

Chan-AUKF 融合算法在三维定位中的应用

李向博,熊 鸣,王丽婕

(北京信息科技大学 高动态导航技术北京市重点实验室,北京 100192)

摘要:针对超宽带 (ultra-wideband, UWB) 定位技术在三维定位应用中存在的定位精度低,定位结果易受复杂环境影响,存在固定偏差的问题,基于 Chan 算法和简化无迹卡尔曼滤波 (unscented Kalman filter, UKF) 算法构建定位系统状态误差补偿函数对简化 UKF 算法进行自适应补偿,提出 Chan-自适应无迹卡尔曼滤波 (Chan-adaptive unscented Kalman filter, Chan-AUKF) 三维定位算法。根据 Chan 算法和简化 UKF 算法解算出的标签三维坐标构建定位系统状态误差补偿函数,对简化 UKF 算法自适应补偿的同时,将此三维坐标作为 Chan-AUKF 算法的初值对标签三维坐标的精确值进行估计。实验结果表明,Chan-AUKF 算法在性能上优于 Chan 算法、UKF 算法和 Chan-UKF 算法,在保证稳定性的同时,能够有效地提高定位精度。

关键词:超宽带;Chan 算法;无迹卡尔曼滤波;Chan-AUKF 算法;状态误差补偿函数

中图分类号:TP391.41;TN925

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2022)06-0150-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2022.06.025

Application of Chan-AUKF Fusion Algorithm in 3D Localization

LI Xiang-bo, XIONG Ming, WANG Li-jie

(Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the problems of low positioning accuracy, easy to be affected by complex environment and fixed deviation of ultra-wideband (UWB) positioning technology in 3D positioning application, the state error compensation function of positioning system is constructed to compensate the simplified UKF algorithm based on Chan algorithm and simplified UKF algorithm, and a Chan-adaptive unscented Kalman filter (Chan-AUKF) 3D positioning algorithm is proposed. The positioning system state error compensation function is built according to the label three-dimensional coordinates calculated by Chan algorithm and simplified UKF algorithm. While the simplified UKF algorithm adaptively compensates, the three-dimensional coordinates are used as the initial value of the Chan-AUKF algorithm to estimate the precise three-dimensional coordinates of the label. Experiment shows that the performance of Chan-AUKF algorithm is better than that of CHAN algorithm, UKF algorithm and Chan-UKF algorithm, and it can effectively improve the positioning accuracy while ensuring the stability.

Key words: UWB; Chan algorithm; UKF; Chan-AUKF algorithm; state error compensation function

0 引言

随着信息技术不断发展,基于位置信息的服务在人们的生活和工作中发挥着越来越重要的作用。UWB 定位技术因其穿透能力强、时间分辨率高、抗多径干扰能力强等优点,广泛应用于室内定位系统中。

UWB 定位系统是基于测距方法来实现定位,按照测距原理的不同可以分为四种测距方法^[1-2]:基于到达时间 (time of arrival, TOA) 估计、基于到达时间差 (time different of arrival, TDOA) 估计、基于到达角度

(angle of arrival, AOA) 估计和接收信号强度 (received signal strength, RSS) 估计。基于 UWB 信号时间分辨率高的优点,TOA 和 TDOA 的 UWB 定位技术在三维定位中应用最广泛^[3],能够满足精确定位的需求。在视距 (line of sight, LOS) 环境中,基于 TDOA 定位技术的 Chan 算法利用两次加权最小二乘法 (weighted least squares, WLS) 对定位标签的三维坐标进行解算,具有很好的定位效果^[4]。但是在非视距环境 (non line of sight, NLOS) 中,Chan 算法的定位精度会急剧下降^[5]。

收稿日期:2021-06-17

修回日期:2021-10-20

基金项目:国家自然科学基金(61971048);国家重点研发计划课题(2020YFC1511702)

作者简介:李向博(1997-),男,硕士,研究方向为控制工程、高动态导航技术等;通讯作者:熊 鸣(1978-),男,博士,高级实验师,研究方向为定位技术、导航技术等。

