

# 基于 RSSI 的四边测距井下人员定位系统

詹华伟,王良源,陈思,史水娥

(河南师范大学 电子与电气工程学院;河南省光电传感集成应用重点实验室,河南 新乡 453007)

**摘要:**针对煤矿井下人员定位不精确的问题,设计了基于四边测距算法的井下定位系统.该系统采用 ZigBee 技术,由 CC2530 为主控芯片的无线传感器网络组成.定位模块中,传感器节点以 Mesh 网络拓扑结构组成无线传感网络,具有信息采集传输和定位的功能.定位算法采用不同于传统三边测距算法的四边测距定位算法,该算法首先利用四边测距模型选取出四个信标节点,然后利用加权均值模型对同一节点采集到的接收信号强度指示(RSSI)值进行数据处理,最后将 RSSI 值转化的距离的平方作为加权因子求出未知节点位置坐标.实验结果表明,该四边测距定位系统较传统三边测距定位系统更具有优势,具有较高定位精度,且能实时定位.

**关键词:**接收信号强度指示;ZigBee;CC2530;Mesh 网络;四边测距算法;实时定位

**中图分类号:**TP301;TP303

**文献标志码:**A

煤炭是我国的主要能源,开采基本在地下进行,坍塌、瓦斯爆炸等矿难事故时刻威胁着井下工作人员的生命安全<sup>[1-4]</sup>.近年来,为方便井下人员日常生产中的管理调度,以及发生矿难时有效开展救援工作,基于无线传感器的通信技术已被应用到煤矿井下人员的定位系统中<sup>[5-6]</sup>.文献[7]提出了基于 ZigBee 中继器的接收信号强度模型,并使用了合理的去噪方法减少干扰,但此方法处理数据较慢,定位耗时较长;文献[8]将 ZigBee 模块与 RFID 模块相结合,利用 ZigBee 模块自组网能力扩展了 RFID 标签定位距离,但此系统适用于室内或户外环境,不适用煤矿井下的复杂环境中;文献[9]提出利用 BP 神经网络改进算法改善 ZigBee 检测网络参数设置方法,但此方法定位精度不高,误差较大;文献[10]通过对系统天线的近场效应进行补偿性修正来减小误差,但此系统稳定性较差,容易受到外界环境的干扰.

考虑到定位系统要实现井下人员准确的实时跟踪监测和定位的目的,本文设计了一种新型的基于 ZigBee 技术的井下人员定位系统,同时兼顾了软硬件设计,解决了目前煤矿井下定位系统的弊端,真正实现了井下人员实时跟踪定位.传统的三边测距定位算法在实际操作中由于存在测距误差,三个圆无法形成公共区域,很难实现精确定位.本系统提出了四边测距定位算法,通过建立坐标系测出未知节点到四个参考节点的接收信号强度指示(RSSI)值,引入加权均值模型,对同一节点采集到的 RSSI 值进行数据处理,计算得到相对节点间的距离,然后利用四个距离值和相应坐标求出未知节点的坐标,从而减小误差,实现对井下人员的精确定位.

## 1 系统设计

ZigBee 是基于 IEEE802.15.4 标准的低成本、低速率、短距离、端延时、高容量、高安全传输的低功耗局域网无线自组网通信技术协议<sup>[11]</sup>.本系统根据 ZigBee 协议规范组建网络,包括定位模块、传输模块、控制模块.定位系统的示意图见图 1.

**收稿日期:**2020-07-16;**修回日期:**2020-11-16.

**基金项目:**国家自然科学基金(61077037);河南省科技攻关计划项目(172102210046);河南省高等学校重点科研项目基础研究项目(19B510006).

**作者简介:**詹华伟(1979-),男,河南汝南人,河南师范大学副教授,研究方向为射频通信技术、无线传感器网络、机器人目标识别.

**通信作者:**王良源,E-mail:897424588@qq.com.

定位模块主要是由 ZigBee 传感器节点构成<sup>[12]</sup>.在无线传感定位网络中,移动定位节点被配置为终端节点,参考定位节点被配置为路由节点,再配置协调器中心节点,三种节点以 Mesh 网络拓扑结构<sup>[13]</sup>组成无线传感网络,在系统中起到信息采集传输和定位的功能.

