

文章编号: 2096-1618(2016)05-0483-06

车载自组网基于集群协作的 MAC 协议

唐晋生, 朱西平, 金 虎
(成都信息工程大学信息安全工程学院,四川 成都 610225)

摘要:车载自组网基于竞争的 MAC 协议 IEEE 802. 11P 存在预见性、公平性、低吞吐量、延迟性、高碰撞率等问题。提出基于集群协作的 MAC 协议 CCBM(an cooperative cluster-based MAC protocol for VANETs),解决节点接入信道的公平性问题,同时提高信道的利用率和有效地适应网络拓扑变化。理论计算和仿真结果显示,选择集群头节点 HN(head node)的平均时隙小于 IEEE 802. 11P 50 %,稳定性增加 50 %。

关 键 词:车载自组网;网络拓扑;头节点;IEEE 802. 11p
中图分类号:TP301 **文献标志码:**A

0 引言

车载自组网采用 IEEE 802. 11p 作为其协议标准。IEEE 802. 11p 是由 IEEE 802. 11 标准扩充,主要用于车载电子设备的无线通讯,采用 4 个接入类型(ACs)保证高优先级包具有较少的等待时间(表 1)。IEEE 802. 11p 采用 5.9 GHz(5.850 ~ 5.925 GHz)带宽的载波侦听多址接入/碰撞避免(carrier sense multiple access with collision avoidance,CSMA/CA)方式,75 MHz 频谱被分成 7 个 10MHz 的信道和 5MHz 的保留信道,控制信道(control channel,CCH)178 用于安全相关应用和系统控制管理,其他 6 个信道是服务信道(service channels,SCHs),主要用于非安全应用和商业应用。IEEE 802. 11p 假定所有车辆通过外部系统被同步到一个共同时间,如全球定位系统(Global Positioning System,GPS)。同步间隔(synchronization interval,SI)是 100 ms。间隔开始时,将会同步到 CCH 一段时间,这段时间被称为控制信道间隔(CCH interval,CCI),其余时间被称为服务信道间隔(SCH interval,SCI)。同步间隔=控制信道间隔+服务信道间隔,也即 SI=CCI+SCI。

表 1 IEEE 802. 11p CCH 的竞争参数

AC No.	Access Class	CWmin	CWmax	AIFS _N
0	Background(BK)	15	102	9
1	Best Effort(BE)	7	15	6
2	Voice(VO)	3	7	3
3	Video(VI)	3	7	2

IEEE 802. 11p 中基于车辆安全相关的应用采用分布式协调功能(distributed coordination function,

DCF)方式。由于车辆的高移动性,VANET 面临网络拓扑快速变换,且由于马路宽度过窄造成链路冗余、链路断裂及车辆密度的变化,严重影响网络的连接性。同时 IEEE 802. 11p 存在预见性、公平性、低吞吐量、高碰撞率等问题,特别是在高密度网络问题更甚^[1-3]。

另外 IEEE 802. 11p 中也采用 TDMA 方式。文献[4]提出多信道 TDMA MAC 协议,通过使用确定知识支持 VANETs 中有效广播服务。对于每个节点,CCH 分配固定时隙用来限制可容纳系统内的汽车数量。文献[5-8]提出了空间分割多址接入方案,将马路分成更小单元。对于车辆来说,使用相应单元,分配给一个时隙、一个频带或一个信号。

此外也采用基于集群多信道 MAC 协议改善 VANETs 性能和可靠性^[9-14]。文献[13]提出一个基于移动集群的方案,基于本身头节点选择标准在多普勒频移上产生接收 Hello 包。文献[14]提出基于移动集群方案 APROVE,头节点将基于车辆间相对距离选择,具有最小相对距离车辆,即最近邻居节点,将被选为头节点。虽然头节点选择标准上集成了移动性,但对于信息的交换和网络的形成需要时间较长。而且,当一个预定义定时器到期时,头节点选择进程是被频繁使用的,将导致大量网络开销和低吞吐量。

首先用最大 ID 算法选择头节点,然后提出基于集群协作的 MAC 协议 CCBM,最后进行理论计算与仿真分析,解决节点接入信道的公平性问题,同时提高信道的利用率和有效地适应网络拓扑变化。

