

# 车载物联网中蠕虫传播模型的构建与仿真

汪 峰<sup>1</sup> 钱焕延<sup>1</sup> 汪婧雅<sup>2,3</sup> 高德民<sup>1,4</sup>

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)<sup>1</sup> (南京中医药大学信息技术学院 南京 210046)<sup>2</sup>

(澳大利亚斯威本国立科技大学信息与通讯技术学院 墨尔本 3122)<sup>3</sup>

(澳大利亚卧龙岗大学电子计算机与通信工程学院 卧龙岗 2500)<sup>4</sup>

**摘 要** 鉴于城市路网环境中车载物联网车辆节点在全方向复杂路况下行驶以及道路环境对无线信号存在阻挡、叠加干扰等影响,结合智能行驶模型 IDM,针对车载物联网蠕虫的传播进行分析研究,构建了车载物联网蠕虫传播模型 VIOTWPM。通过仿真实验证明,VIOTWPM 较好地显示了车辆节点平均速度、阴影衰落等交通流量、无线信道因素对蠕虫传播的影响,为真实地模拟城市路网环境车载物联网蠕虫的传播,以及设计实时检测策略来防治城市路网环境车载物联网蠕虫的破坏性传播提供了理论基础。

**关键词** 物联网,车载网络,网络安全,蠕虫模型,城市路网

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Construction and Simulation of Worm Propagation Model in Vehicular Internet of Things

WANG Zheng<sup>1</sup> QIAN Huan-yan<sup>1</sup> WANG Jing-ya<sup>2,3</sup> GAO De-min<sup>1,4</sup>

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)<sup>1</sup>

(School of Information Technology, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210046, China)<sup>2</sup>

(Faculty of Information and Communication Technologies, Swinburne University of Technology, Melbourne 3122, Australia)<sup>3</sup>

(School of Electrical, Computer & Telecommunications Engineering, University of Wollongong, Wollongong 2500, Australia)<sup>4</sup>

**Abstract** In urban-road environment vehicular Internet of things vehicle nodes draw over an omnirange and complex road conditions domain, the road environment has barrier, superimposed disturbance influence over wireless signal. Inoculating with the intelligent driver model, we investigated the outbreak of worm epidemics in vehicular Internet of things. Our study constructed a vehicular Internet of things worm propagation model with vital mean velocity and shadow-fading component. This model preferably shows the influence over worm propagation in vehicular Internet of things by these components, and factually simulates the worm propagation in vehicular Internet of things, and provides a theoretical basis for programming real-time detection strategy and preventing worm destructive epidemics in vehicular Internet of things.

**Keywords** Internet of things, Vehicular networks, Network security, Worm model, Urban-road

## 1 引言

物联网(The Internet Of Things, IOT)是一个动态的全球网络基础设施,具有基于标准和互操作通信协议的自组织能力,其中物理的和虚拟的“物”具有身份标识、物理属性、虚拟的特性和智能的接口,并与信息网络无缝整合。物联网将与媒体互联网、服务互联网和企业互联网一起构成未来互联网。物联网在无需人工协助干预条件下便可实现物品间的协同和互动,以达到为人们提供智能服务的目的<sup>[1-4]</sup>。由于物联网在军事、工业生产、灾害预警、医疗卫生、智能交通、智能管理等领域有着广泛的应用和深远的前景,因此欧美日等大国已经相继开展相关技术的研究。欧盟提出了环境感知智能(Ambient Intelligence)<sup>[5]</sup>、物联网-欧洲行动计划(Internet of

Things-An action plan for Europe)<sup>[3]</sup>等概念;2009年1月美国IBM也提出智慧地球(Smarter Planet)这一新概念<sup>[6]</sup>;日本衍生出了泛在网络(Ubiquitous Network),2009年6月提出“i-Japan”计划。自2009年8月温家宝总理提出“感知中国(Reading China)”以来,物联网被正式列为国家五大新兴战略性新兴产业之一,写入“政府工作报告”,物联网在中国受到了全社会极大的关注,进入快速发展的时期。

随着物联网的发展,车载物联网(Vehicular Internet Of Things, VIOT)及其安全技术已开始得到广泛关注和应用。车载物联网是一项新兴技术,可以大幅提高未来交通系统的安全和效率,并达到节能减排的目标。通过车载物联网的智能交通控制,可提高平均车速,降低燃油消耗,同时大大减少汽车尾气排放,改善空气质量。车载物联网能够在车辆之间

到稿日期:2011-04-11 返修日期:2011-05-27 本文受国防科工委应用基础资金资助。

汪 峰(1980—),男,博士生,主要研究方向为网络技术、网络安全, E-mail: wangzheng27@126.com; 钱焕延(1950—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为网络技术、网络安全。

