

文章编号:1671-251X(2020)10-0099-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17667

煤矿井下超宽带信号路径损耗测量与分析

窦学丽, 牛永刚, 殷鹏, 李京生, 栾良良, 蓝祥

(北京永安信通科技有限公司, 北京 100089)



扫码移动阅读

摘要:针对目前高精度超宽带(UWB)信号井下路径损耗特征研究多采用理论建模与仿真实验手段,对井下 UWB 信号的实际测量研究较少的问题,选取在矿井中巷道尺寸、巷道墙壁材质、管道设施等环境条件比较普遍的架空乘人装置(猴车)运行巷道及环境恶劣、煤尘浓度高、地面积水严重的掘进工作面 2 个典型场景对 UWB 信号进行路径损耗测量与分析。结果表明:① 2 种巷道环境内的 UWB 信号路径损耗指数均小于 2,巷道的波导效应导致了 UWB 信号比自由空间有更好的传播特性;巷道内 UWB 定位系统的定位基站部署间隔可比地面自由空间传播场景的定位基站部署间隔更大。② 同一矿井内,巷道环境不同,路径损耗特征也不一样;掘进工作面路径损耗指数、阴影衰落方差均与猴车运行巷道的路径损耗指数、阴影衰落方差有较大差异。③ 从掘进工作面巷道内单个测试点位对比看,非视线传输 NLOS 环境比视线传输 LOS 环境的路径损耗大,NLOS 环境的巷道内需要部署更密集的定位基站。所得结果可用于指导矿井 UWB 精确定位系统部署方案设计。

关键词:井下动目标精确定位;超宽带;UWB;路径损耗;平均路径损耗;阴影衰落;定位基站
中图分类号:TD676 **文献标志码:**A

Measurement and analysis of underground ultra wide band signal path loss

DOU Xueli, NIU Yonggang, YIN Peng, LI Jingsheng, LUAN Liangliang, LAN Xiang
(Beijing Yong'an Information & Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract:In view of problem that theoretical modeling and simulation experiment are mostly used in research of underground path loss characteristics of high-precision ultra wide band (UWB) signal, actual measurement research of UWB signal is less. The path loss measurement and analysis of UWB signal are carried out in two typical scenarios of running roadway of overhead passenger device (monkey car) with relatively common environmental conditions such as roadway size, roadway wall material and pipe facilities, and heading face with bad environment, high coal dust concentration and serious water accumulation. The results show that: ① The path loss index of UWB signal in two kinds of roadway environments is less than 2, and wave guide effect of roadway leads to better propagation characteristics of UWB signal than that of free space. The base station deployment interval of the UWB positioning system in roadway is larger than that of the ground free space propagation scene. ② In the same mine, the roadway environment is different, and the path loss characteristics are also different. The path loss index and shadow fading variance of heading face are significantly different from those of monkey car running roadway. ③ From comparison of single test point in roadway of heading face, the path loss in NLOS environment is larger than that in LOS environment. More intensive positioning base stations need to be deployed in roadway in NLOS environment. The results can be used to guide deployment scheme design of

收稿日期:2019-11-25;**修回日期:**2020-09-08;**责任编辑:**王晖,郑海霞。
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804300,2017YFC0804303)。
作者简介:窦学丽(1965—),女,山东淄博人,高级工程师,博士,研究方向为矿井动目标精确定位技术,E-mail:douxueli@beijingyongan.com。
引用格式:窦学丽,牛永刚,殷鹏,等.煤矿井下超宽带信号路径损耗测量与分析[J].工矿自动化,2020,46(10):99-103.
DOU Xueli, NIU Yonggang, YIN Peng, et al. Measurement and analysis of underground ultra wide band signal path loss[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(10): 99-103.

mine UWB precise positioning system.

Key words: accurate positioning of underground moving target; ultra wide band; UWB; path loss; average path loss; shadow fading; location base station

0 引言

井下动目标精确定位是煤矿安全高效生产的重要保障。通过目标位置信息,呈现井下生产运行情况,从而合理调配井下资源,有效应对突发险情^[1]。出于安全方面的考虑,井下动目标精确定位主要采用无线通信的定位方法^[2]。超宽带(Ultra Wide Band,UWB)通信是一门新兴无线通信技术,具有抗多径能力强、系统复杂性低等特点,可实现厘米级高精度定位,在矿井无线定位领域有良好的应用前景^[3]。

