

引用格式:蒋华涛,常琳,李庆,等. 车车通信链路延时补偿算法研究 [J]. 微电子学与计算机,2019,36(3):1-6. [JIANG Hua—tao, CHANG Lin, LI Qing, et al. Research on delay time compensation for the communication link of V2V[J]. Microelectron—ics & Computer,2019,36(3):1-6.]

车车通信链路延时补偿算法研究

蒋华涛^{2,3},常琳¹,李庆^{1,2},陈大鹏^{1,2,3}

(1 中国科学院 微电子研究所,北京 100029;2 中国科学院 物联网研究发展中心,
江苏 无锡 214135;3 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 车车通信已经成为智能车辆获取外界信息的重要手段,而通信延时将严重影响车辆之间信息传输的准确性. 为了减小通信延时问题对车车通信链路产生的不利影响,有必要对延时进行一定的补偿. 本文将首先基于当前统计模型对前方车辆的运动状态进行建模,然后利用加速度方差自适应卡尔曼滤波模型对前车运动状态进行估计,在此基础上增加延时补偿算法,对前车的位置、速度信息进行一定的补偿;最后,通过 Matlab 软件对本文所提出的延时补偿方法进行仿真验证,仿真结果显示了本文所述方法的有效性.

关键词: 车车通信;通信延时;当前统计模型;自适应卡尔曼滤波模型;延时补偿

中图分类号: TN919. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000—7180(2019)03—0001—06

Research on delay time compensation for the communication link of V2V

JIANG Hua-tao^{2,3},CHANG Lin¹,LI Qing^{1,2},CHEN Da-peng^{1,2,3}

(1 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10029,China;
2 CAS R&D Center For Internet of Things,Wuxi 214135,China;
3 University of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100049,China)

Abstract: Vehicle-vehicle communication(v2v) has become an important means for intelligent vehicles to obtain external information,and the communication delay directly affects the accuracy of the received information. In order to reduce the adverse effect of communication delay on the communication link, it is necessary to make some compensation for the delay. This paper first modelling the vehicle motion based on the current statistical model, and then based on the adaptive kalman filter model, the vehicle motion state is predicted, and then the delay compensation algorithm is used to compensate the received information. At last, the delay compensation algorithm is simulated by Matlab software, and the simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: vehicle-vehicle communication; communication delay; current statistical model; adaptive kalman filter model;delay compensation

1 引言

车车通信技术(V2V)由无线通信技术发展而来,它要求车与车之间可以实现自主通信,从而使驾

驶者可以在超视距范围内获知周围其他车辆的行驶状态以及交通状况等信息,使驾驶员及时地调整驾驶策略,从而有效避免交通事故的发生. 车车通信技术对于智能汽车以及智能交通都具有重要意义.

车辆行驶过程中,由于受车辆高速移动、广播信道衰减等因素的影响,使得车车通信延时一直存在.通信延时使车辆不能实时更新周围车辆的状态信息,从而影响车辆根据周围车辆的运动状态及时进行自车运行状况的调整,无法及时保证行车安全.因而,有必要对通信延时进行估计和补偿.

目前,在车车通信延时方面,国内外学者已经做了较多的工作^[1-4].通信路由优化方面,由于AODV路由应用最为广泛,因此在传统AODV路由算法基础上进行改进的研究较多^[5-7].上述分析基本都是从通信协议及路由角度出发来解决通信延时问题.在延时补偿方面^[8-11],补偿方法都取得了较好的效果,但是基本都从自车控制器的角度出发对延时时间进行补偿,没有充分考虑周围车辆的运动状态.

从通信协议、通信路由角度分析通信延时,是最基本的降低通信延时方法,然而车辆在实际行驶过程中,车车通信带来的延时跟车辆当时的运动状态有很大的关系,因此延时估算和补偿应该针对具体的行车状态进行分析.本文提出一种基于自适应卡尔曼滤波模型的车车通信链路延时补偿算法.

