引文格式：景仙林, 魏永虎. 自回归的卡尔曼滤波算法在UWB定位中的应用[J]. 地理空间信息, 2023, 21(5): 117-119. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.05.029

自回归的卡尔曼滤波算法在UWB定位中的应用

景仙林[1]，魏永虎[1]
（1. 西宁市国土勘测规划研究院有限公司，青海 西宁 810000）

摘　要：针对UWB定位易受多路径和非视距误差的影响，导致观测值偏大的问题，提出了一种自回归的卡尔曼滤波UWB定位方法。在实验过程中建立UWB定位卡尔曼滤波的状态方程与观测方程，再将自回归数据模型引入卡尔曼滤波，通过新息过程值中加入设定阈值并加以判断和替换来剔除测量粗差，以提高UWB测距精度。结果表明，静态定位中 *X*、*Y* 方向RMSE值分别提升了63.4%、46.5%，动态定位中 *X*、*Y* 方向RMSE值分别提升了33.3%、38.0%，利用该算法改正观测值对室内静态、动态定位精度具有显著提升效果。

关键词：自回归；卡尔曼滤波；UWB；非视距；阈值
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）05-0117-03

Application of Autoregressive Kalman Filter Algorithm in UWB Positioning

JING Xianlin[1], WEI Yonghu[1]
(1. Xining Land Survey and Planning Research Institute Co., Ltd., Xining 810000, China)

Abstract: Aiming at the problem that UWB positioning is easy to be affected by multi-path and non sight distance error, resulting in large observation values, we proposed an autoregressive Kalman filter UWB positioning method. In the experimental process, we established the state equation and observation equation of UWB positioning Kalman filter, and introduced the autoregressive data model into Kalman filter at first. Then, we added the set threshold to the value of innovation process, which was judged and replaced to eliminate the measurement gross error and improve the UWB ranging accuracy. The experimental results show that in static positioning, the RMSE values in *X* and *Y* direction are increased by 63.4% and 46.5% respectively, and in dynamic positioning, the RMSE values in *X* and *Y* direction are increased by 33.3% and 38.0% respectively. Using this algorithm to correct the observed values has a significant improvement effect on the indoor static and dynamic positioning accuracy.
Key words: autoregressive, Kalman filter, UWB, non sight distance, threshold

随着社会的快速发展，高精度全球导航定位系统（GNSS）已不能满足人们日常生活的需求，超宽带（UWB）、无线保真、蓝牙、超声波等室内定位技术应运而生[1]。UWB是一种无线载波通信技术，具有系统复杂度低、成本低、保密性好、定位精度高等特点，尤其适用于室内等密集多径场所的高速无线接入[2-3]。目前UWB测距方法主要包括信号飞行时间法（TOF）、信号达到时间定位法（TOA）、信号达到时间差测距法（TDOA）、信号到达角度测距法和接收信号强度法[4]，不同方法各有优劣。国内外学者对UWB定位进行了研究分析，徐爱功[2]、刘韬[5]等提出了一种基于数理统计的卡方全局检验和标准正态分布检验的故障定位理论，可有效剔除观测异常值，提高UWB的定位精度和可靠性；韩玉香[3]等提出了一种基于TOF-UWB的快速定位方法，可进一步提高UWB定位精度与效率；刘飞[6]提出了一种GNSS/UWB定位构建方法，实现了0.35 m量级定位精度的UWB定位；贺军义[7]等提出了一种UWB三维协同定位方法，削弱了室内定位跳变问题，同时降低了UWB室内定位对基准站的要求，具有较好的定位精度；徐淑萍[8]、宰昶丰[9]等基于TDOA测距提出了一种UWB组合定位算法，基于观测值构建了非视距误差模型，新算法的定位精度明显提升；崔学荣[10]等利用最小均方算法削弱定位过程中噪声对信号的影响，结果表明最小均方算法可使UWB定位测距精度提高50%。

本文在室内环境中进行UWB静态、动态定位实验，UWB定位易受多路径和非视距误差的影响，导致观测值偏大[11-12]。本文提出了一种自回归的卡尔曼滤波UWB定位方法，首先对自回归数学模型和卡尔曼滤波进行推导，建立UWB定位卡尔曼滤波的状态方

