

井下人员无线定位关键技术研究

程文波^{1,2,3}, 王华军²

(1 宜宾学院 物理与电子工程学院, 四川 宜宾 644000;

2 成都理工大学 地球探测与信息技术教育部重点实验室, 四川 成都 610059;

3 宜宾机械电子工程技术研究中心, 四川 宜宾 644000)

摘 要: 针对现有井下人员定位系统亟待解决的功耗、漏检率和定位精度等技术问题, 从探讨基于 ZigBee 通信技术的无线传感器网络体系架构出发, 对人员无线定位系统中的传感器终端设计、定位机制及无线网拓扑等关键技术进行了较为深入的研究, 给出了传感器节点设计、定位算法以及无线组网等工程实现过程, 及各单元模块所采用的技术优化或改进策略, 改善了现有系统的综合性能。

关键词: 无线传感器网络; 系统架构; 定位机制; 网络拓扑; ZigBee 技术

中图分类号: TP393; TD76

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)04-0165-04

The Key Techniques of Mine Personnel Localization System Based on Wireless Sensor Network

CHENG Wen-bo^{1,2,3}, WANG Hua-jun²

(1 School of Physics and Electronic Engineering, Yibin University, Yibin 644000, China;

2 Key Lab of Earth Exploration & Information Techniques of Ministry of Education,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3 Research Center of Mechanical and Electronic Engineering, Yibin University, Yibin, 644000, China)

Abstract: In view of the technical problems about power dissipation, miss rate and localization accuracy of existing mine personnel localization system, starting from the system architecture of wireless sensor network based on ZigBee communication technology, the key techniques of sensor terminal design, localization mechanism and wireless network topology were in-depth researched. In this paper, engineering realization of the sensor node design, localization algorithm and wireless networking technology were given, optimization of technology or improvement of strategies was proposed in each unit module. They can improve the comprehensive performance of the existing wireless sensor localization system.

Key words: WSN; system architecture; localization mechanism; network topology; ZigBee technology

1 引言

矿难事故不仅给矿山带来毁灭性破坏, 也严重威胁着矿工人身安全。如何开展井下环境参数或监控对象的实时监测、感知和采集, 实现实时险情预警和矿难事故时提供较为有效的疏散和搜救策略, 切实保障井下人员生命安全, 一直是矿业安全问题中

的一项热点研究课题^[1-7]。

目前流行的以基于 RFID 为代表的安全定位与监测系统, 由于存在定位精度较低、漏检率偏高、功耗相对较大、终端设备昂贵等技术不足, 因而仍然停留在简单的考勤应用上, 其在救援工作中所能发挥的积极作用存在较大技术提升或突破的空间。

ZigBee 是近年来出现的, 基于 IEEE802.15.4

收稿日期: 2011-05-23; 修回日期: 2011-07-28

基金项目: 四川省教育厅青年基金项目(11ZB145); 宜宾学院重点基金项目(2011Z13); 国家自然科学基金项目(41174092)

无线标准研制开发的,有关组网、安全和应用软件方面的双向无线网络通信技术,具有协议简单、成本低、功耗小、组网简捷等特点,为解决矿业安全问题提供了新的解决方案^[2].针对现有安全定位与监测系统存在的诸多问题,本文从探讨井下无线传感器网络的体系架构出发,对无线定位系统中的几个关键技术进行深入研究,提出具有一定可行性的改进方案,以提升或优化现有系统综合性能及指标.

2 系统架构

根据不同矿山的实际情况和要求的不同,系统的整体架构及井下无线传感器网络的体系结构需要具有易于扩展和方便重构的特点.从系统整体布局与工程实施的实效性,本文提出了如图 1 所示的无线定位系统集成架构.

