

文章编号:1671-251X(2024)S1-0034-05

# 基于改进时间同步的矿井 UWB 优化定位方法

吴文臻<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013;  
3. 煤矿应急避险技术装备工程研究中心, 北京 100013; 4. 北京市煤矿安全技术研究中心, 北京 100013)

**摘要:**煤矿井下深度大、干扰因素众多、管网式巷道分布复杂,导致井下各定位节点的定位精度低,时间同步难。基于超宽带(UWB)技术的定位优势,提出一种改进的到达时间差(TDOA)定位方法,用于解决无线连接中时间同步的难度。在传统 TPSN 时间同步算法的基础上,兼顾时钟偏差、时钟漂移等影响定位精度的因素,通过卡尔曼滤波降低传输过程中的噪声干扰,并减少了系统的同步次数,降低了功耗。实验结果表明,改进的 TPSN 算法相比于传统 TPSN 算法的定位精度提高了 30% 左右。

**关键词:**井下定位; 超宽带; 时间同步; TDOA; TPSN; UWB

中图分类号:TD655

文献标志码:A

## Research on mine UWB optimized positioning method based on improved time synchronization

WU Wenzhen<sup>1,2,3,4</sup>

(1. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 3. Engineering Research Center for Technology Equipment of Emergency Refuge in Coal Mine, Beijing 100013, China;  
4. Beijing Engineering and Research Center of Mine Safe, Beijing 100013, China)

### 0 引言

我国煤炭生产以深部开采为主,煤层平均开采深度超过 500 m,这给煤炭行业的安全生产带来了新的挑战。为落实煤炭安全生产理念,国家采取一系列措施,包括落实安全生产理念、创新安全生产技术等,安全生产形势不断好转,吨死亡率降至 0.083%<sup>[1-2]</sup>。在煤矿安全生产的科技创新方面,人员定位技术是其中一项关键技术,而人员定位在煤矿井下的定位精度,直接关系到井下人员的安全,也是煤矿安全生产的重要保障。传统的煤矿井下人员定位技术主要包括红外定位<sup>[3]</sup>、超声定位<sup>[4]</sup>、ZigBee 定位<sup>[5]</sup>等。但是,这些传统的煤矿井下人员定位技术在实际应用中仍然存在许多不足之处:定位精度不高、可靠性较差、成本较高、抗多径干扰性能较差,需要持续提升定位精度,以满足现场需求<sup>[6-7]</sup>。

超宽带(Ultra-Wide Band, UWB)技术是一种新型的无线定位技术,具有高精度、高可靠性、低功耗等特点<sup>[8]</sup>,具有广阔的应用前景。近年来,业内学

者重点研究了 UWB 技术在井下人员定位的应用,并取得巨大成果。王洋洋等<sup>[9]</sup>在煤矿井下设计了一种基于 UWB 技术与 DS-TWR 定位算法的精确定位系统,可以缩短时隙宽度提高定位效率。张海军等<sup>[10]</sup>采用加权最小二乘法与无损卡尔曼滤波联合定位算法提高煤矿井下 UWB 人员定位系统的定位精度。丁震等<sup>[11]</sup>研究了粉尘浓度对煤矿井下 UWB 测距精度的影响。肖开泰<sup>[12]</sup>基于 UWB 技术的高精度人员定位系统,以 STM32 和 DW1000 模块为主体进行了定位基站和定位标签硬件电路设计,经测试定位精度满足煤矿定位需求。孙继平等<sup>[13]</sup>认为 UWB 定位中 TOA(Time of Arrival)方法定位精度受设备时延、计时器频率偏移等计时误差因素影响,须设计抑制计时误差的算法,将计时误差在计算中抵消。

定位算法是定位系统的核心,负责将定位设备接收到的信号信息转换为定位结果。定位算法的性能直接影响定位系统的定位精度、可靠性和实时性,因而定位算法的性能直接影响矿井定位技术的发

收稿日期:2024-01-25;责任编辑:王晖。

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2023-TD-ZD005-001,2022-2-TD-ZD001)。

作者简介:吴文臻(1983—),男,福建平潭人,副研究员,硕士,主要从事智能矿山、行业监管等方面的工作,E-mail:wuwenzhen@ccrise.cn。

展。在煤炭行业应用场景下,通过使用单独某种定位算法,定位精度难免差强人意,很难适应复杂的井下环境。鉴此,本文提出将不同定位算法进行组合及优化的方案,以提升定位精度。

