

广西高校优秀人才资助计划项目

无线传感器

网络技术的应用研究

WUXIAN CHUANGANQI

WANGLUO JISHU JI YINGYONG YANJIU

黄 帆 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

广西高校优秀人才资助计划项目

无线传感器

网络技术及应用研究

WUXIAN CHUANGANQI

WANGLUO JISHU JI YINGYONG YANJIU

黄 帆 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了无线传感器网络的基本理论和关键技术探究,涉及无线传感器网络的各个方面,涵盖了无线传感器网络的拓扑控制、节点定位、时间同步、路由协议、数据融合、安全技术、典型应用等,内容全面,体系完整。

本书可作为相关专业学生的参考用书,也可供从事相关专业的工程技术人员与研究人员以及爱好者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络技术及应用研究/黄帆著. —北京:
中国水利水电出版社, 2014. 5
ISBN 978-7-5170-1907-7

I. ①无… II. ①黄… III. ①无线电通信—传感器—
研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 075564 号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:杨元泓 封面设计:崔 蕾

书 名	无线传感器网络技术及应用研究
作 者	黄 帆 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京鑫海胜蓝数码科技有限公司
印 刷	三河市天润建兴印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 14 印张 175 千字
版 次	2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	42.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

无线传感器网络是近年来迅速发展并受到普遍重视的新型网络技术,它的出现和发展对现代科学技术产生了极其深刻的影响,也显著地改变了人们的观念。与传统的网络不同,无线传感器网络将现代通信技术、微型传感器技术以及网络技术有机地融合为一体,在军事、环境监测、家庭自动化及其他很多领域具有广阔的应用前景。

本书主要有以下特点:

(1)基础性。本书注重无线传感器网络的基本理论和关键技术探究,包括无线传感器的基本概念、基本原理、基本结构、基本协议、典型算法和应用。力求展示出无线传感器网络基础和重要的内容,使读者对无线传感器网络有清楚的认识和理解,并做到通俗易懂。

(2)系统性。本书涉及无线传感器网络的各个方面,注重内容的系统性,涵盖了无线传感器网络的拓扑控制、节点定位、时间同步、路由协议、数据融合、安全技术、典型应用,内容全面,体系完整。

(3)新颖性。为适应无线传感器网络理论和技术发展迅速、知识更新快的特点,本书紧跟学科发展前沿,针对当前新出现的各种应用,及时将无线传感器网络的新技术融入内容体系,及时对无线传感器网络的技术框架进行扩充和完善,并给出了新的应用和实例。

本书围绕着近年来无线传感器网络的研究热点和难点,并结

合相关领域的国内外重要研究成果展开详细地阐述和分析。全书共分 8 章,其中:第 1 章绪论,介绍无线传感器网络、无线传感器网络的体系结构、研究现状与发展趋势;第 2 章无线传感器网络的拓扑控制,首先对无线传感器网络的拓扑控制进行概述,然后研究其功率控制算法和层次拓扑结构控制算法;第 3 章无线传感器网络的节点定位,首先对无线传感器网络的节点定位进行概述,其次介绍节点定位技术基础,在此基础之上,详细地分析基于测距的和基于非测距的定位技术;第 4 章无线传感器网络的时间同步,首先对无线传感器网络的时间同步进行概述,其次主要介绍时间同步的概念与原理,在此基础之上,分析传统时间同步技术和新型时间同步技术;第 5 章无线传感器网络的路由协议,首先对无线传感器网络的路由协议进行概述,其次介绍路由协议设计,然后分析典型的路由协议;第 6 章首先对无线传感器网络的数据融合进行概述,其次介绍数据融合技术,然后分析典型的数据融合算法;第 7 章无线传感器网络的安全技术,首先对无线传感器网络的安全技术进行概述,其次介绍安全攻击和安全防护技术,最后探讨安全发展趋势;第 8 章无线传感器网络的典型应用研究,介绍无线传感器网络在军事方面、农业方面、环境监测方面、医疗卫生方面和智能交通方面的应用。

本书在撰写过程中,结合作者多年在包括无线传感器网络在内的各类型自组织多跳无线网络领域多年的研究这些成果,此外还参考了许多科研项目研究成果和原创论文,在此要向相关作者表示衷心的感谢。