2 基于当前的统计模型车辆运动状态建模

目前,在车辆运动状态建模方面,用的比较多的模型有:匀速模型、匀加速模型、变加速模型,但是车辆在运动过程中状态是实时变化的,因此这些模型具有一定的局限性.我国周宏仁教授提出一种时间相关模型,即当前统计模型^[12-13].该模型说明,当目标以某一加速度作运动时,在下一时刻该目标的加速度不会发生大的突变,即只能取在“当前”加速度的某一个邻域内的有限值.目标运动加速度的概率密度函数用修正的瑞利分布进行表示.此模型精度很高,被广泛应用于航空航天等领域的机动目标建模,因此本文选用当前统计模型对运动的车辆进行建模.

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{\alpha^2}(-1 + \alpha T + e^{-\alpha T}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & \frac{1}{\alpha^2}(-1 + \alpha T + e^{-\alpha T}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix}$$

式中, T 表示采样周期.式(3)中的输入矩阵 $\mathbf{U}(k)$ 可

由当前统计模型可知,可以用修正的瑞利分布来表征运动车辆的加速度特性,则运动车辆加速度模型可以表示为^[12]:

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) = \bar{a}(t) + a(t) \\ \dot{a}(t) = -\alpha a(t) + \omega(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x(t)$ 为运动车辆的位置; $\ddot{x}(t)$ 为车辆的加速度; $a(t)$ 为均值为0的有色加速度噪声; α 为机动频率; $\bar{a}(t)$ 为加速度均值; $\omega(t)$ 为均值为0,方差为 $\sigma_a^2 = 2\alpha\sigma_a^2$ 的白噪声,其中 σ_a^2 为加速度方差.由式(1)可得:

$$\ddot{x}(t) = -\alpha \ddot{x}(t) + \bar{a}(t) + \omega(t)$$

由此可得,运动车辆当前统计模型的连续系统方程为式(2):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{a}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega(t) \quad (2)$$

将(2)式离散化,得到基于当前统计模型的车辆运动过程的离散状态方程为:

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{F}(k-1)\mathbf{X}(k-1) + \mathbf{U}(k-1)\bar{a}(k-1) + \mathbf{W}(k-1) \quad (3)$$

在本文中,分别选取运动车辆 X 方向和 Y 方向的位移、速度、加速度作为状态变量,所以式(3)中

$$\mathbf{X}(k) = [x(k) \quad \dot{x}(k) \quad \ddot{x}(k) \quad y(k) \quad \dot{y}(k) \quad \ddot{y}(k)]^T,$$

式中 $x(k)$, $\dot{x}(k)$, $\ddot{x}(k)$ 分别表示 X 方向的位移、速度、加速度,其余的变量为 Y 方向相应的变量.

由于本文是对运动车辆状态的 X 方向和 Y 方向分别进行观测,因此离散状态方程式(3)中的状态转移矩阵 $\mathbf{F}(k)$ 可以表示为

以表示为

$$U(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha}(-T + \frac{\alpha T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha}) & 0 \\ T - \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} & 0 \\ 1 - e^{-\alpha T} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\alpha}(-T + \frac{\alpha T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha}) \\ 0 & T - \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \\ 0 & 1 - e^{-\alpha T} \end{bmatrix}$$

式(3)中的 $W(k)$ 表示系统噪声, $W(k)$ 是均值为 0, 协方差矩阵为 $Q(k)$ 的离散白噪声序列. $Q(k)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} Q(k) &= E[W(k)W^T(k)] \\ &= \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} 2\sigma_a^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$Q(k)$ 表达式中的 q 矩阵为常值矩阵, 此处的 σ_a^2 为加速度方差, 包含 X 方向的车辆加速度方差 σ_{ax}^2 和 Y 方向的车辆加速度方差 σ_{ay}^2 .

由于当前统计模型提出, 运动目标加速度的运动规律可以用修正的瑞利分布来进行表示, 所以, 加速度方差自适应调整的表达式为:

$$\sigma_a^2 = \begin{cases} \frac{4 - \pi}{\pi}(a_{\max} - \bar{a}), & 0 < \bar{a} < a_{\max} \\ \frac{4 - \pi}{\pi}(a_{\max} - \bar{a}), & a_{\max} < \bar{a} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\bar{a} = \{\bar{a}_x, \bar{a}_y\}$; $a_{\max}$ 和 $a_{\min}$ 分别表示正、负两个方向加速度的门限值.

