

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210724

# 井下人员超宽带精确定位算法

侯 华 李峻辉 代超娜 郭宏洋

(河北工程大学信息与电气工程学院 邯郸 056038)

**摘要:** 针对恶劣的井下环境易对超宽带信号造成干扰导致现有井下人员定位算法误差较大的问题,提出基于超宽带的 SDS-TWR 优化算法与鲁棒卡尔曼滤波结合的改进算法。该算法在一次定位周期内可测得定位标签到相邻基站的两个测距值,随后将其作为鲁棒卡尔曼滤波的两个观测值,旨在提高算法定位精度及稳定性、抑制巷道随机 NLOS 时延误差。仿真实验表明,在同等条件下,本文算法较 S-TDOA 法误差降低 35%,较异步测时法误差降低 31%,且误差波动较小,同时抑制了巷道 NLOS 时延误差,有效提高了井下人员定位精度。

**关键词:** 井下人员定位;超宽带;双边双程测距;卡尔曼滤波

**中图分类号:** TN925 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

## Ultra-wideband precise positioning method for downhole personnel

Hou Hua Li Junhui Dai Chaona Guo Hongyang

(School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the ultra-wideband signal is easily interfered by the harsh downhole environment, which leads to the large error of the existing downhole personnel location method, an improved algorithm based on the combination of SDS-TWR optimization method and robust Kalman filter is proposed. In this method, two ranging values from the positioning tag to the adjacent base station can be measured in a positioning period, which are then used as two observation values of robust Kalman filter to improve the positioning accuracy and stability of the algorithm and suppress the random NLOS delay error of roadway. Simulation results show that under the same conditions, the proposed algorithm reduces the error by 35% compared with S-TDOA and 31% compared with asynchronous timing method, and the error fluctuation is small. Meanwhile, the NLOS delay error of roadway is suppressed, and the positioning accuracy of downhole personnel is effectively improved.

**Keywords:** downhole personnel positioning; UWB; SDS-TWR; Kalman filtering

## 0 引 言

煤矿井下工作环境十分恶劣复杂,各种意外事故无不威胁着采煤人员的生命安全<sup>[1]</sup>。井下人员定位系统可有效保障井下人员的安全。目前井下人员定位系统大多选用射频识别技术(radio frequency identification, RFID),红外、Wi-Fi、蓝牙等方式进行定位。但由于煤矿中存在巷道狭长封闭,井下环境恶劣,非视距(non line of sight, NLOS)情况明显等问题<sup>[2]</sup>,上述定位技术不能完全符合目前井下人员定位所需的高定位精度、高抗干扰性、高可靠性等要求<sup>[3]</sup>。超宽带(ultra-wideband, UWB)定位系统的定位精度可以达到厘米级。并且可以通过补偿本地时钟漂移和随机误差来进一步提高距离测量的精度<sup>[4]</sup>。因此该技术能够更好的适用于井下复杂多变的环境<sup>[5]</sup>。

目前井下人员超宽带定位算法主要包括接收信号强度(received signal strength indicator, RSSI)、信号到达角度(angle of arrive, AOA)、信号传输时间(time of arrive, TOA)、双程测距(two-way ranging, TWR)、双边双程测距(symmetric double-sided two-way ranging, SDS-TWR)、信号到达时间差(time difference of arrival, TDOA)等<sup>[6]</sup>。RSSI 算法根据接收信号强度及信号传播距离的关系推算信号收发端的间距。该算法实现简单,成本较低、测量难度小<sup>[7]</sup>。但固定的信号强度衰减模型和信道模型无法完全符合巷道特点,因此该算法误差较大。不过 RSSI 可配合指纹算法提高定位精度<sup>[8]</sup>。AOA 算法通过测量定位标签与基站的方位角,利用几何投影算法计算目标位置<sup>[9]</sup>。该算法对时钟工作方式没有特定要求。但其只能用于直线无障碍测距的视距(line of sight, LOS)环境下,不适用于煤矿井

