

车载自组网中基于车辆密度的多跳广播协议

黄家玮, 钟少华, 刘联海, 王建新

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 在车载自组网中, 介质访问控制协议 (MAC) 的转发效率直接影响了数据消息的多跳广播传输性能。现有方法通常在每跳覆盖范围内选择最远节点来承担转发任务, 通过降低转发次数实现快速多跳广播覆盖。然而, 通过仿真实验和模型分析, 当车辆密度变大时, 现有方法导致信道竞争的接入延时剧增。因此, 提出了一种基于 IEEE 802.11p 协议的多跳广播协议 VDF, 根据车辆密度自适应地选择转发节点。事故预警和在线游戏 2 种典型应用仿真实验结果表明 VDF 降低了全网广播消息的覆盖延时, 同时取得了信道冲突程度和多跳覆盖速度的合理折中。

关键词: 无线车载自组织网络; 介质访问控制协议; 广播; IEEE 802.11p

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Vehicle density based multihop broadcast protocol in VANET

HUANG Jia-wei, ZHONG Shao-hua, LIU Lian-hai, WANG Jian-xin

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In vehicular ad hoc networks (VANET), the medium access control (MAC) protocol was of crucial importance to provide time-critical multihop broadcast. Contemporary multihop broadcast protocols in VANET usually choose the farthest node in broadcast range as the forwarder to reduce the number of forwarding hops. However, it was demonstrated that the farthest forwarder may experience long contention delay in case of high vehicle density. An IEEE 802.11p-based multihop broadcast protocol vehicle density based forwarding (VDF) was proposed, which adaptively chose the forwarder according to the vehicle density. The evaluation results in safety warning and online game applications show that, VDF could shorten broadcast delay by achieving the proper trade-off between the contention delay and coverage speed.

Key words: VANET, MAC, broadcast, IEEE 802.11p

1 引言

近年来, 随着无线通信、计算机网络等技术应用于智能交通系统 (ITS, intelligent transport system) 中, 车载自组网 (VANET, vehicular ad-hoc networks) 正逐渐成为车载通信的主流技术, 通过车辆—基站和车辆—车辆之间通信, 提供了各种辅助车辆行驶的网络服务^[1]。但 VANET 中车辆节点移动速度快、链路寿命短、网络拓扑动态变化快等因素直接影响了网络传输效率。实验表明, 在 VANET 中数据分组的成功传输率不超过 50%, 传输延迟大而且延时抖动剧烈^[2]。同时, 由于车辆节点通常呈现“桶状”

的密集聚集, 常用的泛洪广播路由协议会带来严重的信道拥塞和冲突分组丢失。

因此, 保证 VANET 网络应用数据信息低延时、高可靠的传播是一件具有挑战性的工作。例如, 在典型的安全预警应用中, 当探测事故发生时, 车辆将立即采取多跳广播的方式向其他车辆发送事故预警消息^[3]。如果后续车辆没有及时收到预警消息, 就可能发生追尾甚至连环相撞事故。从事故发生到后续车辆收到警告消息的延时越短, 车辆避险概率就越高。

学术界和工业界对车载自组网的介质访问控制协议进行了广泛的研究。其中, IEEE 802.11p 协议^[4]成为了 VANET 的介质访问控制协议通信的主

收稿日期: 2015-10-26; 修回日期: 2016-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61103204, No.61572530, No.61402541, No.61462007, No.61402542)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61103204, No.61572530, No.61402541, No.61462007, No.61402542)

流协议。作为 IEEE 802.11 协议簇中的一员，IEEE 802.11p 协议沿用了基于二进制指数退避的载波监听多址接入（冲突避免）技术实现在共享无线传输介质上的信道接入。其主要流程是：需要发送数据的节点监听信道来判断信道状态，如果信道空闲，则发送数据；如果信道忙碌，则在信道空闲后，等待随机退避时间后重新竞争信道的使用权。

IEEE 802.11p 协议虽然提供了随机公平的信道接入方法，但各节点随机接入信道的方式并不能在多跳传输场景下提供低延时保证。而且为了降低信道开销，IEEE 802.11p 协议也没有使用 RTS/CTS 信道预约机制来避免各节点同时发送造成数据碰撞。为了解决多跳传输中的延时和可靠性问题，很多学者提出了各种基于 IEEE 802.11p 协议的多跳广播传输协议。这些协议大部分使用 GPS 设备获取地理位置信息，以最小化连通支配集为设计目标，选择当前节点传输范围内最远的节点来承担转发任务，这样不但降低了转发次数，而且避免了多个节点同时转发而引发的数据碰撞。

本文通过仿真实验和模型分析证明了在不同车辆密度场景中，选择不合理的中继节点进行多跳广播消息转发会导致信道接入延时剧增，从而提高消息的总传输延时。因此，本文提出了一种基于 IEEE 802.11p 的多跳广播协议 VDF (vehicle density based forwarding)，根据车辆密度自适应地选择转发节点，在信道接入延时和转发跳数之间取得了较好的均衡。

2 相关工作

在 IEEE 802.11p 协议的多跳传输中，每一个收到消息的节点都会转发该消息。由于相同消息会被重复广播，这不但浪费了有限的无线信道带宽，而且造成频繁的数据碰撞和过高的信道接入延时。为了解决这个问题，目前，提出了多种基于 IEEE 802.11p 协议的快速多跳广播协议，具体可以分为基于延时和基于概率的 2 类协议。

基于延时的多跳广播协议的基本思路是给最远的候选转发节点分配最短的广播等待延时。文献[5]提出了一种基于 IEEE 802.11p 协议的多跳广播协议 UMB，根据车辆节点距发送方的不同距离给节点分配不同的广播延时，距发送方越远的节点所分配的广播延时越短。因此，广播延时最短的车辆节点最先广播收到的消息，而其他收到同样消息的节点不

