

一种基于虚拟目的节点的 VANET 可靠单跳广播机制

张旭东, 姚卫红*, 方仁孝

(大连理工大学 计算机科学与技术学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在车载自组网(VANET)中,单跳广播通常是紧急警告消息传播的基本机制.针对传统 IEEE 802.11 单跳广播存在的不可靠性问题,提出了一种基于虚拟目的节点的可靠单跳广播机制 VDB-ROBS:广播节点对实时接收的数据帧进行统计分析,从邻居节点中选择一个合适的节点作为虚拟目的节点,然后广播节点将与这个虚拟目的节点进行单播传输,同时其他邻居节点仍然将单播帧视作传统的广播帧接收.这种机制使得广播传输能够利用单播中的 RTS/CTS、ACK、重传和竞争窗口调整等多种修复和自适应机制,有效地提高了单跳广播的可靠性.仿真结果表明,VDB-ROBS 相比传统的 IEEE 802.11 单跳广播机制和基于概率的可靠单跳广播机制,能够提供更可靠的单跳广播通信性能.

关键词: 车载自组网;单跳;广播;虚拟目的节点

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi:10.7511/dllgxb201504013

0 引言

根据世界卫生组织近年来统计,道路交通事故每年会导致全世界约 120 万人失去生命,伤害的人数高达 5 000 万,如果不采取有效措施,2020 年道路交通事故将会成为世界第三大死亡原因(http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/road_traffic/world_report/en/).车载自组网^[1](vehicular ad hoc network,简称 VANET)研究的正是这个严峻的问题,目的是通过车载移动环境下的短程无线通信技术,实现车车之间、车路之间的信息交流与协作,提供行车安全、信息娱乐以及提高交通管理效率等多种交通应用服务.车载环境下的单跳信息广播机制是保证车辆行驶中人员安全的关键.周期性的信标消息广播能够帮助车辆节点相互感知,使得车辆节点间相互协作.此外,突发性的紧急消息和安全单跳广播能够帮助故障车辆有效地提醒周围邻居节点,从而避免发生更加严重的二次事故.

然而,VANET 单跳广播存在着严重的可靠性问题,难以保证邻居节点都能成功接收到广播

节点所广播的 MAC 帧.首先,传统的广播机制中接收到广播帧的所有邻居节点不会返回 ACK 确认帧,因而广播节点不可能多次重传丢失的帧;其次,由于面向缓解隐藏终端问题的 RTS/CTS 机制也不适用于广播,因此广播节点不能够预约无线信道,广播帧很可能会被隐藏节点所干扰;最后,由于帧不能多次重传,传统的最小竞争窗口也将不能动态指数地自适应增长,因此造成竞争窗口随机取值较小,使得信道拥塞环境下的碰撞概率较高.IEEE 组织在传统的 IEEE 802.11 标准基础上修订了新的版本——IEEE 802.11p^[2],其目的是在高速移动环境下仍然能够提供高效的无线信道接入服务,是目前国际上最为认可的车载专用短程通信标准.但是,IEEE 802.11p 标准中的广播机制并没有得到进一步修订和加强,因此仍然会存在和 IEEE 802.11 一样的问题.此外相比无线传感网和移动自组网,VANET 中车辆高速移动和交通环境复杂多变使得网络拓扑结构非均匀分布,随时间和空间呈现不同的密度变化,进一步影响到无线通信的性能.Schmidt 等^[3]发现

当出现交通拥挤的状况时,可靠广播的传输范围会因为其他节点的干扰而下降 90%. Torrent-Moreno 等^[4]也通过仿真实验验证了当信道吞吐量饱和时,100 m 处的广播成功接收率只有 20%. 因此,VANET 单跳广播通信仍然存在诸多挑战和不足.

