doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.02.003

顾及空间分布和 NLOS 的 UWB 室内可信定位方法

高周正，李　岩，陈　琳

（中国地质大学（北京）土地科学技术学院，北京 100083）

摘　要：针对现行室内可信定位存在的三维定位精度低与结果可信度难以定量评估的难点，提出了一种可信超宽带（UWB）室内定位模型。该方法采用无迹卡尔曼滤波和 IGG-III 抗差理论模型，解决了 UWB 定位中的非线性化和非视距误差问题；同时，为提高该方法定位结果的可信度，进一步构建了一种兼顾 UWB 基站空间分布和非视距误差的可信精度评估模型。与现有模型相比，提出的方案可有效实现基于 UWB 的室内高精度可信定位。仿真和实测数据结果表明：1）与传统最小二乘结果相比，该方法可提高 30%～40% 的 UWB 定位精度；2）引入 IGG-III 抗差模型可提高 11% 的定位精度；3）非线性化误差对 UWB 定位精度的影响不尽相同，约为 22%～50%；4）提出的可信度评估模型可实时准确评估 UWB 定位精度。

关键词：超宽带定位；抗差无迹卡尔曼滤波；基站空间分布；非视距；可信定位

中图分类号：P228.41　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-8110(2023)02-0016-09

An ultra-wideband based credible indoor positioning method by considering geometry-distribution and NLOS signal

GAO Zhouzheng, LI Yan, CHEN Lin

(School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to overcome the bottlenecks (i. e., low accuracy for 3D indoor positioning, low reliability, and no credible index) in indoor credible positioning at present, an ultra-wideband (UWB)-based credible indoor positioning method is presented. In this method, an unscented Kalman filter and an IGG-III robust algorithm are adopted together to overcome the problems of nonlinearization and non-line of sight errors. Meanwhile, a credible evaluation algorithm by considering the base station geometry-distribution and non-line of sight error is proposed to provide credible index for indoor positioning. Compared to the existing UWB positioning method, our method can provide users with high precision and credible indoor positioning solutions based on UWB. Results from both simulated data and experiment data illustrate that, 1) this method provides 30%～40% improvements on UWB positioning compared to the solutions calculated by traditional least square; 2) the UWB positioning accuracy can be furtherly improved by 11% by applying the IGG-III robust algorithm; 3) the impact of nonlinearization error on UWB positioning accuracy is varying with errors, changing from 22% to 50%; 4) it can accurately evaluate the accuracy of UWB positioning in real time.

Key words: Ultra-wideband positioning; Robust unscented Kalman filter; Base station geometry-distribution; Non-line of sight; Credible positioning

---

收稿日期：2022-12-15；**修订日期**：2023-01-01

基金项目：国家自然科学基金（42274022）；国家重点研发计划（2020YFB0505802）

作者简介：高周正（1986-），男，博士，副教授，主要从事多传感器融合精密定位算法及应用方面的研究。

0　引言

随着科学技术的快速发展，位置服务在人类社会、经济、军事等领域发挥着越来越重要的作用[1]。位置服务技术根据使用环境可分为室外定位技术、室内定位技术和室内外一体化定位技术。其中，以北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system，BDS)、全球定位系统(global positioning system，GPS)、GLONASS 和 Galileo 为代表的全球卫星导航系统(global navigation satellite system，GNSS)具有全球覆盖、全天候、实时、高精度等优势，是提供室外定位、导航和授时(positioning，navigation and timing，PNT)服务的主要手段[2]。然而相关统计结果表明，人日常生活中 70%～90%的时间是在室内度过[3]。室内环境下，GNSS 因信号受遮挡，难以提供位置服务。为此，部分学者对基于红外线、超声波、蓝牙、Wi-Fi、地磁、惯性传感器等的室内定位技术进行了研究[4]。然而，这些室内定位技术存在传输距离短、信号稳定性差、定位系统复杂、受室内布局影响较大、定位精度低等局限性。此外，现有的室内定位技术主要用于二维平面定位，不能满足新兴行业(如物联网、智能穿戴等)对可信三维定位的迫切需求。

与传统室内定位技术相比，超宽带(ultra-wideband，UWB)以其时间分辨率高、功耗低、穿透力强、测距精度高等优点，正受到室内位置服务领域越来越多的关注[5-8]。常见的 UWB 定位方式包括信号到达时间(time of arrival，TOA)、到达时间差(time difference of arrival，TDOA)、到达角度(angle of arrival，AOA)、接收信号强度(received signal strength indication，RSSI)和飞行时间(time of flight，TOF)等[9-10]。其中，TOF 因标签与基站、基站与基站之间不需要严格时间同步、硬件实现简单、成本低且定位精度高等优点，具有广泛应用潜力[10]。同时，UWB 在室内定位中所具备的强大优势，使其成为全球无缝定位的重要组成部分[11]。

