

# UWB室内定位系统的稳定性研究

刘常乐, 郭立全, 杜凯, 李智

安徽理工大学, 地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年5月6日; 录用日期: 2022年6月9日; 发布日期: 2022年6月16日

## 摘要

从移动互联到物联网, 越来越多的应用场景对室内高精度定位提出了需求。为研究UWB定位系统在室内环境对于静止目标的定位性能, 在这篇文章中通过实验的方法对室内环境中空旷和有障碍两种环境中UWB定位特征进行测试。实验结果表明UWB在室内环境中定位误差不超过0.2 m, 实验环境下误差小于10%, 能够满足亚米甚至厘米级的定位精度, 定位性能优越。

## 关键词

UWB, 室内定位, 高精度定位, TOA

# Study on the Stability of UWB Indoor Positioning System

Changle Liu, Liquan Guo, Kai Du, Zhi Li

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: May 6<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jun. 9<sup>th</sup>, 2022; published: Jun. 16<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

From mobile interconnection to the Internet of Things, more and more application scenarios require high-precision indoor positioning. To study the positioning performance of UWB positioning system for stationary targets in indoor environment, the UWB positioning characteristics in both open and obstructed indoor environments are tested experimentally in this paper. The results show that UWB positioning error is less than 0.2 m in indoor environment and less than 10% in experimental environment. UWB can meet the positioning accuracy of sub-meter or even centimeter level and has superior positioning performance.

## Keywords

UWB, Indoor Positioning, High Precision Positioning, TOA

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着科技的发展,计算机和物联网产业也飞速发展,使得自动驾驶、自动循迹、智能家居和智慧工厂等产业发展迅速,诸如以上的众多应用场景对室内定位精度的要求不断提高[1]。在目前常用的几种定位技术中,激光定位技术的精度较高,但是其使用场景有所限制,不适合民用领域的使用[2]。GPS作为室外定位常用的一种定位手段,有着不错的定位精度,但是GPS信号不能穿透建筑物,因此GPS系统不适用于室内定位[3]。在常用的室内定位技术中,WIFI定位和蓝牙定位技术通过录入无线信号的强度作为指纹信息来判断物体的位置[4],其定位精度在米级以上,难以满足高精度的定位需求。ZigBee的优点是相对于蓝牙更为简单稳定,缺点是通信信号受限于环境信道变化。因此ZigBee定位前需要对信道模型进行分析处理[5]。蜂窝网络定位利用运营商基站无线信号进行定位,信号覆盖范围大,成本低,但是抗干扰能力不足,定位误差较大。基于UWB的室内定位技术以其优越的特性,在新兴定位技术中备受关注。

UWB技术是一项始于军事领域的通信技术,在2002年,该技术被开放为民用。我国对于UWB技术的研究起步较晚,但发展较为快速。近年来,大量的高校在室内定位技术逐渐完善的技术上,将目光聚焦在UWB技术上。目前,对于超宽带室内定位技术,很多研究都是基于定位方法的研究,而定位方法又主要是以测距为基础,因此相关定位方法的研究也是以测距方法为研究方向。常见的定位方法有AOA定位方法、TOA定位方法、TDOA定位方法和基于上述方法的融合方法。

为了测试在室内环境下UWB定位技术的定位特性,本文通过实验的方法探究UWB设备在室内环境中的表现,并通过增加障碍物的方法来模拟非空旷环境,用于测试在非理想的空旷环境中UWB定位系统的室内表现。为了避免实验中其他因素的干扰,本文实验统一使用UWB定位常用的基于到达时间的TOA定位方法,以此验证室内环境中UWB定位对于静止目标的定位特性。

## 2. UWB 定位技术

超宽带(Ultra-Wide Band)技术是新兴的无线载波通信技术,其特点是不采用传统的正弦载波进行调制,而是采用纳秒级的非正弦窄脉冲传输数据,该特点使得UWB有着较宽的频谱范围[6]。理论上高频UWB信号因为具有纳秒级的时间分辨精度,可以实现亚米级甚至厘米级的定位精度[7]。其优良的高精度定位特性使得其在进入到室内定位领域之后便得到了飞速的发展。

