

文章编号:1671-1637(2014)02-0104-08

面向车联网的无线网络试验床

段宗涛^{1,2}, 康 军^{1,2}, 唐 蕾^{1,2}, 卢明明¹, 王 栋¹, 王 超¹

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 陕西省道路交通智能检测与
装备工程技术研究中心, 陕西 西安 710064)

摘 要:考虑车联网中待测节点的快速移动性及实现方式多样性等特点,应用网络断层扫描技术,设计并实现了一种面向车联网的无线网络试验床。试验床主要包括网络性能测量单元和测试区域上下游探测单元。用试验床测试了车联网中测试车快速移动对网络性能的影响。测试性能指标包括网络往返延迟、网络丢包率、网络平均吞吐率等。测试结果表明:随车联网中测试车平均行程速度的增大,无线网络性能指标呈下降趋势。当测试车平均行程速度达到 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上时,各项性能指标与 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时相比下降明显,网络平均往返延迟增加约 2.4 倍,丢包率提高约 10 倍,网络平均吞吐率下降约 2.6 倍。可见,试验床能够实现对车联网无线网络性能指标的有效测量和评估。

关键词:车联网;无线通信子系统;无线网络试验床;网络断层扫描;网络性能测量

中图分类号:U495

文献标志码:A

Wireless network testbed oriented internet of vehicles

DUAN Zong-tao^{1,2}, KANG Jun^{1,2}, TANG Lei^{1,2}, LU Ming-ming¹, WANG Dong¹, WANG Chao¹

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Road Traffic
Intelligent Detection and Equipment Engineering Center of Shaanxi Province, Chang'an University,
Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Considering the features of rapid mobility and realizing way diversity of tested nodes in the internet of vehicles, a wireless network testbed oriented internet of vehicles was designed and implemented by using network tomography technology. The testbed was composed of network performance measurement units and up-down stream detection units of testing area. The impact of rapid mobility of test vehicle on network performance was tested by designed testbed. The performance indexes were composed of round-trip delay, packet loss rate, average throughput, etc. in the network. Test result indicates that wireless network performance indexes degrade with the increase of the average speed of test vehicle in the internet of vehicles. When the average speed of test vehicle is more than $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, all performance indexes decrease significantly comparing to the situation of $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Average network round-trip delay increases about 2.4 times, packet loss rate increases about 10 times, and average throughput decreases about 2.6 times. Obviously, the wireless network performance indexes of internet of vehicles are measured and evaluated effectively by the designed wireless network testbed oriented internet of vehicles. 3 tabs, 5 figs, 18 refs.

Key words: internet of vehicles; wireless communication subsystem; wireless network testbed; network tomography; network performance measurement

Author resume: DUAN Zong-tao(1977-), male, associate professor, PhD, +86-29-82334359, ztduan@

收稿日期:2013-11-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51278058,61303041);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G2241020,2013G1241119)

作者简介:段宗涛(1977-),男,陕西凤翔人,长安大学副教授,工学博士,从事交通信息服务研究。

chd.edu.cn.

0 引言

智能交通是中国科技发展规划中的优先主题。当前智能交通的重点在于解决拥堵问题,这就需要建立以车辆为节点的信息系统——车联网。车联网综合现有电子信息技术,将每辆车作为一个信息源,通过无线通信手段连接到网络中,进而实现对全国范围内车辆的统一管理。在车联网环境中,为了实现对交通环境信息的智能感知,需要实时采集测试车运行数据,并进行后台分析处理^[1],因此,车-车、车-路无线通信网络系统,即车联网无线通信子系统成为车联网的关键组成部分。与传统无线网络相比,车联网无线通信子系统应用环境更为复杂多变。车联网信息节点,即车辆,常处于快速移动状态,其移动特性表现为网络拓扑变化快,节点移动速度快以及移动轨迹可预测^[2],其网络传输性能会受到多径衰落^[3]、多普勒效应^[4]等的影响,因此,如何测试和评估车联网无线通信子系统已经成为车联网领域亟待解决的关键问题之一。

目前,主要采用网络模拟软件或无线网络试验床2种方式进行无线网络的测试与评估。TOSSIM是针对TinyOS无线传感器网络的网络仿真软件,可以模拟具有上千节点规模的TinyOS无线传感器网络,并对其进行行为分析和性能评估^[5];SENS是一种采用组件化方式实现的面向大规模无线传感器网络的定制化仿真软件,可针对不同的无线传感器网络应用模型,对其进行交互性和扩展性测试^[6]。以上系统均通过软件方式模拟和仿真无线网络,在设计时通常会对网络信道、拓扑及流量等参数或模型进行多种简化和假设,难以全面体现无线网络的真实性能状况。

