

文章编号:1671-251X(2021)05-0001-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17764

矿井无线中继应急通信系统实现方法

孙继平, 徐卿

(中国矿业大学(北京), 北京 100083)



扫码移动阅读

摘要:分析了矿井无线中继应急通信系统特点:无线发射功率受防爆限制,矿井无线传输衰减大,无线传输距离近;在保证井下工作的各无线通信设备互不干扰,出井后不影响地面无线设备正常工作的前提下,工作频段不受限制;中继链路在巷道中呈链状分布,整体网络呈树状拓扑结构。为解决煤矿事故造成断缆(电缆或光缆)影响矿井应急通信系统的问题,提出了矿井无线中继应急通信系统的实现方法:将数据传输链路与协议控制链路分离,可提高链路控制的灵活性和路由由协议信令的传输效率;链路中各基站的收/发频段与子信道频率按照基站的物理排列顺序进行设置,解决了各级中继站收发相互干扰的问题;数据链路中继传输,链路中各个中继站可与前级和后级节点进行连续的数据交换,解决了多级中继带来的带宽损失、中继时延以及系统稳定性问题;区段式空间复用的中继站频分子信道划分方式,解决了频分信道资源受限的问题;基于固定节点的透传式路由策略,简化了逐级路由寻址和路由发现过程,提高了数据转发效率;正常链路的冗余基站下挂式路由策略,避免了主节点和冗余节点混合传输带来的信道干扰问题;冗余基站、移动终端桥接、本地接入协同的链路断点恢复方法,提高了链路的抗故障能力。

关键词:矿井无线应急通信;无线中继;传输链路;无线信道分配;通信断点恢复

中图分类号:TD655

文献标志码:A

Implementation method of mine wireless relay emergency communication system

SUN Jiping, XU Qing

(China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The characteristics of the mine wireless relay emergency communication system are analyzed in this study. The wireless transmission power is limited by explosion-proof, the mine wireless transmission attenuation is large, and the wireless transmission distance is short. The working frequency band is not limited on the premise that the wireless communication equipment working underground does not interfere with each other and does not affect the normal operation of the wireless equipment on the ground when being taken out of the mine. The relay links are distributed in a chain in the roadway, and the overall network is in a tree topology. In order to solve the impact of the broken cable (cable or optical cable) caused by the coal mine accident on the mine emergency communication system, the implementation method of mine wireless relay emergency communication system is proposed. This method separates the

收稿日期:2021-04-28;**修回日期:**2021-05-11;**责任编辑:**张强。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801800)。

作者简介:孙继平(1958—),男,山西翼城人,教授,博士,博士研究生导师,中国矿业大学(北京)信息工程研究所所长,原副校长;获国家科技进步奖和技术发明奖二等奖4项(第1完成人3项);作为第1完成人获省部级科技进步特等奖和一等奖8项;作为第1完成人主持制定中华人民共和国煤炭行业 and 安全生产行业标准29项;作为第1发明人获国家授权发明专利90余件;主持制定《煤矿安全规程》第十一章“监控与通信”;作为第1作者或独立完成著作12部;被SCI和EI检索的第1作者或独立完成论文90余篇;作为国务院煤矿事故调查专家组组长参加了10起煤矿特别重大事故调查工作;E-mail: sjp@cumtb.edu.cn。

引用格式:孙继平,徐卿. 矿井无线中继应急通信系统实现方法[J]. 工矿自动化,2021,47(5):1-8.

SUN Jiping, XU Qing. Implementation method of mine wireless relay emergency communication system[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(5): 1-8.

data transmission link from the protocol control link to improve the flexibility of link control and the transmission efficiency of routing protocol signaling. The receiving/transmitting frequency bands and sub-channel frequencies of each base station in the link are set according to the physical sequence of base stations, which solves the problem of mutual interference between relay stations at all levels. In data link relay transmission, each relay station in the link can exchange data continuously with the front and back nodes, which solves the problems of bandwidth loss, relay delay and system stability caused by multi-level relay. The frequency molecular channel mode of the relay station with spatial multiplexing of zones solves the problem of limited frequency division channel resources. The fixed node-based transparent routing strategy simplifies the level-by-level route addressing and route discovery process and improves data forwarding efficiency. The redundant base station down-link routing strategy of normal link avoids the channel interference problem caused by the mixed transmission of primary and redundant nodes. The link breakpoint recovery method of redundant base stations, mobile terminal bridging and local access coordination improves the anti-fault ability of the link.

