

# VANET 中基于协议序列及 TDMA 的 混合信道接入机制

徐哲鑫,蔡苓玲,郑丽丽,吴 怡

(福建师范大学医学光电科学与技术教育部重点实验室,福州 350007)

**摘 要:** 为了提高高速公路场景下用户平均有效数据吞吐量,提出车载自组织网络分布式信道接入机制. 通过道路区段划分实现协议序列集复用;通过引入少量反馈并利用 UI(User Irrepressibility)序列特性实现节点间接入顺序感知;同区段节点间利用分布式 TDMA(Time Division Multiple Access)模式最大化吞吐量. 仿真结果表明,其吞吐量性能优于经典的基于 GNSS(Global Navigation Satellite Systems)的机制,并且物理层数据传输速率越大,节点通信半径越大,车辆密度越稀疏,其优势越明显.

**关键词:** 混合信道接入机制;协议序列;时分多址;车载自组织网;全球导航卫星系统

**中图分类号:** TN929.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)06-1408-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.019

## A Hybrid Channel Access Mechanism Based on Protocol Sequences and TDMA for VANET

XU Zhe-xin, CAI Ling-ling, ZHENG Li-li, WU Yi

(Key Laboratory of Opto Electronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education,  
Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

**Abstract:** In order to improve the average throughput performance of user effective data under highway scenario, a distributed channel access mechanism is proposed. The protocol sequence set is reused by road division. According to the characteristic of UI(User Irrepressibility) sequences, a few bits of feedback information are introduced for detecting the channel access order among nodes. Distributed TDMA (Time Division Multiple Access) is proposed for maximizing the throughput performance with a competition zone. The simulation results show that the throughput performance of UI-TDMA mechanism is more superior to classical method in a sparser distributed network or a higher PHY data rate or a larger communication range of node.

**Key words:** hybrid channel access mechanism; protocol sequence; time division multiple access (TDMA); vehicular ad hoc networks (VANET); global navigation satellite systems (GNSS)

## 1 引言

车载自组织网 (Vehicular Ad hoc Network, VANET)<sup>[1,2]</sup> 具有拓扑动态变化、运动轨迹规律性以及功率不受限等特点,其中的信道接入机制影响着系统吞吐量、传输延迟等多方面性能,但由于 VANET 节点的移动性、节点所处范围的无边界性以及系统架构分布式的特性使得该方向的研究成为挑战.

目前 VANET 信道接入机制方面总体可以分成基于“竞争”的、基于“非竞争”的和前述两者混合的机制. 基于“竞争”的信道接入机制通常以 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 为基础<sup>[3]</sup>. 该类协议以 IEEE 802.11p 的 MAC (Media Access Control) 协议最为经典<sup>[4]</sup>,但由于退避机制本身缺陷,节点密集时节点介质访问延迟增大,甚至造成长时间无法接入信道,吞吐量性能也随之严重恶化<sup>[5]</sup>. 基于“非

收稿日期:2015-12-15;修回日期:2016-11-03;责任编辑:梅志强

基金项目:国家自然科学基金(No. 61571128);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)资助项目(No. 20133503120003);福建省教育厅科技项目(B类)(No. JB13005);福建省科技厅工业科技计划重点项目(No. 2014H0019)

竞争”的信道接入机制通常分为时分多址接入 (Time Division Multiple Access, TDMA)、频分多址接入 (Frequency Division Multiple Access, FDMA) 以及码分多址接入 (Code Division Multiple Access, CDMA), 实现无冲突的信道接入, 但 FDMA 和 CDMA 分别需要实现频率以及码字的同步, 这都增加了系统的复杂度, 而 TDMA 可利用车载 GPS 定位系统中卫星授时实现精度很高的时间同步, 因此 TDMA 实用性及可行性更强一些<sup>[6]</sup>. 传统的 TDMA 模式通常需要集中式的管理, 若直接应用于 VANET 无疑增加了网络建设成本, 并且在移动通信环境下的切换也将成为棘手的问题, 因此分布式的 TDMA 将更适合 VANET. CFR MAC (Near Collision Free Reservation Based MAC) 提出了一种近似非竞争的资源预留 MAC 机制<sup>[7]</sup>, 该机制以 VeMAC<sup>[8]</sup> 为基础但是考虑了车流行驶方向和速度, 动态地调整这些子集的大小. 基于“竞争”和“非竞争”的混合机制结合两者的长处, 并且还可延伸运用于多信道的协调中. CS-TDMA (CSMA and Self-Organizing TDMA MAC)<sup>[9]</sup> 采用与 SOFTMAC (Space-Orthogonal Frequency-Time MAC)<sup>[10]</sup> 类似的机制, 但将数据帧中控制部分和业务部分之间的比例根据车流密度进行动态化设计. HER-MAC (Hybrid Efficient and Reliable MAC)<sup>[11]</sup> 在高速公路的场景下, 针对安全类应用提出的一种混合信道接入机制, 数据帧也同样被分成控制和业务部分. 总体上看, 上述各类机制复杂度较高, 对节点间协调能力提出较高的要求, 在 VANET 环境下实用性还需进一步探讨, 并且有些机制需要节点间交互各自邻居信息, 也增大了网络开销, 特别是在节点密集时此类开销将加剧网络拥塞恶化程度.

