

基于车辆运动轨迹的VANETs位置验证

徐会彬^{1,2}, 施星君³, 任 斌⁴, 薛小平¹

(1. 同济大学电子与信息工程学院 上海 普陀区 200092; 2. 上海师范大学天华学院 上海 嘉定区 201815;

3. 浙江工贸职业技术学院 浙江 温州 325003; 4. 东莞理工学院电子工程学院 广东 东莞 523808)

【摘要】正确的位置信息在维护VANETs的正常运行扮演着重要的角色, 恶意节点的位置欺骗将严重影响VANETs诸多应用。通过对节点的位置验证以检测节点的位置欺骗是VANETs重要的研究领域。针对VANETs中车辆移动的相对速度较高, 网络拓扑结构频繁变化, 传统WSN和MANET中的位置验证方案不再适用于VANETs, 提出基于车辆的运动轨迹位置验证方案, 采用最小二乘法对车辆进行连续定位跟踪, 并绘制其行驶路线, 与邻居车辆的行驶路线、速度相比较, 计算其吻合度, 检测位置欺骗。仿真结果表明, 该方案有较低的漏警率和虚警率, 当恶意节点的欺骗距离达到30 m时, 漏警率和虚警率接近于0。

关键词 最小二乘法; 位置验证; 漏警率; 虚警率; 运动轨迹; VANETs

中图分类号 TP393

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.04.011

Vehicle Trajectory-Based Location Verification for VANETs

XU Hui-bin^{1,2}, SHI Xing-jun³, REN Bin⁴, and XUE Xiao-ping¹

(1. School of Electronics and Information, Tongji University Putuo Shanghai 200092;

2. Shanghai Normal University Tian-Hua College Jiading Shanghai 201815;

3. School of Economy & Trade, Zhejiang Industry & Trade Vocational College Wenzhou Zhejiang 325003;

4. School of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology Dongguan Guangdong 523808)

Abstract The correct location information of vehicles plays an important role in the maintenance of the normal operation of vehicle Ad-hoc networks (VANETs) and the position spoofing from malicious node will seriously affect many applications of VANETs. Therefore, the detection of the position spoofing by location verification is an important issue. The traditional location algorithm in WSN and MANET no longer applies to VANETs. In this paper, a vehicle trajectory-based location verification scheme is proposed to locate and track continuously the vehicle and draw the trajectory. The inosulation is calculated and the position spoofing is detected by comparing with the trajectory and speed of the neighbor vehicle. The simulation results show that false negative rate and false positive rate are low. When the cheating distance of malicious node is 30 m, false negative and false positive rate are close to 0.

Key words least square method; location verification; false negative rate; false positive rate; trajectory; VANETs

VANETs可实现车辆之间相互交换各自的位置、车速等信息, 通过这种信息交互, 以增强车辆对周围环境的认知能力, 从而在事故预警、保障交通安全以及为用户提供舒适的驾驶环境等方面发挥作用^[1-2]。在2003年ITU的汽车通信标准化会议上, 各国专家提出的VANETs技术有望大大降低未来交通事故损失^[3]。

VANETs中, 许多应用的正常运行都依赖于正确的位置信息。基于位置信息的Geographic routing^[4-6], 能利用位置信息指导路由的发现、维护和数据转发,

能够优化路径选择, 减少路由能耗, 实现网络的全局优化, 成为VANETs中最主要的路由方式。而且, 几乎所有的安全相关消息都和位置信息密切相关, 如交通状况报告、碰撞避免, 紧急刹车提醒等, 都是和位置信息直接相关的。

目前, 对VANETs网络中的车辆位置验证主要沿用传感器网络和Ad hoc网络中的位置验证方法^[7], 而这些方法均不适用于VANETs网络。传感器网络中节点的动态性不强, 一旦部署后, 节点间的位置基本上是固定的, 其位置验证的手段和方法主要采用位

收稿日期: 2012-09-05; 修回日期: 2013-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(60972036); 上海市民办高校骨干教师科研项目