无线网络试验床是一种实物化或半实物化的网络测试系统,由于其测试环境大多由实际设备构成,通常能够避免因模型简化造成的理论误差,可以实时准确地获取节点及网络的各种状态信息及其变化,从而有效评测网络中运行的协议和算法。无线网络试验床MoteLab可通过测试服务器以Web方式对无线传感网络进行部署、任务创建和调度,在测试过程中自动生成网络节点通信日志数据,然后通过离线方式统计上述日志,实现对无线传感器网络的性能测量^[7];TWIST针对室内混合型无线传感器网络实现了一种可伸缩和可重

配置的测试床,对待测网络节点提供在线配置,在线代码调试功能,通过网络超级节点实现对被测网络单个节点的性能测试^[8];Kansei是一种针对混合型无线传感器网络的试验床,通过混杂仿真和传感数据生成引擎,可自动生成大量传感器实时模拟数据,并以此对无线传感器网络进行性能仿真测试^[9];WISEBED为针对大规模混合型无线传感器网络的验证和评估系统,可实现同时对至少9个地理上分离的包括传感器和执行器的无线网络子网的性能评估。通过对上述比较成熟的无线网络试验床的分析可知,上述试验床仅提供对包括大规模静态网络节点的无线网络的性能测试和评估,在测试过程中待测节点均需静态部署,并未考虑节点的快速移动性,且适用网络协议类型单一,主要针对IEEE 802.15.4。在车联网环境中,待测节点的一个重要特性是快速移动性,同时,车联网无线通信子系统的实现方式也表现出多样性,包括基于IEEE 802.15.4、IEEE 802.11b、IEEE 802.11p、射频识别技术(Radio Frequency Identification, RFID)等多种实现方式^[10-13],这就客观要求面向车联网的无线网络试验床能对包括快速移动节点的多类型无线网络实现有效性能测试和评估。显然,目前已有的无线网络试验床无法直接适用于车联网的测试任务。

针对上述问题,本文提出了一种能够适用于多种类型网络的车联网无线通信子系统试验床,通过灵活的软硬件综合设计,实现了针对快速移动节点的综合网络性能测量,试验床支持对网络往返延迟、丢包率、平均吞吐率等网络性能指标的测量,使试验者方便进行试验中网络资源、网络行为和网络性能的全面掌握,该系统同时具有广泛的适用性和良好的可扩展性。

1 试验床体系结构设计

1.1 设计目标

试验床的3个设计目标如下。

(1)精确感知快速移动待测节点的测试时间窗口。车联网通过采集测试车运行数据进行交通信息自动感知,但测试车通过测试区域的时机是未知的,因此,为实现快速移动节点的网络测试,首先需要精确感知测试车通过测量区域的时间,并自动触发测试过程。

(2)实现适用于拓扑动态变化的车联网无线通信子系统的有效网络性能测量。快速移动性是车联网内部节点的主要特点,这一特性使得车联网无线通信子系统的网络拓扑始终处于动态变化之中,网络拓扑的变化本质上会影响到网络的各项性能指标,从而导致网络性能的动态性^[14]。固定网络拓扑结构的传统网络测量方法已经无法适应于车联网的网络性能测试,基于此,需要设计有效的网络性能测量方法,以适用于拓扑动态变化的车联网无线通信子系统。

(3)适应多种车联网环境的网络测试。目前,车联网技术处于快速发展阶段,车联网无线通信子系统的实现还存在着多样性,因此,客观要求车联网试验床需要具有良好的适应性,以方便进行多种不同类型的车联网环境的测试。

1.2 试验床体系结构

试验床体系主要包括网络性能测量单元和测试区域上下游探测单元,这2类单元通过快速 Ethernet 网络相互通信,具体结构见图1。

采用 RFID 技术设计测试区域上下游探测单元,这2个单元主要负责精确感知快速移动待测节点的测试时间窗口。测试前在测试车内放置车辆身份 IC 卡,卡内保存测试车身份及设备类型信息,包括车牌号、无线接口类型等。当测试车经过测试区域上游探测单元时,该单元识别测试车身份,记录通过时间,并向网络性能测量单元发送测试开始指令,包括测试车身份、上游通过时间、设备类型、测试开始标志等。当测试车经过测试区域下游探测单元时,该单元识别测试车身份,记录通过时间,并向网络性能测量单元发送测试结束指令,包括测试车身份、下游通过时间、测试结束标志等。

