

基于协议序列的车辆自组织网络信道接入控制算法

吴 怡^{1,4}, 沈颖祺², 沈连丰¹, 黄永成³

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096; 2. 香港中文大学网络编码研究所, 香港;
3. 香港中文大学信息工程学系, 香港; 4. 福建师范大学物理与光电信息科技学院, 福建福州 350007)

摘要: 针对如何提高车辆自组织网络无线信道资源利用率问题, 提出了一种分布式车辆间通信信道接入控制算法, 该算法具体表示为利用中国余数定理设计一种用户保障协议序列, 车辆节点(亦称用户)依据该协议序列决定其对通信信道的接入, 无需基站或中心节点的协调, 所设计的协议序列确保每个车辆节点在一个序列周期内至少成功发送一次数据. 仿真结果表明, 采用本文提出的协议序列控制算法比无反馈时隙 ALOHA 接入控制算法具有更小的传输时延, 能够满足车辆自组织网络通信实时性的要求.

关键词: 车辆自组织网络; 协议序列; 用户保障序列; 时隙 ALOHA; 传输时延

中图分类号: TN919.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 04-0826-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.04.033

Protocol Sequences Based Channel Access Control Algorithm in Vehicular Ad Hoc Networks

WU Yi^{1,4}, SHUM Wing-ki², SHEN Lian-feng¹, WONG Wing-shing³

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Institute of Network Coding, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China;

3. Department of Information Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China;

4. School of Physics and OptoElectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A distributed medium access control algorithm applied in vehicular ad hoc networks is presented to improve the utilization rate of wireless channel. It includes the construction of a kind of user irrepressibility protocol sequence based on Chinese Remainder Theorem, and the assignment of the protocol sequences to the vehicular nodes which are also called users. The vehicular nodes transmit or receive the packet according to the assigned sequences instead of the coordination by base station or access point. The designed user irrepressibility protocol sequences can guarantee that each vehicular user can successfully transmit a packet within a period. The simulation results show that the transmission delay under the control of protocol sequences mentioned is less than that of slotted ALOHA.

Key words: vehicular ad hoc network; protocol sequences; user irrepressibility; slotted ALOHA; transmission delay

1 引言

车辆自组织网络 (Vehicular Ad Hoc Networks, VANET) 是指行驶的车辆与车辆间、车辆与路边节点间组成的一种临时性通信网络, 近年来引起众多学者、研究机构以及车辆生产厂家的研究兴趣. VANET 的关键技术研究主要包括物理层设计、MAC 层信道接入控制机制、网络层路由协议设计以及传输控制机制等. 文献 [1] 综述并分析了近年来提出的 VANET MAC 机制, 文献

[2,3] 研究了城市场景下的 VANET 路由算法. 由于车辆节点的快速移动, VANET 具有较大的临时性, 传统的移动自组织网络 (Mobile Ad Hoc Network, MANET) 的一些 MAC 协议并不适合 VANET. 目前已提出的针对 VANET 的 MAC 协议主要有 IEEE 802.11p 的车辆环境的无线接入 (Wireless Access in Vehicular Environments, WAVE) 协议 [4] 和 CarTALK2000 项目中采用的 ADHOC MAC 协议 [5]. WAVE 采用 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 接入控制算法, 是一种竞争式

收稿日期: 2011-05-04; 修回日期: 2012-01-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (No. 2008AA012205); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60872004); 香港特别行政区研究基金会资助项目 (No. 417909); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (No. NCET-10-0018); 福建省高校新世纪优秀人才支持项目 (No. JA10060); 福建省自然科学基金资助项目 (No. 2010J01320)