目前，部分学者对 UWB 定位理论与技术方法进行了深入研究。陈磊等[12]基于最小二乘(least square，LS)和泰勒级数迭代参数估计方法，对基于 TOF UWB 测距二维平面定位算法进行研究。其利用 LS 进行全局寻优，并通过阈值筛选和权值级数获得泰勒算法迭代求解的最佳初值，从而提高 UWB 平面定位精度。基于仿真的静态和动态实验结果表明，该方法的平面定位精度可达 10 cm。闫保芳等[13]基于 LS 和扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter，EKF)对不同室内环境采集的 TOF UWB 测距数据进行处理。实测结果表明，在存在非视距(non-line of sight，NLOS)误差的环境下，室内平面定位精度为 1 m，非 NLOS 环境下，定位精度优于 0.2 m。这些研究主要基于 UWB 进行二维平面定位，但当前实际应用对三维位置的需求越来越迫切。因此，部分学者对 UWB 三维定位技术展开了研究。李鹏等[8]综合利用模拟退火算法和粒子滤波辅助 Chan 算法实现 UWB 三维定位。仿真和实测 TDOA UWB 数据结果表明，LOS 条件下可实现10～20 cm 定位精度，NLOS 条件下可实现优于 60 cm 的定位精度。吕鹏博等[14]采用 LS 拟合法对 TOF UWB 距离数据进行处理，实测结果表明，其定位精度优于 40 cm。董佳琪等[15]将间接平差与卡尔曼滤波进行融合，以提高基于双边测距的 UWB 定位精度。仿真数据与实测结果表明，在 10 cm测距误差的仿真实验中，该算法的三维定位精度优于 9 cm，实地实验中该算法的点位误差为 5.4 cm。

虽然当前学者对 UWB 不同定位技术和参数估计方法进行了较为深入的研究，但缺少对 UWB 定位结果可信度的评估策略的研究。为此，本文在前人研究的基础上，初步给出了一种顾及 UWB 基站空间分布和 NLOS 信号的 UWB 三维可信定位方法。同时，基于抗差理论的无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter，UKF)，对 30 cm 噪声的仿真 UWB 数据和实测 TOF UWB 测距数据进行处理，评估和分析本文室内可信定位方案的有效性。

1　UWB 可信定位理论模型

TOF UWB 通过标签与基站相互通信实现测距，其基本观测方程可表示为[16]

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2} \\ \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(x-x_m)^2+(y-y_m)^2+(z-z_m)^2} \end{pmatrix} \tag{1}$$

其中，$d_j(j=1,2,\cdots,m)$ 表示标签到第 j 个基站的距离值；(x,y,z) 和 (x_j,y_j,z_j) 分别表示标签和基站的坐标。

1.1　抗差 UKF UWB 定位模型

经典的 KF 适用于线性系统[17]，当状态方程或

观测方程为非线性变换时，常采用 EKF[18]。EKF 的核心思想是将非线性函数在滤波值处进行泰勒展开，并忽略二次及以上项。该过程中，只保留了一次项系数，舍弃的高次项会引入截断误差，特别是对于 UWB 这种小范围的定位方法来讲，该误差对定位精度的影响将十分显著。为此，本文提出了采用 UKF 算法，通过无迹变换（unscented transformation，UT）对非线性系统的后验概率密度函数进行近似，从而计算状态向量的均值和协方差，避免线性化的截断误差[19]。

UKF 的函数模型可表示为[19]

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{x}_k \\ \boldsymbol{z}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(\boldsymbol{x}_{k-1}) \\ h(\boldsymbol{x}_k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{w}_k \\ \boldsymbol{v}_k \end{pmatrix} \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{z}$ 分别表示状态向量和新息向量；$f(\boldsymbol{x}_{k-1})$ 和 $h(\boldsymbol{x}_k)$ 分别表示非线性状态方程和非线性观测方程；$\boldsymbol{w}_k$ 和 $\boldsymbol{v}_k$ 分别表示 k 时刻状态噪声向量和测量噪声向量。

本文采用常速模型[17]作为状态方程，状态向量 $\boldsymbol{x}$ 由位置（$\boldsymbol{p}$）和速度（$\dot{\boldsymbol{p}}$）构成，表示为

$$\boldsymbol{x}_k = \underbrace{\begin{pmatrix} \boldsymbol{I} & \boldsymbol{I}\Delta t \\ 0 & \boldsymbol{I} \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{F}} \underbrace{\begin{pmatrix} \boldsymbol{p} \\ \dot{\boldsymbol{p}} \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{x}_{k-1}} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \boldsymbol{w}_{\dot{p}} \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{w}_k} \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{F}$ 表示状态转移矩阵；$\boldsymbol{I}$ 表示单位向量；$\boldsymbol{w}_{\dot{p}}$ 表示速度噪声。

UWB 的非线性观测方程为

$$h(\boldsymbol{x}_k) = \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \tag{4}$$

由于 UWB 几何构型容易畸变，常用的迭代最小二乘初始化方法在 UKF 初始化过程中收敛性差，且容易在设置的有限迭代条件下给出错误结果。本文综合采用 Bancroft 算法[20]和迭代 LS 获取精确初始状态（$\hat{\boldsymbol{x}}_0$）及其方差协方差阵（$\boldsymbol{P}_0$）。在此基础上，计算 $k-1$ 时刻的 Sigma 样本点

$$\boldsymbol{x}_{k-1}^i = [\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1} \quad \hat{\boldsymbol{x}}_{k-1} \pm \sqrt{(n+\lambda)\boldsymbol{P}_{k-1}}] \tag{5}$$

$$\begin{pmatrix} \omega_m^0 \\ \omega_c^0 \\ \omega_m^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda/(n+\lambda) \\ \lambda/(n+\lambda) + (1-\alpha^2+\beta) \\ 0.5/(n+\lambda) \end{pmatrix} \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{x}_{k-1}^i$ 为 $2n+1$ 个 Sigma 点构成的向量（$i=1\sim 2n$），n 为状态向量 $\boldsymbol{x}$ 的维数；$\lambda=\alpha^2(n+\kappa)-n$ 为尺度因子，κ 为比例因子；$\boldsymbol{P}_{k-1}$ 为 $\boldsymbol{x}_{k-1}$ 的协方差矩阵；$\omega_c^i=\omega_m^i$，ω_m^i 和 ω_c^i 分别为均值和协方差的权重；α 为很小的正数，取 $10^{-4}\leqslant\alpha\leqslant 1$[21]；$\beta$ 与 $\boldsymbol{x}_{k-1}$ 的先验信息相关，可取 $\beta=2$[21]。