建立无线通信,也能够 在路过车辆和路边基站之间建立无线通信。利用多跳转发的方式,车载网络能够让两个在信号范围之外的车辆节点也建立通信链接。车载网络将成为未来智能交通系统的重要组成部分。车载物联网无线信道在通信过程中特有的开放性、传统网络异构连接的开放性为蠕虫等恶意代码(malware)的入侵和传播提供了可乘之机。由于车载物联网对于信息传输协议、通信信道、道路环境、交通流量的依赖,因此其在抵御潜在蠕虫攻击上展现出不同以往的性能。由具有潜在灾难性的攻击方案推论,车载物联网的蠕虫的大规模爆发将源自某一独立车辆节点的感染,并通过车辆节点间的通信蔓延整个车载物联网网络。

针对车载无线网络安全及无线蠕虫传播方面的研究,目前国内尚处于起步阶段,国外针对车载物联网安全的研究几乎是空白。文献[7,8]提到各种实时高速公路路网环境中车载自主网络(Vehicle Ad-hoc Networks, VANET)中蠕虫传播,其中只考虑到高速公路简单的同向和反向两种车辆节点相对运动关系,没有涉及城市路网全方向复杂路况行驶的情况;文献[9]分析了车辆节点速度矢量对蠕虫传播的影响,没有考虑道路环境对通信连接的影响。

精准的传播模型是有效描述蠕虫传播规律、评估蠕虫破坏性的工具。鉴于城市路网环境中车辆节点全方向复杂路况行驶以及道路环境对无线信号存在阻挡、叠加干扰等影响,本文结合智能行驶模型(Intelligent Driver Model, IDM)<sup>[10]</sup>,针对车载物联网蠕虫的传播进行分析研究,构建了车载物联网蠕虫传播模型(Vehicular Internet Of Things Worm Propagation Model, VIOTWPM)。VIOTWPM较好地显示了城市路网道路拓扑结构和全方向行驶条件下车辆节点平均速度、阴影衰落等交通流量、无线信道因素对蠕虫传播的影响。通过仿真实验证明,结果与 VIOTWPM 理论一致。VIOTWPM 模型能较为真实地模拟城市路网环境车载物联网蠕虫的传播及其与早期研究的传统网络环境蠕虫传播的差异,为设计实时检测策略,防治城市路网环境车载物联网蠕虫的破坏性传播提供了理论基础。

## 2 模型构建

### 2.1 车辆节点移动性

车载物联网中所有车辆节点的运动以道路网络为基础,是一种十分复杂的交通流量。例如随机游动(random walk)、随机航路点(random waypoint)和随机方向(random direction)等适用于移动自主网络(Mobile Ad-hoc Networks, MANET)和无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)节点运动规律的运动模型根本不适合描述车载物联网车辆节点受道路环境影响的车辆节点的运动。而文献[10,11]中的基于智能行驶模型(Intelligent Driver Model, IDM)和车辆跟驰模型(Car-following Model)在宏观上能够很好地描述车载物联网车辆节点的运动,如自发的交通拥堵、急停快速启动波(stop-and-go waves)、成排行进(platoon formation)等交通现象,将交通流量视为不能压缩的流,在宏观区域内几乎可以忽略城市路网中平交、立交道口对车辆改变行驶角度的影响。

然而在微观上车辆节点的运动和相互关系更为复杂,本文针对城市路网车载物联网蠕虫传播构建车辆节点运动模

型。受城市路网环境限制的车辆节点在全方向性行驶中,速度矢量因素是影响车辆节点性态变化的重要因素。城市路网中车辆节点以密度  $\rho$ (vehicle/km/lane) 随机均匀分布在一个全方向行驶区域。某地区  $1\text{km}^2$  范围  $500\text{m}$  比例尺卫星图如图 1 所示,该区域内  $150\text{m}$  比例尺车载物联网车辆节点几何卫星图如图 2 所示。由图 2 可见,  $1\text{km}^2$  城市路网区域内某车辆节点  $\text{vehicle}_1$  以速度矢量  $\vec{v}_1$  行驶,假设某单位时间内  $\text{vehicle}_1$  在正常的交通条件下直行,  $\vec{v}_1$  为常量。与此同时,另一车辆节点  $\text{vehicle}_2$  在  $\text{vehicle}_1$  的通信半径  $R$  内以速度  $\vec{v}_2$  行驶,此时两车之间建立了接触。要使  $\text{vehicle}_2$  在单位时间  $dt$  处于和  $\text{vehicle}_1$  的接触状态,  $\text{vehicle}_2$  必须在  $\text{vehicle}_1$  的接触范围内行驶,而该接触范围为菱形并沿着速度矢量差  $\vec{\omega} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2$  的方向移动。



图 1 某地区  $1\text{km}^2$  范围  $500\text{m}$  比例尺卫星图



图 2 某地区  $150\text{m}$  比例尺车载物联网车辆节点几何卫星图

本文定义  $\omega = |\vec{\omega}|$ ,  $v_1 = |\vec{v}_1|$ ,  $v_2 = |\vec{v}_2|$ , 并定义  $\phi$  为两车辆节点速度矢量  $\vec{v}_1$  和  $\vec{v}_2$  的夹角。速度  $\omega$  为

$$\omega = (v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos\phi)^{1/2} \quad (1)$$

