

文章编号:1671-251X(2019)02-0035-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018050088

WiFi 快速漫游与 Mesh 网络技术 在综采工作面的应用研究

高思伟, 李森

(北京天地玛珂电液控制系统有限公司, 北京 100013)

摘要:针对目前对 WiFi 通信在综采工作面特定环境下的应用研究较少的问题,结合无线信号空间传播理论分析了 WiFi 信号在综采工作面的传播特性,分析结果表明:在综采工作面, WiFi 信号的传播受到较大影响,尤其是信号覆盖范围明显减小;在综采工作面 WiFi 无线信号传播符合对数距离路径损耗模型。根据综采工作面的空间布局特点,采用快速漫游和 Mesh 网络技术构建了无死区、全覆盖的综采工作面 WiFi 通信网络优选技术方案。测试结果表明,该方案可解决采煤机机载视频通信难题,实现了 WiFi 网络快速漫游功能,可有效保证移动终端的应用效果,整个网络的平均通信吞吐量约为 35 Mbit/s,最低通信吞吐量约为 7 Mbit/s,能够满足大多数综采工作面的通信需求。

关键词:煤炭开采;综采工作面;WiFi 通信网络;采煤机视频通信;对数距离路径损耗模型;通信吞吐量;快速漫游;Mesh 网络技术

中图分类号:TD655 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.tp.20190121.1316.001.html>

Research on application of fast roaming and Mesh network technology of WiFi communication on fully mechanized coal mining face

GAO Siwei, LI Sen

(Beijing Tiandi-Marco Electro-Hydraulic Control System Company Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: At present, there are problems about few application research of WiFi communication in the specific environment of fully mechanized coal mining face, propagation characteristics of WiFi signal on the fully mechanized coal mining face were analyzed combined with wireless signal spatial propagation theory. The analysis results show that on the fully mechanized coal mining face, the WiFi signal propagation is greatly affected, especially the signal coverage is obviously reduced; the WiFi signal propagation on the fully mechanized coal mining face conforms to log-distance path loss model. According to the spatial layout characteristics of fully mechanized coal mining face, an optimal technical scheme of no-dead zone and full coverage WiFi communication network of fully mechanized coal mining face was constructed by fast roaming technology and Mesh network technology. The test results show that the scheme can solve the problem of video communication on the shearer, and realize fast roaming function of WiFi network, can effectively ensure the application effect of the mobile terminal, and the average communication throughput of the whole network is about 35 Mbit/s, the minimum communication throughput is about 7 Mbit/s, which can meet most of the communication needs on fully mechanized coal mining face.

收稿日期:2018-05-26;修回日期:2018-09-26;责任编辑:张强。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804304);北京市科技计划智能制造技术创新与培育资助项目(Z171100000817003);中国煤炭科工集团科技创新资助项目(2016MS014)。

作者简介:高思伟(1989—),男,四川绵阳人,助理工程师,硕士,主要研究方向为工业以太网通信,E-mail:gaosw@tdmarco.com。

引用格式:高思伟,李森. WiFi 快速漫游与 Mesh 网络技术在综采工作面的应用研究[J]. 工矿自动化,2019,45(2):35-40.

GAO Siwei, LI Sen. Research on application of fast roaming and Mesh network technology of WiFi communication on fully mechanized coal mining face[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(2): 35-40.

Key words: coal mining; fully mechanized coal mining face; WiFi communication network; video communication of shearer; log-distance path loss model; communication throughput; fast roaming; Mesh network technology

0 引言

煤矿综采工作面由于工况复杂,通信电缆通常需要层层防护,线缆成本非常高;在综采工作面的支架电液控系统中,各种电缆和通信线缆有上千条,对走线空间也有较高的要求,增加了施工难度。特别是像采煤机这种经常处于动作状态的设备,其通信电缆的布设更加困难。目前,采煤机通信通常采用动力载波或者通信光缆,而动力载波方法通信带宽窄,通信光缆经常被折断^[1]。如果采用无线通信则可避免布线难的问题。

