



文章编号:1671-251X(2021)07-0125-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17732

基于 UWB 与激光测距的综采工作面定位系统

牛永刚, 窦学丽, 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:传统的无线定位技术精度低,UWB 定位技术可实现厘米级高精度定位,满足综采工作面定位系统的精确度要求,但现有研究忽略了安装在液压支架上的基站位置变化对定位效果的影响。针对上述问题,将激光测距技术应用到矿山环境中,设计了一种基于 UWB 与激光测距的综采工作面定位系统。定位基站安装在液压支架上,液压支架位置变动,基站位置随之变动,采用矿用本安型激光测距传感器测量定位基站之间的距离。定位基站外接天线,发射固定功率的 UWB 无线信号,与佩戴在人员身上或安装在设备上的定位标志卡通信,通过飞行时间测距方法确定移动目标的位置信息。定位基站通过矿井环网将位置信息数据上传至地面数据中心。在高河煤矿 E2308 工作面进行了系统测试,结果表明:该系统定位精度达 0.193 m,定位精度较高,系统基站位置校准精度在 0.011 m 左右,有效解决了基站位置校准问题。

关键词:综采工作面; 动目标定位; 矿井无线定位; UWB; 激光测距; 基站位置校准

中图分类号:TD655.3

文献标志码:A

Positioning system of fully mechanized working face based on UWB and laser ranging

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

Abstract: Traditional wireless positioning technology has low accuracy, and UWB positioning technology can achieve centimeter-level high-precision positioning to meet the accuracy requirements of the fully mechanized working face positioning systems. However, the existing researches ignore the impact of position change of the base station installed on the hydraulic support on the positioning effect. In order to solve the above problems, laser ranging technology is applied to the mine environment and a positioning system of fully mechanized working face based on UWB and laser ranging is designed. The positioning base station is installed on the hydraulic support, and the position of the base station changes when the position of the hydraulic support changes. The mine intrinsically safe laser ranging sensor is used to measure the distance between the positioning base stations. The external antenna of the positioning base station transmits fixed-power UWB wireless signals. The positioning base station communicates with the positioning identification card worn on the personnel or installed on the equipment, and determines the positioning information of the moving target through the time-of-flight ranging method. The positioning base station uploads the positioning information data to the ground data center through the mine ring network. The system test is carried out on the E2308 working face of Gaohe Coal Mine, and the result

收稿日期:2021-03-09;修回日期:2021-07-09;责任编辑:胡娴,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:牛永刚(1968—),男,安徽蚌埠人,工程师,硕士,研究方向为矿井动目标精确定位技术,E-mail:niuyonggang@beijingyongan.com。

引用格式:牛永刚,窦学丽,殷鹏,等.基于 UWB 与激光测距的综采工作面定位系统[J].工矿自动化,2021,47(7):125-129.

NIU Yonggang,DOU Xueli,YIN Peng,et al. Positioning system of fully mechanized working face based on UWB and laser ranging [J]. Industry and Mine Automation,2021,47(7):125-129.

show that the positioning accuracy of the system reaches 0.193 m and the positioning accuracy is high. Moreover, the system base station position calibration accuracy is about 0.011 m, which solves the problem of base station position calibration effectively.

Key words: fully mechanized working face; moving target positioning; mine wireless positioning; UWB; laser ranging; base station position calibration

0 引言

采煤作业是煤矿井下最重要、最危险的前端生产环节,对煤矿井下综采工作面内的人员、采煤机等动目标的位置进行监控,可以有效保障工作面生产安全^[1-2]。井下动目标定位一般采用基于无线通信的定位方法^[3]。传统的无线定位技术包括 WiFi、射频识别(RFID)、ZigBee 等,这些技术由于自身局限性,无法实现综采工作面高精度定位^[4-5]。超宽带(Ultra Wide Band,UWB)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很大优势^[6],满足综采工作面定位系统的精确度要求。