1 基于最大 ID 的 HN 选择算法

假定所有车辆具有相同传输能力,则它们有平等机会被选为 HN,此时将用最大 ID 算法选择 HN(车牌

号即车辆 ID)。基于最大 ID 的 HN 选择算法如下所述。

- (1)初始状态,每个时隙用分布协调机制 DCF 接入媒介。
- (2)对于每个包传输时,其退避时间统一规定范围为 $(0,CW)$, CW 为竞争窗口值大小。
- (3)当退避时间接近 0 时,一个节点发送 HELLO 包。
- (4)接收节点比较自己 ID 和源节点 ID。自己 ID 一般大于或小于源节点 ID。此时,有两个 ID 集:小集合和大集合。因为是使用最大 ID 算法,所以要选择大集合,小集合抛弃。节点 ID 比发送节点 ID 小,将不参加 HN 选择。
- (5)在下一个时隙内,通过使用 DCF,所有较大 ID 节点都试图变成 HN。
- (6)重复步骤(3)~(5),直至当下一个时隙 i ,没有节点发送。
- (7)若当前时隙为 i ,那么,一个节点在时隙 $i-1$ 广播 HELLO 包。在当前时隙 i ,没有活跃节点。最后在下一个时隙 $i+1$,此节点将被选为 HN。

最大 ID 算法流程如图 1 所示。

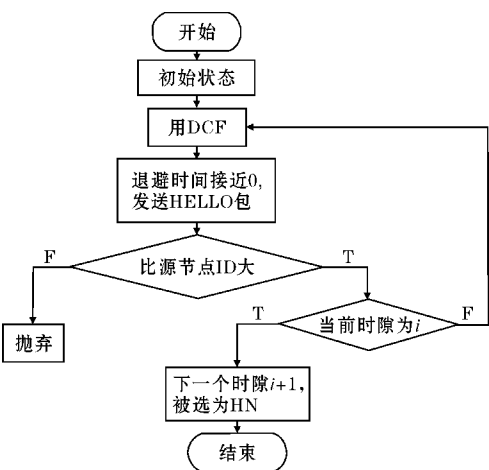


图 1 最大 ID 算法流程图

GM 选择时隙作为带宽请求 (bandwidth request, BR) 的操作同最大 ID 算法选择 HN 操作大同小异。所以,一个节点在整个过程中将有 4 个状态:初始状态、准 HN、HN、GM。集群内通信过程中一个节点状态的相互转换如图 2 所示。

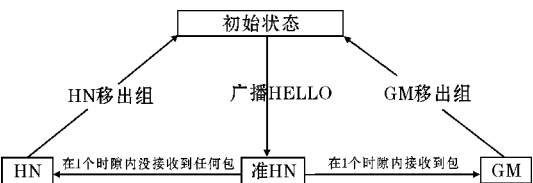


图 2 集群内通信过程中一个节点状态的相互转换

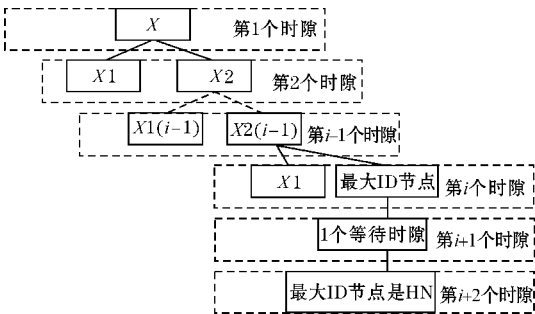


图 3 最大 ID 算法描述方案

最大 ID 算法描述方案如图 3 所示。在初始状态,有 X 个节点尝试成为 HN。在第一个时隙,一个节点传输一个 HELLO 包。一旦接收到这个包, X 个节点将分成两部分: $X1$ 和 $X2$ ($X1$ 是小集合, $X2$ 是大集合)。在第 i 个时隙,最大 ID 节点传输 HELLO 包。在这个时隙后的第 $(i+1)$ 个时隙内,没有节点传输 HELLO 包。在第 $(i+2)$ 个时隙,最大 ID 节点将广播头节点包 (head node packet, HNP)。根据图 4 可以计算出需要的平均时间 T ,用来选择 HN。多余时隙加入平均值,因为此方案有一个时隙是保留时隙。有 4 个节点选择一个 HN,示例如图 4 所示。

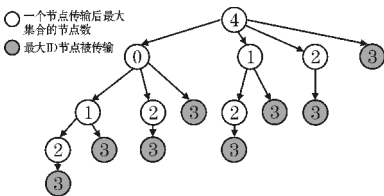


图 4 4 个节点的树状图

在 HN 被选择确认后,GM 将分配时隙来传输数据。

如果在集群范围内新加入一个更大 ID 车辆,那么它将假定一个临时 HN 角色。这个新选择临时 HN 在它范围内将不能参加竞选新的 HN,只能等待融入另一个集群内或者改变状态为主要集群。