与此同时,两车辆节点接触范围  $dS_{ABCD}$  为  $2R\omega dt$ 。

车辆节点速度矢量在方向  $\phi$  和  $(\phi + d\phi)$  夹角内车辆节点的密度为  $\rho(d\phi/2\pi)$ 。因此  $dt$  单位时间内相互进入接触范围的车辆节点为  $dN_\phi = \rho 2R\omega d\phi dt / 2\pi$ 。所以平均接触率  $R_c$  为

$$R_c = \int_0^{2\pi} \frac{dN_\phi}{dt} = \int_0^{2\pi} \frac{\rho 2R\omega d\phi dt / 2\pi}{dt} = \frac{\rho R}{\pi} \int_0^{2\pi} \omega d\phi \quad (2)$$

由式(1)、式(2)有

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{\rho R}{\pi} \int_0^{2\pi} (v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos\phi)^{1/2} d\phi \\ &= \frac{4\rho R}{\pi} (v_1 + v_2) \int_0^{\pi/2} (1 - k^2 \sin^2\omega)^{1/2} d\omega \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $k = 2(v_1v_2)^{1/2} / (v_1 + v_2)$ , 并且  $-1 \leq k \leq 1$ 。式(3)为第二类椭圆积分,标准化范式为

$$R_c = \frac{4\rho R}{\pi} (v_1 + v_2) E\left(\frac{\pi}{2}, k\right) \quad (4)$$

由于车辆节点速度符合麦克斯韦-玻尔兹曼分布(Maxwell-Boltzmann distribution)<sup>[12]</sup>, 本文定义城市路网特定区域

内车辆的平均速度为  $v_m$ 。由式(4),有

$$R_c = \frac{8}{\pi} \rho R v_m = \frac{8\tau\rho R v_m}{\pi(l+l_c)} \quad (5)$$

在 IDM 模型<sup>[11]</sup>中两车稳定行驶状态下,两辆相邻车辆节点间距离为  $l$ ,且  $l \leq R$ ,而

$$l_c(v_m) = (l_0 + v_m T) \left[ 1 - \left( \frac{v_m}{v_0} \right)^\delta \right]^{-1/2} \quad (6)$$

式中,  $l_0$  为拥堵距离,  $\delta$  是行驶参数,  $v_0$  是期望速度,  $T$  为安全车头时距。

此外

$$\rho = \frac{\tau\rho_r}{l+l_c} \quad (7)$$

式中,  $l_c$  为车辆长度,  $\tau$  为道路车道数量,  $\rho_r$  为城市路网中道路密度。

由式(5)和式(7)得

$$R_c = \frac{8}{\pi} \rho R v_m = \frac{8\tau\rho_r R v_m}{\pi(l+l_c)} \quad (8)$$

## 2.2 无线信道

由于大规模生产降低了成本, 802. 11a/b/g 无线局域网技术已经被广泛使用。虽然 802. 11a/b/g 最初不是针对车载环境而设计的, 但由于其被广泛使用带来的优势, 使得许多研究人员在车载环境中进行了实验, 如文献[13-15]对 802. 11a/b/g 在车载环境中的应用进行了一系列实验。802. 11p 和专用短程通信(DSRC)标准对 802. 11 标准进行了扩充, 以使其能够适应车载环境的无线通信<sup>[16,17]</sup>。车载物联网的通信环境在无线通信过程中其车辆节点信号强度不可避免地受到路边树木、山丘以及建筑物等的阻挡影响, 受其他车辆节点、路边节点以及通信基站、手持通信工具等信号源的叠加干扰影响, 这种阴影效应称为阴影衰落(shadow-fading)。因此有必要计算阴影衰落对信道连接率的影响, 来反映现实中的情况。本文结合文献[18]中符合对数正态分布的阴影衰落模型, 加入空间车辆节点平均速度参数  $v_m$  作为速度制约因素, 和阴影衰落模型中随机项的方差参数一起构建无线信道模型。

某一车辆节点以强度  $P_r(1)$  发射无线通信信号, 其他车辆节点以强度  $P_r(2)$  接收。车辆节点间对应的信号衰减被定义, 并以分贝单位表示为<sup>[18]</sup>

$$\beta(l_c) = \beta_1(l_c) + \beta_2 = \frac{P_r(1)}{P_r(2)} = 10 \log \left( \frac{P_r(1)}{P_r(2)} \right) \quad (9)$$

式中,  $\beta_2$  是阴影衰落模型中的随机项, 并以正态概率分布于零均值和方差  $\sigma$  之间;  $\beta_1$  为确定性距离制约项:

$$\beta_1(l_c) = \alpha 10 \log l_c = \alpha 10 \log (l_0 + v_m T) \left[ 1 - \left( \frac{v_m}{v_0} \right)^\delta \right]^{-1/2} \quad (10)$$