Key words: mine wireless emergency communication; wireless relay; transmission link; wireless channel allocation; communication breakpoint recovery

0 引言

矿井应急通信系统是提高救援效率、减少人员伤亡的重要工具,在煤矿事故应急救援和安全生产中发挥着重要作用^[1-3]。在煤矿井下发生事故后,矿井应急通信系统仍能为井下遇险人员提供与地面调度室通信,是救灾指挥部了解井下灾情、被困人员位置和状况,指导被困人员自救的关键装备^[4-5]。目前,煤矿没有专用矿井应急通信系统,均采用矿用有线调度通信系统兼作矿井应急通信系统。矿用有线调度通信系统不需要井下供电,只要电缆不断、电话不坏,就可正常工作,可靠性较高^[6]。但当事故导致断缆时,系统将不能为井下遇险人员提供与地面的通信^[1]。因此,需要研究无通信电缆和光缆的矿井无线应急通信系统。

矿井透地通信系统可穿透煤岩,实现井下与地面通信。但矿井透地通信系统工作频率低、传输速率低,为满足双向通信,需要在井下设置百余米的发射线圈,易受矿井事故灾害的影响^[1]。所以,矿井透地通信系统不能用于矿井应急通信。

煤矿井下无线传输衰减大,无线发射功率受防爆限制,传输距离近,难以满足 10 km 传输距离要求^[7]。为解决矿井无线传输衰减大、无线发射功率受限与应急通信距离远的矛盾,文献[1]提出了多级无线中继的矿井应急通信系统。但 Mesh 等常用的自组网和无线中继技术中继跳数少^[8-12],难以满足矿井应急通信数十跳的要求。因此,有必要研究矿井无线中继通信特点、提出多达数十跳的矿井无线中继应急通信系统实施方法,解决链路设计、无线信道分配、通信断点恢复等问题。

1 Mesh 自组网无线通信

Mesh 自组网无线通信(以下简称 Mesh)是近

年来应用最多的多跳无线中继通信。Mesh 采用多跳路由、对等网络等技术,具有连续动态自组网、自主管理、自我恢复等优点^[8-11]。基于 WiFi+Mesh 的救灾通信系统,移动终端由救护队员携带,具有语音通信、视频监控、环境温度和气体(一氧化碳、氧气、甲烷、二氧化碳)监测及救护队员心跳、体温和姿态监测等功能。当无线通信距离不能满足要求时,通过便携式中继器无线中继,但中继跳数有限,中继距离近^[13]。

矿井应急通信与矿井救灾通信不同,适于救护队员没有到达灾变现场或无法到达灾变现场的条件下使用,传输距离远(达 10 km)。将 Mesh 用于矿井应急通信系统,存在着中继跳数少、中继距离短等问题,难以满足矿井无线中继 10 km 的要求。

Mesh 具备多跳路由优化能力,在网状拓扑结构中,通过降低网络中的最大中继级数,提高链路性能^[10]。在煤矿井下,无线传输受巷道延伸方向限制,中继链路在巷道中呈链状分布,整体网络呈树状拓扑结构。因此,矿井无线中继传输,除冗余节点外,不存在可优化的无线路由,系统无线覆盖范围取决于通信网络的最大中继级数和无中继无线传输距离。

Mesh 的最大中继级数受各级中继节点的带宽损失影响^[10-11]。Mesh 在多跳通信时,每经过一级中继转发,链路的有效带宽均会下降;在中继级数增加到一定程度时,丢包率显著增加,直至无法满足通信需求^[10-11]。

矿井无线传输衰减大。在矿井无线发射功率(含天线增益)受 6 W 限制的条件下,平直巷道的无线传输距离一般不大于 800 m^[7]。巷道弯曲、分支、起伏等进一步加大了矿井无线传输衰减^[7]。Mesh 中继跳数少,难以满足矿井无线中继应急通信距离的需求。

2 矿井无线中继通信特点

矿井无线中继通信具有如下特点:① 无线发射功率受防爆限制(不大于 6 W),矿井无线传输衰减大,无线传输距离近。② 在保证井下工作的各无线通信设备互不干扰,出井后不影响地面无线设备正常工作的前提下,工作频段不受限制,煤矿井下无线频谱资源丰富。③ 中继链路在巷道中呈链状分布,整体网络呈树状拓扑结构。

煤矿井下开采深度达数百米,最深达千余米。地面无线电波难以到达井下,井下无线电波也难以到达地面。因此,仅在煤矿井下使用的无线通信设备,在保证在井下工作互不干扰,出井后不影响地面无线设备正常工作的前提下,工作频段不受限制。因此,煤矿井下无线频谱资源丰富。矿井无线中继应急通信系统可充分利用煤矿井下无线频谱资源丰富的特点,采用收发异频全双工和子信道频分多路复用,通过双工器及频带滤波器实现无线电信号同时和连续收发。

煤矿井下巷道呈多分支树形结构,无线传输路径狭长,链路中继级数多,没有网状拓扑结构路由优化需求。矿井无线中继应急通信系统的中继站固定布置在巷道中,手机等无线终端节点移动速度慢,网络拓扑结构及主要链路路由相对固定;分布于狭长巷道的无线中继站获取全局基站链接信息周期长、开销大,时钟同步困难,难以进行全局的协同控制。

3 矿井无线中继应急通信系统实现方法

为解决煤矿事故造成断缆(电缆或光缆)影响矿井应急通信系统的问题,笔者提出了矿井无线中继应急通信系统的实现方法:将数据传输链路 with 协议控制链路分离,提高了链路控制的灵活性和路由协议信令的传输效率;链路中各基站的收/发频段与子信道频率按照基站的物理排列顺序进行设置,解决了各级中继站收发相互干扰的问题;采用系统链路解耦的中继链路结构,链路中各个中继站可与前级和后级节点进行连续的数据交换,解决了多级中继带来的带宽损失、中继时延以及系统稳定性问题;区段式空间复用的中继站频分子信道划分方式,解决了频分信道资源受限的问题;基于固定节点的透传式路由策略,简化了逐级路由寻址和路由发现过程,提高了数据转发效率;正常链路的冗余基站下挂式路由策略,避免了主节点和冗余节点混合传输带来的信道干扰问题;冗余基站、移动终端桥接、本地接入协同的链路断点恢复方法,提高了链路的抗故障能力。

