

ZigBee 网络性能测试系统研究*

张冲 熊勇 房卫东 单连海 林奋波 陈长勇

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感网与通信重点实验室 上海 200050)

摘要: 随着基于 ZigBee 的无线传感器网络的应用不断涌现,无线网络呈现节点多、传输数据量大、部署区域广的特点,对网络能力的技术研究和传输规范标准提出了新的要求,然而针对 ZigBee 网络性能和路由协议测试研究比较少。为评价基于 802.15.4 的 ZigBee 网络的性能,设计并搭建了一种 ZigBee 无线网络综合测试平台,基于 ARM 处理器开发了 ZigBee 网络性能测试装置,给出了测试装置的软硬件设计,通过测试获得网络的速率、时延、丢包率等性能指标,测试结果表明系统能够有效的实现网络性能测试,为改善和优化 ZigBee 网络的应用,确保网络稳定运行提供了有力的证据。

关键词: ZigBee; 测试平台; 网络性能

中图分类号: TN711.1 TP393.06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

Research of ZigBee network performance test system

Zhang Chong Xiong Yong Fang Weidong Shan Lianhai Lin Fenbo Chen Changyong

(Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)

Abstract: With the constantly emerging of ZigBee wireless network applications, ZigBee wireless network features numbers of nodes, large amount of data, wide distribution. This will put forward new requirements of the technology study of network capacity and the transmission standard. However, the study on the ZigBee network performance and routing protocol is less. In this paper, to evaluate the performance of the ZigBee network based on the 802.15.4 standard, we propose and build a ZigBee wireless network comprehensive testbed, develop ZigBee network performance device based on the ARM processor, design the hardware of the device. By testing the network, we obtain the speed, delay, packet loss ratio. The results show that the system can effectively achieve network performance test. It provides the powerful basis to optimize the ZigBee network applications and ensure stable operation of the network.

Keywords: ZigBee; testbed; networks performance

1 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)是一种综合温湿度、图像和红外等各类信息采集、融合网络传输和数据处理与控制功能于一体的智能网络信息系统。ZigBee 是基于 IEEE802.15.4 标准的低功耗局域网协议,它是 WSN 中最重要的一种传输技术,其他传输技术包括蓝牙和 WiFi 等。通过该网络,可以实时采集各种数据信息,实现人与物理世界之间的信息交互,在智能家居、工业领域和智慧城市等领域已经取得了发展^[1-2]。

目前评估 WSN 性能的仿真平台主要有 NS2 和

OPENET。OPENET 可以对数据分组、节点类型、链路类型、应用场景、和网络拓扑等进行详细配置,问题是仿真速度慢,效率随着网络规模和流量增大而降低。NS2 主要进行 OSI(open system interconnection)模型的仿真,工作在网络数据包级,允许一定范围内的异构网络仿真,实现了协议分离等,使得仿真的节点数目可达成千上万,但要进行跨层设计,导致大量的跨层协议修改工作,增加了仿真难度;而且 NS2 不对应用行为建模,缺少网络节点执行代码的仿真,使其无法进行大规模网络的仿真。

在无线传感器网络的研发与部署中,研发人员发现仿真的结果与实际部署的网络工作结果存在一定差异。究其原因

收稿日期:2015-04

* 基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(61302113)、上海启明星计划(14QB1404400)、上海科技创新行动计划(14511101303)

因,主要是组网架构、应用场景、应用环境、网络规模、感知对象、网络维护和项目投入等因素难以模型化,从而导致对网络预处理过程的高效性、算法的运算复杂度以及硬件匹配、能量消耗、极限测试、传输性能评估等方面缺乏有效的评估方式,使得实际部署的网络规模与仿真时的网络规模有很大差距^[3]。一方面,仿真结果无法为研究人员提供十分有效的参考依据;另一方面,受制于无线传感网络在研发和实验阶段实际部署的局限性,网络规模无法满足测试需求。

在当前传感器网络测试平台的研究中,为进行网络的实验测试,已经出现了多种传感器测试平台^[4],其中比较典型的实现测试平台包括 MoteLab 和 Kansei^[5]等。MoteLab 由两部分组成:无线传感器节点网络和中心服务器。中心服务器是 Motelab 的主体部分,提供用户实验管理、日程安排、节点重编程、数据记录以及用户访问管理等功能。Motelab 提供了 3 种访问方式,用户 A 通过 Web 接口访问创建了一个任务,并进行随后的操作;用户 B 直接访问调取上次实验收集的信息;用户 C 直接访问节点进行操作。该平台为用户完成测试任务提供了方便,但测试评估方法少,网络规模较小,扩展性不强,对能耗的测试只能通过节点上连接万用表实现。俄亥俄州立大学开发的 Kansei 系统,由静止网络、便携网络和移动网络组成。其中静止网络是由 210 个节点组成 15×14 的矩形规则阵列,节点分为 XSM 节点和 Stargate 单片机两部分。XSM 节点是基于伯克利节点模型开发的,使用 916 MHz 微波通信,是网络测试控制的对象。Stargate 单片机使用 802.11b 协议,与以太网相连并通过 51 脚的连接器对 XSM 进行访问和控制。便携网络中节点的数量不确定,除进行数据的存储、压缩、传输和时间同步的管理外,还可根据不同的实验需求搭配所需的传感器,用于实际环境中的数据采集。移动网络由 5 个可移动的机器小车组成,行驶于静止网络布置的节点中;移动网络节点收集和反馈信号并向静止网络实时注入数据,从而配合静止网

