**分类号：TN92 密 级：公 开**

**UDC： 单位代码：10424**

**学 位 论 文**

**基于超宽带的室内定位与目标跟踪**

**※※※**

**申请学位级别：硕士学位 专业名称：电子与通信工程**

**指导教师姓名：※ ※ ※ 职 称：教 授**

**山 东 科 技 大 学**

**二零一八年四月**

**论文题目：**

**基于超宽带的室内定位与目标跟踪**

**作者姓名：※ ※ ※ 入学时间：2015年9月**

**专业名称：电子与通信工程 研究方向：电子与通信工程化技术**

**指导教师：※ ※ ※ 职 称：教 授**

**论文提交日期：2018年4月**

**论文答辩日期：2018年6月**

**授予学位日期：**

**INDOOR LOCATION AND TARGET TRACKING BASED ON ULTRA-WIDEBAND**

**A Dissertation submitted in fulfillment of the requirements of the degree of**

**MASTER OF PHILOSOPHY**

**from**

**Shandong University of Science and Technology**

**by**

**※※※**

**Supervisor: Professor ※※※**

**College of Electronic Communication and Physics**

**April 2018**

**学位论文原创性声明**

**本人呈交给山东科技大学的这篇硕士学位论文，除所列参考文献和世所公认的文献外，全部是本人攻读学位期间在导师指导下的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。**

**若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。**

**硕士生签名：**

**日 期：**

**学位论文使用授权声明**

**本人完全了解山东科技大学有关保留、使用学位论文的规定，同意本人所撰写的学位论文的使用授权按照学校的管理规定处理。**

**作为申请学位的条件之一，学校有权保留学位论文并向国家有关部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版；有权将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库发表，并可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版；允许学校档案馆和图书馆保留学位论文的纸质版和电子版，可以使用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文；为教学和科研目的，学校档案馆和图书馆可以将公开的学位论文作为资料在档案馆、图书馆等场所或在校园网上供校内师生阅读、浏览。**

**（保密的学位论文在解密后适用本授权）**

**硕士生签名： 导师签名：**

**日 期： 日 期：**

**学位论文审查认定书**

**研究生 在规定的学习年限内，按照培养方案及个人培养计划，完成了课程学习，成绩合格，修满规定学分；在我的指导下完成本学位论文，论文中的观点、数据、表述和结构为我所认同，论文撰写格式符合学校的相关规定，同意将本论文作为申请学位论文。**

**导师签名：**

**日 期：**

# 摘要

随着社会各行业的蓬勃发展和无线通信技术的显著进步，无线传感网络被应用到越来越多的方面，其在室内定位上的应用受到了越来越多的关注。因此在可用频谱资源日趋紧张的今天，找到一种更低成本、更快速度、更高精度的定位技术已迫在眉睫。超宽带技术以其极大的带宽、高传输速率、高时间分辨率、强抗多径衰落能力、低发射功率、高保密性等优势脱颖而出，逐渐成为室内环境下高精度定位的首选，被认为是未来通信的十大技术之一。

本文基于超宽带通信，对应用于超宽带的TDOA定位方法中的传统算法进行了改进。主要研究内容概括如下：

1.对超宽带信号的原理进行了介绍，研究了信号的产生；对超宽带信号最常用的实现方式冲激无线电的发射机结构及冲激无线电信号的生成进行了研究；对冲激无线电常使用的高斯脉冲波形及能量谱密度进行了仿真分析；仿真实现了超宽带信号的两种调制方法，即PPM-TH-UWB和PAM-DS-UWB；重点介绍了基于IEEE 802.15.4a标准的信道模型，分析了检测处理信号使用的相干和非相干两种手段，研究了两种手段的接收机结构。

2.主要分析研究了无线定位中几种基于测距的定位方法，即TOA定位方法、TDOA定位方法、AOA定位方法和RSSI定位方法等；研究对比了各定位方法的优劣，确定了基于TDOA的定位方法为主要研究对象，并分析了影响定位精度的因素。