刘清^[7]提出了一种基于 UWB 测距原理的采煤机定位系统,利用 UWB 的测距原理确定采煤机在工作面的相对位置,解决了复杂工况下采煤机定位精度低的问题。刘一鸣等^[8]提出了一种基于 UWB 的采煤机定位精度提升算法,利用信息过滤算法对信号值进行过滤,利用神经网络实现对采煤机的精确定位。但上述研究忽略了安装在液压支架上的基站位置变化对定位效果的影响。激光测距技术具有很好的单色性、方向性、相干性和高亮度的特点,可实现对物体相对距离的高精度测量^[9],是校准基站位置较理想的选择。综采工作面环境恶劣,设备复杂,能见度低,人员与采煤机的相对位置是重要的安全监控内容,宜采用二维定位方法。本文将激光测距技术应用到矿山环境中,结合 UWB 定位技术,设计了基于 UWB 与激光测距的综采工作面定位系统。该系统采用 UWB 通信来提高系统定位精度,利用激光测距技术自动校准定位基站位置。在山西潞安矿业(集团)有限责任公司高河煤矿 E2308 工作面对基站位置校准精度和系统定位精度进行了测试。测试结果表明,该系统具有较高的定位精度,有效解决了基站位置校准问题。

1 系统结构

基于 UWB 与激光测距的综采工作面定位系统主要由定位基站、定位标志卡、交换机、地面数据中心组成,如图 1 所示。定位基站安装在液压支架上,液压支架位置变动,基站位置随之变动,采用激光测

距传感器测量定位基站之间的距离。定位基站外接天线,发射固定功率的 UWB 无线信号,与佩戴在人员身上或安装在设备上的定位标志卡通信,通过信号到达时间估计、到达时间差估计、到达角估计、飞行时间估计等定位方法来确定移动目标的位置信息^[10-11]。定位基站接入矿井环网,通过矿井环网将位置信息数据上传至地面数据中心。定位系统软件将定位数据在地面监控中心进行可视化呈现,辅助管理决策。

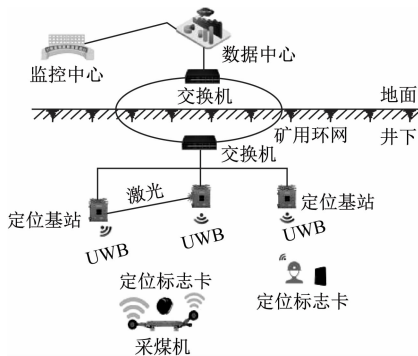


图 1 基于 UWB 与激光测距的综采工作面定位系统结构

Fig. 1 Structure of positioning system of fully mechanized working face based on UWB and laser ranging

2 系统关键技术

2.1 UWB 二维定位

采用 DW1000 UWB 芯片^[12]实现定位基站和定位标志卡之间的通信。通过 UWB 定位技术的飞行时间法来计算基站与标志卡之间的距离。定位基站安装在液压支架顶梁上,每个基站外接 1 个天线,基站天线采用全向平面天线,以垂直极化方式发射 UWB 电磁波信号。UWB 电磁波信号的中心频率为 4.0 GHz。基站天线安装位置有 2 种:靠近煤壁方向和远离煤壁方向,如图 2 所示。天线位置 1 和天线位置 2 的间距大于 2 m,2 种天线安装位置交错排列,使 3 个基站天线组成三角形(系统最少需要 3 个基站组成)。

基于 UWB 与激光测距的综采工作面定位系统定位原理如图 3 所示。通过基站 A,B,C 对移动目标 M 进行定位。本文采用最大似然法进行定位解算^[13-14]。假设基站 A,B,C 的位置坐标分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , 移动目标 M 的坐标

