

文章编号: 0253 - 9993(2010) 07 - 1229 - 05

信标节点链式部署的井下无线传感器网络定位算法

乔钢柱^{1, 2} 曾建潮²

(1. 兰州理工大学 电信学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 太原科技大学 系统仿真与计算机应用研究所, 山西 太原 030024)

摘 要: 针对煤矿井下巷道狭长, 信号多径效应明显, 接收信号强度 (RSSI) 测距算法受井下环境影响大, 定位精度低的情况, 提出了一种信标节点链式部署结构下的动态 RSSI 测距算法, 该算法以信标节点间的距离和他们间测量到的 RSSI 值为参考, 计算巷道内实际环境下的路径衰落指数, 以提高 RSSI 测距算法对环境的适应性。实验结果表明, 在相同的实验环境下, 该算法定位精度优于 RSSI 定位算法, 能够满足井下人员定位的要求。

关键词: 无线传感器网络; 井下人员定位; 链式部署; 接收信号强度; 路径衰落指数

中图分类号: TD676 文献标志码: A

Localization algorithm of beacon nodes chain deployment based on coal mine underground wireless sensor networks

QIAO Gang-zhu^{1, 2}, ZENG Jian-chao²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Division of System Simulation and Computer Application, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Since the coal mine tunnels were always very long and narrow, multipath effects of radio signal in tunnels were produced and low positioning accuracy of received signal strength indicator (RSSI) location algorithm was achieved. A dynamic RSSI location algorithm was proposed based on the beacon nodes chain deployment of tunnel wireless sensor networks and the algorithm took the distance and the corresponding RSSI between the adjacent beacon nodes into account to calculate the actual path loss parameter in the tunnel, thus improving the environmental adaptation of the location algorithm. The simulation shows that the effect of proposed method is more precise than RSSI under the same environment and can meet the requirements of underground person position.

Key words: wireless sensor network; underground people position; chain deployment; received signal strength indicator (RSSI); path loss parameter

我国煤矿地质条件复杂, 存在较多安全隐患, 导致矿难频发, 而传统的有线监测系统无法满足井下全方位安全监测的要求。无线传感器网络 (wireless sensor network) 由于具有成本低廉、功耗小、部署简单、无需现场维护等特点, 可实现各种危险区域的低成本无人连续监测^[1], 目前在煤矿安全生产中已将其应用于煤矿井下人员定位和环境监测中。由于井下人员定位和环境监测都建立在位置信息的基础上, 缺乏了位置信息这些应用将毫无意义, 因此建立可靠

实用的煤矿井下人员定位算法, 不仅能够合理地调配资源, 当矿难发生时还能够提供位置信息便于及时展开救援, 对于提高煤矿安全生产管理水平有着重要的现实意义。

在煤矿井下人员定位算法的相关研究领域, 许多的节点定位算法已被提出。河南理工大学的张治斌等提出了基于 RSSI 测距的加权质心算法^[2]; 中国科技大学的汪炆等在加权质心算法的基础上提出了用固定节点间的距离和 RSSI 值校正移动节点与每个固

定节点间权值的定位算法^[5]; 武汉科技大学的周祖德、王晟针对 DV-HOP 算法通信开销大的问题, 设计了一种基于 DV-HOP 算法和概率栅格方案的新节点定位算法^[6]; 武汉理工大学的韩屏等提出了一种基于无线信号传播时间 TOSP(Time of Signal Propagation) 的地下坑道定位算法^[5]; 北京交通大学的田洪现等提出了一种信号强度的经验值和信道估计相结合的 RSSI 强度值匹配定位算法^[6]; 加拿大的 Abdel-lah Chehri 等提出了一种基于信号到达时间 TOA(Time of Arrival) 的煤矿井下定位算法^[7]。中国矿业大学的刘晓文等通过理论与实验相结合, 提出了一种基于 RSSI 算法的信号强度插值算法^[8]。

在这些定位算法中质心算法和 DV-HOP 算法属于非测距的算法^[9], 他们无需测量节点间的距离和角度信息, 主要通过节点间的连通性和多跳路由信息交换等方法来进行距离的估算, 最终实现节点位置的估计, 质心算法和 DV-HOP 算法对网络布局、节点密度要求较为严格, 信标节点应均匀部署网络的外侧, 节点密度对定位精度影响较大; TOSP、AOA、RSSI 属于基于测距的算法, 主要通过测量节点间的距离或者信号到达的角度, 经过计算后可得到节点的位置, TOSP、AOA 算法虽然在性能上可以获得较满意的定位精度, 但会受到成本、功耗上的一些限制。