收稿日期:2022-07-19

下人员定位。TOA 算法通过测得无线信号在信号收发设备间的传输时间进行定位<sup>[10]</sup>。该算法具有硬件简易、定位精度不受发射功率及接收灵敏度等因素影响的优点,可用于井下人员定位。TWR 算法通过基站与定位标签之间的双向信号传输进行定位,解决了 TOA 算法中需要基站与定位标签时钟同步的问题,保留了 TOA 算法的优势,适合井下人员精确定位<sup>[11]</sup>。但基站和定位标签的时钟频率偏移以及 NLOS 时延影响定位精度。SDS-TWR 算法在 TWR 算法的基础上增加了一次定位标签与基站的主动双向信号传输过程<sup>[12]</sup>。目的在于通过增加测距请求次数来降低时钟频偏带来的误差。不过只在测距设备之间的时延相等时才能最大程度的减小误差<sup>[13]</sup>。TDOA 算法通过接收信号时间的差值进行定位。该算法对基站的时钟精度以及基站间时钟同步要求较高。虽可以实现井下人员精确定位但难度较大成本较高<sup>[14]</sup>。

针对 SDS-TWR 算法定位精度易受到时钟频偏影响的问题及井下 NLOS 时延误差严重影响定位精度的问题,提出基于超宽带的 SDS-TWR 优化算法与鲁棒卡尔曼滤波结合的改进算法。该算法在一次定位周期内可测得定位标签到相邻基站的两个测距值,随后将其作为鲁棒卡尔曼滤波的两个观测值,根据 NLOS 判别因子判断是否存在 NLOS 误差,若存在则通过调整观测误差协方差来抑制 NLOS 误差。为了验证该算法的有效性与稳定性,利用 MATLAB 进行了仿真实验。

## 1 SDS-TWR 优化算法

### 1.1 定位流程

井下巷道狭长,长度远大于高度与宽度,因此,在实际应用中可以将煤矿井下人员定位简化为一维定位。

SDS-TWR 优化算法中基站在巷道等间隔布置,同时在巷道拐角布置基站。相邻基站可以互相无线通信,定位标签在巷道任何位置都可与两侧最近邻的基站通信。基站布置示意图如图 1 所示。

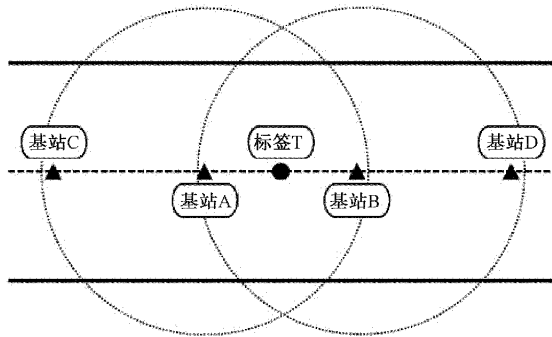


图 1 基站布置示意图

SDS-TWR 优化算法示意图如图 2 所示。

SDS-TWR 优化算法具体步骤如下:

1) 基站 A 周期性广播定位信号并记录下发送时间,标

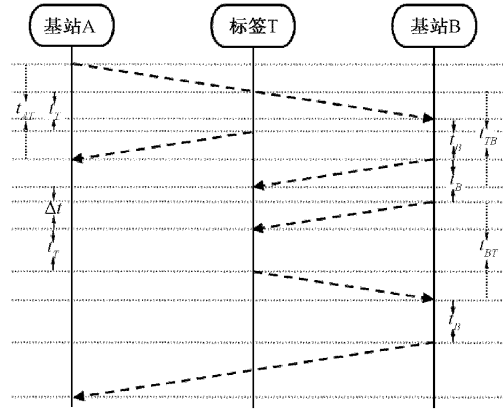


图 2 SDS-TWR 优化算法示意图

签 T 及基站 B 接收到该信号之后分别记录下接收时间;

2) 标签 T 接收到基站 A 所发送的定位信号立即向基站 A 回复应答信号并记录发送时间;

3) 基站 A 接收到标签 T 回复的应答信号后根据发送定位信号的时刻及接收应答信号的时刻计算定位信号收发时间  $t_{AT}$ ;

