

VANET 中安全信息的快速可靠广播路由算法

罗 涛 李俊涛 刘瑞娜 丁 磊 李剑峰

(北京邮电大学网络体系构建与融合北京市重点实验室 北京 100876)

摘 要 为了满足 VANET 中交通安全信息实时可靠传输的需求,文中提出了一种基于自适应认证重传机制的多跳广播路由算法(ACR-BA).首先,为了节省网络资源,ACR-BA 算法设计了两种短控制包,有效地抑制了传输冗余;其次,为了降低竞争信道的碰撞概率,基于地理位置划分了候选节点集,并结合控制包认证机制在一个候选节点集中仅确定出唯一的转发节点;然后,根据网络负载状况设计了一种基于单位基准时隙的自适应机制,设置尽量小的退避等待时间,提高信息广播的实时性;最后,设置了针对短控制包和数据包的超时重传保障机制,在保证算法实时性的基础上最大限度地提高可靠性.理论分析和仿真结果表明,与传统洪泛算法和时隙 1 坚持算法相比,ACR-BA 算法有效地降低了网络中的冗余数据量,在实时性和可靠性两方面均有较大的性能提高.

关键词 VANET;多跳广播;网络状态估计;自适应;认证重传

中图法分类号 TP301 **DOI 号** 10.3724/SP.J.1016.2015.00663

A Fast and Reliable Broadcast Routing Algorithm for Safety Related Information in VANET

LUO Tao LI Jun-Tao LIU Rui-Na DING Lei LI Jian-Feng

(Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract In order to improve the safety, vehicles in the event of traffic jams, accidents or other emergency conditions should distribute the safety related information out reliably and timely. An Adaptation and Certification Retransmission based multi-hop Broadcast Algorithm (ACR-BA) for VANET(Vehicular Ad-Hoc Networks) is proposed in the paper. Firstly, by introducing two short certification packets (RTF/ATF: Request To Forward /Answer To Forward) and dividing all nodes into different parts with different priorities, only one node is selected to rebroadcast in ACR-BA algorithm. This method can reduce the probability of collision during the nodes contending for the channel and the amount of data redundancy. According to the network's load, we then use the adaptive unit slot time to reduce the backoff time and the time for information broadcasting. Finally, both ATF and data packets retransmission mechanism is proposed to improve the block error rate. Theoretical and simulation results demonstrate that, compared with the Mflood and Slotted 1-persist algorithms, the proposed ACR-BA algorithm can reduce the redundant data, shorten the time for broadcast, and also improve the reliability.

Keywords VANET; multi-hop broadcasting; network state estimation; self-adaptive; certification retransmission

收稿日期:2013-09-24;最终修改稿收到日期:2014-10-16. 本课题得到国家自然科学基金(61271184)、新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0594)、国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2013AA013301)和现代信息科学与网络技术北京市重点实验室开放课题(XDXX1309)资助. 罗 涛,男,1971 年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为移动通信、认知无线电技术和车辆通信网络等. E-mail: tluo@bupt.edu.cn. 李俊涛,男,1989 年生,硕士研究生,主要研究方向为移动通信和车辆通信. 刘瑞娜,女,1987 年生,硕士,主要研究方向为车辆通信. 丁 磊,男,1990 年生,硕士研究生,主要研究方向为移动通信. 李剑峰,男,1960 年生,研究员,主要研究方向为高速信息网络.

1 引 言

车载自组织网络(Vehicular Ad-Hoc Networks, VANET)结合全球定位系统(GPS)、传感器技术和无线通信网络,采集实时交通信息并及时广播,进而为车辆的安全行驶、交通管理、数据通信等提供解决方案.根据业务性质,VANET 中的数据业务可分为交通安全业务(如碰撞预警、道路拥塞、道路湿滑及交通事故信息等)和非安全业务(如 Internet 接入、多媒体娱乐等)两大类^[1].显然,非安全业务侧重于丰富用户的精神需求,优先级较低,对传输时延的要求不高;而交通安全业务将对保障行车安全,提高交通效率起到更加积极的作用.因此,为保证交通安全顺畅,针对这类安全业务消息,需要设计一种快速可靠的广播路由算法.

VANET 网络中车辆节点通信距离较短、网络以多跳自组织形式存在,且拓扑结构变化较快^[2-3],故要将信息传播到较远距离,节点通常需要采用多跳中继广播.VANET 网络中,安全信息与非安全信息共享信道,如果不限制中继转发节点数目,一跳范围内节点竞争信道时会频繁地发生碰撞,信道的接入成功率较低;当车辆节点密度较大时,网络信息负载会急剧增大,从而引起广播风暴.

为了解决车载网络通信的难点问题,许多文献都提出了不同的中继转发广播路由算法.如文献[4-7]中采用了基于分簇思想的广播路由算法,将节点划分成相互独立的簇,构建一个虚拟的骨干网络来承担广播信息的转发,这减少了转发节点的个数,降低了网络冗余数据,提高了数据包覆盖全网的速度,但是 VANET 网络拓扑结构的快速变化将使得节点间频繁地进行信息交换,进而消耗大量的网络资源.除此之外,这类基于分簇思想的路由算法的收敛速度较低,因此其并不适合作为 VANET 中安全信息的广播路由算法.文献[8-9]提出了基于概率 p 转发的多跳广播路由算法,即当节点收到数据包后,以概率 p 转发数据包,以概率 $1-p$ 丢弃该数据包.这类算法很大程度地减小了中继转发节点比例.然而,各节点对数据的转发与否具有随机性,以致不能保证安全信息对网络很好地覆盖,这不满足安全信息的高覆盖率的要求.文献[10]提出了基于计数器的广播路由算法,有效抑制了节点的重复转发,降低了网络的冗余数据量,然而,这类算法也降低了数据的扩散速度,因此也不适于作为安全信息的广播路由算