作者简介: 徐会彬(1982-), 男, 博士生, 主要从事VANETs安全技术/路由技术方面的研究。

置估计方法确认节点位置的真实性。Ad hoc网络中, 由于节点的移动性强, 对位置验证有时间上的要求, 但由于移动速度慢, 位置验证的时间可以较长。而在VANETs网络中, 由于节点的移动速度快, 网络内节点的邻居关系随时间变化, 节点间的平均通信时间仅15 s左右, 并且一次相遇后, 再次相遇的可能性极小, 无法基于车辆节点的历史情况判断节点是否是恶意节点。

VANET中已有的位置验证方案大致可分为有基础设施的和没有基础设施的两类^[8], 每一类又可以进一步分为独立的和基于合作的方案。文献[9]提出了一种通过消除恶意数据来实现安全定位的方法, 称为ARMMSE (attack-resistant minimum mean square estimation), 利用存在欺骗的Beacon所引入的恶意参考位置和良性节点所提供的参考位置的不一致原理, 过滤出恶意Beacon信号(位置参考)。文献[10]中对文献[9]中提出的方案进行了改进, 提出一个增强的EARMMSSE(enhanced ARMMSE)方案, 使用贪婪算法减少了恶意节点识别和排除过程的计算量。文献[11]提出基于时间切片位置验证算法, 将高速移动的车辆转化为静态的时间切片。文献[12]提出了一种概率性的位置验证方案, 该方案基于RSS(radio signal strength)测距, 结合双曲线定位估计对恶意内部攻击者实现概率性的定位和追踪。但作为一种联合认证方案, 该方案在借鉴邻居的意见时并未考虑该意见是否可信, 因此该方案存在一定的安全隐患。

本文的位置验证主要关注节点发送的Beacon消息中, 所包含的位置信息是否和节点当前的真实位置一致。当然这里的一致不是绝对的, 允许一定的误差, 该误差是VANETs应用中所能接受的。提出了基于车辆运动轨迹的车辆位置验证算法, 通过利用最小二乘法对车辆的位置进行验证, 并连续跟踪车辆, 通过车辆的行驶路线、速度, 与邻居车辆的行驶路线、速度对比, 分析被验证的车辆与邻居车辆在行驶路线、速度的数据的吻合度, 检测车辆的性质(良性或恶性)。

1 基于车辆的运动轨迹的算法

1.1 系统假设

本文方案基于以下假设:

- 1) 假设大多数的车辆是位置可信的, 仅有部分会实施位置欺骗, 即若一个车辆周围有 n 辆车, 良性车辆的数目至少为 $(n+2)/2$;
- 2) 假设所有车辆中的无线收发设备发射消息时使用相同的全向发射功率(equivalent isotropically

radiated power, EIRP), 这里表示为 S ; 每个车辆能计算收到的信号的RSS值。节点以周期0.3 s发送Beacon消息。

3) 假设本方案所基于的安全机制中的密钥管理方案能够保证每辆车在给定时间只能有一个合法的密钥, 以确保恶意车辆在一个时间无法伪装成多个车辆进行位置欺骗。

1.2 算法描述

所谓的位置验证是验证某一时刻节点是否在其所声称的位置, 判断节点是否真诚地通告了自己的位置, 验证这一过程具有一定的瞬时性。

1) Beacon消息的传播机制。

每个节点周期地广播Beacon消息。Beacon消息的格式设置如图1所示。图中, nodeID表示节点的ID; Timestamp为消息的时戳; LC为节点的位置(二维坐标); Velocity表示节点在此刻的行驶速度; Direction表示节点行驶方向, 方向分向前直行、右拐和左拐, 分别用0、-1、1表示; List_nei用于存储其收到的邻居Beacon消息记录; Distance表示节点根据收到邻居信号的RSS值估计的与邻居之间距离。

nodeID	Timestamp	LC	Velocity	Direction	List_nei
List_nei:					
nodeID	Timestamp	LC	Velocity	Direction	Distance

