



VANET 中基于线性协作策略的预警信息检测算法^{*}

张雪飞,章国安,季彦呈

(南通大学电子信息学院 南通 226019)

摘 要:提出了一种车载 Ad Hoc 网络中基于线性协作策略的交通事故预警信息检测算法,由两个部分组成:局部检测和全局检测。簇首得到移动车辆节点局部检测后的信号强度统计量,进行全局线性组合,做出最终的判决。数值仿真结果表明所提出的策略能在误警概率要求范围内有效提高检测概率,并且避免广播风暴的发生。

关键词: VANET; Ad Hoc; 线性协作; 预警检测

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.05.017

Detection Algorithm of Alarm Messages Based on Linear Cooperative Strategy in VAENT

Zhang Xuefei, Zhang Guoan, Ji Yancheng

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: An alarm message detection algorithm for the traffic accident based on linear cooperative strategy in vehicular Ad Hoc network was proposed, and it was composed of two parts: local detection and global detection. Cluster heads received the statistics of detection signal strength from local mobile vehicle node, and conducted global linear combination to make a final decision. The numerical simulation results show that the proposed strategy can improve the detection probability within the scope of the false alarm probability, and avoid the broadcast storm.

Key words: VAENT, Ad Hoc, linear cooperative, alarm detection

1 引言

智能交通系统(intelligent transportation system, ITS)将通信网络技术、计算机信息处理、传感器检测和自动控制技术融合到整个交通运输系统中,实现对交通运行环境的感知和综合状态的检测^[1]。而车载无线网络(vehicular wireless network)作为 ITS 中交通信息采集、承载和传输平台,依靠自身的短距离无线通信和实时计算能力实现车与车(vehicle-to-vehicle, V2V)、车与路边基础设施(vehicle-to-

infrastructure, V2I)间的通信,能够综合承载多类型交通业务信息,具有移动节点持续电力供给和基于道路规划的拓扑组网优势,正逐渐成为该领域的研究热点。目前,基于车载网络系统的智能交通在一定程度上解决了城市交通流量预警和高速不停车收费问题,但交通事故频频发生且尚无有效解决机制,研究如何有效降低交通事故发生率,具有减少人民生命财产损失、提高交通运输效率的现实意义。

交通安全信息(主要包括车辆碰撞预警信息、道路湿滑检测信息、前端车辆刹车信息)在有限地域和有限时域

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.61371113),交通运输部应用基础研究基金资助项目(No.2013-319-825-110)

范围内有效,消息简短、与位置相关,需要快速准确地地在有限范围内传播,以便后续车节点及时响应,起到安全预警作用。但是,交通安全信息常伴随交通事故的发生(预警)而大量产生,形成安全信息突发流。同时,车节点也在短距离、短时间内大量聚集,导致广播风暴,形成车节点和安全信息高密度分布状态,造成事故域内网络资源短时匮乏,导致安全信息传播产生极大的时延和极高的信息丢失率,但此时安全信息能直接降低交通事故的恶化。当交通安全信息端到端传播时延不超过 200 ms,且信息丢失率不超过 1%时,后端车节点才能正确解析信息内容,并及时做出有针对性的有效响应操作,防范交通事故的恶化。但高速移动下的强多普勒效应和稀疏的路边基础设施使满足时延前提下的平均信息丢失率高达 50%~70%,为改善信息丢失而进行的信息重传使传播安全信息的控制信道过载,反而恶化了安全信息传播性能。因此,要在信道条件受限、车节点和交通信息密集的前提下快速、可靠地传播安全信息需要新的理论研究、新的实现方法^[2]。

2 系统模型

假设所构建的车载 Ad Hoc 网络是由移动的车辆节点和静止的路边单元(RSU)组成的,移动的车辆节点被分成若干组,并与最近的路边单元组成一个簇,每个簇以簇内的路边单元为簇首,由簇首对簇内和簇间的交通或娱乐信息传播进行协调控制^[3]。规定只有簇首可以向簇成员广播交通事故预警信息,但是,携带原始交通事故预警信息的移动车辆节点或者发生事故的簇内的簇成员可以向其簇首以及簇内其他成员广播交通事故预警信息(这样规定可以有效缓解广播风暴的问题)。

