



监测传感网协作节能传输技术

Novel Cooperative and Energy-saving
Transmission Technologies for Monitoring WSN

胡青松 著



科学出版社

监测传感网协作节能传输技术

胡青松 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以监测数据的节能传输为明线、监测节点的协作通信为暗线,较为系统地探讨了监测传感网中的数据传输方法,主要包括协作传输的基本原理、分簇协作节能传输、特殊场合的协作节能传输、协作节能传输的工程应用4大部分,内容涵盖聚焦观测的原理与协作传输的影响因素,观测传感网的分簇方法以及基于分簇机制或虚拟分簇机制的协作MIMO传输方法、智能天线动态虚拟簇传输方法,联合贪婪转发、区域泛洪和空洞避免的煤矿采空区温度监测数据传输方法,源节点与目标节点间没有直接连通路情况下的机会数据传输方法,协作节能传输在矿山物联网和文化遗产监测领域的实际应用等。

本书可作为高等院校物联网专业、信息工程专业、信息管理系统专业、计算机科学与技术专业等高年级本科生或研究生的专业课程教材,也可供物联网等相关领域的技术人员或技术管理人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

监测传感网协作节能传输技术/胡青松,著. —北京:科学出版社,2017.3
ISBN 978-7-03-052485-0

I. ①监… II. ①胡… III. ①互联网络—应用—灾害管理—数据传输—研究 IV. ①X4-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第056892号

责任编辑:胡凯 李涪汁 高慧元/责任校对:王晓茜

责任印制:张伟/封面设计:许瑞

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>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:11

字数:210 000

定价:79.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

随着物联网技术的蓬勃发展和“互联网+”战略的快速推进,如何实时感知现场区域动态、及时掌握监测区域态势进而实施超前干预,从而提高生产效率,预防事故发生,降低事故损失,业已成为企业经营者和政府管理部门的迫切需求,也是科研工作者和技术开发人员不懈努力的方向。

监测传感网一般具有无人值守、电池供电、实时性强等特征,降低网络能量消耗对于延长网络寿命至关重要。监测传感网的能量主要消耗在数据感知、数据处理、数据传输3个环节,其中传输能耗远远高于其他两个环节的能耗,不恰当的数据传输方法将导致部分节点快速死亡,造成监测空洞和网络分裂,甚至导致整个网络无法工作。因此,节能传输是降低网络能量消耗、延长网络寿命、保证监测质量的关键。

近年来,我们围绕地面监测事件(如滑坡)和井下监测场景(如煤矿)中的节能数据传输难题,在试验场建设、理论探讨、技术研究和应用开发方面展开了一系列研究,针对协作传输的影响因素、分簇协作节能传输、特殊场合的协作节能传输提出了一系列新颖的方法,部分方法已在江苏省智能矿山示范工程等实践中得到了应用。本书即为这些工作的总结和梳理,希望能够为感兴趣的研究人员和工程实践人员提供一定的参考和借鉴。

本书得到了国家自然科学基金“煤矿工作面动目标精确定位关键技术研究(资助号:51204177)”、国家重点研发计划“灾害环境下快速应急定位组网技术(资助号:2016YFC0803103)”、国家科技支撑计划“矿井动目标监测技术及在用设备智能管控技术平台与装备(基于物联网管控技术)(资助号:2013BAK06B05)”、江苏省自然科学基金“煤矿巷道自适应环境认知机制与机会通信方法研究(资助号:BK20151148)”、中央高校基本科研业务费专项资金“矿山物联网可重构感知方法研究(资助号:2015XKMS097)”的资助,在此特致谢忱。

实验室的团结攻关和集体智慧是本书的最大能量源泉。在此,特别感谢实验室负责人、我的博士生导师张申教授数十年如一日的坚持和引领,您对科研事业孜孜不倦的追求和对实验室一如既往的呵护让我们能量十足、备感温暖;感谢博士研究生张然、硕士研究生龙佳和闫玉萍在时间同步方面的辛勤付出,以及硕士研究生张典在协作通信中的资源分配方面的开拓进取;同时,感谢硕士研究生曹灿和韩丽娜在机会通信方面的不懈探索,以及硕士研究生丁一珊、曹灿、张亮在