## 1 矿井 UWB 定位系统设计

矿井 UWB 定位系统主要由井上服务器、光纤环网、UWB 定位基站及定位识别卡组成,如图 1 所示。

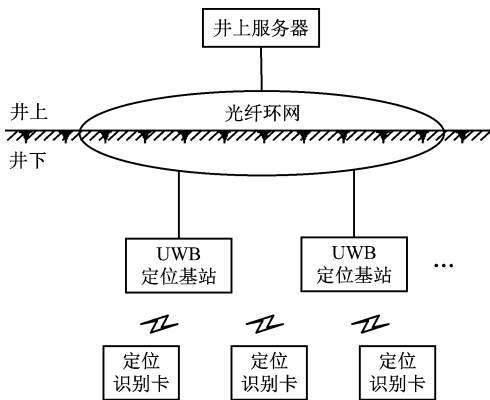


图 1 矿井 UWB 定位系统架构

定位识别卡接入 UWB 定位基站时,UWB 定位基站通过定位算法,确定定位识别卡距离数据信息,并通过光纤环网将定位识别卡数据信息上传到井上服务器,井上服务器通过数据处理得出定位识别卡的具体位置,实现人员、车辆等在矿井内的定位。

UWB 定位基站是矿井 UWB 定位系统的核心构成设备,其定位算法对矿井定位精度有重要影响。为提升矿井 UWB 定位系统精度,本文对 UWB 定位基站算法进行了研究和优化。

## 2 TDOA 定位算法研究

### 2.1 TDOA 定位算法

UWB 定位技术包括 TOA<sup>[14]</sup>、TDOA (Time Difference of Arrival)<sup>[15-17]</sup>、AOA<sup>[18]</sup> 和 RSSI<sup>[19]</sup> 等算法。在 UWB 定位系统中主要采用基于 TDOA 的定位技术。

TDOA 即到达时间差定位,是一种利用信号到达时间差来确定目标位置的定位方法。TDOA 定位系统由多个基站组成,基站发送信号,目标接收到信号后,基站测量信号到达时间。通过比较不同基站测量到的信号到达时间差,从而确定目标位置。

TDOA 定位原理如图 2 所示。基站分别发送信号到目标节点,目标节点接收到信号后,基站测量信号到达时间。通过比较基站测量到的信号到达时间差,可以得到目标节点与基站的距离差。通过 2 个距离差,可以得到 2 个双曲线方程,2 个双曲线

的交点即为目标节点的坐标<sup>[20]</sup>。

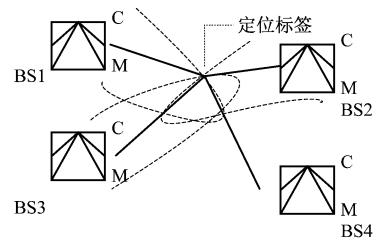


图 2 TDOA 定位原理

设 4 个基站的坐标为  $BS_1(x_1, y_1)$ ,  $BS_2(x_2, y_2)$ ,  $BS_3(x_3, y_3)$ ,  $BS_4(x_4, y_4)$ , 待测标签的坐标为  $(x, y)$ , 用  $r_n$  来表示标签到第  $n$  个基站的距离。将参考基站设为  $BS_1$ , 可计算出标签的坐标  $(x, y)$ :

$$\begin{cases} r_2 - r_1 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ r_3 - r_1 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ r_4 - r_1 = \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 TPSN 时间同步算法

TPSN (Time-Sync Protocol for Sensor Networks) 算法是传感器网络时钟同步的一种常用算法。它利用双向信标交换机制来完成同步,具有精度高、可靠性高、扩展性好等优点。TPSN 算法主要包括选主、同步、校准、同步完成 4 个步骤。在同步开始时,随机选择一个节点作为主时钟,主时钟负责向其他节点发送信标(信标中包含主时钟的时间戳),并负责校准所有节点的时间差。其他节点接收到信标后,计算信标到达时间,并根据信标到达时间计算本地时钟与主时钟之间的时间差。所有节点将计算得到的时间差发送给主时钟。主时钟将所有节点的时间差进行平均,并将平均值作为所有节点的时间差。所有节点将平均值作为本地时钟的时间,同步完成。

时钟同步过程如图 3 所示。 $T_2, T_3$  为节点 B 的本地时间,  $T_1, T_4$  为节点 A 的本地时间。在  $T_1$  时刻,通过节点 A 向节点 B 发送同步信息请求包信息(包含发送时间  $T_1$  和节点的层次号)。在  $T_2$  时刻,节点 B 接收到节点 A 发送的信息,故  $T_2 = T_1 + \delta + \alpha$ , 其中  $\delta$  为时间偏移量,  $\alpha$  为信号传输延迟。