的 MAC 协议,需要发送方和接收方 RTS/CTS(Request To Send/Clear To Send)信息的交互,必须有反馈信道,发生多用户同时争用信道时采用退避算法,协议较为复杂. WAVE 可以比较好地解决隐藏终端问题,但是它的实时性较差,亦不太适合对实时性要求很高的 VANET 应用. ADHOC MAC 是一种基于时隙的同步预约式 MAC 协议,它提出一种新的随机接入方式 RR-ALOHA (reliable reservation ALOHA),该协议是对 R-ALOHA 的一种改进,节点通过每帧周期地广播帧信息(frame information, FI),让所有的邻节点都知道每个时隙的信道使用情况,有节点加入时,先侦听一个时隙的时间,再预约空闲的时隙做为自己的发送时隙,该预约被邻节点在其 FI 中标识出,新加入节点在一帧内收到的邻节点的 FI 中如果都标示出了它的预约,则认为新加入节点成功地预约了该时隙.该方式可以解决隐藏终端和暴露终端问题,但是要求节点需要经过一个帧的侦听时间再加上一个帧时间的确认后才能找到自己可用的信道接入时隙.文献[6]提出了自适应调整发送数据包大小以提高车辆节点竞争信道接入的公平性的方法.

本文提出一种利用精心构造的协议序列(Protocol Sequence)来实现 VANET 中用户信道接入控制的方法,称之为基于协议序列的 VANET 信道接入控制算法.协议序列最早由 Massey 和 Mathys 于 1985 年提出^[7],是一种按照所提方法设计的周期性二进制序列,本文将其用于控制用户对信道的接入.在以往的协议序列研究中,主要目的是如何构造合适的协议序列以提高系统的平均吞吐量,支持更多用户.本文的研究重点是基于协议序列信道接入控制系统的时延性能.在实时性要求较高的应用中,时延这个指标至关重要,比如在 VANET 中,每辆车总是希望能够及时地发送出自己的行驶信息,并且能够及时地收到在本车一跳组网范围内的其他车辆的行驶信息,这对于驾驶者实时了解其行驶环境有着重要意义.协议序列与 CSMA/CA 以及时隙 ALOHA(slotted ALOHA)相比具有较强的优势,它不需要 CSMA/CA 协议和时隙 ALOHA 所要求的退避算法和反馈信道,在一帧时间内不会发生碰撞.

本文就 VANET 应用场景将所设计的协议序列系统性能与无反馈的时隙 ALOHA 进行比较.首先给出基于协议序列的 VANET 系统模型和算法描述,讨论协议序列构造,并对传输时延及系统吞吐量这两个性能指标进行理论分析,然后讨论 VANET 中车辆节点协议序列的分配,最后论述系统仿真并给出全文结论.

2 系统模型和算法描述

考虑的 VANET 应用场景是道路上行驶的车辆间相互通信,每辆车定期发送自己的行驶信息,包括车辆位

置、行驶方向、行驶速度等,通信范围内的所有车辆均接收网中其他车辆发送的该信息,以使每辆车都能及时获知周围车辆的行驶信息.这样,即使在天气恶劣或视线受阻等情况下,每辆车仍然能够获知周围车辆的位置、行驶情况,以保证车辆路上行驶的安全.

假定 VANET 的工作信道为 5.9GHz 专用短距离通信(Dedicated Short Range Communications, DSRC)频段,由 VANET 中的 M 个车辆节点(亦称用户)共享,采用时分方式将一帧分为若干个等长的时隙,每个车辆节点在自己的可用时隙发送数据包,广播自己的行驶信息,在其他时隙接收周围其他车辆的行驶信息.系统模型为分布式,即没有中心站的协调控制,车辆之间没有反馈消息的交互,每辆车依据分配给自己的协议序列来决定自己的信道接入时间,分配方法将在第 5 节给出.

本文提出的基于协议序列的车辆通信算法描述如下:(1)车辆节点采用时隙同步的工作方式.时隙同步是指车辆节点知道时隙的起点,从帧内任意时隙的起点处开始工作,若节点 i 的接入时延为 τ_i ,那么 τ_i 是时隙长度的整数倍.(2)精心构造协议序列并分配给组网的车辆,由协议序列控制车辆节点对通信信道的接入.组网的每个车辆分配到一个二进制的协议序列,假设车辆节点 i 的序列为 $s_i = \{s_i(t), t = 0, 1, 2, \dots\}$,在时隙 $t + \tau_i$,如果 $s_i(t + \tau_i) = 1$,节点发送自己的广播消息;如果 $s_i(t + \tau_i) = 0$,节点等待接收其他节点的消息;如果在同一个时隙有两个或两个以上的节点同时发送消息,则认为信道发生了碰撞,发送的消息发生丢失.即,在一个信道为 M 个用户共用且不知道用户接入时延、没有信道反馈信息的情况下,每个用户由各自的协议序列控制其对信道资源的使用.

