

文章编号:0253-9993(2011)03-0519-08

巷道网络全局定位系统关键技术分析与实验

刘志高¹,李春文¹,邢智鹏¹,耿少博²,戴文翰³,丁青青²

(1. 清华大学 自动化系,北京 100084;2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084;3. 清华大学 电子工程系,北京 100084)

摘 要:提出并实现了一种新型带盲区的煤矿巷道人员全局定位系统,介绍了国内外煤矿人员定位系统的研究现状,分析了发展带盲区巷道网络全局定位系统的必要性。从系统应完成的目标角度考虑,较全面地分析了全局定位系统中的基本问题、数据模型、拓扑优化及全局定位等关键问题;构建了全局定位原型系统,并对定位系统在地下巷道环境进行了较全面的实验测试。将全局定位系统和现有的煤矿人员定位系统进行了对比分析,结果表明:全局定位系统在功能、定位性能、成本、可靠性和可维护性等方面具有较大优势。

关键词:巷道网络模型;全局定位算法;人员全局定位系统;无线传感器网络
中图分类号:TD655 文献标志码:A

Key issues analysis and experiment of the global positioning system in underground tunnel network

LIU Zhi-gao¹, LI Chun-wen¹, XING Zhi-peng¹, GENG Shao-bo², DAI Wen-han³, DING Qing-qing²

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Proposed a novel personnel positioning scheme in tunnel network with blind areas. Investigated current research of the mine personnel positioning system, and analyzed the necessity of developing a global positioning system with blind areas. Developed a more comprehensive analysis of the basic issues, data model, topology optimization, and global positioning issues of MPGPS. Constructed prototype system and made a comprehensive test in the underground tunnel environment. Compared MPGPS with the existing RFID positioning system and the Zigbee positioning system, MPGPS has some advantages in the function, the positioning precision, the cost, the reliability and maintainability.

Key words: data model of tunnel networks; global positioning method; personnel global positioning system; wireless sensor networks

煤矿人员定位系统作为煤矿安全监控系统核心部分之一^[1],综合利用无线射频技术、数据处理技术、数据通讯技术和地理信息系统技术等,从地面实时监测井下人员和设备的当前位置及行走路径,并对人员及设备的历史信息和未来位置信息提供综合查询和预测,为日常管理和紧急救援提供决策支持。

现有煤矿人员定位系统主要包括两类:基于射频识别技术(RFID)^[2-3]和 Zigbee 技术^[4-5]的系统。RFID 系统通过读取关键通道口的读卡器对人员进行

登记,读卡器位置就作为井下人员位置定位信息。此类系统属于区域定位系统,不能实现人员精确定位。虽然可以通过增加读卡器的数量来提高定位精度,但其安装、管理和维护成本将大大增加。已有 Zigbee 系统(如 KJ272)通过广泛布置的传感器测点收集人员随身携带的射频卡信息对人员位置进行定位,此类系统属于精确定位系统,精度能达到 15 m 以内,但需要全面覆盖巷道网络。现有的人员定位系统均属于登记记录型,即对现场收集的目标位置信息进行登记

记录与历史信息查询,尚不能提供包括未来位置预测及综合位置查询等服务,并且成本昂贵。

无线传感器网络(WSN)已经越来越引起人们重视^[6],并得到了广泛应用^[7-8]。C. Nerguizian 等^[9]对井下巷道环境的信号传输特性、定位问题进行了研究,将基于信号地图(也称地理指纹)的定位方法在井下进行了应用,并利用神经网络方法对信号地图特征进行提取;A. Chehri 等^[10]将超带宽技术(ultra wide band)应用于煤矿井下无线传感器网络,提出了定位算法和优化准则;张申^[11]比较完整地提出矿山综合自动化三层结构模型,并对普通非异质可变空间特性巷道的无线传输特性进行了较深入的研究,并提出了信号传播帐篷定律;刘晓文^[12]对以采煤工作面为代表的有限异质可变空间的无线传输特性进行研究,并搭建了基于 WSN 的矿井综合监控平台;杨维等^[13-14]对新一代全矿井信息系统所涉及的频段利用、人员定位、安全监测等关键技术进行了探索研究;李晶^[15]对井下巷道超高频无线电波传播及定位算法进行了研究;裴忠民^[16-17]提出了煤矿井下人员 3 阶段定位方法。

目前 WSN 在煤矿井下的应用是一个研究热点,但其研究主要集中在局部区域应用上。构建一个全矿井无线传感器网络主要存在如下问题:首先,无线传感器网络组网采用 Ad hoc 组网方式,无线传感器测点需要全面覆盖监控区域,这将引起数据碰撞问题。随着传感器数量增加,距离网关较近的无线传感器将担负繁重数据中继功能,使其过早消耗完自身能量而失效,引起网络通信故障。其次,信号地图方法需要事先实地测量得到训练数据库,并经过复杂训练得到信号地图,在位置估计阶段还要不断更新数据库以避免在位置估计阶段和地图训练阶段出现较大差异,这都增加了系统在井下实际应用的难度。此外,基于超带宽技术的定位系统需要笨重硬件设备和网络初始化标定^[18],将其应用于煤矿需要高昂的成本。

