

文章编号: 1007-130X(2010)11-0047-05

无线传感器节点实时能耗监测^{*}

Real-Time Energy Consumption Monitoring for Wireless Sensor Nodes

张帆, 李文锋, 宋威

ZHANG Fan, LI Wen feng, SONG Wei

(武汉理工大学物流工程学院, 湖北 武汉 430063)

(School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

摘要: 无线传感器网络设计的关键技术环节之一是低功耗。首先要准确地检测到运行时各模块的能量消耗, 然后才能够进行控制优化。然而, 应用上的需求千差万别, 导致硬件平台的多样性。本文选取无线传感器网络领域节点能量消耗检测作为研究方向, 提出了一种便携的无线传感器节点能耗数据采集装置, 能够实时采集节点的电压、电流信息。针对当前研究集中于仿真模拟, 这种装置可用于实际环境的能量消耗检测, 检测精度高。在 MicaZ 节点上的实验结果表明, 该系统能以较高精度监测节点的能量效率。实际测量发现, 传感器网络中传感器能耗也属能量消耗的一部分, 且消耗量不可忽视, 为今后的研究改进提供了新的参考。

Abstract: Energy efficiency is a key design issue in wireless sensor networks (WSNs). It is necessary to know the power consumption of each component before optimization. However, different applications need different configurations which will lead to many different hardware platforms. We do some research on the energy efficiency monitoring of WSNs, and propose a portable and real time energy consumption monitoring device for wireless sensor nodes, which measures the current and voltage information in the real world. Compared to simulation, this can be used to monitor the energy efficiency of WSNs in the real world. Furthermore, the experimental results on the wireless sensor network platform named MicaZ show that our design can well monitor the energy consumption of WSNs. Moreover, the energy dissipation of each component on a sensor node also shows that the power consumption of sensors can not be ignored.

关键词: 无线传感器网络; 能耗监测; 电流感应放大; TinyOS

Key words: wireless sensor networks; energy consumption monitoring; current sense amplifier; TinyOS

doi: 10.3969/j.issn.1007-130X.2010.11.012

中图分类号: TP393

文献标识码: A

1 引言

无线传感器网络主要由部署在监测区域内的大量廉价的微型传感器节点组成。这些节点通过无线的方式连接起来, 形成一个多跳自组织网络系统。其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息, 并发送给观察者。目前已经有许多典型的无线传感器网络节点平台, 如 MicaZ^[1]、Mica2^[2]、Telos^[3, 4]、Intel Mote^[5] 等。

来自应用上的需求, 导致了硬件平台的多样性, 低功耗

是其中要考虑的一个重要技术评价指标。当前研究集中于仿真模拟, 但这是在选定平台之后所能做的。在选择无线传感器网络的节点平台, 或者设计一个新的平台时, 需要借助测量工具对无线传感器网络节点进行能耗分析。然而, 无线传感器网络具有节点数目多、体积小、能耗低的特点。平时节点会处于休眠状态降低能耗, 当事件发生时快速切换到工作状态, 能耗曲线的变化非常快。传统的测量技术不能很好地满足可随节点布置在环境中的实时能耗监测需要。

无线传感器网络节点实时能耗数据采集需要测量的数

* 收稿日期: 2010-06-14; 修订日期: 2010-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60475031); 湖北省攻关项目(2007AA101C46)

作者简介: 张帆(1982-), 男, 湖南永州人, 博士生, 研究方向为智能公路、无线传感器网络和机器人技术; 李文锋, 博士, 博士生导师,

研究方向为无线传感器网络、机器人技术和物流技术; 宋威, 博士生, 研究方向为机器人技术和无线传感器网络。

通讯地址: 430063 湖北省武汉市和平大道 1040 号物流工程学院 112 室; Tel: 13419553025; E-mail: ailxy@126.com

Address: Section 112, School of Logistics Engineering, 1040 Heping Avenue, Wuhan, Hubei 430063, P. R. China

