

国家重点研发计划《煤矿重特重大事故应急处置与救援技术研究》，项目编号：2016yfc0801800

国家自然科学基金面上项目《煤矿井下灾后救援网络重构与应急数据流传输关键问题研究》，项目编号：61471361

基于超宽带无线电的 矿山无线通信技术研究

张国鹏 钱建生 ○ 著

Jiyu Chaokuandai Wuxiandian De

Kuangshan Wuxian Tongxin Jishu Yanjiu

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

重特大事故应急处置与救援技术研究》，项目编号：2016yfc0801800

项目《煤矿井下灾后救援网络重构与应急数据流传输关键问题研究》，
项目编号：61471361

基于超宽带无线电的矿山无线通信技术研究

张国鹏 钱建生 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书研究复杂矿井网络环境中的无线多媒体数据流传输问题,增强矿山无线传感器网络的服务质量并延长网络井下生存期。全书共分6章,涉及超宽带(UWB)和多天线(MIMO)融合理论、抗多径衰落的MIMO-UWB空时编码和解码方案、基于跨层设计的多跳中继节点选择和拓扑控制策略等三个具体的研究方向,提供了增强矿山无线传感器网络服务质量并延长其井下生存期的基本思路。

图书在版编目(CIP)数据

基于超宽带无线电的矿山无线通信技术研究 / 张国鹏, 钱建生著. —徐州:中国矿业大学出版社,
2017.10

ISBN 978-7-5646-3749-1

I. ①基… II. ①张… ②钱… III. ①矿山通信—超
宽带技术—研究 IV. ①TD65②TN926

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第264374号

书 名 基于超宽带无线电的矿山无线通信技术研究
著 者 张国鹏 钱建生
责任编辑 王加俊
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 6.75 字数 128千字
版次印次 2017年10月第1版 2017年10月第1次印刷
定 价 23.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤矿井下恶劣的无线通信环境以及大规模多媒体传感数据的平行、汇聚传输,致使以矿井无线信道为传输介质的无线传感器网络(WSN)出现数据负载瓶颈,并由此导致多媒体数据流的 QoS(误码率、时延和数据速率)无法得到保障等问题。尽管分布式信源编码和语音、图像、视频压缩处理算法可以在信源端减小多媒体数据的传输量(即 WSN 的数据负载压力),但仍无法从根本上解决煤矿井下海量数据传输以及多媒体数据流的 QoS 保障问题。煤矿井巷长距离、窄空间结构所导致的电磁波密集多径传播是矿山 WSN 多媒体数据流传输所面临的主要环境约束。若能够有效抑制矿井无线通信环境中的强多径衰落,就能在很大程度上突破矿山 WSN 的数据传输瓶颈,从而显著提高网络对多媒体数据流的容量并满足其 QoS 需求。

本书研究基于 MIMO-UWB 空时理论的 WSN 煤矿井下抗多径衰落机理,以增强井下单跳无线通信链路的 QoS 性能为研究起点,着重解决矿山 WSN 中基于多跳的 MIMO-UWB 数据传输以及多媒体数据流的 QoS 保障问题。

本书重点研究以下三个方面内容。

1. 抗井下强多径衰落的单跳无线通信链路

运用 UWB 和 MIMO 无线通信理论可以有效提高地面无线通信系统的抗多径衰落能力。本书融合 UWB 和 MIMO 技术,研究 MIMO-UWB 抑制煤矿井下强多径衰落的关键技术。从研究矿山 WSN 的物理层和数据链路层出发,解决煤矿井下基于 MIMO-UWB 的空时编/解码策略等相关问题,提高矿山 WSN 单跳无线通信链路的 QoS 性能(误码率和单跳数据速率)。