一般来说,矿井大巷长度在几千米至几十千米^[19],由于井下巷道网络的多水平结构,使得巷道累计总长度可达几百千米,甚至上千千米。然而无线传感器节点的感知范围一般为几十米(zigbee 测点的在室内巷道环境有效通信半径约 60 m^[20]),构建覆盖全巷道网络的定位系统成本高昂,并且布置大量测点带来数据拥塞、延时以及管理与维护等问题,都会严重影响其在井下环境的应用。同时,由于井下自然条件恶劣(潮湿、粉尘、塌方等),即使构建了信息完全覆盖系统,也会因系统可靠性或事故原因,使得部分信息覆盖区由于测点故障而不能及时获取到人员定

位信息。为此,为高效管理井下无线传感器测点,需要针对煤矿特点设计出一套满足井下巷道网络人员定位所需的专门方案。

综合以上分析,目前人员定位系统虽然在定位性能上有了较大提升,但对全局定位理论和技术方面尚未展开研究,有很大研究空间和广泛应用价值。为此,本文提出一种基于 WSN 的带盲区巷道网络人员全局定位系统(简称“全局定位系统”),首先通过局部定位区域的无线传感器网络收集监控区域内的人员信息存入数据库,然后根据数据库中存储的全部或局部区域人员位置信息,运用先进数据处理技术和计算方法,实时估计出巷道网络中(监控区域和盲区)所有人员的历史、当前及未来位置信息,提供基于位置、人员、时间等为索引的全方位综合查询服务。该系统平时可以有效协调工作,提高管理水平;事故发生时,可为救援提供准确人员位置信息。本文通过对全局定位系统涉及的关键理论与技术进行研究,提出一套完整的全局定位系统解决方案并进行原型系统设计和实验验证,可以有效解决现有人员定位系统成本高、精度低、服务效果差等问题。

1 构建全局定位系统的基本问题

如何在满足跟踪精度和耗费资源要求的前提下,使得定位精度尽可能提高、定位速度尽可能快捷,而耗费成本尽可能降低则是研究的主要问题。全局定位系统研究的基本问题可归纳如下:

(1) 煤矿人员全局定位系统总体技术。包括构建带盲区全局定位系统需求分析、方案选择、所涉及问题的分解与关键技术论证等。

(2) 全局定位系统建模。构建煤矿巷道网络、人员定位网络和移动人员的数据模型,使得巷道中人员的位置信息简便表达并处理,以满足全局定位系统对人员实时信息的需求。

(3) 定位网络优化布置。主要研究如何在成本耗费最低情况下达到最好定位效果,包括井下骨干有线网络布置和局部无线传感器网络布置问题。

(4) 定位算法设计。可分为局部区域定位算法和全局定位算法。前者主要解决目标原始位置数据采集与滤波;后者主要根据局部区域获取的定位信息,对人员在巷道网络中的全局位置进行估计。如何选择估计的规则和算法则直接关系到系统定位性能的优劣,主要包括轨迹模式挖掘和人员盲区位置预测。

(5) 全局定位数据管理。对人员信息进行全面管理,以满足人们对定位系统全方位的信息需求。其

研究的目的是扩展数据库技术使得在数据库中 can 表示任意的移动对象,可以处理与移动对象位置相关的各种查询,包括索引技术、查询处理技术和移动对象不确定性管理等。

(6) 原型系统软硬件开发与实验。原型系统开发是大型系统开发的必经阶段,通过原型系统开发可以对整体设计进行评估,发现原理设计阶段的问题,为系统的全面应用奠定基础。包括软硬件研制和现场测试实验。

2 关键理论与技术分析

2.1 全局定位系统建模

现有关于煤矿巷道的建模集中在矿山地理信息系统(MGIS)、矿山巷道数据模型和数据结构研究上^[21-23],注重巷道的静态特征,而对井下环境定位网络建模和人员建模研究较少。煤矿井下巷道网络是一个复杂的三维立体网络,网络覆盖面积大,巷道形式多样。如何有效地利用井下巷道网络特点,实时获取并处理巷道网络中的信息是首先要考虑的问题。由于煤矿井下分层开采,每一层都贯穿纵横交错的巷道网络,各层之间通过上下山通道进行连接,这样便形成煤矿特有的多平面(多水平)、巷道式立体相交网络结构。由于矿井多平面开采,采用单平面结构建模显然不能涵盖井下巷道网络的全面信息,不能满足全局定位需要。全立体的网络模型由于涉及截面和地质特征而使得数据模型复杂,没有很好利用煤矿多平面和巷道式特点。