在实际的定位环境中,为了抑制非视距误差对定位结果的影响,提高定位精度,单一算法已经很难满足定位要求^[6]。

国内外的许多学者对混合定位算法进行研究,文献[7]提出将 RSS、TOA 和 TDOA 三种测量信息构成测距信息集,建立多级联合判决机制,但该方法复杂度较高,运算时间长;文献[8]提出使用 Chan-UKF 算法通过比较设定阈值与初步定位坐标残差的大小来鉴别 NLOS 误差,但该方法随着标签与基站距离的增大,误差也会随之增大;文献[9]提出使用 Chan-Taylor-EKF 协同定位算法,利用每个算法分别对非视距误差进行抑制,但需要设置多个阈值进行筛选判断,增大了算法的复杂度。

针对上述问题,为了有效地抑制非视距误差对定位结果的影响,对定位结果的位置偏差进行补偿,提出了基于 Chan 算法和简化 UKF 算法的 Chan-AUKF 算法。根据定位标签与不同的定位基站之间的距离差即 TDOA 测量值,建立定位基站与定位标签之间的非线性关系式。Chan-AUKF 算法首先利用 Chan 算法对基于 TDOA 测量值建立的非线性方程组进行线性化近似,利用两次 WLS 得到定位标签三维坐标估计值;其次将 Chan 算法得到的标签三维坐标值作为简化 UKF 算法的初值进行滤波处理之后,根据简化 UKF 算法得到定位标签三维坐标初始估计值与定位基站布置的环境建立状态误差补偿函数^[10],对简化 UKF 算法的状态方程进行实时的自适应补偿;最后将简化 UKF 算法解算得到的标签三维坐标初始估计值作为自适应补偿后的简化 UKF 算法的初值代入,对标签的三维坐标进行精确解算。

1 TDOA 定位技术及算法

假设待测标签 $MS(x, y, z)$, 所有基站的位置已知,基站坐标为 $BS(X_i, Y_i, Z_i)$, ($i = 1, 2, \dots, n$), 基站 i 与标签之间的距离为 $r_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2}$ 。TDOA 定位技术是通过测量信号从不同基站到达同一标签的时间差值建立的双曲面方程组来求解标签的三维坐标的技术。将第一个基站作为基准基站,建立基站与标签距离之间的关系如下^[11]:

$$r_{i,1} = r_i - r_1 = c(t_i - t_1) \quad (1)$$

其中, t_i 为基站 i 接收到标签信号的时延值, c 为电磁波传播速度, $r_{i,1}$ 为定位标签与基站 1 与基站 i 的距离差值。

1.1 Chan 算法

Chan 算法是基于 TDOA 定位技术的非递归定位算法^[12-13]。根据公式(1)建立双曲面方程组并将其

线性化处理为公式(2):

$$r_{i,1}^2 + K_i - K_1 = -2(X_{i,1}x + Y_{i,1}y + Z_{i,1}z + r_1r_1) \quad (2)$$

其中, $K_i = X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2$, $X_{i,1} = X_i - X_1$, $Y_{i,1} = Y_i - Y_1$, $Z_{i,1} = Z_i - Z_1$ 。

假设 $z_a = [x, y, z, r_1]^T$ 为未知量,公式(2)的线性形式为:

$$h - G_a z_a = 0 \quad (3)$$

考虑到非视距误差和多径效应的影响,系统存在信号延时误差,建立系统误差向量方程及其解析公式如下:

$$\psi = h - G_a z_a \quad (4)$$

$$\psi = cB\Delta t + \frac{1}{2}c^2\Delta t \odot \Delta t \quad (5)$$

其中, $B = \text{diag}\{r_2, r_3, \dots, r_n\}$, 误差协方差矩阵为 $\Psi = E(\psi\psi^T) = c^2BQB$; Δt 为系统信号延时误差,其均值为 0, 方差为 σ , 协方差矩阵为 $Q = \text{diag}(\sigma_{2,1}, \sigma_{3,1}, \dots, \sigma_{n,1})$ 。

