

煤矿应急通信网络的拓扑重构和数据传输研究

张国鹏 刘 鹏 丁恩杰

(中国矿业大学 物联网研究中心 江苏 徐州 221008)

摘要:为实现井下受灾区域的无线网络覆盖和应急通信 研究应急网络的拓扑重构和数据传输相关问题。首先 提出基于 Wi-Fi Direct 的应急网络重构方案 ,并将应急数据流分为上行、网内和下行数据流三类。针对上行数据流 提出基于时延的服务区分机制 ,使受损严重的终端能在信息获取能力丧失前将感知信息传送至安全终端。由于相邻被困矿工通常需要相同的救援信息 ,针对网内和下行数据流提出基于无线组播的能耗节省方案 ,延长网络的救援支撑时间。所提出的应急网络与现有的监控网络具有功能互补性和协议兼容性 将为煤矿井下作业提供更高的安全保障。

关键词: 无线网络; 应急通信; 矿井灾害; 监控网络

中图分类号: TD67; TP391 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2015)11-0095-06

Study on topology reconstruction and data transmission of mine emergency communication network

Zhang Guopeng, Liu Peng, Ding Enjie

(Research Center of Internet of Things, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to realize wireless network covered and emergency communication in the underground mine disaster , a study was conducted on the topology reconstruction and data transmission problems in the emergency network , emergency network reconstruction plan was provided based on Wi-Fi Direct and the emergency data flow was divided into uplink data flow , internal network data flow and down-link data flow. According to the uplink data flow , based on a time delay , a sub - mechanism of the service zone was provided and the serious damaged terminal before the collection capacity of the information lost could send the perception information to safety terminal. Due to the adjacent miners in difficulty generally needed the same rescue information , according to the internal network and downlink data flow , an energy saving plan was provided based on wireless multicast and the rescue and support time of the network was expanded. The emergency network and available monitoring and control network should have the functional complementation and protocol compatibility in order to provide higher safety protection to the operation in the underground mine.

Key words: wireless network; emergency communication; mine disaster; monitoring and control network

0 引言

矿山信息网络对煤矿安全生产起着重要保障作用 然而其理论和技术目标尚以主动式安全保障为主 即通过对人员、设备和环境的监控 ,实现对矿山灾害事故的预知预警^[1]。而灾害事故一旦发生 ,网络设备(包括通信电/光缆、以太网交换机、无线基

站等) 和通信终端(包括传感器节点、人员/设备定位锚节点、移动通信节点等) 将会受到不同程度的破坏和影响 ,导致灾后残存信息网络的数据传输能力发生严重退化 ,从而无法协助救援人员完成灾情控制和人员抢救等工作。矿山灾害事故的预知预警与事故发生后的抢险救援协助是矿山信息网络需要实现的 2 个重要互补功能^[2]。由于我国矿山事故应

收稿日期: 2015-03-08; 责任编辑: 赵瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.11.020

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA06A411); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2012141); 国家留学基金委公派博士后资助项目(2900759643); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011QNB26)

作者简介: 张国鹏(1978—)男, 江苏徐州人, 副研究员, 博士。E-mail: gpzhang@cumt.edu.cn

引用格式: 张国鹏, 刘鹏, 丁恩杰. 煤矿应急通信网络的拓扑重构和数据传输研究[J]. 煤炭科学技术 2015, 43(11): 95-100.

Zhang Guopeng, Liu Peng, Ding Enjie. Study on topology reconstruction and data transmission of mine emergency communication network [J]. Coal Science and Technology 2015, 43(11): 95-100.

急救救援体系尚未建立健全,对某些灾害事故的发生、发展机理尚未完全掌握,导致矿山应急救援网络(CMRN,Rescue Network in Coal Mines)的研究工作相对滞后^[3-4]。在CMRN领域,文献[5]最早提出了基于无线Mesh的CMRN组网方案WMN(Wireless Mesh Network),相关作者又在文献[6]中进一步将反应式与先验式路由算法相结合,提高了应急数据流传输的可靠性;文献[7]则研究了CMRN的信道容量;文献[8]提出了基于分布式链路负载预期的按优先级信道分配策略,用于提高应急数据传输的实时性;文献[9]提出了改进的AODV路由策略,通过对Mesh终端的识别并避免使用Mesh终端作为数据中继节点,解决矿山应急救援传输的高能耗问题。