目前,基于 UWB 技术的矿井人员、车辆精确定位系统已在少数煤矿实现业务化运行,正在进入推广阶段。对 UWB 信号井下路径损耗特征等方面的研究可为 UWB 精确定位系统推广提供基础技术支持。UWB 信号的路径损耗特征是由随距离变化的平均路径损耗和因障碍物遮蔽产生的阴影衰落 2 个部分组成^[4]。平均路径损耗是指有效接收信号功率较发射信号功率的衰减值,是评估无线定位系统覆盖范围的重要参数^[5]。阴影衰落是指在实际环境中,由于障碍物与复杂地形等因素的影响,2 个不同位置的点即使与发送端的距离相同,接收到的信号强度也可能不同^[6]。

通过查阅大量参考文献,发现目前 UWB 信号井下路径损耗特征的研究主要采用理论建模与仿真实验手段^[7-9],对井下 UWB 信号的实际测量研究较少。针对上述问题,本文对山西潞安集团高河煤矿矿井架空乘人装置(猴车)运行巷道和掘进工作面 2 种典型场景下的 UWB 信号进行路径损耗测量与分析,所得结果可用于指导矿井 UWB 精确定位系统部署方案设计。

1 工程背景

山西潞安集团高河煤矿地处山西省长治市长治县,于 2012 年 6 月正式投产,设计生产能力为 600 万 t/a。矿井属高瓦斯矿井,全井田布置一个开采水平(+450 m),现采 3 号煤层,井筒数量有 7 个,采用立井开拓方式、倾斜长壁全部垮落一次采全高的采煤方法,采用锚索、锚杆、钢带、金属网(或塑料网)联合支护。

高河煤矿是国内首个 UWB 精确定位系统业务化落地的矿井^[10],目前正在进行精确定位系统全矿

覆盖建设。本文选取在矿井中巷道尺寸、巷道墙壁材质、管道设施等环境条件比较普遍的架空乘人装置(猴车)运行巷道及环境恶劣、煤尘浓度高、地面积水严重的掘进工作面 2 个典型场景对 UWB 信号进行路径损耗测量与分析,以便确定类似巷道的定位基站部署方案。

2 路径损耗测量与分析

煤矿井下所采用的 UWB 精确定位系统主要由定位基站和定位标识卡组成。定位基站通常安装在巷道顶部或巷帮上,通过光纤或其他网络线缆接入井下工业环网。在定位系统中预先设置好绝对坐标系下的定位基站物理坐标。定位基站外接天线,发射固定功率的 UWB 信号,与佩戴在人员身上或安装在车辆上的定位标识卡通信,通过信号到达时间估计、到达时间差估计、到达角度估计等定位方法来确定移动目标的位置信息。

通过矿用本质安全型定位基站和车辆定位标识卡及相应的固定支撑器材,在 2 条巷道内分别进行 2 组 UWB 信号路径损耗测量,一组定位基站安装在巷道顶部,另外一组定位基站安装在巷帮上。测量过程如下:

(1) 在地面利用 UWB 精确定位系统管理软件配置好测量用基站的 IP 地址和车辆标识卡卡号。

(2) 选定井下测试起点。将测量用基站与车辆标识卡接各自适配电源,并分别固定到相应支撑器材上,调整支撑器材水平。

(3) 利用 RS485 通信线缆连接测量用基站与定位基站,开启测量用基站。

(4) 将测量用基站天线固定到顶部或巷帮的测试位置上。

(5) 移动车辆标识卡,将高度调节到合适位置。

(6) 用激光测距仪测量车辆标识卡天线与测量用基站天线之间的距离。

(7) 距离固定后,车辆标识卡天线在此点和以此点为中心的同一水平面内 5 cm 边长的正方形 4 个顶点上进行 5 次采样^[11-12]。车辆标识卡与测量用基站 1 s 通信 1 次,每个采样点车辆标识卡固定 1 min,以获得稳定读数。

(8) 移动车辆标识卡远离测量用基站,重复步骤(6)和步骤(7)。

(9) 测量数据通过业务化运行的定位系统上传

至地面服务器,测量完毕后从服务器下载数据到本地进行分析。

利用路径损耗模型^[13-15]对测试数据进行拟合。

$$L(d)=L(d_0)+10\gamma\lg\left(\frac{d}{d_0}\right)+X\tag{1}$$

式中: $L(d)$ 为距离 d 处的路径损耗,dB; d 为测试点位与测量用基站之间的距离,m; d_0 为参考距离,m; γ 为路径损耗指数; X 为阴影衰落项。

