

# 基于 UWB 的跟随箱包对目标的定位研究

刘珂, 李志俊

(武汉理工大学自动化学院, 武汉 430070)

**摘要:** 可靠地定位到跟随目标与箱包的相对位置是实现智能箱包跟随的前提, 箱包移动时, 自身振动和周围环境不断改变增加定位难度。针对该问题, 提出了一种基于 UWB 定位方法。该方法利用 UWB 高精度、抗干扰强、低功耗等优点, 首先对系统进行无线时钟同步求得距离值, 削弱了时钟偏差对测距精度的影响, 然后通过加权自适应卡尔曼滤波对距离值进行滤波减小环境的 NLOS 测距误差, 最后以箱包顶面中心点为原点建立坐标系, 通过三角质心坐标平均的方法进行位置解算。实验时基站置于箱包四个顶角, 标签由跟随目标携带。动态实验和静态实验均表明, 该方法有效抑制了 UWB 系统噪声和环境噪声, 可靠地定位标签(跟随目标)的相对位置。

**关键词:** UWB 定位; 智能箱包; 测距误差; 自适应卡尔曼滤波

**中图分类号:** TP79

## Positioning Research Based on UWB for Following Luggage

LIU Ke, LI Zhijun

(Automation School, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

**Abstract:** To solve the positioning problem of intelligent following luggage, the positioning method of installing UWB (Ultra-wide-band) on the following luggage has been put forward for its capability of making self-adaptation to Kalman filtering. When luggage is moving, the noise from UWB system will change in accordance with vibration and surrounding environment. Therefore, the range error of distance measurement can be increased and the inhibitory effect of traditional Kalman filtering on error always cannot meet requirements. Concerning the issues above, a weighted self-adaptation Kalman filter algorithm is proposed. On the basis of synchronized clock and construction of dynamic ranging model, the distance of filters is set and the triangular centroid coordinates are used to calculate the position on average, improving the reliability and accuracy of positioning. UWB system consists of base stations and labels made of DW1000 radio frequency chips. The base stations are placed at top four corners of the luggage and labels are moved by hand. The experimental results show that, this method can help improve the positioning accuracy of labels effectively, and its fitting path is closer to the real path.

**Key words:** UWB positioning; following luggage; range errors; adaptive Kalman filtering

## 0 引言

UWB 技术是近年新兴的与传统通信技术有极大差异的无线通讯技术, 其通过发送和接收纳秒级及以下频率的脉冲信号来传输数据, 具有 3.1-10.6GHz 量级的带宽, 为智能箱包定位跟随目标提供了可能。外部环境变化与 UWB 系统硬件形成的 NLOS (Non Line Of Sight) 误差和温漂等均会影响测距精度, 造成定位误差。UWB 系统对时钟精度有较高要求, 通过唯一外部总时钟同步节点时钟, 时钟同步效果较好, 在多用户远距离的情况可有效抑制时钟造成的测距误差, 但其成本过高<sup>[1]</sup>, 利用卡尔曼滤波对 UWB 定位系统频差进行调节, 有效抑制了时钟造成的影响, 其算法实现复杂<sup>[2]</sup>, 通过统计的方法采集系统在不同区域 NLOS

**作者简介:** 刘珂 (1992-), 男, 硕士生在读, 主要研究方向为模式识别和智能系统

**通信联系人:** 李志俊 (1963-), 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为 PLC 控制. E-mail: jzhili@mail.whut.edu.cn

偏差量,在后来的定位中通过该偏差量调节定位精度,虽然效果明显,但是该系统忽略了长时间运行的硬件温漂等硬件因素,且其需要大量采集周围环境的 NLOS 数据<sup>[3-5]</sup>。

对跟随目标的定位是实现跟随的前提。当 UWB 应用在箱包上时,即要考虑系统硬件和 NLOS 环境对定位精度的影响,亦需考虑到振动因素,箱包顶角上的 UWB 基站会随箱包运动,产生的振动会极大影响定位精度。在以 UWB 为基准定位方案背景下,提出一种可有效定位跟随目标的方法,该方法对 UWB 系统时钟进行同步减小时钟偏差造成的测距误差,然后计算出移动标签(跟随目标)到箱包各基站的测距值。