目前,井下的工业以太网已经较大面积推广应用,在综采工作面常通过以太网传输视频或者一些控制传感数据。以太网技术在煤矿井下的推广应用也为无线化发展创造了条件。在常用的无线通信方式中,WiFi 因具有综合成本低、安装与设置简单、覆盖范围较广(约 100 m)、传输速度高等优点而被广泛应用。近年来随着通信技术的发展,特别是快速漫游技术、无线网状(Mesh)网络等技术日趋成熟,WiFi 技术的应用范围更广了^[2]。

在煤矿领域,部分煤矿用户和研究机构从 2010 年左右开始探索将 WiFi 技术应用到煤矿井下。在国内,曾研究在煤矿巷道应用 WiFi 技术进行人员定位和安全管理^[3]、无线调度或数据采集^[4],组成无线传感器网络与通信网络实现气体监测、应急通信^[5-6]。在国外,包括 WiFi 在内的多种无线通信技术已经在澳大利亚等国煤矿进行了应用^[7]。

但是,现有的研究重点在于研究 WiFi 技术本身的技术特点和性能,或者是在煤矿巷道等环境下的应用,很少有对于 WiFi 通信在综采工作面特定环境下的应用研究。在工作环境特别恶劣的综采工作面,例如采煤机监控等应用对无线通信有切实的需求^[8];WiFi 在接入煤矿井下有线宽带传输平台、矿用无线摄像机、基站脱网通信、多功能矿井移动通信系统、矿井无线宽带传输等方面相比 WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA 有着明显优势,对于建设现代化矿井通信系统是必不可少的技术^[9]。因此,本文着重从综采工作面工况出发,首先对综采工作面无线信号传输特性进行分析研究,然后提出将 WiFi 快速漫游和 Mesh 网络技术应用到综采工作面,构建适用于综采工作面特殊条件的 WiFi 通信网络优选技术方案。

1 WiFi 信号在综采工作面的传播特性分析

理想情况下,无线信号在无干扰、无障碍物的空间中传播时,接收端的接收功率 $p_r(d)$ 可通过式(1)计算^[10]:

$$p_r(d) = \frac{p_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 \gamma} \quad (1)$$

式中: p_t 为基站发射功率; G_t 为发射端天线增益; G_r 为接收端天线增益; λ 为传输波的波长; d 为发射端与接收端之间的距离; γ 为路径传播损耗指数,该指数与环境相关。

式(1)中除了距离 d 未知外,其他参数皆为已知或可由测量得到,故可以根据式(1)求出距离 d 。

在理想传播条件下,即天线周围为无限大的真空环境,并且没有障碍物,传播损耗计算公式为

$$P(d) = 20\lg(f/\text{MHz}) + 20\lg(d/\text{m}) + 32.4 \quad (2)$$

式中 f 为传输波传输频率。

但是在实际环境中,传输过程中会有更多的损耗产生。

为了更加直观地说明在综采工作面无线信号传输存在巨大的传播损耗,本文设计了如下实验:在综采工作面支架侧布置的 AP(Access Point,无线接入点)端发射功率为 30 dB·m,发射天线增益为 8 dB,通过专用测试设备 AirMagne 测试无线信号强度,测试设备接收天线增益为 5 dB,设备工作在信道 7,中心频率为 2 442 MHz。在工作面支架支护空间内,选取一段相对平坦并且视距范围内无遮挡的区域进行 WiFi 信号强度测试,在接收端距离 AP 端约 23 m 处,接收到的信号强度约为 -62 dB·m。如果无线信号在自由空间中传输,通过式(2)计算可以得出,需要在传输约 1 739 m 之后信号才会衰减到 -62 dB·m。主要测试参数指标对比情况见表 1。

在地面空旷环境下测试时,同样的设备和测试参数,WiFi 信号传输距离能达到 80 m 以上,这也说明在综采工作面 WiFi 信号传输时的损耗要比地面大得多。

无线信号在空间环境中传输时的路径损耗通常能够使用数学模型来表达,常见的几种典型传播模型:线性距离路径损耗模型、对数距离路径损耗模型、衰减因子模型、MK(Motley-Keenan,莫利特·基南)模型^[10]。

