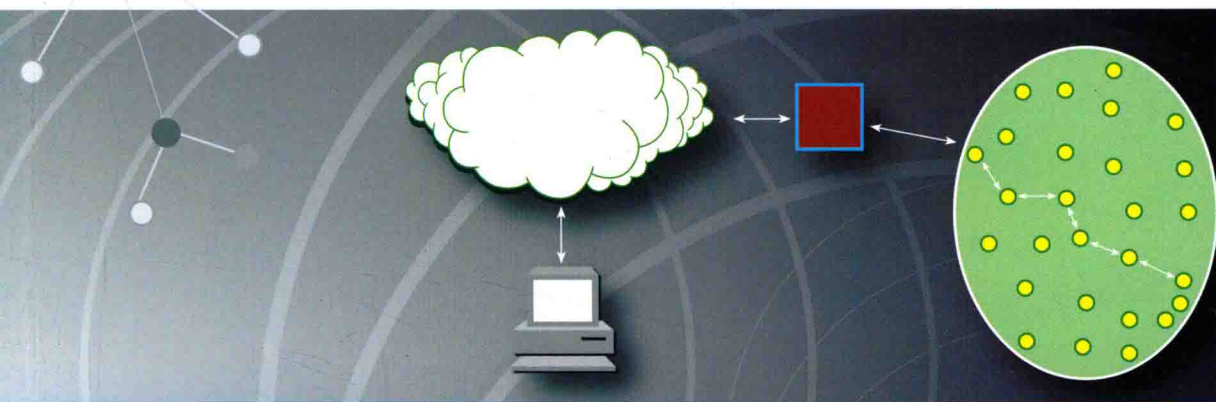


无线传感器网络 路由协议及应用

龚本灿 汪祥莉 任 顺 著



科学出版社

无线传感器网络路由协议及应用

龚本灿 汪祥莉 任 顺 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

在无线传感器网络中,路由协议负责将传感器节点采集的数据逐跳转发至汇聚节点,其性能至关重要。传感器节点依靠电池供电,计算、存储和通信能力十分有限,资源的局限性给路由协议的设计带来了巨大挑战,需要研究与之相适应的路由协议。本书分为10章。第1章介绍无线传感器网络的基本知识;第2章介绍当前典型的无线传感器网络路由协议;第3章介绍非均匀密度的节点部署方案与分簇路由协议;第4章介绍基于蚁群算法的无线传感器网络QoS路由协议;第5章介绍基于地理位置的无线传感器网络多播路由协议;第6章介绍基于小世界特性的异构传感器网络优化路由算法;第7章介绍传感器网络中自适应汇聚路由算法;第8章介绍基于动态规划的传感器网络路径选择算法;第9章介绍无线传感器网络在现代农业中的应用;第10章介绍无线传感器网络在智能电网中的应用。

本书细致而全面地展示了无线传感器网络路由领域的研究进展和作者研究团队的最新成果,可用于无线传感器网络路由研究的教学,也可供科研人员以及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络路由协议及应用/龚本灿,汪祥莉,任顺著.
—北京:科学出版社,2017.4
ISBN 978-7-03-052537-6

I. ①无… II. ①龚… ②汪… ③任… III. ①无线电通信—
传感器—通信网—路由协议 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第079354号

责任编辑:王 哲 霍明亮 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年4月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2017年4月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:315 000

定价:89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书编委会

主要著者（以姓氏笔画排序）

王纪华 王少蓉 任 东 任 顺

李尚宇 李 雨 汪祥莉 陈 鹏

龚本灿 董方敏 潘立刚

前 言

随着传感器技术、嵌入式技术、分布式信息处理技术和无线通信技术的发展,无线传感器网络逐渐成为社会的研究热点,在军事、环境监测、家用、医疗卫生和商业等领域,具有广泛的应用前景。由于无线传感器网络资源的局限性,许多成熟的路由技术不再适合于它,因此,迫切需要根据其自身特点研究合适的路由协议。本书对无线传感器网络高效路由技术及其在农业和智能电网中的应用进行了研究,并在以下六个方面取得了一定的研究成果。