基于式(5)中的 $2n+1$ 个 Sigma 样本点和状态方程(3)，计算预测状态向量及方差协方差

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{x}_{k|k-1}^i \\ \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} \\ \boldsymbol{P}_{k|k-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_{k-1}^i \\ \sum_{i=0}^{2n} \boldsymbol{\omega}_m^i \boldsymbol{x}_{k-1}^i \\ \sum_{i=0}^{2n} \boldsymbol{\omega}_c^i [\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} - \boldsymbol{x}_{k|k-1}^i][\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} - \boldsymbol{x}_{k|k-1}^i]^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_{k-1} \end{pmatrix} \tag{7}$$

基于式(7)中的信息，再次进行 UT

$$\boldsymbol{x}_{k|k-1}^i = [\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} \quad \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} \pm \sqrt{(n+\lambda)\boldsymbol{P}_{k|k-1}}] \tag{8}$$

将式(8)代入非线性观测方程(4)，预测 $k+1$ 时刻的观测信息及其方差协方差

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{z}_{k|k-1}^i \\ \bar{\boldsymbol{z}}_{k|k-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h(\boldsymbol{x}_{k|k-1}^i) \\ \sum_{i=0}^{2n} \boldsymbol{\omega}_m^i \boldsymbol{z}_{k|k-1}^i \end{pmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{P}_{z_k z_k} \\ \boldsymbol{P}_{x_k z_k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{2n} \boldsymbol{\omega}_c^i [\boldsymbol{z}_{k+1|k}^i - \bar{\boldsymbol{z}}_{k|k-1}][\boldsymbol{z}_{k+1|k}^i - \bar{\boldsymbol{z}}_{k|k-1}]^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}_k \\ \sum_{i=0}^{2n} \boldsymbol{\omega}_c^i [\boldsymbol{x}_{k|k-1}^i - \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}][\boldsymbol{z}_{k+1|k}^i - \bar{\boldsymbol{z}}_{k|k-1}]^{\mathrm{T}} \end{pmatrix} \tag{10}$$

基于式(8)、式(9)和式(10)，可实现当前时刻状态更新及方差协方差更新

$$\begin{pmatrix} \hat{\boldsymbol{x}}_k \\ \boldsymbol{P}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} + \boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{z}_k - \bar{\boldsymbol{z}}_{k|k-1}) \\ \boldsymbol{P}_{k|k-1} - \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{P}_{z_k z_k} \boldsymbol{K}_k^{\mathrm{T}} \end{pmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_{x_k z_k} \boldsymbol{P}_{z_k z_k}^{-1} \tag{12}$$

然而，由于 UWB 观测值中常存在 NLOS 信号，使得受 NLOS 污染后的 UWB 距离值定位精度严重降低。为此，本文在 UKF 中引入 IGG-III 抗差理论模型[17]，以削弱异常观测的影响，提高了参数估计的精度和滤波的可靠性。

抗差 UKF（robust UKF，RUKF）通过等价方差阵替换经验误差方差阵，减弱异常 UWB 观测值对参数估计的影响[17]，即

$$\bar{\boldsymbol{R}}_k = \gamma \boldsymbol{R}_k \tag{13}$$

式中，γ 为方差膨胀因子，可表示为

$$\gamma_i = \begin{cases} 1 & |\tilde{V}_i| \leqslant k_0 \\ \dfrac{|\tilde{V}_i|}{k_0}\left(\dfrac{k_1-k_0}{k_1-|\tilde{V}_i|}\right)^2 & k_0 < |\tilde{V}_i| \leqslant k_1 \\ \infty & |\tilde{V}_i| > k_1 \end{cases} \tag{14}$$

其中，$\tilde{V}_i$ 为标准化残差；k_0 和 k_1 为常量，通常取 $k_0=1.0\sim1.5$，$k_1=2.5\sim8.0$[17]。

1.2　UWB 定位可信度评估模型

评估定位结果精度通常采用内符合精度和外符合精度两种方案，其模型可分别表示为

$$\begin{pmatrix}\sigma_{\mathrm{N}}\\ \sigma_{\mathrm{E}}\\ \sigma_{\mathrm{U}}\end{pmatrix}=\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{n}}\left(\left(\frac{\partial h(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\right)^{\mathrm{T}}_{\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_0}\left(\frac{\partial h(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\right)_{\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_0}\right)^{-1}\sqrt{\frac{v^{\mathrm{T}}R^{-1}v}{m-t}} \tag{15}$$

$$\begin{pmatrix}\Delta N\\ \Delta E\\ \Delta U\end{pmatrix}=\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{n}}\begin{pmatrix}x_{\mathrm{e}}-x_{\mathrm{r}}\\ y_{\mathrm{e}}-y_{\mathrm{r}}\\ z_{\mathrm{e}}-z_{\mathrm{r}}\end{pmatrix} \tag{16}$$

式中，$\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{n}}$ 表示从地心地固系到站心地平坐标系的旋转矩阵；$(x_{\mathrm{e}},y_{\mathrm{e}},z_{\mathrm{e}})$ 和 $(x_{\mathrm{r}},y_{\mathrm{r}},z_{\mathrm{r}})$ 分别表示坐标估计值和真值。

