



“十二五”科学技术专著丛书

煤矿井下应急救援 无线Mesh网络 关键技术

张玉 杨维 何德旺 著

KEY TECHNOLOGIES FOR UNDERGROUND
MINE EMERGENCY RESCUE WMN



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十二五”科学技术专著丛书

煤矿井下应急救援 无线 Mesh 网络关键技术

Key Technologies for Underground Mine
Emergency Rescue WMN

张玉 杨维 何德旺 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书以提高煤矿井下灾害应急救援通信的能效为目的,分析了国内外相关技术与煤矿井下应急救援通信需求特点,深入研究了基于无线 Mesh 网络的煤矿井下应急救援通信网络组网关键技术,具体包括井下应急救援无线 Mesh 网络的拓扑结构与节点部署策略、无线 Mesh 网络的传输容量模型、信道资源分配策略、媒体访问控制策略以及骨干传输网络的路由策略,形成了一个针对煤矿井下应急救援通信场景的、较为完整的关键技术体系。

本书内容面向煤矿井下应急救援通信领域,以技术理论研究为主,可作为同行业研究人员或者工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿井下应急救援无线 Mesh 网络关键技术 / 张玉, 杨维, 何德旺著. --北京: 北京邮电大学出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-5635-4534-6

I. ①煤… II. ①张… ②杨… ③何… III. ①无线网—应用—煤矿—矿山救护—中国 IV. ①TD77-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 225135 号

书 名: 煤矿井下应急救援无线 Mesh 网络关键技术

著作责任者: 张 玉 杨 维 何德旺 著

责任编辑: 马晓仟

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷:

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 7

字 数: 172 千字

版 次: 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4534-6

定 价: 20.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

煤炭安全生产一直是煤炭行业的一个重要问题。提高安全保障、减少煤矿事故始终是煤炭行业发展所追求的目标。但是由于煤矿开采环境恶劣,生产流程复杂,人员素质参差不齐,致使煤矿事故频繁发生,造成了严重的经济与生命财产损失,社会影响极坏。随着电子工业与通信技术的发展,煤炭生产与管理逐步走向自动化与智能化,煤矿事故的发生频率逐年降低,但是由于煤矿事故成因复杂、突发性极强,导致事故难以杜绝。在此形势下,煤矿灾害应急救援工作成为降低事故损失的重要环节。

煤矿应急救援通信系统是煤矿灾害应急救援工作的重要组成部分,在抢险救援工作中,为抢险救援各部门之间的指挥调度提供通信支撑,尤其井下应急救援通信网络,可实现井下与地面之间的通信连接,使地面指挥系统能够同步跟踪指挥井下搜救工作,大大提高了井下搜救效率与救援工作的安全性。由于井下地形复杂,环境恶劣,且地面上下被地层阻隔,致使煤矿井下应急救援通信技术发展缓慢,截至 2013 年,我国 70% 的煤矿井下应急通信系统仍以有线通信方式为主,网络的灵活性较差。无线通信方式方便、灵活,随着无线通信技术的发展,基于无线传输方式的煤矿井下应急救援通信系统正得到越来越多的关注。

无线 Mesh 网络是一种新兴的无线自组织网络,具备可快速组网、灵活便携等特点,被广泛应用于地震、火灾等地面灾害应急救援通信场景中,同时也是新一代煤矿井下应急救援通信网络建设的热点技术。煤矿井下灾害环境与地面灾害环境有较大不同,所以构建煤矿井下应急救援无线 Mesh 网络还有许多问题需要解决,如网络传输的可靠性问题、网络的可扩展性问题等。当前,相关研究正处于起步阶段。本书在调研分析了国内外相关研究成果的基础上,结合煤矿井下应急救援通信场景的特殊性,对煤矿井下应急救援通信无线 Mesh 网络的组网关键技术进行了系统的研究,包括网络部署策略、网络容量特性建模、信道资源分配策略、媒体接入访问控制策略、路由策略等,从技术层面解决无线 Mesh 网络在煤矿井下应急救援环境存在的应用问题,提高该网络的应用性能。

本书内容共分为 8 章。第 1 章为绪论部分,概述了煤矿生产中的安全问题,并总结分析了煤矿井下应急救援通信技术发展现状和未来趋势。这一章的内容旨在使读者对煤矿事故成因的复杂性、井下应急救援通信的重要性以及通信技术的现状与发展有一个基本了解。第 2 章为井下应急救援通信特点与需求分析部分,分别从巷道内电磁波的传播特点与需求、井下应急救援通信网络建设的特点与需求以及应急救援通信业务的特点与需求三方面进行了具体分析。第 2 章是本书的重要章节,后续章节中的技术与方案设计均围绕该章中得出的特点与需求的分析结果展开。第 3 章到第 7 章为技术研究部分,是本书的核心章节,基本包括了除物理层外,无线 Mesh 网络组网的其他各层关键技术。第 8 章为内容总结与展望。