络完成测试。该平台利用实际节点与理论模拟相结合的混合模拟方法,提高了测试平台的实用性和数据的可靠性,便携网络的设计方法为测试平台扩大了规模,使网络更加灵活。但该平台的理论研究仍处于初级阶段,混合模拟方式的理论支撑也有待于进一步的论证。

本文提出一种新的测试平台,它具有 Motelab 与 Kansei 的优点,能够实现对无线传感器网络更加全面与稳定的测试,测试平台主要由 ZigBee 协议仿真平台、ZigBee 节点网络、网络分析仪构成,网络评估由网络分析仪分析完成,相比上述平台提高了测试的精度与效率。

2 ZigBee 网络测试平台

2.1 测试平台总体架构

ZigBee 网络测试平台由 ZigBee 软件平台、ZigBee 节点网络与网络性能测试仪组成。软件平台分为 2 个部分:用户界面和网络仿真数据处理。ZigBee 节点网络包含基于 CortexM3 微控制器的终端节点和测试网关。网络性能测试仪由两台 Spirent 的 SPT N4U TestCenter 组成。

通过对仿真平台和测试仪表进行关键技术的二次开发,该平台具有智能解析、性能测试和路由协议测试^[6]等功能,对不同测试设备实现了统一化管理控制,能实现业务由仿真平台向真实 ZigBee 网络的自适应转发,并具备对网络的传输性能参数进行验证。测试平台一个重要的构建依据,是保证网络中产生的数据流的准确性和走向的正确性,通过中间件开发,数据流按照由仿真平台生成的路由产生,由 TestCenter 将业务按照真实网络所采用的数据格式进行映射和封装,同时打上相应传输时间戳和序号,再通过开发的边界网关传输到开发的具有协议重构的真实 ZigBee 节点网络中,通过 TestCenter 在目的为止接收指定的数据包,与发出的数据包进行比较,获得相关的性能参数^[7-8]。图 1 所示是 ZigBee 网络测试平台,图 2 是 ZigBee 网络测试平台实物。

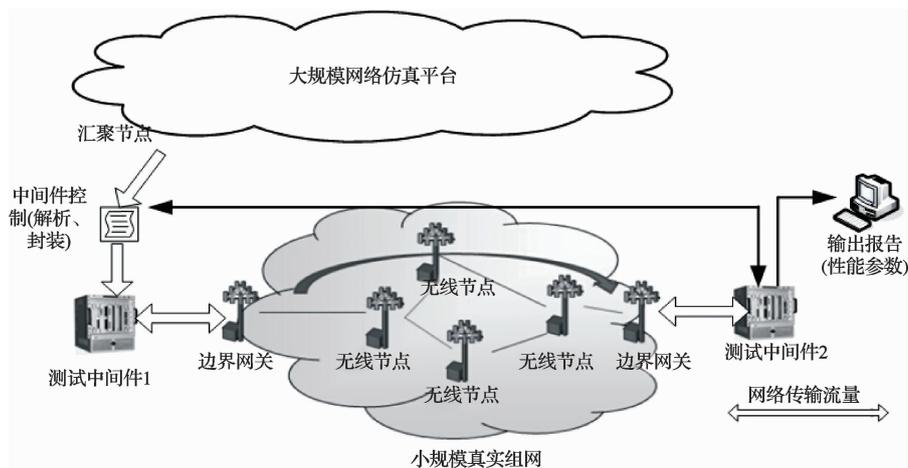


图 1 ZigBee 网络测试平台



图2 ZigBee网络测试平台实物

2.2 测试平台功能

在平台设计和开发时,对平台的测试功能进行了定义,包括了信息交互、仪表控制和测试3个方面。

1) 信息交互功能

通过 Tcl 自动化脚本实现仿真平台业务数据的收集,及筛选仿真平台与真实网络交互的数据。

2) 多仪表控制功能

两台网络分析仪同步工作,实现对数据信息处理、存储,以及对多中间件的传输控制。包括:

①中间件发送端:仿真平台业务数据传输时间的同步;根据业务数据的类型数据进行封装,支持不同业务的数据并发传输;仿真平台与真实网络之间的协议/地址转换^[9]。

②中间件接收端:存储接收的结果;对数据目的地址进行过滤筛选;按照需求输出合适的测试参数结果,包括时延、抖动、速率、带宽、丢包。

3) 测试功能

测试功能包括:网络性能测试和协议测试。

2.3 测试平台硬件设计

ZigBee 节点网络中开发的硬件包括终端节点^[10]和测试网关,基于 CortexM3 微控制器的嵌入式系统硬件电路设计和调试,采用 UART 串口编程技术、I²C 串口编程技术、SPI 串口编程技术,具有参数掉电存储、RS232/RS485 串口通信、I²C 串行接口、开关量输入输出、LCD 显示、温湿度传感、ZigBee 无线通信等功能。其中网关还有传输模块。

2.3.1 终端节点设计

ZigBee 网络终端节点的系统框图如图3所示,对应硬件设计如图4所示。该节点具有用于网络通信的 ZigBee 无线接口、用于节点代码的烧写及节点和 PC 通信的 RS232 串行通信接口。支持 ZigBee 无线数据与 RS232 串口数据的双向转换传输。

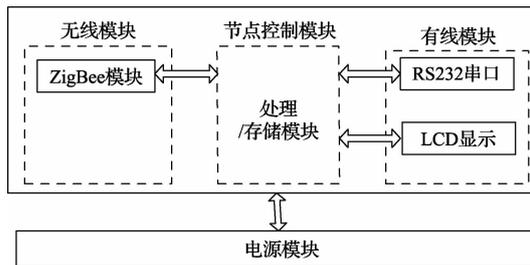


图3 ZigBee无线传感节点系统

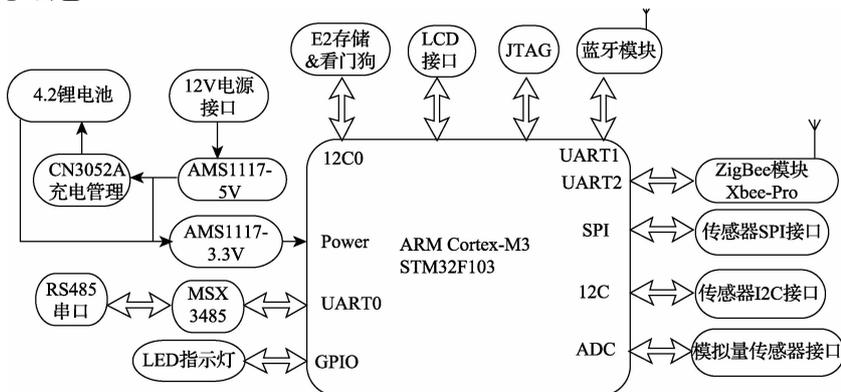


图4 ZigBee无线传感节点硬件设计

无线模块:负责和无线传感网络通信,实现节点无线数据的收发。

节点控制模块:实现传感数据的处理、存储和传输控制。包括传感数据的采集和转换,能根据网络状态的变化来建立数据传输通道。

有线模块:负责本地数据交互,包括和电脑串口通信,节点状态的 LCD 液晶显示。

电源模块:电源模块给节点供电。

2.3.2 测试网关设计

测试网关系统框图如图5所示,对应硬件设计如图6所示。该网关具有用于网络通信的 ZigBee 无线接口、

Ethernet 以太网接口、RS232 串行通信接口。支持 ZigBee 无线数据与 Ethernet 以太网数据的双向转换传输。

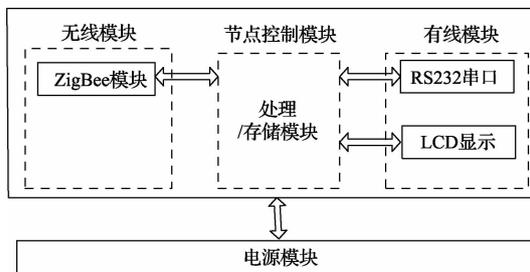


图5 测试网关系统

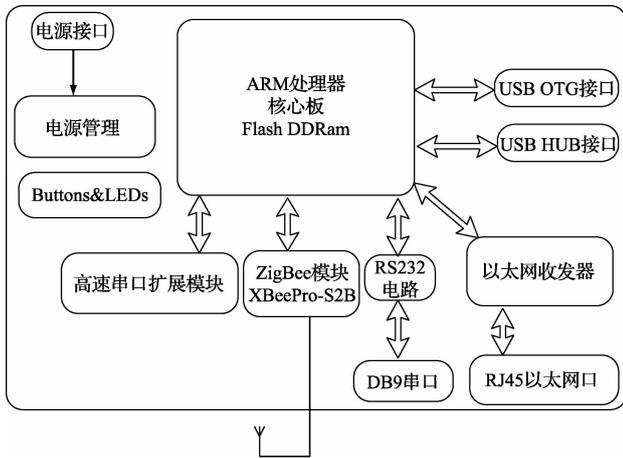


图6 测试网关硬件设计

信息感知模块:负责和无线传感网络通信,实现收集传感网的业务数据。

控制模块:实现业务数据的采集处理、存储和传输控制。包括:业务数据传输处理的优先级排队;根据业务数据的类型进行解析和数据转发;能根据网络状态的变化来

触发已建立业务的切换。

传输模块:负责和 Ethernet 接入网通信,将网关传输的业务数据接入广域网。

电源模块:电源模块给网关供电。

2.4 测试平台软件设计

软件平台主要由用户界面和网络仿真数据处理两个部分组成。主要采用 LabWindows/CVI 编程、Tcl 自动控制语言 AODV 仿真等软件进行开发,具有数据智能解析,参数读取、配置,性能参数实时显示等功能。

