

基于马尔可夫链模型的井下目标轨迹预测算法

孟凡振 吴 杰 卜旭松 冯 锋
(宁夏大学数学计算机学院 银川 750021)

摘 要 针对井下环境恶劣,信标节点失效时会存在大量盲区,提出了一种基于马尔可夫链模型的井下目标轨迹预测算法,利用现有的无线传感器网络和无线射频识别技术,结合马尔可夫链模型对目标运动轨迹进行预测,并对传统的质心定位算法加以改进,使其适应预测模型,同时减少定位误差,提高定位覆盖率。实验证明:所提算法在百米范围内误差较小,可实现准确定位预测。

关键词 目标轨迹预测,马尔可夫链,无线传感器网络,无线射频识别,质心定位算法
中图法分类号 TP393.08 **文献标识码** A

Underground Target Track Prediction Algorithm Based on Markov Chain Model

MENG Fan-zhen WU Jie BU Xu-song FENG Feng

(College of Mathematics and Computer Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract In view of the downhole conditions, the beacon node failure will exist a large number of blind area, this paper proposes a underground target track prediction algorithm based on markov chain model, the use of the existing wireless sensor networks and wireless radio frequency identification technology, combined with markov chain model to estimate target motion track, and the traditional centroid localization algorithm is improved, and adapt it to the prediction model, at the same time reduce the positioning error, improve the positioning coverage. Experimental results show: in hundreds of meters range error is smaller, which can realize accurate positioning.

Keywords Target track prediction, Markov chain, Wireless sensor network, Radio frequency identification, Centroid localization algorithm

对煤矿人员运动轨迹进行有效的预测是煤矿安全的重要部分,对盲区的监控、紧急救援、降低人员伤亡和减少经济损失起到了重大作用。结合无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的定位技术已有广泛的研究^[1,2],而井下人员运动轨迹预测技术相对较少。通常轨迹预测方法大体可分为单用户和多用户两类。多用户轨迹预测是依据已有的大众的历史轨迹信息来进行轨迹预测。单用户的轨迹预测主要依据每个用户自己的历史轨迹进行预测,因此同一条查询轨迹会随着用户的不同预测出不同的轨迹^[3]。

现有的定位主要分为基于测距的定位算法和无需测距的定位算法。基于测距的定位算法通过测量节点之间的距离或角度,然后根据节点之间的几何关系,采用三边测量法、三角测量法或最大似然估计来确定网络节点位置,典型的定位算法有 AHLos(Ad hoc Localization System)算法^[4]和 RADAR 算法^[5]。无需测距的定位算法不需要直接测量节点之间的距离和角度,而是根据网络的联通性来实现定位或位置估计,典型的算法有质心算法(Centroid Algorithm)^[6]、DV-Hop(Distance Vector-Hop)算法^[7]、APIT(Approximate Point-in-Triangulation Test)算法^[8]和 MAP(Mobile Anchor Points)算法^[9]。

本文主要研究的问题是,信标节点正常工作时,可采用定位算法进行定位,当某一区域内有大量信标节点失效时,为了防止盲区的出现,则采用预测算法进行定位。利用无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)获取未知节点的历史数据^[10],和无线传感器网络的自组织传输技术,对传统的无需测距的质心定位算法加以改进,结合马尔可夫链模型,实现单用户的轨迹预测。

1 传统理论技术

1.1 基于马尔可夫链的状态预测

设随机序列 $\{X(n), n=0, 1, 2, \dots\}$ 的离散状态空间为 E , 若对于任意 m 个非负整数 $n_1, n_2, \dots, n_m (0 \leq n_1 < n_2 < \dots < n_m)$ 和任意自然数 k , 以及任意 $i_1, i_2, \dots, i_m, j \in E$ 满足

$$P\{X(n_m+k)=j | X(n_1)=i_1, X(n_2)=i_2, \dots, X(n_m)=i_m\} = P\{X(n_m+k)=j | X(n_m)=i_m\} \quad (1)$$