由于无线传感器网络理论和技术发展迅速,许多问题尚无法定论,加之时间仓促和作者水平有限,书中难免存在错误,敬请同行及读者批评指正。

作者

2014 年 3 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 无线传感器网络概述	1
1.2 无线传感器网络的体系结构	6
1.3 无线传感器网络的研究现状与发展趋势	11
第 2 章 无线传感器网络的拓扑控制	19
2.1 概述	19
2.2 功率控制算法	23
2.3 层次拓扑结构控制算法	26
第 3 章 无线传感器网络的节点定位	39
3.1 概述	39
3.2 节点定位技术基础	42
3.3 基于测距的定位技术	46
3.4 基于非测距定位技术	53

第 4 章 无线传感器网络的时间同步	64
4.1 概述	64
4.2 时间同步的概念与原理	69
4.3 传统时间同步技术	75
4.4 新型时间同步技术	87
第 5 章 无线传感器网络的路由协议	94
5.1 概述	94
5.2 无线传感器网络路由协议设计	98
5.3 典型的无线传感器网络路由协议	110
第 6 章 无线传感器网络的数据融合	135
6.1 概述	135
6.2 无线传感器网络数据融合技术	137
6.3 典型的无线传感器网络数据融合算法	147
第 7 章 无线传感器网络的安全技术	153
7.1 概述	154
7.2 无线传感器网络中的安全攻击	161
7.3 无线传感器网络安全防护技术	173
7.4 无线传感器网络发展和安全趋势	186

第 8 章 无线传感器网络的典型应用研究	189
8.1 无线传感器网络在军事方面的应用	189
8.2 无线传感器网络在农业方面的应用	199
8.3 无线传感器网络在环境监测方面的应用	201
8.4 无线传感器网络在医疗卫生方面的应用	210
8.5 无线传感器网络在智能交通方面的应用	212
参考文献	214

第 1 章 绪 论

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是多学科高度交叉的前沿研究课题,综合了传感器、嵌入式计算、网络及通信、分布式信息处理等技术。无线传感器网络利用大量的微型传感计算节点通过自组织网络以协作方式进行实时监测、感知和采集各类环境或监测对象的信息,以一种“无处不在的计算”的新型计算模式,成为连接物理世界、数字虚拟世界和人类社会的桥梁。

1.1 无线传感器网络概述

1.1.1 无线传感器网络的基本概念

无线传感器网络和基于无线传感器网络的自主智能系统是涉及微机电系统、计算机、通信、自动控制、人工智能等多学科的综合性技术。

微机电系统(MEMS)的迅速发展奠定了设计和实现片上系统的基础,使得将多种传感器集成为一体,制造小型化、低成本、多功能的传感器节点成为可能。

大量的 MEMS 传感器节点只有通过低功耗的无线电通信技术连成网络才能够发挥其整体的综合作用;更小、更廉价的低功

耗计算设备代表的“后 PC 时代”冲破了传统台式计算机和高性能服务器的设计模式,普及的网络化带来了难以估量的计算处理能力。

在通信方式上,无线电、红外、声等多种无线通信技术的发展为微传感器间通信提供了多种选择,尤其是以 IEEE 802.15.4 标准为代表的短距离无线电通信标准的出现,无疑为无线传感器网络的发展奠定了坚实的基础。

具有群体智能的自治系统的行为实现和控制是自动控制和人工智能领域的前沿研究内容,从而为无线传感器网络的智能性提供了有力的技术支持。

以上几个方面的高度发展孕育出了许多新的信息获取和处理模式。无线传感器网络就是其中一例。随机分布的、集成有传感器、数据处理单元和通信模块的微小节点通过自组织的方式构成网络,借助于节点中内置的形式多样的传感器感知所在周边环境中的热、红外、声纳、雷达和地震波信号,从而探测包括温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分、移动物体的大小、速度和方向等众多物理现象,并通过无线通信传送信息,由此构成了无线传感器网络。

尽管很多文献给出了多种无线传感器网络的定义,但是实际上大同小异。本书基于已有文献,并结合自身的理解,给出无线传感器网络通用定义:无线传感器网络是由大量无处不在的,具有通信与计算能力的微小传感器节点密集布设在无人值守的监控区域而构成的能够根据环境自主完成指定任务的“智能”自治测控网络系统。

由于传感器节点数量众多,布设时只能采用随机投放的方式,传感器节点的位置不能预先确定;在任意时刻,节点间通过无线信道连接,自组织网络拓扑结构;传感器节点间具有很强的协同能力,通过局部的数据采集、预处理以及节点间的数据交互来完成全局任务。无线传感器网络是一种无中心节点的全分布系

