

支持性能测量的无线传感器网络实验床技术研究^①

全 杰^② 刘 轶 钱德沛 杜治高

(北京航空航天大学计算机学院中德软件技术联合研究所 北京 100191)

摘 要 针对目前无线传感器网络实验床普遍缺乏性能测量机制的问题,基于 TinyOS 的特点,提出了一种支持对实验对象进行现场测量的实验床体系结构。将轻量级测量实体嵌入到实验床中,对被测系统、测量指标进行约束与定义,设计了高能效的测量方法和测量算法,实现了对实验中节点能耗、链路质量、吞吐量、丢包率、时延、网络拓扑等性能参数的高效可靠获取,解决了传感器网络协议或应用的实时测试问题。该实验床技术支持分布式多点测量和平面、分簇、Multi-Sink 等多种网络结构,提高了实验床设施的利用率和实验效率。实验案例证明了其良好的易用性、普适性和可扩展性。

关键词 无线传感器网络,实验床,性能测量, TinyOS

0 引 言

无线传感器网络是多学科高度交叉的热点研究领域^[1],其广阔的应用前景受到国内外学术界和工业界的广泛关注。与传统网络相比,无线传感器网络包含的节点数量大,资源和能量受限,无线通信具有动态性和不可靠性,应用环境复杂多变,因此,如何测试和评估无线传感器网络研究的成果成为亟待解决的问题之一。

模拟是网络研究的重要手段,但现有的传感器网络模拟工具如 NS-2^[2]、TOSSIM^[3]、SENS^[4]、SENSE^[5]、SensorSimulator^[6]等通常对传感、信道、拓扑、流量等参数或模型做诸多简化和假设,难以真实体现无线特性和网络状况。而由实际部署于物理环境下的硬件节点构建的传感器网络实验床,能够捕获实地参数,避免因模型简化造成的理论误差,方便地为研究人员提供更真实、更全面、更准确的实验数据,因而实验床方法实用、高效。国内外对传感器网络实验床技术的研究已取得一些成果,较为著名的包括 MoteLab^[7]、Kansei^[8]、TWIST^[9]、DSN^[10]、Mirage^[11]等。搭建实验床的直接目标是在实验中准确实时地获取节点及网络的各种状态信息及其变化,以及对网络中运行的协议和算法进行量化评测。上述已有实验床仅为实验者提供了基本的实验环境和

支撑平台,实验运行信息和性能参数的汲取都必须在实验程序中添加额外的紧耦合的自定义调试代码或事件日志来实现^[12,13],这不仅增加了实验者的工作量,还会对被测系统本身带来噪声影响,导致实验数据和测试结果的不准确和不可信。

针对上述问题,本文研究了基于实验床的测量方法,提出了一个支持性能测量的无线传感器网络实验床 ProNet 及其测量实体(testbed-based sensorNet In-situ Measurement, t-NIM),用以监测实验现场,发现网络拓扑,测量节点能耗、信号强度、吞吐量、时延、丢包率等指标,使实验者获得对实验中网络资源、网络行为和网络性能的全面掌握。测量对用户实验依赖性小,占用节点资源少,引入的附加开销小,具有较好的可扩展性和广泛的适用性。

1 实验床基础设施

定义 SUT(System Under Test)是实验者提交到实验床上进行测试评估的实验程序,它可以是传感器网络协议(栈)或应用系统。SUT 及其组建的网络共同构成了 t-NIM 的测量对象。

实验床是 SUT 和 t-NIM 的运行环境和载体。本文提出的实验床——ProNet 是一个基于 TinyOS 和 Mote^[14,15]的无线传感器网络测试平台,它由一系列软硬件组成,其体系结构如图 1 所示。

① 863 计划(2006AA01A118, 2005DKA64004),国家自然科学基金(60673180)和中德国际合作(01BU0680)资助项目。

② 男,1983 年生,博士生;研究方向:无线传感器网络协议,网络编码;联系人, E-mail: Jie.Tycoon@gmail.com
(收稿日期:2008-06-13)