则称 $\{X(n), n=0, 1, 2, \dots\}$ 为马尔可夫链。其中, n_m 表示现在时刻, n_1, n_2, \dots, n_{m-1} 表示过去时刻, n_m+k 表示将来时刻, 那么此式表明在将来 n_m+k 时刻处于状态 j 仅依赖于现在 n_m 时刻的状态 i_m , 而与过去 $m-1$ 个时刻 n_1, n_2, \dots, n_{m-1} 所处的

本文受宁夏自然科学基金重点项目(NZ13004)资助。

孟凡振(1987-),男,硕士生,主要研究方向为 RFID 射频识别、无线传感器网络;吴 杰(1986-),女,硕士生,主要研究方向为 RFID 射频识别、无线传感器网络, E-mail: wu19861113@sina.com; 卜旭松(1988-),男,硕士生,主要研究方向为数据挖掘;冯 锋(1971-),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为 RFID 射频识别、无线传感器网络。

状态无关,该特性称为马尔可夫性或无后效性。式(1)给出了无后效性的表达式。

$$P\{X(n_m+k)=j|X(n_m)=i_m\}, k \geq 1$$

称之为马尔可夫链在 n 时刻的 k 步转移概率,记为 $P_{ij} = P_{ij}(n, n+k)$ 。转移概率表示已知 n 时刻处于状态 i ,经 k 个单位时间后处于状态 j 的概率^[11]。

1.2 质心定位算法

质心算法(Centroid Algorithm)是一种基于网络连通性的定位算法,采用计算几何学中的质心计算原理^[12,13]。在计算几何学中,多边形的几何中心称为质心,多边形顶点坐标的平均值则为质心节点的坐标。假设一个 n 边形的顶点坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$,则它的质心坐标 (x, y) 如式(2)所示。

$$(x, y) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (2)$$

质心算法将上述质心计算原理应用于无线传感器网络的节点定位中,把网络中的信标节点作为多边形的顶点,用来计算其它未知节点的位置。一个未知节点通信范围内的信标节点广播信标消息后,记录从每个信标节点收到的信标消息数,并每隔一定时间 T_L 计算与信标节点 i 之间的连通指标(Connectivity Metric),其计算方法如式(3)所示:

$$C_i = \frac{N_r(i, T_L)}{N_s(i, T_L)} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $N_r(i, T_L)$ 表示在 T_L 时间内未知节点收到来自信标节点 i 的消息数目; $N_s(i, T_L)$ 表示在 T_L 时间内信标节点 i 发送的消息数目。

2 井下目标轨迹预测算法

2.1 目标轨迹预测算法步骤

Step 1 利用时间同步的射频信号对未知节点进行扫描,形成定位向量 $(Loc-HD, Node-ID, T)$ 。其中, $Loc-HD$ 表示信标节点的位置信息, $Node-ID$ 表示未知节点 ID, T 表示时间戳。

Step 2 当未知节点同时被 3 个以上信标节点检测到,利用改进的质心定位算法,对未知节点进行定位。

Step 3 根据上一定位状态及历史数据,结合马尔可夫链模型,预测未知节点下一时刻在蜂窝状网格内信标节点检测到未知节点概率最大的信标序列,将产生 3~6 个信标节点组成的定位序列。

Step 4 利用概率最大的信标序列进行定位,转 Step 1。对于后续位置的预测,则重复 Step 2、Step 3。

2.2 改进的质心定位算法

对于改进的质心定位算法,本文采用蜂窝状布置信标节点,以提高定位精度,降低误差值,如图 1 所示。

在蜂窝状网格内,计算求出检测到未知节点的信标节点信号范围的交集,与未检测到未知节点的信标节点的交集相减,即得出未知节点所处的范围。假设未知节点在点 A 处被信标节点 u_{i0}, u_{i1}, u_{i2} 检测到,信号范围交集为 $u_{i0} \cap u_{i1} \cap u_{i2}$,在 u_{i0}, u_{i1}, u_{i2} 所在的蜂窝状网格内未被另外 3 个节点 u_{i3}, u_{i4}, u_{i5} 检测到,其信号范围交集为 $u_{i3} \cap u_{i4} \cap u_{i5}$,则 A 点所在的范围为 $(u_{i0} \cap u_{i1} \cap u_{i2}) - (u_{i3} \cap u_{i4} \cap u_{i5})$,获得交点坐标 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$,根据质心定位算法得 A 点坐标,如式(4)所示:

$$(x, y) = \left(\frac{x_0 + x_1 + x_2 + x_3}{4}, \frac{y_0 + y_1 + y_2 + y_3}{4} \right) \quad (4)$$