2. 面向 QoS 的煤矿井下长距离(多跳)多媒体数据流传输

受煤矿井下长距离、窄空间限制,矿山 WSN 多采用多跳组网方式。本书研

究了煤矿井下面向 QoS 的多跳、多媒体流传输及其 QoS 保障问题,提出了将单跳(短距离)MIMO-UWB 实施方案扩展至矿山 WSN 网络层的多跳(长距离)数据传输的方案,解决了面向 QoS 的多跳中继节点选择策略等网络层关键问题。

3. 矿山 WSN 节点的能耗最小化和全网能耗平衡机制

煤矿井下高速多媒体数据流传输会加速无线传感器节点的能量消耗。无线传感器节点的能量受限特性以及各节点数据负载量的不一致性会导致矿山信息孤岛,即网络覆盖盲区的过早出现。为延长 WSN 的井下生存期、避免网络覆盖盲区的过早出现,本书研究了多媒体数据流传输过程中传感器节点的能耗最小化和全网节点的能耗平衡问题,以满足多媒体数据流的 QoS 需求为前提,以减小和平衡全网节点的能耗为目标,优化矿山 WSN 中的多跳中继节点选择策略以及中继节点的能耗策略,有效地延长了 WSN 在井下的生存期。

由于时间仓促,加之水平有限,疏漏和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2017 年 10 月

目 录

1	绪论	1
1.1	矿山无线网络的工作环境	1
1.2	面临的挑战	4
1.3	矿山无线通信网络的体系结构	6
1.4	主要研究内容	8
2	矿山无线网络实现的整体方案	13
2.1	基于 MIMO-UWB 的单跳链路空时编/解码方案	13
2.2	基于多跳传输的中继节点选择	15
2.3	面向全网节点能耗平衡的算法优化	17
2.4	矿山无线通信网络的特点	19
3	基于 UWB 的井下无线传感器网络信道模型	20
3.1	煤矿井下的 UWB 通信系统	20
3.2	UWB 信号的井下传播环境	21
3.3	UWB 信号井下传播的信道建模	23
3.4	衰减模型	24
3.5	仿真实验	27
3.6	总结与展望	31
4	矿井环境下的 UWB 信号发射和接收策略	33
4.1	矿井环境下的 UWB 信号传输机理	33
4.2	UWB 井巷衰减与多径传播特性	34
4.3	UWB 井巷多径传播信道模型	36
4.4	UWB 矿井多径衰落仿真实验	37

4.5	矿井 UWB 信号调制发射策略	39
4.6	矿井 UWB 信号接收策略	40
4.7	结论	42
5	矿井超宽带无线中继传输的误码率性能	43
5.1	矿井环境下 UWB 点对点传输	43
5.2	UWB 单跳直接传输链路	44
5.3	UWB 中继传输链路	47
5.4	仿真实验	51
5.5	结论	54
6	基于多天线阵列的矿井超宽带无线通信系统研究	55
6.1	矿井环境下 UWB 点对点传输	55
6.2	UWB 井巷衰减与多径传播特性	56
6.3	基于 SISO-UWB 的矿井无线通信	58
6.4	基于 MIMO-UWB 的空时编/解码方案	62
6.5	仿真实验	65
6.6	结论	68
7	矿山应急通信网络的组网方案	69
7.1	矿山应急通信网络的重要作用	69
7.2	构建矿山应急通信网络所面临的挑战	72
7.3	矿山应急通信网络的组网研究	75
7.4	结论	85
附录		86
	主要缩略语对照表	86
	主要数学符号汇总	88
参考文献		89

