

邢智鹏,李春文,陆思聪. 基于LQI滤波与联合参数估计的井下人员定位算法[J]. 煤炭学报,2017,42(6):1628-1633. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1275

Xing Zhipeng, Li Chunwen, Lu Sicong. Coal mine underground personnel localization algorithm based on LQI filter and joint parameters estimation[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6):1628-1633. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1275

# 基于 LQI 滤波与联合参数估计的井下人员定位算法

邢智鹏,李春文,陆思聪

(清华大学自动化系,北京 100084)

**摘要:**现有的基于RFID技术的井下人员定位系统存在定位准确度低、抗干扰性差等问题。为提高井下人员定位算法的准确性和环境适应性,提出了一种在ZigBee通信协议框架下,基于LQI滤波与RSSI联合参数估计的定位算法。首先使用LQI指标对通过ZigBee芯片读取的原始RSSI数据进行滤波,其次对RSSI的信道参数和环境噪声参数进行联合估计,并依据环境噪声参数对距离估计进行补偿,最后利用最小二乘法完成定位计算。算法挖掘了现有硬件设备的潜力,更多考虑了环境对定位的影响,有效的提高了定位的准确度。最后通过ZigBee硬件平台验证了算法的有效性,与原有RSSI定位算法相比,改进算法将定位均方误差降低了约10%。

**关键词:**井下人员定位;LQI滤波;RSSI;联合参数估计

中图分类号:TD655

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)06-1628-06

## Coal mine underground personnel localization algorithm based on LQI filter and joint parameters estimation

XING Zhi-peng, LI Chun-wen, LU Si-cong

(Automation Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Existing RFID-based underground personnel localization systems have the problems of low positioning accuracy, low noise immunity and other issues. In order to enhance the accuracy and environmental adaptation of the coal mine underground personnel localization algorithm, this paper proposes a RSSI (received signal strength indication) joint parameters estimation and localization algorithm based on LQI (link quality indication) filter in the ZigBee communication protocol framework. The proposed algorithm first uses the LQI as the smoothing filter to process the original RSSI data collected from ZigBee chips, and then estimates the RSSI channel parameters combined with environmental noise parameter. Moreover, the environmental noise parameter is used to compensate the estimated distance. Finally, it gets the localization results via the least square method. Through taking the potential of existing hardware equipments and paying more consideration to the effects of environment, the proposed algorithm effectively improves the accuracy of localization. The effectiveness of the algorithm is confirmed by simulation based on the ZigBee hardware platform. Compared with the original RSSI location algorithm, the mean square error of the proposed algorithm is reduced by about 10%.

**Key words:** underground personnel localization; LQI filter; RSSI; joint parameters estimation

煤矿安全是煤炭生产中的重大课题之一,为提高煤矿安全生产水平,国务院、安监总局等部门相继发文,规范和促进煤矿井下安全避险“六大系统”的建设与完善<sup>[1]</sup>。井下人员定位系统是“六大系统”的重要子系统之一,为煤矿的日常生产管理提供保障,为紧急情况下的应急救援提供决策依据<sup>[2]</sup>。

现有的井下人员定位系统主要以射频识别技术(Radio Frequency Identification, RFID)为主<sup>[2]</sup>。RFID为一种区域定位技术,较难实现高准确度的定位,且存在抗干扰性差、漏卡率高等问题。ZigBee为一种低功耗、低数据速率、低成本的双向无线通信技术,基于ZigBee的多种定位算法已成为研究关注的热点,并逐渐应用于煤矿井下定位系统<sup>[3-4]</sup>。定位算法根据定位过程中是否测量节点间的距离,可分为非测距和测距两大类;非测距类主要包括质心定位、DV-Hop和APIT等算法,测距类主要包括TOA、TDOA、AOA和RSSI等算法<sup>[5-6]</sup>。在测距类算法中,接收信号强度算法(Received Signal Strength Indication, RSSI)由于硬件实现价格低廉,体积小,精度较高,在矿山、隧道和室内等定位场合获得较多应用<sup>[7-8]</sup>。