3.1 数据传输链路 with 协议控制链路分离

为提高矿井无线中继应急通信系统链路控制的

灵活性和路由协议信令的传输效率,在异频全双工收发和频分子信道多路复用的基础上,笔者提出了将数据传输链路 with 协议控制链路分离的系统结构。在各中继站中,协议控制专用信道由 2 个窄带高灵敏度无线电收发机构成,对其进行分时接入;数据传输信道由多个独立的宽带无线电收发机构成,对其按频分子信道复用方式进行分频接入。在无线链接质量良好时,协议控制专用信道专用于传输组网与路由维护相关信令,数据传输信道专用于用户数据收发;在信道质量不足以满足数据传输链路的信息传输带宽时,仅将协议控制专用信道对应的无线电收发单元接入射频链路,将其复用为数据传输链路,用于传输窄带字符及重要数据信息。中继站频谱与信道分配如图 1 所示。

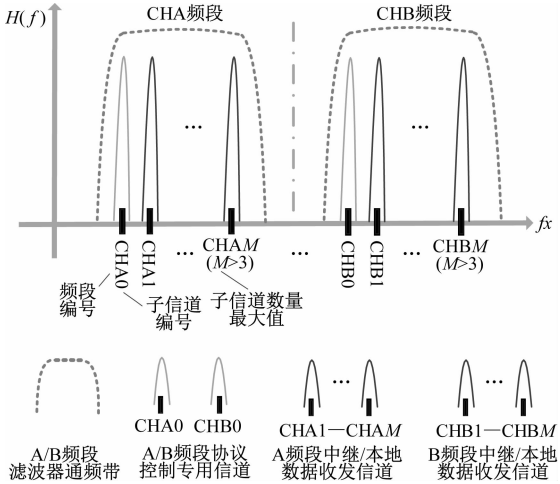


图 1 中继站频谱与信道分配

Fig. 1 Spectrum and channel allocation of relay stations

3.2 数据链路中继传输方法

在上述中继站的频谱与信道分配的基础上,笔者提出了矿井无线中继应急通信系统的数据链路中继传输方法。链路中各基站的收/发频段与子信道频率按照基站的物理排列顺序进行设置,如图 2 所示,图中物理位置标号为 1,2,...,i,i+1,i+2,...,N(i 为奇数,N 表示基站的 最大位置编号)的中继站依次安装于矿井巷道中。

利用双工滤波器的频段隔离特性,各中继站的 CHA、CHB 频段的收/发模式按如下规则进行设置:物理位置标号为 1,3,...,i,i+2,...,N₁(N₁ 表示基站的 最大奇数位置编号)的中继站采用 CHA 频段接收,CHB 频段发射;物理位置标号为 2,4,...,i+1,i+3,...,N₂(N₂ 表示基站的 最大偶数位置编号)的中继站采用 CHB 频段接收,CHA 频段发射。

利用矿井巷道无线衰减大及传输距离近的特点,笔者提出了区段式空间复用的中继站频分子信道划分方式,解决了频分信道资源受限的问题。不处于分支巷道交汇处的各无线中继站,其 CHA、CHB 频段中所使用的频分子信道按基站的物理安

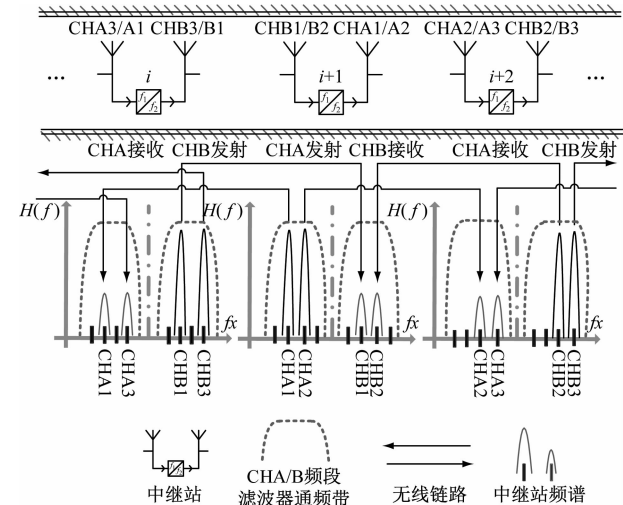


图 2 数据链路中继

Fig. 2 Data link relay

装顺序,以 CHB1 和 CHB3 发、CHA1 和 CHA3 收, CHA1 和 CHA2 发、CHB1 和 CHB2 收,CHB2 和 CHB3 发、CHA2 和 CHA3 收,CHA1 和 CHA3 发、CHB1 和 CHB3 收,CHB1 和 CHB2 发、CHA1 和 CHA2 收,CHA2 和 CHA3 发、CHB2 和 CHB3 收进行循环分配,各个频分子信道的收/发方式由其所处频段的收发规则决定。

