

无线传感器网络原理与OMNeT++实现

罗娟 曾凡仔
李仁发 肖玲
编著

 湖南大学出版社
图书出版基金资助项目

湖南大学出版社



湖南大学出版社
图书出版基金资助项目

无线传感器网络原理与OMNeT++实现

罗娟 曾凡仔 李仁发 肖玲 编著

湖南大学出版社

内 容 简 介

本书以无线传感器网络体系结构为主线,阐述了无线传感器网络物理层、MAC 层、传输层、应用层的原理与协议。并通过 OMNeT++ 仿真实现各层具有代表性的协议和应用实例。

本书可作为高等院校通信、自动化、信息等专业的研究生课程指导教材,也可作为无线传感器网络相关领域工程技术人员的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络原理与 OMNeT++ 实现/罗娟,曾凡仔,李仁发,肖玲编著. —长沙:湖南大学出版社,2011. 7

ISBN 978 - 7 - 5667 - 0021 - 6

I. ①无… II. ①罗…②曾…③李…④肖… III. ①无线电通信—传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 145413 号

无线传感器网络原理与 OMNeT++ 实现

Wuxian Chuanganqi Wangluo Yuanli yu OMNeT++ Shixian

作 者: 罗 娟 曾凡仔 李仁发 肖 玲 编著

责任编辑: 张建平

出版发行: 湖南大学出版社

责任印制: 陈 燕

社 址: 湖南·长沙·岳麓山

邮 编: 410082

电 话: 0731 - 88822559(发行部), 88820006(编辑室), 88821006(出版部)

传 真: 0731 - 88649312(发行部), 88822264(总编室)

电子邮箱: presszhangjp@hnu. cn

网 址: [http://www. presshnu. com](http://www.presshnu.com)

印 装: 长沙利君漾印刷厂

开本: 880×1230 32 开

印张: 7. 25

字数: 209 千

版次: 2011 年 7 月第 1 版

印次: 2011 年 7 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978 - 7 - 5667 - 0021 - 6/TP · 70

定价: 18. 00 元

版权所有, 盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错, 请与发行部联系

前 言

近年来，微电子（MEMS）技术的发展为传感器的微型化提供了可能，微处理技术的发展促进了传感器的智能化，通过 MEMS 技术和射频（RF）通信技术的融合促进了无线传感器及其网络的诞生。传统的传感器正逐步实现微型化、智能化、信息化、网络化，正经历着一个从传统传感器（DumbSensor）→智能传感器（SmartSensor）→嵌入式 Web 传感器（EmbeddedWebSensor）的内涵不断丰富的发展过程。

OMNeT++是开源的基于组件的模块化的开放网络仿真平台，近年来在科学和工业领域里逐渐流行的一种优秀的网络仿真平台，主要用于通信网络和分布式系统的仿真。OMNeT++作为离散事件仿真器，具备强大完善的图形界面接口和可嵌入式仿真内核，同 NS2、OPNET 和 JavaSim 等仿真平台相比，OMNeT++可运行于多个操作系统平台，可以简便定义网络拓扑结构，具备编程、调试和跟踪支持等功能。

本书以无线传感器网络的体系结构为主线，阐述了无线传感器网络物理层、MAC 层、网络层、传输层、应用层的原理与协议，并通过 OMNeT++仿真实现各层具有代表性的协议及应用实例。

全书共分为七章。第一章绪论，主要介绍了无线传感器网络体系结构、应用、挑战与意义；第二章介绍无线传感器网络的仿真平台 OMNeT++的体系结构、语法和仿真过程；第三章无线传感器网络物理层协议，主要讨论了超宽带 UWB 在物理层的仿真实现；第四章 MAC 层协议与仿真，介绍了几种无线传感器网络典型 MAC 协议，并仿真实现了 S-MAC 协议；第五章阐述了网络层协议，并仿真实现典型的路由算法和分簇算法；第六章传输层协议，讨论了适合于无线传感器网络的传输协议以及仿真实现；第七章应用层协议，在传感