RSSI算法依据一定的信号传播模型进行RSSI测距,计算未知节点到参考节点的距离,进而获得位置节点坐标信息。文献[9]使用高斯模型选取高概率发生区的RSSI值,减少了一些小概率、大干扰事件对整体测量的影响,增强了定位信息的准确性。文献[10]提出了一种基于RSSI差分校正的最小二乘-拟牛顿定位算法,在RSSI测距中通过参考节点的自校正定位求得误差校正系数,并运用到未知节点测距中;在定位计算中,将最小二乘法计算出的初值,用拟牛顿法对未知节点坐标进行迭代求精。文献[11]先使用有偏极大似然方法获得未知节点位置估计,再利用一种在线分布式随机近似算法对估计进行优化。文献[12]以RSSI技术为基础,提出了一种新型允许盲区的煤矿巷道人员全局定位系统方法,通过在关键节点布置少量测点组成定位单元,获取井下人员局部定位信息,经数据处理算法估计出井下人员全局定位信息。

针对现有RSSI算法定位准确度不足的问题,本文利用现有硬件平台能够提供的表征传输数据帧质量的链路质量指标(Link Quality Indication, LQI)对RSSI数据进行滤波,对影响定位的信道参数和环境噪声参数进行联合估计,增强了算法对环境的适应性,并依据环境噪声参数对测距数据进行补偿,提高了定位算法的准确度。

## 1 RSSI 定位算法原理

无线传感器网络中采用的无线信号传播模型主要有自由空间传播模型、地面双向反射模型和对数正态阴影模型等<sup>[13]</sup>。在实际应用中,由于存在多径效应、障碍物等因素影响,一般较多的使用对数正态阴影模型。

依据对数正态阴影模型,有:

$$r(d) = p(d_0) - 10n \lg(d/d_0) + x_\sigma \quad (1)$$

其中, $d$ 为接收节点到发射节点的距离; $r(d)$ 为距离接收节点 $d$ 处的接收信号强度(单位dB·m); $p(d_0)$ 为距离发射节点 $d_0$ 处的接收信号强度, $d_0$ 为参考距离,通常取1m,此时 $p(d_0)$ 记为 $p_0$ ;  $n$ 为路径损耗指数,表示路径损失随距离增加而增大的快慢,与周围环境有关,一般将 $p_0$ 和 $n$ 称为信道参数; $x_\sigma$ 为均值为0,标准差为 $\sigma$ 的高斯分布随机变量,表示环境中的噪声干扰, $\sigma$ 或 $\sigma^2$ 又称为环境噪声参数。

在忽略 $x_\sigma$ 的影响后,由式(1)可得

$$d = 10^{[p_0 - r(d)]/10n} \quad (2)$$

待定位盲节点通过上式,分别获得和通信半径内 $m$ 个坐标已知的参考节点( $m \geq 3$ )之间的距离,可得

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \\ \dots \\ (x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 = d_m^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中,盲节点 $(x, y)$ 到第 $i$ 个参考节点 $(x_i, y_i)$ 的距离为 $d_i$ ,式(3)可整理成矩阵形式:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (4)$$

$\mathbf{A}, \mathbf{X}, \mathbf{B}$ 分别为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ \dots & \dots \\ 2(x_m - x_1) & 2(y_m - y_1) \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 - (d_2^2 - d_1^2) \\ \dots \\ x_m^2 - x_1^2 + y_m^2 - y_1^2 - (d_m^2 - d_1^2) \end{bmatrix}$$

根据最小二乘法,可解得盲节点坐标 $\mathbf{X}$ 为

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (5)$$

## 2 改进的 RSSI 定位算法

基于ZigBee协议的CC2430/31系列芯片<sup>[14]</sup>为目前许多RSSI算法实现的硬件平台。该系列芯片在提供原始RSSI数据的同时,还可以从其协议栈中数据帧中直接读取LQI值。可以在不增加硬件成本的前提下利用LQI对RSSI进行滤波。

## 2.1 LQI 滤波

依据 IEEE 802.15.4 协议, LQI 为链路质量指示, 表征接收数据帧的能量与质量, 大小基于接收信号强度以及检测到的信噪比, 一般与正确接收到数据帧的概率相关<sup>[15]</sup>。有实验<sup>[16-17]</sup>显示, 当 LQI < 90 时, 网络中的丢包率和错误率迅速增加; 当 LQI > 110 时, RSSI 值较为稳定可靠。