采用对数正态阴影模型, X 服从均值为0,标准差为 σ 的正态分布。发射信号强度 $T(\text{dB}\cdot\text{m})$ 与接收信号强度 $R(\text{dB}\cdot\text{m})$ 的关系为

$$R=T-L\tag{2}$$

假设 T 恒定,有

$$R(d)=R(d_0)-10\gamma\lg\left(\frac{d}{d_0}\right)-X\tag{3}$$

记录 d 和 R 的数据,代入式(3),即可得到 γ 。

2.1 猴车运行巷道测试

猴车运行巷道如图1所示。测试点位起点在南翼猴车运行巷道第15架处,巷道宽为5.5 m,高为5 m。巷道顶部有管道及猴车支架,整个巷道为水泥墙面,测试期间猴车停运。巷道平坦,基本无煤尘。巷道前120 m为视线传输(Line of Sight, LOS)环境,120 m处开始,巷道有下坡,130 m处为非视线传输(Not Line of Sight, NLOS)环境。

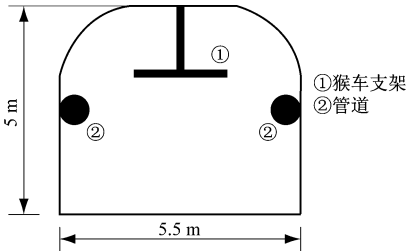


图1 猴车运行巷道
Fig.1 Monkey car running roadway

定位基站安装在巷帮时,基站天线距地面高度为2 m,车辆标识卡测量距离为1~130 m。定位基站安装在巷道顶部时,基站天线距顶板高度为1.3 m,车辆标识卡测量距离为2~120 m。测量过程中车辆标识卡高度始终固定为1.5 m,且车辆标识卡测量点位与定位基站的距离选择并不完全相同。一方面可通过测量距离相同的点进行测量结果的相互验证,另一方面因猴车停运时间有限,可实现相同测量次数下对更多的距离进行采样。猴车运行巷道测量结果如图2所示。图中显示在相同距离处2种方式得到的接收信号强度相差不大,相互验证可知测量结果较为可信。

排除130 m处NLOS环境测试点结果,根据上文路径损耗模型对其他测试结果进行拟合,参考距

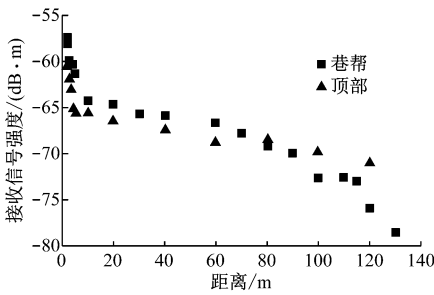


图2 猴车运行巷道测量结果
Fig.2 Measurement results of monkey car running roadway

离为1 m。猴车运行巷道路径损耗拟合模型如图3所示。图中将距离转换成 $10\lg\frac{d}{m}$,二者转换为线性关系。图中路径损耗指数 $\gamma=0.67$,小于2,巷道的波导效应导致了UWB信号比自由空间有更好的传播特性^[9]。巷道内UWB精确定位系统的定位基站部署间隔可比地面自由空间传播场景的定位基站部署间隔更大。通过Matlab计算得到的拟合优度(取值范围 $[0,1]$)为0.86,拟合结果较好。

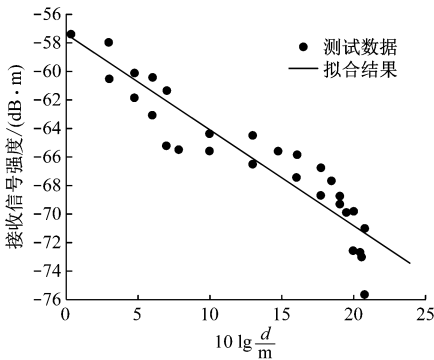


图3 猴车运行巷道路径损耗拟合模型
Fig.3 Path loss fitting model of monkey car running roadway

对于阴影衰落,正态分布拟合后标准差结果为1.75,猴车运行巷道阴影衰落如图4所示,经验分布与正态分布拟合度较好。

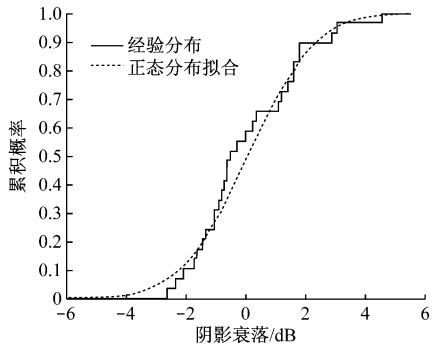


图4 猴车运行巷道阴影衰落
Fig.4 Shadow decline of monkey car running roadway

2.2 掘进工作面测试

掘进工作面如图5所示。测试点位起点在

E2311 掘进工作面运输胶带 329 架处,巷道宽为 5.5 m,高为 4 m。掘进机在 329 架前方约 220 m 处,测试期间掘进机处于停机状态。掘进巷道四周都是煤壁,用铁丝网保护,运输胶带在面向掘进工作面左侧、巷道顶部中间位置、巷帮上部均有各类管道且堆放着设备。巷道略有起伏,地面有积水,煤尘飞扬。巷道前 200 m 为 LOS 环境,但从 180 m 处开始,巷道略有下坡;210 m 处时巷道内设备较多,可视为 NLOS 环境。