传输模块在整个系统中有两个作用:1)将无线传感器网络采集到的信息传递到控制模块;2)将系统发出的控制命令信息传输到井下无线传感器网络中.

控制模块主要由地面控制主机、以太网交换机、Web 服务器以及其他终端设备组成.主要负责对传输上来的信息进行存储、处理和显示.

## 2 硬件部分

系统的硬件设计由移动定位节点、路由参考节点和协调器中心基站三者共同构成了 ZigBee 无线网络.

射频模块(图 2(a))由系统默认和 PCB 天线相连接.如果使用外置天线,IPX 接口需要根据用户需求外围配置.节点模块分为两种:移动定位节点(图 2(c))和路由参考节点(图 2(d)).各节点之间通过射频模块或杆状天线(图 2(b))进行通信连接.主要运行流程:信息从移动定位节点发出,途径路由参考节点和协调器中心基站(图 2(e))最终通过光纤到达地面控制主机.本系统的硬件设计,具有小型化,低功耗,可扩容等特点<sup>[14]</sup>,保持了各部分模块功能的独立性,便于以后对系统的改进.

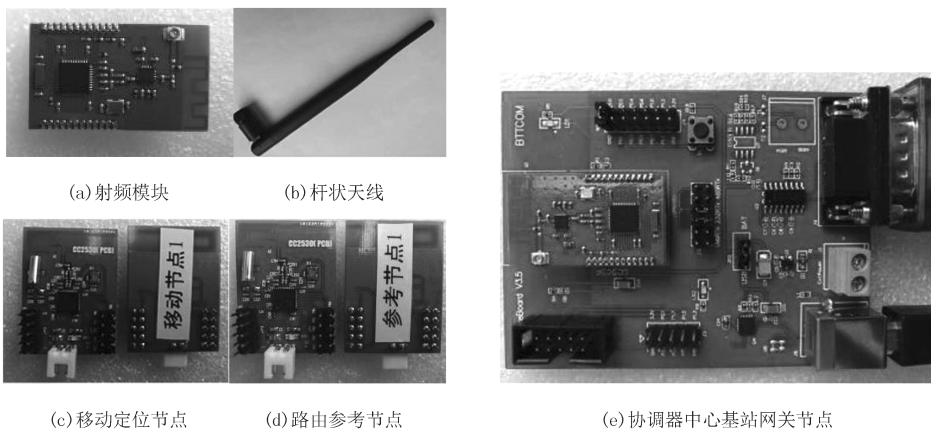


图2 各网关节点实物图

Fig.2 Physical diagram of each gateway node

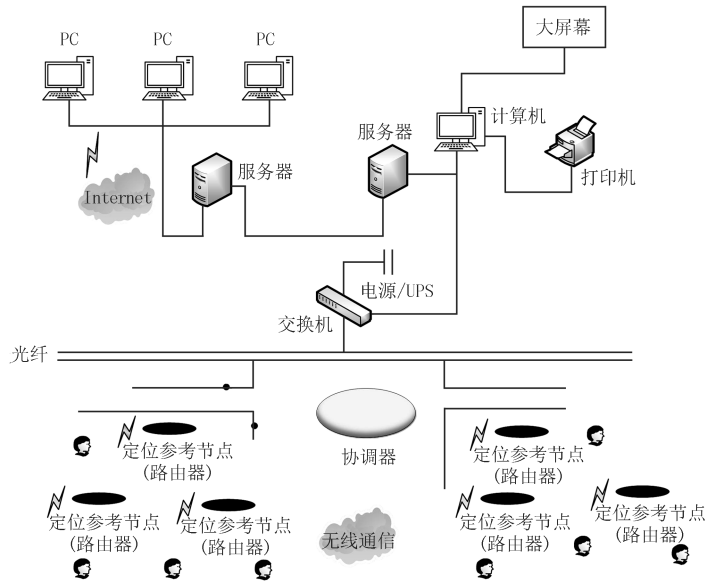


图1 定位系统总体架构示意图

Fig.1 Overall architecture of positioning system

### 3 定位算法

#### 3.1 测距原理

无线信号在传播过程中信号强度会随着传播距离的增加而衰减.根据衰减程度可估算节点间传输距离<sup>[15]</sup>.用

$$d = 10^{\frac{A-R}{10n}} \quad (1)$$

表示接收信号强度与传输距离之间的关系, $d$  为发射与接收,节点之间的距离<sup>[16-17]</sup>, $R$  为 RSSI, $A$  为距离 1 m 的接收信号功率, $n$  是信道衰减指数,一般取  $2\sim 5$ <sup>[18]</sup>.