当 LQI 较高时, 当前 RSSI 值较为可信, 直接采用当前数值; 当 LQI 低于一定阈值时, 当前 RSSI 不可信, 采用经过滤波的前一时刻数据替代当前值。当 LQI 适中时, 以 LQI 为基准调整权重, 对当前值和历史值进行平滑滤波。综合以上考虑, 得到 LQI 滤波器为

$$\begin{cases} \hat{r}_t = r_t, \text{LQI} > 110 \\ \hat{r}_t = \alpha r_t + (1 - \alpha)r_{t-1}, \alpha = 1 - \frac{110 - \text{LQI}}{20}, & (6) \\ 90 \leq \text{LQI} \leq 110 \\ \hat{r}_t = \hat{r}_{t-1}, \text{LQI} < 90 \end{cases}$$

其中,  $r_t$  表示  $t$  时刻的原始 RSSI 值;  $\hat{r}_t$  表示  $t$  时刻滤波后的 RSSI 值。LQI 滤波器能够有效的消除跳变等异常 RSSI 对测距的不利影响。

## 2.2 信道参数与环境参数的联合估计

在矿井和室内等应用场合, 多径反射、温度湿度、粉尘等诸多因素会引起信道参数的变化, 如果所有区域使用相同的信道参数, 会带来较大的误差。因此应当对不同局部范围内的信道参数分别进行估计, 以增加算法对环境的适应性。在同一局部范围内, 噪声干扰可认为服从同一分布。

当由  $m$  个参考节点组成的局部定位单元部署完成后, 由于各参考节点坐标已知, 所以任意两个参考节点之间的距离也是确定的, 在盲节点进入定位区域之前, 可以先利用参考节点间的距离和实测到的接收信号强度, 对信道参数进行估计。

$m$  个参考节点构成  $k = m(m-1)/2$  个参考节点对,  $r_i$  表示第  $i$  对 ( $i \in k$ ) 参考节点之间的接收信号强度,  $d_i$  表示第  $i$  对参考节点之间的距离。信道参数  $(p_0, n)$  的估计可表示为

$$(\tilde{p}_0, \tilde{n}) = \arg \min_{p_0, n} \sum_{i=1}^k (p_0 - 10n \lg d_i - r_i)^2 \quad (7)$$

记  $\mathbf{R} = [r_1, \dots, r_k]^T$ ,  $t_i = 10 \lg d_i$ ,  $\mathbf{T} = [t_1, \dots, t_k]^T$ ,  $\mathbf{1}_k$  为长度为  $k$  元素全为 1 的列向量,  $\mathbf{O} = [1_k, -\mathbf{T}]$ , 依据线性回归理论<sup>[18]</sup>可得上式的解为

$$\begin{bmatrix} \tilde{p}_0 \\ \tilde{n} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^+ \mathbf{R} \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{Q}^+$  为  $\mathbf{O}$  的 Moore-Penrose 逆,  $\mathbf{Q}^+ = (\mathbf{O}^T \mathbf{O})^{-1} \mathbf{O}^T$ <sup>[19]</sup>。经过计算整理, 进一步可得:

$$\begin{cases} \tilde{n} = -\frac{\text{cov}(\mathbf{R}, \mathbf{T})}{\sigma_i^2} \\ \tilde{p}_0 = \bar{r} + \tilde{n} \bar{t} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\bar{r} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k r_i$ ,  $\bar{t} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k t_i$ ,  $\sigma_i^2 = \sum_{i=1}^k (t_i - \bar{t})^2$ ,  $\text{cov}(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (r_i - \bar{r})(t_i - \bar{t})$ 。

在获得信道参数的估计值 ( $\tilde{p}_0, \tilde{n}$ ) 后, 可以很方便的获得环境噪声方差的极大似然估计为

$$\tilde{\sigma}^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\tilde{p}_0 - 10 \tilde{n} \lg d_i - r_i)^2 \quad (10)$$