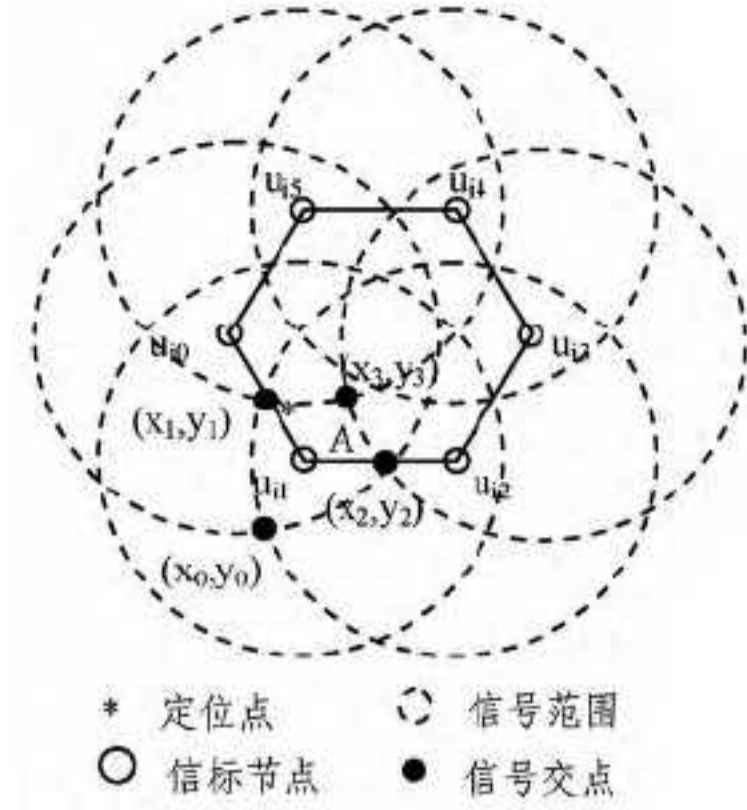


图 1 改进的质心定位算法

2.3 轨迹预测算法

根据改进的质心定位算法,结合本文上节提出的马尔可夫链模型,进行未知节点的轨迹预测。根据 A 点为某一时刻已知定位坐标,对其下一时刻的坐标位置 B、C 进行预测,如图 2 所示。