巷道网络建模的目的是为了更好地进行人员全局定位,除了需要对矿井巷道网络进行建模之外,还需要对定位网络以及网络中人员进行建模,使这三者通过数据结构有机地结合起来。充分利用巷道网络之间的关系,使之既能保证煤矿人员定位需要,又不能过于复杂,而增加定位的成本。对这3种网络建立概念模型、逻辑模型与物理数据模型,从而建立一个多层次、多粒度、多目标动静结合的全局定位系统时空数据模型体系。

2.2 定位网络拓扑优化与部署

本文以煤矿为研究对象,涉及井下巷道组成的自然网络、无线传感器网络测点和现场总线共同组成的定位网络。由于井下巷道网络覆盖面积大,巷道网络长,如何在该网络上布设定位网络,以最大限度获取网络信息,以及如何设计出高效的数据结构和方便易行的更新方案,提高系统使用维护的便捷性是全局定位系统的重要研究内容,目前并无合适的表示煤矿井下巷道网络的优化方法。

通过以上分析,亟需从实际出发,考虑煤矿的特点,综合分析定位网络的性能,找出既能够客观反映井下网络实际,又方便易用的优化设计方法,降低系统成本,提升网络性能。为此,以全局定位系统构建成本为优化目标,得出包含测点代价和线缆代价共同组成的骨干传输网络成本优化模型^[24],设计出基于Prim算法的优化方法,实现对无线传感器网络的优化部署。

2.3 全局定位算法

本文主要研究井下巷道网络中人员的全局定位问题,包括对环境适应性强的基于RSSI的局部定位算法,和适用于井下巷道网络的全局定位机制,实时获取井下人员的位置信息,得到任一时刻井下所有人员的全局定位分布,提高定位算法的精度和实用性。由于成本和网络容量等原因,煤矿井下一般是一个带盲区的信息网络。无法通过直接测量得知盲区的人员分布情况,必须综合利用煤矿巷道的数学模型和人员行走轨迹、速度等历史信息,建立起人员行为模型,通过一系列数据处理算法,对人员的位置进行估计,以实时获取井下人员的全局位置信息。由于井下巷道中无线信号存在信号反射、衍射和扩散等多径干扰和非视距问题,造成基于信号强度的定位方法存在较大的误差,增加了研究难度。

本文提出一种区域预测与速度矢量预测相结合的全局定位方法。基于每日信息的人员轨迹模式挖掘与预测是全局定位算法关键环节之一。利用数据挖掘方法自动发现人员周期性轨迹模式,不需要事先根据不同人员人工设定其工作路径,提高了定位系统智能化水平,增加了系统通用性。在某种意义上,可以根据路径长度来对未来路径进行选择,其好处是可以应用已有最短路径算法(比如Dijkstra算法)得到一个理论上最优的运动路径。而实际上,人员行走路径选择会更为复杂,道路安全性、通行舒适性、路径长度、坡度以及个人喜好等都将影响到路径选择。这些因素影响结果表现为人员的实际行为,而且这些行为已经通过定位系统存储在数据库中。因此,更为有效的方法是通过数据挖掘从人员历史信息发现人员行为规律,得到人员的轨迹模式^[25],以此来进行目标的未来位置预测。这样则可以最大限度地利用已有信息,使预测结果更加贴近实际。

全局定位算法^[26]是在两种粒度下逐步求精的预测办法:粗粒度下对未来目标区域进行预测和细粒度下对具体位置坐标进行预测。该方法包括:

(1) 通过局部定位区域内的无线传感器网络,对经过定位区域的人员进行位置计算,并将此位置信息

上传到监控中心。

(2) 利用巷道几何特征和人员行走速度约束设计出简易滤波算法,解决由于多径反射、衍射等造成的定位信息不准问题,减少位置误差。

(3) 由于局部定位区域得到的位置信息是二维局部坐标,需利用巷道空间特征对其进行二、三维变换,使其变成三维全局坐标。

(4) 把人员全局位置坐标进行聚合,将其运动轨迹表示为一系列区域标识组成的位置序列。利用数据挖掘技术找到人员行为轨迹,得到人员轨迹模式,以此来预测区域,估计出未来时间人员将出现的定位区域。

(5) 基于轨迹模式的区域预测仅得到当前及未来人员可能出现的区域,而具体位置并不知,需根据(4)得到的轨迹模式和速度信息进行位置点预测。当预测产生下一个目标区域后,在其局部定位区域内,根据上一时刻采样得到的速度和方向信息,然后利用路段的物理特征,模拟出人员在此路段的移动速度,以此对盲区位置进行估计。