得到交通事故预警信息的簇首会对各个车辆节点的信号强度的变化幅度进行线性分析,由于车载 Ad Hoc 网络中车辆节点的高速移动性对信号的衰减影响显著,所以在信号强度变化幅度较小的时候,簇首有理由估计预警信息是正确的,因为发生交通事故会使临近的车辆减速从而降低了移动性。通过线性整合有关车辆节点的信号强度变化幅度(方差),作为簇首的路边单元感知了簇成员的行驶情况并判断是否需要向相邻的簇首转发预警信息。

由于车载 Ad Hoc 网络对传输能耗的要求不高,假设模型中的移动车辆节点信息传输能耗不受限制,即可以最大功率传输数据。当车辆节点得到交通事故的预警信息后,无论预警信息正确与否,在经过局部检测后,都会向其

簇首转发预警信息,按照前面的规定,只有簇首才可以向簇内其他成员广播预警信息。簇首在收到预警信息后负责对信息的正确与否进行判决。

如图 1 所示,在簇 B 中发生了交通事故,事故车辆节点会立即向簇内其他成员发送预警信息。接收到预警信息的车辆节点会通过局部检测对信号强度进行分析,从而初步判断信息的正确性。随后簇成员车辆节点会进一步向簇首发送预警信息以及信号强度的检测结果。簇首通过全局检测后对交通事故预警信息的正确与否做出判决,如果判决为真,簇首会向所管辖的车辆节点以及相邻的簇首广播预警信息,如果判决为假,簇首会丢弃此预警信息。

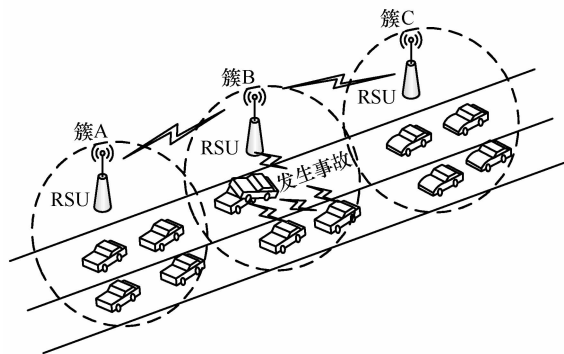


图 1 交通事故预警信息广播模型

3 基于线性协作策略的检测算法

所提出的基于线性协作策略的检测算法包括两个环节:局部检测和全局检测。局部检测是获得交通事故预警信息的车辆节点独立地进行信息核实,而全局检测是作为簇首的路边单元整合簇成员的预警信息,然后对其正确与否作出最终的判决。

对预警信息正确与否的判决是通过假设检验的方式。假设检验分为以下两种情况:第一种情况用 D_0 表示,假设没有交通事故发生,即收到的事故预警信息是错误的;第二种情况用 D_1 表示,假设有交通事故发生,即收到的事故预警信息是正确的。

引入 P_f 表示簇首对正确的事故预警信息进行错误判决的概率,引入 P_d 表示簇首对预警信息做出正确判决的概率,即交通事故正确检测的概率。本算法意在将误警概率 P_f 控制在要求范围内的同时,最大化检测概率 P_d 。

3.1 局部检测

如图 2 所示,当接收到交通事故发生地点附近的车辆发送的预警信息时,车辆节点会整合预警信息的信号强



度,每个车辆节点会在 N 个时隙的检测周期内计算得到信号强度的初步统计量 x_i ,表示如下^[4]:

$$x_i = \sum_{k=0}^{N-1} |u_i(k)|^2, i=1,2,\dots,M \quad (1)$$

其中, $u_i(k)$ 表示接收到的簇内第 i 个移动车辆节点的信号强度。根据两种假设检验结果,将检测周期第 k 个时隙接收的信号强度表示如下:

$$u_i(k) = \begin{cases} e_i(k), & D_0 \\ e_i(k) + h_i s(k), & D_1 \end{cases} \quad i=1,2,\dots,M \quad (2)$$