1 绪 论

1.1 矿山无线网络的工作环境

煤矿井下作业远离地面,地形复杂且环境恶劣,瓦斯突出、顶板塌陷、矿震、透水等易发事故不仅对矿山生产造成毁灭性破坏,而且严重威胁矿工生命安全。随着信息技术的快速发展,集环境监测预警、人员/设备状态监控和生产/救援决策为一体的“数字化矿山^[1]”和“矿山物联网^[2]”等现代化矿山综合自动化系统在提高煤矿安全生产水平、减少灾害事故发生以及灾后抢险救援等诸多方面发挥着日益重要的作用。无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)以其良好的移动自组织性、可伸缩性和灾后可自愈性,已经成为上述各类矿山自动化系统的重要组成部分^[3]。WSN 不仅可对矿区生产环境、人员和设备状况进行动态、实时监测,还可与矿山有线数据网络(如工业以太环网和现场总线网络)形成互补,协同将监测信息传送至数据集成与决策应用终端,为矿山安全生产提供实时、可靠的数据传输平台,如图 1-1 所示。

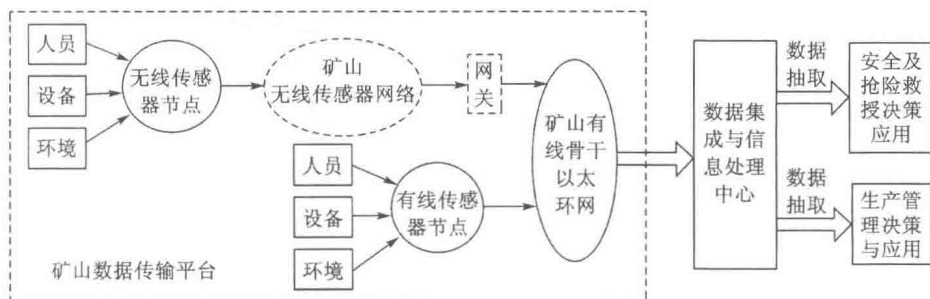


图 1-1 矿山高速信息传输平台

然而,矿山信息化建设因其特殊的作业空间环境和装备的高可靠性要求,其水平远滞后于地面信息化水平。近年来,随着 IP 语音电话、车载视频以及救援探测器等移动多媒体监控终端在矿山安全生产中的广泛应用,矿山 WSN 不仅要传输多类环境监测数据(如瓦斯浓度、湿度、温度、矿压、矿震等信息,多以文本数据格式进行存储和传输),还需要监测/传输语音、图像、视频等多媒体格式数据。尽管针对矿山 WSN 的数据传输理论已经取得了不小的进展,并且能够承载小规模、间歇性的矿区多媒体数据传输,但是,今后各类多媒体监控终端在矿区的大范围推广和应用,以及应急救援、采掘工作面等特殊区域或场合所需的大量多媒体终端的并行、协同监控,所引发的大规模多媒体数据传输会导致矿山 WSN 出现数据承载瓶颈,无法有效、及时传输监测数据,最终影响到整个矿山安监系统的正确、及时决策。例如,中国矿业大学物联网(感知矿山)研究中心所承担的 2012 年霍尔辛赫煤矿物联网示范工程(一期)中,现有基于无线局域网标准 IEEE 802.11 b/g(即 Wi-Fi)的 Mesh 无线网络架构尚不能解决工作面人员/设备连续视频监控所引发的中等数据规模多媒体信息传输问题。因此,必须对现有的矿山 WSN 进行全新的网络技术规划和协议设计,才能满足未来矿区无线数据传输平台的特殊需求。这些需求包括:大规模的多媒体数据传输,严格的网络服务质量(QoS)保障,以及突发性流媒体数据传输。下面对这些需求进行详细分析。

1.1.1 大规模多媒体数据传输

尽管众多煤矿已建成如图 1-1 所示的井下网络系统,但这些网络多用于局部信息监测,其采集和传输的信息量较少。随着矿山物联网和数字矿山在煤矿生产中的应用,针对生产过程/环境、人员/设备状况等复杂对象的监控,要求传感器节点实时采集、传输各类多媒体数据,如语音、图像、视频以及人员与人员、人员与设备、设备与设备间的交互信息。这些呈几何级数增长的海量多媒体数据将对煤矿现有的无线/有线网络、数据处理和存储能力形成巨大挑战。以淮北矿业集团某矿井为例,其用于安全监测的井下无线传感器数量近 1 600 个,监测的多媒体数据类型近 60 种,每个传感器节点日产生数据量近 600 Mbps,若