为加速网络汇聚成为一个更稳定的集群拓扑,一个在其范围内没有 HN 的车辆并且没有在临时 HN 范围内,它将会加入这个集群并且将不会参加选择另一个临时 HN。若汽车位于两个 HN 的范围内,它将会加入到离其近的 HN 所在集群中,给主要集群胜过临时集群更高的优先权。

基于集群 TDMA 的 CBT 系统 (cluster-based TDMA, CBT),TDMA 时隙架构与 MAC 层帧格式是有联系的。如图 5,区间 $[0,1]$ 用来实现两种不同目的,所有节点都广播 HELLO 包直到 HN 被选出来,完成构建 CBT 系统。一旦 CBT 系统形成,被选中 HN 将广播一个包括集群头节点包 (head node packet, HNP) 的时隙

分配图给其他 GM,然后 GM 将分配时隙来传输数据。

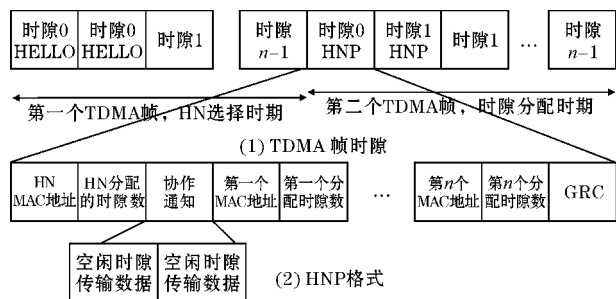


图5 新时隙格式

HNP 由下列部分构成: HN MAC 地址(6 字节, 集群头节点 MAC 地址; 头节点分配的位置数(1 字节, 集群头节点分配位置 ID); 通知协作(7 字节, 当帮助节点不止一个时, 集群头节点通知帮助节点, 利用空闲时隙传输数据。GM MAC 地址(6 字节, 集群其他成员的 MAC 地址); 分配时隙数(1 字节, 分配时隙数的 ID 取值范围是 $[1, n-1]$; 集群控制范围 (group range control, GRC) (4 字节, 为保护集群头节点发出的数据包)。

2 理论分析

理论分析模拟参数见表 2。

表2 模拟参数

参数	含义
X	集群的节点数量
T	选择一个 HN 所需平均时间
A_n^m	从 n 个不同元素中取出 m ($m \leq n$) 个元素, 按照一定的顺序排成一列
d	一个 TDMA 帧的时隙数
f	TDMA 帧数
R	传输比特率 (Mbps)
T_s	时隙的持续时间

其中, 每个节点传输概率为 $a^{[5]}$, 则

$$a = \frac{2}{CW + 1}$$

在所研究时隙内至少有一个传输概率 b , 则

$$b = 1 - (1 - a)^X$$

概率 c 表示在信道上成功传输, 即一个节点在信道上传输概率, 事实上至少有一个节点传送。

$$c = \frac{Xa(1-a)^{x-1}}{b} = \frac{Xa(1-a)^{x-1}}{1 - (1-a)^x}$$

假设选择一个 HN 要求平均时间 \bar{T} 需满足

$$\frac{X}{c} \leq \bar{T} \leq \frac{1}{c} \sum_{m=0}^{X-1} (X-m)$$

证明 用 P_i 表示大集合 $X2_i$ 中一个节点在第 i 个时隙内在信道上成功传输概率。定义 $P_i = P(\text{节点 } a \text{ 恰好在信道上传输/选中节点 } a) \times P(\text{节点 } a \text{ 被选中})$, 因为节点在信道上传输是独立于所选择节点的, 即节点在信道上传输和所选择节点, 二者之间是没有任何联系相互独立, 有 $P_i = P(\text{节点 } a \text{ 恰好在信道上传输}) \times P(\text{节点 } a \text{ 被选中})$:

$$P_i = \frac{c}{X2_i}$$

图 3 描述了 $X2_i$ 。 n 表示 HN 被成功选中时时隙。在第 $n-1$ 个时隙, HN 选择失败, 最后在第 n 个时隙成功。

$$P_n = \frac{c}{X2_n}$$

选择 HN 有平均时隙 \bar{T}

$$\begin{aligned} \bar{T} &= \bar{T}(t_1 + t_2 + \dots + t_m) + 1 \\ &= \bar{T}(t_1) + \bar{T}(t_2) + \dots + \bar{T}(t_m) + 1 \end{aligned}$$