1 相关工作

目前已经有许多研究者提出了不同的方法来改善 VANET 单跳广播的通信性能. 通常,有效的方法是多次广播 MAC 帧^[5-6],即发送端或者邻居节点根据不同的自适应机制广播一定数量的帧副本来确保邻居节点都能接收到原来的广播帧. Ma 等^[7]提出了面向接收端重复机制 ROR(receiver-oriented repetition),通过最远的接收者来广播一定数量的帧,确保了发送端的邻居节点可以通过多途径接收到原来的广播帧,避免了面向发送端重复机制中发送端可能出现连接暂时断开的状况. Wisitpongphan 等^[8]、Tonguz 等^[9]提出了 3 种基于概率和定时器的再广播机制,可以减小广播风暴问题. 在加权 p -坚持机制中,当邻居节点接收到发送端的广播帧,会在固定时间 W 内等待广播帧的副本,一旦超时则以 p 的概率再次广播接收到的帧. 概率 p 的计算公式为 $p_{ij} = d_{ij}/r$,其中 d_{ij} 是发送节点 i 与其邻居节点 j 的距离, r 是发送节点 i 的传输范围. 在时隙 1-坚持机制中,邻居节点会动态选择不同的时隙 $S_{ij} = N_s(1 - d_{ij}/r)$,其中 N_s 是最多时隙时间,如果在 S_{ij} 等待时间内没有接收到帧副本立即以 1 的概率再次广播 MAC 帧. 在时隙 p -坚持机制中,邻居节点将以 p 的概率再次广播 MAC 帧,而发送节点如果在固定等待时间内没有接收到帧副本则以 1 的概率重复广播 MAC 帧. 针对当前的广播机制只能应用于高速公路或城市等单一移动场景的问题,Ros 等^[10]提出了 AckPBSM 协议,结合连通支配集合 CDS 和邻居评估机制 NES 两种技术,车辆节点通过信标帧携带了最近接收到广播帧的标识信息,从而实现对广播帧的确认和重传,并且该协议可以适用于车载环境下的各种移动场景. Balan 等^[11]提出了一种密集情况下易碰撞问题的解决方案. 基于最近接收帧的统计,通过和一个固定阈

值比较来判定当前网络是否处于拥塞状态,然后动态地调整竞争窗口的大小,改善了广播的性能. 然而,在不同的节点密度下如何选择合适的阈值以及如何调整合适的竞争窗口大小则是关键问题.

2 基于虚拟目的节点的可靠单跳广播

本文设计了一种基于虚拟目的节点的可靠单跳广播机制——VDB-ROBS,广播源节点通过对接收到的广播帧进行统计分析,从周围邻居节点中选择一个合适的节点(通常是最远邻居节点)作为广播源节点的虚拟目的节点,从而间接应用 RTS/CTS、ACK、重传和竞争窗口调整等多种恢复和自适应机制,以期提高单跳广播的通信性能. VDB-ROBS 算法如下:

```

1 Initialize;
2   Neighs = the neighbor node set of current node;
3   VD = BROADCAST_ADDRESS;
4   Dest = the value of the destination field in MAC headers;
5   Bssid = the value of BSSID field in MAC headers;

6 Receive Beacon;
7   Get  $i$  (Address, Location, Timestamp, ...) from Beacon;
8   if  $i \in Neighs$  then
9     Update the information of node  $i$  in Neighs;
10  else
11    Neighs = Neighs  $\cup \{i\}$ ;
12  end if
13  Refresh Neighs;
14  Find the farthest neighbor node  $N$  of current node;
15  VD =  $N$ ;

16 Receive Event;
17  Parse Dest and Bssid from the MAC header of Event message;
18  if Dest  $\neq$  BROADCAST_ADDRESS then
19    Discard the packet;
20  else if Bssid == BROADCAST_ADDRESS then
21    Delivery the packet to the higher layer;
22  else if Bssid  $\neq$  CURRENT_ADDRESS then
23    Delivery the packet to the higher layer;
```

```
24 else
25     Delivery the packet to the higher layer;
26     Return an ACK to the source broadcasting node;
27 end if

28 Reliable Broadcast:
29 Get an Event message from the higher layer for
    broadcasting;
30 Dest=BROADCAST_ADDRESS;
31 Bssid=VD;
32 Construct MAC frame with (Src, Dest, Bssid,
    Event);
33 Transmit the MAC frame as it is unicast to VD;
34 Wait for ACK from VD;
35 Retransmission if timer is expired;
```

2.1 邻居节点跟踪

如图 1 所示,假设车辆都配置了 GPS 或类似的定位设备,可以实时获取自身的地理位置信息,同时车辆本身也能够通过车内传感器获取自身的状态信息,如车速、行驶方向等,此外车辆将以固定频率(通常是 10 Hz)实时广播包含上述信息的 Beacon 信息.当车辆节点接收到邻居节点广播的 Beacon 信息后,将更新当前节点内部的邻居节点集合 *Neighs*,因此 *Neighs* 中包含的是最新的邻居节点状态信息.