图1 Beacon消息的格式

邻居节点收到来自邻居的Beacon消息, 首先判断其方向, 如果同向, 存储该消息, 并根据接收到该消息的RSS值计算距离, 将其存放在邻居列表中; 如果反向, 则丢弃该消息。之所以丢弃异向的邻居消息, 是由于异向的邻居关系维持时间及短, 邻居关系呈一次性。只接收与自己同方向的Beacon消息, 提高了邻居关系的长久性。

节点周期性向邻居发送Beacon消息。设节点 P 在 t_1 时刻发送Beacon消息, 发送Beacon的消息内容如图2所示。

P	t_1	$(x_p^{t_1}, y_p^{t_1})$	30	0	List_nei
-----	-------	--------------------------	----	---	----------

图2 P 点在 t_1 时刻发送的消息

图中, P 表示节点 P 的ID; t_1 表示发送该Beacon消息的时刻; $(x_p^{t_1}, y_p^{t_1})$ 表示节点 P 在 t_1 时刻对邻居所宣称的位置。良性节点向邻居通告自己的真实位置, 而恶意节点向邻居通告自己的虚假位置。30表示节点该时刻的行驶速度; 0表示节点向前直行。设有 k 个邻居收到该消息, $\{V, W_1, W_2, \dots, W_k\} \subseteq VS$, 且这些邻居与节点 P 同向, 其中 V 作为验证者, 其余的邻居 $W_1, W_2, \dots, W_k$ 为证人。 $W_1, W_2, \dots, W_k$ 根据其收到该消

息的RSS值, 计算与节点 P 的距离:

$$P_{rw} = c \frac{P_{tx}}{d^\alpha} \Leftrightarrow d = \left(\frac{cP_{tx}}{P_{rw}} \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$

式中, P_{rw} 为接收到的信号强度; c 常数; d 表示节点之间的距离; α 表示损耗系数; P_{tx} 表示发送信号的功率。

在计算过程中, 假定每个节点的发射功率已知。 $W_1, W_2, \dots, W_k$ 根据收到这个消息时的RSS值, 估计距离, 设其距离为 $D_{1p}^i, D_{2p}^i, \dots, D_{kp}^i$, 并且将其存放在自己的Beacon消息的列表中, 如 W_1 在 t_1' 时刻发送的Beacon消息, 其内容如图3所示。图中, Distance=123, 表示节点 W_1 根据收到来自 P 发送的消息的RSS, 通过式(1)计算得到的。同时, $W_2, W_3, \dots, W_k$ 也分别向邻居发送自己的Beacon消息。验证者陆续收到来自证人的信息, 以及节点 P 在不同时刻发送的Beacon消息。

W_1	t_1'	(x_p^i, y_p^i)	28	0	List_nei
-------	--------	------------------	----	---	----------

List_nei:

P	t_1'	(x_p^i, y_p^i)	30	0	123
-----	--------	------------------	----	---	-----

图3 W_1 在 t_1' 时刻发送的消息

设经过一段时间后(t_1, t_2, t_3, t_4), 验证者能获得来自证人、被验证者的数据信息, 并融合这些数据, 来判断被验证者所宣称位置的真实性。

根据证人提供的数据: $D_{1p}^i, D_{2p}^i, \dots, D_{kp}^i$ 、 $D_{1p}^j, D_{2p}^j, \dots, D_{kp}^j$ 、 $D_{1p}^k, D_{2p}^k, \dots, D_{kp}^k$ 、 $D_{1p}^l, D_{2p}^l, \dots, D_{kp}^l$; 验证者存储的节点 P 在4个时刻所宣称的信息, 包括其位置、速度和方向:

$$\begin{aligned} t_1: & \text{lc}_p^1, v_p^1, \text{or}_p^1 \\ t_2: & \text{lc}_p^2, v_p^2, \text{or}_p^2 \\ t_3: & \text{lc}_p^3, v_p^3, \text{or}_p^3 \\ t_4: & \text{lc}_p^4, v_p^4, \text{or}_p^4 \end{aligned}$$

