

基于零干扰测试背板的无线传感器网络测试平台*

赵忠华^{1,2,3+}, 皇甫伟¹, 孙利民¹, 周新运¹

¹(中国科学院 软件研究所, 北京 100190)

²(信息安全国家重点实验室(中国科学院 研究生院), 北京 100049)

³(中国科学院 研究生院, 北京 100049)

Non-Intrusive Backplane-Based Testing Platform for Wireless Sensor Networks

ZHAO Zhong-Hua^{1,2,3+}, HUANGFU Wei¹, SUN Li-Min¹, ZHOU Xin-Yun¹

¹(Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(State Key Laboratory of Information Security (Graduate University, The Chinese Academy of Sciences), Beijing 100049, China)

³(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhaozhonghua@is.iscas.ac.cn, http://www.iscas.ac.cn/

Zhao ZH, Huangfu W, Sun LM, Zhou XY. Non-Intrusive backplane-based testing platform for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2012, 23(4): 878-893. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4013.htm>

Abstract: Accurate runtime monitoring and testing is critical in the successful field deployment of wireless sensor networks (WSNs). Conventional techniques that demand extra reports from the sensor nodes could easily alter the node and network behaviors. The delay and asynchrony of the extra reports also implies that fine-grained monitoring can hardly be achieved. Sniff-Inside approach is presented in this case, and a non-intrusive backplane-based testing platform for wireless sensor networks is developed. With auxiliary test boards, the testing platform directly captures chip-level signals from wireless sensor nodes and the captured data are transferred through independent network paths to a monitoring server. The remote access client gains access to the test server by subscribing to test data on the server and finishes the analysis and processing of test data. It has been demonstrated that the operations of the monitored WSN can be fully identified through parsing the chip-level data across different nodes. The experimental results show that, through chip-level signal sniffing, the testing platform effectively gathers accurate runtime data with no side effects on the spontaneous behavior of sensor networks. The case study further shows the testing platform facilitates the tests of high-level functionalities, such as signal analysis, protocol verification and accurate evaluation of network performance.

Key words: wireless sensor network; testing; testing backplane; testing platform; sniff-inside; non-intrusive

摘要: 精确的网络运行状态监视和性能评估对于无线传感器网络的研究和实际部署具有极为关键的意义,而现有的测试技术和测试平台对无线传感器网络的自身运行存在一定的干扰,测试数据的精度也受限于传感器节点的硬件配置.针对现有测试技术和测试平台的缺陷,提出了内部侦听的测试方式,并进一步研发了基于零干扰测试背板

* 基金项目: 国家自然科学基金(60903211); 国家科技重大专项(2011ZX03005-002); 北京市自然科学基金(4092011); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(ISCAS2009-DR15)

收稿时间: 2010-09-21; 修改时间: 2011-01-20; 定稿时间: 2011-03-07

的无线传感器网络测试平台.测试平台首先通过由额外的测试背板直接捕获传感器节点内部互连信号,产生测试数据;然后测试数据经由额外的传输网络传送到测试服务器,进行解析和预处理;最后,远程访问客户端通过订阅机制访问测试服务器上的测试数据,并对其分析和处理.测试平台在避免对无线传感器网络正常运行产生干扰的前提下,实现对运行时刻的无线传感器网络的高精度零干扰的透明测试.实验结果表明,基于零干扰测试背板的无线传感器网络测试平台可以对无线传感器网络进行信号分析、协议验证,并对性能进行精确的评估.

关键词: 无线传感器网络;测试;测试背板;测试平台;内部侦听;零干扰

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

无线传感器网络(wireless sensor networks,简称 WSN)在近年得到国际学术界和工业界的广泛关注,已取得了丰富的研究成果,在部分领域正逐步向实用化推进.测试技术,尤其是精确的网络运行时刻的状态监视和性能评估,对于无线传感器网络的研究和实际部署应用具有极为关键的意义.

无线传感器网络具有运算、存储、通信和能量资源极度受限的显著特点,其测试技术面临更大的技术挑战.无线传感器网络节点运算和存储资源受限,如果测试数据由节点自身收集,不仅会对节点的运行和能量消耗有一定影响,测试数据的精度也会受限于节点的硬件配置水平(如时间测量精度).无线传感器网络的带宽资源极为受限,如果测试数据经由节点间的无线链路逐跳传输,将会对网络行为产生不可避免的干扰.对于将要部署在实际环境中的无线传感器网络而言,在客观上需要对网络运行有准确的把握.假如测试行为对无线传感器网络的自身运行产生了较大的干扰,或者测试数据的精度较低,那么所观测到的无线传感器网络行为将偏离于其正常运行时刻的行为,这必然将影响对无线传感器网络的协议分析和性能评估的判定结果.

近年来,国内外已经提出了多种无线传感器网络测试方式和相应的测试平台与工具.根据测试数据的产生和收集方式的不同,现有的无线传感器网络测试技术大致分为 3 类:一是测试数据由传感器节点生成,经由无线传感器网络自身链路传输,显然,这种方式对无线传感器网络的节点和网络行为有明显的干扰;二是尽管测试数据由传感器节点生成,但经由额外的传输通道进行收集,虽然避免了对无线传感器网络自身通信的影响,但仍然会占用节点的运算和存储资源;三是借助于外部的侦听设备,由额外的设备侦听空中的数据分组获得无线传感器网络的运行状况,从而避免对其运行产生干扰.然而侦听设备难以了解节点的内部工作状态,缺乏对节点运行的细致观察能力.因此,现有的测试技术以及基于这些技术形成的测试平台与工具并不能很好地满足对无线传感器网络运行的细致、准确以及零干扰的测试需求.高精度零干扰的测试方法和相应的测试平台已成为无线传感器网络发展中亟待解决的关键问题之一.

本文研究并提出一种新型的基于内部侦听(sniff-inside)技术的传感器网络测试平台,其核心思想在于,由额外的高精度测试设备捕获无线传感器节点内部芯片的互连信号并产生测试数据,这些测试数据经由额外的传输网络收集并集中分析处理,从而避免对无线传感器网络节点的资源占用,满足高精度和零干扰的测试需求.

本文第 1 节介绍无线传感器网络测试的相关工作.第 2 节解释内部侦听测试技术的原理.第 3 节讨论基于零干扰测试背板的无线传感器网络测试平台的设计与实现.第 4 节给出测试平台的若干典型的测试结果.最后是全文的总结和未来工作安排.

1 相关工作

目前,典型的无线传感器网络测试技术和平台可以根据测试数据的产生和收集方式分为 3 类,具体介绍如下:

第 1 类测试方式由无线传感器网络的节点产生测试数据,这些测试数据经由无线传感器网络自身的链路逐跳传输到达汇聚节点并进行分析,如图 1 所示.其典型实现如 Crossbow 公司的 MoteWorks^[1],它是基于 MICA 系列节点开发的无线传感器网络测试系统,可测指标包括网络拓扑结构、节点剩余能量、链路质量、传输速率等.节点的微控制器运行相应的软件测试代码,生成测试数据并经由无线链路逐跳传输到测试服务器,通过文本或图形方式显示测试结果,使得用户能够远程监视无线传感器网络的运行情况.这种测试方式无需额外的测试

设备,具有较低的测试部署成本,然而它对无线传感器网络的运行存在较大的干扰.此外,节点自身的运算速度和晶振精度等硬件水平也限制了测试数据的准确性.