基于协议序列 (protocol sequence) 的信道接入机制成为基于“非竞争”信道接入机制的重要分支<sup>[12-14]</sup>. 通过将合理设计的二进制序列分配给节点, 实现了确定性的介质访问, 并可实现分布式运作. 用户保障 (User Irrepressibility, UI) 序列是协议序列的中一个类别, 实现了节点介质访问时延的有界性, 克服了竞争型信道接入机制介质访问时延无界的弊端. 基于协议序列的信道接入机制本质上应隶属于 TDMA, 且不需要中心设备集中式地管理及分配用户时隙, 其接入方式也比分布式 TDMA 简单, 但其实现的难度在于序列集合的设计以及序列的分配. 基于 GNSS (Global Navigation Satellite System) 的协议序列生成及分配机制<sup>[13]</sup> 较好地解决了协议序列的生成及分配问题, 但序列集合根据道路区段内最大可能用户数生成, 因此在车辆密度稀疏的情况下, 将导致许多序列未被使用, 从而浪费时隙资源.

针对基于 GNSS 的信道接入机制在车辆节点密度稀疏时出现时隙浪费的问题, 本文利用 UI 序列的接入时延有界性以及 TDMA 对时隙利用的高效性, 提出基

于 UI-TDMA 的混合信道接入机制. 在高速公路场景下, 通过合理规划道路区段划分及频谱映射, 进一步合理优化分布式序列集合生成及分配的解决方案, 并利用 UI 序列特性解决帧同步问题及区段内邻居节点探测问题、利用 TDMA 提高用户平均吞吐量.

## 2 系统模型

### 2.1 场景描述

高速公路场景将成为传统移动通信网络棘手的一个问题, 主要有高速移动引起的多普勒频移、频繁切换问题以及穿透衰耗和阴影衰落等, 特别是在偏远地区和隧道等极端环境下, 对基站模式的移动通信网提出更苛刻的要求, 不得不在软硬件上耗费大量人力物力作针对性的设计. 根本上, 上述问题都是由基站的“静止”与车辆的“高速运动”之间的矛盾导致的, 而相比之下, 同向行驶车辆之间的相对移动则缓慢的多, 而对向行驶的车辆间链路生存时间会非常短暂, 因此本文主要考虑同向行驶车辆之间的通信问题. 对高速公路 80 ~ 120km/h 的限速范围而言, 同向行驶车辆间最大相对速度差仅 10m/s 左右. 因此, VANET 的自组织性和分布式的信道接入机制特性恰能适用于车辆间相对移动较缓慢的特点, 克服传统移动通信网的诸多问题.

### 2.2 道路区段划分及频谱规划

在道路区段划分上沿用文献<sup>[13]</sup>的思想, 但将区段长度  $L$  缩短为节点的通信半径  $R$ , 这样每个区段内部节点两两之间均在一跳范围内, 即可直接监听到同区段内任一节点的时隙使用情况, 便于统计时隙使用情况. 为解决隐藏点问题, 重新设定 IEEE 802. 11p 中业务信道与区段的映射关系, 如图 1 所示.

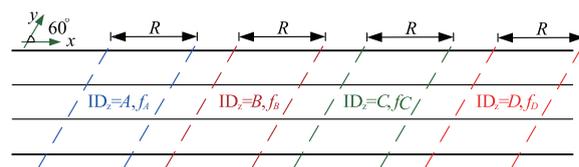


图1 修正后区段划分及频谱规划

以 4 个区段为一个循环, 依次标注区段  $ID_z = A, B, C, D$ , 对应的频段可使用 IEEE 802. 11p 信道中的 4 个业务信道, 分别表示为  $f_A, f_B, f_C, f_D$ . 需要说明的是, 由于车辆节点之间存在相对移动, 若以 3 个区段为一个循环并标注且区段  $ID_z = A, B, C$ , 对应地使用 3 个 IEEE 802. 11p 信道时, 连续两个 A 区段内的节点可能会成为关于 BC 区段分界附近节点的隐藏点. 而在 4 个业务信道的循环分配下, 相邻的 A 区段内节点只有在超帧  $T$  内至少穿过 B 区段后才可能成为对方的隐藏点, 其他相邻同频区段之间关系类似, 因此只要合理设定超帧  $T$  的长度即可避免隐藏点问题. 这样通过利用车辆间相对

速度的特点,降低了序列更换的频率,增加系统稳定性也减少网络开销.另外,区段内序列集合将依照小区个数生成,而序列周期与序列集合中序列个数成正比,因此更短的区段长度也可缩短序列周期,进一步提高用户平均吞吐量.