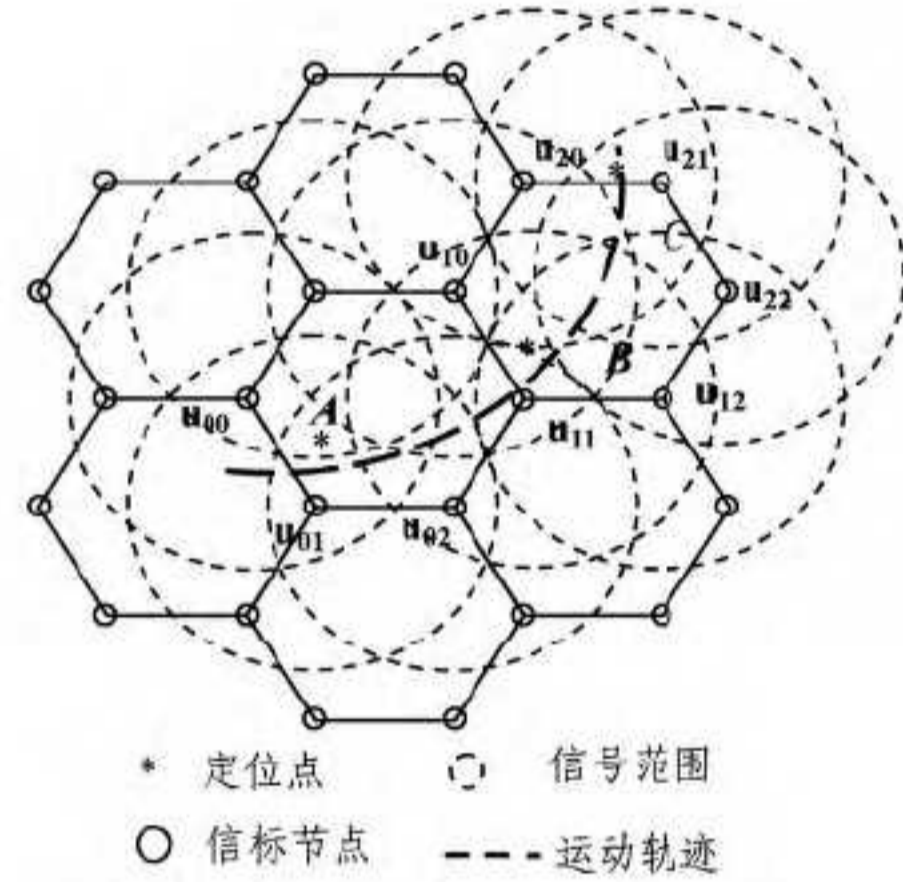


图 2 未知节点运动轨迹

根据图 2 所示的信标节点的分布情况,以及信号覆盖半径可得,未知节点在井下任意位置均能被 3~6 个信标节点检测到。设未知节点某一时刻在 $u_{i0}, u_{i1}, \dots, u_{i5} (0 \leq i < \infty)$ 信号范围内,则下一位置所在的信号范围,根据马尔可夫链模型找出概率最大的信标序列,如式(5)所示。

$$P\{X(n_m)+i=u_{i0}, u_{i1}, \dots, u_{i5} | X(n_m)+i-1=u_{i0}, u_{i1}, \dots, u_{i5}\} (0 \leq i < \infty) \quad (5)$$

假设,已知 A 点坐标所在信号范围为 u_{i0}, u_{i1}, u_{i2} ,对下一坐标位置 B 所在信号范围进行预测,假设在 $u_{i10}, u_{i11}, u_{i12}$ 信号序列的概率最大,其值为:

$$P\{X(n_m)+1=u_{i10}, u_{i11}, u_{i12} | X(n_m)=u_{i0}, u_{i1}, u_{i2}\}$$

即求:

$$\begin{aligned} & u_{i10}, u_{i11}, u_{i12} \\ & = \text{ArgMax} P\{u_{i10}, u_{i11}, u_{i12} | u_{i0}, u_{i1}, u_{i2}\} \\ & = \frac{P(u_{i0}, u_{i1}, u_{i2} | u_{i10}, u_{i11}, u_{i12}) P(u_{i10}, u_{i11}, u_{i12})}{P(u_{i0}, u_{i1}, u_{i2})} \\ & = P(u_{i0}, u_{i1}, u_{i2} | u_{i10}, u_{i11}, u_{i12}) P(u_{i10}, u_{i11}, u_{i12}) \end{aligned}$$

$P(u_{i0}, u_{i1}, u_{i2})$ 为已知概率,可忽略为常数。

同理,根据 B 点坐标点预测下一坐标 C,概率最大的信标节点序列为:

$$P\{X(n_m)+2=u_{20}, u_{21}, u_{22} | X(n_m)+1=u_{10}, u_{11}, u_{12}\}$$

3 实验结果及分析

利用 Matlab 进行仿真实验,将某一煤矿内安全监测区域抽象为 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的长方形区域,六边形边长为 15m ,信标节点 150 个,未知节点 50 个,MAC 协议采用 $802.15.4$,巷道内实际环境下的路径衰落指数 $\eta=3.5$,参考距离 $d_0=1\text{m}$,高斯分布随机变量 X_i 的标准差取值为 4.0 。实验结果是重复 30 次运行的平均值。实验主要根据以下指标进行性能评估:

(1) 将传统质心定位算法的覆盖率、未知节点的定位误差与本文改进的质心定位算法进行比较。

(2) 将改进的质心定位与本文预测的定位位置进行比较。

3.1 改进的质心定位算法比较

3.1.1 定位覆盖率

传统的质心定位算法和改进算法的覆盖率如图 3 所示。随着信标节点半径的增加,改进算法的定位覆盖率达到 100% 。在传统质心定位算法中,由于信标节点的布置对定位精度有较大的影响,在信标节点通信半径较短时,定位覆盖率仅有 50% 左右,但随着信标节点通信半径的增加,传统算法与改进算法的覆盖率趋于一致。从图 3 可以看出,改进算法的覆盖率明显高于传统算法。

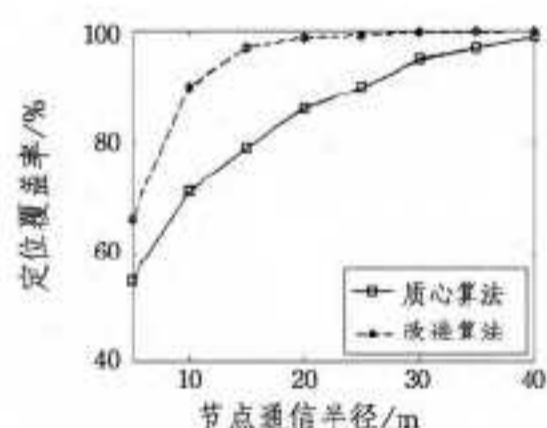


图 3 定位覆盖率图

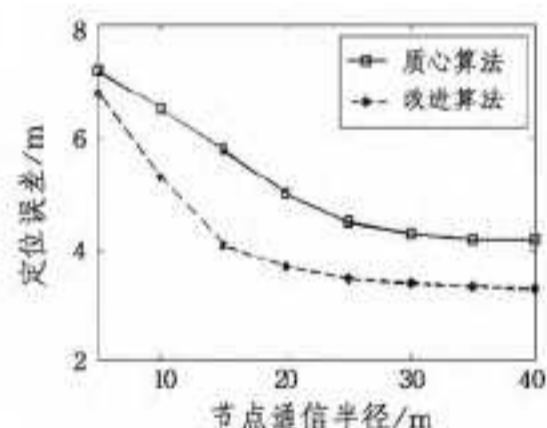


图 4 平均定位误差

3.1.2 定位误差

传统的质心定位算法和改进算法的定位误差,采用平均点位误差进行评价,如式(6)所示。

$$Error = \sqrt{e_v^2 + e_h^2} \quad (6)$$

式中, $Error$ 、 e_v 、 e_h 分别为平均点位误差、平均纵向误差、平均水平误差,它们随信标节点的通信半径变化^[14],如图 4 所示。信标节点通信半径较小时,误差较大,信标节点通信半径增加后,定位误差降低,改进算法的平均定位误差小于传统质心定位算法。

3.2 预测轨迹与定位轨迹比较

设通信半径为 25m ,利用马尔可夫链模型进行预测,依据上一个已知位置预测下一个位置,依次类推。实验选择的数据集包括 50 次基本相同的未知节点运动轨迹,来进行训练。一次预测结果和质心定位坐标的平均值误差如图 5 所示。用相同方法,比较预测 30 、 50 、 80 条运动轨迹的平均误差,如图 6 所示。