网络性能测量单元包括网络测试控制模块、网

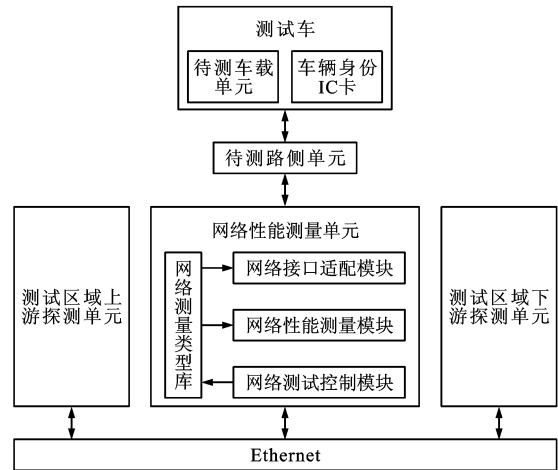


图1 试验床结构

Fig.1 Testbed architecture

络性能测量模块、网络测量类型库和网络接口适配模块,主要负责针对车联网无线通信子系统的有效网络性能测量,其中,网络测量类型库包含针对多种常见无线网络接口的测量代码。根据测试区域上游探测单元发送的测试开始指令,网络测试控制模块控制网络接口适配模块切换测试上下文环境,并控制网络性能测量模块开始进行测量;根据测试区域下游探测单元发送的测试结束指令,网络测试控制模块控制网络性能测量模块结束测量过程,计算并记录测量过程时间窗口长度和测试车通过测试区域的平均行程速度。网络性能测量模块负责采用相应测量代码进行实际网络性能指标的实时测量和计算,并动态显示测量数据和保存测量结果。由于待测路侧单元与网络性能测量单元之间采用标准串口连接,网络接口适配模块负责根据所测网络类型在网络性能测量模块与待测路侧单元之间进行数据格式转换。试验床各模块在测试过程中的交互关系见图2。

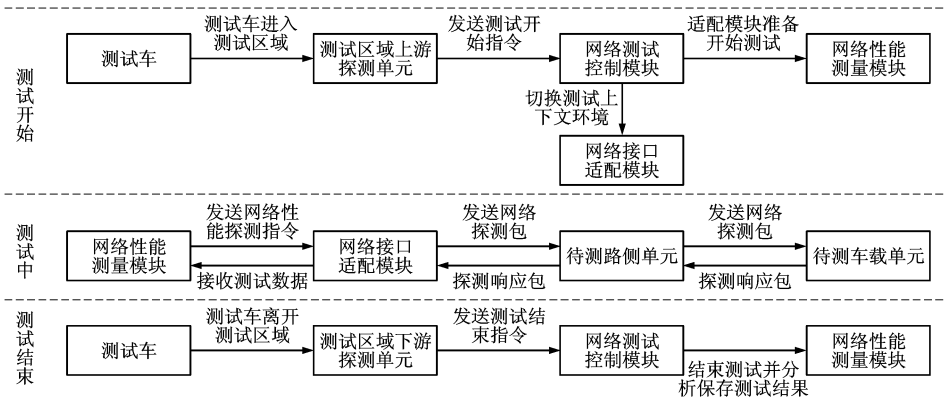


图2 试验床各模块的交互关系

Fig.2 Interactive relationship of testbed modules

2 试验床的实现

2.1 测试区域上下游探测单元的实现

测试区域上下游探测单元主要实现对快速移动待测节点测试时间窗口的精确感知,识别待测节点网络类型,并自动触发测试过程。测试区域上下游探测单元硬件结构基本相同,均基于超高频 RFID 技术实现,采用 ARM7+AS3990 的设计方案,系统主要由主控模块和射频收发模块组成。测试区域上下游探测单元硬件结构见图 3。主控模块包括主控制器、电源转换模块、网络接口模块、状态指示模块、辅助电路和 JTAG 接口模块等。主控制器芯片选用 LPC2132,价格低廉,带串口,资源丰富,具有 8 KB RAM,32 KB Flash,16 bit 和 32 bit 的定时器,30 个可用 I/O 口,时钟频率最高可达 70 MHz。该芯片作为主控芯片可以很好地简化外围电路,降低