然而,上述研究仍然基于混合式网络拓扑结构(由井下大巷等区域的有线骨干环网和采动工作面等动态区域的无线移动网络组成,无线基站仍然需要电缆供电并通过有线骨干环网互联)展开,没有考虑灾害事故对井下供电系统的破坏以及对网络设备健康工作状况的影响^[14]。基于全无线网络架构,文献[10]研究了如何利用无线传感器网络(WSN,Wireless Sensor Network)的拓扑重构识别井下灾后坍塌区域;文献[11]则研究如何利用WSN的上行数据传输获取事故现场信息等问题。不过,文献[10-11]均针对WSN展开研究,WSN采用无线多跳自组网(ad hoc)结构,由于矿井巷道特殊的长距离、窄空间管状结构及其所造成的严重多径信号衰落,WSN高误码率和高丢包率问题一直没有得到很好的解决^[12]。此外,长距离多跳WSN还存在着节点时间同步困难等网络技术问题^[13]。

灾害事故所导致的电力供应中断和通信环境恶化是CMRN拓扑重构所面临的最大困境。如何利用灾后残存的网络设备和终端实现无线互联就成为CMRN需要解决的首要问题;在此基础上,才能进一步研究应急数据流传输等相关问题。笔者从研究CMRN的应用环境和主要作用出发,分析CMRN灾后拓扑重构所面临的主要难题,并提出应对此问题的网络协议和技术方案。同时,根据井下应急数据流的作用对其传输流向进行划分,分析应急数据流传输所面临的网络服务质量(QoS,Quality of Service)保障和能耗节省问题,并提出相应的解决方案和需要进一步研究的关键技术。笔者研究的CMRN与现有矿山监控网络具有较大的功能互补性和协议

兼容性,它们的协同工作将为煤矿井下作业提供更高的安全保障。

1 矿山应急救援网络及应急数据流

CMRN能够利用灾后残存的无线基站和终端重构覆盖受灾区域的应急通信网络,为准确、高效的矿难抢险救援提供安全、可靠的信息传输通道。结合图1可知,CMRN的重要作用体现在以下3个方面。

1) 获取事故现场信息(上行数据流传输)。瓦斯爆炸和突水等事故通常造成巷道顶板冒落和泥石堵塞,导致救援人员无法进入、直接观察事故现场。利用CMRN可以远程获取事故现场信息(如事故源的位置、烈度,被困人员的生命体征和位置分布)。这对地面救援及时了解灾情状况,搜索井下被困人员提供重要的参考信息,同时,该信息也被用于研究矿山灾害的发生、发展机理。

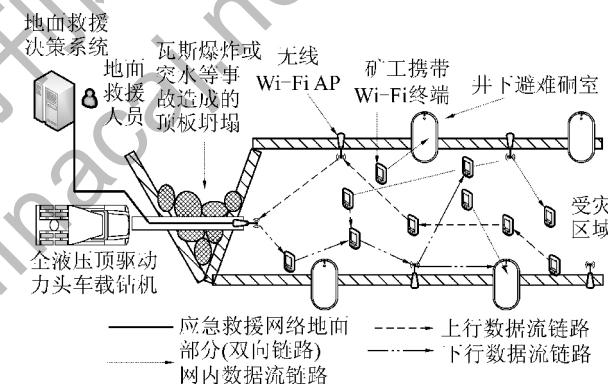


图1 矿山应急救援网络拓扑结构和数据传输流向

Fig. 1 Topology and data flows of emergency networks in coal mines

2) 协助被困人员和紧急避险系统进行信息交互(网内数据流传输)。井下紧急避险系统能为被困人员提供自救器、避难硐室、救生舱、避灾路线指示、应急预案等紧急避险装备和措施^[1]。利用CMRN可协助被困人员之间、被困人员与紧急避险系统之间进行信息传输,为被困人员实施自救、协救,最大限度发挥紧急避险设备的作用以提供信息支持。

