

文章编号:1671-251X(2017)11-0063-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.11.013

基于 RSSI 的偏移误差修正的井下定位算法

侯倍倍, 宋玉龙, 曹硕

(中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:针对基于 RSSI 的加权质心定位算法会出现三边测量区域选择错误、只是用节点之间的距离信息衡量信标节点的影响力,忽略了各条信号传输路径中误差的标准偏差也不同的问题,提出了一种基于 RSSI 的偏移误差修正的井下定位算法。该算法结合加权质心定位算法思想,采用 RSSI 测距模型测量节点之间的距离。在获得节点间的距离信息后,通过对测距误差中随机变量的标准偏差进行概率分布分析来衡量节点间的测距误差,并对随机变量进行偏移误差修正,最终获得较高精度的定位效果。仿真结果表明,与加权质心定位算法相比,该算法的定位精度提高了 19%,定位结果的稳定性也有较大程度的改善。

关键词:井下定位;加权质心定位算法;渐变模型;信号强度;标准偏差;误差修正

中图分类号:TD655 文献标志码:A 网络出版时间:2017-10-27 09:13

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20171027.0913.013.html>

An underground positioning algorithm of offset error correction based on RSSI

HOU Beibei, SONG Yulong, CAO Shuo

(School of Information and Control Engineering, China University of
Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract:In view of problems that the weighted centroid positioning algorithm based on RSSI would appear error of three-side measuring area selection, only use distances between nodes to measure influence of beacon nodes, but neglect standard deviations of errors in every signal transmission path are different, an underground positioning algorithm of offset error correction based on RSSI was proposed. The algorithm combines with the idea of weighted centroid positioning, and uses RSSI distance model to measure distance between nodes. After obtained the distance information, it can measure the distance error between nodes through probability distribution analysis of standard deviation of the random variables in the ranging error, and then corrects the offset error of the random variables, finally obtains the positioning results with higher precision. The simulation results show that the positioning accuracy improves 19% compared with the weighted centroid positioning algorithm, and the stability of positioning results also has great improvement.

Key words: underground positioning; weighted centroid positioning; Shadowing model; signal strength; standard deviation; error correction

收稿日期:2017-05-25;修回日期:2017-09-12;责任编辑:张强。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801808)。

作者简介:侯倍倍(1992—),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为矿井通信与监控、通信网等,E-mail:1147117436@qq.com。

引用格式:侯倍倍,宋玉龙,曹硕.基于 RSSI 的偏移误差修正的井下定位算法[J].工矿自动化,2017,43(11):63-69.

HOU Beibei, SONG Yulong, CAO Shuo. An underground positioning algorithm of offset error correction based on RSSI[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(11): 63-69.

0 引言

精确的井下定位技术是煤矿大数据物联网技术研究的主流^[1]。目前,定位技术大致分为 2 类:基于测距的定位技术和基于非测距的定位技术^[2]。基于测距的定位技术主要有基于到达角度(Arrive of Angle, AOA)、基于到达时间差(Time Difference of Arrival, T-DOA)、基于接收信号强度指示(Receive Signal Strength Indication, RSSI)及基于飞行时间(Time of Light, TOF)等方法。这些方法主要是在测得节点间距离和角度信息的基础上,结合最大似然估计法、三边测量法等测出未知节点的位置信息。基于非测距的定位技术主要有质心定位技术(Centroid Algorithm, CA)、DV-Hop (Distance Vector-Hop)定位技术等。基于非测距的定位方法通常是按照无线传感器网络中节点的通信半径、无线网络连通度和节点间跳数来实现的,相比较基于测距的定位方法,该定位方法在对硬件的需求上有很大的降低,但对定位精度的改善也较少。一直以来,如何提高定位精度是众多学者研究的问题之一。文献[3]提出了质心算法,该算法通过测量未知节点获取邻居锚节点的位置信息,取这些锚节点所组成区域的质心作为未知节点的坐标。随着定位技术的发展,一些学者提出了加权质心定位算法^[4-6],其利用节点间距离信息引入了权值,能够显著提高定位的精度。文献[7]将 RSSI 测距和加权质心定位算法相结合,提出基于 RSSI 的加权质心定位算法来提高定位的精度。分析这些定位方法可知,采用 RSSI 测距并求取目标区域加权质心定位算法较好地兼顾了定位的精度和计算量^[8]。但是这种算法中,求取质心首先需要确定目标区域,而现有的三边测量定位算法中往往会出现区域选择错误的情况,甚至在某些情况下出现三边测量无重叠的区域(三边测量定位技术中根据测距的影响会出现这样的问题)。同时,基于 RSSI 的加权质心定位算法只是利用了节点之间的距离信息来衡量信标节点的影响力,而忽略了各条信号传输路径中误差 X_{σ_i} 的标准偏差 σ_i 也是不同的^[9]。而实际中标准偏差的不同也会增大定位误差,因此,本文在基于 RSSI 的加权质心定位算法的基础上,设计了一种基于 RSSI 的偏移误差修正的定位算法。在测得节点间的距离后,把标准偏差 X_{σ_i} 的误差影响考虑在内,利用统计

