

# 无线传感器网络

赵仕俊 唐懿芳 著



科学出版社

# 无线传感器网络

赵仕俊 唐懿芳 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书全面论述了无线传感器网络的基础理论、技术方法和最新研究成果。全书共 11 章,对涉及无线传感器网络关键技术的网络部署、拓扑结构、节点定位、目标跟踪、路由协议、数据融合、拥塞控制、网络安全等问题进行了深入研究,并以 TinyOS 为基础详细介绍了无线传感器网络操作系统,最后通过实例说明了无线传感器网络的工程设计方法。

本书可供无线传感器网络研究人员和无线传感器网络设计工程师参考,也可作为高等学校、研究院所信息与控制领域的本科生和研究生课程的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

无线传感器网络 / 赵仕俊, 唐懿芳著. —北京: 科学出版社, 2013.5  
ISBN 978-7-03-036866-9

I. ①无… II. ①赵… ②唐… 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(2013)第040637号

---

责任编辑: 邓 静 张丽花 / 责任校对: 宋玲玲  
责任印制: 闫 磊 / 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>

四季青双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2013 年 5 月第一次印刷 印张: 21 1/2

字数: 418 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 序

无线传感器网络是物联网的基础，是影响人类未来生活的重大新兴技术之一。作者在网络部署、拓扑结构、路由协议、节点定位、目标跟踪、拥塞控制、数据融合、网络安全等涉及无线传感器网络关键技术的各方面进行了深入研究，所提出的无线传感器网络正六边形节点覆盖模型，将基于模拟退火思想的遗传算法应用于 WSN 节点定位，关于无线传感器网络的工程设计方法等都具有新意。

全书针对无线传感器网络研究问题进行分类，按照理论基础、国内外研究状态、作者的理解认识、未来研究方向来组织论述，结构清晰、逻辑严密。相信从事无线传感器网络研究的人员阅读本书后，会在把握研究方向、理清研究思路、激发研究灵感诸多方面颇有获益。

姚建铨 院士

2012年12月

# 前 言

无线传感器网络是 21 世纪改变人类生活的重大技术之一。作者以无线传感器网络的重点研究问题为主线,在参考国内外无线传感器网络最新资料的基础上,结合自己 10 年来对无线传感器网络进行持续研究所取得的若干成果,科学组织内容,精心著述成书。

在内容安排上,作者力图通过有限的篇幅,对涉及无线传感器网络的基础理论、关键技术、重点研究内容、主要研究方法、国内外的典型研究成果,以及作者的研究成果进行详细讨论。读者通过参阅本书能够了解到无线传感器网络的系统知识,把握无线传感器网络的研究方向,通过对一些基本研究方法和研究成果的批判,生发对有关问题研究的新思路。

在组织架构上,首先介绍无线传感器网络系统与体系结构,给出无线传感器网络的问题域,然后详细讨论涉及无线传感器网络的关键技术,包括不同区域的网络部署、能量高效的拓扑控制、网络层路由协议和数据链路层 MAC 协议、将模拟退火思想的遗传算法应用于 WSN 的节点定位算法、基于动态成簇的二进制 WSN 目标跟踪、基于主动队列管理的拥塞控制、基于事件驱动的数据融合和传感器网络安全技术等研究内容。再以 TinyOS 为基础,详细介绍无线传感器网络操作系统结构、设计准则和主要设计技术。最后以数字化钻井的无线传感器网络监测系统为例,说明无线传感器网络的工程设计流程、技术参数的确定方法和网络部署运行技术。

在此谨向帮助和参与本书相关研究工作的所有同仁表示感谢。北京科技大学张朝晖教授、穆志纯教授、王沁教授,清华大学黄德先教授,北京理工大学戴亚平教授曾对书中的研究内容提出中肯的意见,使得有关问题的研究得到了满意的结果;张朝晖教授审阅了本书全稿;研究生陈琳、徐秀兰、徐麦玲、王盼盼、刘思佳和李国全等曾参与了部分研究工作。在本书的著述过程中参阅了大量研究资料,谨向书中已列出和未列出的所有文献资料的作者表示敬意。同时,向长期以来一直默默支持我们研究工作的亲人表示深深的感谢。

“思如静水,想若流云”是“思想”的精致状态,作者始终以这种认真态度和满腔热情来从事本书的著述。尽管小心翼翼,然而由于作者才疏学浅,书中的瑕疵仍然在所难免,拜望广大读者不吝赐教,我们感激不尽。