中继站的两频段 CHA 和 CHB 收/发间隔设置,设置为发射频段内的 2 个频分子信道用于向前级和后级节点发送数据;设置为接收频段内的 2 个频分子信道用于接收来自前级和后级节点的数据。前级和后级节点的发送和接收数据流与中继站本地待收和待发数据流由中继站的基带单元,按路由协议进行集中数据交换,实现中继站的数据转发及本地

数据的上传与下载,完成数据链路中继传输功能。

区段式空间复用的中继站频分子信道划分方法将中继链路按节点间关系分解为独立子链路,各个独立子链路双工收发,信道频分复用,彼此间互不干扰。利用矿井巷道无线衰减大及传输距离近的特性,对中继站的频分子信道进行每 3 个站循环复用,解决了频分信道资源受限的问题。各个中继站可连续与前级和后级节点进行数据交换,减少了多级中继产生的累计传输时延,解决了多级中继产生的带宽损失及中继级数受限问题。

固定安装在巷道中的各基站仅需要在基站安装后,按上述方法进行一次频段分配。正常工作时,不改变其收发频段及频分子信道与前级和后级节点的对应关系,不需要与前级和后级节点进行收发时序及信道切换的协同配合,实现了各子链路的控制解耦。采用数据链路中继传输方法的中继站不需要进行时钟同步,任何一个子链路失效不会对其他子链路产生干扰。各中继站仅需要将断开链路的中继数据进行缓存,在信道恢复时,恢复数据的转发,实现链路失效重连,提高了系统稳定性。

3.3 频分子信道复用

为解决频分信道资源受限的问题,利用矿井巷道无线传输距离近的特点,对各节点的频分子信道进行区段式空间复用。单一巷道数据链路信道复用方式如图 3 所示,在无分支巷道的单链路中继系统中,考虑中继站传输距离覆盖左右各 2 个节点的情况下,各频段仅需要分配 3 个子信道用于无线中继链路,1 个子信道用于协议控制链路。

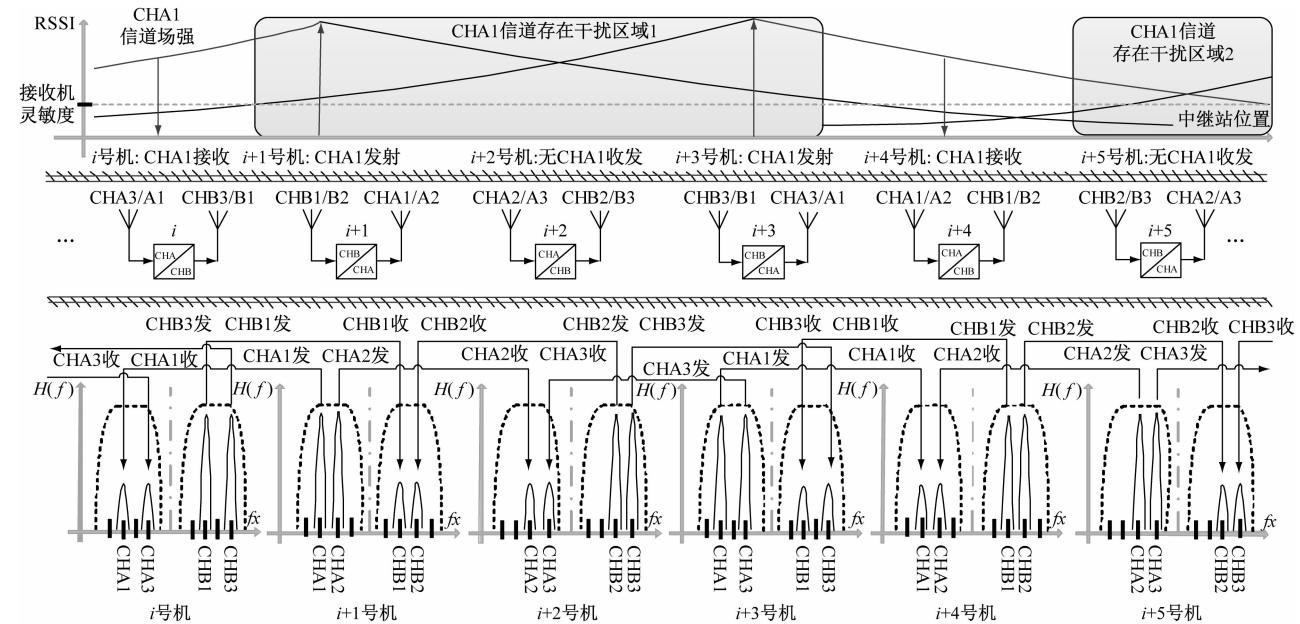


图 3 单一巷道数据链路信道复用方式

Fig. 3 Single roadway data link channel multiplexing mode

多分支巷道数据链路频分子信道复用方式如图 4 所示,各基站标号前置数字代表巷道编号,后置数字代表同巷道中基站排列编号。其中标号为 1- i 的中继站位于分支节点处,包含主巷道在内共有 4 个独立的链路方向,1- i 中继站 CHA/B 频段中各划分有 4 个子信道用于无线中继链路,其中 CHA4/