#### 3.2 算法的设计与改进

本系统选用基于距离的定位算法,而在基于距离的定位算法中,基于 RSSI 的应用最为广泛且定位效果最好.考虑到 RSSI 值在测量时容易受到外部环境的影响,同一节点应测出多组数据值,然后引入加权均值模型进行数据处理,进而减小误差,提高定位精度<sup>[19]</sup>.

整理同一节点获取的 RSSI 值, $R_k$  出现  $f_k$  次,其中  $f_k$  为权值,且  $f_1 + f_2 + \dots + f_k = i$ ,则 RSSI 的加权平均值  $\bar{R} = (R_1 f_1 + R_2 f_2 + \dots + R_k f_k) / i$ .

在实际测量中,由于测距误差的存在,传统的三边定位算法中三圆难以交于一点,导致无法准确定位<sup>[20]</sup>.根据仿真实验对比,系统采用了基于 RSSI 的四边测距定位算法.定位模型图如图 3 所示.

建立适当的坐标系.图 3 中, $A, B, C, D$  为圆心.在三角形  $ABC, ABD, ACD, BCD$  的质心  $M_j(x_j, y_j), j = 1, 2, 3, 4$ ,即为定位系统模型中的信标节点<sup>[21-22]</sup>.未知节点记为  $E(x_E, y_E)$ . $M_j$  与  $E$  的距离为  $d_j$ <sup>[23]</sup>,可通过将  $R$  带入(1)式求出.为了提高定位精度,利用距离加权因子的算法模型求

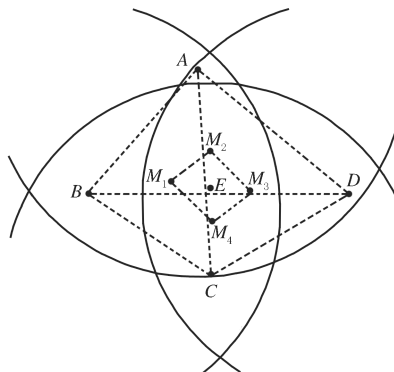


图3 定位模型

Fig. 3 Positioning model

出未知节点的估计坐标<sup>[24]</sup>  $x_i = (\frac{x_1}{d_1^2} + \frac{x_2}{d_2^2} + \frac{x_3}{d_3^2} +$

$\frac{x_4}{d_4^2}) / (\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2} + \frac{1}{d_4^2}), y_i = (\frac{y_1}{d_1^2} + \frac{y_2}{d_2^2} + \frac{y_3}{d_3^2} + \frac{y_4}{d_4^2}) / (\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2} + \frac{1}{d_4^2})$ . 算法的流程图见图 4.

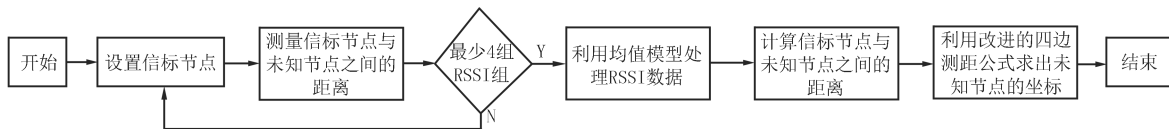


图4 算法流程

Fig. 4 Algorithm flow

### 4 仿真结果与分析

为了验证本系统的改进算法,使用 MATLAB 进行仿真.仿真区域为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ,100 个信标节点均匀分布在区域内,每个节点的通信半径为 50 m.由于信号在传播过程中会受到周围环境干扰,在仿真中加入均值为 0,均方差为 6 的高斯随机噪声,信道衰减指数  $n$  取 3.按照上述算法流程进行仿真实验 100 次,结果取其平均值.