观测方程可以表示为:

$$Z(k) = H(k)X(k) + V(k)$$

式中,

$$\begin{aligned} H &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ V(k) &= \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$V(k)$ 表示均值为 0, 方差为 $R(k)$ 的白噪声, 在此处的物理含义为通信产生的延时.

上述完成了运动车辆基于当前统计模型的建模, 即状态方程和观测方程:

$$\begin{cases} X(k) = F(k-1)X(k-1) + U(k-1) \\ \bar{a}(k-1) + W(k-1) \\ Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \end{cases}$$

接下来将通过自适应卡尔曼滤波算法对运动车

辆的状态进行跟踪, 然后在自适应卡尔曼滤波算法对车辆状态进行预测的基础上对车辆的状态信息进行一定的延时补偿.

3 基于自适应卡尔曼滤波模型的时延补偿算法

3.1 自适应卡尔曼滤波模型

传统的卡尔曼滤波算法在跟踪目标状态方程确定、系统噪声以及观测噪声模型都已知的情况下可以取得较好的效果, 但是车辆的运动状态每时每刻都在高速变化, 因此不能够确切的得出系统噪声以及观测噪声(本文中噪声主要指通信延迟)的模型, 所以针对本文所述情景, 传统卡尔曼滤波算法将不能取得最优的效果, 为此本文将采用一种基于加速度方差自适应卡尔曼滤波算法对车辆的运行状态进行跟踪.

从文献[14]对传统的卡尔曼滤波模型的分析可以得出, 系统噪声 $W(k)$ 的协方差矩阵 $Q(k)$ 影响着滤波精度(传统模型中 $Q(k)$ 固定, 不随时间变化, 实际中 $Q(k)$ 是不断变化的), 因此噪声协方差矩阵 $Q(k)$ 为滤波时的参数自适应调整提供了依据. 在第2节对运动车辆的建模得到了协方差矩阵 $Q(k)$ (式(4)), 以及加速度方差自适应调整的表达式(式(5)), 所以, 可以据此在传统的卡尔曼滤波算法中对协方差矩阵 $Q(k)$ 进行自适应调整得到本文采用的自适应卡尔曼滤波模型.

基于加速度方差自适应卡尔曼滤波算法:

(1) 设置状态变量 $X(k)$ 以及预测误差协方差矩阵的初值: $X(0) \quad P(0)$

(2) 状态变量 $X(k)$ 进行观测值更新:

$$Z(k) = H(k)X(k) + V(k)$$

(3) 计算卡尔曼增益矩阵:

$$K_g(k) = P(k | k-1)H^T / (HP(k | k-1)H^T + R)$$

(4) 对状态变量进行最优估计:

$$X(k|k) = X(k|k-1) + K_g(k)(Z(k) - HX(k|k-1))$$

(5) 计算最优估计误差协方差矩阵:

$$P(k|k) = (I - K_g(k)H)P(k|k-1)$$

(6) 对状态量进行预测:

$$X(k|k-1) = F(k)X(k-1|k-1) + U(k)\bar{a}(k)$$

(7) 计算 X, Y 两个方向的加速度方差 σ_{ax}^2 和 σ_{ay}^2 , 自适应调整 $Q(k)$.

当前统计模型用修正的瑞利分布(概率密度函数是时变的)来表征加速度变化,因此在每个时刻的概率密度都是不同的,通过计算每个时刻的加速度均值即可的噪声协方差矩阵.

把 $\ddot{x}(k)$ 一步预测 $\ddot{x}(k|k-1)$ 作为 kT 时刻当前加速度(即加速度的均值),于是由公式(5)可以得到加速度方差,从而对噪声协方差矩阵进行实时自适应调整.

(8) 计算预测误差协方差矩阵:

$$P(k|k-1) = F(k)P(k-1|k-1)F^T(k) + Q(k)$$

(9) 返回(2),继续进行下一个周期计算.

此模型的核心是:当前统计模型的概率密度函数是时变的,因此在不同时刻的概率密度不同,利用每个时刻的加速度均值(也就是当前加速度)来更新过程噪声协方差矩阵,然后利用卡尔曼滤波公式对滤波参数进行自适应调整,从而实现对前车运动状态的跟踪.