统。由于大量传感器节点是密集布设的,传感器节点间的距离很短,因此,多跳、对等通信方式比传统的单跳、主从通信方式更适合在无线传感器网络中使用,由于每跳的距离较短,无线收发器可以在较低的能量级别上工作。另外,多跳通信方式可以有效地避免在长距离无线信号传播过程中遇到的信号衰减和干扰等各种问题。

无线传感器网络可以在独立的环境下运行,也可以通过网关连接到现有的网络基础设施上,如 Internet 等。在后面这种情况中,远程用户可以通过 Internet 浏览无线传感器网络采集的信息。

1.1.2 无线传感器网络的特点

在过去的 80 多年里,无线网络技术取得了突飞猛进的发展。从人工操作的无线电报网络到使用扩频技术的自动化无线局域、个域网络,无线网络的应用领域随着技术的进步不断地扩展。但迄今为止,主流的无线网络技术,如 IEEE 802.11、Bluetooth,都是为了数据传输而设计的,称之为无线数据网络。目前,无线数据网络研究的热点问题是无线自组网络技术。作为 Internet 在无线和移动范畴的扩展和延伸,无线自组网络可以实现不依赖于任何基础设施的移动节点在短时间内的互联。与传统网络相比,无线自组网络具有以下显著特点:

(1)无中心和自组织性。无线自组网络中没有绝对的控制中心,所有节点的地位平等,网络中的节点通过分布式算法来协调彼此的行为,无需人工干预和任何其他预置的网络设施,可以在任何时刻任何地方快速展开并自动组网。由于网络的分布式特征、节点的冗余性和不存在单点故障瓶颈,使得网络的鲁棒性和抗毁性很好。

(2)动态变化的网络拓扑。网络的拓扑结构是指从网络层角度来看的物理网络的逻辑视图。在无线自组网络中,移动终端能

够以任意速度和任意方式在网中移动,并可以随时关闭电台;无线收发装置的天线类型多种多样、发送功率随着携带能量的变化而变化;加之无线信道间的互相干扰、地形和天气等综合因素的影响,移动终端间通过无线信道形成的网络拓扑随时可能发生变化,而且变化的方式和速度都难以预测。

(3)受限的无线传输带宽。无线自组网络采用无线传输技术作为底层通信手段,由于无线信道本身的物理特性,它所能提供的网络带宽相对有线信道要低得多。此外,考虑到竞争共享无线信道产生的冲突、信号衰减、噪声和信道之间干扰等多种因素,移动终端得到的实际带宽远远小于理论上的最大带宽。

(4)移动终端的能力有限。无线自组网络中移动终端具有携带方便、轻便灵巧等好处,但是也存在固有缺陷,如能源受限、内存较小、CPU 性能较低等,从而给应用程序设计开发带来一定的难度;屏幕等外设较小,不利于开展功能较复杂的业务。

(5)多跳路由。由于节点发射功率的限制,节点的覆盖范围有限。当它要与其覆盖范围之外的节点进行通信时,需要中间节点的转发。此外,无线自组网络中的多跳路由是由普通节点协作完成的,而不是由专用的路由设备完成的。

(6)安全性较差。无线自组网络是一种特殊的无线移动网络,由于采用无线信道、有限电源、分布式控制等技术,它更容易受到被动窃听、主动入侵、拒绝服务、剥夺“睡眠”等网络攻击。信道加密、抗干扰、用户认证和其他安全措施都需要特别考虑。

(7)网络的可扩展性不强。在目前 Internet 环境下,可以采用子网、无级域间路由(Classless Inter Domain Routing, CIDR)和变长子网掩码(Variable Length Subnet Masks, VLSM)等技术,增强 Internet 的可扩展性。但是动态变化的拓扑结构使得具有不同子网地址的移动终端可能同时处于一个无线自组网络中,因而子网技术所带来的可扩展性无法应用在无线自组网络环境中。

无线传感器网络与无线自组网络有许多相似之处,也具有无

线自组网络的前6条属性,有些文献甚至将无线传感器网络作为无线自组网络的一种。但通过比较可以发现,二者存在着一些本质的区别。首先,二者的应用目标不同。无线自组网络在不依赖于任何基础设施的前提下,以为用户提供高质量的数据传输服务为主要目标。无线传感器网络以监控物理世界为主要目标。从这种意义上讲,无线自组网络是一种数据网络,而无线传感器网络是一种测控网络。其次,无线传感器网络具有区别于无线自组网络的独有特点,具体如下:

(1)超大规模。为了完成对物理世界高密度的感知,无线传感器网络系统一般由成千上万个微小传感器构成,较无线自组网络规模成数量级的提高。无线传感器网络主要不是依靠单个设备能力的提升,而是通过大规模、冗余的嵌入式设备的协同工作来提高系统的可靠性和工作质量。尽管在未来的5~10年内,具有计算、存储、通信、感知能力的嵌入式设备(节点)的体积可以小到 1mm^3 ,但单体设备的能力还十分有限。

(2)无人值守。传感器的应用与物理世界紧密联系,微传感器节点往往密集地分布于需要监控的物理环境之中。由于规模巨大,不可能人工“照顾”每个节点,网络系统往往在无人值守的状态下工作。每个节点只能依靠自带或自主获取的能源(电池、太阳能)供电。由此导致的能源受限是阻碍无线传感器网络发展及应用的最重要的“瓶颈”之一。

(3)易受物理环境的影响——动态性强。无线传感器网络与其所在的物理环境密切相关,并随着环境的变化而不断的变化。这些时变因素严重地影响了系统的性能,如低能耗的无线通信易受环境因素的影响;外界激励变化导致的网络负载和运行规模的动态变化;随着能量的消耗,系统工作状态的变化等都要求传感器网络系统要具有对动态环境变化的适应性。

1.2 无线传感器网络的体系结构

1.2.1 无线传感器网络的系统架构

无线传感器网络的系统架构。通常包括传感器节点、汇聚节点和管理节点等,如图 1-1 所示。

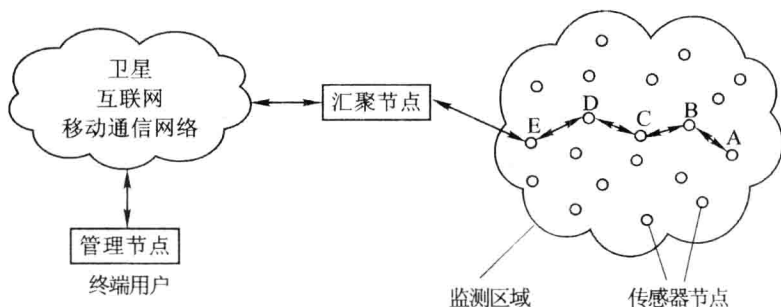


图 1-1 无线传感器网络的系统架构

在图 1-1 中,大量传感器节点随机密布于整个被观测区域中,通过自组织的方式构成网络。传感器节点在对所探测到的信息进行初步处理之后,以多跳中继的方式将其传送给汇聚节点,然后经卫星、互联网或是移动通信网络等途径到达最终用户所在的管理节点。终端用户也可以通过管理节点对无线传感器网络进行管理和配置、发布监测任务或是收集回传数据。

传感器节点通常是一个嵌入式系统,由于受到体积、价格和电源供给等因素的限制,它的处理能力、存储能力相对较弱,通信距离也很有限,通常只与自身通信范围内的邻居节点交换数据。要访问通信范围以外的节点,必须使用多跳路由。为了保证采集到的数据信息能够通过多跳送到汇聚节点,节点的分布要相当密

集。从网络功能上看,每个传感器节点都具有信息采集和路由的双重功能,除了进行本地信息收集和数据处理外,还要存储、管理和融合其他节点转发过来的数据,同时与其他节点协作完成一些特定任务。

汇聚节点通常具有较强的处理能力、存储能力和通信能力,它既可以是一个具有足够能量供给和更多内存资源与计算能力的增强型传感器节点,也可以是一个带有无线通信接口的特殊网关设备。汇聚节点连接传感器网络与外部网络,通过协议转换实现管理节点与传感器网络之间的通信,把收集到的数据信息转发到外部网络上,同时发布管理节点提交的任务。

1.2.2 传感器节点的结构

传感器节点由传感单元、处理单元、无线收发单元和电源单元等几部分组成,如图 1-2 所示。

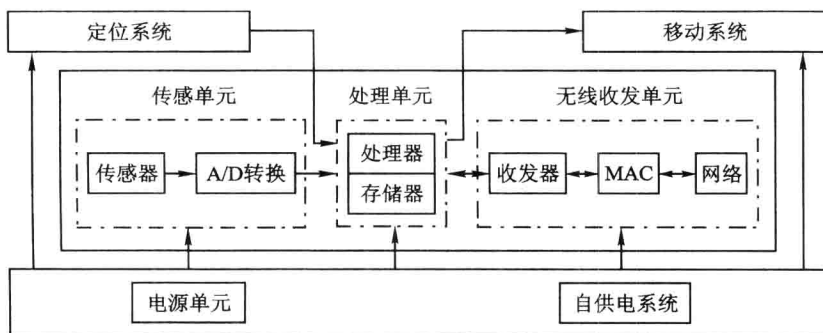


图 1-2 传感器节点的结构

传感单元用于感知、获取监测区域内的信息,并将其转换为数字信号,它由传感器和数/模转换模块组成;处理单元负责控制和协调节点各部分的工作,存储和处理自身采集的数据以及其他节点发来的数据,它由嵌入式系统构成,包括处理器、存储器等;无线收发单元负责与其他传感器节点进行通信,交换控制信息和