其中, $s(k)$ 表示信号强度的变化量,它的变化幅度由信道增益 h_i 决定,在检测周期内信道增益被认为是保持不变的^[5]。 $e_i(k)$ 表示局部检测噪声,用一个向量 $\sigma = [\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_M^2]^T$ 表示它们的方差。不失一般性,认为 $s(k)$ 和 $e_i(k)$ 相互独立。

由式(1)和式(2)可知 x_i 是 N 个高斯随机变量的平方和,所以 x_i / σ_i^2 在 D_0 成立的条件下服从自由度为 N 的中心卡方分布,在 D_1 成立的条件下服从含有参数 r_i 、自由度为

N 的非中心卡方分布,其公式化表示如下:

$$\begin{aligned} D_0: x_i / \sigma_i^2 &\sim \chi_N^2 \\ D_1: x_i / \sigma_i^2 &\sim \chi_N^2(r_i) \end{aligned} \quad (3)$$

其中,参数 r_i 在本文模型中表示第 i 个移动车辆节点对应的局部信噪比(SNR)。

根据中心极限定理,如果 N 的数值足够大,检测统计量 $\{x_i\}$ 会无限接近正态分布,因此可得其均值为:

$$E(x_i) = \begin{cases} N\sigma_i^2, & D_0 \\ N\sigma_i^2 + r_i\sigma_i^2, & D_1 \end{cases} \quad (4)$$

其方差为:

$$V(x_i) = \begin{cases} 2N\sigma_i^4, & D_0 \\ 2N\sigma_i^4 + 4r_i\sigma_i^4, & D_1 \end{cases} \quad (5)$$

令 t_i 表示局部检测判决门限,当个体车辆节点进行交通事故检测时,判决准则如下:

$$\begin{aligned} D_0: x_i &< t_i \\ D_1: x_i &\geq t_i \end{aligned} \quad i=1,2,\dots,M \quad (6)$$