器网络应用驱动的前提下，对节点定位、网络管理以及无线传感器网络安全算法进行了探讨，并用 OMNeT++ 进行了仿真实验。

本书阐述了无线传感器各层的协议，并给出了各层协议的仿真实现。通过这些仿真实例使读者能更深入地掌握无线传感器网络原理。全书理论联系实际，内容丰富，覆盖面广，层次清晰，叙述深入浅出，可作为高等院校通信、自动化、信息等专业的研究生课程指导教材，也可作为无线传感器网络相关领域工程技术人员的专业参考书。

本书的第一、二章由李仁发编写，第四、五、六章由罗娟编写，第三、七章由曾凡仔编写，肖玲参与了全书的整理和校对。刘慧中、梁华林、吴迪、周超、吕磊、宋琛、李鹏程、崔艳玲、高利等参与各章节算法在 OMNeT++ 上的具体实现的仿真实验。

本书得到国家自然科学基金“一类复杂环境下的无线传感器网络定位算法研究”的资助。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，书中难免有错误和不当之处，请读者批评指正。

编 者

2011 年 6 月

目 次

第 1 章 无线传感器网络概述

第 1 节 无线传感器网络	1
第 2 节 无线传感器网络的结构	2
第 3 节 无线传感器网络的特征	9
第 4 节 无线传感器网络的应用领域	10
第 5 节 无线传感器网络存在的问题与挑战	13
第 6 节 仿真器概述	15
参考文献	19

第 2 章 OMNeT++ 简介

第 1 节 OMNeT++ 框架	20
第 2 节 OMNeT++ 的安装	23
第 3 节 OMNeT++ 语法	23
第 4 节 仿真过程	38
第 5 节 配置文件 omnetpp.ini	39
第 6 节 结果分析工具	40
第 7 节 结束语	42
参考文献	42

第 3 章 物理层仿真

第 1 节 超宽带 (UWB) 的基础知识	43
第 2 节 用 OMNeT++ 对 UWB 进行仿真	49
参考文献	67

第 4 章 MAC 层仿真

第 1 节 无线传感器网络 MAC 层特性及分类	68
--------------------------	----

第 2 节 基于竞争的 MAC 协议	71
第 3 节 无竞争 MAC 协议	74
第 4 节 混合型 MAC 协议	76
第 5 节 其他类型的 MAC 协议	77
第 6 节 基于 OMNeT++ 的 MAC 层协议仿真	79
第 7 节 小 结	97
参考文献	97
第 5 章 网络层仿真	
第 1 节 网络通信模式	100
第 2 节 无线传感器网络协议分类	102
第 3 节 无线传感器网络中平面路由	104
第 4 节 无线传感器网络中层次化路由	107
第 5 节 其他路由算法	109
第 6 节 经典算法的 OMNET 仿真	110
第 7 节 无线传感器网络路由协议研究的发展趋势	127
参考文献	128
第 6 章 传输层仿真	
第 1 节 无线传感器网络传输协议设计	130
第 2 节 无线传感器网络传输协议	135
第 3 节 无线传感器网络与 Internet 的互联	156
参考文献	158
第 7 章 应用层仿真	
第 1 节 无线传感器网络节点定位	161
第 2 节 网络管理	190
第 3 节 安全路由协议的 OMNeT++ 仿真	204
参考文献	220

第 1 章 无线传感器网络概述

目前，人类已经置身于信息时代，而作为信息获取最重要和最基本的技术——传感器技术，得到了极大的发展。大量多功能传感器被运用，并使用无线技术连接，使得信息获取技术从过去的单一化向集成化、微型化和网络化方向发展，逐渐形成无线传感器网络。无线传感器网络是具有信息综合和信息处理能力的传感器网络，融合了传感器技术、微电子技术、无线通信技术、分布式信息处理技术和嵌入式系统技术等多个技术领域，可以实时地检测和采集监控区域内的各种信息，并对这些信息进行分析处理。