再考虑用于其他生产目的数据监测,其所使用的传感器数量 and 多媒体数据类型将至少提高一个数量级。

1.1.2 严格的网络服务质量(QoS)保障

矿区多媒体数据传输要求 WSN 提供严格的 QoS 保障。例如:(1) IP 语音的传输速率不低于 16 kb/s,误码率不高于 10^{-3} ,数据分组接收时延不超过 20 ms;(2) 视频的传输速率不低于 200 kb/s,误码率不高于 10^{-5} ,数据分组接收时延不超过 40 ms^[4]。若上述多媒体数据业务的 QoS 需求无法得到保障,则不仅会造成矿山安全生产决策的不准确性和滞后性,更严重的还会延误矿难救援的最佳时机,无法实施及时、有效的救援。

1.1.3 突发性、流媒体数据传输

当前的矿区环境监测与小规模多媒体数据传输具有间歇性和规律性的特点,对网络宽带要求较低(每秒几兆比特)。而未来在矿区会大规模部署无线多媒体监控终端,一旦有相关井下安全生产事件发生,则突发性多媒体数据需要进行长时间、不间断连续传输。此外,工作面和抢险救援现场通常需要多区域、多终端的协同、联动监控。因此,矿山 WSN 必须具备大规模、突发性、流媒体数据传输能力(每秒几十兆甚至上百兆比特)。由于 WSN 受井下恶劣无线通信环境的影响,且传感器节点体积小、携带能量有限,还受到本质安全型最大输出功率的限制,当前的矿山 WSN 尚不具备这一能力。

解决上述矿山 WSN 的多媒体数据传输问题需要多个研究领域的协同努力。首先,分布式信源编码及数据集成方案^[5,6]可以利用多个相邻传感器节点监测信息的时间、区域和事件相关性,去除冗余信息,在多媒体信源层面减小数据传输量,从而相对提高 WSN 的数据传输能力^[7,8]。这一方面的研究“煤矿物联网多源异构监测信息源端压缩采集方法研究”已经获得 2012 年国家自然科学基金的支持。其次,运用分布式语音、图像和视频压缩算法^[9,10]可以进一步对多媒体数据进行压缩预处理,通过增加接收端解码器复杂度的方式来换取网络数据负载的减小,从而降低矿山 WSN 的数据承载压力^[11,12]。这一方面的研

究“面向矿井复杂环境和机动应用的无线视频编码技术研究”也已获得 2012 年国家自然科学基金的支持。

1.2 面临的挑战

与上述试图通过减小矿山 WSN 的数据承载压力,从而间接提高其多媒体数据传输能力的研究方法不同,本书采用另一种研究思路,即应用先进的无线通信理论直接扩展矿山 WSN 的数据传输能力,对煤矿井下多媒体数据流的传输机理及其 QoS 保障机制展开研究,最终为矿山安全生产决策层提供高速、实时、可靠的无线多媒体数据传输平台。