学知识,分析了测距误差的概率分布特征,通过建立数学模型解决了随机变量所带来的测距误差影响。通过仿真实验分析可知,在同种环境下,在 100 次定位计算中,偏移误差修正定位算法的定位精度比加权质心定位算法的定位精度平均提高了 19%,且多次定位效果较平稳,有着更好的定位效果。

1 定位算法理论基础

1.1 井下定位环境模型

从煤矿井下的实际环境角度出发,人员、机车多在巷道中作业,其他的特殊区域相对较少。因此,本文实验采用的井下定位模型将模拟井下的巷道环境来进行锚节点的布置,如图 1 所示。

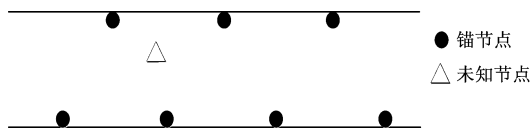


图 1 井下定位模型

Fig. 1 Underground positioning model

本文模拟实验着重按照三角形样式的拓扑结构布置相关锚节点,以减小定位误差带来的影响,改善定位效果。

1.2 接收信号强度指示

接收信号强度指示^[10]是一种节约能量、性价比高的测距技术。其测距原理是根据信号的衰减程度,选用合适的信道传输模型,将收发节点之间的信号衰减换算为对应的信号传播距离,然后依据转换的距离进行节点定位。在之前的定位研究中,无线电传播路径损耗模型^[11]主要有自由空间传播模型、Hata 模型、Motley 模型、渐变模型等。其中,自由空间传输模型是理想化的,认为发送者和接收者之间是直线路径传播,忽略了现实复杂环境中存在的障碍物、多径等因素。通过综合考虑,实际环境中多采用渐变模型来进行测距。

1.3 基于信号传播理论的渐变模型

在 RSSI 定位算法研究中,信号传播损耗模型多利用渐变模型。而大量研究也表明,由于在实际应用环境中存在多径、绕射、障碍物等因素,渐变模型也相对合理。本文将采用符合高斯分布的渐变模型进行定位分析^[12]。

$$P_L(d_i) = P_L(d_0) + 10n \lg \frac{d_i}{d_0} + X_{\sigma_i} \quad (1)$$

式中: $P_L(d_i)$ 为经过 d_i 距离后的路径损耗能量; $P_L(d_0)$ 为经过参考距离 d_0 后的路径损耗能量; n 为

信道衰减指数。

1.4 加权质心定位算法

加权质心定位算法^[12]的核心思想:通过获得锚节点到未知节点间的距离信息,为每个锚节点赋予相应的权值,通过改变权值来体现不同锚节点对质心位置的影响力。由于传统加权质心定位算法中,各锚节点对质心的影响是通过赋予权值系数进行衡量的,在一定程度上,权重系数分配的不合理性会影响定位精度。

本文结合加权质心定位算法的思想,在获得节点间的距离信息后,通过对测距误差中随机变量的标准偏差进行概率分布分析来减小测距误差带来的定位影响,并对随机变量进行偏移误差修正,最终获得较高精度的定位结果。

2 偏移误差修正定位算法

2.1 测距误差分析

用 P_T 表示发射点的信号强度,由渐变模型可知, d_i 处节点接收信号强度,即发射点的信号强度减去 d_i 距离后的路径损耗强度为

$$P_i(d_i) = P_T - P_L(d_i) = P_T - P_L(d_0) - 10n \lg \frac{d_i}{d_0} - X_{\sigma_i} \quad (2)$$

