

21世纪高等学校规划教材 | 物联网



无线传感器网络 原理及方法

许 毅 编著
李文锋 审

清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 物联网

无线传感器网络 原理及方法

许 毅 编著
李文锋 审

清华大学出版社
北京

信息革命的第三次浪潮正悄然来临,并将最终改变社会、企业、社区和个人的生活方式。这次信息革命既包括大家热论的物联网,也包括新一代互联网和无处不在的计算模式的最新发展。为使物联网具有全球互联和随时随地与任何人和物通信的能力,就涉及到非常广泛的信息技术,其中无线传感器网络技术备受关注。

物联网是新一代信息技术的重要组成部分。物联网(The Internet of Things)顾名思义,就是“物物相连的互联网”。包含两层意思:第一,物联网的核心和基础仍然是互联网,是在互联网基础上进行了延伸和扩展的网络;第二,其用户端延伸和扩展到了任何的物体与物体之间,并且能够进行信息交换和通信。因此,物联网的定义是通过射频识别(RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备,按约定的协议,把任意物体与互联网相连接,进行信息交换和通信,以实现物体的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。

无线传感器网络是一个全新的技术领域,近几年来国内外研究者都投入了大量的精力,积极攻克标准、技术和应用方面的难关。无线传感器网络在国民经济建设和国防军事上具有十分重要的应用价值,我国也把这项技术列入了长期科技发展规划之中。2009年8月7日下午,温总理在中科院无锡高新微纳传感网络工程研发中心考察时,强调在国家重大科技专项中,要加快推进无线传感器网络的发展。

无线传感器网络是由大量传感器节点通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织网络系统,它能够实现数据的采集量化、处理融合和传输。它综合了微电子技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等先进技术,能够协同地实时监测、感知和采集网络覆盖区域中各种环境或监测对象的信息,并对其进行处理,将处理后的信息通过无线方式发送,并以自组多跳的网络方式传送给观察者。具体来讲,无线传感器网络兼具感测、运算与网络能力,能够通过传感器侦测周围环境,如温度、湿度、光照、气体浓度、震动幅度等,并由无线网络将搜集到的信息传送给监控者。监控者解读报表信息后,便可掌握现场状况,从而去维护、调整相关系统。由于监控物理环境的重要性从来没有像如今这么突出,无线传感器网络已被视为环境监测、建筑监测、公用事业、工业控制、家庭、船舶和运输系统自动化中的下一个发展方向。无线传感器网络的应用一般不需要很大的带宽,但是对功耗的要求却很严格,大部分时间内必须保持低功耗。由于无线传感节点通常使用存储容量不大的嵌入式处理器,因此对协议栈的大小也有严格限制。

本科教育是高等教育的主体和基础,物联网工程专业是刚建立的一门新专业,抓好本科教学是提高整个高等教育质量的重点和关键。因此,让本科专业学生或者其他相关的信息专业的本科生学习无线传感器网络的基本内容和基础技术具有非常重要的意义。

无线传感器网络是物联网工程专业和其他相关的信息专业的一门重要课程。本书主要内容包括无线传感器网络概述,网络结构、覆盖与连接,网络通信,网络的支撑技术,网络MAC层,网络协议的技术标准,网络的路由协议,网络安全,网络应用开发,物联网环境下的WSN。

本教材依据物联网工程专业的教学大纲而编写,教学计划为50课时左右。通过对本课程

的学习,学生能够掌握无线传感器网络设计与开发的基本技术,为今后从事无线传感器网络系统和网络化探测设备的设计开发打下良好基础。

为了便于读者学习,本书在编写过程中尽量做到结合实际,着重介绍物理概念,以图文结合的方式来阐述问题,文字力求通俗易懂。为了适应教学需要,各章后面均附有习题,书后附有主要的参考文献。

本书作者的工作得到了国家自然科学基金项目、湖北省基金项目、省级教研项目和校级教研项目的支持和资助,在此表示谢意!感谢武汉理工大学物流学院副院长、博导李文锋教授为本书的撰写提供了指导思想,并对书稿审阅给予支持。感谢武汉理工大学计算机学院物联网系硕导伍新华副教授参加本书的最后定稿工作。研究生刘姣姣、李兆祥、崔梅、秦敏、颜俊杰、聂中伟、杨威、曾伟伟、刘荣兰、张佳珂、许永强、高玉等人为本书的完成也做出了贡献。另外,本书编写过程中参考了大量文献和资料,恕不一一列举,在此对原作者深表谢意。

无线传感器网络技术发展非常快,新思想、新技术、新观点不断提出,本书力求全面地介绍无线传感器网络的主要技术,但由于作者水平所限,书中难免存在不足之处,希望广大读者批评指正。

