

# 一种基于幅频矢量感知的井下定位算法

姚运全<sup>1</sup>, 李 瑾<sup>2</sup>, 郭银景<sup>2</sup>, 梁泉泉<sup>2</sup>, 郭登岭<sup>3</sup>, 刘 虹<sup>2</sup>

(1. 新汶矿业集团有限责任公司 协庄煤矿, 山东 新汶 271221; 2. 山东科技大学 信息与电气工程学院, 山东 青岛 266590;  
3. 中国石油冀东油田公司 南堡油田, 河北 唐山 063200)

**摘要:** 现有的矿山人员定位系统定位精度低, 不能满足煤矿安全生产和灾后救援系统的需要。提出了一种矿用精密定位算法。在该算法中, 移动节点接收巷道空间的电磁波, 在分析所接收电磁波的基础上, 进行信息融合并构造幅频特性矢量, 经马尔科夫滤波与模式匹配, 将幅频特性矢量映射到巷道的电子地图, 进而得到移动节点的精确位置信息。实验表明, 该算法定位误差小于 2 m, 计算复杂度较低, 易于工程实现, 能够满足煤矿安全生产的需要。

**关键词:** 幅频矢量; 感知; 定位算法; 移动节点

中图分类号: TN929.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)06-0101-05

## A Coal Mine Localization Algorithm Based on the Amplitude Vector Perception

YAO Yunquan<sup>1</sup>, LI Jin<sup>2</sup>, GUO Yinjing<sup>2</sup>, LIANG Quanquan<sup>2</sup>, GUO Dengling<sup>3</sup>, LIU Hong<sup>2</sup>

(1. Xiezhuang Coal Mine, Xinwen Mining Group Co. Ltd, Xinwen, Shandong 271221, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. Nanpu Oilfield, CNPC Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063200, China)

**Abstract:** As the low precision of the existing localization system can't meet the needs of the coal mine production safety and the disaster relief system, a new localization algorithm is proposed in this paper. According to such algorithm, the information was fused and the amplitude vector was built based on the analysis of the electromagnetic wave in the roadway which the mobile node received. After Marov filtering and pattern matching, the vector was mapped to the roadway electronic map, and the precise location of the mobile node could be obtained. Experiments show that the localization algorithm, whose error is less than 2 m, can meet the safety needs of the coal mine production because of its low computational complexity and easy project realization.

**Key words:** amplitude vector; perception; localization algorithm; mobile node

煤矿安全生产与灾后救援的关键技术之一是人员定位技术, 由于煤矿巷道的拓扑结构复杂, 信道特性动态变化, 地面常用的精密定位算法无法移植到井下的人员定位系统。目前, 煤矿使用的人员定位系统大部分是基于 RFID (radio frequency identification, 射频识别) 的区域定位系统, 这种系统的定位精度较低, 无法满足煤矿安全生产的需要。

国内外学者在精密定位算法的研究领域已经做了大量工作, 但定位精度和实用性尚未达到救灾环境的使用要求。2006 年, 李晶<sup>[1]</sup> 基于煤矿井下信道频域模型和 TOA (time of arrive) 方法对井下人员精确定位进行研究。在对井下信道特性研究的基础上, 探讨了影响 TOA 精度的因素, 提出了 MO-TOA (基于 MUSIC

收稿日期: 2012-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61071087); 中国煤炭工业协会项目 (MTKJ2011-363); 山东省自然科学基金项目 (ZR2011FM018)

作者简介: 姚运全 (1974—), 男, 山东新汶人, 工程师, 主要从事煤矿信息化方面的研究。E-mail: tayyq@163.com

郭银景 (1966—), 男, 山东嘉祥人, 教授, 博士生导师, 主要从事透地通信系统的研究, 本文通信作者。

E-mail: gyjlwh@163.com

和 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing, 正交分频复用) 技术的超分辨率 TOA) 精密定位方法并利用网络矢量分析仪进行验证。2008 年, 汪玉凤等<sup>[2]</sup> 利用三边测距原理进行井下工作人员的精确定位, 利用 3 个采集点的信息估计移动节点的精密位置信息。2010 年, 刘继旺<sup>[3]</sup> 对煤矿巷道电磁波传播模型进行研究, 基于 UWB (ultra wideband) 技术探讨了 AOA (angle of arrive) 和 TOA 结合的方法, 并仿真验证了该算法的有效性。2009 年, 澳大利亚皇家墨尔本理工大学 (Royal Melbourne Institute of Technology) 的 Zhang 等<sup>[4]</sup> 将指纹算法引入井下定位, 大大降低了定位节点的计算复杂度, 采用卡尔曼滤波器使定位精度达到 1.7 m。近几年, 国内外许多学者也在精密定位方法的研究方面作了有益的探索<sup>[5-9]</sup>, 但从现有的文献来看, 由于井下作业人员分布情况复杂, 现有的定位系统无法实时报告井下人员的具体位置, 定位精度低, 计算复杂度高。