无线传感器网络作为新一代的传感器网络，具有非常广泛的应用前景。目前国内外的知名科研机构以及公司都非常重视无线传感器网络的发展。可以预计，无线传感器网络的广泛应用将会给人类的生产和生活的各个领域带来极大的变革。

第 1 节 无线传感器网络

传感器网络被认为是 21 世纪最重要的技术之一，它将会对人类未来的生活方式产生深远影响。关于无线传感器网络的代表性论述出现在 1999 年，题为“传感器走向无线时代”。随后在美国的移动计算和网络国际会议上，提出了无线传感器网络是下一个世纪面临的发展机遇。2003 年，美国《技术评论》杂志（《Technology Review》）评出对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术，传感器网络被列为第一。同年，美国《商业周刊》未来技术专版论述四大新技术时，无线传感器网络也列其中。美国《今日防备》杂志更认为无线传感器网络的应用和发展，将引起一场划时代的军事技术革命和未来战争的变革。2004 年《IEEE Spectrum》杂志发表一期专辑：传感器的国度，

论述无线传感器网络的发展和可能的广泛应用。可以预计,无线传感器网络的发展和广泛应用将对人们的社会生活和产业革命带来极大的影响和产生巨大的推动。

无线传感器网络是由多学科高度交叉的新兴前沿研究热点领域。国内研究机构如中科院、清华大学、国防科技大学、电子科技大学、哈尔滨工业大学以及浙江大学等学术团体都对此进行了跟踪研究。中国下一代互联网示范工程(CNGI)也包含了无线传感器网络节点的研究项目^[1]。

无线传感器网络的研究采用系统发展模式,融合了现代先进的微电子技术、微细加工技术、系统 SoC (System on Chip) 芯片设计技术、纳米材料技术、现代信息通讯技术、计算机网络技术等,实现了微型化、集成化、多功能化及系统化、网络化,特别是满足了无线传感器网络特有的超低功耗系统设计。正因为这些显著的特点,无线传感器网络具有十分广阔的应用前景。尽管传感器网络的研究最初是基于军方电子战的需求,但由于技术的发展和成本的降低,推动无线传感器网络进一步向大规模、低功率方向发展,其应用的范围也进一步扩大,目前无线传感器网络已应用于战场侦察、灾后恢复、环境检测、电力系统检测、交通管理、生产自动化、医疗救护等领域。并且可以作为互联网的极大延伸,成为公认的新兴前沿热点研究领域,被认为是将对 21 世纪产生巨大影响力的技术之一,具有广泛的应用前景。

第 2 节 无线传感器网络的结构

一、无线传感器网络节点结构

无线传感器网络节点的基本组成^[2]如图 1-1 所示,包括如下 4 个基本单元:传感单元(由传感器和模数转换功能模块组成)、数据处理单元(包括 CPU、存储器、嵌入式操作系统等)、数据传输单元(由无线通信等模块组成)以及电源。此外,可以选择的其他功能单