4) 基站 B 在接收到由基站 A 发来的定位信号后,间隔  $t_B$  及  $2t_B$  分别向标签 T 发送一次定位信号。其中  $t_B$  是相对于基站 B 的时钟频率而言的;

5) 标签 T 依次接收到两次基站 B 发来的定位信号,分别记录下两次接收时间,并计算出两次接收时间的差值  $\Delta t$ 。在接收到第二次基站 B 发来的定位信号时立刻向基站 B 回复应答信号并记录发送时间;

6) 基站 B 接收到标签 T 发来的应答信号,根据已知的时间及基站 A 和基站 B 间距  $d_{AB}$  (布置基站时已知) 计算出基站 B 到标签 T 间的距离  $d_{BT}$ , 以及收发定位信号的时间  $t_{BT}$ 。并将已得到的  $d_{BT}$  和  $t_{BT}$  发送给基站 A;

7) 基站 A 接收到基站 B 发来的信号后,根据  $t_{AT}$  和  $t_{BT}$  以及  $d_{AB}$  计算出基站 A 距标签 T 的距离  $d_{AT}$ 。

SDS-TWR 优化算法流程图如图 3 所示。

### 1.2 距离计算

$$t_{AT} = \frac{2d_{AT}}{c} + t_T \tag{1}$$

$$t_{BT} = \frac{2d_{BT}}{c} + t_T \tag{2}$$

其中,  $t_{AT}$  和  $t_{BT}$  分别为基站 A 和基站 B 到定位标签之间定位信号的收发时间;  $d_{AT}$  和  $d_{BT}$  分别表示基站 A 和基站 B 到定位标签 T 的距离;  $t_T$  表示定位标签从接收到定位信号到回复应答信号的间隔时间;  $c$  表示电磁波传输速度,为光速。移项后可得:

$$d_{AT} = \frac{c(t_{AT} - t_T)}{2} \tag{3}$$

$$d_{BT} = \frac{c(t_{BT} - t_T)}{2} \tag{4}$$

式(3)与(4)两式做差可得:

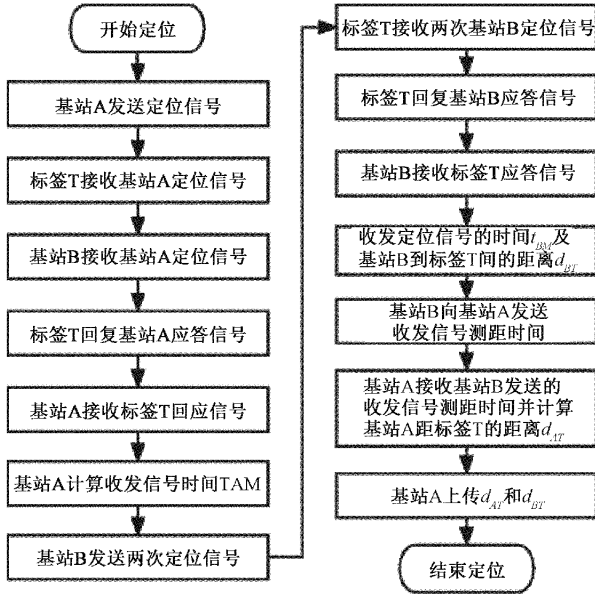


图 3 SDS-TWR 优化算法流程图

$$d_{AT} - d_{BT} = \frac{c(t_{AT} - t_{BT})}{2} \quad (5)$$

由于基站响应速度较快, 井下人员移动速度相对较慢, 因此可近似的认为在单个采样间隔内定位标签 T 的位置不变, 则:

$$d_{AB} = d_{AT} + d_{BT} \quad (6)$$

$$d_{AT} - d_{BT} = 2d_{AT} - d_{AB} \quad (7)$$

将式 (6) 带入到式 (7) 中得:

$$2d_{AT} - d_{AB} = \frac{c(t_{AT} - t_{BT})}{2} \quad (8)$$

$$d_{AT} = \frac{1}{2} \left[ d_{AB} + \frac{c(t_{AT} - t_{BT})}{2} \right] \quad (9)$$