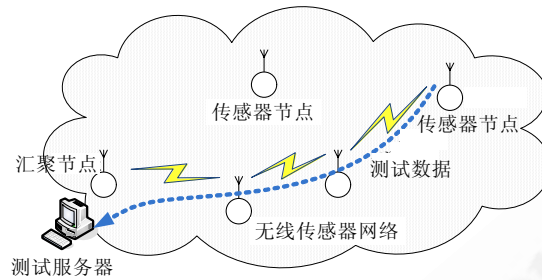


Fig.1 Test data are generated and transmitted by wireless sensor networks

图1 测试数据经由无线传感器网络自身产生和传输

第2类测试方式仍然由无线传感器网络的节点产生测试数据,但是这些测试数据并不经由无线传感器网络自身的无线链路传输,而是通过额外的数据通道传输到测试服务器,如图2所示.本测试方式的典型实现平台包括 MoteLab^[2], Kansei^[3], Trio^[4]和 TWIST^[5]等.以俄亥俄州立大学开发的 Kansei 系统为例, Kansei 采用 XSM 传感器节点,每个 XSM 节点被连接到一个 StarGate 节点. StarGate 节点采用 400MHz 主频的 PXA255 微处理器,具有以太网或无线局域网的通信能力. XSM 节点产生的测试数据经扩展接口传输到 StarGate 节点,并由以太网或无线局域网进一步转发到测试服务器.在本测试方式中,测试数据在额外的网络链路上传输,因而对于无线传感器网络的无线通信不存在干扰.然而,待测节点仍需运行相应的测试代码,节点自身的状态仍然会受到测试行为的影响,测试的精度也受限于节点自身的硬件配置水平.

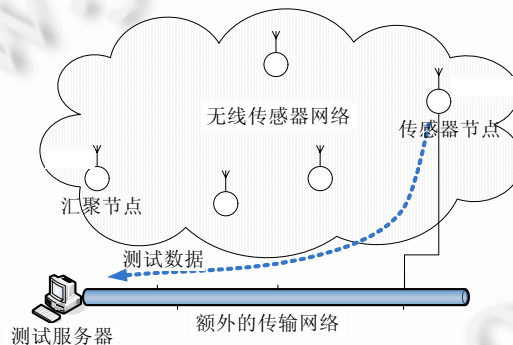


Fig.2 Test data are generated by sensor nodes and transmitted by the additional network

图2 测试数据经由节点产生和额外网络传输

第3类测试方式则通过额外的侦听节点或辅助仪器实施对无线传感器网络的测试,如图3所示.本测试方式的典型测试工具包括 SNAMP^[6], SpyGlass^[7]和 WiSens^[8]等.侦听节点位于某传感器节点的附近,对射频分组进行捕获,获得相应的测试数据并对网络进行分析.基于辅助侦听节点的测试方式对网络运行没有任何干扰.然而,由于是从射频信号进行外部侦听(sniff-outside),本测试方式难以获知节点内部的状态变化.同时,由于射频电路参数的差异性和无线通信的不确定性,即使侦听节点成功捕获到射频分组,也无法判断临近的节点是否也可以成功接收,反之亦然.此外,侦听节点的射频捕获范围仅覆盖一个有限的区域,因此本测试方式通常仅用于局部的辅助性网络诊断目的,难以形成网络级的测试平台.

总体而言,学界已经在无线传感器网络的测试领域取得了一定的成果,然而,非侦听类的测试技术对网络行为存在一定的影响,难以适用于资源极度受限的无线传感器网络;而外部侦听技术也难以观察节点内部的行为,仅适合在局部范围内实现辅助性的网络诊断.现有的测试技术和相应的测试平台很难提供给用户高精

度、零干扰和网络化的测试能力,无法满足对无线传感器网络运行的细粒度、精确和零干扰的测试需求.因此,如何在避免对无线传感器网络正常运行产生干扰的前提下精确获取测试数据,是无线传感器网络测试技术的关键技术问题.

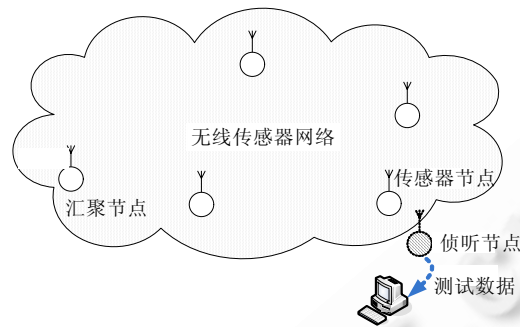


Fig.3 Test method based on sniffer nodes

图3 基于侦听节点的测试方式

2 内部侦听测试方式

内部侦听(sniff-inside)技术是一类新型测试方法,它面向现有传感器节点的典型组成结构,通过捕获和分析节点内部芯片间的互连信号,达到了解节点内部状态和行为的测试目的.

传感器节点是无线传感器网络的基本功能单元.目前,业界已经研制了多种传感器节点,典型的节点有 Mica, Mica2, MicaZ^[9], TelosB^[10], Imote, Iris 等.这些节点具有类似的硬件结构特征,包含若干用印制板导线连接的器件,如微控制器单元(micro control unit,简称 MCU)、射频收发单元(radio frequency transceiver)、传感器、电源和外部扩展接口(如串行接口)等,如图4所示.以 TelosB 节点为例,它采用 MSP430 微控制器、CC2420 射频芯片,具有温湿度传感器、排针及 USB 扩展接口,采取 3V 电池供电.

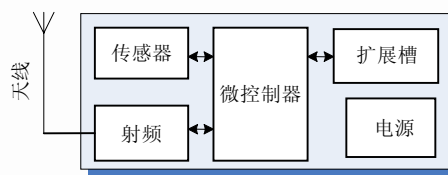


Fig.4 Typical hardware architecture of sensor nodes

图4 典型的传感器节点硬件架构

节点器件间的连接方式与节点的设计需求和器件管脚定义有关.以 TelosB 为例,在其微控制器和射频芯片间存在 4 条串行外设接口(serial peripheral interface,简称 SPI)信号线和 6 条通用 I/O 线.为了执行射频数据收发操作,微控制器和射频芯片间需要在上述信号线上按照一定的格式交互命令和数据,其信号时序详见 CC2420 芯片手册.理论上,若获得节点微控制器和射频芯片间的交互信号,则可以完全了解节点的射频数据收发情况.类似地,若获取节点微控制器和传感器间的互连信号,则可以了解节点的感知采样操作.

因此,通过额外的测试背板,由节点内部互连信号获得测试数据并传输到测试服务器进行集中处理(如图5所示),不仅可以呈现丰富的节点运行时刻信息,同时也避免了对节点自身运行的干扰,实现了对无线传感器网络的有效测试分析.此外,内部侦听测试数据的精度不局限于节点自身的硬件配置,而取决于对节点内部互连信号的采样精度,即测试背板自身的能力,因此有可能借助高性能的测试背板满足高精度的测试需求.