感谢读者选择本书,欢迎读者对本书内容提出批评和修改建议。

作 者

xuyi@whut.edu.cn

2011年3月于武汉

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 无线传感器网络的基本概念	1
1.2 无线传感器网络的特征	2
1.2.1 与现有无线网络的区别	2
1.2.2 与现场总线的区别	3
1.2.3 传感器节点的限制	3
1.2.4 传感器组网的特点	4
1.3 无线传感器网络的关键性能指标	6
1.4 无线传感器网络的应用	8
1.5 无线传感器网络的研究历史	9
1.5.1 计算设备的演化历史	9
1.5.2 无线传感器网络发展的三个阶段	10
1.5.3 无线传感器网络的发展趋势	11
习题 1	14
第 2 章 无线传感器网络结构、覆盖与连接	15
2.1 无线传感器网络拓扑结构	15
2.2 无线传感器网络覆盖	17
2.2.1 无线传感器网络覆盖问题	17
2.2.2 无线传感器网络区域覆盖	22
2.2.3 无线传感器网络的点覆盖	25
2.2.4 无线传感器网络边界覆盖	25
2.2.5 无线传感器网络覆盖能效评价指标	26
2.3 无线传感器网络连接可靠性	27
2.3.1 无线传感器网络连接可靠性分析	27
2.3.2 基于概率和图论的连接可靠性	29
2.3.3 基于扩散理论的连接可靠性	30
习题 2	31
第 3 章 无线传感器网络通信	32
3.1 无线传感器网络协议结构	32
3.1.1 传统网络协议 OSI 参考模型	32
3.1.2 无线传感器网络协议的分层结构	32

3.2 物理层	34
3.2.1 物理层的概述	34
3.2.2 传感器网络物理层的设计	37
3.3 数据链路层协议	39
3.4 网络层协议	41
3.5 传输层协议	42
3.5.1 Event-to-Sink 传输	43
3.5.2 Sink-to-Sensors 传输	44
3.6 应用层协议	44
3.6.1 传感器管理协议	44
3.6.2 任务分派与数据广播协议	45
3.6.3 传感器查询与数据分发协议	45
3.7 无线传感器网络跨层设计	45
3.7.1 分层设计方法	46
3.7.2 跨层设计方法	46
3.7.3 跨层设计的必要性	48
3.7.4 无线传感器网络跨层设计主要技术	49
习题 3	52

第 4 章 无线传感器网络的支撑技术 53

4.1 时间同步机制	53
4.1.1 时间同步的意义和特点	53
4.1.2 TPSN 时间同步协议	55
4.1.3 时间同步的应用示例	56
4.2 定位技术	57
4.2.1 传感器网络节点定位问题	57
4.2.2 基于测距的定位技术	60
4.2.3 无须测距的定位技术	63
4.2.4 定位系统的典型应用	65
4.3 数据融合	65
4.3.1 多传感器数据融合概述	65
4.3.2 传感器网络中数据融合的作用	67
4.3.3 数据融合技术的分类	69
4.3.4 数据融合的主要方法	71
4.3.5 传感器网络应用层的数据融合示例	73
4.4 能量管理	75
4.4.1 能量管理的意义	75
4.4.2 传感器网络的电源节能方法	76
4.4.3 动态能量管理	78
4.5 容错技术	85

4.5.1	概述	86
4.5.2	故障模型	87
4.5.3	故障检测与诊断	88
4.5.4	故障修复	93
4.6	数据管理	95
4.6.1	系统的结构	95
4.6.2	数据模型	97
4.6.3	查询语言	98
4.6.4	数据存储	100
4.6.5	索引技术	103
4.6.6	查询处理技术	107
4.6.7	数据管理系统实例	112
4.7	服务质量保证	116
4.7.1	无线传感器网络服务质量概述	116
4.7.2	无线传感器网络服务质量研究	118
习题 4		121
第 5 章	无线传感器网络 MAC 层	123
5.1	无线传感器网络 MAC 协议的分类	123
5.2	IEEE 802.11 协议	124
5.2.1	IEEE 802.11 网络拓扑结构	124
5.2.2	IEEE 802.11 协议 MAC 层的工作模式	126
5.2.3	分布式协调功能(DCF)	128
5.2.4	集中式协调功能(PCF)	130
5.2.5	DCF 与 PCF 机制的局限性	131
5.2.6	IEEE 802.11 的 QoS 保障	132
5.3	基于竞争的 MAC 协议	133
5.3.1	S-MAC 协议	133
5.3.2	T-MAC 协议	135
5.3.3	Sift 协议	137
5.4	基于时分复用的 MAC 协议	139
5.4.1	基于分簇网络的 MAC 协议	140
5.4.2	DEANA 协议	140
5.4.3	基于周期性调度的 MAC 协议	141
5.4.4	TRAMA 协议	143
5.4.5	DMAC	146
5.4.6	其他类型的 MAC 协议	148
习题 5		150