由此可以计算出基站 A 到标签的距离  $d_{AT}$ , 在此将该距离记为  $d_1$ 。

与此同时, 通过另一种算法同样能够得到  $d_{AT}$ 。

$$t_{TB} = \frac{2d_{BT}}{c} + t_B \quad (10)$$

其中,  $t_{TB}$  表示定位标签到基站 B 到之间定位信号的收发时间;  $t_B$  表示提前做出规定的基站 B 向标签 T 发送定位信号的间隔时间。

$$d_{BT} = \frac{c(t_{TB} - t_B)}{2} \quad (11)$$

设  $\Delta t$  为定位标签 T 分别接收到基站 B 间隔  $t_B$  及  $2t_B$  发来的定位信号时间的差值, 在不考虑时钟频偏时  $t_B$  与  $\Delta t$  相等, 因此用  $\Delta t$  替换上式中的  $t_B$  得到:

$$d_{BT} = \frac{c(t_{TB} - \Delta t)}{2} \quad (12)$$

$$d_{AT} = d_{AB} - d_{TB} = d_{AB} - \frac{c(t_{TB} - \Delta t)}{2} \quad (13)$$

由此可以计算出基站 A 到标签的距离  $d_{AT}$ , 在此将该

距离记为  $d_2$ 。

### 1.3 误差分析

设基站 A 和基站 B 的时钟频率偏移分别为  $e_A$  和  $e_B$ , 基站 A 和基站 B 收发定位信号的真实时间分别为  $t'_{AT}$  和  $t'_{BT}$ , 基站 A 到定位标签 T 的真实距离为  $d'_{AT}$ 。

首先分析  $d_1$ , 由式 (9) 可知,  $d_1$  与  $t_{AT}$  和  $t_{BT}$  有关, 与定位标签无关, 具体的设该算法定位误差为  $\Delta d_1$  则:

$$t_{AT} = t'_{AT}(1 + e_A) \quad (14)$$

$$t_{BT} = t'_{BT}(1 + e_B) \quad (15)$$

$$d'_{AT} = \frac{1}{2} \left[ d_{AB} + \frac{c(t'_{AT} - t'_{BT})}{2} \right] \quad (16)$$

$$\Delta d_1 = d_1 - d'_{AT} = \frac{c(t'_{AT}e_A - t'_{BT}e_B)}{4} \quad (17)$$

再分析  $d_2$ , 由式 (13) 可知,  $d_2$  与  $(t_{TB} - \Delta t)$  有关, 设该算法定位误差为  $\Delta d_2$  则:

$$t_{TB} = t'_{TB}(1 + e_T) \quad (18)$$

$$\Delta t = \Delta t'(1 + e_T) \quad (19)$$

$$d'_{AT} = d_{AB} - \frac{c(t'_{TB} - \Delta t')}{2} \quad (20)$$

$$\Delta d_2 = d_2 - d'_{AT} = \frac{c(t'_{TB} - \Delta t')e_T}{2} \quad (21)$$

通过上述分析可以看出,  $d_1$  与  $t_{AT}$  和  $t_{BT}$  有关, 与定位标签无关。定位标签的时钟频偏不影响定位精度,  $d_2$  与  $t_T$  有关, 与基站 A 与基站 B 无关, 基站 A 与基站 B 的时钟频偏不影响定位精度。因此提出一种融合  $d_1$  与  $d_2$  提高定位精度及算法稳定性的鲁棒卡尔曼滤波算法。

## 2 鲁棒卡尔曼滤波算法

为解决上述问题, 本文采用了鲁棒卡尔曼滤波算法。上文中的  $d_1$  与  $d_2$  作为其中的两个观测值, 该算法根据标准化后的新息向量构建自适应因子, 修正量测噪声协方差矩阵。

假设 UWB 定位标签匀速移动, 因此本文采用恒速 (constant velocity, CV) 运动学模型描述定位标签的变化状态。系统噪声向量  $w$  的协方差矩阵  $Q$  根据 CV 模型速率误差和测距时间间隔构建, 一般由经验值给出。观测噪声的协方差矩阵  $R$  用 UWB 测距误差均值表示。