3) 向灾区传达地面救援指令(下行数据流传输)。地面救援获取灾区现场信息后,借助矿山物联网进行数据融合和大数据分析,做出最佳救援决策(如最佳避难硐室、救生舱位置,避灾路线指示和被困人员自救方案等),救援决策信息仍需借助CMRN传达至井下被困人员和紧急避险系统。

2 矿山应急救援网络组网协议与拓扑重构

2.1 组网协议选择

矿山灾害事故会导致供电系统和有线环网的瘫痪,但无线基站和终端仍然可以依靠预装的蓄电池供电,并通过无线信道传输数据。由于衍生和重构关系,CMRN 必须兼容现有矿山监控网络通信协议,例如在“矿山物联网示范工程”^[14]中使用的 IEEE 802.11 协议(即 Wi-Fi)^[15]。考虑到灾害事故会对 Wi-Fi 基站(AP, Access Point)以及终端的传输性能造成影响(例如,当灾区环境温度超过一定阈值后,调制/解调芯片的接收误码率性能将急剧恶化^[16]),灾区稀疏的可用 AP 不足以覆盖全部无线终端。不过,最新被提出的 Wi-Fi Direct 协议^[17]则为突破上述 CMRN 应急组网困境提供了解决途径。

如图 2 所示,Wi-Fi Direct 的每个协议终端都能实现 AP 网络管理功能,因此,位置相近的若干终端可以组成一个簇,并从中选择唯一的终端,即软件定义的 AP(SAP, Software defined AP),履行网管职能,从而实现簇的宽带无线接入。此外,Wi-Fi Direct 支持 SAP 与 AP、AP 与 AP 以及 SAP 与 SAP 的互联,受灾区域中可用的 SAP/AP 和终端持续这种间互联和网络扩展过程,最终可以实现 CMRN 的拓扑重构和对大部分终端的无线覆盖。

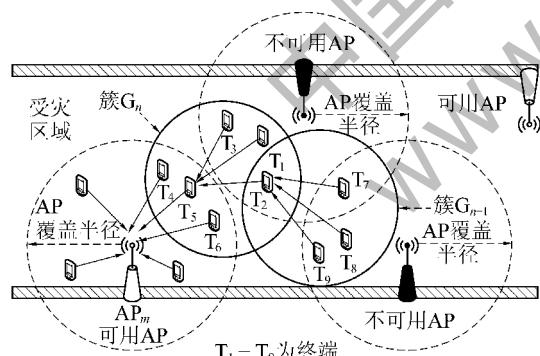


图 2 矿山应急救援网络 Wi-Fi Direct 簇结构和簇间互联

Fig. 2 Cluster architecture of Wi-Fi Direct in
coal mines and connection of clusters

由于井下无线终端数量较多(除了人员携带的移动终端和固定的传感器节点,还包括井下避难硐室预留的应急组网专用终端,这些终端在事故发生后由被困人员随机放置在巷道,用于增强应急网络的连通性和数据传输能力),而且比 AP 的体积小、耗电低,更易于存储和保护,因此 Wi-Fi Direct 在矿山灾害事故抢险救援环境中极

具应用优势。

2.2 拓扑重构关键技术

Wi-Fi Direct 仅提出了基本的组网理论和协议框架,并没有给出具体的实现方案。相关的组网和维护协议算法都需要研究者自行开发实现。因此,CMRN 需要解决以下问题。

1) 拓扑重构问题。井下被困区域中各 Wi-Fi Direct 簇的 SAP 选择(即相邻的多终端成簇)是 CMRN 拓扑重构的关键环节。当簇内存在多个候选终端时(如图 2 中的簇 G_n 有 3 个候选终端 T_4, T_5, T_6),如何选择合适的 SAP 就成为 CMRN 拓扑重构需要解决的核心问题,并对 CMRN 的连通性、QoS 和能耗产生重要影响。SAP 选择与候选终端的当前运行状态密切相关,首先需要定义任意候选终端 T_i 在时刻 t 的多维度运行状态信息,包括: T_i 与相邻的多个 SAP 或 AP 的信道信息; T_i 与簇内其他终端的信道信息;衡量 T_i 健康工作状况的灾后环境信息; T_i 可用能量信息等。

