, separately. Finally, simulations are conducted to compare the proposed IRAR and the state-of-the-art schemes. Simulation results suggest that IRAR outperforms the compared schemes significantly in delivery ratio and delay.

Keywords Vehicular ad hoc network, Relay assisted, Routing scheme, Local maximum, Stochastic model

1 引言

车载自组织网络 (Vehicular Ad Hoc Networks, VANETs) 由一组运动的车辆组成,可以包含一些固定的通信基础设施,支持车辆-车辆或者车辆-通信设施之间的通信。VANETs 可以提供交通流量、事故报警等服务,以提高交通效率,增强驾乘人员的安全性。此外, VANETs 还可以提供导航、住宿餐饮、加油站等信息服务,以及驾乘人员的休闲娱乐方式等,正受到汽车制造商、政府和研究机构等的广泛关注^[1-3]。

与传统的移动自组网 (Mobile Ad Hoc Networks, MANETs)^[4] 相比, VANETs 具有以下一些新的特点:节点的移动速度更快,链路拓扑结构变化剧烈,网络中部分节点的网络连接经常处于中断状态和分割状态;节点运动受限于道路环境;节点之间的通信受道路两旁高大建筑物的阻挡等。因此,传统的 MANETs 协议通常不能直接适用于 VANETs 环境。

基于上述原因, VANETs 的消息只能在路口向其他道路转发,且 VANETs 不能根据节点形成的拓扑结构进行路由转发,而适合采用“携带-存储-转发”的机会转发模式进行消息

传递,即携带消息的节点在没有遇到合适的下一跳邻居节点可以转发时,由该节点存储并携带消息,直到遇到合适的邻居节点,再将消息转发给它。

目前,关于 VANETs 路由算法的研究已经取得了很多成果。但是现有的 VANETs 路由算法很少考虑使用固定设施辅助路由,多是依靠移动的车辆节点进行消息转发。然而,在一些偏僻的道路,或者交通流量比较低的时段,消息在路口进行转发时,在算法所确定的最优转发道路(通往最优一跳转发路口的道路)上经常遇到没有可供转发的邻居节点的情况,即局部最大化问题^[5]。因此,消息转发经常会进入路由恢复模式,即消息被转发或者携带进入了次优道路,从而大大增加了消息的投递时延。

在城市道路环境中,路旁设施也是智能交通系统和智慧城市的必要组成部分,美国 ITS 协会发布的车联网指南预测,美国 30 万个信号控制路口将采用路旁设施运行 V2I 应用^[6]。在路口遇到局部最大化时,道路上的消息可以先发送到中继辅助路由设施,再由中继辅助路由设施转发到最优转发道路上的车辆上。如果在最优转发道路中暂时没有可供转发的车

到稿日期:2017-02-06 返修日期:2017-12-04 本文受国家自然科学基金项目(61471306),西南科技大学博士基金项目(16zx7106)资助。

孙海峰(1976—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为车载自组织网络,E-mail:dr_hfsun@163.com(通信作者);宋丽丽(1981—),女,硕士,讲师,CCF 会员,主要研究方向为模式识别。

辆存在,那么由中继辅助路由设施暂时缓存,直到在最优转发的道路上出现可供转发的车辆,并将消息转发给它。

本文通过分析城市道路环境下 VANETs 消息转发特点,特别是路由由恢复模式带来的投递时延增大的现象,提出了在路口增加中继辅助路由设施来缓存消息的路由算法(Intersection-Relay-Assisted Routing, IRAR)。所提出的 IRAR 算法主要实现了以下几个方面的创新:利用所提出的统计模型确定消息位于路口以及道路时的最优下一跳路口;在路口遇到局部最大化问题时,将消息转发到中继辅助路由设施进行缓存,以确保消息始终向最优转发方向的道路转发;如果最优转发道路和当前所在道路位于同一条直线上,则可以跨越路口转发。实验结果表明,所提出的路由算法实现了较高的投递成功率和较低的投递时延。

2 相关工作

Karp 等提出的 GPCR 算法^[5]既不保存整个网络的拓扑信息,也不计算到达目标节点的完整路由,而是利用邻居节点和目标节点的位置进行贪婪转发。GPCR 的优点是简单,但没有考虑道路地图信息和全局最优路径的选择,消息在转发的过程中会进入局部最优路径。虽然 Bazzi 等设计的 GFAVR 算法^[7]提出了局部最优解决方案,但其只适用于节点比较稠密的城市道路环境。因此,利用 VANETs 地图信息和车辆统计信息设计性能更好的路由算法,成为了迫切需求。