### 3 混合信道接入机制

#### 3.1 “小区-序列”映射关系

与基于 GNSS 的序列生成及分配方法类似,在区段内完成正六边形小区的划分,设节点通信半径为  $R$ ,区段长度与节点通信半径相等,车辆车道数为  $N_l$ ,车辆长度为  $l_v$ ,假设小区大小恰好能容下一个车辆节点,那么每个区段内可容纳的最大用户数为

$$K_{\max} = \lfloor \frac{R}{l_v} \cdot N_l \rfloor \quad (1)$$

其中  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整运算.根据  $K_{\max}$  即可生成协议序列集合,设  $p$  为大于  $K_{\max}$  的最小素数.以  $q = 2p - 1$  生成素数序列 (Generalized Prime Sequences, GPS) 为例<sup>[14]</sup>,GPS 隶属于 UI 序列,设序列集合中序列个数为  $p$ ,则序列的负载因子将为  $f = 1/(2p - 1)$ .每个小区中心点的地理坐标都将对应序列集合中的一个序列,这个映射表可预存与车载导航设备上.每个区段使用相同的序列集合,实现序列复用,这种重复关系使得车辆仅需预存高速公路入口处第一个区段的“小区-序列”映射表即可,其他任意位置所对应的序列都可以由该映射表推算获得.

#### 3.2 超帧结构及其参数设定

每个节点在业务信道上将以超帧为周期进行通信.如前文所述,超帧长度由以最大节点相对速度跨越一个区段长度所需时间决定.设高速公路限速为  $[v_{\min}, v_{\max}]$ ,单位为  $\text{m/s}$ ;区段长度为  $R$ ,单位为  $\text{m}$ ,则业务信道中超帧长度可设为

$$T = \frac{R}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (2)$$

其单位为“s”.以高速公路中  $80 \sim 120\text{km/h}$  限速为例,当节点通信半径为  $1\text{km}$  时,  $T = 3600 \times 1 / (120 - 80) = 90\text{s}$ .但实际路况中  $1\text{km}$  内同时出现车速为  $80\text{km/h}$  和  $120\text{km/h}$  的概率很低,因此可将  $T$  设为经验值  $100\text{s}$ .需要说明的是,该超帧长度的设定适用于正常交通流运动状态下,即无交通事故,无拥堵等意外情况.若发生上述意外情况,则车辆将暂时暂停 IEEE 802.11p 业务信道数据发送,转入 IEEE 802.11p 安全信道,采用抑制广播风暴的转发机制收发紧急消息<sup>[15-17]</sup>.

超帧可分成若干时隙,时隙长度依据 IEEE 802.11p 协议定义设置为  $\tau = 13\mu\text{s}$ .超帧结构如图 2 所示,由 3 个部分组成:第 1 部分将基于 UI 序列实现同区

段内用户探测及同步,持续时间为  $T_{\text{ds}} = L\tau$ ,其中  $L$  为序列周期长度,即一个序列周期所占用时隙的个数;第 2 部分将在第 1 部分的基础上,根据当前小区用户数使用基于 TDMA 的模式实现数据传输,持续时间为  $T_{\text{dt}} = T - L\tau - T_G$ .其中  $T_G$  为保护间隔,即为超帧的第 3 部分,用于意外情况下额外突发紧急消息的传送以及信道切换等系统操作所需的缓冲时间,其长度设为 IEEE 802.11p 中 CCHI 间隔长度  $50\text{ms}$ <sup>[18-20]</sup>.



图2 UI-TDMA混合信道接入机制的超帧结构

#### 3.3 时隙分配及使用

所有节点在高速公路的路口处将会被路边节点告知“小区-序列”映射表以及“区段-频段”映射关系,并且超帧的起始时刻由 GNSS 告知,但由于信号传播时延和节点对数据的处理时间,每个节点实际的超帧起点存在一定误差<sup>[13]</sup>.在每个超帧的起始时刻,所有节点清除之前的时隙使用模式,依照“小区-序列”映射表根据当前所在小区获取对应的 UI 序列,并根据当前所处区段对应的频段收发数据.

在超帧的“探测及同步”部分,每个节点根据获取的序列中 0 和 1 的序列值进行数据收发.节点只在区段对应的频段内发送数据,但在 4 个业务频段均可接受数据,以实现跨区段通信.由于节点的超帧起点有所不同,因此会导致节点间 UI 序列中部分发送时隙发生数据碰撞.然而,UI 序列可保证序列在一个周期中至少有一个发送时隙成功发送<sup>[13,14]</sup>,称之为“至少成功一个 1”.由于“探测及同步”部分持续时间设定为一个 UI 序列周期,因此必然有至少一个节点在该部分成功发送,且每个节点在该部分至少成功一个 1.