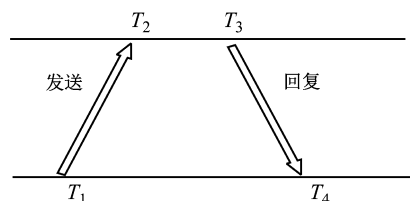


图 3 TPSN 算法节点同步信息交换模型

随后节点 B 返回应答信息包,包含节点 B 的层次号以及时间信息  $T_2, T_3$ 。在  $T_4$  时刻,节点 A 接收到节点 B 的响应包,故  $T_4 = T_3 + \delta - \alpha$ 。则时间偏移和传输延迟的表达式为

$$\alpha = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} = \frac{U + V}{2} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} = \frac{U - V}{2} \quad (3)$$

依据式(2)与式(3),原始 TPSN 算法未估计时钟频率偏移。为保证时钟偏移在合理范围,需采用多种同步策略,以减少同步的通信量和能耗,并采用分层结构,降低网络中节点损坏的影响。

### 2.3 改进 TDOA 定位算法

矿井环境复杂,存在多种干扰因素,基站数量有限,人员动态性强,标准 TDOA 定位算法在矿井下定位精度受到很大影响。基于此,本文改进了标准 TDOA 定位算法,改进的 TDOA 定位算法原理如图 4 所示。

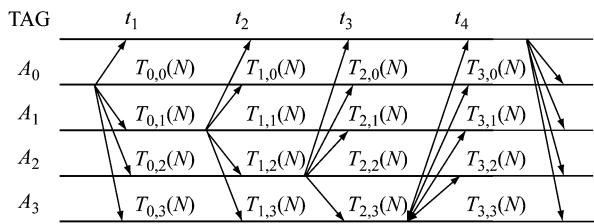


图 4 改进的 TDOA 定位算法原理

在本方案中,主基站向从基站发送信号,从基站接收信号后,向标签发送信号,并回复主基站。因此,主基站和从基站的交互过程相当于主从基站的时钟同步过程。在主从基站的时钟同步过程中,对其中的时钟偏差,可以参照 TPSN 算法的时钟同步方法进行类似处理,采用分层结构,将网络节点进行分层。分层结构分为树形结构和网状结构,本文基于网状结构,将主基站的主节点、从基站的从节点建立为二层网状结构,如图 5 所示,主从节点的交互过程,即主从基站在交互过程中实现时钟信息的同步。

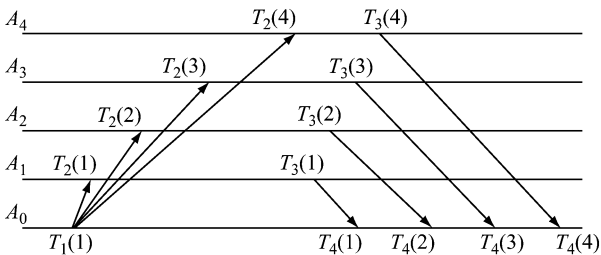


图 5 TPSN 算法节点同步信息交换模型

1) 预设一个主基站  $A_0$ ,然后设定从基站  $A_1, A_2, \dots, A_i$ 。主基站  $A_0$  与第  $i$  个从基站  $A_i$  之间的距离为  $d_i$ ,主基站  $A_0$  与第  $i$  个从基站  $A_i$  之间的时钟偏差为  $\theta_i$ 。

2) 在  $T_1$  时刻,主基站  $A_0$  向部分从基站  $A_1,$

$A_2, \dots, A_i$  发送信号;从基站接收主基站  $A_0$  的信号,并记录接收信号的时刻  $T_2, T_2$  计算公式为

$$T_2 = T_1 + \frac{d_i}{c} + \theta_i \quad (4)$$

式中  $c$  为电磁波传输速度。

3) 在  $T_3$  时刻,从基站发送包含各自层次号及时间信息( $T_1, T_2, T_3$ )的信号。

4) 在  $T_4$  时刻,主基站  $A_0$  接收从基站的信号,并记录接收信号的时刻  $T_4, T_4$  计算公式为

$$T_4 = T_3 + \frac{d_i}{c} - \theta_i \quad (5)$$

5) 在主从基站之间的交互过程中,通过主基站记录的时间信息差,可以得到主从基站的时钟偏差  $\theta_i, \theta_i$  计算公式为

$$\theta_i = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} \quad (6)$$

6) 通过主从基站间的距离  $d_i$  及电磁波传输速度  $c$ ,可以得到信号的空中传输时间  $\frac{d_i}{c}, \frac{d_i}{c}$  的计算公式为

$$\frac{d_i}{c} = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} \quad (7)$$