收稿日期：2022-03-13；修回日期：2022-05-20。
项目来源：西宁市科技计划资助项目（2019-Y-12）。
第一作者简介：景仙林（1987—），工程师，主要研究方向为大地测量理论、导航与定位及其数据处理，E-mail：jingxianlin@126.com。

程与观测方程；再将自回归数据模型引入上述方程，通过在新息过程值中加入设定阈值并加以判断和替换来剔除测量粗差、提高测距精度，进而提高UWB定位精度。

1 数学模型

1.1 UWB定位模型

TOA算法直接测量流动站到达基站的时间，以时间与光速的乘积为流动站到定位基站的距离，以基站为圆心、距离为半径，两个距离圆相交于两点，得到流动站的两个位置解，因此需要第三个距离圆才能确定流动站的真实位置。假设流动站与基站时钟完全同步，以3个基站为圆心、距离为半径，相交点即为流动站坐标位置，如图1所示，3个圆的半径分别为 R_1、R_2、R_3，流动站到达定位基站的时间分别为 t_1、t_2、t_3，3个基站的坐标为 (x_1,y_1)、(x_2,y_2)、(x_3,y_3)，流动站的坐标为 (x,y)，根据其几何关系则有：

$$\begin{cases} R_1=\sqrt{(x_1-x)^2+(y_1-y)^2}=c(t_1-T_t) \\ R_2=\sqrt{(x_2-x)^2+(y_2-y)^2}=c(t_2-T_t) \\ R_3=\sqrt{(x_3-x)^2+(y_3-y)^2}=c(t_3-T_t) \end{cases} \tag{1}$$

式中，T_t 为流动站发送信号的时间；c 为信号在空气中传播速率。

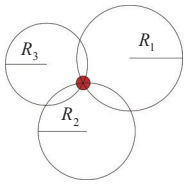


图1 TOA定位原理示意图

TOA三维空间定位为球形模型，假设流动站的三维坐标为 (x,y,z)，根据几何意义可知：

$$\begin{cases} R_1=\sqrt{(x_1-x)^2+(y_1-y)^2+(z_1-z)^2}=c(t_1-T_t) \\ R_2=\sqrt{(x_2-x)^2+(y_2-y)^2+(z_2-z)^2}=c(t_2-T_t) \\ R_3=\sqrt{(x_3-x)^2+(y_3-y)^2+(z_3-z)^2}=c(t_3-T_t) \\ \vdots \\ R_n=\sqrt{(x_n-x)^2+(y_n-y)^2+(z_n-z)^2}=c(t_n-T_t) \end{cases} \tag{2}$$

基于TOA测距实现空间二维定位，流动站的位置在3个距离圆的交点处，至少需要3个基站才能实现定位，且3个基站不能共线；实现空间三维定位，球的交点为流动站的三维位置，至少需要4个基站才能实现定位，且任意3个基站在空间上形成直线。

1.2 自回归的卡尔曼滤波

卡尔曼滤波的基本数学模型包括状态方程和观测方程，即

$$\boldsymbol{x}_k=\boldsymbol{\phi}_{k,k-1}\boldsymbol{x}_{k-1}+\boldsymbol{\Gamma}_{k,k-1}\omega_{k-1} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{Z}_k=\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{x}_k+\vartheta_k \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{x}_k$ 为状态向量；$\boldsymbol{Z}_k$ 为测量向量；$\boldsymbol{\phi}_{k,k-1}$ 为单位时间内状态转移矩阵；$\boldsymbol{\Gamma}_{k,k-1}$ 为状态噪声系数矩阵；ω_{k-1} 为状态噪声分量；ϑ_k 为观测噪声分量；$\boldsymbol{H}_k$ 为观测向量系数矩阵。

自回归模型可表示为：

$$\boldsymbol{x}_k=\beta_1x_{k-1}+\beta_2x_{k-2}+\beta_3x_{k-3}+\ldots+\beta_{n-1}x_{k-n+1}+\beta_nx_{k-n}+\omega_k \tag{5}$$

式中，β_1、β_2、β_3、…、β_{n-1}、β_n 为加权系数；ω_k 为加性白噪声。

将自回归模型引入卡尔曼滤波中，令方程为：

$$\begin{cases} x_1(k)=\boldsymbol{x}_k \\ x_2(k)=\boldsymbol{x}_{k-1} \\ \vdots \\ x_n(k)=\boldsymbol{x}_{k-n+1} \end{cases} \tag{6}$$