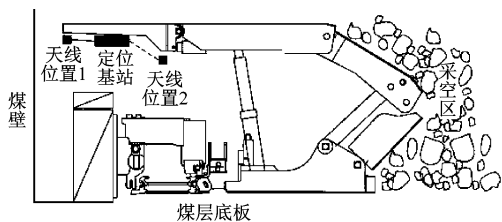


图 2 定位基站安装位置

Fig. 2 Positioning base station installation location

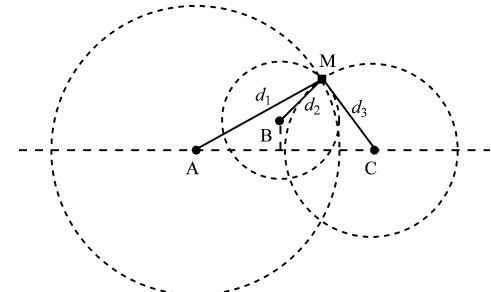


图 3 基于 UWB 与激光测距的综采工作面定位系统定位原理

Fig. 3 Positioning principle of positioning system of fully mechanized working face based on UWB and laser ranging
为 (x,y) , 移动目标 M 到基站 A,B,C 之间的距离分别为 d_1,d_2,d_3 , 则可得

$$\begin{cases} (x_1-x)^2+(y_1-y)^2=d_1^2 \\ (x_2-x)^2+(y_2-y)^2=d_2^2 \\ (x_3-x)^2+(y_3-y)^2=d_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

因式(1)为非线性方程组, 不易求解, 将其改写成 $Dz=b$ 的线性方程组的形式求解, 其中 D 为系数矩阵, z 为变量矩阵, b 为常数矩阵, 计算公式分别为

$$D=2\begin{bmatrix} (x_1-x_3) & (y_1-y_3) \\ (x_2-x_3) & (y_2-y_3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$z=\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$b=\begin{bmatrix} x_1^2-x_3^2+y_1^2-y_3^2+d_3^2-d_1^2 \\ x_2^2-x_3^2+y_2^2-y_3^2+d_3^2-d_2^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

实际测量中, 必须考虑测量误差, 假设测量误差为 $e(z)$, 根据最小二乘原理得

$$e(z)=\|b-Dz\|^2 \quad (5)$$

对测量误差 $e(z)$ 求导, 得到 z 的最小值:

$$\frac{de(z)}{dz}=2D^TDz-2D^Tb=0 \quad (6)$$

假设方程有解, 那么可得

$$z=(D^TD)^{-1}D^Tb \quad (7)$$

z^T 就是定位目标的位置坐标。

2.2 基站校准

采用 GUJ1400 矿用本安型激光测距传感器测量定位基站之间的距离。定位基站通过 CAN 总线与液压支架控制器连接, 若基站所在液压支架移架, 则与之相邻基站的激光测距传感器校准此基站位

置。基站连接方式如图 4 所示。

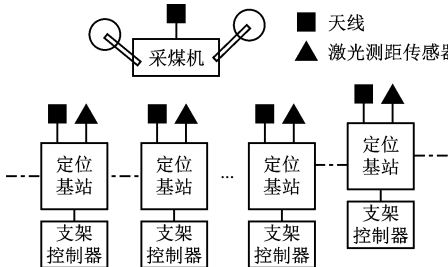


图 4 基站连接方式

Fig. 4 Base station connection mode

基站位置校准方法如图 5 所示。综采工作面移架方式采用单架依次顺序式, 基站 C 所在的液压支架向前推移(推移距离小于 2 m), 定位系统收到移架信号后 30 s, 与基站 C 相邻的最近基站 B 的激光测距传感器通过测距得到与基站 C 的距离 k , 基站 B,C 之间的水平距离 l 通过二者坐标值计算可得, 根据勾股定理得到二者垂直距离 j , 从而进一步用基站 B 与基站 A 之间的垂直距离 H 减去 j 得到基站 C 的移动距离 h 。