再广播该消息，避免数据碰撞，并提高效率。

另一种基于延时的 Rec 协议^[6]也使用了地理位置信息来选择转发节点。在 Rec 协议中，选取距离没收到消息的邻居节点质心最近的节点作为转发节点。该节点收到消息后立即转发，因此能减少延时和不必要的重传次数。但由于车辆的高移动性，Rec 协议很难得到周围节点的实时位置信息。

为了避免错误的估计传输范围，JIVCA^[7]使用周期性的 Hello 分组来实时获取邻居节点的位置信息。根据邻居节点的位置信息，JIVCA 实时更新各节点的当前估计传输范围。与其他基于延时的协议不同的是，JIVCA 通过调节 MAC 层竞争窗口值来选择转发节点。距离发送方越远节点的竞争窗口值越小，具有越大的可能性成为转发节点。

基于概率的多跳广播协议为每一个车辆节点设定不同的广播转发概率^[8-10]。文献[8]提出了一种加权的 P -坚持 MAC 协议，收到消息的节点根据自己距离发送方的距离计算广播的概率。随着距离的增加，广播所收到消息的概率增大。因此，距离发送方最远的节点最有可能首先广播消息，从而降低信道中的广播消息数量和信道竞争程度。

3 问题分析

为了加快广播消息的传播速度，基于延时和基于概率的广播协议都为距离发送节点最远的节点赋予最高的转发优先级。这样，方法实现了转发中继数量的最小化，但同时却忽略了转发中继节点面临的信道竞争问题：转发节点虽然在发送节点传输覆盖范围内具有最高的转发优先级，能避免传输范围内的信道冲突，但这却无法避免与传输范围外的隐藏节点冲突。而当车辆节点密度增加时，这种由隐藏节点引起的竞争延时会不断加剧，造成端到端的广播传输性能下降。本节首先描述 VANET 多跳广播的典型场景，然后利用仿真实验来分析车辆节点密度对多跳广播传输性能的影响。

车载无线网络多跳广播的典型场景设定为如图 1 所示的多车道公路。由于车辆节点的传输半径范围 R 远大于道路宽度，因此，场景可简化为道路长度为 L 的直线网络拓扑。其中，车辆密度为 α ，发送方 S 和转发节点 F 的距离为 d 。 F 转发 S 所发送消息的同时，在发送方 S 的传输范围 R 内没有其他车辆与 F 竞争信道。

用 NS2^[11]仿真搭建如图 1 所示的实验拓扑场

景, 所有车辆节点均匀分布在 5 km 长的 4 车道直线道路上, 以恒定速度同向行驶。各节点使用 IEEE 802.11p 作为 MAC 层协议, 以 10 个/秒的速率发送消息分组。消息分组大小为 1 000 byte, 这在传输速率为 1 Mbit/s 的无线信道中需要占用 32 个时隙。表 1 描述了仿真和分析中的道路交通参数和 MAC 层协议设置。车辆密度分别为每公里每车道 25、100 和 175 辆, 以模拟测试车辆密度稀疏和稠密的不同道路场景中转发的性能。同时, 测试中选择距离发送节点最远的节点作为转发中继节点。由于传输半径远大于道路宽度, 本文将实验拓扑从 4 车道简化为 1 车道的直线道路, 那么车辆密度所对应的 α 参数值分别为 0.1、0.4 和 0.7 辆/米。

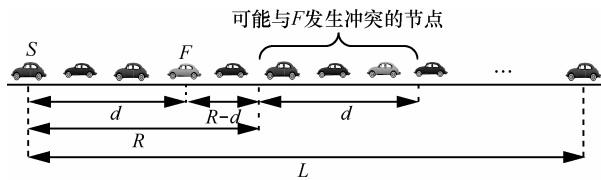


图 1 车载无线网络多跳广播的典型场景

表 1 实验场景参数设置

参数	参数值	参数	参数值
车辆密度 α	0.1, 0.4, 0.7 辆/米	行驶速度 v	50 km/h
道路长度 L	5 000 m	车道数	4
传输半径范围 R	300 m	信道传输模型	Two Ray Ground
时隙长度 σ	20 μ s	DIFS 长度 D	2.5
CW_{min}	31	CW_{max}	1 023
信道传输速率 r	1 Mbit/s	仿真时间	100 s

实验中测试道路最前端的车辆节点向最后端车辆节点发送消息分组的传输延时和广播次数。图 2 所示为在不同车辆密度下该消息分组端到端延时的累积分布函数。当车辆密度很小时($\alpha=0.1$ 辆/米), 传输延时主要分布在 0.15 s 以下。而当密度变大时, 延时值不断提升, 其中, $\alpha=0.7$ 辆/米时, 延时主要分布在 0.45 s 左右。

为了进一步分析延时随着密度上升而提高的原因, 本文统计了端到端传输消息中各转发节点的广播次数。其中, 总广播次数包括了各转发节点的正常中继发送次数和由于信道冲突而造成的发送失败次数。图 3 显示, 随着密度的变大, 信道冲突的发送失败次数不断提高。虽然正常中继发送次数不变, 总的广播次数仍然提升约 55%。