由于矿山 WSN 独特的生存环境及其所受到的相关技术制约,相关的工作将面临以下挑战。

1.2.1 恶劣的煤矿井下无线通信环境

煤矿井巷具有特殊的窄截面、长距离、多弯道管状封闭空间结构,如图 1-2 所示。巷道表面多为矿物导体,且其内部充满多种矿尘微粒。这些因素

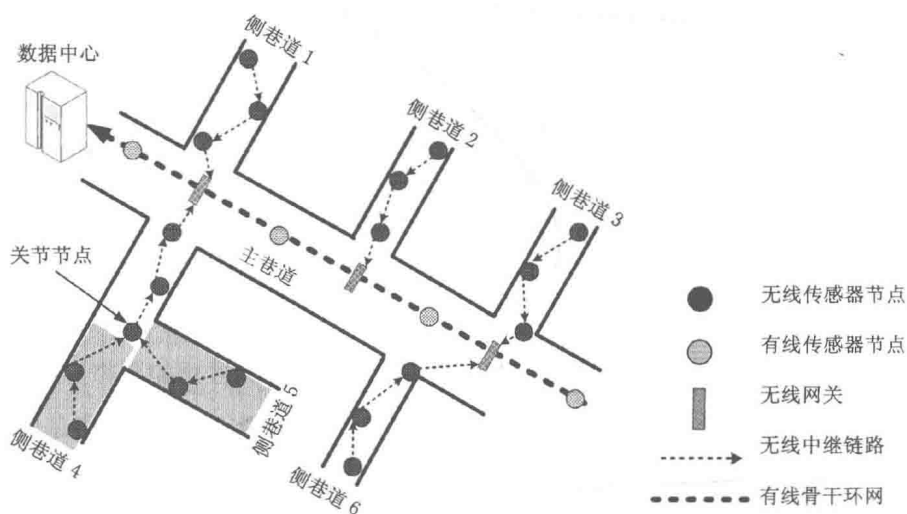


图 1-2 井下巷道结构和 WSN 部署示意图

引发无线电磁波在矿井巷道中的复杂反射、折射和散射,并最终导致无线电信号的密集多径传播和强多径衰落^[13]。在矿井巷道这种极为恶劣的无线通信环境中传输多媒体数据业务并满足其 QoS 需求,将是一项极具挑战性的研究工作^[14,15]。

1.2.2 基于多跳的矿山 WSN 多媒体数据传输

尽管基于 Wi-Fi 无线接入点(AP)的 Mesh 网络^[16,17]已经能够传输少量的视频业务(如矿车携带摄像头),并已经在中国矿业大学物联网研究中心的“夹河矿”和“霍尔辛赫矿”两个矿山物联网示范工程中得到应用,但是,AP 至监控终端只经过一跳无线传输。与基于单跳无线传输的 Mesh 网络体系结构不同,矿山 WSN 采用多跳组网方式^[13],需要多个相邻的传感器节点协同将监测数据以无线中继转发的方式传送至有线骨干网网关节点(AP 或者传感器汇聚节点),再传至数据集成中心,如图 1-2 所示。因此,需要研究面向多跳的无线多媒体数据传输及其 QoS 保障问题。

1.2.3 无线传感器节点能耗的最小化及全网节点能耗的不一致性

如图 1-2 所示,某些处于巷道交界或监测频繁区域的节点(如图 1-2 中的关节节点)相比于其他节点数据传输负载较大,能量消耗也就过快,从而引发全网节点的能耗差异,并由此导致矿山信息孤岛即网络覆盖盲区的出现,如图 1-2 中关节节点断电后的阴影区域(侧巷道 4 和 5)。因此,在研究面向 QoS 的矿山 WSN 多媒体数据传输机理的同时,还要尽可能平衡网络中各节点的能耗,避免井下网络覆盖盲区的过早出现。然而,无线传感器节点依靠电池供电,其每个节点都有减小数据传输量、降低能耗的优化目标。显然,这与网络整体能耗均衡化的目标是不一致的,甚至是相矛盾的。尽管针对 WSN 的能耗均衡问题已受到国内外研究学者的广泛关注^[18-20],但是这些研究均未综合考虑个体节点能耗最小化这一优化目标。因此,本书的研究工作需要保障多媒体数据传输 QoS 的同时,综合考虑个体节点能耗最小化和全网节点能耗均衡化这两个不一致的网络优化目标,给出最佳的解决方案。