Wisitpongphan 等^[8]和 Tian 等^[9]分别研究了美国 I-80 和 I-394 高速公路上的探测器数据信息,各自得出了在车辆密度稀疏分布的条件下车辆间距符合指数分布的规律。利用该规律可建立统计模型,并计算消息通过道路转发的期望时延。

Zhao 等提出了 VADD 算法^[10],其采用了“携带-存储-转发”的机会路由策略。VADD 使用城市地图和道路车流量信息,以及车辆在每个路口的转发概率,得到一个 $n \times n$ 的线性公式,最终计算出在每个路口的最优转发道路。但是,求解此 $n \times n$ 线性公式时需要假设消息在路口的转发优先级。VADD 算法由于利用了道路信息,且采用了缓存机制,因此大大提高了消息的投递成功率。但是,VADD 解决局部最大化问题时采取了向次优道路转发的策略,增加了消息投递时延。

类似于 VADD 算法,Sun 等提出的 JTAR 算法^[11]也利用了城市地图信息和道路车流量信息。JTAR 计算消息在每一条道路的转发时延,并利用 Dijkstra 最小权重算法得到全局最优路径。如果消息在路口遇到局部最大化问题,JTAR 选择由车辆继续携带消息的方式进入非最优转发道路。

GyTAR 算法^[12]使用两个因素的综合权重来确定最优转发道路:1)相邻道路的车辆密度;2)道路对端路口到目标节点的距离。但是,权重的确定依赖于经验,且在出现路口局部最大化的情况下,GyTAR 采取了由车辆携带消息到下一个路口的方案。由于消息的携带时延远大于转发时延,因此该局部最大化路由由恢复策略的效率较低。

为解决消息在路口的局部最大化问题,Guan 等提出一种以在路口等待信号灯的车辆作为虚拟转运节点的路由算法 IBFP^[13],即在出现路口局部最大化问题时,先将消息转发到虚拟转运节点,再由虚拟转运节点将消息携带到其他路口。但是,如果在路口没有车辆,则 IBFP 无法利用虚拟转运节点。

总之,VANETs 路由算法的研究与实际道路交通信息的结合越来越紧密,以期提供更优异的路由性能。

3 统计模型

将城市环境下的车载自组织网络视为一个无向图 $G=(V,E,d)$ 。其中,顶点 $i \in V$ 代表地图上的路口;边 $s_{mn}=(m,n) \in E$ 表示连接路口 m 和 n 的道路; $d:E \rightarrow (R^+)$ 是给每条边赋值的正数映射函数,表示消息通过该道路的期望转发时延。

根据 Wisitpongphan 等^[8]和 Tian 等^[9]关于车辆间距分布规律的研究成果,类似于 VADD, GyTAR 和 JTAR 等算法,IRAR 同样假设城市道路上的车辆间距满足指数分布规律。消息通过道路的转发时延主要包括携带时延和消息在车辆之间的转发时延。假设 VANETs 无线通信设备的覆盖半径为 R ,显然,转发时延是发生在所有间距小于 R 的车辆之间,而携带时延发生在间距大于 R 的车辆之间。对于道路 s_{mn} ,间距小于 R 的车辆的累积概率密度函数可以表示为:

$$P(X < R) = 1 - e^{-\lambda R} \quad (1)$$

其中,指数分布的参数 λ 为车辆间距均值的倒数(即车辆密度 ρ_{mn})。因此,消息通过 s_{mn} 的期望转发时延 d_{mn} 可以表示为:

$$d_{mn} = (1 - e^{-R \cdot \rho_{mn}}) \frac{l_{mn} \cdot c}{R} + e^{-R \cdot \rho_{mn}} \frac{l_{mn}}{v_{mn}} \approx e^{-R \cdot \rho_{mn}} \frac{l_{mn}}{v_{mn}} \quad (2)$$

其中, l_{mn} 为 s_{mn} 的长度; c 为邻居车辆间的一跳转发时延,可约等于 0; v_{mn} 为 s_{mn} 上的车辆的平均运行速度。假设 s_{mn} 上的平均车流量为 T_{mn} ,则 ρ_{mn} 可以表示为:

$$\rho_{mn} \approx \frac{T_{mn}}{v_{mn}} \quad (3)$$

使用该模型可以为无向图 G 中集合 d 的每一个元素进行赋值,即地图上的每一条道路都可以得到消息通过的转发时延。

由式(1)可知,道路上的车辆密度越大,则期望转发时延越小。因此,使用 Dijkstra 最小权重算法可以计算得到从任一路口 i 将消息投递到目标节点的最小投递时延 D_i 、最优下一跳路口 I_{opt} 以及全局最优路径。这样,位于路口的车辆以及路口的辅助转发设施,都可以使用此方法计算并确定最优下一跳路口。