相对于其他的室内定位技术,UWB定位有着如下的特点:

1) 定位精度高。得益于特殊的非正弦调制方式,以及优良的时间分辨率,UWB室内定位可以实现亚米级甚至厘米级的定位精度。此外,UWB的频谱资源与常规无线通信不易相互干扰,因此UWB可以实现与其他无线通信技术融合定位,而且UWB无线电波的穿透能力较强,可以在室内和地下场景进行应用[8]。

2) 有较强的多径分辨能力。常规的正弦载波通信方式为连续正弦波,其信号为连续信号,持续时间

长, 易产生多径效应。UWB 信号采用的是占空比极低的单周期脉冲, 持续时间也极其短, 因此多径信号在时间上是可分离的。

3) 功耗低。UWB 系统有着独特的脉冲信号数据发送方式, 相对于常见的正弦载波通讯, 脉冲通讯的脉冲持续时间短, 占空比低, 因此 UWB 系统可以比一般通讯系统节省功耗[9]。例如, UWB 系统的设备功率是蓝牙设备所需功率的 1/20 左右, 是传统移动电话的功率的 1/100 左右[10]。

### 3. 基于到达时间的 UWB 无线定位原理及方法

#### 3.1. 三边测量法

三边测量法是指通过测量三个或三个以上的参考定位节点与待定位节点之间的距离之后, 通过一定的算法确定待定位节点坐标的一种方法[11][12], 其原理如下图 1 所示:

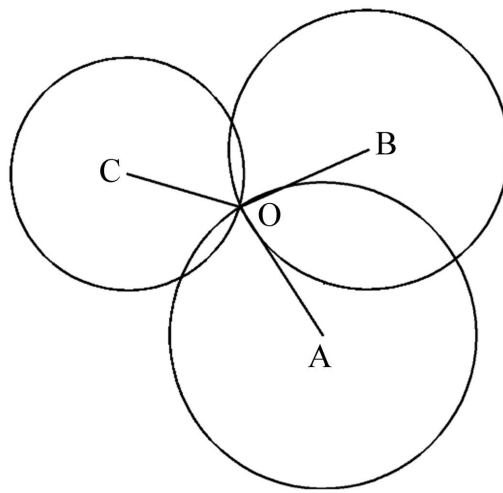


Figure 1. Schematic diagram of three-sided positioning  
图 1. 三边定位原理图

如上图所示, 三个参考节点分别为 A、B、C, 对应坐标 $(x_a, y_a)$   $(x_b, y_b)$   $(x_c, y_c)$ , 三个节点距离待定位节点 O 的距离分别为  $d_a$ ,  $d_b$ ,  $d_c$ 。分别以三个参考节点为圆心, 参考节点与待定位节点对应的距离为半径做圆, 则三个圆的交点就是待定位节点的坐标[13]。即

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_a)^2+(y-y_a)^2}=d_a \\ \sqrt{(x-x_b)^2+(y-y_b)^2}=d_b \\ \sqrt{(x-x_c)^2+(y-y_c)^2}=d_c \end{cases} \quad (1)$$

求解可得待定位节点 O 的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_a-x_c) & 2(y_a-y_c) \\ 2(x_b-x_c) & 2(y_b-y_c) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_a^2-x_c^2+y_a^2-y_c^2+d_c^2-d_a^2 \\ x_b^2-x_c^2+y_b^2-y_c^2+d_c^2-d_b^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

#### 3.2. UWB 的 TOA 定位法

TOA 飞行时间算法是根据参考节点到待定位节点的时延进行距离估计从而获得待定位节点到参考节点之间距离的一种方法。通过估算出三个或以上参考节点到待定位节点之间的距离就可以通过上述的三边测量

法来进行计算待测节点的坐标。其中 TOA 测距算法又可以分为单程测距(One Way Ranging, OWR)和双程测距(Two Way Ranging, TWR)。