在 CV 模型下状态向量由测距值及其变化速率构成:

$$\mathbf{X}_k = [d_k v_k] \quad (22)$$

状态转移矩阵为:

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

观测方程的观测矩阵为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

鲁棒卡尔曼滤波算法具体步骤如下:

1) 计算一步状态预测

$$\mathbf{X}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{X}_{k-1} \quad (25)$$

2)计算误差协方差矩阵

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_{k-1} \quad (26)$$

3)计算新息值

$$\epsilon_k = Z_k - H X_{k|k-1} \quad (27)$$

新息向量  $\epsilon_k$  是一步预测值与观测值之间的差值。如果  $\epsilon_k$  值很大,则表明观测值可能存在 NLOS 误差。所以本文以  $\epsilon_k$  为基础构建 NLOS 判别因子。

4)根据 Huber 权函数计算判别因子

$$a_k = \begin{cases} 1, & |Y_k| \geq m \\ \frac{Y_k}{c}, & |Y_k| \leq m \end{cases} \quad (28)$$

$$Y_k = \epsilon_k^T Q_{\epsilon|k}^{-1} \epsilon_k \quad (29)$$

$$Q_{\epsilon|k} = R_k + H P_{k|k-1} H^T \quad (30)$$

式中:  $m$  为实验统计常量,  $Q_{\epsilon|k}$  表示  $\epsilon_k$  的协方差矩阵。

判别因子发现 NLOS 误差后,卡尔曼滤波的预测值更可信,因此减小增益矩阵  $K_k$  值,只需增大观测噪声协方差矩阵  $R_k$  值可实现减小  $K_k$  值。

5)修正观测噪声协方差矩阵,并计算新息协方差矩阵

$$P_{Yk} = H_k P_{k|k-1} H_k^T + a_k R_k \quad (31)$$

6)计算卡尔曼滤波增益

$$\hat{K}_k = P_{k|k-1} H_k^T P_{Yk}^{-1} \quad (32)$$

7)状态更新

$$\hat{X}_k = X_{k|k-1} + \hat{K}_k \epsilon_k \quad (33)$$

8)误差协方差矩阵更新

$$\hat{P}_k = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (34)$$

新息阈值  $m$  应根据巷道环境进行设定,若阈值  $m$  过大,则可能造成巷道突发 NLOS 时延不能有效滤除,若阈值  $m$  过小,则会造成正常 TOA 测量值非法舍弃影响定位精度<sup>[15]</sup>。

### 3 仿真实验

使用 MATLAB 仿真软件进行仿真,基站 A 和基站 B 间距 400 m,定位标签以约 1.2 m/s 的速度沿基站 A 向基站 B 匀速前进,频率偏移取值范围参考 IEEE802.11 标准,频率偏移在  $\pm 25 \times 10^{-6}$  范围内。将本文算法与文献中提出的异步测时法和 S-TDOA 法进行比较<sup>[16-17]</sup>。

1)不考虑 NLOS 误差时的定位精度仿真实验

为了测试本文提出的 SDS-TWR 优化算法与鲁棒卡尔曼滤波结合的改进算法在定位精度方面的优势,本实验将基站 A、基站 B、定位标签的时钟频偏  $e_A, e_B, e_T$  均设置为  $25 \times e^{-6}$ ,收发定位信号的间隔时间  $t_A, t_B, t_T$  均设置为  $6 \times e^{-9}$  s。对测距观测值添加相同的高斯噪声,不添加随机 NLOS 噪声。实验中定位标签由基站 A 出发向基站 B 进行匀速运动,到达基站 B 的位置后停止。3 种算法定位误差比较数据如表 1 和 2 所示,定位误差比较如图 4 和 5 所示。