在信息覆盖区中,采用点和边的表达方式,网络中每个点都具有明确的欧氏坐标 (x, y, z) ,公式表示为 $G=(V, E)$,其中 V 表示所有结点、节点组成的集合; E 表示结点、节点之间连线组成的集合。在进行信息盲区人员位置预测时则采用路径和交点的表示方式 $N=(R, J)$,其中 R 表示所有路径组成的集合; J 表示路径之间的交点集合。即指出“某人员位于某条路径上距某位置多远的距离”。全局定位流程图 1 所示。

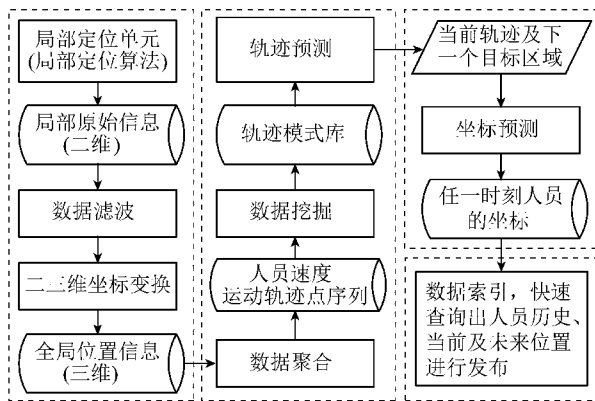


图 1 全局定位流程

Fig. 1 The flow of global positioning

如何挖掘出适合煤矿巷道特征的人员运动规则,和局部定位区域内的位置信息滤波,并以此来提高全局定位精度是又一难点。

2.4 系统软硬件开发与实验验证

对于工业现场应用的人员定位系统来说,不但要

具备精准的定位性能,还要具有极高的可靠性和耐用性。煤矿井下自然环境恶劣,湿度、粉尘等,极易损坏测点。射频芯片工作在高频段,对硬件的电磁兼容性要求很高。这要求传感器节点不仅要同时具备防震、防潮、防尘等措施,还要符合煤矿安全防爆标准、具备良好的可维护性和可扩展性等。研制成功后,还需要进行大量的可靠性测试和现场测试,这些都给系统软硬件设计提出诸多挑战。

3 原型系统开发

3.1 系统总体设计

考虑到在井下巷道环境下,很难通过全球定位系统(GPS)来实现对巷道人员的定位,因此设计了基于无线传感器网络的全局定位系统,主要由参考节点、网关、基站、上位计算机、远程监视平台和人员随身携带的移动节点组成。

如图 2 所示,按功能全局定位系统大体上可以分为 3 层,即现场监控层、上位监控层和远程监视层。现场监控层主要包括移动节点、参考节点、网关和基站。移动节点不断计算出自身位置,通过多跳路由方式传送到网关。网关把得到的人员原始位置信息通过 RS-485 总线传送到基站,进而通过 CAN 现场总线传送到上位计算机。上位监控层不断从 CAN 接口接收从基站发送来的数据包,并对这些数据包进行分类、分析、计算和可视化处理。远程监视层又可以分为 3 层,即数据库服务器层、Web 服务器层和浏览器服务器层,采用客户端/服务器模式。数据库服务器和 Web 服务器与上位计算机间通过局域网(Intranet)进行连接,遵从 TCP/IP 协议;远程监控计算机通过互联网连接 Web 服务器,通过浏览器查看监控系统监控到的各种统计信息。

3.2 现场监控层设备

如前所述,基站为井下多个定位单元的汇集点,对原始定位信息不做处理,功能相对单一。本部分主要对网关、参考节点、移动节点进行说明。

(1) 网关。为定位单元中心,其硬件实物如图 3(a)所示。网关由包括微处理器和天线的主板和包括液晶显示器和通信接口的底板组成。微处理器和射频部分位于主板上。微处理器(CC2430^[27])完成人员定位信息的收发和配置信息的传送。底板上主要包括电源、通信接口、液晶显示和选择按键等相关电路。网关将多个人员定位单元通过 RS-485 总线连接到一起组成人员定位网络。