收发采集数据,它由无线通信模块组成;电源单元能够为传感器节点提供正常工作所必需的能源,通常采用微型电池。

此外,传感器节点还可以包括其他辅助单元,如移动系统、定位系统和自供电系统等。由于需要进行比较复杂的任务调度与管理,处理单元还需要包含一个功能较为完善的微型化嵌入式操作系统,如美国 UC Berkeley 大学开发的 TinyOS。目前已有多种成型的传感器节点设计,它们在实现原理上相似,只是采用了不同的微处理器、不同的协议和通信方式。

由于传感器节点采用电池供电,一旦电能耗尽,节点就失去了工作能力。为了最大限度地节约电能,在硬件设计方面,要尽量采用低功耗器件,在没有通信任务的时候,切断射频部分电源;在软件设计方面,各层通信协议都应该以节能为中心,必要时可以牺牲其他的一些网络性能指标,以获得更高的电源效率。

1.2.3 无线传感器网络的体系结构概述

无线传感器网络的体系结构由分层的网络通信协议、网络管理平台以及应用支撑平台等 3 个部分组成,如图 1-3 所示。

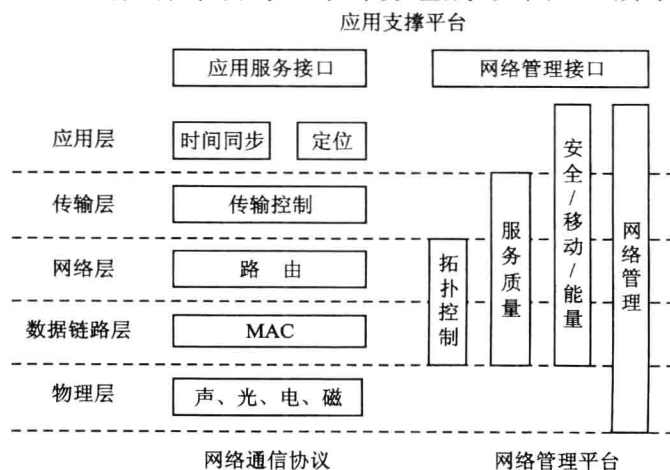


图 1-3 无线传感器网络的体系结构

1. 分层的网络通信协议

类似于传统 Internet 网络中的 TCP/IP 协议体系,它由物理层、数据链路层、网络层、传输层等组成。

(1)物理层。无线传感器网络的物理层负责信号的调制和数据的收发,所采用的传输介质主要有无线电、红外线、光波等。

(2)数据链路层。无线传感器网络的数据链路层负责数据成帧、帧检测、媒体访问和差错控制。其中,媒体访问协议保证可靠的点对点 and 点对多点通信;差错控制则保证源节点发出的信息可以完整无误地到达目标节点。

(3)网络层。无线传感器网络的网络层负责路由发现和维护,通常,大多数节点无法直接与网关通信,需要通过中间节点以多跳路由的方式将数据传送至汇聚节点。

(4)传输层。无线传感器网络的传输层负责数据流的传输控制,主要通过汇聚节点采集传感器网络内的数据,并使用卫星、移动通信网络、Internet 或者其他的链路与外部网络通信,是保证通信服务质量的重要部分。

2. 网络管理平台

网络管理平台主要是对传感器节点自身的管理以及用户对传感器网络的管理,它包括了拓扑控制、服务质量管理、能量管理、安全管理、移动管理、网络管理等。

(1)拓扑控制。为了节约能量,某些传感器节点会在某些时刻进入休眠状态,这导致网络的拓扑结构不断变化,因而需要通过拓扑控制技术管理各节点状态的转换,使网络保持畅通,数据能够有效传输。拓扑控制利用链路层、路由层完成拓扑生成,反过来又为它们提供基础信息支持,优化 MAC 协议和路由协议,降低能耗。

(2)服务质量管理。服务质量管理在各协议层设计队列管