综上所述,本书的研究成果将为煤矿井下大规模无线多媒体数据流传输及其 QoS 保障机制提供有效的解决方案,具有实际的矿山应用价值。

1.3 矿山无线通信网络的体系结构

矿山 WSN 相关的研究工作一直受到国内外学者的广泛关注,在我国,也一直受到国家自然科学基金的支持。例如,2008 年的自由面上项目“煤矿工作面无线传感器网络组网关键技术研究”,2010 年的青年项目“井下复杂环境中无线通信与组网关键技术研究”和 2012 年的青年项目“矿井无线 Mesh 网络关键技术的基础研究”等。从数据网络协议角度分析,矿山 WSN 由物理层、数据链路层和网络层构成,如图 1-3 所示。相应的,本书针对的矿山 WSN 多媒体数据传输及 QoS 保障机制的研究工作也按照上述三个网络层面依次展开。在各协议层面,项目的研究将借力于当前先进的无线通信理论和技术,即在矿山 WSN 的物理层和数据链路层应用无线超宽带(UWB)^[21]和多天线(MIMO)^[22]通信理论,在其网络层应用无线网络跨层设计理论^[23]。下面,针对上述技术理论及其在矿山无线多媒体数据传输网络领域的研究现状进行分析。

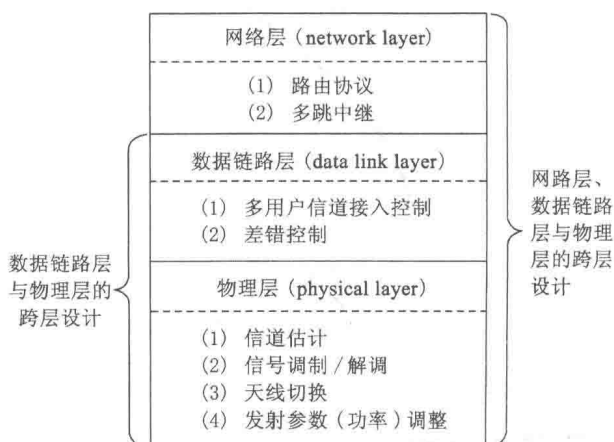


图 1-3 矿山 WSN 分层协议体系结构与跨层设计思想

1.3.1 物理层:煤矿井下 UWB 无线传输

在煤矿井下等封闭空间环境中,窄带信号的多径传播会使得接收端遭受严重的码间串扰,由此导致无线传输的高误码率和低数据传输速率^[24]。近年来,具有抗多径、低能耗、高速率(短距离)、高精度定位等优良特性的超宽带 UWB 调制/解调技术已经成为封闭空间环境下无线通信的首选^[25],同时也受到矿山无线通信领域中国内外学者的重视。例如,文献[26]和[27]分别研究了脉冲(IR)和多波段-正交频分复用(MB-OFDM)UWB 信号在煤矿井巷的多径传播和衰落特性;文献[28]则以发射和接收节点间是否存在可视链路为标准,对煤矿井下各类 UWB 无线信道进行区分建模;王艳芬 2009 年在其博士学位论文《矿井超宽带无线通信信道模型研究》中,对 UWB 信号矿井传输的大尺度和小尺度衰落特性进行了综合研究,并对 UWB 信号在煤矿井下的传播特性参数进行物理和数学建模。上述研究成果为本项目研究矿井无线信道对多媒体数据传输性能的影响奠定了理论基础,但是它们均未涉及 UWB 信号在煤矿井下传播的误码率特性、基于抗多径的最优发射和接收策略等多媒体数据传输及其 QoS 保障所需解决的关键问题。