3.2 时延补偿算法分析

假定在 k 时刻,前方车辆将自身的位置、速度、加速度信息通过 DSRC 设备经通信链路发送给后车, T_d 时刻后,后车收到信息.因此,后车收到数据时前车的运动状态已经发生了改变.所以,需要后车根据收到的前车 k 时刻的状态信息以及 T_d 时间内前方车辆的运动状况估计前车的状态信息.首先通过上述自适应卡尔曼滤波算法对前车的状态信息进行预测,得到状态预测值为 $\hat{X}(k-T_d)$,然后加入对延时的补偿.

由于当前统计模型指出当目标以某一加速度作运动时,在下一时刻该目标的加速度不会发生大的突变,但速度可能发生较大改变,因此本文对前车的速度状态信息进行一定的补偿,进行补偿之后的前方车辆状态信息如式(6).

$$X(k) = \hat{X}(k-T_d) +$$

$$\begin{bmatrix} T_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_x(k|k-1) \\ \hat{a}_x(k|k-1) \\ 0 \\ \hat{v}_y(k|k-1) \\ \hat{a}_y(k|k-1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $X(k) = [x(k) \quad \dot{x}(k) \quad \ddot{x}(k) \quad y(k) \quad \dot{y}(k) \quad \ddot{y}(k)]^T$, $\hat{v}_x(k|k-1)$ 、 $\hat{a}_x(k|k-1)$ 、 $\hat{v}_y(k|k-1)$ 、 $\hat{a}_y(k|k-1)$ 分别表示 X 方向和 Y 方向速度与加速度的一步预测.

由延迟补偿公式(6)可以得出,经过补偿后得到的前车 k 时刻的位移信息等于自适应卡尔曼滤波算法预测的 $k-T_d$ 时刻的位移信息加上时延 T_d 与 $k-T_d$ 时刻预测的速度乘积;同理,经过补偿之后得到的前车 k 时刻的速度信息等于 $k-T_d$ 时刻速度的预测信息加上时延 T_d 与 $k-T_d$ 时刻预测加速度的乘积.

基于方差自适应卡尔曼滤波模型的时延补偿算法流程如图1所示.

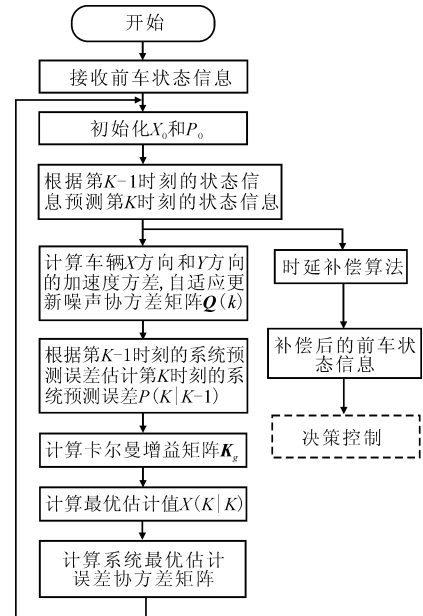


图1 时延补偿算法流程图

4 仿真结果与分析

目前,用于车间通信的最成熟、最广泛的通信协议是美国的 802.11p 协议,文献[15]对 802.11p 的各项性能进行了详细分析,并且给出了端到端的通

信延时,即 802.11p 的延时为 100 ms 左右波动,此外,在本文仿真时还考虑了信息采集延时、车载终端处理数据延时等,为此在本文的仿真过程中将延时时间设置为一组随机数,即延时时间 $T_d = \text{rand}(1, 100)$,采样点数 $N=100$, $T=1$,机动频率 $\alpha=0.125$,加速度上限值 $a_{\max}=10\text{ m/s}^2$. 由于在第 2 节进行车辆运动状态建模时,是对 X 、 Y 方向分别进行观测,因此本文只对 X 方向状态变化进行仿真, Y 方向与 X 方向类似,本文不再赘述. 设置前方车辆 X 方向的初始状态为 $X(k)=[100\text{ m}\ 5\text{ m/s}\ 0]^T$. 仿真过程中设置的 X 方向车辆的运动情况包括:匀速阶段,匀加速阶段,变加速阶段,具体设置如表 1 所示,其中, k 表示采样时刻.