然而，如式(15)所示的内符合精度是基于观测残差、观测值先验权和几何强度因子(position dilution of precision，PDOP)，白噪声条件下其结果尚且理想，复杂条件下容易受观测粗差的影响，实际应用中难以准确在线反映实际定位结果的可信度。如式(16)所示的外符合精度，则需要通过与真值进行比对才能得出，无法实时在线应用。为此，针对 UWB 定位本身特性，设计了一种顾及基站空间分布强度、密度和 NLOS 误差的 UWB 定位结果实时可信度在线评估模型

$$\sigma_k=\sigma_{\mathrm{LOS}}\cdot\zeta_{\mathrm{DOP},k}\cdot\kappa_{\mathrm{GEO}}\cdot\chi \tag{17}$$

$$\begin{pmatrix}\sigma_{\mathrm{LOS}}\\ \zeta_{\mathrm{DOP},k}\\ \kappa_{\mathrm{GEO}}\\ \chi\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}(\boldsymbol{v}_{\mathrm{LOS}}^{\mathrm{T}}\bar{R}^{-1}\boldsymbol{v}_{\mathrm{LOS}})/(m-m_{\mathrm{NLOS}}-t)\\ \mathrm{mean}\left(\sum_{x_1}^{x_{\max}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{n}}\left(\left(\frac{\partial h(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\right)\left(\frac{\partial h(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\right)\right)^{-1}\right)\\ \zeta_{\mathrm{DOP},k}/\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{n}}\left(\left(\frac{\partial h(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}_j}\right)\left(\frac{\partial h(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}_j}\right)\right)^{-1}\\ (\max(\Theta_s)-\min(\Theta_s))/\mathrm{mean}(\Theta_0)\end{pmatrix} \tag{18}$$

式中，σ_{LOS}、$\zeta_{\mathrm{DOP},k}$、κ_{GEO} 和 χ 分别表示不受 NLOS 影响的单位权中误差、UWB 工作区域平均 DOP(k=NDOP、EDOP 和 VDOP)、当前时刻空间几何强度奇异阻抗因子和基站空间分布密度再平衡因子；m_{NLOS} 和 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{LOS}}$ 分别表示由 IGG-III 探测出来的 NLOS 基站数和不含 NLOS 的观测残差向量；Θ_s 表示基于当前标签位置的不同象限基站数，s=0、1、2、3、4 分别表示理想条件下各象限平均基站数和第一、二、三、四象限基站数。

1.3　UWB 可信定位算法框架

根据上述模型，本文 UWB 可信定位算法架构可通过图 1 简单表示。首先，利用 8 个 LinkTrack P 基站(有效测距范围 500 m，www.nooploop.com)，采集各基站至标签的距离；然后，基于 Bancroft 算法[20]和迭代 LS 对 UKF 进行坐标初始化；在此基础上，进行 UKF 状态更新和观测更新；同时，利用 IGG-III 抗差理论对可能存在的 NLOS 观测值进行识别探测；基于以上计算结果与过程信息，结合式(15)、式(16)和式(17)分别给出 UKF 的内符合精度、外符合精度和可信度方案评估精度。

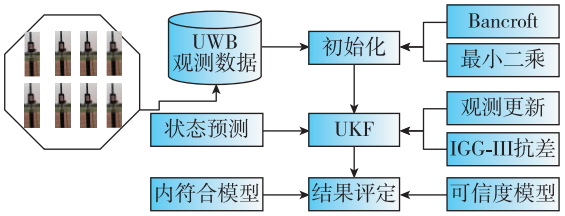


图 1　UWB 可信定位算法基本架构图

Fig. 1　Algorithm structure of UWB credible positioning

2　实验与结果分析

为验证本文的 UWB 定位方法，分别采用实测数据和仿真数据对其进行综合分析。实验设备除 LinkTrack P 外，还采用了 M40 GNSS/惯性导航系统(inertial navigation system，INS)组合导航系统、莱卡全站仪等设备(见图 2)。其中，M40 的 GNSS 和 INS 数据用于提供 RTK(real-time kinematic)/

图 2　UWB 定位实验设计与部分实验设备

Fig. 2　Design of UWB positioning and part of the used equipment

INS 紧组合结果，用作参考真值。莱卡全站仪用于测定 8 个 UWB 基站坐标（见表 1）。实测数据采集时，利用布设在中国地质大学（北京）西操场跑道附近（见图 2）的 8 个基站，围绕跑道采集 4 000 个观测历元动态实测 UWB 数据。本次实验中，标签离基站最远距离为 164 m、最近为3 m。为增加 NLOS 误差，实验过程中，数位实验参与人员不定期地从各基站旁边经过。在仿真实验中，基于实测实验的 8 个基站和区域中心点坐标，在真实距离的基础上，仿真仅加入均值为 0.0 m、标准差为 0.3 m 的高斯分布白噪声，无 NLOS 噪声，仿真4 000个观测历元 UWB 静态数据。

表 1　实验中的 UWB 基站坐标

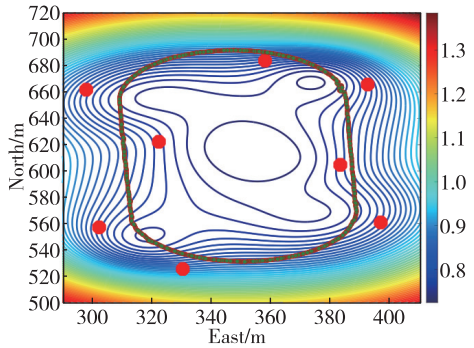
Tab. 1　Coordinates of UWB base stations used in test