应用开发方面的耕耘奉献。其他由于篇幅所限未能一一列出的优秀研究生，你们的工作亦是实验室研究日新月异的坚实柱石。

特别感谢我的恩师——长江学者、杰出青年基金获得者、中南大学吴立新教授，您的教诲令我永生难忘，您的指导让我受益终身。

感谢本书所引文献的作者和单位，你们的艰苦付出和卓越贡献使本书得以站在巨人的肩膀上开始研究和写作。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 监测与监测传感网	1
1.2 监测传感网研究现状	3
1.3 传感网节能传输研究现状	6
1.4 监测传感网节能传输实验方法	9
1.5 本书内容概貌与结构体系	16
第 2 章 协作传输节能机制	20
2.1 协作传输基础	20
2.1.1 无线信号传播特征	20
2.1.2 协作通信基础	21
2.1.3 链路费用模型	25
2.2 协作通信的能耗与影响因素	26
2.2.1 协作通信节能的理论证明	26
2.2.2 协作节点数量的影响	27
2.2.3 收发电路能耗的影响	28
2.2.4 仿真实验与结果分析	29
2.3 协作节点间的功率分配	33
2.3.1 系统模型	33
2.3.2 基于折中差分演化的功率分配	35
2.3.3 仿真实验与结果分析	37
第 3 章 分簇协作节能传输机制	40
3.1 分簇传输技术概述	40
3.2 零簇头与簇头数目失衡问题	41
3.2.1 簇头选举策略	41
3.2.2 零簇头问题	45
3.2.3 簇头数目失衡问题	49
3.3 自适应分簇路由	51
3.3.1 问题求解的基本思路	51

3.3.2	簇头数目的自适应调整	52
3.3.3	平衡式簇头选择	53
3.3.4	层次型分簇路由算法	55
3.4	基于 Voronoi 图的能量均衡分簇路由算法	58
3.4.1	单层锚点轮盘与簇头选择	58
3.4.2	多层锚点轮盘与簇头选择	61
3.4.3	EBCRV 的性能分析	64
第 4 章	协作 MIMO 传输机制	69
4.1	MIMO 与协作 MIMO	69
4.2	分簇协作 MIMO 模型	71
4.3	数据传输策略	72
4.3.1	数据传输	72
4.3.2	能耗分析	74
4.4	仿真实验与结果分析	75
4.4.1	参数设置	75
4.4.2	结果分析	76
第 5 章	动态虚拟簇传输机制	79
5.1	功率和能耗模型	79
5.1.1	发送功率模型	79
5.1.2	能量消耗模型	80
5.2	虚拟簇的动态构建与更新	81
5.2.1	虚拟簇的构建方法	81
5.2.2	虚拟簇的动态更新	83
5.3	SaDVC-Routing 的数据转发流程	84
5.4	仿真实验与结果分析	86
5.4.1	仿真设置	86
5.4.2	结果分析	87
第 6 章	动态方格划分传输机制	91
6.1	GtmWSN 模型与特征	91
6.1.1	GtmWSN 模型构建	91
6.1.2	GtmWSN 的特征	93
6.2	GtmWSN 动态方格划分方法	94
6.2.1	数据采集模式	94
6.2.2	动态方格划分	94

6.3 基于动态方格划分的数据传递	97
6.4 仿真实验与结果分析	98
第7章 基于机会通信的传输机制	103
7.1 机会通信与机会网络	103
7.1.1 机会通信的基本原理	103
7.1.2 典型机会路由算法	104
7.2 机会网络节点移动模型	106
7.2.1 独立同分布移动模型	107
7.2.2 基于地图的移动模型	107
7.3 机会通信的性能仿真方法	108
7.3.1 机会路由仿真算法仿真工具	108
7.3.2 常见机会网络算法的性能分析	111
7.4 机会网络中节点相遇的时空规律	115
7.4.1 相遇模型与实验数据集	115
7.4.2 节点相遇的空间特征	117
7.4.3 节点相遇的时间特征	120
第8章 协作节能传输的工程应用	126
8.1 基于语义的矿山物联网	126
8.1.1 矿山认知网络体系结构	126
8.1.2 矿山认知网络的接口引擎	129
8.1.3 矿山信息的表示与处理	131
8.1.4 矿山信息集成框架	134
8.1.5 矿山物联网信息的传输	137
8.1.6 矿山物联网信息的处理与应用	140
8.2 基于物联网的文化遗产监测	144
8.2.1 文化遗产监测技术路线	145
8.2.2 基于物联网的文化遗产数据感测	148
8.2.3 数据传输、处理与应用	151
参考文献	154

