

卡尔曼滤波提高 UWB 测距精度研究*

任昊誉 郭晨霞 杨瑞峰

(中北大学 仪器与电子学院 山西省自动化检测装备与系统工程技术研究中心 太原 030051)

摘要: 超宽带(UWB)测距的室内定位在商场、住户、医院等地应用十分广泛,提高室内定位竞争力的是定位精度。为了实现实际测量过程中在各种干扰条件下较为准确的测距,采用了卡尔曼滤波算法,尽可能的减少外界干扰对测距的影响,以减少测量误差。针对 UWB 测距精度提高问题,设计了以卡尔曼滤波为处理算法的对比实验,结果为测距精度有较大提高,在实验环境下误差从 5.8% 减少到了 2.44%,在精度提高最明显的距离通过绘图分析表明数据的可靠性提高,测距精度提高了 58%。实验表明,卡尔曼滤波方法有效地提高了 UWB 的测距精度。

关键词: UWB 测距;卡尔曼滤波;双边双向测距;室内定位

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3099

Research on improving UWB ranging accuracy by Kalman filter

Ren Haoyu Guo Chenxia Yang Ruifeng

(Shanxi Automation Testing Equipment and System Engineering Technology Research Center, School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Ultra-wide band (UWB) ranging indoor positioning is widely used in shopping malls, residents, hospitals and other places, improving the competitiveness of indoor positioning is positioning accuracy. In order to achieve accurate ranging under various interference conditions in the actual measurement process, Kalman filter algorithm is adopted to reduce the influence of external interference on ranging as much as possible, so as to reduce the measurement error. Aiming at the problem of UWB ranging accuracy improvement, a comparative experiment using Kalman filter as processing algorithm is designed. The results show that the ranging accuracy has been greatly improved, and the error has been reduced from 5.8% to 2.44% in the experimental environment. In the distance where the accuracy is most obviously improved, the data reliability has been improved and the ranging accuracy has been improved by 58% through drawing analysis. Experimental results show that Kalman filter can effectively improve the ranging accuracy of UWB.

Keywords: UWB range; Kalman filter; two-way ranging; indoor positioning

0 引言

目前,全球定位系统已经成为了大多数智能设备的必备配置,比如智能手机、汽车导航等,利用全球定位系统进行户外定位的功能已经非常普遍。而在室内由于层层遮挡与干扰,卫星信号不能及时准确的定位,利用移动传感器进行室内定位的势头越来越大^[1]。

室内定位,即提供室内环境中人或物体位置的解决方案,是智能应用需求日益增长的尖端服务之一^[2],目前来讲,常见的定位技术有 WiFi 定位技术、蓝牙定位技术、ZigBee 定位技术、超宽带定位技术、超宽带(ultra-wide band, UWB)定位技术^[3]。而无论是哪种定位方法,最根本的原理都是通过多个小

型基站对标签发射接收信号来测距,根据基站的位置与测得的距离构建坐标系,从而完成定位的功能。本文采用 UWB 定位技术,超宽带被认为是最精确的方法之一,因为它可以提供厘米级精度的定位估计^[4],非常适合于无线传感器网络中数据传输的低功耗和精确测距信息的获取^[5],比如矿井下矿工的定位^[6]、仓库内叉车与货物的定位^[7]、家庭环境中防止老年人跌倒^[8]等。相比需要测距的定位方法,非测距的定位方法只能提供粗略的范围估计,不能满足需求^[9],所以测距的精度大小,决定了定位精度的大小。

为了提高 UWB 测距的精度以在生活中最大限度的提高人们的生活与工作安全保障,文献[10]提出了较为复杂

收稿日期:2021-06-10

* 基金项目:山西省重点研发计划项目(201903D121118)、山西省回国留学人员科研项目(2020-111)资助

的固定区间平滑滤波增强惯性导航系统(inertial navigation system, INS)/UWB/非完整性约束模型(non-holonomic constraint, NHC)组合算法,解决了室内定位两大难题:精度不高、连续性和可靠性差,大大推动了 UWB 传感器与定位的融合发展^[10],由于算法过于复杂,数据处理的响应较慢,需要占用大量的内存;另外,文献[11]中 UWB 本身的算法改进也被广泛应用被用于导航定位,但是该算法处理的数据极值之差过大,不适合在高精度的环境下测量。针对测量精度的提高问题,本文采用效率较高的卡尔曼滤波算法,目的将数据处理过程在不过于影响精度的情况下简化,可以丰富 UWB 测距的应用场景。