赵仕俊 唐懿芳

2012 年 12 月

# 目 录

序

前言

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 绪论               | 1  |
| 1.1 引言                 | 1  |
| 1.2 无线传感器网络概述          | 2  |
| 1.2.1 无线传感器网络定义        | 2  |
| 1.2.2 系统组成             | 3  |
| 1.2.3 网络模型             | 4  |
| 1.3 网络体系结构             | 4  |
| 1.4 网络节点               | 6  |
| 1.5 网络特点与性能评价          | 9  |
| 1.5.1 网络特点             | 9  |
| 1.5.2 性能评价             | 11 |
| 1.6 网络应用               | 11 |
| 1.7 无线传感器网络与物联网        | 13 |
| 1.8 主要研究内容             | 14 |
| 1.9 内容组织               | 18 |
| 参考文献                   | 18 |
| 第 2 章 无线传感器网络部署        | 19 |
| 2.1 概述                 | 19 |
| 2.2 覆盖及评价指标            | 21 |
| 2.2.1 基本假设             | 21 |
| 2.2.2 覆盖及优化            | 21 |
| 2.2.3 覆盖问题分类           | 23 |
| 2.2.4 网络覆盖评价指标         | 25 |
| 2.3 覆盖模型与区域覆盖概率        | 29 |
| 2.3.1 基本概念             | 29 |
| 2.3.2 感知、通信和连通覆盖的物理模型  | 30 |
| 2.3.3 感知、通信和连通覆盖的数学模型  | 32 |
| 2.3.4 区域随机覆盖概率与覆盖数     | 34 |
| 2.3.5 节点覆盖的随机分布函数      | 35 |
| 2.3.6 一维区域传感器节点覆盖的分布实验 | 37 |
| 2.4 一维区域节点覆盖模型         | 38 |
| 2.4.1 一维区域定义           | 38 |
| 2.4.2 节点覆盖模型           | 39 |
| 2.4.3 一维区域覆盖           | 40 |
| 2.5 二维区域节点覆盖模型         | 44 |
| 2.5.1 正六边形节点覆盖模型       | 44 |
| 2.5.2 节点通信半径           | 45 |
| 2.5.3 邻居节点数与连通图的分形     | 47 |

|            |                |           |
|------------|----------------|-----------|
| 2.5.4      | 区域的最小覆盖        | 51        |
| 2.6        | 三维区域节点覆盖模型     | 52        |
| 2.6.1      | 正六面体节点覆盖模型     | 52        |
| 2.6.2      | 切顶八面体节点覆盖模型    | 54        |
| 2.6.3      | 相对于感知范围的通信半径   | 55        |
|            | 参考文献           | 55        |
| <b>第3章</b> | <b>网络拓扑控制</b>  | <b>58</b> |
| 3.1        | 概述             | 58        |
| 3.1.1      | 网络拓扑结构及分类      | 58        |
| 3.1.2      | 拓扑控制研究内容       | 59        |
| 3.2        | 拓扑控制设计原则与算法评价  | 60        |
| 3.2.1      | 网络能耗模型         | 60        |
| 3.2.2      | 拓扑控制协议设计原则     | 61        |
| 3.2.3      | 拓扑控制算法评价       | 62        |
| 3.3        | 功率控制算法         | 64        |
| 3.3.1      | 相关研究           | 64        |
| 3.3.2      | XTC 算法         | 64        |
| 3.4        | 睡眠调度算法         | 65        |
| 3.4.1      | 相关研究           | 65        |
| 3.4.2      | CCP 算法         | 66        |
| 3.4.3      | SPAN 算法        | 67        |
| 3.4.4      | HEED 算法        | 68        |
| 3.5        | 层次型无线传感器网络拓扑控制 | 69        |
| 3.5.1      | 基本定义           | 69        |
| 3.5.2      | 分簇算法           | 70        |
| 3.5.3      | 求解连通支配集算法      | 75        |
| 3.6        | 能量高效的虚拟骨干网构造算法 | 77        |
| 3.6.1      | 问题背景           | 77        |
| 3.6.2      | 系统假设           | 78        |
| 3.6.3      | 算法模型及符号描述      | 79        |
| 3.6.4      | 骨干节点选举方法       | 80        |
| 3.6.5      | EVBC 算法描述及实现   | 82        |
| 3.6.6      | EVBC 算法的路由生成方法 | 84        |
| 3.6.7      | 算法性能仿真测试与分析    | 85        |
|            | 参考文献           | 86        |
| <b>第4章</b> | <b>节点定位</b>    | <b>89</b> |
| 4.1        | 概述             | 89        |
| 4.1.1      | 定位研究的主要问题      | 89        |
| 4.1.2      | 定位算法性能评价       | 90        |
| 4.2        | 相关研究           | 91        |
| 4.3        | 节点定位原理         | 96        |
| 4.3.1      | 基本概念及定义        | 96        |
| 4.3.2      | 定位计算方法         | 96        |
| 4.4        | ADV-Hop 定位算法研究 | 101       |
| 4.4.1      | DV-Hop 算法描述    | 101       |