3 用户保障协议序列的构造

近年来不少学者提出了一些好的协议序列的构造方法,生成了素数序列(Prime Sequences, PS)^[8]、摇摆序列(Wobbling Sequences, WS)^[9]以及中国余数定理序列(Chinese Remainder Theorem Sequences, CRT)^[10]等,并从两个不同的方面对协议序列的构造进行了研究,将协议序列分类为移位不变(Shift Invariance, SI)序列^[11]和用户保障(User Irrepressibility, UI)序列^[12].SI 序列的设计目标是无论用户从序列的什么时刻开始工作,系统的吞吐量都不会有任何的变化.UI 序列的设计目标是无论用户从序列的什么时刻开始,保证每个用户在序列的一个周期长度 L 期间内一定能够成功地发送一个数据包.下面针对 VANET 应用场景,讨论怎样构造合适的 UI 序列以满足车辆间通信的 MAC 层接入控制要求.

3.1 协议序列的有关定义

(1)负载因子

一个长度为 L 的周期性二进制序列 $a(t)$, 序列中 1 的个数定义为汉明重量, 用 w 表示; 其负载因子 f_{duty} (duty factor) 定义为汉明重量除以序列长度, 即

$$f_{duty} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{L} \sum_{t=0}^{L-1} a(t)$$

负载因子值的大于可以用来表示能量消耗情况. f_{duty} 在数值上为 w/L .

(2) 特征集

令 $Z_L = \{0, 1, 2, \dots, L-1\}$ 表示个数为 L 的循环群. 长度为 L 的二进制序列 $s(t)$, 其特征集 I_s 定义为

$$I_s \stackrel{\text{def}}{=} \{t \in Z_L : s(t) = 1\}$$

特征集 I_s 表示序列中 1 的位置.

协议序列具有循环移位性, 如果一个序列中所有 1 的位置与其他序列循环移位后 1 的位置相同, 则表明这个序列的每个发送时隙都与其他序列的发送时隙重合, 发送的数据包会发生碰撞, 无法在一个周期内成功地发送数据包.

由文献[12]可知, UI 序列能保证在一个周期内, 每个序列中至少有一个 1 不与其他序列中 1 的位置相同.

3.2 CRT-UI 序列的构造

CRT 序列的构造方法基于中国余数定理. 给定一个素数 p , p 大于等于网络中的用户数, 令 $q = 2p - 1$, p 与 q 为互素, 序列的周期 $L = pq$, 负载因子 $f_{duty} = 1/q$. 对应的 UI 序列构造如下.

(1) 利用中国余数定理建立二维矩阵和一维数组之间的对应关系

假设一个 $m \times n$ 矩阵

$$A = \begin{bmatrix} a(0,0) & \cdots & a(0, n-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a(m-1,0) & \cdots & a(m-1, n-1) \end{bmatrix}$$

如果 m 与 n 互素, 矩阵 A 与包含 mn 个元素的一维数组 $b = [b_0, b_1, \dots, b_{mn-1}]$ 之间有如下对应关系:

$$b_i = a(i \bmod m, i \bmod n)$$

这里 $i \bmod m$ 表示 i 对 m 取模, 为 i 除以 m 后的余数.

(2) 确定序列的特征集

构造协议序列, 主要是要确定序列中 1 的位置, 即序列的特征集表示. 对于 CRT 序列, 其特征集定义为

$$I_1 = \{(0,0), (q,0), (2q,0), \dots, ((p-1)q,0)\}$$

$$I_g = \{(gy \bmod p, y) \in Z_p \oplus Z_q : y = 0, 1, \dots, p-1\}$$

其中 g 为生成数, 且 $g = 2, 3, \dots, p$.

(3) 生成 CRT-UI 序列

得到特征集后, 即可构造序列 $s_i(t)$.