1 UWB 定位原理

UWB 定位不需要使用传统定位方式中传输信息的载波,如超声波、激光等,而是利用电子标签设备发送具有纳秒或纳秒级以下的非正弦窄脉冲来传输数据^[12],定位基站接收,再通过计算时间差来定位。所以 UWB 的频谱范围很宽,具有抗干扰能力强、传输速率高、带宽较宽、功耗低、传输功率低等优点^[13]。

和北斗导航一样,在室内位想要较为准确的定位,需要至少 3 个基站^[14],灵活使用三角测量算法或者三边测量算法算出标签具体的位置,三边测量算法的原理如图 1 所示。

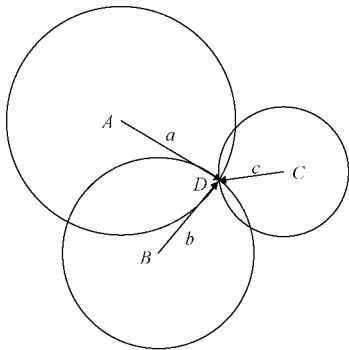


图 1 三边测量法原理

图 1 中以 3 个基站 A、B、C 为圆心作圆,并建立坐标系,A、B、C 的坐标分别是 (X_a, Y_a) 、 (X_b, Y_b) 、 (X_c, Y_c) , D 为标签,以 A、B、C 为圆心的圆相交于标签 D,则 A、B、C 为参考节点,D 为移动节点,圆 A、B、C 的半径分别是 a 、 b 、 c ,假设 D 的坐标为 (X, Y) ,根据最小二乘法可以列出公式:

$$\begin{cases} (X - X_a)^2 + (Y - Y_a)^2 = a^2 \\ (X - X_b)^2 + (Y - Y_b)^2 = b^2 \\ (X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2 = c^2 \end{cases} \quad (1)$$

可以得到标签 D 的坐标为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(X_a - X_c) & 2(Y_a - Y_c) \\ 2(X_b - X_c) & 2(Y_b - Y_c) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_a^2 - X_c^2 + Y_a^2 - Y_c^2 + c^2 - a^2 \\ X_b^2 - X_c^2 + Y_b^2 - Y_c^2 + c^2 - b^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

所以只需要知道基站 A、B、C 的坐标以及到标签 D 的距离,根据式(2)就可以得到 D 的坐标,从而定位到 D 的位置^[15]。

有时为了提高应对复杂环境的定位效果,会采用 4 个或者更多基站来构建定位系统。

2 UWB/TOF 测距原理

在 UWB 定位中,常常使用时间戳来计算基站从发射信号到接收信号所用的时间,即飞行时间(time of flight, TOF),然后根据位移时间公式计算出信号走过的距离,这个距离就是所测距离的两倍。评价一种 TOF 测距方法的指标就是精度的大小。

单边双向测距方法是最简单的方法之一,但是由于方法本身精度不高,误差与测量的距离长度几乎呈指数关系,不符合实际测量要求,所以,为了减小误差,使误差随着测距的距离呈线性关系,通常 UWB 测距是使用双边双向测距,原理如图 2 所示。

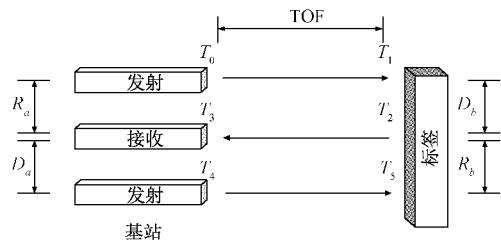


图 2 双边双向测距原理

基站发射信号由标签接收,然后标签处理后发射回基站最后从基站再发射信号到标签,所以得到双边双向测距中的时钟误差:

$$R_{a测} = (1 + k_a)R_{a真} \quad (3)$$

$$D_{a测} = (1 + k_a)D_{a真} \quad (4)$$

$$R_{b测} = (1 + k_b)R_{b真} \quad (5)$$

$$D_{b测} = (1 + k_b)D_{b真} \quad (6)$$

其中, D 为设备的处理时间, k_a 为标签时钟漂移, k_b 为基站时钟漂移。由此算出飞行时间误差,首先按照对称双边双向的误差处理方法:

$$T_{测} - T_{真} = \frac{T_{真}}{2} \times (k_a + k_b) + \frac{D_{b真} - D_{a真}}{4} (k_a - k_b) \quad (7)$$