通过最小二乘法, 估计节点 P 在4个不同的时刻位置。

2) 最小二乘法。

设目标节点的坐标为 $M(x, y)$, 观察点的坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$; 目标节点到观察点的距离 $d_1, d_2, \dots, d_n$, 则:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = d_2^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (2)$$

利用最小二乘原理, 可以得到目标节点的最小二乘估计, 即:

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (3)$$

$$\text{式中, } A = -2 \begin{bmatrix} (x_1 - x_4) & (y_1 - y_4) \\ (x_2 - x_4) & (y_2 - y_4) \\ \vdots & \vdots \\ (x_{n-1} - x_n) & (y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}; \quad b =$$

$$\begin{bmatrix} d_1^2 - d_4^2 - x_1^2 + x_n^2 - y_1^2 + y_n^2 \\ d_2^2 - d_4^2 - x_2^2 + x_n^2 - y_2^2 + y_n^2 \\ \vdots \\ d_{n-1}^2 - d_n^2 - x_{n-2}^2 + x_n^2 - y_{n-1}^2 + y_n^2 \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}。$$

采用最小二乘算法, 并依据 $D_{1p}^i, D_{2p}^i, \dots, D_{kp}^i$ 、 $D_{2p}^j, D_{2p}^j, \dots, D_{kp}^j$ 、 $D_{1p}^k, D_{2p}^k, \dots, D_{kp}^k$ 和 $D_{1p}^l, D_{2p}^l, \dots, D_{kp}^l$ 估计节点 P 在4个不同时刻的位置, 设其估计的位置分别表示为 est_lc_p^i 、 est_lc_p^j 、 est_lc_p^k 和 est_lc_p^l 。

3) 车辆行驶轨迹的分析。

验证者首先根据 est_lc_p^i 、 est_lc_p^j 、 est_lc_p^k 、 est_lc_p^l 以及 lc_p^i 、 lc_p^j 、 lc_p^k 、 lc_p^l 绘制节点 P 的两条行驶路线。第一条是由节点 P 自己宣称的4个不同时刻的 lc_p^i 、 lc_p^j 、 lc_p^k 、 lc_p^l , 并用拟合的方法形成的平滑曲线(由于车辆行驶路线近似平滑曲线), 命为宣称曲线; 第二条是通过证人RSS值估计的节点 P 的 est_lc_p^i 、 est_lc_p^j 、 est_lc_p^k 、 est_lc_p^l , 并用拟合的方法形成的平滑曲线, 命为估计曲线。平滑曲线是三维坐标系的, 由 x 、 y 、 t 轴构成。检测两条曲线的吻合度, 将其吻合度作为节点 P 的性质参数。

对两条曲线采样, 并对比每个采样的值, 计算两条曲线的吻合度。

设采样点数为 N , $B_\omega(x_{iT}^\omega, y_{iT}^\omega) = \{\omega(iT)\}$, $i = 0, 1, \dots, N$, 其中, ω 表示某条曲线, T 表示采样时间间隔, $B_\omega(x_{iT}^\omega, y_{iT}^\omega)$ 为曲线 ω 进行采样后的数据, 表示在不同时刻曲线节点的坐标值。

通过下式比较两条曲线的采样值:

$$(x_{iT}^{\omega_1} - x_{iT}^{\omega_2})^2 + (y_{iT}^{\omega_1} - y_{iT}^{\omega_2})^2 \leq \delta \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (4)$$

式中, δ 为门限值。当采样后两点的距离小于 δ , 则认为两点吻合, 并记为 0; 如果采样后两点的距离大于 δ , 则认为两点不吻合, 并记为 1。通过式(4), 可得到两条曲线的吻合度数据, 将其存放于 $1 \times N$ 矩阵 M 中。

若计算后 $M = [00010000]$, 表示第四个采样点两点不吻合, 即: $(x_{3T}^{\omega_1} - x_{3T}^{\omega_2})^2 + (y_{3T}^{\omega_1} - y_{3T}^{\omega_2})^2 \geq \delta$, 其他所有的采样点的距离都小于门限值 δ 。门限值的取值直接影响到数组 M 内元素的值, 应结合仿真