CHB4、CHA5/CHB5 分别用于链接 2 分支巷道的 2-1、3-1 中继站,其余各基站子信道复用方式与单链路中继保持一致。因此,系统所需频分子信道的最大值由矿井巷道最大分支数决定。在分支巷道最大分支数确定的情况下,系统最大中继级数不会受频分子信道的数量限制。

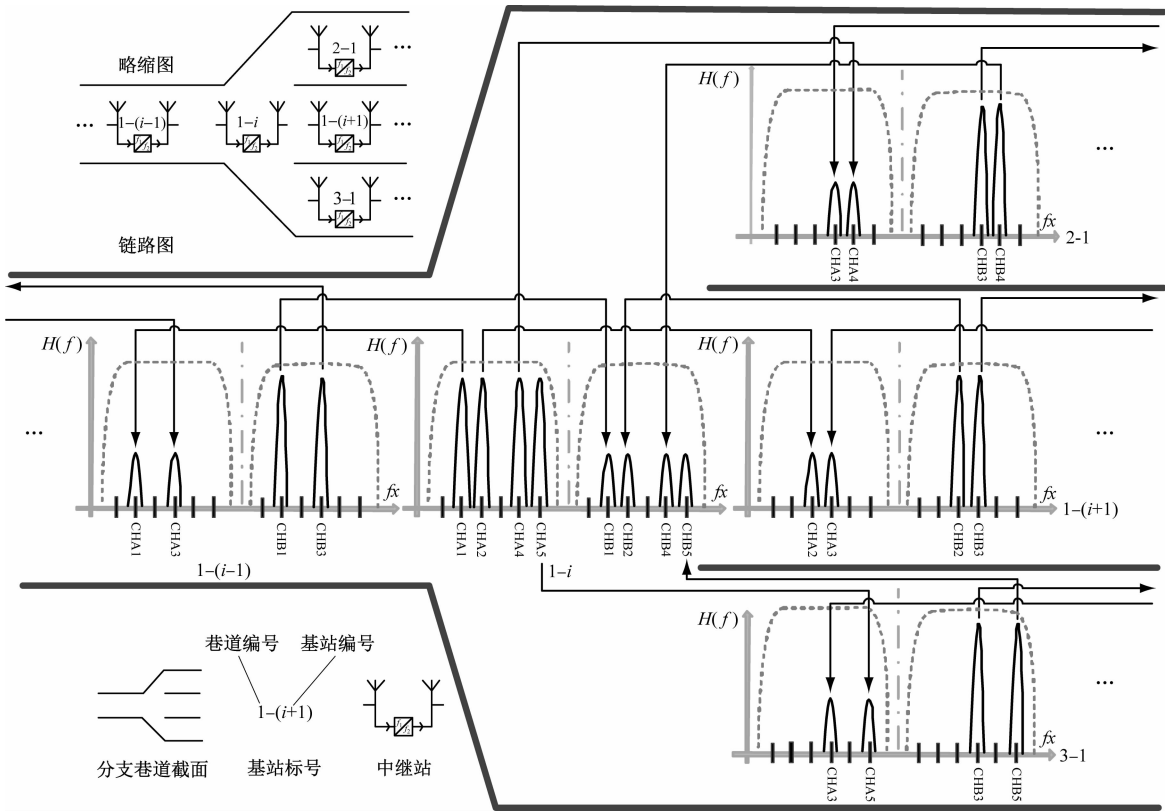


图 4 多分支巷道数据链路信道复用方式

Fig. 4 Multi-branch roadway data link channel multiplexing mode

3.4 基于固定节点的透传式路由策略

为解决多级无线中继逐级路由寻址和路由发现带来的链路开销问题,结合井下无线传输距离近、传输方向单一且确定、基站固定安装的特点,提出了基于固定节点的透传式路由策略。煤矿井下固定安装的各无线中继站形成了相对稳定的主链路由拓扑结构,可以按照矿井巷道的延伸方向将路由简单地划分为上行/下行结构。信息源节点需要根据存储器中的固定节点路由表,明确目标节点相对于本节点的上行和下行位置,在数据包头附上目标节点的设备号后,直接向目标传输路径所在方向的子链路进行透传式发送。

除分支巷道口处的中继节点外,其他各级中继节点无需进行逐级路由寻址,仅需对数据包头的设备号进行滑动窗口过滤。非本机接收的数据包,在进行完整校验后将直接采用透传方式通过子链转发给下一级节点。在数据包转发至分支节点时,由分支节点根据路由表进行分支巷道方向的判断,选择

对应巷道方向的子链进行透传转发。目标节点在转发数据流时,滑动检索到数据包头为本机设备号,在进行完整的数据包接收和校验后,将目标数据从中继数据流中下载下来,释放数据流。为保证数据的可靠传输,在进行数据包校验后,由路由控制链路向前一级节点反馈 ACK 信令,完成数据收发的全过程。基于固定节点的透传式路由策略简化了逐级路由寻址和路由发现过程,提高了数据转发效率,减小了协议对链路的开销。