法.文献[11-15]提出了基于地理位置信息的广播路由算法.文献[11]所提算法中,每个节点在发送数据包之前先将自己的位置信息加入到数据包中,当前节点收到不同节点转发的重复的数据包时,从数据包中读取上一跳节点的位置信息,据此来分析上一跳节点所发送的数据包的覆盖区域,并计算自己转发该数据包后,转发的数据包所能覆盖的新区域的面积,将此面积数值与预设的门限值进行比较,大于该门限值则转发数据包.文献[12]所提的时隙 1 坚持(Slotted 1-persist)算法中,根据节点间距离来计算并设置节点的转发等待时间,当前节点与上一跳节点的距离越大,则当前节点的转发等待时间越短,该算法有效地抑制了转发节点数目,优先选择距离上一跳节点相对较远的节点作为转发节点,降低了转发跳数.然而,由于高速衰落信道所引起的丢包等影响,该算法并不能保证安全信息能够可靠地快速传播出去.与基于概率 p 转发的广播算法和基于位置的广播路由算法相比,该算法能更好地保证信息的覆盖率,但同时也增加了多跳广播过程中每一跳的时延.特别是在节点稀疏及节点密度不均匀的场景下,或者节点通信范围边界无节点存在的场景下,转发时延更大.文献[13-15]在文献[11-12]的基础上,做了进一步的优化改进.其中文献[13-14]结合车辆密度这一重要因素,提出了基于车辆密度自适应的广播路由算法.具体来讲,文献[13]在 Slotted 1-persist 算法的基础上,新加入了数据包发送功率、速率及车辆密度等通信链路性能的影响因子,并以此为权值,计算并设置节点的转发等待时间.而文献[14]结合车辆空间分布和信道质量等因素,提出了基于自适应门限值的广播路由算法,该算法中,节点储存并更新相对位置 D ,如果 D 大于预设门限值,则该节点转发数据包;否则丢弃,该算法通过衡量覆盖区域来减少转发节点的个数,这与基于计数器的路由算法类似,数据多跳转发时延大,且该算法中最优门限值的选择与网络状态紧密相关.总之,文献[13-14]所改进的广播路由算法更适用于环境不断变化的车联网,但这类算法是基于车辆密度先验信息的.文献[15]所提算法考虑了节点的移动性,节点通过维护相邻车辆的位置及速度等信息,从而预测邻居节点的运动趋势,选择合适的节点作为转发节点,该算法提高了信息广播的可靠性,但是同时也增加了车辆间交换信息所需的资源开销.

因此,为了减少 VANET 中多跳广播产生的冗余数据,增加信息广播的实时性和可靠性,同时严格

控制算法的开销,本文提出了一种基于自适应认证重传机制的多跳广播路由算法(Adaptation and Certification Retransmission based Multi-hop Broadcast Algorithm, ACR-BA). 首先,为了降低竞争信道的碰撞概率,抑制传输数据的冗余,ACR-BA 算法基于地理位置信息划分了候选节点集,设计了两种短控制包 RTF/ATF (Request To Forward/Answer To Forward)及其认证机制,仅确定出唯一转发节点;然后,ACR-BA 算法设计了一种单位基准时隙的自适应机制,尽可能地减小退避等待时间,提高信息广播的实时性;最后,ACR-BA 算法又引入包超时重传机制,提高信息广播的可靠性.

2 ACR-BA 算法

首先,在讨论 ACR-BA 算法之前,先给出两个前提条件:

(1) 由于实际交通中车辆移动轨迹会受到实际道路结构的限制,故 VANET 中安全信息的传播对象重点考虑的是同向车道的后续车辆. 基于此,安全信息的多跳广播主要考虑在当前车辆节点运动方向的反方向上选择一个车辆节点作为中继转发节点,从而完成安全信息的单向快速广播.

(2) 汽车上普遍都装有 GPS 定位设备,可以随时获取车辆的地理位置信息.

考虑到安全信息传播对实时性和可靠性的要求,在 ACR-BA 算法中,为减少转发节点的数目,抑制广播风暴,提出了中继选择策略;为保证安全信息广播的及时性,提出了基于网络状态估计的单位基准时隙自适应机制;为保证安全信息广播的可靠性,提出了数据包重传保障机制. ACR-BA 算法流程如图 1 所示. 由图可知,ACR-BA 算法需要当前节点和其上一跳节点来共同协作完成. 图中竖直虚线表示各节点自己的生命周期,竖直虚线结束表示该节点周期结束. 向右实线表示上一跳节点发送给当前节点的信息,向左虚线表示当前节点反馈给上一跳节点的信息. 由图 1 可知,ACR-BA 算法中,唯一中继节点的选择及数据包的转发步骤主要有:

(1) 节点(图 1 中的上一跳节点)发送一个数据包,并设定数据包定时重传定时器.

(2) 一跳范围内的节点(图 1 中的当前节点)收到数据包后,判断如果是新包,则设置发送 RTF (Request To Forward)退避定时器. 当前节点中权限最高的节点,最先发送 RTF 包,并设置数据包自

动重传定时器.

(3) 一跳范围内其他设置了 RTF 退避定时器的节点在收到 RTF 包后将 RTF 退避时间定时器取消. 上一跳节点在收到 RTF 包后,如果找不到针对该 RTF 包曾有过发送 ATF (Answer To Forward)包的记录,则发送 ATF 包,并设定 ATF 重传定时器.

(4) 当前节点收到上一跳节点发送的 ATF 包后,与收到的 DATA 包及自身 ID 匹配,如果成功,则以广播方式转发第(2)步中收到的 DATA 包.