假设 z_a 中各个元素相互独立,利用 WLS 得到 z_a 的第一次估计值:

$$\tilde{z}_a = \text{argmin}\{(h - G_a z_a)^T \Psi^{-1}(h - G_a z_a)\} = (G_a^T Q^{-1} G_a)^{-1} G_a^T Q^{-1} h \quad (6)$$

实际上, z_a 中的元素 r_1 与 (x, y, z) 之间是有关联的。利用 z_a 的第一次估计值对系统误差向量方程中的值进行更新,通过 WLS 得到 z_a 的第二次估计值:

$$\tilde{z}_a = (G_a^T \Psi^{-1} G_a)^{-1} G_a^T \Psi^{-1} h \quad (7)$$

1.2 标准 UKF 算法

卡尔曼滤波器只适用于线性高斯模型,基于 TDOA 技术建立基站与标签距离的关系为非线性方程组,对于非线性的问题需要使用扩展卡尔曼滤波器或无迹卡尔曼滤波器处理。UKF 利用无迹变换在估计点附近选取采样点,用这些采样点表示的高斯密度近似状态的概率密度函数,如果状态噪声服从高斯分布,UKF 算法近似度可以达到三阶近似,即使不服从高斯分布,也能实现二阶近似^[10]。相比于扩展卡尔曼滤波器对非线性函数进行近似,UKF 是对非线性函数的概率密度分布进行近似,无需计算雅克比矩阵,提高精度的同时减小了算法计算复杂度。

基于基站与标签距离的关系建立线性状态方程和非线性观测方程:

$$\begin{cases} X_k = FX_{k-1} + W_k \\ Z_k = H(X_k) + V_k \end{cases} \quad (8)$$

其中, $X_k = [x_k, y_k, z_k]^T$ 为标签的位置坐标, F 为状态转移矩阵; $Z_k = [d_{2,1}, d_{3,1}, \dots, d_{n,1}]^T$ 为基站获得的 TDOA 距离值; W_k 、 V_k 分别为过程噪声和观测噪声,

其协方差矩阵分别为: \mathbf{Q}_k 、 \mathbf{R}_k ; $H(X_k) = [r_{2,1}, r_{3,1}, \dots, r_{n,1}]^T$ 。

UKF 使用无迹变换来处理状态的均值和协方差的非线性传递问题,对非线性函数的概率分布进行近似,用一系列确定样本来逼近状态的后验概率分布。无迹变换获得 $2n+1$ 个样本点 X (Sigma 点) 及其对应的权值如式(9)与式(10)所示。

$$X_i = \begin{cases} \hat{x}, & i = 0 \\ \hat{x} + \sqrt{(n+\lambda)P_{xx}}, & i = 1, 2, \dots, n \\ \hat{x} - \sqrt{(n+\lambda)P_{xx}}, & i = n+1, n+2, \dots, 2n \end{cases} \quad (9)$$

$$W_i^{(m)} = \begin{cases} \frac{\lambda}{n+\lambda}, & i = 0 \\ \frac{\lambda}{2(n+\lambda)}, & i = 1, \dots, 2n \end{cases} \quad (10)$$

$$W_i^{(c)} = \begin{cases} \frac{\lambda}{n+\lambda} + 1 - \alpha^2 + \beta, & i = 0 \\ \frac{\lambda}{2(n+\lambda)}, & i = 1, \dots, 2n \end{cases}$$

其中, $\lambda = \alpha^2(n + \kappa) - n$, $W^{(m)}$, $W^{(c)}$ 分别为期望和协方差矩阵的加权重。

UKF 算法的具体实现过程如下:

(1) 滤波初值:

$$\hat{X}_0 = E[X_0] \quad (11)$$

$$P_0 = E[(X - \hat{X}_0)(X - \hat{X}_0)^T] \quad (12)$$

(2) 计算 $k-1$ 时刻 Sigma 点集:

$$X_{k|k-1} = [\hat{X}_{k|k-1}, \hat{X}_{k|k-1} + \sqrt{(n+\lambda)P_k}, \hat{X}_{k|k-1} - \sqrt{(n+\lambda)P_k}] \quad (13)$$

(3) 一步预测 k 时刻的状态与协方差:

$$X_{k|k-1} = FX_{k-1|k-1} \quad (14)$$

$$\hat{X}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} X_{k-1|k-1} \quad (15)$$

$$X_{k|k-1} = [\hat{X}_{k|k-1}, \hat{X}_{k|k-1} + \sqrt{(n+\lambda)P_k}, \hat{X}_{k|k-1} - \sqrt{(n+\lambda)P_k}] \quad (16)$$

(4) 重复步骤(2), 计算 k 时刻观测预测, 获取观测均值和协方差:

$$X_{k|k-1} = [\hat{X}_{k|k-1}, \hat{X}_{k|k-1} + \sqrt{(n+\lambda)P_k}, \hat{X}_{k|k-1} - \sqrt{(n+\lambda)P_k}] \quad (17)$$

$$Z_{k+1|k} = H(X_{k+1|k}) \quad (18)$$

$$\hat{Z}_{klk-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} Z_{klk-1} \quad (19)$$

$$P_{Z,Z_i} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [Z_{klk-1} - \hat{Z}_{klk-1}] [Z_{klk-1} - \hat{Z}_{klk-1}]^T + R_k \quad (20)$$

$$P_{X,Z_i} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [X_{klk-1} - \hat{X}_{klk-1}] [Z_{klk-1} - \hat{Z}_{klk-1}]^T \quad (21)$$

(5) 量测更新:

$$K_k = P_{X,Z_i} (P_{Z,Z_i})^{-1} \quad (22)$$

$$P_{klk} = P_{klk-1} - K_k P_{Z,Z_i} K_k^T \quad (23)$$

$$\hat{X}_{klk} = \hat{X}_{klk-1} + K_k (Z_k - \hat{Z}_{klk-1}) \quad (24)$$

在标准 UKF 滤波算法中需要经过两次 UT 变换, 分别对系统的状态方程和观测方程的概率密度分布进行近似。根据公式(3)可知, 基于 TDOA 定位技术的 Chan 算法状态方程为线性方程, 利用 UT 变化中 Sigma 点的预测值加权求得的系统状态预测对提高定位精度的意义不大, 反而会加大算法的运算量, 降低运算效率。为了降低算法的复杂度, Chan-AUKF 算法对标准 UKF 算法进行了简化, 只进行对量测方程的 UT 变换, 省略标准 UKF 算法的步骤(2), 简化步骤(3), 对状态预测及预测协方差进行修正:

$$\hat{X}_{k|k-1} = F\hat{X}_{k-1|k-1} + \text{xoffset} \quad (25)$$

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q_{k-1} \quad (26)$$

2 Chan-AUKF 融合算法

在实际定位环境中, 基站与标签之间通讯的 UWB 信号受 NLOS 与多径效应的影响, 测量得到的 UWB 信号飞行时间掺杂着很多误差, 将这些含有误差的测量值直接代入上述算法中解算出来的标签三维坐标与实际坐标之间存在着很大的误差^[14-15]。针对这一问题, 该文提出一种 Chan-AUKF 混合算法。Chan-AUKF 算法使用 Chan 算法和简化的 UKF 算法对标签的三维坐标进行初步估计, 利用标签的三维坐标初步估计值建立系统状态误差补偿函数, 对简化的 UKF 算法进行实时自适应补偿, 并将其作为 AUKF 算法的初值代入对标签的精确坐标进行估计。Chan-AUKF 算法实现的具体流程如图 1 所示。

具体步骤如下:

(1) 对标签三维坐标进行初始估计。

通过 UWB 信号在基站和标签之间的传播时间戳测得标签与不同基站间的 TDOA 值, 利用 Chan 算法根据测得的 TDOA 值对标签的三维坐标进行解算; 将 Chan 算法的解算结果作为 UKF 算法的初值对标签的三维坐标进行初始解算。

(2) 建立系统状态误差补偿函数。

根据简化 UKF 算法初始解算出标签的三维坐标值与定位基站分布的中心点坐标值构造状态误差补偿函数。假设定位基站的分布的中心点坐标为 (x_c, y_c, z_c) , Chan 算法解算得到的定位标签三维坐标为

$(x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1})$, 两个坐标值的偏差如下:

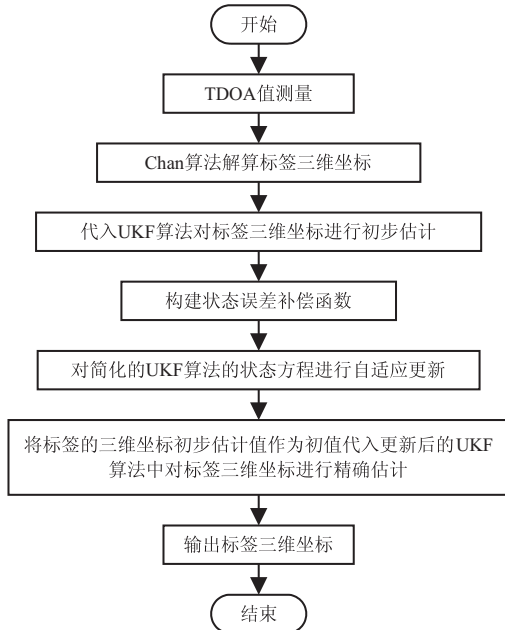


图 1 Chan-AUKF 算法流程

$$\begin{cases} \Delta x = x_{k-1} - x_c \\ \Delta y = y_{k-1} - y_c \\ \Delta z = z_{k-1} - z_c \end{cases} \quad (27)$$

根据坐标偏差大小, 分别设置坐标的补偿尺度因子 k_x 、 k_y 、 k_z , 尺度补偿因子大小与 UWB 的误差特性和实际环境有关, 将坐标状态补偿量标记量 $xoffset$ 标记为:

$$\begin{cases} offsetx = -k_x \Delta x \\ offsety = -k_y \Delta y \\ offsetz = -k_z \Delta z \end{cases} \quad (28)$$

$$xoffset = [offsetx, offsety, offsetz]^T \quad (29)$$

根据标签坐标状态的补偿量, 将简化 UKF 模型的状态方程更新为:

$$\begin{cases} X_k = FX_{k-1} + xoffset + W_k \\ Z_k = H(X_k) + V_k \end{cases} \quad (30)$$

(3) 对标签三维坐标进行精确估计。

根据公式(30)对简化 UKF 算法的状态方程和观测方程进行自适应补偿, 将标签的三维坐标的初步解算结果作为更新后的 AUKF 算法初值代入, 对标签的三维坐标进行精确估计。

3 实验与结果分析

为了充分验证所提方法的合理性, 搭建实验环境对算法进行验证。将 5 个基站放置在 $10m \times 10m \times 30m$ 的实验区域内: 基站 1 $(0, 0, 0)$, 基站 2 $(6.02, 3.12, 0)$, 基站 3 $(3.12, 6.04, 1.56)$, 基站 4 $(6.16, 3.08, 3.22)$, 基站 5 $(3.32, 6.21, 4.62)$, 中心点坐标为