第1章 绪 论

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 在环境监测、医疗监测、交通监测、野生动物监测、灾害监测、文化遗产监测、智能农业等领域具有重要应用, 是实施物联网的基础。WSN 节点能量有限且要求长时间工作^[1], 因此降低网络能量消耗对于延长网络寿命至关重要。网络能量主要消耗在数据感知、数据处理、数据传输三个环节, 其中传输能耗远远高于其他两个环节的能耗, 不恰当的路由选择方法将导致部分节点快速“死亡”^[2, 3], 造成监测空洞和网络分裂, 甚至导致整个网络无法工作。因此, 节能传输是降低网络能量消耗、延长网络寿命、保证监测质量的关键。

1.1 监测与监测传感网

根据监测对象的不同, 监测方法和监测系统差异也很大。以灾害监测为例, 我国地域辽阔, 地质条件复杂, 地震、崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害频度高、分布广、强度大^[4]。对于深部开采, 复杂的工程地质条件使得断层岩脉纵横交错, 易发生井下火灾、瓦斯爆炸、突水等灾害^[5], 同时易导致地面塌陷、采场边坡失稳、滑坡与岩崩等^[6]。实施基于 WSN 的灾害监测对于灾前事件按需实时观测、灾中事件演变过程聚焦观测、灾后救援和灾损评估具有十分重要的意义。这种灾害监测 WSN 由大量的小型传感节点组成^[7], 具有强大的数据采集、自组成网和数据传输能力^[8]。为了方便, 后面章节称这种传感网为监测 WSN (monitoring WSN, M-WSN)。

监测的理论和方法体系主要包括监测时空基准、传感网数据整合、监测空间数据聚类分析、监测功能分区、区域动态形变场理论、传感网地理信息系统模型理论等^[6]。以灾害监测为例, 需要监测灾害发生发展的影响因素、灾害特征、造成影响等多个方面^[9]。被观测区域一旦有环境变化或灾害发生, 要求观测网络快速触发预定义的处理过程。因此, M-WSN 是一种典型的事件驱动观测网络, 它从需求出发, 为传感器调度、数据获取、数据处理和在线服务提供标准的服务接口, 实现灾害事件协同观测、数据高效处理和辅助决策支持^[10]。

事件驱动专注于事件和事件依赖的研究和应用。事件是在某个瞬间或某个时间间隔内发生或者预期要发生的任何事情, 事件依赖则是与事件应用相关的内容,

如事件定义、事件管理、事件处理、事件驱动架构等。M-WSN 观测事件包括传感器事件、领域事件和状态事件三个层次，它们的抽象级别逐渐升高。传感器事件是指与传感器获取数据有关的事件，包括与传感器状态有关的事件（如数据采集准备、采集中、采集完成等）和观测对象属性数据有关的事件（如时间、空间、属性值、数据丢失、重复读取等）。领域事件由传感器观测数据事件在特定领域派生而来，是原始观测数据在特定领域的进一步抽象。状态事件是指与观测对象所处状态有关的事件，这些状态需要预先定义。

目标监测是一个包括多个子任务的复杂过程（图 1.1）^[9]。首先由监控中心进行任务规划，确定监测地点、监测时间段和参与传感器等；其次进行传感器规划，根据规划的观测任务确定需要采集的环境参数；然后，传感器根据规划情况进行观测，观测结果通过无线或有线网络传输到数据中心，数据中心根据应用模型进行数据处理，进而提取观测数据所蕴涵的特征信息，评估观测区域发生灾害的概率；评估结果通过 Web 等方式对外发布，感兴趣的用户根据通知消息从指定地点获取评估结果，若有必要，也可获取未经处理的原始数据。