|              |                        |     |
|--------------|------------------------|-----|
| 4.4.2        | DV-Hop 算法改进思路          | 102 |
| 4.4.3        | ADV-Hop 算法要旨           | 103 |
| 4.4.4        | ADV-Hop 算法的实现          | 105 |
| 4.4.5        | 算法仿真实验分析               | 108 |
| 4.5          | GSAL 定位算法研究            | 110 |
| 4.5.1        | 基于 GA 的定位算法及其局限        | 110 |
| 4.5.2        | 基于 SA 的定位算法及其局限        | 115 |
| 4.5.3        | 基于模拟退火思想的遗传算法          | 119 |
| 4.5.4        | GSAL 定位算法实现            | 120 |
| 4.5.5        | GSAL 算法仿真分析            | 123 |
|              | 参考文献                   | 125 |
| <b>第 5 章</b> | <b>目标跟踪</b>            | 127 |
| 5.1          | 概述                     | 127 |
| 5.1.1        | 目标跟踪过程                 | 127 |
| 5.1.2        | 目标跟踪关键技术               | 128 |
| 5.2          | 二进制传感器分类与跟踪算法评价        | 129 |
| 5.2.1        | 二进制传感器分类与通信模型          | 129 |
| 5.2.2        | 目标跟踪算法的评价指标            | 131 |
| 5.3          | 目标定位跟踪算法               | 132 |
| 5.3.1        | 质心算法                   | 132 |
| 5.3.2        | 加权算法                   | 135 |
| 5.3.3        | 线性拟合算法                 | 138 |
| 5.3.4        | 解析算法                   | 139 |
| 5.3.5        | 粒子滤波算法                 | 142 |
| 5.4          | 动态成簇算法                 | 143 |
| 5.4.1        | 动态成簇算法简介               | 143 |
| 5.4.2        | 网络部署方案                 | 144 |
| 5.4.3        | 节点激活方式                 | 145 |
| 5.4.4        | 簇头选举及成员选择方法            | 145 |
| 5.4.5        | 簇头移交方法                 | 146 |
| 5.5          | 面向单目标跟踪的 BWSN 异步动态成簇算法 | 148 |
| 5.5.1        | 问题描述                   | 148 |
| 5.5.2        | 目标发现及节点激活              | 149 |
| 5.5.3        | 动态跟踪簇构建及调整             | 150 |
| 5.5.4        | 异步跟踪时间的标定、传递及计算        | 153 |
| 5.5.5        | ADC 算法的仿真实验及分析         | 153 |
|              | 参考文献                   | 156 |
| <b>第 6 章</b> | <b>网络协议</b>            | 158 |
| 6.1          | 概述                     | 158 |
| 6.1.1        | 计算机网络协议                | 158 |
| 6.1.2        | WSN 协议                 | 159 |
| 6.2          | 网络层路由协议                | 159 |
| 6.2.1        | 路由算法评价指标               | 161 |
| 6.2.2        | 长链型路由协议                | 162 |
| 6.2.3        | 平面型路由协议                | 165 |



|              |                                |            |
|--------------|--------------------------------|------------|
| 6.2.4        | 层次型路由协议                        | 169        |
| 6.2.5        | 其他路由协议                         | 172        |
| 6.3          | 数据链路层 MAC 协议                   | 173        |
| 6.3.1        | 关于 MAC 协议                      | 173        |
| 6.3.2        | IEEE 802.11 和 IEEE 802.15.4 介绍 | 175        |
| 6.3.3        | 传感器网络 MAC 协议的差异和限制             | 180        |
| 6.3.4        | 非调度式 MAC 协议                    | 183        |
| 6.3.5        | 调度式 MAC 协议                     | 186        |
| 6.3.6        | 未来展望                           | 191        |
| 6.4          | 时钟同步                           | 192        |
| 6.4.1        | 传统时钟同步技术                       | 193        |
| 6.4.2        | 传感器网络时钟同步基本原理                  | 193        |
| 6.4.3        | 典型传感器网络时钟同步技术                  | 197        |
| 6.5          | 服务质量 QoS                       | 199        |
|              | 参考文献                           | 200        |
| <b>第 7 章</b> | <b>数据融合</b>                    | <b>203</b> |
| 7.1          | 概述                             | 203        |
| 7.2          | 关于数据融合                         | 204        |
| 7.2.1        | 多传感器数据融合                       | 204        |
| 7.2.2        | WSN 数据融合                       | 204        |
| 7.2.3        | 数据融合模型                         | 205        |
| 7.2.4        | 网络层中的数据融合                      | 208        |
| 7.2.5        | 基于事件驱动的数据融合                    | 210        |
| 7.2.6        | 数据融合技术难点                       | 211        |
| 7.3          | 数据融合节点延时分配算法                   | 212        |
| 7.3.1        | 经典延时分配算法                       | 212        |
| 7.3.2        | 数据传输端到端延时分析                    | 216        |
| 7.4          | SSF-M/G/1 算法                   | 218        |
| 7.4.1        | 算法思想                           | 218        |
| 7.4.2        | ON/OFF 模型及分组平均到达速率             | 219        |
| 7.4.3        | M/G/1 队列及分组到达时间间隔              | 220        |
| 7.4.4        | 允许延时时间分配算法                     | 221        |
| 7.4.5        | 算法伪代码                          | 223        |
| 7.5          | 仿真实验及分析                        | 224        |
| 7.5.1        | 评价指标                           | 224        |
| 7.5.2        | 仿真参数设置                         | 224        |
| 7.5.3        | 实验分析                           | 224        |
|              | 参考文献                           | 226        |
| <b>第 8 章</b> | <b>拥塞控制</b>                    | <b>228</b> |
| 8.1          | 概述                             | 228        |
| 8.2          | 无线传感器网络拥塞控制机制                  | 229        |
| 8.2.1        | 基于拥塞检测与处理的缓解机制                 | 230        |
| 8.2.2        | 拥塞避免机制                         | 231        |
| 8.3          | 网关节点拥塞控制                       | 232        |
| 8.3.1        | 瓶颈网络模型                         | 232        |