(1) 非均匀密度的节点部署方案与分簇路由协议。由于传感器节点有着严格的能量限制,并且难以进行能量补充,如何合理地利用网络能量是设计无线传感器网络路由协议所面临的首要问题。将传感器节点组织成簇的形式有利于降低节点的能耗和提高网络的可扩展性,但分簇路由协议存在“热区”问题。本书提出了一种非均匀密度的节点部署方案及相应的分簇(unequal density based node deployment and clustering, UDNDNC)路由协议,在数据转发量较大的区域部署更多的节点,以提供足够的能量供簇间转发时使用,并从理论上分析了不同网络区域最优的节点分布密度。

(2) 基于蚁群算法的无线传感器网络 QoS (quality of service) 路由协议。近年来,无线传感器网络中对时延敏感的应用越来越多,这些应用要求从网络得到的信息是连续的、实时的,服务质量成为系统设计者必须考虑的因素之一。本书提出了一种基于蚁群算法的按需驱动的 QoS 路由(ant colony algorithm based QoS routing, ACQR)协议,并设计了相应的状态转移规则和信息素更新规则。

(3) 基于地理位置的无线传感器网络多播路由协议。多播能够最大限度地节省网络带宽、降低能量消耗。现有的启发式算法主要存在以下问题:①需要网络的全局信息,这在大型无线传感器网络中是不现实的;②计算的时间和空间复杂度大,难以在普通传感器节点上实现;③依靠预先建立的路径,通信开销大。本书提出了一种基于地理位置的无线传感器网络多播路由协议(geographic multicast routing protocol, GMRP),该协议不需要预先建立路径,计算简单,通信开销小。

(4) 基于小世界特性的异构传感器网络优化路由算法。针对异构无线传感器网络中异构节点的最优部署和节点的路由问题,提出了一种基于混合整数规划的异构网络分簇路由算法(clustering heterogeneous network based on mixed integer programming, CHNMIP)。它克服了传统异构传感器网络路由算法中异构节点部署优化程度不高、普通节点传输路径单一的缺陷,降低了网络能耗,使节点能量消耗更加均匀,延长了网络生存时间。

(5) 传感器网络中自适应汇聚路由算法。针对汇聚开销和传输开销相当的传感器

网络,提出了一种综合考虑汇聚开销和传输开销的最小能耗自适应汇聚路由算法(compressing MEAAT, CMEAAT)。它解决了现有汇聚算法汇聚次数过多的问题,并且对汇聚后的节点数据利用第二代小波零树编码算法(embedded zerotree coding based on second generation wavelets, EZC-SGW)进行压缩,以降低传输能耗。

(6) 基于动态规划的传感器网络路径选择算法。根据无线传感器网络多跳传输的特点,利用动态规划思想分别提出了最小能耗、能耗均衡和最小时延的优化路由算法。它克服了传统优化路由算法计算复杂度较高的不足,在能耗、能量均衡和时延等方面优于传统路由算法。

本书作者的研究工作得到了“十二五”农村领域国家科技计划课题(863子课题)——农田小生境监测无线传感器网络开发(2013AA10230207)、国家自然科学基金项目——面向水电机组维护的增强现实云数据获取与虚实融合方法研究(61272236)、新能源电力系统湖北省协同创新中心项目——微电网能量管理系统关键技术(SDKJ-0001)、国家重点研发计划项目“城镇安全风险评估与应急保障技术研究”子课题“城市多部门协同的网格化安全监测和保障技术装备及集成信息平台(2016YFC0802503)”的资助,在此表示感谢!