节点在该序列周期的发送时隙主要发送当前时隙请求消息以及对最近一个未反馈的请求消息的反馈消息.当前时隙请求消息包括当前使用的频段、UI 序列的标示以及当前发送时隙在序列中的位置.由于共有 4 个频段,因此当前使用的频段用 2 比特表示即可;当前使用序列标示所需的二进制位数可根据  $\lceil \log_2 K_{\max} \rceil$  确定,其中  $\lceil \cdot \rceil$  为向上取整操作,例如当前最大用户数  $K_{\max} = 600$  时,需要  $\lceil \log_2(600) \rceil = 10$  比特表示;在使用生成素数序列时,序列中 1 的个数与其参数  $p$  相同,即等于大于  $K_{\max}$  的最小素数,因此需要  $\lceil \log_2 p \rceil$  比特表示.请求消息广播之后,由于区段长度等于节点通信半径,因此若

某节点请求信息发送成功,区段内其他节点均能接收,下一个成功发送的节点在发送时隙中除了发送其自身请求消息外还将对之前未被反馈的请求信息进行反馈.这两部分信息将在同一个时隙内发送完毕.反馈的内容即为未反馈的请求信息,也就是重新广播未反馈的请求消息,这样总的请求消息及反馈消息共需要 44 比特.通过反馈过程,区段内所有节点均可获知该时隙成功发送并且已被反馈.同时,区段内所有节点调整自身时钟,与该时隙成功发送的节点保持同步,这就进一步修正了时隙同步和帧同步.运用该机制,一个序列周期中除了所有序列中位于最后的发送时隙,每个请求消息都会被下一个最接近的成功发送节点反馈,这也就减少了信息的冗余.

由于 UI 序列的特性,在一个序列周期内,每个序列至少有一个 1 能成功发送,因此尽管所有序列中最后一个 1 发出后得不到反馈,但如果该序列此前的 1 都没有被反馈则可以认为该 1 已成功发送.然而,如果该序列此前的 1 中已有 1 被反馈,则最后这个 1 是否能成功发送不得而知,但是这里只关心一个序列周期中每个节点第一次成功发送 1 的位置,并按照成功发送 1 的顺序依次安排数据传输部分 TDMA 所分配到的时隙.也就是说,同区段的节点通过监听一个序列周期后,不仅可以实现与同区段其他节点的超帧同步还可以统计出同区段内当前节点个数以及成功发送的时隙位置,从而分布式地确定在后续超帧时间内时隙分配方式.

在超帧中数据传输部分,时隙的分配依照探测及同步部分中第一次成功发送的顺序进行分配,并且考虑到公平性,采用循环分配方式.例如节点 A、B、C 在探测及同步部分第一次成功接入的顺序为 BAC,则在数据传输部分即可依照 BAC ACB CBA BAC……的顺序分配时隙,实现统计意义上总时隙的平均分配.该过程每个节点可分布式计算,即所有节点在经历探测及同步部分后,可各自计算自身应获取的时隙位置,无需交互信息,从而提高通信效率,降低网络开销.

当前超帧内,设同一区段的用户数为  $K_{\text{now}}$ ,则显然每个用户能获得有效数据的传输时间为

$$t_i^{\text{data}} = \frac{T - L^{\text{UI-TDMA}} \tau - T_G^{\text{UI-TDMA}}}{K_{\text{now}}} \quad (3)$$

其中,  $L^{\text{UI-TDMA}}$  是探测及同步部分使用的序列的序列周期,若采用  $q = 2p - 1$  的 UI 序列,  $p$  为大于最大可能用户数  $K_{\text{max}}^{\text{UI-TDMA}}$  的最小素数且当  $K_{\text{max}}^{\text{UI-TDMA}}$  较大时 ( $K_{\text{max}}^{\text{UI-TDMA}} > 10$ ),则可近似得到

$$\begin{aligned} L^{\text{UI-TDMA}} &= p^{\text{UI-TDMA}} \cdot (2p^{\text{UI-TDMA}} - 1) \\ &\approx 2 \cdot (K_{\text{max}}^{\text{UI-TDMA}})^2 \end{aligned} \quad (4)$$

设每时隙可发送的比特数为  $b_s$ ,从而单用户平均有效数据吞吐量为:(单位:bps)

$$S_i^{\text{UI-TDMA}} = \frac{(t_i^{\text{data}}/\tau) \cdot b_s}{T} \quad (5)$$

文献[13]基于 GNSS 的机制中,超帧  $T^{\text{GNSS}}$  的表达式写为

$$T^{\text{GNSS}} = F \cdot L^{\text{GNSS}} \cdot \tau + T_G^{\text{GNSS}} \quad (6)$$

其中  $F$  为帧个数;每个帧即为一个序列周期,序列周期长度为  $L^{\text{GNSS}}$ ;  $T_G^{\text{GNSS}}$  为保护间隔,满足  $T_G^{\text{GNSS}} \leq L^{\text{GNSS}}$ .可以看出,两种机制的超帧结构的第一个序列周期都采用 UI 序列,但由于区段长度不同,使用的序列也不同.具体地,由于基于 UI-TDMA 机制的区段长度为基于 GNSS 机制的一半,因此有  $K_{\text{max}}^{\text{GNSS}} = 2 \cdot K_{\text{max}}^{\text{UI-TDMA}}$ ,从而可推得  $L^{\text{GNSS}} = 4 \cdot L^{\text{UI-TDMA}}$ .并且基于 UI-TDMA 机制从第一个序列周期结束的下个时隙开始到保护间隔前最后一个时隙将采用 TDMA,而基于 GNSS 机制在第一个序列周期结束后,将再重复使用  $(F - 1)$  次第一个周期使用的序列,直到进入保护间隔.另外,两个机制的保护间隔长度也不同,基于 UI-TDMA 机制由于进行了相对同步处理,因此保护间隔缩短为 50ms;而基于 GNSS 机制的保护间隔至多将长达一个序列周期的长度,对应的持续时间可能长达数秒.这样,可以求得