此处的 t_1, t_2, \dots, t_m 是第 1 个节点, 第 2 个节点, 一直到第 m 个节点要求时隙数。最大 ID 节点 a 是第 m 个节点。 P_1 的概率密度函数为

$$f(x) = (1 - P_1)^{x-1} P_1$$

P_1 是第一个节点成功传输概率。第一个节点传输平均时隙 $T[t_1]$ 可以计算为

$$T(t_1) = \sum_{t_1=1}^{\infty} x f(x) = \frac{1}{P_1}$$

类似于 t_1 , 可以计算 \bar{T}

$$\begin{aligned} \bar{T} &= \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} + \dots + \frac{1}{P_m} + 1 = \sum_{i=1}^m P_i + 1 = \sum_{i=1}^m \frac{X2_i}{c} + 1 \\ &= \frac{1}{c} \sum_{i=1}^m X2_i + 1 \end{aligned} \quad (1)$$

由式(1), 根据值 m , 得出另一个值 \bar{T} , 如果最大 ID 节点在间隔 t_1 传输 HELLO 包, 得到 $\bar{T}_{\min} = X/c$ 。在最坏情况下, 每个时隙最大集合内的最小节点传输 HELLO 包, 在时间 X 后, 最大 ID 节点传输 HELLO 包。

在图 4 示例中 $\bar{T}_{\max} = \sum_{j=0}^{X-1} \frac{X-j}{c}$, 有 4 个节点选择一个 HN, $\bar{T}_{\min} = 4/c$, $\bar{T}_{\max} = 10/c$ 。 X 个节点的变量, 有个时隙平均数来选择一个 HN。

在 HN 被选择确认后, 集群其他 GM 将给它们分配时隙来传输数据。为计算成功带宽请求 (bandwidth request, BR) 所需时隙平均数, 得到 \bar{T} 平均数, 即 $\bar{T} = (\bar{T}_{\min} + \bar{T}_{\max})/2$ 。在第一个帧, 要求 \bar{T} 个时隙来选择 HN, 这里仍然有 $(d-\bar{T})$ 个时隙来满足带宽需求。对于

($X-1$)个 GM 来说,这里共有 $(d - \bar{T})^{X-1}$ 种不同组合。

在第一个 TDMA 帧里,为实现成功带宽传输,对于所有($X-1$)个节点,这里有 $A_{X-1}^{(d-T)}$ 种情况。用 D_{BR}^i 代表失败带宽平均数,则表示为

$$D_{BR}^i = \begin{cases} (X-1) - \sum_{j=1}^{X-1} \frac{A_j^{(d-T)}}{(d-T)^j}, & \text{若 } d=2 \\ D_{BR}^{i-1} - \sum_{j=1}^{D_{BR}^{i-1}} \frac{A_j^d}{d^j}, & \text{若 } d=3,4,\dots,f \end{cases}$$

所以,通过利用第 i 个 TDMA 帧,可以计算从($X-1$)个 GM 节点中,成功发送 BR 的概率。表示为 P_{BR}^i

$$P_{BR}^i = \begin{cases} \frac{A_{X-1}^{(d-T)}}{(d-T)^{X-1}}, & \text{若 } d=1 \\ \frac{A_{D_{BR}^i}^d}{d^{D_{BR}^i}}, & \text{若 } d=2,3,\dots,f \end{cases} \quad (2)$$

Y 表示成功 BR 所需时隙平均数,由式(2)可以计算出

$$Y = P_{BR}^1(d - \bar{T}) + \left(\sum_{i=2}^f (i \cdot P_{BR}^1 C_{j=1}^{i-1} (1 - P_{BR}^i)) \right) \cdot d$$

在 BR 请求后,HN 必须广播集群头信息包(head node packet,HNP)告知其 GM。参考图 5,可以计算出一个集群中 HN 为了广播 HNP 所需的时隙数。 Z 为

$$Z = \frac{(63 \cdot X + 32)/R}{T_s} = \frac{56 \cdot X + 32}{T_s \cdot R}$$

在 HN 广播 HNP 信息后,一个 GM 可以在指定时隙内发送数据。可以传送单个时隙,也可以传送多个时隙。 W 表示一个 GM 在开始传输数据前,等待所需时隙平均数。可以得到:

$$W = \begin{cases} \frac{\sum_{i=0}^X}{X} = \frac{X-1}{2}, & \text{若用单时隙} \\ \frac{((1 + \text{Max}_{rand})/2) \sum_{i=0}^X}{X} \\ \frac{(1 + \text{Max}_{rand})(X-1)}{4}, & \text{若用多时隙} \end{cases}$$