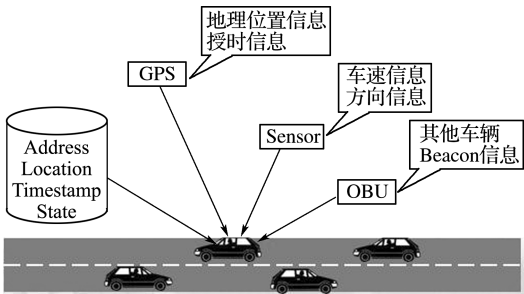


图 1 邻居节点跟踪
Fig. 1 Neighbor node tracking

2.2 确定最远邻居节点

确定一个节点的最远邻居节点通常有两种方式:第一种是基于接收端的,即最远的接收节点在收到 MAC 帧后立即以最小的延迟或最大的概率返回一个确认信息,同时取消其他邻居节点返回 ACK 的机会;第二种则是基于发送端的,即发送

节点从内部保存的邻居节点信息中通过一定的计算选择出与自身位置相隔最远的邻居节点.第一种方式能够实时选取当前通信范围内的最远邻居节点,但是有可能存在几个最远邻居节点同时返回确认信息,而造成碰撞丢失的现象;第二种方式则有可能会选择过时的最远邻居节点,即由于所保存邻居节点信息的过时使得计算得到的结果与当前实际最远邻居节点不一致,但是通常不会消耗额外的信道资源开销,而且通信延迟相对较小.这里 VDB-ROBS 不局限于其中的任何一种方式,但是本文基于以下考虑默认采用第二种方式.

广播帧丢失原因主要有两种:一是隐藏终端和同时传输引起了同一时刻无线信道中存在多个帧被传输,因而接收端的干扰能量较强,使得信号无法解析而造成帧丢失现象,这通常是密集交通环境下引起丢包的主要原因;二是 PHY 层的路径损耗和信道衰减引起了接收端的信号能量较弱,同样使得信号无法解析而造成帧丢失现象,这通常是稀疏交通环境下引起丢包的主要原因.通过对这两种丢包原因的进一步分析,可以发现第一种丢包因素会影响到通信范围内的所有或多数邻居节点,第二种丢包因素往往只影响到远距离的邻居节点.因而邻居节点接收不到 MAC 帧的概率是随着节点间距离的增加而增加的.本文选择最远邻居节点作为虚拟目的节点的意义在于:如果能够保证最远邻居节点成功接收到广播帧,那么广播节点和最远邻居节点之间的其他邻居节点都能以较大的概率接收到广播帧,从而可以有效地提高单跳广播的可靠性.

2.3 可靠广播

如图 2 所示,当上层应用需要广播一个紧急消息 Event 时,可靠 MAC 层首先构造一个 MAC 帧,帧头部的源节点域设置成当前节点的 MAC 地址,目的节点域设置成广播地址,而 BSSID 域设置成虚拟目的节点的 MAC 地址,然后将 MAC 帧传递给 PHY 层,并且启动定时器等待虚拟目的节点的 ACK 帧,一旦定时器超时则立即重传 MAC 帧.周围邻居节点的 MAC 层接收到帧后,会分析帧头部中 BSSID 域的值来确定自身是否是虚拟目的节点,如果不是,当前接收节点将会把该帧视作广播帧而直接将帧数据交付给上层;如

果是,当前接收节点将会把该帧视作单播帧,因此需要给源节点返回 ACK 确认帧,然后再将帧数据交付给上层. 因此,通过 BSSID 域所携带的虚拟目的节点地址,实现了广播源节点和虚拟目的节点的单播传输,以及和其他邻居节点的广播传输的一种混合式广播方式.