由式(2)通过数学变形得

$$d_i = d_0 10^{\frac{P_T - P_L(d_0) - P_i(d_i) - X_{\sigma_i}}{10n}} \quad (3)$$

实际定位中,随机变量 X_{σ_i} 未知,可以用式(4)估计 d_i 的值:

$$\hat{d}_i = d_0 10^{\frac{P_T - P_L(d_0) - P_i(d_i)}{10n}} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)分析可知,随机变量 X_{σ_i} 的不确定性是导致测距误差的主要原因。在现实定位过程中,随机变量 X_{σ_i} 的影响难以消除,从而在三边测量过程中的3个圆通常不会交于一点,其原理如图2所示。图中 O_1, O_2, O_3 是3个锚节点所在位置。

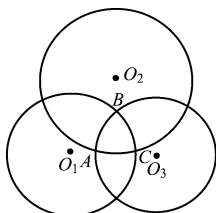


图2 三圆相交原理示意

Fig. 2 Schematic diagram of intersection of three circles

理论上,如果在某次测距中已知随机变量 X_{σ_i} 的值,那么可以根据式(3)计算得到准确的距离 d_i ,

此时图2中的圆 O_1, O_2, O_3 将变为图3中虚线所示的圆,半径依次为 d_1, d_2, d_3 的3个圆交于同一点 D , D 点即为未知节点的准确位置。

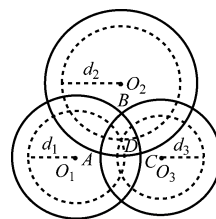


图3 图2随机变化后的分析

Fig. 3 Analysis of figure 2 after random changes

2.2 算法思想

偏移误差修正定位算法根据加权质心定位算法思想,利用RSSI测距模型进行锚节点和未知节点间的测距,在测得节点间的距离后,从另一个角度出发,根据实际定位随机变量 X_{σ_i} 对测距定位的影响,对模型中随机变量进行统计学分析,分析其概率分布特征,最终减小测距误差,实现定位。其具体过程:首先一次选取3个锚节点向未知节点发送信号,然后根据RSSI的测距模型分别计算3个锚节点与未知节点的距离 $\hat{d}_i$ 和实际距离 d_i ,分别以3个锚节点为圆心,以测得估计距离为半径作实线圆,测得实际距离为半径作虚线圆。接着利用统计学对测距误差进行概率特征分析,最终获得较好的定位效果。图4为某次基于接收信号强度定位模型中以锚节点 O_1, O_2, O_3 为圆心,以按式(4)测距得到的距离 $\hat{d}_i$ 为半径作3个实线圆。基于上一节的分析,若假设此次定位中随机变量 X_{σ_i} 已知,则可以作出图中所示的3个虚线圆并交于一点 D ,连接 O_1D, O_2D, O_3D 并延长,分别与3个实线圆交于 E, F, G 三点。锚节点坐标为 $O_1(x_1, y_1), O_2(x_2, y_2), O_3(x_3, y_3)$ 。

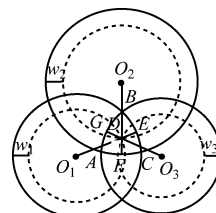


图4 某次基于接收信号强度定位的模型

Fig. 4 Model based on received signal strength positioning

设锚节点 O_1, O_2, O_3 对未知节点测距的绝对误差依次为 w_1, w_2, w_3 , (x, y) 为 D 点坐标,则有

$$\begin{cases} DE = w_1 \\ DF = w_2 \\ DG = w_3 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)可以改写为

$$\frac{DE}{w_1} = \frac{DF}{w_2} = \frac{DG}{w_3} \quad (6)$$

式中 $w_i = \hat{d}_i - d_i, i=1,2,3$ 。

由式(3)和式(4)计算得

$$w_i = \hat{d}_i \left(1 - 10^{-\frac{X_{\sigma_i}}{10n}}\right) \quad (7)$$

由图4模型可知:

$$\begin{cases} DE = \hat{d}_1 - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \\ DF = \hat{d}_2 - \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} \\ DG = \hat{d}_3 - \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} \end{cases} \quad (8)$$