第 6 章 无线传感器网络协议的技术标准	151
6.1 技术标准的意义	151
6.2 IEEE 1451 系列标准	152
6.3 IEEE 802.15.4 标准	156
6.3.1 IEEE 802.15.4 标准概述	156
6.3.2 物理层	157
6.3.3 MAC 子层	158
6.3.4 符合 IEEE 802.15.4 标准的传感器网络实例	160
6.4 ZigBee 协议标准	162
6.4.1 ZigBee 概述	162
6.4.2 网络层规范	165
6.4.3 ZigBee 系统软件的设计开发	166
6.4.4 符合 ZigBee 规范的传感器网络实例	168
6.5 蓝牙(Bluetooth)	170
6.5.1 蓝牙协议栈简介	170
6.5.2 蓝牙协议栈分析	170
6.5.3 蓝牙技术的发展趋势	179
6.6 UWB	179
6.6.1 UWB 技术概括	179
6.6.2 UWB 主流技术	180
6.6.3 UWB 的发展趋势	181
习题 6	182
第 7 章 无线传感器网络的路由协议	183
7.1 路由协议概述	183
7.1.1 无线传感器网络路由协议的考虑因素	183
7.1.2 路由的过程	184
7.1.3 无线传感器网络路由协议分类方法	186
7.2 平面路由协议	187
7.2.1 Flooding 和 Grossing 协议	187
7.2.2 SPIN 协议	188
7.2.3 SAR、DD 和 MCFA 协议	189
7.3 层次路由协议	190
7.3.1 LEACH	190
7.3.2 PEGASIS	191
7.3.3 TEEN	192
7.3.4 APTEEN、TTDD 和 EARSN 协议	193
7.3.5 平面路由协议和层次路由协议比较	193
7.4 能量感知路由	194

7.4.1	能量消耗源	194
7.4.2	能量路由	195
7.4.3	能量多路径路由	196
7.5	基于查询的路由	197
7.5.1	定向扩散路由	197
7.5.2	谣传路由	199
7.6	地理位置路由	200
7.6.1	GEAR 路由	201
7.6.2	GAF 路由	203
7.6.3	GPSR 路由	204
7.6.4	GEM 和 MECN 路由	206
7.7	可靠路由协议	207
7.7.1	不相交多路径路由机制	207
7.7.2	ReInForM 路由	208
7.7.3	SPEED 协议	210
7.8	路由协议自主切换	211
习题 7		212

第 8 章 无线传感器网络安全 213

8.1	无线传感器网络安全概述	213
8.1.1	无线传感器网络安全威胁模型	213
8.1.2	无线传感器网络安全面临的障碍	213
8.1.3	无线传感器网络安全要求	215
8.1.4	无线传感器网络安全解决方案的评估	217
8.2	无线传感器网络中的安全攻击	217
8.2.1	物理层安全攻击	217
8.2.2	链路层安全攻击	218
8.2.3	对无线传感器网络层(路由)的攻击	219
8.2.4	对传输层的攻击	222
8.3	SPINS 安全解决方案	223
8.3.1	符号	223
8.3.2	SNEP	223
8.3.3	μ TESLA	225
8.3.4	μ TESLA 详细描述	226
8.3.5	SPINS 实现	228
8.3.6	SPINS 性能评估	230
8.4	安全管理	231
8.4.1	预共享密钥模型	232
8.4.2	随机密钥预分布模型	233
8.4.3	基于分簇式的密钥管理	235

8.4.4 基于本地协作的组密钥分发方案	237
习题 8	238
第 9 章 无线传感器网络应用开发	239
9.1 无线传感器网络硬件平台	239
9.1.1 无线传感器网络硬件结构及分类	239
9.1.2 网络节点的硬件开发	241
9.1.3 传感器节点的模块化设计	242
9.1.4 传感器节点开发实例	249
9.2 操作系统与软件开发	252
9.2.1 网络节点的操作系统	252
9.2.2 软件开发	260
9.3 后台管理软件	263
9.4 无线传感器网络的仿真	268
9.4.1 无线传感器网络仿真的特点	268
9.4.2 通用网络仿真平台	268
9.4.3 针对无线传感器网络的仿真平台	272
9.4.4 无线传感器网络工程测试床	278
9.5 无线传感器网络应用开发	283
9.5.1 WWMS 系统分析	283
9.5.2 WWMS 系统实现的关键技术	284
9.5.3 WWMS 系统整体测试	290
习题 9	290
第 10 章 物联网环境下的无线传感器网络	292
10.1 RFID 与无线传感器网络的整合	292
10.1.1 RFID 的基础理论	292
10.1.2 RFID 和无线传感器网络整合的原因	293
10.1.3 RFID 标签与传感器的整合	295
10.1.4 RFID 标签与无线传感器节点和无线设备的整合	299
10.1.5 读写器与无线传感器节点和无线设备的整合	301
10.1.6 RFID 和传感器的混合	303
10.2 物联网与无线传感器网络	304
10.2.1 物联网的基本概念	304
10.2.2 物联网环境下的无线传感器网络技术	305
习题 10	306
参考文献	307