Max_{rand} 表示一个 GM 要求时隙最大值。最终,可以计算时隙平均数,计算的时隙是选择一个 HN 的时间,当一个节点发送数据时,有:

$$S = \bar{T} + Y + Z + W$$

可以计算时隙平均数,当一个节点准备发送数据时,通过选择 HN 计算时间。当一个集群中 GM 数目增加时,时隙总数也增加。提议的方案选择 HN 更快,并且在第一帧内有更多空闲时间。所以,GM 分配传输 BR 传输数据要比 IEEE 802.11p 更快。

3 仿真结果

为评估文中方案,用 MATLAB 计算和模拟选择一个 HN 的平均时隙。模拟 100 次得到最终性能指标平均值。假定 $R=18$ Mbps,即是 IEEE 802.11p OFDM 物理层对于 5 GHz 来说支持的比特率。 $T_s = 0.35 \text{ ms}^{[16]}$ 。

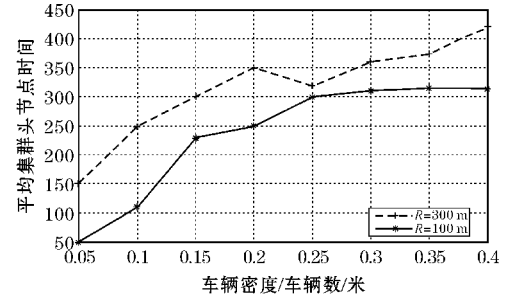


图6 平均 HN 时间与车辆密度

平均 HN 时间与车辆密度的关系如图 6 所示。当车辆密度为 0.05 时,集群头节点时间分别为 50、150;当车辆密度增加 3 倍,达到 0.2,集群头节点时间分别是 250、350,增加约 3~5 倍。当车辆密度从 0.05~0.25 时,通信范围 R 为 100 m、300 m 所需集群头节点时间都在逐渐增加,但时间差在逐渐减少;车辆密度大于 0.25 时,所需集群头节点时间差逐渐增大。但始终 300 m 通信范围组群头节点所需时间比 100 m 多。可见,通信范围越大,在相同情况下,密度就变小,集群头节点所需时间也越多。如上分析知,增加车辆密度,HN 平均寿命增加。这是因为车辆之间相对距离在减少。因此,车辆间相对速度也在减少,导致 HN 高的稳定因子。

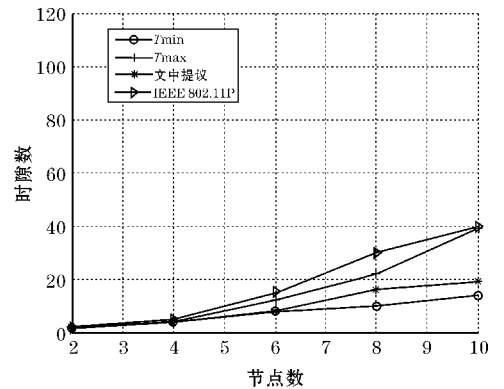


图7 选择 HN 所需时隙的平均数

选择 HN 所需时隙的平均数如图 7 所示。通过增加节点数(即车辆数),从 2~10 来改变一个集群中 GM 的数量,选择 HN 所需最大时隙 \bar{T}_{max} 、最小时隙 \bar{T}_{min} 在逐渐增加,平均时隙 \bar{T} 也在增加。在 HN 被选

择确认后,GM 将分配时隙来传输数据。

当 GM 的数量是 2、4、6 时,选择 HN 的时隙平均值在两个系统中是相同的。但是,当 GM 增加时,文中提议时间比 IEEE 802.11p 少。当 GM 数量达到 10 时,大约需 19 个时隙,而 IEEE802.11p 要求 40 个时隙。模拟结果在间隔 $[\bar{T}_{\min}, \bar{T}_{\max}]$ 内,并且选择 HN 的时间明显少于 IEEE 802.11p 近 50 % 的时间。

4 结束语

文中提出基于集群协作的 MAC 协议 CCBM。通过使用最大 ID 算法,在选择 HN 时的平均时隙数和稳定性方面明显优于 IEEE 802.11p。解决了车载自组网中节点接入信道的公平性问题,同时提高信道的利用率和有效地适应网络拓扑变化。下一步将通过设定一个机制来控制每个集群拓扑范围,使 HN 能够及时改变使用通信范围,并允许它所有的 GM 在 CCI 内能够发送状态信息,以使进一步解决车载自组网中的预见性、公平性、低吞吐量、延迟性、高碰撞率等问题。

