

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.03.017

## 综采工作面机电装备无线 Mesh 通信方法

周 信, 王忠宾, 谭 超, 刘新华, 季 瑞

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:**针对现有通信方式不能很好地适应综采工作面机电设备动态移动的问题,提出了一种基于无线 Mesh 网络的综采工作面机电装备通信方法。为了提高 Mesh 网络带宽资源的利用率,提出了基于双天线和干扰感知的动态信道分配方法;设计了高吞吐率路由协议和多径路由控制协议,对无线 Mesh 网络链路质量进行管理;对影响 Mesh 网络信号强度的因素进行分析,研究适用于综采工作面的无线网络节点部署方法;对无线 Mesh 网络在综采工作面的通信效果进行实验,结果显示,无线 Mesh 网络的信号强度范围为 $-41\sim-68$  dBm,数据传输速率为大于等于 12 Mbps。结果表明,无线 Mesh 网络能够满足综采工作面机电装备的通信需求,为综采工作面机电装备的通信提供了一种新思路。

**关键词:**无线 Mesh; 多信道; 吞吐率; 信号强度

**中图分类号:** TN929.4; TD421.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2014)03-108-07

## Communication method for electromechanical equipment on fully mechanized face with wireless mesh network

ZHOU Xin, WANG Zhongbin, TAN Chao, LIU Xinhua, JI Rui

(School of Mechanical Engineering, China University of Mining and Technology, XuZhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the pre-existing communication condition can't satisfy the dynamic movement of the electric & mechanical equipment on fully mechanized face, a wireless communication method based on mesh network is proposed. The design of the dual antenna and the dynamic distribution method of channels based on the interference perception which make the limited bandwidth sources can be rationally used. A high throughput routing protocol and a multipath routing control are used for the efficient management of the wireless mesh network. The factors which affect the signal strength are analyzed to research the deployment method of the wireless network adapt to the fully mechanized face. Experiments are carried out and the result shows that the signal strength of the wireless mesh network is  $-41\sim-68$  dBm and the data transfer rate is above or equal 12 Mbps. Thus, the mesh network can satisfy the requirement of the electric & mechanical equipment and the method is a new way to solve the communication problem on fully mechanized face.

**Key words:** wireless mesh; multichannel; throughput; signal strength

收稿日期:2013-10-28

基金项目:国家高科技研究发展计划(863)重点资助项目(2013AA06A411);国家自然科学基金资助项目(51005231);江苏省青蓝工程资助项目

作者简介:周信(1987-),男,中国矿业大学博士研究生,研究方向为装备集成及其自动化,(E-mail)cumtzhouxin@163.com。

煤炭是中国重要的基础能源,工业经济的快速发展对煤炭的需求不断扩大,煤炭产量的快速增加加剧了产量需求与安全生产之间的矛盾,国家“十二五”规划提出煤矿生产应朝着自动化和少人化方向发展<sup>[1]</sup>,而煤矿生产自动化和少人化的实现需要可靠的通信平台支持<sup>[2-3]</sup>。

目前,煤矿主要通过电力载波通信并基于传统的无线局域网来实现综采机电装备工作状态的监控,但由于煤矿井下的数据传输量大、实时性要求高、环境复杂多变等特点,使得现有方法不能满足煤矿生产的使用要求<sup>[4-5]</sup>。此外,随着综采自动化的不断发展,各机电装备之间的数据实时交互需求日益明显。因此,亟需设计新的通信方式用于综采工作面各机电装备之间的数据交互和状态监控。

将无线网络用作综采工作面机电装备之间的通信平台是一种有益的尝试。但是,直接将传统的无线网络用于综采工作面时存在以下问题:1)综采工作面空间狭小、金属装备多、且生产时粉尘大,数据传输效果差;2)数据的实时传输能力有限,特别是在煤矿井下的复杂环境中,大量数据的实时传输更加显得困难;3)传统无线网络的点对点传输特性,决定了只要网络中有一个节点出现故障,则整个无线网络不能正常工作<sup>[6-7]</sup>。