信标节点周期性发出节点 ID,位置坐标,RSSI 信号等信息,由随机分布的未知节点接收并记录.未知节

点的实际坐标为 $(x_0, y_0)$ , 则定位误差可以表示为 $e = \sqrt{(x_E - x_0)^2 + (y_E - y_0)^2}$ . 选取 10 个未知节点用四边距测量定位, 与三边测距算法的定位对比(图 5).

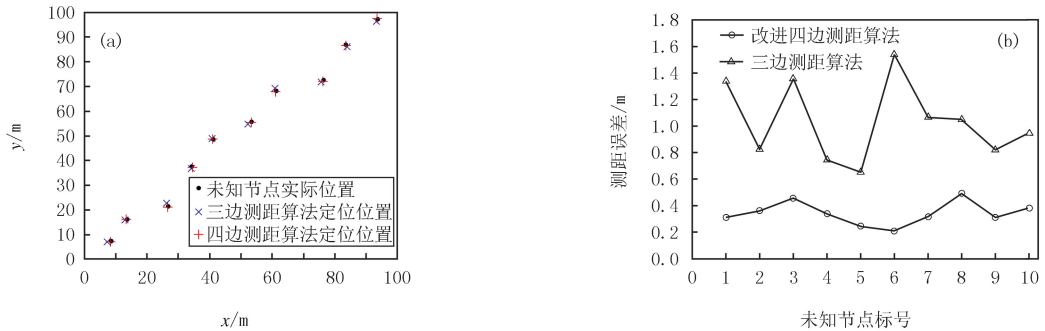


图5 两种定位算法数值计算结果

Fig.5 Numerical positioning comparison of two algorithms

三边测距定位算法的定位误差最大为 1.538 m, 最小为 0.652 m; 四边测距定位算法的定位误差最大为 0.491 m, 最小为 0.209 m. 对于同一未知节点的定位, 四边测距算法较三边测距算法的定位误差改善最多为 1.329 m, 最少为 0.405 m, 定位精确度明显提高. 四边测距定位算法定位误差较小, 在定位精确度上有明确提高, 且波动性较小. 四边测距定位算法改善了定位效果, 提高了定位精度, 平均定位误差减小了 0.696 m.

## 5 硬件平台搭建

根据实际情况, 在搭建试验系统时, 无线传感网络选取 1 个移动定位节点、4 个参考定位节点以及 1 个协调器中心基站. 通过设定不同的 IEEE 地址区别 6 个无线传感器网络节点. USB 连接线连接协调器中心基站以及上位机(模拟监控主机)模拟出井上监控主机与无线传感网络的通信. 在上位机上通过串口调试进行可视化分析, 进而得出实验系统测试数据. 系统整体结构图见图 6.

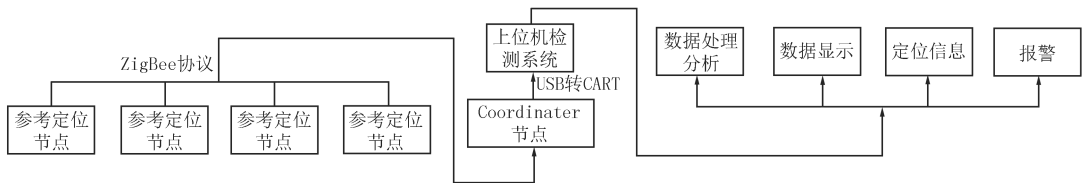


图6 系统结构实验图

Fig.6 Experimental diagram of system structure

无线传感器会预留 SOC 调试接口, 把仿真器的 10 针接口通过转换器和 PC 端的 USB 连接, 实现了给实验板供电以及算法下载的功能. 实验系统的实际连接图见图 7.

根据搭建好的实验平台在实验区域内设定相应数量的路由参考节点, 一个或数个定位节点以及一个网关节点. 路由参考节点持续向外部发出射频信号; 当移动节点检测到参考节点发出的信号之后, 根据芯片的性能能够得到两个节点之间通信的信号强度, 即 RSSI, 然后把得到的数据信息打包传输到网关节点; 网关节点与 PC 端上位机相连接, 在上位机上打开需要演示定位情况的软件, 显示出移动定位节点的初步估计位置相对应的估算坐标值, 进而达到定位的目的.

以四个路由参考节点和一个移动定位节点为例, 在实验区域放置所有节点, 上位机显示的实时定位演示如图 8 所示.