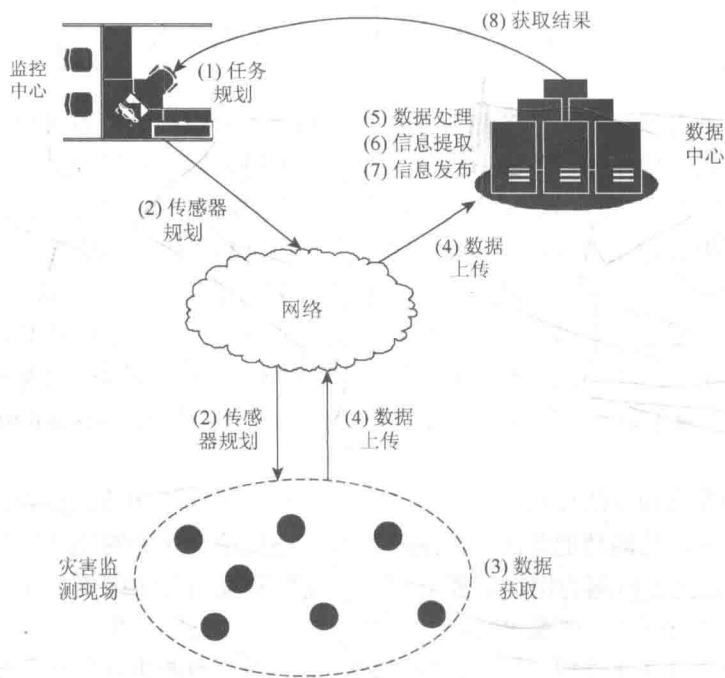


图 1.1 灾害监测数据获取流程

与普通 WSN 相比，M-WSN 面临许多突出的挑战：①传感节点之间需要彼此协同完成事件感知任务，要求研究基于事件驱动的传感网自适应组网原理与方法，

以支撑事件驱动的快速组网观测与聚焦服务；②需要根据观测数据类型、尺度、精度及实时性等要求，在最小化网络资源损耗的前提下，为观测信息提供有效、优化的传输路径，为应急情况下传感器组网完成局部重点地区聚焦观测任务提供理论和方法支撑；③需要研究适用于特殊环境、特殊监测对象的监测传感网最优部署方法和优化节能数据传输方法，如煤矿工作面线性或双线性网络的组网方法与节能传输机制。这三个问题的核心，是在保证监测频率、数据精度、时延要求等 QoS 约束下，实现灾害信息的协同采集和节能传输。

M-WSN 具有无中心、自组织、节点易损、动态拓扑、多跳路由等特征，其要求长期监测和电池供电的特点决定了必须采用节能的数据传递方法^[11]。为了节省能量，一方面应大力发展低功耗芯片，在物理层采用功耗更低的电路并尽量降低发射功率^[12]；另一方面应在网络层研究节能路由算法，以降低寻路和传输能耗。也可以对物理层、MAC (media access control) 层和网络层进行跨层优化^[13]，优化整个网络的功率分配和能量消耗^[7, 14]。本书重点研究面向 M-WSN 的节能数据传输方法，即在能量限制、带宽约束等约束下，如何将感知节点的数据高效可靠地传输到 Sink 节点。它对于实施灾前事件按需实时观测、灾中事件演变过程聚焦观测、灾后救援和灾损评估具有十分重要的意义。

1.2 监测传感网研究现状

监测传感网在各行各业发挥着越来越大的作用，吸引众多的学者进行着孜孜不倦的研究。限于篇幅，这里仅探讨灾害监测、智能交通、文化遗产监测、矿山物联网方面的研究现状。

M-WSN 一般具有无线节能传输、无人值守、低功耗且独立电源支持、实时性强等特征^[15]，其节点可以随机部署，网络形式丰富多样，节点之间可以协同感知和传输，能够监控广阔区域，并在被监测对象的不同阶段发挥作用。以灾害监测为例（图 1.2）^[16]：灾前服务于灾害预测，即对灾害区域进行实时、连续观测，

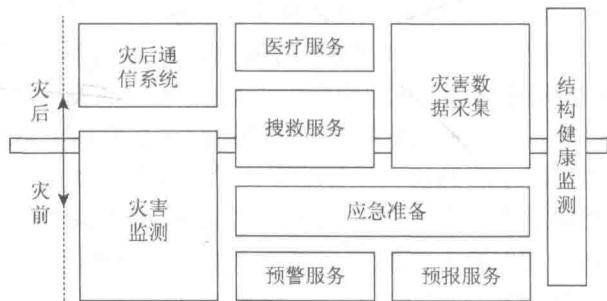


图 1.2 WSN 在灾害监测中的应用

为各级部门和普通大众提供灾害预警预报服务,并为决策机构提供应急准备参考;灾时继续观测,服务于灾害趋势预测和灾害区域提取;灾后服务于灾害影响程度评估,如果灾害导致常规通信设施部分或全部瘫痪, M-WSN 也可作为临时救灾通信系统,为医疗和搜救提供决策数据。此外,在灾前、灾时和灾后, M-WSN 都可以提供结构健康监测服务,实时监测重点建筑的结构健康状况。