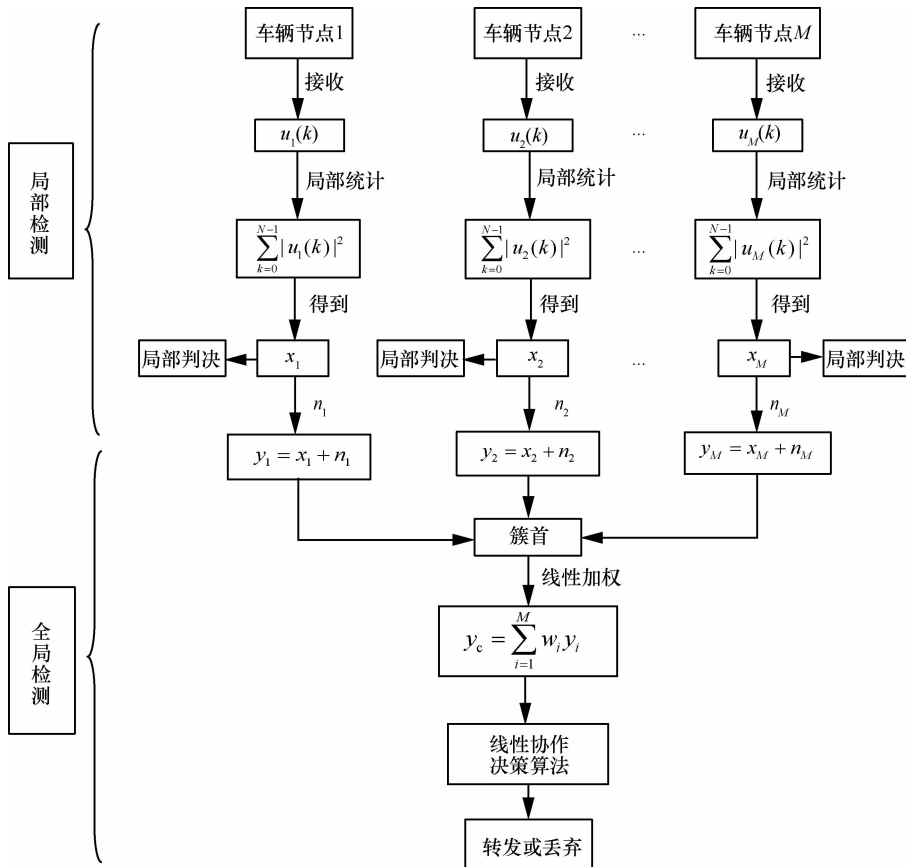


图2 线性协作检测系统

P_d 是正确的预警信息被成功检测的概率, 而 P_i 包括两方面含义: 一方面是收到真实事故预警信息却检测为没有事故发生, 另一方面是收到错误的事故预警信息且检测为有事故发生。第一方面的错误和漏检有可能引起二次事故的发生, 而第二方面错误会导致不必要的降速, 引起交通拥挤。因此, 第 i 个车辆节点的误警概率和检测概率如下:

$$P_f^{(i)} = Pr(x_i \geq t_i | D_0) + Pr(x_i < t_i | D_1) \\ = CCDF \left[\frac{t_i - E(x_i | D_0)}{\sqrt{V(x_i | D_0)}} \right] + CDF \left[\frac{E(x_i | D_1) - t_i}{\sqrt{V(x_i | D_1)}} \right] \quad (7)$$

$$P_d^{(i)} = Pr(x_i \geq t_i | D_1) = CCDF \left[\frac{t_i - E(x_i | D_1)}{\sqrt{V(x_i | D_1)}} \right] \quad (8)$$

其中, $CCDF(\cdot)$ 表示互补累积分布函数, $CDF(\cdot)$ 表示累积分布函数, 用于计算服从零均值和单位方差的正态分布变量的尾概率。

3.2 全局检测

信号强度统计量 $\{x_i\}$ 随后会通过理想的正交控制信道发送给簇首, 表示如下:

$$y = x + n \quad (9)$$

其中, $x = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$, 信号的全局检测噪声 $\{n_i\}$ 是零均值且空间上无相关性的高斯变量, 用 $n = [n_1, n_2, \dots, n_M]^T$ 表示, 并用向量 $\delta = [\delta_1^2, \delta_2^2, \dots, \delta_M^2]^T$ 表示它们的方差。当所有车辆节点将相关信号强度信息发送给簇首后, 簇首会以线性组合的方式计算全局的假设检验统计量 y_c 。式(9)中的 $\{y_i\}$ 是各个车辆节点的信号强度统计量, 用 $y = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ 表示。

全局检测是通过若干车辆节点的相互协作完成的, 由式(9)可知, 当各车辆节点经过专用的控制信道向簇首发送检验统计量 $\{x_i\}$ 时, 簇首收到的统计量是服从正态分布的 $\{y_i\}$, 其均值 $E(y_i) = E(x_i)$, 其方差如下^[6]:

$$V(y_i) = \begin{cases} 2N\sigma_i^4 + \delta_i^2, & D_0 \\ 2(N + 2r_i)\sigma_i^4 + \delta_i^2, & D_1 \end{cases} \quad (10)$$

式(3)中的参数 r_i 在本文模型中表示第 i 个移动车辆节点对应的局部信噪比, 满足:

$$r_i = \frac{E_s |h_i|^2}{\sigma_i^2} \quad (11)$$

其中, E_s 表示检测周期内系统所传输的信号能量, 满足:

$$E_s = \sum_{k=0}^{N-1} |s(k)|^2 \quad (12)$$

一旦接收到 $\{y_i\}$, 簇首就会进行线性计算得出全局检验统计量, 表示如下:

$$y_c = \sum_{i=1}^M w_i y_i = w^T y \quad (13)$$

其中, $w = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T$ 表示用于控制全局事故检测的权向量。不同的权值代表着不同的簇成员节点对全局检测判决的影响程度, 而移动车辆节点对应的权值由它进行局部检测时相对于事故发生位置的距离决定, 离事故发生车辆节点较近的簇成员会分配较大的权值。