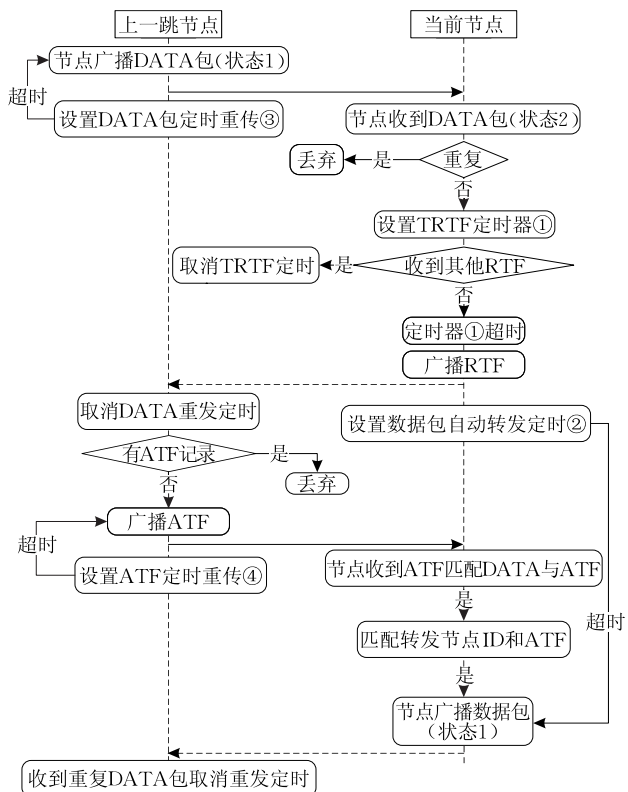


图 1 ACR-BA 算法流程图

ACR-BA 算法中,第(2)步和第(3)步通过 RTF 和 ATF 包进行两次握手,实现了 ACR-BA 算法中唯一中继转发节点的选择机制. 第(1)步和第(3)步两个重传定时器的设置实现了 ACR-BA 算法中数据包和 ATF 包的定时重传机制. ACR-BA 算法中的自适应机制则是根据网络负载状况来动态设置整个流程中各计时器的单位基准时隙来实现的.

2.1 唯一中继选择策略

一跳转发过程中,唯一中继转发节点的选择算法分两步实现.

(1) 候选节点集划分. 根据与上一跳节点间的距离,将一跳范围内的所有节点划分为不同候选节点集,每个节点集中节点的转发权限相同.

如图 2 所示,为了抑制转发节点个数,并充分适

应 VANET 的动态拓扑结构,基于地理位置划分了候选节点集:以广播节点(图中上一跳节点)为基准点将其通信覆盖半径 R 均匀地划分为 N_s 段,划分的路段按照由远及近依次命名(1, 2, 3, ..., N_s),且将与基准点的距离 d 作为加权值,为各路段设置等级 L .当广播节点通信范围内的其他节点收到广播包之后,如果该包是新的,则该节点根据式(1)计算出它的等级,这样,最远非空路段内的节点具有最高转发权限等级.当节点收到新的广播消息以后,转发权限越高的节点,发送 RTF 包之前的退避等待时间越短,退避等待时间 T_R 通过式(3)计算得出.显然,最远非空路段内的节点优先于其他节点参与到转发节点竞争环节当中.

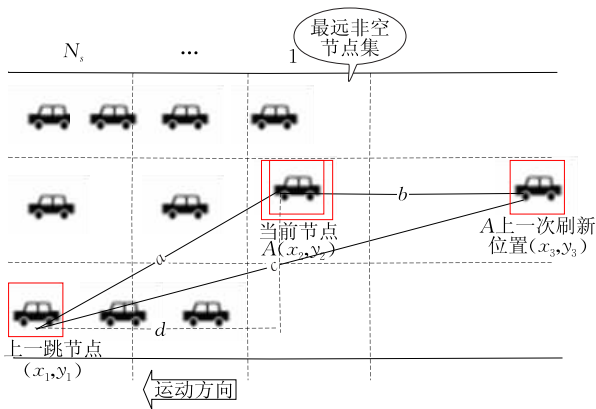


图2 ACR-BA 候选节点集

$$L = \left\lceil \frac{d \cdot N_s}{R} \right\rceil \quad (1)$$

$$d = -\frac{(a^2 + b^2 - c^2)}{2b} \quad (2)$$

$$T_R = (N_s - L) \cdot T_s \quad (3)$$

其中, T_s 是单位基准时隙(后文中 $T_{s,a}$ 和 $T_{s,s}$ 分别表示 ACR-BA 算法和 Slotted 1-persist 算法的单位基准时隙), d 是当前节点与上一跳转发节点的距离在道路方向上的映射,这样能保证在道路宽度相比于节点通信半径不能忽略的情况下,实现转发节点的最优选择.设由 GPS 获得的节点的坐标为 (x, y) ,每个节点存储当前坐标及上一次刷新的坐标值,则可定义距离

$$a = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4)$$

$$b = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2} \quad (5)$$

$$c = \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2} \quad (6)$$

(2) 唯一转发节点选择. 采用短控制包认证机制从候选节点集里确定唯一的转发节点.

为抑制候选节点数目,在确定了最高权限的候

选节点集后,还需要从该候选节点集的多个节点中选择唯一的中继转发节点.

首先,为了节省网络资源,提高算法的实时性,ACR-BA 算法设计了两种控制包 RTF/ATF. 控制包的长度远小于数据包的长度,可节省其传输时间.控制包和数据包格式如图 3 所示. 3 种包都包含 MAC 层包头、IP 包头,包类型、序列号和源节点 ID,其中 IP 包头里包含了本地节点 ID,包类型用于区分该包属于控制包还是数据包,序列号和源节点 ID 用于唯一标识一个包. RTF 包是转发请求包,该包还携带目的节点 ID 信息,用以指明数据包的上一跳节点 ID; ATF 是转发应答包,该包还携带转发节点 ID 信息,广播节点用此标志位来选择唯一的中继转发节点,收到该包的其他节点,如果转发节点 ID 与自身 ID 不匹配,则放弃转发权限的竞争;候选节点向上一跳节点发送转发请求包 RTF,收到 RTF 包后,上一跳节点发送 ATF 包,从而确定唯一转发节点.数据包中的安全等级用于区分信息属于安全信息还是非安全信息,还包含广播节点的位置信息及单位时隙和要发送的有效数据.