状态方程可表示为：

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_{n-1}(k+1) \\ x_n(k+1) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \cdots & \beta_{n-1} & \beta_n \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_{n-1}(k) \\ x_n(k) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}\omega_k \tag{7}$$

式（7）可表示为：$\boldsymbol{x}_{k+1}=\boldsymbol{\phi}_{k+1,k}\boldsymbol{x}_k+\boldsymbol{\Gamma}_{k+1,k}\omega_k$。对于式（7）中的加权系数 β_i 可用最小二乘求得，即

$$\begin{bmatrix} \beta_m \\ \beta_{m+1} \\ \vdots \\ \beta_{n-1} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} x_{m+p} & x_{m+p-1} & \cdots & x_{m+1} & x_m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n-1} & x_{n-2} & \cdots & x_{n-p+1} & x_{n-p} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} x_{m+1} \\ x_{m+2} \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \tag{8}$$

式（8）可表示为：$\hat{\boldsymbol{\beta}}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}$，则观测方程可表示为：$\boldsymbol{Z}_{k+1}=\boldsymbol{H}_{k+1}\boldsymbol{x}_{k+1}+\vartheta_k$。

因此，卡尔曼滤波迭代可得到 k 时刻的状态预估、状态估计校正、误差协方差矩阵预估、卡尔曼增益、新息过程。

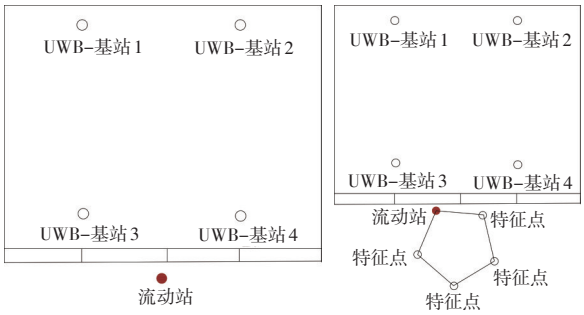
基于自回归的卡尔曼滤波在建立过程中加入设定阈值（此处为经验值，20 cm），并加以判断和替换，以剔除测量粗差，进而提高测距精度。将卡尔曼滤波迭代在新息过程中得到的新息过程值与设定阈值进行比较，若新息过程值大于设定阈值，则认定当前测量值为粗差，并以零替代卡尔曼增益值；反之，则保留测量值，即

$$\boldsymbol{K}_k=\begin{cases} 0 & \hat{z}_{k|k-1}>\text{设定阈值} \\ P_{k|k-1}\boldsymbol{K}_k^{\mathrm{T}}\left[\boldsymbol{H}_kP_{k|k-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}+R_k\right]^{-1} & \hat{z}_{k|k-1}\leqslant\text{设定阈值} \end{cases} \tag{9}$$

2 实验设计与结果分析

实验选取了4个UWB模块布设实验场地，流动站

位于实验场地外，墙体厚度为24 cm。实验过程采用USB3.0模块对数据进行实时传输，实验设备布设如图2所示。



a 静态定位　　b 动态定位

图2　实验场景示意图

2.1　静态定位实验分析

以在非视距情况下利用全站仪测得的流动站平面坐标 (X, Y) 为参考值（真值），分别统计未使用自回归的卡尔曼滤波改正观测值和使用自回归的卡尔曼滤波改正观测值的定位结果，以最大误差、平均误差和均方根误差（RMSE）为精度评估因子进行分析，结果表明，实验场外流动站未使用自回归的卡尔曼滤波在 X、Y 方向的定位精度较一致，X、Y 方向的最大误差分别为0.72 m、0.78 m，平均误差分别为0.33 m、0.35 m，RMSE值分别为0.41 m、0.43 m；使用自回归的卡尔曼滤波对观测值改正后，X、Y 方向的最大误差分别为0.46 m、0.58 m，平均误差分别为0.12 m、0.20 m，RMSE值分别为0.15 m、0.23 m。在静态定位中，对 X 方向而言，使用自回归的卡尔曼滤波对观测值改正后最大误差、平均误差、RMSE值分别提升了36.1%、63.6%、63.4%；对 Y 方向而言，分别提升了25.6%、42.9%、46.5%，进一步证实了使用自回归的卡尔曼滤波改正观测值对室内静态定位精度具有较明显的提升效果。