如需记录测距和定位信息, 单击“数据记录”菜单, 软件会在输入文件名后自动记录固定节点坐标, 测距时间, 测距值, 定位结果等信息.

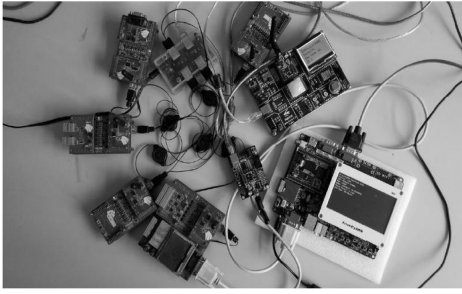


图7 实际连接图

Fig.7 Actual connection diagram

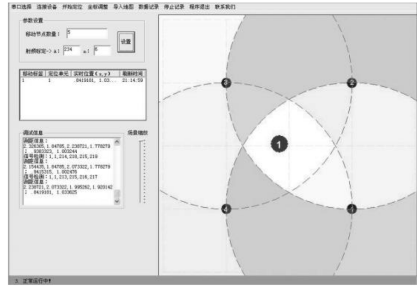


图8 实时定位演示

Fig.8 Real-time positioning demonstration

### 6 实验结果及分析

为测试本文四边测距定位系统与传统三边测距定位系统的误差,首先需要选取一个合适的信道衰减指数.由图 9 可知在信道衰减指数为 3 时,定位误差较小且稳定.即取信道衰减指数为 3 进行后续实验.

将传统三边测距定位算法与四边测距定位算法分别下载入实验板中,信道衰减指数取 3 并选取一块面积为 10 m×10 m 的实验区域进行实验,然后与实际坐标位置进行对比,实验结果如下所示.

由图 10 可以得出在相同的实验条件下依旧满足仿真所得的结果,四边测距定位系统依旧稳定波动较小,且在精度方面优于传统三边测距定位系统.

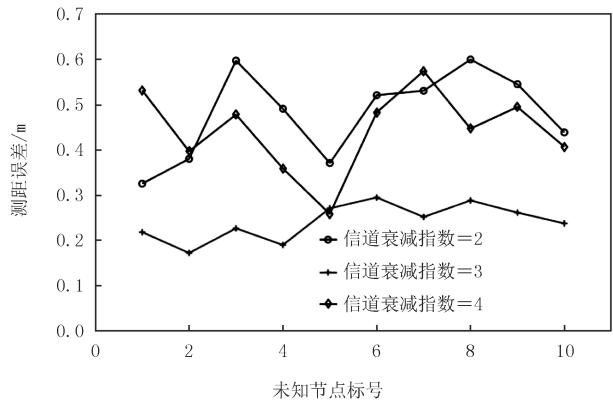


图9 不同信道衰减指数定位误差图

Fig.9 Positioning error graphs of attenuation exponential of different channels

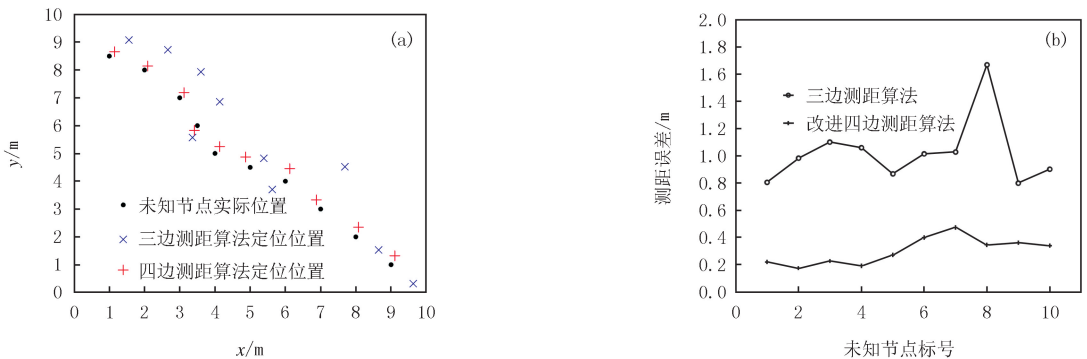


图10 两种算法实验结果对比

Fig.10 Experimental results comparison of two algorithms

### 7 结束语

本定位系统将 ZigBee 与基于 RSSI 定位结合应用在煤矿井下人员跟踪定位系统中,不仅解决了基于



ZigBee的定位系统缺少测距定位技术的问题,还改善了基于RSSI测距定位的远距离通信的弊端,提高了定位精度,从而保障井下工作人员的生命安全.通过实验结果表明,本文所提出的系统较传统定位系统更具有优势,更适用于煤矿井下复杂的环境中.在后续研究中,考虑更多的复杂情况进一步优化定位算法,减小环境因素对系统的影响.