据变化快,精度要求高,既要求能测量节点休眠时极低的能量消耗,又要能测量到状态切换的过程。同时,无线传感器网络节点的电路相对复杂,在设计中还需要考虑检测微弱电流中的干扰信号和漏电流现象^[6]。传统的对无线传感器网络节点进行能耗分析的技术手段主要有两种:

(1) 用通用仪器设备测量节点各个模块的能耗,如数字示波器;

(2) 采用软件探针的方法。

使用数字示波器体积大,通道有限,不方便在实际环境中进行测量;使用软件探针需要改动节点源程序,容易影响节点正常工作。以现代微电子技术作为检测手段,具有体积小、便携、抗干扰能力强、受环境影响小、检测速度快、测量精度高等优越性,是当今检测技术发展的主要方向^[7,8]。

本文成功地将现代微电子技术作为检测手段,应用于无线传感器网络节点能耗监测中,提出了一种便携的无线传感器节点能耗数据采集装置。该装置采用电流感应放大技术进行测量,对节点正常工作无影响,能够实时采集节点的电压、电流信息。同时,还具有体积小,可随传感器节点布置在环境中的特点。可以用于对传感器节点的实时能耗监测,通过分析达到改进节点硬件设计和软件能耗管理效率的目的。该装置具有两种不同接口传输数据,即 USB 接口和无线数据通信接口。从能量消耗变化的角度,基于此装置还可以开发出无线传感器网络的环境健康状态监测。本文首先介绍了相关工作,然后分析检测系统各个组成部分的电流感应放大、A/D 转换和数据处理;给出了检测电路以及与单片机的接口电路,程序关键算法;最后给出了在无线传感器网络平台 MicaZ 节点上的实验。

2 相关工作

对于无线传感器网络的便携式能耗监测装置,目前还没有针对性的研究文献提出。具有代表性的研究有 Shnayder^[9]、Kämmer^[10]、Landsiedel^[11] 等使用电流/电压转换器将节点电流转换为电压输出到数字示波器来测量。数字示波器有高达 1GHz 的采样频率,测量数据可以完整地保存下来以供分析。文献[9]描述测量 Mica2 节点的理想电流变化范围为 30 μ A 到 30mA 之间,受到数字示波器体积和重量的影响,不便于移动和大规模实现,只能用在实验室测量和建立各个模块的仿真模型。

Dutta^[12] 提出了一种新的思路,使用软件探针。他们在文献中提出了一种称为 iCount 的组件,通过在原工作程序中插入代码,控制开关电路的输出。该组件是基于传感器网络操作系统 Tiny OS^[13] 平台,使用其独特的语法开发,在应用程序执行时调用。使用外部硬件电路配合组件捕获输出的脉冲宽度和周期,从而计算出能量消耗。这种方式受节点的软件平台限制,而且会对节点的工作造成不可估量的影响。

现代的微电子技术为小型化、便携的应用提供了低成本实现,是未来的一个发展方向^[7]。文献[14]介绍了一种由 PIC18F458 单片机和 16 位精度的 A/D 转换器 (AD7705)^[15] 构成的信号采集系统。基于单片机和 16 位 A/D 转换器的信号采集系统,给出了在 8 位单片机上实现

便携节点能耗检测的可行性参考。根据上述情况,我们采用电流/电压转换器把待测电流转换为电压,输出到 A/D 转换器,然后使用 Atmega16L 单片机^[16] 与 AD7705 通信获取测量数据。单片机快速扫描 A/D 转换器,搜集信息,并进行处理后传输到电脑上保存,以供分析。