本研究提出一种基于 Wi-Fi (wireless-fidelity) 网的幅频矢量感知的定位算法, 可以实现井下人员精密定位, 并大大降低运算复杂度。该算法以移动节点检测到的幅频矢量为基础, 通过融合中心对幅度矢量模式匹配确定节点坐标, 利用历史数据和马尔科夫滤波器, 提高定位精确度, 有效降低节点位置的定位误差, 以确保各节点之间数据通信准确性和稳定性, 实现对井下人员的实时定位监测。该算法用较少参数变量完成较为复杂的计算过程, 有效地减少网络节点间的通信开销, 延长了网络生存周期, 增强了整个网络系统的鲁棒性。

## 1 定位系统结构

基于 Wi-Fi 网络的井下幅频矢量定位系统由定位系统服务器 (信息融合中心)、无线 AP (access point, 接入点) 和 Wi-Fi 终端 (移动节点) 组成。井下 Wi-Fi 网络的 AP 间可以实现级联连接或组建局域网。巷道中安装多个 AP, 以保证覆盖整个矿井, 并力求无缝连接。定位系统在各 AP 上均寄生了一个标准信标发射模块, 这些模块分别发射幅值相同、频率不同的电磁波, 移动节点进入基站覆盖范围时, 接收并分析空间电磁波, 生成幅频矢量。

融合中心通过 Wi-Fi 网络采集各移动节点生成的幅频矢量序列, 以存储的电子地图为基础, 将移动节点的幅度矢量经马尔科夫滤波后映射到 AP 分割后的电子地图, 通过数据的拟合、迭代和识别等过程, 得出定位信息。

以一个巷道为例, 定位系统的结构组成如图 1 所示。Wi-Fi 终端, 融合中心, AP 之间均通过无线进行通信。虚线圆为 AP 信号覆盖范围。

移动节点也可以称为 Wi-Fi 终端, 即用户手中的 Wi-Fi 手机。Wi-Fi 手机通过无线 Wi-Fi 网络与服务器进行数据交互。该系统 Wi-Fi 终端的位置信息可以直观地显示在电子地图上, 管理员通过进入管理系统管理用户。

## 2 幅频矢量定位算法

井下安装若干 AP 信标, 完整覆盖井下环境。每个 AP 信标分别发射幅值相同但频率不同的电磁波, 移动节点进入基站覆盖范围内时, 接收并分析空间电磁波。为了节省频率资源, 有效利用频带, 该系统的 AP 信标分别发射 7 种频率的信号, 即  $f_0 - f_6$ 。相邻 AP 信标发射不同的频率信号, 相隔 2 个 AP 信标以上可采用相同的频率。每个移动节点选择 3 个幅值最大的频点作为该节点的幅频矢量, 表示为

$$\mathbf{V}_{n,k} = [(f_1, A_1), (f_2, A_2), (f_3, A_3)]_{n,k} \quad (1)$$

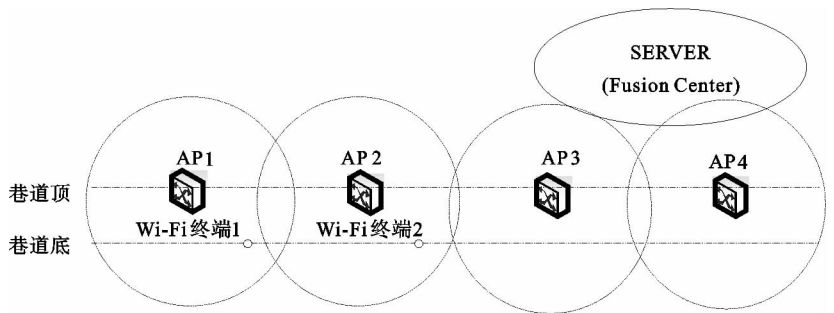


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of system structure

其中： $V_{n,k}$ —第  $n$  个移动节点在采样时刻  $k$  收到的信号； $f_1$ —该终端收到的幅度最大的信标，一般来自于离移动节点最近或较近的 AP。