(2) 参考节点。放置在网关设备无线信号覆盖范围内,任务是提供一个包含自己位置 x, y 坐标和

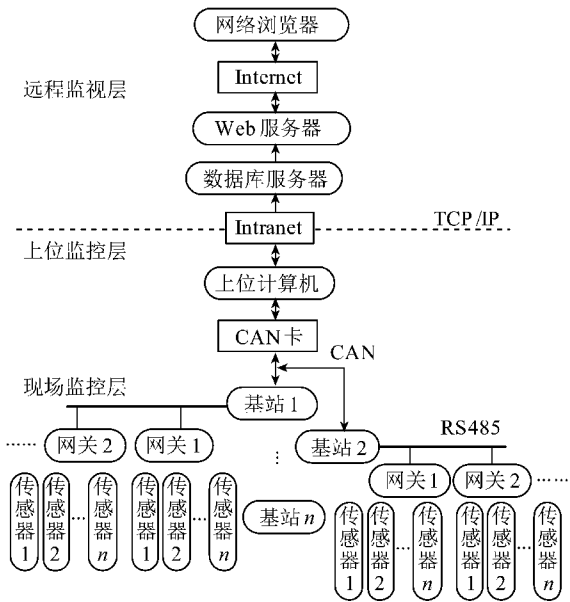


图2 全局定位系统结构

Fig. 2 Architecture of MPGPS

RSSI值的信息包给移动节点。参考节点硬件实物如图3(b)所示,由电源底板和主板组成。

(3)移动节点。主要完成对井下移动人员的实时位置运算。它能够与一跳通信范围内的参考节点通话,收集这些节点的 x,y 坐标和RSSI值,并根据这些信息和输入参数 A,n 一起计算其位置信息发送给网关,具体操作流程参照文献[28]。移动节点实物如图3(c)所示。移动节点主板电路微处理器选用带定位引擎的芯片CC2431^[29]。

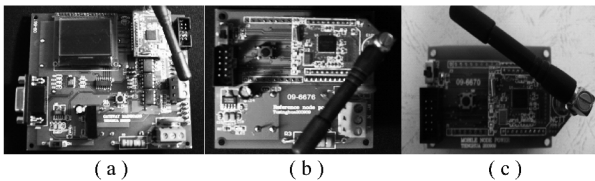


图3 网关实物、参考节点和移动节点

Fig. 3 Gateway,reference node and mobile node

3.3 上位监控平台

上位监控平台软件主要由数据采集模块、数据验证和信息提取模块、数据存储模块和数据显示模块组成。

(1)数据采集模块。上位计算机连续运行数据采集程序,通过CAN卡接收从基站发送来的信息包。数据接收程序会自动对接收到的数据包增加时间戳,然后将接收包中的局部定位单元数据坐标转换为全局坐标,以便数据包验证和信息提取模块进行处理。

(2)数据包验证和信息提取模块。主要负责数据采集模块消息的处理。主要包括数据的预处理模

块、状态更新模块、以及人员全局定位分析模块。

(3)数据存储模块。主要负责对信息的存储操作,包括将节点状态信息、移动节点定位确定信息的插入、更新等。

(4)数据显示模块。完成煤矿巷道网络拓扑结构的自动生成并图形显示。操作人员可以对网关、参考节点和移动节点进行设置,显示移动人员的当前位置、历史轨迹等。

3.4 远程监视软件

远程监视平台主要任务是实时显示当前网络状况,其中包括网关、参考节点、移动节点状态、定位信息等。客户端使用者可以通过远程监视平台了解网络信息,查询井下人员当前及历史信息等。全局定位系统软件结构如图4所示。

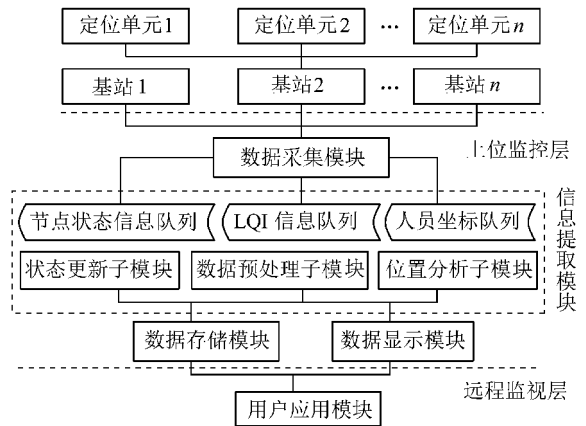


图4 MPGPS软件结构

Fig. 4 Software structure of MPGPS

4 定位系统实验与对比分析

4.1 实验测试

如图5(a)所示,在地下巷道环境对定位系统进行了实验测试。实验系统由1个定位单元(即1个网关、4个参考节点和1个移动节点)和1台上位计算机(即笔记本电脑1台:Windows 7操作系统,Intel Core 2 Duo 1.8 GHz微处理器,2 GB内存,320 GB硬盘)。上位计算机通过RS232线缆与定位单元的网关相连。图5(b)为工作中的参考节点,图5(c)为定位单元的布置实景。

巷道中的平均温度为13℃,平均相对湿度大于100%,巷道宽度为1.8 m,长度约为160 m,与真实煤矿中的自然环境条件基本相同。分别以巷道的长度方向和宽度方向为 x 轴和 y 轴,以巷道的入口为坐标原点建立坐标系。4个参考节点分别布置在巷道的两侧,坐标为 $R1(0,0)$ 、 $R2(0,1.75)$ 、 $R3(10,0)$ 、 $R4(10,1.75)$,移动节点在巷道中的定位区域运动,