可以看出,当基站与标签的时钟同步时,飞行误差最小,所以对对称双边双向测距可以将由时钟漂移引起的误差限定在一共比较小的范围内。此时飞行时间的误差与飞行时间基本成正比,总体误差的主要来源不再是时钟漂移之差,而是飞行时间与时钟的精度。而事实上,很难保证基站与标签时间延迟相等,故无法确保误差的来源。

根据以上的分析,采用非对称双边双向测距似乎是最好的选择,该法对比上面的测距方法,只多了几步:

$$R_{a真}R_{b真} = (2T_{真} + D_{a真})(2T_{真} + D_{b真}) \quad (8)$$

经过代数变换,得到飞行时间的计算公式:

$$T_{\text{真}} = \frac{R_{a\text{真}} R_{b\text{真}} - D_{a\text{真}} D_{b\text{真}}}{2(R_{a\text{真}} + D_{a\text{真}})} = \frac{R_{a\text{真}} R_{b\text{真}} - D_{a\text{真}} D_{b\text{真}}}{2(R_{b\text{真}} + D_{b\text{真}})} = \frac{R_{a\text{真}} R_{b\text{真}} - D_{a\text{真}} D_{b\text{真}}}{R_{a\text{真}} + D_{a\text{真}} + R_{b\text{真}} + D_{b\text{真}}} \quad (9)$$

由对称双边双向测距误差计算可知,时钟漂移不再是系统误差的主要来源,所以式(9)可以转化为测量值的公式:

$$T_{\text{测}} = \frac{R_{a\text{测}} R_{b\text{测}} - D_{a\text{测}} D_{b\text{测}}}{R_{a\text{测}} + D_{a\text{测}} + R_{b\text{测}} + D_{b\text{测}}} \quad (10)$$

将式(3)~(6)代入(10):

$$T_{\text{测}} = \frac{R_{a\text{真}} R_{b\text{真}} - D_{a\text{真}} D_{b\text{真}}}{R_{a\text{真}} + D_{a\text{真}} + R_{b\text{真}} + D_{b\text{真}}} \times \frac{(1+k_a)(1+k_b)}{1+k_a} = (1+k_a)T_{\text{真}} = (1+k_b)T_{\text{真}} \quad (11)$$

最后计算出飞行时间误差为:

$$T_{\text{测}} - T_{\text{真}} = k_a T_{\text{真}} = k_b T_{\text{真}} \quad (12)$$

从式(12)中可以看出总体误差只与某个时钟的时钟漂移有关。单个设备的时钟漂移可以将误差限制在一个单独的时间域内,通过计算该设备时间漂移将测得的时间转化为实际的时间,最终得到实际的距离^[16]。

3 精度优化方法

在实际测距时,由于室内、山区、地下、隧道环境的复杂多变和信号传播有多路径性,测得的信号中有粗差和噪声^[17]。为了减少粗差、降低噪声,使数据输出更加平滑^[18],从而进一步提高测试数据的稳定性和精度,可以加入卡尔曼滤波。

实验中使用以 decawave 公司的 DW1000 为核心的 HR-RTLS1 设备,该设备有 UWB 信号的收发,采用三角测量算法来定位^[19]。这里考虑到研究测距而非定位,所以使用 1 个基站 1 个标签的最小测距系统。

卡尔曼滤波精度算法如图 3 所示。

用 TOF 测出的距离与距离变化率作为系统状态向量 x_k , 可以建立测距模型:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w \quad (13)$$

其中, $A \in R^{n \times n}$ 表示两个状态之间的转换矩阵; $u \in R^l$ 表示可控制的输入; $B \in R^{n \times l}$ 表示控制输入到当前状态的转换矩阵; w 是过程噪声,在这里忽略掉 u 控制输入,得到:

$$x_k = Ax_{k-1} + w \quad (14)$$

当前状态测量值与状态值的函数关系为:

$$z_k = Hx_k + v \quad (15)$$

其中, k 与 $k-1$ 分别表示当前状态和前一状态; $x \in R^n$ 表示要估计的状态; $z \in R^m$ 表示实际测量值; $H \in R^{m \times n}$ 表示当前状态实际测量值的转换矩阵; v 则是测量噪声。