并可证, 该估计是无偏的。由于信道参数和环境噪声参数的估计可以同时得到, 故称为参数的联合估计。

## 2.3 测距估计补偿

当信道参数估计 ( $\tilde{p}_0, \tilde{n}$ ) 已知时, 由式(2)可得盲节点和参考节点之间的距离估计值为

$$\tilde{d} = 10^{[\tilde{p}_0 - r(d)]/10\tilde{n}} \quad (11)$$

由式(1), (11)可知:

$$\tilde{d} = 10^{x_\sigma/10\tilde{n}} d = \exp\left(\frac{x_\sigma \ln 10}{10\tilde{n}}\right) d \quad (12)$$

因而有:

$$E(\tilde{d}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\tilde{\sigma}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{x_\sigma \ln 10}{10\tilde{n}}\right) d \exp\left(-\frac{x_\sigma}{2\tilde{\sigma}^2}\right) dx_\sigma = d \exp\left(\frac{\beta^2 \tilde{\sigma}^2}{\tilde{n}^2}\right) \quad (13)$$

其中,  $\beta = (\ln 10)/10\sqrt{2}$ , 所以  $\tilde{d}$  是  $d$  的有偏估计。这一结果与文献[20]得出结论是等价的。由于在联合参数估计中已经得到了噪声参数估计  $\tilde{\sigma}^2$ , 故可以通过补偿获得关于  $d$  的无偏估计  $\tilde{d}'$ :

$$\tilde{d}' = 10^{\frac{1}{10\tilde{n}} [\tilde{p}_0 - r(d) - \frac{\beta \tilde{\sigma}^2}{\sqrt{2\tilde{n}}}] } \quad (14)$$

由于改进后的 RSSI 算法主要包括 LQI 滤波、联合参数估计和距离补偿 3 部分, 因为可以将改进后的算法称为 LF-JE-DC (LQI Filter-Joint Estimation-Distance Compensation) 算法, 算法的整体流程如图 1 所示。

## 3 仿真实验

实验使用基于德州仪器 CC2430/2431 系列芯片

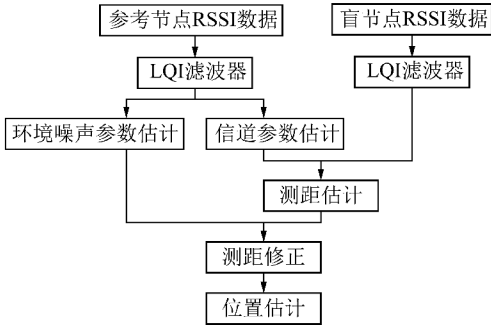


图1 LF-JE-DC 算法流程

Fig. 1 Flowchart of LF-JE-DC algorithm

的 ZigBee 开发套件作为仿真平台,一套定位单元包括一个网关,4 个参考节点,一个移动节点(图 2)。现有的开发套件中参考节点使用 CC2430 芯片,移动节点使用 CC2431 芯片,由于本算法涉及使用参考节点间距离和接收信号强度信息,故需使用 CC2431 替代原有参考节点上的 CC2430。原始数据通过网关汇聚采集,传输到上位机后由 Matlab 完成计算。

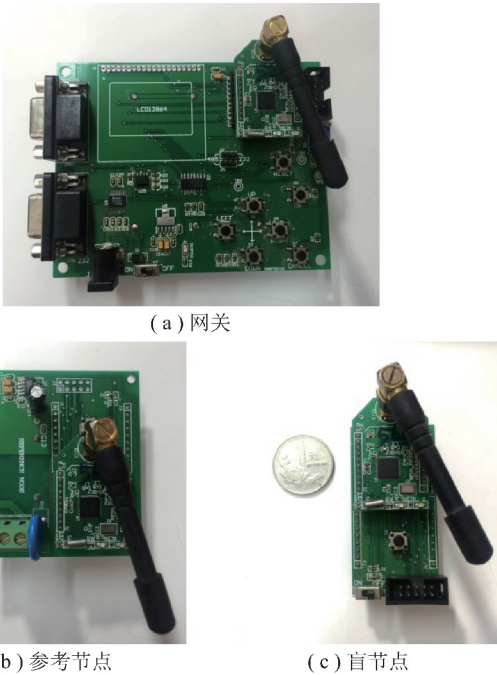


图2 定位单元器件

Fig. 2 Components of localization unit

实验场景如图 3 所示,在某一建筑室内部 4 m×10 m 的区域内建立坐标系并布设参考节点(网关位置与算法无关,未画出),将实验场景设置为室内狭长型区域以模拟井下巷道的部分场景。参考节点坐标如图 3 所示。需要说明的是,将其中一个参考节点部署在(5,4)而不是(10,4),是为了破坏参考节点之间的对称性,将参考节点对间不同的距离数从 3 提高到 6,这将有助于在参考节点较少时改善信道参数估计的准确性。