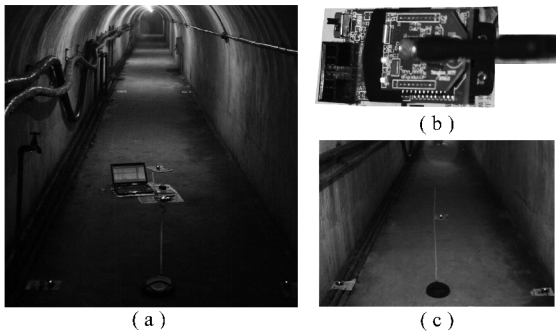


图 5 巷道中定位系统布置

Fig. 5 The deployment of MPGPs in a underground tunnel

上位计算机运行定位软件记录移动节点的位置信息。

实验 1 定位精度实验。移动节点中环境参数 A 设定为 40, n 设为 3.875, 测试结果见表 1 和图 6 (为增加测量结果的客观性, 在每个位置分别进行了 10 次重复实验, 然后对测试结果取平均值)。

表 1 定位精度结果
Table 1 The experiment test results m

采样点	真实值	测试值	误差
Loc1	(0,0)	(2.1,0)	2.1
Loc2	(0,1.8)	(0.4,2.0)	1.3
Loc3	(2.0,1.0)	(1.3,2.4)	1.9
Loc4	(4.0,1.0)	(3.1,2.7)	1.9
Loc5	(5.0,1.0)	(4.8,1.0)	0.2
Loc6	(10,0)	(9.9,0)	0.1
Loc7	(10,1.0)	(10,1.0)	0

表 1 中的误差定义为

$$E_{rr}(i) = \sqrt{(x_{real}(i) - x_{est}(i))^2 + (y_{real}(i) - y_{est}(i))^2}$$

平均误差定义为

$$\bar{E} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E_{rr}(i)$$

式中, (x_{real}, y_{real}) 表示真实位置; (x_{est}, y_{est}) 表示测量结果; m 表示采样点的数量。

如图 6 所示, 移动节点在位置 (0,0) 的定位误差最大为 2.1 m, 平均误差为 $\bar{E} = (2.1 + 1.3 + 1.9 + 1.9 + 0.2 + 0.1) / 7 = 1.1$ m。

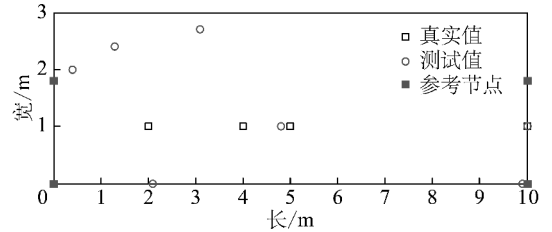


图 6 定位精度实验

Fig. 6 Static positioning performance

实验 2 环境参数 A 对定位性能影响的实验。基于 RSSI 的定位精度会受到环境参数 A 和 n 的影响。 A 表示距参考节点 1 m 处的接收信号强度值; n 表示信号强度的衰减指数。在巷道环境中分别进行了环境参数 A 和 n 对定位精度的影响实验。首先, 将 n 设定为 3.875, 将 A 由 30 逐步增大到 45, 观察定位精度。测量结果见表 2。

从表 2 实验结果可以看出, 当 A 取值为 40 或 45 时, 定位误差明显降低。当 $A=40$ 时, 5 个采样点的平均误差为 $(2.1 + 2.1 + 0.5 + 2.4 + 0.7) / 5 = 1.56$ m, 当 $A=45$ 时, 5 个采样点的平均误差为 2.42 m。

实验 3 环境参数 n 对定位性能影响的实验。实验中, 设定 A 为 40, 然后将 n 从 3.375 到 4.625 变化, 测量各个采样点的定位结果, 测试结果见表 2。

表 2 实验结果和误差
Table 2 The experiment test results and error m

环境参数	测量参数	Loc1	Loc2	Loc3	Loc4	Loc5
A	真实值	(0.2,1.0)	(3.0,1.0)	(5.0,1.0)	(7.0,1.0)	(9.0,1.0)
	测量值和误差(A=30)	(1.8,5.5),4.8	(0.3,8.8),8.3	(5.2,8.1),7.1	(3.1,8.9),8.8	(13.8,4.6),6.0
	测量值和误差(A=35)	(3.4,0.4),3.2	(1.6,6.6),5.7	(5.7,4.2),3.3	(4.3,6.7),6.8	(12.8,3.1),4.3
	测量值和误差(A=40)	(2.3,0.6),2.1	(3.7,2.9),2.1	(5.5,1.1),0.5	(5.0,2.4),2.4	(8.4,0.6),0.7
	测量值和误差(A=45)	(2.5,0.1),2.4	(3.5,0),1.1	(8.6,4.3),4.9	(5.0,0),2.2	(7.6,0.4),1.5
n	真实值	(3.0,1.0)	(5.0,1.0)	(7.0,1.0)	(9.0,1.0)	
	测量值和误差(n=3.375)	(0.3,4.8),4.4	(7.4,4.9),4.6	(4.4,6.2),5.8	(11,3.7),3.4	
	测量值和误差(n=3.625)	(0,4.4),4.5	(6.8,5.8),5.1	(4.4,3.1),3.3	(9.3,4.0),3.0	
	测量值和误差(n=3.875)	(3.7,2.9),2.1	(5.5,1.1),0.5	(5.0,2.4),2.4	(8.4,0.6),0.7	
	测量值和误差(n=4.125)	(2.7,0),1.1	(6.0,1.3),1.0	(5.0,0.4),2.1	(7.3,2.5),2.3	
	测量值和误差(n=4.375)	(3.0,0),1.0	(6.0,1.0),1.0	(5.0,0),2.2	Overrun	
测量值和误差(n=4.625)	(3.0,0.1),0.9	(6.8,1.6),1.9	(5.0,0),2.2	Overrun		