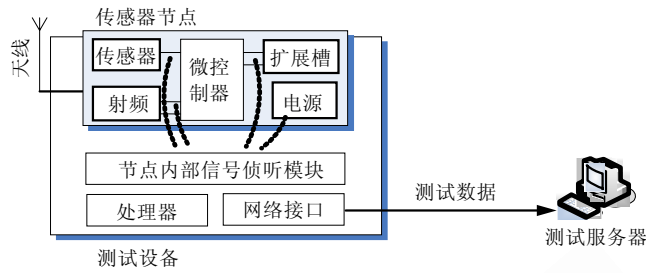


Fig.5 Test data are generated by the sniff-inside approach

图 5 基于 Sniff-Inside 方式获取测试数据

3 测试平台的设计与实现

基于内部侦听测试技术,我们研发了一套基于零打扰测试背板的无线传感器网络测试平台.测试平台的组成如图 6 所示,它包括若干测试单元、额外的测试数据传输网络、一台测试服务器以及若干远程访问客户端.每个测试单元由一个待测传感器节点和测试背板组成,测试背板负责采集节点的内部互连信号并产生测试数据.测试数据传输网络可以用有线或无线网络实现,通常支持 TCP/IP 协议,从而支持远程的测试需求.测试服务器和远程访问客户端之间采用 C/S 架构.测试服务器通过额外的测试数据传输网络接收测试数据,对其进行解析和预处理,并将原始数据和解析后的数据存储在数据库中,以备提供给远程访问客户端使用.远程访问客户端通过现有网络连接至测试服务器,运行测试数据分析工具,实现对无线传感器网络进行信号分析、协议验证和性能精确评估.

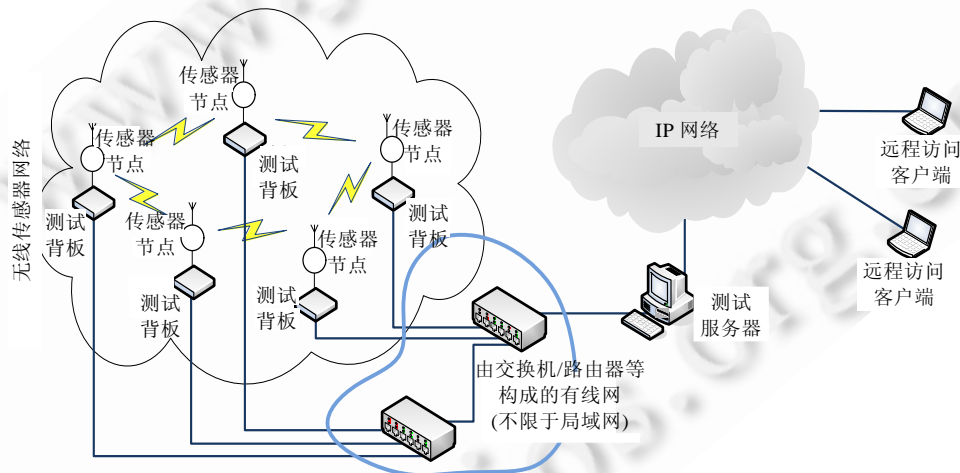


Fig.6 Composition of testing platform for wireless sensor networks

图 6 无线传感器网络测试平台的组成

3.1 测试背板

基于零打扰测试背板的无线传感器网络测试平台采用了内部侦听的技术,其中,节点内部信号侦听模块以测试背板的形式实现.在无线传感器网络测试平台中,测试背板用于捕获与之相连的传感器节点的内部互连信号,继而再对信号编码后转发到测试服务器.测试背板与待测节点的连接方式如图 7 所示.

测试背板主要由信号采集模块(signal acquisition module,简称 SAM)、微处理器和以太网接口模块等组成.SAM 模块与待测传感器节点连接,负责捕获节点内部互连信号产生原始测试数据,是测试背板的核心模块.微

处理器对 SAM 模块产生的测试数据进行必要的压缩和编码,并转发到以太网接口模块.以太网接口模块主要提供测试数据在网络中的传输能力.

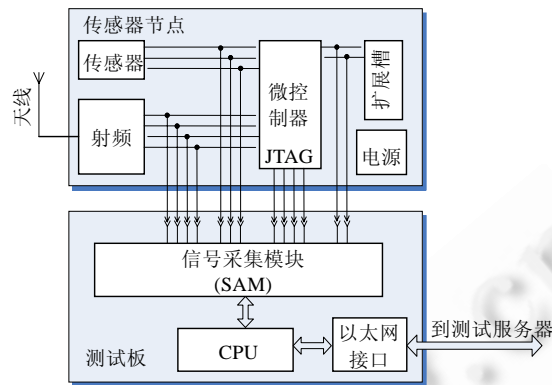


Fig.7 Composition of test backplane and the connection method between test node and test backplane

图 7 测试背板的组成及与测试节点的连接方式

SAM 模块和传感器节点的接口主要包括 5 组信号:(1) 射频收发芯片和微控制器间的互连信号,提供射频分组收发信息;(2) 传感器和微控制器间的互连信号,提供感知操作信息;(3) 微控制器和扩展槽的信号,提供微控制器访问外设的信息;(4) 微控制器的 JTAG(joint test action group)接口,提供对微控制器的编程和调试能力;(5) 节点的电源线,由测试背板向待测传感器节点提供电源,并通过测量供电电流获取节点功率消耗信息.

无线传感器网络平台测试背板的硬件选取 Atmel 公司的 AT91SAM7X256 作为微处理器.SAM 模块采用 Altera 公司的 Cyclone II EP2C8 高性能可编程逻辑阵列(field-programmable gate array,简称 FPGA),工作于 100MHz 时钟频率,实现对节点内部互连信号的高速精确采样.测试背板包括高精度晶体振荡器,提供微秒级别的精确时间测量能力.此外,测试背板配置了 LED 显示,串口和蜂鸣器作为信息输出和告警输出.在软件实现上,采用 FreeRTOS 作为嵌入式操作系统,采用轻量级协议栈 LwIP^[11]作为 TCP/IP 实现.测试背板的具体实现说明可参考文献[12].

3.2 待测无线传感器网络节点

理论上,无线传感器网络测试平台支持前述具有典型硬件架构的多种传感器节点类型.由于现有节点的扩展接口信号有限,为了采集节点内部的互连信号,必须采取飞线或探针夹具的方法,这使得测试平台的部署并不方便.为此,我们研制了一类支持测试功能的传感器节点 ZiNT(zigbee node with testing support),如图 8 所示.