如果携带消息的车辆位于道路 s_{mn} 上的位置 t ,则确定该车辆所携带消息的最优下一跳路口 I_{opt} 的方式如图 1 所示。

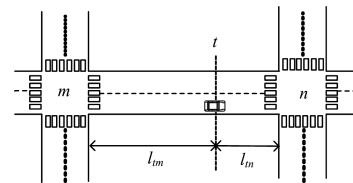


图1 道路上的消息确定最优下一跳路口示意图

Fig. 1 Selecting the next optimal intersection for messages on road

因此, I_{opt} 可以表示为:

$$I_{opt} = \arg \min_i (D_i + d_i), i = m, n \quad (4)$$

其中, d_i 表示消息从道路上的位置 t 分别转发到该道路两端的路口 m 和 n 所需要的时间,可以表示为:

$$d_i = \frac{d_{mn} \cdot l_i}{l_{mn}} \quad (5)$$

由于根据 Dijkstra 最小权重算法得到的最小投递时延 D_i

属于全局最优解,因此根据式(4)确定的 I_{opt} 不存在回路问题。

4 IRAR 路由算法

IRAR 路由算法通过周期性广播信标消息来发现邻居;位于道路上的消息,使用贪婪直路转发模式尽力将消息向所确定的最优下一跳路口方向转发;位于路口的消息,使用路口转发模式将消息转发到最优转发道路。

4.1 信标消息

类似于其他 VANETs 路由算法,IRAR 的节点通过周期性广播一跳的信标消息来发现邻居。信标消息中封装了节点 ID 及其当前位置的坐标信息。IRAR 的每个节点都维持一个邻居列表,该列表用于记录邻居车辆的位置信息和时间戳信息。节点收到一个信标消息后,如果信标消息携带的 ID 在邻居列表中不存在,表明一个新的邻居进入通信范围,则将其 ID 连同时间戳一起插入到邻居列表中;如果该 ID 在邻居列表中已经存在,那么在邻居列表中更新该 ID 对应的位置信息和时间戳;如果超过一个信标广播周期仍然没有收到来自于某一邻居车辆的信标消息,则认为该邻居已经离开通信范围,将其从邻居列表中删除。

4.2 贪婪直路转发模式

位于道路上的车辆 N 所携带的消息将会被尽力转发至所确定的 I_{opt} 方向。如果车辆的邻居节点有多个,那么选择距离 I_{opt} 最近的邻居节点进行贪婪转发。这与传统路由 VANETs 路由算法的转发策略一致。

IRAR 的贪婪直路转发模式改进了传统转发策略。如果 I_{opt} 的最优下一跳路口 I'_{opt} 与车辆 N 所在的道路位于同一条直线上,那么可以跨过 I_{opt} 按照传统贪婪直路转发模式将消息直接转发到 I_{opt} 的最优转发道路 S'_{opt} 上的邻居车辆,以转发跳数并降低出现路口最大化问题的概率;否则,如果车辆 N 的邻居节点中包含位于路口的辅助转发节点,则将消息转发给该辅助节点。

4.3 路口转发模式

研究发现,在没有路口中继辅助设施存在且消息在路口 I_{opt} 遇到局部最大化问题时,将携带进入非最优道路的消息再次回传到刚刚经过的路口 I_{opt} ,然后在此路口尝试将消息继续沿最优方向的道路转发,所实现的消息投递延迟显著低于选择次优道路的方案^[11]。因此,在路口遇到局部最大化问题时,IRAR 采用由路口中继辅助设施暂时缓存消息的方案来降低消息投递时延。

对于路口转发辅助设施所缓存的消息,如果在最优转发道路 S_{opt} 上有邻居车辆,那么进入贪婪直路转发模式,选择一个邻居车辆进行转发。

对于路口车辆所携带的消息(比如位于路口的车辆新产生的消息,或者从道路 S_{opt} 驶来的车辆所携带的消息),如果在 S_{opt} 存在邻居节点,那么进入贪婪直路转发模式。如果在车辆离开路口时 S_{opt} 上仍然没有出现邻居车辆,消息则由车辆携带进入道路,同样进入贪婪直路转发模式。