根据卡尔曼滤波的增益矩阵:

$$K_k = P_{k|k-1} H^T (HP_{k|k-1} H^T + R_k)^{-1} \quad (16)$$

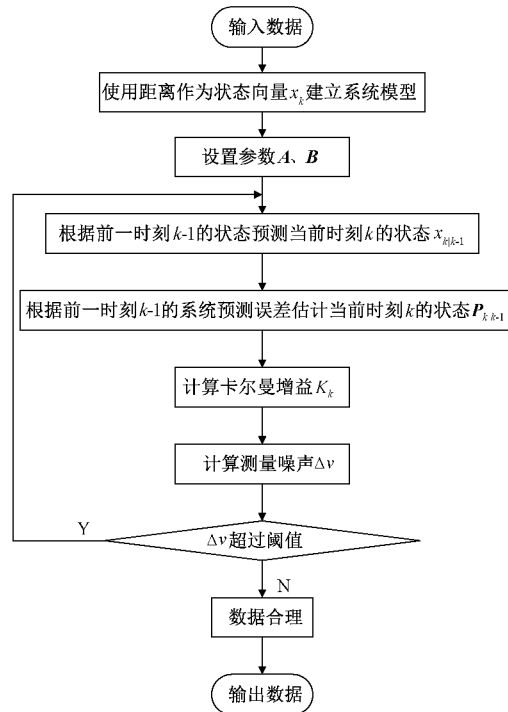


图 3 卡尔曼滤波算法流程

其中, $P_{k|k-1}$ 为预测协方差矩阵; R_k 为被观测到的噪声; $H \in R^{m \times n}$ 表示当前状态与实际测量值的转换矩阵^[20]。当 $P_{k|k-1}$ 增大, 卡尔曼增益 K_k 相应增大, 噪声 R_k 增大, 卡尔曼增益 K_k 相应减小。

首先预测 x_k, x_{k-1} 的值, 由二者构成的预测协方差矩阵 $P_{k|k-1}$, 由式(15)算出 $v = z_k - Hx_{k-1}$, v 的协方差矩阵为 $HP_{k|k-1}H^T$, 由于 H 只是起到单位转换的作用, 这里假设检验量为 $\Delta v = v^T (HP_{k|k-1}H^T)^{-1} v$, 当 Δv 小于给定阈值, 则说明该数据合理^[21]。

4 实验结果对比

4.1 实验内容

为检验设计的合理性与实用性, 在室温恒定、无障碍物无电子干扰的实验房间中, 使用同一 HR-RTLS1 设备, 控制变量为是否使用卡尔曼滤波进行两组实验, 实验流程图 4 所示。

将每个距离的 500 组数据取平均值后与实际距离计算误差得到表 1 与表 2。

从表 1 中可以看出除了 1 m 处测得的数据外, 其他处的数据误差都不高于 9%, 平均误差只有 5.8%。

从表 2 中可以看出此时测距的相对误差均不高于 7%, 平均误差只有 2.44%。

4.2 结果分析

将文献[9]中提出的超宽带 UWB、惯性导航系统 INS 在非完整性约束模型 NHC 中的精度提高方法和采用固定

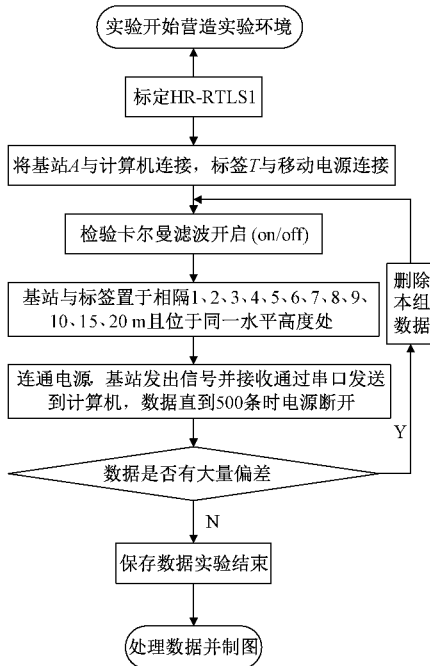


图 4 实验过程流程

表 1 未加卡尔曼滤波数据

实际距离/m	平均测量/m	相对误差/%	平均误差/%
1	1.338 60	33.860	
2	2.111 14	5.557	
3	3.190 52	6.350 666 7	
4	4.226 36	5.659	
5	5.177 78	3.555 6	
6	6.152 08	2.534 666 7	5.799 9
7	7.154 18	2.202 571 429	
8	8.178 22	2.227 75	
9	9.149 74	1.663 777 8	
10	10.167 78	1.677 8	
15	15.124 94	0.832 933 3	
20	20.695 38	3.476 9	