路由转发如图 5 所示,节点采用巷道标号-设备标号的形式进行标记,图中举例描述了在分支巷道中,2-89 节点向 1-94 节点发送数据及 1-57 节点向 3-80 节点发送数据的完整路由路径。

3.5 链路断点路由恢复方法

煤矿井下发生事故后,受爆炸冲击波、煤与瓦斯突出、冲击地压、顶板冒落等影响,巷道中的无线天线、射频馈线、有线电视和光缆、基站设备等会发生损毁,顶板冒落物会造成无线传输损耗增大,原有无

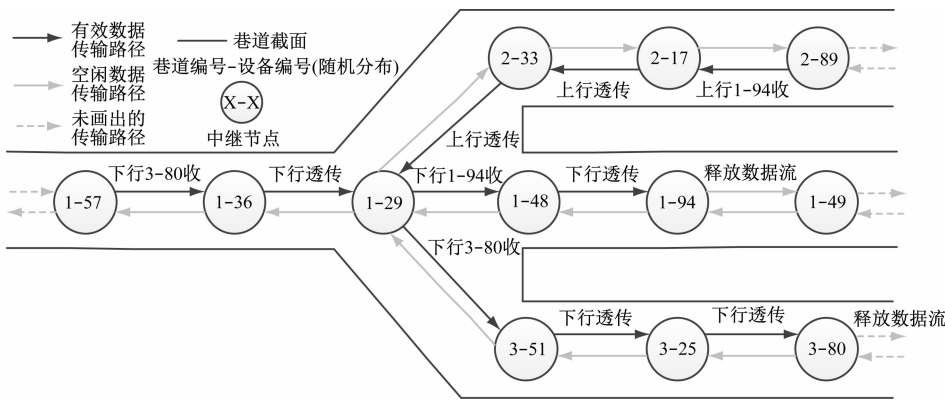


图 5 路由转发

Fig. 5 Routing forwarding

线链路预算可能无法满足传输要求，在数据链路中形成通信断点和信息孤岛。矿井应急通信系统应具有抗灾变能力，当出现通信断点和信息孤岛时，能快速自组织和自恢复，将未损毁节点尽可能快速重组，并充分利用可链接的有线或无线链路打通通信断点。

为提高链路的抗故障能力，笔者提出了冗余基站、移动终端桥接、本地接入协同的链路断点路由恢复方法。冗余基站掉线不影响中继链路，非连续主链路中继站掉线，冗余基站直接替换；发生多个连续基站掉线时，采用单个或多个移动终端透传桥接链路断点；兼容有线通信链路，有线链路断点处的无线中继站将有线链路数据作为本地数据进行中继转发。

3.5.1 固定基站冗余链路自恢复

为防止单一节点损坏导致通信中断的情况，分布于巷道中的各个固定无线基站采用冗余布置，每个无线基站至少可与左右任意方向的 2 个基站节点进行通信。在矿井巷道发生灾害事故后，若链路中发生非连续性节点掉线，或无线传输未发生完全阻塞时，可利用各基站的链路冗余度接替原有掉线设备或打通阻塞区域。

为减小中继级数带来的传输开销，中继链路中的冗余节点以终端模式挂载于前一中继节点上，在前级中继节点正常时不参与中继数据转发，避免了主节点和冗余节点混合传输带来的信道干扰问题。当发生中继链路非连续性节点失效时，临近节点将对其进行原工作状态校验：若失效节点为以终端模式挂载于前级中继的冗余节点，则不影响正常双向数据传输；若失效节点为用于中继数据传输的中继节点，以终端模式挂载在其上的冗余节点在判断原中继节点失效时，应立即将原中继节点的工作模式应用于本机，物理层收发频率和信道选择与原中继节点保持一致，直接转接原中继节点的中继数据流，

实现不影响原中继数据链路的冗余节点无缝切换。

在完成上述操作后，临近节点需向链路的源节点发送局部路由维护信令，报备失效节点信息，完成路由维护功能。

3.5.2 移动终端节点的桥接恢复

当连续发生多个主中继节点及冗余节点损坏时，首先尝试由终端节点进行直接的中继桥接。处于链路断点处的终端节点，将向链路断点区域内的中继站发送组网请求信令，若成功与处于断点区域内的中继站进行握手链接，表明已成功绕过失效区域节点，链接了原有中继链路。此时，挂载终端节点的前一级中继站将向该节点发送临时中继信令，由该终端节点转发主链路的中继数据，实现单级终端的直接桥接恢复。

当单个移动终端节点进行了一段时间的重连尝试后，判断其无法直接与原有中继链路建立链接时，处于链路断点处的终端节点需要向其他终端节点发送组网请求信令。链路中断区域中的各终端节点，在与其进行组网握手链接后，将判断是否可以与中断区域内的中继站进行链接。若无法进行链接，将转发该信令，继续进行组网请求。若可与断点区域内的中继站进行有效链接，将由位于断点下行方向的终端节点向链路上行方向的终端节点进行信令回传，直至链路上行方向断点处的中继站。由该基站将根据回传的信息向与其链接的终端节点发送临时中继信令，各个终端节点根据该信令进行双向数据透传转发，恢复通信断点区域的数据传输，实现多级终端的桥接恢复。