最优 SAP 选择不仅取决于每个候选终端自身的运行状态,而且与本簇内其他终端的运行状态,以及相邻簇的 AP/SAP 运行状态也密切相关。因此,最优 SAP 选择是一个多维度数学优化问题,需要根据不同的应急组网目标(例如,上行数据流要求实现基于时延的 QoS 区分,而下行和网内数据流则以能耗节省为网络目标),求解上述多维度数学优化问题,设计相关的低复杂度、分布式算法。

2) 拓扑维护问题。CMRN 的无线终端有一部分是矿工携带的智能矿灯多功能通信终端,矿工的移动会导致网络拓扑结构发生变化。此外,簇内 SAP 与其他候选终端的无线信道质量、当前健康工作状况和可用能量都随时间发生变化。因此,需要设计合适的 SAP 更新机制,保持 CMRN 的连通性。考虑到应急终端的移动性,以及其运行状态的时变特性,CMSN 需研究基于时间触发的 SAP 更新机制,并求解重启 SAP 选择的最佳时间频率,在平衡簇内各终端能耗的同时,减小 SAP 更新所需网络信令开销。

3 基于 QoS 的应急数据流传输

3.1 矿山应急救援数据流 QoS 区分

向地面救援系统还原灾情发生和发展状况是 CMRN 上行数据流传输的主要目的之一。灾害事故从发生到衰减的时间较短,无线基站和终端受到灾

害冲击后的有效工作时间呈不同程度的衰减^[11]。这就要求CMRN必须确保受灾害影响较大的数据源终端能在其信息获取能力完全丧失前将感知的灾害现场信息缓存至健康状况较好的无线基站或终端(当前的移动终端均能植入16~256GB的大容量缓存^[18]),以备地面救援系统获取。

为实现上述网络目标,应急终端不仅要感知事故现场的环境信息,还要对其灾后健康工作状况做出评价,从而CMRN能够根据其健康状况为其感知信息提供基于时延约束的数据传输服务^[11]。由于无线信道的时变衰落特性,CMRN无法保证上行数据流的硬性服务质量QoS指标(即Intserv^[19]),仅能提供QoS区分服务(即DiffServ^[19]),使高优先级数据流的数据包会被优先调度传输。因此,需要研究针对CMRN的QoS区分问题。

3.2 矿山应急救援公平性的QoS区分

上行数据流传输主要向地面救援反馈事故爆发、衰减过程以及事故现场信息,必须在其发生后的较短时间内完成。由于受到灾害冲击,应急终端的工作性能和有效工作时间都有不同程度的衰减。为了使健康工作状况较差的应急终端能在其信息获取和传输能力丧失前完成信息反馈,首先,需要实现数据流的QoS优先级映射,使得CMRN能够根据源终端当前的健康工作状况及其对网络QoS的满意度,将其数据流归为不同的优先级。考虑到QoS区分不仅要保证高优先级数据流的数据包被优先调度传输,还要确保低优先级数据流的数据包获得传输机会,不至于出现数据吞吐量为零的现象^[20],这就需要研究基于优先级权重的数据包调度传输算法,解决公平性的QoS区分问题。

为了实现基于时延的QoS区分,矿山应急网络的SAP/AP必须支持多优先级队列。尽管IEEE 802.11e EDCA^[21]已经实现了多优先级队列,并通过赋予高优先级队列更有利的MAC层信道竞争参数实现了QoS区分。然而EDCA会导致数据包传输碰撞加剧并出现数据吞吐量为零的现象,而公平性的队列调度机制可以有效避免此现象的出现。

4 应急救援网络能耗及应急救援组播

4.1 应急救援网络能耗

灾害事故从爆发到衰减,灾区的环境状况逐渐趋于稳定。此时,抢险救援工作的开展主要依靠

CMRN的下行及网内数据流传输。由于灾区的AP和终端都只能依靠电池供电,为了延长对救援行动的支撑时间,必须研究下行以及网内应急数据流的传输能耗节省问题。文献[2]研究表明,位置相近的被困矿工通常需要相同的救援信息(如最佳避难硐室位置、逃生路线图等),因此,可以采用无线组播(multicast)^[22]提高应急传输的能谱效益、降低传输能耗。