## 1 距离分析与滤波

### 1.1 测距分析

由于时钟信号对 UWB 系统测距精度影响较大,对于 TDOA 测距模型,通过计算 UWB 信号基站和标签数据传输的时间差得到相互距离,精确的时钟对测距精度有致命的影响,故采用 WCS (Wireless Clock Synchronization) 无线时钟同步<sup>[6]</sup>能消除测距过程中时钟误差。本文采用 WCS 方法,对 TDOA 时间误差做修正。手持标签向箱包基站发送数据包时,不同基站与标签距离不同使得接收时间产生了时间差。UWB 脉冲信号波在相同介质中传播的速率恒定为光速  $C$ , 因此可由信号接收时间差计算出基站到标签的距离。

假设有  $n$  节点的无线传感器网络,标签节点与基站模块内部时钟标准频率为  $f_0$ ,未知时钟偏移为  $\eta_i$ , 其中  $i=1,2,3,...,n$ , 节点相互之间通过每一次的数据包“握手”进行通信<sup>[7]</sup>。

第  $i$  节点的实际频率为:

$$f_i = f_0(1 + \eta_i)$$

标签节点有一个未知的初始时间  $T_0$ ,假定当前接收基站节点为  $i$  则该基站节点处的 TOA (到达时间) 看作为:

$$T_{0,i}(K) = \left( KT_b + \frac{\|x_0 - x_i\|}{c} \right) \left( \frac{1 + \eta_0}{1 + \eta_i} \right) + T_0 + \gamma_i$$

$\gamma_i$  为系统测量噪声,可看作加性高斯白噪声;  $T_b$  表示标签节点到基站节点一次“握手”的时间间隔;  $\frac{\|x_0 - x_i\|}{c}$  表示标签节点到基站节点之间的传播延时,利用泰勒级数展开  $(1 + \eta_0)/(1 + \eta_i)$  可记作  $1 + \eta_i - \eta_0$ ,  $\eta_0 - \eta_i$  是晶振的频差,其典型值约为  $10^{-5}$ , 故  $\frac{\|x_0 - x_i\|}{c}(\eta_0 - \eta_i)$  项,在箱包应用中  $\|x_0 - x_i\|$  为 3 米,  $C$  为  $3 \times 10^8$ , 故该项值约为  $10^{-13}$  量级可略掉,则标签节点到基站节点  $i$  的 TDOA (到达时间差) 为:

$$TDOA_i \approx KT_b(1 + \eta_i - \eta_0) + \frac{\|x_i - x_0\|}{c} + \gamma_i - \gamma_0$$

WCS 无线时钟同步的方法对每个基站到标签之间的 TOA 从而分析解算出标签到基站的  $TDOA_i$ , 通过传统卡尔曼滤波获得各个基站到标签之间的时钟差和频率差的估计值,可消除时钟差和频率差对系统的影响。对于相同应用环境, UWB 电磁脉冲在同介质中传播速度恒定,故标签节点到基站节点距离为:

$$X_i = C_a \times TDOA_i$$

$i=1,2,3,\dots,n$ ,  $X_i$  为标签到基站的距离,  $C_a$  为空气中光速, 对该距离模型建立状态方程:

$$X_{i,k} = AX_{i,k-1} + BU_{i,k-1} + q_{i,k}$$

$X_{i,k}$  和  $X_{i,k-1}$  分别表示  $i$  基站距离在  $k$  和  $k-1$  时刻的状态,  $U_{i,k-1}$  为  $i$  基站距离在  $k-1$  时刻对系统的控制量,  $q_{i,k}$  表示  $i$  基站距离在  $k$  时刻的过程噪声, 其协方差矩阵为  $Q_{i,k}$ ,  $A$ 、 $B$  为参数控制矩阵, 其中  $A = \begin{bmatrix} 1 & TDOA_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

对该距离模型建立测量方程为:

$$Y_{i,k} = H_{i,k}X_{i,k} + r_{i,k}$$

$Y_{i,k}$  为  $i$  基站到标签距离在  $k$  时刻的测量值,  $H_{i,k}$  为状态转移矩阵,  $r_{i,k}$  表示  $i$  基站到标签距离在  $k-1$  时刻的测量噪声, 其协方差矩阵为  $R_{i,k}$ 。