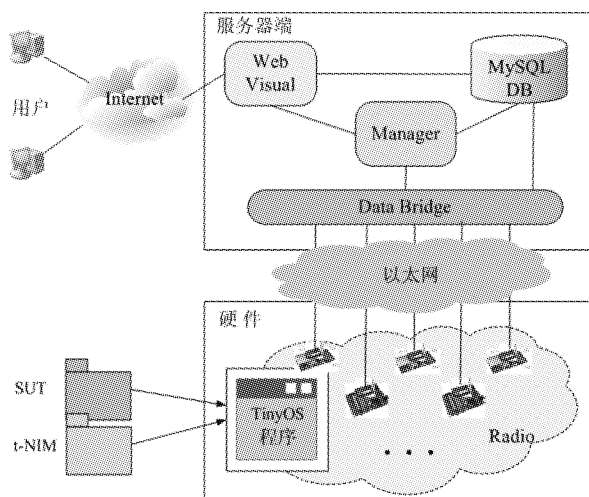


图1 ProNet 系统结构图

1.1 ProNet 硬件

ProNet 目前由固定部署于 10m × 20m 实验室区域内的 51 个 Micaz^[15] Mote 阵列组成。Micaz 节点使用 CC2420 无线收发芯片,支持 2.4GHz IEEE802.15.4/Zigbee 标准和 TinyOS,是广泛使用的传感器网络处理器/射频板。

MIB600^[15]充当以太网网关,桥接无线传感器网络和有线网络。它通过 51 针接口与 Mote 相连,提供两个 TCP 端口分别实现与节点间的通用异步接收/发送(UART)数据通信和在系统编程(ISP)。ProNet 硬件还包括 5 个功能更为强大的 Stargate^[15]单板机,与 Mote 整体构成 Super Node,使实验床支持异构网络实验。

网关及以太网构成了一个后端骨干网络,提供实验床基础服务(如远程重编程)和测量服务(测量命令的注入、测量结果的收集等),而 SUT 本身的通信通过 Radio 完成。分立的控制网络和被测网络增强了实验床的灵活性,减小了对共享资源的争用。同时,因通过 MIB600 或 Stargate 与后端网络相连,每个 Mote 都可充当高能簇头节点、Sink 节点、基站或网关,故 ProNet 支持平面/层次/分簇/分割^[9]/Mesh/Multi-Sink 等多种网络结构的 SUT。

1.2 ProNet 软件

ProNet 软件集中部署于 ProNet 中心服务器,处理实验调度、节点编程、数据解析等工作,包含以下几个软件模块:

(1) Web Visual。实验者通过 Web 访问和使用实验床。实验者可编辑实验持续时间、实验间隔、实验次数等参数,进而选择节点并提交实验程序(提交的实验程序应由实验者通过 TOSSIM 模拟环境或本

地硬件平台调试通过);实验过程中可发起 t-NIM 测量并得到图形化的测量结果;实验结束后可下载实验结果数据。

(2) MySQL DB。数据库存储实验床系统数据、SUT 实验数据和 t-NIM 测量数据。系统数据包括用户信息、节点状态、节点位置、日志信息、实验配置信息、实验者上传的程序镜像和消息解析文件等。实验过程中 SUT 和 t-NIM 产生的数据经 Data Bridge 解析后亦存入数据库。

(3) Manager。控制其他软件模块的运行,设置参与实验的节点,创建并调度实验,对节点进行重编程。同时提供硬件管理、实验状态管理及日志维护等功能。Manager 还充当计算池,从数据库提取原始测量数据,按照测量算法将统计和计算的结果生成 Web 内容呈现给实验者。

(4) Data Bridge。是一个后台程序,是服务器端和传感器网络间的通信桥梁。通过 TCP 端口连接至每个节点,响应 Manager 进行动作:下行——从数据库获取程序镜像下载至节点,按需将主动测量命令、时间同步消息等注入到网络中;上行——根据实验者定制的解析程序解析 SUT 产生的实验数据各字段,收集 t-NIM 测量数据,插入数据库。

2 t-NIM 特点与体系结构

2.1 设计特点

t-NIM 基于 ProNet,对运行其上的各种 SUT 提供系统测量服务。t-NIM 需遵循以下设计原则:

(1) 轻量级。t-NIM 是相对简单的,在节点端占用较少的 RAM 空间和计算资源,如第 3 节表 1 所示。t-NIM 在节点端仅获得最原始的测量数据,对数据的解析、计算、统计及部分测量算法的执行都在服务器端进行,使与 SUT 对节点资源的争用降至最低。