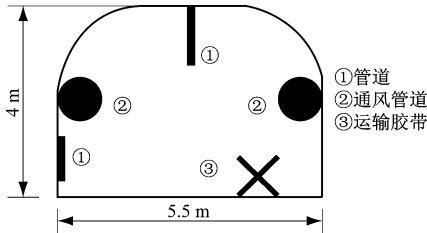


图 5 掘进工作面

Fig. 5 Heading face

定位基站安装在巷帮时,基站天线高度为 2 m,车辆标识卡测量距离为 1~190 m。定位基站安装在巷道顶部时,基站天线距顶板 1 m,车辆标识卡测量距离为 3~210 m。测量过程中车辆标识卡高度始终固定为 1.5 m。

掘进工作面测量结果如图 6 所示。图中显示在相同距离处 2 种方式得到的接收信号强度相差不大,相互验证可知测量结果较为可信。从图 6 可看出,210 m NLOS 环境测量点位的路径损失与 LOS 环境测量点位比相对较大,因此,NLOS 环境的巷道内需要部署更密集的定位基站。

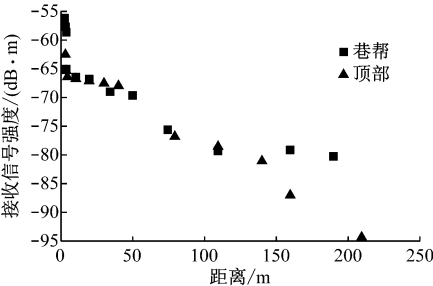


图 6 掘进工作面测量结果

Fig. 6 Measurement results of heading face

排除 NLOS 环境测试点结果,对所有测量结果根据上文路径损耗模型进行拟合,参考距离为 1 m。掘进工作面路径损耗拟合模型如图 7 所示。图中将距离转换成 $10\lg \frac{d}{m}$,二者转换为线性关系。图中路径损耗指数 $\gamma=1.10$,小于 2。通过 Matlab 计算得到的拟合优度为 0.83,拟合结果较好。

对于阴影衰落,正态分布拟合后标准差结果为 2.95。掘进工作面阴影衰落如图 8 所示。经验分布

与正态分布拟合度较好。

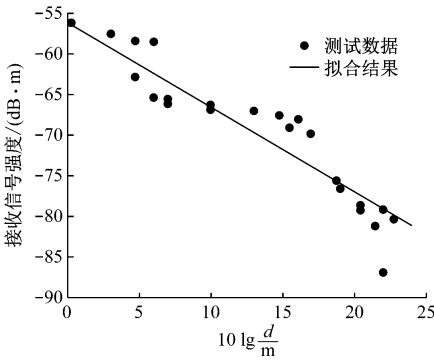


图 7 掘进工作面路径损耗拟合模型

Fig. 7 Path loss fitting model of heading face

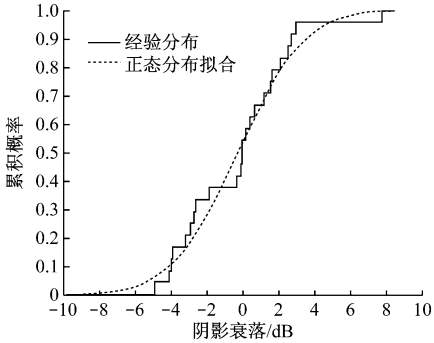


图 8 掘进工作面阴影衰落

Fig. 8 Shadow decline of heading face

3 结论

(1) 2 种巷道环境内的 UWB 信号路径损耗指数均小于 2,巷道的波导效应导致了 UWB 信号比自由空间有更好的传播特性。巷道内 UWB 定位系统的定位基站部署间隔可比地面自由空间传播场景的定位基站部署间隔更大。

(2) 同一矿井内,巷道环境不同,路径损耗特征也不一样。掘进工作面 UWB 信号路径损耗指数、阴影衰落方差均与猴车运行巷道的路径损耗指数、阴影衰落方差有较大差异。其他巷道内 UWB 定位系统的定位基站部署间隔可根据环境条件参考这 2 种典型巷道环境确定。

(3) 从掘进工作面巷道内单个测试点位对比看,NLOS 环境比 LOS 环境的路径损耗大。NLOS 环境的巷道内需要部署更密集的定位基站。

(4) 测量结果可用于指导矿井 UWB 精确定位系统部署方案设计,为 UWB 精确定位系统推广提供基础技术支持。

参考文献 (References):

[1] 胡青松,张申,吴立新,等. 矿井动目标定位:挑战、现状与趋势[J]煤炭学报,2016,41(5):1059-1068.