第1章

无线传感器网络概述

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,它综合了传感器、嵌入式计算、网络及通信、分布式信息处理等技术。

本章首先对无线传感器网络的基本概念、特征进行简要的介绍,然后介绍无线传感器网络的关键性能指标和应用,最后介绍无线传感器网络的研究历史。

1.1 无线传感器网络的基本概念

目前无线网络可分为两种,如图 1-1 所示。一种是有基础设施网,需要固定基站,例如手机,属于无线蜂窝网,它需要高大的天线和大功率基站来支持,基站就是最重要的基础设施。另外,使用无线网卡上网的无线局域网,由于采用了接入点这种固定设备,也属于有基础设施网。另一种是无基础设施网,又被称为无线 Ad Hoc 网络,节点是分布式的,没有专门的固定基站。

无线 Ad Hoc 网络又可分为两类。一类是移动 Ad Hoc 网络,它的终端是快速移动的。一个典型的例子是美军 101 空降师装备的 Ad Hoc 网络通信设备,保证在远程空投到一个陌生地点之后,在高度机动的装备车辆上仍然能够实现各种通信业务,而无须借助外部设施的支持。另一类就是无线传感器网络,它的节点是静止的或者移动很慢。

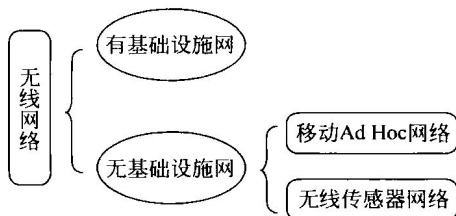


图 1-1 无线网络的分类

在移动自组织网络(Mobile Ad hoc NETwork, MANET)出现之初,它指的是一种小型无线局域网,这种局域网的节点之间不需要经过基站或其他管理控制设备就可以直接实现点对点的无线通信,而且当两个通信节点之间由于功率或其他原因导致无法实现链路直接连接时,网内其他节点可以帮助中继信号,以实现网络内各节点的相互通信。由于无线节点是在随时移动的,因此这种网络的拓扑结构也是动态变化的。

无线传感器网络的标准定义是,无线传感器网络是大量的静止或移动的传感器以自组织和多跳的方式构成的无线网络,目的是协作地探测、处理和传输网络覆盖区域内感知对象的监测信息,并报告给用户。

在这个定义中,传感器网络有实现数据采集、处理和传输三种功能,而这正对应着现代信息技术的三大基础技术,即传感器技术、计算机技术和通信技术,它们分别构成了信息系统的“感官”、“大脑”和“神经”三个部分。因此,无线传感器网络正是这三种技术的结合,可以构成一个独立的现代信息系统,如图 1-2 所示。

另外,从上述定义可以看出,传感器、感知对象和用户是传感器网络的三个基本要素。无线网络是传感器之间、传感器与用户之间最常用的通信方式,用于在传感器与用户之间建立通信路径。协作式的感知、采集、处理和发布感知信息是传感器网络的基本功能。

一组功能有限的传感器节点协作地完成大的感知任务,是传感器网络的重要特点。传感器网络中的部分或全部节点可以

慢速移动,拓扑结构也会随着节点的移动而不断地动态变化。节点间以 Ad Hoc 方式进行通信,每个节点都可以充当路由器的角色,并且都具备动态搜索、定位和恢复连接的能力。

传感器节点由电源、感知部件、嵌入式处理器、存储器、通信部件和软件这几部分构成。电源为传感器提供正常工作所必需的能源。感知部件用于感知、获取外界的信息,并将其转换为数字信号。处理部件负责协调节点各部分的工作,如对感知部件获取的信息进行必要的处理、保存,控制感知部件和电源的工作模式等。通信部件负责与其他传感器或用户的通信。软件为传感器提供必要的软件支持,如嵌入式操作系统、嵌入式数据库系统等。

传感器网络的用户是感知信息的接收者和使用者,可以是人也可以是计算机或其他设备。例如,军队指挥官可以是传感器网络的用户,一台由飞机携带的移动计算机也可以是传感器网络的用户。一个传感器网络可以有多个用户,一个用户也可以是多个传感器网络的使用者。用户可以主动地查询或收集传感器网络的感知信息,也可以被动地接收传感器网络发布的信息。用户对感知信息进行观察、分析、挖掘以制定决策,或对感知对象采取相应的行动。