表 1 主要测试参数
Table 1 Main experiment parameters

名称	参数值
信号中心频率/MHz	2 442
发射天线增益/dB	8
接收天线增益/dB	5
发射功率/(dB·m)	30
接收信号强度/(dB·m)	−62
工作面传输距离/m	23
自由空间理论距离/m	1 739

通过 AirMagnet 测试得到的综采工作面 WiFi 信号强度分布如图 1 所示。

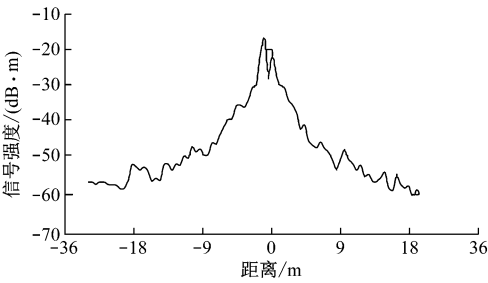


图 1 综采工作面 WiFi 信号强度分布

Fig.1 Distribution of signal strength on fully mechanized coal mining face

从图 1 可以看出,综采工作面 WiFi 无线信号传播特性符合对数距离路径损耗模型,即

$$P|_{dB} = P(d_0) + 10\gamma\lg(d/d_0) \tag{3}$$

式中: $P(d_0)$ 为参考距离 d_0 处的路径传播损耗,可实际测量出; d_0 为参考距离,通常设为 1 m。

WiFi 无线信号接收强度的实测值与理论计算值对比如图 2 所示,理论计算值是根据式(3)在 γ 为 3.5 的情况下计算得到的,工作面实测得到的接收信号强度与理论计算值基本一致。可见,在试验的综采工作面,无线电波的传播基本遵循式(3)的传播模型。

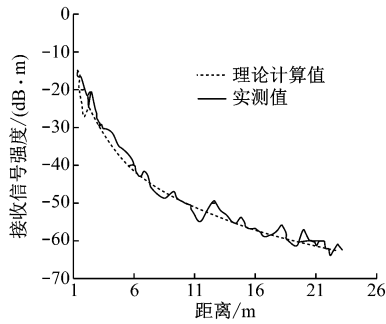


图 2 实测值与理论计算值对比

Fig.2 Comparison between measured value and theoretical calculating value

以上测试说明,综采工作面 WiFi 信号传播损

耗非常大,这严重限制了单个 AP 节点的覆盖范围;除此之外,在综采工作面,影响 WiFi 通信性能的还有以下几个重要的因素:

- (1) 非视距传输:当 AP 端与客户端(Client 端)之间的直射路径被一些障碍物阻挡后,无线电波只能在经过反射、衍射或散射后才能到达接收端。
 - (2) 多径传播:从发射机天线发射的无线电波,沿 2 个或多个路径到达接收机天线的传播现象。
- 以上 2 种信号传播方式均会严重影响 WiFi 信号的传播特性。

如果要增大 AP 无线信号的覆盖范围,通常可以通过增大发射功率和天线增益来实现,天线增益与天线体积成正相关,不能无限制增大。按照 GB 3836.1—2010 标准要求,AP 端作为射频源的最大发射功率为 6 W,即发射功率不得大于 37.8 dB·m。采用对数距离路径损耗模型(式(3))计算,在试验综采工作面,即使 AP 端以国家标准规定的最大发射功率工作,单个 AP 的无线信号只能覆盖工作面约 40 m 的范围,与长达 300 m 的综采工作面相比还有很大差距。并且考虑到工作面倾斜、起伏,支架动作过程中产生的遮挡等,通常需要在综采工作面布置多个 AP 节点才能够达到工作面全覆盖的目标。