表 2 加卡尔曼滤波数据

实际距离/m	平均测量/m	相对误差/%	平均误差/%
1	1.012 82	1.282	
2	2.098 62	4.931	
3	3.189 56	6.318 667	
4	4.200 56	5.014	
5	5.090 60	1.812	
6	6.036 56	0.609 333	2.436 1
7	7.144 48	2.064	
8	8.119 24	1.490 5	
9	9.113 10	1.256 667	
10	10.090 40	0.904	
15	15.070 56	0.470 4	
20	20.616 16	3.080 8	

区间平滑滤波 (rauch-tung-striebeI, RTS) 的 INS/UWB/NHC 组合算法、文献[10]中提出的改进型 UWB 定位算法、常用的去极值平均平滑滤波算法与本文所使用的 KF/UWB 算法做比较如表 3 所示。

表 3 各种算法精度对比 %

类型	误差	精度提高
UWB	5.80	0
去极值平均平滑	3.49	39.8
INS/UWB/NHC	3.31	42.9
INS/UWB/NHC/RTS	2.94	49.3
改进型 UWB	2.63	54.7
KF/UWB	2.44	58.0

相比其他同类型算法,卡尔曼滤波算法执行速度更快,处理后的数据误差更小,精度提高更明显;不过正是由于算法结构简洁,卡尔曼滤波在水平方向上测距的精度提高较多,而垂直方向上提高不明显,日后研究方向就是全方位提高测量精度。

为了更直观看出卡尔曼滤波的效果,选两组数据进行数据分析,从表 1 和 2 中可以看出,在 3.00 m 处的测距误差在有无卡尔曼滤波的情况下差别最小,所以将 3.00 m 的数据整理为波形图,为了提高可信度,在 3.00 m 处加测 500 组,共 1 000 组。其中图 5 为未加卡尔曼滤波的波形图,图 6 为加入卡尔曼滤波的波形图。