3.对基于TDOA定位方法的几种传统定位算法LS算法、WLS算法、Fang算法、Taylor算法、Chan算法等进行了研究，对Fang、Taylor、Chan三种算法进行了仿真，对比了定位的精度；通过对比分析结合Chan算法和Taylor算法的优势进行了算法的联合，初步提高了定位精度；研究了移动目标的定位跟踪，介绍了卡尔曼滤波算法，并使用卡尔曼滤波算法对Fang、Taylor、Chan三种定位算法进行了改进，通过仿真对比选择了Chan算法与卡尔曼滤波的结合，提高了对移动目标定位跟踪的精度；最后使用移动机器人平台及定位套件进行了定位实验，实验验证了该改进算法的可行性，其定位精度表现良好。

**关键词：**室内定位，UWB，TDOA，定位算法，卡尔曼滤波

**ABSTRACT**

With the vigorous development of various industries in the society and the remarkable progress of wireless communication technology, wireless sensor networks have been applied to more and more aspects, and their applications in indoor [localization](javascript:;) have received more attention. Therefore, it is urgent to find a low-cost, faster-speed, and higher-precision [localization](javascript:;) technology when the available spectrum resources are becoming increasingly urgent. Ultra-wideband technology stands out for its great bandwidth, high transmission rate, high time resolution, strong resistance to multi-path fading, low transmit power, and high confidentiality, and has gradually become the first choice for high-precision [localization](javascript:;) in indoor. It is considered one of the top ten technologies for future communications.

This paper base on the UWB communication and try to improve the traditional algorithm in the TDOA [localization](javascript:;) method for UWB. The main research content is summarized as follows：

1. This paper introduce the principle of UWB signals and research the generation of signals. The most commonly used implementation of UWB signals is research on the transmitter structure of impulse radio and the generation of impulse radio signals. Gaussian pulse waveforms and energy spectral density, which are often used in impulse radio, are simulated and analyzed. The simulation implements two modulation methods for UWB signals, namely PPM-TH-UWB and PAM-DS-UWB. The channel model based on the IEEE 802.15.4a standard is mainly introduced. The coherent and non-coherent methods used for detecting and processing signals are analyzed. The receiver structure of the two methods is studied.

2. This paper mainly analyzes several [localization](javascript:;) methods based on ranging in wireless [localization](javascript:;), namely TOA [localization](javascript:;) method, TDOA [localization](javascript:;) method, AOA [localization](javascript:;) method and RSSI [localization](javascript:;) method. The research compares the advantages and disadvantages of each [localization](javascript:;) method, and determines the TDOA-based [localization](javascript:;) method as the main research object, and analyzes the factors that affect the [localization](javascript:;) accuracy.

3. Several traditional [localization](javascript:;) algorithms based on TDOA [localization](javascript:;) methods such as LS algorithm, WLS algorithm, Fang algorithm, Taylor algorithm, and Chan algorithm are studied. The three algorithms of Fang, Taylor and Chan were simulated and the accuracy of [localization](javascript:;) was compared. By combining the advantages of the Chan algorithm and the Taylor algorithm, they were combined to improve the [localization](javascript:;) accuracy. The location tracking of moving target is studied. Kalman filtering algorithm is introduced. Kalman filtering algorithm is used to improve the three localization algorithms of Fang, Taylor and Chan. The combination of Chan algorithm and Kalman filter is selected through simulation and comparison. The algorithm improves the accuracy of [localization](javascript:;) and tracking of moving targets. Finally, the mobile robot platform and [localization](javascript:;) kit were used to carry out the [localization](javascript:;) experiment. The experiment verified the feasibility of the improved algorithm, and its [localization](javascript:;) accuracy performed well.

**Key words**: indoor localization，UWB，TDOA，location algorithm，kalman filter

# 目录

[摘要 I](#_Toc512021982)

[目录 IV](#_Toc512021983)

[1 绪论 1](#_Toc512021984)

[1.1 课题研究背景及意义 1](#_Toc512021985)

[1.2 常见室内定位技术比较 1](#_Toc512021986)

[1.3 国内外研究现状 4](#_Toc512021987)

[1.4 实验应用平台 6](#_Toc512021988)

[1.5 论文的主要研究内容及结构 6](#_Toc512021989)

[2 超宽带无线技术 8](#_Toc512021990)

[2.1 超宽带技术介绍 8](#_Toc512021991)

[2.2 UWB技术优势 10](#_Toc512021992)

[2.3 超宽带信号的实现 11](#_Toc512021993)

[2.4 超宽带信道模型 19](#_Toc512021994)

[2.5 UWB的接收方式 21](#_Toc512021995)