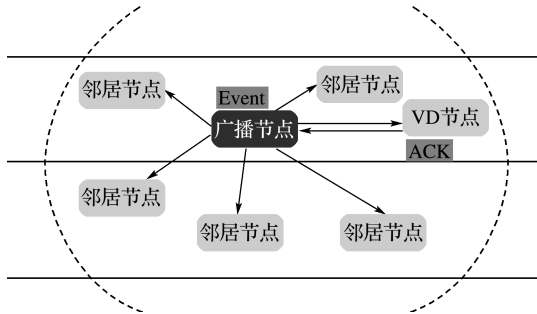


图 2 可靠广播
Fig. 2 Reliable broadcast

2.4 RTS/CTS 机制

VDB-ROBS 可采用 RTS/CTS 机制来缓解广播的隐藏终端问题. 首先,广播源节点构建 RTS 控制帧,其中目的节点域设置 VD 节点的 MAC 地址;VD 节点接收到 RTS 帧后则立即返回 CTS 控制帧,然后广播源节点再开始可靠广播 MAC 帧;而其他非 VD 邻居节点接收到 RTS 或 CTS 帧时则等待一段时间再开始竞争信道资源. 在密集交通环境下,通过少量的 RTS/CTS 通信负载,可以确保广播 MAC 帧时邻居节点和非传输范围内的干扰节点能够处于非发送状态,从而减少了 MAC 帧被碰撞的概率,进一步提高了单跳广播的可靠性.

3 仿真实验及分析

3.1 仿真场景

为了验证所提出机制的合理性和正确性,本文采用了 NS3 网络仿真器和 SUMO 交通仿真器建立了高速公路 VANET 通信场景,分析评估了不同的车辆密度下 VDB-ROBS 机制的性能. 首先,利用 SUMO 交通仿真器模拟出 4 排道 1 km 单向行驶的高速公路,平均车辆移动速度为 60 km/h,车辆节点的数量为 20~200. SUMO 产生的车辆移动轨迹数据将导入并转化成 NS3 中的

移动模型. 其次,利用 NS3 模拟无线通信设备,实现紧急消息的发送和接收过程. 应用层是恒定速率数据流 CBR 模型,应用数据包发送的频率为 10 Hz,数据包的长度为 512 B. 应用层的数据包不会交付给 Internet 协议栈模型,而是直接交付给 MAC 层,即通过无线仿真设备直接广播发送. 这是因为通常假设 VANET 中传统的 TCP/IP 模型不适用于高速的车载移动环境. MAC 层传输功率 P 分别为 10、20 和 30 dBm,数据速率为固定的 6 Mbps. PHY 层的信道模型是双径衰减模型. 其他的无线仿真参数如表 1 所示. 本文实验的仿真场景运行时间是 20 s,每次仿真场景都进行 20 次实验,每次实验结果是不同节点密度和不同传输功率下的无线网络通信性能,最终仿真结果是取这 20 次实验结果的平均值.

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数名称	参数值
信道频率	5.9 GHz
信道带宽	10 MHz
数据速率	6 Mbps
DIFS	64 μ s
SIFS	32 μ s
SLOT	16 μ s
PLCP	40 μ s
前导信号信头	8 μ s
$W_{\min}$	15
$W_{\max}$	1 023

3.2 性能指标

在车载移动环境下,单跳广播用于紧急和预警状况,因此数据传输的可靠性和实效性是至关重要的. 本文将分析数据包交付率 (packet delivery ratio, D)、数据包接收率 (packet reception ratio, R)、数据包平均延迟 (packet average delay, T) 和网络系统吞吐量 (network system throughput, S) 4 项指标.

3.3 参照机制

为了验证 VDB-ROBS 的通信性能,本文将与两种广播机制进行对比. 第一种是传统的 IEEE 802.11p 广播机制 (pure broadcast, 简称 PB),这种机制没有确认、重传和再广播等任何可靠性增

强机制. 第二种是基于概率的可靠广播机制, 选择的是加权 p -坚持机制 (weighted p -persistence broadcast, 简称 WPPB), 通过最远邻居节点再广播和广播源节点重传机制提高广播的可靠性. 本文提出的基于虚拟目的节点的可靠单跳广播机制 VDB-ROBS, 可以进行 ACK、重传和竞争窗口自适应调整, 但是默认不开启 RTS/CTS 握手机制.