表 1 仿真轨迹设置

初始值 $X(1)=100$ $V(1)=5\text{ m/s}$		
$k=1:20$	$v(k+1)=v(k)$	$a=0$
$k=21:39$	$a(k+1)=(k-20)*0.1$	$v(k+1)=v(k)+a(k)*T$
$k=40:59$	$a(k+1)=-(k-39)*0.1$	$v(k+1)=v(k)+a(k)*T$
$k=60:79$	$a(k+1)=(k-59)*0.15$	$v(k+1)=v(k)+a(k)*T$
$k=80:89$	$a(k+1)=-(k-59)*0.1$	$v(k+1)=v(k)+a(k)*T$
$k=90:99$	$v(k+1)=v(k)+a(k)*T$	$a(k+1)=-2$

对前方车辆 X 方向状态信息的延时补偿仿真结果如图 2 至图 6 所示. 图 2 显示了 X 方向的位置信息在延时补偿前与延时补偿后自适应卡尔曼滤波结果与真实值的对比图,图 3 显示的是放大后的对比图,从图中可以清晰的看出,未进行延时补偿的滤波结果与真实值相差较大,而进行延时补偿后的滤波结果很好的拟合了真实值的变化趋势. 图 4 显示了经过延时补偿后的 X 方向位置误差,由图可以看出,延时补偿后位置误差保持在 0.5 m 左右波动,也说明了延时补偿取得了较好的跟踪效果,使得后方车辆更能准确的得到前车真实的状态信息.

图 5 和图 6 分别显示了前方车辆 X 方向速度的延时补偿结果和速度误差分析,可以清楚的看出补偿后的速度曲线较好的拟合真实速度曲线,误差图说明了补偿后速度误差在 0.5 m/s 以下,很好的跟踪了前车速度变化.