元包括定位系统、移动系统以及电源自供电系统等。

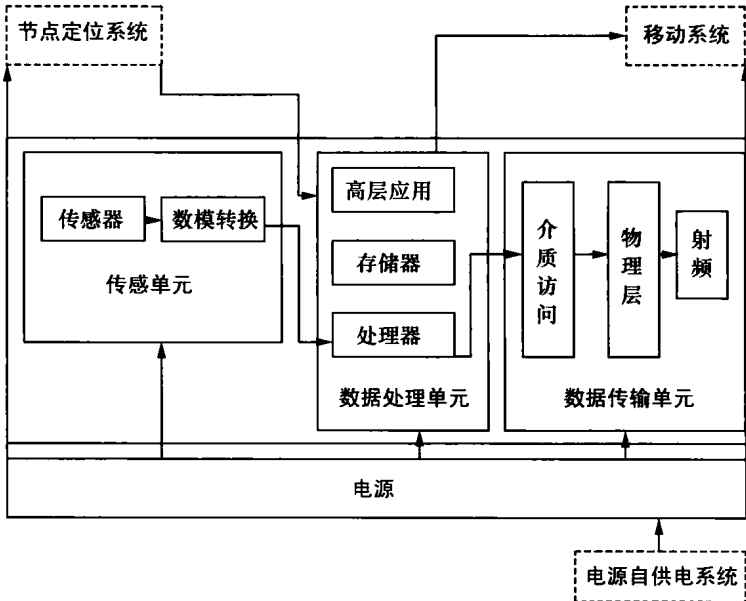


图 1-1 传感器节点结构

传感单元负责监测区域内信息的采集和数据转换，由各类传感器及模数转换设备组成，传感器的类型是由被监测物理信号的形式决定的，如用于温度监测的铂电阻传感器、用于压力传感的电容式传感器等。数据处理单元负责控制整个节点的处理操作、路由协议、同步定位、功耗管理、任务管理等，通常选用低功耗嵌入式微控制器，如 Mica 系列使用的 ATmega128, Telos 平台使用的 TIMSP430。数据传输单元负责与其他节点进行无线通信，交换控制消息和收发采集数据，由低功耗、短距离的无线通信等模块组成，比如 Chipcon 公司的 CC1010、CC2420 等。因为传感器节点需要进行较复杂的任务调度与管理，系统还需要一个微型化的实时操作系统，UC Berkeley 为此专门开发了 TinyOS，也可使用 uC /OS - II。电源是影响节点寿命的关键因素，无线传感器网络的特点决定了节点目前只能使用 AA 型的碱

电池或锂电池，不过已有公司从周围环境取得能量并将其转换成微瓦电能的方法，例如，利用太阳能来给电池充电。

二、无线传感器网络结构

无线传感器网络的基本原理是：节点可以通过飞机布撒或人工布置等方式，大量部署在被感知对象内部或者附近，这些节点通过自组织方式构成无线网络，以协作的方式实时感知、采集和处理网络覆盖区域中的信息，并通过多跳网络将数据经由 Sink 节点（接收发送器）链路将整个区域内的信息传送到远程控制管理中心。反之，远程管理中心也可以对网络节点进行实时控制和操纵。

如图 1-2 所示，整个网络主要包括以下几部分：

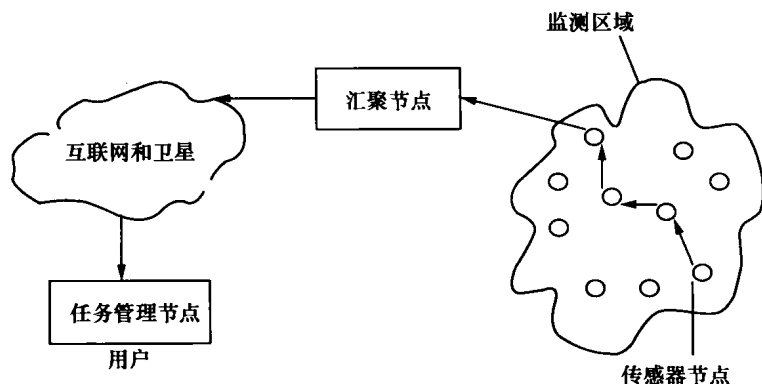


图 1-2 传感器网络结构

网络用户（任务管理节点） 它负责从网络中获取所需要的信息，同时也可以对网络做出各种各样的指示、操作等。

传输介质（Internet 网或通讯卫星） 它是用户与传感网络之间的桥梁和纽带。

Sink 节点（接收发送器） 它拥有足够的能量，其处理能力、存储能力和通信能力相对比较强，连接传感器网络与 Internet 网络等外部网络，实现两种协议栈的通信协议转换，同时发布管理节点的监测任务，并把收集的数据转发到外部网络上。Sink 节点既可以是一