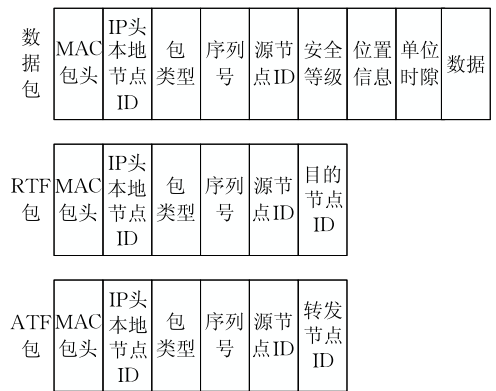


图3 控制包及数据包格式

2.2 自适应单位时隙设置

车载网络的特点决定了其网络负载会动态变化,为了保证安全信息传播的实时性,ACR-BA 算法设计了基于网络状态估计的单位时隙自适应机制,通过统计 MAC 层排队时延 D_q 和信道接入时延 D_a 来估计网络状态,并根据获得的排队时延和接入时延来动态调整单位基准时隙 T_s .

T_s 的选择原则是:确保只有候选节点集里的节点才能发送 RTF,且 T_s 应尽可能小,以减少等待时间,提高算法的实时性.

实际情况下, T_s 太小,会导致多个路段中的节点参与转发权限的竞争, T_s 太大,则会导致候选节点集中节点的退避等待时间过大,影响算法的实时

性. 因此, 设置 T_s 的最小值为平均竞争窗口的大小, 采用式(7)来计算 T_s .

$$T_s = \max\left(\frac{\omega_0}{2} \cdot \delta, D_q + D_a + D_R\right) \quad (7)$$

其中, ω_0 为最小竞争窗口, δ 为 802.11p 协议的单位时隙, D_R 表示 RTF 包的发送时间. 节点广播消息前将自己的 T_s 加入包头中(如图 3), 收到该数据包的所有节点都将统一的 T_s 来设置等待时间.

2.3 重传机制设计

ACR-BA 算法中, ATF 控制包和数据包都只有一个节点负责对其转发, 因此, 这两种包转发的成功率将直接影响算法的性能. 为了提高算法的可靠性, ACR-BA 算法针对这两种包分别设计了相应的重传保障机制.

(1) ATF 重传

候选节点收到 ATF 控制包之后, 对自身 ID 与包头中转发节点 ID 进行对比, 如果匹配, 则立即转发数据包, 否则放弃转发. 因此, 上一跳广播节点可以通过是否收到重复的数据包来判断它的 ATF 控制包是否发送成功. 上一跳广播节点从发送 ATF 包到收到重复数据包的时间间隔可以估算为

$$T_{RA} = T_s + \sigma_D \quad (8)$$

其中, σ_D 为估计的一跳传输时延值. 如果等待 T_{RA} 时间之后, 上一跳广播节点还没有收到重复的数据包, 那么则判定 ATF 包发送失败, 为了保证可靠性, 需要重传 ATF 包.

重传 1 次 ATF 包之后, 如果仍没有成功, 继续重传可能导致在重传过程中消耗过多的时间, 因此本文将 ATF 包的重传次数设定为 1. 然而, 如果不继续重传, 将会导致没有节点转发数据包, 进而导致数据包传播中断. 因此, ACR-BA 算法提出了候选节点超时转发数据包的机制, 用来保证转发的可靠性. 根据算法流程, 设定候选节点发送 RTF 包到其正常收到 ATF 包之间的最大时间间隔为 T_{AD} , 如式(9)所示. 候选节点在等待 T_{AD} 时间之后, 如果还没收到与 RTF 包相对应的 ATF 包, 则其将自动广播数据包.

$$T_{AD} = (N_s + 2) \cdot T_s - T_R + \sigma_D \quad (9)$$

(2) 数据包重传

节点在转发一个数据包之后, 如果收到发给自己的与该数据包对应的 RTF 包, 则判定该数据包转发成功; 如果在一定时间内没有收到 RTF 包, 则判定数据包转发失败. 可以将超时重传时间 T_{RD} 设置为从节点发送一个数据包到其收到与此数据包相对

应的 RTF 控制包所需要的最大时间间隔, 如式(10)所示. 如果数据包转发失败, 则重新发送该数据包.

$$T_{RD} = N_s \cdot T_s + \sigma_D \quad (10)$$

3 理论分析

本节将对 ACR-BA 算法、Slotted 1-persist 算法和 Mflood 算法的冗余数据量及一跳转发时延性能进行理论分析.

3.1 冗余数据量

定义冗余数据量为, 每广播 1 比特数据(有用信息), 实际在网络中产生的数据量(包含有用信息及与此相关的所有信息). 在此指一跳转发产生的冗余数据. 借鉴文献[16]中车辆分布的常用模型, 对冗余数据量进行了简单的建模分析. 首先, 假设道路上车辆节点间的距离服从参数为 λ 的指数分布, 则在长为 x 的路段上有 λx 个车辆节点, 不考虑碰撞概率, ACR-BA 算法只有候选节点发送 RTF 包, 且最终确定一个中继节点转发数据包. 则在信息广播的每一跳转发过程中, ACR-BA 算法的冗余数据量为

$$R_A = \left\{ \lambda \frac{R}{N_s} \cdot [P_R + h_R] + P_A + h_A + P_D + h_D \right\} / P_D \quad (11)$$

根据文献[12]可知 Slotted 1-persist 算法的冗余数据量为

$$R_S = \left\{ \lambda \frac{R}{N_s} \cdot [P_D + h_D] \right\} / P_D \quad (12)$$

传统洪泛算法(Mflood 算法)的冗余数据量为

$$R_M = \{ \lambda R \cdot [P_D + h_D] \} / P_D \quad (13)$$

其中, R 表示通信半径, P_A 、 P_R 和 P_D 分别表示 ATF 包、RTF 包和 DATA 包的原始包长, h_A 、 h_R 和 h_D 分别表示 ATF 包、RTF 包和 DATA 包的 MAC 包头长度. 显然, Slotted 1-persist 算法和 Mflood 算法的冗余数据量主要由 P_D 和 h_D 确定, 而 ACR-BA 算法的冗余数据量则主要由 P_A 和 P_R 确定. 又由于 P_D 远大于 P_A 和 P_R , h_D 远大于 h_A 和 h_R . 所以, ACR-BA 算法的冗余数据量最小.