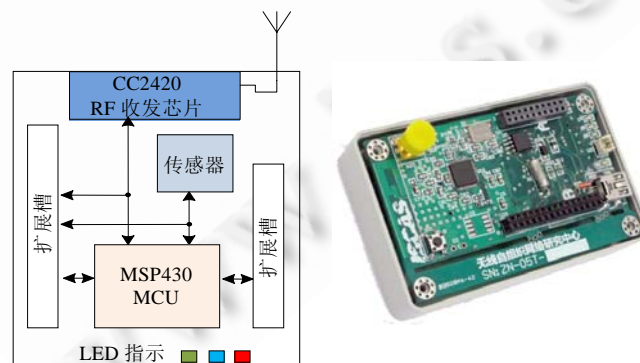


Fig.8 ZiNT sensor node

图 8 ZiNT 传感器节点

ZiNT 节点兼容于 Crossbow 公司的 TelosB 节点,其微控制器、射频收发芯片等与 TelosB 完全相同,同样支持 TinyOS 操作系统.两类节点的区别主要在于,ZiNT 提供了支持测试的扩展插槽,射频芯片、传感器与微控制器间的连线、微控制器的 JTAG 线均被引出到扩展槽上.由于 ZiNT 的开发和使用兼容于主流的 TelosB 节点,具有方便的测试接口,因而在提供典型传感器节点测试能力的基础上降低了测试平台的部署复杂度.

3.3 测试单元

无线传感器网络测试平台的测试单元由测试节点和测试背板连接组成.为适应多种传感器节点类型,测试单元的连接采用了辅助的转接板,测试背板的扩展槽和待测传感器节点的扩展槽通过转接板相连,如图 9 所示.

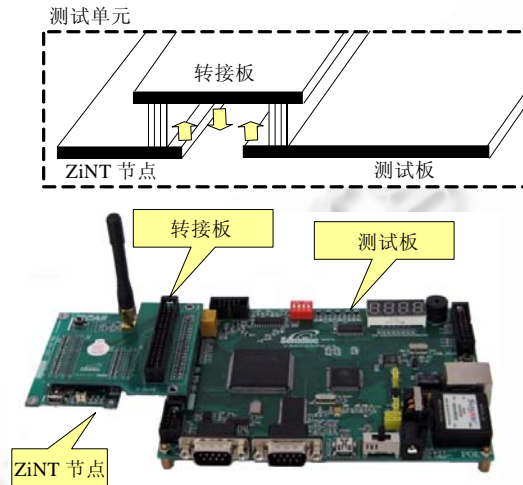


Fig.9 Mechanical structure of test unit

图 9 测试单元的机械结构示意图

对于 ZiNT 节点,我们设计了相应的转接板.对于其他类型的节点,通过飞线或探针夹具的形式引出节点内部的互连信号,更换相应的转接板就可以实现与测试背板间的互连.这种积木式的插接结构,有利于实现测试平台的灵活性和扩展性.测试背板内部的 SAM 模块采用 FPGA 来实现,可以提供电路设计的灵活性,适应于不同类型节点的内部互连信号.

3.4 测试服务器和远程访问客户端

在无线传感器网络测试平台中,所有的测试数据由测试背板采集,然后传至测试服务器.测试服务器收到测试数据后,对其进行解析和预处理.远程访问客户端通过订阅机制访问测试服务器上的测试数据,然后对其进一步分析和处理.

在使用数据分析工具进行任何性能分析之前,首先要解决的是测试单元间以及测试单元与测试服务器之间的时钟同步问题,这对于无线传感器网络的高精度测量具有重要的意义.

在基于零干扰测试背板的无线传感器网络测试平台中,存在如下两个重叠的网络:

- 由众多传感器节点组成的无线传感器网络;
- 测试单元经有线网络连接至测试服务器组成的测试数据传输网络.

在无线传感器网络中,一个传感器节点发送一个无线分组,则能够接收到此无线分组的邻居节点在接收时刻上几乎是同时的.既然测试平台能够捕获到每个测试单元收发的无线分组及相关操作,那么其中包含的精确的时间关联信息应对测试平台的时钟同步起到很好的帮助作用.在测试数据传输网络中,测试背板通过支持 TCP/IP 协议的有线网络与测试服务器相连,测试服务器通常为高性能的计算机或服务器设备,测试背板内部拥有处理能力很强的 FPGA 和微处理器,板上有频率和精度都较高的晶振,因而测试背板和测试服务器之间可以

基于 TCP/IP 实现两者间的时钟同步.然而,由于有线 TCP/IP 网络的往返延迟大约是数 10 个毫秒,所以仅仅通过测试服务器和测试单元间基于 TCP/IP 的时钟同步无法达到高精度测量的目标.

在本测试平台中,我们提出了一个二维时钟同步协议,如图 10 所示.其中,测试服务器和测试单元之间的时钟同步称为水平维度时钟同步,测试单元之间的时钟同步称为垂直维度时钟同步.水平维度时钟同步是周期性和粗粒度的,垂直维度时钟同步是偶然性和精确的.通过二者的合理结合,测试平台的二维时钟同步协议可以实现精确和连续的时钟同步.

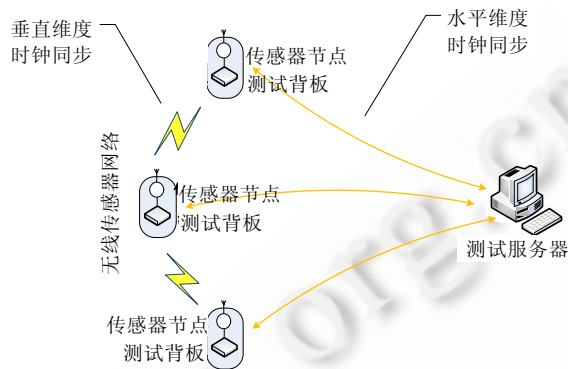


Fig.10 Two-Dimensional clock synchronization protocol

图 10 二维时钟同步协议

下面给出二维时钟同步协议的具体实现过程.

(1) 水平维度时钟同步

测试服务器与测试单元之间的水平维度时钟同步如图 11 所示.在 T_1 时刻,测试服务器向测试单元发送一个消息,在 T_2 时刻测试单元接收到该消息;在 T_3 时刻,测试单元向测试服务器返回一个应答消息,在 T_4 时刻,测试服务器接收到该应答消息.其中, T_1 和 T_4 与测试服务器的时钟相关, T_2 和 T_3 与测试单元的时钟相关.假定往返的传输延迟是对称的,则测试服务器的 $(T_1+T_4)/2$ 等于测试单元的 $(T_2+T_3)/2$.

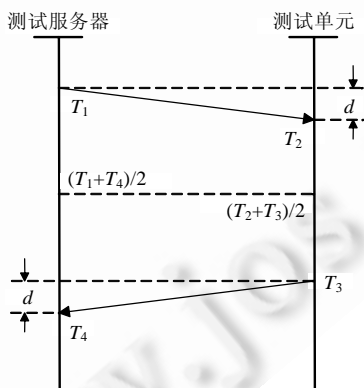


Fig.11 Clock synchronization in horizontal dimension

图 11 水平维度时钟同步

假设 $t^{(s)}$ 代表测试服务器的时间, t_i 代表第 i 个测试单元的时间,则通过如下公式便可计算出第 i 个测试单元的系统时间:

$$t^{(s)} = k_i \times t_i + \Delta_i,$$

其中, \$k_i\$ 代表时钟漂移, \$\Delta_i\$ 代表时钟偏移.