所以,可以由式(6)~式(8)求解出未知节点的坐标。但是,由于式(7)中 X_{σ_i} 是未知的随机量,所以仍然无法求出测距误差 w_i 的具体值。由式(6)可知,只需得出 w_1, w_2, w_3 三者的比例关系即可得到未知节点的坐标,也就是需要寻找一种可以衡量 w_1, w_2, w_3 之间大小关系的方法。近似于式(7),即求 T_i 使得:

$$\begin{cases} w_1 \approx kT_1 \\ w_2 \approx kT_2 \\ w_3 \approx kT_3 \end{cases} \quad (9)$$

式中: k 为一个比例常量; T_i 为近似衡量 w_i 大小的一个相关量。

因为 X_{σ_i} 是随机变量,所以本文将从概率上对 w_i 进行分析,并找到衡量测距误差大小的方法。

2.3 测距误差的衡量

继续分析式(7),测距绝对误差 w_i 是一个随机值,该值受随机变量 X_{σ_i} 影响,可以根据 X_{σ_i} 的概率分布^[3]求得 w_i 的概率密度分布。

已知 X_{σ_i} 的概率分布为

$$P(X < x_{\sigma_i}) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}\right) dx \quad (10)$$

根据式(7),可求得 w_i 概率分布为

$$F_D(w_i) = P(W < w_i) = P\left(\hat{d}_i \left(1 - 10^{-\frac{X_{\sigma_i}}{10n}}\right) < d_i\right) = P\left(X > 10n \lg\left(1 - \frac{w_i}{\hat{d}_i}\right)\right) \quad (11)$$

令 $X' = \frac{X}{\sigma_i}$, 则 X' 符合正态高斯分布:

$$P(W < w_i) = P\left(X > 10n \lg\left(1 - \frac{w_i}{\hat{d}_i}\right)\right) =$$

$$P\left[X' > \frac{10n \lg\left(1 - \frac{w_i}{\hat{d}_i}\right)}{\sigma_i}\right] = 1 - \Phi\left[\frac{10n \lg\left(1 - \frac{w_i}{\hat{d}_i}\right)}{\sigma_i}\right] \quad (12)$$

对该概率分布函数,在置信度为 95% 时的情况下求其置信区间,可得

$$\hat{d}_i \left(1 - 10^{-\frac{1.96\sigma_i}{10n}}\right) < w_i < \hat{d}_i \left(1 - 10^{-\frac{-1.96\sigma_i}{10n}}\right) \quad (13)$$

式(13)的物理意义:如果在某次测距中根据式(4)得到的计算距离为 $\hat{d}_i$, 那么真实距离 d_i 有 95% 的概率落在图5中的圆环形阴影区域内。

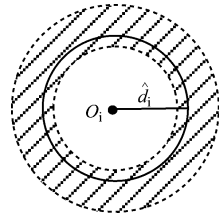


图5 真实距离落在阴影区域分析示意

Fig. 5 Analysis chart of real distance in the shadow region

该区域范围内最大测距绝对误差为 $\hat{d}_i \left(1 - 10^{-\frac{1.96\sigma_i}{10n}}\right)$, 其值为正; 最小测距绝对误差为 $\hat{d}_i \left(1 - 10^{-\frac{1.96\sigma_i}{10n}}\right)$, 其值为负。则可以用式(14)来近似衡量图4中 w_i 的大小。

$$T_i = \left| \hat{d}_i \left(1 - 10^{-\frac{1.96\sigma_i}{10n}}\right) \right| + \left| \hat{d}_i \left(1 - 10^{-\frac{-1.96\sigma_i}{10n}}\right) \right| = \hat{d}_i \left(10^{-\frac{1.96\sigma_i}{10n}} + 10^{-\frac{-1.96\sigma_i}{10n}}\right) \quad (14)$$

式(14)表明,锚节点与未知节点之间估计距离越大、随机变量 X_{σ_i} 的标准差越大,则概率上该锚节点的某次测距误差就越大。反之,锚节点与未知节点之间估计距离越小、随机变量 X_{σ_i} 的标准差越小,则概率上该锚节点的某次测距误差就越小。因此,式(6)可转换为

$$\frac{DE}{T_1} = \frac{DF}{T_2} = \frac{DG}{T_3} \quad (15)$$

将式(8)、式(14)代入式(15)得

$$\begin{aligned} \frac{\hat{d}_1 - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}}{\hat{d}_1 \left(10^{-\frac{1.96\sigma_1}{10n}} + 10^{-\frac{-1.96\sigma_1}{10n}}\right)} &= \\ \frac{\hat{d}_2 - \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2}}{\hat{d}_2 \left(10^{-\frac{1.96\sigma_2}{10n}} + 10^{-\frac{-1.96\sigma_2}{10n}}\right)} &= \\ \frac{\hat{d}_3 - \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2}}{\hat{d}_3 \left(10^{-\frac{1.96\sigma_3}{10n}} + 10^{-\frac{-1.96\sigma_3}{10n}}\right)} & \end{aligned} \quad (16)$$