$$F = \lfloor \frac{T}{\tau \cdot L^{\text{GNSS}}} \rfloor - 1 \quad (7)$$

由于每个节点之间存在超帧误差,依据文献[14]中吞吐量计算公式,可以推出统计意义下基于 GNSS 机制的用户平均有效数据吞吐量为:(单位:bps)

$$S_i^{\text{GNSS}} = \frac{(f^{\text{GNSS}} (1 - f^{\text{GNSS}})^{K_{\text{max}}^{\text{GNSS}} - 1} \cdot F \cdot L^{\text{GNSS}}) \cdot b_s}{T} \quad (8)$$

其中,UI 协议序列的负载因子为  $f^{\text{GNSS}} = 1/(2p^{\text{GNSS}} - 1)$ ,  $p^{\text{GNSS}}$  为大于  $K_{\text{max}}^{\text{GNSS}}$  的最小素数.同理,当  $K_{\text{max}}^{\text{GNSS}}$  较大时,负载因子可近似为  $f^{\text{GNSS}} \approx 1/(2K_{\text{max}}^{\text{GNSS}})$ .

由于基于 UI-TDMA 机制采用四个频段,因此将与使用单频段的基于 GNSS 机制的 4 倍比较.两种机制吞吐量的比值可表示为:

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{S_i^{\text{UI-TDMA}}}{4S_i^{\text{GNSS}}} \geq \frac{\frac{T - L^{\text{UI-TDMA}} \tau - T_G^{\text{UI-TDMA}}}{K_{\text{now}} \tau}}{4 \cdot f^{\text{GNSS}} \cdot 1 \cdot \left( \frac{T}{\tau \cdot L^{\text{GNSS}}} - 1 \right) \cdot L^{\text{GNSS}}} \\ &= \frac{K_{\text{max}}^{\text{UI-TDMA}}}{K_{\text{now}}} \cdot \frac{T - L^{\text{UI-TDMA}} \tau - T_G^{\text{UI-TDMA}}}{T - 4L^{\text{UI-TDMA}} \tau} \\ &= r_k \cdot r_t \end{aligned} \quad (9)$$

上式可看成由两项组成,第 1 项  $r_k = K_{\text{max}}^{\text{UI-TDMA}}/K_{\text{now}}$  为基于 UI-TDMA 机制中每个区段最大可能用户数  $K_{\text{max}}^{\text{UI-TDMA}}$  和当前用户数  $K_{\text{now}}$  的比值,由于区段内当前用户数必然小于等于最大可能用户数,即  $K_{\text{now}} \leq K_{\text{max}}^{\text{UI-TDMA}}$ ,因此显然有  $r_k \geq 1$ ;第 2 项  $r_t = (T - L^{\text{UI-TDMA}} \tau - T_G^{\text{UI-TDMA}})/(T - 4L^{\text{UI-TDMA}} \tau)$  为与时间有关的因子,其中  $L^{\text{UI-TDMA}} \tau$  为基于 UI-TDMA

机制中探测及同步部分的 UI 序列周期,通常以秒为数量级,而  $T_c^{\text{UI-TDMA}}$  为该机制超帧中保护间隔,数量级为毫秒,因此可以得到  $r_i \geq 1$ . 从而可以证明  $S_i^{\text{UI-TDMA}} \geq 4S_i^{\text{GNSS}}$ , 即从理论上证明基于 UI-TDMA 的机制的用户平均有效数据吞吐量性能将优于基于 GNSS 的机制. 另外,从公式(1)、(2)、(4)可以看出,超帧时间  $T$ 、区段内最大可能用户数  $K_{\max}^{\text{UI-TDMA}}$  及 UI 序列周期  $L^{\text{UI-TDMA}}$  均为节点通信半径  $R$  的函数,因此  $r_s$  可归结为仅由节点通信半径  $R$  和区段内当前用户数  $K_{\text{now}}$  决定. 从理论上讲,当给定  $K_{\text{now}}$  时,随着  $R$  的增大,  $T$ 、 $K_{\max}^{\text{UI-TDMA}}$  及  $L^{\text{UI-TDMA}}$  均递增,从而  $r_s$  也将递增,也就是说区段内当前用户数一定时,节点通信半径越大,基于 UI-TDMA 机制的吞吐量性能优势越明显;当给定  $R$  时,  $T$ 、 $K_{\max}^{\text{UI-TDMA}}$  及  $L^{\text{UI-TDMA}}$  均为常量,从而  $r_i$  为常量,  $r_k$  则与  $K_{\text{now}}$  的变化成反比,也就是说,当节点通信半径一定时,当前用户数越少,基于 UI-TDMA 机制的吞吐量性能优势越明显. 上述结论在性能仿真与分析部分将得到进一步证实.