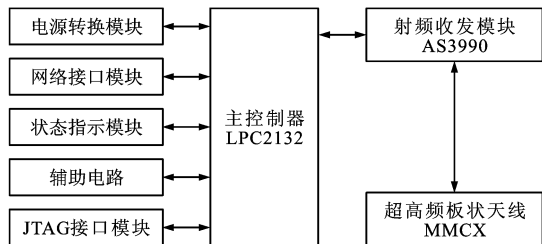


图3 探测单元硬件结构

Fig.3 Hardware structure of detection unit

功耗,同时提高抗干扰强度,使系统更小型化。射频收发模块采用奥地利微系统公司研制的用于超高频 RFID 读写器的专用芯片 AS3990,其封装形式为 64 脚 QFN 封装,芯片内集成了接收电路、发送电路、协议转换单元、连接 MCU(微控制器)的 8 bit 并行接口或 SPI 串行接口等,具有集成度高的特点。AS3990 芯片具有 2 种工作模式,支持 ISO/IEC 18000-6C^[15] 和 ISO/IEC 18000-6A/B 协议,同时具有并行接口或串行接口 2 种数据接口方式,方便与主控制器进行数据通信。需要发送的命令和数据信号经编码、调制、射频放大后输出到天线。天线采用的是增益为 8 dBi 的 UHF RFID 超高频板状天线 MMCX,读卡距离可达 5 m。为了便于室外测试,测试区域上下游探测单元均采用可充电的 3.4 V、2 A 锂电池供电。车辆身份 IC 卡采用无源电子标签,即依靠读写器的射频载波来提供电能,芯片中有一块存储区,保存着标签编号等信息。根据 ISO/IEC 18000-6C 协议规定,从逻辑上将标签存储器分为用户、TID、EPC 和保留 4 个存储体,每个存储体可以由 1 个或 1 个以上的存储器组成。实际应用中

主要使用用户存储器,该存储器允许存储用户指定数据,并且用户可以自己定义存储器的组织。ISO/IEC 18000-6C 协议提供了防冲突算法,在寻卡的同时启动防冲突机制,这样阅读器可以同时读取多个标签,很好地适应复杂的应用环境。

测试区域上游探测单元软件部分主要包括寻卡、读卡、获取系统时间、发送测试开始指令等步骤。测试区域下游探测单元软件部分主要包括寻卡、读卡、获取系统时间、发送测试结束指令等步骤。测试区域上下游探测单元在启动时发送时间同步包,以完成与网络性能测量单元之间的时间同步。

2.2 网络性能测量单元的实现

网络性能测量单元主要负责针对车联网无线通信子系统进行有效网络性能测量,需要实现适用于拓扑动态变化的车联网无线通信子系统的网络性能测量方法,并能够适应多种车联网环境的网络测试。

为了能够适应多种车联网环境的网络测试,网络性能测量单元中的网络接口适配模块采用适配器+模板的设计模式进行设计。网络测量类型库中包含针对多种常见无线网络接口的测量模板代码,由网络测试控制模块根据测试区域上游探测单元传递的待测网络类型信息控制网络接口适配模块切换测试上下文环境。网络接口适配模块与网络性能测量模块之间采用统一软件接口进行设计。根据指定的网络类型,网络接口适配模块在网络性能测量模块与待测路侧单元之间进行数据及指令格式转换。

为了适应车联网无线通信子系统拓扑结构的动态变化,基于网络断层扫描技术^[16]实现有效网络性能测量。网络断层扫描技术根据网络外部即网络边界的测量信息来分析和推断网络内部性能,网络性能测量的基本方法是在网络边界上主动发送探测数据包,然后记录在网络边界上接收到的响应数据包的数量和延迟,并利用统计分析模型推断内部链路的数据包丢失率和延迟。在网络性能测量单元中,基于网络断层扫描技术,采用主动探测方式并结合数据融合与统计分析方法,实现了对车联网环境中的车-路及车内无线网络链路的往返延迟、丢包率、平均网络吞吐量等性能指标的测量及分析。网络性能测量单元的测试流程见图 4。为了准确描述网络性能测量数据的处理流程和计算方法,给出如下定义。