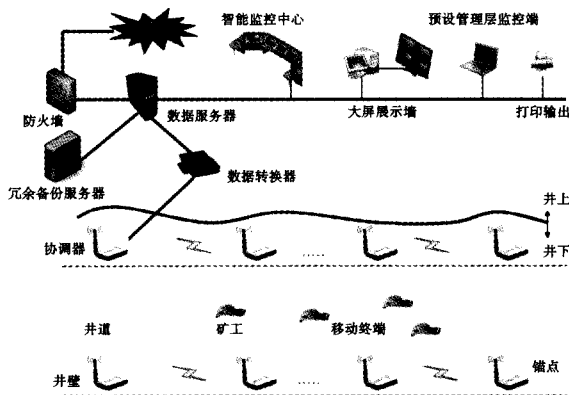


图 1 井下人员无线定位系统整体框架图

在图 1 中,井下无线传感节点(锚点和移动终端)以自组织方式构成无线传感器网络,以协作的方式感知、采集和处理覆盖区域的环境参数(如温度、湿度、震动等,锚点分布于矿道井壁)和目标对象数据(如位置等,传感器由井下人员等实体对象携带),以多跳(Multi-hop)中继的方式将数据传回协调器,最后借助 SINK 链路将数据传送到井上中心数据库进行集中处理.

数据转换器用以实现各种接口的通信协议转换,完成相应接口的无缝对接;冗余备份服务器负责提供数据的备份存储,保证系统在发生故障时能实时恢复原数据或系统.后台系统则主要包括智能监控中心、大屏幕墙展示、预设领导监控端及数据打印输出等部分.

在正常情况下,后台系统能实现数据信息的三维表现、动态访问、实时处理、记录与存储等基本功能;在突发事故时,系统可完成实时险情预警,在矿

难事故发生后,能尽快提供优化的人员安全疏散路径及搜救决策响应,为救援工作的有效展开赢取宝贵时间.

3 技术研究及应用改进

3.1 传感器终端

系统终端选用 TI 公司的低功耗 SoC ZigBee 单片机 CC2430/31 来实现.芯片 CC2430 片内集成增强的 8051 微控制器内核和符合 IEEE802.15.4 标准的 2.4 GHz 射频收发器,具有优良的无线接收灵敏度 and 强大的抗干扰性能,处于休眠模式时整个芯片的流耗小于 $0.9 \mu\text{A}$,从硬件上支持 CSMA/CA 机制,还集成有 ADC、AES 安全协处理器和 USART 等片上外设及丰富的 I/O 口资源,适合用于设计锚点;芯片 CC2431 是带硬件定位引擎的片上系统(SoC),它由 CC2430 加上 Motorola 公司基于 IEEE 802.15.4 标准的无线定位引擎组成,具有 2.4 GHz DSSS(直接序列扩频)射频收发器核心,能够满足低功耗无线定位应用,用于设计便携式移动终端.两款芯片均具备基于 ZigBee 技术的各种底层硬件需求,符合定位系统对终端“体积小、功耗低”的指标要求,通过简单外围电路设计即可实现终端硬件电路设计.

在测试中发现,无线通信信号会受到井下复杂环境的较大干扰,信号衰减明显通信距离受限,很大程度上制约了无线定位传感器网络系统在井下的实际应用.为此,提出在原有节点的基础上,通过采用扩展射频传输距离的方法,提升原定位终端射频模块的发射功率和接收灵敏度,来改善通信距离以提高定位精度.模块框图如图 2 所示.

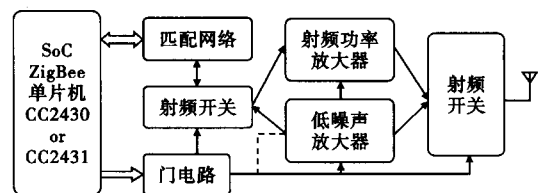


图 2 扩展传输距离的射频模块框图

3.2 定位机制^[4]

基于距离(Range Based Localization, RBL)的定位算法包括测距、定位和修正等基本环节.它是通过测量节点间点到点的距离或角度信息,使用三边测量法、三角测量法或最大似然估计法等来定位自身.

在人员无线定位传感器网络中,测量手段采用

接收信号强度指示(Received Signal Strength Indicator, RSSI),移动终端自身定位方法采用三边测量法(Trilateration Technique).实现过程如下:

(1)测距. RSSI 测距是利用已知发射功率,在接收节点测量接收功率,计算传播损耗,然后使用理论或经验的信号传播模型,将传播损耗转化为距离.根据 Shadowing 模型,井下信道传输模型可近似为公式(1)的对数正态分布信道模型^[7].

$$P(d) = P(d_0) - 10n \lg(d/d_0) \quad (1)$$

式中, $p(d)$ 表示在距移动节点 d 处的参考节点接收到移动节点的 RSSI 信号功率, $p(d_0)$ 表示在参考距离 d_0 处的接收功率, n 为路径损耗指数,是一个与环境相关的值.取 $d_0 = 1$ m,从而得到实际应用中的 RSSI 测距公式(2).

$$\text{RSSI} = P(d) = A - 10n \lg d \quad (2)$$

式中, A 为信号传输 1 m 远处接收信号的功率(dBm),而 n 和 A 值需根据所在矿井下的实际环境来测试获得,不同矿井该组参数会有所变化.