[2.6 本章小结 24](#_Toc512021996)

[3 无线定位技术 25](#_Toc512021997)

[3.1 无线定位方法的分类 25](#_Toc512021998)

[3.2 基于测距的定位方法 25](#_Toc512021999)

[3.3 基于非测距的定位方法 34](#_Toc512022000)

[3.4 影响定位精度的主要因素 35](#_Toc512022001)

[3.5 本章小结 37](#_Toc512022002)

[4 定位算法分析及优化 38](#_Toc512022003)

[4.1 基于TDOA定位算法的研究 38](#_Toc512022004)

[4.2 经典定位算法 38](#_Toc512022005)

[4.3 定位性能指标 45](#_Toc512022006)

[4.4 经典定位算法仿真对比 46](#_Toc512022007)

[4.5 Chan和Taylor联合定位算法 50](#_Toc512022008)

[4.6 Chan和Taylor联合定位仿真分析 51](#_Toc512022009)

[4.7 UWB移动定位算法 52](#_Toc512022010)

[4.8 室内定位实验 61](#_Toc512022011)

[4.9 本章小结 64](#_Toc512022012)

[5 总结与展望 66](#_Toc512022013)

[5.1 总结 66](#_Toc512022014)

[5.2 对未来研究工作的展望 66](#_Toc512022015)

[参考文献 67](#_Toc512022016)

[致谢 71](#_Toc512022017)

[攻读硕士期间主要研究成果 72](#_Toc512022018)

**Contents**

[1 Introduction 1](#_Toc512021984)

[1.1 Project research background and significance 1](#_Toc512021985)

[1.2 Common indoor [localization](javascript:;) technology comparison 1](#_Toc512021986)

[1.3 Research status at home and abroad 4](#_Toc512021987)

[1.4 Experimental application platform 6](#_Toc512021988)

[1.5 The main research content and structure of the thesis 6](#_Toc512021989)

[2 Ultra-wideband wireless technology 8](#_Toc512021990)

[2.1 Ultra-wideband technology introduction 8](#_Toc512021991)

[2.2 UWB technology advantages 10](#_Toc512021992)

[2.3 Ultra-wideband signal implementation 11](#_Toc512021993)

[2.4 Ultra-wideband channel model 19](#_Toc512021994)

[2.5 UWB reception method 21](#_Toc512021995)

[2.6 Chapter summary 24](#_Toc512021996)

[3 Wireless [localization](javascript:;) technology 25](#_Toc512021997)

[3.1 Classification of wireless [localization](javascript:;) methods 25](#_Toc512021998)

[3.2 Ranging-based [localization](javascript:;) method 25](#_Toc512021999)

[3.3 Non-ranging based [localization](javascript:;) method 34](#_Toc512022000)

[3.4 The main factors affecting the [localization](javascript:;) accuracy 35](#_Toc512022001)

[3.5 Chapter summary 37](#_Toc512022002)

[4 [Localization](javascript:;) algorithm analysis and optimization 38](#_Toc512022003)

[4.1 Research on Location Algorithm Based on TDOA 38](#_Toc512022004)

[4.2 Classical [localization](javascript:;) algorithm 38](#_Toc512022005)

[4.3 [Localization](javascript:;) performance indicators 45](#_Toc512022006)

[4.4 Classical [localization](javascript:;) algorithm simulation contrast 46](#_Toc512022007)

[4.5 Chan and Taylor joint [localization](javascript:;) algorithm 50](#_Toc512022008)

[4.6 Chan and Taylor joint [localization](javascript:;) simulation analysis 51](#_Toc512022009)

[4.7 UWB mobile [localization](javascript:;) algorithm 52](#_Toc512022010)

[4.8 Indoor [localization](javascript:;) experiment 61](#_Toc512022011)

[4.9 Chapter summary 64](#_Toc512022012)

[5 Summary and outlook 66](#_Toc512022013)

[5.1 Summary 66](#_Toc512022014)

[5.2 Prospects for future research work 66](#_Toc512022015)

[References 67](#_Toc512022016)

[Acknowledgements 71](#_Toc512022017)

[Main work achievements during postgraduates 72](#_Toc512022018)