本书得到了项目“多播广播单频网的能效与资源优化研究”,北京市自然科学基金资助项目(4154072);“煤矿井下基于空时处理的编码协作 MC-CDMA 跨层自适应无线传输技术研究”,国家自然科学基金(51274018);“基于 Mesh 网络井下可视化无线救灾通信技术与装备”国家科技支撑计划(2013BAK06B03)的支持,书中内容具有较强的应用针对性,可为同领域的研究生或者工程技术人员从事相关研究提供参考。

由于著者水平有限,书中难免有疏漏之处,欢迎读者提出宝贵意见和建议。

著 者

2015 年 5 月于北京

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 煤矿安全概述	1
1.1.1 煤矿事故原因	1
1.1.2 煤矿事故类型	2
1.2 煤矿井下应急救援通信系统	3
1.3 煤矿井下应急救援通信技术现状与趋势	4
1.3.1 技术现状	4
1.3.2 发展趋势	8
第 2 章 煤矿井下应急救援通信特点与需求分析	9
2.1 井下应急救援通信特点	9
2.1.1 传输环境特点	9
2.1.2 工作性质特点	10
2.2 井下应急救援通信网络需求分析	11
2.2.1 网络建设需求	11
2.2.2 业务传输需求	12
2.3 本章小结	16
第 3 章 W-URN 网络部署规划	17
3.1 W-URN 当前部署方式与问题分析	17
3.2 W-URN 网络结构设计	18
3.2.1 WMN 结构类型	18
3.2.2 混合网状网结构的 W-URN	20
3.3 W-URN 分层规划	21
3.3.1 W-URN 的功能体系与层次划分	21
3.3.2 骨干路由层规划设计	23
3.3.3 网关层规划设计	27
3.3.4 Mesh 终端层规划设计	29
3.3.5 仿真与结果分析	29

3.4 本章小结	35
第 4 章 W-URN 骨干传输网络标称容量分析	36
4.1 相关研究	36
4.2 标称容量分析方法	37
4.3 带状骨干传输网络的标称容量	38
4.3.1 链路流量分布特征	39
4.3.2 瓶颈冲突域分析	40
4.3.3 带状骨干传输网络的标称容量分析模型	43
4.4 模型复杂度分析	44
4.5 基于模型的关键技术性能仿真分析	45
4.6 本章小结	50
第 5 章 W-URN 混合模式媒体访问控制策略	52
5.1 问题分析	52
5.1.1 共性问题	52
5.1.2 特性问题	54
5.2 现有 MAC 协议技术分析	54
5.2.1 MAC 协议分类	54
5.2.2 几种典型无线 MAC 协议	55
5.3 W-URN 的 MAC 机制设计	58
5.3.1 Mesh 接入层的 MAC 机制	58
5.3.2 骨干传输层的 MAC 机制	60
5.4 本章小结	61
第 6 章 W-URN 基于优先级机制的修正分级信道分配策略	62
6.1 问题分析	62
6.2 相关技术分析	63
6.2.1 静态信道分配与动态信道分配	63
6.2.2 集中式信道分配与分布式信道分配	65
6.2.3 W-URN 的信道分配方式选择	67
6.3 修正分级信道分配策略	68
6.3.1 MCCA 相关信息的维护与计算	68
6.3.2 信道分配原则	70
6.3.3 MCCA 信道分配	71
6.4 仿真与结果分析	73
6.4.1 仿真参数设置	74

6.4.2 仿真结果分析.....	74
6.5 本章小结.....	76
第7章 W-URN 基于跨层机制的改进型 AODV 路由策略	77
7.1 现有路由技术分析.....	77
7.2 AODV 路由协议	78
7.2.1 路由发现.....	78
7.2.2 路由修复.....	80
7.3 RAODV 路由策略	81
7.3.1 骨干传输层的路由机制.....	83
7.3.2 Mesh 接入层的路由机制	86
7.4 仿真与结果分析.....	87
7.4.1 仿真参数设置.....	88
7.4.2 仿真结果分析.....	88
7.5 本章小结.....	90
第8章 总结与展望	91
8.1 工作总结.....	91
8.2 工作展望.....	92
缩写索引	94
参考文献	96

第1章 概述

首先从煤矿事故原因与煤矿事故类型两方面对煤矿安全问题的复杂性进行了概述;在此基础上介绍了由于煤矿安全问题的复杂难以控制,使煤矿灾害应急救援通信系统在减少灾害损失中具有重要作用,并对煤矿灾害应急救援通信系统的体系结构进行了描述;最后对煤矿井下应急救援通信的技术现状与发展趋势进行了分析。