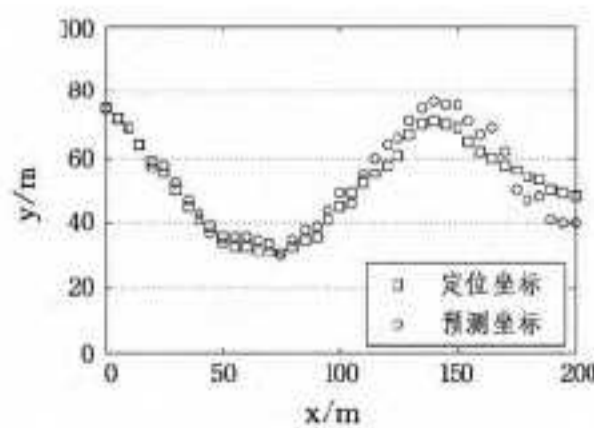


图 5 预测位置与定位位置比较

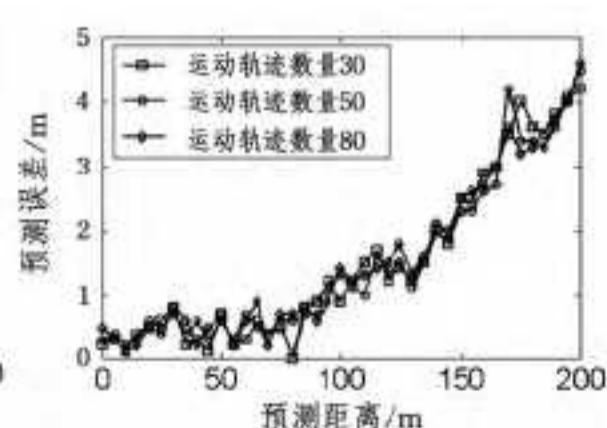


图 6 总体预测定位误差

从图 5、图 6 中可以看出,两种定位坐标曲线在 x 轴、 y 轴小于 100 米时基本吻合,且误差值稳定。但是,在后续位置的预测中偏差逐渐加大,经分析得知,这是本文算法采用马尔可夫链模型逐渐累积误差所致。实际应用时,可以采取定位算法与预测算法相结合的定位策略,以减少预测误差。

结束语 针对井下环境恶劣,信标节点失效时会存在大量盲区,本文提出了一种基于马尔可夫链模型的井下目标轨迹预测算法,利用现有的无线射频识别和无线传感器网络技术,对传统的质心定位算法加以改进,使其适应预测算法,同时提高了定位的覆盖范围,减少了误差。结合马尔可夫链模型对下一时刻的未知节点位置进行预测,并基于此预测结果预测后续未知节点的位置,实验证明,在百米范围内预测误差较小,本文算法是有效的。

参考文献

- [1] Wang Yang, Huang Liu-sheng, Xiao Ming-jun, et al. Localization algorithm for wireless sensor network based on RSSI-verify[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2009, 30(1): 59-62
- [2] Chen Kai, Zhou Yi, He Jian-hua. A localization scheme for underwater wireless sensor networks [J]. International Journal of Advanced Science and Technology, 2009, 4: 9-16
- [3] 李万高,赵雪梅,孙德广. 基于改进贝叶斯方法的轨迹预测算法研究[J]. 计算机应用, 2013, 33(7): 1960-1963
- [4] Savvides A C, Han M, Srivastava B. Dynamic Finegrained Localization In Ad-Hoc Networks of Sensors[C] // Proc. of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom' 01). New York, 2001(7): 166-167
- [5] Bahl P, Padmanabhan V. RADAR: an In-building RF-based User Location and Tracking System [C] // Proc. of IEEE INFOCOM'02. Tel Aviv, Israel, 2000(2): 775-784
- [6] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 28-34
- [7] Niculescu D, Nath B. DV-based Positioning in Ad Hoc Networks [J]. Kluwer Journal of Telecommunications Systems, 2003, 22(1-4): 267-280
- [8] He T, et al. Range-free Localization Schemes in Large Scale Sensor Networks[C] // Proc. of the 9th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom' 03). New York, 2003(9): 81-95
- [9] Ss K-F, Ou C-H, Jiau H C. Location with Mobile Anchor Points in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 1187-1197
- [10] Carbutar B, Ramathan M K, Mehmet Koyuturk, et al. Efficient tag detection in RFID systems[J]. J. Parallel Distrib. Comput., 2009, 69: 180-195
- [11] 彭曲,丁治明,郭黎敏. 基于马尔可夫链的轨迹预测[J]. 计算机科学, 2010, 37(8): 189-193
- [12] 丁恩杰,乔欣,常飞. 基于 RSSI 的 WSNs 加权质心定位算法的改进[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(7): 53-56
- [13] 韩东升,杨维,刘洋. 煤矿井下基于 RSSI 的加权质心定位算法[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 522-528
- [14] 田丰,秦涛,刘华艳. 煤矿井下无线型无线传感器网络节点定位算法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1760-1764