

基于 TWR 的 WLS 和 KF 融合室内定位方法

刘姝廷, 张媛媛, 张贺, 娄浩云

(沈阳理工大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 超宽带 (ultra wide band, UWB) 传感器室内定位常通过双向测距法 (two-way ranging, TWR) 测得基站到待测标签距离, 采用三边定位法进行室内定位, 但因存在非视距误差等因素影响导致定位精度低且发散, 为此本文提出采用加权最小二乘法 (weighted least squares, WLS) 训练数据集, 将其定位结果与卡尔曼滤波相结合进行室内定位。仿真实验结果表明, 该方法能够解决经典定位造成较大误差的缺点, 定位更快速。

关键词: 超宽带; 双向测距法; 加权最小二乘算法; 卡尔曼滤波算法

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2024.06.002

Indoor Positioning Based on TWR Fusion of WLS and KF

LIU Shuting, ZHANG Yuanyuan, ZHANG He, LOU Haoyun

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: Ultra wide band (UWB) sensors often use two-way ranging (TWR) to measure the distance between the base station and the target label for indoor positioning. The trilateral positioning method is used for indoor positioning, but due to factors such as non-line-of-sight errors, the positioning accuracy is low and scattered. Therefore, it is proposed here to use weighted least squares (WLS) to train the dataset and combine its positioning results with Kalman filtering for indoor positioning. The simulation experiment results show that this method can solve the problem of large errors caused by classical positioning and achieve faster positioning.

Key words: ultra wide band; two-way ranging; weighted least squares algorithm; Kalman filtering algorithm

随着我国城市化进程的加快, 人们在室内的时间越来越多。室内定位系统在智能家居、室内停车场、医疗保健中心及购物中心等多个领域均具有广泛的应用前景。如何提高定位精度是室内定位系统重要的研究内容^[1]。然而, 由于室内环境复杂多变, 存在许多障碍物, 导致卫星信号大幅度衰减, 给室内定位带来了较大挑战^[2]。本文提出在室内环境中采用超宽带 (ultra wide band, UWB) 技术, 利用双向测距 (two-way ranging, TWR) 原理进行测距。UWB 技术解禁后, 开始受

到广泛关注和研究, 美国联邦通信委员会为 UWB 技术分配了 3.1 ~ 10.6 GHz 的频段^[3]。基于 UWB 的定位跟踪技术具有高精度定位、良好鲁棒性、强适应性和低成本等优势, 成为当前定位技术的研究热点^[4]。UWB 作为一种新型的载波通信技术, 与常规载波通信模式相比, 采用了非常窄的脉冲传输数据^[5], 理想情况可达到 10 cm 的测距精度和 30 cm 的定位精度^[6]。在进行基站到待测标签距离测量时, 提出一种循环唤醒 UWB 定位锚点的方法, 即在同一时刻仅使用一个定位锚点,

使待测标签与被唤醒的定位锚建立通讯连接,从而保证待测标签仅与一个定位锚点保持通讯,其他定位锚点保持休眠状态^[7]。

测量目标与锚传感器之间的距离或范围可以采用到达角(AOA)、到达时差(TDOA)、到达时间(TOA)以及飞行时间(TOF)等测量方法,每种方法都有其适用场景^[8]。针对TOF的测量,发送器会将发送时间戳附加到分组并发送到接收器,接收器在接收到信号后再次加上接收时间戳,从而精确记录信号传输的时间^[9]。采用双向测距法可以有效消除由于时钟同步引起的误差。双向测距法分为单边双向测距法和双边双向测距法,当设备接收到来自其他设备的回传信息时,经过一段特定的响应时间后再发送确认消息包,可有效减少由于时钟偏差引起的测距误差,从而显著提高测距的精度^[10]。

综上所述,本文基于UWB定位技术,采用TWR测距方式,通过加权最小二乘法(weighted least squares, WLS)结合卡尔曼滤波算法,对定位精度进行优化。采用TWR测距方法获得基站到待测标签间的距离,将采集的多组数据作为试验的数据集,通过WLS确定待测标签位置,并结合卡尔曼滤波算法进行位置精度优化,以提高预测准确性,该测量方法称为融合方法。