定义 1:设测试区域上游探测单元检测到的测

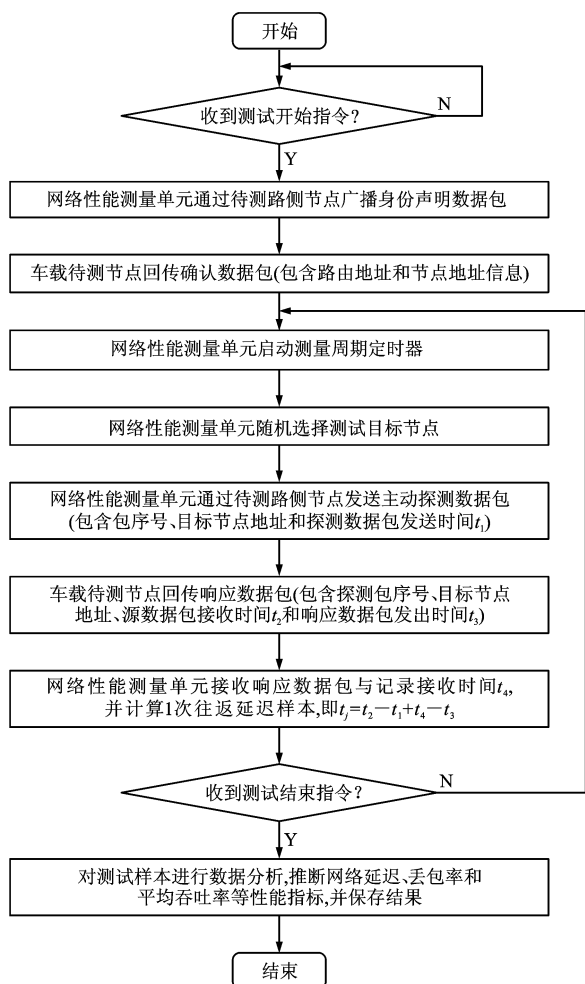


图4 测试流程

Fig. 4 Testing flow

试车通过时刻为 T_a , 测试区域下游探测单元检测到的测试车通过时刻为 T_b , 则测试时间窗口 T 为时刻 T_a 、 T_b 之间的时间间隔, T 包含探测时间和其他操作消耗时间 T_c , 本文设 T_c 为常数。

定义 2: 若主动探测数据包发出后却没有收到对应目标节点的响应数据包, 即判定为丢包。有效延迟样本为在 1 个测试时间窗口内, 待测节点发出第 j 个主动探测数据包, 并收到目标节点返回的第 j 个响应数据包后所测量到的往返延迟时间 t_j 。

在 1 次测试过程中, 当测试车以设定速度通过测试区域时, 通过测试区域上下游探测单元可以检测到此次测试所对应的测试时间窗口 T 。为了获得足够的测试样本, 要求测试车以设定速度多次重复通过测试区域, 因此, 对无线网络性能的测量实际上需要在设定车速条件下通过多次测试来完成, 这就要求在测试前估算需要进行测试的次数。设在整个测试过程中需要发送的主动探测包总数为 N , 主动探测包的发送周期为 h , 本文中 N 、 h 均为

常数, 则在设定车速条件下整个测试过程中需进行的测试次数 C 为

$$C = \text{INT}[Nh / (T - T_c)] \quad (1)$$

在推断待测目标系统网络平均往返延迟时, 采用基于相对距离的数据融合算法^[17]处理有效往返延迟测量样本, 从而推断待测目标系统的网络平均往返延迟。算法具体步骤如下。

Step 1: 收集第 l 个测试时间窗口 T_l 内的有效延迟样本, 计算第 i 、 j 个测试样本的有效延迟样本相对时间间隔 d_{ij}

$$d_{ij} = |t_i - t_j| \quad i, j = 1, 2, \dots, n_l \quad (2)$$

式中: n_l 为时间窗口 T_l 内收集到的有效往返延迟测试样本总数。

Step 2: 计算相对时间间隔 d_{ij} 的支持度 r_{ij}

$$\begin{cases} r_{ij} = 1 - d_{ij} / \max(d_{ij}) \\ r_{ij} \in [0, 1] \end{cases} \quad (3)$$

Step 3: 构造时间窗口 T_l 的支持度矩阵 R_l

$$R_l = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n_l} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n_l 1} & \cdots & r_{n_l n_l} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Step 4: 采用 QR 算法求解实对称矩阵 R_l 的最大特征值及其对应的特征向量 V

$$V = (v_1, \dots, v_{n_l})$$

Step 5: 计算待测目标系统的第 l 个测试时间窗口的网络平均往返延迟估计值 a_l

$$a_l = Y_1 t_1 + \cdots + Y_{n_l} t_{n_l} \quad (5)$$

$$Y_i = \frac{v_i}{v_1 + \cdots + v_{n_l}}$$

Step 6: 返回 Step 1, 直到全部处理完在 C 个测试时间窗口内获得的有效延迟样本, 然后计算各测试时间窗口网络平均往返延迟估计值的相对时间间隔 D_{lk}

$$D_{lk} = |a_l - a_k| \quad l, k = 1, 2, \dots, C \quad (6)$$

Step 7: 计算各相对时间间隔 D_{lk} 的支持度 b_{lk} 为

$$b_{lk} = 1 - D_{lk} / \max(D_{lk}) \quad (7)$$

Step 8: 构造支持度矩阵 B

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1C} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{C1} & \cdots & b_{CC} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Step 9: 采用 QR 算法求解实对称矩阵 B 的最大特征值及其对应的特征向量 X

$$X = (x_1, \dots, x_C)$$

Step 10: 待测目标系统的网络平均往返延迟估

计值 A 为

$$A = W_1 a_1 + \cdots + W_c a_c \quad (9)$$

$$W_l = \frac{x_l}{x_1 + \cdots + x_c}$$

在测试过程中,网络性能测量单元在待测网络边界可检测到连续丢包个数,由于网络性能测量单元属于时间驱动方式,即周期性发送探测数据包,待测目标节点属于事件驱动方式,即收到探测数据包后返回响应数据包,则根据文献[18],可由检测到的连续丢包个数推断待测目标网络丢包率上限。设在测试时间窗口 T_l 内检测到最大连续丢包个数为 M_l ,在置信度水平为 P 的条件下,通过式(10)可计算第 l 个测试时间窗口的网络丢包率上限 σ_l

$$\begin{cases} (1-P)^{1/M_l} = 2\sigma_l - \sigma_l^2 \\ \sigma_l \in [0,1) \end{cases} \quad (10)$$