2.2　动态定位实验分析

动态定位实验中利用全站仪测得流动站运动过程中特征点的平面坐标 $(X_i, Y_i)(i=1,2,3,\cdots)$，分别统计未使用自回归的卡尔曼滤波改正观测值和使用自回归的卡尔曼滤波改正运动过程中特征点观测值的定位结果，以最大误差、平均误差和RMSE为精度评估因子进行分析，结果表明，未使用自回归的卡尔曼滤波在 X、Y 方向的最大误差均超过1 m，平均误差分别为0.54 m、0.64 m，RMSE值分别为0.57 m、0.71 m；使用自回归的卡尔曼滤波对观测值进行改正后，X、Y 方向的最大误差分别为0.85 m、0.90 m，平均误差分别为0.32 m、0.35 m；RMSE值分别为0.38 m、0.44 m。在动态定位中，对 X 方向而言，使用自回归的卡尔曼滤波对观测值改正后的最大误差、平均误差、RMSE值分别提升了17.0%、40.7%，33.3%；对 Y 方向而言，分别提升了28.5%、45.3%，38.0%，表明使用自回归的卡尔曼滤波改正观测值对室内动态定位精度也有较明显的提升效果。

3　结　语

本文提出了一种自回归的卡尔曼滤波UWB定位方法。首先对建立UWB定位卡尔曼滤波的状态方程与观测方程进行了推导，再将自回归模型引入卡尔曼滤波，通过设定阈值来剔除粗差。设计实验数据表明，静态定位中使用自回归的卡尔曼滤波对观测值改正后，X 方向的最大误差、平均误差、RMSE值分别提升了36.1%、63.6%，63.4%，Y 方向分别提升了25.6%、42.9%，46.5%；动态定位中使用自回归的卡尔曼滤波对观测值改正后，X 方向的最大误差、平均误差、RMSE值分别提升了17.0%、40.7%，33.3%，Y 方向分别提升了28.5%、45.3%，38.0%，说明使用自回归的卡尔曼滤波改正观测值对室内静态、动态定位精度均具有显著的提升效果。

参考文献

[1] 朱正伟，蒋威，张贵玲，等. 基于RSSI的室内WiFi定位算法[J]. 计算机工程与设计，2020，41(10)：2 958-2 962

[2] 徐爱功，史政旭，高嵩，等. 一种UWB定位系统自主完好性监测方法[J]. 导航定位学报，2021，9(6)：9-15

[3] 韩玉香，张晓亮，张晓明，等. 基于TOF的UWB可移动基站快速自定位算法[J]. 导航定位与授时，2021，8(6)：112-117

[4] 陈燕. 基于UWB的高精度室内三维定位技术研究[D]. 成都：电子科技大学，2018

[5] 刘韬，徐爱功，隋心. 基于自适应抗差卡尔曼滤波的UWB室内定位[J]. 传感技术学报，2018，31(4)：567-572

[6] 刘飞. 多传感器融合的高精度无缝定位模型与方法研究[J]. 测绘学报，2021，50(12)：1 780

[7] 贺军义，吴梦翔，宋成，等. 基于UWB的密集行人三维协同定位算法[J]. 计算机应用研究，2022，39(3)：790-796

[8] 徐淑萍，王双，郭宇，等. 一种抗非视距误差的组合定位算法[J]. 科学技术与工程，2021，21(31)：13 405-13 412

[9] 宰昶丰，郭英，叶瑾，等. 基于UWB穿墙定位中NLOS误差的优化方法[J]. 电子测量技术，2021，44(19)：128-133

[10] 崔学荣，周靖超，李娟，等. 最小均方信道均衡的UWB测距方法研究[J]. 导航定位学报，2021，9(5)：66-72

[11] 任东宇，任东旭，张元. 基于UWB和Skyline的室内三维实时定位技术研究[J]. 地理空间信息，2017，15(8)：113-115

[12] 王威，陈正宇，张帅，等. 多类智能终端基于灰色关联度的WKNN定位效果分析[J]. 地理空间信息，2021，19(3)：64-67