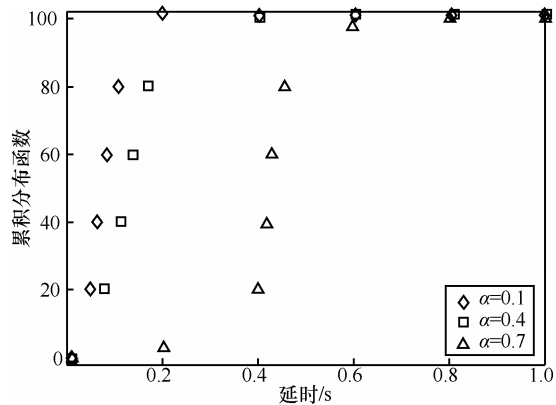


图 2 端到端消息延时的累积分布函数

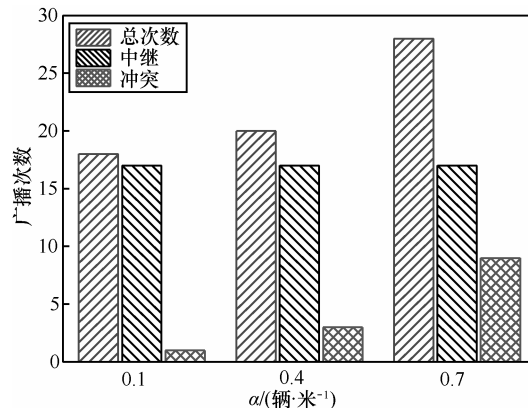


图 3 端到端消息发送次数

4 理论建模和协议设计

从第 3 节的分析可知, 如果选择距离发送节点最远的节点作为转发中继节点, 在节点密度变大时信道的冲突会使传输延时不断提高, 降低传输性能。针对该问题, 本节首先利用数学建模和仿真实验来分析转发节点的选择位置和多跳广播延时的关系, 进而得到最佳转发节点的选取方法, 最后提出了基于车辆密度的多跳广播协议。

4.1 建模分析

为了分析转发节点的选择位置和多跳广播延时的关系, 本文提出 p -坚持 CSMA/CA 模型用以分析 IEEE 802.11p 的信道竞争机制。该模型从发送概率 P 的几何分布中随机取样, 以刻画无线节点的随机退避机制, 能较好地分析 IEEE 802.11 协议簇的传输性能^[12,13]。

图 4 展示了一次消息发送的典型流程, 其中包括了成功发送 (successful) 时隙, 以及每次成功发送之前可能产生的信道碰撞 (collision) 时隙和信道空闲 (idle) 时隙。其中, 由多个车辆节点在相

同时隙发送消息将产生信道碰撞。而发生信道碰撞后, 依据 IEEE 802.11p 的退避算法, 各节点将随机等待一段时间, 从而形成了信道空闲时隙。

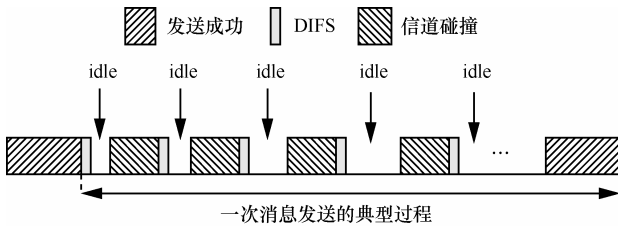


图 4 消息发送的过程

由图 1 可知, 距离 d 内共有 ad 个节点。转发节点 F 进行消息转发时, 可能有 $ad-1$ 个隐藏节点与之发生信道消息碰撞。使用式(1)和式(2)计算转发节点 F 成功传输概率 P_s 和碰撞概率 P_c 。

$$P_s = \frac{p(1-p)^{ad-1}}{1-(1-p)^{ad}} \quad (1)$$

$$P_c = \frac{1-(1-p)^{ad} - p(1-p)^{ad-1}}{1-(1-p)^{ad}} \quad (2)$$

其中, 在初始状态下, 依据最小竞争窗口值 CW_{\min} 计算得到各节点的平均随机退避时间为 $\frac{CW_{\min} + 1}{2}$, 那么各节点发送概率 p 为

$$p = \frac{2}{CW_{\min} + 1} \quad (3)$$

根据式(1)和式(2), 可以计算得到转发节点 F 所经历碰撞次数 N_c 的期望值 $E[N_c]$ 为

$$E[N_c] = \frac{P_c}{P_s} = \frac{1-(1-p)^{ad}}{p(1-p)^{ad-1}} - 1 \quad (4)$$

每次信道碰撞时间 T_c 包括消息发送时间 σm 和 DIFS 等待时间 σD 。其中, m 、 D 和 σ 分别为消息发送占用时隙数、DIFS 等待时隙数和时隙长度。由式(4)计算得到在每次成功发送前的总信道碰撞时间 T_{col} 为

$$T_{col} = E[N_c]T_c = \sigma \left[\frac{1-(1-p)^{ad}}{p(1-p)^{ad-1}} - 1 \right] (m+D) \quad (5)$$

如图 2 所示, 信道碰撞仅发生在 2 个空闲片段之间, 所以计算空闲片段数量的期望值 $E[N_i]$ 为

$$E[N_i] = E[N_c] + 1 = \frac{1-(1-p)^{ad}}{p(1-p)^{ad-1}} \quad (6)$$

依据发送概率 p 和竞争节点数目 ad 可以确定每个空闲片段的等待时隙数, 计算其期望值 $E[T_i]$ 为

$$E[T_i] = \sigma [1 - (1-p)^{ad}] \sum_{i=0}^{\infty} i(1-p)^{adi} = \frac{\sigma(1-p)^{ad}}{1-(1-p)^{ad}} \quad (7)$$

在一次成功发送前的总信道空闲时间 T_{idle} 为

$$T_{idle} = E[N_i]E[T_i] = \frac{\sigma(1-p)}{p} \quad (8)$$

而一次成功发送消息数据的时间 T_{trans} 为

$$T_{trans} = \sigma(m+D) \quad (9)$$

一次转发消息数据的总传输时间 T_{hop} 包括信道碰撞时间 T_{col} 、信道空闲时间 T_{idle} 和成功发送时间 T_{trans} , 由式(5)、式(8)和式(9)得到。

$$\begin{aligned} T_{hop} &= T_{col} + T_{idle} + T_{trans} \\ &= \frac{\sigma[m+D - (m+D-1)(1-p)^{ad}]}{p(1-p)^{ad-1}} \end{aligned} \quad (10)$$