#### 1) 单程测距

单程测距是指在参考节点与待测节点时钟相同的情况下, 采用计算单次信号飞行时间来估算距离的方式[14]。节点在 AB 之间进行通信, 当  $T_0$ 时刻节点 A 将包含时间标识符的信息包发送给节点 B, 节点 B 的接收时间为  $T_1$ , 则根据电磁波在空气中的传播速度为  $c = 3 \times 10^8$  m/s, 则 AB 两节点之间的距离为

$$S = c(T_1 - T_0) \quad (3)$$

#### 2) 双程测距

双程测距是在单程测距的条件不满足时, 即参考节点与待测节点的时钟不相同的情况下, 仅使用单节点的时钟, 然后利用信号在两个节点之间往返的时间差来进行距离求解的一种算法[15] [16]。在  $T_0$ 时刻, A 节点发送数据包给节点 B, 当节点 B 接收到数据包之后立即将数据包转发回 A, 节点 A 收到转发回来的数据包的时刻为  $T_1$ , 此时可以计算出节点 AB 之间的距离为

$$S = \frac{1}{2}c(T_1 - T_0) \quad (4)$$

### 3.3. UWB 的 AOA 定位法

AOA 是一种基于信号到达角度的定位算法, 其原理是定位基站安装方向一致的阵列天线, 通过天线阵列测量出待测目标节点所发出的电磁波信号的入射角度, 则待定位的目标节点就在该节点到定位基站的连接线上, 通过电磁波入射角度可以得知连接线方向, 根据两个基站的两个角度不同的连接线, 就能算出连接线的交点为目标节点的坐标位置。

假设有两个定位基站 A 和 B, 基站收到从待测节点 O 发出的信号角度  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 通过求解方程  $\tan \theta_i = \frac{x - x_i}{y - y_i}$ ,  $i = 1, 2$ 。可以计算出移动台位置 X (x, y)。

AOA 的定位精度主要取决于天线的方向性。通常定向天线好于全向天线。使用这种方法进行测量常常需要一组复杂的 4 个和 12 个天线阵列。该方法的精度随着使用的天线阵列数目的增加而增加。但是 AOA 所得到的角度测量相当敏感。在室内非视距环境中经常遇到多径传播等环境因素影响, 其定位效果往往也会受到强烈的影响。

### 3.4. UWB 的 RSSI 定位法

RSSI 是一种基于信号接收强度的定位方法, 这种方法是根据射频信号在空间传输和衰减特性进行定位, 电磁信号在空间中传输, 其信号强度大小与传输距离成反比, 因此, 只要计算接收机接收的信号场强值和已知的信道衰落模型及发射机发射信号的场强值, 就可以估算出接收机和发射机之间的距离。常见的采用 RSSI 定位的技术比如蓝牙和 WIFI 技术, 均采用了位置指纹的 RSSI 算法[17]。然而, 当电磁信号在室内环境中传播时, 其传输路径的参数并不一定十分理想, 在非视距环境, 或者非平稳环境下, 其定位表现较差, 甚至难以建立路径损耗模型。因此, 在实际应用中, 估算的距离有点不可靠。

## 4. UWB 定位实验及数据分析

为了对 UWB 通信系统的定位性能进行分析, 本文通过进行几组对比实验来验证 UWB 定位的精度和在非理想条件下的表现。

### 4.1. 实验环境布置

为了探究 UWB 系统对于室内定位的性能, 本文实验选择在室内进行, 实验场所在一个  $4 \times 3 \text{ m}$  的空旷室内进行, 定位参考基站为 4 组, 分别放置于房间的四个角落, 并与墙壁保持一定的距离。最终的基站坐标设置为  $A_1(0, 0)$ ,  $A_2(3, 0)$ ,  $A_3(0, 2.5)$ ,  $A_4(3, 2.5)$ 。实验的算法采用 TOA 飞行时间算法以及卡尔曼滤波算法均衡实验误差提高定位精度[18]。