(2) 高效性。t-NIM 通过后端网络收集测量数据,不占用无线通信信道,引入的额外网络流量少,避免影响 SUT 的正常运行。测量行为的发生、测量点和测量周期的选取等均依实验者的需求而定,同时在测量实时性和额外网络负荷间取得折衷。

(3) 普适性。被测试的 SUT 具有不可预知的多样性,可以是多种不同的应用系统或协议,同时, SUT 可能构建各种网络结构(如 1.1 节所述)。t-NIM 支持对各类 SUT 的测量,具有广泛的适用性。

(4) 可扩展性。t-NIM 以组件库的形式存在,与

SUT 的接口少并标准化,二者形成松耦合关系,易于扩展。由于 t-NIM 对 SUT 的依赖性小,实验者可将更多精力关注于 SUT 本身。

2.2 流量发生器

流量发生器是 t-NIM 的重要组成部分,其主要作用是:(1)生成主动测量包。t-NIM 对 RSSI、拓扑、时延、丢包率等指标的测量需要产生专门的参数可控的测量包,流量发生器负责这些测量包的构造、封装和发送。流量发生器产生泊松流,发包时间序列服从 Poisson 负指数分布。泊松到达能够观察任何随机过程的时变特征,且对测量对象无干扰、无共振效应。(2)生成背景流量。SUT 的测试往往需要构建特定的网络场景,流量发生器可根据实验者的需要灵活配置并生成具有特定属性的负载流量。流量发生器支持均匀流和突发流两种流量模型。均匀流很好地表征了传感器网络 Time-driven 应用场景下的周期性连续流量特性,而突发流接近 On/Off 模型,反映了传感器网络 Event-driven 应用场景下的流量特性^[16]。

流量发生器产生的流量包都位于应用层,然后交由 SUT 处理,遵循 SUT 的协议栈操作。

2.3 t-NIM 体系结构

假设 t-NIM 与 SUT 间有且仅有三个开放的参数化 API:Send[AppID]——源节点填充可用负载域,产生本地数据包并发送;Intercept[AppID]——中间节点对收到的数据包进行网内计算、数据融合并路由转发;Receive[AppID]——目的节点接收到数据包,得到有效负载信息做进一步处理。

AppID 类似于 TCP/IP 协议族中的端口号,实现应用程序数据流的多路复用。若一个数据包的传输路径为 A→B→C→D,则 A:Send→B:Intercept→C:Intercept→D:Receive。基于 TinyOS 和传感器网络的特点,上述假设是规范的、合理的,同时满足 t-NIM 的普适性和可扩展性设计要求。

t-NIM 与 SUT 基于统一接口进行连接,构成完整的 TinyOS 程序镜像装载至 Mote 节点上实现测量功能。其体系结构如图 2 所示。

UARTBase 实现节点和网关间的数据通信。当 t-NIM 各测量组件从 SUT 收到测量包,需要报告测量结果时,UARTBase 将服务类型(TinyOS)消息封装成类 PPP-HDLC 帧,通过 UART 串口径网关的 TCP 连接交给服务器端进一步处理;当服务器端向节点触发测量命令、时间同步消息或背景流量时,UARTBase 接收、解析帧格式并将消息分发至相应组件,各组件通过流量发生器将测量包注入 SUT。本地探针