综上所述,IRAR 路由算法如算法 1 所示。其中, A_j 表示节点 j (车辆或路口设施)的邻居节点的集合, X 表示路口中继辅助路由设施。

算法 1 IRAR 路由算法

```

for each node j do
  for each message m buffered in j do
    if j is on the road
      if  $\emptyset = \{\text{node } e \text{ is on } S'_{opt} \mid e \in A_j\}$ 
        if  $X \in A_j$ 
          forward m to X;
        else
          forward m to node k where
             $k = \arg \min_i (l_i, l_{opt}), i \in A_j$ ;
        end if
      else
        forward m to node k where
           $k = \arg \min_i (l_i, l_{opt}'), i \in A_j$ ;
        end if
      else
        forward m to node k where
           $k = \arg \min_i (l_i, l_{opt}), i \in A_j$ ;
        end if
      end for
    end for
  end for
end for

```

5 仿真及分析

5.1 仿真设置

本节通过仿真实验将所提出的路由算法 IRAR 与 JTAR, VADD 和 GyTAR 算法进行性能对比。

仿真实验平台采用的是网络协议仿真器 NS-2,其版本为 NS2.34^[14]。车辆运动数据集由开源软件 VanetMobiSim^[15] 产生, VanetMobiSim 是车载自组网研究常用的车辆运动轨迹产生器,能够模拟接近真实的车辆的运动行为。

仿真实验采用 $4000\text{m} \times 3000\text{m}$ 的 5×4 曼哈顿网格地图,这种地图环境被很多 VANETs 路由算法仿真实验所采用^[10-12,16]。设置道路为双向两车道,限速为 22m/s (80km/h)。车辆数量为 $100 \sim 400$,以产生不同节点密度的道路环境。

仿真过程中,节点之间的应用层通信使用基于 UDP 的常比特率(Constant Bit Rate, CBR)协议。仿真过程中随机选择 25 个车辆节点作为 CBR 的消息源,每个 CBR 消息源每秒产生一个 CBR 数据包。目标节点位于主干道的一个固定位置。所有仿真参数的设置如表 1 所列。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	值
地图大小	$4000\text{m} \times 3000\text{m}$ (5×4 Grid)
路口半径	50 m
车辆数量	$100 \sim 400$
道路限速	22m/s (80km/h)
应用层协议	25 个 CBR 连接
CBR 速率	1.0 packets/s
CBR 负载	256 kB
无线通信半径	250 m
信标广播周期	0.5 s
分组生存时间	128 跳
MAC 层算法	IEEE802.11 DCF
仿真时间	300s

VanetMobiSim 在仿真参数的控制下产生车辆运动的数

据集文件。根据车辆运动数据集文件,可以统计得到每一条道路上的车辆统计信息(车辆密度和平均速度),并在仿真过程中全局共享。将道路上车辆的统计信息代入式(2)即可求得消息通过每一条道路时的期望转发时延。

5.2 投递成功率

投递成功率定义为消息成功投递到目标节点的数量与总消息数量之比。图 2 给出了不同车辆密度场景下所得到的消息投递成功率。

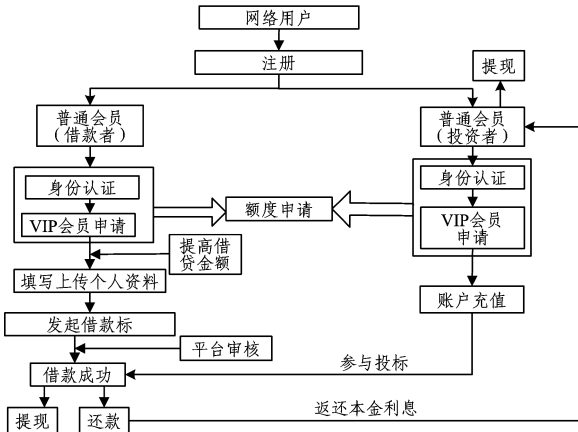


图 2 不同节点密度情况下的投递成功率

Fig. 2 Delivery ratios for different nodes densities

从图 2 中可以看出,在所有对比的路由算法中,IRAR 在每种车辆密度场景下都表现出最高的投递成功率。

在车辆密度较低(100 个节点)的情况下,IRAR 的投递成功率比 JTAR, VADD 和 GyTAR 高出 70%。原因在于,此条件下的道路连通性较差, JTAR, VADD 和 GyTAR 在路口需要频繁进行路由恢复,而 IRAR 却可以始终将消息向最优转发道路进行转发。随着车辆密度的增加,IRAR 实现的投递成功率的 优势逐渐变小。原因在于,随着道路的连通性变好, JTAR, VADD 和 GyTAR 在路口进行路由恢复的概率变低。