滑坡监测是 M-WSN 的重要应用领域。滑坡是滑体沿着滑面在滑床上运动的一种灾害运动形式^[4]。发生滑坡之前,边坡岩体的内应力会连续变化。当滑动力大于岩土体的抗滑力后,就会发生变形和滑动。滑坡监测可以采用深部位移监测法、地表位移监测法、滑坡体应力应变监测法、地下水监测法、地声监测法、影像监测法等,其中许多方法需要人工操作,如深部位移监测法、地表位移监测法等,致使监测效率低下,难以实现连续、实时监测。而通过超宽带 WSN 等手段,不但可以实现大面积密集监测,而且可以轻易实现表面位移、深部位移、声发射、影像等多种技术的协同监测,结合运动学和动力学理论,对滑坡进行准确监测和预报。

M-WSN 在火山监测方面也有很大优势。与传统的数据采集设备相比, M-WSN 节点体积小、重量轻、能耗低,可用于监测火山活动情况^[17, 18],研究火山震动波的传播规律并确定震源。火山震动信号一般位于 1~20Hz 的低频段,根据奈奎斯特采样定理,所需的采样频率至少应为 40Hz。除了采样频率外,其他需要考虑的 QoS 指标有可用性、可靠性、响应时间、时延、吞吐量、带宽容量、丢包率、占空比 (duty cycle)、能耗、平均抖动、负载因子、流量类型等。

M-WSN 适用于大范围内的地震监测和预警。王玉和陈晓清针对汶川地震区山地灾害提出了基于 M-WSN 的预警体系^[15]。他们根据降雨、位移、含水量和水压力等灾害激发因子的监测数据,以及地形、地貌、植被和岩土体等灾害形成背景因素,结合灾害判识模型,判断是否会有山地灾害爆发。灾害发生后,根据实时监测数据分析灾害时间、规模、威胁范围,并发布预测预报信息,并在专家、领导以及相关部门的协同下发布预警避灾信息,制定防灾减灾措施。

M-WSN 在其他地质灾害监测预警方面也具有很广泛的应用。Chen 等从传感器、网络和能耗方面研究了基于 WSN 的库区地质灾害预警问题^[16]。他们以 MicroRF-201 作为感知传感器,通信距离可以达到 300~3000m,支持低功耗设计并具有较大的内存空间。文献[16]考虑了网络层的可靠性和实时传输能力,设计了一个支持在故障情况下联网恢复、移动节点管理功能的动态路由协议,并提出了对应的数据融合和重建方法,以支持海量、异构数据处理和融合。

另外,在灾前、灾时和灾后都需要对重点建筑进行结构健康监测 (structure health monitoring, SHM),如桥梁、铁轨、轨枕以及轨道设备^[19]。传统的 SHM 通常是集中式的, WSN 仅仅被当做数据收集设备^[20],监控中心只能收到有限节点的

数据,只能对受损最严重的区域进行重点监测而忽略其他区域。此外,传统方法也难以及时监测极端事件(如地震)导致的结构损害,因为采集和分析数据需要较长的时间。为此,需将监测系统的 cyber 部分和 physical 部分综合起来考虑,基于关系数据库的感知数据、元数据的存储与管理模式^[21],构建分布式、层次化的 SHM 系统,利用 WSN 的处理能力对采集到的数据进行初步处理,提取出与 SHM 相关的特征,实现柔性损毁检测和定位。

M-WSN 在文化遗产监测中也具有广泛应用。影响文化遗产保护的因素主要是自然灾害和人为破坏两方面。其一,火灾水患等自然灾害和风化侵蚀、环境污染等使文化遗产变得脆弱不堪。如敦煌壁画,由于空气里含二氧化碳过多而褪色较快;石质性的文物虽然结实,但是对所处环境非常敏感,特别是易受酸雨影响而风化。其二,人为破坏和管理不善造成的后果更为严重。大足石刻两次被盗,武当山遇真宫惨遭大火灭顶之灾,长城遭遇开矿、修路等破坏事件时有发生,我国在文化遗产保护方面任重而道远。值得庆幸的是,近年我国对文化遗产地保护工作越来越重视,一大批遗产地保护被提升到国家层面,新兴技术(如空间信息技术和物联网技术^[51, 52])逐渐被应用到文化遗产保护中,这些技术的应用给文化遗产的保护和监测提供了强大支持,数字化敦煌就是其中的典型代表^[50]。