是一组宿主程序,调用 TinyOS 系统接口,收集 SUT 节点当前状态并周期性报告。

每个 Mote 都可嵌入一个或多个测量组件构成探测点,因而 t-NIM 同时支持单点测量和分布式多点测量。

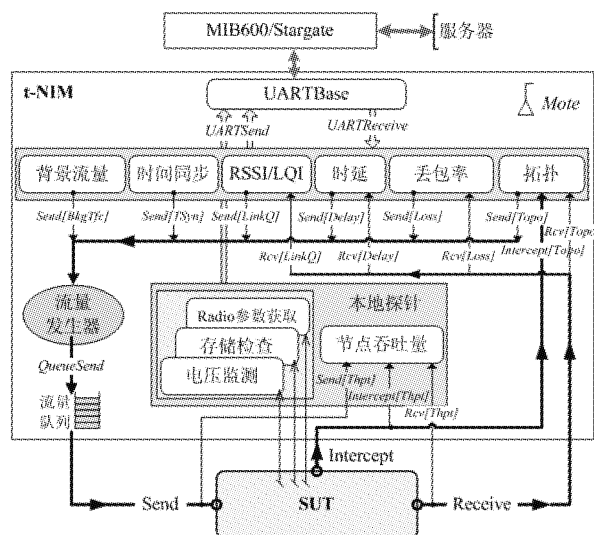


图 2 t-NIM 体系结构图

3 t-NIM 测量指标与测量算法

目前国内外无线传感器网络测量评估技术尚未形成标准化和系统化,本文主要针对传感器网络无线通信不稳定和资源能量有限两大特点,测试其网络路径性能(延迟、丢包率、吞吐量、拓扑等)和节点剩余能量及工作状态等,表 1 归纳了 t-NIM 涵盖的各项测量指标及其相关属性。

表 1 t-NIM 测量指标及测量属性

基本 测量指标	测量 范围	测量方式	统计与计算	RAM 占用 (Byte)
存储使用	节点	被动		33
电压/电流	节点	被动	能耗速率	5
			网络能量分布	
Radio 参数	链路	被动		11
RSSI/LQI	链路	主动	邻居链路质量	8
拓扑	网络	主动	可达/连通性	9
			路由结构	
节点吞吐量	节点	被动	吞吐量	6
			流量分析	
单/双向时延	网络	主动	时延抖动	19
丢包率	网络	被动/主动	网络有效带宽	10
			网络负荷容量	
总计	UARTBase:165 + 流量发生器:54			320

3.1 节点功能部件工作指标

(1) 存储器使用状况。监测当前 Flash、EEPROM 等存储介质及程序存储空间的使用情况,检测 SRAM 中栈的可用、曾用空间并进行讹误(corruption)检查。

(2) 能量消耗。能耗是传感器网络研究中最关注的指标之一。将实验使用的节点设置为电池供电,通过读取 ADC 值计算当前电压值 V_{batt} ($V_{\text{batt}} = V_{\text{ref}} \times \text{ADC_FS} / \text{ADC_Channel30}$, $\text{ADC_FS} = 1024$, $V_{\text{ref}} = \text{Internal voltage reference} = 1.223 \text{ volt}$)。若对每个节点进行周期性的能量状态扫描和收集,即可计算出节点总能耗和能耗速率,绘制能量等高图,为实验者呈现整体网络的能量使用和分布状况。

(3) 负载电流。实验床提供一个 PYI-1503D 数字万用表,可根据实验者的需要将其连接到 Micaz 节点的 Molex 外部电源连接器上,从而实时获取实验过程中节点功能部件负载电流大小。

3.2 节点无线通信工作指标

(1) Radio 参数。访问无线通信协议栈相关接口可测量当前信道 k 、频率 F 和发射功率 P 的值。对于 CC2420 芯片,有 $F = 2405 + 5 \times (k - 11) \text{ MHz}$, $k = 11, 12, \dots, 26$; $P = 10 \lg(P'/P_0)$, 其中 $P_0 = 1 \text{ mW}$, P' 是以 mW 为单位的功率值, P 有 8 个输出功率级, $-25 \text{ dBm} \leq P \leq 0 \text{ dBm}$ 。

(2) 信号强度。接收信号强度指示(received signal strength indicator, RSSI)向网络层或应用层提供接收数据包时无线信号的强度和质量信息。本文以接收节点 RF 管脚功耗代表 RSSI, 计算如下:

$$P_{\text{RF}} = \text{RSSI_VAL} + \text{RSSI_OFFSET} [\text{dBm}] \quad (1)$$

其中, RSSI_VAL 为 CC2420 内置寄存器当前记录值, RSSI_OFFSET 通常取经验值 -45 dBm , P_{RF} 在 $0 \sim -100 \text{ dBm}$ 之间。

链路质量指示(link quality indication, LQI)是另一个表征通信链路质量的无量纲特征值,可视为 CC2420 芯片 DSSS-OQPSK 调制的码片差错率,用 7 位的无符号整形表示,一般在 $50 \sim 110$ 之间。数值越大,表示完成帧交付过程的质量越高。

CC2420 在接收的 MAC 帧的最后两个字节存放 RSSI_VAL 值及 LQI 值,因而从接收到的 TinyOS 消息里即可方便的得到 RSSI 和 LQI 域值。