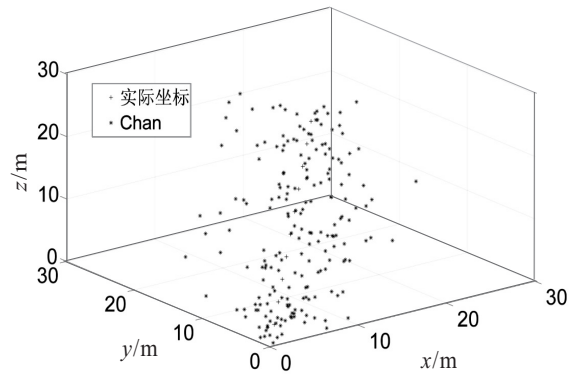
$(3, 3, 3)$ 。实验测试环境如图 2 所示, 测试前对各个基站在视距环境下校准。



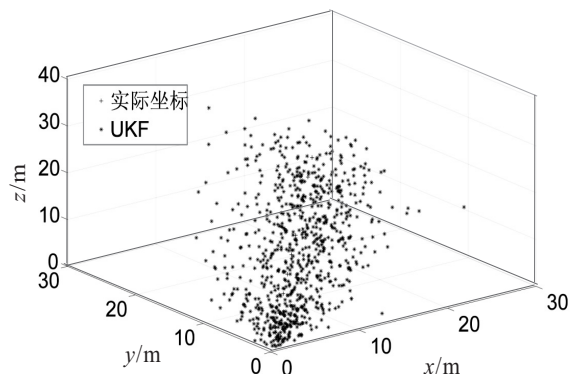
图 2 实验测试环境

将 5 个基站分别校准后, 选取合适的位置放置定位标签, 利用标签与基站之间的信号传播, 测量 TDOA 值, 并将测得的 TDOA 值载入 MATLAB, 分别利用 Chan 算法、标准 UKF 算法、Chan-AUKF 算法对标签的三维坐标分别进行解算。

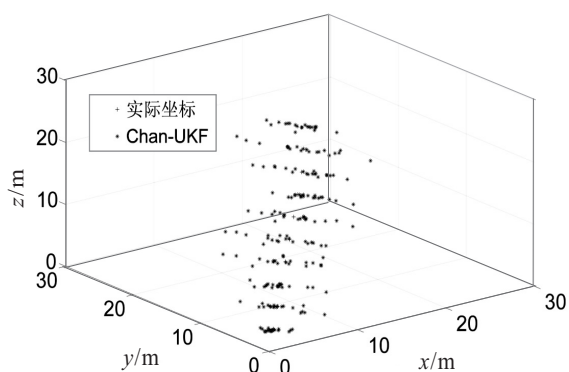
实验中, 对每一个标签分别进行了 10 次测量, 测得 10 组 TDOA 值, 将这 10 组 TDOA 值载入 MATLAB 中利用三种算法进行三维解算, 如图 3 所示, 分别为 Chan 算法、UKF 算法、Chan-UKF 算法和 Chan-AUKF 算法得到的估计坐标与实际坐标的对比。



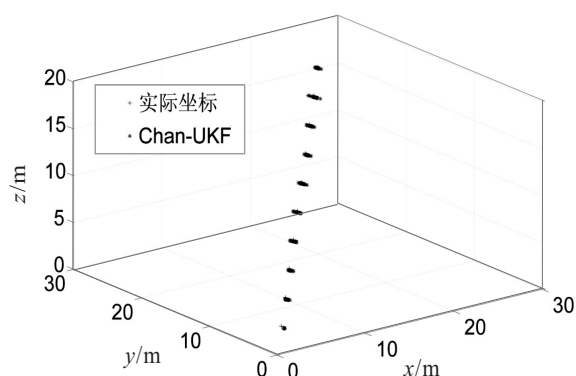
(a) Chan 算法估计坐标与实际坐标



(b) UKF 算法估计坐标与实际坐标



(c) Chan-UKF 算法估计坐标与实际坐标



(d) Chan-AUKF 算法估计坐标与实际坐标

图 3 四种定位算法估计坐标与实际坐标对比

从图 3 中可以看出,相比于 Chan 算法、标准 UKF 算法和 Chan-UKF 算法,Chan-AUKF 算法解算出的标签坐标估计值与标签实际坐标最接近,Chan 算法解算出的标签坐标估计值与实际坐标的误差最大,UKF 算法次之,Chan-UKF 算法解算出的标签坐标估计值与实际坐标误差比 UKF 算法更小,但与 Chan 算法相比,UKF 算法和 Chan-UKF 算法解算出的坐标与实际坐标更加接近。对比四种种算法解算出坐标值的