针对上述问题,笔者采用基于 Mesh 的无线网络通信方法构建综采工作面通信平台。通过设置多信道和双天线,合理利用有限的带宽资源,增加网络容量,满足大量数据的实时传输需求;采用多径路由协议使得无线 Mesh 网络中的任意两个节点之间可以建立多条通信链路,并能够根据实际情况选择最优路径进行数据传输;自组织路由协议的应用使得无线 Mesh 网络能够适应综采工作面设备的动态变化;对影响综采工作面无线 Mesh 网络性能的因素进行分析,合理布置 Mesh 网络节点,使其达到较为理想的通信效果。

## 1 基于 Mesh 技术的双天线传输方法

### 1.1 Mesh 技术的原理

无线 Mesh 网络主要由多个 Mesh 节点组成,节点与节点之间通过无线链路进行通信,并通过终端节点接入有线网络。与传统无线网络相比,无线 Mesh 网络扩展了帧格式定义,增加了多跳 Action 管理帧<sup>[8]</sup>。增加的 Action 帧格式如表 1 所示。

表 1 多跳 Action 帧格式

帧顺序	信息类别
1	Mesh 头文件信息
2	操作类别信息
...	一个或多个自定义信息,位于最后

Mesh 节点通过 Mesh 网络配置文件接入无线网络,Mesh 网络配置文件主要由 Mesh 标志、Mesh 网络路径协议标志和 Mesh 网络路径开销标志组成。

Mesh 节点通过发送 Probe Request 帧或者侦听 Beacon 帧收集邻居节点信息,Probe Request 帧和 Beacon 帧中包含 Mesh ID 号、Mesh 配置等信息。Mesh 节点从接收到的 Beacon 帧中解析出发射端 Mesh 节点的网络配置文件信息并与自身的网络配置文件信息进行匹配,当网络配置文件信息相匹配时,双方建立通信。

### 1.2 双天线数据传输

无线 Mesh 网络中,数据分解成数据包后经过天线向外发送,对于单天线通信,天线同时作为发送和接收节点,数据的发送和接收不能同时进行,这就导致了多节点数据传输过程中出现带宽衰减现象<sup>[9]</sup>。单天线出现带宽衰减现象的原因如下。

设节点 1 向节点 5 传送 3 个数据包,且:

$$T_1 - T_0 = T_2 - T_1 = T_3 - T_2 = T_4 - T_3 = \Delta t。$$

其中, $\Delta t$  为任意两个节点之间传送一个数据包所需时间,则有时间-动作如表 2 所示。

表 2 单天线无线数据传输时间-动作

时间	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5
$T_0$	发送数据包 1	接收数据包 1			
$T_1$		发送数据包 1	接收数据包 1		
$T_2$	发送数据包 2	接收数据包 2	发送数据包 1	接收数据包 1	
$T_3$		发送数据包 2	接收数据包 2	发送数据包 1	接收数据包 1
$T_4$	发送数据包 3	接收数据包 3	发送数据包 2	接收数据包 2	
$T_5$		发送数据包 3	接收数据包 3	发送数据包 2	接收数据包 2
$T_6$			发送数据包 3	接收数据包 3	
$T_7$				发送数据包 3	接收数据包 3

由表 2 可知,节点 1 以  $\Delta t/\text{packet}$  速率向节点 5 传送 3 个数据包需要时间为  $7\Delta t$ ,数据包传输途中各个节点的带宽利用率分别为:37.5%、75%、75%、75%、37.5%,带宽利用率为 37.5% 的节点为网络中的传输瓶颈,浪费了有限的带宽资源。

而采用双天线可有效避免带宽衰减问题。双天线配置允许同一无线网络节点通过其中一根天线发送数据,通过另外一根天线接收数据,采用双天线配置方法完成多节点之间的数据传输时间-动作如表 3 所示。