4 性能分析

本文将主要研究基于协议序列控制方式的 VANET

的系统吞吐量和传输时延, 并与无反馈的时隙 ALOHA 系统相比较. 系统吞吐量定义为一帧中成功发送数据包的时隙数占总时隙数的比例; 传输时延可分为发送时延和接收时延, 发送时延 X_k 定义为车辆节点 k 第一次成功地发出一个数据包所用的时隙数, 接收时延 Y 定义为从某个时隙开始, 网络中的所有车辆节点至少成功发出一个数据包所用的时隙数. 接收时延也可以用组网的节点的最大发送时延来表示, 即

$$Y \stackrel{\text{def}}{=} \max\{X_k : k = 1, 2, \dots, M\} \quad (1)$$

4.1 系统吞吐量

在本文研究的无反馈时隙 ALOHA 系统中, 假设用户 k ($k = 1, 2, \dots, M$) 在时隙 l ($l = 1, 2, \dots, L$) 以相同的概率 p_A 发送数据包, 组网的用户节点总数为 M , 我们通过分析已得平均系统吞吐量为^[13]

$$S_{S-ALOHA} = Mp_A(1 - p_A)^{M-1} \quad (2)$$

采用类似的分析方法, 假设由 M 个节点构成的 CRT-UI 系统, 其协议序列的负载因子为 f_{duty} , 则系统的平均吞吐量为

$$S_{CRT-UI} = Mf_{duty}(1 - f_{duty})^{M-1} \quad (3)$$

4.2 传输时延

(1) 无反馈时隙 ALOHA 系统的传输时延

假定网络中的用户数为 M , 用户之间相互独立, 每个用户在每个时隙以概率 p_A 发送数据包, 则该用户在一个时隙能够成功发送数据包的概率为

$$\alpha = p_A(1 - p_A)^{M-1}$$

设用户 k 在第 X_{jk} 时隙第一次成功地接收到用户 j 的数据包, 则其概率分布函数为

$$P_{S-ALOHA}(X_{jk} = i) = (1 - \alpha)^{i-1} \alpha \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

令 $X_k = \max_{j \neq k} X_{jk}$ ($j, k = 1, 2, \dots, M-1$), 则 X_k 可以用来表示用户 k 收到周围其他 $M-1$ 个用户数据包所用的时间, 求其数学期望即可得无反馈时隙 ALOHA 系统的接收时延.

$$\begin{aligned} E[X_k] &= \sum_{i=1}^{\infty} P_{S-ALOHA}(X_k \geq i) = \sum_{i=1}^{\infty} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^M P_{S-ALOHA}(X_j < i) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} (1 - (1 - \alpha)^{i-1})^{M-1} \end{aligned}$$

(2) CRT-UI 序列系统的传输时延

首先分析 CRT-UI 序列系统的发送时延. 发送时延的大小与发送数据包的间隔时间有关, 发送数据包的间隔时间由协议序列决定, 发送模式周期性地重复.

假定用户 k , 其协议序列为 $s(t)$, 特征集 $I_k = \{x_{[1]}, x_{[2]}, \dots, x_{[w]}\}$, $x_{[1]} < x_{[2]} < \dots < x_{[w]}$, 周期为 L , 其接入时延为 τ . 令 $I_k + \tau = \{x_{[1]}^{\tau}, x_{[2]}^{\tau}, \dots, x_{[w]}^{\tau}\}$, $x_{[2]}^{\tau}, \dots, x_{[w]}^{\tau}$ 为按升序排列的整数. 则其发送时延 X_k 的

概率为

$$P_{CRT-UI}(X_k \leq x | \tau) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq x_{[1]}^{(\tau)} \\ p_n & x_{[n]}^{(\tau)} \leq x \leq x_{[n+1]}^{(\tau)} \end{cases}$$

其中

$$p_n = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \binom{n}{i} \left(1 - \frac{iw}{L}\right)^{M-1}$$