- HU Qingsong, ZHANG Shen, WU Lixin, et al. Localization techniques of mobile objects in coal mines: challenges, solutions and trends[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1059-1068.
- [2] 孙继平. 矿井移动通信的现状 & 关键科学技术问题[J]. 工矿自动化, 2009, 35(7): 110-114.
- SUN Jiping. Present situation and key problems of science and technology of mine mobile communication [J]. Industry and Mine Automation, 2009, 35(7): 110-114.
- [3] 王洋洋. UWB 技术在煤矿精确定位中的应用[J]. 煤炭技术, 2020, 39(5): 186-188.
- WANG Yangyang. Application of accurate positioning based on ultra-wide band technology in mine[J]. Coal Technology, 2020, 39(5): 186-188.
- [4] 郭陆岩, 庄铭杰. 复杂环境下 UWB 室内定位接收信号的模拟研究[J]. 现代计算机(专业版), 2020(6): 7-13.
- GUO Luyan, ZHUANG Mingjie. Research on simulation of UWB positioning received signals in indoor complex environment[J]. Modern Computer, 2020(6): 7-13.
- [5] 杨力, 方向, 刘强, 等. 地雷场环境超宽带信号路径损耗特性研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(9): 1055-1061.
- YANG Li, FANG Xiang, LIU Qiang, et al. Research on UWB signal's path loss characteristic in minefield [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(9): 1055-1061.
- [6] 栗玉雄, 王东. 阴影衰落环境下传感器网络的点覆盖研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(32): 112-114.
- SU Yuxiong, WANG Dong. Point coverage problem of sensor networks in shadow fading environment[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(32): 112-114.
- [7] 王艳芬, 于洪珍, 张传祥. 矿井超宽带复合衰落信道建模及仿真[J]. 电波科学学报, 2010, 25(4): 805-812.
- WANG Yanfen, YU Hongzhen, ZHANG Chuanxiang. Modeling and simulation of mine ultra-wideband composite fading channel[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(4): 805-812.
- [8] 彭丽, 孙彦景, 钱建生. UWB 矿井巷道无线信道模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(增刊 1): 256-259.
- PENG Li, SUN Yanjing, QIAN Jiansheng. Wireless channel model of UWB for coal mine tunnels [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2008, 36(S1): 256-259.
- [9] 王艳芬, 陈颖, 孙彦景. 矿井 UWB 路径损耗模型的构建及仿真[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(5): 549-552.
- WANG Yanfen, CHEN Ying, SUN Yanjing. Construction and simulation of the path loss model for mine UWB [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, 43(5): 549-552.
- [10] 刘永升, 李一桥. 潞安集团高河能源: 精准定位促进“三精”管理 助力智能矿山建设[J]. 中国煤炭工业, 2019(4): 30-31.
- LIU Yongsheng, LI Yiqiao. Gaohe energy of Lu'an Group: precise positioning, promoting "three refined" management and assisting intelligent mine construction[J]. China Coal Industry, 2019(4): 30-31.
- [11] CHEHRI A, FORTIER P, TARDIF P-M. Large-scale fading and time dispersion parameters of UWB channel in underground mines [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2008(1044): 264-276.
- [12] NKAKANOU B, DELISLE G Y, HAKEM N. Experimental characterization of ultra-wideband channel parameter measurements in an underground mine [J]. Journal of Computer Networks and Communications, 2011: 1-7.
- [13] COULIBALY Y, GILLES D, NADIR H, et al. Experimental characterization of the UWB channel for an underground mining vehicle [C]//7th European Conference on Antennas and Propagation, 2013.
- [14] MATIN M A, YASMEEN K A, ALI M A M, et al. Statistical model for UWB channel in an industrial environment [C]// International Conference on Microwave & Millimeter Wave Technology, 2008.
- [15] CASSIOLI D, DURANTINI A. Measurements, modeling and simulations of the UWB propagation channel based on direct-sequence channel sounding [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2010, 5(5): 513-523.