1.3.2 数据链路层(跨物理层):基于 MIMO 的煤矿井下无线通信

尽管 UWB、OFDM 等先进的宽带无线传输技术可以改善传统窄带系统在抗多径衰落方面的先天不足,但是,在矿山、隧道等密集多径传播环境中,UWB 的单独使用仍然无法满足多媒体数据传输对低误码率、高速率和低时延的严格要求^[29]。多天线 MIMO 系统^[30]作为另一类新兴的无线通信抗多径干扰技术可以进一步利用无线信道的多径传播特性、获取空间分集增益,从而在不增加系统频谱带宽和传输能耗的前提下,较大幅度提高无线传输的数据速率。尽管当前已有众多文献对 MIMO 系统在地铁^[31]、公路隧道^[32]、煤矿井下^[33-35]等封闭空间环境中的应用和理论展开了研究,郑红党 2010 年在其博士学位论文《煤矿井巷电波传播理论和 MIMO 信道建模关键技术研究》中也对窄带 MIMO 系统的煤矿井下信道容量进行了深入分析,但是这些研究成果均基于窄带系统,

没有针对超宽带矿井无线通信。由于多媒体数据传输遭受井下强多径衰落的影响,并受到传感器节点体积小和最大输出功率的限制,本书的研究工作将融合 MIMO 和 UWB 这两种先进的抗多径干扰理论,最大限度地提升矿山 WSN 多媒体数据传输和 QoS 保障能力。为此,本书需要对 MIMO-UWB 融合系统的空时编/解码方案及其误码率和数据传输速率特性进行理论与实验的综合研究与分析。

1.3.3 网络层(跨物理层和数据链路层):煤矿井下多跳无线中继传输

矿山 WSN 采用多跳组网方式,文献[16,36-38]研究了矿山多跳 WSN 在煤矿井下的层次型组网策略^[36]、拓扑控制算法^[37]、多跳数据传输协议^[38]以及 Mesh 应急救援动态组网方案^[16]。近年来,相关的研究工作也获得了国家自然科学基金的支持,如 2010 年的面上项目“长距离 WMSN 的矿井多媒体救灾通信系统基础理论研究”和 2012 年的面上项目“基于协作通信的矿井多信息流无线传输关键技术研究”。然而,上述研究文献和研究项目多侧重于煤矿井下的多媒体信息压缩处理算法、长距离组网/布网方案以及路由算法,而未涉及面向大规模多媒体数据传输的物理层调制信号设计、基于多跳中继的数据链路层参数控制以及 QoS 保障机制等一系列相关问题。与有线网络不同,无线网络的物理层特性(阴影衰落、多径衰落等)直接影响其上层协议的性能(数据链路层和网络层)以及网络整体规划,同时,也是制约无线网络整体服务质量的最主要瓶颈。众多研究者认为只有突破有线网络中基于“分层”的通信协议架构,采用以无线网络的物理层特征为中心,对其物理层、数据链路层和网络层采用“跨层”联合设计的方法,才能获得最优的无线传输性能,从而最大限度地满足多媒体数据传输的 QoS 需求^[39,40]。作为理论上的创新点,也是对现有相关理论与技术研究的进一步提升,本书将“跨层设计”思想用于研究矿山 WSN 面向 QoS 的多跳、多媒体数据传输问题。

1.4 主要研究内容

煤矿井下恶劣的无线通信环境以及大规模多媒体传感数据的平行、汇聚传

输,致使以矿井无线信道为传输介质的 WSN 出现数据负载瓶颈,并由此导致多媒体数据流的 QoS(误码率、时延和数据速率)无法得到保障等问题(如对图 1-2 的分析)。尽管分布式信源编码和语音、图像、视频压缩处理算法可以在信源端减小多媒体数据的传输量(即 WSN 的数据负载压力),但仍无法从根本上解决煤矿井下海量数据传输以及多媒体数据流的 QoS 保障问题。实际上,煤矿井巷长距离、窄空间结构所导致的电磁波密集多径传播是矿山 WSN 多媒体数据流传输所面临的主要环境约束。如果能够有效抑制矿井无线通信环境中的强多径衰落,那么就能在很大程度上突破矿山 WSN 的数据传输瓶颈,从而显著提高网络对多媒体数据流的容量并满足其 QoS 需求。本书基于 MIMO-UWB 空时理论的 WSN 煤矿井下抗多径衰落机理,以增强井下单跳无线通信链路的 QoS 性能为研究起点,着重解决矿山 WSN 中基于多跳的 MIMO-UWB 数据传输以及多媒体数据流的 QoS 保障问题。具体说,本书依次研究了以下三个层面的内容。