## 1.2 自适应卡尔曼滤波

基站到标签距离  $X_i$  采样可看作为离散控制过程的系统, 该系统可以用线性微分方程描述, 故距离模型传统卡尔曼滤波可表示为:

$$\begin{cases} \hat{X}_{i,k}^- = A\hat{X}_{i,k-1} + BU_{i,k-1} \\ P_{i,k}^- = AP_{i,k-1}A^T + q_{i,k-1} \\ K_{i,k} = P_{i,k}^- H_{i,k}^T (H_{i,k} P_{i,k}^- H_{i,k}^T + r_{i,k-1})^{-1} \\ X_{i,k} = \hat{X}_{i,k}^- + K_{i,k} (Y_{i,k} - H_{i,k} \hat{X}_{i,k}^-) \\ P_{i,k} = (I - K_{i,k} H_{i,k}) P_{i,k}^- \end{cases}$$

对于基站  $i$ ,  $Y_{i,k}$  为测量值,  $X_{i,k}$  为预测值,  $\hat{X}_{i,k}^-$  为  $k$  时刻的预测状态向量,  $K_{i,k}$  为卡尔曼增益矩阵,  $P_{i,k}$  为  $k$  时刻的预测状态误差协方差矩阵,  $I$  为单位矩阵,  $Y_{i,k} - H_{i,k} \hat{X}_{i,k}^-$  为  $k$  时刻的测量余量。

传统卡尔曼滤波<sup>[8]</sup>, 由  $k-1$  时的最优距离值  $\hat{X}_{i,k-1}$  预测  $k$  时刻的系统距离状态值  $\hat{X}_{i,k}^-$ , 由  $k-1$  时的误差协方差  $P_{i,k-1}$  和过程噪声  $r_{i,k-1}$  预测新的误差  $P_{i,k}^-$ , 计算出卡尔曼增益  $K_{i,k}$  后进行校正更新  $X_{i,k}$ , 更新后的值即是  $k$  时刻的最优距离值, 最后为下一步估计  $k+1$  时刻的最优距离值进行迭代, 其原理是一个不断迭代更新的处理过程。

传统的卡尔曼滤波, 其过程噪声协方差和测量噪声协方差  $Q_{i,k}$  和  $R_{i,k}$  求解较为困难。系统状态的不同亦需要  $Q_{i,k}$  和  $R_{i,k}$  发生变化, 特定的  $Q_{i,k}$  和  $R_{i,k}$  的值对应特定状态, 对其余状态采用同样的值会造成测距误差较大, 故需要采用动态调整  $Q_{i,k}$  和  $R_{i,k}$  的值来减小误差。

对于 WCS 方法的 UWB 测距系统, 受制于 UWB 脉冲信号、环境因素、硬件温漂等因素, 其测量误差会随着测量值的增大相应地增大, 即  $Q_{i,k}$  和  $R_{i,k}$  随着  $X_{i,k}$  的增加相应地增加,

故本文通过权值矩阵的自适应卡尔曼滤波来动态调整  $Q_{i,k}$  和  $R_{i,k}$  的值。对第  $k$  次采样，该次采样前  $n$  次采样距离值  $X_{k,i-1}, X_{k,i-2}, X_{k,i-3}, \dots, X_{k,i-n}$ ，假定过程噪声协方差和测量噪声协方差有固定初值  $Q_{i,0}$  和  $R_{i,0}$  则基站  $i$  在  $k$  时刻的  $Q_{i,k}$  和  $R_{i,k}$ ：

$$\begin{cases} Q_{i,k} = e_{k,q} Q_{i,0} \\ R_{i,k} = e_{k,r} R_{i,0} \end{cases}$$

$$e_{k,q} = e_{k,r} = \begin{bmatrix} X_{i,k-1} & L & 0 \\ M & O & M \\ 0 & L & X_{i,k-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{n-1}{n} & L & 0 \\ M & O & M \\ 0 & L & \frac{1}{n} \end{bmatrix}$$

$\frac{n-1}{n}, \frac{n-2}{n}, \frac{n-3}{n}, \dots, \frac{1}{n}$  分别为临近采样点  $k$  时刻采样的影响因子，越接近  $k$  则其影响因子就越大，其中  $n$  根据采样频率的大小可灵活选择。将此权值引入卡尔曼滤波器，即可得到距离加权自适应卡尔曼滤波，动态调节其过程噪声与测量噪声，减小测距的误差。