分布,随着定位标签与定位基站之间距离的增大,Chan-AUKF 算法解算出的坐标与实际位置的误差无明显变化,而 Chan 算法、标准 UKF 算法和 Chan-UKF 算法解算出的标签坐标与标签实际坐标的误差随着标签与基站之间距离的增大而增大,解算结果存在发散的现象。

为了从数值上对三种算法的定位精度进行比较,分别计算 Chan 算法、标准 UKF 算、Chan-UKF 算法和 Chan-AUKF 算法解算出的标签坐标估计值与实际坐标的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 值。图 4 为三种算法 RMSE 值变化曲线,表 1 为四种算法的 RMSE 值。

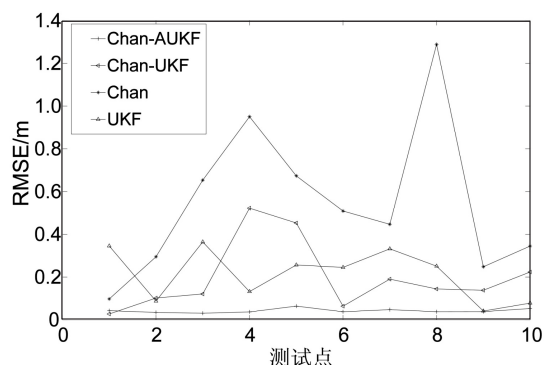


图 4 标签估计坐标 RMSE 值曲线

从图 4 中可以看出,Chan 算法的定位精度最低,坐标估计结果与实际坐标的误差最大,不能作为最后的估计结果使用;标准 UKF 算法和 Chan-UKF 算法相比较于 Chan 算法,虽然定位精度有所提高,但随着标签与基站之间的距离增大,定位误差也随之增大,不能满足定位要求。Chan-AUKF 算法与前两种算法相比,在提高定位精度的同时,能够有效抑制基站与标签之间距离增大给定位结果带来的误差,实时自适应地对状态进行补偿。

表 1 不同算法的 RMSE 值对比

标签的实际坐标	Chan 算法	UKF 算法	Chan-UKF 算法	Chan-AUKF 算法
(1.05,1.12,2.96)	0.233 5	0.251 2	0.156 2	0.042 3
(2.14,2.16,6.05)	0.130 4	0.093 5	0.092 2	0.072 6
(3.08,3.12,9.06)	0.245 3	0.314 8	0.287 8	0.089 3
(4.20,3.88,12.08)	0.407 4	0.369 6	0.342 1	0.064 8
(5.03,5.09,14.97)	0.515 3	0.409 1	0.376 6	0.092 8
(6.06,6.12,18.14)	0.464 6	0.377 1	0.322 4	0.042 2
(6.98,7.13,21.16)	0.589 4	0.339 3	0.287 4	0.066 3
(8.06,7.94,24.12)	0.774 1	0.6240	0.611 7	0.053 8
(9.06,9.07,27.19)	0.570 6	0.679 8	0.354 2	0.075 3
(10.12,9.98,30.07)	0.814 4	0.696 3	0.627 9	0.057 4

为了从数值的角度分析四种算法的误差,对四种算法估计结果的 RMSE 进行统计。从表 1 中可以看到四种算法对标签的三维估计坐标的 RMSE 分析,Chan 算法的 RMSE 值最大为 0.814 4 m,最小为 0.130 4 m,平均值为 0.474 5 m;UKF 算法的 RMSE 值最小为 0.093 5 m,最大为 0.696 3 m,平均值为 0.415 5 m;Chan-UKF 算法的 RMSE 值最大为 0.627 9 m,最小值为 0.092 2 m,平均值为 0.345 8 m;Chan-AUKF 算法的 RMSE 值最大为 0.092 8 m,最小值为 0.042 2 m,平均值为 0.065 7 m。无论是从 RMSE 的最大值、最小值还是平均值来看,Chan-AUKF 算法能够有效地提高定位精度。