3.4 仿真结果及分析

如图 3、4 所示, 随着节点的变化和传输范围的变化, VDB-ROBS 的纵坐标 D 和 R 优于传统的无线单跳广播机制 PB 和 WPPB. 在 3 种不同传输功率下, 与 PB 机制相比, VDB-ROBS 的 D 平均分别提高 87%、102% 和 97%, R 平均分别提高 22%、50% 和 18%, 所以 VDB-ROBS 具有更加可靠的广播性能. 在稀疏环境下, VDB-ROBS 的广播成功概率明显优于其他两种机制, D 和 R 都高达 90% 以上. 在密集环境下, 虽然 3 种机制的广播可靠性都相应地下降, 但是 VDB-ROBS 仍然具有很好的可靠性.

如图 5 所示, WPPB 和 VDB-ROBS 的平均延迟明显大于 PB 机制. 通过分析可以发现: (1) PB 机制的延迟主要是由排队、竞争退避和帧传输引起的; (2) WPPB 机制在 PB 机制延迟的基础上增加了再广播和重传过程引起的延迟; (3) VDB-ROBS 机制在 PB 机制延迟的基础上增加了 ACK、重传和竞争窗口指数增长引起的延迟. 这些可靠性增强机制会带来一定的交互过程, 因此会进一步增加通信延迟.

如图 6 所示, VDB-ROBS 机制的网络系统吞吐量明显优于其他两种机制. 此外可以发现无论采用哪种广播机制, 网络系统吞吐量都呈现先增长再降低的过程. 这是因为在稀疏环境下的节点增长会带来成功广播帧的数量, 而在密集环境下的节点增长则只会带来对无线信道的干扰, 反而降低了成功广播帧的数量. 因此只有在节点分布较适中的情况下, 网络系统吞吐量才能达到较优的结果.

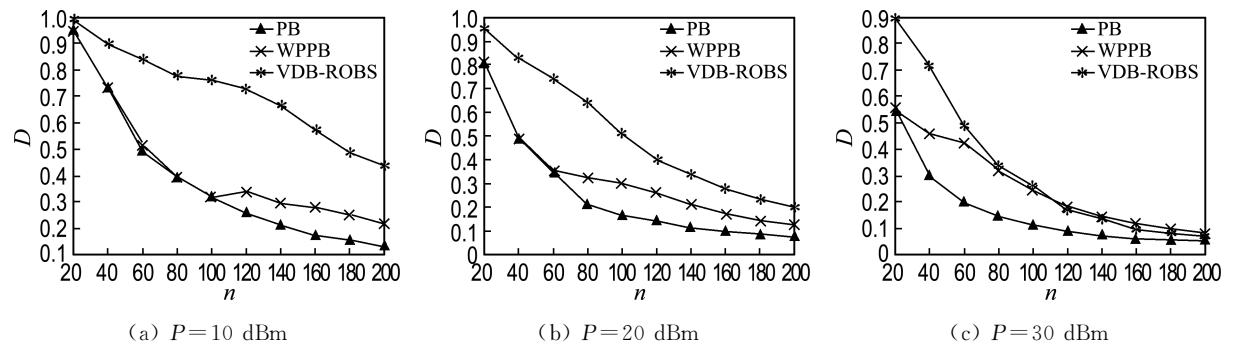


图 3 不同节点密度和传输功率下的数据包交付率

Fig. 3 The packet delivery ratio under different node density and transmission power