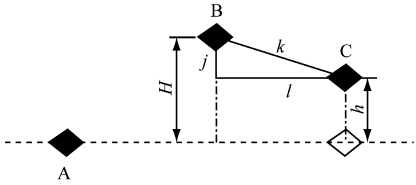


图 5 基站位置校准方法

Fig. 5 Location calibration method of the base station

3 系统测试

为验证基于 UWB 与激光测距的综采工作面定位系统的有效性, 在高河煤矿 E2308 工作面进行基站位置校准精度和系统定位精度的测试。高河煤矿设计生产能力为 600 万 t/a, 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, 煤层标高为 460~520 m, 煤层厚度为 6.2~7.5 m, 平均厚度为 6.38 m, 属稳定性煤层。E2308 工作面采用长壁放顶煤开采技术, 可采长度为 653 m, 切眼长度为 335 m, 采高为 6.7 m, 储量为 226 万 t。工作面液压支架各动作采用液压片阀人工操作方式, 采一刀煤, 人工放一次煤。E2308 工作面目前主要设备概况: ① 采煤机型号为 MG400/930-WD, 采高为 2.0~3.5 m, 交流变频无级调速。② 工作面中间液压支架型号为 ZF8500/22/42, 端头端尾液压支架型号为 ZFG10800/23/38。工作面架内(液压支架立柱以内的空间)行人通道宽为 0.6 m, 架外(液压支架立柱以外)到煤壁之间的宽度约为 3.5 m。③ 前后部刮板输送机型号为 SGZ1000/2*1000, 电动机功率为 1 000 kW, 运输能力为 2 000 t/h, 电压等级

为 3 300 V,采用变频控制。

3.1 测试过程

测试工作使用的主要器材为矿用本质安全型定位基站和车辆定位标志卡及相应的固定支撑器材。测试工作在采煤机停运期间进行,共使用 3 个定位基站和 10 个车辆定位标志卡。测试过程如下:

- (1) 在地面利用 UWB 定位系统管理软件配置好测试用基站的 IP 地址和车辆标志卡卡号。
- (2) 选定一段无地形起伏的工作面作为测试地点。将测试用基站与车辆标志卡接各自适配电源,并分别固定到相应支撑器材上,调整支撑器材水平。
- (3) 将基站 A, B, C 安装在液压支架上,2 个基站之间相距 30 m,按照定位系统设计方案调整固定天线位置。利用 CAN 总线连接测试用基站与业务化运行的矿井定位系统在测试点处已存在的最近的定位基站,开启测试用基站。
- (4) 将车辆标志卡放置到指定位置,其中 2 个在液压支架内,8 个在液压支架外。基站与标志卡位置如图 6 所示。

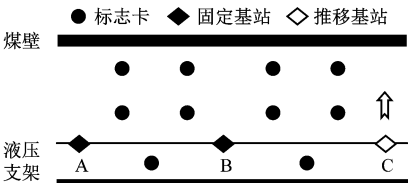


图 6 基站与标志卡位置

Fig. 6 Location schematic diagram of base station and identification card

- (5) 利用激光测距仪、纤维卷尺测量并且标定定位基站 A,B,C 和 10 个车辆标志卡的初始坐标位置。在之后的测试过程中,车辆标志卡、基站 A 和基站 B 保持位置不变。
- (6) 在定位系统控制软件中进行基站位置初始化设置,然后定位系统开始与车辆标志卡通信并进行定位。
- (7) 测试过程中液压支架位置不发生变动,而是通过改变基站位置来实现液压支架移架的同等效果。将基站 C 向前移动,并手动发送移架信号给定位系统控制软件。
- (8) 系统对基站 C 的位置进行校准,然后对车辆标志卡进行定位。
- (9) 重复步骤(7)和步骤(8)。
- (10) 测试数据通过业务化运行的矿井定位系统上传至地面服务器,测试完毕后从服务器下载数据到本地进行分析。

3.2 测试结果分析

3.2.1 基站位置校准精度分析

E2308 工作面循环进度为 0.8 m,采放比为

1:1.12;一刀一放,采放平行作业,放煤步距为 0.75~0.8 m。基站 C 以 0.2 m 为单位间隔向煤壁方向推移,测量数据见表 1。

表 1 基站位置校准测量数据

Table 1 Base station position calibration measurement data

推移次数	推移距离/m	测量距离/m	绝对误差/m	相对误差/%
1	0.2	0.192	0.008	4.0
2	0.4	0.391	0.009	4.5
3	0.6	0.610	0.010	5.0
4	0.8	0.788	0.012	6.0
5	1.0	1.013	0.013	6.5
6	1.2	1.190	0.010	5.0
7	1.4	1.389	0.011	5.5
8	1.6	1.614	0.014	7.0
9	1.8	1.786	0.014	7.0
10	2.0	2.012	0.012	6.0

