引文格式：钱剑航. 加权最小二乘的 NLOS UWB 室内定位精度分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 86-88. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.08.022

加权最小二乘的NLOS UWB室内定位精度分析

钱剑航[1]
（1. 广东省国土资源测绘院，广东 广州 510500）

摘　要：针对非视距误差对UWB室内定位影响较大的问题，提出一种加权最小二乘数学算法的NLOS UWB定位算法，实验过程中在基于TDOA算法过程中引入加权最小二乘算法，验证了加权最小二乘算法对UWB室内静态、动态定位精度有较好提升效果。实验结果表明：新算法对UWB静态定位X方向、Y方向RMS值分别提升49.6%、49.4%，STD值分别提升45.8%、38.0%；对UWB动态定位X方向、Y方向RMS值分别提升51.7%、55.2%，STD值分别提升49.6%、53.1%，证明了加权最小二乘算法在NLOS情景下UWB室内定位的可行性。

关键词：加权最小二乘；非视距；UWB；定位
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）08-0086-03

NLOS UWB Indoor Positioning Accuracy Analysis Based on Weighted Least Squares

QIAN Jianhang[1]
(1. Guangdong Institute of Land and Resources Surveying and Mapping, Guangzhou 510500, China)

Abstract: Considering the problem that non line of sight error hada great impact on UWB indoor positioning, we proposed an NLOS UWB positioning algorithm based on weighted least squares mathematical algorithm in this paper. In the experimental process, we introduced the weighted least squares algorithm based on TDOA algorithm to verify the improvement effect of weighted least squares algorithm on UWB indoor static and dynamic positioning. The experimental results show that the new algorithm improves the RMS values in X direction and Y direction by 49.6% and 49.4% respectively, and the STD values by 45.8% and 38.0% respectively. For UWB dynamic positioning, the RMS values in X direction and Y direction are increased by 51.7% and 55.2% respectively, and the STD values by 49.6% and 53.1% respectively, which proves the feasibility of weighted least square algorithm for UWB indoor positioning in NLOS scenario.

Key words: weighted least squares, non line of sight, UWB, positioning

UWB定位技术是一种具有快捷方便，成本低廉、定位精度高、稳定性强等特点的一种室内定位手段。UWB定位技术在视距（line of sight，LOS）情景下定位精度可达厘米级，但是UWB在定位过程中往往受到非视距（non line of sight，NLOS）的影响，造成较大粗差[1-6]。目前UWB测距方法主要包括信号飞行时间法（time of flight measurement，TOF）、信号达到时间定位法（time of arrival，TOA）、信号达到时间差测距法（time difference of arrival，TDOA）、信号到达角度测距法（angle of arrival，AOA）、接收信号强度法（received signal strength indication，RSSI），不同UWB测距方法间各有优劣[5]。目前国内外学者对UWB室内定位进行研究分析，文献[7]提出一种抗NLOS误差的新算法，该算法在LOS情景下定位误差为6 cm，在NLOS情景下定位误差为15 cm，新算法对定位精度提升较为明显；文献[8]提出了一种基于UWB和惯性导航系统的组合定位方法，该室内定位方法在LOS和NLOS情景下均能达到厘米级定位精度，且具备较高的可靠性；文献[9]提出了一种融合UWB行人航位推算的算法，该融合算法室内定位最大误差为0.82 m，最小误差为0.14 m，平均误差为0.4 8 m，有效提高了室内定位的精度，文献[10]提出一种UWB的改进算法，该算法对NLOS误差进行处理，实验结果表明该改进算法可使室内定位精度达到厘米级，同时有较强的抗干扰性。

在室内定位过程中，UWB观测值受NLOS误差、多路径效应的影响，使定位结果产生较大误差，本文提出一种加权最小二乘UWB室内定位方法，该方法

收稿日期：2022-04-18；修回日期：2022-06-20。
项目来源：广东省科技计划项目（2021B1111610001、2021B1212100003）。
作者简介：钱剑航（1989—），工程师，从事摄影测量与遥感技术应用、GIS数据处理方面及地图编制的研究，E-mail：qianjianhang@126.com。

可有效剔除NLOS误差，提高UWB室内定位精度。

1　数学模型

1.1　TDOA定位数学模型

TDOA是测量2个不同基站接收信号的时间差值，乘以信号传播速度c，得到定位标签到基站的距离差，求解距离差方程组得到定位标签的位置坐标[11-12]。

TDOA二维定位为双曲线模型，假设定位过程中基站的平面坐标分别为(x_1, y_1)、(x_2, y_2)、(x_3, y_3)，接收到信号的时间分别为T_1、T_2、T_3，定位标签的平面坐标为（X，Y），由距离差方程组可得到：

$$\begin{cases}\Delta S_{21}=\left(S_2-S_1\right)=c\left(T_2-T_1\right)\\ \Delta S_{31}=\left(S_3-S_1\right)=c\left(T_3-T_1\right)\end{cases}\tag{1}$$