试验现场设置了四个基站,分别放置在办公室四个位置,形成长方形布局。每个基站通过手机支架架高两米,以保证在非视距条件下测试时基站不受障碍物影响。

1 加权最小二乘算法

1.1 最小二乘法

最小二乘法是根据观察模型来预估信号参数,使误差的平方和最小^[11]。在使用最小二乘法定位标签坐标时,由于室内环境中障碍物位置不同,各基站与定位标签之间的测距误差不同。通常情况下,当基站和定位标签之间距离越近,测距误差越小^[12]。因此,可以根据基站和定位标签的距离给每个基站赋予权值以提高定位精度。本文试验中四个基站固定在房间的四个角落,尽量避免非视距情况。选用一个标签作为移动的待测标签。分别设定四个基站的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) , 待测标签坐标为 (x, y, z) 。用TWR技术确定各基站到待测标签的距离 $R_i (i=0, 1, 2, 3)$, 计算表达式为

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = R_i^2 \quad (1)$$

式中 i 表示基站序号。由式(1)可得矩阵为

$$\begin{bmatrix} R_0 \\ R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \\ \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \\ \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} \\ \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将公式(2)等号两端的矩阵每个元素分别平方,然后将左端矩阵中的第2、3、4行向量值减去第1行向量值,同时对右端矩阵以相同方式进行操作,可得表达式为

$$\mathbf{AX} = \mathbf{b} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_3 - x_0) & 2(y_3 - y_0) & 2(z_3 - z_0) \\ 2(x_2 - x_0) & 2(y_2 - y_0) & 2(z_2 - z_0) \\ 2(x_1 - x_0) & 2(y_1 - y_0) & 2(z_1 - z_0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} x_3^2 - x_0^2 + y_3^2 - y_0^2 + z_3^2 - z_0^2 + R_0^2 - R_3^2 \\ x_2^2 - x_0^2 + y_2^2 - y_0^2 + z_2^2 - z_0^2 + R_0^2 - R_2^2 \\ x_1^2 - x_0^2 + y_1^2 - y_0^2 + z_1^2 - z_0^2 + R_0^2 - R_1^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由公式(3)得

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (7)$$

1.2 加权准则

由于受环境影响,基站到待测标签的测量误差会随距离的增大而增加,噪声方差与距离存在正比关系。为此,采用WLS减小误差,本文使用基站与待测标签间距离的倒数作为权重 \mathbf{W} ,表达式(7)改为

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{b} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{W} = \text{diag}(w_{0j}, w_{1j}, w_{2j}, w_{3j}) \quad (9)$$

式中 j 表示待测标签的序号; $w_{0j}, w_{1j}, w_{2j}, w_{3j}$ 表示各基站所对应的权重值。为了计算在无偏估计条件下的待测标签坐标,本文引入了对称正定矩阵 \mathbf{W} ,根据每个标签对基站的影响程度可调整加权系数的大小,标签到基站的距离越近,权值越大,反之越小。各点权重的计算表达式为

$$w_{ij} = 1 - \frac{d_{ij}}{\sum_{i=0}^3 d_{ij}} \quad (10)$$

式中 d_{ij} 表示各基站到各标签的距离值。

2 加权最小二乘融合卡尔曼滤波

研究人员提出了许多抑制非视距误差的新方法,如散射模型法、BF参数法和卡尔曼滤波法等,其中卡尔曼滤波法是研究领域中最为常用的一种算法^[13]。

2.1 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波方法以线性系统的状态方程为基础,是一种能够在线性系统中根据所测得数据精准预测系统状态的算法^[14]。本文实验将待测标签坐标作为待观测数据,采集五组待测标签坐标。由于待测标签固定不动,所以进行卡尔曼滤波时设置状态转移矩阵和控制矩阵均为单位矩阵,卡尔曼滤波方法能够有效地处理系统噪声和测量误差,提高室内定位精度。

卡尔曼滤波的状态方程为

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{F}\mathbf{X}_{t-1} + \mathbf{W}_{t-1} \quad (11)$$

式中: \mathbf{X}_t 表示 t 时刻的状态向量; \mathbf{F} 表示状态转移矩阵; \mathbf{W}_{t-1} 表示过程噪声,本文设置均值为0,其中协方差矩阵具体值固定在一定范围内随机选取。

观测方程为

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{H}\mathbf{X}_t + \mathbf{V}_t \quad (12)$$

式中: \mathbf{Y}_t 表示 t 时刻的观测向量; \mathbf{H} 表示观测矩阵; \mathbf{V}_t 表示观测噪声,观测噪声一般为高斯白噪声,设置均值为0,其中协方差矩阵具体值固定在一定范围内随机选取,且观测噪声与过程噪声不相关。本文采用卡尔曼滤波法,以提高数据精度并降低噪声,但传统卡尔曼滤波在系统运动状态变化时精度下降。因此,本文采用多次对固定点进行采样以提高传统卡尔曼滤波的准确性。