个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。

传感网络 这是传感器网络的核心。在感知区域中，大量的节点自组成网，监测、感知信息向 Sink 节点发送，或接收来自 Sink 节点的操作命令，改变自身的工作状态。传感器节点通常是一个微型的嵌入式系统，它的处理能力、存储能力和通信能力相对较弱，通过携带能量有限的电池供电。从网络功能上看，每个传感器节点兼顾传统网络节点的中断和路由器双重功能，除了进行本地信息收集和数据处理外，还要对其他节点转发来的数据进行存储、管理和融合等处理，同时与其他节点协作完成一些特定任务。目前传感器节点的软硬件技术是传感器网络研究的重点。

三、无线传感器网络协议栈

随着传感器网络的深入研究，研究人员提出了多个传感器节点上的协议栈。图 1-3 (a) 所示是早期提出的一个协议栈，这个协议栈包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层，与互联网协议栈的五层协议相对应。另外，协议栈还包括能量管理平台、移动管理平台和任务管理平台。这些管理平台使得传感器节点能够按照能源高效的方式协同工作，在节点移动的传感器网络中转发数据，并支持多任务和资源共享。各层协议和平台的功能如下：

物理层：

负责数据的调制、发送与接收，涉及传输的媒介、频段的选择、载波产生、信号检测、调制解调方式、数据加密和硬件设计等。

无线传感器网络的传输介质可以是无线、红外或者光介质。例如，在微尘项目中，使用了光介质进行通信。还有使用红外技术的传感器网络，它们都需要在收发双方之间存在视距传输通路。大量的传感器网络节点基于射频电路，无线传感器网络推荐使用免许可证频段 (ISM)，在物理层技术选择方面，环境的信号传播特性、物理层技术的能耗是设计的关键问题。传感器网络的典型信道属于近地面信道，其传播损耗因子较大，并且天线高度距离地面越近，其损耗因子就越

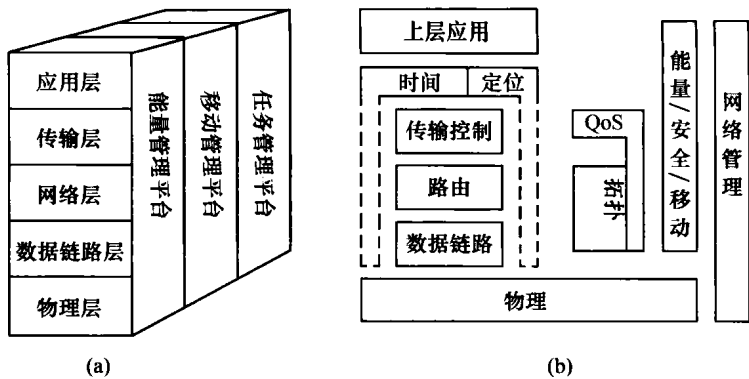


图 1-3 传感器网络协议栈

大，这是传感器网络物理层设计的不利因素。然而无线传感器网络的某些内在特征也有利于设计的方面。例如，高密度部署的无线传感器网络具有分集特性，可以用来克服阴影效应和路径损耗。目前低功率传感器网络物理层的设计仍然有许多未知领域需要深入探讨。

数据链路层：

负责数据成帧、帧检测、媒体接入和差错控制。数据链路层保证了传感器网络内点到点和点到多点的连接。

数据链路层一个功能是介质接入控制。在无线多跳 Ad hoc 网络中，介质访问控制（Media Access Control，MAC）层协议主要负责两个职能：其一是网络结构的建立，因为成千上万个传感器节点高密度地分布于待测地域，MAC 层机制需要为数据传输提供有效的通信链路，并为无线通信的多跳传输和网络的自组织特性提供网络组织结构；其二是为传感器节点有效合理地分配资源。

蓝牙和移动 Ad hoc 网络可能是现有网络中最接近传感器网络的。然而，蓝牙采用星形网络拓扑结构，并采用集中式分配的时分复用机制，这对于拓扑结构需要经常调整的无线传感器网络来说并不有利。传统 Ad hoc 网络的 MAC 层协议强调在移动条件下提供较好的服务质量（QoS）保证，节电并非其考虑的主要因素，因此，也不能够照搬于无线传感器网络。