1.1 煤矿安全概述

煤矿安全问题是煤炭行业始终关注的重要问题,也是困扰煤炭企业发展的棘手问题。每年煤矿事故都会给社会造成严重的经济与生命财产损失。至今还没有彻底避免煤矿事故的有效措施,这是因为煤矿事故的发生原因复杂多变,且突发性极强,这些性质具体体现在煤矿事故原因与煤矿事故类型两方面。

1.1.1 煤矿事故原因

煤矿灾害的诱发原因涉及因素较多,主要源于两方面,一个是煤矿生产固有危险,一个是煤矿生产过程危险。

1. 煤矿生产固有危险

煤矿生产多为井工矿井,地质条件复杂,灾害类型多,分布面广。煤矿生产的固有危险主要指煤矿井下不安全的生产环境。不安全的生产环境包括煤矿井下可能直接导致煤矿事故的自然条件和作业环境,如矿井透水、顶板垮塌等自然灾害,以及照明不良、噪声过大、通风不畅等恶劣的作业环境。在我国国有重点煤矿中,地质构造复杂或极其复杂的煤矿占 36%,地质构造简单的煤矿仅占 23%。可见,我国大部分煤矿处于不安全的生产环境中。

自然条件的危险性表现在煤矿开采过程中,工人容易受到瓦斯爆炸、渗水透水、煤尘中毒、顶板垮塌等自然灾害的威胁,导致事故发生,造成人员伤亡。

作业环境的危险性表现在煤炭生产作业环境恶劣,作业点多、作业面广、作业线长、预见性差,且各作业点相互连通,当某一处发生灾害时,往往会同时蔓延到附近的作业点,使灾害的危害性扩大。

2. 煤矿生产过程危险

煤矿生产主要是地下作业,客观上存在着水、火、瓦斯、粉尘、顶板等危险因素,生产条件

差,自然灾害多,危险程度高。虽生产的产品种类单一,但是其生产过程复杂,如采煤、掘进施工需要钻眼、爆破、运输、支护等工序,矿井生产需要提升、运输、供电、排水、照明、压风、安全监测监控等环节,因此煤矿生产过程危险性极高。

煤矿生产过程中灾害发生的原因可归结为三个方面:人的不安全行为、物的不安全状态和系统的不安全配置。

首先,人的不安全行为。违章指挥、违章作业、疲劳上岗、带情绪工作等都属于人的不安全行为。大量统计资料表明,绝大多数灾害都与人的不安全行为有关。美国矿山事故调查表明,人的不安全行为导致的事故占 85%。在中国,矿工素质较差,安全管理较薄弱,不安全行为更是导致煤矿灾害的重要原因。

其次,物的不安全状态。物的不安全状态是指设备、设施、工具、材料等人们在生产过程中使用的物具处于不正常、不稳定、随时可能发生影响生产或伤及人身事故的状态。

最后,系统的不安全配置。系统是指由相互依赖和相互作用的若干个组成部分结合而成的具有特定功能和明确目的的有机整体。系统配置指系统内各部分之间的结合形式。如果各部分之间结构合理、结合紧密、状态稳定、功能可靠就认为系统的配置是安全的,反之就是不安全配置。

1.1.2 煤矿事故类型

在所有导致煤矿事故的因素中,顶板、瓦斯煤尘、水、火以及机电,是导致事故的主要因素,被称为煤矿事故的五大灾害。据此,煤矿事故的主要类型为:顶板事故、瓦斯事故、突水事故、火灾事故以及机电事故。

1. 顶板事故

煤矿顶板事故是指在煤矿井下采煤过程中,煤层顶板意外垮塌而造成的人员伤亡、设备损坏、生产中止等灾害事故。随着煤炭需求的急剧上升,煤矿开采深度和强度增加,导致冒顶事故发生频率上升,尤其是局部冒顶,在所有矿山事故中最为常见。

2. 瓦斯事故

瓦斯和空气混合后,在一定条件下,遇高温热源发生剧烈氧化反应,并伴随声、光和大量热量及压力上升的现象,称为瓦斯爆炸。瓦斯爆炸是煤矿最严重的灾害之一,其强大的冲击波可造成井巷设施和通风系统的破坏,导致人员伤亡,而且极易形成瓦斯或煤尘的二次爆炸,扩大受灾面积;爆炸产生的大量有害气体极易造成人员中毒或窒息;爆炸产生的大量热量造成人员的烧死或烧伤,也可能引发火灾。