环境, 适宜选取参数 δ 值。通过对矩阵 $\mathbf{M}$ 的分析, 就能得到两条曲线的吻合度 ρ_M 。 ρ_M 为 $\mathbf{M}$ 中零的个数占总元素的比值。

根据曲线可分析节点在不同时刻的速度情况, 从速度数据能测量节点是否真实地报告自己的位置信息。其理由: 第一, 在从属同一邻居的车辆, 其速度应在同一范围内, 即车辆的行驶速度相差不大, 可对比邻居车辆在同一段的行驶速度; 第二, 节点在不同时刻所宣称的位置, 应与其在不同时刻的速度相对应, 同时车辆的行驶速度也应符合道路行驶规则。

为此, 可从两个渠道获取节点的速度。一方面, 节点在不同时刻自己所宣称的速度值, 设 $\{v_{id}^j\}$, id 表示节点的 ID, j 表示时刻。另一方面, 通过节点的行驶路线, 该路线由邻居通过的 RSS 值, 对节点估计的行驶路线, 计算节点在不同时刻的速度, 设为 $\{\text{est_}v_{id}^j\}$, 其中, $j \in \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ 。通过下式对比两个速度的差值:

$$|v_{id}^j - \text{est_}v_{id}^j| < \xi \quad (6)$$

其中, ξ 为速度吻合门限值。如果速度吻合, 即速度差在门限范围内, 记为 0; 否则记为 1。形成一个 1×4 的矩阵 $\mathbf{H}$, 存放速度差值。通过式(5)计算速度吻合度 ρ_H 。

同时, 绘制邻居的速度曲线, 对比从属一个邻居范围内的速度曲线。同样, 采用上述方法, 分别进行采样, 其形成 $k \times N$ 矩阵 $\mathbf{R}$, k 为邻居数目, N 为采样点数。通过计算 $\mathbf{R}$ 每行非零的个数, 可知节点的速度是否与邻居的速度相吻合。根据 ρ_M 定义计算节点 P 所形成的速度曲线与邻居的速度曲线吻合度, 记为 $\rho_{R(i)}$ 。 $\rho_{R(i)}$ 等于 $\mathbf{R}(i,:)$ 中零的个数占 $\mathbf{R}(i,:)$ 总元素的比值, $i = 0, 1, \dots, k$ 。

吻合度 ρ_M 、 ρ_H 和 $\rho_{R(i)}$ 不同程度地反映了被验证节点的性质。为了能准确判断节点, 针对 ρ_M 、 ρ_H 和 $\rho_{R(i)}$ 提供不同的权重系数。

通过下式判决节点的性质:

$$\xi_{\text{str}} = c_m \rho_M + c_h \rho_H + \sum_i c_i \rho_{R(i)} \quad (5)$$

式中, c_m 、 c_h 分别为(0,1)的常数, 系数 $c_i \in (0,1)$ 。参数 ξ_{str} 融合了行驶路线、速度的吻合度数据, ξ_{str} 值越大, 表示被验证节点的行驶路线、速度与邻居行驶路线、速度相配, 并与自己宣称的信息一致。当 ξ_{str} 小于门限值 Q , 则认为节点 P 属于恶意节点; 否则属于良性节点。

2 算法仿真以及分析

2.1 算法性能指标

一个位置验证算法的有效性, 主要通过该算法能否正确地判断节点所声称的位置是否同其当前位置一致。位置验证算法应能检测出虚假地通告位置的恶意节点, 同时对于正确声称其位置的良性节点, 不能将其误判为恶意节点。位置验证算法的正确率 (accuracy, AC), 表示为位置验证结果正确的次数与总的验证次数之比。考虑到VANETs中正确的位置信息的重要性, 将正确率分为两个重要的标准来评价位置验证算法的有效性, 分别为漏警率 (false negative rate, FNR) 和虚警率 (false positive rate, FPR)。提出的验证方案具有良好的性能。