在多级终端节点仍无法恢复原有链路时，需通过挂载于通信断点附近的移动终端节点采用人工移动或自主移动的方式接近通信断点所在区域，在移动过程中进行实时路由发现，通过尝试终端节点的移动补位，恢复链路断点链接。在 2 个或多个终端节点通过路由发现重组断点链接时，根据上述规则，

通过终端节点对的数据透传,完成通信断点的桥接恢复。

移动终端节点的桥接链路恢复主要包含无线电断点补位导航、自组网链路扩展、桥接数据透传3个功能单元。其中,无线电断点补位导航主要用于引导移动终端节点通过人工移动或自主移动的方式向通信断点区域深入。各移动终端节点首先通过查询全局路由表,根据所链接的无线中继站路由信息确定所在巷道区段,向该无线终端携带人员或移动装置提供移动方向导航信息。根据该无线终端节点与固定基站通信的信号强度RSSI,预估其所在巷道区段的位置,向该无线终端携带人员或移动装置提供移动距离导航信息。

自组网链路扩展通过终端节点移动过程中的组网发现与组网握手尝试与通信断点所在区域的任意节点进行链路连接。在终端节点移动过程中,通信断点所在区域的任意固定中继站成功与其进行组网握手,则表明已打通断点区域内的部分链路,此时将该信息反馈至终端节点图形化显示界面或移动设备载体,终止本次无线电断点补位导航;当终端节点移动至链路预算最大范围附近,或由于物理障碍无法继续前进时,仍未与通信断点所在区域的任意节点进行组网握手,则表明无线通信中断距离大于单级无线中继的传输距离,终止本次无线电断点补位导航,进一步深入的补位动作由其他可移动终端节点实现。

在各移动终端节点完成中继断点区域的自组网链路扩展后,由于路由关系不确定,为防止路由关系频繁变化影响链路传输的可靠性,不对各移动终端节点进行全局路由维护。处于原通信断点区域内的各移动终端节点将根据新建立的组网链接关系进行双工数据透传,完成对原有链路的数据桥接。

3.5.3 本地有线接入协同

为有效兼容矿井中现有的有线通信链路,同时不破坏无线中继路由协议,将无线中继站作为终端设备,通过以太网交换机挂载于矿井下的以太网中^[14],各中继站的IP由以太网交换机进行分配。链路中各固定基站在进行无线中继数据传输的同时,将由本地产生的收发数据,通过接口发送至以太网交换机,经数据流IP封装后进行上行传输;以太网交换机将以太网中的有效数据,根据设备IP地址进行数据分拣与解包,将处理好的数据通过接口回发至中继站,实现中继站与以太网的双向数据交换。

无线中继系统为串级传输链路,每级中继站收发的数据中,仅有少数为有效的本机收发数据,绝大部分为转发内容。为避免各中继站向以太网收发大

量的重复数据,增加链路传输及处理负担,在链路正常时,各中继站仅将本机新产生与待接收的数据与以太网进行数据交换,不对其他设备的转发数据进行有线链路传输。

在有线链路发生中断时,位于断点处的以太网交换机将检测到以太网数据传输超时,交换机将超时的数据转发至位于有线链路断点处的无线中继站,中继站将该数据作为本地数据进行中继转发,中继传输方向与有线链路中断方向保持一致,各级中继站在接收到该转发数据时,都将按照原路由信息进行本地有线传输请求,若未发生有线传输超时则表明有线链路已于该节点处恢复,此时将不再对其进行无线中继转发;若本地传输请求仍超时,则继续进行无线中继转发,直至将该数据发送到目标节点。

当无线链路发生中断时,位于断点处的中继站将检测到无线中继数据传输超时,此时中继站将不区分是否为本机数据,将中继链路的收发数据统一接入至以太网交换机,以太网交换机根据数据包中的设备地址对其进行IP封装,由以太网进行有线链路的数据传输。位于无线链路断点区域中的中继站,由该区域中的以太网交换机按照数据包的IP地址进行分拣解包,并分发给对应中继站,恢复原有的无线数据链路传输。

在语音数据的接收处理方面,由于有线/无线链路数据到达各个节点的时间不同步,为充分利用双链路数据的传输带宽,同时减少数据质量评判与链路切换控制开销,采用数据池对语音数据流进行连续的接收缓冲。各节点在收到来自有线/无线链路的语音数据包时,解析后不立即进行播放,将其存储于播放缓冲区,采用固定的延迟时间进行滞后播放,形成待播放的数据池。缓冲区中的数据不区分其有线/无线链路来源,按语音数据包的采集顺序标签进行排序,在任意链路的语音数据流发生滞后、误码、丢包时,可由缓冲区的对应链路数据进行弥补,从而有效提高语音播放的连续性与可靠性。

4 结论

(1) 矿井无线中继通信具有如下特点:① 无线发射功率受防爆限制(不大于6W),矿井无线传输衰减大,无线传输距离近。② 在保证井下工作的各无线通信设备互不干扰,出井后不影响地面无线设备正常工作的前提下,工作频段不受限制,煤矿井下无线频谱资源丰富。③ 中继链路在巷道中呈链状分布,整体网络呈树状拓扑结构。