## 参 考 文 献

- [1] 张玉,杨维,韩东升,等.井下应急救援通信网络拓扑规划与资源配置[J].华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(7):61-66.  
ZHANG Y, YANG W, HAN D S, et al. Topology planning and resource allocation of underground emergency rescue communication network[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013, 41(7): 61-66.
- [2] 刘勇,罗宇锋,王红旗,等.一种新型井下人员组合定位系统设计[J].工矿自动化,2014,40(2):11-15.  
LIU Y, LUO Y F, WANG H Q, et al. Design of a new underground personnel combination positioning system[J]. Industrial and Mining Automation, 2014, 40(2): 11-15.
- [3] 胡平,鞠捷.井下救援人员定位中的信号抗干扰技术研究[J].计算机仿真,2013,30(4):208-212.  
HU P, JU J. Research on signal anti-jamming technology in the positioning of underground rescue personnel[J]. Computer Simulation, 2013, 30(4): 208-212.
- [4] MOHAMED A S. Meta-surface synthesis for time-harmonic waves: exact spectral and spatial methods[J]. PIER, 2014, 149: 205-216.
- [5] CHENG L, WU C D, ZHANG Y Z, et al. A survey of localization in wireless sensor network[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 4(1): 1-12.
- [6] SUN C, XING J P, LIANG H Z, et al. Switched IMM algorithm for maneuvering target tracking[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2012, 14(7): 461-468.
- [7] 张亚琳.基于 ZigBee 中继器矿山井下人员定位算法[J].物联网技术,2016,6(8):18-19.  
ZHANG Y L. Underground personnel positioning algorithm based on ZigBee repeater[J]. Internet of Things Technology, 2016, 6(8): 18-19.
- [8] 张开生,王静.基于 ZigBee 和 RFID 的消防员定位系统设计[J].实验技术与管理,2017,34(7):122-126.  
ZHANG K S, WANG J. Design of fireman positioning system based on ZigBee and RFID[J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(7): 122-126.
- [9] 王海英,阮祺,常肖.基于 ZigBee 技术的隧道人员定位精度研究[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(5):111-114.  
WANG H Y, RUAN Q, CHANG X. Research on positioning accuracy of tunnel personnel based on ZigBee technology[J]. Road Construction Machinery and Construction Mechanization, 2016, 33(5): 111-114.
- [10] 崔璐,蔡觉平,赵博超.基于 ZigBee 技术的井下人员定位安全监测系统[J].大连理工大学学报,2011,51(S1):102-106.  
CUI L, CAI J P, ZHAO B C. Underground personnel positioning safety monitoring system based on ZigBee technology[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(S1): 102-106.
- [11] 艾精文,党晓娟,吕启深,等.基于物联网的具有全景功能的全维度设备状态监测系统研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(16):122-128.  
AI J W, DANG X J, LYU Q S, et al. Research on omnidirectional equipment condition monitoring system with panoramic function based on Internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 122-128.
- [12] 郝昭,李晓卉,丁月民.基于 WSN 路由节点度模型的楼宇走廊定位算法[J].传感技术学报,2017,30(11):1700-1705.  
HAO Z, LI X H, DING Y M. Building corridor location algorithm based on WSN routing node degree model[J]. Journal of Sensing Technology, 2017, 30(11): 1700-1705.
- [13] 郭会军,王宏江.基于弧参数约束的无线传感网络定位算法[J].传感技术学报,2018,31(4):620-624.  
GUO H J, WANG H J. Wireless sensor network localization algorithm based on arc parameter constraint[J]. Journal of Sensing Technology, 2018, 31(4): 620-624.
- [14] 吴杰,冯锋,丁志义.基于 RFID 与 WSN 融合技术的井下定位算法研究[J].计算机工程与设计,2014,35(7):2278-2282.  
WU J, FENG F, DING Z Y. Research on underground positioning algorithm based on RFID and WSN fusion technology[J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(7): 2278-2282.
- [15] URADZINSKI M, GUO H. Advanced Indoor Positioning Using Zigbee Wireless Technology[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 97(4): 6509-6518.
- [16] 付华,刘公权,邢亮.基于同步挤压小波变换的故障行波测距方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(2):18-24.  
FU H, LIU G Q, XING L. Fault traveling wave location method based on synchronous squeezed wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 18-24.