数据链路层的另一个重要功能是传输数据的差错控制。在通信网中有两种重要的差错控制模式，分别是前向差错控制（FEC）和自动重传请求（ARQ）。在多跳网络中，ARQ 由于重传的附加能耗和开销而很少使用，即便是使用 FEC 方式，也只考虑低复杂度的循环码。而其他的适合传感器网络的差错控制方案仍处在探索阶段。

网络层：

网络层的功能包括分组路由、拥塞控制等。

传感器网络节点高密度地分布于待测环境内或周围。在传感器网络节点和接收器节点之间需要特殊的多跳无线路由协议。传统的 Ad hoc 网络多基于点对点的通信，而在传感器网络中由于网络拓扑以及节点不稳定，因此为增加路由可达度，网络大都使用广播式通信，路由算法也基于广播方式进行优化。此外，与传统的 Ad hoc 网络路由技术相比，无线传感器网络的路由算法在设计时需要特别考虑能耗的问题。基于节能的路由有若干种：如最大有效功率（PA）路由算法，即选择总有效功率最大的路由，总有效功率可以通过累加路由上的有效功率得到；最小能量路由算法，该算法选择从传感器节点到接收器传输数据消耗最小能量的路由；基于最小跳数路由，在传感器节点和接收机之间选择最小跳数的节点；基于最大最小有效功率节点路由，即算法选择所有路由中最小有效功率最大的路由。传感器网络的网络层设计的设计特色还体现在以数据为中心。在传感器网络中，人们只关心某个区域的某个观测指标的值，不会去关心具体某个节点的观测数据。传统网络传送的数据是和节点的物理地址联系起来的，以数据为中心的特点要求传感器网络能够脱离传统网络的寻址过程，快速有效地组织起各个节点的信息，并融合提取出有用信息直接传送给用户。

传输层：

负责数据流的传输控制，是保证通信服务质量的重要部分。

传感器网络的计算资源和存储资源都十分有限，而且通常数据传输量并不是很大。这样，对于传感器网络而言，是否需要传输层是一个问题，最为熟知的传输控制协议（TCP）是一个基于全局地址的端

到端传输协议。而对于传感器网络而言，TCP 设计思想中基于属性的命名对于传感器网络的扩展性并没有太大的必要性，数据确认机制也需要大量节点资源以及通信带宽，因此适合于传感器网络的传输层协议应类似于 UDP 协议。

应用层：

包括一系列基于监测任务的应用层软件，提供各种具体的增值业务应用，同时也提供时间同步和节点定位功能。

能量管理平台：

管理传感器节点如何使用能源，在各个协议层都需要考虑节省能量。

移动管理平台：

监测并注册传感器节点的移动，维护到汇聚节点的路由，使得传感器节点能够动态跟踪其邻居的位置。

任务管理平台：

其主要功能是在一个给定的区域内平衡和调度监测任务。

图 1-3 (b) 所示的协议栈细化并改进了原始模型。定位和时间同步子层在协议栈中的位置比较特殊。它们既要依赖于数据传输通道进行协作定位和时间同步协商，同时又要为网络协议各层提供信息支持，如基于时分复用的 MAC 协议，基于地理位置的路由协议等很多传感器网络协议都需要定位和同步信息。所以在图中用倒 L 型描述这两个功能子层。图 1-3 (b) 右边的诸多机制一部分融入到图 1-3 (a) 所示的各层协议中，用以优化和管理协议流程；另一部分独立在协议外层，通过各种收集和配置接口对相应机制进行配置和监控。如能量管理，在图 1-3 (a) 中的每个协议层次中都要增加能量控制代码，并提供给操作系统进行能量分配决策；QoS 管理在各协议层设计队列管理、优先级机制或者带宽预留等机制，并对特定应用的数据给予特别处理；拓扑控制利用物理层、链路层或者路由层完成拓朴生成，反过来又为它们提供基础信息支持，优化 MAC 协议和路由协议的协议过程，提高协议效率，减少网络能量消耗；网络管理则要求各层嵌入各种信息接口，并定时收集协议运行状态和流量信息，协调控