# 1 绪论

## 1.1 课题研究背景及意义

近些年来，无线通信技术、无线局域网和无线传感器迅猛发展，智能手机、物联网和移动互联迅速进入到人们的生活，人们对室内外位置信息需求的增长又带动了无线定位技术产品在各领域应用与发展。在室外场景下，GPS全球定位系统的应用已经较为成熟，在常见的车辆导航，手机定位等方面都集成了GPS技术，给人们的出行和贵重的物品找回带来了极大的方便。但是GPS技术由于其无线电波无法穿透房屋、墙壁等障碍物，且安装有GPS服务的设备能耗较高，因此并不适用于室内环境下人员物品的定位。然而随着经济的快速发展，室内已经成为大多数人的主要生活办公场所，根据资料显示室内已经成为一半以上的网络接入和电话业务的发生场所[1]。

在此发展趋势下，室内的短距离定位服务越来越受到人们的关注，例如在大型商场、医院、停车场或者搜救抢险环境下人员、物品的定位，都需要定位技术的参与发挥。但是室内环境相对比较复杂，各种障碍物较多，这使得定位设备在通信时难免会受到影响，从而造成定位精度的下降，目前室内定位技术有：红外线、超声波、射频识别、蓝牙、Wifi、ZigBee和UWB超宽带。面对人们对于室内定位技术日益增长的需要和对定位性能不断的追求，如何开发出更精确的室内定位系统已经成为了现今热门的研究课题[2]。随着技术的日趋完善，室内定位必将更好的服务室内人们的办公与生活。

## 1.2 常见室内定位技术比较

（1）红外线室内定位

红外线定位技术的原理[3]是目标节点上的IR标志发射调频后的红外线，通过室内的光学传感器捕获该信号，从而完成定位的。红外线室内定位技术定位精度较高，也较为成熟，但是当目标节点受到障碍物遮挡时红外线无法穿透，无法完成定位，使得其只能被用于可视距的环境中。而且红外线的传输距离较短，在室内完成定位工作需要布设大量的接收设备，增加了系统的复杂性与成本，同时效果一般，因此较少使用在室内环境的定位中。

（2）超声波室内定位

超声波室内定位是利用声波的反射来进行测距，再通过定位算法，就可以得到目标节点的位置信息。即目标节点上的发射器向指定方向发射经过调制的超声波，应答器接收该超声波后，会向发射器回传一个超声波，利用发射和接收的时间，通过声波的传播速度，即可得到发射器与各应答器间的距离[3]。

超声波室内定位具有穿透性能较好，抗干扰能力强的特点，适合较为简单的结构和厘米级定位精度。但是超声波在空气中传播的时候的衰减较大，同时容易受到非视距因素和多径效应影响，并不适用于较大空间的室内环境。

（3）射频识别(RFID)室内定位

RFID定位使用射频识别技术进行接触式或非接触式的双向通信，通过数据的交换来完成识别和定位[4]。定位工作的原理是，当目标标签进入定位设备发射的电磁场中移动时会产生感应电流，定位设备通过对电流等信息的分析处理，实现对目标标签的识别与定位，RFID定位系统示意图如图1.1所示。



图1.1 RFID定位系统示意图

Fig.1.1 RFID [localization](javascript:;) system schematic

射频识别的定位技术的优势是识别速度快、受非视距因素影响小、定位精准，且体积较小，使用成本较低。但其传输距离较短、不具相互通信的能力，因此较难的整合到其他的定位系统中，其在隐私安全保障和国际标准化方面都还有很多需要改进的地方。

（4）蓝牙室内定位

蓝牙定位技术是先对基站接收到信号的强度进行测量，通过功率衰减和距离的关系公式得到距离基站的距离，从而实现对目标节点的定位。蓝牙室内定位具有低功耗的特点，由于模块占用空间小，易于集成于其他系统中。但在复杂室内环境中，蓝牙定位的稳定性较差，容易受到噪声干扰，定位精度不高[5]。

（5）Wi-Fi室内定位

Wi-Fi定位技术一般是对移动目标设备在无线网络中的信号强度进行测量，通过信号衰减模型将此信息转化为距离信息来对目标设备进行定位[6]。也可以通过先记录下局域网内己知位置处的信号强度，将测得的目标设备的信号强度与之比对，从而确定目标设备位置的方式[7]。

在实际应用中Wi-Fi常用来实现复杂的大范围的定位和跟踪，例如公园、厂房、大型商场等环境，总体定位精度较高。但在复杂的室内环境下，Wi-Fi定位技术的精度一般在2m-20m左右。