需要说明的是,由于车辆的移动性,在超帧期间不同区段的车辆可能出现交错,而交错将导致隐藏点问题和区段间节点通信问题. 其中,隐藏点问题已通过超帧长度解决,而对于区段间节点通信问题上,也已令节点采用使用当前区段对应频段发送,在四个频段均可接受的模式解决.

#### 4 性能仿真与分析

该部分将在 MATLAB 的仿真环境下模拟高速公路场景中 UI-TDMA 机制的各项性能,并与文献[13]中基于 GNSS 的算法进行比较. 高速公路限速为 80 ~ 120km/h, 对向行驶的车辆间链路生存时间很短,因此只考虑同向行驶车辆间通信,且可得出最大相对速度约为 10m/s. 高速公路中紧急停车带较少使用,因此单个行车方向上车道数为 3,每个车道宽度 3.75m. 节点间最大通信距离依据 IEEE 802.11p 的规定设定为 1km,最小通信半径依据高速公路安全车距设定为 100m,两者都远大于道路宽度,因此可以认为均分法中区段长度的对角线长度与区段长度相等,即假定区段长度等于通信半径时,区段内任意位置两个车辆节点都在对方的一跳范围内. 节点间通信信道及物理层参数依照 IEEE 802.11p 进行设置. 其他参数设定如下:时隙长度设为 13 $\mu$ s;车辆长度设为 5m,并假设每个小区恰能容下一辆车;用于探测的比特数为 44 比特;保护时间间隔为 50ms.

本文着重解决高速公路场景下 VANET 中用户的吞吐量问题,因此以用户平均有效数据吞吐量作为性能指标. 将用于探测、同步等数据归属于网络开销,则用户平均有效数据吞吐量可定义为单位时间内平均每个用户扣除网络开销数据量后发送的物理层数据量,单

位为 Mbps. 需要说明的是,由于基于 UI-TDMA 的信道接入机制中以 4 个区段为周期循环配置,每个区段使用 1 个 IEEE 802.11p 的业务信道发送 4 个业务信道接收,而文献[13]基于 GNSS 的机制中每个区段均可同时使用 4 个业务信道收发,因此本文所提机制的用户平均有效数据吞吐量性能将与基于 GNSS 机制的 4 倍比.

##### 4.1 车流密度的影响

给定车辆节点通信半径为 1km,则区段长度也为 1km,设定超帧时间为 100s. 考虑到当节点通信半径范围内无邻居节点时无法进行通信,因此车流最稀疏的情况对应的最小车流密度为平均每个区段 2 个车辆节点. 若设定车长为 5m 且车道数为 3,则车流密度最密集的情况为区段内每个小区均被车辆节点占领,这样对应的最大车流密度为平均每个区段 600 个车辆节点. 设定物理层数据速率设定为 6Mbps,基于 UI-TDMA 的用户平均有效数据吞吐量的仿真值、理论值如图 3 所示,并与相应的基于 GNSS 的信道接入机制比较. 可以看出,节点越稀疏,UI-TDMA 的优势越明显. 这是因为基于 GNSS 的机制中每个节点仅使用一个序列,且该序列依照区段内最大可能用户设定,因此节点密度越低则序列集合中未被利用的序列就越多. 而在基于 UI-TDMA 的机制中,除探测及同步部分的时隙以及保护间隔所占用的时隙外,超帧内的时隙几乎完全被区段内所有用户均分使用,而这种均分行为是分布式且自适应的,即可自发地针对区段内用户数进行统计意义上均分,提高了时隙的利用率从而提高吞吐量性能. 这样在车流密度越稀疏的情况下,基于 UI-TDMA 机制中节点可比基于 GNSS 的机制中获得更多的时隙资源,从而表现出吞吐量性能优势更明显.

##### 4.2 车辆节点通信半径的影响

本文假定所有车辆节点使用相同的发射功率,在高速公路的场景下,其通信半径可近似为均等. 理论上,相同的车流密度下节点通信半径越大,则通信范围内可接收到邻居节点信息数据量越大,但节点间通信干扰程度也越大,因此若采用“竞争型”信道接入机制将导致节点接入时延增大影响服务质量,而采用“非竞争”信道接入机制则可以很好解决这个问题,该部分将仿真这一方面的性能.