如果 \$k_i\$ 和 \$\Delta_i\$ 能被同时获得, 则第 \$i\$ 个测试单元被水平维度时钟同步. 如果所有的测试单元被水平维度时钟同步, 则整个测试平台在水平维度便被时钟同步.

为了获得第 \$i\$ 个测试单元的时钟漂移和时钟偏移, 从第 \$i\$ 个测试单元的第 \$m\$ 轮水平维度时钟同步的消息交互中可以推导出如下等式:

$$t_{i,m}^{(s)} = k_i \times t_{i,m} + \Delta_i,$$

其中, \$t_{i,m}^{(s)} = (T_1 + T_4)/2\$, \$t_{i,m} = (T_2 + T_3)/2\$.

以此类推, 在对多个测试单元的水平维度时钟同步计算过程中, 测试服务器方可以得到一个用来计算所有测试单元时钟漂移和时钟偏移的矩阵方程(1):

$$\begin{aligned}
 & A_H x = B_H \\
 & A_H = \begin{bmatrix} t_{1,1} & 1 & & & \\ t_{1,2} & 1 & & & \\ \vdots & \vdots & & & \\ t_{1,C_1} & 1 & & & \\ & & t_{2,1} & 1 & \\ & & t_{2,2} & 1 & \\ & & \vdots & \vdots & \\ & & t_{2,C_2} & 1 & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & t_{N,C_N} & 1 \end{bmatrix} \\
 & x = [k_1, \Delta_1, k_2, \Delta_2, \dots, k_N, \Delta_N]^T \\
 & B_H = [t_{1,1}^{(s)}, t_{1,2}^{(s)}, \dots, t_{1,C_1}^{(s)}, t_{2,1}^{(s)}, \dots, t_{2,C_2}^{(s)}, \dots, t_{N,C_N}^{(s)}]^T
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中, \$C_i\$ 代表第 \$i\$ 个测试单元的水平维度时钟同步的轮数.

理论上, 只要测试服务器和测试单元间进行足够多次的消息交互, 通过上述矩阵方程便可以求解出所有测试单元的时钟漂移和时钟偏移. 但是, 由于有线 TCP/IP 网络的往返延迟大约是数 10 个毫秒, 所以仅仅通过测试服务器和测试单元间水平维度时钟的同步很难达到无线传感器网络对高精度时间测量和分析的目标要求.

(2) 垂直维度时钟同步

假定在无线传感器网络中, 一个传感器节点发送一个无线分组, 则能够接收到此无线分组的邻居节点在接收时刻上是同时的. 对垂直维度的时钟同步来说, 如果两个测试单元 \$i\$ 和 \$j\$ 分别在 \$t_{i,m}^v\$ 和 \$t_{j,m}^v\$ 时刻捕获到了相同的无线分组 \$m\$, 则可以得出如下等式:

$$k_i \times t_{i,m}^v + \Delta_i = k_j \times t_{j,m}^v + \Delta_j.$$

上述等式可以重写为

$$k_i \times t_{i,m}^v + \Delta_i - k_j \times t_{j,m}^v - \Delta_j = 0.$$

从而可以得到垂直维度时钟同步的矩阵方程(2):

$$\begin{aligned}
 & A_v x = B_v \\
 & A_v = \begin{bmatrix} \vdots \\ \dots & t_{i,m}^v & 1 & \dots & -t_{j,m}^v & -1 & \dots \\ \vdots \end{bmatrix} \\
 & x = [k_1, \Delta_1, k_2, \Delta_2, \dots, k_N, \Delta_N]^T \\
 & B_v = [\dots, 0, \dots]^T
 \end{aligned} \tag{2}$$

综上所述,由水平维度时钟同步矩阵方程(1)和垂直维度时钟同步矩阵方程(2)可以得到二维时钟同步的矩阵方程(3):

$$\begin{bmatrix} A_H \\ A_V \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} B_H \\ B_V \end{bmatrix} \quad (3)$$

对上述二维时钟同步的矩阵方程可以使用最小二乘法求解,从而获得所有测试单元的时钟漂移和时钟偏移.同时,亦可对上述二维时钟同步矩阵方程分别在垂直和水平两个维度上赋予不同的权值,如此,可以使用加权的最小二乘法求解加权的二维时钟同步矩阵方程.

测试服务器通常都是高性能的计算机或服务器设备.在测试服务器中,首先使用上述二维时钟同步算法,对所有来自测试数据传输网络的测试数据进行预处理,使得分属不同测试单元的测试数据的时间戳被统一调整为标准时间戳,从而实现测试平台的时钟同步;进而再按照测试数据类型对测试数据进行分类和存储,以供进一步分析和处理.

远程访问客户端中包括多组的测试应用程序,如节点原始信号重构、网络事件回放、性能评估等.按照具体需求,这些测试应用程序利用订阅机制通过现有网络访问测试服务器上的测试数据,然后对其进行分析和处理.

测试服务器和远程访问客户端的软件模块组成如图 12 所示.

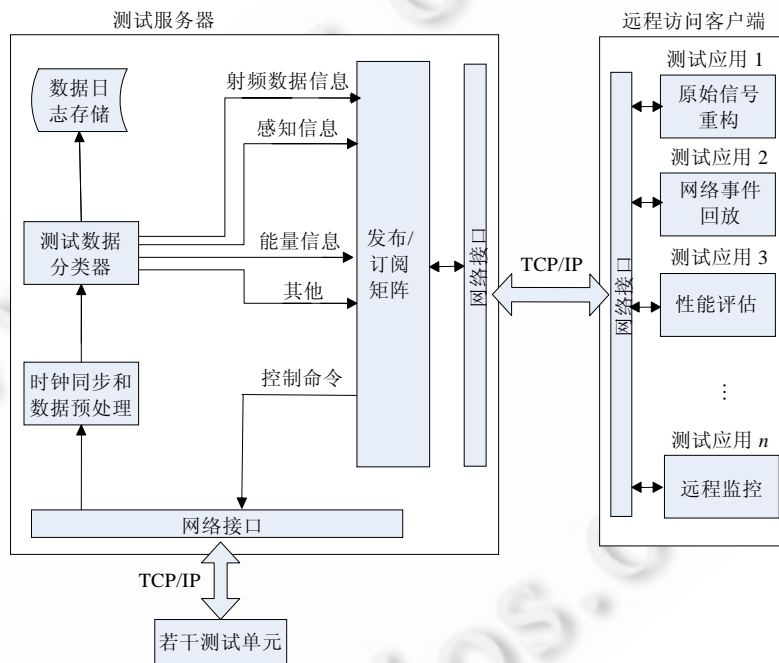


Fig.12 Block diagram of test server and remote access client in testing platform for WSN

图 12 无线传感器网络测试平台测试服务器和远程访问客户端的模块图

测试服务器和远程访问客户端的软件由 C++和 Python 语言混合编写.C++是高效的编译型语言,Python 语言是灵活的脚本语言,两者的组合兼顾了测试需求的多样性和数据处理的复杂性.目前已经开发完成若干典型的无线传感器网络测试应用程序,图 13 分别示意了测试服务器的测试数据捕获中心和远程访问客户端的节点原始信号重构、网络事件回放的运行时刻截图.