表 1 不考虑 NLOS 误差时不同定位算法误差数据

测量次数	异步测时法 误差/cm	S-TDOA 法 误差/cm	本文算法 误差/cm
1	5.65	6.47	4.41
2	5.41	6.46	4.10
3	5.56	6.27	4.00
4	5.40	6.14	3.88
5	5.42	5.91	3.79
6	5.32	6.12	3.94
7	5.54	5.86	3.84
8	5.39	5.88	3.77
9	5.39	5.61	3.67
10	5.39	5.98	3.86
11	5.41	5.73	3.68
12	5.55	5.72	3.73
13	5.47	5.78	3.73
14	5.39	5.57	3.61
15	5.67	5.71	3.76
16	5.52	5.48	3.77
17	5.18	5.66	3.48
18	5.55	5.57	3.66
19	5.62	5.61	3.80
20	5.60	5.34	3.59

表 2 不考虑 NLOS 误差时的定位平均误差

定位算法	平均误差/cm
异步测时法	5.47
S-TDOA 法	5.74
本文算法	3.77

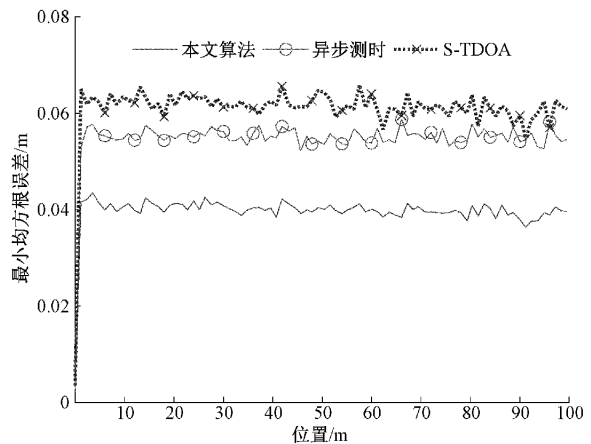


图 4 不考虑 NLOS 误差时不同算法误差曲线

由表 1 中的数据和图 4 中代表本文算法的误差曲线均位于另外其他两条误差曲线的下方可知,定位标签在移动的过程中,本文算法的定位误差均低于异步测时法和 S-

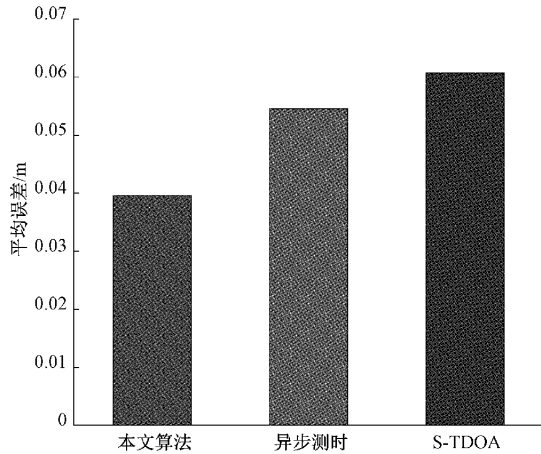


图 5 不考虑 NLOS 误差时不同算法平均误差比较

TDOA 法。由图 5 可知本文算法的平均误差低于其他两种算法的平均误差。由表 2 的数据可知在该实验中本文算法平均误差为 3.77 cm, 并且可计算得出本文算法较 S-TDOA 法误差降低 35%, 较异步测时法误差降低 31%。因此本实验可基本证明本文算法能够有效提高井下人员定位精度。

2) 时钟频偏和信号收发时间对算法影响分析实验

为了分析本文提出的 SDS-TWR 优化算法与鲁棒卡尔曼滤波结合的改进算法受时钟频偏和信号收发时间两个参数的影响程度以及算法的稳定性, 本实验对基站 A、基站 B、定位标签的时钟频偏  $e_A, e_B, e_T$  取值在  $-40 \times e^{-6} \sim 40 \times e^{-6}$  范围内,  $t_{AT}$  分别取 0.02、0.65、1.30、1.95、2.60  $\mu s$  时本文算法、异步测时法及 S-TDOA 法, 3 种算法的定位误差进行分析比较。定位误差曲线如图 6 所示。