|               |                        |            |
|---------------|------------------------|------------|
| 8.3.2         | AQM 反馈控制系统模型           | 234        |
| 8.3.3         | RBF 神经网络               | 235        |
| 8.3.4         | 灰色预测 GM(1,1) 模型        | 237        |
| 8.3.5         | RBF-GM 算法              | 238        |
| 8.3.6         | 仿真及其结果                 | 239        |
| 8.4           | 基于主动队列管理的拥塞控制机制        | 241        |
| 8.4.1         | 主动队列管理                 | 241        |
| 8.4.2         | 自适应主动队列管理 API 算法       | 245        |
| 8.4.3         | 区分丢包的速率调节 DR 算法        | 249        |
| 8.4.4         | API-DR 算法              | 251        |
| 8.4.5         | API-DR 算法仿真实验及分析       | 252        |
|               | 参考文献                   | 254        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>网络安全</b>            | <b>256</b> |
| 9.1           | 概述                     | 256        |
| 9.1.1         | WSN 的安全威胁              | 256        |
| 9.1.2         | 安全体系结构                 | 257        |
| 9.1.3         | 安全要求与目标                | 258        |
| 9.2           | 无线传感器网络安全技术            | 260        |
| 9.2.1         | 安全技术分类                 | 260        |
| 9.2.2         | 密码技术                   | 260        |
| 9.2.3         | 密钥确立和管理                | 262        |
| 9.2.4         | 路由安全                   | 263        |
| 9.2.5         | 数据融合安全                 | 264        |
| 9.2.6         | 入侵检测                   | 265        |
| 9.2.7         | DoS 攻击                 | 265        |
| 9.2.8         | 访问控制和权限管理              | 266        |
| 9.2.9         | 无线传感器网络安全协议            | 267        |
| 9.3           | 链路层加密方案                | 269        |
| 9.3.1         | TinyOS 的安全保护措施 TinySec | 269        |
| 9.3.2         | 链路层加密方案 SenSec         | 271        |
| 9.4           | 无线传感器网络用户认证技术          | 272        |
| 9.4.1         | 认证技术分类                 | 272        |
| 9.4.2         | 用户认证协议                 | 274        |
| 9.4.3         | 基于 $\mu$ TPCT 的广播认证协议  | 276        |
| 9.5           | 密钥管理技术                 | 279        |
| 9.5.1         | 密钥管理的安全和性能评价           | 279        |
| 9.5.2         | 密钥管理方案和协议的分类           | 280        |
| 9.5.3         | 典型密钥管理方案和协议            | 281        |
| 9.5.4         | 层次型 WSN 动态密钥管理方法       | 284        |
|               | 参考文献                   | 288        |
| <b>第 10 章</b> | <b>无线传感器网络操作系统</b>     | <b>289</b> |
| 10.1          | 概述                     | 289        |
| 10.2          | WSNOS 设计原则             | 290        |
| 10.3          | 操作系统关键技术               | 291        |
| 10.3.1        | 体系结构                   | 291        |