从表 2 实验结果可以看出,定位精度随着 n 的变化而变化。当 n 取值为 3.875 和 4.125 时,定位系统在巷道中的定位误差较小。当 n 为 3.875 时,平均定位误差为 1.43 m, n 为 4.125 时的平均定位误差为 1.63 m。

4.2 MPGPs 和已有 RFID、Zigbee 系统的比较

将 MPGPs 与已有的 RFID 定位系统(如 KJ280^[30])和 Zigbee 定位系统(如 KJ272^[4])进行对比。MPGPS 在功能、定位性能、成本、可靠性和可维护性等方面都具有较大优势,见表 3。

表 3 MPGPs、KJ280 和 KJ272 系统的对比
Table 3 The comparison of MPGPs, KJ280 and KJ272

系统	KJ280	KJ272	MPGPS
架构	总线结构	分簇结构	带盲区的分簇-总线分层混合结构
主要功能	位置记录;位置查询	位置记录;位置查询	位置记录;位置查询;位置预测
定位方法	基于射频识别技术	基于接收信号强度的定位方法	全局定位方法;局部位置定位、信息滤波、全局坐标变换、区域位置预测与盲区坐标位置预测
定位精度	区域定位,不能提供具体位置坐标	$\leq \pm 15$ m	$\leq \pm 3.0$ m(覆盖区域); $\leq \pm 4.5$ m(盲区)
成本	高	高	低
可靠性	一般	较差	较高
供电	市电	电池	市电和电池共同供电
维护性	高级 RFID 读卡器结构复杂,成本昂贵,维护性较差	需要在巷道放置大量的路由节点保持无线信号的联通,导致系统的可靠性和可维护性较差	具有大量的信息盲区不需要放置传感器测点,导致传感器数量大大降低,使得系统整体维护性大大提高

5 结 论

提出并实现了一种带盲区煤矿井下人员全局定位系统,该系统能够在测点网络非完全覆盖定位区域的情况下实现井下人员的全局定位,降低了成本。本文特别对定位系统在巷道环境进行了实验研究,分别对环境参数 A 和 n 进行了对比实验,实验结果表明,基于 RSSI 的定位方法的定位精度受环境参数的影响较大,但针对实际的环境进行参数校正后,会得到比较准确的定位结果。当 $A = 40$, $n = 3.875$ 时,在地下巷道环境的定位误差最小,定位误差基本在 3 m 以内,基本满足井下人员定位的需求。

参考文献:

[1] Yu Limin, Li Anqi, Sun Zheng, et al. Design of monitoring system for coal mine safety based on wireless sensor network[A]. Proceeding of IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications[C]. 2008;409-414.
 [2] Chen Peng, Zhao Chunhua. Area wireless sensor networks for personnel location under coalmine[A]. Proceeding of Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications[C]. 2007;2 882-2 885.
 [3] Zhang Qinghua, Wang Bo, Cheng Guoquan, et al. Object position tracking based on E-map and RFID in coal mine[A]. Proc. 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2009)[C]. 2009;880-885.
 [4] KJ272 矿用人员定位系统[EB/OL]. <http://yiritech.com/GB/>