3.2 一跳转发时延

定义一跳转发时延为, 从节点收到一个广播数据包到将其转发出去所耗时间. 一跳转发时延是算法实时性的衡量标准, 其值越小, 安全信息扩散得就越快, 整个算法的实时性就越好.

在此, 假设道路上车辆节点服从泊松分布, 则节点间的距离服从指数分布, 设指数分布参数为 λ , 则在长为 x 米的路段上, 有 k 个节点的概率为^[11]

$$P(k, x) = \frac{(\lambda x)^k}{k!} e^{-\lambda x} \quad (14)$$

划分的节点集路段按照由远及近依次命名,第 i ($1 \leq i \leq N_s$) 段为最远非空路段的概率为

$$P_i = \left(1 - p\left(0, \frac{R}{N_s}\right)\right) \cdot p^{i-1}\left(0, \frac{R}{N_s}\right) \quad (15)$$

在 ACR-BA 算法中,由于只有唯一的转发节点,故不用考虑碰撞概率,候选节点集里的节点从收到新数据包开始到将其转发出去的时延为

$$t_i = (i-1) \cdot T_{s_a} + \sigma_R + \sigma_A + \sigma_D \quad (16)$$

其中, T_{s_a} 表示 ACR-BA 算法的单位基准时隙, σ_R 、 σ_A 、 σ_D 分别表示发送 RTF、ATF 和 DATA 包所花费的时间. 显然, ACR-BA 算法中有 $\sigma_R \approx \sigma_A \approx T_{s_a}$, 其大小受网络负载的影响,且随着网络负载的增大而增大. t_i 的期望即为 ACR-BA 算法的平均一跳转发时延:

$$D_A = \sum_{i=1}^{N_s} p_i t_i \quad (17)$$

同理可得, Slotted 1-persist 算法的一跳转发时延为

$$D_S = \sum_{i=1}^{N_s} p_i s_i \quad (18)$$

$$s_i = (i-1) T_{s_s} + \omega + \sigma_D \quad (19)$$

其中, s_i 表示 Slotted 1-persist 算法中节点从收到新数据包开始到将其转发出去的时延, T_{s_s} 表示 Slotted 1-persist 算法的单位基准时隙, ω 表示 Slotted 1-persist 算法中的 WAITTIME.

在此,假设只有一个数据包需要发送,该数据包无排队时延,且参与转发权限竞争的节点是饱和负载,其总有数据包要发送,即满足文献[1]中所提的饱和负载下的 802.11 广播机制分析模型. 那么,此时 ACR-BA 算法中的 T_{s_a} 和 σ_D 可计算为

$$T_{s_a} = D_a + D_R \quad (20)$$

$$\sigma_D = D_a + D_D \quad (21)$$

$$D_a = \sum_{k=1} p_{k, \frac{R}{N_s}} \cdot \left[T(k+1, P_{ave}(k)) - \frac{P_{ave}(k)}{Rate} \right] \quad (22)$$

$$p_{ave}(k) = \frac{k \cdot p_R + p_A + p_D}{k+2} \quad (23)$$

其中, D_a 表示信道接入时延, D_R 和 D_D 分别表示 RTF 包和 DATA 包的发送时延. $k+1$ 表示在确定唯一转发节点的过程中,共有 k 个候选节点和一个广播节点参与. $p_{ave}(k)$ 为估计的平均包的大小, $Rate$ 表示信道速率. 根据文献[12]的计算模型, MAC 层广播包的时延为

$$T(k, P_{ave}(k)) = \frac{\omega_0 + 1}{2} \left[(1 - p_{tr})\sigma + p_{tr} p_s T_b + p_{tr} (1 - p_s) T_b \right] \quad (24)$$

其中, $\tau = \frac{2}{\omega_0 + 1}$ 表示一个节点有数据包要发送的概率, 而 $p_{tr} = 1 - (1 - \tau)^k$ 表示信道忙碌的概率, $p_s = k\tau(1 - \tau)^{k-1}$ 则表示一个节点成功发送数据包的概率, T_b 表示数据成功传输后信道被标记为忙碌状态的平均时间.

4 仿真结果分析

考虑到实际公路每条车道宽 3.5 m, 仿真场景采用了 1500 m × 20 m 的直道模型, 取 $N_s = 13$. 移动场景采用 VanetMobisim 模拟, 车辆密度设为 30 ~ 150 辆/1500 m, 初始位置随机产生, 其速度在 3 ~ 20 m/s 范围内变化. 车辆的通信半径设为 250 m, 底层采用 802.11p 协议, 设置的信道数据传输速率为 1 Mb/s, 车辆节点发送数据包的速率为 1 packet/s, 数据包大小为 256 ~ 1024 Bytes, 发包节点数为 1 ~ 11 个. 采用 NS-2 软件仿真 ACR-BA 算法、Mflood 算法及 Slotted 1-persist 算法. 首先, 对比分析了算法的冗余数据量和一跳转发时延的性能. 同时, 为了更加深入地评估算法的性能, 也对 ACR-BA 算法的转发节点比例和覆盖率性能进行了计算机仿真分析.

4.1 冗余数据量性能仿真分析

图 4 给出了车辆密度与冗余数据量关系的理论分析及仿真结果, 其中 (t) 表示理论结果, (s) 表示仿真结果. 图中, 有 2 个源节点发送数据包, 数据包大小为 512 Bytes. 由图可知, 仿真结果与理论结果基本相符. 与 Mflood 算法相比, Slotted 1-persist 算法和 ACR-BA 算法由于减少了参与数据转发的节点的数目, 这两种算法都能够很好地抑制网络中的冗余数据量. 随着车辆密度的增加, 3 种算法的冗余数据量虽然都有所增加, 但是, 相比于 Slotted 1-persist 算法和 Mflood 算法, ACR-BA 算法冗余数据量的增长趋势则缓慢得多. 这是因为随着车辆密度的增大, Mflood 算法和 Slotted 1-persist 算法中参与转发数据包的节点数目会增加, 而 ACR-BA 算法每次选择的转发节点都仅为一个, 其冗余数据量自然也相对平稳. 由图可知, 仿真结果比理论结果整体要略高一点, 这是因为实际仿真中存在传输失败引起的冗余数据量. Mflood 算法的仿真结果与理论结果相差较大, 这是因为: 理论分析中已假定车辆节点呈指数分布, 节点密度与场景内的总节点数成正比, Mflood 算法中冗余数据量与一跳范围内的节点数目成正

比,故其理论结果呈线性;而通过 vanetmobisim 产生的场景,节点分布相对集中,并不是均匀覆盖整个场景,这样就导致了一跳范围内的节点密度可能比整个场景中节点的平均密度要大,所以实际仿真中 Mflood 算法的冗余数据量要比理论结果大一些.