### 4.2. 室内空旷环境下的实验及误差分析

实验首先测量了在空旷环境下的 UWB 定位系统对于待测点坐标的定位能力, 测量结果如下图 2 所示, 通过实验结果的直观展示可以看出 UWB 定位的测量值与实际值较为接近, 通过如图 3 所示的误差分析可以得知 UWB 定位系统在 x 轴和 y 轴的定位性能均比较优越, 大多数的定位误差均能保持在  $0.1 \text{ m}$  上下浮动, 情况较好时可以精确误差小于  $0.1 \text{ m}$ , 此外最大误差不超过  $0.2 \text{ m}$ , 满足亚米级定位的标准, UWB 定位系统在室内精确定位的性能优越。

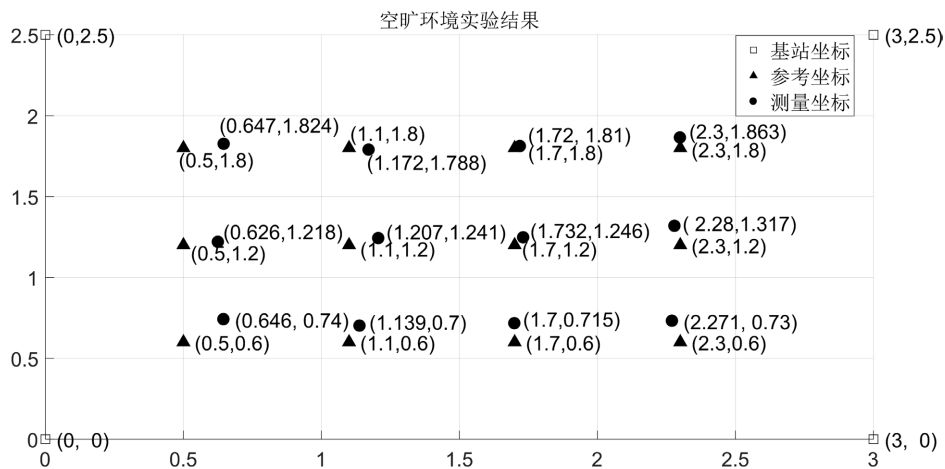


Figure 2. Experimental results in open environment

图 2. 空旷环境实验结果

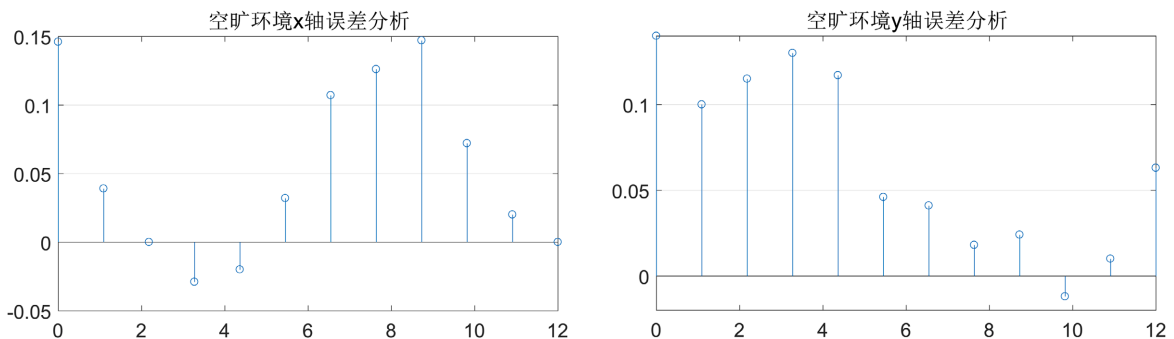


Figure 3. Analysis of experimental data in open environment

图 3. 空旷环境实验数据分析

### 4.3. 室内有障碍物情况下实验及分析

为了探究 UWB 定位系统的室内定位性能, 本文在室内空旷环境实验探究的基础上进一步进行了障碍物环境实验。障碍物环境共设置三组实验, 第一组为在定位基站  $A_1$  与定位基站  $A_2$  所成的 x 轴路径上

设置遮挡障碍物进行实验，第二组为定位基站  $A_2$  与基站  $A_4$  之间所形成的 y 轴路径上设置障碍物遮挡进行实验，第三组为在主定位基站  $A_1$  附近直接以障碍物进行遮挡，阻碍主定位基站与其他参考基站的路径进行实验。为了更好的分析实验数据获得更好的实验结果，本次障碍物实验定位数据选取了更多的参考点进行，以利于实验分析。三组实验结果如下图 4 所示，从实验结果可以直观的看出，在三种障碍实验条件下 UWB 室内定位的性能都比较好，定位结果与参考值接近，误差均在米及以下。