2.4.1 用户界面设计

ZigBee 用户界面是以 Windows 7 为操作系统,采用 C 语言,选用 NI 公司 LabWindows/CVI 程序开发工具^[11],对平台的用户界面进行了设计。

网络配置、网络状态管理、结果显示模块是直接面向用户工作的,负责帮助用户管理自己的实验任务,查看运行状态和结果。软件界面如图7所示,用户可以对文件加载、节点、网关、IP 地址、板卡端口、端口速率、发送帧长度、UDP 端口进行配置。

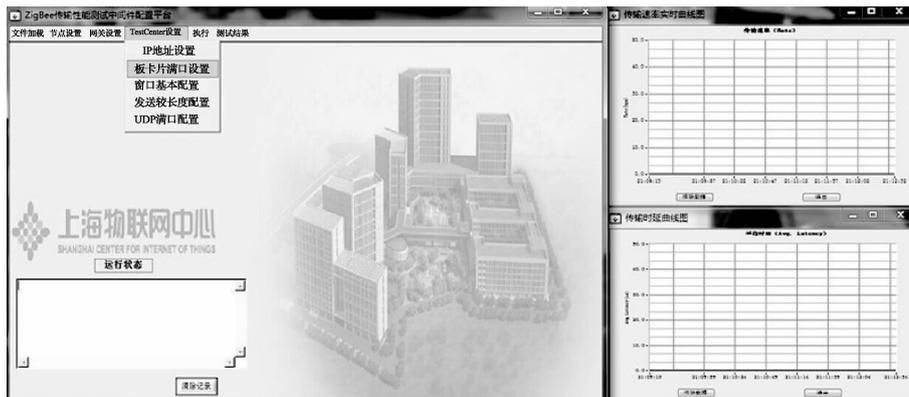


图7 PC端软件界面

2.4.2 网络仿真处理

网络仿真数据处理包括仿真平台记录筛选、数据转换

```
515.4936272880145N.node[10].Communication.Routing
515.4936272880145N.node[10].Communication.Routing
515.4936272880145N.node[16].Communication.Routing
515.4936272880145N.node[20].Communication.Routing
515.4936272880145N.node[23].Communication.Routing
515.4936272880145N.node[31].Communication.Routing
515.4936272880145N.node[32].Communication.Routing
```

和帧格式处理过程。ZigBee 网络协议仿真平台仿真不同的路由协议,如 AODV 路由记录格式如图8所示。

```
07-reorived data packet.source:19 dest hop:10 final destination:10.
12-reoeiving data packet,give packet to app layer.source:19.
Received [AODV routing data packet]from MAC layer.
```

图8 仿真平台数据格式

开发的测试中间件根据仿真平台日志的格式、业务类型、业务时间、发送对象和接收对象等关键信息,建立可靠的筛选机制,从而实现并保证仿真平台数据向 ZigBee 网络的可靠转发。流程如图9所示。

针对仿真记录数据填充和 IP 地址的缺省,着重研究了仿真平台上的业务类型,结合标准协议定义的格式,由中间件预置数据内容,同时引入节点编号与真实网络 IP 地址的映射,完成对数据的完整填充。

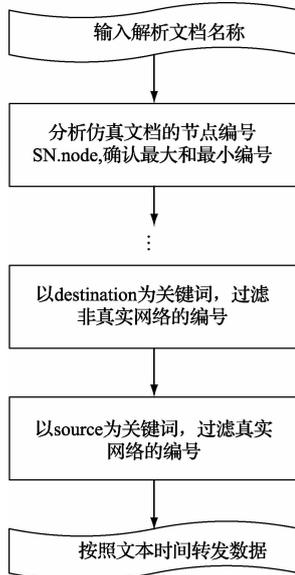


图9 数据筛选流程

该方法中由测试中间件首先按照仿真记录的业务格式进行填充,将仿真实行为转化为真实的数据,然后根据真实网络中节点编号与IP地址的映射表,填入完整的目的IP地址,完成仿真平台数据向真实网络数据的转换。数据转换流程如图10所示。