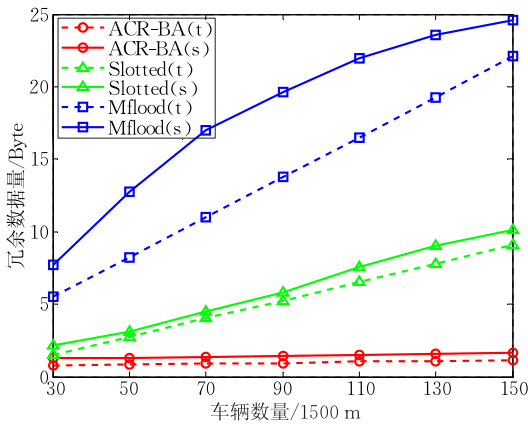


图 4 冗余数据量和车辆密度关系图

4.2 一跳转发时延性能仿真分析

图 5 给出了一跳转发时延性能与节点密度关系的理论分析与仿真结果,其中只有 1 个源节点发送数据包.由图可知,仿真结果与理论分析基本相符.两种算法的一跳转发时延都会随着节点密度的增大而增长. ACR-BA 算法的一跳转发时延始终优于 Slotted 1-persist 算法,这是因为, ACR-BA 算法引入了短控制包 RTF 和 ATF,包长很小,其传输时延就比数据包小得多;此外, ACR-BA 算法的短控制包转发确认机制也等效降低了网络数据包大小的平均值.根据文献[12]对 802.11MAC 层时延的分析可知,要发送的数据包平均大小越小,MAC 层的接入时延就越小.所以,与 Slotted 1-persist 算法相比, ACR-BA 算法的平均一跳转发时延更小.由图可知,不同节点密度下,两种算法的理论结果都比仿真

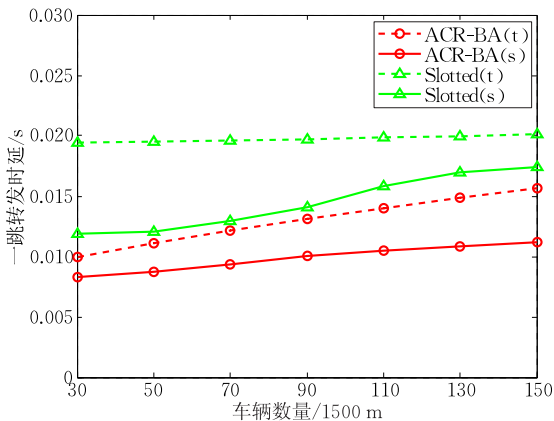


图 5 一跳转发时延与节点密度

结果大,这是因为实际仿真中,参与转发竞争的节点本身并不产生数据包,而理论分析中,假定每个参与转发竞争的节点都有数据包要发送,理论分析的网络负载比实际仿真中的网络负载要高.因此,理论结果会比仿真结果要偏大一些.

图 6 是在不同的发包源节点个数的场景下,对 3 种算法进行仿真的结果,该结果主要表征网络业务负载对一跳转发时延的影响.由图可知,随着负载的增大, Mflood 和 Slotted 1-persist 两种算法的转发时延会越来越大, ACR-BA 算法则始终表现出较好的性能优势,几乎不变,这说明在任何网络负载下, ACR-BA 算法都能很好地抑制广播风暴,从而保证较高的信息扩散速度.

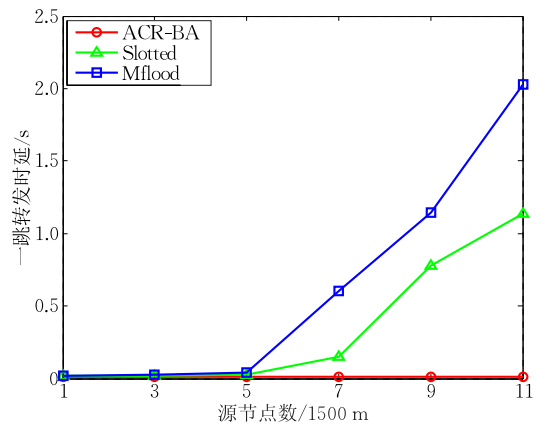


图 6 一跳转发时延与源节点数

图 7 是对 3 种算法在不同数据包大小情景下进行的仿真结果,主要分析数据包大小对一跳转发时延的影响.其中源节点个数为 1,车辆密度为 30 辆/1500 m.由图可知,随着数据包的增大,3 种算法的一跳转发时延会越来越大,因为数据包越大,排队时延及接入时延都会增大,数据包的发送时延也会略有增大,因此,一跳时延也会增大.

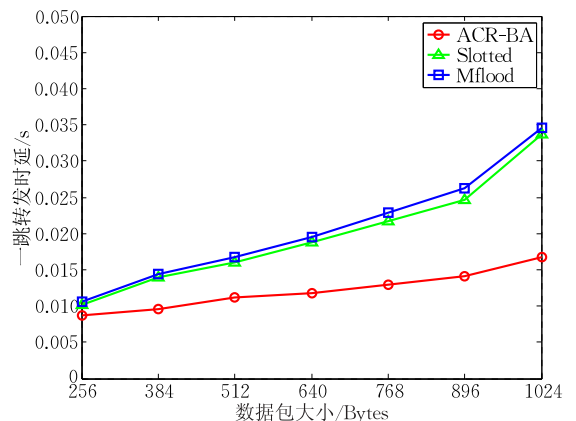


图 7 一跳转发时延与数据包大小

4.3 转发节点比例性能仿真分析

转发节点比例定义为:一跳范围内,收到上一跳节点广播的数据包后,转发数据包的节点数目与所有收到数据包节点数目的比值.转发节点比例值越大,则参与转发的节点数就越多.在网络负载低的情况下,转发节点比例值越大,广播算法的可靠性越好,但是会增加网络的开销.在网络负载高的情况下,转发节点比例值过大,可能会加剧网络拥塞,使信息的广播受阻,降低算法的可靠性并增加时延.因此,转发节点比例是分析广播路由算法的重要衡量指标之一.