|               |                         |            |
|---------------|-------------------------|------------|
| 10.3.2        | 层次化技术                   | 293        |
| 10.3.3        | 框架技术                    | 294        |
| 10.3.4        | 节能通信模型                  | 295        |
| 10.3.5        | 可裁减的构件技术                | 295        |
| 10.3.6        | 普适计算技术                  | 296        |
| 10.4          | TinyOS 操作系统             | 297        |
| 10.4.1        | 系统简介                    | 297        |
| 10.4.2        | 体系结构与特点                 | 298        |
| 10.4.3        | 组件模型和命名规则               | 300        |
| 10.4.4        | TinyOS 的任务              | 302        |
| 10.4.5        | TinyOS 调度器              | 303        |
| 10.4.6        | 系统启动和初始化                | 304        |
| 10.4.7        | TinyOS 通信               | 304        |
| 10.4.8        | 并发模型                    | 305        |
| 10.4.9        | 能量管理                    | 306        |
| 10.4.10       | 模拟服务                    | 306        |
| 10.4.11       | TinyOS 系统的编程            | 306        |
| 10.5          | Mantis 系统               | 312        |
| 10.6          | SenOS 系统                | 313        |
|               | 参考文献                    | 313        |
| <b>第 11 章</b> | <b>无线传感器网络工程设计</b>      | <b>314</b> |
| 11.1          | 概述                      | 314        |
| 11.2          | 监测区域分类                  | 314        |
| 11.3          | 覆盖数计算                   | 315        |
| 11.3.1        | 一维长线区域                  | 315        |
| 11.3.2        | 二维平面区域                  | 316        |
| 11.3.3        | 三维空间区域                  | 318        |
| 11.4          | 无线传感器网络部署的工程设计          | 320        |
| 11.4.1        | 设计流程                    | 320        |
| 11.4.2        | 技术参数设计                  | 320        |
| 11.5          | ZigBee 系统技术             | 321        |
| 11.5.1        | ZigBee 技术特点             | 321        |
| 11.5.2        | ZigBee 技术的协议构架          | 322        |
| 11.5.3        | ZigBee 技术的网络拓扑结构        | 323        |
| 11.6          | 基于 ZigBee 技术的石油钻井现场 WSN | 324        |
| 11.6.1        | 系统结构设计                  | 324        |
| 11.6.2        | 拓扑控制机制与节点定位方法           | 327        |
| 11.6.3        | 路由机制                    | 328        |
| 11.6.4        | 系统工作模式                  | 328        |
| 11.7          | 实验测试                    | 330        |
| 11.7.1        | 实验方法                    | 330        |
| 11.7.2        | 中断模式实验                  | 331        |
| 11.7.3        | 周期性模式实验                 | 331        |
|               | 参考文献                    | 332        |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)综合了传感器技术、微机电系统技术、嵌入式计算机技术、分布式信息处理技术、网络技术和通信技术,是信息感知和数据采集领域的一场革命,是 21 世纪影响人类生活的重大技术之一<sup>[1-3]</sup>。

无线传感器网络旨在提供一个有效的连接自然界和计算机世界的桥梁,可广泛应用于国防军事、国家安全、环境监测、目标跟踪、医疗卫生、反恐抗灾、智能建筑、环境科学和空间探索等领域,已经引起许多国家的军事部门、工业界和学术界的极大关注<sup>[4-6]</sup>。美国自然科学基金委员会 2003 年制定了传感器网络研究计划,巨额投资支持相关基础理论的研究。美国国防部和各军事部门都对传感器网络给予了高度重视,在 C<sup>4</sup>ISR 的基础上提出了 C<sup>4</sup>ISRT(Command, Control, Communication, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance and Targeting)计划,强调战场情报的感知能力、信息的综合能力和信息的利用能力,把传感器网络作为一个重要研究领域。美国加州大学伯克利分校最早开展对无线传感器网络的研究,研究涉及的内容系统而全面,并已研制成功 TinyOS 操作系统。此外,南加州大学、加州大学洛杉矶分校、斯坦福大学、麻省理工学院等著名大学也针对无线传感器网络中的热点和难点问题进行了研究并取得进展。日本、英国、意大利、巴西等国家也对传感器网络表现出了极大的兴趣,纷纷展开了该领域的研究工作。在产业界,2002 年,英特尔公司发布了“基于微型传感器网络的新型计算发展规划”;2004 年,NASA 的 JPL(Jet Propulsion Laboratory)研制了用于空间探索的 Sensor Webs。此外,摩托罗拉、英特尔、霍尼韦尔等著名公司发起成立了 ZigBee 产业联盟,致力于无线传感器网络技术的研发和推广。

我国在传感器网络方面的研究水平还有待提高。国家自然科学基金委员会自 2003 年开始连续几年将无线传感器网络列为重点资助项目,课题涉及传感器网络的各个方面。中科院无线传感器项目组已经成功研制了基于专用低功耗处理器芯片的 IPv6 无线传感器网络节点软硬件平台。目前,中国科学院、中国科技大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、北京科技大学、中国石油大学和北京邮电大学等正在开展该领域的研究工作。