2.2 融合方法

本文在WLS的基础上,将获得的待测标签坐标代入卡尔曼的观测方程中,作为卡尔曼的观测值。设 $\mathbf{X}_t = [x_t, y_t]^T$,其中 x_t, y_t 为 t 时刻由WLS得到的标签位置。定位算法流程图如图1所示。

3 算法仿真分析

为使试验中的待测节点有良好的活动性并且尽量减少障碍物带来的视距效应,将四个基站设置在一个空旷房间的四个角落,坐标分别为基站0(0,0,2.22),基站1(6.32,0,2.22),基站2

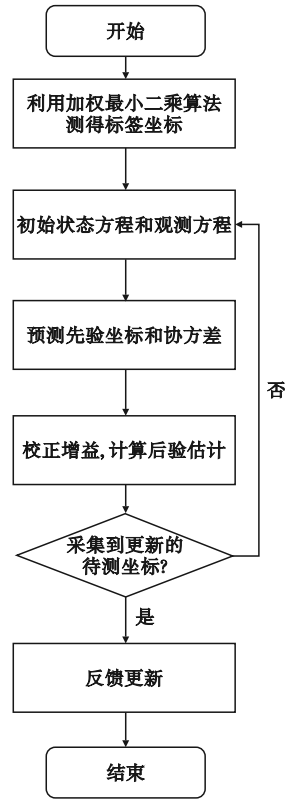


图1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flowchart

(6.32,5.68,2.22),基站3(0,5.68,2.22);本文将待测标签放置在所设基站范围内的任意六个位置,且待测节点高度不高于基站高度,采集场景和上位机显示界面如图2、图3所示。



图2 数据采集场景

Fig. 2 Data collection scenario

采用MatlabR2020a平台对WLS进行仿真,将实际待测标签位置与利用WLS获得的标签位置进行对比,结果如图4所示。

将利用WLS获得的标签作为卡尔曼滤波的观测值,设置标签的移动速度为1,标签的起点和移动速度也是卡尔曼滤波算法的初值,运行于Visual Studio 2019平台,卡尔曼滤波时采用的是固定点滤波,设 \mathbf{F} 、 \mathbf{H} 为单位矩阵,过程噪声和观

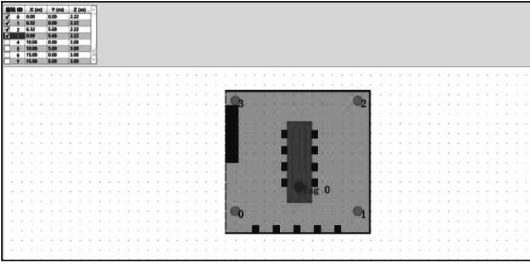


图 3 上位机显示

Fig. 3 Upper computer display

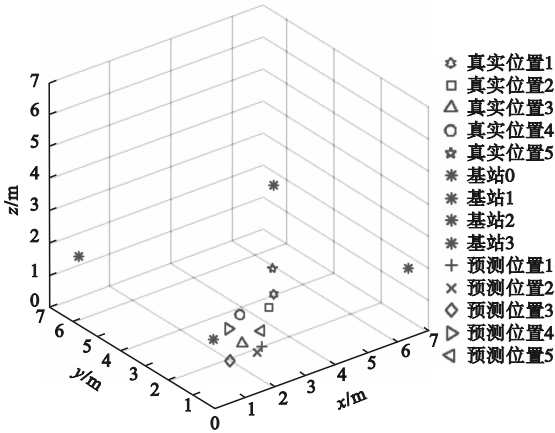


图 4 预测位置与实际位置对比图

Fig. 4 Comparison between predicted position and actual position

测噪声设置为 0.7 ~ 1.0 之间,其中过程噪声参数设置均值为零,观测噪声参数设置均值为零,选取待测标签 1 坐标作为卡尔曼的观测值,将 WLS 融合卡尔曼滤波的坐标收集并记录下来,并通过仿真进行对比分析,结果如图 5、图 6 所示。

从图 5 中可以看出,在实际环境中,受非视距效应等因素影响,两种方法均存在误差。单从标签 x 轴坐标值来看,初始阶段采用 WLS 和 WLS 融合卡尔曼滤波法并未显示明显差异;经过 6 次采样后, WLS 的结果与实际值之间存在 [0.1, 0.2] 的误差,而融合方法将带有误差的位置坐标值进行了优化处理,其误差范围为 [0.01, 0.1), 表明随着采样次数的增加,融合方法在减小误差方面表现较好。