3.3 网络拓扑

拓扑测量是对 SUT 进行网络性能测量和数据流量测量的前提。这里的拓扑为路由信息而非物理拓扑,反映了 SUT 的数据传输路径,是拓扑在网络

层协议上的逻辑抽象。

t-NIM 采用拓扑跟踪机制。源节点响应测量命令发送拓扑测量包,路径上的中间节点将其节点 ID 添加至测量包负载尾部并转发,目的节点接收到测量包后将完整节点列表交给 UART,从而服务器端得到一条 TraceRoute 记录: ($mID_1, mID_2, \dots, mID_n$)。采用多点主动测量,将多条路径测量结果合并为路径总表,进而可构建全网的拓扑连接关系。显然,测量点和目标集的选取由实验者来确定。t-NIM 结合实验床提供的节点物理位置分布,可构建地理拓扑图呈现给实验者。拓扑测量自然也实现了连通性、可达性测量。

拓扑结构会因路由算法或网络通信状态而时变,同时,为规避无线传感器网络中多路径路由和备份路由的二义性, t-NIM 假设 SUT 中的路由在一个测量周期 T 内保持相对稳定,从而测量一段时期内的活动路由,保证测量的完备性和准确性。拓扑测量包为应用层数据包,因而测量时间及收敛速度与 SUT 的路由协议和下层通信状况有关。

3.4 节点吞吐量

传感器网络中每个节点即是数据源,又充当路由角色,因而其吞吐量是指在一个测量周期内节点产生、转发和接收的数据包总量。

t-NIM 在节点中置入监听探针,利用 TinyOS 的事件触发机制,通过 SUT 的 Send、Intercept、Receive 等标准接口分别统计协议、应用等不同类型数据包数量大小,并将测量结果通过 UARTBase 报告给服务器端,使实验者获得对流量行为和流量分布的实时监测、分析与建模。节点吞吐量的测量结果还可用于某一时间段内吞吐率、网络总吞吐量等性能指标的计算。

3.5 同步、时延与抖动

时延,尤其是单向时延的测量前提是时间同步。实验床通过 *rdtsc* 汇编指令读取服务器 CPU 的 64 位 TSC 寄存器值作为计时器使用,其分辨率可达到 μm 级^[17]。通过可靠的 TCP 连接,服务器端周期性地对实验中每个节点同时发送同步消息,节点调整本地时钟,达到以计时器为时钟源的全网同步。这种基于实验床的时间同步机制有效同步范围大,同步时间短,同时不占用无线信道带宽,不引入额外网络流量。同步误差主要由以太网信道争用的不确定性引起,同步精度在 ms 和百 μm 之间,这对无线传感器网络的时延测量是足够的。

时延的测量包括单向时延、回路时延(round trip

time, RTT)和时延抖动。发送端发送时延测量请求包并标记发送时刻,接收端生成包含收发时间戳的测量结果包上报服务器端。由于时间戳的标记只能在 SUT 之上完成,包含了排队时延、信道访问时延、传输时延、中断时延等 SUT 协议栈及操作系统的处理时间,因而测量结果为路径端到端时延。RTT 多用于传感器网络中“查询-报告”响应时延的测量,其测量方法类似,但无须节点同步。

抖动反映了时延变化的规律,一定程度上表征了链路状态稳定性和网络负载特性。为实时获取测量结果,t-NIM 采用“前后参考”计算时延变化,即对于测量包序列 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 设第 i 包端到端时延为 $D_{e2e}(i)$, 则前后参考时延抖动为

$$J_r(i) = D_{e2e}(i) - D_{e2e}(i-1), (i > 1) \quad (2)$$

3.6 网络丢包率

丢包率(packet loss rate)用于衡量 SUT 所构建的网络的数据传输可靠性,与节点状态(如节点失效)、信道质量、系统负载、SUT 协议栈的队列调度算法等因素有关。t-NIM 采用被动估计和主动测量两种方法获得网络丢包率。

被动估计中,在发送节点和接收节点置入探针,分别监听 Send 和 Receive 接口,统计发送、接收总包数。由于节点在短时间内收到的包数量随时间不同抖动较大,故采用指数加权位移平均法(exponential weighted moving average, EWMA)将历史信息引入最终的测量结果中,得到时变的统计意义上的结论:假设测量周期为 T , 有 N 个发送端和 M 个接收端,在时刻 $t_n = t + nT$ 得到的丢包率为

$$P_n = \alpha \times \hat{P}_n + (1 - \alpha) \times P_{n-1}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3)$$