## 2 定位方法

常规 UWB 定位，基站节点越多定位精度越高。但应用在箱包上时，受制于箱包体积、硬件成本等因素，基站数量必定有限。手持标签移动过程中，其距地高度与箱包上平面基本相等，故可将定位模型简化为 UWB 平面定位。对于固定位置的基站  $g$ ，在箱包基站平面建立坐标系，基站  $g$  的坐标为  $(x_g, y_g)$ ，WCS 加权自适应卡尔曼滤波得到标签  $t$  到基站距离  $d_t$ ，其坐标为  $(x_t, y_t)$ 。箱包四个基站，其坐标为  $(x_n, y_n), n=1, 2, 3, 4$ ，以基站为圆心距离为半径，得到方程组：

$$\begin{cases} d_1^2 = (x_t - x_1)^2 + (y_t - y_1)^2 \\ d_2^2 = (x_t - x_2)^2 + (y_t - y_2)^2 \\ d_3^2 = (x_t - x_3)^2 + (y_t - y_3)^2 \\ d_4^2 = (x_t - x_4)^2 + (y_t - y_4)^2 \end{cases}$$

当测量值与理论值完全相等时方程组有且只有唯一解  $(x_t, y_t)$ ，即四个圆相交于一点。但在实际应用中，有测距误差的实际距离模型如图 1 所示。

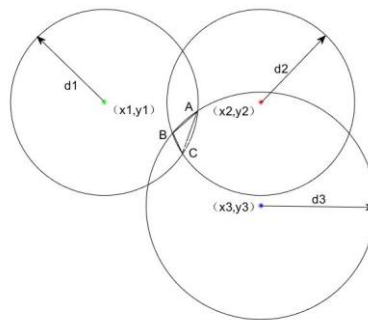


图 1 实际距离模型

图 1 中, 易求得交点 A, B, C 的坐标, 以这三点为顶点构成三角形, 易求得该三角形质心记作  $z_1$ , 记其坐标为  $(x_{t1}, y_{t1})$ 。同理, 对  $(x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$  与  $(x_1, y_1), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$  及  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_4, y_4)$  交点构成的其余三个三角形质心  $z_2(x_{t2}, y_{t2}), z_3(x_{t3}, y_{t3}), z_4(x_{t4}, y_{t4})$ 。对求得的四个质心点  $x$  坐标与  $y$  坐标取平均值, 利用三角质心平均的方法<sup>[9]</sup>, 则标签  $t$  的坐标可表示为:

$$\begin{cases} x = \frac{x_{t1} + x_{t2} + x_{t3} + x_{t4}}{4} \\ y = \frac{y_{t1} + y_{t2} + y_{t3} + y_{t4}}{4} \end{cases}$$

### 3 实验与结果分析

实验采用超宽带芯片带宽为 3.5GHz~6.5GHz, 主控通过 SPI 协议与其进行数据通信。实物如图 2 所示, 基站采用自制的特殊心性微带天线以满足箱体结构安装要求, 标签为 PCB 板载天线<sup>[10]</sup>。利用 WCS 进行时钟同步, 通过加权自适应卡尔曼滤波、三角质心平均定位的方法进行标签坐标解算, 将得到的位置信息给到箱包主控, 进行后续处理。