7) 计算主从节点,即主从基站的时钟偏差。通过式(6)、式(7)对主从节点的时钟偏差进行计算。将得到的主从基站时钟偏差带入式(1),即可得到信号空中传输的精确时间差。

$$\left\{ \begin{aligned} & \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} = \\ & \quad c \left( t_2 - t_1 - \frac{d_2}{c} - T_{\text{reply}2} - \theta_2 \right) \\ & \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} = \\ & \quad c \left( t_3 - t_1 - \frac{d_3}{c} - T_{\text{reply}3} - \theta_3 \right) \\ & \sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} = \\ & \quad c \left( t_n - t_1 - \frac{d_n}{c} - T_{\text{reply}n} - \theta_n \right) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中:  $\frac{d_n}{c}$  为主从基站之间的飞行时间;  $T_{\text{reply}n}$  为每个基站的等待时延。

改进定位算法中,通过计算信号空中传输的精准时间差,配合基站等待时延  $T_n$ ,能够对所有基站的时钟进行初始化。改进算法在一定程度上避免了基站之间信号同时交互导致的信号冲突,降低了时钟同步的复杂度。

在对时钟偏差进行计算时,尽量避免通过单次数据进行计算,应通过多组数据进行多次计算,以减少误差干扰。由于在信号传输过程中会存在随机时

延,导致时钟同步的精准度不高,从而导致定位精度不精准。为提高时钟同步精度,减少随机时延的影响,本文引入卡尔曼滤波对时钟偏差进行处理。

#### 2.4 卡尔曼滤波改进 TPSN 算法

卡尔曼滤波是一种基于贝叶斯统计理论的滤波算法,它可以有效估计随机过程的状态,降低其中的噪声干扰。卡尔曼滤波的包括 3 个步骤:① 初始化:根据初始条件,估计基站时钟偏差的状态。② 预测:根据当前状态,预测下一个时刻的基站时钟偏差。③ 更新:根据测量值,更新基站时钟偏差的状态。

首先进行时钟偏差的计算:

$$T(n) = T'(n) + v(n) \quad (9)$$

式中: $T(n)$ 为 $nT_0$ 的时钟偏差预测值; $T_0$ 为单次采样周期; $nT_0$ 为多次采样的时钟; $T'(n)$ 为 $nT_0$ 的时钟偏差实际值; $v(n)$ 为高斯白噪声,其均值为 0,方差为 $\sigma_v^2$ 。

接下来进行频率漂移率的计算:

$$f'(n) = a(n) + w(n) \quad (10)$$

式中: $f'(n)$ 为 $nT_0$ 的时钟频率漂移率; $f(n)$ 为 $nT_0$ 的时钟频率; $a(n)$ 为正常的频率漂移; $w(n)$ 同 $v(n)$ 一样,为高斯白噪声,但二者相互独立。式(10)成立的前提为不考虑主时钟的时钟频率 $f$ 的噪声影响。

根据式(9)、式(10),可推导出主从时钟的状态方程及预测方差:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} T'(n+1) \\ f(n) - f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T'(n) \\ f(n) - f \end{bmatrix} \alpha(n) + \begin{bmatrix} 0.5T_0^2 \\ T_0 \end{bmatrix} w(n) \\ T(n+1) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} T'(n) \\ f(n) - f \end{bmatrix} + v(n) \end{cases} \quad (11)$$

在式(11)基础上,

$$\begin{aligned} \text{令} \begin{cases} \mathbf{X}(n+1) = \begin{bmatrix} T'_{\text{offset}}(n+1) \\ f(n) - f \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{Y}(n+1) = [T'_{\text{offset}}(n+1)] \end{cases} \\ \mathbf{B} = \tau = \begin{bmatrix} 0.5T_0^2 \\ T_0 \end{bmatrix}, \mathbf{H} = [1 \quad 0], \text{可将其进一步简化为} \\ \begin{cases} \mathbf{X}(n+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(n) + \mathbf{B}\alpha(n) + \tau w(n) \\ \mathbf{Y}(n+1) = \mathbf{H}\mathbf{X}(n) + v(n) \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