如图3所示,借助无线信道的广播特性,AP或SAP在下行链路可以将同一信息一次性发送到多个具有相同信息需求的终端(即被困矿工),相比于多次的端到端单播(Unicast),一次性组播可以大幅降低数据和信令的传输总量,减小能量和频谱带宽消耗。然而,由于煤矿井下无线信道的深度衰落和时变特性,连接AP/SAP和多个终端的无线链路存在信道质量上的巨大差异,而无线组播的传输能耗和数据速率均取决于信道质量最差的收发链路^[23]。不过,D2D(device-to-device)直接通信^[23]的出现为突破无线组播的性能瓶颈提供了解决途径。D2D是支持蜂窝小区中终端间直接通信的网络技术,可以减小通信跳数、缩短通信距离、降低传输能耗^[23]。D2D不同于ad hoc模式:首先,D2D通信必须在基站的授权下之下进行;其次,D2D需要使用其所在区域频段进行通信。

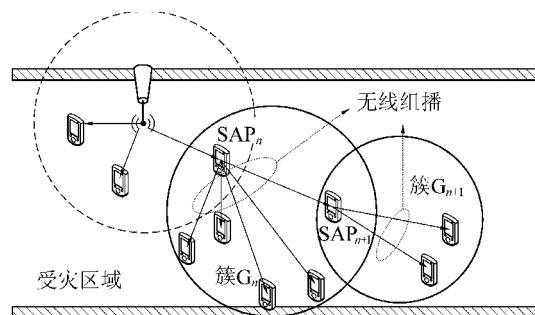


图3 煤矿井下应急救援网络下行数据流的无线组播

Fig. 3 Wireless multicasting of downlink data flows in coal mine emergency networks

当地面救援信息通过应急网关向灾区下行传输时,AP/SAP以高速率向簇内多个终端组播同一信息,该信息被部分信道条件较好的终端接收;此后,成功接收的终端使用D2D向接收失败的终端重传该信息(即D2D协作重传),从而保证该救援信息能被簇内所有终端正确接收。D2D协作重传利用了相邻终端间较好的无线信道条件,使无线组播不再受限于少数质量差的下行链路,在确保

下行及网内数据流高速率传输的同时,也大幅降低了AP/SAP的传输能耗。尽管如此,D2D通信仍然要占用簇内的频谱和能量资源,需要在分析D2D协作重传对无线组播能谱效益的影响的基础上,提高CMRN下行及网内数据流传输的能谱效益,降低传输能耗。

4.2 应急数据组播

无线组播的性能受限于簇内信道质量最差的下行链路(SAP/AP至终端),D2D协作重传能够利用相邻终端间较好的信道条件,使无线组播不再受限于少数质量较差的簇内下行链路,但是,需要研究D2D重传方式对无线组播性能和相关算法复杂度的影响。

如图4所示,无线组播既可通过一个低速的单D2D重传实现(图4a),也可通过多个高速并行的D2D重传实现(图4b)。因此,CMRN中基于D2D协作重传的无线多播需要研究以下3个彼此相关的问题:簇内最优D2D重传终端选择;簇内最优D2D重传终端数量;簇内最优D2D重传路径选择。



图4 煤矿井下基于D2D协作重传的无线组播系统模型

Fig. 4 Multicasting system model of cooperative D2D retransmission in coal mines

在图4中,每个簇可以选择一个或多个D2D重传终端向D2D接收终端重传SAP/AP的组播数据,而D2D重传的能谱效益取决于所选择的D2D重传终端、重传终端的数量以及重传路径。公式化定义CMRN的能谱效益衡量指标为

$$\eta_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{b_{i,j}p_i} \quad (1)$$

式中: $r_{i,j}$ 为簇内任意终端 T_i 和 T_j 之间的数据速率; $b_{i,j}$ 为传输信道带宽; p_i 为终端 T_i 的发射功率。

式(1)的物理意义是:使用1J的能量在1Hz频段上可以传输的最大比特数。令 C 表示簇内候选D2D重传终端的数量, D 表示簇内D2D接收终端的数量,可以进一步定义簇内所有D2D链路的能谱效益矩阵 E (C 行 D 列)为

$$E = \begin{bmatrix} \eta_{1,1} & \eta_{1,2} & \cdots & \eta_{1,D} \\ \eta_{2,1} & \eta_{2,2} & \cdots & \eta_{2,D} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \eta_{C,1} & \eta_{C,2} & \cdots & \eta_{C,D} \end{bmatrix} \quad (2)$$