因为 $\{y_i\}$ 是服从正态分布的随机变量, 所以它的线性组合也是服从正态分布的随机变量, 因此 y_c 的均值为:

$$\bar{y}_c = \begin{cases} N\sigma^T w, & D_0 \\ (N\sigma + E_s h)^T w, & D_1 \end{cases} \quad (14)$$

其中, 矩阵 $h = [h_1^2, h_2^2, \dots, h_M^2]^T$ 表示局部信道增益的模平方, y_c 的方差为:

$$V(y_c) = E(y_c - \bar{y}_c)^2 \\ = w^T E[(y - \bar{y})(y - \bar{y})^T] w \quad (15)$$

所以根据假设检验的两种情况表示如下:

$$V(y_c | D_0) = w^T E[(y - \bar{y}_{D_0})(y - \bar{y}_{D_0})^T | D_0] w \\ = \sum_{i=1}^M (2N\sigma_i^4 + \delta_i^2) w_i^2 \\ = w^T \text{diag}_{D_0} w \quad (16)$$

$$\text{diag}_{D_0} = 2N \text{diag}^2(\sigma) + \text{diag}(\delta) \quad (17)$$

$$V(y_c | D_1) = w^T E[(y - \bar{y}_{D_1})(y - \bar{y}_{D_1})^T | D_1] w \\ = \sum_{i=1}^M (2N\sigma_i^4 + 4r_i\sigma_i^4 + \delta_i^2) w_i^2 \\ = w^T \text{diag}_{D_1} w \quad (18)$$

$$\text{diag}_{D_1} = 2N \text{diag}^2(\sigma) + 4E_s \text{diag}(h) \text{diag}(\sigma) + \text{diag}(\delta) \quad (19)$$

其中, $\text{diag}(\cdot)$ 表示以给定的向量为对角线元素的方形矩阵。用矩阵形式表示 diag_{D_0} 和 diag_{D_1} 如下:

$$\text{diag}_{D_0} = \text{diag} \begin{bmatrix} 2N\sigma_1^4 + \delta_1^2 \\ 2N\sigma_2^4 + \delta_2^2 \\ \vdots \\ 2N\sigma_M^4 + \delta_M^2 \end{bmatrix}^T \quad (20)$$



$$\text{diag}_{D_1} = \text{diag} \begin{bmatrix} 2N\sigma_1^4 + 4E_s |h_1|^2 \sigma_1^2 + \delta_1^2 \\ 2N\sigma_2^4 + 4E_s |h_2|^2 \sigma_2^2 + \delta_2^2 \\ \vdots \\ 2N\sigma_M^4 + 4E_s |h_M|^2 \sigma_M^2 + \delta_M^2 \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

令 t_c 表示判决门限,当簇首通过线性协作方式进行全局检测时,判决准则如下:

$$\begin{aligned} D_0: y_c &< t_c \\ D_1: y_c &\geq t_c \end{aligned} \quad (22)$$

因此全局检测中交通事故预警信息的误警概率和检测概率表示如下:

$$\begin{aligned} P_f &= \Pr(y_c \geq t_c | D_0) + \Pr(y_c < t_c | D_1) \\ &= \text{CCDF} \left[\frac{t_c - N\sigma^T w}{\sqrt{w^T \text{diag}_{D_0} w}} \right] + \text{CDF} \left[\frac{(N\sigma + E_s h)^T w - t_c}{\sqrt{w^T \text{diag}_{D_1} w}} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

$$P_d = \Pr(y_c \geq t_c | D_1) = \text{CCDF} \left[\frac{t_c - (N\sigma + E_s h)^T w}{\sqrt{w^T \text{diag}_{D_1} w}} \right] \quad (24)$$

