

无线传感器网络节点能耗测量及分析

牛 星¹ 李 捷¹ 周新运² 赵忠华²

(河南大学计算机与信息工程学院 开封 475000)¹ (中国科学院软件研究所 北京 100190)²

摘 要 传感网能量高效是无线传感器网络研究中的关键性问题,而对节点能耗的准确测量评估是基础。现有的传感器网络节点能量测试方法,难以满足长时间、细粒度和高精度的测量需求。设计了一款传感器网络节点能耗测量设备,它利用电流采样、高速模拟数字转换芯片和可编程逻辑阵列构成的功耗测量电路实现对节点功能的准确和连续的测量,并对测量结果进行进一步分析。结果表明,该功耗测量设备符合传感网节点的实际运行情况,测量结果为传感器网络节点在线的能耗评估提供了数据依据。

关键词 传感器网络,节点能耗,测量

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Measurement and Analysis to Wireless Sensor Network Node Energy Consumption

NIU Xing¹ LI Jie¹ ZHOU Xin-yun² ZHAO Zhong-hua²

(School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475000, China)¹

(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)²

Abstract Energy efficiency of sensor network is the key problem in the wireless sensor network research and accurate measurement of node energy consumption is the basis for assessment. Existing methods for testing sensor network node energy are difficult to meet a long time, fine-grained and high-precision measurement needs. Therefore this paper designed a sensor network node energy measurement equipment which uses the energy measurement circuit composed by current sampling, high-speed AD conversion chip and programmable logic array to fulfill the accurate and continuous measurement of node function and do the next analysis for the measured results. Measured results show that the power measurement device complies with the actual sensor network node operation and the measured results provide the data basis for the energy consumption online assessment of sensor network node.

Keywords Sensor networks, Node consumption, Measurement

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN, 传感网)由大量低成本的微型传感器节点组成,实现所部署区域的感知信息收集、处理和传输任务。传感网广泛应用于安全反恐、智能交通、医疗救护、环境监测、精准农业和工业自动化等诸多领域,并受到了学术界和工业界的普遍重视。近年来,传感网领域不仅取得了大量的科研成果,也得到了了一定的实际应用^[1-3]。

传感网通常随机部署在没有基础网络设施的场所,节点由电池供电,在使用过程中难以为电池充电或更换电池。一旦电池能量用完,节点将无法工作。因此,能耗高效使用是传感网设计和运维的重要目标之一,而网络和节点能耗的监视测量则是能耗相关研究的基础问题。

在网络的能耗监视研究方面,美国南加州大学的 Yong-gang Jerry Zhao 和加利福尼亚大学的 Deborah Estrin 等人设计了一种 eScan 方法^[4]来监视传感网的能量剩余情况。该方法把剩余能量和消耗速度大致相同的节点分为一类,把这些

分类用不同的深度表示,从而能够观察出网络能量的整体消耗程度和分布。显然,网络的能耗监视依赖于节点的能耗的估计或测量。

在节点的能耗测量研究方面,主要的方法有两类,即仿真方法和实验方法。仿真方法采用模拟工具对节点运行时刻的能量消耗进行分析估计,如 PowerTOSSIM^[5] 和 SWANS^[6]。但是采用模拟工具进行仿真都是在给定参数下进行的,与实际的情况存在一定的差距,同时仿真方法的具体参数也来自实验分析。实验方法则通常需要采用额外的硬件电路对节点的功率消耗进行测量分析。一些学者提出了基于软件探针进行实时监测的方法,如 SPOT^[7] 和 Dutta^[8],即通过插入能耗测量代码,再配合外部硬件电路来计算节点能耗,但此种方法对硬件要求较高,并且受到软件平台的限制^[9]。文献[10]提出了一种基于外部电流测量的实测能耗方法,它在电源与节点之间串联了一只 10 欧姆的电流取样电阻,在电阻两侧接数字示波器对其电压进行测量,最后通过如下公式

到稿日期:2011-05-20 返修日期:2011-05-17 本文受国家科技重大专项(009ZX03006-004),中国科学院软件研究所青年博士创新基金(ISCAS2009-DR15),河南省科技创新人才项目(114100510001)资助。

牛 星(1986—),男,硕士生,主要研究方向为计算机网络等,E-mail:76561023@qq.com;李 捷(1975—),博士,教授,主要研究方向为网络管理等;周新运(1979—),男,博士,主要研究方向为无线局域网、无线传感器网络;赵中华(1983—),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络。

$$P=V \times I=(V_{\text{电源}}-V_{\text{电阻}}) \times V_{\text{电阻}} / R_{\text{电阻}}$$