在国外,欧洲在文化遗产地监测预警方面走在世界前列,欧盟(具有独立的科研支持计划)、意大利、瑞士、瑞典、西班牙、德国等都非常重视,资助了大量的研究项目和实际保护项目,这和他们拥有大量历史遗迹和文物有关。例如, MUSECORR 项目^[11],它由法国、捷克、德国、瑞士、丹麦等国的七家研究机构共同发起,对文物进行基于 WSN 的实时电流变化和温湿度监控,以实时掌控文物的腐蚀情况及其内在规律。

一些位于极端气候环境下的遗产地在很大程度上受到火灾的威胁,在树木等因素共同作用下,短时间内就会对文物造成无可挽回的损失。此外,由于遗产地通常受保护的时间已经较长,附近通常覆盖有珍贵的古树,这更加重了火灾危险^[24]。为此,欧盟第 7 框架计划支持了一个 Firesense 项目(FP7-ENV-2009-1-244088-FIRESENSE),名为文化遗产保护中利用多传感器网络的着火检测与管理^[25, 26]。项目通过在需要监测的地方部署一个能够检测温度的 WSN,并安装普通可见光摄像机和红外摄像机,对遗产地进行远程监控,并提供气候数据。

在智能交通方面,监测传感网可用于交通管理、车辆控制、交通信息服务、运载工具操作辅助、货运管理、交通基础设施状况感知、电子收费和紧急救援等方面。车联网是实现智能交通的重要手段,它以车内网、车际网和车载移动互联网为基础^[22],按照约定的通信协议和数据交互标准,在车辆与车辆、车辆与互联网之间进行信息交换,以实现上述智能交通所需功能。车联网是一种大规模的移

动网络时空数据采集技术,能够方便地将所获取的信息与现有多种动态交通采集手段获取的信息进行快速有效的融合,对于获取全面准确的全时空动态交通信息、实现车辆和道路监控的实时化和管理的智能化、推动交通安全与效率提升具有重要意义。

基于 WSN 的矿山感知物联网也是保障煤矿安全开发利用、构建和谐矿区的重要保障。《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,将“重大生产事故预警与救援”作为公共安全领域的优先主题之一,重点研究矿井瓦斯、动力性灾害预警与防控技术^[23]。在《社会发展科技领域国家科技计划项目需求征集指南》中,明确提出研究数字矿山关键技术、基于物联网的环境重大事件监测预警与处置技术^[24]。国务院办公厅下发的“安全生产规划”也提出了建设煤矿瓦斯综合防治和矿山安全监测及信息化系统、提高重大危险源监控的目标^[25]。

目前我国矿山的安全信息感知水平较低,信息获取手段严重匮乏,尤其是缺少瓦斯事故^[26, 27]、顶板事故^[28, 29]、突水事故^[30, 31]、火灾事故^[32, 33]等重大灾害的实时连续监测预警手段。为此,需要针对煤矿环境的受限异质、时变非线性等特点,研究煤矿灾害多源感知节点的协同部署和感知问题,改进矿井信息传输网络(尤其是无线网络)的部署合理性,减少矿山信息监测的盲区;大力研究节能感知和传输方法,提高信息传输的速度和可靠性,进而建立各种灾害综合监测预警模型,形成较为完善的自动监测预警系统,为灾害防治及安全决策提供科学依据。

1.3 传感网节能传输研究现状

灾害监测数据必须传输到监控中心方可达到决策支持的目的(图 1.1)。传感节点采集到数据后,通过特定路由方法将数据传输到一个或多个目标(Sink)节点, Sink 节点再通过运营商的 2G/3G/4G 等无线设施或光缆等有线设施传输到数据中心。不恰当的路由选择方法将会导致部分节点快速“死亡”^[2, 3],造成监测空洞和网络分裂,甚至导致整个网络无法工作。

路由选择的关键,一是确定最优下一跳节点,二是确定数据转发时机。在路由选择过程中,网络资源、数据类型、容错能力、服务质量、数据报告模型等都是重要的考虑因素。节能路由一般采用单数据包能耗、每轮消耗能量、第一个节点死亡的时刻、存活节点总数、平均时延、数据传输成功率等作为选路指标。无论采用何种指标,选择候选转发节点时都需要邻居节点的状态信息^[34],如邻接链路的状态信息、邻居节点与目标节点的距离等。