由于作者水平所限,加之无线传感器网络路由技术的研究仍处于不断发展和变化之中,书中不足之处在所难免,恳请专家、读者批评指正。

本书编写分工如下:任顺、任东主要撰写第1~2章,董方敏、陈鹏、龚本灿主要撰写第3~5章,汪祥莉(武汉理工大学)、王少蓉主要撰写第6~8章,李雨、李尚宇、王纪华、潘立刚主要撰写第9~10章。全书由龚本灿统稿。

著 者

2016年10月于三峡大学

目 录

前言

第 1 章	无线传感器网络简介	1
1.1	无线传感器网络的基本概念	1
1.2	无线传感器网络的结构	2
1.3	传感器节点的结构	3
1.4	无线传感器网络的特点	4
1.5	无线传感器网络的应用	6
1.6	无线传感器网络的性能指标	8
1.7	无线传感器网络的协议栈	8
1.8	无线传感器网络的关键技术	10
1.9	本章小结	13
第 2 章	无线传感器网络路由协议综述	14
2.1	无线传感器网络路由协议的特点	14
2.2	无线传感器网络路由协议的性能指标	15
2.3	无线传感器网络路由协议的分类	16
2.4	无线传感器网络平面路由协议	17
2.5	无线传感器网络分簇路由协议	21
2.6	无线传感器网络 QoS 路由协议	28
2.7	本章小结	34
第 3 章	非均匀密度的节点部署方案与分簇路由协议	35
3.1	分簇路由协议概述	35
3.1.1	无线传感器网络拓扑结构	35
3.1.2	分簇算法的评价标准	36
3.1.3	分簇算法的分类	37
3.2	节点均匀分布情况下的热区问题	38
3.3	非均匀密度的节点部署方案	39
3.3.1	网络模型	39
3.3.2	相关定义	40
3.3.3	节点部署方案的理论分析	40

3.4	UDNDC 路由协议描述	46
3.4.1	簇生成算法	47
3.4.2	簇间转发树的形成	50
3.4.3	数据采集	51
3.4.4	协议分析	51
3.5	仿真实验	52
3.6	本章小结	59
第 4 章	基于蚁群算法的无线传感器网络 QoS 路由协议	60
4.1	无线传感器网络 QoS 路由问题	60
4.2	蚁群算法及其在网络路由中的应用	61
4.2.1	蚁群算法的原理及特点	61
4.2.2	基本蚁群算法的实现过程	63
4.2.3	基本蚁群算法的改进	65
4.2.4	蚁群算法在网络路由中的应用	68
4.3	基于蚁群算法的无线传感器网络 QoS 路由协议	69
4.3.1	QoS 路由网络模型	69
4.3.2	相关术语和定义	70
4.3.3	蚁群算法规则	73
4.3.4	ACQR 路由协议描述	76
4.4	协议分析与评价	79
4.4.1	协议分析	79
4.4.2	协议评价	79
4.5	仿真实验	80
4.6	本章小结	82
第 5 章	基于地理位置的无线传感器网络多播路由协议	83
5.1	多播路由协议概述	83
5.1.1	Internet 多播路由协议	83
5.1.2	Ad Hoc 多播路由协议	84
5.1.3	无线传感器网络多播路由协议	85
5.2	GMRP 设计	89
5.2.1	网络模型	89
5.2.2	协议的核心思想	89
5.2.3	相关定义	91
5.2.4	多播路由选择算法	93
5.2.5	多播路由的维护	95