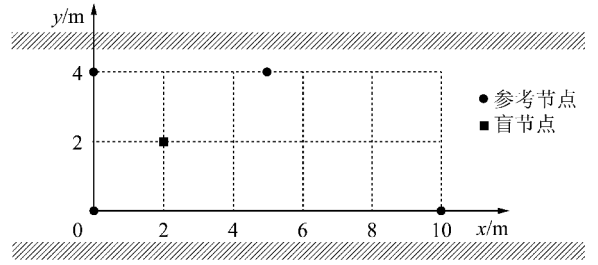


图3 实验场景与传感器布设示意

Fig. 3 Schematic of experimental scene and sensors deployment

按照图 3 部署参考节点后,使用 LQI 滤波后的 RSSI 值,依据式(9),(10)对信道参数和环境噪声进行联合估计,可得到一组参数为:  $\tilde{p}_0 = 39.78$ ,  $\tilde{n} = 3.54$ ,  $\tilde{\sigma}^2 = 13.22$ 。

参数估计完成后,以 2 m 为间隔,将移动节点依次置于定位区域内的(0,2),(2,0),(2,2)等整数网格节点上,共 15 个采样点,并以 1~15 进行编号表示。每个采样点上分别进行两组定位,每组进行 10 次定位测量,两组之间间隔约 4 h。第 2 组采样进行前,重新进行一次参数联合估计。得到更新后的相应参数为:  $\tilde{p}_0 = -40.06$ ,  $\tilde{n} = 3.61$ ,  $\tilde{\sigma}^2 = 12.97$ 。最后,取总计 20 次定位的平均值作为定位估计值。

定义第  $i$  个采样点上的单点定位误差为

$$\Delta d_i = \sqrt{(\tilde{x}_i - x_i)^2 + (\tilde{y}_i - y_i)^2} \quad (15)$$

其中,  $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$  表示该采样点估计坐标;  $(x_i, y_i)$  表示该采样点实际坐标。

定义算法的均方误差为

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta d_i^2} \quad (16)$$

图 4 中,GF-RSSI 方法代表文献[9]中的基于高斯滤波器(Gauss Filter)的 RSSI 算法,LF-JE 方法(LQI Filter-Joint Estimation)代表本文 LQI 滤波加联合参数估计但不进行测距补偿的算法,LF-JE-DC 方法代表本文 LQI 滤波加联合参数估计并进行测距补偿的完整算法。

结合图 4 与表 1 可知,LF-JE 算法总体优于 GF-RSSI 算法,但是优势并不明显,主要是由于测试环境基本为静态的,且无障碍物阻隔等干扰,测得 LQI 值较高,属于较为理想的情况,LQI 滤波器的效果并未得到充分体现,GF-RSSI 算法中包含的滤波也发挥了和 LQI 滤波器近似的效果,减少了噪声的影响。LF-JE-DC 算法在大部分节点上的定位误差小于 GF-RSSI 算法,定位准确度比 LF-JE 算法有所提高,LF-JE-DC 算法和已有的 GF-RSSI 算法相比,将