5 结束语

车车通信对车辆的主动安全具有重要的研究意义,文章首先对现有的通信延时补偿算法进行总结

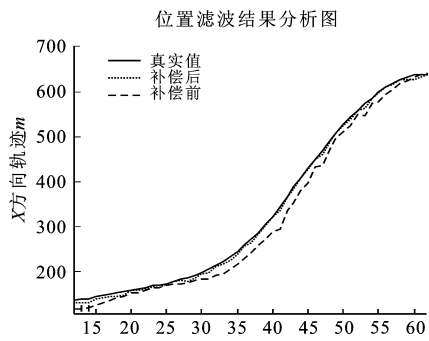


图 2 前方车辆 X 方向运行轨迹对比图

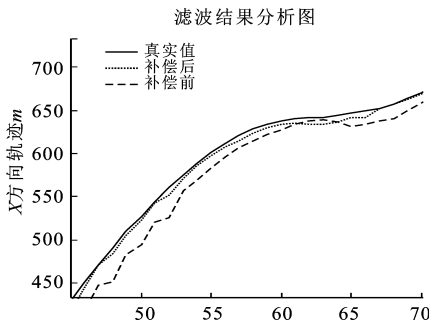


图 3 X 方向放大后的对比

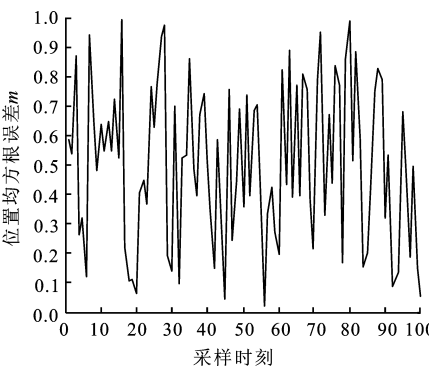


图 4 X 方向位置误差

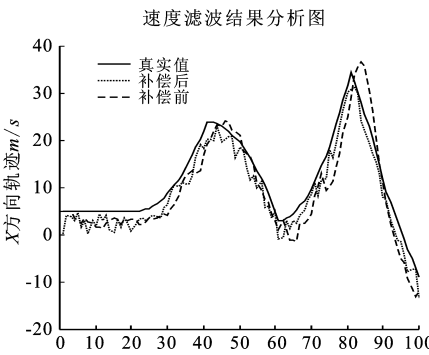


图 5 前车 X 方向速度变化对比图

分析,然后采用精度比较高的当前统计模型对前方运动的车辆进行建模,在建立模型的基础上,采用一种加速度方差自适应卡尔曼滤波算法对周围车辆的

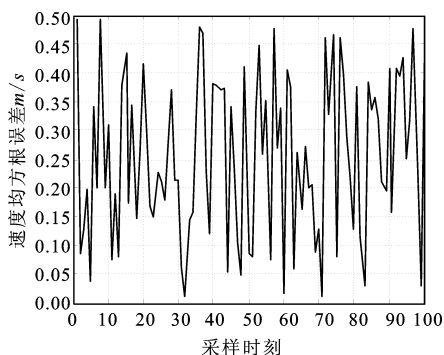


图6 X方向速度误差

运动状态信息进行预测,最后加入时延补偿,从而得到周围车辆比较精确的状态信息。仿真结果表明,本文所提出的时延补偿算法取得了较好的结果。

由于加入了延时补偿环节,使车辆能够更精确的接收周围车辆的运动状态信息,从而使车辆能够根据周围车辆的运动状态更加及时的进行自车运行状况的调整,保证行车安全。

参考文献:

- [1] 刘灵雅,王聪. 基于 802.11p 的可变 SCH 时隙 MAC 机制[J]. 通信技术,2017,50(1):56-61.
- [2] STANICA R, CHAPUT E, BEYLOT A L. Enhancements of IEEE 802.11p protocol for access control on a VANET control channel[C]//IEEE International Conference on Communications. Kyoto, Japan, IEEE, 2011:1-5.
- [3] 王非,王新红,李想,等. VANET 自适应门限 MAC 层退避算法研究[J]. 通信技术,2012,45(10):46-49.
- [4] SOUZA A B D, LUIZA A, DE B, et al. An adaptive mechanism for access control in VANETs [EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/267707178_An_Adaptive_Mechanism_for_Access_Control_in_VANETs?ev=prf_cit, 2011:183-188.
- [5] 夏梓峻,刘春风. 基于链路预测的 VANET 路由算法[J]. 计算机工程,2012,38(4):110-111.

- [6] 杜青松,朱江,张尔扬. 基于闲时逆寻和路由学习机制的优化 AODV 路由协议[J]. 通信学报,2011,32(8):64-71.
- [7] 董春阳. 基于机器学习的车载自组织网络 DTN 路由协议研究[D]. 重庆:重庆邮电大学,2016.
- [8] XIANG X H, QIN W H, XIANG B F. Research on a DSRC-based rear-end collision warning model [J]. IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, 2014,15(3):1054-1065.
- [9] 景首才. 基于车路协同的车辆追尾预警系统的研究与实现[D]. 西安:长安大学,2016.
- [10] 王庞伟,黄玲,王云鹏,等. 考虑通信延迟的车辆队列协同巡航控制算法[J] 公路交通科技,2013,30(suppl.1):150-154.
- [11] 岳伟,郭戈,王丽媛. 通讯网络影响下自主车队分散式控制[J]. 东南大学学报(自然科学版),2011,41(增刊1):144-151.
- [12] 周宏仁. 机动目标当前统计模型与自适应跟踪算法[J]. 航空学报,1983,4(1):73-86.
- [13] ZHOU H R. Tracking of maneuvering targets[D]. Minneapolis: University of Minnesota, 1984.
- [14] 王向华,覃征,杨新宇,等. 基于多次卡尔曼滤波的目标自适应跟踪算法与仿真分析[J]. 系统仿真学报,2008,19(23):6458-6460.
- [15] BU J, TANG G, DING N, et al. Implementation and evaluation of WAVE 1609.4/802.11p in ns-3[D]. China, Dalian: Dalian University of Technology, 2014. DOI:10.1145/2630777.2630778.

作者简介:

蒋华涛 男,(1991-),硕士研究生. 研究方向为汽车电子和车联网. E-mail:1921800602@qq.com.

常琳 女,(1983-),博士,副研究员. 研究方向为汽车电子和车联网.

李庆 男,(1972-),博士,研究员. 研究方向为汽车电子和车联网.

陈大鹏 男,(1968-),博士,研究员. 研究方向为汽车电子和车联网.