电流/电压转换在检测系统中占有很重要的地位。常用的电流测量方法是在被测电路中串入精密电阻,通过直接采集电阻两端的电压来获得电流。这种方法的优点是测量简单方便,但当被测电流较大,而且串入的电阻阻值又较大时,电阻的压降对电路的带载能力将产生较大的影响;当被测电流很小时,从电阻上直接取得的电压值又可能太小,影响测量准确度。这种直接测量的方法很难选择合适的阻值,以适应电流变化范围较大的情况,尤其是较小电流的准确测量。根据文献描述的无线传感器节点能耗情况,需要采集的电流变化范围从微安级到毫安,上述串电阻直接测量的方法无法满足要求。文献[17]介绍了一种采用电流/电压转换芯片 MAX472,实现了电动机阶跃电流的高精度测量,克服了常规方法的缺点。然而,其参数不适合节点的电流测量,而且参数计算繁琐。电流感应放大器 ADM4073^[18] 具有精度高、测量范围大、参数换算简单等特点,适合用来监测无线传感器节点电流变化。

关于高精度 A/D 转换选择。数字示波器的主要作用在于将测量的电压转换为数字形式,便于保存分析。数字示波器体积大,不利于移动,而且通道有限,无法满足多个无线传感器网络节点的测量需求。文献[19]描述了 AD7705 用于电子称重,满足国家三级称重标准,能够保证绝对精度小于 0.1%,有效数据位 15 位。文献[20]介绍了 24 位精度的 A/D 转换器 AD7714 在压力测量中的应用。比较 16 位精度和 24 位精度的 A/D 转换器在测量传感器节点能耗方面,16 位精度的 A/D 转换器从处理速度和分辨率角度已经可以满足要求。

3 无线能耗信息采集网络及节点硬件设计

3.1 无线能耗信息采集网络

我们提出一种无线能耗信息采集网络,其结构如图 1 所示。



图 1 能耗信息采集网络结构图

节点装载在能耗监测装置上,一起布置在环境中,可以实现在环境中监测无线传感器网络的能耗信息。网络由传感器节点、能耗监测装置、传感器节点网关、能耗信息采集网关、数据服务器和因特网终端组成。能耗监测装置具有无线通信的功能,与传感器节点的网络互不影响,各自通过

自己的网关传递数据。采集到的能耗信息被传递到数据库服务器存储起来,通过远程终端电脑可以查看分析。根据无线传感器网络中各个节点的能耗状态,可以判断网络的健康状况以及任务负载均衡情况。无线能耗信息采集网络考虑到了实际环境的影响,能够检验无线传感器网络设计的实际执行情况,在仿真之外提供了又一检验设计的技术手段。

3.2 硬件设计

无线传感器网络节点能耗检测装置如图2所示。图中能耗检测装置还装载了MicaZ节点及其传感器板MTS310CA。能耗检测装置主要由5个部分组成,分别为传感模块、信号调理模块、单片机、无线通信模块和电源模块,如图3所示。传感器节点电流不能直接由A/D转换器处理,必须先由电流感应放大转换电路转换为电压信号。单片机集成的A/D转换功能只有10位,精度不够,因此需要选择独立的A/D转换器将该电压信号转换为相应的数字量输入到单片机内。电压的信息采集则由单片机内置的A/D转换器完成。该装置可以方便地通过USB接口或者无线接口与电脑连接并且实现相互通讯。单片机操作A/D转换器,并且负责进行数字信号处理,然后将结果输出给计算机。

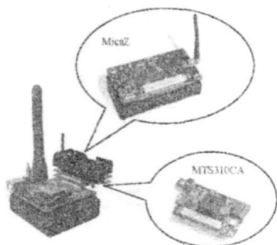


图2 能耗监测系统结构图

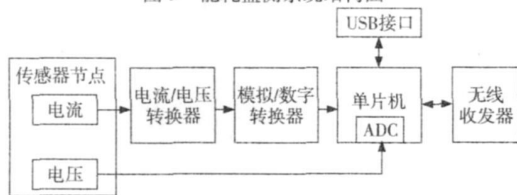


图3 能耗监测装置结构图

ADM4073是一组低成本、高端电流检测放大器^[18],适合于便携式设备的电流测量,如手机、笔记本电脑等。输入电压范围为2V~28V,供电电压为3V~28V,供电电流低于500mA,误差为正负1.0%,可选择增益为20V/V、50V/V或100V/V。图3的电流/电压转换器采用ADM4073。使用ADM4073检测电流,不会影响节点正常工作,见图4。