根据统计均值模型,为减小 RSSI 值的随机性,移动终端采集 m 个 RSSI 值求数据均值,如式(3)所示.

$$\text{RSSI} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \text{RSSI}_i \quad (3)$$

在工程应用中,可以通过调节 m 值来平衡实时性与精确性.一般地,当 m 很大时,可以有效解决定位数据的随机性,但通信成本也会相应增加.

(2)定位.在二维空间里,如果移动终端能获得与之相邻的三个锚点的距离 d ,即可使用三边测量法实现移动终端自身定位.

如图 3 所示,若要定位移动终端 D 的位置,先假设 D 的坐标为 (X, Y) ,三个参考节点的坐标和各自到移动终端 D 的相对距离已知(测距部分获得),则可列写方程组(4).

$$\begin{cases} \sqrt{(X - X_a)^2 + (Y - Y_a)^2} = d_a \\ \sqrt{(X - X_b)^2 + (Y - Y_b)^2} = d_b \\ \sqrt{(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2} = d_c \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可得移动终端 D 的自身二维坐标:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(X_a - X_c) & 2(Y_a - Y_c) \\ 2(X_b - X_c) & 2(Y_b - Y_c) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_a^2 - X_c^2 + Y_a^2 - Y_c^2 + d_c^2 - d_a^2 \\ X_b^2 - X_c^2 + Y_b^2 - Y_c^2 + d_c^2 - d_b^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(3)修正.理论上,稳定的 RSSI 值可以使得三个传感器的通信覆盖区域规范地相交于 D 点.然

而,由于实际工程环境中的非视距(NLOS)、反射、信号衰减、噪声干扰、多径传播等因素的存在,极大影响了 RSSI 值的稳定.因此,该方法中的交点往往位于图 3 中的阴影内(如任一点 D'),定位精度下降.

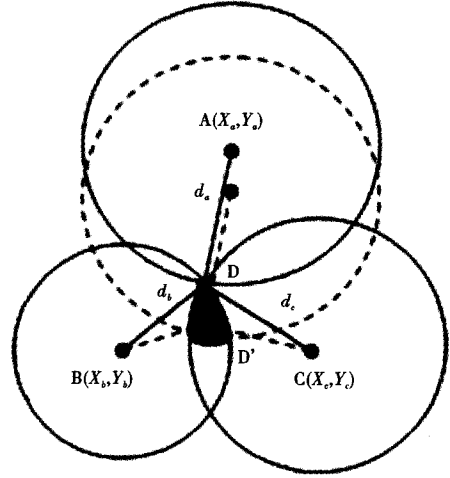


图3 三边测量法理论与实际状况对比图示

考虑到移动终端传感器 CC2431 芯片运算处理能力有限, RSSI 衰减模型需对浮点数取整等自身因素,会给定位精度带来累积误差,作如下修正:(1)将涉及距离相关的数据放大十倍处理;(2)凡涉及除法的运算,采用通分法将除法尽量在最后一环运行;(3)进行去开方运算转换,降低运算复杂度,提高精度.

3.3 无线网拓扑

人员无线定位网络系统主要由 ZigBee 网关(Location Dongle)、参考节点(Reference Nodes)以及盲节点(Blind Nodes)组成. ZigBee 网关即为无线定位系统的网络协调器,主要负责网络的建立、相关配置,以及接收、传输各节点反馈的有效数据;参考节点(锚点)即为无线定位系统中的已知自身坐标节点,充当 ZigBee 网络的路由器,主要负责寻找、建立以及维护网络报文的路由信息,并负责报文的转发;盲节点即为无线定位系统中的移动终端,它通过参考节点定位自身位置,具有加入、退出网络的功能,并可以接收和发送网络报文. ZigBee 网络可以根据应用需要组成基本星型、网状和簇状三种拓扑结构,如图 4 所示.