式中 $n = 1, 2, \dots, w$. 当 $M \leq n \leq w$ 时, 概率 p_n 的值为 1, 这保证了用户 j 不会被其他用户屏蔽, 即 $P_{CRT-UI}(X_k \leq x_{[k]}^{(\tau)} | \tau) = 1$. X_k 的条件期望值为

$$\begin{aligned} E[X_k | \tau] &= \sum_{t=1}^{\infty} P_{CRT-UI}(X_k \geq t | \tau) \\ &= \sum_{t=0}^{L-1} (1 - P_{CRT-UI}(X_k \leq t | \tau)) \end{aligned} \quad (4)$$

因为当 $t \geq L$ 时, $P_{CRT-UI}(X_k \geq t | \tau) = 0$, 因此无限求和可以用有限求和来替换. 式(4)中求和的第一项表示序列中第一个 1 所在的时隙位置, $x_{[1]}^{(\tau)}$, 对应 $t = 0, 1, \dots, x_{[1]} - 1$, 其概率为 1, 第二项为第二个 1 和第一个 1 之间的间隔, 即 $x_{[2]}^{(\tau)} - x_{[1]}^{(\tau)}$, 对应 $t = x_{[1]}^{(\tau)}, x_{[1]}^{(\tau)} + 1, \dots, x_{[2]}^{(\tau)} - 1$, 其概率为 $1 - p_1$, 依次类推, 将所有项组合可得

$$E[X_k | \tau] = x_{[1]}^{(\tau)} + \sum_{n=1}^{M-1} (1 - p_n)(x_{[n+1]}^{(\tau)} - x_{[n]}^{(\tau)}) \quad (5)$$

只需求得 $n = M - 1$, 因为当 $n \geq M$ 时, $p_n = 1$.

对式(5)所有 τ 求和, 可得

$$\begin{aligned} E[X_k] &= \sum_{\tau=0}^{L-1} E[X_k | \tau] \\ &= \sum_{\tau=0}^{L-1} x_{[1]}^{(\tau)} + \sum_{n=1}^{M-1} (1 - p_n) \sum_{\tau=0}^{L-1} (x_{[n+1]}^{(\tau)} - x_{[n]}^{(\tau)}) \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可得 CRT-UI 系统的发送时延.

根据式(1)对接收时延的定义, 可知概率 $P_{CRT-UI}(Y \leq t)$ 等价于概率事件 $\bigcap_{k=1}^M \{X_k \leq t\}$. 随机变量 X_k 不独立, 为简单起见, 假设 X_k 统计独立, 因此, 接收时延 Y 的概率可近似用下式计算:

$$P_{CRT-UI}(Y \leq t) = \prod_{k=1}^M P_{CRT-UI}(X_k \leq t) \quad (7)$$

5 VANET 中车辆节点的协议序列的分配

考虑的 VANET 场景是车辆节点构成分布式自组织通信网络, 没有基站(或中心节点)控制. 本节讨论如何将协议序列分配给车辆节点, 考虑了 3 种分配方式, 分别是预分配、路边节点分配和基于位置分配.

在预分配方式中, 假定将协议序列预先分配给每个车辆节点. 比如, 预写到车辆节点通信装置的 EPROM 或 FLASH 中, 车辆节点在启动车内通信设备时, 即可以按预先设置的协议序列控制对通信信道的接入. 由于协议序列的生成与网络中的用户数有关, 因此, 在预分

配方式中需考虑分配给用户的序列总数, 即选择合适的素数 p . 在 VANET 中, 可以综合考虑路况、车道及车辆节点的通信范围, 来确定在一跳通信范围内需要设计的协议序列的个数. 需要注意的是, 应该保证通信范围内分配给车辆的协议序列的唯一性, 如果有两个或两个以上车辆节点采用了同一个协议序列, 有可能会发生冲突, 造成车辆用户无法发送消息. 预分配方式执行简单, 但在实际中, 路上行驶车辆的速度各不相同, 保持使用同一个协议序列组的车辆始终在同一个一跳的通信网络内并不现实, 如果考虑更多的可能用户, 那么协议序列在设计中就要选择大的 p , 相对应的序列周期长度 $L = pq$ 会很长, 保证每个用户能够成功发送一个数据包所需的时间上限比较长, 这将不利于信息传输实时性, 因此它较适合于车辆数不是特别多的情况.