式中,  $\alpha$  为路径损耗指数, 且  $2 \leq \alpha \leq 4$ 。

式(10)所描述的模型只能捕获无线信道中由距离和阴影衰落影响造成的信号衰减, 无法体现两个通信的车辆节点受车辆节点平均速度影响所造成的变化。目前一些对适用于车载无线通信环境的 802. 11 和 802. 16 (WiMAX) 技术的研究表明, 车辆节点速度对通信信号质量有重要的影响<sup>[19]</sup>。把车辆节点平均速度因素加入到模型中, 并由式(6)用速度函数表示距离, 得到确定性速度和距离制约项  $\beta_1'$ <sup>[20]</sup>:

$$\beta_1'(v_m, l_c) = \beta_1(l_c) - v_m (1 - e^{-v_m/v_0}) \quad (11)$$

某一车辆节点发射的无线通信信号到达其他车辆节点

时, 接收方接收到的信号强度  $P_r(2) \geq \beta$  可以建立通信连接的最小信号强度  $P_r(2)_{th}$ , 也就是两车辆节点间的信号衰减  $\beta(1, 2) \leq$  最大衰减阈值  $\beta_{th}$  时, 两车辆节点间便可建立通信连接。由式(9)可知

$$\beta_{th} = \frac{P_r(1)}{P_r(2)_{th}} = 10 \log \left( \frac{P_r(1)}{P_r(2)_{th}} \right) \quad (12)$$

因此对于给定的  $P_r(1)$  和  $P_r(2)$ , 两车辆节点间能够建立通信连接直接通信的几率为

$$R_t = R \{ P_r(2) \geq P_r(2)_{th} \} = \{ \beta(1, 2) \} \\ = \int_{-\infty}^{\beta_{th} - \beta_1} \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma} e^{-\frac{\beta_2^2}{2\sigma^2}} d\beta_2 \quad (13)$$

根据高斯公式, 设  $\beta_2 = 2^{1/2} \sigma \cdot t$ , 由式(13)和高斯分布可得

$$R_t = \int_{-\infty}^{\frac{\beta_{th} - \beta_1'}{2^{1/2} \sigma}} \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma} e^{-\frac{(2^{1/2} \sigma t)^2}{2\sigma^2}} d(2^{1/2} \sigma \cdot t) \\ = \int_{-\infty}^{\frac{\beta_{th} - \beta_1'}{2^{1/2} \sigma}} \frac{1}{\pi^{1/2}} e^{-t^2} dt \\ = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi^{1/2}} \int_0^{\frac{\beta_{th} - \beta_1'}{2^{1/2} \sigma}} e^{-t^2} dt \quad (14)$$

此外高斯误差函数为

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (15)$$

由式(11)、式(14)和式(15)得

$$R_t = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{erf} \left( \frac{\beta_{th} - \beta_1'}{2^{1/2} \sigma} \right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{erf} \\ \left( \frac{\beta_{th} - \alpha 10 \log (l_0 + v_m T) \left[ 1 - \left( \frac{v_m}{v_0} \right)^\delta \right]^{-1/2} + v_m (1 - e^{-v_m/v_0})}{2^{1/2} \sigma} \right) \quad (16)$$

## 2.3 蠕虫传播动力学模型

易感染-已感染-免疫 (Susceptible-Infected-Recovered, SIR)<sup>[21]</sup>模型是 Internet、移动自主网络、无线传感器网络和物联网环境中研究蠕虫传播的经典模型。在 SIR 模型中, 车辆节点只能处于易感染状态、已感染状态和免疫状态 3 种状态之一。若未被蠕虫感染, 车辆节点处于易感染状态。若被蠕虫感染, 车辆节点处于已感染状态。车辆节点通过安装补丁升级程序等防御机制便可以清除该种蠕虫, 并且不能再感染其他车辆节点, 同时自己也不能被感染驻存过的同一种蠕虫再次感染, 此时车辆节点处于免疫状态。本文定义单位时间内处于易感染状态下的车辆节点被感染的几率为  $\beta$ 。单位时间内已感染状态下的车辆节点以几率  $\gamma$  清除蠕虫, 变成免疫车辆节点, 并对清除的该种蠕虫免疫。一般情况下  $\beta$  和  $\gamma$  的值是不相同的。A 为车辆节点行驶区域面积, 某单位时间某城市路网区域内车辆节点总数为 N, 且短时间内变化很小。车辆节点作为被感染物其种群总数为

$$N = A \cdot \rho \quad (17)$$

由式(7)和式(17)得

$$N = A \cdot \frac{\tau\rho_r}{l+l_c} = \frac{A\tau\rho_r}{l+l_c} \quad (18)$$

在瞬时 t 时刻, 已感染车辆节点数为 I(t), 易感染车辆节点数为 S(t), 免疫车辆节点数为 R(t)。SIR 模型的规范式如下<sup>[21]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta I(t)S(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta I(t)S(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) \end{cases} \quad (19)$$