5.3	正确性证明和复杂性分析	95
5.4	仿真实验	96
5.5	本章小结	98
第 6 章	基于小世界特性的异构传感器网络优化路由算法	99
6.1	问题的提出	99
6.2	异构传感器网络的小世界特征分析	100
6.2.1	复杂网络的基本概念	100
6.2.2	复杂网络的基本拓扑模型及性质	101
6.2.3	传感器网络的复杂网络特征分析	106
6.2.4	异构传感器网络的小世界特性分析	107
6.3	小世界特性的异构网络路由算法构建	111
6.3.1	小世界特性异构网络的传输方式和能耗模型	111
6.3.2	基于混合整数规划的异构节点优化部署	115
6.4	小世界特性的分簇异构网络路由算法	124
6.4.1	小世界特性分簇异构网络的提出	124
6.4.2	簇头数目的优化计算	125
6.4.3	分簇异构网络路由算法的构建	127
6.4.4	分簇异构网络路由算法的性能分析	128
6.5	仿真实验与分析	131
6.6	本章小结	136
第 7 章	传感器网络中自适应汇聚路由算法	137
7.1	问题的提出	137
7.2	传感器网络数据汇聚的研究和发展	138
7.2.1	数据汇聚基础知识	138
7.2.2	数据汇聚路由算法和能耗的相关研究	142
7.3	最小能耗自适应汇聚路由 MEAAT 的构造算法	146
7.3.1	汇聚网络模型	146
7.3.2	自适应汇聚判断	148
7.3.3	MEAAT 汇聚路由算法及性能分析	154
7.4	基于压缩的最小能耗自适应汇聚路由算法	163
7.4.1	第二代小波分解零树编码算法能耗分析	163
7.4.2	MEAAT 汇聚路由由中压缩性能分析	165
7.4.3	CMEAAT 路由算法结构	169
7.5	仿真实验与分析	172
7.6	本章小结	177

第 8 章	基于动态规划的传感器网络路径选择算法	179
8.1	问题的提出	179
8.2	动态规划模型	180
8.2.1	动态规划的基本原理	180
8.2.2	实际网络的标准化转换	183
8.3	基于动态规划的路由算法	184
8.3.1	最小能耗路由算法	184
8.3.2	基于能量均衡的低能耗路由算法	187
8.3.3	基于最小时延的低能耗路由算法	189
8.4	仿真实验与分析	193
8.5	本章小结	197
第 9 章	无线传感器网络在现代农业中的应用	198
9.1	智能温室环境监控系统架构	198
9.2	智能温室环境监控系统硬件	199
9.3	智能温室环境监控系统软件	201
9.3.1	智能温室监控系统的 Web 架构	201
9.3.2	监测数据读取模块	205
9.3.3	传感器管理模块	206
9.4	传感器数据服务	210
9.4.1	传感数据 XML 文件的定义	210
9.4.2	传感数据 JSON 文件的定义	211
9.5	智能温室环境监控系统应用实例	212
9.5.1	系统架构	212
9.5.2	系统的功能特点	214
9.5.3	软件平台的二次开发	214
9.6	本章小结	218
第 10 章	无线传感器网络在智能电网中的应用	219
10.1	智能电网概述	219
10.1.1	智能电网的概念	219
10.1.2	智能电网的特点	220
10.1.3	智能电网中的传感技术	221
10.2	光纤传感技术	221
10.2.1	光纤传感技术的原理	221
10.2.2	全光纤电流传感器	223
10.2.3	光纤电压传感器	225

10.2.4 光纤光栅传感器	229
10.2.5 分布式光纤传感器	231
10.3 无线传感器网络在智能电网中的应用	233
10.3.1 光纤传感在智能电网中的应用领域	233
10.3.2 基于 Zigbee 技术的传感网	236
10.4 本章小结	237
参考文献	238

第 1 章 无线传感器网络简介

1.1 无线传感器网络的基本概念

无线传感器网络是由大量多功能、低功耗、廉价的传感器节点组成的智能专用网络系统,节点间采用自组织的无线通信方式相互传递信息,协同完成特定功能。它集成了传感器技术、嵌入式计算技术、微电子制造技术、无线电通信技术和软件编程技术等,可以实时采集监控区域中感知对象的各种信息(如温度、湿度、光照、地震波、声音和视频等),并经过处理后传递给观察者。无线传感器网络具有获取信息精度高、部署灵活、扩展方便、价格低廉、性能可靠等优点,在工业、农业、军事侦察、环境监测、反恐抗灾、火灾预警、交通管理、医疗卫生、空间探测等众多领域都有着广阔的应用前景^[1-3]。