感知对象是用户感兴趣的监测目标,也是传感器网络的感知对象,如坦克、军事人员、动物、有害气体等。感知对象一般通过表示物理现象、化学现象或其他现象的数字量来表征,如温度、湿度等。一个传感器网络可以感知网络分布区域内的多个对象,一个对象也可以被多个传感器网络所感知。

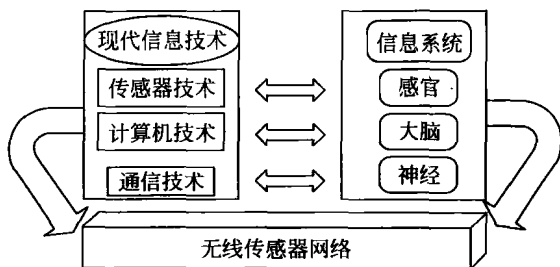


图 1-2 现代信息技术与无线传感器网络之间的关系

1.2 无线传感器网络的特征

1.2.1 与现有无线网络的区别

无线自组网(Mobile Ad Hoc Network)是一个由几十到上百个节点组成的、采用无线通信方式的、动态组网的多跳的移动性对等网络。这种网络的用途是通过动态路由和移动管理技术传输能达到服务质量要求的信息流。

传感器网络虽然与无线自组网有相似之处,但也存在着很大的差别。传感器网络是集成了监测、控制以及无线通信的网络系统,节点数目更为庞大,会有上千甚至上万,节点分布更为密集。同时,由于环境影响和能量消耗,节点更容易出现故障。而且,环境干扰和节点故障易造成网络拓扑结构的变化。另外,通常情况下,大多数传感器节点是固定不动的。

另外,传感器节点具有的能量、处理能力、存储能力和通信能力等都十分有限。传统无线网络的首要设计目标是提供高服务质量和高效带宽利用,其次才考虑节约能源。而传感器网

络的首要设计目标是能源的高效使用,这也是传感器网络 and 传统网络最重要的区别之一。

1.2.2 与现场总线的区别

在自动化领域,现场总线控制系统(Fieldbus Control System,FCS)正在逐步取代一般的分布式控制系统(Distributed Control System,DCS),各种基于现场总线的智能传感器/执行器技术得到了迅速发展。现场总线是应用在生产现场和微机化测量控制设备之间,实现双向串行多节点数字通信的系统,也被称为开放式、数字化、多点通信的底层控制网络。

现场总线作为一种网络形式,是专门为实现在严格的实时约束条件下工作而特别设计的。

现场总线技术将专用微处理器植入传统的测量控制仪表,使它们各自具有数字计算和数字通信的能力,然后采用简单连接的双绞线等作为总线,把多个测量控制仪表连接成网络系统,并按公开、规范的通信协议,在位于现场的多个微机化测量控制设备之间和现场仪表与远程监控计算机之间实现数据传输与信息交换,形成各种适应实际需要的自动控制系统。

现场总线是 20 世纪 80 年代中期在国际上发展起来的。随着微处理器与计算机功能的不断增强和价格的降低,计算机与计算机网络系统得到了迅速发展。现场总线可实现整个企业的信息集成,实现综合自动化,形成工厂底层网络,完成现场自动化设备之间的多点数字通信,实现底层现场设备之间和生产现场与外界的信息交换。

目前市场上较为流行的现场总线有 CAN(控制局域网)、Lonworks(局部操作网络)、Profibus(过程现场总线)、HART(可寻址远程传感器数据通信)和 FF(基金会现场总线)等。

由于严格的实时性要求,这些现场总线的网络构成通常是有线的。在开放式通信系统互联参考模型中,它利用的只有第一层物理层、第二层链路层和第七层应用层,避开了多跳通信和中间节点的关联队列延迟。然而,尽管固有有限差错率不利于实时,人们仍然致力于在无线通信中实现现场总线的构想。

由于现场总线是通过报告传感数据从而控制物理环境的,所以从某种程度上说它与传感器网络非常相似,甚至可以将无线传感器网络看作是无线现场总线的实例。但是两者的区别是明显的,无线传感器网络关注的焦点不是数十毫秒范围内的实时性,而是具体的业务应用,这些应用能够容许较长时间的延迟和抖动。另外,基于传感器网络的一些自适应协议在现场总线中并不需要,如多跳、自组织的特点,而且现场总线及其协议也没有考虑节约能源问题。

1.2.3 传感器节点的限制

传感器节点在实现各种网络协议和应用系统时,也存在一些限制和约束。

1. 电源能量有限

传感器节点体积微小,通常只携带能量十分有限的电池。由于传感器节点个数多、成本要求低、分布区域广,而且部署区域环境复杂,有些区域甚至人员不能到达,所以要传感器节点通过更换电池的方式来补充能源是不现实的。如何高效使用能量来最大化网络生命周期是传感器网络应用所必须考虑的问题。

传感器节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。随着集成电路工艺的进步,传感器和处理器模块的功耗变得很低,绝大部分能量消耗在无线通信模块上。