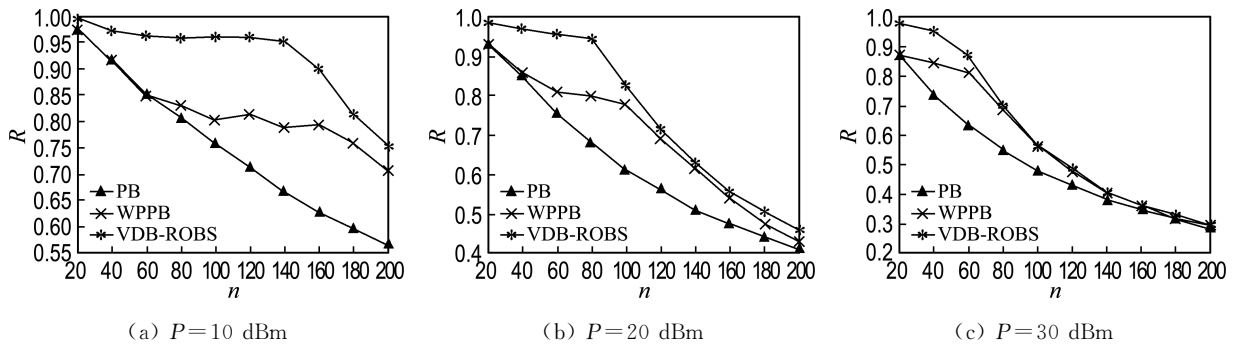


图 4 不同节点密度和传输功率下的数据包接收率

Fig. 4 The packet reception ratio under different node density and transmission power

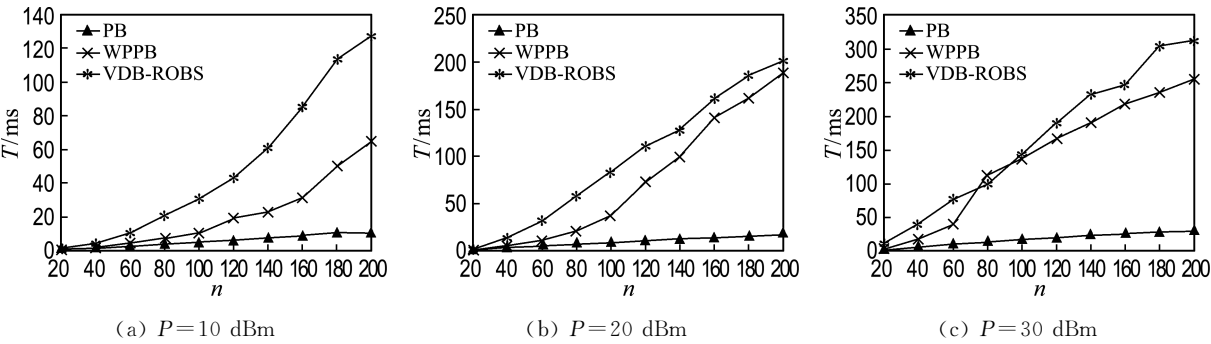


图 5 不同节点密度和传输功率下的数据包平均延迟

Fig. 5 The packet average delay under different node density and transmission power

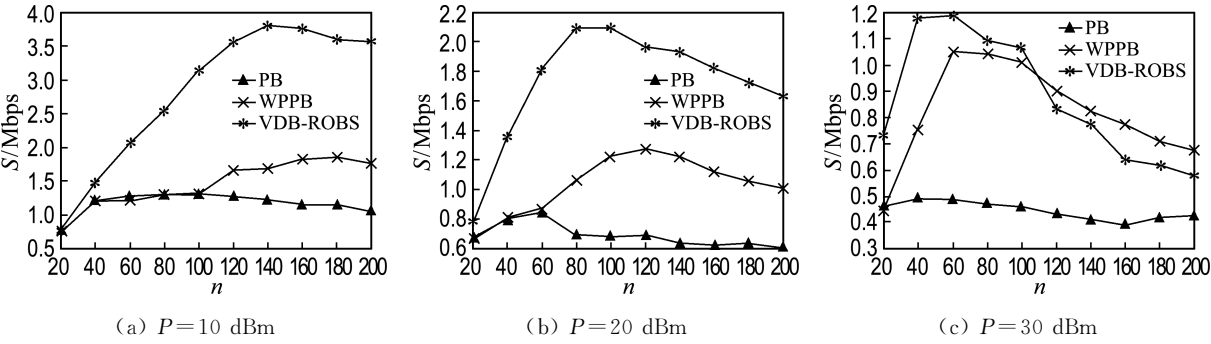


图 6 不同节点密度和传输功率下的网络系统吞吐量

Fig. 6 The network system throughput under different node density and transmission power

4 结 语

本文提出的 VDB-ROBS 机制通过保证最远邻居节点能够以较高的概率成功接收广播帧,并间接增加了其他邻居节点接收到广播帧的成功率,从而提高了单跳广播的可靠性. 仿真结果验证了在不同密度和传输功率下,VDB-ROBS 明显优于传统的 IEEE 802. 11p 广播和基于概率的单跳可靠广播. 此外,VDB-ROBS 还具有较好的扩展性和兼容性,不会直接影响到当前标准的工作机制.