（6）ZigBee室内定位

ZigBee是一种低传输速率、低功耗、高传输容量的短距无线通信协议[8]。通过网络中大量传感器的相互通信从而实现其定位 [7]。相对蓝牙协议其更为简单稳定，但是信号的传输很容易受到环境信道的影响，且信号源的密度、实际环境和算法等因素还有严重影响定位的精度。

（7）UWB室内定位

超宽带技术是近几年发展的一种新兴的无线电技术，通过节点间的纳秒和纳秒级以下的极窄脉冲来实现数据的传递。超宽带定位技术需要先将位置己知的基站部署在环境中，通过目标节点与基站间信号的传递来实现距离的测量，再使用三边定位等算法得到目标节点的位置[9]。由于UWB系统具有功耗低、时间分辨力强、对障碍物有较好穿透能力和安全性好等优势，其室内定位上的应用将具有相当广阔的发展前景[10]。本文对室内定位技术的研究便是基于超宽带信号。

表1.1 各类室内定位技术对比

Tab1.1 Comparison of various indoor [localization](javascript:;) technologies

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 定位技术 | 精度 | 优点 | 缺点 |
| 红外线 | 10cm-1dm | 精度较高，较为成熟 | 仅适用于可视距环境，传输距离短，成本高 |
| 超声波 | 10cm | 精度较高、结构简单 | 受非视距影响大、成本高 |
| 射频识别 | 可变 | 体积小、功耗低、成本低 | 作用距离短，整合性差 |

表1.1 （续）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 定位技术 | 精度 | 优点 | 缺点 |
| 蓝牙 | 1m | 体积小、易集成 | 工作范围小、易受干扰、稳定性差 |
| Wifi | 1m-2m | 易安装、成本低 | 抗干扰差、功耗较高 |
| ZigBee | 3m-5m | 功耗低、成本低 | 定位精度较低 |
| UWB | 10cm | 穿透力强、功耗低、精度高、抗干扰强 | 易受遮挡物、金属影响，成本高 |

## 1.3 国内外研究现状

随着科学技术的发展和社会的进步，人们对位置服务（Location Based Service，LBS）的需求与日俱增，无线定位技术的普及也逐渐地改变着人们的生活。全球定位系统GPS、北斗卫星定位系统BDS，以及移动通信网络和WIFI等的位置服务得到了越来越多的应用，而室内定位技术的研究和发展在上世纪末才开始。

应用于人员的定位服务技术较多，常见的有：蓝牙、GPS、射频识别, Wi-Fi等技术，随着UWB技术使用的开放，越来越多的科研工作者投入到基于UWB技术的室内定位系统的研究与开发上来。

UWB技术早在20世纪60年代就开始被美军应用在雷达等设备上。美国联邦通信委员会（Federal Communication Commission，FCC）在2002年2月开放超宽带技术，让其可以用于民用通信，并授权3.1-10.6GHz的频带免费使用[11]。在此以后，越来越多的公司和科研机构开始了对UWB的研究和基于UWB系统的开发。现如今，随着室内定位研究的火热，在室内定位领域有了越来越多的成果，越来越多的技术被应用于室内定位中来，例如红外线定位、蓝牙定位、WiFi定位、射频识别定位以及超声波定位等技术。然而，由于这些定位技术本身的局限性和实施的难度，现如今并没有得到大规模的应用。超宽带定位技术则不同，其实时性好，在密集多径的情况下，传输也较为可靠，并拥有处理次纳秒级时延的分辨率，定位精度能够达到厘米级[5]。由于超宽带技术优良的特性，现已成为了室内高精度定位系统的首选。

我国是最近十年才开始关注超宽带通信的发展。由于UWB技术近年来越来越受到研究者的追捧，国家的相关部门也开始给予了很大程度的重视和政策倾斜。同时越来越多的科研机构和高校也投入到了UWB技术的研究应用中，东南大学、清华大学和中国科技大学等高校参与了2001年“863”计划中的高速UWB实验演示系统研发项目，并根据各自提出方案分别进行研发。哈尔滨工业大学、北京邮电大学等学校也都在国家自然科学基金的支持下开展了超宽带技术的研究。2015年“超宽带接入产业联盟”在中兴、华为等全国22家公司和科研机构的联合下成立了，联盟一经成立便迅速推动了国内超宽带技术的发展。