得出节点的能耗。该方法可以方便地获得节点能耗,但也存在一些不足:一是使用的电流取样电阻较大,电流流过电阻时会产生较大的压降,有可能影响到节点的运行,并影响测试结果的准确度;二是需要使用人工观察的方法经由示波器来测量加在电阻上的电压,无法实现连续的数据分析和存储,难以对传感网节点进行长期细粒度的连续测量。

针对上述方法的不足,提出一种长时间、细粒度和高精度的传感网节点能耗测量方法,即通过定制的传感网节点能耗测量设备对节点长期工作过程中任意时刻的功耗进行准确分析,从而有助于分析传感器节点不同模块的耗电和功耗的相关性,设计和实现能耗高效的传感网协议和应用。根据本文节点能耗测量设备的实测结果对典型传感器网络节点的能耗进行了分析。

本文第1节介绍节点能耗测量的方法和设备实现;第2节对实测结果进行分析并建立能耗模型;最后对全文进行总结。

1 传感网节点能耗的测量方法和设备实现

传感网节点的能耗测量机制与用户需求、测量环境和待测节点均有密切的关系。针对现有方法的不足,为了建立细粒度的传感网节点能耗模型,需要长时间、高采样率对节点的功耗进行监视测量。在本测试场景中,可以采用一定的辅助性测试设备,在实验室环境对节点功耗进行研究分析。待测节点通常由电池供电,典型的供电为相对恒定的3V电压。因此如果可以测量出供电电流,则可以获得节点的功耗,但此处应避免文献[10]对节点自身工作影响较大的缺陷。

基于上述考虑,本文对传感网节点采用如图1所示的功耗测量方法。由一路供电电源(供电电压为 V)对传感网节点供电,供电线路中串联一个小阻值电流采样电阻 R 。电流采样电阻 R 两端的电压 V_1 送入差分放大器进行放大,放大倍数固定为 K 。放大后的电压信号 V_2 经过A/D转换器转换为数字信号,并进行后端的数据处理、存储和显示。采样的速率由后端根据用户需求确定。

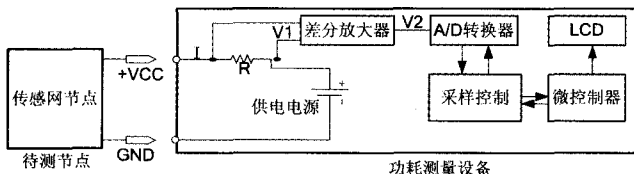


图1 节点功耗测量方法

根据上述功耗测量电路的设计,可以得到下述等式:

$$V_2=K \cdot V_1=K \cdot R \cdot I \quad (1)$$

因此,通过节点的电流约为:

$$I=V_2/(K \cdot R) \quad (2)$$

节点的瞬时功耗为:

$$P=V \cdot I=V_2 \cdot V/(K \cdot R) \quad (3)$$

节点的累计能量消耗为:

$$E=\int_t P(t)dt=\frac{V}{K \cdot R} \int_t V_2(t)dt \quad (4)$$

与现有的测量方法不同,本方法有两个改进。一方面,由

于引入了差分放大器,可以测量到电流采样电阻微弱的两端压差,因此电流采样电阻可以很小。典型的传感网节点最大供电电压为3V,最大电流为40mA,电流采样电阻为0.5Ω,若放大倍数 K 为100,则满量程输出为2V,足以满足需求。即使对于最大工作电流,电流采样电阻上带来的压降也仅为20mV,对传感网节点的工作几乎没有影响。相比而言,文献[10]中采用10Ω的采样电阻,此时的压降约为0.4V,传感网节点实际的工作电压降低到2.6V,已经影响到了传感网节点的正常工作。另一方面,本方法将电流信号采样转换后进行数字化处理,从而可以方便地进行数据显示、存储、分析、绘图等操作,更有利于从数据中发掘传感网节点的功耗特性,并通过累积计算节点的总能耗。