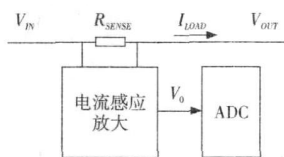


图4 电流测量原理

AD7705以其功能强大、接口方法简单、设定方式灵活等优点得到了广泛的应用。AD7705适用于低频测量的完整模拟前端,器件可以直接接受低电平信号并输出串行数字信号,它的3线串行接口与SPI总线兼容,通过软件可以

设定增益、信号极性和通道选择进行配置。本系统采用准差分模拟输入,经由电流感应放大电路产生的模拟电压与AD7705的AIN1+输入端相连。AD7705从DOUT引脚输出数据,单片机通过DIN脚把操作指令写入AD7705的寄存器中。AD7705为外时钟同步模式,DIN、DOUT、SCLK都按数据手册提供的时序图对寄存器进行控制操作。AD7705可与ADM4073、AD780和Atmega16L使用同一工作电源,而且不需要特定的加电顺序。需要注意的是,时钟信号DCLK在两次操作AD7705之间要保持高电平,即在不访问AD7705的时刻,或者两次操作之间的空闲时,DIN、SCLK都保持高电平最可靠。

高精度参考电压源AD780为AD7705提供2.5V的基准电压。其基本特性通过8脚的悬空或接地,可实现2.5V或3.0V的输出;输出电压范围2.5V±1mV或3.0V±1mV;输入电压范围可从4~36V来实现2.5V或3.0V的输出。在使用AD780作基准电压源时,其周围的电容一定要按照图3上所示进行配置,否则输出的精度会下降。

4 软件算法

软件算法指在单片机上实现的程序,主要分为两部分:A/D转换操作和数据处理操作。AD7705具有八个片内寄存器,通过对片内寄存器的编程,可以实现通道选择、增益选择、滤波频率选择、转换周期选择、自动校准和A/D转换等功能。对AD7705的任何一种操作,必须首先对通信寄存器写入相应代码,然后才能对其他寄存器读写。有关AD7705的各种工作模式、校准操作等,可以参考AD7705的数据手册^[17]。

单片机上的数据处理算法如:

Algorithm 1 Data Processing (current, voltage)

Require: An sampling value *current*, *voltage*.

Ensure: The current value is $0 \leq data \leq 65\ 535$ (16bit ADC).

Ensure: The voltage value is $0 \leq data \leq 1\ 023$ (16bit ADC).

Clear old value *current*, *voltage*;

Read current from AD7705

if *current* > 0 and *current* < 65 536 then

 Read voltage from microcontroller

 Push the current and voltage value to transmission buffer

6: else

 7: Delay 10μs

8: end if

9: Jump to 1

在满足从AD7705稳定地获取数据的前提下,应尽量降低单片机的工作频率,这样可以提高抗干扰能力和降低检测系统的功耗。在印制板采取良好的抗干扰措施前提下,如果干扰仍然比较严重,那么软件上也应采取相应的措施,采用软件冗余技术进行相同命令的多次写入,以保证操作的可靠性。

5 实验结果及分析

5.1 精度校准实验

根据设计计算电路的参数,将其应用到测试电路中,并

采集电流测量值(电压为 5V, 采样率为 500Hz) 选择不同的负载电阻: 0Ω(表示无连接负载)、2KΩ、1KΩ 和 100Ω。我们采集两组原始数据, 分别为测量结果(Measurement Results) 和参考值(Reference Value)。测量结果是各个稳态测量值的均值, 参考值是用高精度的电流表测出的平均稳态的电流值。对比如表 1 所示, 反映了在稳态电压下通过不同负载电阻的电流。通过与参考电流表读数做比较校准, 根据欧姆定律校准测量值。