在常规高速公路场景下,即无事故不拥堵的情况下,车辆间保持较大间距(100m 以上),总体上看节点通信半径范围内(1000m 以内)车流密度较为稀疏(约为 30 辆/km),因此仿真参数中当前用户数设定为 30 辆/km,其他参数与 4.1 中相同,模拟节点通信半径从 100 ~ 1000m 变化时用户平均有效数据吞吐量的变化,并与基于 GNSS 的机制比较,仿真结果如图 4 所示. 由图可见,随着节点通信半径增大,基于 GNSS 的机制用

户平均有效数据吞吐量性能持续下降,总体下降了一个数量级,而基于 UI-TDMA 机制的性能只有略微下降,总体基本保持不变,在大通信半径覆盖时比基于 GNSS 机制性能高出 2 个数量级.这是因为节点通信半径越大将导致区段长度越大.当小区大小一定时,区段长度越大则最大可能用户数越多,从而设计的序列周期越长,并且序列的负载因子越小<sup>[14]</sup>,即节点发送数据的时间占一个序列周期时间的比例越低.在基于 GNSS 的机制中,每个节点始终只使用一个 UI 协议序列作为发送依据,因此节点通信半径越大,一个序列周期中空闲却无法利用的时隙就越多,即用户平均有效数据吞吐量越低.而在基于 UI-TDMA 的机制中,除了探测和同步部分使用根据区段最大可能用户数设计的 UI 协议序列外,在数据传输部分使用 TDMA 进行高效率地时隙分配.当节点通信半径增大时,尽管探测和同步部分也使用了具有更长序列周期且更低负载因子的 UI 序列,但超帧持续时间也增长,一方面弥补了探测和同步部分损失的吞吐量,另一方面每个节点在数据传输部分分配的时隙数也增加,进一步提升吞吐量性能,因此总体

上看用户平均有效数据吞吐量性能只有略微损失.

### 4.3 物理层数据传输速率的影响

不同业务将对应不同的物理层数据传输速率需求,因此需要模拟不同物理层数据传输速率下用户的平均有效数据吞吐量.图 5 描绘了该影响因素下,基于 UI-TDMA 的机制与基于 GNSS 的机制的性能对比.给定区段内当前用户数 30 辆,节点通信半径为 1000m,物理层数据传输速率变化范围依照 IEEE 802.11p 标准设定为 3~27Mbps,显然数据传输速率越大,用户平均有效数据吞吐量越大,因此图 5 中两条曲线都呈上升趋势.另外,图 5 中两条曲线的性能差距随数据传输速率增大而变大,且基于 UI-TDMA 机制的性能比基于 GNSS 机制的性能高出两个数量级.这是因为在每个时隙允许发送的比特总数越大,可用于传输有效数据的比特量就越多.尽管在基于 UI-TDMA 机制中只有超帧的数据传输部分才传输数据,但在 TDMA 模式下平均每个用户能分配到的时隙总数要明显多于基于 GNSS 机制,因此较基于 GNSS 信道接入机制的性能优势就越明显.

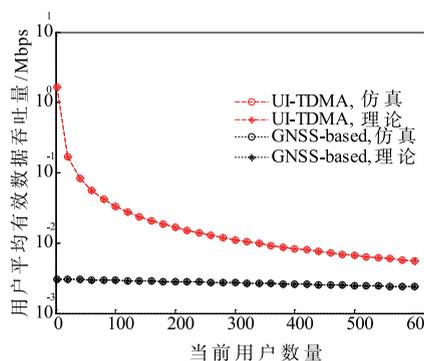


图3 当前用户数量对用户平均数据吞吐量的影响

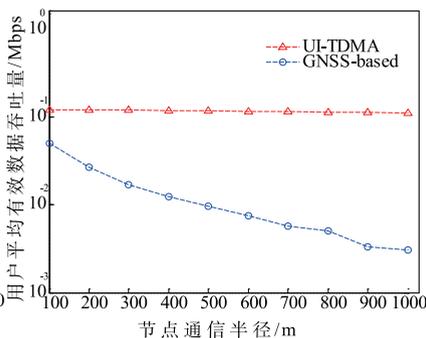


图4 节点通信半径对用户平均数据吞吐量的影响

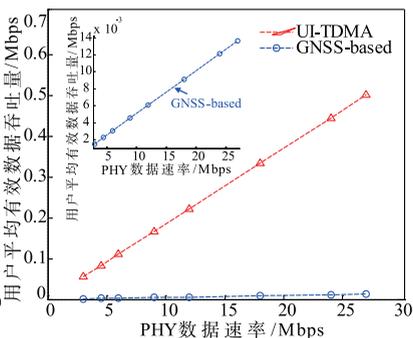


图5 物理层传输速率对用户平均数据吞吐量的影响

## 5 结论

为提高在高速公路场景下车辆节点的用户平均有效数据吞吐量,本文将基于用户保障(UI)协议序列的信道接入机制与 TDMA 模式相结合,提出基于 UI-TDMA 混合信道接入机制.该机制隶属于“非竞争”分布式 TDMA 的信道接入机制,并且具有分布式的序列及时隙分配方式,因此适用于具有动态拓扑的 VANET,且可自适应于车流密度的动态变化.在道路方面,进行区段划分并构建与 IEEE 802.11p 中业务信道的映射,从而解决协议序列复用问题以及隐藏点问题;在帧结构方面,通过规划探测与同步部分、数据传输部分以及保护间隔,实现超帧同步修正以及及时隙高效利用,其中探测与同步部分使用 UI 序列,利用其序列特性实现同区段邻居节点探测以及超帧起始点的相对同步,数据传输部分以探测与同步部分获取的信息为基础实现同区段内

各节点之间的时分多址接入,即实现统计意义上的时隙均分.仿真结果表明,在不同的车流密度下,基于 UI-TDMA 机制的用户平均有效数据吞吐量性能比经典的基于 GNSS 机制高出 1~2 个数量级;在不同的节点通信半径下,所提机制的吞吐量性能几乎保持一致,侧面体现了优良的抗干扰性能;并且若物理层数据传输速率越大,则所提机制的性能优势较基于 GNSS 的机制越明显.在下一步的研究中,可在频段使用上加以优化,进一步提高频谱利用率.