路边节点分配方式是指比如在单向四车道高速公路的车辆通信场景中, 可以按照车辆进入高速公路的顺序, 在高速公路入口处开始设置一些路边节点, 由路边节点分配协议序列给进入其通信范围内的车辆. 车辆进入下一个路边节点的通信范围内时可以向该路边节点报告其使用的协议序列情况, 路边节点检查是否在通信范围内有相同的车辆使用同样的协议序列, 如果有, 则分配一个新的协议序列给后进来的车辆. 此外, 路边节点通过接收车辆节点的报告信息, 可以了解其周围车辆数的多少, 根据车辆数目动态调整协议序列的生成程序, 产生满足路上车辆间通信需要的协议序列个数. 采用路边节点分配的办法可以有效地解决隐藏终端及暴露终端的问题.

基于位置的分配方式是指依据路上行驶的车辆的位置来分配协议序列, 即: 将道路划分为若干个格子, 每个格子对应一个协议序列, 协议序列可以依据当前格子的地理位置参数生成. 车辆首次获得分配的协议序列后, 保持使用该协议序列, 经过一段行驶时间后, 车辆通过自己的位置获取装置(如 GPS)刷新自己的地理位置, 并根据当前的地理位置生成并选择新的协议序列. 基于位置的分配方式由于定时根据车辆节点所处的位置对所用协议序列进行更新, 可保证每个车辆节点所用的序列的唯一性, 但是协议序列的生成方式相对比较复杂, 且要求每个车辆节点设备中必须内置序列生成程序. 基于位置的分配方式可以有效地解决隐藏终端和暴露终端的问题.

6 系统仿真

本文采用 NS2 仿真器建立 VANET 在高速公路上的一个应用场景, 设计了基于协议序列进行信道接入控制的车与车之间的通信. 具体场景为, 一个单向四车道的高速公路, 车辆均匀分布在 1200m 长的路段. 每个车

辆节点的一跳通信范围为 300m,为了能够准确地观测车辆与周围其他车的通信情况,我们选取中间 600m 范围内的车辆进行观察,因为在此范围内的车辆其前后通信范围内都有车.物理层采用衰落信道的模型,车辆节点的接收功率表示为

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^4 L}$$

式中: P_t 为发射功率; G_t 为发射天线增益; G_r 为接收天线增益; L 是系统损失参数; λ 为波长, d 为发射节点与接收节点之间的距离.系统详细仿真参数如表 1 所示.

本文主要分析了仿真系统的接收时延,接收时延的统计方法是,记录每个车辆节点从某一时刻开始成功地接收到其通信范围内其他所有车辆节点所需的时隙数,平均传输时延是对观察范围内所有车辆节点的传输时延求平均.

表 1 仿真参数

仿真参数	参数值
车速	28m/s
工作频段	5.9GHz
发送数据速率	6Mbps
有效覆盖范围	300m
发射天线增益 G_t	1
接收天线增益 G_r	1
系统损失参数 L	1
接收功率阈值	5.09314×10^{-11} W
数据包大小	30bytes
时隙时间	42 μ s

(1) VANET 中车辆节点数未知
当网络中相互通信的车辆节点数未知时,在 CRT-UI 序列的构造中需要考虑组网的最大可能车辆节点数.本文研究的车辆节点的通信范围为 300m,在高速公路上,每辆车的前后 300m 范围内的车辆均可以当成是一跳通信范围内的组网车辆.采用预设置和基于位置设置相结合的方式,每辆车事先预设置一个协议序列,路上行驶过程中再依据所处地理位置(例如经过收费站、服务区时)改变序列.预设置时要保证一跳通信范围内的每个车辆节点使用唯一的协议序列,需要考虑 600m 范围内的最多车辆数.根据高速公路车辆行驶的特点和交通规则的要求,本文考虑该场景下的最多车辆数

为 120,即平均每车道车与车之间间距 20m.

基于上述分析,需要设计不少于 120 个协议序列并预先分配给每个车辆节点.在构造 CRT-UI 序列时,因为 127 是大于 120 的最小素数,故取 $p = 127$, $q = 2p - 1 = 253$,序列周期 $L = pq = 32131$ 时隙,其负载因子 $f_{duty} = 1/q = 1/253$.