最后,由式(16)解得未知节点的坐标 (x,y) 。因为式(16)有多对解,所以方程求解后还应对坐标进行筛选,具体选择方法在算法流程中论述。

3 算法流程

假设3个锚节点坐标为 $O_1(x_1,y_1),O_2(x_2,y_2),O_3(x_3,y_3)$,其测距标准差依次为 $\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$,未知节点接收到3个锚节点的信号强度值依次为 P_1,P_2,P_3 ,则对未知节点的定位过程如下:

- (1) 根据式(4)计算出未知节点到各个锚节点的估计距离 $\hat{d}_1,\hat{d}_2,\hat{d}_3$ 。
- (2) 根据估计距离和锚节点测距标准差,由式(15)计算出 T_1,T_2,T_3 。
- (3) 设未知节点坐标为 (x,y) ,由式(16)求解出未知节点坐标的多组可能解 (a_j,b_j) ;对可能坐标进行筛选,得到多组可能的坐标解后,分别计算它们与3个锚节点的距离:

$$L_{ij} = \sqrt{(x_i - a_j)^2 + (y_i - b_j)^2}$$

- (4) 对每一组解,用该点到各个锚节点的距离分别减去各个锚节点的测距值,得到差值后取绝对值并求和,即求 $K_j = \sum_{i=1}^3 |L_{ij} - \hat{d}_i|$;比较 K_1,K_2,K_3 的大小,取最小 K_j 所对应的解 (a_j,b_j) 作为未知节点的估计坐标。

4 仿真与分析

仿真基于 MatlabR2012b 平台,将仿真区域设置在 $100\text{ m}\times 15\sqrt{3}\text{ m}$ 的区域,模拟井下主巷道环境。选取3个锚节点,为使3个锚节点尽量等价,将其按照正三角形的特点摆放,坐标依次为 $O_1(0,0),O_2(15,15\sqrt{3}),O_3(30,0)$ 。设 $P_T=4\text{ dB}\cdot\text{m},P_{(d_0)}=55\text{ dB}\cdot\text{m},d_0=1\text{ m},n=2$,锚节点信号强度值测量次数 $m=6$ 。通过仿真对偏移误差修正定位算法与加权质心定位算法的性能进行分析。

4.1 算法性能分析

选择一点作为未知节点,用不同的锚节点测距标准差仿真3次,每次分别用加权质心定位算法和偏移误差修正定位算法仿真定位100次(仿真100个节点的误差)。假设该未知节点坐标为 $(20,10)$,3次仿真中3个锚节点对未知节点测距标准偏差分别为 $[1\ 1.5\ 2],[1.5\ 1.5\ 1.5],[2\ 1.5\ 1]$ 。仿真结果见表1。

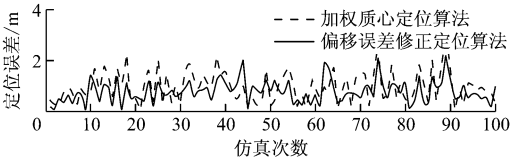
由表1可知,在相同的仿真环境下,当考虑到测

表1 2种算法在不同测距标准差时的仿真结果
Table 1 Simulation results of two algorithms under different ranging standard error m

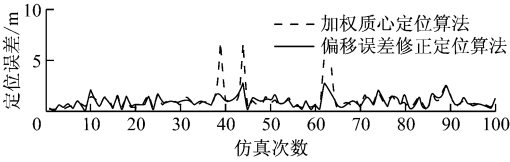
误差	[1 1.5 2]		[1.5 1.5 1.5]		[2 1.5 1]	
	加权质	偏移误	加权质	偏移误	加权质	偏移误
	心定位	差修正	心定位	差修正	心定位	差修正
	算法	定位算法	算法	定位算法	算法	定位算法
平均误差	0.970 1	0.786 6	1.076 9	0.930 3	1.613 2	1.021 8
最大误差	3.410 2	2.320 2	7.301 5	2.728 6	8.376 8	3.511 3
最小误差	0.064 3	0.054 0	0.060 8	0.033 0	0.036 4	0.049 6