基于上述设计,完成了相应的硬件设计方案,实现了一套传感网功耗测量设备。在具体的硬件设计和实现中,电流采样电阻两端差分信号转换为放大的电压信号的差分放大器采用MAXIM公司的MAX4173,它具有20、50和100倍的固定放大增益。A/D转换器选择TI公司的TLC5540,具有8bit分辨率、最高40M Sps(Sample per second,采样次数每秒)的高速采样,可以满足传感网节点的高时间分辨率功耗测量需求。采样控制部分的电路采用FPGA(Field-Programmable Gate Array,现场可编程逻辑阵列)实现,具体型号为Altera公司的EP2C8,完全可以支持40M/s的高速采样和预处理工作,具体的硬件电路设计采用Verilog HDL语言完成。微处理器选用三星公司的S3C2440,可以运行于400MHz主频,支持Linux操作系统。LCD选用3.5英寸液晶触摸屏,提供应用程序界面和数据显示输出能力。除了支持功耗测量数据的直接图形输出外,本实现也可以选择用SD卡(Secure Digital Memory Card)或U盘作为数据存储空间,方便用户导出数据。

在具体结构实现上,本设计分为功耗测量板、微控制器板和液晶屏3个部分。功耗测量板包括电流采样、差分放大、A/D转换和采样控制部分;微控制器板即是主处理器和存储器及外围电路;液晶屏即为上述具有触摸输入能力的3.5英寸屏幕。3个部分的具体实物如图2所示,组装完成的最终设备形式如图3所示。

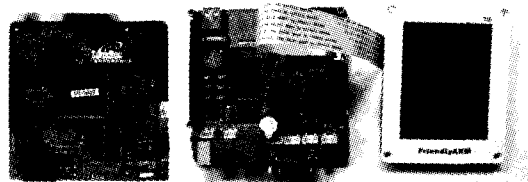


图2 功耗测量板、微控制器板和液晶屏



图3 传感网节点功耗测量设备

2 传感网节点能耗实测及能耗模型分析

待测节点采用中国科学院软件研究所研制的ZN-05系

列传感器节点,该节点目前在国内多个高校和科研机构得到使用,它主要包括处理器模块、无线通信模块、光敏/温度传感器模块、电源模块等4部分。ZN-05节点使用的微处理器是德州仪器(TI)公司生产的超低功耗单片机MSP430F1611,它采用16位RISC架构,最高运算速度可以达到8MHz,还具有丰富的内部资源和外部接口。芯片内部有10k Byte RAM,48k Byte Flash,以及模数/数模转换器,并提供I2C, SPI, UART多种外设接口。同时采用64Pin QFP封装减小芯片体积,具有高集成度和超低功耗的突出特点。ZN-05节点的通信模块使用Chipcon公司的无线收发芯片CC2420。CC2420提供2.4GHz频段上的基于IEEE802.15.4标准的无线通信单芯片解决方案,实现了IEEE802.15.4标准的物理层规范。CC2420最高通信速率为250kbps,最大发射功率0dbm,最大通信距离可以达到100m,并可以同时发送和接收128字节的数据。工作在最大发射功率0dbm和工作电压3.0V时,电流消耗只有17mA。CC2420的外围电路非常简单,基本只需要LC输入/输出匹配电路。节点处理器可以使用AA电池供电,工作于3V直流电压下。

ZN-05节点操作系统采用的是应用非常广泛的TinyOS,它是UC Berkeley(加州大学伯克利分校)开发的开放源代码操作系统,专为嵌入式无线传感网络设计。TinyOS基于构件(component-based)的架构,使得快速的更新成为可能,而这又减小了受传感网络存储器限制的代码长度。图4为无线传感网络节点和节点转接板实物图。

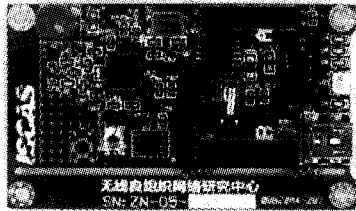


图4 ZN-05系列传感网节点

为了通过对节点的功耗实测,分析和建立节点能耗模型,对节点在休眠、接收和发送等不同状态下的功耗进行了实际测量。

(a)休眠状态

在休眠状态下,节点仅消耗很小的能量,实测节点电流为0.6mA,因此休眠状态下的节点功耗为:

$$P=V \times I=3V \times 0.6mA=1.8mW$$

(b)接收状态

在接收状态下,节点需要侦听空中的射频分组,因此节点能耗有明显的增加。实测表明,节点的工作电流基本稳定于19.2mA左右,因此在接收状态下节点的功耗为:

$$P=V \times I=3V \times 19.2mA=57.6mW$$

(c)发送状态

在发送状态下,由于发送瞬间的射频模块的工作电流突变,以及节点电路受电容、电感等储能器件的共同影响,实测的节点工作电流具有明显的波动性。为了评估发送一个分组的耗电情况,需要进行多次对比实验。首先,设置传感网节点发送数据分组的时间间隔为20ms,其次分别测量传感网节点在发送不同长度数据时和在不同的发送功率条件下的电流消