图 1 为当网络中车辆节点数从少到多时系统的传输时延对比情况.图中 CRT-UI 代表的是 MAC 层采用 CRT-UI 协议序列进行接入控制,和无反馈时隙 ALOHA 的接入控制情况的传输时延的对比.无反馈时隙 ALOHA 在每个时隙的接入概率 p_A 分别为 $1/127$ 和 $1/253$.采用 CRT-UI 协议序列时,车辆节点从 127 个可用的协议序列中任意选择 M 个.节点开始工作时,随机地选择从序列的任意一位开始.从图 1 可见,当网络中用户节点数不同时,采用 CRT-UI 协议序列接入方式的传输时延总是小于时隙 ALOHA 的接入方式.

(2) VANET 中车辆节点数已知

当已知网络中的通信车辆节点数时,通过设计合适的协议序列,对比无反馈时隙 ALOHA,在传输时延上前者亦有显著改善,仿真结果如图 2 所示.图 2 显示了当网络中的用户数为 20 时的系统性能.从图中可见,当用户数 $M = 20$ 时,CRT-UI 的最优设计是 $p = 23$,23 是大于 20 的最小素数,此时系统的吞吐量和传输时延的性能最优,随着 p 的增大系统吞吐量下降,传输时延增大.而对于无反馈时隙 ALOHA,其吞吐量和传输时延的最优点是当其接入概率为 $1/20$ 时,此时,系统的吞吐量最大、传输时延最小.当无反馈时隙 ALOHA 的接入概率 $1/20 < p_A < 1$ 时,其系统吞吐量均低于 $p_A = 1/20$ 点,传输时延均大于 $p_A = 1/20$ 点.这是由于当 $p_A > 1/20$ 时,引起了更多的接入冲突.从图 2 还可见,系统的吞吐量由接入概率和负载因子决定,当接入概率等于负载因子时,CRT-UI 方式和无反馈时隙 ALOHA 方式具有几乎相同的系统吞吐量性能,仿真结果与式(2)及式(3)的分析结果相吻合,但 CRT-UI 方式的传输时延性能比无反馈时隙 ALOHA 方式小很多.

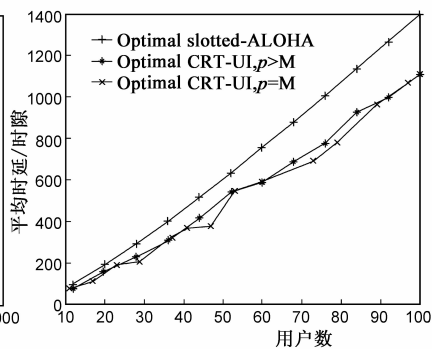
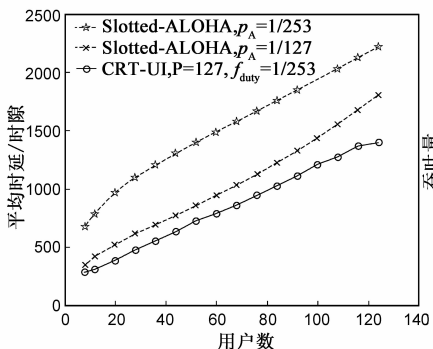


图 1 传输时延随网络中车辆数变化情况的比较

图 2 系统吞吐量、传输时延比较($M=20$)

图 3 最优设计时的传输时延比较

无反馈时隙 ALOHA 方式中,最优点的系统吞吐量要优于 CRT-UI,因为在其最优点上,无反馈时隙 ALOHA 的接入概率差不多是 CRT-UI 方式负载因子的两倍.

下面来看已知网络中节点数时,采用最优的协议序列设计与最佳的无反馈时隙 ALOHA 接入方式的性能,比较结果如图 3 所示.图中针对固定的网络节点数 M ,CRT-UI 协议序列设计时 p 取大于等于 M 的最小素数(如 $M = 12$ 时,选 $p = 13$)和 p 取等于 M 的素数(如 $M = 13$ 时,选 $p = 13$),无反馈时隙 ALOHA 的接入概率 $p_A = 1/M$ (如 $M = 12$ 时,选 $p_A = 1/12$).组网的车辆节点数从 11 增至 100,对比不同节点数时 CRT-UI 方式和无反馈时隙 ALOHA 方式的传输时延及系统吞吐量的比较.从图 3 可见,采用 CRT-UI 协议序列方式的传输时延总是小于无反馈时隙 ALOHA 方式.