1.4.1 抗井下强多径衰落的单跳无线通信链路

运用 UWB 和 MIMO 无线通信理论可以有效提高地面无线通信系统中的抗多径衰落能力。本书融合 UWB 和 MIMO 技术,研究了 MIMO-UWB 抑制煤矿井下强多径衰落的关键技术。在研究的第一阶段,为了提高矿山 WSN 单跳无线通信链路的 QoS 性能(误码率和单跳数据速率),以矿山 WSN 的物理层和数据链路层为研究重心,解决煤矿井下基于 MIMO-UWB 的空时编/解码策略等相关问题。

1.4.2 面向 QoS 的煤矿井下长距离(多跳)多媒体数据流传输

受井下长距离、窄空间限制,煤矿井下的 WSN 多采用多跳组网方式(如图 1-2 所示)。研究的第二步是煤矿井下面向 QoS 的多跳、多媒体流传输及其 QoS 保障。这一阶段的研究关键是如何将单跳(短距离)MIMO-UWB 实施方案扩展至矿山 WSN 网络层的多跳(长距离)数据传输层面,解决面向 QoS 的多跳中继节点选择策略等网络层关键问题。

1.4.3 矿山 WSN 节点的能耗最小化和全网能耗平衡机制

煤矿井下高速多媒体数据流传输会加速无线传感器节点的能量消耗。无线传感器节点的能量受限特性以及各节点数据负载量的不一致性会导致矿山信息孤岛即,网络覆盖盲区的过早出现(如针对图 1-2 的分析)。为延长 WSN 的井下生存期、避免网络覆盖盲区的过早出现,本书的最后一步研究多媒体数据流传输过程中传感器节点的能耗最小化和全网节点的能耗平衡问题。具体来说,本书以满足多媒体数据流的 QoS 需求为前提,以减小和平衡全网节点的能耗为目标,优化矿山 WSN 中的多跳中继节点选择策略以及中继节点的能耗策略,从而尽可能延长 WSN 在井下的生存期。

煤矿井巷的长距离、窄空间结构及其所导致的问题有:(1) 无线电信号的强多径衰落;(2) 传感器节点在巷道的稀疏网络拓扑和;(3) 较低的数据传输路径冗余度。这是矿山 WSN 多媒体数据传输所面临的主要网络环境约束。在这些约束条件下,显著提高网络对多媒体数据流的传输容量,满足多媒体数据流的 QoS 需求(误码率、时延和数据速率),并延长 WSN 在煤矿井下的生存期是本书的研究目标。本书对矿山物联网中大规模多媒体数据传输问题进行有益的探索,也是本书作者长期从事煤矿安全监控研究工作的延伸,并对“感知矿山物联网”和“数字化矿山”战略具有积极的推动作用。

针对上述研究内容,本书分析了以下具体问题。

1. 构造基于单跳数据传输的 MIMO-UWB 空时编码矩阵

本书分析了煤矿井下 MIMO-UWB 无线信道特征,构造具有低复杂度、低能耗的 MIMO-UWB 空时编码矩阵和解码策略,以提高井下单跳无线链路的 QoS 性能(低误码率、高数据速率)。

2. 求解煤矿井下面向 QoS 的多跳中继节点选择策略

本书分析了 WSN 在煤矿井下的多跳网络拓扑结构,在已研究的单跳 MIMO-UWB 空时方案的基础上,以满足多媒体数据流的 QoS 需求为优化目标,获取多跳 MIMO-UWB 数据传输的最优中继节点选择策略,并验证其 QoS 保障能力。