距标准偏差时,采用偏移误差修正定位算法比加权质心定位算法所得的定位误差小,这是因为偏移误差修正定位算法对偏移误差进行了修正,使得定位效果更准确。另外,从最大与最小误差数据对比中可以看出,偏移误差修正定位算法比加权质心定位算法稳定性好。

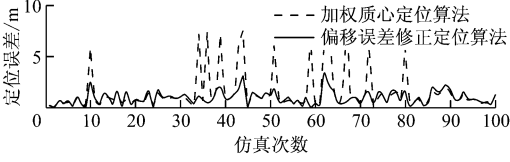
偏移误差修正定位算法与加权质心定位算法的误差对比如图6所示。仿真中,未知节点到3个锚节点的实际距离依次为 $[22.4\ 16.7\ 14.1]$,如图6(a)所示的锚节点测距标准差为 $[1\ 1.5\ 2]$,100次定位计算中,偏移误差修正定位算法定位精度比加权质心定位算法平均提高了19%。图6(b)和图6(c)考虑了定位过程中2种特殊的标准差分布情况,这些情况下相对于加权质心定位算法而言,



(a) 锚节点测距标准差为 $[1\ 1.5\ 2]$



(b) 锚节点测距标准差为 $[1.5\ 1.5\ 1.5]$



(c) 锚节点测距标准差为 $[2\ 1.5\ 1]$

图6 偏移误差修正定位算法与加权质心定位算法误差对比曲线

Fig. 6 Error comparison curve between offset error correction positioning algorithm and weighted centroid positioning algorithm

偏移误差修正定位算法也有着更好的性能。如在图 6(b)中,3 个锚节点测距标准差相同,采用加权质心定位算法定位偶尔会出现误差突然增大的现象^[13],这主要是由于算法未能正确选择求取质心的目标区域,而偏移误差修正定位算法可以避免这种现象的发生,定位结果更加稳定和准确。如图 6(c)所示,3 个锚节点测距标准差与实际距离成正比,可以看出,采用加权质心定位算法时上述现象更加突出,偏移误差修正定位算法的稳定性也更加明显。

此外,为了更直观地反映偏移误差修正定位算法的性能,此次实验又与比较常见的加权质心定位算法、三边测量定位算法的误差进行了对比,仿真结果如图 7 所示。

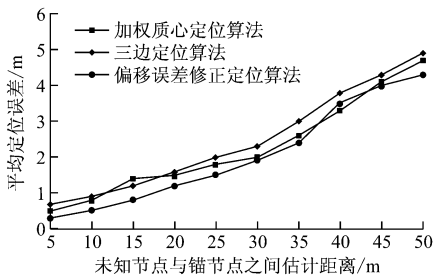


图 7 不同估计距离下 3 种定位算法平均定位误差
Fig. 7 Average localization error of three positioning algorithms under different estimation distances

由图 7 可看出,在同样的实验环境下,偏移误差修正定位算法的误差在整体上小于加权质心定位算法和三边测距定位算法的误差,具有较好的定位效果。

4.2 算法的适用性分析

实际定位过程中,往往会出现 3 个定位圆不能两两相交的情况,导致定位误差突然变大。而偏移误差修正定位算法无需确定三圆重叠区域,所以,适用于这些特殊情形下的定位。图 8 为一次定位中三圆未能两两相交的情况,定位精度为 0.728 4 m,定位仍然保持较好的稳定性。

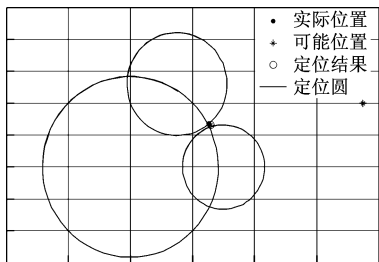


图 8 三圆未能两两相交情况的定位效果
Fig. 8 Positioning effect of two circles disjoint in the three circle

5 结论

(1) 在加权质心定位算法的基础上提出了基于 RSSI 的偏移误差修正定位算法,重点从信号传播损耗模型上分析信号强度定位误差的来源,研究了定位过程中测距误差的概率分布特征,解决了因随机变量的不确定性影响测距误差问题,提高了定位效果。