数据报告模型对路由设计具有重要影响。WSN 有五种典型的数据报告模式,

见图 1.3。其中，局部通信模式用于向邻居广播节点状态，或者直接在两个节点之间传输数据，通常用于节点之间的协作观测和传输；点对点模式用于将数据从一个节点直接传输到另外一个节点，在 WLAN 环境中使用得较多；汇聚模式用于将多个节点的数据向一个节点汇聚，绝大多数数据收集应用属于这种模式，特别是在分簇路由中使用得非常广泛^[35]；融合模式主要用在中继节点对收到的数据进行处理和融合，从而降低数据量；发散模式则多用于将命令（如传感器规划）从 Sink 节点发往传感节点。

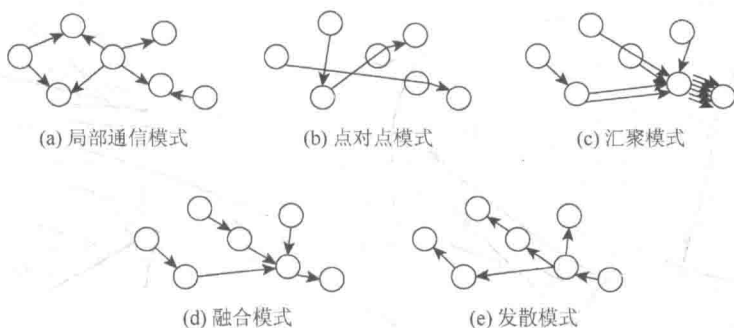


图 1.3 WSN 的数据传输模式

M-WSN 的传感节点能量、处理能力和存储空间都十分有限。但是，灾害监测的特点要求一旦有事件发生，就需要将数据从分布式部署的多个传感节点连续、实时传输到 Sink 节点（进而传输到数据中心）。不过 M-WSN 的路由设计也有有利的方面：观测节点在部署好以后，节点位置在生命周期内几乎固定不动，观测网络的拓扑结构不会经常变化，除非重大事件导致部分节点发生位置偏移^[36]；节点位置几乎不变使得观测系统能够轻易确定数据位置属性，便于设计基于地理位置路由和分析事件的时空演化过程^[37]；由于 M-WSN 通过多个传感节点的协同对事件进行聚焦观测，不同节点在同一时间、同一节点在不同时间所感知的数据具有极强的空间相关性和时间相关性，利于在路由过程中实施数据融合以降低数据量、降低带宽消耗、提高能量效率。

现有 WSN 路由算法主要有五种类型^[1]，即基于网络结构的路由、基于通信模型的路由、基于网络拓扑的路由、可靠路由、其他路由（图 1.4），它们涵盖了图 1.3 中的所有数据传输模式。基于网络结构的路由可以分成平面性路由和层次性路由，平面性路由中的所有节点地位都是相同的^[38]，而层次性路由则将网络中的节点分簇^[39]，典型的如 LEACH 及其派生算法^[40]，普通节点的数据交由簇头节点，在簇头节点进行数据融合之后再转发给目标节点。我们在这方面也进行了一些探索^[3, 35]。层次性路由的关键是簇的划分和簇头的选择^[35]，由于簇头承担了

全部数据转发任务和数据融合任务,因此能量消耗比普通节点大得多。为了避免簇头能量快速耗尽而死亡,要求不同节点轮流担当簇头角色,以实现节点间的能耗均衡。

基于通信模型的路由包括查询驱动型、事件驱动型和协商合作型三种,是本书的研究重点。查询驱动型在用户需要了解监测区域情况时下达查询命令触发观测和传输过程,事件驱动型则由观测区域所发生的事件驱动系统进行监测^[5],特别适用于灾害监测应用场景,而协商合作型要求节点之间彼此协同,合力完成观测和传输任务^[41, 42]。