为规范几率分布,假如易感染车辆节点与已感染车辆节点产生接触,建立通信连接,被已感染车辆节点所感染成为已感染车辆节点的几率为  $P$ ,那么本文考虑车辆节点运动方式和通信信道机制下车载物联网蠕虫总的传播概率为

$$\begin{aligned} \beta(t) &= R_c \cdot R_i \cdot P \\ &= \frac{8\tau\rho R v_m}{\pi(l+l_c)} \cdot \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\beta_{th} - \beta_1'}{2^{1/2}\sigma}\right) \right] \cdot P \\ &= \frac{4\tau\rho R v_m P}{\pi(l+l_c)} + \frac{4\tau\rho R v_m P}{\pi(l+l_c)} \operatorname{erf}\left(\frac{\beta_{th} - \beta_1'}{2^{1/2}\sigma}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

在以往的 SIR 模型中,包括车辆在内的节点都被限定在某一固定区域。但是在实时城市路网的某一固定区域中,车辆节点是在不断变化的,同一时刻内会有许多车辆节点不停驶入、驶出该区域。因此本文定义单位时间内车辆节点驶入该区域的几率为  $b$ ,并且新驶入的车辆节点都处于易感染状态;与此同时车辆节点驶出的几率为  $b'$ 。一般情况下某单位时间内驶入和驶出同一区域的车辆节点近似数量守恒,因此本文假设  $b$  和  $b'$  的值相等,且处于 3 种状态的车辆节点有同等的驶入/驶出率。

交通流量、车速和车流密度是表征交通流特征的 3 个基本参数,3 参数关系交通流量模型为

$$Q = k \cdot v_m \quad (21)$$

式中, $Q$  为每小时单位面积行驶区域平均流量 (vehicle/h);  $k$  为平均车流密度 (vehicle/km),  $k = \rho \cdot \tau$ 。

每小时单位行驶区域内车辆节点驶入/驶出几率为

$$b = AQ/N \quad (22)$$

由式(18)、式(21)和式(22)推导出每分钟单位区域内车辆节点驶入/驶出几率为

$$b = \frac{AQ}{60N} = \frac{A\rho\tau v_m}{60A\rho\tau} (l+l_c) = \frac{v_m(l+l_c)}{60} \quad (23)$$

在初始时刻免疫车辆节点的数目  $R(0)=0$ 。对 VIOTW-PM 的构建如下:

$$\begin{cases} S(t) + I(t) + R(t) = N \\ R(0) = 0 \\ N = \frac{A\tau\rho}{l+l_c} \\ l_c(v_m) = (l_0 + v_m T) \left[ 1 - \left( \frac{v_m}{v_0} \right)^\delta \right]^{-1/2} \\ \frac{dS(t)}{dt} = \frac{v_m(l+l_c)}{60} N - \frac{v_m(l+l_c)}{60} S(t) - \beta S(t)I(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t) - \frac{v_m(l+l_c)}{60} I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) - \frac{v_m(l+l_c)}{60} R(t) \\ \beta(t) = \frac{4A\tau\rho R v_m P}{\pi(l+l_c)} + \frac{4A\tau\rho R v_m P}{\pi(l+l_c)} \operatorname{erf}\left(\frac{\beta_{th} - \beta_1'}{2^{1/2}\sigma}\right) \\ \beta_1'(v_m, l_c) = \beta_1(l_c) - v_m(1 - e^{-v_m/v_0}) \\ \beta_1(l_c) = \alpha 10 \log l_c \end{cases} \quad (24)$$

### 3 仿真研究

针对车载物联网蠕虫在城市路网的传播,VIOTWPM 模型参数在本文仿真实验中的取值如表 1 所列。

表 1 VIOTWPM 模型参数表

参数名称	参数定义	参数取值
R	车辆节点通信半径	250m
$v_m$	空间车辆节点平均速度	0~60km/h
$l_c$	车辆长度	5m
A	车辆节点行驶区域面积	1km <sup>2</sup>
$\tau$	道路车道数量	6lane
$\rho_r$	道路密度	10km/km <sup>2</sup>
$l_0$	拥堵距离	2m
$\delta$	行驶参数	2
$v_0$	期望速度	60km/h
T	安全车头时距	1.6s
$\sigma$	阴影衰落模型中随机项的方差	2~4dB <sup>2</sup>
$\alpha$	路径损耗指数	3
$\gamma$	免疫率	0.1
P	易感染车辆节点与已感染车辆节点通信时感染率	1

本文随机选取车载物联网车辆节点感染蠕虫,并且在城市路网可能出现的各种交通状态情况下模拟该病毒的传播。为获取显著具有统计学意义的数据,本文的仿真实验开始时随机选取 10 辆不同的车辆节点作为初始已感染车辆节点,并且每辆平均至少进行 50 次仿真。

图 3 示出在阴影衰落模型中随机项的方差  $\sigma=2$ ,物联网车辆节点以 7 种不同平均车速在不同路况下行驶时车载物联网蠕虫从初始状态开始传播的过程及不同传播规律。