从 20 世纪 90 年代开始至今,无线传感器网络的发展历程大概可以划分为三个阶段。第一阶段主要致力于小型化、低功耗、低成本、智能化的传感器节点的开发和研制;第二阶段注重无线传感器网络作为通信网络的特性研究,特别是通信协议的设计和实现;第三阶段侧重于对无线传感器网络的群体智能行为的研究。

无线传感器网络是当前在国际上备受关注的、涉及多学科高度交叉融合、技术高度密集的前沿热点研究领域。由于网络中节点数量多并具有高度自主性,每个传感器节点的能力和能源都十分有限,网络工作环境恶劣,网络拓扑结构经常处于高度的动态变化中,因此,构建一个可靠、高效的传感器网络系统是一项艰巨而有挑战性的工作,特别是在体系结构、网络协议、能量高效、节点定位、目标跟踪、系统软件及网络应用方面,现有的思想与方法完全不适应或者必须经过修改才能应用于无线传感器网络。

## 1.2 无线传感器网络概述

### 1.2.1 无线传感器网络定义

#### 1. 无线 Ad hoc 网络

Ad hoc 源于拉丁语,意思是“for this”,可引申为“for this purpose only”,即“为某种目的设置的,特别的”意思。Ad hoc 网络的起源可以追溯到 1968 年的 ALOHA 网络和 1973 年 DARPA 开始研究的分组无线网络(Packet Radio Network)。在开发 IEEE 802.11 标准时,IEEE 802.11 标准委员会采用了“Ad hoc 网络”一词来描述这种特殊的自组织对等式多跳移动通信网络,将分组无线网络改称为 Ad hoc 网络,Ad hoc 网络就此诞生。

IEEE 希望 Ad hoc 网络成为为特定目的而临时组建并短期存在的网络。IEEE 802.11 标准定义的 Ad hoc 网络为仅由那些通过无线方式能够互相进行直接通信的站点组成的网络,即独立的基本服务集(Independent Basic Service Set, IBSS)。IBSS 没有接入点,为单跳 Ad hoc 网络,但是目前研究的 Ad hoc 网络通常是多跳的。1997 年 IEEE 成立了移动 Ad hoc 网络 MANET(Mobile Ad hoc NETWORK)工作组,专门负责具有数百个节点的移动 Ad hoc 网络的路由算法的研究和开发,并制定相应的标准。

Ad hoc 网络由一组自主的无线节点或终端相互合作而形成,独立于固定的基础设施并采用分布式管理,是一种自创造、自组织和自我管理网络。与传统的蜂窝网络(Cellular Network)相比,Ad hoc 网络没有网关节点,所有节点分布式运行,具有路由器的功能,负责发现和维护到其他节点的路由,向邻居节点发射或转发分组。这种网络既可以单独运行,又可以通过网关接入到有线骨干网络——Internet。

## 2. 无线传感器网络的定义

根据节点是否移动,无线 Ad hoc 网络分为移动 Ad hoc 网络和传感器网络。在移动 Ad hoc 网络中,各个无线节点可以自由移动,通常也把无线 Ad hoc 网络等同于移动 Ad hoc 网络。在传感器网络中,各个无线节点静态地随机分布于某一区域。传感器负责收集区域内的声音、电磁或地震信号等多种信息,将它们发送到网关节点。网关具有更大的处理能力,能够进一步处理信息,或有更大的发送范围,可以将信息送往某个大型网络,使远程用户能够检索到该信息。随着微机电系统技术和信息技术的发展,可实现低成本、灵巧、可移动、功能强大的传感器节点,更具有应用价值。无线传感器网络成为 Ad hoc 网络技术的一个重大应用领域,目前,无线传感器网络已等同于无线 Ad hoc 网络。Ad hoc 网络是一个没有任何固定的设施,集中无线、可移动、节点自组织等特点形成的网络。绝大多数的无线传感器网络(以下简称 WSN)都采用无线 Ad hoc 网络的体系结构。

到此,可以给出无线传感器网络的定义:无线传感器网络是以传感器为网络节点,节点之间能够协作地实时监测、感知和采集各种监测对象的信息并对其进行处理,然后以自组多跳的网络方式将信息无线传送到用户终端,从而实现物理世界、计算世界以及人类社会三元世界的连通。从上述定义可以看到,传感器节点、观察者、感知对象和无线通信是传感器网络的4个基本要素。