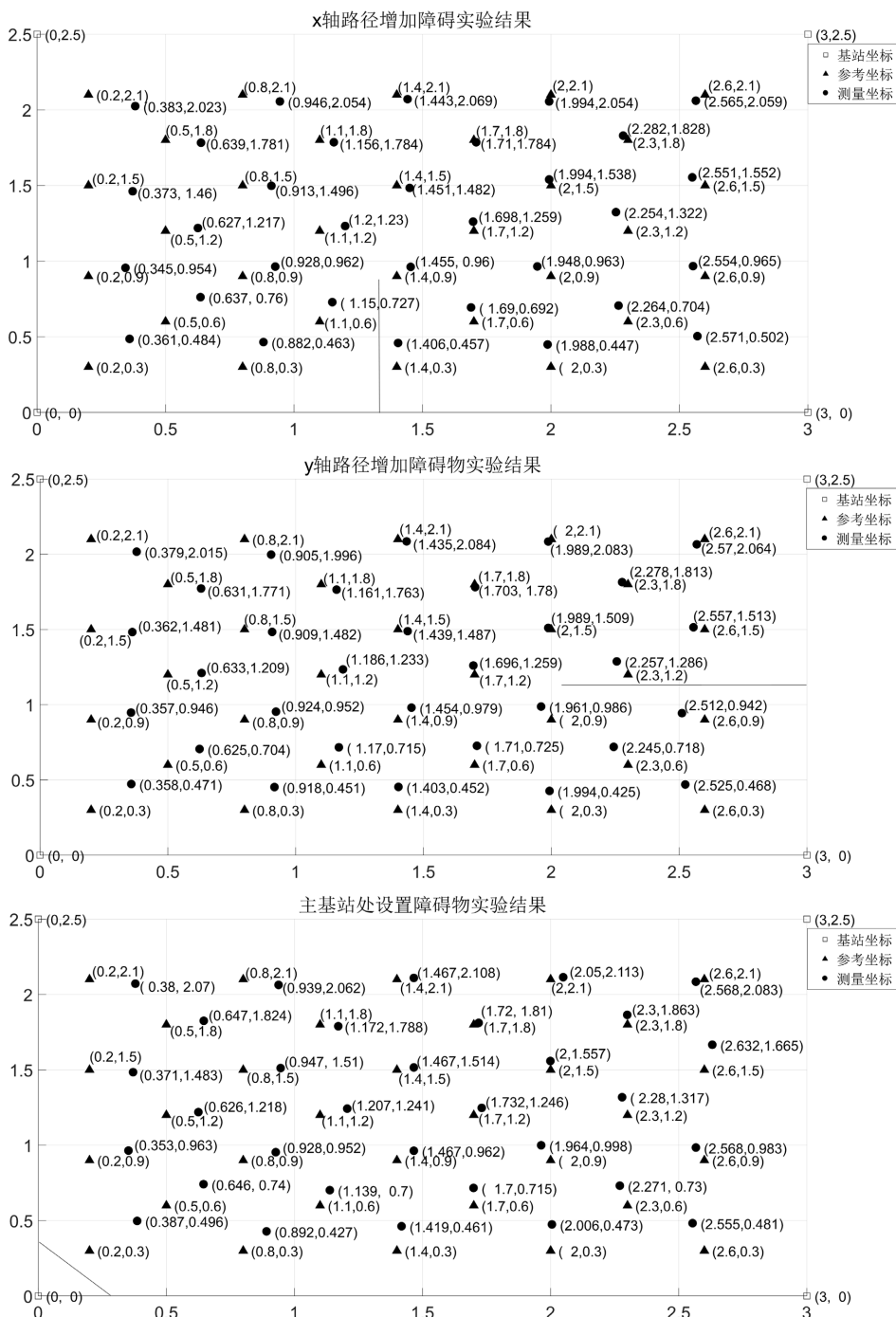


Figure 4. Experimental results in a barrier environment  
图 4. 有障碍环境下实验结果

通过对有障碍物环境下的实验数据进行分析可以获得如下图 5 所示的结果, 图中可以看到在三种障碍环境下 UWB 定位的误差仍然能保持 0.2 m 以内的定位精度, 且在大多数情况下定位的误差能达到 0.1 m 以内, 能够满足高精度定位的需求。由此可以判断即使在存在障碍的环境中, UWB 定位系统仍可以保持高精度的优越定位特性。在对比三种情况下的 x 轴误差值可以看出, x 轴的定位误差呈现一定的规律性, 猜测为当待定位的标签距离主定位基站较近时, 多径效应的干扰使得定位的精度受到影响, 但是整体的 UWB 高精度定位性能比较可靠。