待测目标网络总体丢包率上限 σ 为

$$\sigma = \max(\sigma_l) \quad (11)$$

待测目标网络平均吞吐率 U 为

$$U = 2L(1-\sigma)/A \quad (12)$$

式中: L 为主动探测数据包总长度。

3 试验验证

为验证试验床的有效性,给出了测试实例,并对测试结果进行分析。测试区域为长安大学的人-车-路综合试验场。测试路段为标准两车道东西向直行路段,测试区域长度为 200 m,测试车由东向西行驶,测试区域上下游探测单元分别部署在测试区域两端,网络性能测量单元部署在测试区域中间 100 m 处路侧位置,测试车内放置一个车辆身份 IC 卡,即无源电子标签,被测设备为车载 ZigBee 无线传感网络(深联致远科技有限公司基于 IEEE 802.15.4 的 IOT-NODE24T 型 ZigBee 节点),路侧节点为 ZigBee 协调器(硬件类型与车载节点相同),采用 1 个协调器、1 个路由器、10 个设备节点的星形拓扑结构,主动探测数据包长度为 47 Byte(与待测节点响应数据包长度相同),发包周期为 1 s,经测定 T_c 不超过 2 s,在各种车速条件下各发送 40 个主动探测数据包。测试结果见表 1、2。

表 1 测试结果 1

Tab. 1 Test result 1

测试序号	1	2	3	4	5	6	7
测试车设定速度/(km·h ⁻¹)	20	30	40	50	60	70	80
测试车实际平均行驶速度/(km·h ⁻¹)	21.27	31.47	40.33	49.78	60.23	68.51	79.65
平均测试时间窗口/s	33.85	22.88	17.85	14.46	11.95	10.51	9.04
测试次数	2	2	3	4	5	5	6
测试期间总丢包数	4	3	4	5	6	10	14
最大连续丢包数	1	1	1	3	4	5	5

由测试过程中获得的网络往返延迟样本值,根据本文算法,由式(9)得到待测目标系统在相应车速条件下的网络平均往返延迟估计值,由测试过程中获得的网络最大连续丢包个数,根据式(10)、(11),在置信度水平为 99%的条件下,计算待测目标系统在相应车速条件下的网络丢包率上限,根据获得的网络平均往返延迟估计值和网络丢包率上限,由式(12)得到待测目标系统在相应车速条件下的网络平均吞吐率,结果见表 3。

待测网络系统的各项性能指标随着测试车速度的变化情况见图 5,当测试车平均行程速度递增时,由于多径衰落、多普勒效应等的影响,待测车载 ZigBee 无线网络系统网络性能呈下降趋势。当测试车平均行程速度达到 70 km·h⁻¹ 以上时,与 20 km·h⁻¹ 时相比,各项性能指标下降明显,如网络平均往返延迟增加约 2.4 倍,丢包率提高近

10 倍,网络平均吞吐率下降约 2.6 倍。综上所述,所测车载 ZigBee 无线网络系统在车联网车辆高速移动环境中应用时存在性能限制,设计人员需要考虑改进措施。

4 结 语

在车联网环境中,待测节点的高速移动性是其重要特征。车联网无线通信子系统的实现方式也表现出多样性。针对上述问题,本文提出一种能够适用于多种类型网络的车联网无线通信子系统试验床,通过灵活的软硬件综合设计,实现了针对快速移动节点的综合网络性能测量方法,支持对网络往返延迟、丢包率、平均吞吐率等常见网络性能指标的测量,使试验者全面掌握试验中网络资源、网络行为和网络性能。在后续的研究工作中,将主要围绕试验床存在的下述问题展开。