可靠性增强需要一定的交互管理过程,因而容易造成一定的通信延迟. 而对于车载环境下的紧急消息广播,数据包的实效性也是至关重要的. 因此,在较高的可靠性能下如何保证通信延迟仍然能够满足紧急消息的通信需求将需要进一步的研究.

参考文献:

[1] Zeadally S, Hunt R, Chen Y S, *et al.* Vehicular ad

hoc networks (VANETS): Status, results, and challenges [J]. **Telecommunication Systems**, 2012, **50**(4):217-241.

[2] IEEE 802. 11 Working Group. IEEE standard for information technology-Telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-Specific requirements. Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. Amendment 6: Wireless access in vehicular environments IEEE Std 802. 11 [S]. New York: IEEE Computer Society, 2010.

[3] Schmidt R K, Kloiber B, Schüttler F, *et al.* Degradation of communication range in VANETs caused by interference 2.0-real-world experiment [C] // **Communication Technologies for Vehicles - Third International Workshop, Nets4Cars/ Nets4Trains 2011, Proceedings**. Heidelberg: Springer Verlag, 2011:176-188.

[4] Torrent-Moreno M, Jiang D, Hartenstein H. Broadcast reception rates and effects of priority access in 802. 11-based vehicular ad-hoc networks

- [C] // **VANET - Proceedings of the First ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks**. Philadelphia: Association for Computing Machinery, 2004:10-18.
- [5] Xu Q, Mak T, Ko J, *et al.* Vehicle-to-vehicle safety messaging in DSRC [C] // **VANET - Proceedings of the First ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks**. Philadelphia: Association for Computing Machinery, 2004:19-28.
- [6] Jiang D, Taliwal V, Meier A. Design of 5.9 GHz DSRC-based vehicular safety communication [J]. **IEEE Wireless Communications**, 2006, 13(5): 36-43.
- [7] Ma X M, Yin X Y, Trivedi K. A robust broadcast scheme for VANET one-hop emergency services [J]. **IEEE Vehicular Technology Conference**, 2011: 6093018.
- [8] Wisitpongphan N, Tonguz O K, Parikh J S, *et al.* Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks [J]. **IEEE Wireless Communications**, 2007, 14(6):84-94.
- [9] Tonguz O, Wisitpongphan N, Bai F, *et al.* Broadcasting in VANET [C] // **2007 Mobile Networking for Vehicular Environments, MOVE**. Piscataway:IEEE Computer Society, 2007:7-12.
- [10] Ros F J, Ruiz P M, Stojmenovic I. Reliable and efficient broadcasting in vehicular ad hoc networks [C] // **VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference**. Piscataway:IEEE, 2009.
- [11] Balan N, GUO Jin-hua. Increasing broadcast reliability in vehicular ad hoc networks [C] // **VANET - Proceedings of the Third ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks**. New York: Association for Computing Machinery, 2006:104-105.

A reliable one-hop broadcast scheme in VANET based on virtual destination node

ZHANG Xu-dong, YAO Wei-hong*, FANG Ren-xiao

(School of Computer Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In the vehicular ad hoc network (VANET), one-hop broadcast is usually the basic scheme of emergency warning messages communication. To deal with the problem of unreliability of traditional IEEE 802.11 one-hop broadcast, a reliable one-hop broadcast scheme based on virtual destination node — VDB-ROBS is proposed. The broadcast node carries on the statistical analysis of the received real-time data frames to select a suitable node from neighbor nodes as virtual destination node, then the broadcast node will be unicast with the virtual destination node, while the other neighbor nodes still receive this unicast frames as traditional broadcast frames. Therefore, this approach can utilize multiple unicast recovery and self-adaptation scheme, such as RTS/CTS, ACK, retransmission and contention window adjustment, thus can effectively improve the reliability of one-hop broadcast. Simulation results show that compared with traditional IEEE 802.11 one-hop broadcast scheme and probability-based reliable one-hop broadcast scheme, the proposed VDB-ROBS provides more reliable performance of one-hop broadcast communication.

Key words: vehicular ad hoc network; one-hop; broadcast; virtual destination node