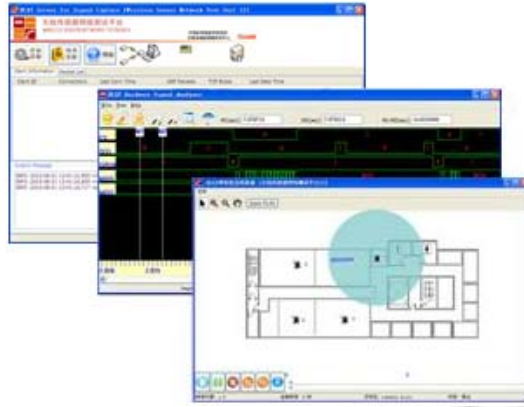


Fig.13 Screenshots of test server and remote access client

图 13 测试服务器和远程访问客户端运行界面截图

4 无线传感器网络测试平台的应用

无线传感器网络测试平台对无线传感器网络的测试能力分为 3 个层面,如图 14 所示.在信号层,无线传感器网络测试平台可以获得节点内部的互连信号信息,包括信号发生变化的精确时间戳,这些信息反映了丰富的节点内部状态的变化情况;在分组层,通过解析节点内部微控制器和射频模块间的互连信号,获得节点收发无线分组的全部内容和对应的精确时刻,可以用于验证和分析无线传感器网络协议;在性能评估层,通过网内多个节点间对收发分组情况的分析统计,获得链路质量、传输延时、分组丢失率、网络拓扑等性能指标.

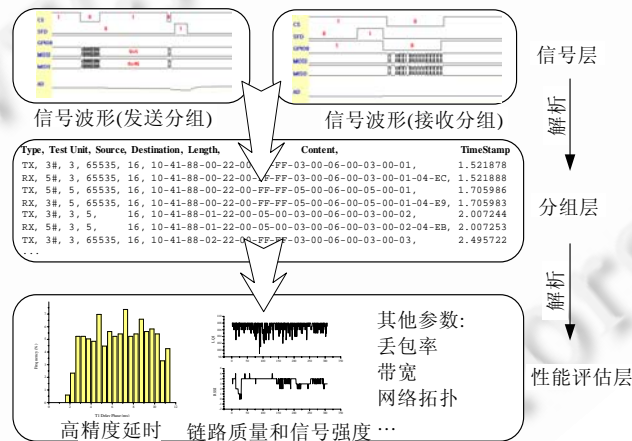


Fig.14 Three layers of testing capabilities of testing platform for WSN

图 14 无线传感器网络测试平台的 3 层测试能力

基于零干扰的内部侦听测试方式和高性能的测试背板信号捕获模块,无线传感器网络测试平台可以在避免干扰无线传感器网络自身运行的条件下获得精确的测试数据,实现状态监视、协议验证和分析、性能评估等测试需求.

本节将进一步通过系列实验介绍基于零干扰测试背板的无线传感器网络测试平台的多种实际应用.

4.1 测试数据捕获及测试平台时钟同步精度

无线传感器网络测试平台进行相关测试工作的首要基础是测试数据的捕获,用于实现此功能的部件便是

测试平台的数据捕获工具.该无线传感器网络测试平台的测试数据捕获工具运行于测试服务器上,实现多个测试单元的测试数据的收集和存储.测试场景包括一台 DELL OptiPlex 360 作为测试服务器、一台便携计算机 IBM T43 作为远程访问客户端、若干测试单元(采用 ZiNT 节点)以及用于测试数据传输的局域网.测试数据捕获工具的运行界面如图 15 所示.测试数据的捕获是测试平台对无线传感器网络进行测试的基础.

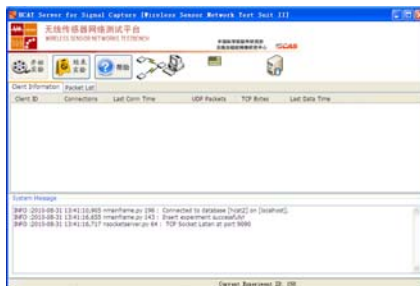


Fig.15 Test data capture tool in testing platform for WSN

图 15 无线传感器网络测试平台的测试数据捕获工具

既然一个传感器节点发送一个无线分组,则能够接收到此无线分组的邻居节点在接收时刻上是同时的.那么,在测试平台中,针对同一个无线分组在不同传感器节点上产生的收发(receive-send)时钟偏差是评价测试平台时钟同步算法精度的一个重要的测量指标.

为了验证测试平台的时钟同步精度,我们进行了如下实验,在实验中部署了 10 个测试单元,分别位于实验室的不同位置,我们选取 1 号测试单元的测试数据进行分析.图 16 表示的是 1 号测试单元仅进行水平维度时钟同步后的时钟偏差,数据表明,水平维度时钟同步后的时钟偏差大多处于 0.5ms 的区间.

图 17 为测试单元进一步执行垂直维度时钟同步后的时钟偏差,数据表明,偏差绝对值通常小于 $1.5\mu\text{s}$,时钟同步精度比仅使用水平维度时钟同步的精度有了大幅度的提高.这意味着,不同的测试单元通过二维时钟同步后,测试平台能够获得微秒级别的高精度的测量结果.

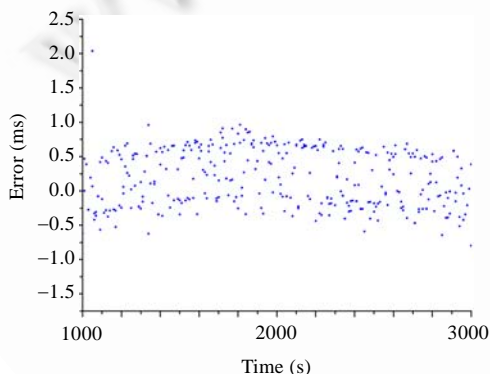


Fig.16 Precision of horizontal clock synchronization

图 16 水平维度时钟同步的精度

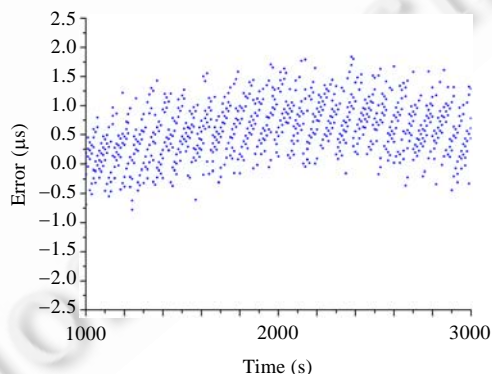


Fig.17 Precision of vertical clock synchronization

图 17 垂直维度时钟同步的精度

4.2 能耗测量

能量消耗是无线传感器网络的关键性能指标之一.在无线传感器网络测试平台中,传感器节点的电源由测试背板提供,因而无线传感器网络测试平台在向传感器节点提供工作电源的同时可以测量送入传感器节点的电流值,通过采用高速、高精度的 ADC 集成电路可以实现 $1\mu\text{s}$ 周期的电流采样,从而准确地获得任意时刻节点的电流消耗,实现对传感器节点功耗的细粒度分析.图 18 是无线传感器网络测试平台电流消耗截图.