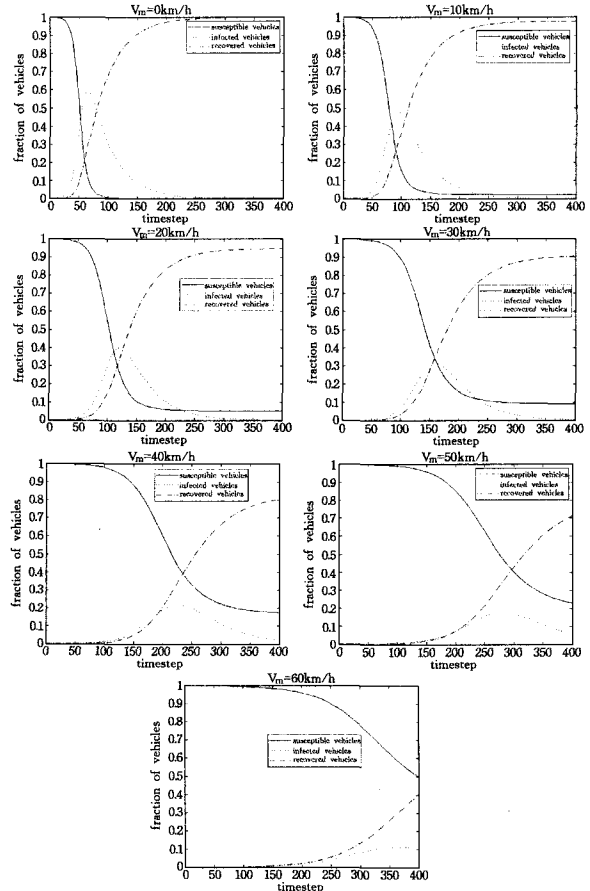


图 3  $\sigma=2$ ,不同平均车速时 3 种感染状态比例曲线图

根据图 3,本文将其分成初始阶段、爆发阶段和平稳阶

段。

### (1) 初始阶段

各种车辆节点平均速度时车载物联网蠕虫传播的初始状态都是易感染,车辆节点比例近似于 1,已感染车辆节点和免疫车辆节点比例近似于零。

### (2) 爆发阶段

随着车载物联网蠕虫的传播,不断有易感染车辆节点被感染,使得易感染车辆节点比例不断降低,已感染车辆节点比例不断增加并达到最大值,同时在补丁程序等防御机制作用下已感染车辆节点以 0.1 的免疫率转化成免疫车辆节点。免疫车辆节点的比例也不断增加,已感染车辆节点比例也从最大值逐渐回落。

### (3) 平稳阶段

最后已感染车载物联网车辆节点比例下降并在接近于 0 的水平达到稳定,易感染车辆节点比例在车辆节点平均速度对应的  $b$  值附近达到稳定,免疫车辆节点比例也在该车辆节点平均速度对应的  $1-b$  值附近达到稳定。

图 4 是城市路网环境在两种不同阴影参数随机项方差取值( $\sigma=2$  和  $\sigma=4$ )条件下车载物联网车辆节点平均速度对应最大车辆节点感染比例的关系图。 $\sigma$  的取值越大,意味着外界因素对无线通信信号的阻挡、叠加干扰影响越大,也意味着是阴影衰落影响越大。这时车载物联网车辆节点间建立通信连接直接通信的几率也就越大,从而使得图中表示的车辆节点最大感染比例随之越大。

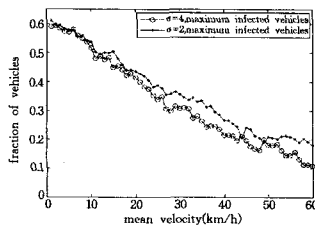


图 4 两种阴影参数平均车速对应车辆节点最大感染比例图

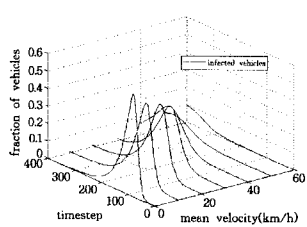


图 5 1km<sup>2</sup> 城市路网区域不同车速 VIOTWPM 蠕虫传播动力学

20km/h 以下较低车辆节点平均速度情况下,道路处于拥堵、不畅通等交通状况,这时车载物联网车辆节点密度比较大,某车辆节点可建立通信连接的其他车辆节点较多。同时两车辆节点间除了直接通信连接还存在不同数目的间接多跳通信连接,阴影衰落对蠕虫传播的影响从而被弱化。

20km/h 到 60km/h 车辆节点平均速度情况下,道路处于较通畅、通畅等交通状况,这时阴影衰落对蠕虫传播的影响比较明显, $\sigma$  的取值越大,车辆节点最大感染比例也越大。

此外,由于各种不同车辆节点平均速度对应的车载物联网车辆节点最大感染比例是在不同时间点达到的,并且该时间点随着车辆节点平均速度的增加而增加,仿真实验设定的免疫率  $\gamma=0.1$  对较高车辆节点平均速度时车辆节点的最大感染比例有更大的影响,更多的车辆节点从已感染状态变到免疫状态,因此两种不同  $\sigma$  的取值下最终车辆节点最大感染比例差距被缩小。也就是免疫率的存在一定程度上弱化了较高车辆节点平均速度时阴影衰落对蠕虫传播的影响。