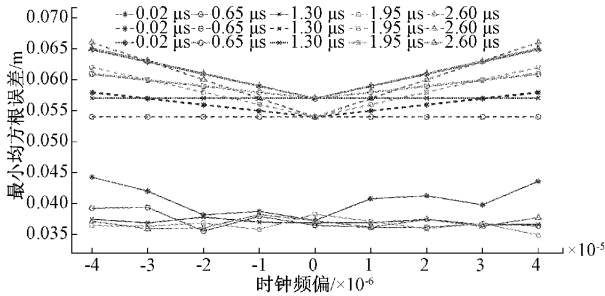


图 6 时钟频偏和信号收发时间对算法影响的误差曲线比较

通过对图 6 中定位误差曲线分析发现, 本文算法与不受基站 A 与基站 B 时钟频偏影响的异步测时法和和不受定位标签时钟频偏影响的 S-TDOA 法相比, 定位误差受信号收发时间及时钟频偏影响相对较小。由于受到鲁棒卡尔曼滤波算法迭代次数过少的影响, 本文算法仅在信号收发时间极小即定位标签恰从基站 A 出发时定位误差较大。本文算法的误差波动相较于异步测时法降低大约 50%, 较 S-TDOA 法降低大约 25%。因此本实验基本证明了本文算法具有较强稳定性。

3) NLOS 误差抑制仿真实验

为了测试本文提出的 SDS-TWR 优化算法与鲁棒卡尔曼滤波结合的改进算法对巷道随机 NLOS 的抑制性能。在加入了随机 NLOS 误差的情况下, 将本文算法与 SDS-TWR 算法、卡尔曼滤波算法进行比较。3 种算法定位误差曲线如图 7 所示, 定位误差比较数据如表 3 和 4 所示。

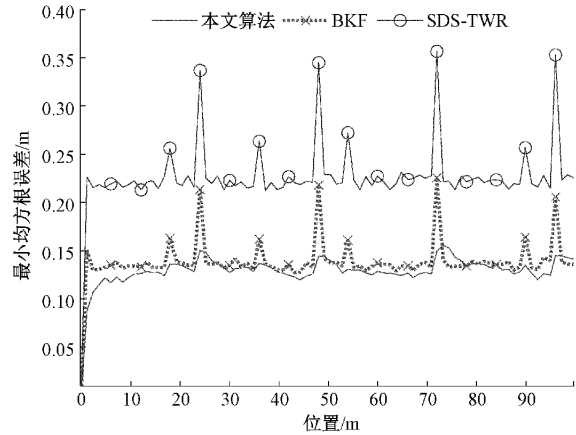


图 7 NLOS 情况下不同算法误差曲线

表 3 NLOS 情况下不同算法定位平均误差

定位算法	平均误差/cm
SDS-TWR	23.61
卡尔曼滤波	14.28
本文算法	12.90

表 4 NLOS 情况下不同定位算法误差数据

测量次数	SDS-TWR 误差/cm	卡尔曼滤波 误差/cm	本文算法 误差/cm
1	19.76	13.53	8.55
2	19.08	11.56	11.04
3	19.09	11.52	10.89
4	23.09	14.60	12.37
5	33.30	21.05	13.90
6	19.70	11.83	11.66
7	24.54	14.16	12.02
8	19.49	11.79	11.81
9	20.34	11.98	11.22
10	32.92	20.44	13.56
11	20.68	11.76	12.72
12	24.48	14.41	12.39
13	19.72	12.22	12.21
14	20.02	11.87	11.32
15	19.73	11.80	11.17
16	36.79	21.85	13.96
17	20.78	12.03	11.26
18	19.97	11.74	10.95
19	25.36	15.21	12.34
20	33.44	20.31	13.99



分析表 3 中的数据可知在该实验中本文算法的平均误差为 12.90 cm, 低于其他两种算法的平均误差。分析表 4 中的数据可知, SDS-TWR 算法误差波动范围为 19.08~36.79 cm; 卡尔曼滤波算法误差波动范围为 11.52~21.85 cm; 本文算法误差波动范围在 8.55~13.99 cm 之间, 观察图 7 中不同算法定位误差曲线可得 SDS-TWR 算法误差曲线脉冲波动十分明显, 卡尔曼滤波算法误差曲线脉冲波动相对明显, 本文算法误差曲线相对平稳且整体基本在其他两条曲线之下。通过上述分析总结可知, 本实验基本证明卡尔曼滤波算法无法有效抑制随机 NLOS 时延误差, 本文算法对随机 NLOS 时延误差滤波效果明显。可有效提高井下人员定位精度。