4 结束语

针对 UWB 定位系统在三维定位中定位精度低、存在固定偏差的问题,基于 Chan 算法与简化 UKF 算法,根据定位环境的误差特性,通过构建状态误差补偿函数,对简化 UKF 算法的状态方程进行自适应实时状态误差补偿。实验结果表明,在 NLOS 环境中,Chan 算法的定位精度最低,UKF 算法和 Chan-UKF 算法的定位精度虽然比 Chan 算法高,但也受 NLOS 误差的干扰。利用 Chan 算法和简化 UKF 算法得到的初始估计坐标构建状态误差补偿函数对简化的 UKF 算法进行实时状态误差补偿,可以有效降低 NLOS 误差对定位结果的影响,提高定位精度。改进后的 Chan-AUKF 算法在 NLOS 环境中的定位精度可以达到厘米级,在保证稳定性的同时,有效地提高了定位精度,满足了 UWB 三维定位系统的定位要求。

参考文献:

- [1] 王桂杰,焦良葆,曹雪虹. 基于最小二乘法的室内三维定位算法研究[J]. 计算机技术与发展,2020,30(4):69-73.
- [2] CHENG Y, ZHOU T. UWB indoor positioning algorithm based on TDOA technology [C]//2019 10th international conference on information technology in medicine and education (ITME). Qingdao:IEEE,2019:777-782.
- [3] 金仙力,赵道明. 基于改进 CHAN 的超宽带定位误差校正算法[J]. 计算机技术与发展,2018,28(3):67-71.
- [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] KIM H J, XIE Y, YANG H, et al. An efficient indoor target tracking algorithm using TDOA measurements with applications to ultra-wideband systems [J]. IEEE Access, 2019, 7 (99):91435-91445.
- [6] YAN H, WANG F. A method of strong tracking UKF based on adaptive constraints [C]//2019 IEEE 3rd information technology, networking, electronic and automation control conference (ITNEC). Chengdu:IEEE,2019:2339-2343.
- [7] 李娅菲,朱炬璋. 非视距条件下的测距信息融合定位方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(5):775-780.
- [8] 杨紫阳,吴才章,张 弛. 基于 Chan 和改进 UKF 的 UWB 室内混合定位算法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(12):65-69.
- [9] 王瑞荣,郑书万,陈浩龙,等. 一种基于 Taylor 和 Kalman 的室内协同定位方法[J]. 传感技术学报,2014,27(11):1557-1561.
- [10] 傅 军,许 达,付 阳. 一种自适应 UKF 在 UWB 室内定位中的应用[J]. 测绘通报,2019(S1):12-17.
- [11] ZANG L, SHEN C, ZHANG K, et al. Research on hybrid algorithm based on TDOA [C]//2020 IEEE 20th international conference on communication technology (ICCT). Nanning: IEEE,2020:539-542.
- [12] WU Z. Research on motion pattern classification and wavelet denoising based on TDOA-Chan algorithm [C]//2019 IEEE 2nd international conference on electronics and communication engineering (ICECE). Xi'an:IEEE,2019:66-70.
- [13] CHEN L, LI X, WANG J, et al. Moving sensor nodes' tracking by WT-UKF in wireless sensor networks [C]//2015 IEEE 5th international conference on electronics information and emergency communication. Beijing:IEEE,2015:91-94.
- [14] 肖 竹,谭光华,李仁发,等. 无线传感器网络中基于超宽带的 TOA/AOA 联合定位研究[J]. 计算机研究与发展,2013,50(3):453-460.
- [15] 田龙彬. 室内环境下的三维定位技术研究[D]. 南京:南京邮电大学,2019.