其中 $\hat{P}_n = (\sum_{i=1}^N S_i^{(t_{n-1}, t_n)} - \sum_{j=1}^M R_j^{(t_{n-1}, t_n)}) / \sum_{i=1}^N S_i^{(t_{n-1}, t_n)} \times 100$, $P_0 = 0$, $S_i^{(t_{n-1}, t_n)}$ 为节点 i 在 $(t_{n-1}, t_n]$ 时间段内发送的总包数, $R_j^{(t_{n-1}, t_n)}$ 为节点 j 接收的总包数, 加权因子 $\alpha \in (0, 1]$ 。 T 和 α 可由实验者根据实验需要确定。若实验持续 K 个周期,则网络平均丢包率为

$$\bar{P} = \sum_{n=1}^K P_n / (KT) \quad (4)$$

当 SUT 产生足够的通信量时,被动估计是高效的,但当被测的 SUT 本身并不产生或产生很少的应用层数据量时,则被动估计是不充分的,需要利用流量发生器产生专门的可控的测量包来进行丢包率的主动测量。同时,实验者可在不同测量周期逐步增

大发包速率,从而测得丢包率不超过阈值 γ 的网络有效带宽,即

$$B_e = \text{MAX}_{P_n \leq \gamma} \{ [\sum_{i=1}^N (S_i^{(t_{n-1}, t_n)} \times L_i)] / T \} \quad (5)$$

其中 L_i 为节点 i 发送的包长度, γ 由实验者指定,如可取 $\gamma = 1.5\%$ 。 B_e 近似表征了一定条件下网络的饱和吞吐率和网络负载容量,是 SUT 测试的重要性能参考。

4 实验与评估

4.1 路由协议实验

ReliableRoute 是 Crossbow 与 Intel 伯克利实验室实现的 Many-to-One 路由协议,适用于数据收集型传感器网络。它建立一个以 Sink 为根节点的 Spanning 树型拓扑,每个节点向自己的父节点发送数据并最终多跳传送至 Sink。

选取 51 个节点中的 26 个进行实验。ReliableRoute 基于 CC2420RadioAck 无线通信协议栈,t-NIM 测得其信道 $k = 15$, 频率 $F = 2425\text{MHz}$, 发射功率 $P = -15\text{dBm}$ 。每个节点的 t-NIM 流量发生器依次产生 5 个拓扑测量包,发包间隔服从 $1/\lambda = 5\text{s}$ 的泊松过程,得到的拓扑连接如图 3 所示。发现的拓扑是以节点 18 为根节点的严格的树型结构,网络中节点和 Sink 保持 100% 的路径连通率,故拓扑测量是完整准确的。

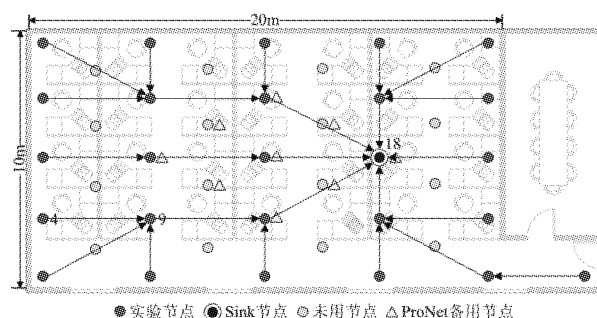


图 3 ProNet 节点部署与 ReliableRoute 拓扑图

测量节点吞吐量时分别进行均匀和突发流量两次实验,每次实验持续 120min,同时测量网络丢包率。均匀流量模型下,每个节点以 1packet/8s 的恒定速率发送背景流量,突发流量模式下,在 40 ~ 80min 内以 10 倍于均匀流量速率即 1packet/800ms 发送突发流量,包大小均为 41 字节。节点 4 和节点 9 的测量结果如图 4 所示。