3. 突水事故

凡影响、威胁矿井安全生产,使矿井局部或者全部被淹没,并造成人员伤亡和财产损失的矿井涌水事故,统称为矿井突水事故。造成矿井突水的水源主要为大气降水、地下水、地表水和采空区积水。突水事故主要是因为煤矿疏于管理,防排水设施不完善或疏于维护造成。突水事故一旦发生会造成井下通道被淹、井下设备损坏等问题。突水事故是煤矿事故中影响最严重的事故类型之一,造成重大人员伤亡与经济损失。

4. 火灾事故

火灾是违背人们意愿发生的非控制燃烧。我们把在矿井范围内发生的,或虽发生在井

口附近、煤层露头上但有可能危及人员、财产和资源安全的燃烧事故称为矿井火灾。火灾是矿井常见的灾害事故。矿井火灾一般被分为内因火灾和外因火灾。内因火灾也称为自然发火,由井下煤层湿热氧化引起;外因火灾由井下的违规操作、机械碰撞以及雷电等因素引起。矿井火灾危害严重。井下一旦发生火灾事故,会生成大量有毒有害气体,威胁人员生命,且难以救护,加重事故损失。

5. 机电事故

煤炭科学技术的发展,使煤矿井下生产用机械设备数量和品种越来越多,机电设备故障及各种原因造成的矿井机电事故,成为影响安全生产的重要因素,被称为煤矿生产的第五大灾害。据对2000年以来的煤矿事故统计,机电设备失爆是煤矿井下火灾事故与瓦斯爆炸等事故的一个直接原因。

上述事故类型虽然体现形式不同,但是诱发原因却具有很强的相关性,各种事故很可能在一系列因素的影响下同时发生,造成更大的灾害。

1.2 煤矿井下应急救援通信系统

由1.1节分析可知,煤矿事故原因复杂,类型多,突发性强,控制难度很大。截至目前,国内外主要通过完善生产管理流程、加强灾害监控的方式来降低事故发生的概率,还没有能够完全避免煤矿事故的可行办法。一旦事故发生,救援效率成为减少事故损失的最有效措施。如在2007年河南省陕县煤矿发生特大透水事故中,69名矿工被困,经过应急救援,被困矿工全部安全升井;2012年发生在四川攀枝花市肖家湾煤矿的瓦斯爆炸事故造成145人被困,经过及时救援,110人安全升井。

煤矿灾害的多样性和突发性决定了其事故救援工作的广泛性、综合性和专业性。救援工作的总目标是通过预先设计的应急措施,利用一切力量,在灾害事故发生后迅速控制其发展,并努力使灾害损失降至最小。这就要求有高效的调度指挥系统。煤矿井下应急救援通信系统是实现地面指挥中心对井下救援工作进行指挥调度的关键技术。此前,我国在井下应急救援通信方面几乎是一片空白。事故发生后,只能凭经验实施井下救援,井下救援工作危险性极高,盲目搜索导致救援效率低下。在井下应急救援通信系统的支持下,地面指挥中心能够实时掌握井下搜救情况,便于及时做出正确的救援决策,根据搜救情况进行跟踪调度指挥,提高救援效率,同时指挥中心通过对来自井下的环境数据进行分析,能够及时发现事故隐患,避免二次事故对搜救人员造成人身伤害。

图1.1所示为煤矿应急救援通信系统结构图。如图所示,煤矿应急救援通信系统由三部分组成:远程应急指挥通信网络(RCN,remote emergency command communication network)、现场地面应急指挥通信网络(LGCN,local ground emergency command network)与井下应急救援通信网络(URN,underground emergency rescue communication network)。RCN为整个应急救援通信系统的远程指挥网络,由应急指挥部和相关政府部门组成远程指挥中心,通过互联网与现场应急救援指挥中心进行信息交流,远程监控现场的救援情况,参与营救方案的制定与救援任务指挥,同时进行更大范围的人员补充调度。LGCN是在煤矿事故现场紧急组建的地面应急指挥网络,由地面应急指挥中心、医疗救护小组、消防人员相