2.2 仿真建模

本次仿真选取了一个较为简单的4车道场景, 每车道宽2.5 m, 长500 m的高速公路, 公路上共有11辆车, 其中一辆为验证者 V , 其余为证人节点 $\{W_1, W_2, \dots, W_{10}\}$, 证人按 $W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow \dots \rightarrow W_{10}$ 的顺序轮流广播自己的位置, 即充当被验证者的角色。车辆的初始化分布如图4所示。

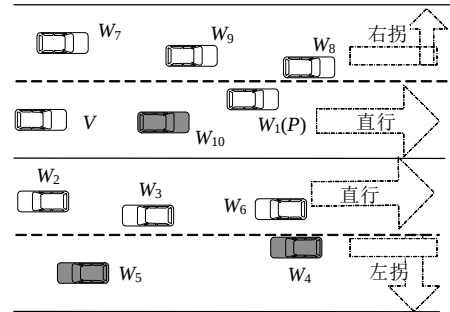


图4 车辆的初始分布图

本次仿真在 $10 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的目标区域内随机部署1个验证者 V 和10个邻居节点。按照仿真建模中通信过程的设计, V 在收到被验证者的 Beacon 消息后, 提取出其中的信息, 使用本文所提出的位置验证算法进行验证。在仿真中约定以下内容: 通过RSS值测距误差在 $0 \sim 10 \text{ m}$ 之间; 最大通信距离为 300 m ; 所有节点都在 $10 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的区域内, 但是恶意节点上报的位置可以在该区域之外; $\delta = 12^2 = 144$, $\rho_{R(i)} = 0.4$, 采样点数 $N = 20$, $\xi = 0.8$, $\rho_M = 0.4$, $\rho_H = 0.2$ 。

在仿真过程中, 分别对邻居中有1个恶意节点, 2个恶意节点, 3个恶意节点以及4个恶意节点的情况进行了仿真, 进行1 000次的位置验证, 通过分析漏警率和虚警率, 分析了位置验证算法中, 选取最佳

的 τ 值。在此基础上,利用该最优门限值,仿真分析了恶意节点欺骗距离分别为10 m、15 m、20 m、25 m、30 m、35 m、40 m、45 m和50 m时的漏警率、虚警率。

2.3 仿真数据分析

通过仿真,得到如图5~图8所示数据。图3和图4中, Q 越大,漏警率越高,虚警率越低; Q 越低,漏警率越低,虚警率越高。故可取一个最佳的 Q 值,使得漏警率和虚警率同时较低,从而获得优良的算法性能。