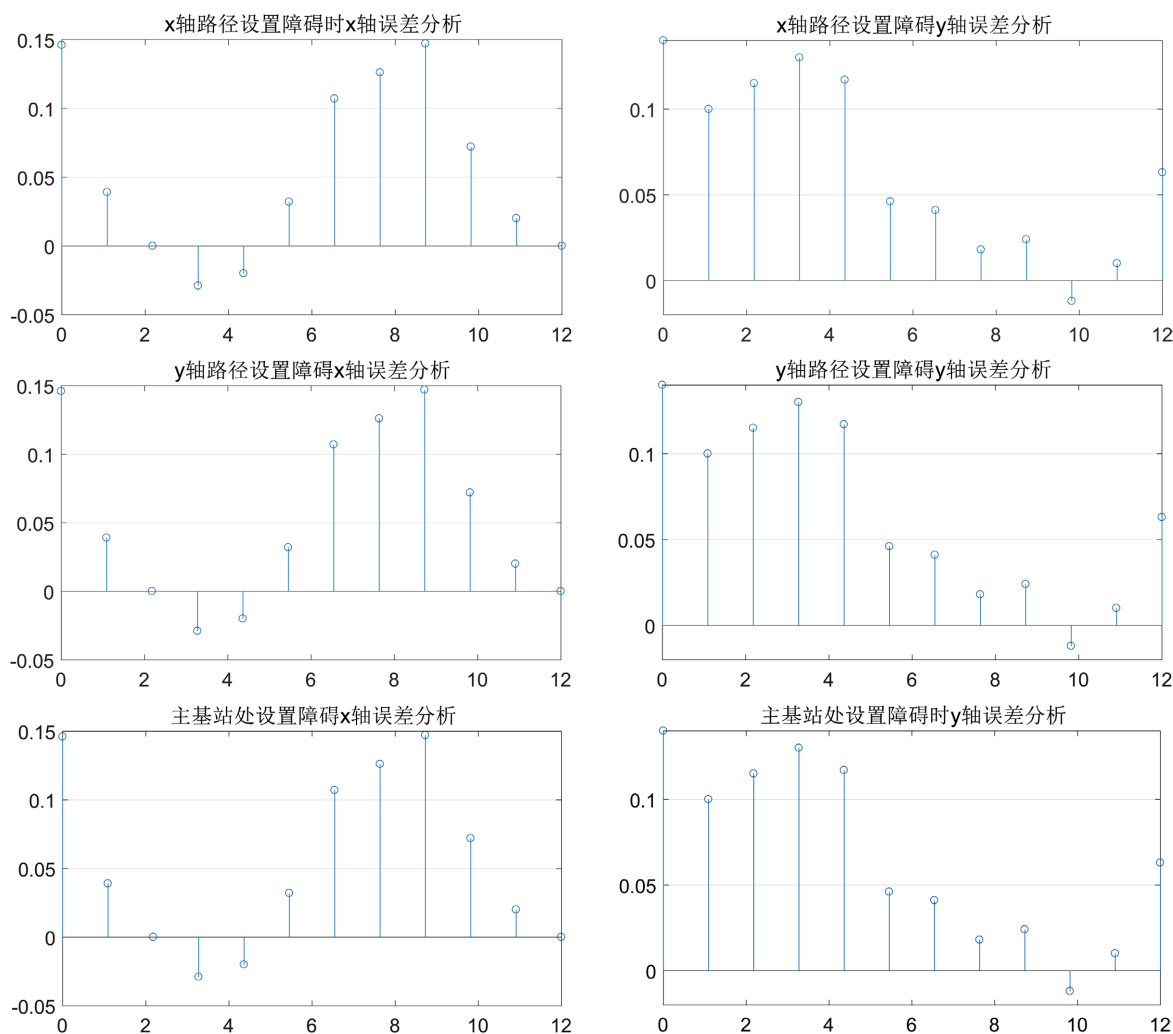


Figure 5. Analysis of experimental data in barrier environments

图 5. 有障碍环境实验数据分析

## 5. 结论

本文通过实验的方式对 UWB 室内定位的性能进行验证, 分别进行了空旷环境和有障碍环境的多组实验。通过对比几组不同环境中的实验结果可以看出 UWB 定位系统在室内的表现整体效果较为良好, 由此可以推断在有着室内高精度定位需求的智能物流、物联网等行业中, UWB 有着巨大的应用前景。

通过实验,  $4 \times 3$  米的室内环境中, 空旷环境下对于固定标签的定位结果与实际值吻合度较好。在设置障碍的情况下, 无论是在定位环境的 x 轴, y 轴, 还是对主定位基站设置障碍, 其实验结果波动不大。

实验的  $x$  轴定位误差不超过 5%， $y$  轴定位误差小于 7%，且在较为良好的条件下 UWB 定位可以做到误差 0.1 m 以内的厘米级高精度定位。另外，对于实验结果中的  $x$  轴实验数据分析，可以发现当  $x$  轴定位标签与主定位基站距离大于 1 m 的距离时，定位误差有着较为明显的改善，在实际应用过程中可以根据条件调整基站与标签的位置以获得较好的定位效果。

## 参考文献

- [1] 袁帅, 刘美妍. 浅析 UWB 定位技术的应用[J]. 电子世界, 2021(23): 180-181.
- [2] 杜鑫, 朱文亮, 文西芹, 周云鹏, 王素红. UWB 超宽带室内定位技术[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(12): 23-25.
- [3] 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.
- [4] 郝晴晴. 基于 UWB 的超高精度室内定位系统[J]. 无线互联科技, 2021, 18(16): 120-122.
- [5] 张俊, 陈伟利. 基于 ZigBee 节点技术的室内人员定位系统的研究[J]. 科学技术创新, 2021(20): 173-174.