(2) 基于 RSSI 的偏移误差修正定位算法综合考虑了测量距离和误差的标准差这 2 个影响定位精度的因素,具有定位精度高、稳定性好的特点。除了高斯分布模型,该算法同样适用于其他概率分布模型。未来的工作将研究如何进一步减小随机变量所带来的误差,以进一步提高定位效果。

参考文献 (References):

- [1] RIGGINS F J, WAMBA S F. Research directions on the adoption, usage, and impact of the Internet of things through the use of big data analytics[C]//The 48th Hawaii International Conference on System Sciences, Kauai, 2015: 1531-1540.
- [2] 李鹤. 无线传感器网络中 RSSI 定位算法的自校正参数研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [3] BLUMENTHAL J, REICHENBACH F, TIMMERMAN D. Position estimation in ad hoc wireless sensor networks with low complexity[C]//Joint 2nd Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2005: 41-49.
- [4] 王琰琳, 黄友锐, 曲立国. 改进型质心算法在井下人员定位中的应用[J]. 煤矿机械, 2012, 33(8): 76-78. WANG Yanlin, HUANG Yourui, QU Ligu. Improved centroid localization algorithm in application of underground personnel positioning[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(8): 76-78.
- [5] WEI Z, LV Z, YANG C, et al. Wireless positioning method based on correctness judgment of received signal strength for mine locomotive[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(1): 178-184.
- [6] 李论. 基于 RSSI 的煤矿巷道高精度定位算法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [7] 崔法毅, 邵冠兰. 基于 RSSI 多边定位误差的加权质心定位算法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2162-2168. CUI Fayi, SHAO Guanlan. Weighted centroid localization algorithm based on multilateral localization error of received signal strength indicator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7):

- 2162-2168.
- [8] 陈昌祥,达维,周洁. 基于RSSI的无线传感器网络距离修正定位算法[J]. 通信技术,2011,44(2):65-66.
CHEN Changxiang, DA Wei, ZHOU Jie. RSSI-based range collation localization algorithm in WSN [J]. Communications Technology, 2011, 44(2): 65-66.
- [9] 程森林,李雷,朱保卫,等. WSN定位中的RSSI概率质心计算方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(1):100-104.
CHENG Senlin, LI Lei, ZHU Baowei, et al. Computing method of RSSI probability centroid for location in WSN [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(1): 100-104.
- [10] 王学. 基于RSSI带误差补偿的无线传感器网络定位算法研究及实现[D]. 洛阳:河南科技大学, 2013.
- [11] 高雷,郑相全,张鸿. 无线传感器网络中一种基于三边测量法和质心算法的节点定位算法[J]. 重庆工学院学报(自然科学), 2009, 23(7):138-141.
GAO Lei, ZHENG Xiangquan, ZHANG Hong. A node localization algorithm for wireless sensor network based on trilateration and centroid algorithm [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science), 2009, 23(7): 138-141.
- [12] 郭小成,刘喜凤. 基于无线信号传播损耗模型的RFID定位系统[J]. 科技创业家, 2013(8):7-8.
GUO Xiaocheng, LIU Xifeng. RFID positioning system based on wireless signal propagation loss model [J]. Technological Pioneers, 2013(8): 7-8.
- [13] 王缓缓,乐丽琴. 基于RSSI差值加权的质心定位算法[J]. 科技通报, 2014, 30(9):147-151.
WANG Huanhuan, YUE Liqin. Algorithm of centroid localization based on the RSSI difference weighting [J]. Bulletin of Science and Technology, 2014, 30(9): 147-151.
- [14] YANG R, ZHANG H. RSSI-based fingerprint positioning system for indoor wireless network [J]. Communications in Computer & Information Science, 2014, 463:313-319.
- [15] 胡戡,姚维照. 基于线性回归的无线传感器网络加权质心定位算法[J]. 太原理工大学学报, 2011, 42(5): 499-502.
HU Yu, YAO Weizhao. Linear-regression-based weighted centroid localization algorithm in wireless sensor networks [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2011, 42(5): 499-502.
- [16] 王佩琦,李艳萍,陈相南,等. 基于RSSI距离修正的WSNs定位算法[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(5): 135-137.
WANG Peiqi, LI Yanping, CHEN Xiangnan, et al. Localization algorithm for WSNs based on RSSI range modified [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(5): 135-137.