测量周期 $T = 240\text{s}$,即图中每个点代表之前

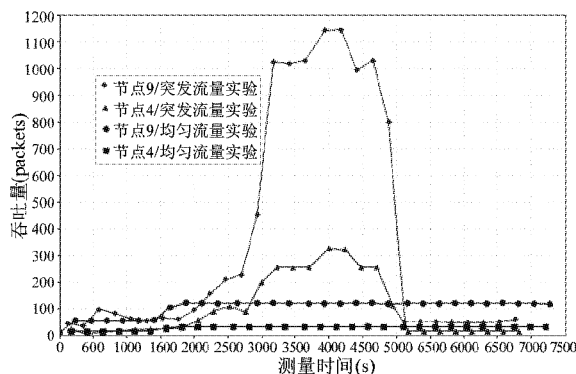


图4 节点吞吐量测量结果

240s 内的包吞吐量。两次实验中,节点 9 的值基本为节点 4 的 4 倍,而节点 9 的吞吐量为其本身及 3 个子节点的吞吐量之和,因而测量结果与实际一致。突发流量时段的测量值比理论值小,这是高吞吐率下丢包率增大所致。根据式(3)和式(4),t-NIM 测得突发流量实验的网络平均丢包率 $\bar{P} = 3.6\%$ 。

4.2 链路质量测量实验

邻节点链路质量通常是路由算法选择下一跳的依据指标之一,因而链路质量测量对于网络层协议的分析与设计至关重要。RSSI/LQI 能够迅速反应链路质量的变化,实验通过获取 Micaz 节点 CC2420 收发芯片的 RSSI、LQI 值表征链路质量。

选取距离不同的 3 组节点,每组包含发送节点和接收节点。节点响应服务器端的测量命令,以 1packet/2s 的速率发送 200 个测量包到接收节点。为避免冲突,任何时刻都只有一个 Mote 进行发送。接收节点将收到的包数及包到达时的 RSSI、LQI 值记录于 Log 中,一轮实验完成后通过 UART 报告给服务器,服务器端计算 RSSI 和 LQI 均值。改变发送节点的功率级别(-25, -15, -10, -7, -5, -3, -1, 0dbm)重复进行实验,测量结果如图 5 所示。

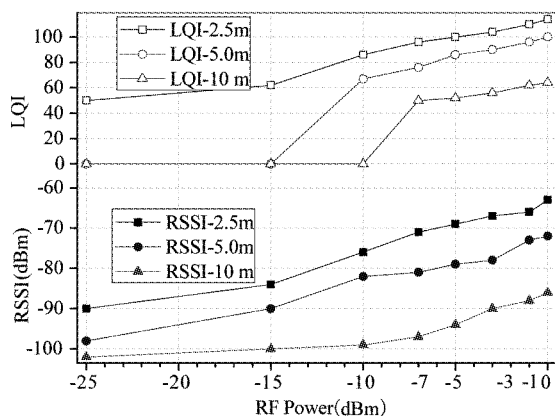


图5 RSSI/LQI 测量结果

实验结果呈现出 RSSI/LQI 与发射功率和距离的高度相关性。对应的 RSSI 和 LQI 曲线具有相似的变化和趋势,这是因为它们都代表了接收信号功率与背景噪声的比率(SNR)。RSSI 和发送功率之间存在更好的近似线性关系,相同功率级别下, RSSI 值与距离平方成反比。

根据信号衰减与传播距离之关系的理论模型 $RSSI_{rx}(d) = RSSI_{rx}(d_0) - \eta 10 \log(d/d_0) + X_{\sigma, dBm}$ [18], 现场数据能够为测距定位提供实际测试样本,同时也是研究无线通信时空特性、拓扑/功率控制的有效参考。因而,基于 ProNet 的 RSSI/LQI 测量可进行多种扩展实验。

5 结 论

本文基于 TinyOS,将性能测量引入到实验床技术中,实现了对实验对象的现场测量和节点-链路-网络三级性能评估。实际部署中,ProNet 支持异构、分簇、多网关等多种网络结构,支持 Web 远程访问,灵活易用;t-NIM 高度组件化,支持分布式多点测量,可扩展性好,实验证明其运行时占用节点内存资源少,引入的额外网络流量少,可信有效。ProNet 结合 t-NIM,采用先进的硬件设备和开放的软件架构,为无线传感器网络实验床技术提供了一种新颖高效的解决方案。