现代网络技术的发展已使世界变成了“地球村”,人与人之间可以随时随地进行沟通和交流,但人与物的交流则相对困难,人们对物理世界的感知需要通过传感器来获取。微机电技术的发展使得传感器的尺寸越来越小,甚至可以集成到一块芯片中,而功能却越来越强,可以完成数据的感知、采集、融合和通信,从而极大地扩展了传感器的应用领域。无线传感器网络将从根本上改变人类和自然界的交互方式,把人类的交流领域从虚拟的网络世界延伸到具体的物理世界。使人们随时随地都能够从物理世界获取到大量真实、可靠的信息,真正实现“普适计算”的理念。可以预计,无线传感器网络的广泛应用是一种必然趋势,是信息感知和采集的一场革命,将给人类的生产和生活带来深远的影响^[4]。

无线传感器网络是一个多学科高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域,受到军事界、工业界和研究机构的高度重视。美国《商业周刊》和《技术评论》在有关未来技术发展的研究报告中,分别将其列为 21 世纪将掀起新的产业浪潮的四大高新技术之一和将要改变世界面貌的十大新兴技术之一。无线传感器网络广阔的应用前景和巨大的商业价值引起了世界各国的广泛关注。2000 年,美国国防部将无线传感器网络列为国防部门五个尖端领域之一,并提出了 C4ISRT 军事计划,强调战场信息的采集、处理和运用能力。2002 年欧盟设立了 EYES 无线传感器网络行动方案。2002 年美国 Intel 公司提出了基于微型传感器网络的新型计算发展规划。2003 年美国自然科学基金委员会投资 3400 万美元进行无线传感器网络基础理论的研究。2004 年日本成立了无线传感器网络调查研究会。2005 年美国计算机学会开始出版 *ACM Transactions on Sensor*

Networks，专门刊登无线传感器网络方面的最新研究成果。许多重要的国际学术会议也设立了无线传感器网络方面的专题。

我国一直非常重视无线传感器网络的发展，清华大学、北京大学、中国科学技术大学等国内知名高校和中国科学院等研究机构已全面展开了无线传感器网络的研究，并已取得了丰硕的研究成果。中国国家自然科学基金委员会已经批准了多个无线传感器网络方面的重点项目。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》中，确定了两个与无线传感器网络直接相关的研究方向，突出体现了对无线传感器网络的高度重视。

1.2 无线传感器网络的结构

无线传感器网络一般由传感器节点、汇聚节点（sink）、控制台、Internet 和卫星通信链路组成^[5]，如图 1-1 所示。传感器节点部署在监测区域，实时采集覆盖区域内各种感兴趣的数据，并采用无线多跳通信方式将数据发送到汇聚节点，汇聚节点经 Internet 和卫星链路与控制台相连，最终把数据传递给用户。用户也可以通过控制台对无线传感器网络进行配置和管理，发布数据采集指令。