图 8 对比了 ACR-BA、Slotted 1-persist 和 Mflood 算法的转发节点比例. ACR-BA 和 Slotted 1-persist 算法采用划分优先级的方式减小了转发节点的个数, ACR-BA 算法更是通过 RTF 和 ATF 包的握手机制,确定了唯一的转发节点.而 Mflood 算法中则是所有收到数据包的节点都参与转发,所以转发比例值恒为 1.随着车辆节点密度增加, Slotted 1-persist 算法和 ACR-BA 算法中,转发节点比例值都有所下降,且 ACR-BA 算法的转发节点比例下降更快.因为随着节点密度的增加,两种算法中的权限最高的候选节点集中的点也相应增加, Slotted 1-persist 算法中相当于节点转发比例值中分子和分母同时增加,但是分母的增加速度高于分子的增加速度,导致整个比值降低. ACR-BA 算法中,由于每一跳只选择唯一转发节点,相当于比值中分子不增加,分母增加,因此比值下降速度更快.

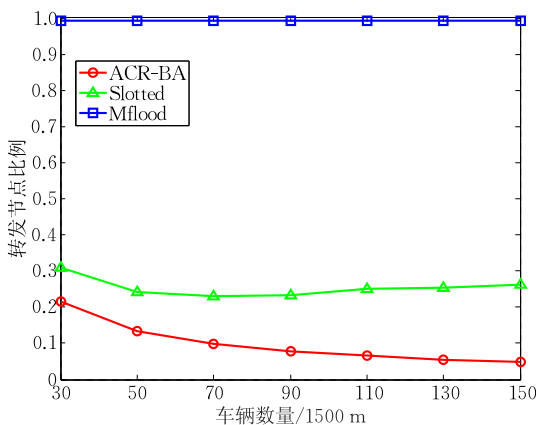


图 8 转发节点比例与车辆密度关系图

4.4 覆盖率性能仿真分析

定义覆盖率为车联网中成功接收到广播信息的车辆节点数与总的车辆节点数的比值,该比值表征广播算法的可靠性,该值越大表明广播路由越可靠,

越适用于安全信息的多跳广播.

图 9 是覆盖率与节点密度的仿真结果图,其中数据包大小为 500 Bytes/packet,发包速率为 1 packet/s,源节点数目为 1.如图所示,当节点密度较低时,3 种算法的覆盖率都较低,这是因为当节点密度较低时,车联网的连通性较低;当车辆节点密度增大时,3 种算法的覆盖率性能都有所提高,这是因为节点密度的增加增强了网络的连通性.3 种算法中, Slotted 1-persist 算法的覆盖率最低,这是因为 Slotted 1-persist 算法为了抑制广播风暴,限制了转发节点的数目而又没有转发确认及重传机制.而 ACR-BA 算法加入了转发确认及重传机制,在限制转发节点数目的同时,保证了转发的可靠性,因而 ACR-BA 算法的覆盖率在相同情况下是最高的,特别是当节点密度较大时,其覆盖率很快接近为 100%.

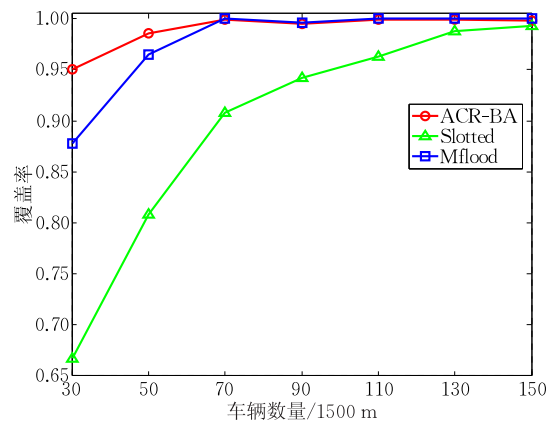


图 9 覆盖率与节点密度的关系图

图 10 是覆盖率与源节点数的仿真结果,衡量网络负载与覆盖率的关系.其中车辆节点密度为 130 辆/1500 m,数据包大小为 512 Byte.由图可知,随着发包源节点数的增加,3 种算法的覆盖率都逐渐下降.因为发包源节点数越多,网络负载越大,包

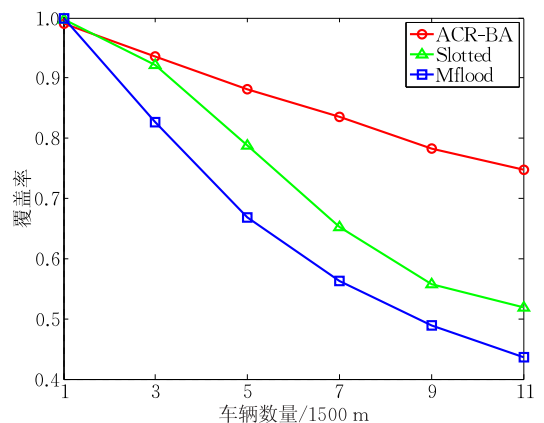


图 10 覆盖率与源节点数的关系图

发生碰撞的概率越大,覆盖率越低.由图可知,与 Mflood 和 Slotted 1-persist 算法相比,ACR-BA 算法的覆盖率的下降趋势较缓和.这是因为 ACR-BA 算法在每一跳只选择唯一的转发节点,严格控制了网络负载的增长,其增长趋势平缓.由此也可得出,网络负载的增大导致覆盖率的降低.