VIOTWPM 模型中已感染车辆节点比例的变化最能体现各种因素对车载物联网蠕虫传播的影响,而且已感染车辆

节点比例和免疫车辆节点比例都随之变化。图 5 集中显示了图 3 中 7 种不同车辆节点平均速度时已感染车辆节点比例的变化。

20km/h 以下较低车载物联网车辆节点平均速度情况下,道路处于拥堵、不畅通等交通状况,这时车载物联网蠕虫传播的初始阶段和爆发阶段持续的时间都很短。进入蠕虫传播的爆发阶段后,已感染车辆节点比例也很快达到峰值,且峰值比例值较大(约 0.6~0.4)。随后也很快降到近似于 0 的水平,进入蠕虫传播的平稳阶段。

20km/h 到 60km/h 车载物联网车辆节点平均速度情况下,道路处于较通畅、通畅等交通状况,这时车载物联网蠕虫传播的初始阶段、爆发阶段持续时间较长。进入蠕虫传播的爆发阶段后,已感染车辆节点比例较长时间才达到峰值,且峰值比例值较小(约 0.3~0.1)。随后较长时间才降到稍高于 0 的水平,进入蠕虫传播的平稳阶段。

可以看出不同的车辆节点平均速度下蠕虫的传播比例在初始时刻都是呈线性变化的。车辆节点平均速度越慢,初始状态和爆发状态持续的时间越短,爆发状态中已感染车辆节点比例的增长越快,且达到的峰值越大。考虑最大的车辆节点感染比例,有两个时段段需要注意:接近 0km/h 平均时速时蠕虫最多能够感染 60% 的车辆节点,在接近 60km/h 平均时速时不会有超过 10% 的车辆节点感染蠕虫。

**结束语** 车载物联网是一个具有巨大发展潜力的新兴领域,它能够使人们的日常生活更紧密地与计算机技术和互联网技术相结合,增强交通安全,提高城市交通效率,节能减排,以及提供各种与位置相关的信息服务。近年来,车载物联网已经得到了学术界、工业界以及政府部门的高度重视,制订已提上相关的工业、技术标准日程。随着物联网技术的发展和运用,车载物联网防范被人们认识、接受并应用,利用车载物联网传播的蠕虫等恶意代码的威胁也将日益严峻。本文基于城市路网环境中车辆节点全方向复杂路况行驶以及道路环境对无线信号存在阻挡、叠加干扰影响,结合智能行驶模型,针对网络蠕虫的传播进行分析研究,构建了新型 VIOTWPM 模型。VIOTWPM 模型较好地显示了车辆节点平均速度、阴影衰落等交通流量、无线信道因素对蠕虫传播的影响。通过仿真实验证明,结果与 VIOTWPM 模型理论一致。VIOTWPM 模型能较为真实地模拟城市路网环境车载物联网蠕虫的传播和爆发,反映出与早期研究的传统网络环境蠕虫传播的差异,本文将其归结为车辆节点特有的空间运动特性和无线信道环境。VIOTWPM 模型为设计实时检测策略,保护车载物联网网络安全,防治城市路网环境车载物联网蠕虫的破坏性传播,提供了理论基础。考虑到车载物联网间歇性连通的特性与传统网络的异构互联等是研究的热点,进一步完善 VIOTWPM 模型将是后续研究的方向。

## 参 考 文 献

- [1] ITU. The Internet of Things[R]. Geneva: ITU Internet Reports, 2005
- [2] 吴功宜. 智慧的物联网——感知中国和世界的技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 15-16
- [3] Commission of the European Communities. Internet of Things—An Action Plan for Europe[M]. Brussels: COM, 2009: 1-12

(下转第 38 页)

能下降。

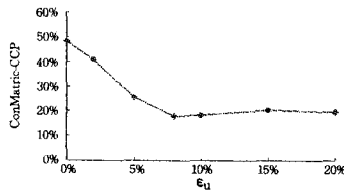


图3 参数  $\epsilon_u$  对不同优化模型最优解的影响

**结束语** 本文以无线多收发机网络为对象,研究多接口多信道多跳的无线网络中路由、信道分配和链路调度联合优化问题,重点讨论网络流量不确定的影响,并且改进了现有研究中对节点接口、通信干扰方面的假设过于简化的问题。考虑到实际网络中流量不确定性的特征,本文以网络吞吐量最大化为目标,提出传输流约束、信道资源约束以及干扰约束条件下的资源分配联合优化模型,以及基于不确定流量条件下的资源分配最优解的链路调度策略。仿真实验结果证明,本文所提出的路由、信道分配及链路调度方案能够更好地适应网络流量需求的变化。本文所提出的优化模型的流量需求分布(参数)可以采用流量评估模型来刻画。不过现有流量评估模型需要较高的计算复杂度来获取准确的流量信息,其结果本身也存在一定的不确定性,因此需要采用更加合适的数学工具进行描述。本文将在未来的工作中进一步研究流量需求分布参数不准确条件下的优化模型及其网络性能。