2 WiFi 快速漫游与 Mesh 网络技术在综采工作面的应用研究

2.1 快速漫游技术

如果在综采工作面布置多个 AP 节点,那么一个客户端应该被允许在同一 WiFi 网络覆盖范围内自由快速漫游,即当客户端在脱离某 AP 覆盖范围时,它的移动客户端应该在短时间内切换连接到另一个 AP 上去。这种和 AP 间连接的关系转换叫做切换。如果在移动时无法顺利切换或者切换的延时过长,客户端的正常通信,尤其是一些实时性较强的应用,就很有可能受到影响,甚至完全中断。所以,解决切换时延问题对于 WiFi 网络实时通信有着重大的意义,而快速漫游技术正好可以解决这一难题^[11]。

通常 WiFi 环境中无线漫游切换只发生在当前连接的质量变得不可接受时,客户端才会试着去连接其他 AP,这是一个 WiFi 的硬切换过程,这个过程产生的延时通常在秒级,在工业控制中无法接受。

如果在一个无线客户端配置 2 张无线网卡,分别连接信号强度最好的 2 个 AP 端,那么很容易实现零延时漫游切换。而快速漫游技术正是借鉴了这一思路,在客户端一张无线网卡与一个 AP 连接的同时,如果移动的 WiFi 客户端检测到当前 AP 的接

收信号强度降到某一阈值,此时在保持正常通信的同时,移动客户端就会发起了切换过程,做好 AP 切换前的准备,尽量减少切换的延时。

整个漫游切换过程可以分为 3 个阶段:探测、重新鉴权和重新关联。其中探测阶段最花费时间,至少需要 300~500 ms。快速漫游切换的重点就在于如何降低探测过程引起的延时及减少扫描信道时引起的数据丢失^[12]。

漫游切换过程如图 3 所示。在探测阶段,移动客户端通过扫描信道获知周围 AP 的状态信息,扫描信道的范围通常是该频段的所有信道。扫描流程完成之后,如果现有的 AP 已经需要切换,则移动客户端向新的 AP 发送鉴权请求帧,进行鉴权和认证操作;若认证成功,新 AP 端向移动客户端发送鉴权响应帧。之后移动客户端向新 AP 发送重新关联请求帧,并与新 AP 进行信息的交互,例如传输速率、信标、发送间隔时间等。如果新 AP 同意移动客户端的接入,就向移动客户端发送重新关联响应帧,完成整个漫游切换过程。

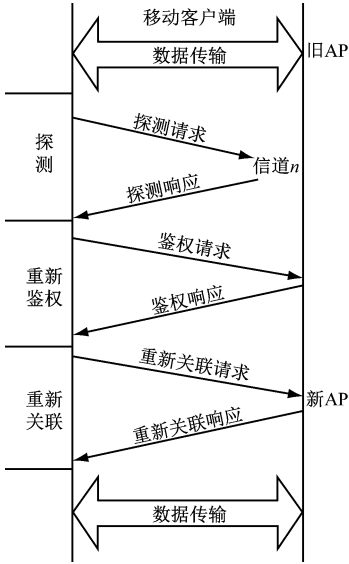


图 3 漫游切换过程

Fig. 3 Romaing switch process

本文中所选用的快速漫游技术对 802. 11 切换方案进行了改进,采用选择性背景扫描和缓存机制,通过降低探测时延提高切换速度,可以将切换延时降到 10 ms 以内。

通过快速漫游技术可以使客户端在整个网络中快速切换,实现无缝接入,将综采工作面 WiFi 通信性能提升到切实可行的程度。

2.2 Mesh 网络技术

由于大多数的综采工作面并没有铺设有线以太网,所以,多个 AP 节点布置时有一些困难:如果采用传统的网线电缆铺设,网线只能传输 100 m,考

虑到从支架内部走线,覆盖的工作面长度约为 50 m;并且 100 m 的矿用通信电缆制作和铺设成本非常高。如果采用光缆,通信距离有余,但是容易折断。所以,本文采用 Mesh 网络技术,Mesh 网络采用多跳方式进行通信,可以使通信网络中的所有设备互相通信。这种网络结构最大的好处就是,当距离通信网关近的无线节点发生数据拥塞时,无线节点可以重新查找一条流量更少的链路进行数据传输^[13]。Mesh 网络新增节点时的工作模式如图 4 所示,Mesh 网络中一个节点故障时的工作模式如图 5 所示。