致谢:感谢成都市科技计划项目(2015-NY01-00123-NC)对本文的资助

参考文献:

- [1] K A Hafeez, L Zhao, Z Liao, et al. A new broadcast protocol for vehicular ad hoc networks safety applications [C]. in Proc. IEEE GLOBECOM Conf., 2012:6-10.
- [2] X Ma, X Chen. Performance analysis of IEEE 802.11 broadcast scheme in ad hoc wireless LANs[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2012, 57(6):3757-3768.
- [3] M Torrent-Moreno, J Mittag, P Santi, et al. Vehicle-to-vehicle communication: Fair transmit power control for safety-critical information [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2013, 58(7):3684-3703.
- [4] H Omar, W Zhuang, L Li. VeMAC: A TDMA-based MAC protocol for reliable broadcast in VANETs [J]. IEEE Trans. Mobile Comput., [EB/OL]. http://ieeexplore.ieee.org/ezproxy.lib.ryerson.ca/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6226415&contentType=Early+Access+Articles&searchField%3DSearch_All%26queryText%3DVeMAC%3A+A+TDMAbasedMAC+protocol, 2012, 99:1-10.

- [5] C Han, M Dianati, R Tafazolli, et al. A novel distributed asynchronous multichannel MAC scheme for large-scale vehicular ad hoc networks [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2012, 6(7):3125-3138.
- [6] J Blum A Eskandarian. A reliable link-layer protocol for robust and scalable intervehicle communications [J]. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., 2011, 8(1):4-13.
- [7] G M Abdalla, M A Abu-Rgheff, S M Senouci. Space-orthogonal frequency-time medium access control (SOFT MAC) for VANET [J]. in Proc. GHS, 2013:1-8.
- [8] Y C Lai, P Lin, W Liao, et al. A region-based clustering mechanism for channel access in vehicular ad hoc networks [J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2011, 29(1):83-93.
- [9] M Gerla J T Tsai. Multicluster, mobile, multimedia radio network [J]. Wireless Netw., 1995, 1(3):255-265.
- [10] H Wu, Z Zhong, L Hanzo. A cluster-head selection and update algorithm for ad hoc networks [J]. in Proc. IEEE GLOBECOM Conf., 2010:1-5.
- [11] M Chatterjee, S K Das, D Turgut. WCA: A weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks [J]. Cluster Comput., 2002, 5(2):193-204.
- [12] K H Almotairi, X Shen. Multi-channel medium access control for ad hoc wireless networks [J]. Wireless Commun. Mobile Comput. (Wiley), doi: 10.1002/wcm.1159. [EB/OL]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcm.1159/abstract>, 2011.
- [13] M Ni, Z Zhong, D Zhao. MPBC: A mobility prediction-based clustering scheme for ad hoc networks [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2011, 60(9):4549-4559.
- [14] C Shea, B Hassanabadi, S Valaee. Mobility-based clustering in VANETs using affinity propagation [C]. in Proc. IEEE GLOBECOM Conf., Dec. 2013:1-6.
- [15] T L Sheu, Y H Lin. A cluster-based TDMA system for inter-vehicle communications [J]. Journal of Information Science and Engineering, 2014, 30(1):213-231.

- [16] H Omar, W Zhuang, A Abdrabou, et al. Performance evaluation of VeMAC supporting safety applications in vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2013, 1(1): 69–83.

An Cooperative Cluster-based MAC Protocol for VANETs

TANG Jin-sheng, ZHU Xi-ping, JIN Hu

(College of Information Security Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: For vehicular ad-hoc network (VANET), contention-based medium-access-control (MAC) protocols such as IEEE 802.11p have problems in predictability, fairness, low throughput, latency, and high collision rate. Therefore, this paper proposes a new protocol, i.e. An Cooperative Cluster-based MAC Protocol for VANETs (CCBM). Therefore, CCBM solves the fairness problem of node access channel. In addition, the group's algorithm can also improve the utilization of idle time, and it can effectively adapt to network topology changes. Theoretical calculation and simulation results show that the average time slot of the head node (HN) is less than IEEE 802.11p 50% and the stability is increased by 50%.

Key words: vehicular ad-hoc network; network topology; head node; IEEE 802.11p