RSSI 强度值匹配定位算法需要建立一个容量的信号强度分布数据库, 并及时更新, 维护工作量较大。RSSI 算法根据节点接收到的信号强度, 计算出信号的传播损耗, 利用无线信号传播的理论或经验模型将传输损耗转化为距离, 然后估算出节点的位置, 由于目前大多数的节点都有 RF 发射能力, RSSI 算法无需增加任何额外的硬件设备, 成本低廉、能耗低, 而且在井下 50 m 范围内 RSSI 定位是有效的, 因此采用 RSSI 算法进行井下人员定位是可行的^[8]。

由于煤矿井下空间狭小, 无线通信环境差, 多径效应明显, 信号衰落快, 而 RSSI 受环境的影响较大, 用相同的节点对和相同的距离在不同的环境下测出的 RSSI 值差别可能非常大; 即使在同一环境间隔相同的距离, 但不同的区域或不同的方向都会导致 RSSI 值不同^[5]; 井下巷道内的空气流动、温度变化、人员和机车的通过, 都将引起某点的信号强度的变化, 从而导致 RSSI 算法定位精度不是令人非常满意, 有可能产生 $\pm 50\%$ 的测距误差^[9]。而在无线传播模型中环境对无线信号衰减的影响主要体现在路径衰落指数上, 传统的 RSSI 测距算法中路径衰落指数通常选用固定的经验值, 无法反映出井下不同区域对无线信号的影响程度, 导致测距误差较大。

本文结合井下巷道信标节点的布局, 将信标节点间的实际距离和信号强度与作为参考, 计算巷道环境内每个信标节点的动态路径衰落指数, 大大增加了系统对于井下不同环境的适应性, 提高了算法的精度。

1 无线信号传播模型

无线传感器网络研究中基本的无线信号传播模型有 3 种: 自由空间(Free-Space) 模型、双向地面反射(Two-Ray Ground Reflection) 模型、屏蔽(Shadowing) 模型^[10]。自由空间模型和双向地面反射模型都将通信环境描述成理想环境, 通信范围描述为理想的圆; 通过接收到的信号能量确定信号的传播距离。但实际上由于信号的褪色效应, 在某个距离上接收到的信号能量是个随机值, 因而这两种模型并不适用于实际环境。

由于屏蔽模型对理想的圆形模型进行了扩展, 采用了更加符合实际环境的统计模型, 综合性更强, 因此在研究中被广泛的应用。研究表明, 尽管煤矿内部环境复杂, 但煤矿安全监测布局无线传感器网络节点间传输可用屏蔽模型来表示^[2]。

屏蔽模型有两部分组成: 第 1 部分是路径损耗(path loss) 模型, 它以一个接近发送端的距离 r_0 处的平均接收功率作为参考, 预测出在距离 r 上的平均接收功率, 其公式为

$$\frac{\rho_r(r_0)}{\rho_r(r)} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^\beta \quad (1)$$

式中 β 为路径损耗指数, 通常取经过实际测量得到的经验值。

从式(1)可以推导出距离 r 的计算公式为

$$r = r_0 \left(\frac{\rho_r(r_0)}{\rho_r(r)}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2)$$

屏蔽模型的第 2 部分指出, 在固定距离上节点接收的信号能量符合对数正态随机变化。

其模型公式为

$$\left(\frac{\rho_r(r_0)}{\rho_r(r)}\right)_{\text{dB}} = -10\beta \lg \left[\frac{r}{r_0}\right] + \psi \quad (3)$$

其中 ψ 是个无实际意义的随机变量。通过实验计算得知, 不计算 ψ 对测量结果影响不大, 因此为了计算简单, 本文采用了简化的路径损耗模型^[11], 即

$$\left(\frac{\rho_r(r_0)}{\rho_r(r)}\right)_{\text{dB}} = -10\beta \lg \left[\frac{r}{r_0}\right] \quad (4)$$

2 井下巷道信标节点部署方式

从屏蔽模型中知道路径损耗指数 β 反映的是环境因素对无线电能量消耗的指数, 障碍物越多则 β 越

大,随着距离的增加接收到的平均能量下降速度就会越来越快。井下环境复杂,变化快,各处的路径衰落指数不同,测距时采用固定的经验值进行计算则会带来较大的误差,因此获取准确的 β 对于 RSSI 定位算法影响较大。如果能够利用网络中已知信息动态获得巷道内的 β ,将会大大提高定位精度。因此本文中提出将测距算法与巷道信标节点部署方式相结合,提出了一种动态 β 获取算法。