互联网组成。LGCN 同时与井下救援基地连接。地面应急指挥中心可实现对地面、井下各抢险救援小组的统一指挥调度,保证救援工作协调有序展开。

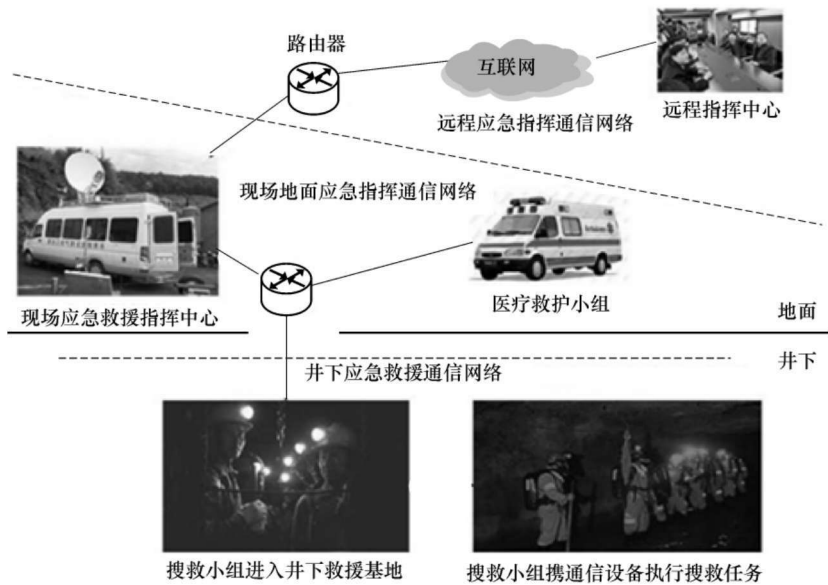


图 1.1 煤矿应急救援通信系统

URN 位于井下,由救援人员下井后临时搭建,一般由井下救援基地和救援人员携带的通信节点设备联网组成。救援人员携带的通信节点设备过去只有语音设备,现在增加了无线传感器与视频终端设备。无线传感器可集成于一个节点对某一位置进行环境监测,也可组成传感器网络对某一区域进行监测。监测目标可能为井下氧气、甲烷、一氧化碳等气体浓度,风压、水压等环境参数等。视频终端采集井下可视环境信息。语音终端一般为可穿戴式,跟随搜救人员,实现搜救人员与指挥中心之间随时随地的语音通信。URN 中终端设备产生的不同类型信息通过 URN 网关向地面应急指挥中心传递,外界的指挥命令通过 URN 网关下达到各终端设备。

在整个煤矿应急救援通信系统中,RCN 以广域网为基础,LGCN 采用局域网组网,二者均工作于地面通信环境,技术成熟,采用现有通信技术能够快速有效地搭建。URN 位于井下。由于井下空间结构复杂,通信环境恶劣,造成 URN 的建设难度大,加上煤矿井下通信研究的商业价值相对较低,导致 URN 的技术发展相对落后。因此,在整个煤矿应急救援通信系统中,URN 是研究重点,URN 的性能提升对于提高整个系统的应用性能具有重要的作用。

1.3 煤矿井下应急救援通信技术现状与趋势

1.3.1 技术现状

随着煤矿安全生产问题日益凸显,煤矿井下应急救援通信也逐渐得到相关学者的关注。

至今,煤矿井下应急救援通信经历了从有线到无线、从窄带到宽带,从模拟语音通信到数字多媒体通信的发展历程。总结起来,煤矿井下应急救援通信技术主要可分为三类:有线通信(TTW,through-the-wire)、透地通信(TTE,through-the-earth)和无线通信(TTA,through-the-air)。

1. 有线通信技术

有线通信技术是指依托有线基础设施在井下建立长距离应急救援通信。信号可通过电磁介质,如双绞线、同轴电缆、光纤等传播。此外,井下巷道中的其他传输线,如电缆,也可以用来传输信号。有线通信方式带宽大、信号传输质量好,但是便携性和抗毁性较差。当采用有线通信技术时,为保证井下救援人员和地面指挥中心始终能够通信,救援人员下井携带的通信设备必须带有与地面指挥中心相连的线缆,线缆会严重影响救援行动的速度与灵活性。此外,井下环境复杂,线缆一旦断裂,就会造成井下救援人员与地面之间无法通信。

有线通信技术在井下应急救援通信中的应用历史较长,主要以语音通信为主。表 1.1 中列出了几种典型的有线通信设备,并对其优缺点进行了简单阐述。

表 1.1 典型有线通信设备

名称	技术类型	优点	缺点
电话	TTW	容易操作	脆弱,易因塌顶、矿井火灾以及爆炸等事故发生损坏
寻呼机	TTW+TTA	便宜、操作简单	单向
小车电话	TTW	包括固定的和移动的两类型,可以连接所有轨道运煤小车	覆盖范围有限;不适合在湿热和灰尘较多的环境下使用;容易受到电力机械设备的干扰
升降机电话	TTW	操作简单	限于升降机舱之间的通信和地面与井下工作站之间的通信

2. 透地通信技术

透地通信技术是采用超低频信号穿透地层进行通信的一种技术。当无线电波的频率低到一定程度时电磁波能够穿透地层,因此将信息承载在低频电磁波上便可实现地上与井下的信息传输。透地通信系统的工作频率一般为 90 Hz~4 kHz,必须利用巨大的环形天线才能实现信号的发射,天线直径可达几千米。地面空间开阔,可自由架设天线,因此采用透地通信技术,可以实现从地面向井下任意位置传输信息。但是,井下空间纵横交错,障碍物较多,不便于布设大体积天线,因此透地通信技术多用于从地面到井下的单向寻呼系统。