表 3 双天线无线数据传输时间-动作

时间	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5
$T_0$	发送数据包 1	接收数据包 1			
$T_1$	发送数据包 2	发送数据包 1 接收数据包 2	接收数据包 1		
$T_2$	发送数据包 3	发送数据包 2 接收数据包 3	发送数据包 1 接收数据包 2	接收数据包 1	
$T_3$		发送数据包 3	发送数据包 2 接收数据包 3	发送数据包 1 接收数据包 2	接收数据包 1
$T_4$			发送数据包 3	发送数据包 2 接收数据包 3	接收数据包 2
$T_5$				发送数据包 3	接收数据包 3

由表 3 可知,节点 1 以  $\Delta t/\text{packet}$  速率向节点 5 传送 3 个数据包需要时间为  $5\Delta t$ ,数据包传输途中各个节点的带宽利用率分别为:50%、66.7%、66.7%、66.7%、50%,采用双天线通信方式可以减少数据传输时间,提高网络可用带宽的瓶颈值,且传输任务越多,带宽利用率越高。

1.3 信道分配与干扰抑制

双天线收发机制的实现需要为不同天线在同一频段下分配不同的信道,笔者使用了一种基于干扰感知的动态信道分配方法<sup>[10]</sup>。无线 Mesh 网络中的每个 Mesh 节点通过这种感知方法对其和相邻节点之间的干扰程度进行测量,根据测量结果选择合适的通信信道。多信道条件下的信号干扰模型如图 1 所示。

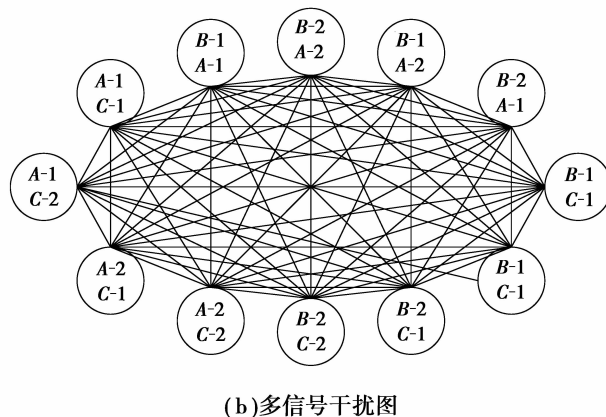
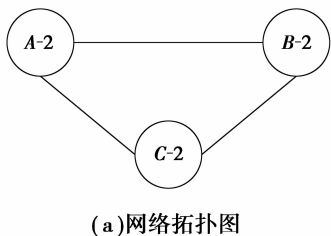


图 1 多信道干扰模型

图 1(a)中,A,B,C 为两两相邻的 3 个节点,每个节点配置两根天线,当图 1(a)中两节点之间对应的边可能发生干扰时,则在图 1(b)中的两点之间以 1 条线连接,图 1(b)中的节点为图 1(a)中的链路,图 1(b)中的连线为对链路的干扰。

在多信道干扰模型基础上,对信道进行分配。在分配信道时,主要考虑的因素为信道使用程度和信道干扰程度<sup>[11]</sup>。Mesh 网络中的每个节点周期性地检测所有的信道,得出结果后按照一定的规则对这两个因素进行计算,并将计算结果发送至信道分



(a)网络拓扑图

配服务器。信道分配服务器按照公式 1 对每个信道的当前状态进行计算:

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Rank}_i^c}{n} \quad (1)$$

式中: $n$  为网络中 mesh 节点的个数; $\text{Rank}_i^c$  为节点  $i$  对信道  $c$  的干扰估计,根据计算结果,选择  $R_c$  值最小的信道为当前节点  $i$  使用的信道。本方法从全局网络范围内考虑了干扰对多信道信号传输的影响,能够在不同干扰条件下提高无线 Mesh 网络的通信质量。