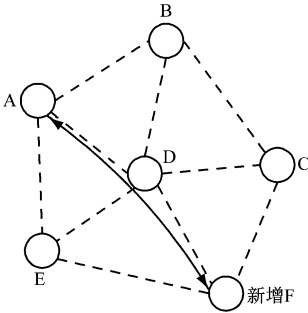


图 4 Mesh 网络新增节点时的工作模式

Fig. 4 Working mode when new node is added to

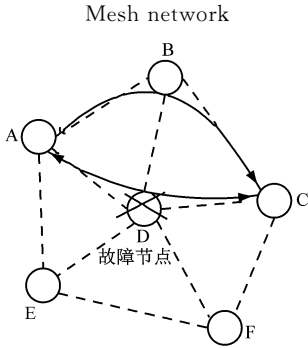


图 5 Mesh 网络中节点故障时的工作模式

Fig. 5 Working mode when node fails in Mesh network

Mesh 网络具有非常强的灵活性,节点间可以不通过网线连接,在工况复杂的综采工作面具有良好的适应性。但是由于综采工作面狭长的空间特征,采用的 Mesh 网络拓扑结构通常比较单一,不能充分发挥 Mesh 网络的优势。

通过 Mesh 网络技术,可以在工作面灵活配置 AP 节点,只要电缆所至的地方,都可以配置 AP 节点;根据工作面地形和其他设备的布置情况,可以灵活调节 AP 节点的布置数量、节点之间的通信距离;工作面所有的 AP 节点通过有线或者无线的方式组成一个通信网络。

2.3 WiFi 通信网络优选技术方案设计

将快速漫游和 Mesh 网络 2 项关键技术结合起来可构成综采工作面全覆盖的 WiFi 通信网络。应用这 2 项技术,结合综采工作面环境特点,设计了

2 种 WiFi 通信网络优选技术方案:

(1) 方案 1:在缺少有线网络的综采工作面,通过 Mesh 网络实现多 AP 之间的互相连接与通信,常用的拓扑结构如图 6 所示。

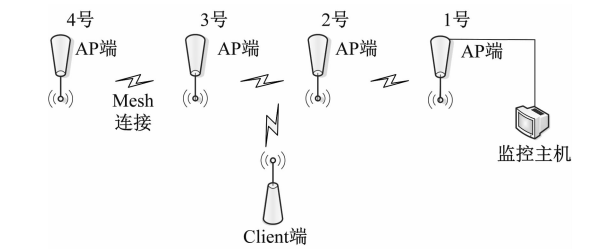


图 6 综采工作面常用的 WiFi 网络拓扑结构(方案 1)
Fig. 6 Common WiFi network topology on fully mechanized coal mining face(scheme 1)

(2) 方案 2:在已经铺设有线网络的工作面,Mesh 网络则可以作为有线通信网络的延伸,同时起到系统冗余备份的作用,提高整个网络拓扑的可靠性。布置方案如图 7 所示。

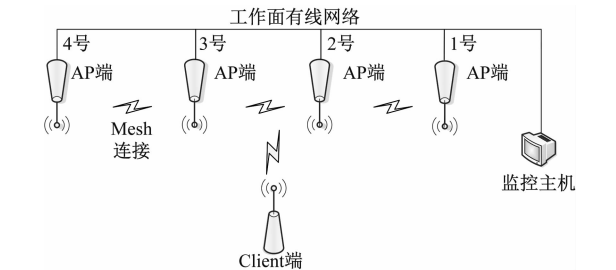


图 7 综采工作面常用的 WiFi 网络拓扑结构(方案 2)
Fig. 7 Common WiFi network topology on fully mechanized coal mining face(scheme 2)