图 19 是对一个周期性发送数据分组的 TelosB 节点实测的电流消耗.可以看到,在节点发送分组的瞬间,电流反而有所降低,这与通常我们理解的无线传感器网络发送分组时功率消耗较大的理解相违背.事实上,在 TI 公司的 CC2420 数据手册中已经指出,CC2420 接收状态下消耗的电流大小约 18.8mA,而在最大发送功率下的消耗电流仅为 17.4mA.CC2420 的功率消耗与实验结果非常吻合,从而表明,测试背板的功耗测试是精确而可信的,这些数据为无线传感器网络的生存周期分析提供了良好的数据基础.

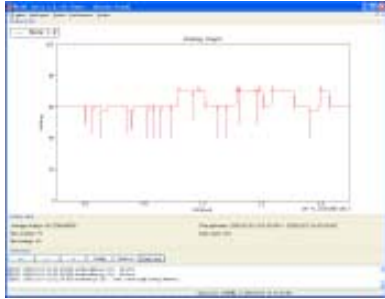


Fig.18 Screenshot of current consumption of tested node in testing platform for WSN

图 18 无线传感器网络测试平台电流消耗截图

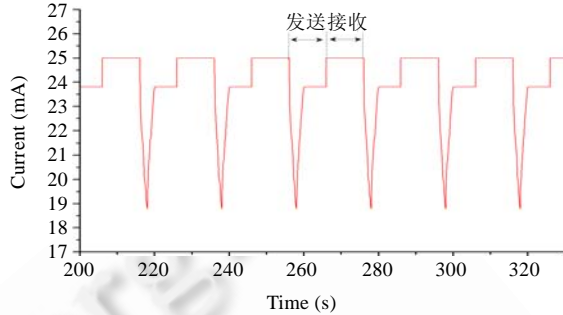


Fig.19 Current consumption curve of TelosB node which periodically sends packets

图 19 周期性发送分组的 TelosB 节点实测电流消耗曲线

如果供电电压是一个已知的常量 V (对 TelosB/ZiNT 节点来说为 3V),通过对电压、时间和采样电流值三者的乘积进行积分,便可以得到能量消耗 E ,具体计算公式如下:

$$E = \int P(t)dt = \int V \times I(t)dt = V \int I(t)dt \approx V \sum I_t \Delta t_i,$$

其中, P 代表节点的功率.

4.3 分组丢失率和链路质量

分组丢失率和链路质量是无线通信的常见性能指标.基于无线传感器网络测试平台,对于每一个测试单元,可以零打乱地获得节点发送的所有分组,也可以获得节点接收的所有分组.通过分组间的比对,就可以获得哪些分组被正确地接收到,哪些分组没有被正确地接收到.

以对汇聚树协议 CTP^[13]产生的路由拓扑研究为例.CTP 是无线传感器网络中一种典型的路由协议,它提供了到无线传感器网络中汇聚节点的尽力的多跳的数据转发.在实验中部署了 8 个待测传感器节点,分别位于实验室中的不同位置,其中 1 号节点为汇聚节点,如图 20(a)所示.

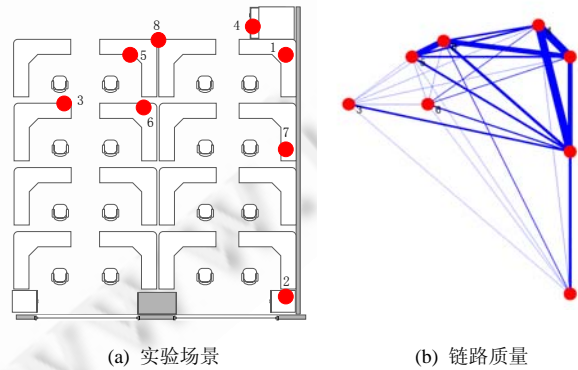


Fig.20 Experimental scenario and link quality represented with packet loss rate

图 20 实验场景和分组丢失率表征的链路质量

由于节点间距离和位置的差异性,使得不同链路的分组丢失率和链路质量存在明显的差异.分组丢失率能够从无线传感器网络测试平台收集的测试数据中经由统计方法获得,这在一定程度上反映了链路质量.图 20(b)所示为不同链路的分组丢失率和链路质量情况,为了更清晰地反映分组丢失率和链路质量,使用线的粗细代表分组丢失率的大小和链路质量的好坏,线越粗代表链路质量越好,分组丢失率越低;相反地,线越细代表链路质量越差,分组丢失率越高.

4.4 传输延时

对于无线传感器网络测试平台,不同的测试背板之间可以通过有线网络连接.测试背板内部的 FPGA 和微处理器能力很强,板上晶振的频率和精度都比较高,因此测试背板之间可以取得良好的时钟同步.对于任意的分组,仅需要接收和发送该分组的两个节点记录分组的收发时刻,就可以进行有效的延时测量.

以单跳的射频收发延时测量为例,定义单跳延时为自发送节点提交数据分组的起始时刻到接收节点完全接收完毕的时间.这段时间包括了发送节点微控制器将数据分组写入射频芯片的时间、射频发送时间和接收节点微控制器自射频芯片读出数据的时间等若干阶段.图 21 为一次实验中产生的节点传输延时测量界面.

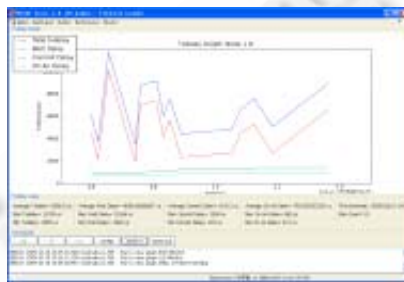


Fig.21 Screenshot of delay measurement of tested nodes in testing platform for WSN

图 21 无线传感器网络测试平台节点延时测量截图

无线传感器网络测试平台拥有高精度时钟,可以达到微秒级的测试能力;并通过记录无线传感器网络的收发信息,精确地获得节点的行为模型,进行精度的分析测量,从而实现帮助网络管理者达到分析优化系统设计的目的.

4.5 时钟同步协议评估

无线传感器网络测试平台的时间精度可以达到微秒级,因此不仅可以对网络延时进行深入的细粒度分析,也可以对无线传感器网络的时钟同步协议进行评估.为了评估无线传感器网络时钟同步协议的性能指标,如同步时间、同步精度等,如图 22 所示,只需要传感器节点送出反映时钟同步的同步信号,由测试背板采集该信号并加上相应的时间戳,这个时间戳在无线传感器网络测试平台服务器这一方进行比较,即可了解全网的时钟同步性能.