	编号	东向	北向	高程
基站	A1	683.93	357.80	1.79
	A2	665.76	392.16	1.89
	A3	604.65	382.98	1.81
	A4	560.87	396.51	1.89
	A5	525.45	330.24	1.82
	A6	557.12	302.24	1.87
	A7	622.23	322.23	1.85
	A8	661.84	297.92	1.91
静态仿真坐标		600.00	340.00	1.50
DOP 值仿真高程				0.0

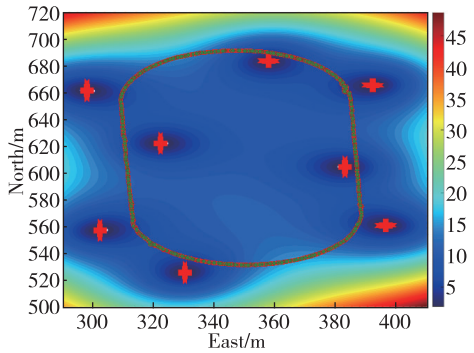
为了对比，分别采用迭代 LS 和 RUKF 两种参数估计方法进行数据处理；在实测数据中，为进一步分析非线性化误差和抗差模型的影响，另引入了抗差迭代 LS（RLS）的结果。精度评定分别采用内符合精度、外符合精度和可信度三种方案。

2.1　区域几何精度因子与 NLOS 分析

由于仿真数据中仅加入了高斯白噪声，这里以实测数据为例，分析整个 UWB 定位区域的几何精度因子和 NLOS 误差情况。由图 3 测试区水平精度因子（horizontal dilution of precision，HDOP）和垂直精度因子（vertical dilution of precision，VDOP）分布情况可知，因基站布设在高程差异较小的平面上，测试轨迹区域 UWB 平面几何强度（0.7～0.8）是垂向（11～25）的近 30 倍，这是引起 UWB 平面定位精度远优于高程的决定性原因，这也是大部分学者目前只研究 UWB 平面定位的原因。此外，从图 4 的残差分布可以看出，实验设备的噪声基本在 0.3 m 以内，然而动态实验中存在明显的 NLOS 误差。



（a）HDOP



（b）VDOP

图 3　测试区 HDOP 和 VDOP 分布情况

Fig. 3　Distribution of HDOP and VDOP around the test field

2.2　仿真数据结果分析

由于仿真数据中无 NLOS 误差，因此没有进行 RLS 解算。图 5 所示为迭代 LS 和 RUKF 计算的平面散点图和位置误差时间序列图。据此可知，1）迭代 LS 和 UKF 的计算结果均表明 UWB 平面位置精度（cm 级）远优于高程精度（m 级），由于是静态数据（没有基站空间分布密度的影响）且没有加入 NLOS 误差，因此这种差异是由空间几何强度因子引起的，该结论与 2.1 节中的理论分析一致；2）由于没有加入 NLOS 误差，因此式（14）中抗差模型不会被激活，迭代 LS 结果与 RUKF 的差异是由线性化误差引起的，这也证明在 UWB 这类局部区域的距离交汇定位技术中，线性化误差是显著的，引入 UKF 是必要的。这种线性化误差对定位精度的影响在图 6 所示累积分布函数（cumulative distribution function，CDF）曲线中表现得更为明显和直观，即 UKF 平面精度 100%优于 5 cm，高程 100%优于 3 m；而与之对应的 LS 结果则分别为 27 cm 和 4.8 m。