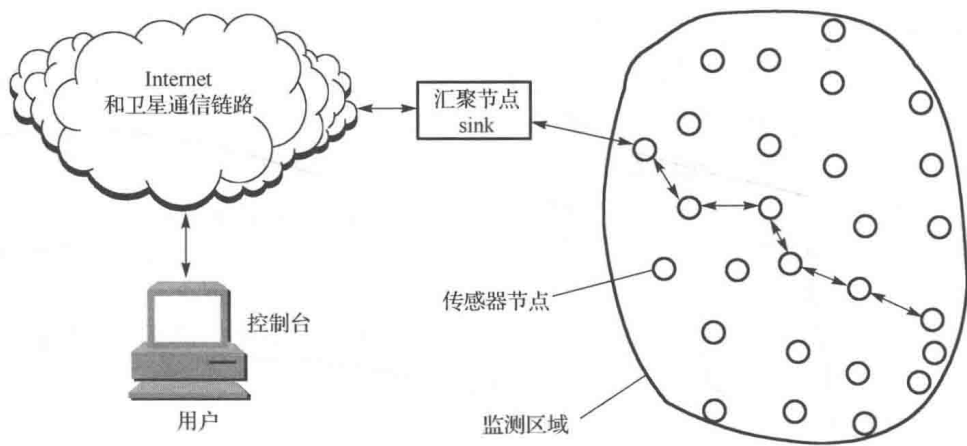


图 1-1 无线传感器网络结构

上述结构中，传感器节点是一个微型嵌入式系统，依靠电池供电，其存储容量和通信处理能力都很弱，通常与汇聚节点无法直接通信，需要依靠其他传感器节点的转发。从网络功能上看，传感器节点具有终端和路由器的双重功能，除了进行本地的数据收集和处理，还要对来自其他传感器节点的数据进行存储、融合和中继等操作。

汇聚节点既可以是一个具有增强功能的传感器节点，有足够的能量供给和更多的内存与计算资源，也可以是没有监测功能仅带有无线通信接口的特殊网关设备。它连接无线传感器网络和 Internet，实现两种协议栈之间的协议转换。

1.3 传感器节点的结构

传感器节点由硬件系统和软件系统两大部分组成,硬件系统的结构如图 1-2 所示,主要包括:数据采集单元、处理单元、通信单元和能量供应模块^[6]。

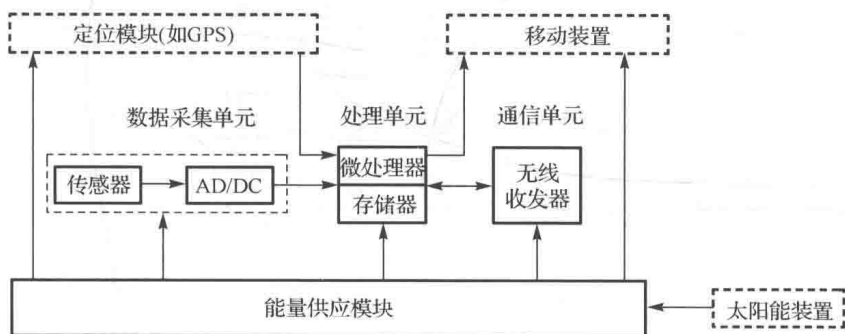


图 1-2 传感器硬件系统的结构

数据采集单元由传感器与 AD/DC 转换器组成,传感器负责采集区域内的数据,AD/DC 转换器负责将模拟量转换成数字量。传感器的能量消耗与单次采集能耗和采集次数有关,可以采用低功耗器件和降低采样频率来减少节点的能耗。由于无线传感器网络节点部署密度大,不同传感器节点的监测区域会有一定的重叠,因此,适当降低采样频率不会影响监测数据的有效性。

处理单元主要由微处理器和存储器构成,是节点的功能控制中心和数据计算中心,负责执行通信协议、处理节点采集的数据和转发来自其他节点的数据。微处理器一般采用微型、低功耗的嵌入式 CPU。

通信单元负责与其他传感器节点交换控制消息和收发数据,其发射能耗与距离的 $n(2 < n < 4)$ 次方成正比,通常采用短距离的多跳通信方式以节省能量。另外,相邻传感器节点采集的数据具有较大的冗余,采用数据融合技术有利于减少网络流量。

能量供应模块为传感器的正常运行提供能量,通常采用电池供电。随着集成电路工艺的进步,数据采集单元和处理单元的能耗已经变得很低,绝大部分的能量消耗在无线通信模块上。图 1-3 给出了传感器节点的能量消耗情况^[7]。

通信模块有四种状态:发送、接收、空闲以及睡眠。从图 1-3 可以看出:发送状态的能耗最大,接收状态和空闲状态的能耗相差不大,而睡眠状态下的能耗远低于空闲能耗。这是因为空闲状态下节点也要监听信道,看是否有数据发给自己,而在睡眠状态下节点完全关闭了通信模块,能量消耗很少。因此,在执行监控任务时,应尽可能采用节点调度算法使节点更多地转入睡眠状态。