制网络中各个协议组件的运行。

第3节 无线传感器网络的特征

无线传感器网络与物理世界紧密耦合,无线节点在无人看守的情况下感知环境状况,相互通信^{[3][4][5]},对感知数据进行处理并实时地做出反应,它具有以下特征:

(1) 通信能力有限。传感器节点的通信带宽窄而且经常变化,通信覆盖范围只有几十到几百米。传感器之间的通信断接频繁,经常导致通信失败。由于传感器网络更多地受到地势地貌以及自然环境的影响,传感器可能会长时间脱离网络,离线工作。因此,如何利用有限的通信能力高质量地完成感知任务是设计人员面临的重要挑战。

(2) 电源能量有限。传感器由于电源的原因经常失效或废弃。而在大多数应用中,无法给电池充电或更换电池,一旦电池能量用完,这个节点也就失去了作用。因此在传感器网络设计过程中,任何技术和协议的使用都要以节能为前提。

(3) 计算存储能力有限。传感器节点都具有嵌入式处理器和存储器,由于这些器件的限制,传感器的计算和存储能力十分有限。

(4) 网络动态性强。网络中的传感器、感知对象和观察者都可能具有移动性,并且经常有新节点加入或已有节点失效,因此,网络的拓扑结构动态变化。而且网络一旦形成,人们很少干预其运行,加之物理环境不确定性的影响,使整个系统呈现高度的动态性。传感器网络的硬件必须具有高强壮性和容错性,相应的通信协议必须具有可重构和自适应性。

(5) 自组织、无中心、多跳路由。网络的布设和展开无需依赖于任何预设的网络设施,节点协调各自的行为,开机后就可以快速、自动地组成一个独立的网络。传感器网络中没有严格的控制中心,所有节点地位平等,是一个对等式网络。网络中节点只能与它的邻居直接通信。如果希望与其射频覆盖范围之外的节点进行通信,则需通过中间节点进行路由。传感器网络的多跳路由是由普通网络节点完成的,

没有专门的路由设备。

(6) 节点没有统一的标识。传感器网络节点没有一个全局性的标识,如 IP 地址等。每个节点仅仅知道自己邻近节点的位置和标识,传感器网络通过相邻节点之间的相互协作来进行信号处理和通信,具有很强的协作性。

(7) 传感器数量大、分布范围广、体积小、成本低。传感器网络的传感器节点密集,数量巨大。此外,传感器网络可以分布在很广的地理区域,维护十分困难甚至不可维护,其软、硬件必须具有高健壮性和容错性。传感器各部分集成度很高,具有体积小的优点,从应用的角度出发,要求传感器网络具有低成本。

(8) 数据管理与处理是传感器网络的核心^[4]。传感器网络的核心是感知数据,而不是网络硬件。观察者感兴趣的是传感器产生的数据,而不是传感器本身。在传感器网络中,传感器节点不需要地址之类的标识。所以,传感器网络是一种以数据为中心的网络,其基本思想是,把传感器视为感知数据流或感知数据源,把传感器网络视为感知数据空间或感知数据库,把数据管理和处理作为网络的应用目标。

此外,由于传感器节点分布很密集,相邻节点之间的感知数据具有很强的相似度。对于一些具体的传感器网络,工作环境非常恶劣,再加上节点分布密集,环境噪声干扰和节点之间的相互干扰更强。

第 4 节 无线传感器网络的应用领域

无线传感器网络具有十分广阔的应用前景^[6,8,9,10],在军事、国防、工农业、环境监测、城市交通、医疗卫生、智能家居、空间探索、抢险救灾、反恐反恐、危险区域远程检测等许多领域都有重要的研究价值和巨大的实用价值。

一、军事应用

传感器网络的研究最早起源于军事领域。由于传感器网络具有快速部署、自组织性、隐蔽性、容错性等特点,因此非常适用于军事方