- [6] 盛坤鹏. 室内 UWB 组网定位方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [7] 邸鹏. 基于 UWB 无线通信技术在矿井中的应用研究[J]. 数字通信世界, 2021(10): 161-162.
- [8] 方文浩. 基于 UWB 的煤矿井下高精度定位技术研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [9] 张焯, 江华. 基于 UWB 应用的功耗测量分析[J]. 长江信息通信, 2021, 34(8): 154-156.
- [10] 赵荣泳, 张浩, 林权威, 陆剑锋. WUB 定位技术及智能制造应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 270.
- [11] 赵甜甜. 基于时间的超宽带室内定位算法研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [12] 朱永龙. 基于 UWB 的室内定位算法研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2014.
- [13] 何焯. 超宽带定位技术与算法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [14] 叶庆雨. 基于超宽带的高精度室内定位系统设计[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2020.
- [15] 唐春玲. UWB 的 TOA 估计算法的研究[J]. 电子世界, 2014(9): 99.
- [16] 胡丹妮, 张洁, 李建峰, 赵洪森, 王野. 基于 UWB 技术的室内定位系统及其算法研究[J]. 丽水学院学报, 2021, 43(5): 56-61.
- [17] 丁云龙, 孙德刚, 杨善金. 基于 ZigBee 的无线传感网络的定位技术研究[J]. 信息技术与信息化, 2021(3): 187-188+191.
- [18] 任昊誉, 郭晨霞, 杨瑞峰. 卡尔曼滤波提高 UWB 测距精度研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(18): 111-115.