## 2 无线 Mesh 网络链路管理

### 2.1 自组织网络路由协议

综采设备随着工作面的推进处于动态运行状态,无线 Mesh 节点也因此处于动态变化状态,对于每个节点和相邻节点的无线链路而言,其链路通信质量也在不断发生变化。为了适应井下 Mesh 节点的动态变化,解决通过程中处于变化状态的无线链路不稳定问题,采用高吞吐率路由协议来降低变化链路的丢包率,解决由链路失效导致的数据包丢失问题等<sup>[12]</sup>。高吞吐率路由协议采取了传输功率控制、连续尝试、忽略链路失效等技术对路由协议进行优化,减少了链路临时变化对数据传输的影响。在路径判据的使用方面,高吞吐率路由协议采用了数据包成功传送至邻居节点的时间(ETT)作为判据,ETT 的计算方法如下:

$$\text{ETT} = \frac{1}{P_{\text{ack}} r_i} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{ack}}$  为由于探测帧丢失所引起的确认字符在反向链路上的发送概率; $r_i$  为不同速率的前向发送数据是预期的广播包的吞吐量。

移动自组织网络路由协议将链路质量作为网络质量的主要判据,链路质量的评价指标为延时判据和信道差异判据。设某一链路的加权累计传输时间为  $\text{WCETT}_{\text{delay\_time}}$ ,则有:

$$\text{WCETT}_{\text{delay\_time}} = \sum_{i=1}^n \text{ETT}_i \quad (3)$$

式中: $\text{ETT}_i$  为第  $i$  跳路径的传输时间期望值; $n$  为该链路上的跳数。

设数据包在第  $j$  个信道上传输的时间累计为  $T_j$ ,则:

$$T_j = \sum_{\text{channel}_j} \text{ETT}_i \quad (4)$$

数据通过不同信道进行传输时,数据累计传输时间最长的信道成为传输的瓶颈,某一条路径上使用的信道较多时,信道差异较大,传输时间

较少:

$$\text{WCETT}_{\text{channel\_dif}} = \min_{1 \leq j \leq k} T_j \quad (5)$$

综合延时判据和信道差异判据,得出一种基于加权方法的路由选择标准:

$$\text{WCETT} = \alpha \text{WCETT}_{\text{channel\_dif}} + (1 - \alpha) \text{WCETT}_{\text{delay\_time}} \quad (6)$$

式中  $\alpha$  为权重因子,调节信道差异判据和延时判据在决定路由选择标准中的比重大小。

### 2.2 多径路由控制协议

综采工作面无线 Mesh 节点的位置随着机电装备位置的变化不断发生变化,无线链路质量也随之变化,变化过程中不断有链路失效和建立新的链路。如果数据都依赖某单一链路进行传输,则可能导致该条链路负载过重,从而导致丢包等问题。因此,无线 Mesh 网络通过多路径对数据进行传输。多径路由控制协议的主要组成部分包括路径发现及其维护和通信负载平衡控制两个方面<sup>[13]</sup>。

设无线 Mesh 网络中两条通信链路分别为  $R_a$ 、 $R_b$ ,负载按照一定的比例  $a:b$  分配在不同的链路上,则定义不同链路之间的干扰指数可表示为

$$\epsilon(a, b) = \max_{1 \leq j \leq \min\{m_a, m_b\}} T_j(a, b), \quad (7)$$

其中

$$T_j(a, b) = \frac{at_{aj} + bt_{bj}}{a + b}, j \in \text{SR}(P_a) \cup \text{SR}(P_b) \quad (8)$$

式中: $t_{kj}$  为同一链路上使用信道  $j$  传输数据的累计时间; $\text{SR}(P)$  表示路径  $P$  上的信道集合。干扰指数即为信道使用的平均累计时间, $\epsilon$  表示了某一信道的繁忙程度, $\epsilon$  值越大,说明其越容易受到干扰。