卡尔曼滤波完成初始化后,会根据当前状态,对下一时刻的时钟偏差进行预测,预测公式为

$$x(n+1|n) = \mathbf{A}x(n|n) + \mathbf{B}u(n) \quad (13)$$

式中: $x(n+1|n)$ 为利用当前时刻预测的结果; $x(n|n)$ 为当前时刻的最优结果; $u(n)$ 是当前状态的

控制量。

用 $\mathbf{P}(n|n)$ 表示卡尔曼滤波的最小预测均方差矩阵, $\mathbf{P}(n+1|n)$ 表示利用当前时刻预测结果 $x(n+1|n)$ 的协方差矩阵,为简化运算,此处用 $\mathbf{Q}$ 来代表协方差。最小预测均方差矩阵计算公式为

$$\mathbf{P}(n+1|n) = \mathbf{A}\mathbf{P}(n|n)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (14)$$

通过式(14),可以推导出卡尔曼增益矩阵:

$$\mathbf{K}(n+1|n) =$$

$$\mathbf{P}(n+1|n)\mathbf{H}^T(\mathbf{R} + \mathbf{H}\mathbf{P}(n+1|n)\mathbf{H}^T)^{-1} \quad (15)$$

式中 $\mathbf{R}$ 为 $v(n)$ 的协方差矩阵,表示整个预测过程的噪声。

在卡尔曼滤波算法中,单次采样周期 $T_0$ 的选择非常重要,会直接影响到 TPSN 算法的精度与性能。 $T_0$ 设置越小,同步次数越多,定位精度越高,同时也会增加整体功耗。反之, $T_0$ 设置越大,同步次数越小,功耗也越小,但定位精度会明显下降。

卡尔曼滤波算法在计算过程中,会对主从节点的时钟进行同步,将时钟偏差与时钟漂移限制在合理的区间,保证主从节点的时钟不会出现较大偏差,可从噪声中提取出有用信号,降低噪声对预测值的影响,避免噪声干扰。

### 3 实验分析

#### 3.1 实验环境

在实验室环境下模拟了矿井下的巷道环境,在实验室环境进行二维定位,采用的硬件包括 3 台 UWB 定位基站,1 个移动标签模块以及 1 台电脑。在 3 台 UWB 定位基站中随机选择 1 台作为主基站,并与电脑相连,主基站负责接收基站与标签的信号,并将相应数据回传电脑进行处理。

实验装置摆放位置如图 6 所示,将主基站作为坐标轴原点(0,0),主基站与从基站分布在 $50 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的矩形范围,基站高度设置为 1.5 m。

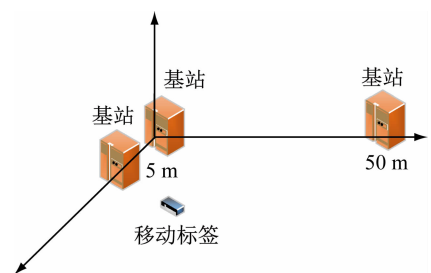


图 6 实验装置摆放位置

#### 3.2 实验结果

分别将移动标签放入(3,2.5)、(1.5,2.5)、(3,3)、(1.5,3)这 4 个位置分别进行 300 次测试实验,求得平均实验误差,验证改进 TPSN 算法的 TDOA

定位的性能。

表 1 列出了采用传统 TPSN 算法的 TDOA 定位测试结果。通过对 4 个位置进行误差统计与计算,传统 TPSN 算法的最小定位误差为 13.25~15.79 cm,最大误差为 20.54~22.35 cm,平均误差为 18.79~20.43 cm。测试结果表明,传统 TPSN 算法的 TDOA 定位精度不是很高,很难满足矿井特定场景下的定位需求。

| 表 1 传统 TPSN 算法测试结果 |            |            |            | cm |
|--------------------|------------|------------|------------|----|
| 移动标签<br>真实坐标       | 实验最大<br>误差 | 实验最小<br>误差 | 实验平均<br>误差 |    |
| (3,2.5)            | 21.89      | 14.31      | 19.35      |    |
| (1.5,2.5)          | 22.35      | 13.25      | 20.43      |    |
| (3,3)              | 20.54      | 15.79      | 18.79      |    |
| (1.5,3)            | 21.04      | 14.89      | 19.36      |    |