软件系统是无线传感器网络的重要组成部分,主要包括嵌入式操作系统(如

uClinux、TinyOS) 和通信协议等, 其性能直接影响网络的生命周期。除了上述几大部分, 个别功能强大的传感器节点可能还包括定位模块 (如 GPS)、移动装置 (如小电机驱动的小车) 以及太阳能装置等。

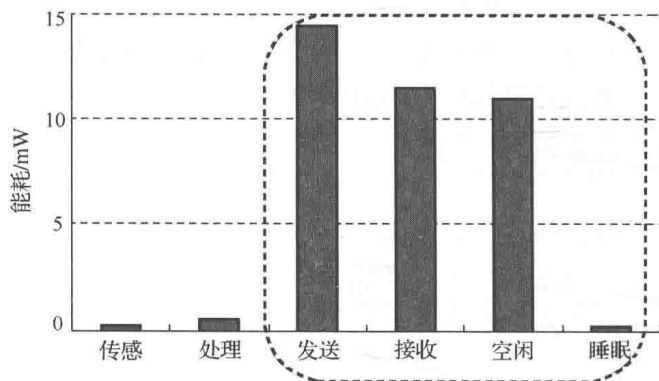


图 1-3 传感器节点的能量消耗情况

1.4 无线传感器网络的特点

无线传感器网络独特的网络结构 and 应用背景使其具有不同于其他网络的特点^[4-6]。

1. 资源有限

首先, 传感器节点是一种微型嵌入式设备, 具有成本低、体积小、功耗少等特点, 使得其能量有限、计算和通信能力弱、存储容量小、不能够处理复杂的任务。其次, 传感器节点的通信带宽窄, 易受高山、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, 通信断接频繁。最后, 传感器节点个数多、分布范围广而且部署区域环境复杂, 在很多应用中通过更换电池来补充能量是不现实的。因此, 如何充分利用有限的资源去完成数据的采集、处理和中继等多种任务是设计无线传感器网络面临的主要挑战。在研制无线传感器网络的硬件系统和软件系统时, 必须充分考虑资源的局限性, 协议层不能太复杂, 并且要以节能为前提。

2. 自组织

无线传感器网络的部署不需要借助任何预设的网络基础设施, 通常采用飞机抛撒在人迹罕至的监测区域内, 无法预先设定节点的位置和节点之间的邻居关系。另外, 由于节能的需要, 传感器节点可以交替运行在工作与睡眠两种状态, 节点随时可能因为各种情况而发生故障, 这些都会引发网络拓扑结构的动态变化。因此, 传感器节点必须具有自组织能力, 能够通过路径发现、拓扑控制和分布式算法相互协调自动完成网络的配置、运行和维护。

3. 大规模

无线传感器网络可以分布在很广的地理区域内,为了获取精确信息,传感器节点通常密集部署,数量成千上万。大量冗余节点的存在,降低了对单个传感器的性能要求,使得无线传感器网络具有较强的容错性和抗毁性,且具有较高的监测精度。在大规模无线传感器网络中,人们更加关心网络的整体可靠性和使用寿命,而不是强调单个传感器节点的作用。

4. 多跳路由

无线传感器网络中节点的功率有限,通信距离只有几十米到几百米,不足以覆盖整个网络区域,如果希望与其射频范围之外的节点通信,则需要经过中间节点的转发。无线传感器网络中没有专门的路由设备,多跳路由是由普通传感器节点完成的。

5. 网络动态性强

无线传感器网络中节点虽然很少移动,但其拓扑结构会随着时间的推移而发生改变。主要原因如下。

- (1) 节点可能因能量耗尽而死亡,也可能因其他故障而失效。
- (2) 传感器节点、汇聚节点和监测对象本身可能具有移动性。
- (3) 环境条件的改变可能引起无线通信链路带宽的变化,甚至时断时续。
- (4) 为了提高精度或延长网络寿命可能向网络中加入新的节点。