考虑到无线 Mesh 网络中的负载分配需求,按照 WCETT 方法对两条链路中的独立链路权重进行计算得出:

$$\delta(a, b) = \frac{a \text{WCETT}(P_a) + b \text{WCETT}(P_b)}{a + b} \quad (9)$$

综上,对于无线 Mesh 网络的多径路由判据 CAM 计算如下:

$$\text{CAM} = \beta \epsilon + (1 - \beta) \delta \quad (10)$$

实际使用过程中应根据不同的无线链路负载分布情况,合理计算多径路由判据,以实现较好的网络通信性能。

## 3 无线 Mesh 网络性能影响因素分析

### 3.1 节点安装距离

无线 Mesh 节点安装在综采工作面采煤机机身

和液压支架上,综采工作面空间狭小,电磁波传输过程中,会遇到各种各样的反射界面,实际应用中,无线 Mesh 节点接收到的信号往往不是由信号源直接发射出来的信号,是若干经过一次或几次反射后信号的叠加。下面以最简单的两径传播模型为例,分析煤矿井下综采工作面电磁波传播过程中的反射效应。

如图 2 所示, A、B 为处于同一通信范围内的两个无线节点设备。

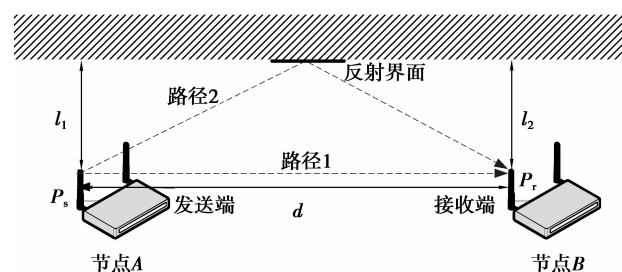


图 2 综采工作面无线传输两径传播模型

节点 A 以发射功率  $P_s$  向节点 B 发射电磁波,一部分电磁波直接发射到节点 B,还有一部分电磁波经过一次反射发送至节点 B,设节点 B 天线的信号接收功率为  $P_r$ ,则有

$$P_r = 4P_s \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \sin^2 \left( \frac{2\pi l_1 l_2}{\lambda d} \right) \quad (11)$$

式中:  $\lambda$  为电磁波波长;  $d$  为两天线之间的距离;  $l_1$ 、 $l_2$  分别为两天线到反射截面所在平面的垂直距离。由公式可知,无线信号的信号强度与距离的平方成反比关系,距离越远,信号衰减越大。

### 3.2 动态过程中的无线信号传输

综采工作面运行过程中,两相邻交换机之间的直射波会被障碍物阻挡,如采煤机、支架立柱、支架护帮等。障碍物的存在引起无线传输过程中的绕射损耗<sup>[14]</sup>。用绕射参数  $v$  表征无线传输过程中的绕射损耗,则有

$$v = r \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (12)$$

式中:  $r$  为障碍物顶点距离直射波所在直线距离,称为菲涅尔余隙;  $d_1$  为发射端距离障碍物顶点所在直线的垂直距离;  $d_2$  为接收端距离障碍物顶点所在直线的垂直距离。由式(12)可知,当障碍物与无线接收端之间的距离  $d_2$  趋向于无限小时,发射端与接收端之间的无线传输绕射损耗接近无穷大,接收端接收不到来自发射端的信号。