由于井下巷道狭小细长,不利于无线固定节点(这些节点由于位置固定且已知,称之为信标节点)的部署^[21],因此在本系统中巷道内信标节点采用链式密集部署,将信标节点只安装在有立柱的一侧,在主巷道内可间隔 200 m、坑道中可间隔 50 m 等距安装信标节点。由于信标节点均匀间隔且密集,每个信标节点至少可以与邻近的 4 个节点通信;巷道内信标节点连续编号,如图 1 所示。

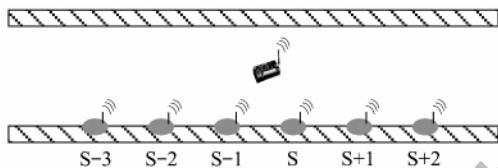


图 1 巷道内信标节点部署

Fig. 1 The deployment of beacon nodes in tunnel

3 人员定位算法详细描述

本文中由于相邻信标节点间的距离已知,可周期性测量邻居信标节点间的信号强度,将其带入无线信号传播模型中求出当前环境下每个信标节点的路径衰落指数。当移动节点需要定位时,可选取强度值最大的若干个信标节点,获取这些信标节点的路径衰落指数,根据传播模型计算出与信标节点的距离。本算法由动态路径衰落指数获取算法和改进的 RSSI 定位算法两部分组成。

3.1 动态路径衰落指数获取算法

由于巷道内信标节点间距离已知,通过定期记录信标节点间的信号强度,应用屏蔽模型便可计算出每个信标节点的路径衰落指数,假设信标节点间的距离为 M ,算法过程如下:

- (1) 巷道中每个信标节点周期性发送自身信息:节点 ID、自身位置信息。
- (2) 当信标节点接收到其他信标节点信息后,根据节点编号判断发送节点是否是其邻近的 4 个节点,若是,则记录这 4 个邻近节点发送的 RSSI 均值。如图 1 所示,信标 S 分别记录均值 \bar{R}_{S-2} 、 \bar{R}_{S-1} 、 \bar{R}_{S+1} 、 \bar{R}_{S+2} 。

- (3) 当信标节点接收到超过阈值的邻居信标节点的信息后,根据式(5)计算出新的 β ,并代替掉信标保存的原有 β 。

$$\beta = \frac{\lg(\rho_r(r_0)) - \lg(\rho_r(r))}{\lg(r) - \lg(r_0)} \quad (5)$$

式中, $\rho_r(r_0) = \frac{\bar{R}_{S-1} + \bar{R}_{S+1}}{2}$; $\rho_r(r) = \frac{\bar{R}_{S-2} + \bar{R}_{S+2}}{2}$; $r = 2M$, $r_0 = M$ 。

算法中 β 根据实际环境中信号衰减计算得到,能够精确地反映出巷道不同区域对信号衰落的影响,将其带入路径损耗模型中可获得较准确的结果。

3.2 改进的 RSSI 定位算法

当移动节点需要定位时,移动节点根据信标节点与其通讯时的信号强度,选取信号强度最大的信标节点进行距离估算,详细的过程如下:

- (1) 当移动节点需要确定自己位置时,会向周围信标节点发送定位请求信息包。
- (2) 当信标节点收到移动节点的定位请求后,会向移动节点返回一个自身信息包:节点 ID、 β 、 $\rho_r(r_0)$ 、距离 M 。
- (3) 当移动节点收到信标节点的信息包后,记录同一信标的 RSSI 平均值。
- (4) 当移动节点收到 N 个超过信号强度阈值的信标节点信息后,将其按照 RSSI 值从大到小排列。
- (5) 选取其中 $K(K \geq 3, K < N)$ 个 RSSI 最大的信标节点,运用路径衰减模型,带入式(2)估算出移动节点到其距离。
- (6) 当移动节点获取了与 K 个信标节点的距离后,用极大似然估计等方法估算出移动节点的坐标 (\hat{x}, \hat{y}) 。