### 参考文献

[1] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404

[2] 李礼,张春元. 多接口多信道无线网状网中流量感知的信道带宽调制算法[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 875-881

[3] Kodialam M, Nandagopal T. Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks[C]// ACM MobiCom. 2005; 73-87

[4] Alicherry R B M, Li L. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks [C]// ACM MobiCom. 2005; 58-72

[5] Rad A H M, Wong V W S. Joint channel allocation, interface assignment and MAC design for multi-channel wireless mesh networks[C]// IEEE Infocom. 2007; 1469-1480

[6] 陈勋,张朝阳,罗海燕. 无线 Mesh 网络中功率控制、信道分配和调度的联合优化[J]. 浙江大学学报, 2009, 43(8): 1406-1411

[7] Meng X, Wong S H Y, Yuan Y, et al. Characterizing flows in large wireless data networks[C]// ACM MobiCom. 2004; 174-186

[8] Brar G, Blough P M, Santi P. Computationally efficient scheduling with the physical interference model for throughput improvement in wireless mesh networks[C]// ACM MobiCom. 2006; 2-13

[9] Dai L, Xue Y, Chang B, et al. Integrating traffic estimation and routing optimization for multiradio multi-channel wireless mesh networks[C]// IEEE Infocom. 2008; 71-83

[10] Song Yang, Zhang Chi, Fang Yu-guang. Harnessing Traffic Uncertainties in Wireless Mesh Networks-A Stochastic Optimization Approach[J]. Mobile Network, 2009, 14: 124-133

[11] Wang W, Wang Y, Li X-Y, et al. Efficient Interference Aware TDMA Link Scheduling for Static Wireless Mesh Networks[C]// ACM MobiCom. 2006; 262-273

(上接第 32 页)

[4] Kranenburg R V. The Internet of Things; A critique of ambient technology and the all-seeing network of RFID[R]. Network Notebooks 02. Amsterdam; Institute of Network Cultures Press, 2007; 10-28

[5] Want R. Enabling Ubiquitous Sensing with RFID[J]. Computer, 2004, 37(4): 84-86

[6] IBM. 智慧地球赢在中国[EB/OL]. [http://www.ibm.com/smarterplanet/global/files/cn\\_zh\\_cn\\_overview\\_decadeofsmart\\_wininchina.pdf](http://www.ibm.com/smarterplanet/global/files/cn_zh_cn_overview_decadeofsmart_wininchina.pdf), 2009

[7] Hubaux J, Capkun S, Luo J. Security aspects of inter-vehicle communications[J]. IEEE Security & Privacy Magazine, 2005, 2: 49-55

[8] Chen T M, Jean-Macq R. Worm epidemics in high-speed networks[J]. IEEE Computer, 2004; 48-53

[9] Rhodes C J, Nekovee M. The opportunistic transmission of wireless worms between mobile devices[Z]. ArXiv: 0802. 2685v1, Feb. 2008

[10] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Phys. Rev. E, 2000, 62: 1805-1813

[11] Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems [J]. Rev. Mod. Phys, 2001, 73: 1067-1141

[12] Rhodes D C J, Anderson R M. Contact rate calculation for a basic epidemic model[J]. Mathematical Biosciences, 2007

[13] Ott J, Kutscher D. Drive-Thru Internet; IEEE 802. 11b for "Automobile" Users[C]// Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'04). Vol 1, Piscataway, NJ, USA; IEEE, Mar.

2004; 362-373

[14] Bychkovsky V, Hull B, Miu A K, et al. A Measurement Study of Vehicular Internet Access Using in Situ Wi-Fi Networks[C]// Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Communications (MOBICOM'06). Los Alamitos, CA, USA, New York, NY, USA; ACM, Sep. 2006; 50-61

[15] Hadaller D, Keshav S, Brecht T, et al. Vehicular Opportunistic Communication Under the Microscope[C]// Proceeding of the 5th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys'07). San Juan, Puerto Rico, USA. New York, NY, USA; ACM, June 2007; 206-219

[16] Armstrong L. Dedicated Short Range Communications Project [EB/OL] <http://www.learmstrong.com/DSRC/DSRCHome-set.htm>

[17] IEEE 802. 11p. WAVE—Wireless access for the vehicular environment[S]. 2008

[18] Bettstetter C, Hartmann C. Connectivity of wireless multihop networks in a shadow fading environment[C]// Proc. MSWIM'03. San Diego, USA, 2003

[19] Singh J P, Bambos N, Srinivassan B, et al. Wireless LAN performance under varied stress conditions in vehicular traffic scenarios[C]// Proceedings of IEEE VTC'2002. Vancouver, Canada, 2002

[20] Sim M L, Nekovee M, Ko Y F. Throughput analysis of WiFi based broadband access for mobile users on highways[C]// Proceedings of IEEE MICC/ICON'2005. Kuala Lumpur, 2005

[21] Beretta E, Takeuchi Y. Convergence results in SIR epidemic models with varying population sizes[J]. Nonlinear Analysis, 1997, 28: 1909-1921