假设消息从道路最前方车辆节点通过多跳广播转发到最后方车辆节点, 一共需要 $\frac{L}{d}$ 次广播转发, 可以得到端到端的多跳广播延时 T 为

$$T = \frac{\sigma L [m+D - (m+D-1)(1-p)^{ad}]}{dp(1-p)^{ad-1}} \quad (11)$$

定义相邻 2 个转发节点之间的距离为单跳转发距离 d 。 d 的值越大, 下一跳转发节点距离当前转发点越远。图 5 显示了 d 从 0 m 变化到 290 m 时, 端到端的多跳广播延时的变化情况。从理论计算和 NS2 仿真结果看出, 端到端的延时 T 的变化趋势和车辆密度 α 直接相关。当车辆密度小时 ($\alpha=0.1$ 辆/米), 选择较近的节点来转发广播消息会导致过多的转发次数和较大的广播延时。因此, 端到端的广播延时 T 随着距离 d 的增大而减小。但是当车辆密度变大后, 选择最远的节点作为转发节点将经历过多的信道碰撞, 从而加大端到端延时。如图 5 所示, 当 α 为 0.7 辆/米时, 选择较近或较远的节点作为转发节点都会增加端到端的广播延时。

4.2 协议设计

由 4.1 节的分析可以知道多跳广播延时是单跳距离 d 的凸性函数, 即在不同的车辆密度下, 有且仅有一个最优单跳距离 d_{opt} 使多跳广播延时最小

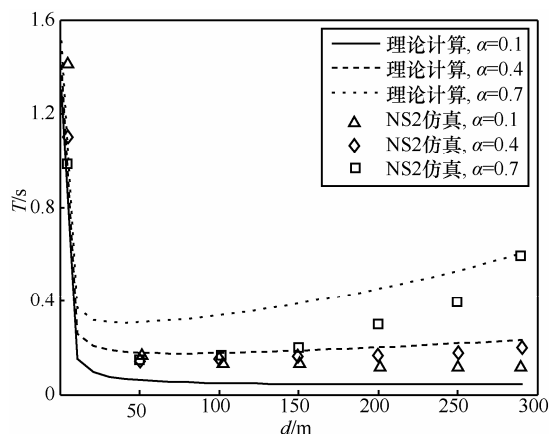


图 5 端到端的多跳广播延时的变化情况

化。为了得到尽可能小的多跳延时，单跳距离选取的原则是通过得到信道冲突和覆盖速度的合理折中以实现多跳延时的最小化。这实际上是一个凸优化问题，可描述为求延时 $T(d)$ 的最小值 $T(d_{opt})$ 。

$$T(d_{opt}) = \min \{T(d) | d \in (0, R)\} \quad (12)$$

其中， $T(d)$ 描述了多跳广播延时与单跳距离大小的函数关系， R 是传输半径范围。为了保证端到端的传输延时最小，可以依据一阶导数 $T'(d)=0$ 来求解得到最优距离 d_{opt} 的值，如式(13)所示。

$$d_{opt} = \frac{\text{lambertw} \left[\frac{1-m-D}{(m+D)e} \right] + 1}{\alpha \ln(1-p)} \quad (13)$$

其中， lambertw 函数为乘积对数函数^[14]。为了实现该目标，本文设计了根据车辆密度自适应地选择转发节点以调节单跳转发距离的 VDF 协议。VDF 根据车辆密度计算当前节点距转发节点的最优距离 d_{opt} ，选出合适的下一跳转发节点 F ，以实现网络延时的最小化。

首先，在 IEEE 802.11p 协议中，各车辆节点会周期性发送“心跳”信标 (beacon) 分组向周围邻居节点广播自己的 ID 号和位置信息。VDF 利用了 beacon 分组来与周围节点共享实时的节点位置信息，同时在 beacon 分组中设置“转发节点标识位” (缺省值为 0)，用以区分 beacon 分组是否由当前转发节点发送。各节点依据收到的 beacon 分组信息更新其邻居节点列表 $neighbour_list$ ，统计其邻居节点个数，计算出车辆密度 α ，同时，依据 GPS 信息和转发节点的 beacon 分组计算自己距离转发节点的距离 d_f 。得到车辆密度后，依式(13)得到最优单跳

转发距离 d_{opt} 。

各节点收到消息数据分组后，先判断所收到的是否为新分组，如果是，则计算等待时隙 CW ，同时计时器开始计时，当计时器超时后将发送该消息数据分组。其中，为了与 IEEE802.11p 协议兼容，VDF 采用了分布式的控制策略，各节点依据自己距离转发节点的距离 d_f 来计算其竞争窗口 CW 值

$$CW = \left| \frac{d_f - d_{opt}}{R} \right| (CW_{max} - CW_{min}) + CW_{min} \quad (14)$$

其中，传输半径 R 、最大竞争窗口 CW_{max} 和最小竞争窗口 CW_{min} 的值如表 1 所示。从式 (14) 可见，各节点分配了不同等待广播时隙，距发送方的距离 d_f 与最优距离 d_{opt} 最接近的节点获得最小的竞争窗口 CW 值，也就具有最大概率成为中继节点来首先转发广播消息。当某个节点转发广播消息后，则成为新的转发节点，并在其后所发送的 beacon 分组中将“转发节点标识位”设置为 1，向其邻居节点通告该节点已经成为转发节点。

如果节点所收到的消息数据分组不是新分组，这表明其他节点已经承担了中继任务并转发该消息。因此，当前节点不再转发该消息，计时器停止计时。

VDF 协议的核心代码如下。

Algorithm: VDF()

变量:

$neighbour_list$: 当前传输半径内车辆集合

n_v : $neighbour_list$ 中车辆数量

F : 转发节点

d_f : 转发节点 F 到当前节点的距离

α : 车辆密度

系统参数:

R : 传输半径

CW_{max} : 最大竞争窗口

CW_{min} : 最小竞争窗口

初始化:

```
{
     $n_v = 0$ ;
     $F = \emptyset$ ;
     $d_f = 0$ ;
     $neighbour\_list = \emptyset$ ;
}
```

```

当收到车辆  $v$  的心跳信标
{
  若  $v$  不在  $neighbour\_list$ , 则
  {
     $n_v = n_v + 1$ ;
    添加  $n_v$  至  $neighbour\_list$ ;
    更新节点密度  $\alpha$ ;
  }
  若  $v$  是转发节点  $F$ , 则
  将  $d_f$  更新为  $F$  到当前节点的距离;
}
当收到转发节点  $F$  的数据分组
{
  若该数据分组是新数据分组, 则
  {
    依据式 (14) 计算  $CW$ ;
    启动计时器计时;
  }
  否则停止计时器计时;
}
当计时器超时
{
  广播收到数据分组;
  当前节点成为转发节点  $F$ ;
}

```

5 仿真与实验

本节通过 NS2 仿真实验对 Rec、IEEE 802.11p 和 VDF 进行性能评估, 其中, IEEE 802.11p 协议采取缺省的随机退避机制。实验性能评价指标包括广播延时和广播次数。1) 广播延时定义为消息从第一个发送方到最后一个接收方的传输延时。作为网络传输的关键性能指标, 广播延时越小, 数据消息的传播速度越快, 越能满足安全预警等应用的快速传输要求。2) 广播次数包括消息成功广播次数和因为信道碰撞而失败的广播次数。从第 3 节的分析可以知道, 传输范围越大, 导致信道碰撞概率和广播失败次数增加, 但传输范围越小则意味着每次广播覆盖的范围越小, 需要更多数量的中继传输。因此, 只有选择合适的中继转发节点, 才能得到最

佳的传输范围以避免过多的失败广播或中继广播。

实验拓扑结构采用如图 1 所示的 5 km 4 车道公路场景。所有车辆节点均衡分布在道路上, 并以 10 beacon/s 的速率发送 100 byte 的 beacon 消息来声明各自的 ID 和位置信息。同时, 为了模拟智能交通系统中其他应用所产生的背景流量, 设定所有车辆节点以 10 packet/s 的速度发送 1.5 KB 大小的数据分组给它们的邻居节点, 其他的网络参数设置如表 1 所示。实验中每组测试重复 10 次, 并根据置信区间为 95% 来统计平均结果。

在实验中, 模拟了 2 种典型的应用服务。1) 事故预警: 当交通事故发生时, 事故车辆利用多跳广播向后面所有车辆发送事故预警消息。测试可以分为单源和多源场景, 在单源的场景中只有队首车辆节点是事故预警消息源, 而多源场景中会随机选择一定数量的车辆节点为消息源。2) 在线游戏: 各用户通过周期性的多跳广播来将数据发送到其他所有用户。由于游戏数据的传播速度直接影响着用户体验, 通过改变数据发送间隔以在不同信道负载下来测试协议的延时性能。最后, 本文模拟了一个高速公路多车追尾连锁事故的场景, 用以分析在交通事故发生时不同协议的避险效果。

5.1 单源场景下事故预警应用的性能比较

本实验测试在单源场景下, 当车辆节点分别采用 IEEE 802.11p、Rec 和 VDF 协议进行多跳广播事故预警时的广播延时和广播次数。实验中选择道路上最前车辆节点作为预警消息的发送源, 以 0.05 s 作为发送间隔周期性发送 2 KB 大小的预警消息分组。首先, 测试不同网络负载下的协议性能。为了控制网络负载, 逐渐增加道路上车辆节点的数量, 车辆密度从 50 辆/千米增加到 250 辆/千米。

如图 6(a) 的结果所示, 当车辆密度为 50 辆/千米时, VDF 和 Rec 取得了相近的延时性能, 而 IEEE 802.11p 的延时相对较高。这是因为车辆密度较小时, IEEE 802.11p 由于不考虑车辆密度因素, 随机选择转发节点, 单跳的平均转发距离较小, 预警消息的传输速度最低。随着车辆密度的提高, 信道冲突的增加导致了 3 种协议的多跳广播传输延时都在变大。但 Rec 的延时增长速度明显高于其他 2 种协议。当车辆密度为 250 辆/千米时, Rec 的延时分别比 VDF 和 IEEE 802.11p 高约 34% 和 15%。这是由于 Rec 虽然通过选择传输范围内最远的节

点作为中继节点提高了消息覆盖范围，但同时也造成了过高的无线信道的竞争退避延时。VDF 协议根据接收节点接收范围内车辆密度决定下一次传输范围，降低了冲突退避延时和重传概率，延时性能最好。