将式（1）转换成平面坐标表达，即得到：

$$\begin{cases}\Delta S_{21}=\sqrt{\left(x_2-x\right)^2+\left(y_2-y\right)^2}-\sqrt{\left(x_1-x\right)^2+\left(y_1-y\right)^2}\\ \Delta S_{31}=\sqrt{\left(x_3-x\right)^2+\left(y_3-y\right)^2}-\sqrt{\left(x_1-x\right)^2+\left(y_1-y\right)^2}\end{cases}\tag{2}$$

TDOA三维定位为双曲面模型，其定位原理与二维定位相似，假设定位过程中基站的三维坐标为（x_i，y_i，z_i），$i=1$，2，3，…，接收到信号的时间为T_i，定位标签的三维坐标为（X，Y，Z），ΔS_{i1}表示第i个基站距离定位标签到基第1个基站的差值，即：

$$\begin{cases}\Delta S_{21}=\sqrt{\left(x_2-x\right)^2+\left(y_2-y\right)^2+\left(z_2-z\right)^2}-\sqrt{\left(x_1-x\right)^2+\left(y_1-y\right)^2+\left(z_1-z\right)^2}\\ \Delta S_{n1}=\sqrt{\left(x_n-x\right)^2+\left(y_n-y\right)^2+\left(z_n-z\right)^2}-\sqrt{\left(x_1-x\right)^2+\left(y_1-y\right)^2+\left(z_1-z\right)^2}\end{cases}\tag{3}$$

式中，$n\geqslant 4$，对方程组求解即可得到定位标签在三维空间的位置坐标。

1.2　加权最小二乘的数学模型

最小二乘估计算法不需要任何先验信息，只需要对估计量的观测模型进行信号的参量预估，得到误差平方和最小。基于TDOA算法建立方程，即：

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{AX}+b\tag{4}$$

式中，满足$E(b)=0$，且$\mathrm{cov}(b)=\sigma^2\boldsymbol{G}$，其中$\boldsymbol{G}$为已知的正定矩阵，$\sigma^2$为无偏估计，$\boldsymbol{Y}$为由距离测量值的函数表示已知$k\times 1$维向量，$\boldsymbol{X}$为定位标签位置构成的$n\times 1$维未知向量，$\boldsymbol{A}$为$k\times n$维测量系数矩阵，表示测量值与定位标签间的位置关系。则残差可用向量表示为：

$$r=\boldsymbol{AX}+b-\boldsymbol{Y}\tag{5}$$

基于加权最小二乘求取$\boldsymbol{X}$，即：

$$Q(\boldsymbol{X})=(\boldsymbol{Y}-b-\boldsymbol{AX})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}(\boldsymbol{Y}-b-\boldsymbol{AX})\tag{6}$$

式（6）中，$\boldsymbol{W}$为加权矩阵。对式（6）进行一阶求导，并使结果等于0，即：

$$\frac{\partial Q_{\boldsymbol{W}}(\boldsymbol{X})}{\partial \boldsymbol{X}}=-2\,\boldsymbol{A}'\boldsymbol{WY}+2\boldsymbol{AWXY}\tag{7}$$

此时令其倒数等于0，即：

$$\boldsymbol{A}'\boldsymbol{WY}=\boldsymbol{AWXY}\tag{8}$$

则上述方程的解唯一，即：

$$\hat{\boldsymbol{X}}=\left(\boldsymbol{A}'\boldsymbol{WA}\right)^{-1}\boldsymbol{A}'\boldsymbol{WY}\tag{9}$$

同时对式（3）进行平方处理，即可得到定位标签在三维空间的位置坐标。

2　实验设计

本次实验过程中设计4个UWB定位模块放置在10 m×10 m密闭实验场地中，实验场地墙体均为一砖墙厚度24 cm。为测试LOS和NLOS情景下UWB定位精度，分别在LOS和NLOS场景下进行静态动态定位实验，示意图如图1所示。

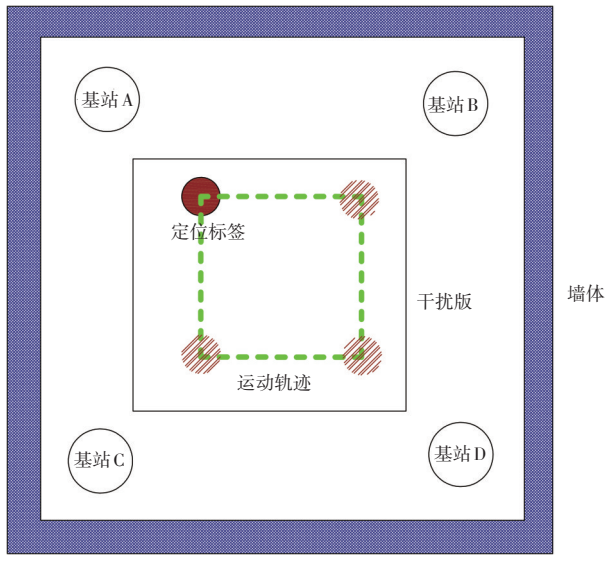


图1　NLOS情景下静态动态定位示意图

由图1清晰看出，实验在密闭室内环境中开展，4个UWB定位模块分别位于实验室4个边缘位置，将定位标签分别放置在预定矩形4个顶点上，在运动轨迹矩形外围设置干扰板，形成NLOS情景。在运动轨迹矩形4个顶点分别进行NLOS静态定位实验，将定位标签沿着矩形预定轨迹前进进行NLOS动态定位实验。