由 P_d 的定义可知, $(1-P_d)$ 表示真实的交通事故预警信息没有被成功检测的概率,即漏检概率,此概率升高会使车辆节点无法在事故发生地点附近及时降速或绕行。本算法的目的就是在满足误警概率要求的情况下最小化漏检概率(最大化检测概率)。

图3表示全局线性协作检测的判决算法,按照检测系统的要求给定误警概率 P_f 和检测周期时隙数 N ,根据式(23)得到全局检测的判决门限 t_c ,将其带入式(24)得到计算检测概率的函数,通过如图3的循环计算得到最大的检测概率 P_d' ,如果 P_d' 不小于 0.5 则判决预警信息为真,簇首将向簇成员广播预警信息并且转发给相邻簇首,否则将判决预警信息为假,丢弃预警信息。

4 仿真分析

将交通事故预警信息的线性协作检测算法进行仿真,仿真背景和系统模型中描述的一样,车载 Ad Hoc 网络是由移动的车辆节点和静止的路边单元组成,移动的车辆节点被分成若干组,并与最近的路边单元组成一个簇,每个簇以簇内的路边单元为簇首,假设其中某个簇内发生交通事故,发生事故车辆节点向包括簇首在内的簇成员广播预警信息,各个车辆节点独立接收事故车辆信息并参与线性

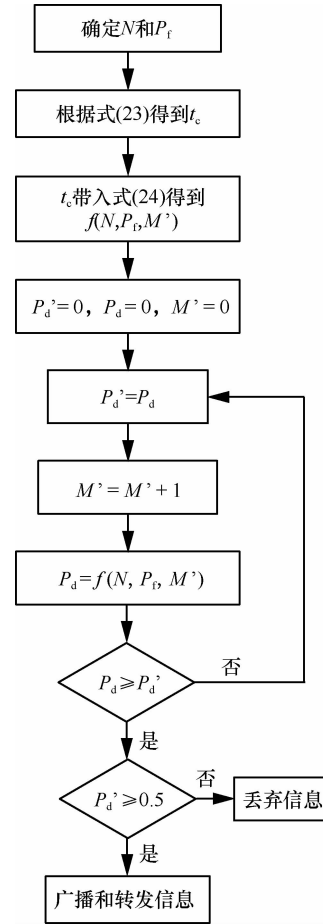


图3 全局线性协作检测判决算法

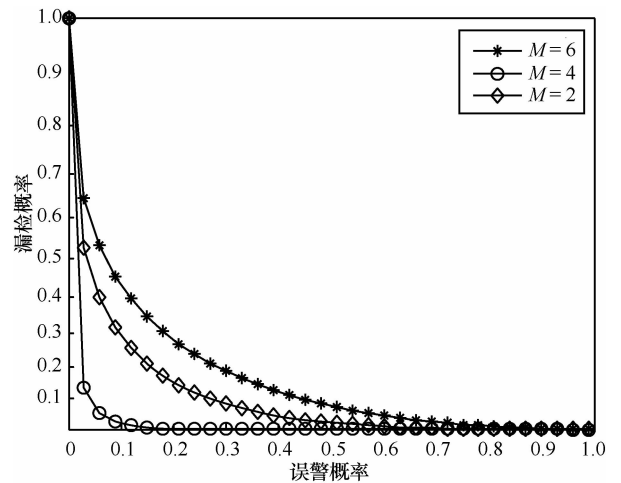


图4 $M=2, 4, 6$ 时漏检率与误警率的比较

协作检测系统。

图4和图5是在固定信道噪声 $\sigma^2=1, \delta^2=1$, 各移动车辆节点对应局部信噪比和信号强度由系统随机分配的前提下,设定误警概率 P_f 为不同取值时,交通事故预警信息