(1) 传感器节点是传感器网络的主要硬件,具有信息感知、数据处理、信息通信等功能。

(2) 观察者是传感器网络的用户,是感知信息的接收者和应用者。

(3) 感知对象是观察者感兴趣的监测目标,即传感器网络的感知对象。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。

(4) 无线通信是传感器之间、传感器与观察者之间的通信方式,用于在传感器与观察者之间建立通信路径。

### 1.2.2 系统组成

一个传感器网络通常包括传感器节点(Sensor Node)、网关节点(Sink Node)和任务管理节点(Manage Node)。大量传感器节点可以通过人工部署或飞行器撒播,甚至可以借助火箭发射等方式部署在监测区域(Sensor Field)内部或附近。之后,这些节点能够以自组织的方式构成网络,并通过多跳转发的方式将感知到的数据传送到远端的网关节点,而网关节点则可以将整个网络的数据通过卫星传送到计算机网络中心,同时也可以将用户的查询请求发送到传感器网络中。传感器网络系统如图 1-1 所示。

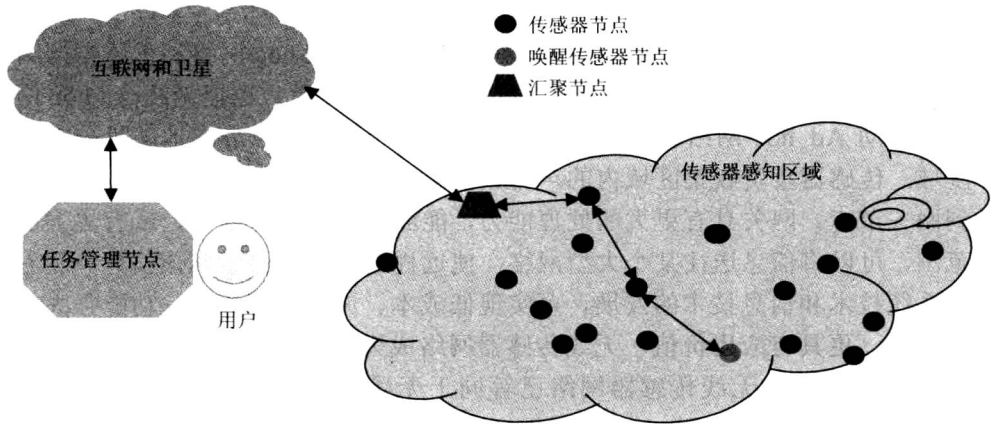


图 1-1 WSN 系统组成

### 1.2.3 网络模型

一般来说, WSN 的协议针对特定的应用设计。通常在建立 WSN 的模型 (Network Model) 时作如下假设:

- (1) 传感器节点随机均匀布设;
- (2) 传感器节点不具备随机移动性;
- (3) 所有的传感器节点相同且节点的初始能量相等;
- (4) 所有传感器节点的探测范围相等;
- (5) 网络中所有节点的位置信息是可知的;
- (6) 网络中只有一个网关节点, 分布在传感器网络内, 且位置固定。

目前的研究通常还假设节点采用全向天线, 因此, 在平面区域内节点的无线通信覆盖范围可以用以节点为中心, 以最大传输距离为半径的圆盘表示。当网络中所有节点同构, 网络的拓扑结构可以通过二维平面上的单位圆盘图建模, 即利用无向图描述网络的拓扑结构<sup>[7]</sup>。

## 1.3 网络体系结构

无线传感器网络体系结构 (WSN Architecture) 是描述传感器网络自身特点, 反映用户对网络需求, 在设计网络协议和网络通信机制的过程中必须遵守的一组抽象规则。设计网络体系结构的目的是为网络协议和算法的标准化提供统一的技术规范, 使其能够满足用户需求。

WSN 体系结构与传统的计算机和通信网络不同, 研究人员参照 OSI (Open

System Interconnect) 五层协议模型, 提出了多个 WSN 协议体系结构框架, 大部分框架都是由文献[6]提出的五层协议栈细化改进而来的。图 1-2 所示的 WSN 体系结构, 不仅起到了将相关研究内容集成到统一框架和体系下的作用, 而且也清晰地表明了传感器网络组成的逻辑关系和应研究的主要内容。