7 结论

设计合理的协议序列用于 VANET 车辆通信的信道接入控制,可以获得系统传输时延的较好性能.当车辆节点具有相同的功率损耗,即无反馈时隙 ALOHA 的接入概率和协议序列的负载因子相同时,协议序列接入控制具有较小的系统传输时延,性能优于无反馈时隙 ALOHA.

参考文献

- [1] Leng Supeng, et al. Medium access control in vehicular ad hoc networks[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2011, 11(7): 796 – 812.
- [2] 李元振,等.一种基于竞争转发的城市场景车载 Ad Hoc 网络路由算法[J].电子学报,2009,37(12):2639 – 2645.
LI Yuan-zhen, et al. A contention-based forwarding routing protocol for vehicular ad hoc networks in city scenarios[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2639 – 2645. (in Chinese)
- [3] 李元振,等.城市场景车载 Ad Hoc 网络竞争转发关键参数分析[J].电子学报,2011,38(5):1154 – 1158.
LI Yuan-zhen, et al. Analysis of key parameter of contention-based forwarding strategy for vehicular ad hoc networks in city scenarios[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 38(5): 1154 – 1158. (in Chinese)
- [4] Uzcatogui R. Wave: a tutorial [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(5): 126 – 133.
- [5] Borgonovo F, Capone A, et al. ADHOC MAC: A new MAC architecture for ad hoc networks providing efficient and reliable point-to-point and broadcast services[J]. Wireless Networks, 2004, 10(4): 359 – 366.
- [6] 滕达,等.车载网络中提高公平性的数据包大小自适应调节方案[J].电子学报,2007,35(8):1521 – 1526.
TENG Da, et al. An adaptive packet-size adjusting scheme for

improving fairness in vehicle networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(8): 1521 – 1526. (in Chinese)

- [7] Massey J and Mathys P. The collision channel without feedback [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1985, 31(2): 192 – 204.
- [8] Shaar A A, Davies P A. Prime sequences: quasi-optimal sequences for OR channel code division multiplexing[J]. IEE Electronic Letters, 1983, 19(21): 888 – 890.
- [9] Wong W S. New protocol sequences for random access channels without feedback[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(6): 2060 – 2071.
- [10] Shum K W and Wong W S. Construction and applications of CRT sequences[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(11): 5780 – 5795.
- [11] Shum K W, et al. Shift-Invariant protocol sequences for the collision channel without feedback[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3312 – 3322.
- [12] Shum K W, Wong W S, et al. Design and construction of protocol sequences: Shift invariance and user irrepressibility[A]. IEEE ISIT 2009[C]. IEEE, 2009. 1368 – 1372.
- [13] 吴怡,等.基于自组织映射神经网络的 VANET 组网算法[J].通信学报,2011,32(12):136 – 145.
WU Yi, et al. Networking algorithm based on self-organizing neural network for VANET[J]. Journal on Communications, 2011, 32(12): 136 – 145. (in Chinese).

作者简介



吴 怡 女,1970 年生于辽宁葫芦岛.东南大学移动通信国家重点实验室博士生.福建师范大学副教授.研究方向为无线自组织网络,无线视频传输.
E-mail: wuyi@seu.edu.cn



沈颖祺 男,1972 年生于香港.香港中文大学网络编码研究所研究员,博士.研究方向为信息论、网络编码.

沈连丰(通信作者) 男,1952 年生于江苏邳州.东南大学移动通信国家重点实验室教授,博士生导师.研究方向为短距离无线通信与泛在网络、超高速无线局域网、无线传感器网络和物联网.
E-mail: lfshen@seu.edu.cn

黄永成 男,1952 年生于香港.香港中文大学信息工程系讲座教授,IEEE fellow.研究方向为移动通信、基于信息控制理论.