综采工作面中的常见场景,如图 3 所示。

图 3(a)中,两相邻无线节点之间的菲涅尔半径

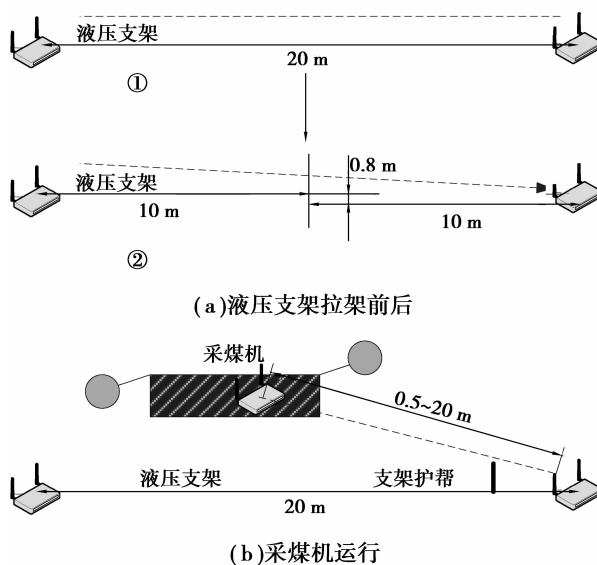


图 3 常见工作面工作场景

$R_i$  可由式(13)计算:

$$R_i = 17.3 \sqrt{\frac{d}{4f}} \quad (13)$$

式中:  $d$  为发射端和接收端到障碍物中心的距离,  $f$  为天线频率,计算图 3(a)场景中菲涅尔半径  $R_i$  得:

$$R_1 = 17.3 \sqrt{\frac{d}{4f}} \approx 17.7 \text{ m}.$$

同理,计算图 3(b)场景中的菲涅尔半径  $R_2$  得:

$$R_2 \approx 3.9 \sim 25.0 \text{ m}.$$

当  $r/R_i > 0.5$  时,绕射附加损耗为 0,障碍物对直射波基本上没有影响;当  $r/R_i = 0$  时,绕射附加损耗为 6 dB;当  $r/R_i = 0$  时,绕射附加损耗随  $R_i$  的减小而急剧增大。图 3(a)中,液压支架拉架后,前后支架产生错架,支架位置越靠近无线接收端,其菲涅尔余隙越小,对无线交换机的接收性能影响越大。图 3(b)中,工作面机电装备运行时,如果安装有无线交换机的支架没有收到位,则会在无线 Mesh 节点之间形成障碍,这样形成的菲涅尔余隙值很小,将导致采煤机机载无线交换机与支架无线交换机之间的通信受阻。因此,在综采工作面部署无线 Mesh 节点时,应尽量使无线 Mesh 节点处于自由空间位置,远离综采工作面各种机电设备,减少绕射附加损耗。

## 4 现场实验

### 4.1 无线 Mesh 网络信号强度

以无线 Mesh 网络在中平能化集团平煤股份六矿 22210 综采工作面的应用为例,验证笔者所提出方法的有效性。22210 综采工作面全长 190 m,在此

长度范围内均匀布置 12 台无线网络交换机,其部署情况如图 4 所示。

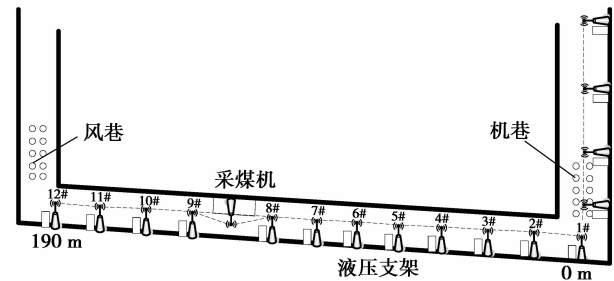


图 4 22210 综采工作面无线 Mesh 网络部署

基于 Linux 系统开发了综采工作面无线 Mesh 网络管理平台,对无线 Mesh 网络节点进行集中管理,对无线网络资源进行统一调配,并对无线 Mesh 网络运行状态进行实时监控,无线 Mesh 网络管理平台显示主界面如图 5 所示。