基本星型结构是一个单跳(Single-hop)系统.在基本星型拓扑中,中心协调器将与所有设备都通信,能耗较大,一般采用电力系统供电,而网络中的路由器实际是不具备路由作用的,各节点间也不传输数

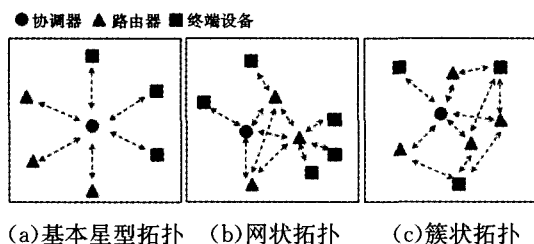


图4 ZigBee 网络拓扑结构

据或命令,供电方式为电池,该结构总体功耗较小,但节点与中心协调器间传输距离有限,因此只适用于小范围的室内应用,无法满足井下要求。

这种多跳系统传输距离远,自愈性好,但其构建较为复杂,节点所要维护的信息较多,由于一直处于“监听”状态,功耗很大,一般适用于野外大规模环境等参数监测。

簇状结构实际是复杂的星型结构。在簇状拓扑中,网络协调器、路由器、终端设备功能清晰,构建简单,所需资源相对较少,并可实现网络的路由转发功能,从而扩大网络通信范围,适宜于井下无线定位系统组网。当然,借用簇状网的拓扑思想,也可以构建其它混合网。

4 结束语

本文针对目前定位系统中存在的诸多问题,从系统整体架构的探讨出发,对人员无线定位系统中

的几个关键技术进行了较为深入的研究,提出具有一定可行性的改进策略,提升或优化现有系统的综合性能及指标,以推动矿业安全的智能化。

参考文献:

- [1] 黄迎辉,李新. 基于 ZigBee 无线网络技术的矿井监测系统[J]. 自动化与仪表, 2010(07): 21-23, 31.
- [2] 朱斌,谭勇. 基于 ZigBee 无线定位技术的安全监测系统[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(06): 1247-1249.
- [3] 安威鹏,沈志广. 基于 ZigBee 矿井人员跟踪定位的方法研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(10/2): 79-81.
- [4] 钟晓玲,徐昌彪. 矿井下基于无线传感器网络的定位机制[J]. 传感技术学报, 2009, 22(08): 1159-1162.
- [5] 黄成玉,李思敏. 基于 ZigBee 技术的矿井人员定位算法研究[J]. 通信技术, 2010, 43(8): 195-198.
- [6] 王森,白文乐. 基于无线传感器网络的 TDOA-CTLS 定位算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(04): 149-152.
- [7] Pichlet M, Sshwarzer S, Stelzer A, et al. Multi-channel distance measurement with IEEE 802.15.4 (ZigBee) devices[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(05): 845-859.

作者简介:

程文波 男, (1979—), 博士生, 讲师. 研究方向为现代信号与信息处理。

(上接第 164 页)

行分类,分类的速度和准确率均得到了提高。从而证实了该方法进行机械缺陷分类的有效性。

参考文献:

- [1] Hossein Ravanbod. Application of neuro-fuzzy techniques in oil pipeline ultrasonic nondestructive testing [J]. NDT&E International, 2005(38): 643-653.
- [2] 李雪,朱杰. 超声探伤信号的神经网络识别[J]. 电子测量技术, 2006, 29(2): 23-25.
- [3] Li Meng, Lu Shuang, Chen Daimin, et al. Application of wavelet-neural network in rolling bearings fault diagnosis[C]// Conference Proceedings of the Seventh International Conference on Electronic Measurement& Instruments. [s.l.]: IEEE, 2005: 604-608.
- [4] 邸新杰,李午申,白世武,等. 焊接裂纹金属磁记忆信号的神经网络识别[J]. 焊接学报, 2008, 29(3): 13-16.
- [5] 李功,黄民. 基于小波包变换的超声回波信号特征提取[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2006, 29(2): 246-249.
- [6] 杨俊,陈贤富. 基于 KPCA 和 RBF 网络的文本分类研究[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(3): 122-125.
- [7] 朱颖东,李红婵. 结合类内集中度和优化 RBF 神经网络的特征选择[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(2): 145-148.
- [8] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 172-181.

作者简介:

刘涛 男, (1972—), 博士. 研究方向为智能信息处理、网络安全。