耗值,随后利用高速采样实测的电流值通过式(4)得到节点的平均功耗。

在具体的测量中,将CC2420射频发送功率分别设置为0dBm,-5dBm,-10dBm,-15dBm和-25dBm 5个等级,分组净荷程度设为1、4、8、16和28个字节,通过多次观测取平均值,得到表1所列结果。

表1 传感网节点实测平均发送功耗

射频功率/dBm	分组长度				
	1字节	4字节	8字节	16字节	28字节
0	40.58	45.56	54.23	68.65	90.94
-5	34.01	38.72	43.46	56.52	73.73
-10	29.11	33.49	37.87	47.71	60.58
-15	26.25	29.37	33.58	42.68	54.54
-25	24.12	26.15	28.24	38.67	49.38

对表1中的数据,使用数学分析软件Origin进行可视化绘图,如图5所示。

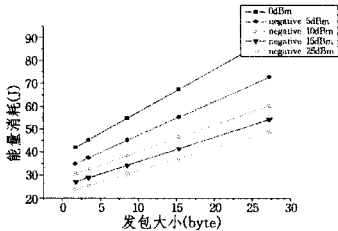


图5 节点发送状态能耗曲线

如图5所示,节点的发送功耗与发送分组的长度和射频发送功率均有密切的关系。对于相同长度的数据分组,射频功率越大,所需要消耗的能量就越高。对于相同的射频发送功率,能量消耗与发送分组的净荷长度具有明显的线性关系。上述观测与现有传感网的能耗分析的结论是吻合的,表明了本文功耗测量设备实验结果的有效性。

对图5的数据进行线性拟合,可以得到发送状态下发送能耗与分组长度和射频发送功率的表达式。设L为净荷长度(以字节为单位),则不同发送功率下的功耗见表2所列线性模型。

表2 节点传输能耗模型方程

发送功率/dBm	发送功耗/mW
0	1.87L+38.66
-5	1.38L+32.45
-10	1.16L+28.55
-15	1.06L+25.26
-25	0.97L+22.25

上述分析仅为每秒按照20ms固定周期发送分组条件下的平均功耗。对于更为复杂的情况,可以进行类似的分析,建立发送能耗和分组数量、分组长度以及射频发送功率间的更为复杂、准确的模型,本文不再赘述。

在传感网节点的工作过程中,节点通过节点内部的定时器估计出自身位于不同状态(休眠、接收、发送)的时间长度,通过上述预设定的功耗模型求得累计的能量消耗,并进一步估算自身的剩余能量。

结束语 无线传感器网络近年正逐步向实用化推进。通常情况下,无线传感器网络被随机部署在没有基础网络设施的场所,节点由电池供电。在使用过程中难以为电池充电或

更换电池。一旦电池能量用完,节点将无法工作。低功耗节点的研制一直是研究者们普遍关注的焦点,而对节点能耗的准确测量是低功耗节点研究的基础。目前对于无线传感器网络能量消耗实际测量方面的研究还不是很多,其中大部分采用模拟器进行仿真的方法。但模拟器的准确度非常有限,与实际应用中的情况差距很大。已有一些基于实测的能耗测量设备,但都存在着很多不足。

面向节点能耗的长时间、细粒度和实际的测量,采用电流采样和高速 A/D 转换器等技术手段,设计和实现了一类传感网节点的功耗测量设备,它能够准确实时地测量传感器节点的能量消耗,并可以对节点任意瞬间的能耗进行细粒度分析,从而有助于分析传感器节点不同模块之间的能耗相关性。

基于上述功耗测量设备,对已有的传感网节点的能耗进行了分析,对休眠、接收和发送等不同状态下的节点功耗,尤其是节点发送状态下的功耗模型进行了细致的研究。测量和分析结果表明,本文的功耗测试设备和分析方法符合实际情况,对传感网节点的功耗测量给出了准确的数据,为进一步构建能耗模型奠定了数据基础。

在未来工作中,将进一步分析节点中发送状态下的功耗变化情况,同时分析节点访问传感器等外围设备造成的能量消耗。此外对不同硬件平台的节点类型进行更为广泛的测量分析,为传感器网络的实用化推进提供更为翔实的数据支持。