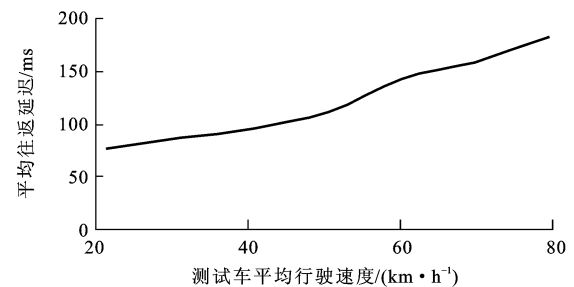
表 2 测试结果 2
Tab. 2 Test result 2

数据包序号	各次测试中的有效往返延迟/ms						
	1	2	3	4	5	6	7
1	87	79	90	135	141	149	110
2	74	丢包	92	109	123	169	180
3	74	85	95	124	丢包	100	丢包
4	81	78	90	123	丢包	170	丢包
5	82	85	丢包	108	丢包	134	丢包
6	75	91	92	113	丢包	138	丢包
7	73	94	102	118	176	117	213
8	82	丢包	94	129	166	175	196
9	76	87	104	124	114	177	239
10	74	79	90	99	167	丢包	198
11	75	91	106	丢包	167	丢包	110
12	76	79	丢包	112	144	丢包	133
13	85	94	101	102	156	丢包	192
14	丢包	91	95	91	162	丢包	丢包
15	84	79	94	100	153	141	丢包
16	68	78	100	103	173	214	丢包
17	丢包	94	90	137	丢包	123	丢包
18	73	94	94	102	156	128	丢包
19	68	93	丢包	102	155	167	257
20	86	90	91	124	103	104	239
21	80	79	89	丢包	107	149	253
22	73	84	丢包	113	104	130	136
23	丢包	98	98	112	147	159	207
24	78	85	90	100	128	108	162
25	84	82	90	97	98	丢包	161
26	84	86	95	113	156	丢包	丢包
27	75	91	99	101	141	丢包	235
28	83	82	105	112	156	丢包	184
29	81	87	95	91	169	168	152
30	74	79	92	136	117	190	137
31	84	81	91	112	129	137	223
32	86	93	106	115	115	112	143
33	78	丢包	106	丢包	134	177	丢包
34	72	95	102	丢包	107	106	丢包
35	72	83	90	丢包	111	183	丢包
36	70	86	95	105	169	101	丢包
37	85	89	101	128	丢包	152	264
38	丢包	84	93	116	111	127	145
39	75	83	97	136	131	126	202
40	71	92	102	111	144	丢包	222

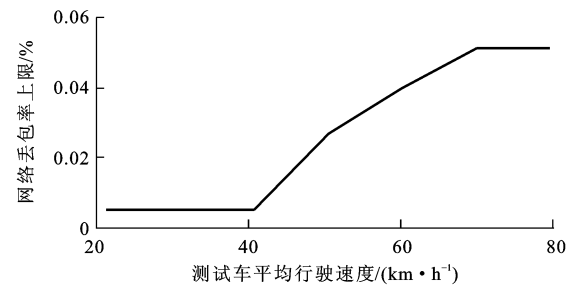
表 3 待测网络系统性能指标

Tab. 3 Performance indexes of tested network system

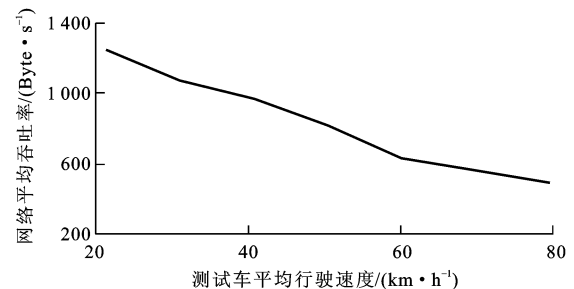
测试序号	网络平均往返延迟/ms	网络丢包率上限/%	网络平均吞吐率/(Byte · s ⁻¹)
1	76.44	0.005	1 252.75
2	87.33	0.005	1 071.00
3	96.21	0.005	972.14
4	111.78	0.027	818.23
5	143.16	0.040	630.34
6	157.99	0.051	564.63
7	182.13	0.051	489.79



(a) 网络平均往返延迟随车速的变化



(b) 网络丢包率上限随车速的变化



(c) 网络平均吞吐率随车速的变化

图 5 性能指标与车速关系

Fig. 5 Relationship between performance indexes and vehicle speed

(1) 目前试验床仅实现了对 ZigBee 无线网络的性能测试,后续工作中将继续完善网络测量类型库,在统一的试验床体系框架下实现针对 IEEE 802.11b 和 IEEE 802.11p 无线网络的网路性能测量。

(2) 目前被测网络的拓扑结构仅局限于路-车-路单跳类型,后续工作中将进一步实现面向路-车-车-路等多跳复杂网络拓扑结构的网路性能测试方法。

(3) 目前试验床每次仅能针对单一设定车速进

行测试,后续工作中将实现在同一测试过程中允许多辆测试车以不同设定车速同时通过测试区域,试验床能够自动识别各种设定车速,并准确计算各种设定车速条件下的网络性能指标。

(4)目前,在对测试数据处理过程中所采用的网络平均往返延迟时间算法的时间复杂度较高,后续工作将对该算法进行改进,以降低算法的时间复杂度,进一步提高网络性能测量的实时性。

参考文献:

References:

- [1] 秦玲,张剑飞,郭鹏,等.浮动车交通信息采集与处理关键技术及其应用研究[J].交通运输系统工程与信息,2007,7(1):39-42.
QIN Ling, ZHANG Jian-fei, GUO Peng, et al. Study of key technologies and applications of floating car traffic information collection and processing[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(1): 39-42. (in Chinese)
- [2] HARTENSTEIN H, LABERTEAUX K P. A tutorial survey on vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(6): 164-171.
- [3] TURIN G L, JEWELL W S, JOHNSTON T L. Simulation of urban vehicle-monitoring systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1972, 21(1): 9-16.
- [4] 廖惜春,丘敏,麦汉荣.无线传感网络中多普勒效应的研究与仿真[J].传感技术学报,2007,20(12):2674-2678.
LIAO Xi-chun, QIU Min, MAI Han-rong. The research and simulation of doppler effect in wireless sensors networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(12): 2674-2678. (in Chinese)
- [5] LEVIS P, LEE N, WELSH M, et al. TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications[C]//ACM. Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2003: 126-137.
- [6] SUNDRESH S, KIM W, AGHA G. SENS: a sensor, environment and network simulator[C]//IEEE. Proceedings of the 37th Annual Simulation Symposium. Washington DC: IEEE, 2004: 221-228.
- [7] WERNER-ALLEN G, SWIESKOWSKI P, WELSH M. MoteLab: a wireless sensor network testbed[C]//IEEE. Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Piscataway: IEEE, 2005: 483-488.
- [8] HANDZISKI V, KOPKE A, WILLIG A, et al. TWIST: a scalable and reconfigurable testbed for wireless indoor experiments with sensor networks[C]//ACM. Proceedings of the 2nd International Workshop on Multi-hop Ad Hoc Networks: from Theory to Reality. Florence: ACM, 2006: 63-70.
- [9] ERTIN E, ARORA A, RAMNATH R, et al. Kansei: a high-fidelity sensing testbed[J]. IEEE Internet Computing, 2006, 10(2): 35-47.
- [10] 王建军,秦振海. ZigBee无线个人区域网技术在汽车网络的应用[J].汽车电器,2012(6):70-72.
WANG Jian-jun, QIN Zhen-hai. Application of ZigBee personal wireless LAN in vehicle network[J]. Auto Electric Parts, 2012(6): 70-72. (in Chinese)
- [11] 常促宇,向勇,史美林.车载自组网的现状与发展[J].通信学报,2007,28(11):116-126.
CHANG Cu-yu, XIANG Yong, SHI Mei-lin. Development and status of vehicular ad hoc networks[J]. Journal on Communications, 2007, 28(11): 116-126. (in Chinese)
- [12] DU Ying-tian, ZHANG Lin, FENG Yu-fei, et al. Performance analysis and enhancement of IEEE 802.11p/1609 protocol family in vehicular environments[C]//IEEE. Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Piscataway: IEEE, 2010: 1085-1090.
- [13] 汪成亮,张晨.面向车联网的交通流参数检测[J].计算机工程与应用,2012,48(23):212-218.
WANG Cheng-liang, ZHANG Chen. Detection model of traffic flow parameters oriented internet of vehicles[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(23): 212-218. (in Chinese)
- [14] 王伟,蔡皖东,田广利,等. Ad Hoc网络性能测量分析[J].计算机科学,2007,34(1):71-73,91.
WANG Wei, CAI Wan-dong, TIAN Guang-li, et al. Analysis of the ad hoc network performance measurement[J]. Computer Science, 2007, 34(1): 71-73, 91. (in Chinese)
- [15] 刘宏伟,李成. ISO/IEC 18000-6C 简析[J]. 信息技术与标准化,2007(7):17-20.
LIU Hong-wei, LI Cheng. ISO/IEC 18000-6C sketch and analyse[J]. Information Technology and Standardization, 2007(7): 17-20. (in Chinese)
- [16] 李贵山,蔡皖东.网络断层扫描技术的研究与发展[J].测控技术,2008,27(2):1-4.
LI Gui-shan, CAI Wan-dong. Research and development of network tomography[J]. Measurement and Control Technology, 2008, 27(2): 1-4. (in Chinese)
- [17] 胡振涛,刘先省.基于相对距离的一种多传感器数据融合方法[J].系统工程与电子技术,2006,28(2):196-198.
HU Zhen-tao, LIU Xian-xing. Method of multi-sensor data fusion based on relative distance[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(2): 196-198. (in Chinese)
- [18] 康军,戴冠中.基于网络 QoS 的网络化控制系统保性能控制[J].控制与决策,2009,24(7):973-978,984.
KANG Jun, DAI Guan-zhong. Design of guaranteed cost controller of networked control systems based on QoS[J]. Control and Decision, 2009, 24(7): 973-978, 984. (in Chinese)