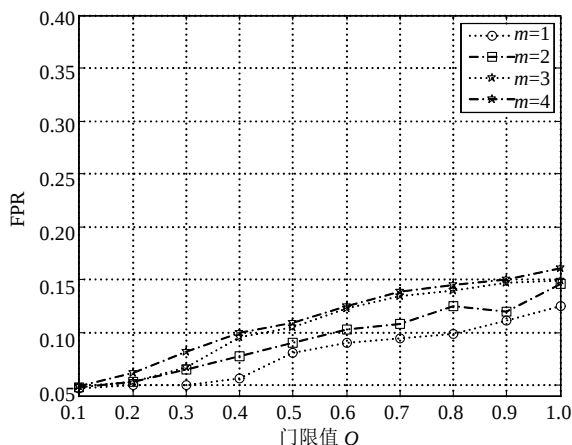


图5 Q 取不同值时本文算法的漏警率

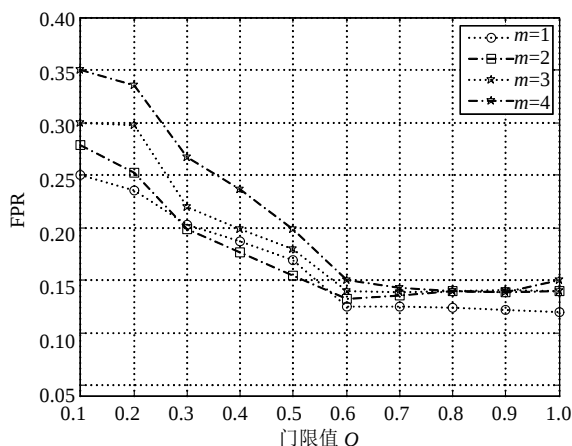


图6 Q 取不同值时本文算法的虚警率

在 $Q=0.6$ 时,本文仿真分析了恶意节点距离欺骗分别为10 m、15 m、20 m、25 m、30 m、35 m、40 m、45 m和50 m时,在 $m=1,2,3,4$ 恶意节点的情况下,本文所提出算法的漏警率和虚警率分别如图7和图8所示。

从图7和图8所示结果知,在10 m时,漏警率和虚警率较高,这是因为在本文的仿真建模中,所选用的测距误差为0~10 m,因此当恶意证人的测距欺骗为10 m时,是无法区分恶意证人和良性证人的。当恶意证人所欺骗的距离达到30 m时,基于车辆运

动轨迹的漏警率和虚警率几乎趋近于0。说明,本文所提出的位置验证方案,具有很好的性能。

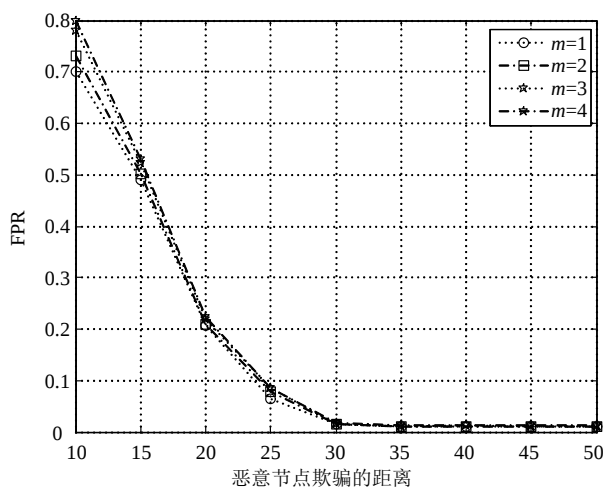


图7 漏警率随恶意节点的距离欺骗的距离值变化曲线

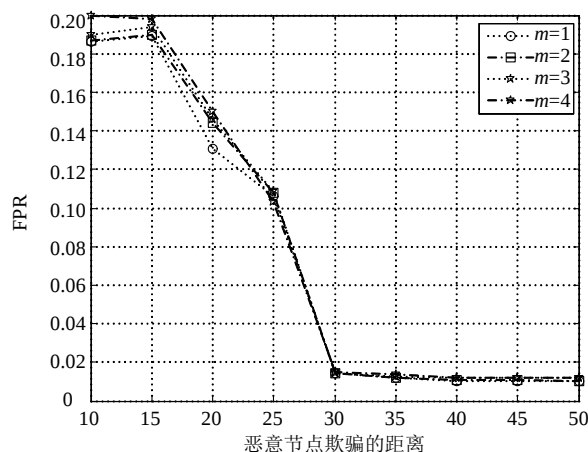


图8 虚警率随恶意节点的距离欺骗的距离值变化曲线

3 总结

针对VANETs的恶意节点的位置欺骗,依据从邻居关系的车辆的行驶路线、速度应类似的事实,即节点的行驶路线、速度数据应与邻居节点的数据相吻合,提出基于车辆的运动轨迹的位置验证算法,通过对节点的连续跟踪,绘制其行驶路线,并与邻居的相应数据对比,检测节点的性质。仿真结果表明,基于车辆的运动轨迹的位置验证算法能有效检测出恶意节点,具有较低的漏警率和虚警率。