从图 6 中可以看出,采样越多,融合方法越好,尤其是在进行第 12 次采样时,融合方法最小误差可达 0.03,而 WLS 最少误差为 0.1。

本文基于待测标签 2 进行了同样的仿真试验。将经由 WLS 获取的位置值作为卡尔曼的观测值继续进行对比,仿真的结果如图 7、图 8 所示。

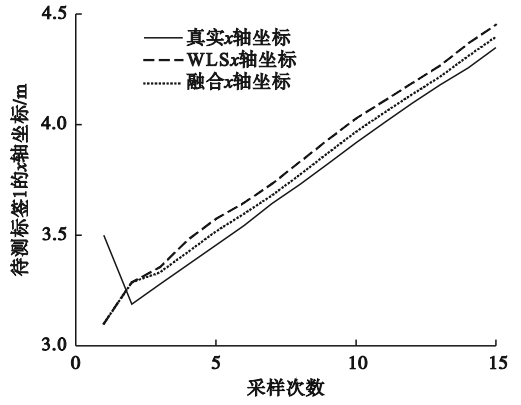


图 5 待测标签 1 的 x 轴坐标折线图

Fig. 5 Line graph of x-axis coordinate of label 1 to be tested

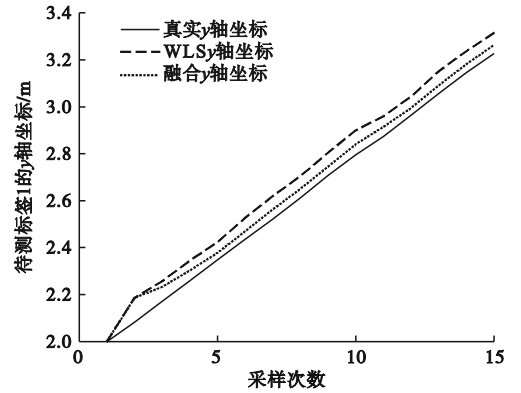


图 6 待测标签 1 的 y 轴坐标折线图

Fig. 6 Line graph of y-axis coordinate of label 1 to be tested

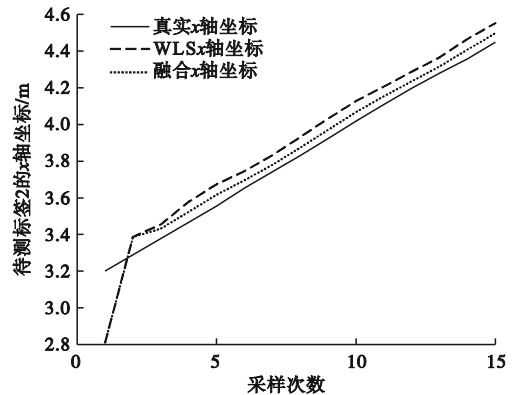


图 7 待测标签 2 的 x 轴坐标折线图

Fig. 7 Line graph of x-axis coordinate of label 2 to be tested

由图 7 可以看出,在相同的非视距效应或多径干扰的环境下,对待测标签 2 进行同样的方法定位时,进行初始采样时误差较大,其呈现出的效果与图 5 相似,在第 6 次采样之后,更加凸显融合方法的精准,误差在 [0.01, 0.1) 区间。

由图8可以看出,通过将WLS得到的带有误差的坐标作为状态数据,结合真实的观测数据进行卡尔曼滤波处理,有效减小了非视距效应等误差干扰,融合方法平均误差在 $(0.03, 0.05]$ 区间,而WLS平均误差在 $(0.1, 0.2]$ 区间。

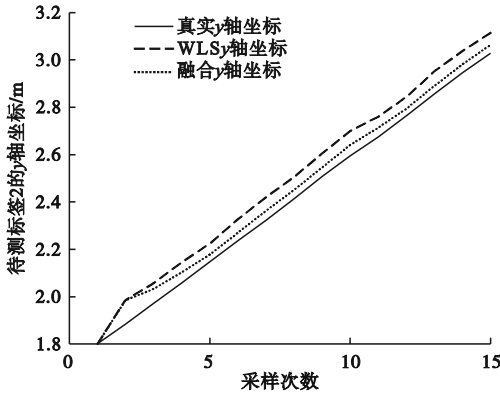


图8 待测标签2的y轴坐标折线图

Fig.8 Line graph of y-axis coordinate of label 2 to be tested

综合上述试验结果可知:WLS的复杂度对于x轴坐标为3.6,y轴坐标为2.7;而融合方法复杂度对于x轴坐标为4.5,y轴坐标为4.2。因此,WLS的复杂度比融合方法复杂度低,在数据量相对较小的情况下是更好的选择,在数据量较大且状态维度较大的情况下准确率更高,更有优势。