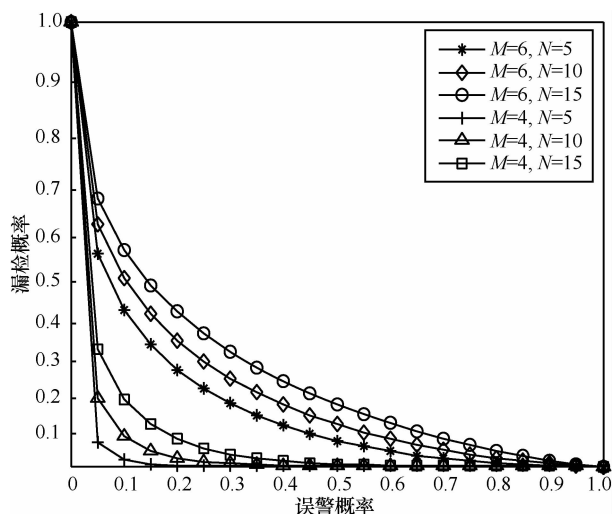


图5 $M=4, 6$, $N=5, 10, 15$ 时漏检率与误警率的比较

漏检概率($1-P_d$)的统计结果。

图4反映了在检测周期的时隙数 $N=5$ 的情况下,参与全局检测的移动车辆节点(簇成员)数量 M 分别为 2、4、6 时的仿真曲线,由图4可知,在移动车辆节点数 M 由 2 增加到 4 的过程中,对应要求下漏检概率降低,检测系统性能明显提高,但是当 M 由 4 增加到 6 时,检测系统性能下降,可能原因是过多数量的簇成员的参与增加了局部错误检测信息的概率,引起了簇首错误的全局判决。

由图5可知,随着 N 的增加,系统检测性能呈下降趋势,可能的原因是时延问题导致簇首接收到不准确的信号强度信息。此外, $M=4$ 时系统检测性能普遍优于 $M=6$ 的时候,可能的原因是簇成员数量过多时,簇首精确分配参与检测的簇成员权值的难度提高,导致整个检测系统的性能下降。

由图4和图5中最优的(最下方)仿真曲线可知在簇成员个数和检测周期时隙数以及传输信噪比都相对较优时,使用本算法可以在误警概率较低的情况下达到很高的检测概率(很低的漏检概率)。

5 结束语

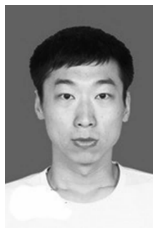
本文提出了一种车载 Ad Hoc 网络中基于线性协作策略的交通事故预警信息检测技术,它主要由两步算法组成:局部检测和全局检测。簇首得到移动车辆节点局部检测后的信号强度的统计量,进行全局线性组合,做出最终的判决,数值仿真结果表明所提出的策略能在误警率要

求范围内有效提高检测概率,在未来的研究中需要进一步提高算法复杂度来估算最优化权值分配和最优化参与车辆节点数量。

参考文献

- 1 常促宇,向勇,史美林. 车载自组网的现状与发展. 通信学报, 2007, 28(11):116~126
- 2 王昭然,谢显中,赵鼎新. 车载自组织网络关键技术. 电信科学, 2011, 27(1):44~51
- 3 王艺,邓佳佳,林毅. 适用于车联网应用的移动通信网络. 电信科学, 2012, 28(6):1~6
- 4 Wang C X, Hong X M, Ge X H, *et al.* Cooperative MIMO channel models: a survey. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(2):80~87
- 5 Kawadia V, Kumar P R. Principles and protocols for power control in wireless Ad Hoc networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(1):76~88
- 6 Julius H M, Ali-Akber D M, Oksamc. Maximizing the effective lifetime of mobile Ad Hoc networks. EICE Trans on Communications, 2010, 91(9): 2818~2827

[作者简介]



张雪飞,男,南通大学电子信息学院硕士生,主要研究方向为无线 Ad Hoc 网络。



章国安,男,博士,南通大学电子信息学院院长、教授、博士生导师,主要研究方向为移动通信。



季彦呈,男,博士,南通大学电子信息学院讲师,主要研究方向为协作通信。

(收稿日期:2014-01-16)