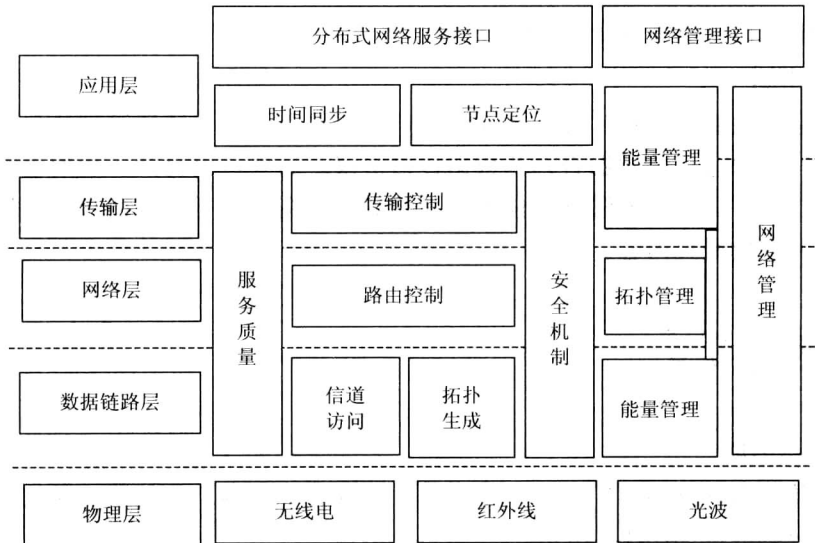


图 1-2 WSN 体系结构

### 1. 物理层

物理层 (Physical Layer) 负责频率选择、载波频率产生、信号检测、信号的发送与接收及其调制解调、数据加密和功率控制等, 物理层的设计目标是以尽可能少的能量消耗获得较大的链路容量。物理层协议主要研究信号传播效果、能效和调制方案, 其他问题主要属于硬件设计的范畴。

### 2. 数据链路层

数据链路层 (Data-link Layer) 负责数据成帧、帧检测、信道访问和错误控制。数据链路层的设计目标是保证通信网络中点对点和对多点的连通可靠性, 保证源节点发出的信息可以完整、无误地到达目标节点。数据链路层主要研究信道访问和错误控制问题。

### 3. 网络层

网络层 (Network Layer) 主要负责网内从源节点到目标节点的数据分组路由, 并把数据可靠传送到网关节点, 通过数据融合和拥塞控制提高数据传输效率。

### 4. 传输层

要通过 Internet 或其他外部网进入传感器网络时, 需要设计传输层协议。传输层



负责数据流的传输控制, 提供可靠的、开销合理的数据传输服务。由于 Internet 的传输控制协议 TCP 与传感器网络环境的特点不匹配, TCP 的连通会终止在传感器网络的网关节点, 因此, 需要设计专门的传输层协议来处理网关节点和传感器节点之间的通信, 而用户和网关节点之间的通信则可通过用户数据报协议 (User Datagram Protocol, UDP) 或 TCP 经由 Internet 或卫星来实现。另一方面, 网关节点和传感器节点之间的通信可以纯粹是 UDP 型协议。

### 5. 应用层

从信息交换的角度看, 有 3 个重要的应用层协议, 即传感器管理协议、任务分配和数据广播协议、传感器查询和数据传播协议。另外, 也包括一系列基于监测任务的应用层软件。传感器管理、任务分配和数据广播、传感器查询和数据传播是应用层协议的主要研究内容。

## 1.4 网络节点

### 1. 节点组成

无线传感器网络节点由电源、传感器、嵌入式处理器、存储器、通信部件和软件这几部分构成, 如图 1-3 所示。

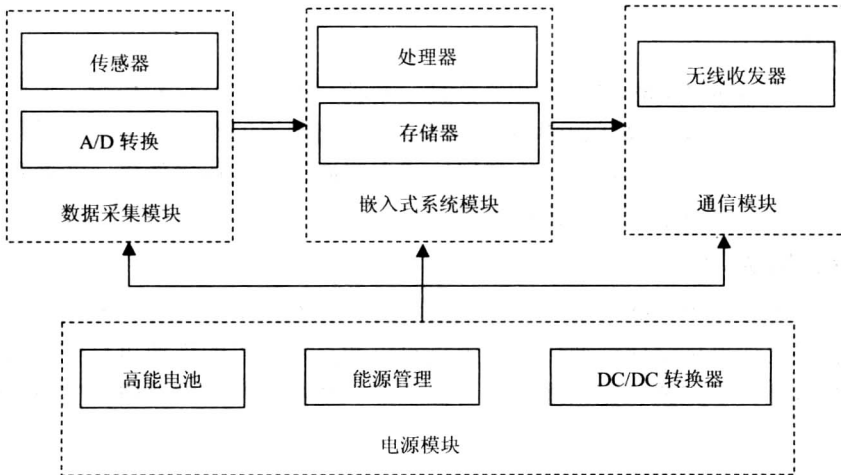


图 1-3 传感器网络节点结构框图

### 2. 传感器节点工作模式

按照节点各部件开启与关闭状况, 传感器节点的工作模式有以下 5 种, 分别是: 检测、通信、空闲、侦听和休眠。节点在 5 种工作模式下的各部件工作状态如表 1-1 所示。