3 结果分析

在LOS情景下使用全站仪测出定位标签平面坐标(X,Y)作为参考值，对比分析加权最小二乘对UWB室内定位精度提升效果。将均方根（root mean square，RMS）值和标准差（standard deviation，STD）值作为精度评估因子进行分析。

3.1 NLOS静态定位分析

分别将定位标签在矩形4个顶点进行静态定位，分别不使用加权最小二乘算法和使用加权最小二乘算法分别进行处理，将结果与参考值进行对比分析，对其结果进行统计分析，结果如表1所示。

表1 静态定位误差统计/cm

类别	未使用加权最小二乘算法		使用加权最小二乘算法	
	RMS	STD	RMS	STD
X方向	12.5	10.7	6.3	5.8
Y方向	15.4	12.1	7.8	7.5

由表1对静态定位误差统计可知，在静态定位过程中，使用加权最小二乘算法对室内UWB静态定位精度有较明显的效果。未使用加权最小二乘算法，室内UWB静态定位误差在X方向、Y方向RMS值分别是12.5 cm、15.4 cm，STD值分别是10.7 cm、12.1 cm；使用加权最小二乘算法，室内UWB静态定位误差在X方向、Y方向RMS值分别是6.3 cm、7.8 cm，STD值分别是5.8 cm、7.5 cm。对X方向而言，使用加权最小二乘算法可使RMS值、STD值精度提升49.6%、45.8%，对Y方向而言，使用加权最小二乘算法可使RMS值、STD值精度提升49.4%、38.0%。

3.2 NLOS静态定位分析

将定位标签沿着矩形方向匀速运动，将定位标签运动过程中的位置进行定位，将数据分别不使用加权最小二乘算法和使用加权最小二乘算法分别进行处理，将结果与参考值进行对比分析，统计结果如表2所示。

表2 动态定位误差统计/cm

类别	未使用加权最小二乘算法		使用加权最小二乘算法	
	RMS	STD	RMS	STD
X方向	32.5	26.4	15.7	13.3
Y方向	35.7	28.8	16.0	13.5

由表2对动态定位误差统计可知，在动态定位过程中，使用加权最小二乘算法对室内UWB动态定位精度有较明显的效果。未使用加权最小二乘算法，室内UWB动态定位误差在X方向、Y方向RMS值分别是32.5 cm、35.7 cm，STD值分别是26.4 cm、28.8 cm；使用加权最小二乘算法，室内UWB动态定位误差在X方向、Y方向RMS值分别是15.7 cm、16.0 cm，STD值分别是13.3 cm、12.9 cm。对X方向而言，使用加权最小二乘算法可使RMS值、STD值精度提升51.7%、49.6%，对Y方向而言，使用加权最小二乘算法可使RMS值、STD值精度提升55.2%、53.1%。

4 结 语

UWB以其高精度、价格低廉的特点，在室内定位中优势明显。UWB原始数据中包含的NLOS误差严重影响UWB定位系统的精度和可靠性。本文提出一种加权最小二乘数学算法的NLOS UWB定位算法，实验结果表明，加权最小二乘算法对UWB室内静态、动态定位精度有较好提升效果。未使用加权最小二乘算法时，室内UWB静态定位X方向和Y方向精度相当，均为分米级；使用加权最小二乘算法时，室内UWB静态定位X方向和Y方向精度相当，均为厘米级。无论是否加权最小二乘算法，室内UWB动态定位X方向和Y方向精度均为分米级，使用后最小二乘算法后，X方向和Y方向精度提升约为50%左右。

参考文献

[1] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报,2010,39(1):1-6

[2] 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

[3] 邱儒琼,聂小波,王海侠. 基于WiFi的室内位置服务路径规划研究[J]. 地理空间信息,2017,15(4):31-33

[4] 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

[5] 陈锐志,陈亮. 基于智能手机的室内定位技术的发展现状和挑战[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 316-1 326

[6] 吴绍华,张钦宇,张乃通. 密集多径环境下UWB测距的NLOS误差减小方法[J]. 电子学报,2008,36(1):39-45

[7] 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

[8] 刘韬,徐爱功,隋心. 超宽带与惯性导航组合的室内导航定位[J]. 测绘科学,2016,41(12):162-166

[9] 李景文,韦晶闪,周俊芬,等. 融合UWB+PDR的室内定位方法改进[J]. 测绘通报,2022(3):36-40

[10] 贺晶晶,姜平,冯晓荣. 基于UWB的无人运输车的导航定位算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(11):1 743-1 749

[11] 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

[12] 王晓飞. 基于TOA的室内高精度三维定位技术及算法研究[D]. 西安:西北工业大学,2018