综上所述, MATLAB 仿真结果表明, 本文所提出的 SDS-TWR 优化算法与鲁棒卡尔曼滤波结合的改进算法有效提高了井下人员定位精度, 降低了信号收发时间及时钟频偏对定位精度的影响并且有效抑制了巷道 NLOS 时延误差。

#### 4 结 论

本文分析了 UWB 主流定位算法的定位性能及误差来源, 详细分析了井下环境对 UWB 定位精度的影响。为解决井下人员定位系统现存的定位精度不足和易受 NLOS 误差影响等问题。本文提出一种 SDS-TWR 优化算法与鲁棒卡尔曼滤波结合的改进算法。实验表明该算法降低了信号收发时间及时钟频偏对定位精度的影响, 有效降低了巷道 NLOS 时延误差对定位的影响, 实现了井下目标位置的精确估计。本文只对井下狭长巷道环境中的一维定位进行了实验分析, 后续将对井下环境二维定位方案进行分析研究。

#### 参考文献

- [1] 常琳. UWB 技术在精准人员管理系统中的应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(5): 163-165, 169.
- [2] RAYCHOWDHURY A, PRAMANIK A, ROY G C. New approach for localization and smart data transmission inside underground mine environment[J]. SN Applied Sciences, 2021, 3(6): 1-12.
- [3] ZARE M, BATTULWAR R, SEAMONS J, et al. Applications of wireless indoor positioning systems and technologies in underground mining: A review[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2021, 38(6): 2307-2322.
- [4] 陈红梅, 常林江, 徐振方, 等. 复杂环境下 GNSS/INS/UWB 紧组合的无人机协同导航算法[J]. 仪器仪表学

报, 2021, 42(7): 98-107.

- [5] 张海军, 孙学成, 赵小虎, 等. 煤矿井下 UWB 人员定位系统研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 29-34, 41.
- [6] 叶伟. 煤矿井下目标定位的研究现状与展望[J]. 中国矿业, 2021, 30(1): 82-89, 105.
- [7] 陈宏辉, 胡小平, 吴开盛. 煤矿井下移动机器人节点三维定位算法研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3): 65-70.
- [8] 郑自兴, 姚金杰. 基于信号强度的指纹定位匹配算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 31-35.
- [9] 杨晓倩. 基于 TOA-AOA 数据融合的定位算法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(16): 104-108.
- [10] 邵小强, 李康乐, 陈熙, 等. 基于改进卡尔曼滤波和参数拟合的矿井 TOA 定位方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1616-1624.
- [11] 孙宏伟, 曹雪虹, 焦良葆, 等. DS-TWR 算法室内定位批量测距系统的优化研究[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 73-82.
- [12] 尹秋园, 余慧敏. TDOA/SDS-TWR 联合的超宽带室内测距[J]. 电子测量技术, 2021, 44(4): 75-79.
- [13] 高健, 陆阳, 李庆巧, 等. 采用三次通信的 TOF 与 TDOA 联合定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 66-73.
- [14] 陈浩, 李起伟, 王子龙. 基于改进 TDOA 在煤矿井下超宽带定位算法的研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(6): 96-102.
- [15] 田广亮, 张丽杰, 李志宇. SVR 辅助改进鲁棒卡尔曼滤波的 UWB/INS 组合定位方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(3): 79-84.
- [16] 孙哲星, 孙继平. 异步测时矿井人员精确定位方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1464-1470.
- [17] 朱自强. 超宽带定位的关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

#### 作者简介

侯华(通信作者), 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为移动通信与认知无线电技术、物联网与装备智能化技术。

E-mail: houhua@hebeu.edu.cn

李峻辉, 硕士研究生, 主要研究方向为移动通信。

E-mail: 652944992@qq.com

代超娜, 硕士研究生, 主要研究方向为移动通信。

E-mail: 1070552280@qq.com

郭宏洋, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉。

E-mail: 1015539667@qq.com