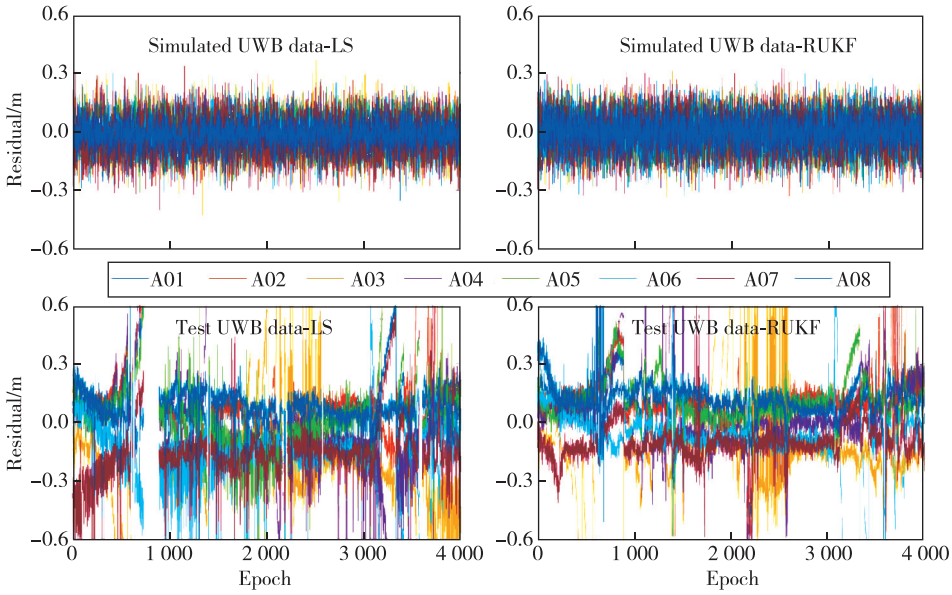


图 4　实测和仿真 UWB 数据 LS 和 RUKF 残差

Fig. 4　Residuals of LS and RUKF for measured/simulated UWB data

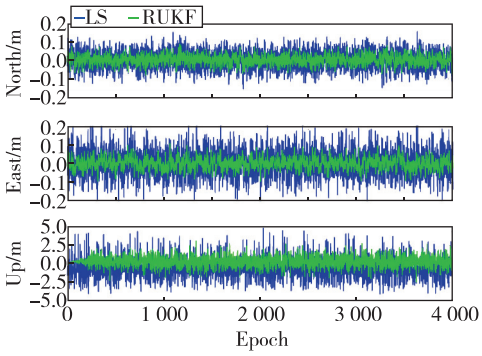


图 5　LS 和 RUKF 点位误差序列

Fig. 5　Position errors calculated from LS and RUKF

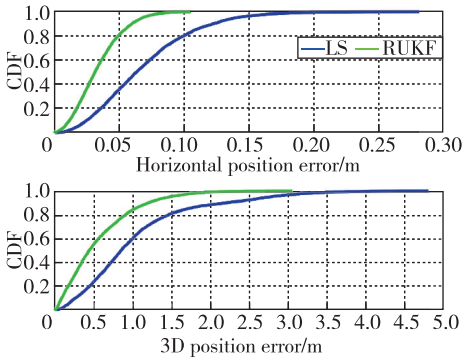


图 6　LS 和 RUKF 位置误差 CDF 曲线

Fig. 6　Position CDF calculated from LS and RUKF

两种参数估计方法的平面和高程统计结果(均方根误差(root mean square error,RMSE)和平均误差)如图 7 所示,基于迭代 LS 的水平和高程 RMSE 分别为 8 cm 和 1.3 m,平均误差为 7 cm 和 1.0 m;而基于 UKF 的水平和高程 RMSE 分别为 4 cm 和 0.7 m,平均误差为 3 cm 和 0.6 m。非线性化误差对定位 RMSE 的影响为 46.2%～50.0%,对平均误差的影响为 40.0%～57.1%。

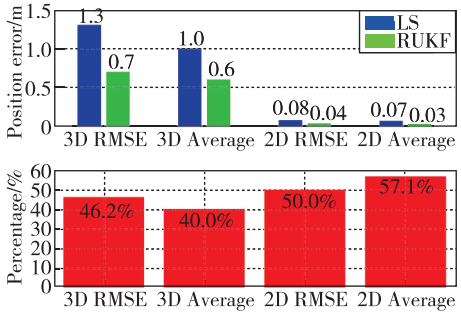


图 7　仿真数据平面和三维统计结果

Fig. 7　Statistics result for horizontal and 3D position errors

在此基础上,以外符合精度(Real error)为参考,分别对 UKF UWB 定位的内符合精度(Sigma)和可信度(Credible)进行分析(图中分别给了 2 条 ±Sigma 曲线和 2 条 ±Credible 曲线,用于直观表征精度指标对真实误差的包裹情况)。如图 8 所示,在仿真数据中,内符合精度指标 Sigma 和可信度指标 Credible 均能较好地评估平面精度,甚至内符合精度指标 Sigma 更接近外符合精度 Real error。但在高程方向,内符合精度 Sigma 要显著差些(在正误差部分,大部分内符合精度指标 Sigma 比外符合精度 Real error 值小,即无法正确评估此时结果的

可信度)。然而,得益于式(18)中的空间几何强度奇异阻抗因子,基于本文的可信度方案给出的可信度(Credible)指标在平面和高程均能较好地表征 UWB 定位结果的可信度。这表明,即使在理想的白噪声条件下,本文的方案亦能有效评估 UWB 定位精度。

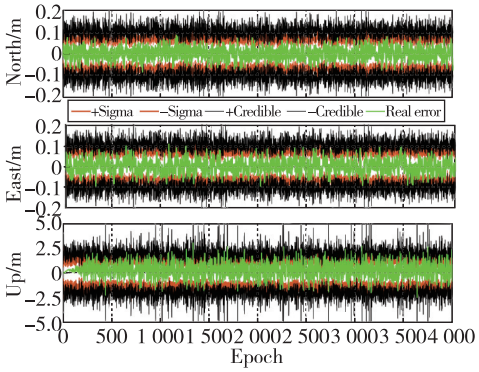


图 8 静态仿真数据 RUKF 内符合精度(Sigma)、外符合精度(Real error)和可信度(Credible)

Fig. 8 Compliance accuracy of Sigma, Real error, and Credible for static simulated UWB data RUKF

2.3 实测数据结果分析

基于实际采集的受 NLOS 影响的 UWB 动态数据的定位结果如图 9 所示,RUKF 在定位精度改善方面的优势亦非常显著,特别是在高程方向。对应的 CDF 曲线和统计结果如图 10 和图 11 所示,非线性化误差和 NLOS 误差在平面上对两种参数估计方法的定位精度影响较小,RMSE 统计值均为 0.3 m。平均误差(0.3 m 和 0.2 m)的差异主要由抗差模型引起,当均采用 RLS 和 RUKF 时,平面定位精度无差异,即非线性化误差对 UWB 平面精度的影响可以