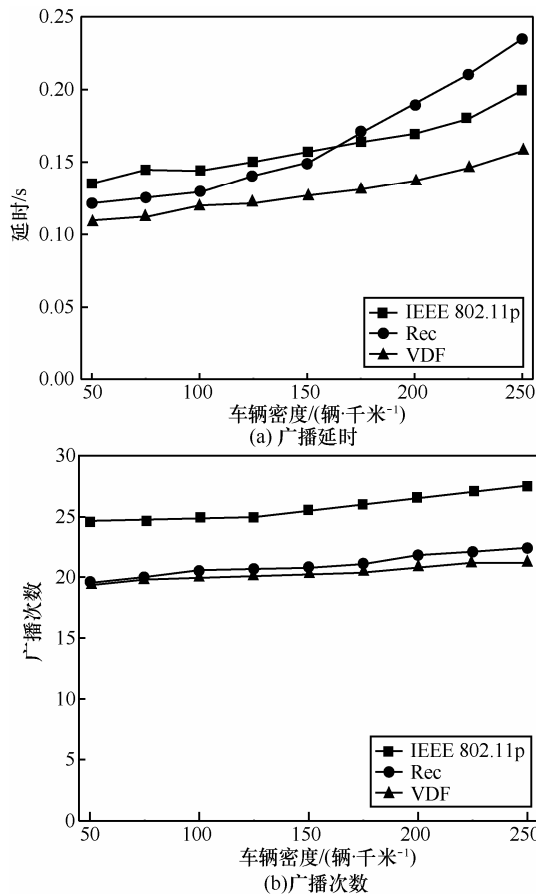


图 6 单源场景下改变车辆密度的事故预警消息传输性能

从图 6(b)可以看出，由于 IEEE 802.11p 随机选择转发中继节点，需要更多次的中继广播，造成其广播数量最高。相对于 IEEE 802.11p，Rec 减少了中继广播，其广播次数降低了约 20%。当密度变大时，VDF 减小了单跳转发距离，从而降低了信道冲突概率和重传次数，获得了最低的总广播次数。

实际上，车辆移动的差异性会导致网络拓扑和车辆密度不断变化。接下来测试在不同车辆速度差异度下的协议性能。其中，所有车辆初始以 125 辆/千米的密度均匀分布在道路上。实验开始后车辆开始移动，平均速度为 50 km/h，各车速率服从均匀分布，其最大速度差异度从 10%增加至 50%。

如图 7(a)所示，在不同的车速差异度下，VDF 始终获得了最小的多跳广播传输延时。图 7(b)中，

Rec 和 VDF 的广播次数相似，相对 IEEE 802.11p 降低了约 20%。以上结果说明在动态变化的网络拓扑中，即使车辆密度不断变化，VDF 协议仍然体现了较好的健壮性和可靠性。

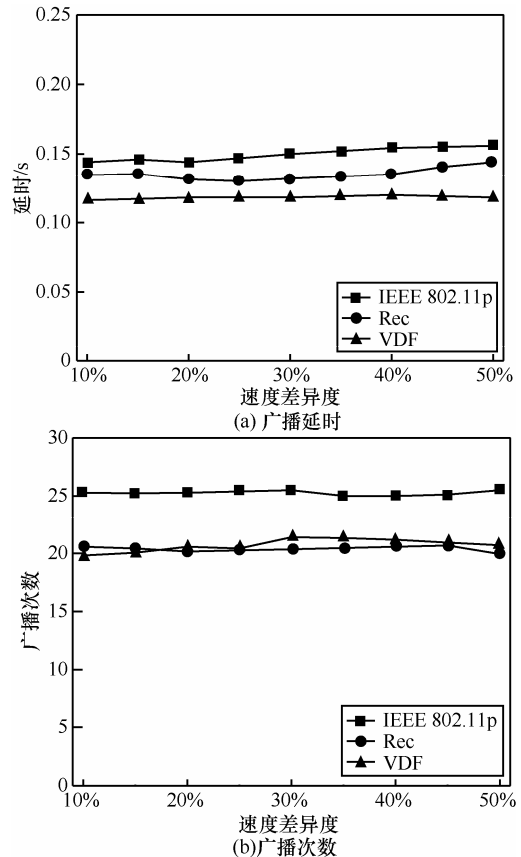


图 7 单源场景下改变车速差异度的事故预警消息传输性能

5.2 多源场景下事故预警应用的性能比较

交通事故发生时，除了单事故源的情况，也有可能多个车辆节点同时预警并发送交通预警消息。此时多个并发广播的交通预警消息之间也会发生信道碰撞。因此，本实验在固定车辆密度的情况下考察多源场景下的预警消息广播性能。实验中预警消息发送的车辆节点随机选择，并且数量从当前道路车辆总数的 5%逐步增加到 25%。预警消息的发送间隔时间和分组大小分别设定为 0.05 s 和 2 KB，车辆密度固定为 125 辆/千米。

从图 8(a)可以看出，3 种协议的传输延时都随着发送节点数量的增加而增长。而且由于多个车辆节点并发广播加剧信道冲突，多源场景下的多跳广播延时都要高于对应的单源场景。在 3 种协议中，随着源节点的数量增多，由于其最远节点转发的策略，Rec 的延时增长速度最快。而相对于其他方法，

因为选择较近的节点作为承担转发任务，降低了信道冲突的概率，VDF 的延时性能最佳。其中，当源节点占总节点数为 25% 时，VDF 的延时相对 Rec 和 IEEE 802.11p 分别降低了约 29% 和 19%。

如图 8(b) 所示，在多源场景下各协议的广播次数比单源场景都有增高，而 IEEE 802.11p 的广播次数仍然是最高的。与单源场景类似，由于 VDF 避免了过多的重传广播，其总广播次数在源节点数据量较多时比 Rec 还要小，取得了最好的性能。