(2) 提出了矿井无线中继应急通信系统的实现方法:将数据传输链路与协议控制链路分离,提高了

链路控制的灵活性和路由协议信令的传输效率;链路中各基站的收/发频段与子信道频率按照基站的物理排列顺序进行设置,解决了各级中继站收发相互干扰的问题;多射频全双工收发、频分信道复用的中继站架构、前后级中继站独立且固定的频分信道分配方式使系统链路解耦,链路中各个中继站可与前后级节点进行连续的数据交换,解决了多级中继带来的带宽损失、中继时延以及系统稳定性问题;区段式空间复用的中继站频分子信道划分方法解决了频分信道资源受限的问题;基于固定节点的透传式路由策略简化了逐级路由寻址和路由发现过程,从而提高了数据转发效率;正常链路的冗余基站下挂式路由策略减小了中继级数带来的传输开销,避免了主节点和冗余节点混合传输带来的信道干扰问题;冗余基站、移动终端桥接、本地接入协同的链路断点恢复方法提高了链路的抗故障能力。

参考文献 (References):

[1] 孙继平,张高敏. 矿井应急通信系统[J]. 工矿自动化, 2019,45(8):1-5.
SUN Jiping, ZHANG Gaomin. Mine emergency communication system [J]. Industry and Mine Automation, 2019,45(8):1-5.

[2] 孙继平. 煤矿安全生产监控与通信技术[J]. 煤炭学报, 2010,35(11):1925-1929.
SUN Jiping. Technologies of monitoring and communication in the coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(11):1925-1929.

[3] 孙继平. 煤矿井下安全避险“六大系统”的作用和配置方案[J]. 工矿自动化, 2010,36(11):1-4.
SUN Jiping. Effect and configuration of " Six Systems" for safe act of rescue of coal mine underground [J]. Industry and Mine Automation, 2010,36(11):1-4.

[4] 孙继平,钱晓红. 煤矿事故与应急救援技术装备[J]. 工矿自动化, 2016,42(10):1-5.
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Coal mine accident and emergency rescue technology and equipment [J]. Industry and Mine Automation, 2016,42(10):1-5.

[5] 孙继平,钱晓红. 煤矿重特重大事故应急救援技术及装备[J]. 煤炭科学技术, 2017,45(1):112-116.
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Emergency rescue technology and equipment of mine extraordinary accidents [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1):112-116.

[6] 孙继平. 煤矿事故特点与煤矿通信、人员定位及监视新技术[J]. 工矿自动化, 2015,41(2):1-5.
SUN Jiping. Characteristics of coal mine accidents and

new technologies of coal mine communication, personnel positioning and monitoring[J]. Industry and Mine Automation, 2015,41(2):1-5.

[7] 孙继平. 矿井无线传输的特点[J]. 煤矿设计, 1999(4): 20-22.
SUN Jiping. The characteristics of mine wireless transmission[J]. Coal Mine Design, 1999(4):20-22.

[8] 陈琳琳,刘乃安. 无线 Mesh 网络与 IEEE 802 系列标准[J]. 中兴通讯技术, 2008(2):8-11.
CHEN Linlin, LIU Nai'an. Wireless Mesh network and IEEE 802 standards [J]. ZTE Communications, 2008(2):8-11.

[9] 张牧,严军荣. 802. 11s 无线 Mesh 网络研究进展与挑战[J]. 计算机工程与应用, 2010,46(22):75-79.
ZHANG Mu, YAN Junrong. Progress and challenge of wireless 802. 11s Mesh networks [J]. Computer Engineering and Application, 2010,46(22):75-79.

[10] 方艺霖,李方敏,吴鹏,等. 无线 Mesh 网络组播路由协议[J]. 软件学报, 2010,21(6):1308-1325.
FANG Yilin, LI Fangmin, WU Peng, et al. Multicast routing protocol for wireless Mesh networks [J]. Journal of Software, 2010,21(6):1308-1325.

[11] 宋文,戴剑波,王飞,等. 矿井 WMN 多媒体应急通信系统多跳传输性能研究[J]. 煤炭学报, 2011,36(4): 706-710.
SONG Wen, DAI Jianbo, WANG Fei, et al. Research on the multi-hop performance of underground mine emergency communication system based on WMN [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 706-710.

[12] 朱铨,蒋新华,邹复民,等. 矿井 WMN 多媒体应急通信系统多跳传输性能改进[J]. 计算机应用, 2012, 32(3):800-803.
ZHU Quan, JIANG Xinhua, ZOU Fumin, et al. Improvement on multi-hop performance of underground mine emergency communication system based on WMN [J]. Journal of Computer Applications, 2012,32(3):800-803.

[13] 孙继平. 现代化矿井通信技术与系统[J]. 工矿自动化, 2013,39(3):1-5.
SUN Jiping. Modern mine communication technology and system[J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(3):1-5.

[14] 孙继平. 煤矿井下有线宽带信息传输研究[J]. 工矿自动化, 2013,39(1):1-5.
SUN Jiping. Research of wired broadband information transmission of coal mine underground [J]. Industry and Mine Automation, 2013,39(1):1-5.