对比方案 1 和方案 2 可知,方案 1 的优点是简单灵活,缺点是由于 WiFi 的 AP 节点之间的 Mesh 连接必然会占用一部分通信带宽,所以,与 Client 端的通信带宽会受到影响;方案 2 的优点是整个网络拓扑设计有冗余,可靠性高,通信带宽高,缺点是系统较为复杂。对于自动化程度较高的综采工作面,有线的以太网通信已渐渐成为常规配置,WiFi 通信更多的是作为一个补充,用来解决一些难以铺设通信线缆的特殊应用,例如采煤机系统的通信,所以,实际应用时建议优先选择方案 2。

3 方案的实施与测试分析

在综采工作面布置的 WiFi 终端通常有 2 种形式:固定设备(如固定的无线摄像机、传感器等)和移动设备(防爆平板、WiFi 手机等)。其中保证移动设备在 WiFi 网络中成功应用的难度远大于固定设备应用,移动设备中又以采煤机设备的应用环境最为恶劣。本文所设计的通信方案以解决采煤机采煤过程中 WiFi 通信问题为目标。

在选取的试验综采工作面,由于已经布置有百兆以太网,所以,按照方案 2 布置了整个测试系统。工作面共有 160 架支架,在 18,48,78,108,138 架支架上布置 AP 端 WiFi 基站,在采煤机机身上布置 1 个 Client 端 WiFi 基站,同时将 1 组高清摄像机连接到采煤机身上的 Client 端。测试系统连接如图 8 所示。

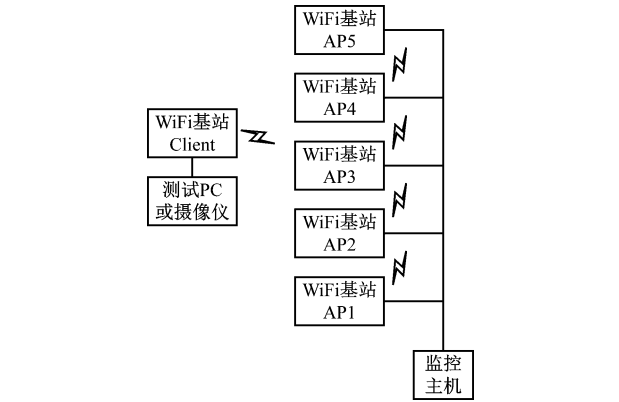


图 8 测试系统连接
Fig. 8 Experiment system connection

在该测试系统下进行了 2 项测试:

(1) 在采煤过程中,通过监控主机观察采煤机身上的视频摄像机拍摄的画面是否连续。

(2) Client 端的视频摄像机换为一台便携式计算机,通过 IxChariot 工具测试 WiFi 通信吞吐量。

通过测试(1)可以清晰看到视频画面,并且无任何卡顿。从 Client 端连接的 AP 端 MAC 地址可以清楚看到采煤机运动过程中 Client 与 AP 的连接在不同的几个基站之间切换。由此可知,Client 端漫游切换时的延时小于人眼能够识别出的 40 ms。

在测试(2)整个过程中,Client 端从工作面机尾 160 架支架位置移动到机头处,耗时约 5 min,通信吞吐量部分测试结果如图 9 所示。

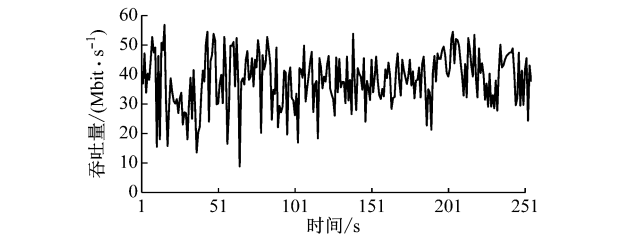


图 9 通信吞吐量测试结果
Fig. 9 Test result of communication throughput

从图 9 可以看出,采煤机身上的 Client 端到支架侧的 AP 端的通信吞吐量平均在 35 Mbit/s 左右,最小处约为 7 Mbit/s,吞吐量减小的原因是系统中 WiFi 设备为保证漫游切换过程中的通信效果,采用了缓存机制,使得有效通信带宽减小。