图 5 中的曲线是误差曲线, 以百分比的形式显示在图上。误差最大处为 4.0865%, 随着测量电流的增大误差越来越小。从表 1 和图 5 可以看出 ADM 4073 的测量精度和误差。

表 1 校准实验, 不同负载情况下通过的电流平均值

Voltage(V)	5			
Load resistor(Ω)	0	2K	1K	100
Measurement results (mA)	0.598 5	3.101 2	5.627 9	46.875 0
Reference value (mA)	0.624	3.192	5.671	46.424

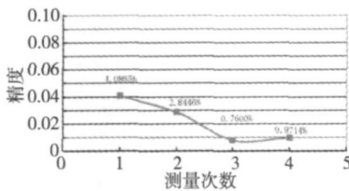


图 5 电流测量误差变化

5.2 TinyOS 动态能耗管理监测

在无线传感器网络平台中, MicaZ 在国内外使用广泛。我们以此为研究平台, 在 MicaZ 节点上的实验结果可以与国内外研究文献中的数据做比较。采集到的信号数据被传输到电脑上, 在电脑上记录下实时的测量数据并绘制出能耗曲线。通过比较参考文献[6]中的数据图表, 可以验证用采集数据绘制的能耗曲线。在 MicaZ 节点运行的是开源嵌入式操作系统 TinyOS^[19] 上的 Blink 演示程序。该程序操作节点上的 3 个 LED 灯以不同频率闪烁(4Hz、2Hz 和 1Hz)。处理器定时从休眠状态唤醒并操作 LED 灯开关, 完成后在处理器任务空闲时又进入休眠。整个过程在 TinyOS 的动态能耗管理框架(Dynamic Power Management, 简称 DPM) 下自动运行。消耗电流的变化曲线如图 6 所示, 工作电压不变。对比参考文献[6]中的图可以看出, 我们通过能耗测量装置绘制的曲线, 能够清晰地观察到处理器和 3 个 LED 灯的工作状态。

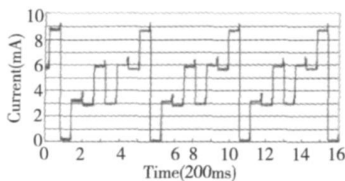


图 6 测量 MicaZ 节点的能耗曲线(TinyOS 的 Blink 演示程序)

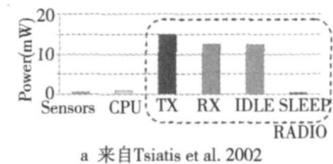
5.3 传感器能量消耗监测

从硬件方面考虑, 传感器节点主要有三个部分消耗能量: 传感器模块、处理器模块和无线通信模块。随着集成电

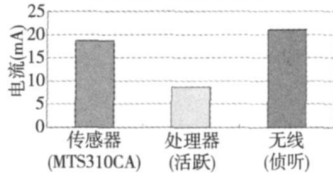
路工艺的飞速发展, 传感器、处理器和无线模块的功能不断增强, 同时功耗越来越低。图 7a 来自 Tsiatis 等人的工作^[20], 许多研究者相信传感器节点的绝大部分能量消耗在无线通信模块, 并以此图为依据。从图 7a 可知, 传感器和处理器工作时能量消耗的比例已经很小, 而绝大部分的能耗集中在无线通信模块上。然而, 图中给出了详细的无线通信各种工作模式下的功耗, 却没有对传感器和处理器的

工作状态做出说明。借助能量消耗监测系统, 我们对 MicaZ 节点以及与其配套的 MTS310CA 传感器板(集成了麦克风、扬声器、加速度传感器、磁传感、温度传感器和光敏传感器)的能量消耗进行了测量, 结果如图 7b 所示。实验设置如下:

供电电压为 3.3V。传感器部分, 我们使能了对 MTS310CA 传感器板上各个传感器的供电, 各个传感器工作状态消耗的电流如表 2 所示; 处理器部分, 我们取的是单片机处于活动状态, 没有采取休眠机制; 无线部分, 我们使能了无线侦听, 使无线模块一直处于接收侦听状态。采集到的电流消耗数据如图 7b 所示。由此可知, 在各部分没有采用休眠策略的时候, 传感器实际消耗的能量并不像图 7a 所示。在处理和无线通信采用了能量管理策略的条件下, 例如采用了动态功耗管理的 TinyOS 系统, 处理器和通信的能耗都得到了管理优化, 这时传感器的能量消耗将占据不可忽视的比重。根据分析结果, 我们认为无线传感器网络节点的低功耗设计不仅要考虑处理器和无线通信的能耗, 也需要关注传感器的能量消耗。



a 来自 Tsiatis et al. 2002



b 我们在 MicaZ 节点及其 MTS310CA 传感器板上的测量

图 7 节点子系统的能量消耗

表 2 传感器供电状态下能量消耗

	Voltage(V)	Current(mA)
Microphone	3.3	1.941 4
Sounder		0.755 5
Accelerometer		0.376 6
Magnetometer		8.570 3
Temperature		6.618 1
Light		0.343 4
Total		18.605 3

6 结束语

应用上的需求千差万别, 导致硬件平台设计的多样性, 本文提出了一种无线传感器网络能耗检测装置, 包括一系列硬件设计、软件处理算法和实验验证。该装置具有体积小、便携的特点, 能够对节点的电压和电流进行实时采样处

理,分辨率在微安级,适用于对无线传感器网络节点的能量消耗进行监测。我们的设计弥补了无线传感器网络的能耗分析依赖仿真的现状。该系统作为便携能耗测量仪器,不仅限于无线传感器网络节点的能耗检测,还具有广泛的应用场景。

下面的工作中,我们将在实际环境中建立一个一对多传感器节点的实时能量消耗监测系统,并对各种路由协议下的节点能量消耗进行对比分析。我们还将继续研究新的工作模式,为无线传感器网络健康状况以及负载均衡,从能量消耗方向提供现实的、准确的信息。

参考文献:

[1] Crossbow Technology Inc. MicaZ Wireless Measurement System[EB/OL]. [2010-04-12]. <http://www.xbow.com.cn/wsn/pdf/MICAZ.pdf>.

[2] Crossbow Technology Inc. MICA2 Data Sheet[EB/OL]. [2010-04-12]. http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICA2_Datasheet.pdf.

[3] Polastre J, Szewczyk R, Culler D. Telos: Enabling Ultra Low Power Wireless Research[C] // Proc of the 4th Int'l Conf on Information Processing in Sensor Networks: Special Track on Platform Tools and Design Methods for Network Embedded Sensors, 2005: 364-369.

[4] Moteiv Corporation. Telos (rev b) Datasheet[EB/OL]. [2010-04-20]. http://www.willow.co.uk/TelosB_Datasheet.pdf.

[5] Nachman L, Kling R, Adler R, et al. The Intel Mote Platform: A Bluetooth-Based Sensor Network for Industrial Monitoring[C] // Proc of the 4th Int'l Symp on Information Processing in Sensor Networks, 2005: 437-442.

[6] Shnayder V, Hempstead M, Chen B, et al. Simulating the Power Consumption of Large Scale Sensor Network Applications[C] // Proc of the 2nd Int'l Conf on Embedded Networked Sensor Systems, 2004: 188-200.

[7] Kramer M, Gerdaldy A. Energy Measurements for MicaZ Node[R]. Technical Report KrGe06, University of Kaiserslautern, 2006.