如图 1-3 所示为传感器节点各部分能量消耗的情况,从图中可知传感器节点的绝大部分能量消耗在无线通信模块。传感器节点传输信息时要比执行计算时更消耗电能,在 100 米距离上传输 1 比特信息需要的能量大约相当于执行 3000 条计算指令所消耗的能量。

无线通信模块存在发送、接收、空闲和睡眠 4 种状态。无线通信模块在空闲状态时会一直监听无线信道的使用情况,检查是否有数据发送给自己,而在睡眠状态则关闭通信模块。从图 1-3 中可以看出,无线通信模块在发送状态的能量消耗最大,在空闲状态和接收状态的能量消耗接近,略少于发送状态的能量消耗,在睡眠状态的能量消耗最少。如何让网络通信更有效率,例如减少不必要的转发和接收,不需要通信时尽快进入睡眠状态,是传感器网络协议设计需要重点考虑的问题。

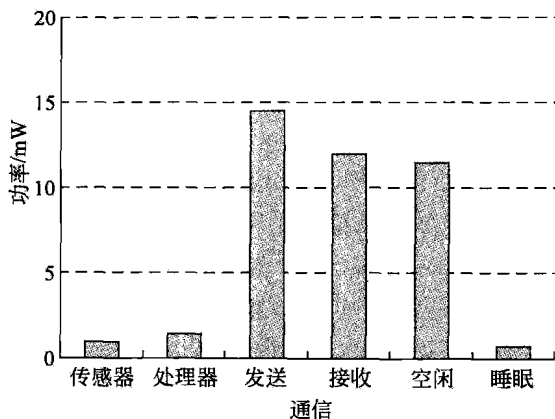


图 1-3 传感器节点能量消耗情况

2. 通信能力有限

无线通信的能量消耗与通信距离的关系如下。

$$E = k \times d^n$$

其中 k 是系数,参数 n 满足关系 $2 < n < 4$ 。 n 的取值与很多因素有关,例如传感器节点部署贴近地面时,障碍物多、干扰大, n 的取值就大。天线质量对信号发射质量的影响也很大。考虑诸多因素,通常取 n 为 3,即通信能耗与距离的 3 次方成正比。随着通信距离的增加,能耗将急剧增加。因此,在满足通信连通度的前提下应尽量减少单跳通信距离。一般而言,传感器节点的无线通信半径在 100 米以内比较合适。

考虑到传感器节点的能量限制和网络覆盖区域大,传感器网络采用多跳路由的传输机制。传感器节点的无线通信带宽有限,通常仅有几百 Kbps 的速率。由于节点能量的变化,同时受高山、建筑物、障碍物等地势地貌以及风雨雷电等自然环境的影响,无线通信的性能可能经常变化,会频繁出现通信中断。在这样的通信环境和节点通信能力有限的情况下,如何设计网络通信机制以满足传感器网络的通信需求是传感器网络应用所需要考虑的重点问题。

3. 计算和存储能力有限

传感器节点是一种微型嵌入式设备,要求它价格低、功耗小,这些限制必然导致其携带的处理器能力比较弱,存储器容量比较小。为了完成各种任务,传感器节点需要完成监测数据的采集和转换、数据的管理和处理、应答汇聚节点的任务请求和节点控制等多种工作。

随着低功耗电路和系统设计技术的提高,目前已经开发出了很多超低功耗的微处理器。除了降低处理器的绝对功耗以外,现代处理器还支持模块化供电和动态频率调节功能。利用这些处理器的特性,传感器节点的操作系统设计了动态能量管理和动态电压调节模块,可以更有效地利用节点的各种资源。动态能量管理是在节点周围没有其感兴趣的事件发生时,部分模块处于空闲状态,把这些组件关掉或调到更低能耗的睡眠状态。动态电压调节是在计算负载较低时,通过降低微处理器的工作电压和频率来降低处理能力,从而节约微处理器的能耗。很多处理器,如 StrongARM,都充分考虑了节能问题,并提供了对电压频率调节的支持。

1.2.4 传感器组网的特点

无线传感器网络是信息技术的前沿和交叉领域,集计算机、通信、网络、智能计算、传感器、嵌入式系统、微电子等多个领域于一身。它将大量的多种类型的传感器节点组成自治的网络,

实现对物理世界的动态智能协同感知。如果说移动通信连接的是人和人,传感器网络连接的则是物和物。

无线传感器网络除了具有 Ad Hoc 网络的移动性、断接性、电源能力局限性等共同特征以外,在组网方面具有一些鲜明的自身特点。它的主要特点包括自组织性、以数据为中心、应用相关性、动态性、网络规模大和需要高的可靠性等。