透地通信技术虽然存在许多局限性,但是由于可以直接由地面向地下任何位置传输信号,在煤矿井下应急救援领域被广泛研究并被投入实际应用。20 世纪 70 年代,美苏即开始研究超低频透地无线通信技术。该技术的工作频率范围为 3~30 kHz,可以穿透 300 m 深的地层。20 世纪 90 年代,澳大利亚镁思梯技术公司开发了 PED(personal emergency device) 应急指挥寻呼系统,单向透地距离可达 800 m,正常通信速率 0.5 B/s。随后,加拿大 VitalAlert 公司也推出了自己的 Canary 系列透地通信产品。2005 年,Barkand 等在一个石灰岩矿和运行中的煤矿中对“Telemag”半双工透地通信原型系统进行了测试研究,该系统用 500 Hz 带宽实现了实时语音通信。此后 PED 和 Canary2 系统也宣布能实现短距离语音

通信。2011 年开始, LockheedMartin 公司、StolarHorizone 公司、UltraElectronics 公司等也陆续研制出各自的透地通信系统。国内从事透地通信持续研究的学者较少, 且大部分从事低频电磁波方向研究, 如张清毅于 1999 年用环形天线方式对透地通信的信道特性进行过研究, 陶晋宜于 1999—2000 年对电磁波透地通信方案及系统装置方面进行过研究, 陈鹏等从事电磁波透地传输方法模拟的研究等。

随着研究的开展, 透地通信系统的天线尺寸在逐步缩小, 带宽在逐步增加, 但是, 到目前为止, 其带宽相对于多媒体信息传输需求来说仍然很低, 其应用优势仍然集中于寻呼与定位。

3. 无线通信技术

无线通信技术利用无线介质进行通信, 使终端设备从线缆的束缚中解放出来, 大大提高了应急救援通信设备的便携性。但是, 井下复杂的无线通信环境对无线通信技术提出了一系列挑战。一个简单的无线通信系统由发射机、无线传输信道和接收机组成。除了实际应用对发射机和接收机设计产生的限制, 井下无线通信面临的最大困难来自井下无线传输信道。

电磁波的无线传播与电磁波的频率密切相关, 图 1.2 中总结了不同频段电磁波的传播特点。如图所示, 电磁波的频率越高带宽越大, 天线尺寸越小, 噪声干扰越小, 相应意味着电磁波信号的传输速率增加, 设备越来越便携, 噪声干扰越来越小。但是, 电磁波的衰减会随着频率的增加而增加。

波导传播是电磁波在受限空间中的另外一种重要的传输特性。当井下巷道成分为低损耗电介质时, 电磁波频率高于截止频率时, 巷道能够对电磁波的传播起到波导效果。此时电磁波信号的传播损耗较低, 能够传播较远距离。截止频率是波导的一个特性参数。当电磁波的频率低于截止频率时, 巷道将无法起到波导效果, 电磁波迅速衰减, 传播距离较近。截止频率和巷道的界面尺寸直接相关。对于一般巷道, 其截止频率范围为几十到几百兆赫兹。当电磁波频率高于巷道截止频率时, 电磁波以一定角度射向巷道壁, 可以通过在巷道内来回反射沿巷道向前传播。反射行为会造成电磁波能量损耗。电磁波频率越高, 反射损耗越大。巷道的波导传播效果在超高频段(UHF, ultra high frequency)最好。