当某簇内SAP/AP下行组播的数据量为 L 比特,且D2D重传终端的数量为1时,能谱效益最高的D2D重发终端 T_{i^*} 选择方案可以表示为

$$T_{i^*} = \arg \min_{T_i \in T} \left\{ \frac{L}{\min_{\forall T_j \in R} (e_{i,j})} \right\} \quad (i = 1, 2, \dots, C; j = 1, 2, \dots, D) \quad (3)$$

其中: T 为该簇内的候选D2D重传终端集合; R 为该簇内的D2D接收终端集合。

当簇内允许的D2D重传终端个数 K 大于1时,即 $1 < K \leq C$,可以推导出此时若重传 L 比特信息所需的最小能谱资源为

$$\min_{R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_k = R} \left\{ \sum_{k=1}^K \frac{L}{\min_{\forall T_j \in R_k} (e_{i,j})} \right\} \quad (4)$$

其中: T 为簇内候选的D2D重发终端集合; R 表示簇内的D2D接收终端集合; k 为D2D重传终端 T_k 的序号($T_k \in T$); R_k 为从 T_k 接收重发信息的终端集合,且有 $R_k \subset R$, $R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_k = R$, $R_i \cap R_j = \emptyset$, $\forall i \neq j$ 。从式(4)可见,随着簇内D2D重传终端数量 K 的增加,该簇的D2D接收终端被划分为多个子集 R_1, R_2, \dots, R_k ,完成一次数据重传需要越来越多的并行D2D协作重传,而每个重传终端服务的接收终端数量也相对减少。为了避免共信道干扰,必须分配正交的时频资源给每个D2D重传链路。因此,必须研究最优的D2D重发终端数量,以及最优的集合 R 子集划分方案(即重传路径选择),从而提高D2D协作组播的能谱效益。

5 结语

针对煤矿井下应急救援网络的应用需求,研究并突破灾后井下可用Wi-Fi AP减少这一应急组网困境,并使应急网络对数据流具备一定的QoS区分能力,同时能够支撑井下救援工作较长一段时间。将来还需对以下3个方面进行研究:①煤矿井下应急组网关键技术:在灾后断电的情况下,探索利用尚能正常工作的AP和终端完成对受灾区域的无线网络覆盖,并设计低复杂度、分布式算法实现应急网络拓扑维护;②基于时延的应急数据流QoS区分:在确保健康状况较差源终端的感知信息得到优先传输的同时,也使得其他源终端的数据流获得传输机

会,从而避免信息还原的不完整性问题;③高能谱效益、低能耗的煤矿井下无线传输:探索利用无线组播和D2D协作重传技术提高应急网络下行和网内数据流传输的能谱效益,降低网络整体的数据传输能耗。

参考文献:

- [1] 孙继平. 安全高效矿井监控关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2012(12):1-5.
Sun Jiping. Research of key technologies for mine safety and efficiency monitoring [J]. Industry And Mine Automation , 2012 (12) : 1 - 5.
- [2] Bandyopadhyay L K , Chaulya S K , Mishra P K . Wireless communication in underground mines [M]. US : Springer – Verlag New York Inc , 2010: 1 - 64.
- [3] 李学来,胡敬东. 煤矿应急救援技术的研究及应用现状[J]. 煤炭工程 2005(4):1-5.
Li Xuelai ,Hu Jingdong. Research and application of emergency rescue technology in coal mine [J]. Coal Engineering 2005(4):1-5.
- [4] 杨大明. 煤矿井下紧急避险技术装备现状与发展[J]. 煤炭科学技术 2013 ,41(9):49-52.
Yang Daming. Status and development on technology and equipment of emergency refuge system in underground mine [J]. Coal Science and Technology ,2013 ,41(9):49-52.
- [5] 李起伟,霍中刚,温良等. 基于无线Mesh网络的煤矿应急救援系统设计研究[J]. 工矿自动化, 2012(6):39-43.
Li Qiwei ,Huo Zhonggang ,Wen Liang et al. Development of coal mine emergency rescue system based on wireless mesh network [J]. Industry and Mine Automation , 2012(6) : 39 - 43.
- [6] 温良. 基于Mesh网络的煤矿救灾通讯技术[J]. 煤矿安全, 2013 ,44(4):135-137.
Wen Liang. Coal mine rescue communication technology based on mesh network [J]. Safety in Coal Mines , 2013 ,44(4):135-137.
- [7] 张玉,杨维. 矿井带状应急救援无线Mesh网络的标称容量[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2012 ,40(6):59-64.
Zhang Yu ,Yang Wei. Nominal capacity of strip topology emergency rescue wireless mesh network for underground mines [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition , 2012 ,40(6) : 59 - 64.
- [8] 张玉,杨维. 矿井应急救援WMN修正分级信道分配策略[J]. 煤炭学报, 2012 ,37(11):1935-1940.
Zhang Yu ,Yang Wei. A modified and classified channel allocation scheme for underground mine emergency rescue WMN [J]. Journal of China Coal Society , 2012 ,37(11) : 1935 - 1940.
- [9] 张玉,杨维,韩东升. 混合结构矿井应急救援无线Mesh网络及其路由算法[J]. 煤炭学报, 2013 ,38(12):2279-2284.
Zhang Yu , Yang Wei ,Han Dongsheng. Architecture and routing algorithm of wireless mesh network for underground mine emergen-
- cy rescue [J]. Journal of China Coal Society , 2013 ,38(12) : 2279 - 2284.
- [10] 宋金玲,郝丽娜,魏培. 夹河煤矿感知矿山物联网方案设计及实施[J]. 煤炭科学技术, 2012 ,40(9):68-71.
Song Jinling ,Hao Lina ,Wei Pei. Design and practices on plan of sensory mine internet of things for Jiahe Mine [J]. Coal Science and Technology ,2012 ,40(9) : 68 - 71.
- [11] Li M ,Liu Y. Underground coal mine monitoring with wireless sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks , 2009 , 5(2) : 1 - 9.
- [12] Liu M ,Gong H ,Wen Y et al. The last minute: efficient data evacuation strategy for sensor networks in post – disaster applications [C]. Shanghai: 2011 Proc IEEE of INFOCOM 2011.
- [13] 范新越,杨维. 井下多媒体无线传感器网络自适应调制研究[J]. 煤炭学报, 2009 ,34(9):1291-1296.
Fan Xinyue , Yang Wei. Study on the adaptation modulation of underground mine multimedia wireless sensor network [J]. Journal of China Coal Society 2009 ,34(9):1291 - 1296.
- [14] 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.
- [15] IEEE 802.11—2007 , Wireless lan medium access control and physical layer specifications[S].
- [16] Herr Q P M Johnson W ,Feldman M J. Temperature – dependent bit – error rate of a clocked superconducting digital circuit [J]. IEEE Trans Applied Superconductivity ,1999 ,9 (2) : 3594 - 3597.
- [17] Wi – Fi Alliance ,P2P Technical Group. Wi – Fi Peer – to – Peer (P2P) Technical Specification [R]. Austin : Wi – Fi Alliance 2009.
- [18] Golrezaei N A ,Molisch F. Femtocaching and device – to – device collaboration: a new architecture for wireless video distribution [J]. IEEE Commun Mag , 2013 ,51(4) : 142 - 149.
- [19] Ponnappan A ,Yang L ,Pillai R. A policy based QoS management system for the intserv/diffserv based internet [C] // Policies for Distributed Systems and Networks. Proceedings Third International Workshop on IEEE , [sl] 2002.
- [20] Zhang Y. Study on the fairness of wireless mesh networks [J]. Journal of University of Science and Technology of China , 2007 (2) : 1 - 9.
- [21] IEEE 802.11e/D4. 1 ,Wireless lan medium access control and physical layer specifications: mac enhancements for quality of service [S].
- [22] Zhang G ,Yang K ,Hu Q et al. Bargaining game theoretic framework for stimulating cooperation in wireless cooperative multicast networks [J]. IEEE Communications Letters ,2012 ,16(2) : 208 - 211.
- [23] Doppler K ,Rinne M ,Wijting C et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE – advanced networks [J]. IEEE Commun Mag , 2009 ,47(12) : 42 - 49.