1. 自组织性

在传感器网络的应用中,通常传感器节点被放置在没有基础结构设施的地方。传感器节点的位置有时不能预先精确设定,节点之间的相互邻居关系预先也不知道,如通过飞机将传感器节点播撒到面积广阔的原始森林,或随意放置到人员不可到达或危险的区域。

由于传感器网络的所有节点的地位都是平等的,没有预先指定的中心,各节点通过分布式算法来相互协调。在无人值守的情况下,节点能自动组织起一个探测网络。正因为没有中心,网络不会因为单个节点的脱离而受到损害。

以上功能的实现要求传感器节点具有自组织的能力,能够自动地进行配置和管理,通过拓扑控制机制和网络协议,自动形成转发监测数据的多跳无线网络系统。

在传感器网络的使用过程中,部分传感器节点由于能量耗尽或环境因素而失效,也有一些节点为了替换失效节点、增加监测精度而被补充到网络中,这样在传感器网络中的节点个数就会动态地增加或减少,从而使网络的拓扑结构随之动态变化。传感器网络的自组织性要适应这种网络拓扑结构的动态变化。

2. 以数据为中心

目前的互联网是先有计算机终端系统,然后再互连成为网络的,终端系统可以脱离网络独立存在。在因特网中网络设备是用网络中唯一的 IP 地址来标识的,资源定位和信息传输依赖于终端、路由器和服务器等网络设备的 IP 地址。如果希望访问因特网中的资源,首先要知道存放资源的服务器的 IP 地址。可以说目前的因特网是一个以地址为中心的网络。

传感器网络是任务型的网络,脱离传感器网络谈论传感器节点是没有任何意义的。传感器网络中的节点采用节点编号标识,节点编号是否需要全网唯一,取决于网络通信协议的设计。

由于传感器节点属于随机部署,其构成的传感器网络与节点编号之间的关系是完全动态的,表现为节点编号与节点位置没有必然的联系。用户使用传感器网络查询事件时,直接将所关心的事件通告给网络,而不是通告给某个确定编号的节点。网络在获得指定事件的信息后汇报给用户。这种以数据本身作为查询或传输线索的思想,更接近于自然语言交流的习惯,因此说传感器网络是一个以数据为中心的网络。

例如,在目标跟踪的传感器网络中,跟踪目标可能出现在任何地方,对目标感兴趣的用户只关心目标出现的位置和时间,并不必关心是哪个节点监测到目标。事实上,在目标移动的过程中,必然是由不同的节点提供目标的位置消息。

3. 应用相关性

传感器网络用来感知客观物理世界,获取物理世界的信息量。客观世界的物理量多种多样,不可穷尽。不同的传感器网络应用关心不同的物理量,因此对传感器的应用系统也有多种多样的要求。

不同的应用对传感器网络的要求不同,它们的硬件平台、软件系统和网络协议会有所差别。因此,传感器网络不可能像因特网那样,存在统一的通信协议平台。不同的传感器网络的应用虽然存在一些共性问题,但在开发传感器网络应用系统时,人们更关心传感器网络的差

异。只有让具体系统更贴近于应用,才能符合用户的需求和兴趣点。针对每一个具体应用来研究传感器网络技术,这是传感器网络设计不同于传统网络的显著特征。

4. 动态性

传感器网络的拓扑结构可能因为如下因素而改变。

- (1) 环境因素或电能耗尽造成的传感器节点出现故障或失效。
- (2) 环境条件变化可能造成的无线通信链路带宽变化,甚至时断时通。
- (3) 传感器网络的传感器、感知对象和观察者这三要素都可能具有移动性。
- (4) 新节点的加入。

由于传感器网络的节点是处于变化的环境中的,它的状态也在相应的发生变化,加之无线通信信道的不稳定性,网络拓扑结构也在不断地调整变化,而这种变化方式是无人能准确预测出来的。这就要求传感器网络系统能够适应这种变化,具有动态的系统可重构性。

5. 网络规模大

为了获取精确信息,在监测区域通常会部署大量的传感器节点,传感器节点数量可能会成千上万。传感器网络的大规模性包括两方面含义:一方面是传感器节点分布在很大的地理区域内,例如在原始森林采用传感器网络进行森林防火和环境监测,需要部署大量的传感器节点;另一方面,传感器节点部署很密集,在一个面积不是很大的空间内,密集部署了大量的传感器节点,实现对目标的可靠探测、识别与跟踪。

传感器网络的大规模性具有如下优点。

- 通过不同空间视角获得的信息具有更大的信噪比。
- 分布式地处理大量的采集信息,能够提高监测的精确度,降低对单个节点传感器的精度要求。
- 大量冗余节点的存在,使得系统具有很强的容错性能。
- 大量节点能增大覆盖的监测区域,减少探测遗漏地点或者盲区。