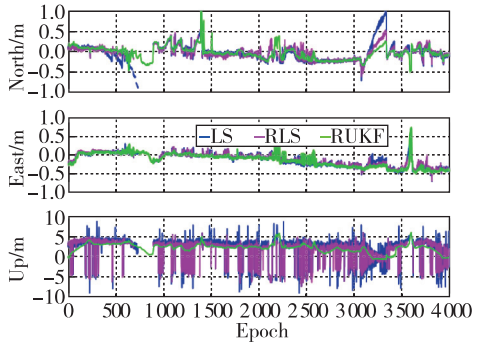


图 9 LS、RLS 和 RUKF 动态点位误差序列

Fig. 9 Dynamic position errors calculated from LS, RLS, and RUKF

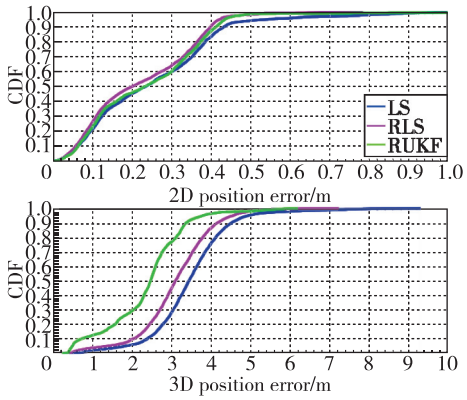


图 10 LS、RLS 和 RUKF 动态位置误差 CDF 曲线

Fig. 10 Dynamic position error CDF calculated from LS, RLS, and RUKF

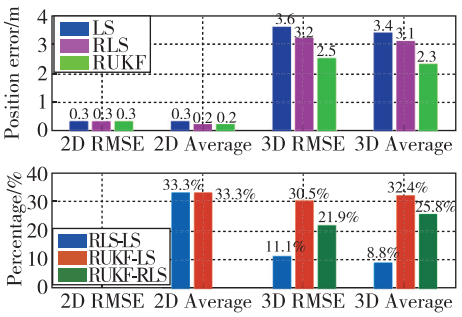


图 11 动态数据平面和三维统计结果

Fig. 11 Statistics result for horizontal and 3D dynamic position errors

忽略。迭代 LS、RLS 和 RUKF 的三维 RMSE 分别为 3.6 m、3.2 m 和 2.5 m,即抗差理论和非线性化误差的影响分别为 11.1%和 21.9%,二者耦合后的影响为 30.5%。与仿真实验类似,动态 UWB 实测平面精度亦远优于高程精度,这种差异在采用迭代 LS 解算时更明显。与静态仿真结果相比,动态实测 UWB 在平面和三维的定位精度均存在显著降低,这种差异是 NLOS 误差、非线性化误差和 UWB 设备随机噪声的耦合,这可以结合图 4 中的观测残差和图 9 中的定位误差序列分析得出。

图 12 所示为动态实测 UWB 定位中的内符合精度、外符合精度和可信度计算结果(图中分别给了 2 条±Sigma 曲线和 2 条±Credible 曲线,用于直观表征精度指标对真实误差的包裹情况)。可以看出,由于实际 UWB 观测值受 NLOS 误差和观测随机噪声的影响,使得基于高斯白噪声假设的内符合精度评估指标(Sigma)难以准确评估实际定位误差(Real error),而是给出过于理想化的精度指标,从而不能很好地反映实际定位精度。这种不符现

象，在动态应用中变化的非线性化误差和 DOP 奇异的耦合扰动影响下更加明显。而本文综合顾及 NLOS 误差、测站几何分布、测站空间分布密度的可信度指标（Credible），分别利用 IGG-III 抗差理论、空间几何强度奇异阻抗因子和基站空间分布密度再平衡因子削弱 NLOS、DOP 异常和测站空间分布密度不均衡的影响，从而较为实时准确地预测各历元的定位精度，且与外符合定位误差（Real error）具有较高的精度一致性和误差变化趋势一致性。其中，这种变化趋势一致性（对比图 12 中的绿色曲线和黑色点），在历元 1～1 000、1 500 附近、2 200 附近、2 600 附近、3 200 附近以及 3 500～4 000 表现得尤为明显。

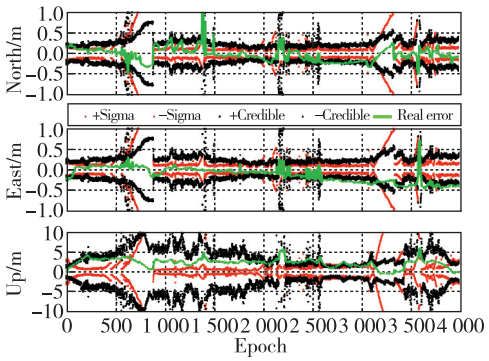


图 12　实测 UWB 数据 UKF 内符合精度（Sigma）、外符合精度（Real error）和可信度（Credible）

Fig. 12　Compliance accuracy of Sigma, Real error, and Credible for dynamic test UWB data

3　结论

针对传统 UWB 定位算法中的非线性化误差、非视距误差和结果精度在线可信评估等问题，本文提出了基于 IGG-III 抗差理论的 UKF UWB 三维定位方法和顾及 UWB 基站空间分布的结果精度可信评估方法，给出了详细的理论模型，并分别基于仿真数据和实测数据对其进行了综合分析验证。结果表明，1）在只存在白噪声影响的条件下，非线性化误差对 UWB 定位精度的影响超过 40%；2）在 NLOS 条件下，非线性化误差对 UWB 定位精度的影响接近 22%，NLOS 对定位精度的影响接近 11%；3）本文给出的可信度计算模型在仿真静态实验和实测动态实验中均可较好地实时评估 UWB 定位精度，该方法表现出了一定的实用价值。然而，该方法对于不同测距精度的 UWB 设备、不同 UWB 基站构型等场景下的泛化能力尚需进一步研究。

参考文献

[1] 杨元喜．导航与定位若干注记[J]．导航定位学报，2015，3(3)：1-4.
Yang Yuanxi. Notes of navigation and positioning[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2015, 3(3): 1-4(in Chinese).