5 结 语

针对安全业务信息,本文提出了一种面向 VANET 的自适应认证转发的多跳广播路由算法.在划分候选节点集的同时引入了 RTF-ATF 短控制包的转发节点确认机制,有效地抑制了转发节点个数,减小了算法的数据冗余量;采用基于网络状态估计的单位基准时隙自适应机制有效地降低了节点转发等待时间,提高了实时性.此外,算法还提出了数据包重传机制提高了信息传播的可靠性和网络覆盖率.因此,ACR-BA 算法在实时性和可靠性方面均有较大提高,能够适用于紧急安全消息的多跳广播.

综上所述,本文所提 ACR-BA 算法在直道场景下覆盖率和一跳时延等性能良好,可作为高速公路场景下 VANET 网络安全信息广播的路由算法.尤其是在高速公路上出现交通事故等紧急状况时,若以事故车辆作为源节点,使用本文所提的 ACR-BA 算法进行安全信息广播时,其后续车辆将会在第一时间收到,并及时采取相应的制动措施,从而可以有效避免连环相撞等类似事故的发生.此外,ACR-BA 算法也可为进一步研究 VANET 中安全信息的广播路由算法提供参考.

参 考 文 献

- [1] Ma Xiao-Min, Chen Xian-Bo. Performance analysis of IEEE 802.11 broadcast scheme in ad hoc wireless lans. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(6): 3757-3768
- [2] Chang Cu-Yu, Xiang Yong, Shi Mei-Lin. Development and status of vehicular ad hoc networks. *Journal on Communications*, 2007, 28(11): 116-126(in Chinese)
(常促宇, 向勇, 史美林. 车载自组织网络的现状与发展. *通信学报*, 2007, 28(11): 116-126)
- [3] Chen Li-Jia, Jiang Hao, Wu Jing, et al. Research on transmission control on vehicle ad-hoc network. *Journal of Software*, 2007, 18(6): 1477-1490(in Chinese)
(陈立家, 江昊, 吴静等. 车用自组织网络传输控制研究. *软件学报*, 2007, 18(6): 1477-1490)
- [4] Bononi L, Di Felice M. A cross layered MAC and clustering scheme for efficient broadcast in vanets//*Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems*. Pisa, Italy, 2007: 1-8
- [5] Su Hang, Zhang Xi, Chen Hsiao-Hwa. WSN12-6; Cluster-based DSRC architecture for qos provisioning over vehicle ad hoc networks//*Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*. San Francisco, USA, 2006: 1-5
- [6] Fan Peng, Haran J, Dillenburg J, Nelson P C. Traffic model for clustering algorithms in vehicular ad hoc networks//*Proceedings of the IEEE Consumer Communications and Networking Conference*. Las Vegas, USA, 2006: 168-172
- [7] Little T D C, Agarwal A. An information propagation scheme for vanets//*Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems*. Vienna, Austria, 2005: 155-160
- [8] Haas Z J, Halpern J Y, Li Li. Gossip-based ad hoc routing//*Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. New York, USA, 2002: 1707-1706
- [9] Alshaer H, Horlait E. An optimized adaptive broadcast scheme for inter-vehicle communication//*Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*. Stockholm, Sweden, 2005: 2840-2844
- [10] Fukuhara T, Warabino T, Ohseki T, et al. Broadcast methods for inter-vehicle communications system//*Proceedings of the IEEE Wireless and Communications and Networking Conference*. New Orleans, USA, 2005: 2252-2257
- [11] Yang J, Kim B, Sun M T. Location-aided broadcast in wireless ad hoc networks. *Journal of Information Science and Engineering*, 2007, 23(3): 871-886
- [12] Wisitpongphan N, Tonguz O K, Parikh J S, et al. Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks. *IEEE Wireless Communication*, 2007, 14(6): 84-94
- [13] Yang Qiong, Shen Lian-Feng. A multi-hop broadcast scheme for propagation of emergency messages in vanet//*Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT)*. Nanjing, China, 2010: 1072-1075
- [14] Slavik M, Mahgoub I. Spatial distribution and channel quality adaptive protocol for multihop wireless broadcast Routing in vanet. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(4): 722-734
- [15] Lai Peiyuan, Wang Xinhong, Lu Ning, et al. A reliable broadcast routing scheme based on mobility prediction for vanet //*Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Xi'an, China, 2009: 1083-1087
- [16] Frachia R, Meo M. Analysis and design of warning delivery service in inter vehicular networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(7): 832-845



LUO Tao, born in 1971, Ph. D. , professor, Ph.D. supervisor. His research interests include mobile communication, cognitive radio networks and WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment).

LI Jun-Tao, born in 1989, M. S. candidate. His research interests include mobile communication and WAVE.

LIU Rui-Na, born in 1987, M. S. Her research interest is WAVE.

DING Lei, born in 1990, M. S. candidate. His research interest is mobile communication.

LI Jian-Feng, born in 1960, professor. His research interest is high-data rate information network.

Background

To ensure traffic safety in vehicle ad hoc networks (VANET), we need to broadcast safety related information timely and reliably. This paper focus on improving the reliability and real-time of safety related information transmission in VANET. We study on a safe and reliable broadcast routing algorithm. Currently, there are many broadcast routing algorithms in VANET. Some of them have a lot of overhead, which results in large delay, while some of them are lack of safety assurance mechanism.

This paper proposes a real-time and reliable broadcast routing algorithm for safety related information, which can guarantee the promptness and reliability of broadcasting. The algorithm reduces the amount of data redundancy by reducing the number of forward nodes, reduces the one-hop forward delay with a unit slot adaptive mechanism. Additionally, this paper introduces a retransmission mechanism to improve the reliability of information dissemination. The results show

that, performances in real-time and reliability of the proposed ACR-BA algorithm are better than that of the traditional Mflood and Slotted 1-persist algorithm.

In the environment of straight high way, the proposed algorithm can be applied as a multi-hop broadcast algorithm for emergency safety message in VANET. And this paper can also be a reference for further study in VANET safety information broadcast routing algorithm.

This work is supported in part by the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 61271184, the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-11-0594), the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China under Grant No. 2013AA013301 and the Open Fund of the Key Laboratory of Advanced Information Science and Network Technology of Beijing (XDXX1309).