6. 可靠性

传感器网络特别适合部署在恶劣环境或人员不能到达的区域。传感器节点可能工作在露天环境中,遭受太阳的暴晒或风吹雨淋,甚至遭到无关人员或动物的破坏。同时,传感器节点往往采用随机部署,如通过飞机撒播或发射炮弹到指定区域进行部署。这些都要求传感器节点非常坚固,不易损坏,能够适应各种恶劣环境条件。

无线传感器网络通过无线电波进行数据传输,虽然省去了布线的烦恼,但是相对于有线网络,低带宽成为了它的天生缺陷。同时,信号之间还存在相互干扰,信号自身也在不断地衰减。因此,网络通信的可靠性也是不容忽视的。

另外,由于监测区域环境的限制以及传感器节点数目巨大,不可能人工“照顾”到每个节点,网络的维护十分困难甚至是不可维护的。传感器网络的通信保密性和安全性也十分重要,防止监测数据被盗取和收到伪造的监测信息。因此,传感器网络的软硬件必须具有鲁棒性和容错性。

1.3 无线传感器网络的关键性能指标

根据无线传感器网络的特有结构及应用的特殊要求,可以总结出无线传感器网络系统的关键性能评估指标,包括网络的工作寿命、网络覆盖范围、网络搭建的成本和难易程度、网络响

应时间。这些评定指标之间是相互关联的,通常为了提高其中一个指标必须降低另一个指标,比如降低网络的响应时间性能可以延长系统的工作寿命。这些指标构成的多维空间可以用于评估一个无线传感器网络系统的整体性能。

1. 网络的工作寿命

任何一个传感器网络搭建之前首先要考虑的就是系统的工作寿命。环境数据采集和安全监测应用中的网络节点一般都布置在无人区域,常常需要数月甚至几年的工作寿命,长期保持稳定的工作状态显得尤其重要。

影响网络工作寿命的首要因素是能源供给。每个网络节点必须能够管理自身的能源供给以使网络寿命最大化。节点的最小工作寿命往往会成为限制网络系统正常工作的重要因素,例如,安全监测应用中任意一个节点的失效都可能使系统失效。在某些应用场合中,网络可以采用外部电源供电,如采用相关建筑物的供电系统对部分甚至全部网络节点供电。然而,对于无线传感器网络系统来说,首要的优点是网络搭建的简易性,采用外部供电方式恰恰削弱了无线传感器网络的这一优点。但开发者可以采取折中的方法,即只对很少的特殊节点采用外部供电的方式。

在多数的应用场合中,大部分网络节点还是采用自身供电方式,其能源储备能够维持数年时间。或者这些网络节点能够通过附加设备从所在环境中获取能源,例如太阳能电池和压电换能装置,选择这些供电方式的前提是节点的平均功耗足够低。在已经确定了能源供给的情况下,决定系统工作寿命最主要的因素是无线收发器的功耗大小。网络节点的无线收发器的功耗是网络系统最主要的功耗,可以通过降低传输信号的输出功率或者降低无线收发器的工作频率来降低功耗,但不管哪种方法都会影响网络系统其他方面的性能。

2. 网络覆盖范围

无线传感器网络的第二大性能指标是网络的覆盖范围。对于一个实际网络来说,能够覆盖更大的范围通常是有意的事情,而且终端用户的使用也会更方便。在无线传感器网络中,覆盖范围不仅仅局限于单个节点的无线通信距离。因为采用多跳通信技术可以大大扩展网络的覆盖范围,理论上可以无限地扩展网络的覆盖范围。但在实际应用中,覆盖范围越大,也就意味着信息传递所需经过的节点越多,同时对于处于关键路径的节点来说,需要传输的次数也会越多,因此会增加网络节点的功耗,降低网络的工作寿命。

和覆盖范围相关的是网络容纳节点的数量,即可扩展性。可扩展性是无线传感器网络的一大优点。网络用户可以先组建很小的网络,随后不断增加传感器节点以采集更多的信息。该网络采用的技术必须能满足其进行网络扩展的要求。与此同时,在网络扩展过程中,必须注意到,增加系统中网络节点的数量会影响到系统的工作寿命和采样速率。因为更多的节点意味着更多数据的无线传输和更多的功耗,并且原来的采样周期也会相应增加。

3. 网络搭建成本和难易程度

网络搭建容易是无线传感器网络的突出优点。由于无线传感器网络通常可以自组织网络,因此施工人员就无须了解其底层的通信机制,没有经过特别培训的人员也可以在其关心的区域中组建简易的无线传感器网络。理想情况下,传感器网络可以根据任意的节点部署方式自组织网络。但是在真实的应用环境中,不同的场景和目的制约着节点的部署方式,节点不可能任意无限制地部署。所以在搭建网络时,无线传感器网络还应该能够自我评定网络组建的性能以及指标,并发现潜在的问题,这就要求任意一个节点都可以发现与其相关的链路信息并评定其链接性能。