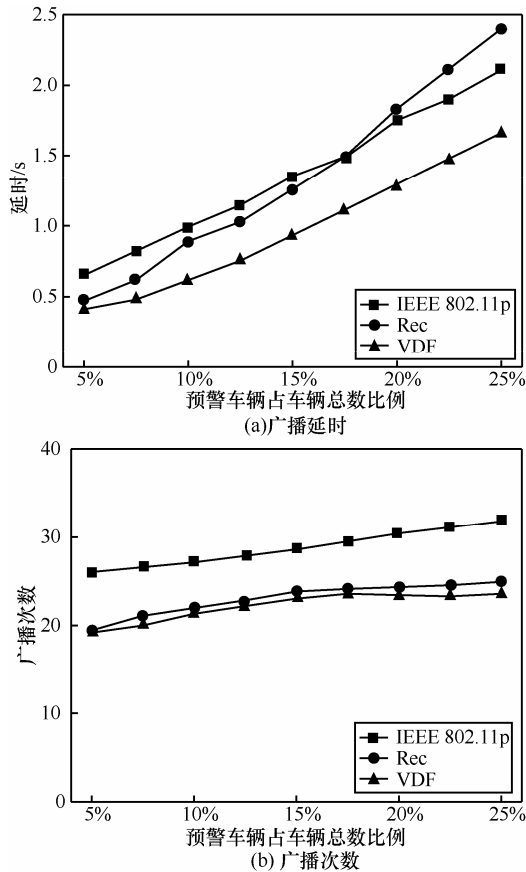


图 8 多源场景下的事故预警消息传输性能

5.3 在线游戏应用的性能比较

在线游戏是车载无线网中的一种典型娱乐应用，各节点通过广播通信将游戏数据发送给其他游戏参与节点，数据的实时传输性能直接决定用户体验。同时，相对事故预警应用仅需要传输预警消息，在线游戏应用需要所有用户实时并发传输大量数据，所以保证传输可靠性就变得十分重要。本实验通过调节数据发送的间隔来测试传输延时和成功接收率。实验设定 4 车道下，车辆密度为每公里每车道 24 辆 ($\alpha=100$ 辆/千米)，随机选择 50 辆车作为游戏用户，各用户周期性发送 2 000 byte 的数据分组给其他用

户。分组发送间隔依次设置为 10 ms、50 ms 和 100 ms。

从图 9(a) 可以看出，当分组发送间隔为 10 ms 时，由于较高的数据发送速率，各协议的延时都大于 3.5 s。当分组发送间隔为 50 ms 或 100 ms 时，3 个协议的延时都降到 0.8 s 以下。注意到 50 ms 和 100 ms 的分组发送间隔下延时相差并不大，其原因在于发送速率还不够高，竞争还未造成信道饱和。图 9(b) 比较了各协议的节点传输成功概率。随着分组发送间隔变大，由于信道冲突率降低，各协议的传输成功概率都不断提高。相对其他协议，在不同发送间隔下，VDF 对不同信道竞争状态都显示较好的适应性，以较小覆盖范围转发广播消息，取得最低延时和最高可靠性。

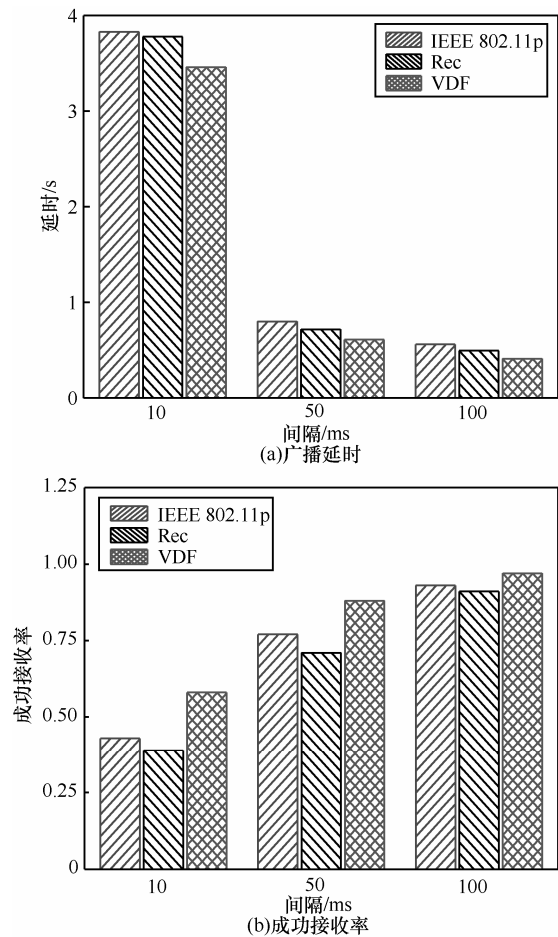


图 9 在线游戏应用的传输性能

5.4 高速公路多车追尾连锁事故的避险性能比较

本实验测试车辆队列发生追尾事故时，各广播协议的避险效果。实验考察车辆密度为每公里每车道 40 辆的 4 车道高速公路行驶场景。其中，选择 30 辆车组成车辆行驶速度为 120 km/h 的同向行驶

车队，车间距离为 25 m。当队首车辆发生事故时，会以 0.05 s 的周期发送 2 KB 大小的预警消息分组，同时以 8 m/s^2 的加速度来降低行驶速度。如果前后两车车距小于 4 m 时，则认为发生了追尾事故，此时两车都会以 8 m/s^2 的加速度来降速直至停车。同时假设当发生以下 2 种情况时，驾驶员能刹车降速以避险：1) 当前车相邻的前方两车发生了事故；2) 收到了前方任一车辆转发的事故预警消息。当驾驶员刹车后，车辆将以 8 m/s^2 的加速度降速。设定驾驶员的反应时间在 0.75~1.5 s 均衡分布。

实验考察 Rec 和 VDF 2 个协议的避险性能指标：1) 前后两车停车或追尾时的相对速度，如果相对速度大于 0，则说明两车发生追尾事故，而且相对速度越大，事故危害越大；2) 前后两车停车后的车距，如果车距小于 4 m，则说明两车最终还是发生追尾事故。

图 10 对比了 Rec 和 VDF 协议下前后两车停车或追尾时的相对速度。0~3 号车间的相对速度都大于 0，这说明当队首车辆（0 号车）发生事故时，由于车速过快，其后 1~3 号车都发生了追尾。其余的车辆则依据所接收的事故预警信息来降速避险。图 10(a)和图 10(b)中结果对比显示出相对于 Rec 协议，VDF 协议降低了多跳广播延时，从而保证更多车辆节点有效避险。