通过以上 2 项测试可以看出,在工作面的 WiFi

网络中,实现了快速漫游功能,可以有效保证移动终端的应用效果;并且整个网络的有效通信带宽达到了 7 Mbit/s,能够满足大多数的应用需求,如视频信号传输、监控数据传输等。

4 结论

(1) 通过对 WiFi 信号在综采工作面环境下传播的理论分析与实际测试,证明在综采工作面中,WiFi 信号的传播受环境影响较大,尤其是信号覆盖范围明显减小;在综采工作面 WiFi 无线信号传播符合对数距离路径损耗模型。

(2) 根据实际工况,采用快速漫游和 Mesh 网络技术设计了灵活的工作面全覆盖的 WiFi 通信网络优选技术方案。试验结果证明,该方案能够适应工作面特殊的环境,通信吞吐量最低达到 7 Mbit/s,具有较好的应用效果。

(3) 要进一步提升 WiFi 通信在综采工作面的应用效果,一方面需要对无线信号在综采工作面传播的模型进行大量的试验验证,建立可靠的数学模型,用来指导拓扑结构的设计和 WiFi 站点的布置;另一方面还需要对 Mesh 网络、MIMO(多输入多输出)技术等进行深入的研究,选用合适的技术和产品,提高井下 WiFi 产品的性能。

参考文献(References):

[1] 梁占泽. WiFi 无线技术在采煤机数据传输中的应用[J]. 陕西煤炭, 2017, 36(5): 105-107.
LIANG Zhanze. Application of WiFi wireless technology in data transmission of shearer [J]. Shaanxi Coal, 2017, 36(5): 105-107.

[2] 刘伟. 基于 WiFi 无线通信系统在高速铁路中的应用[J]. 通讯世界, 2017(9): 127-128.
LIU Wei. Application of wireless communication system based on WiFi in the high speed railway[J]. Telecom World, 2017(9): 127-128.

[3] 胡瑞. 基于 WiFi 的井下移动智能信息系统研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012: 1-72.

[4] 王军, 顾义东, 曾苛, 等. WiFi 通信技术在煤矿信息化中的应用分析[J]. 工矿自动化, 2017, 43(7): 90-93.
WANG Jun, GU Yidong, ZENG Ke, et al. Application analysis of WiFi communication

technology in coal mine information[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(7): 90-93.

[5] SONG Wen, WANG Fei, DAI Jianbo, et al. A emergency communication system based on WMN in underground mine [C]//International Conference on Commuter Application and System Modeling, 2010: 624-627.

[6] PAN Tao, LIU Xiaoyang. Hybrid wireless communication system using ZigBee and WiFi technology in the coal mine tunnels [C]//Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2011: 340-343.

[7] PRASANT M, SALIL K, DIETHELM O, et al. Safety assurance and rescue communication systems in high-stress environments: a mining case study[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(4): 66-67.

[8] 姜俊英, 马宏伟. 采煤机监控技术研究现状与发展趋势[J]. 煤矿机械, 2015, 36(8): 1-3.
JIANG Junying, MA Hongwei. Research and development trends of shearer monitoring and control technology[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(8): 1-3.

[9] 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.

[10] 潘立波. 基于 WiFi 技术的无线定位算法研究与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 1-78.

[11] 徐茜亮, 王维. 基于 WiFi 的漫游切换无缝接入技术研究[J]. 工矿自动化, 2011, 37(3): 6-8.
XU Xiliang, WANG Wei. Research of technology of seamless access in roaming handoff based on WiFi [J]. Industry and Mine Automation, 2011, 37(3): 6-8.

[12] 滕劲, 徐昌庆. WiFi 中多 AP 间快速切换的研究与实现[J]. 通信技术, 2009, 42(11): 121-123.
TENG Jin, XU Changqing. Study and implementation of fast inter-AP handoffs in WiFi WLAN [J]. Communication Technology, 2009, 42(11): 121-123.

[13] 唐国琦. 无线 Mesh 网络在智能电网中的应用研究[D]: 北京: 北京邮电大学, 2016: 1-55.