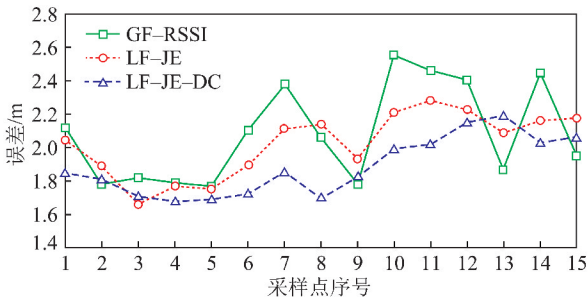


图4 不同算法定位误差

Fig. 4 Localization errors of different algorithms

均方差降低了约 10%，显示了依据环境噪声进行测距补偿的必要性。

表1 算法均方差比较

Table 1 Comparison of algorithms' MES

算法	MSE
GF-RSSI	2.103
LF-JE	2.031
LF-JE-DC	1.892

文献[10]使用的差分修正算法适用于大量部署参考节点的场景,其仿真实验使用的参考节点数量为30~100个。在本文只使用4个参考节点的情况下,文献[10]中算法会产生较大的误差,削弱了对比的意义。另外,文献[10]中存在超出参考节点间直接通信范围的情况,也与本文的实验场景有所区别,不适宜作为改进算法的参照。因此本文仍主要以 GF-RSSI 算法作为对比基线。

将图4中的实验结果和文献[11]中分布随机近似算法 DSA 对比,DSA 对定位结果进行优化后,可以最终收敛到 1.5 m 左右的定位误差,略优于 LF-JE-DC 算法,但代价是近似部分需要反复进行 200~250 步的迭代,计算开销较大。实际应用中频繁的迭代计算会增加硬件的电量消耗,缩短系统的使用时间;算法的时间复杂度也不利于对实时性要求较高的场景。相比之下,LF-JE-DC 算法通过一次修正后的误差水平相当于 DSA 算法进行 50 次迭代优化后的效果,因此在考虑了算法的计算开销和时间复杂度后,可以认为 LF-JE-DC 算法仍有一定的优势。文献[12]中的定位算法需要通过现场不断调整参数设置来改善定位精度,算法的一般误差在 3 m 以内;当参数设置合适时,算法的定位误差在 1.56~2.42 m,平均后的效果大致与 LF-JE-DC 算法相当。LF-JE-DC 算法通过动态的估计信道参数,避免了人工调整参数,能实现较为稳定的定位效果,是对文献[12]中算法较为切实的改进。

综上所述,本文提出的 LF-JE-DC 在定位精度、计算开销和稳定性方面较已有算法有不同程度的改进。受硬件条件限制,仿真实验覆盖的区域较小,且两次联合估计之间间隔较为有限,参数变化幅度不够显著,与对照算法性能之间的差异较小。实际应用中,当待定位区域范围扩大,信道参数和环境噪声参数的一致性和时变性有更显著表现时,预计 LF-JE-DC 算法对已有 RSSI 算法的优势将更为明显。本文提出的 LF-JE-DC 算法可以作为文献[12]中井下人员定位系统定位单元的底层优化算法,提高局部定位的准确度,进而为井下全局人员定位系统性能的优化提供依据。

## 4 结 语

针对现有井下人员定位系统定位准确较低的问题,提出了一种在 ZigBee 通信协议框架下,基于 LQI 滤波的 RSSI 定位算法,对信道参数和环境噪声参数进行联合,并对测距数据进行补偿。算法较多了考虑井下人员定位系统中定位单元所在区域环境和通信信道对定位的影响,挖掘了现有硬件的潜力,提高了算法的环境适应性和定位准确性。仿真实验验证了算法的有效性。本文算法可以作为局部定位算法应用到煤矿全局人员定位等大型动态监控系统的设计实现中。

在进一步研究中,可针对煤矿井下应用中更复杂的动态场景,特别是 LQI 较低时,改进 LQI 滤波器的设计,使之更贴近实际。当井下人员定位系统传感器网络覆盖区域扩大,参考节点数量增多后,可考虑如何结合环境将整个网络合理的划分成多个子网,分别估计局部区域内的参数;当同一局部区域内参考节点数目增加后,可考虑如何优化联合估计时参考节点的选取以降低联合参数估计阶段算法的复杂度,这些问题将留待后续的研究。

## 参考文献 (References):

- [1] 孙继平. 煤矿井下安全避险“六大系统”的作用和配置方案[J]. 工矿自动化, 2010(11):1-4.  
Sun Jiping. Effect and configuration of 'six systems' for safe act of rescue of coal mine underground[J]. Industry and Mine Automation, 2010(11):1-4.
- [2] 孙继平. 煤矿井下人员位置监测技术与系统[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(11):1-5.  
Sun Jiping. Personnel position monitoring technology and system in underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(11):1-5.
- [3] Deshpande R S, Wadhwa L K. Overview of ZigBee based WSN[J]. International Journal of Science and Research, 2015, 4(5):442-