如今，UWB无线定位技术己经在方方面面都取得了长足的进步并获得了重要成果。在国外，基于UWB无线定位技术的产品有来自英国的Ubisense公司的UWB实时定位系统、美国Zebra公司的DART UWB实时定位系统等，在国内，海尔集团、环旭电子集团等公司研发的基于UWB技术的产品也取得了较大的领先，同时与飞思卡尔半导体有限公司一起推出的应用了UWB技术的高清电视机等数字化多媒体产品也广受好评。来自清华产学研项目的清研讯科的LocalSense定位系统，北京全迹科技有限公司的高精度室内定位系统等，在视距环境下都有很好的表现。这些发展成果标志着中国的高新技术型企业和科研实力较强的高等院校已经在超宽带技术的研究和应用上走在了世界前列。如图1.2所示为清研讯科LocalSense的定位系统原理。

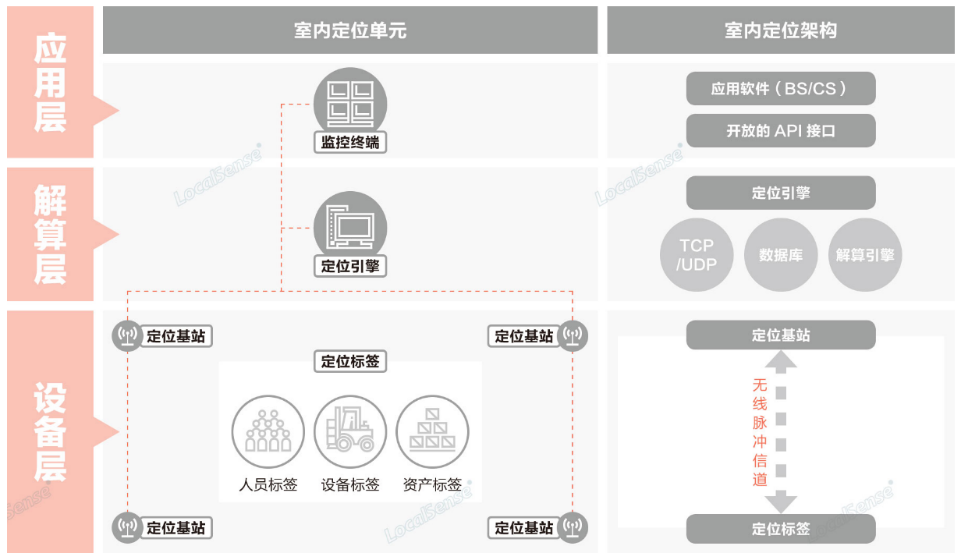


图1.2 LocalSense定位系统原理图

Fig1.2 LocalSense [localization](javascript:;) system schematic

总结一下，目前国内外对于UWB的室内定位技术的研究更多的还是基础理论的研究、鲜有实用的工程实现，并且普及不够。其中，室内环境下的目标定位与跟踪是主要的研究热点。

## 1.4 实验应用平台

本文对于基于超宽带的室内定位技术的研究将应用于Turtlebot3移动机器人平台，Turtlebot3移动机器人平台是韩国ROBOTIS公司开发的一款开放式移动机器人平台，基于ROS开源系统，分为Burger和Waffle两种。TurtleBot3较上一代提升了硬件水准，其拥有Raspberry Pi 3 Model B和Intel® Joule™单板计算机，Intel® Realsense™ R200相机，Dynamixel X系列舵机等先进设备，在保证平台性能和质量的前提下，降低了平台的成本和尺寸，适合对移动机器人在定位与导航方面进行研究与实验。由于TurtleBot3采用模块化的结构方式，因此可以进行多种定制化方案，可选配各种机器人配件，如机器人底座、计算机和传感器等。