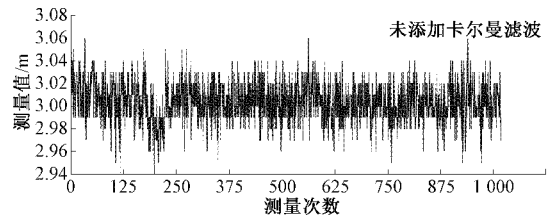


图 5 3.00 m 未加滤波数据

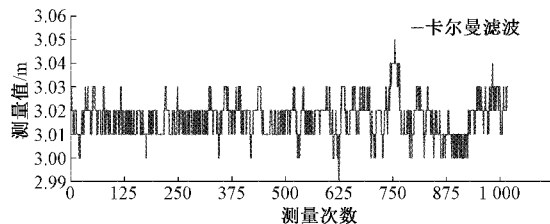


图 6 3.00 m 已加滤波数据

通过波形图可以看出虽然平均误差相差不大,但是加入卡尔曼滤波的数据波形图更加平稳,波形中许多段都是平滑的,说明相比未加滤波的数据杂乱无章,滤波后测得数据更加稳定。

将使用滤波算法测得的数据和未使用滤波算法测得的数据作对比,如图 7 所示。

从波形图中可以很直观地看出卡尔曼滤波的效果十分显

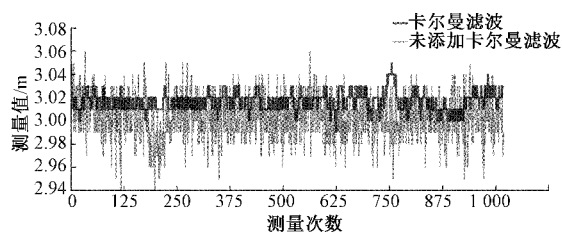


图 7 UWB 卡尔曼滤波效果

著,使用卡尔曼滤波后不仅极值减小,而且平均相对误差也减小,相应的,精度提高了 58%,数据输出进一步变得平滑。

5 结 论

本文利用 UWB 测距原理,针对 UWB 测距精度不足的问题,使用带有卡尔曼滤波算法的设备测量了室内基站到标签的距离,结果为提高了 UWB 设备的测量精度。实验结果证实了该方法相比同类型的算法提高 UWB 测距的测量精度的效果更好。该方法具有较好的适用性,能够更加准确、可靠和方便地测距,但未解决全方位测距精度不足的问题,只在水平方向上精度提高,不过也是为测距应用特别是在室内较短距离测量等应用中提供了一种较为可靠的思路与方法。

参考文献

- [1] ABDELNASSER H, MOHAMED R, ELGOHARY A, et al. SemanticSLAM: Using environment landmarks for unsupervised indoor localization[J]. IEEE Trans. Mob. Comput., 2016, 15(7):1770-1782.
- [2] AGUILAR-GARCIA A, FORTWS S, COLIN E, et al. Enhancing RFID indoor localization with cellular technologies [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015, 2015(1):1-22.
- [3] MIHALDINEC H, DZAPO H. Method for joint flexion angle estimation using UWB ranging with clock model compensation [J]. Automatika, 2020, 61(1):132-140.
- [4] RIDOLFI M, VANDERMEEREN S, DEFRAJE J, et al. Experimental evaluation of UWB indoor positioning for sport postures[J]. Sensors, 2018, 18(1):168.
- [5] LONG C H, SHEN C, FENG G A, et al. Research on network scalability based on UWB indoor localization system [J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 42:07003.
- [6] LI M G, ZHU H, YOU S Z, et al. UWB-based localization system aided with inertial sensor for underground coal mine applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(12):6652-6669.
- [7] ZHAO K, ZHU M, XIAO B, et al. Joint RFID and UWB technologies in intelligent warehousing management system [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(12):11640-11655.

- [8] CAPRA M, SAPIENZA S, ROS P M, et al. Assessing the feasibility of augmenting fall detection systems by relying on UWB-based position tracking and a home robot[J]. Sensors, 2020, 20(18):5361.
- [9] 朱清山, 王伟. 基于 RSSI 的指纹地图室内定位算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10):6-9.
- [10] 闵于, 杨凯, 高周正. 固定区间平滑滤波增强 UWB/INS/NHC 组合算法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(7):46-50.
- [11] 臧利国, 唐一鸣, 沈业辉, 等. 基于 UWB 的智能召车导航定位系统研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(7):45-52.
- [12] 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.
- [13] JING W, BIAN H X. Research on UWB-based indoor ranging positioning technology [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 394(5):052011.
- [14] 胡梅, 李晓宇, 陈建云. 采样噪声对北斗全球信号测距误差的影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9):180-188.
- [15] 陈磊, 刘伟. 基于 RSSI 的测距优化和三边定位算法研究[J]. 湖北工业大学学报, 2016, 31(2):49-52.
- [16] NEIRYNCK D, LUK E, MCLAUGHLIN M. An alternative double-sided two-way ranging method[C]. Workshop on Positioning, Navigation and Communications, IEEE, 2016(13):1-4.
- [17] 张玮. 基于复合滤波的 RSSI 无线网络测距算法[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(2):74-76.
- [18] 杨秀梓, 王敬东, 刘亚飞, 等. UWB/惯性技术组合优化的室内定位技术研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(15):132-138.
- [19] YANG J Y, MING Y, HELED J, et al. Implementation of UWB indoor location and distance measurement based on TOF algorithm[J]. Matec Web of Conferences, 2018, 173:03018.
- [20] 钟启林, 衷卫声, 熊剑, 等. 改进卡尔曼滤波的行人导航算法[J]. 导航定位学报, 2021, 9(2):28-34.
- [21] 仰胜, 胡志刚, 赵齐乐, 等. 基于 TOF 模式的 UWB 定位原理与精度验证[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(3):247-251.

作者简介

任昊誉, 硕士研究生, 主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail:337372510@qq.com

郭晨霞, 副教授, 主要研究方向为测控技术和视觉测量。

E-mail:guochenxia@nuc.edu.cn

杨瑞峰, 教授, 主要研究方向为自动化测试与控制技术。

E-mail:yangruifeng@nuc.edu.cn