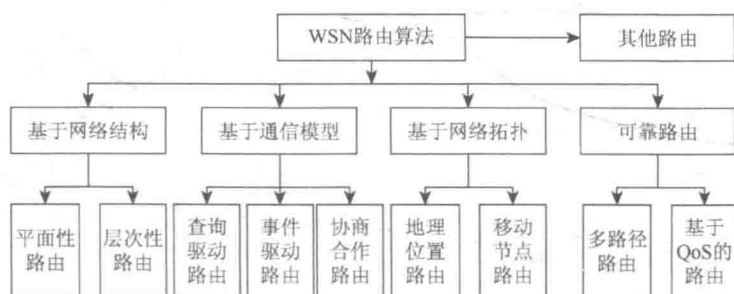


图 1.4 WSN 路由协议的分类

基于网络拓扑的路由包括地理位置路由和移动节点路由。地理位置路由利用节点位置信息提高路由算法的性能^[43, 44],典型的如 GPSR (greedy perimeter stateless routing) 算法,它从当前节点的邻居节点中选择距离目标节点最近、同时比当前节点到目标距离近的节点作为下一跳。如果不存在比当前节点更近的邻居节点,贪婪算法将会失败,此时采用右手法则边界路由。在拓扑动态变化的 WSN 中,仅通过局部拓扑信息就能快速找到到达最终目标的新路径,而移动节点路由则通过设定移动 Sink 或其他移动节点的方式辅助收集数据^[36]。

可靠路由的目标是增强数据传输的可靠性,可采用多条路径以保障路径可靠性(多路径路由),或者要求在路由选择时满足 QoS 约束(基于 QoS 的路由)。多路径路由可以显著提高传输可靠性,促进负载均衡,有相交路径与非相交路径、主从路径与非主从路径之分^[45]。QoS 约束因子与应用密切相关^[46],常见的 QoS 指标有时延、可靠性、抖动、带宽^[39],路由能耗也可视为一种 QoS 指标。

除了基于网络结构的路由、基于通信模型的路由、基于网络拓扑的路由、可靠路由外,还有一些基于其他思路的路由算法。考虑到 WSN 链路的动态时变性,采用确定性路由方法性能不高,而机会路由不用事先确定数据传输路径,节点选择下一跳时利用无线信道的广播特征,将数据转发给一个节点集。由于有多个候选转发节点,因此提高了传输可靠性,降低了数据转发次数、网络时延和端到端

吞吐量。

由于智能天线可以自适应地将波束对准目标节点^[47],并能按需调整波束宽度^[48],因此将同样大小的数据发送到同样距离,所需要的发射功率比全向天线要小得多。如果能充分利用智能天线和分簇方法的优势,将能实现物理层和网络层的跨层优化,获得较高的能量增益。群智能优化也在 WSN 节能路由设计中得到了广泛的应用,以提高传感节点的处理效率,避免复杂的数学运算,如遗传算法、粒子群优化和基于模糊规则的系统(fuzzy rule-based systems, FRBS)等^[49],Zungeru 等对此有很好的综述^[50]。这些方法可以与占空比调度^[51, 52]、虚拟力^[53]等思想结合,以降低数据量、延长网络寿命。

节能路由在矿井中也已有大量研究成果。矿井监测 WSN 与地面 WSN 的主要区别:一是拓扑结构为长带状的一维链形结构^[54];二是采掘工作面与采空区等区域的动态推进特性^[37]。研究适合这种复杂环境下包含多种大型设备、具有不同地质构造和物理走向的网络模型和数据传递方法,是延长矿井监测 WSN 寿命和提高监测精度的前提和保障^[55]。为此,人们对通用的地面路由协议加以改进^[56, 57],重点解决链状结构网络中靠近 Sink 节点的 WSN 节点能效消耗过高的问题;或将 Mesh 网络、混合结构网络的思想用于井下 WSN 路由设计^[58, 59],重点解决井下 WSN 网络鲁棒性低、终端对骨干传输网络依赖性高的问题;或针对特定监测目的和应用区域设计路由方法^[60, 61],如支架支撑力监测、采空区温度监测。这些方法都可以归结于图 1.4 所示的类型范畴。

1.4 监测传感网节能传输实验方法

总体而言,监测传感网的实验方法包括仿真实验和实物实验,其中仿真实验又包括纯软件仿真和半实物仿真。

在纯软件仿真中,NS2 使用得非常广泛,它不但是开源免费软件,而且大量的示例模型和其他研究人员贡献的代码可供参考。OMNeT++是另外一个使用较为广泛的开源软件,可以免费用于学术和非营利性目的;它是一个模块化的离散事件仿真器,支持协议仿真、排队网络建模、硬件体系结构验证等需求。在商业仿真软件领域,QualNet 和 OPNET 的功能非常完善,不过受限于高昂的价格,在国内的用户并不太多。此外,也有相当多的用户使用 MATLAB 评估网络协议的性能,对于这些软件的详细介绍超出了本书的范围,感兴趣的读者可以参阅相应书籍。当然,还有许多可供选用的仿真软件,如机会通信领域一般使用 ONE (opportunistic network environment simulator) 软件,这将在第 7 章进行介绍。