测量结果表明,激光校准基站位置的最小误差为 0.008 m,最大误差为 0.014 m,平均误差为 0.011 m,相对误差较小,校准结果较为精确。

3.2.2 系统定位精度分析

选取初始状态和液压支架推移 0.8 m 时的状态进行系统定位精度分析,以真实反映经过一次移架后的系统定位精度。

以基站 A 的天线位置为坐标原点,液压支架延伸方向为 X 轴,指向煤壁的方向为 Y 轴,建立相对坐标系,基站 B 和基站 C 的天线位置初始坐标分别为(30 m,2.2 m)和(60 m,0)。记录测量结果,并计算 X 轴和 Y 轴方向的误差($\Delta x_i = |x_i - x_0|$, $\Delta y_i = |y_i - y_0|$, i 为标志卡序号, $i = 1, 2, \dots, 10$),结果见表 2。

采用精度计算公式计算 2 种情况下的系统定位精度。

$$P = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \tag{8}$$

计算得到初始状态下的最小误差为 0.163 m,最大误差为 0.195 m,平均误差为 0.177 m。当液压支架向前推进 0.8 m 时,最小误差为 0.182 m,最大误差为 0.214 m,平均误差为 0.193 m。2 种情况下系统平均误差相差 0.016 m,与基站位置校准误差 0.012 m(表 1)相比略大。

定位误差结果如图 7 所示。当液压支架推移后,所有标志卡的定位误差均有所增加。根据本文测量结果,由于液压支架推移 1 次,误差会增大 0.016 m,出于对累积误差的考虑,经过一段时间

表2 系统定位结果

Table 2 System positioning results m

标志卡 序号	实际坐标 (x_0,y_0)	标志卡 位置	初始状态		支架推移0.8 m	
			Δx_1	Δy_1	Δx_2	Δy_2
1	(14.920,-0.789)	架内	0.143	0.127	0.151	0.144
2	(44.915,-0.773)	架内	0.146	0.129	0.158	0.145
3	(10.130,0.961)	架外	0.115	0.116	0.139	0.127
4	(19.932,0.946)	架外	0.122	0.119	0.136	0.126
5	(39.835,1.034)	架外	0.128	0.124	0.129	0.132
6	(50.170,1.155)	架外	0.130	0.121	0.145	0.133
7	(9.742,2.480)	架外	0.122	0.126	0.138	0.130
8	(20.245,2.550)	架外	0.120	0.115	0.139	0.131
9	(40.187,2.610)	架外	0.127	0.124	0.134	0.133
10	(49.890,2.479)	架外	0.131	0.120	0.128	0.130

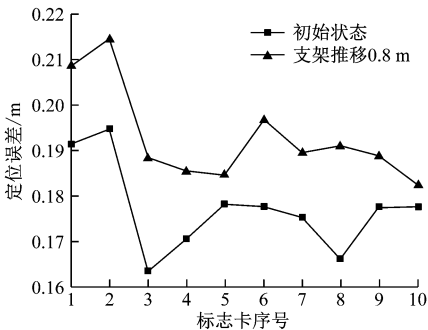


图7 定位误差

Fig. 7 Positioning error

后,应对定位系统统一初始化校准1次。相同情况下,位置在架内的1号和2号标志卡与架外的其他标志卡相比,定位误差均大于0.012 m,这是由金属材质的液压支架遮挡所导致的。

4 结语

提出了一种基于UWB与激光测距的综采工作面定位系统,该系统采用DW1000 UWB芯片实现定位基站和定位标志卡之间的通信,利用UWB定位技术对采煤机进行高精度定位,采用GUJ1400矿用本安型激光测距传感器测量定位基站之间的距离,利用激光测距技术自动校准定位基站位置。在高河煤矿井下E2308工作面进行了定位系统验证,结果表明:系统基站位置校准精度在0.011 m左右,系统定位精度达0.193 m,定位精度较高,有效解决了基站位置校准问题。该系统方案可为UWB精确定位系统推广应用提供借鉴。

参考文献(References):

[1] 符世琛,李一鸣,张敏骏,等. 基于UWB信号的TW-TOF测距技术在狭长巷道中的精度测试实验研究

[J]. 煤炭技术,2017,36(3):246-248.