5.3 投递时延

投递时延为投递消息到目标节点所花费的平均时间。对于投递成功率较低的算法,由于只统计了小部分距离目标节点比较近的源节点所产生的消息,因此投递时延反而可能会比较低。为了对不同路由算法的投递时延进行公平对比,仿真实验设置为在仿真时间结束时,源节点便不再产生新的 CBR 消息,但仿真过程会一直运行,直到 95% 的消息能够投递到目标节点。

各路由算法在不同车辆密度场景下的投递时延如图 3 所示。从图中可以看出,在各种节点密度情况下,IRAR 实现的投递时延均低于对比算法,特别是在车辆密度较低的情况下,IRAR 的优势更加明显。

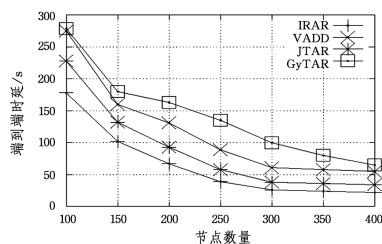


图 3 不同节点密度情况下的投递时延

Fig. 3 Delivery delays for different nodes densities

结束语 本文首先介绍了 VANETs 的特性,分析了现有路由算法在路口的局部最大化问题,并提出了解决方案;其次总结了 VANETs 路由算法的发展,并分析了典型路由算法的特点;然后通过建立消息在道路上的转发时延统计模型得到消息投递的全局最优转发路径,并设计了 IRAR 路由算法;最后通过仿真实验对比了几种典型路由算法。从实验结果可以看到,所提出的 IRAR 路由算法实现了较高的投递成功率和较低的投递时延。

参考文献

- [1] HUANG C M, LIN S Y. An early collision warning algorithm for vehicles based on V2V communication [J]. International Journal of Communication Systems, 2012, 25(6): 779-795.
- [2] 李东颖. 车联网将成产业革命推动力 [N]. 北京青年报, 2014 (1).
- [3] CUNHA F, VILLAS L, BOUKERCHE A, et al. Data communication in VANETs: Protocols, applications and challenges [J]. Ad Hoc Networks, 2016, 44: 90-103.
- [4] MACKER J P, CORSON M S. Mobile ad hoc networking and the IETF [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 1998, 2(1): 9-14.
- [5] KARP B, KUNG H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks [C]// 6th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom' 00). New York: ACM, 2010: 243-254.
- [6] BAYLESS S H, GUA A. Connected vehicle technical insights [EB/OL]. [2016-11-08]. <http://www.itsinternational.com/sections/nafta/features/its-america-publishes-connected-vehicle-guidance>.
- [7] BAZZI A, ZANELLA A. Position based routing in crowd sensing vehicular networks [J]. Ad Hoc Networks, 2016, 36: 409-424.
- [8] WISITPONGPHAN N, BAI F, MUDALIGE P, et al. Routing in sparse vehicular ad hoc wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(8): 1538-1556.
- [9] TIAN D X, LEUNG V C M. Analysis of broadcasting delays in vehicular ad hoc networks [J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2011, 11(11): 1433-1445.
- [10] ZHAO J, CAO G. VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular Ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1910-1922.
- [11] SUN H F, LUO G C, CHEN H. JTAR: Junction-Based Traffic Aware Routing in Sparse Urban VANETs [J]. IEICE Transactions on Communications, 2012, E95B(3): 1007-1010.
- [12] JERBI M, SENOUCI S M, RASHEED T, et al. Towards efficient geographic routing in urban vehicular networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 5048-5059.
- [13] GUAN X, HUANG Y, CAI Z P, et al. Intersection-based forwarding protocol for vehicular ad hoc networks [J]. Telecommunication Systems, 2016, 62(1): 67-76.
- [14] NSNAM. Network Simulator (ns-2) [EB/OL]. [2010-05-08]. http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/Main_Page.
- [15] HARRI J, FIORE M, FILALI F, et al. Vehicular mobility simulation with VanetMobiSim [J]. Simulation, 2009, 87(4): 275-300.
- [16] WU T Y, WANG Y B, LEE W T. Mixing greedy and predictive approaches to improve geographic routing for VANET [J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2012, 12(4): 367-378.