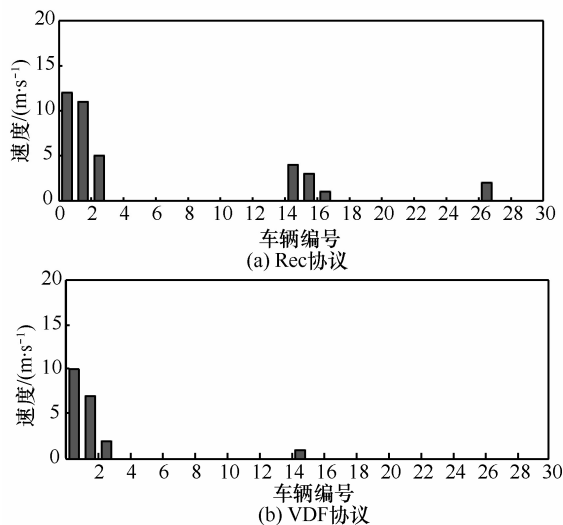


图 10 前后两车相对速度

图 11 显示了 Rec 和 VDF 协议下前后两车停车后的车距。可以看出，由于存在驾驶员反应时间的差异性，各车间的车距各不相同。对比图 11(a)和图 11(b)，VDF 协议下更多车辆的前后车距大于

4 m，这说明 VDF 取得了更好的多跳广播预警避险性能。

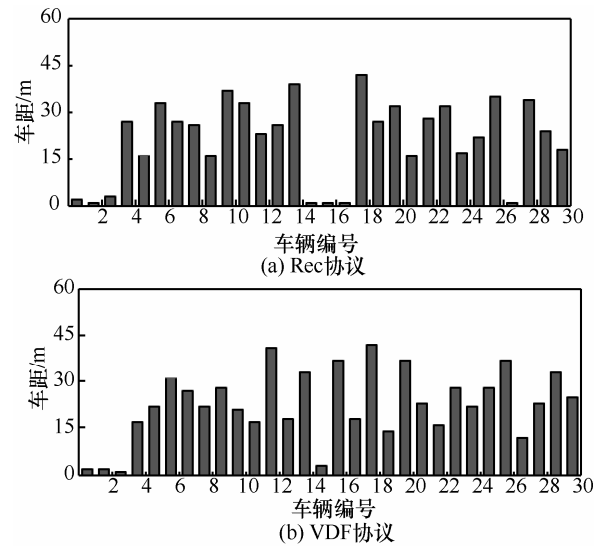


图 11 前后两车车距

6 结束语

本文提出了一种车载无线网络中基于车辆密度的多跳广播协议，这种协议没有选择最远的可达节点来进行中继转发，而是根据车辆密度自适应选择转发节点，从而缓解信道竞争，有效地降低了多跳广播延时和广播次数。NS2 仿真实验表明，相对 Rec 和 IEEE 802.11p 协议，VDF 在事故预警和在线游戏 2 种典型车载无线应用中都取得较好的性能。为了避免车辆节点高移动性的影响，未来拟研究车载无线网中基于移动预测的转发节点优选方法，并在真实网络进一步测试协议的性能。

参考文献:

- [1] PANICHPAPIBOON S, PATTARAATIKOM W. A review of information dissemination protocols for vehicular ad hoc networks [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2012, 14 (3): 784-798.
- [2] ZHANG J, MA X, WU T. Performance modeling and analysis of emergency message propagation in vehicular ad hoc networks [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2014,14(3): 366-379.
- [3] XIANG Q, CHEN X, KONG L. et al. Data preference matters: a new perspective of safety data dissemination in vehicular ad hoc networks[C]// In Proceedings of INFOCOM, 2015.
- [4] IEEE 802.11p/D10.0, Part11: wireless LAN medium access control (MAC) and the physical layer (PHY) specifications: amendment 7: wireless access in vehicular environment, draft 7.0 [S]. 2010.

- [5] KORKMAZ G, EKICI E, OZGUNER F, et al. Urban multihop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems [C]// ACM Intl Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks. 2004: 76-85.
- [6] LIU J, YANG Z, STOJMENOVIC I. Receiver consensus: on-time warning delivery for vehicular ad-hoc networks [C]// In Proceedings of ICDCS, 2012: 386-395.
- [7] PALAZZI C, ROCCHETTI M, FERRETTI S. An inter vehicular communication architecture for safety and entertainment [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(1): 90-99.
- [8] ZHOU L, ZHANG Y, SONG K, et al. Distributed media services in P2P-based vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(2): 692-703.
- [9] WEGENER A, HELLBRUCK H, FISCHER S. et al. AutoCast: an adaptive data dissemination protocol for traffic information systems [C]// In Proceedings of VTC, 2007: 1947-1951.
- [10] SLAVIK M, MAHGOUB I. Stochastic broadcast for VANET [C]// In Proceedings of CCNC, 2010: 1-5.
- [11] The network simulator [EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [12] CALI F, CONTI M, GREGORI E. Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8(6): 785-799.
- [13] DENG D J, KE C H, CHEN H H. Contention window optimization for IEEE 802.11 DCF access control [J]. IEEE Transactions Wireless Communication. 2008, 7(12): 5129-5135.
- [14] CHATZIGEORGIOU I. Bounds on the Lambert function and their application to the outage analysis of user cooperation[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17 (8): 1505-1508.

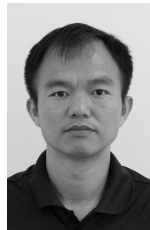
作者简介:



黄家玮 (1976-), 男, 湖南长沙人, 博士, 中南大学副教授, 主要研究方向为计算机网络算法和协议。



钟少华 (1989-), 男, 湖南长沙人, 中南大学硕士生, 主要研究方向为车载无线网络的 MAC 协议。



刘联海 (1978-), 男, 福建厦门人, 中南大学讲师、博士生, 主要研究方向为无线网络协议设计。

王建新 (1969-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 中南大学教授, 主要研究方向为网络理论优化。