FU Shichen, LI Yiming, ZHANG Minjun, et al. Accuracy testing experiment in narrow roadway based on TW-TOF ranging technique of UWB signals[J]. Coal Technology,2017,36(3):246-248.

[2] 夏婷,李威,王超,等. 综采工作面采煤机定位技术研究现状及展望[J]. 工矿自动化,2017,43(10):24-28.

XIA Ting, LI Wei, WANG Chao, et al. Research status and prospect of shearer positioning technology on fully mechanized coal mining face[J]. Industry and Mine Automation,2017,43(10):24-28.

[3] 孙继平. 矿井宽带无线传输技术研究[J]. 工矿自动化,2013,39(2):1-5.

SUN Jiping. Research of mine wireless broadband transmission technology [J]. Industry and Mine Automation,2013,39(2):1-5.

[4] 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.

[5] 戴国华,易灵芝,王根平. 一种新的基于 ZigBee 技术定位算法[J]. 计算机测量与控制,2012,20(4):1105-1107.

DAI Guohua, YI Lingzhi, WANG Genping. A new location algorithm based on ZigBee technology[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(4):1105-1107.

[6] 郝维来,杨公训. 基于UWB无线通信技术在矿井中的应用研究[J]. 计算机应用研究,2008,25(2):600-602.

HAO Weilai, YANG Gongxun. Application of wireless communication technology based on UWB in coal mine underground[J]. Application Research of Computers,2008,25(2):600-602.

[7] 刘清. 基于超宽带技术的采煤机定位系统设计[J]. 煤炭科学技术,2016,44(11):132-135.

LIU Qing. Design on positioning system of shearer based on ultra wide band technology[J]. Coal Science and Technology,2016,44(11):132-135.

[8] 刘一鸣,刘万里,张博渊,等. 基于UWB的采煤机定位精度提升算法研究[J]. 工矿自动化,2016,42(12):25-30.

LIU Yiming, LIU Wanli, ZHANG Boyuan, et al. Research of precision improving algorithm of shearer positioning based on UWB[J]. Industry and Mine Automation,2016,42(12):25-30.

[9] 叶美图,梁义维,王锴. 矿井巷道表面位移激光测量装

- 置研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(7): 84-87.
- YE Meitu, LIANG Yiwei, WANG Kun. Research on laser measuring device of surface displacements of mine roadway [J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(7): 84-87.
- [10] 李世银, 朱媛, 王晓明. 考虑锚点位置误差的井下 TDOA 改进算法 [J]. 工矿自动化, 2019, 45(11): 10-13.
- LI Shiyin, ZHU Yuan, WANG Xiaoming. Improved TDOA algorithm for underground positioning considering anchor position error [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(11): 10-13.
- [11] NEIRYNCK D. An IEEE 802. 15. 4A ultra-wideband transceiver for real time localisation and wireless sensor networks [M]. Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [12] DOTLIC I, CONNELL A, HANG M, et al. Angle of arrival estimation using decawave DW1000 integrated circuits [C]//14th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC), Bremen, 2017: 1-6.
- [13] 詹华伟, 詹海潮, 赵勇. 基于 RSSI 极大似然估计定位算法的改进与实现 [J]. 河南师范大学学报 (自然科学版), 2018, 46(5): 37-41.
- ZHAN Huawei, ZHAN Haichao, ZHAO Yong. Improvement and implementation of maximum likelihood estimation positioning algorithm based on RSSI [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2018, 46(5): 43-47.
- [14] 钟丽鸿, 胡成全, 金京姬. 基于 RSSI 极大似然估计定位算法的分析与实现 [J]. 吉林大学学报 (理学版), 2014, 52(3): 556-560.
- ZHONG Lihong, HU Chengquan, JIN Jingji. Analysis and implementation of maximum likelihood estimation positioning algorithm based on RSSI [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2014, 52(3): 556-560.