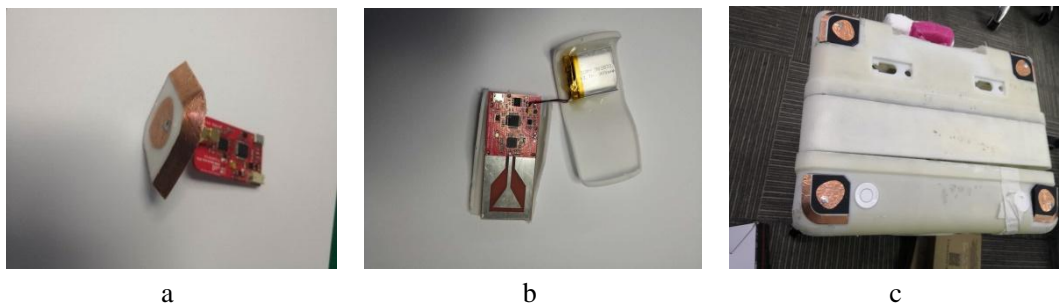
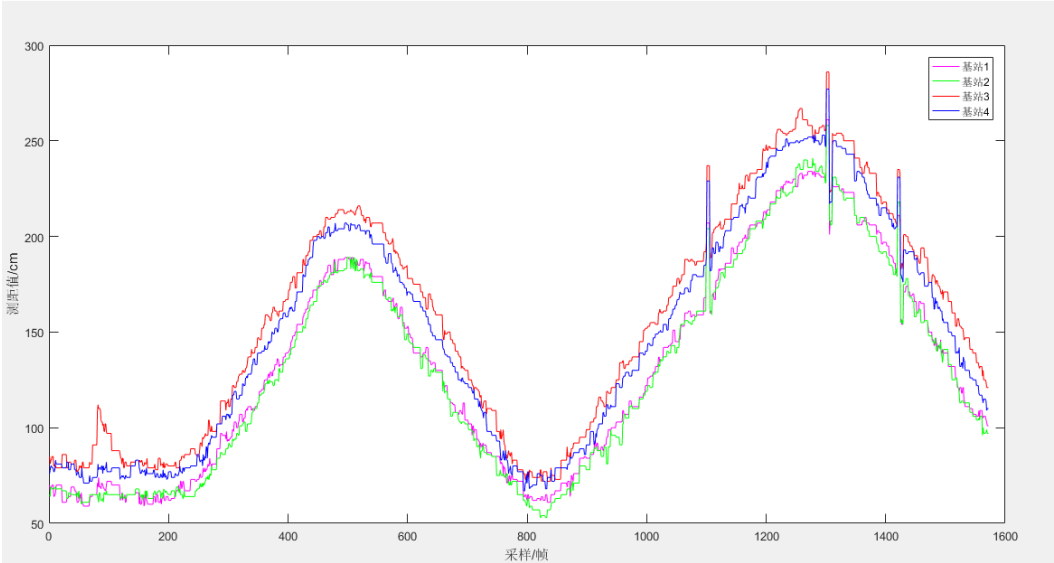


图 2 基站、标签和箱体实物图

试验时, 采样频率设置为 40Hz。静态实验将箱包置于固定位置, 定位目标持标签在箱体中轴线即  $y$  轴移动, 后半段实验过程中, 有物体在标签基站之间随机移动, 静态实验采样约 1600 帧数据。图 3 为标签相对于四个基站静态实验  $y$  方向测距的原始数据, 可以看出在物体在标签基站之间移动过程中, UWB 信号出现了多径效应, 使得测距误差变大。传统卡尔曼滤波与加权自适应卡尔曼滤波后数据如图 4、图 5 所示。表 1 对这两种滤波方法在各个基站的平均测量误差与均方根进行了误差统计。