- [17] 赵铁军,王秀斌,虞跃.基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(21):83-91.  
ZHAO T J,WANG X B,YU Y.A single terminal fault location method for single phase fault of cable based on parameter identification of metal sheath model[J].Power System Protection and Control,2019,47(21):83-91.
- [18] YU Z Z, GUO G Z.Improvement of Positioning Technology Based on RSSI in ZigBee Networks[J].Wireless Personal Communications, 2017,95(3):1943-1962.
- [19] 刘夏,李国良,张灵峰,等.一种井下人员无线定位算法研究[J].工矿自动化,2020,46(4):38-45.  
LIU X,LI G L,ZHANG L F,et al.A wireless location algorithm for underground personnel[J].Industrial and Mining Automation,2020, 46(4):38-45.
- [20] 薛忠新,王峰,杨文奇,等.井下人员定位算法研究[J].煤炭技术,2019,38(11):137-138.  
XUE Z X,WANG F,YANG W Q,et al.Research on underground personnel positioning algorithm[J].Coal technology,2019,38(11): 137-138.
- [21] 张波,张勇,刘政强,等.国网山东电力北斗地基增强系统建设方案及应用[J].电力系统保护与控制,2020,48(3):70-76.  
ZHANG B,ZHANG Y,LIU Z Q,et al.Construction scheme and application of Beidou foundation enhancement system of State Grid Shandong electric power[J].Protection and Control of Power System,2020,48(3):70-76.
- [22] 陈强,王建,熊小伏,等.一种降雨诱发滑坡灾害下输电杆塔的监测与预警方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(3):147-155.  
CHEN Q,WANG J,XIONG X F,et al. Monitoring and early warning method for transmission tower under rainfall-induced landslide disaster[J].Protection and Control of Power System,2020,48(3):147-155.
- [23] 朱守金,孙权海,杜艳,等.基于 ZigBee 的井下人员定位系统研究与设计[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2019,37(1):131-134.  
ZHU S J,SUN Q H,DU Y,et al.Research and design of underground personnel positioning system based on ZigBee[J].Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition),2019,37(1):131-134.
- [24] 朱光.改进 RSSI 加权质心算法在井下人员定位中的应用研究[J].中国矿业,2018,27(12):198-201.  
ZHU G.Application of improved RSSI weighted centroid algorithm in underground personnel positioning[J].China Mining,2018,27(12): 198-201.

## Four-sided ranging underground personnel positioning system based on RSSI

Zhan Huawei, Wang Liangyuan, Chen Si, Shi Shuie

(College of Electronic and Electrical Engineering; Henan Key Laboratory of Optoelectronic Sensing Integrated Application,  
Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of inaccurate personnel positioning in coal mine, a mine positioning system based on quadrilateral ranging algorithm is designed. The system adopts ZigBee technology and consists of wireless sensor network with CC2530 as the main control chip. In the localization module, the sensor node is composed of a mesh network topology, which has the function of information collection, transmission and positioning. Firstly, The positioning algorithm adopts a four-sided ranging positioning algorithm which is different from the traditional three-sided ranging algorithm. The algorithm firstly selects four beacon nodes with the four-sided ranging model. Then USES the weighted mean model to process the RSSI value collected from the same node. Finally, the square of the distance converted from the RSSI value is used as the weighting factor to obtain the unknown node location coordinates. The four-side ranging positioning system has more advantages than the traditional three-side ranging positioning system with higher positioning accuracy and real-time positioning.

**Keywords:** RSSI; ZigBee; CC2530; Mesh network; quadrilateral ranging algorithm; real time positioning

[责任编辑 杨浦 刘洋]