参考文献

- [1] ABUMANSOOR O, BOUKEERCHE A. A cooperative multi-hop location verification for non line of sight (NLOS) in VANET[C]//Wireless Communications and Networking Conference. Ottawa: IEEE, 2011: 773-778.
- [2] CATHAY S C, Internet ITS consortium[EB/OL]. [2009-04-20]. <http://www.internetits.org>. 2006.4
- [3] 常促宇, 向勇, 史美林. 车载自组网的现状与发展[J]. 通

- 信学报, 2007, 11(5): 116-127.
- CHANG Cu-yu, XIANG Yong, SHI Mei-lin. Development and status of vehicular Ad hoc networks[J]. Journal on Communications, 2007, 11(5): 116-127.
- [4] TANG G M, XIE Y. Regional perimeter routing for GPSR based on left & right-hand rules[J]. Application Research of Computers, 2011, 3(28): 1100-1104.
- [5] FÜßLER H, MAUVE M, HARTENSTEIN H, et al. Mobile com poster: Location-based routing for vehicular Ad hoc networks[J]. Mobile Computing and Communications, 2003, 7(1): 47-49.
- [6] MUSICKI D, KAUNE R, KOCH W. Mobile emitter geolocation and tracking using TDoA and FDoA measurements[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 3(2): 1863-1874.
- [7] DAWEI L, DAN W. A node-to-node location verification method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(5): 1526-1538.
- [8] SONG J H, WONG VS, LEUNG V M. Secure location verification for vehicle Ad hoc networks[C]//Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE, 2008: 1-5.
- [9] LIU D, NING P, DU W K. Attack-resistant location estimation in sensor networks[C]//The 4th international symposium on information processing in sensor networks (IPSN'05). Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2005: 99-106.
- [10] ZHOU Yu, ZHANG Hai-yan, LIU Yan-chang. An attack-resistant localization algorithm in wireless sensor networks[C]//Wireless Communications Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE, 2010: 1-4.
- [11] XUE Xiao-ping, LIU Ming-yang, LIN Ni-zhong, et al. Time slice-based location verification for VANET[J]. China Communication, 2011, 9(8): 45-53.
- [12] LAURENDEAU C, BARBEAU M. Probabilistic localization and tracking of malicious insiders using hyperbolic position bounding in vehicular network[J]. Journal on Wireless Communications and Networking, 2009, 2(4): 1-13.

编辑 张俊

(上接第548页)

- [4] HAARDT M, ROEMER F, GALDO G D. Higher-order SVD-based subspace estimation to improve the parameter estimation accuracy in multidimensional harmonic retrieval problems[J]. IEEE Trans Signal Process, 2008, 56(7): 3198-3213.
- [5] LATHAUWER L, MOOR B, VANDER-WALLE J. A multilinear singular value decomposition[J]. SIAM J Matrix Anal Appl, 2000, 21(4): 1253-1278.
- [6] LATHAUWER L. Signal processing based on multilinear algebra[D]. Leuven, Belgium: Katholieke University, 1997.
- [7] HAARDT M. Efficient one-, two- and multi- dimensional high resolution array processing[D]. Munich, Germany: Munich University of Technology, 1996.
- [8] THAKRE A, HAARDT M, ROEMER F, et al. Tensor-based spatial smoothing using multiple snapshots[J]. IEEE Trans Signal Process, 2010, 58(5): 2715-2727.
- [9] NION D, SIDIROPOULOS N D. Adaptive algorithms to track the Parafac decomposition of a third-order tensor[J]. IEEE Transactions, 2009, 57(6): 2299-2310.
- [10] KOLDA T G, BADER B W. Tutorial on matlab for tensors and the tucker decomposition[EB/OL]. [2012-03-05]. <http://csmr.ca.sandia.gov/~tgkolda/pubs/index.html#SAND2004-5187>.
- [11] RAO B D, HARI K V S. Weighted subspace methods and spatial smoothing: analysis and comparison[J]. IEEE Trans on SP, 1993, 41(2): 788-803.
- [12] VIBERG M, OTTERSTEN B. Sensor array processing based on subspace fitting[J]. IEEE Trans on SP, 1991, 39(5): 1110-1121.

编辑 税红