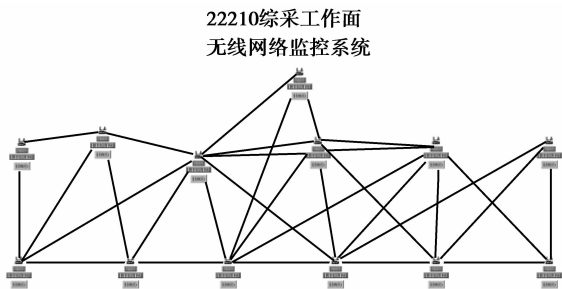


图 5 22210 综采工作面无线 Mesh 网络运行情况

由图 5 可知,无线 Mesh 网络中的 Mesh 节点能够与多个相邻节点之间建立通信连接,采煤机、运输系统通过无线 Mesh 网络加入煤矿井下主干网,移动节点在运行过程中,不断与已经建立连接的 Mesh 节点断开,并与新的 Mesh 节点建立连接,实现煤矿井下机电装备通信网络的无缝覆盖。

根据无线 Mesh 网络管理平台信息终端数据统计结果,综采工作面无线 Mesh 网络运行时各个节点接收到的信号强度如图 6 所示。

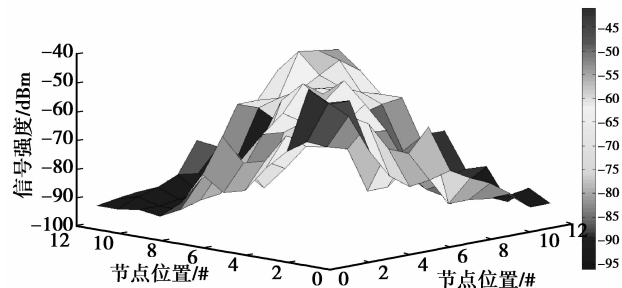


图 6 综采工作面无线 Mesh 网络信号强度分布图

图 6 高亮部分为无线 Mesh 网络有效通信区域,有效通信区域内的信号强度保持在  $-41 \sim -68$  dBm 范围内,信号强度能够满足全双工数据通信要求。由图 6 还可看出,节点 4 和节点 8、9 为当前无线 Mesh 网络的薄弱节点,应适当调整节点位置和天线方向,改善通信效果,提高整个网络的运行效率。

#### 4.2 无线 Mesh 网络传输速率

为了实现综采工作面机电装备的可视化管理与操作,在综采工作面上安装 9 路网络视频,采煤机数据、运输系统数据、网络视频数据通过无线 Mesh 网络与顺槽控制中心及地面控制中心进行实时交互。根据实时监控要求,各个子系统数据的传输速率要求如表 4 所示:

表 4 子系统数据传输速率要求

监控对象	数据传输速率
采煤机子系统	$\geq 2$ kbps
运输子系统	$\geq 4.5$ kbps
网络视频监控子系统	$\geq 2.25$ Mbps
总计	$\geq 2.26$ Mbps

根据无线 Mesh 网络管理平台信息终端数据统计结果,综采工作面无线 Mesh 网络运行时各个节点数据传输速率如图 7 所示。

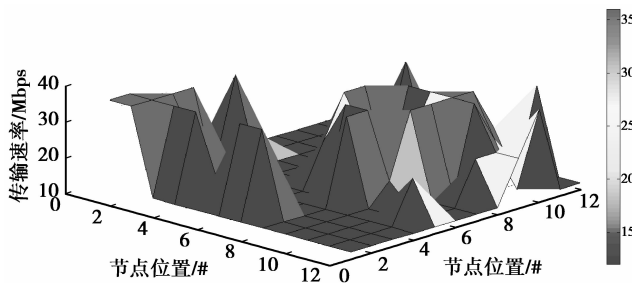


图 7 无线 Mesh 网络传输速率分布图(单位:Mbps)

由图 7 可知,无线 Mesh 网络通信区域内数据传输速率  $\geq 12$  Mbps  $> 2.26$  Mbps,能够满足综采工作面大量数据的实时传输需求。

## 5 结论

针对当前综采工作面通信中存在的问题,提出了将无线 Mesh 网络应用于综采工作面通信中来,并获得以下结论:

1) 设计了基于双天线和干扰感知的动态信道分配方法,有效利用了 Mesh 网络带宽资源,数据传输速率保持在 12 Mbps 及以上。

2) 采用高吞吐率路由协议和多径路由控制协议对无线网络链路进行管理,使网络具备自组织能力和数据包多径传输能力。

3) 分析了节点安装距离和菲涅尔余隙对综采工作面无线 Mesh 网络的影响,相邻 Mesh 节点之间的距离应小于 25 m,并尽量安装在自由空间位置。

4) 综采工作面中的 Mesh 节点能够与多个相邻节点建立通信,信号强度范围为  $-41 \sim -68$  dBm,能够满足大量数据信号的实时传输要求。

#### 参考文献:

- [1] 张世洪. 我国综采采煤机技术的创新研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1898-1902.  
ZHANG Shihong. Study on the innovation of fully mechanized coal shearer technology in China [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1898-1902.
- [2] 孙继平, 宋秋爽, 王国法. 高效综合机械化采煤成套装备技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [3] Wang G F, REN H W. New development of sets equipment technologies for coal mine long-wall face in China [J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2012, 3(18), 1-9.
- [4] Hu S Y. Present situation and developing trend of coal mine automation and communication technology [J]. Journal of Coal Science and Engineering(China), 2008, 14(3): 489-491.
- [5] Hargrave C O, Ralston J C, Hainsworth D W. Optimizing wireless LAN for longwall coal mine automation [J]. IEEE Transactions on industry applications, 2007, 43(2): 111-117.
- [6] 牛晓光, 崔莉, 黄长城. 移动自组织网络中基于优化分簇的混合路由协议[J]. 通信学报, 2010, 31(10): 58-67.  
NIU Xiaoguang, CUI Li, HUANG Changcheng. Hybrid optimal cluster routing protocol for mobile ad hoc network [J]. Journal on Communication, 2010, 31(10): 58-67.
- [7] 胡致远, 郭建丁, 王景, 等. 多接口无线 mesh 网络的信道时空分配[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(2): 26-31.  
HU Zhiyuan, GUO Jianding, WANG Jing, et al. Spatio-temporal channel assignment in multi-radio wireless mesh networks [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(2): 26-31.
- [8] Hossain E, Leung K K. 无线 mesh 网络架构与协议[M]. 易燕, 李强, 刘波, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009: 55-67.
- [9] 王健康, 杨彦从, 郝建军, 等. 地下巷道中无线通信空时编码的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 332-336.  
WANG Jiankang, YANG Yancong, HAO Jianjun, et al. Space-time coding in tunnels [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(3): 332-336.
- [10] Ramachandran K N, Belding E M, Almeroth K C, et al. Interference-aware channel assignment in multi-radio wireless mesh networks[C/OL] // Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications, 2006 [2013-10-07]. [http://scholar.google.com/scholar?q=Interference-aware+channel+assignment+in+multi-radio+wireless+mesh+networks&btnG=&hl=zh-CN&as\\_sdt=0%2C5](http://scholar.google.com/scholar?q=Interference-aware+channel+assignment+in+multi-radio+wireless+mesh+networks&btnG=&hl=zh-CN&as_sdt=0%2C5).
- [11] 崔勇, 张鹏, 吴建平. 无线移动互联网原理、技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 192-196.
- [12] Aguayo D, Bicket J, Morris R. SrcRR: a high throughput routing protocol for 802.11 mesh networks (DRAFT) [EB/OL]. [2012-10-07] <http://pdos.csail.mit.edu/~rtm/srcrr-draft.pdf>.
- [13] Draves R, Padhye J, Zill B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh network[C] // Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2004: 114-128.
- [14] 舒坚, 刘琳岚, 樊佑磊, 等. 无感知分组丢失下的无线传感器网络链路质量评估模型[J]. 通信学报, 2011, 32(4): 103-111.  
SHU Jian, LIU Linlan, FAN Youlei, et al. Link quality estimation model for wireless sensor networks under non-perceived packet loss [J]. Journal on Communication, 2011, 32(4): 103-111.

(编辑 郑洁)