## 2.1 基准点的选取

将巷道划分成  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的方格，方格的中心即为该算法的基准点，在电子地图上标出，划分方法如图 2 所示。图中  $V_{i_0,j_0}$  和  $V_{i_1,j_1}$  分别表示在坐标为  $(i_0, j_0)$  和  $(i_1, j_1)$  方格中的移动节点曾经采样到的幅频矢量。如果不同移动节点在同一基准点生成的幅频矢量有差异，基准点对应矢量由邻近基准点矢量融合判决产生。

## 2.2 移动节点位置信息的计算

巷道中各点对应的幅频矢量主要由以下因素决定：①附近 AP 信标的距离，②巷道的形状，③巷道内电磁波传输的波导效应，④附近移动节点的电磁干扰。因为巷道信道的复杂性，影响幅频矢量的因素还有很多，但主要因素是 AP 的距离。

通常情况下，在空间传递过程中，随着传输距离的增加，信号强度不断下降。因而，通过测量接收信号的强度，可以估计发射节点和移动节点之间的距离。信号强度的数学模型为

$$P_r(d) = P_r(d_0) + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_0 \quad (2)$$

其中： $P_r(d)$ —距离发射点  $d$  处的接收信号强度； $d_0$ —参考距离； $P_r(d_0)$ —在参考距离  $d_0$  处的路径衰减系数； $n$ —路径衰减指数； $X_0$ —均值为 0 的高斯分布随机指数。

每个 AP 的位置和信标频率是已知的，可以在电子地图上精确表示出来。融合中心将接收到的来自移动节点的矢量信息进行融合。距离 AP 越近，信号强度越大，所以，根据信号强度可以判断出离 AP 最近的终端，每两个 AP 之间进行归一化。

基于以上分析，融合过程描述如下。

### Step 1 信道学习，描述轨迹

移动节点在  $k$  时刻收到来自 AP 的信号，组成矢量

$$\mathbf{V}_{n,k} = [(f_1, A_1), (f_2, A_2), (f_3, A_3)]_{n,k}; \quad (3)$$

前一时刻，即  $k-1$  时刻的信号矢量为

$$\mathbf{V}_{n,k-1} = [(f_1, A_1), (f_2, A_2), (f_3, A_3)]_{n,k-1}. \quad (4)$$

依据电子地图，由式(2)计算  $\mathbf{V}_{n,k}$  和  $\mathbf{V}_{n,k-1}$  对应的坐标，填入基准点所对应的矢量数据容器。利用马尔科夫滤波器，确定  $k$  时刻和  $k-1$  时刻用户的位置关系，并计入基准点的矢量数据容器。

对矢量数据容器进行滤波处理，滤除噪声矢量。对幅值较大的同一频率信号，设该信号由第  $m$  个 AP 信标发射，两个相邻采样时刻信号依据式(2)推算。用户通过将  $P_r(d_k)$  与前一个信号  $P_r(d_{k-1})$  进行比较来确定当前用户的位置。 $P_r(d_k) - P_r(d_{k-1}) > 0$  时，即在  $k$  时刻用户比  $k-1$  时刻更靠近第  $m$  个 AP；否则，反之。同理，再选择收到的另一个幅值较大的同频率 AP 信标的信号进行处理，得出距离该 AP 的位置远近的比较结果。由于两 AP 的位置是已知的，结合比较结果，就可以知道  $k$  时刻同  $k-1$  时刻的相对位置。

根据 AP 的位置信息，以及 AP 的辐射模型和参考点的信号强度，可以知道当前用户的大体位置。且由于人的行走速度有限，在短时间间隔内，两个采样点相距很近，利用该信号当前时刻与前一时刻方位信息，就可以在地图上描绘出该终端的前行轨迹。

### Step 2 轨迹叠加，求质心，修正基准点

移动节点足够多的时候，运行轨迹也就多了，采样点可以遍布整个电子地图。融合中心不断进行学习，

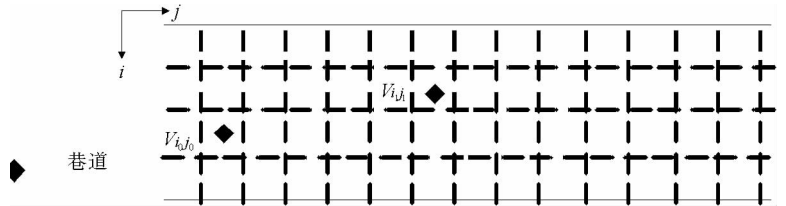


图 2 算法基准点的选取示意图

Fig. 2 The schematic diagram of reference point selection

将各用户的运行轨迹进行叠加。电子地图上每个栅格内的采样点用矢量表示为

$$\mathbf{V}_{i,j} = [(f_1, A_1), (f_2, A_2), (f_3, A_3)]_{i,j}; \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{n \in A_{ij}} \mathbf{V}_{i,j}. \quad (6)$$