[2] 杨元喜．综合 PNT 体系及其关键技术[J]．测绘学报，2016，45(5)：505-510.
Yang Yuanxi. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(5): 505-510(in Chinese).

[3] Rahim K. Heading drif mitigation for low cost inertial pedestrian navigation[D]. The University of Nottingham, 2012.

[4] 李由．基于 MEMS 惯性传感器、Wi-Fi、磁场特征的移动智能终端室内行人导航算法[D]．武汉：武汉大学，2015.
Li You. Integration of MEMS sensors, Wi-Fi, and magnetic features for indoor pedestrian navigation with consumer portable devices[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015(in Chinese).

[5] 王川阳．UWB 定位方法及构型优化研究[D]．徐州：中国矿业大学，2020.
Wang Chuanyang. Study on UWB positioning method and configuration optimization[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020(in Chinese).

[6] Liu Y. UWB ranging error analysis based on TOA mode [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1939 (1):012124.

[7] Albaidhani A, Morell A, Vicario J. Anchor selection for UWB indoor positioning[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2019, 30 (6): e3598.

[8] 李鹏，向宇翔，荣冬成，等．改进的 Chan-粒子滤波算法超宽带室内三维定位[J]．导航定位与授时，2022，9(4)：123-129.
Li Peng, Xiang Yuxiang, Rong Dongcheng, et al. Improved Chan particle filter algorithm for UWB indoor 3D positioning[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(4): 123-129(in Chinese).

[9] Gezici S, Zhi T, Giannakis G, et al. Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 70-84.

[10] Han Y, Zhang X, Lai Z, et al. TOF-based fast self-

positioning algorithm for UWB mobile base stations [J]. Sensors，2021，21(19)：6359.

[11] 文铠．基于超宽带的室内定位与定向关键技术研究[D]. 武汉：武汉大学，2020.
Wen Kai. Research on the key techniques of ultra-wideband based indoor positioning and orientation estimation[D]. Wuhan：Wuhan University，2020(in Chinese).

[12] 陈磊，王菲菲，焦良葆，等．基于最小二乘和泰勒级数的超宽带定位算法[J]. 信息化研究，2020，46(2)：30-35.
Chen Lei，Wang Feifei，Jiao Liangbao，et al. UWB location algorithm based on least square and Taylor series[J]. Informatization Research，2020，46(2)：30-35(in Chinese).

[13] 闫保芳，毛庆洲．一种基于卡尔曼滤波的超宽带室内定位算法[J]. 传感器与微系统，2017，36(10)：137-140，143.
Yan Baofang，Mao Qingzhou. An UWB indoor positioning algorithm based on Kalman filtering[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2017，36(10)：137-140，143(in Chinese).

[14] 吕鹏博，张岳魁．基于 UWB 的三维定位分析与算法研究[J]. 物联网技术，2022，12(4)：4-8.
Lyu Pengbo，Zhang Yuekui. Research on 3D positioning analysis and algorithm based on UWB[J]. Internet of Things Technologies，2022，12(4)：4-8(in Chinese).

[15] 董佳琪，连增增，徐精诚，等．融合卡尔曼滤波算法在超宽带定位中的研究[J]. 测绘科学，2022，47(5)：10-17.
Dong Jiaqi，Lian Zengzeng，Xu Jingcheng，et al. Research on fusion Kalman filter algorithm in UWB positioning[J]. Science of Surveying and Mapping，2022，47(5)：10-17(in Chinese).

[16] 李楠，梁冰．基于 UWB 的三维定位和优化滤波方法[J]. 河北大学学报(自然科学版)，2021，41(3)：329-336.
Li Nan，Liang Bing. 3D positioning and optimal filtering method based on UWB[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition)，2021，41(3)：329-336(in Chinese).

[17] 杨元喜．自适应动态导航定位[M]. 北京：测绘出版社，2006.
Yang Yuanxi. Adaptive navigation kinematic positioning[M]. Beijing：Surveying and Mapping Publishing House Co.，Ltd.，2006(in Chinese).

[18] Kaczmarek A，Rohm W，Klingbeil L，et al. Experimental 2D extended Kalman filter sensor fusion for low-cost GNSS/IMU/Odometers precise positioning system[J]. Measurement，2022，193：110963.

[19] Lyu X，Hu B，Dai Y，et al. Gaussian process regression-based quaternion unscented Kalman robust filter for integrated SINS/GNSS[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics，2022，33(5)：1079-1088.

[20] 侯鹏宇，宋子远，石波，等．Bancroft 算法应用于 GPS/BDS/GLONASS 三系统伪距单点定位[J]. 海洋测绘，2018，38(6)：33-36.
Hou Pengyu，Song Ziyuan，Shi Bo，et al. Bancroft algorithm applied to GPS/BDS/LONASS pseudo-range single-point positioning[J]. Hydrographic Surveying and Charting，2018，38(6)：33-36(in Chinese).

[21] 刘韬，徐爱功，隋心．自适应抗差 KF-UKF 的超宽带导航定位方法[J]. 测绘科学，2017，42(12)：104-111.
Liu Tao，Xu Aigong，Sui Xin. UWB navigation and positioning based on adaptive robust KF-UKF[J]. Science of Surveying and Mapping，2017，42(12)：104-111(in Chinese).

（编辑：黄利华）