图10 数据转换流程

测试中间件发送的数据帧为带有 Spirent 特有签名字段的以太网的帧格式,并在帧的数据部分第一字段加上目的地址(custom header,CH)如图11所示,其中CH中填入的是目的节点的字段。对应的 Signature 字段如图12所示,在 Signature 字段中记录了传输性能中的各个参数,接收端经过对其中信息的提取,来获得不同的参数。

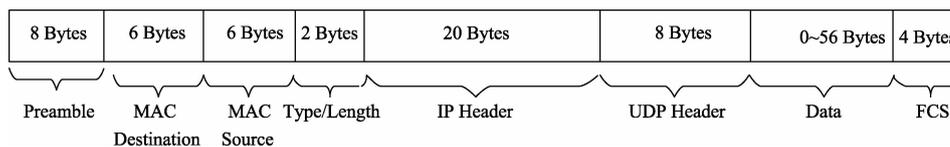


图11 数据帧格式

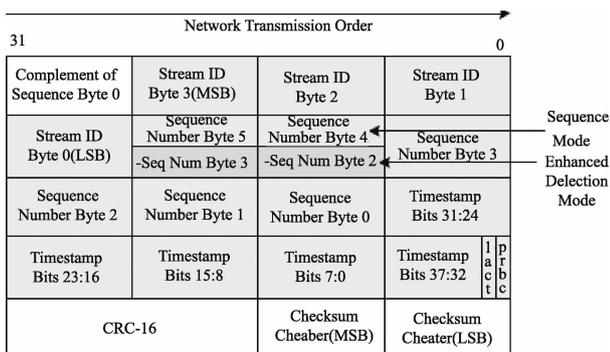


图12 Signature 格式

2.5 ZigBee 网络性能参数

根据 RFC 2501^[12], 自组网路由协议的性能比较主要是从定性和定量两个方面进行。一个好的自组网路由协议应当满足以下特性要求:分布式运行方式,提供无环路路由,按需进行协议操作,安全性,提供设备“睡眠”操作特性,对单向信道的支持。以下指标可用作定量比较路由协议性能^[13-14]:

1) 分组递交率 F

业务源产生的数据包个数与目的节点接收到的数据

包个数之比:

$$F = \frac{\text{接收到的数据包个数}}{\text{发送的数据包个数}} \quad (1)$$

2) 端到端的平均时延 Delay

它包括路由查找时延、数据包在接口队列中的等待时延,传输时延及 MAC 层的重传时延:

$$Delay = \frac{\sum (\text{接收到数据包的时间} - \text{AGT 发送数据包的时间})}{\text{发送数据包的个数}} \quad (2)$$

3) 路由协议开销

所有路由分组所含字节数,单位为字节。对于经多跳传输的数据包,该包的每一次传输就认为是一次传输。

4) 平均跳数 Hop

数据包从源节点发送到目的节点所经历的平均跳数:

$$Hop = \frac{\text{仿真中所有数据包被转发的次数和}}{\text{接收到的数据包个数}} \quad (3)$$

针对网络传输性能研究,主要根据网络中业务传输参数,包括:时延、丢包率、传输速率、抖动、峰值值等的不同要求有选择性的进行测量,同时考虑到无线传感网络中节

点休眠引起的路由变化,也需要对某个时段的性能参数进行区分参考。在这种情况下,考虑以时间为性能参数统计的标尺,提供所需时间段内不同业务流量下的测试指标结果。考虑到本平台目前状况,主要针对前两个指标进行测试,其他指标将在后续工作中进行改进。

3 测试平台实验应用

构建的测试平台可以对 ZigBee 网络路由协议和传输性能进行测试。其中,路由节点和网关节点使用的是 XBeePRO 模块,内置协议栈,可以方便的测试各种 ZigBee 网络的基础功能。结合本测试平台的实际情况,可以进行 MAC 层、网络层协议一致性测试,传输性能参数如时延、速率测试。用户界面将配置好的参数下发到网络分析仪中,可以方便的进行测试。

3.1 数据传输测试实验

开发的路由节点和网关节点中的 XBeePRO 模块,运行的是基于 EM357 的 ZigBee 片上系统和 EmberZNet PRO 的协议栈,可以进行网络协议和传输性能测试。下面测试案例中介绍了 AODV 协议测试方法的实验。

将 6 个路由节点随机的分布在实验室中,网关节点通过网线与网络分析仪相连。测试平台中间件筛选由电脑仿真的 AODV 协议数据,经过网络分析仪的重新封装,由网关节点将数据转入 ZigBee 网络,最终由另一个网关节点将接收到的数据交给网络分析仪进行分析。具体步骤如下:

1)启动测试节点和 TestCenter

各节点上电,路由节点加入由测试网关建立的网络。开启 TestCenter。

2)配置 TestCenter 各网络参数

打开控制平台软件,配置文件加载、节点、网关、IP 地址、板卡端口地址、端口速率、发送帧长度、UDP 端口等参数。

3)执行测试

点击启动测试选项,测试开始,TestCenter 按照配置自动执行特定的测试。

4)测试分析

测试结果保存在 CSV 文件中,可根据测试数据产生实时曲线图,包括平均时延和传输速率两款曲线图。测试流程如图 13 所示。

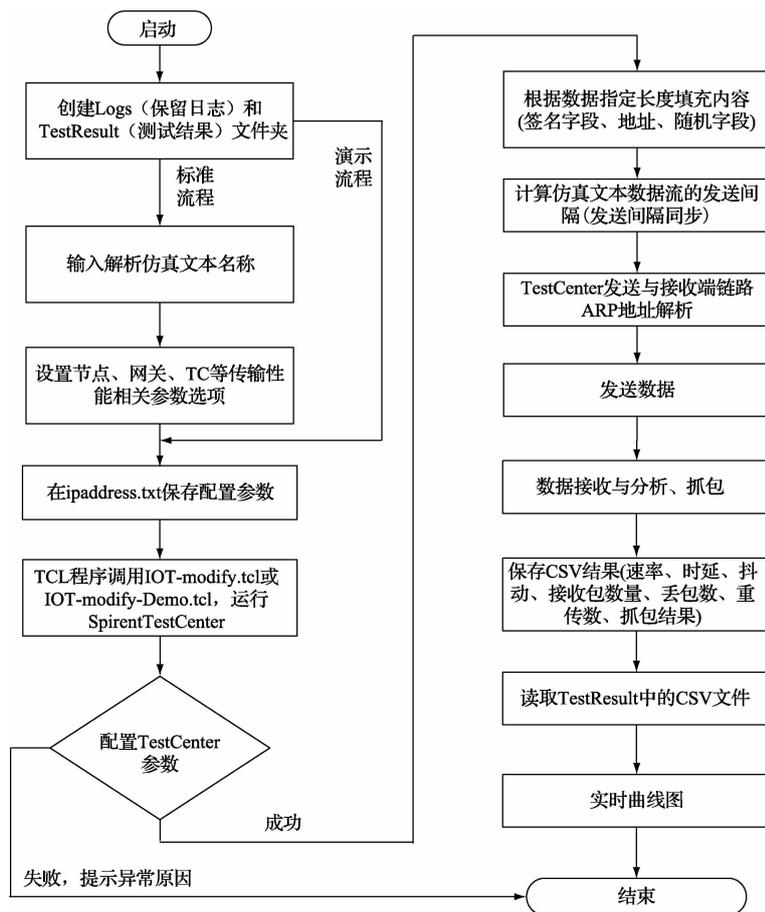


图 13 测试运行状态流程

3.2 测试结果

测试结果中,对协议和传输性能测试结果进行了分析。

3.2.1 路由协议测试

在发送数据包之前,对数据帧中目的地址进行限定,

本测试中将发往网关的两个 UDP 数据包 IP 地址 192.168.16.254 映射为十六进制 C0A810FE, 将发往其他节点的数据包的地址写为各自的网络编号(网络建立时协