[8] Landsiedel O, Wehrle K, Otz S G. Accurate Prediction of Power Consumption in Sensor Networks[C] // Proc of the 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, 2005: 37-44.

[9] Lee C, Mok P. A Monolithic Current-Mode CMOS DC/DC Converter with on-Chip Current Sensing Technique[J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 2004, 39(1): 3-14.

[10] 刘布民, 蔡伟, 陆铁军, 等. 低功耗无损电流检测技术的分析与设计[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(3): 393-396.

[11] 魏振忠, 刘向群. 电流/电压转换芯片 MAX472 在永磁直流电动机虚拟测试系统中的应用[J]. 电子技术应用, 2000, 26(5): 57-59.

[12] Hohlt B, Doherty L, Brewer E. Flexible Power Scheduling for Sensor Networks[C] // Proc of the 3rd Int'l Symp on Information Processing in Sensor Networks, 2004: 205-214.

[13] 屈新芽, 金春雨, 聂文清. AD7705 在电子秤中的应用[J]. 电子产品世界, 2001(18): 22-24.

[14] 孙汝建. AD7714 在压力测量中的应用[J]. 电子产品世界,

2000(7): 36-37.

[15] 高延正, 何道清, 刘雷. 基于 PIC18F458 和 AD7705 的信号采集系统[J]. 仪器仪表用户, 2008, 15(6).

[16] Atmel Corp. ATmega161 Datasheet. Atmel document no. 2466. 2004[EB/OL]. [2010-04-12]. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2466.pdf.

[17] Analog Devices. AD7705 Manual[EB/OL]. [2010-04-12]. http://www.analog.com/static/imported_files/datasheets/AD7705_7706.pdf.

[18] Analog Devices. ADM4073 Manual[EB/OL]. [2010-04-12]. http://www.analog.com/static/imported_files/Data_Sheets/ADM4073.pdf.

[19] Levis P, Madden S, Polastre J, et al. TinyOS: An Operating System for Sensor Networks[M]. Ambient Intelligence, 2005.

[20] Sarikaya B. Nomadic User Approach to Building Mobile Wireless Sensor Networks[C] // Proc of Int'l Workshop on Network Security and Wireless Communications, 2005.

(上接第 43 页)

sor Networks[C] // Proc of the 33rd Annual Hawaii International Conf on System Sciences, 2000: 3005-3014.

[2] Liu M, Cao J N, Chen G H, et al. EADEEG: An Energy Aware Data Gather Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2007, 18(5): 54-61.

[3] Wei Y, Heidemann J, Estrin D. An Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C] // Proc of the Twenty First Annual Joint Conf of the IEEE Computer and Communications Societies, 2002: 1567-1576.

[4] van Dam T, Langendoen P. An Adaptive Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C] // Proc of the 1st Int'l Conf on Embedded Networked Sensor Systems, 2003: 171-180.

[5] Lu G, Krishnamachari B, Raghavendra C. An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks[C] // Proc of the 18th Int'l Parallel and Distributed Processing Symp, 2004.

[6] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Network[C] // Proc of the 2nd Int'l Conf on Embedded Networked Sensor Systems, 2004: 138-149.

[7] Keshavarzian A, Lee H, Venkatraman L. Wakeup Scheduling in Wireless Sensor Networks[C] // Proc of the 7th ACM Int'l Symp on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, 2006: 322-333.

[8] Gu Y, He T. Data Forwarding in Extremely Low Duty Cycle Sensor Networks with Unreliable Communication Links[C] // Proc of the 5th Int'l Conf on Embedded Networked Sensor Systems, 2007: 321-334.

[9] Burri N, Rickenbach P, Wattenhofer R. Dozer: Ultra Low Power Data Gathering in Sensor Networks[C] // Proc of the 6th Int'l Symp on Information Processing in Sensor Networks, 2007: 450-459.

[10] Yu Y, Govindan R, Estrin D. Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks[R]. UCLA Computer Science Department, 2001.