将系统迁移至具有更完整体系结构的 TinyOS-2.x 平台是下一步的必要工作,同时研究针对性的流量生成模型和测量算法,以支持可用带宽等更多性能参数的测量。对于传感器网络大规模应用场景,结合实验床的真实度和模拟工具的虚拟能力,探究大规模混合协作仿真技术将是未来工作的重点。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 2002, 38 (4): 393-422
- [2] Downard I. Simulating sensor networks in ns-2: [NRL formal report]. Washington D C: Naval Research Laboratory (NRL), 2004
- [3] Levis P, Lee N, Welsh M, et al. TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*. New York: ACM Press, 2003. 126-137
- [4] Sundresh S, Kim W, Agha G. SENS: a sensor, environment

- and network simulator. In: Proceedings of the 37th Annual Simulation Symposium (ANSS-37). Arlington, VA: IEEE CS Press, 2004. 221-228
- [5] Chen G, Branch J, Pflug M J, et al. SENSE: a wireless sensor network simulator. In: Advances in Pervasive Computing and Networking. New York: Springer, 2004. 249-267
- [6] Mallanda C, Suri A, Kunchakarra V, et al. Simulating wireless sensor networks with OMNet ++ . http://csc.lsu.edu/sensor_web/simulator.html: Louisiana State University, Baton Rouge, LA, 2005
- [7] Werner-Allen G, Swieskowski P, Welsh M. Motelab: a wireless sensor network testbed. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05). Los Angeles: IEEE Press, 2005. 483-488
- [8] Ertin E, Arora A, Ramnath R, et al. Kansei: a testbed for sensing at scale. In: Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'06). Nashville: ACM Press, 2006. 399-406
- [9] Handziski V, Köpke A, Willig A, et al. TWIST: a scalable and reconfigurable wireless sensor network testbed for indoor deployments: [technical report]. Berlin: Telecommunication Networks Group, Technical University Berlin, 2005
- [10] Dyer M, Beutel J, Kalt T, et al. Deployment support network-a toolkit for the development of WSNs. In: Proceedings of the 4th European Workshop on Sensor Networks (EWSN2007). Berlin: Springer, 2007. 195-211
- [11] Chun B N, Buonadonna P, AuYoung A, et al. Mirage: a microeconomic resource allocation system for sensonet testbeds. In: Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors(EmNetS-II). Sydney: IEEE Press, 2005. 19-28
- [12] Tolle G, Culler D. Design of an application-cooperative management system for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN2005). Istanbul: IEEE Press, 2005. 121-132
- [13] Whitehouse K, Tolle G, Taneja J, et al. Marionette: using RPC for interactive development and debugging of wireless embedded networks. In: Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'06). Nashville: ACM Press. 416-423
- [14] TinyOS Official Website. <http://www.tinyos.net/>: UC Berkeley, 2008
- [15] Crossbow's Products. <http://www.xbow.com>: Crossbow Technology Inc, 2008
- [16] Tilak S, Abu-Ghazaleh N B, Heinzelman W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2002, 6 (2): 28-36
- [17] 黎文伟,张大方,谢高岗等.基于通用 PC 架构的高精度网络时延测量方法.软件学报,2006,17(2):275-284
- [18] Shen X F, Wang Z, Jiang P, et al. Connectivity and RSSI based localization scheme for wireless sensor networks. In: Lecture Notes on Computer Science. Berlin: Springer, 2005. 3645. 578-587

A testbed technique supporting performance measurement for wireless sensor networks

Tong Jie, Liu Yi, Qian Depei, Du Zhigao

(Sino-German Joint Software Institute, School of Computer Science and Engineering,
Beihang University, Beijing 100191)

Abstract

To solve the problems in real-time evaluation and deep analysis of wireless sensor network (WSN) applications, a novel Mote and TinyOS based WSN testbed architecture characterized by supporting distributed *in-situ* performance measurement of experimental objects was proposed. The system under test and the measurement metrics were defined and a set of high energy-efficient measurement algorithms were implemented. The lightweight measurement entity built in the testbed during experiments enables the reliably acquirement of node energy consumption, link quality, throughput, packet loss rate, delay and network topology without bringing extra load traffic upon radio. The testbed technology provides flat, cluster, segmented, mesh, multi-sink network structure adaption, so enhances the testbed infrastructure utilization and improves the experiments deployment efficiency. The research cases proved its significant features of convenience, fidelity, universality and scalability.

Key words: wireless sensor networks, testbed, performance measurement, TinyOS