调器分配), 发送端发送 10 个数据包, 然后对接收端口数据包进行捕获, 结果如图 14 所示。

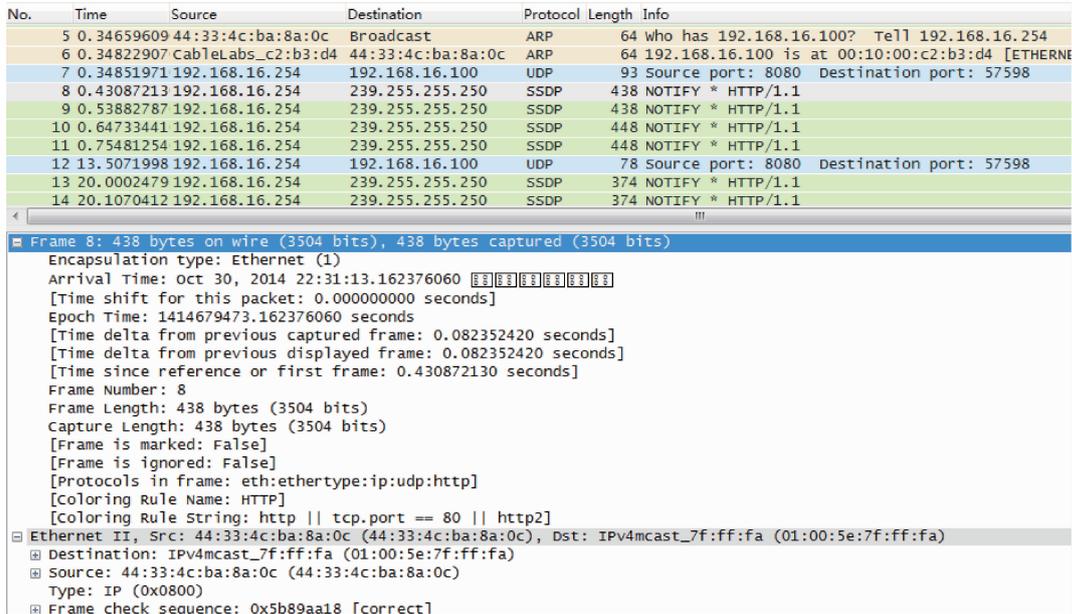


图 14 capture 数据包

由上图可知:目的网关接收到 2 个 UDP 数据包, 对应发送包的地址。解析其中 UDP 数据包可知, MAC 层、网络层、应用层帧结构与协议标准一致, 和目前现有的协议一致性测试相比, 更加具体直观显示了协议帧结构中的各个参数。

3.2.2 传输性能测试

在测试的过程中, 用户界面中的曲线图会实时的记录

当前的网络速率和时延状况, 实现对网络的实时监控, 如图 15 所示。

由图 15 可知: 运行状态栏显示了网络配置状态, 右图显示了实时的速率和时延曲线, 和 Kansei, MOTLAB 平台相比, 增加了实时监控的能力。时延曲线趋于稳定状态, 速率曲线会有骤降, 具体原因, 会进行进一步分析研究。

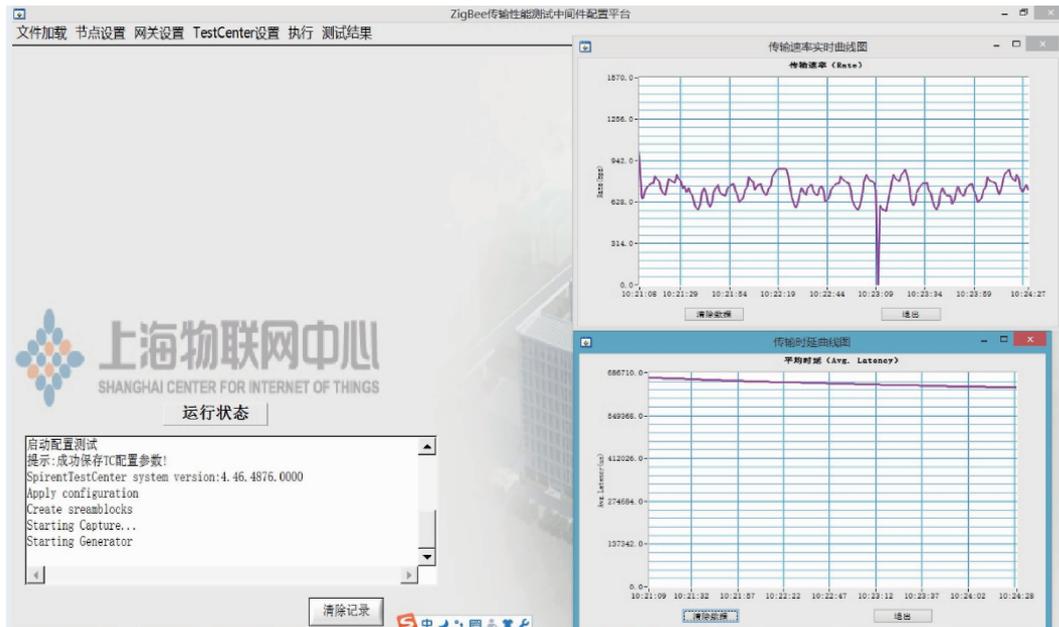


图 15 实时曲线

为了更准确显示测试结果,将测试数据进一步分析^[15]。在本网络中,L2层最小的数据长度为70 Bytes,其中包括46 Bytes的协议固定头部和24 Bytes的有效载荷。其他长度也类似,都包含46 Bytes的固定头部。以下测试在丢包率为0的情况下,测试在不同帧速率下的发送/接收帧数情况。其中,丢包率为0是指在较理想的传输环境下,节点/网关最大的数据交付能力,即设备的最大吞吐量。