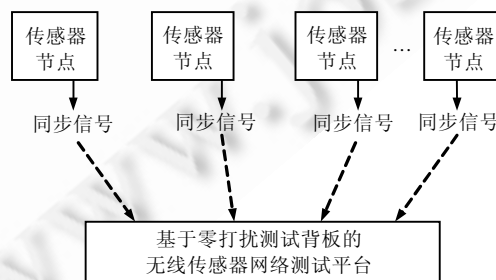


Fig.22 Performance analysis of clock synchronization in WSN

图 22 无线传感器网络时钟同步的性能分析

4.6 数据挖掘和统计分析

无线传感器网络测试平台可以把所有的测试数据(即网络日志)存储在测试服务器的数据库中,供用户进行后期的深入分析.测试平台提供了插件形式的数据挖掘和分析框架,图 23 的左图为框架的导航界面,可以进入不同的数据分析模块.数据分析模块可以由用户自行开发,对于典型的数据挖掘和统计分析应用,无线传感器网络测试平台提供了相应的模块.图 21 的右图为 4 个节点间的数据通信量的可视化分析界面,通过对测试数据的统计和挖掘,可以帮助用户发现或理解无线传感器网络的运行规律,解决网络性能瓶颈或优化网络运行.



Fig.23 Data mining and statistical analysis in testing platform for WSN

图 23 无线传感器网络测试平台的数据挖掘和统计分析

5 总结和未来工作

在避免打扰无线传感器网络正常工作的前提下获得精确的网络运行时刻数据,对于无线传感器网络的研究和应用均具有重要的意义.现有的测试技术和测试平台实现仍然对无线传感器网络存在一定程度的干扰,影响了测试数据的准确性.同时,测试精度受限于硬件精度和运算能力.

本文针对目前典型的无线传感器网络节点硬件架构,提出了内部侦听测试方式,并基于零打扰测试背板进一步研发了无线传感器网络测试平台.通过采用高性能、高精度的定制硬件电路捕获待测节点内部的互连信号,并经过额外的网络,将这些测试数据传输到测试服务器和远程访问客户端,进行同步、解析、处理和数据挖掘,获得节点射频收发数据、感知操作等信息,进而进行日志存储、协议验证和性能评估,达到了零打扰和高精度的无线传感器网络测试目标.

无线传感器网络测试平台对于传感器节点和节点上的应用软件具有透明性.节点本身无法察觉测试平台的存在,节点的软件也无需增加任何用于测试目的的辅助代码,因而极大地降低了测试复杂度.

无线传感器网络测试平台支持多种传感器节点类型,具有较好的扩展性.然而,当前测试平台对主流节点的支持尚需飞线或定制的测试夹具.随着无线传感器网络迈向大规模、实用化和商业化阶段,在传感器网络被应用到诸多领域时,如何对种类繁多、数量巨大的传感器网络进行测试,将成为一个棘手的问题.因此,需要事先规定一个标准的测试接口,这样才能彻底解决该问题.目前,我们正在积极参与传感器网络标准化的制定工作,希望制定并出台一个传感器网络的测试接口标准.同时,我们也已经开始与国内相关研发部门合作,在新型传感器节点中预留相应的测试接口.

无线传感器网络的应用需求广泛,网络类型和测试目标复杂多样.为了更好地对无线传感器网络的科学研究和基于无线传感器网络的科学探索提供支持,在未来的工作中,我们将继续针对无线传感器网络的典型测试需求,扩展现有的无线传感器网络测试平台功能,设计和提供基于 Web 界面的无线传感器网络测试服务,允许用户在线提交测试需求,同时提供典型的无线传感器网络测试数据的下载.这些工作将对无线传感器网络自身的研究和相关学科均具有重要的实施价值.

References:

- [1] Crossbow. MoteWorks wireless sensor network platform. <http://www.xbow.com/>

- [2] Werner-Allen G, Swieskowski P, Welsh M. MoteLab: A wireless sensor network testbed. In: Proc. of the 4th Int'l Symp. on Information Processing in Sensor Networks. Los Angeles: ACM/IEEE, 2005. 483–488. <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/papers/motelab-spots05.pdf> [doi: 10.1109/IPSN.2005.1440979]
- [3] Emre E, Anish A, Rajiv R, Nesterenko M, Naik V, Bapat S, Kulathumani V, Sridharan M, Zhang H, Cao H. Kansei: A testbed for sensing at scale. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks. Nashville: IEEE, 2006. 399–406. <http://ceti.cse.ohio-state.edu/siefast/group-old/publications/ertin2006ispn.pdf> [doi: 10.1109/IPSN.2006.243879]
- [4] Dutta P, Hui J, Jeong J, Kim S, Sharp C, Taneja J, Tolle G, Whitehouse K, Culler D. Trio: Enabling sustainable and scalable outdoor wireless sensor network deployments. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks. Nashville: IEEE, 2006. 407–415. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1662485&tag=1 [doi: 10.1109/IPSN.2006.243880]
- [5] Handziski V, Köpke A, Willig A, Wolisz A. TWIST: A scalable and reconfigurable testbed for wireless indoor experiments with sensor networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Multi-Hop Ad Hoc Networks: From Theory to Reality. Florence: ACM Press, 2006. 63–70. [doi: 10.1145/1132983.1132995]
- [6] Yang Y, Xia P, Huang L. SNAMP: A multi-sniffer and multi-view visualization platform for wireless sensor network. In: Proc. of the 1st IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications. Singapore: IEEE, 2006. 1523–1526. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4026016
- [7] Buschmann C, Pfisterer D, Fischer S, Fekete SP, Krölller A. SpyGlass: A wireless sensor network visualizer. ACM SIGBED Review, 2005,2(1):1–6. [doi: 10.1145/1121782.1121784]
- [8] Wireless sensor network sniffer/analyzer user manual. 2006. http://www.bzworks.com/library/downloads/WiSens_Classic_User_%20Manual.PDF
- [9] Crossbow. MICAz OEM module. 2002. http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAz_OEM_Edition_Datasheet.pdf
- [10] Crossbow. TelosB mote (TPR2400). 2005. http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/TelosB_Datasheet.pdf
- [11] Dunkels A. Design and implementation of the LwIP TCP/IP stack. Technical Report, Swedish Institute of Computer Science, 2001.
- [12] Li TL, Huangfu W, Yang X, Zhang ZQ, Sun LM, Li FM. Design and implementation of non-intrusive wireless sensor network tester. Computer Science, 2010,37(4):45–48 (in Chinese with English abstract).
- [13] Gnawali O, Fonseca R, Jamieson K, Moss R, Levis P. Collection tree protocol. In: Proc. of the 7th ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Berkeley: ACM Press, 2009. 1–14. <http://hinrg.cs.jhu.edu/uploads/CS450/ctp.pdf> [doi: 10.1145/1644038.1644040]

附中文参考文献:

- [12] 李天林,皇甫伟,杨煦,张志强,孙利民,李方敏.非干扰式无线传感器网络测试仪的设计与实现.计算机科学,2010,37(4):45–48.



赵忠华(1983—),男,山东菏泽人,博士生,主要研究领域为无线传感器网络。



皇甫伟(1975—),男,博士,副研究员,CCF高级会员,主要研究领域为无线网络,自组织网络,无线传感器网络。



孙利民(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,多媒体通信技术。



周新运(1979—),男,博士,助理研究员,CCF会员,主要研究领域为无线局域网,无线传感器网络。