最后定义横向误差 E_1 、纵向误差 E_2 、点位误差 E ,假设移动节点的实际坐标为 (x, y) ,则误差值为

$$E_1 = |\hat{x} - x| \quad (6)$$

$$E_2 = |\hat{y} - y| \quad (7)$$

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (8)$$

4 仿真实验及结果分析

采用 Matlab 模仿巷道环境对本算法进行了定位仿真,并与 RSSI 定位算法进行了对比。在一个长为 1 km 的狭长带状区域沿底部一侧每间隔 20 m 部署一个信标节点,节点的通信半径为 50 m,巷道宽度分别为 10、8、5、3 m 分别进行了 10 000 次仿真实验。采用动态 β 算法的仿真结果见表 1。采用 RSSI 定位算法的仿真结果见表 2。

表 1 动态 β 算法仿真结果Table 1 The simulation results of dynamic β parameter location algorithm

误 差	巷道宽度/m				
	10	8	5	3	
横向误差	最大值	3.918 0	4.240 0	4.750 9	4.150 3
	平均值	0.562 6	0.623 5	0.804 8	0.986 9
	标准差	0.557 3	0.591 6	0.682 8	0.733 7
纵向误差	最大值	1.938 8	2.136 5	1.926 6	1.858 3
	平均值	0.250 8	0.245 9	0.242 3	0.240 2
	标准差	0.200 4	0.198 7	0.192 6	0.192 4
点位误差	最大值	3.972 6	4.361 4	4.983 9	4.261 6
	平均值	0.669 7	0.719 6	0.882 0	1.047 3
	标准差	0.530 8	0.566 5	0.657 2	0.714 3

表 2 RSSI 算法仿真结果

Table 2 The simulation results of RSSI location algorithm

误 差	巷道宽度/m				
	10	8	5	3	
横向误差	最大值	8.116 0	7.104 2	7.227 4	8.374 5
	平均值	0.818 8	0.917 0	1.161 0	1.421 1
	标准差	0.791 8	0.819 4	0.930 4	0.998 3
纵向误差	最大值	6.047 0	4.109 7	4.481 5	4.444 0
	平均值	0.579 0	0.558 7	0.539 9	0.532 8
	标准差	0.483 9	0.460 8	0.452 3	0.449 8
点位误差	最大值	8.971 8	8.086 6	8.504 1	9.480 6
	平均值	1.112 4	1.175 6	1.362 9	1.568 3
	标准差	0.793 3	0.809 1	0.923 0	1.021 1

定位误差中横向误差是点位误差的主要来源,由 RSSI 测距误差带来^[3]。随着巷道宽度减小无线信号的折射、衍射增加,多径效应明显,信号衰减严重,因而误差有所增加;纵向误差主要与巷道宽度有关,因而随着巷道宽度减小误差随之减小。仿真结果表明,采用动态 β 算法系统最大横向误差小于 4.8 m,最大纵向误差小于 2.1 m,最大点位误差小于 5.0 m;平均横向误差小于 1.0 m,平均纵向误差小于 0.3 m,平均点位误差小于 1.1 m。而 RSSI 定位算法的点位误差和横向误差均比动态 β 算法的结果较大。

从表 3 中可以看出,巷道宽度为 3 m 时动态 β 算法定位误差落在 1.5 m 范围内的概率为 75.64%,而 RSSI 算法却只有 54.23%。总体上,动态 β 算法的定位精度比 RSSI 算法更能够满足井下人员定位的要求。

表 3 两种算法仿真结果比较

Table 3 The comparison of two algorithms' simulation results

参 数	巷道宽度/m				%
	10	8	5	3	
误差改	均值	39.794 9	38.790 2	35.288 2	33.223 3
进比率	标准差	33.097 0	29.983 2	28.803 7	30.043 0
动态 β 算	<1.0 m	81.57	78.02	67.52	56.23
法误差概率	<1.5 m	91.88	90.44	83.85	75.64
RSSI 算法	<1.0 m	55.59	50.87	42.30	35.65
误差概率	<1.5 m	77.71	74.01	65.46	54.23

5 结 论

针对煤矿井下巷道环境复杂、无线信号多径效应明显,传统 RSSI 定位算法误差较大的情况,提出了一种在巷道信标节点链式部署方式下利用信标节点间的距离和信号强度值获取当前环境下的路径损耗指数计算方法。与 RSSI 算法相比,动态 β 算法的定位平均误差和标准差分别减少了 33% 和 28% 以上,仿真实验结果表明,动态 β 算法优于 RSSI 算法,大大地提高了定位的准确性。

参考文献:

- [1] Chen Kai, Zhou Yi, He Jianhua. A localization scheme for underwater wireless sensor networks [J]. International Journal of Advanced Science and Technology, 2009, 4(9): 9-16.
- [2] 张治斌,徐小玲,阎连龙. 基于 Zigbee 井下无线传感器网络的定位方法 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 125-128.
Zhang Zhibin, Xu Xiaoling, Yan Lianlong. Underground localization algorithm of wireless sensor network based on Zigbee [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 125-128.
- [3] 汪 炆,黄刘生,肖明军,等. 一种基于 RSSI 校验的无线传感器网络节点定位算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(1): 59-62.
Wang Yang, Huang Liusheng, Xiao Mingjun, et al. Localization algorithm for wireless sensor network based on RSSI-verify [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2009, 30(1): 59-62.
- [4] 周祖德,王 晟. 一种适用于复杂环境的无线传感定位算法研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(11): 121-124.
Zhou Zude, Wang Sheng. An improvement nodes localization scheme in complex condition [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(11): 121-124.
- [5] 韩 屏,李方敏,吴学红. 一种基于无线传感器网络的实用性地下坑道定位方法 [J]. 传感技术学报, 2007, 20(10): 2 313-2 318.
Han Ping, Li Fangmin, Wu Xuehong. Practical localization method used for underground tunnel based on wireless sensor network [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(10): 2 313-

- 2 318.
- [6] 田洪现, 杨 维. 基于无线局域网的矿山井下定位技术研究 [J]. 煤炭科学技术 2008, 36(5): 72-75.
Tian Hongxian, Yang Wei. Research on mine underground positioning technology based on wireless local area network [J]. Coal Science and Technology 2008, 36(5): 72-75.
- [7] Abdellah Chehri, Paul Fortier, Pierre Martin Tardif. UWB-based sensor networks for localization in mining environments [J]. Ad. Hoc. Networks 2009, 7: 987-1 000.
- [8] 刘晓文, 王振华, 王淑涵, 等. 基于 RSSI 算法的矿井无线定位技术研究 [J]. 煤矿机械 2009, 30(3): 59-60.
Liu Xiaowen, Wang Zhenhua, Wang Shuhan, et al. Study of WSN localization based on RSSI in coal mine [J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(3): 59-60.
- [9] 王福豹, 史 龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法 [J]. 软件学报 2005, 16(5): 1 148-1 157.
Wang Fubao, Shi Long, Ren Fengyuan. Self-localization systems and algorithms for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 1 148-1 157.
- [10] 刘喜梅, 张 超, 胡继珍. 一种复杂环境下无线传感器网络定位算法 [J]. 青岛科技大学学报 2006, 30(2): 173-178.
Liu Ximei, Zhang Chao, Hu Jizhen. A localization algorithm in complex environment for wireless sensor networks [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology 2006, 30(2): 173-178.
- [11] Shamir A. 无线电传播简介: 专用术语, 室内传播和路径损耗及实例 [J]. 今日电子 2002(S1): 26-30.
Shamir A. An introduction to radio waves propagation: generic terms, indoor propagation and practical approaches to path loss calculations including examples [J]. Electronic Products China 2002(S1): 26-30.
- [12] Chen Guangzhu, Zhu Zhencai, Zhou Gongbo, et al. Sensor deployment strategy for chain-type wireless underground mine sensor network [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18: 561-566.
- [13] 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): 1 142-1 146.
Tian Feng, Guo Wei, Wang Chuanyun, et al. Assistant localization algorithm of underground GIS based on Zigbee [J]. Journal of China Coal Society 2008, 33(12): 1 142-1 146.

2010 年《煤炭学报》征订启事

《煤炭学报》是中国煤炭学会主办的、向国内外发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科学研究成果论著和学术论文, 以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结, 也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值, 被 Ei、IEA Coal Abstract CD-ROM、中国科学引文数据库、科学技术文摘速报(日本)、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖, 获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖, 获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖, 获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获首届国家期刊奖。2004-2007 年分别入选第三、第六届百种中国杰出学术期刊。2008 年荣获“中国精品科技期刊”称号。2009 年荣获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。

《煤炭学报》深受广大作者、读者的爱护和支持, 也受到各级部门的重视, 在学术水平上具有较高的地位, 很多单位都将在《煤炭学报》发表的论文作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊, 每期 176 页, 每册订价 31 元, 全年共收费 372 元。欲订阅者可直接与本编辑部联系, 编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址: 北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 邮政编码: 100013

联系电话: (010) 84262930 联系人: 毕永华

E-mail: mtxbbyh@126.com mtxb@vip.163.com