参 考 文 献

[1] 孙利民,李建中,朱红松. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005

(上接第 83 页)

改进算法就利用分簇算法将大规模网络进行分簇,先进行簇内节点的局部定位,然后利用融合算法将其局部坐标转化为全局坐标。但改进算法也有一定的局限性。由于 Hop-Euclidean 算法有一定的假设条件,因此该算法只有在相应的假设条件下,其定位精度才会有明显的提高。仿真结果表明,和经典 MDS-MAP 算法相比,改进算法在定位精度提高的情况下,对不规则网络和大规模网络有更好的适应性。

参 考 文 献

[1] Nicolescu D, Nath B. Ad-Hoc positioning systems(APS)[C]// Proceedings of 2001 IEEE Global Telecommunications Conference. IEEE Society, 2001: 2926-2931

[2] 王福豹,史龙,任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J]. 软件学报,2005,16(5): 857-868

[3] Capkun S, Hamdi M, Hubaux J P. GPS-Free Positioning in Mobile Ad-hoc Networks[J]. Cluster Computing, 2003, 5(2): 157-167

[4] Niculescu D, Nath B. Localized Positioning in Ad Hoc Networks[C]// Cayirci E, Znati T, Ekici E, eds. Proc. of the 1st IEEE Int'l Workshop on Sensor Network Protocols and Applications. Anchorage: IEEE Communications Societies, 2005: 42-50

[2] 杜小明,陈岩. 无线传感器网络研究现状与应用[J]. 北京工商大学学报:自然科学版,2006,26(1): 41

[3] 李晓维,徐勇军. 无线传感器网络技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007

[4] Zhao Yong-gang, Gobindan R, Estrin Z D. Residual Energy Scan for Monitoring Sensor Networks[C]// WCNC. 2002

[5] Shnayder V, Hempstead M, Chen B, et al. Simulating the Power Consumption of Large Scale Sensor-Network Application[C]// SenSys'04. Baltimore, Maryland, USA, November 2004: 3-5

[6] Barr B, Hass Z J, Renesse R V. Scalable Wireless Ad hoc Network Simulation[M]. Handbook on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad hoc Wireless, and Peer-Peer Networks. CRC Press, 2005: 297-311

[7] Milenkovic A, Milenkovic M, Jovanov E, et al. An Environment for Runtime Power Monitoring of Wireless Sensor Network Platforms[C]// Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium. 2005: 406-410

[8] Hoht B, Doherty L, Brewer E. Flexible Power Scheduling for Sensor Networks[C]// Proceedings of the Third International Symposium on Information Processing. 2004: 205-2144

[9] Zhang Fan, Li Wen-feng, Song Wei. Real-time Energy Consumption Monitoring for Wireless Sensor Nodes [J]. Computer Engineering & Science, 2010, 32(11): 47-51

[10] Panthachai Y, Keeratiwintakorn P. An Energy Model for Transmission in Telos-based Wireless Sensor Networks[C]// International Joint Conference on Computer Science & Software Engineering (JCSSE2007). May 2007: 2-4

[5] Hightower J, Boriello G, Want R. SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength[R]. UW CSE 2005-02-02. Seattle: Department of Computer Science Engineering, University of Washington, 2005

[6] Simon Wong K-F, Tsang I W, Cheung V, et al. Position Estimation for Wireless Sensor Networks[C]// IEEE Globecom. 2005: 2772-2776

[7] Shang Yi, Wheeler R, Zhang Ying, et al. Localization from mere connectivity[C]// Proceedings of the Fourth ACM Symposium on mobile Ad-hoc Networking and Computing (Mo-biHoc). New York: ACM Press, 2003: 201-212

[8] 祝义荣,李迟生,等. 传感器网络中基于多维标度定位算法的改进[J]. 计算机仿真,2010,27(3): 143-146

[9] 石为人,许磊. 一种面向无线传感器网络相对定位的分簇算法[J]. 计算机工程与应用,2008,44(24): 15-18

[10] 马震,刘云,沈波. 分布式无线传感器网络定位算法 MDS-MAP (D) [J]. 通信学报,2008,29(6)

[11] 史龙. 无线传感器网络自身定位算法研究[D]. 西安:西北工业大学,2005: 38-42

[12] 段渭军,王福豹,史龙. Hop-Euclidean 无线传感器网络自身定位算法[J]. 计算机科学,2007,34(9)

[13] Horn B. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions[J]. J Opt Soc Am A, 1987, 4: 629-642