因此,无线传感器网络必须具有可重构性,能够适应网络的动态变化。

6. 应用相关性

不同应用的无线传感器网络在工作模式(分周期报告模式、查询模式或事件驱动模式)上各不相同,在关心的物理量、网络规模和构成上也千差万别。例如,有的应用要求传感器节点或汇聚节点是移动的,而有的应用则要求它们是静止的;有的应用具有单个汇聚节点,而有的应用则具有多个汇聚节点。不同的无线传感器网络应用虽然存在一些共性问题,但是不可能像 Internet 一样,有一个统一的通信协议平台,必须根据每一个具体应用的需求,设计与之适应的无线传感器网络技术。

7. 以数据为中心

传统的计算机网络是以地址(MAC 地址或 IP 地址)为中心的,数据的接收、发送和路由都按照地址进行处理。而无线传感器网络是任务型的网络,用户通常不需要知道数据来自于哪一个节点,而更关注数据及其所属的空间位置。例如,在目标跟踪系统中,用户只关心目标出现的位置和时间,并不关心是哪一个节点监测到目标。因此,在无线传感器网络中不一定按地址来选择路径,而可能根据感兴趣的数据建立起从发送方到接收方的转发路径。另外,传统的计算机网络要求实现端到端的可靠传输,

传输过程中不会对数据进行分析 and 处理；而无线传感器网络要求的是高效率传输，需要尽量减少数据冗余，降低能量消耗，数据融合是传输过程中的重要操作。

8. 安全性差

由于采用无线信道、有限电源、分布式控制等技术，传感器节点更容易受到网络攻击。主要攻击形式包括：①修改路由。通过发布虚假的路由信息，攻击者能够达到更改路由表、延长转发路径、割裂网络，增加端到端延时的目的。②选择性转发。节点收到数据包后，可以部分转发或者根本不转发收到的数据包，导致数据包丢失。③Sinkhole 攻击。攻击者假称自己有足够的能量、数据转发高效和可靠，从而吸引大量的邻居节点将其作为下一跳，而攻击者收到数据包后可以采用部分转发或者更改数据包内容的方式，以达到攻击的目的。④拒绝服务攻击。攻击者找到网络中的瓶颈节点，不断地请求它转发数据，耗尽其能量，造成网络分割。此外，还有 Wormhole 攻击、Sybil 攻击、HELLO flood 攻击等。

1.5 无线传感器网络的应用

无线传感器网络在众多领域得到了广泛的应用，主要表现在以下方面。

1. 军事应用

采用飞机将传感器节点播撒到敌方阵地，就能够非常隐蔽地收集战场信息。无线传感器网络具有的高密度、自组织和容错性等特征使其不会因为少数节点的损坏而导致整个系统的崩溃，非常适合在恶劣的战场环境中完成各项监测任务。无线传感器网络已成为 C4ISRT 系统重要的组成部分，受到军事发达国家的普遍关注。美国陆军先后确立了“灵巧传感器网络通信”“无人值守地面传感群”“战场环境侦察与监视系统”等一系列军事研究项目。美国海军最近又提出了协同交战计划，利用传感器从多方面对目标进行探测，以提高测量精度和对目标的命中率^[2,4]。

2. 环境科学

无线传感器网络可用于监控森林火灾、防治洪水、跟踪候鸟等^[7-9]。ALERT 系统^[10]采用无线传感器网络来收集降雨量和土壤含水率等方面的数据，当发生暴雨时可以预测爆发山洪的概率。美国加州大学采用无线传感器网络系统来监测大鸭岛上海燕的生活习性^[11]，研究人员在大鸭岛上部署了 32 个由温度、湿度、气压和红外线传感器组成的节点，并将它们接入 Internet，从而可以实时获取岛上的气候信息，评价海燕筑巢的环境条件。此外，无线传感器网络也可以应用在精细农业中，通过监测土壤的温度、湿度、酸碱度、含水量、光照强度等数据，并借助专业模型来获得农作物生长的最佳条件。