ProShow.asp? ProID=127,2010-05-08.
 [5] KJ323 矿用人员定位管理系统[EB/OL]. <http://www.dlgdkj.com/cpzs.html>,2010-05-08.
 [6] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, Dipak Ghosal. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks (Elsevier), 2008, 52:292-330.
 [7] Stuart G Taylor, Kevin M Farinholt, Eric B Flynn, et al. A mobile-agent-based wireless sensing network for structural monitoring applications[J]. Meas. Sci. and Technol., 2009, 20(4):1-32.
 [8] Kuang X, Feng R, Shao H. A lightweight target-tracking scheme using wireless sensor network[J]. Meas. Sci. and Technol., 2008, 19(2):1-7.
 [9] Chahè Nerguizian, Charles Despins, Sofiène Affès. Geolocation in mines with an impulse response fingerprinting technique and neural networks[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2006, 5(3):603-611.
 [10] Abdellah Chehri, Paul Fortier, Pierre Martin Tardif. UWB-based sensor networks for localization in mining environments[J]. Ad Hoc Networks(Elsevier), 2009(7):987-1 000.
 [11] 张 申. 帐篷定律与隧道无线数字通信信道建模[J]. 通信学报, 2002, 23(11):41-50.
 Zhang Shen, Tent law and modeling of radio digital communication channel in tunnel[J]. Journal of China Institute of Communication, 2002, 23(11):41-50.
 [12] Liu Xiaowen, Wang Manyi, Wen Jinchao, et al. Transmission performance of 2.4 GHz wireless sensor nodes when used in a working-face environment[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(2):185-188.
 [13] 杨 维, 周嗣勇, 乔 华. 煤矿安全监测无线传感器网络节点定位技术[J]. 煤炭学报, 2007, 32(6):652-656.

- Yang Wei, Zhou Siyong, Qiao Hua. Node localization in wireless sensor networks for coal mine security monitoring [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32 (6): 652-656.
- [14] 杨 维, 冯锡生, 程时昕, 等. 新一代全矿井无线信息系统理论与关键技术[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 506-509.
- Yang Wei, Feng Xisheng, Cheng Shixin, et al. The theories and key technologies for the new generation mine wireless information system [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 506-509.
- [15] 李 晶. 井下巷道超高频无线电波传播及定位算法的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- Li Jing. Research on the UHF radio wave propagation and location algorithms in mine tunnels [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [16] 裴忠民, 邓志东, 巫天华, 等. 矿井无线传感器网络三阶段定位方法[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 87-92.
- Pei Zhongmin, Deng Zhidong, Wu Tianhua, et al. A novel three-phase localization method in coal mine wireless sensor networks [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 87-92.
- [17] 裴忠民. 煤矿井下多媒体无线传感器网络定位方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2010.
- Pei Zhongmin. Research on localization method for underground multimedia wireless sensor network in coal mines [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [18] Oppermann I, Stoica L, Rabbachin A, et al. UWB wireless sensor networks: UWEN-A practical examples [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42: 27-32.
- [19] 刘晓文. 基于 WSN 的煤矿井下监控网络平台关键技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009: 26.
- Liu Xiaowen. Research on the key technologies of WSN-based underground monitoring network platform in coal mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009: 26.
- [20] 田 丰, 郭 巍, 王传云, 等. 基于 Zigbee 技术的煤矿井下 GIS 辅助定位算法[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1 442-1 446.
- Tian Feng, Guo Wei, Wang Chuanyun. Assistant localization algorithm of underground GIS based on Zigbee [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1 442-1 446.
- [21] Mao Shanjun. Research in data model of coalmine GIS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1998, 27(4): 331-337.
- [22] 马荣华, 黄杏元, 贾建华, 等. 矿山地理信息系统中巷道模型的研究 [J]. 测绘学报, 2000, 29(4): 355-362.
- Ma Ronghua, Huang Xingyuan, Jia Jianhua, et al. Study of laneway model in GIS for mine [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000, 29(4): 355-362.
- [23] 崔春香, 张新利. 矿山地理信息数据模型研究 [J]. 太原理工大学学报, 2008, 39(3): 281-284.
- Cui Chunxiang, Zhang Xinli. Study of data model of MGIS in mine [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2008, 39(3): 281-284.
- [24] 刘志高, 李春文, 丁青青, 等. 煤矿人员定位系统拓扑优化模型 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 329-332.
- Liu Zhigao, Li Chunwen, Ding Qingqing, et al. Coal mine personnel positioning system topology optimization model [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 329-332.
- [25] Gökç Yavaş, Dimitrios Katsaros, özgür Ulusoy, et al. A data mining approach for location prediction in mobile environments [J]. Data & Knowledge Engineering, 2005, 54(2): 121-146.
- [26] 刘志高, 李春文, 耿少博, 等. 带盲区巷道网络人员全局定位系统 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(S0): 236-242.
- Liu Zhigao, Li Chunwen, Geng Shaobo, et al. A personnel global positioning scheme in underground tunnel networks with blind areas [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S0): 236-242.
- [27] CC2430 data sheet (rev. 2.1) SWRS036F [EB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2430.pdf>, 2010-08-13.
- [28] Aamodt K. Application note AN042 (Rev. 1.0): CC2431 location engine [EB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/an/swra095/swra095.pdf>, 2010-08-13.
- [29] CC2431 data sheet: system-on-chip for 2.4 GHz ZigBee/ IEEE 802.15.4 with location engine [EB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2431.pdf>, 2010-08-13.
- [30] KJ280: 煤矿人员定位系统 [EB/OL]. http://www.zkhw.cn/frontwb/product_1.html, 2010-05-08.