4 结论

本文基于WLS融合卡尔曼滤波方法对UWB室内定位精度进行研究,有效解决了室内定位误差过大问题。为减小非视距效应影响,本试验选择在办公室利用TWR测距方法采集基站到标签距离,并基于这些距离值计算了WLS的权重以及待测标签的坐标,接着将这些坐标值用作卡尔曼滤波的观测值,经过15次采样后,仿真结果显示融合方法得到的标签坐标与真实坐标更为接近,表明本文提出的方法有效。

参考文献(References):

[1] 张翼. 基于超宽带技术室内定位算法综述[J]. 数字技术与应用,2023,41(11):147-149.
ZHANG Y. Overview of indoor positioning algorithms based on ultra-wideband technology[J]. Digital Technology & Application,2023,41(11):147-149. (in Chinese)

[2] WANG J, WANG M M, YANG D, et al. UWB positioning algorithm and accuracy evaluation for different indoor scenes[J]. International Journal of Image and Data Fusion,2021,12(3):203-225.

[3] 何海平,郭杭,王阳. 基于UWB的室内定位系统研究[C]// 卫星导航定位与北斗系统应用2016:星参北斗位联世界,2016:138-142.

[4] 石豪东,付铭,夏雨啸,等. 基于单锚点UWB的室内定位技术[J]. 自动化与仪表,2023,38(11):88-93.
SHI H D, FU M, XIA Y X, et al. Indoor positioning technology based on single anchor UWB[J]. Automation & Instrumentation,2023,38(11):88-93. (in Chinese)

[5] 陈静,缪坤坤,FELIX Manirankunda. 基于UKF优化多三角加权定位算法的UWB室内定位系统设计[J]. 无线电工程,2023,53(3):669-677.
CHEN J, MIAO K K, MANIRANKUNDA F. Design of UWB indoor positioning system based on UKF optimized multi-triangular weighted algorithm[J]. Radio Engineering,2023,53(3):669-677. (in Chinese)

[6] 苏素燕,陈金旺,王林芳,等. 室内外定位技术综述[J]. 智能计算机与应用,2023,13(10):179-183.
SU S Y, CHEN J W, WANG L F, et al. A review of indoor and outdoor positioning technology[J]. Intelligent Computer and Applications,2023,13(10):179-183. (in Chinese)

[7] 陈锐志,郭光毅,陈亮,等. 室内高精度定位技术研究应用现状与发展趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(10):1591-1600.
CHEN R Z, GUO G Y, CHEN L, et al. Application status, development and future trend of high-precision indoor navigation and tracking[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2023,48(10):1591-1600. (in Chinese)

[8] PAN H, QI X G, LIU M L, et al. An UWB-based indoor coplanar localization and anchor placement optimization method[J]. Neural Computing and Applications,2022,34(19):16845-16860.

[9] TIAN Y L, LIAN Z Z, WANG P H, et al. Application of a long short-term memory neural network algorithm fused with Kalman filter in UWB indoor positioning[J]. Scientific Reports,2024,14:1925.

[10] BREGAR K. Indoor UWB positioning and position tracking data set[J]. Scientific Data,2023,10:744.

[11] 张紫沁,冯玉田. 基于自适应Kalman滤波的DS-TWR测距方法研究[J]. 工业控制计算机,2023,36(2):86-88.
ZHANG Z Q, FENG Y T. Research on DS-TWR method based on adaptive Kalman[J]. Industrial Control Computer,2023,36(2):86-88. (in Chinese)

[12] 钱剑航. 加权最小二乘的NLOS UWB室内定位精度分析[J]. 地理空间信息,2023,21(8):86-88.
QIAN J H. NLOS UWB indoor positioning accuracy analysis based on weighted least squares[J]. Geospatial Information,2023,21(8):86-88. (in Chinese)

[13] 林红梅,李犇,王涛,等. 基于TDOA的改进室内定位算法[J]. 工矿自动化,2023,49(S1):50-55.
LIN H M, LI B, WANG T, et al. Improved indoor location algorithm based on TDOA[J]. Journal of Mine Automation,2023,49(S1):50-55. (in Chinese)

[14] 徐建华,张雨霖,韩勇强. 基于移动节点辅助定位的UWB室内定位方法[J]. 中国惯性技术学报,2023,31(2):141-147.
XU J H, ZHANG Y L, HAN Y Q. UWB indoor location method based on moving node auxiliary positioning[J]. Journal of Chinese Inertial Technology,2023,31(2):141-147. (in Chinese)