表 2 列出了采用改进 TPSN 算法的 TDOA 定位测试结果。通过对 4 个位置进行误差统计与计算,改进 TPSN 算法的最小定位误差为 9.58~10.64 cm,最大误差为 19.63~21.34 cm,平均误差为 13.69~14.83 cm。采用改进 TPSN 算法的 TDOA 定位精度误差比传统 TPSN 算法的 TDOA 定位平均误差降低接近 30%。

| 表 2 改进 TPSN 算法测试结果 |            |            |            | cm |
|--------------------|------------|------------|------------|----|
| 移动标签<br>真实坐标       | 实验最大<br>误差 | 实验最小<br>误差 | 实验平均<br>误差 |    |
| (3,2.5)            | 19.89      | 9.74       | 14.83      |    |
| (1.5,2.5)          | 21.34      | 9.58       | 13.69      |    |
| (3,3)              | 20.64      | 10.64      | 14.03      |    |
| (1.5,3)            | 19.63      | 9.73       | 13.98      |    |

上述测试结果与结论均建立在实验室环境下,实验室环境简单,干扰因素较少。若应用在矿井等巷道环境,定位精度与实验室测试结果相比,必然会有一定的误差。然而,在实验室环境下,改进 TPSN 算法的 TDOA 定位明显提升了定位精度,表明该方法应用在井下,也具有一定的适用性。

## 4 结论

研究了基于 UWB 的矿用定位系统时间同步方法,利用卡尔曼滤波对传统 TPSN 算法进行改进,提升了 TPSN 算法的同步精度,提高了定位测量的精度,并减少了系统的同步次数,降低了功耗。同时,深入分析了主基站时钟漂移对同步的影响。实验结果表明,改进 TPSN 算法相比于传统 TPSN 算法,定位精度提高了 30%左右,在环境复杂的矿井下更具有适用性。

## 参考文献:

[1] 王显政.我国煤矿安全生产 50 年回顾与展望[J]. 煤矿安全,2020,51(10):1-4.

[2] 申伟光.基于 UWB 技术的煤矿井下无线定位系统[J]. 煤矿安全,2018,49(10):131-134.

[3] 蔺璐.面向煤矿井下人员的红外技术研究[D]. 太原:太原理工大学,2018.

[4] 孙哲星.煤矿井下人员精确定位方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.

[5] 孙继平.矿井人员位置监测技术[J]. 工矿自动化,2023,49(6):41-47.

[6] 陈新科,喻川,文智力. UWB 定位技术在煤矿井下的应用[J]. 煤炭科学技术,2018,46(S1):187-189.

[7] 方文浩.基于 UWB 的煤矿井下高精度定位技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.

[8] 周仁斌.基于 UWB 技术的煤矿井下人员精确位置监测系统[J]. 煤矿机械,2022,43(6):181-184.

[9] 王洋洋,张洪亮.基于 UWB 技术与 DS-TWR 算法的煤矿井下人员精确定位系统[J]. 煤炭技术,2022,41(11):200-202.

[10] 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.

[11] 丁震,张雨晨.煤矿井下粉尘浓度对 UWB 测距精度的影响研究[J]. 工矿自动化,2021,47(11):131-134.

[12] 肖开泰.基于 UWB 超宽带的煤矿定位系统设计[J]. 煤矿安全,2020,51(8):128-131.

[13] SUN Jiping,LI Chenxin. Tunnel personnel positioning method based on TOA and modified location-fingerprint positioning [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26 (3): 429-436.

[14] 田亚飞.基于 UWB 的室内无线定位技术研究[D]. 吉林:吉林大学,2019.

[15] 罗勃.基于 UWB 技术的 TDOA 定位算法的研究与实现[D]. 海口:海南大学,2017.

[16] 陈思翰.基于 Fang 算法的 TDOA 室内定位技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2017,15(5):752-755.

[17] 韦子辉,张要发,赵计勋,等. LM 算法在 TDOA 三维定位中的应用研究[J]. 计算机工程,2020,46(9): 193-197,204.

[18] 朱霞青.一种减小偏差的三维 AOA 定位方法[J]. 无线通信技术,2020,29(1):1-5.

[19] 肖晓晴.基于 UWB 的移动物体室内定位技术研究[D]. 苏州:苏州大学,2020.

[20] 仲江涛.基于 UWB 室内定位算法的研究与实现[D]. 深圳:深圳大学,2017.

[21] 张梅,荣昆,张双双.基于卡尔曼滤波的 TPSN 时钟同步算法[J]. 电子测量技术,2020,43(18):43-46.