其中： $n$ —坐标为 $(i, j)$ 的方格中元素的个数； $\mathbf{Y}_{i,j}$ —方格的质心，作为定位时的参考矢量。

### Step 3 移动节点的定位

当移动节点进入巷道，终端的采样矢量为

$$\mathbf{V}_{n,k} = [(f_1, A_1), (f_2, A_2), (f_3, A_3)]_{n,k}, \quad (7)$$

表示终端  $n$  在采样时刻  $k$  时的信号矢量。参考矢量集为  $\langle \mathbf{Y}_{i,j} \rangle$ ， $\mathbf{V}_{n,k}$  与参考矢量集中的矢量进行对比，找出失真最小的参考点  $\mathbf{Y}_{\min}$ ，即：

$$d(\mathbf{V}_{n,k}, \mathbf{Y}_{\min}) = \min d(\mathbf{V}_{n,k}, \mathbf{Y}_{i,j}). \quad (8)$$

$d(\mathbf{V}_{n,k}, \mathbf{Y}_{i,j})$  为矢量  $\mathbf{V}_{n,k}$  与参考点  $\mathbf{Y}_{i,j}$  之间的失真测度，常用的失真测度为欧氏距离的平方，其表达式为  $d(\mathbf{V}_{n,k}, \mathbf{Y}_{i,j}) = (\mathbf{V}_{n,k} - \mathbf{Y}_{i,j})^2$ 。 $\mathbf{Y}_{\min}$  就是该用户的定位结果，即电子地图上坐标  $(i, j)$  为用户的定位输出。

### Step 4 更新数据库，数据迭代

Step 3 已获得新用户的位置。定位完成后，融合中心将新用户数据进行处理，优化数据库，也就是进行 Step 1 和 Step 2，优化每个方格的矢量参考点。

## 3 实验结果

因为楼道环境与井下巷道环境的电磁传播特性非常相似，因而将实验楼总长约 400 m 的 4 层楼道作为仿真巷道测试环境，对本研究提出的定位算法进行仿真。仿真 Wi-Fi 系统由 25 个改装后 AP 和 4 个移动节点组成。在对仿真巷道的幅度矢量电子地图的 20 个全程训练后，移动节点的测试定位误差逐渐收敛。表 1 是误差稳定后的测试结果。

可以看出，该定位算法误差小于 2 m，根据用户终端测得的矢量数据，融合中心做出了精确的定位。误差的大小不仅取决于对幅度矢量电子地图的训练次数，还与电子地图本身的精度有关。电子地图的精细程度越高，定位精度就越高，计算复杂度也越大，系统的工程实现成本越高。训练次数越多，每个电子地图像素点对应的幅度矢量就越准确，马尔科夫滤波的效果就越好，定位精度就越高。

影响定位系统实用性的主要因素是定位精度和定位节点的计算复杂度。利用 MATLAB 对常见的定位算法进行了定位节点计算复杂度仿真。因为目前常见的各种定位精度较高的算法均以 TOA, AOA 和 TDOA 等参数为基础，其定位节点计算复杂度处于同一个数量级。在现有的算法中，指纹算法的定位精度与幅度矢量感知定位算法相当，选取经典 TOA、指纹算法和幅度矢量感知定位算法进行仿真研究。

图 3 为定位节点获取一组定位坐标所需的计算量，图中数据以幅度矢量感知定位算法在 20 m 定位精度下的计算复杂量为基准进行了归一化处理。仿真结果表明，幅度矢量感知定位算法的计算量约为另外两种算法的 1/20。该算法的定位节点只需感知环境几个频点的幅度大小，并进行简单的处理，绝大部分计算工作由融合中心的计算机来完成，使移动节点定位的计算复杂度大大降低。

## 4 结束语

对定位系统的设计做了分析与研究，并给出系统框架模型；提出了融合矢量定位算法，通过循环求精过程对数据进行修正，能够有效地确定井下人员的具体位置，减少定位误差。实验证明，与传统的定位方法相

表 1 实验数据和误差列表

Tab. 1 The experiment and error data list m

测试点	实际位置坐标	测量位置坐标	误差
1	(7,9)	(8.0,8.3)	1.2
2	(15,25)	(14.2,23.6)	1.6
3	(28,40)	(27.0,41.0)	1.4
4	(46,68)	(46.5,68.3)	0.6