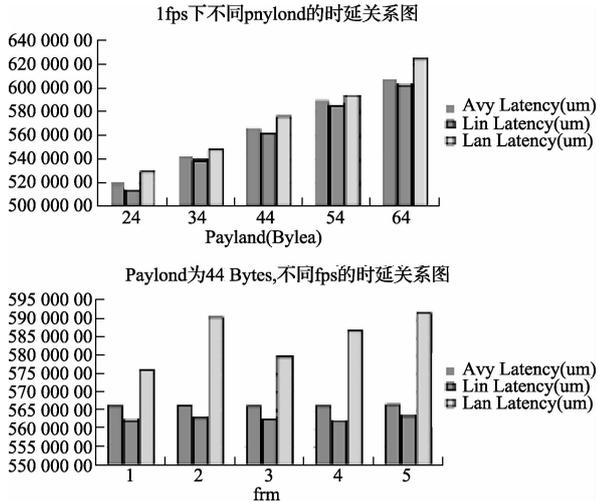


图 16 payload-delay, fps - delay 关系

由图 16 可以看出:

- 1) 传输时延与发送帧长度存在一定关系,发送帧每增加 10 Bytes,时延增加约 25 ms。
- 2) 丢包率为 0 的情况下,有效载荷为 24、34、44 Bytes 的最大传输帧率为 5。而有效载荷为 54、64 Bytes 时,最大传输帧率为 4。
- 3) 保持数据帧长度不变,在丢包率为 0 的情况下改变传输帧率,则传输时延与传输帧率无关。
- 4) 当数据有效载荷超过 64 Bytes,ZigBee 网络自动将数据帧进行随机分片,从而导致传输性能测试仪无法正确解析载荷内的定位信息,引起传输参数的误统计。

4 结 论

本 ZigBee 网络测试平台由 ZigBee 软件平台、ZigBee 节点网络与 Spirent 的 SPT N4U TestCenter 网络性能测试仪组成,平台创新性的使用了 TestCenter 网络性能测试仪模拟多用户终端,通过发送特定结构的数据包,测试网络性能和路由协议性能两个对象,对时延、速率等指标进行了测试。测试平台对评估网络状况,提出改进策略有重要作用。但平台所构建的网络规模较小,还没有做到大规模的应用级测试,下一步就是完善网络测试平台,实现路由协议开销、跳数等测试。

参 考 文 献

[1] 郑军,张宝贤. 无线传感器网络技术[M]. 北京:机械工业出版社,2012:1-3.

[2] 王保云. 物联网技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报,2009,23(12):1-7.

[3] ALLIES L, BLAMPAIN E, MJAHEH H, et al. Modeling of a wireless SAW temperature sensor and associated antenna [J]. Instrumentation, 2014, 1(1):8-14.

[4] 江涌,谷建华,杜鹏雷,等. 无线传感器网络测试平台研究[J]. 计算机技术与发展,2010(9):188-192.

[5] PRABAL D, JONATHAN H, JAEIN J, et al. Trio: enabling sustainable and scalable outdoor wireless sensor network deployments[R]. Proceedings of the fifth international conference on Information processing in sensor networks, 2006.

[6] KALISZAN A, GLABOWSKI M, HANCZEWSKI S. A new testing method of routing protocols for wireless mesh networks[C]. Advances in Intelligent Systems & Computing,2014:353-361.

[7] 郑凯,赵宏伟,张孝临. 基于 ZigBee 网络的心电监护系统的研究[J]. 仪器仪表学报,2008,29(9):1908-1911.

[8] 鲍贤亮,陈年海,徐一凡,等. 基于 ZigBee 技术的无线脉搏传感网[J]. 电子测量技术,2015,38(2):105-108.

[9] 黄庆卿,汤宝平,邓蕾,等. 无线传感器网络子带能量自适应数据压缩方法[J]. 仪器仪表学报,2014,35(9):1998-2003.

[10] 吴川,周治平. 嵌入式 WMMP-T 协议的物联网网关系统的设计[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(8):870-878.

[11] 庞丽娟,陶小亮. 基于 LabWindows/CVI 的测试设备设计与研究[J]. 国外电子测量技术,2014,33(6):78-80.

[12] CORSON S, MACKER J. Mobile ad hoc networking (MANET):routing protocol performance issues and evaluation considerations [Z]. IETF RFC 2501, January 1999;http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2501.txt.

[13] XIAOPING C,STEPHANE M. Testing protocols in Internet of Things by a formal passive technique [J]. China Information Sciences, 2014,57(3):1-13.

[14] 陈振,翟琰,胡松华,等. 基于网络划分的 VANET 路由构建及数据传输方法[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(8):836-842.

[15] 孙伟,王建平,李奇越,等. 无线传感器网络 MAC 层传输性能研究模型[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(2):144-149.

作 者 简 介

张冲,1990 年出生,中科院上海微系统与信息技术研究所在读硕士研究生。主要研究方向为无线传感器网络。E-mail:skdzhangchong@126.com

熊勇,1973 年出生,中科院上海微系统与信息技术研究所研究员。主要研究方向为无线传感器网络、移动通信。E-mail:yong.xiong@mail.sim.ac.cn