- 445.
- [4] Ranya C M, Shanmugaraj M, Prabakaran R. Study on ZigBee technology [A]. Electronics Computer Technology (ICECT), 2011, 3rd International Conference on IEEE [C]. 2011; 297-301.
- [5] Mao G, Fidan B, Anderson B D O. Wireless sensor network localization techniques [J]. Computer Networks, 2007, 51 (10): 2529-2553.
- [6] 孙继平, 李晨鑫. 基于改进均值滤波和参数拟合的矿井 TOA 几何定位方法 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1206-1212.  
Sun Jiping, Li Chenxin. Mine TOA geometric positioning method based on improved mean filtering and parameter fitting [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1206-1212.
- [7] Honghui Z, Rongyan G. Research on RSSI-Based localization system in the wireless sensor network [J]. Open Automation and Control Systems Journal, 2014, 6: 1139-1146.
- [8] 胡青松, 张申, 吴立新, 等. 矿井动目标定位: 挑战、现状与趋势 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1059-1068.  
Hu Qingsong, Zhang Shen, Wu Lixin, et al. Localization techniques of mobile objects in coal mines: Challenges, solutions and trends [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1059-1068.
- [9] 章坚武, 张璐, 应瑛, 等. 基于 ZigBee 的 RSSI 测距研究 [J]. 传感技术学报, 2009, 22(2): 285-288.  
Zhang Jianwu, Zhang Lu, Ying Ying, et al. Research on distance measurement based on RSSI of ZigBee [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(2): 285-288.
- [10] 程秀芝, 朱达荣, 张申, 等. 基于 RSSI 差分校正的最小二乘-拟牛顿定位算法 [J]. 传感技术学报, 2014, 27(1): 123-127.  
Cheng Xiuzhi, Zhu Darong, Zhang Shen, et al. RSSI-based differential correction least-squares-quasi-Newton positioning algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(1): 123-127.
- [11] Morral G, Dieng N A. Cooperative RSSI-Based indoor localization; B-MLE and distributed stochastic approximation [A]. 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014 - Fall) [C]. IEEE, 2014; 1-5.
- [12] 刘志高, 李春文, 邢智鹏, 等. 巷道网络全局定位系统关键技术分析与实验 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 519-526.  
Liu Zhigao, Li Chunwen, Xing Zhipeng, et al. Key issues analysis and experiment of the global positioning system in underground tunnel network [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 519-526.
- [13] Matolak D W, Kaya S, Kodi A. Channel modeling for wireless networks-on-chips [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(6): 180-186.
- [14] CC2430 datasheet [OL]. <http://www.chipcom.com>, 2016-05-04.
- [15] IEEE Std. 802.15.4-2003. Standard for telecommunications and information exchange between system-local area medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low rate wireless personal area networks (WPAN) [Z]. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>, 2016-04-08.
- [16] 朱明, 金仁成, 车志平, 等. 基于平滑预测 LQI 的 WSN 动态功率控制研究 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2015, 15(8): 26-29.  
Zhu Ming, Jin Rencheng, Che Zhiping, et al. WSN dynamic power control based on smooth forecast LQI [J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2015, 15(8): 26-29.
- [17] Halder S J, Park J G, Kim W. Adaptive filtering for indoor localization using ZigBee RSSI and LQI measurement [A]. Adaptive Filtering Applications [C]. Tech. Open Access Publisher, 2011; 305-324.
- [18] Roos T, Myllymäki P, H Tirri, et al. A statistical modeling approach to location estimation [J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2002, 1(1): 59-69.
- [19] 张贤达. 矩阵分析与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 85-87.  
Zhang Xianda. Matrix analysis and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004; 85-87.
- [20] Zanca G, Zorzi F, Zanella A, et al. Experimental comparison of RSSI-based localization algorithms for indoor wireless sensor networks [A]. Proceedings of the Workshop on Real-world Wireless Sensor Networks [C]. ACM, 2008; 1-5.