145 图 3 箱体静态四个基站原始数据

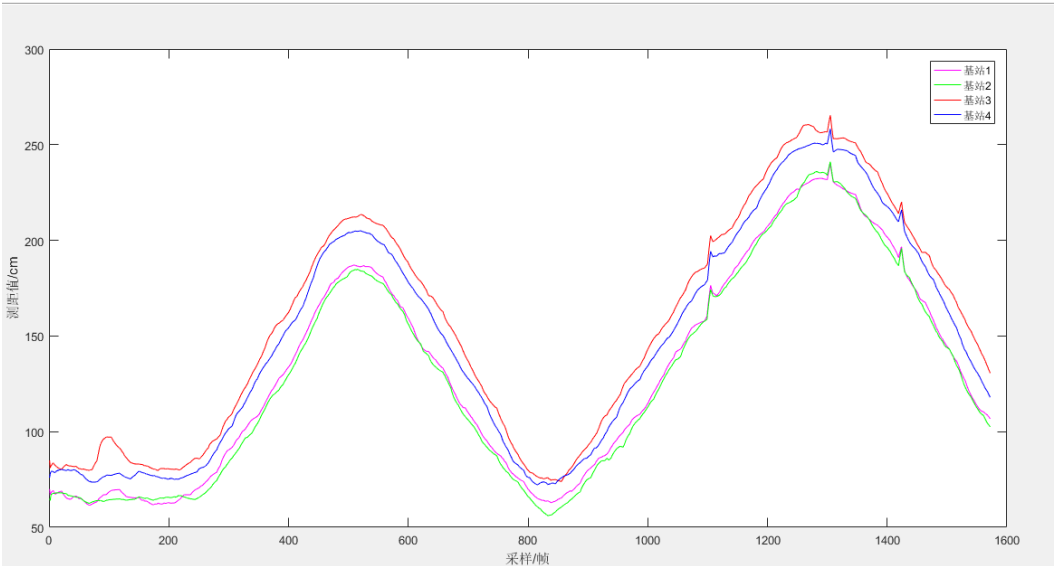


图 4 传统卡尔曼滤波数据

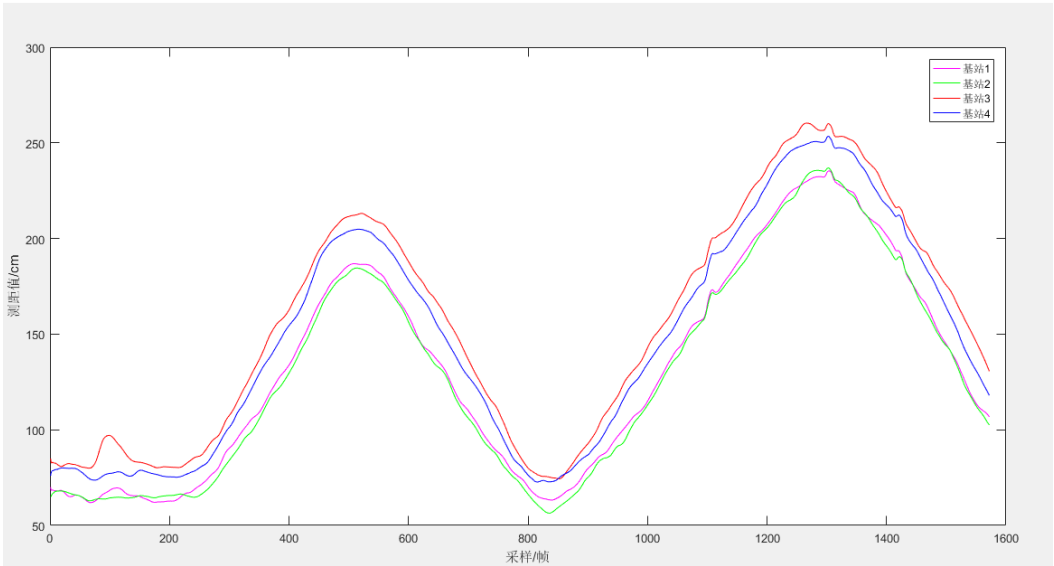


图 5 加权卡尔曼滤波数据



表 1 静态测距误差

卡尔曼滤波	误差	基站 1	基站 2	基站 3	基站 4
传统	平均误差/cm	10.189	10.255	12.982	13.274
	误差均方差/cm <sup>2</sup>	5.352	5.217	6.559	6.671
加权自适应	平均误差/cm	3.202	3.239	4.354	4.822
	误差均方差/cm <sup>2</sup>	1.348	1.127	1.508	1.738

动态实验中，为了模拟箱包运动产生的振动，将箱包放于振动台上，同时标签进行预先设定好的三角路径移动，利用提出的三角质心坐标平均方法求得标签坐标，绘制出轨迹，箱体振动状态下共采集大约 1200 帧数据，其结果如图 6 所示，其中黑色代表真实路径，蓝色为传统卡尔曼滤波的解算路径，红色为加权自适应卡尔曼滤波的解算路径。表 2 为解算的坐标误差最大值与误差均方差信息。