### 参考文献

- [1] Hartenstein H, Laberteaux K P. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(6): 164-171.
- [2] Chang S W, Sang-Sun L. A routing protocol for urban vehicular multi-hop data delivery[J]. Chinese Journal of E-

- lectronics, 2016, 25(2): 348 – 356.
- [3] Jurdak R, Lopes C V, Baldi P. A survey, classification and comparative analysis of medium access control protocols for ad hoc networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2004, 6(1): 2 – 16.
- [4] Gast M S. 802. 11 Wireless networks, The definitive Guide [J]. Oreilly, 2002, 32(11): 111 – 124.
- [5] Qiu H J F, Ho W H, Tse C K, et al. A methodology for studying IEEE 802. 11p VANET broadcasting performance with practical vehicle distribution [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10): 4756 – 4769.
- [6] Haddad M, Muhlethaler P, et al. TDMA-based MAC protocols for vehicular Ad Hoc networks: A survey, qualitative analysis and open research issues [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2461 – 2492.
- [7] Zou R, Liu Z, Zhang L, et al. A near collision free reservation based MAC protocol for VANETs [A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) [C]. Istanbul: IEEE, 2014. 1538 – 1543.
- [8] Omar H A, Zhuang W, Li L. Evaluation of VeMAC for V2V and V2R communications under unbalanced vehicle traffic [A]. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall) [C]. Québec: IEEE, 2012. 1 – 5.
- [9] Zhang L, Liu Z, Zou R, ET AL. A scalable CSMA and self-organizing TDMA MAC for IEEE 802. 11 p/1609. x in VANETs [J]. Wireless Personal Communications, 2014, 74(4): 1197 – 1212.
- [10] Abdalla G M, Abu-Rgheff M A, Senouci S M. Space-orthogonal frequency-time medium access control (SOFT MAC) for VANET [A]. Proceedings of Information Infrastructure Symposium [C]. Tunisia: IEEE, 2009. 1 – 8.
- [11] Dang D N M, Dang H N, Nguyen V D, et al. HER-MAC: A hybrid efficient and reliable mac for vehicular Ad Hoc networks [A]. Proceedings of IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA) [C]. Victoria: IEEE, 2014. 186 – 193.
- [12] Zhang Y, Shum K W, Wong W S, et al. Binary sequences for multiple access collision channel: identification and synchronization [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(2): 667 – 675
- [13] Wong W S. Transmission sequence design and allocation for wide area Ad Hoc networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(2): 869 – 878.
- [14] WU Y, SHUM K W, SU Q, et al. Safety messages broadcast in vehicular Ad Hoc [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(3): 1467 – 1479
- [15] Panichpapiboon S, Lin C. Irresponsible forwarding under real intervehicle spacing distributions [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5): 2264 – 2272.
- [16] Chaqfeh M, Lakas A. Speed adaptive probabilistic broadcast for scalable data dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks [A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC) [C]. Cyprus: IEEE, 2014. 207 – 212.
- [17] Ros F J, Ruiz P M, Stojmenovic I. Acknowledgment-based broadcast protocol for reliable and efficient data dissemination in vehicular Ad Hoc networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(1): 33 – 46.
- [18] Zhang L, Liu Z, Zou R, et al. A scalable CSMA and self-organizing TDMA MAC for IEEE 802. 11 p/1609. x in VANETs [J]. Wireless Personal Communications, 2014. 74(4): 1197 – 1212.
- [19] Campolo C, Vinel A, Molinaro A, et al. Modeling broadcasting in IEEE 802. 11p/WAVE vehicular networks [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(2): 199 – 201.
- [20] Mistic J, Badawy G, Mistic V B. Performance characterization for IEEE 802. 11 p network with single channel devices [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1775 – 1787.

#### 作者简介



**徐哲鑫** 男, 1985 年生于福建福州, 博士, 福建师范大学讲师, 主要研究方向为无线自组织网。

E-mail: xuzhexin@fjnu.edu.cn



**蔡苓玲** 女, 1992 年生于福建泉州, 福建师范大学硕士生, 主要研究方向为无线自组织网、传输序列等。

E-mail: fsd\_c@sina.cn



**郑丽丽** 女, 1990 年生于福建省福鼎市, 福建师范大学硕士, 主要从事车载自组织网络通信方面的研究。

E-mail: zhenglili1001@qq.com

**吴怡 (通讯作者)** 女, 1970 年生于辽宁葫芦岛, 福建师范大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线自组织网、无线视频传输。

E-mail: wuyi@fjnu.edu.cn