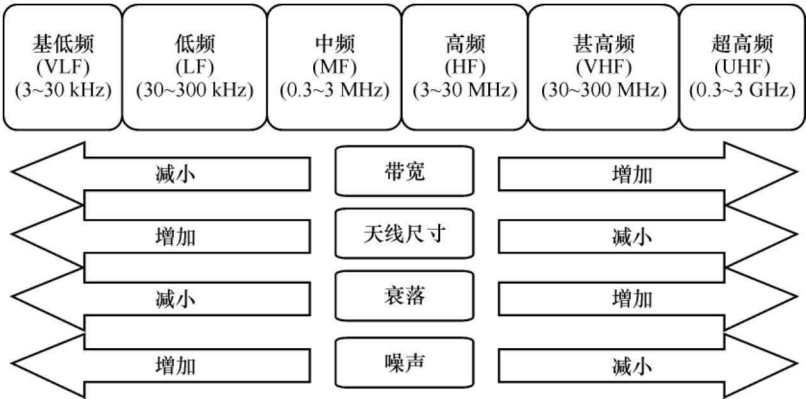


图 1.2 煤矿井下不同频段电磁波的传播性能

基于无线通信的井下应急救援通信网络主要有以下三种组网方式。

(1) 无线 WiFi 接入+有线中继

无线局域网组网方式综合使用无线 WiFi 接入技术与有线中继传输技术,能够支持多媒体信息的漫游接入与可靠传输,其网络结构如图 1.3 所示。

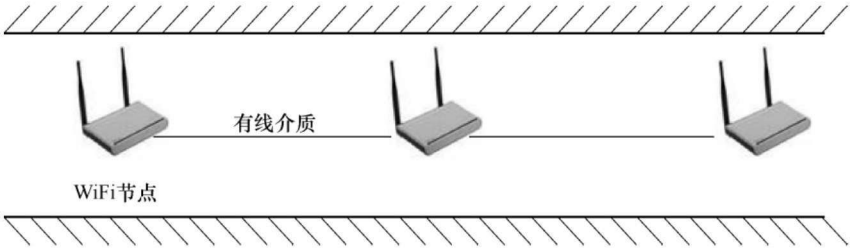


图 1.3 无线 WiFi 接入+有线中继组网模式

井下应急救援活动范围大,空间结构复杂,WiFi 节点之间以有线方式相互连接严重影响搜救工作的灵活性和可扩展性。此外,有线中继方式本身抗毁能力较差,长距离中继线的任意一处遭到破坏都会造成整个通信链路中断,安全隐患较大。因此,虽然无线 WiFi 接入+有线中继的组网方式使用了无线接入方式,但是这种方式受有线中继的限制较多,便携性和鲁棒性较差。

(2) 无线 WiFi 接入+无线中继

无线 WiFi 接入+无线中继的组网方式如图 1.4 所示。这种组网方式最初由军事应用兴起,称为移动自组织网络(MANET,mobile Ad-hoc Network),也称为 Ad hoc 网络,是一种基于无线、多跳、无中心、分布式控制的移动通信网络。与传统的无线网络相比,它无需网络基础设施,不依赖于任何固定的基础设施和管理中心,由一组自主的移动节点临时组成,通过移动节点间的相互协作和自我组织,保持网络连接,具有较强的自组织、自恢复能力,并且容易构建,对井下应急抢险救灾环境具有较强的适应性。但是 Ad hoc 技术主要应用于小规模用户节点之间的自我组网,其大规模应用仍处在仿真和实验阶段,其实际应用还存在大量问题需要解决。此外,Ad hoc 网络往往以独立的网络形式存在,在需要多网融合的煤矿应急救援通信场景中可执行性较差,难以满足应用需求。

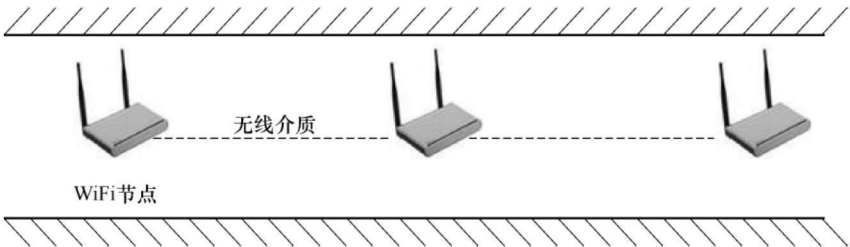


图 1.4 无线 WiFi 接入+无线中继组网模式

无线 Mesh 网络,又称为无线网状网(WMN,wireless mesh network),是 Ad hoc 网络的一种扩展形式,其网络结构和 Ad hoc 网络基本一样,采用无线中继方式进行组网,具有自组织、自恢复、容错能力强、快速组网等优点。此外,无线 Mesh 网络扩展了 Ad hoc 的网络功能,具体包括:打破了 Ad hoc 独立组网的特性,实现了无线 Mesh 网络与异构网络的融

合,解决了 URN 与 LGCN 之间的互连问题;将自组网功能扩展到 WiFi 节点等功能更强大的设备,这些设备具有更多的能量储备与更强的处理能力,因此可以使用多射频^①多信道技术,提高 URN 网络的网络容量和抗干扰能力。

1.3.2 发展趋势

在有线通信、透地通信与无线通信三种技术中,有线通信技术在煤矿井下应急救援通信系统中应用最为广泛,透地通信系统很早以前也已投入商用,只有无线通信技术尚处于研究阶段,这主要是由于煤矿井下应急救援环境给无线通信提出了许多挑战,如带宽问题、传输距离问题、干扰问题等。尽管如此,随着无线通信技术的发展,无线 Mesh 网络技术还是成为建设新一代煤矿井下应急救援通信网络的热点,即建立基于无线 Mesh 网络的 URN(W-URN, WMN based URN)。未来的 W-URN 将是全无线结构的,彻底摆脱有线传输介质的束缚;同时是宽带传输网络,支持语音、数据、视频等多媒体业务传输,从而为地面指挥中心传达更加具体、全面的搜救信息。