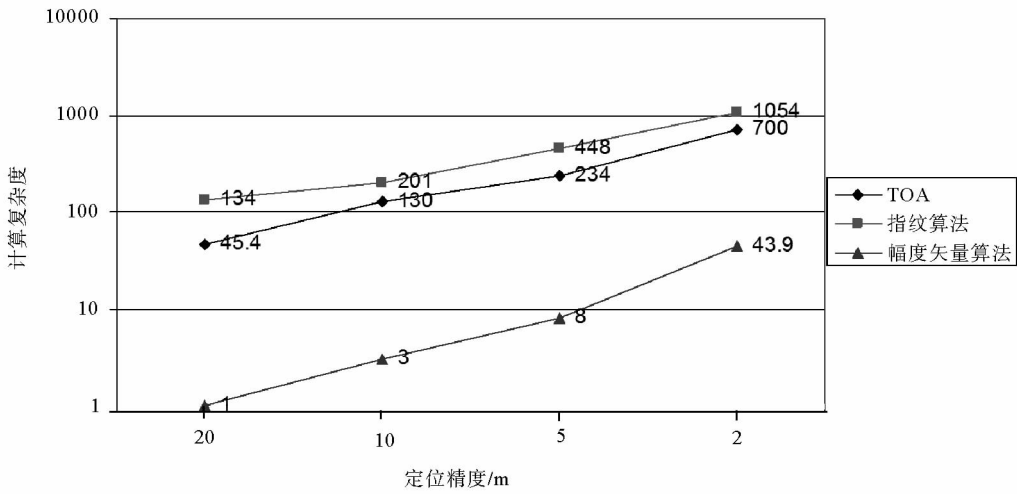


图3 算法的定位节点计算复杂度比较图

Fig. 3 The computational complexity of the algorithms

比,本文算法能够提高定位精度,降低计算复杂度。定位精度和电子地图的精细程度同算法的计算复杂度密切相关,在工程实现时,需要平衡定位精度和实现成本之间的关系。

参考文献:

[1]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,2006:81-83.  
[2]汪玉凤,段丽华. 井下人员定位系统精确定位[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2008,30(5):725-727.  
WANG Yufeng,DUAN Lihua. Precise positioning underground staffs positioning system[J]. Journal of Liaoning Technical University:Natural Science,2008,30(5):725-727.  
[3]刘继旺. 井下复杂环境中无线传感器网络节点定位算法的研究[D]. 合肥:安徽大学,2010:14-18.  
[4]ZHANG K F,ZHU M,WANG Y J,et al. Underground mining intelligent response and rescue systems[J]. Procedia Earth and Planetary Science,2009,1(1):1044-1053.  
[5]GUO X C,LI Y Y. Underground personnel positioning system based on ZigBee[C]//4th International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou,Oct. 28-30,2011:298-300.  
[6]孟宇,刘立,李文辉. 用于井下移动设备定位的路标设计及其视频识别方法[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(S1):770-772.  
MENG Yu,LIU Li,LI Wenhui. Designation and recognition method of landmarks for positioning underground mobile equipments[J]. Journal of Central South University:Science and Technology,2011,42(S1):770-772.  
[7]郭银景,杨洪骞,杨涛,等. 一种井下无线自组织网络自愈路由算法[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2012,31(1):84-88.  
GUO Yinjing,YANG Hongqian,YANG Tao,et al. A self-healing routing algorithm for the underground wireless self-organizing network[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2012,31(1):84-88.  
[8]蒋磊,于雷,王振肿,等. 基于 Wi-Fi 和 Zigbee 的井下人员无线跟踪与定位系统的设计[J]. 工矿自动化,2011,34(7):1-6.  
JIANG Lei,YU Lei,WANG Zhenchong,et al. Design of wireless tracking and positioning system of underground personnel based on Wi-Fi and ZigBee[J]. Industry and Mine Automation,2011,34(7):1-6.  
[9]王保德. 煤矿井下三维人员定位及信息管理系统的研究[J]. 工矿自动化,2011,34(12):98-100.  
WANG Baode. Research of 3D personnel positioning and information management system in coal mine underground[J]. Industry and Mine Automation,2011,34(12):98-100.  
[10]刘园园,葛世荣,朱华,等. 煤矿救灾机器人定位技术研究[J]. 煤矿机械,2011,32(1):49-52.  
LIU Yuanyuan,GE Shirong,ZHU Hua,et al. Research on localization technology of coal mine rescue Robot[J]. Coal Mine Machinery,2011,34(12):98-100.