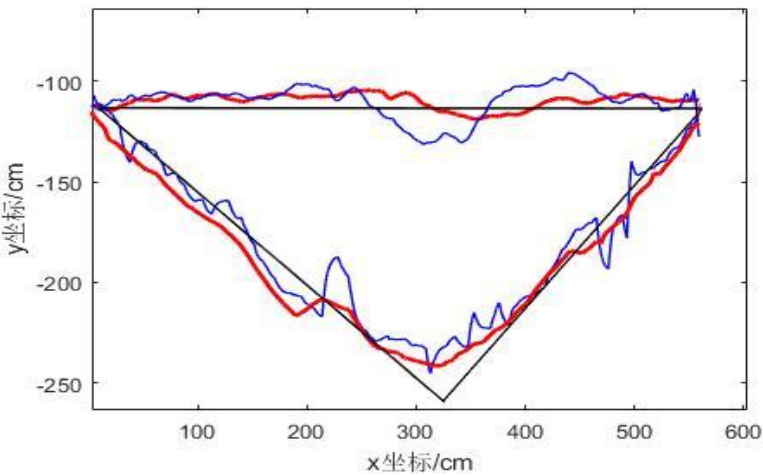


图 6 振动状态定位轨迹图

表 2 振动定位误差

坐标	卡尔曼滤波	最大误差/cm	最大误差精度/%	误差均方差 cm <sup>2</sup>
X	传统卡尔曼	23.525	13.31%	10.331
	加权自适应	10.035	4.17%	4.279
Y	传统卡尔曼	18.823	10.27%	13.014
	加权自适应	9.035	4.58%	5.036

分析以上实验可知：

在箱包上，UWB 基站之间距离较近，偶然的 NLOS 误差对定位精度可以造成巨大影响，通过传统卡尔曼滤波虽然能减少该影响，但仍有较大的测距波动。静态实验中，对比图 4 与图 5，加权自适应卡尔曼滤波方法动态且有效地对 UWB 系统噪声进行修正，相较于传统卡尔曼滤波其测距精度更高，测距误差均方差更小，稳定性更强。动态实验分析了，模拟了实际应用环境，虽然相较于静态时其误差稍显增加，但其定位坐标误差、误差精度与均方差等仍然优于传统卡尔曼滤波，通过三角质心平均坐标方法结算拟合的路径也更加贴合真实路径。实验证明，该定位算法应用于箱包上精度更高、稳定性更好。

## 4 结论

170       在 UWB 定位系统中, 环境因素、系统硬件等各种原因会对定位精度有较大影响, 其定位精度常常达不到应用要求。当其应用到箱包上时, 箱包的振动与周围环境变化都会对定位精度造成较大影响, 造成其定位信息错误, 箱包无法判断主人的具体位置。本文在传统卡尔曼滤波的基础之上, 提出了一种加权自适应动态调整系统误差距离滤波方法。设计了静态与模拟箱体移动过程中的振动环境的动态实验, 将原始数据分别用改进后的方法与传统卡尔曼滤波方法进行精度、误差、定位轨迹的行分析。数据结果表明, 静态与动态环境中, 改进后的加权自适应卡尔曼滤波具有更高定位精度, 箱包 UWB 定位系统通过该方法可有效找到手持标签主人的位置, 为 UWB 在箱包上的应用提供了有效依据。

175

### [参考文献] (References)

- 180       [1] 陈辉,熊辉,殷昌盛,等.基于无线传感器网络时钟同步的定位算法研究[J].现代电子技术: 2015,(7):23-27.  
[2] Benini A, Mancini A, Longhi S. An IMU/UWB/Vision-based Extended Kalman Filter for Mini-UAV Localization in Indoor Environment using 802.15.4a Wireless Sensor Network[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 70(1-4):461-476.  
[3] Jiang Z, Groves P D. NLOS GPS signal detection using a dual-polarisation antenna[J]. Gps Solutions, 2014, 18(1):15-26.  
185       [4] Diamant R, Tan H P, Lampe L. LOS and NLOS Classification for Underwater Acoustic Localization[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 13(2):311-323.  
[5] Mazuelas S, Lago F A, Blas J. Prior NLOS Measurement Correction for Positioning in Cellular Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(5):2585-2591.  
190       [6] 基于 UWB 的无线传感器网络定位技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.  
[7] 王明珠. 通信干扰对 UWB 通信系统的影响分析[D]. 江苏: 江苏大学, 2007.  
[8] 胡国荣, 欧吉坤. 改进的高动态 GPS 定位自适应卡尔曼滤波方法[J]. 测绘学报, 1999, 28(4):290-294.  
[9] 赵大龙,白凤山,董思宇,等.一种基于卡尔曼和线性插值滤波的改进三角质心定位算法[J].传感技术学报: 2015,(7):1086-1090.  
195       [10] 蔡力峰. PCB 天线的分析及应用设计[J]. 电脑与电信, 2013(7):54-56.