针对 W-URN 的建设,国内外高校和企业进行了许多研究。这些研究成果主要分为理论研究成果和产品研发成果两类。理论研究成果主要集中在电磁传播层面,以无线电波在巷道环境下的传输模型与物理层抗干扰技术为研究对象,如 Emslie 在 1975 年研究了 UHF 频段电磁波在煤矿巷道中的传播理论,随后人们又利用实验手段研究了不同波段电磁波的传播特性,其中,Laselva 和 Chahe 专门针对无线局域网常用频段 2.4 GHz 和 5.8 GHz 的传播性能进行了研究,为无线 WiFi 技术的井下应用提供了理论依据;杨维等人研究了基于码分多址(CDMA, code division multiple access)调制的抗干扰、抗衰落技术等。产品研发成果则主要侧重于系统设计、性能分析和终端产品设计,如 Misra、Rabbi、Yarali 等人从网络系统设计角度入手,对煤矿井下应急救援无线 Mesh 网络的系统结构进行了设计;Jane、Bai、Zhang 等人对井下环境 W-URN 的覆盖率、网络吞吐量、时延、容错率等网络性能进行了测试分析;中国科学煤炭研究院开发出了 KJ30 无线救灾通信系统等。然而,针对 W-URN 组网技术层面的研究很少,尚处于起步阶段。目前所研发产品使用的组网技术主要采用商业产品技术,仅在此基础上进行煤安认证,便形成 W-URN 的产品设备。井下通信场景与地面通信场景有较大不同,针对地面环境的组网技术未必适用于井下应急救援通信环境。因此,作者依托国家“十二五”科技支撑计划课题(2013BAK06B03)“基于 Mesh 网络井下可视化无线救灾通信技术与装备”等项目,从技术层面对煤矿井下应急救援无线 Mesh 网络建设的关键技术展开研究,重点研究了 W-URN 的网络拓扑规划与资源配置、MAC 层技术、信道分配技术以及路由层技术,并结合 W-URN 的应用需求提出了具体的技术方案。

^① 文中所提到的“射频”与“射频接口”含义相同,具有独立的物理层与媒体接入控制(MAC, media access control)层。

第2章 煤矿井下应急救援通信特点与需求分析

为了使煤矿井下应急救援通信网络的技术研究更具应用针对性,本章分析了煤矿井下应急救援场景的环境特点与通信需求,建立了井下应急救援多媒体通信业务模型,对语音、传感数据与视频数据等煤矿井下应急救援场景主要通信业务的业务特性及其在带宽、时延等方面的传输需求进行了分析总结。

2.1 井下应急救援通信特点

井下应急救援通信与地面日常通信之间具有较大差别,经分析,具体体现在传输环境复杂与工作性质危急两方面。

2.1.1 传输环境特点

煤矿井下的主体结构为纵横交织的主巷道与支巷道,如图 2.1 所示,除此之外,煤矿井下还分布着切面、竖井、逃生通道、急救站、凹室等其他结构,这些结构彼此相互连通,组成了一个庞大复杂的网络。巷道内部也并不平整,部分巷道中地上铺设铁路轨道和传送带,提放挖掘机等机械设备。巷道墙壁一般都很粗糙,为了固定巷道顶部,防止顶板塌陷,一些顶部会布设木网或者金属网,如图 2.2 所示。在此复杂环境下,无线电波因受到不同因素的影响,在井下传播时具有复杂的传输特性。

1. 非直线传播

无线传输一般采用超高频频段(UHF, 0.3~3 GHz)电磁波,此时电磁波无法穿透巷道壁,只能被控制在巷道空间内传播。巷道内存在着大量的拐角、弯道与斜坡,这些都会阻碍电磁波的直线传播,限制电磁波的传播距离。

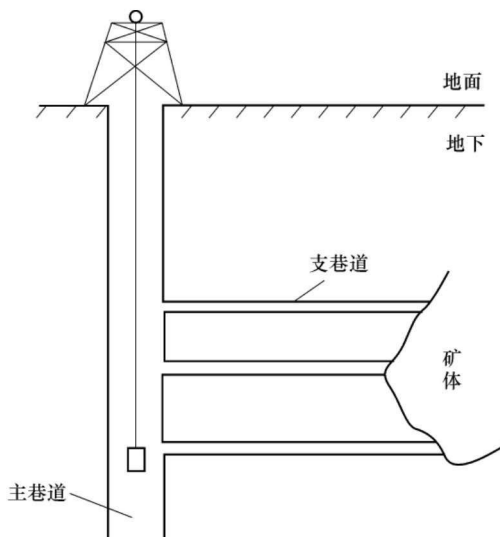


图 2.1 巷道结构图