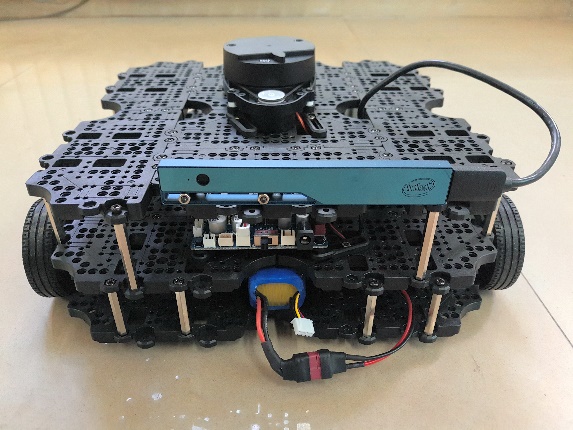
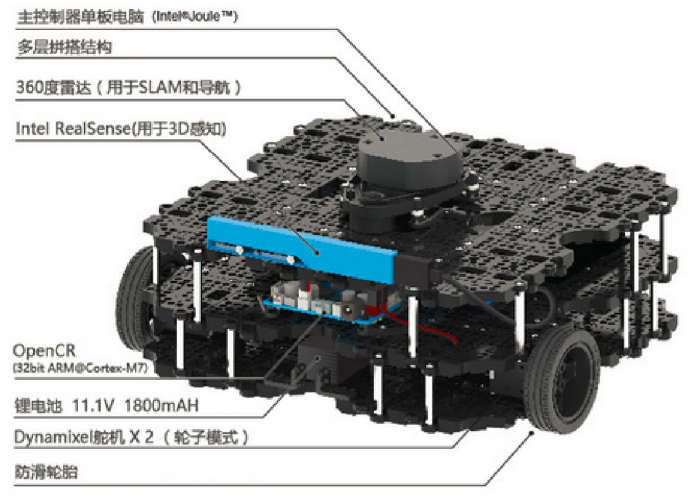


图1.3 TurtleBot3移动机器人平台

Fig1.3 TurtleBot3 mobile robot platform

TurtleBot3可应用于高校科研院校在移动机器人方面的研究与教学，也同样适合机器人爱好者的使用和机器人公司产品的研发实验。TurtleBot3是多个机器人公司参与合作的产品，如Open Robotics，ROBOTIS以及其它的合作伙伴，Intel、 Onshape和OROCA等。

## 1.5 论文的主要研究内容及结构

本文以超宽带通信为基础，分析了传统的定位方法，并重点对基于TDOA的定位算法进行了分析对比，并结合算法的特点予以了改进，同时还对移动目标的跟踪定位进行了分析改进，提高了定位的精度。论文内容结构安排如下：

第一章为绪论。首先对常见的定位技术进行了对比，接着介绍了UWB技术的国内外发展现状，最后说明本论文的主要研究内容及结构安排。

第二章对超宽带技术的原理和优势进行了分析，介绍和仿真了超宽带信号的实现，接着结合信道模型对超宽带通信系统中的信号发射和接收方式进行分析，为下文做出铺垫。

第三章的主要内容是对常用的无线定位方法进行介绍对比。首先从原理上按照是否需要测距对几种传统的定位方法进行了分类，分析比对了几种方法的优缺点，最后介绍影响定位精度的因素。

第四章对基于TDOA定位方法的几种经典的算法进行了分析，介绍了几种定位性能指标，对算法进行了仿真对比，结合算法的优势提出了Chan和Taylor的联合算法，并验证了联合定位算法在定位上的优势。对于移动目标的定位跟踪，介绍了卡尔曼滤波器，使用卡尔曼滤波进行了简单的目标跟踪，并运用卡尔曼滤波器对传统算法进行改进，经过仿真分析，确定了Chan-Kalman算法在移动目标跟踪定位上的优势。最后对改进算法进行了实验，验证了其可行性及精度。

第五章对本文的工作进行了总结，并对该课题的后续研究方向进行了展望。

# 2 超宽带无线技术

## 2.1 超宽带技术介绍

超宽带技术是一种用纳秒至微秒级的非正弦波窄脉冲传输数据的无载波通信技术[12]。2002年4月美国联邦通信委员会发布了UWB无线设备规范，并重新定义了超宽带信号[13]。修改UWB信号绝对带宽为功率衰减10dB处的上、下限频率，并将信号相对带宽的下限修改为20%。按照新的定义，超宽带信号是指-10dB相对带宽大于0.2或者-10dB带宽B大于500MHz的信号，其中和B的定义为：

式（1.1）

式（1.2）

其中，、分别表示功率较峰值功率衰减10dB时所对应的上限频率和下限频率，时间分辨率与信号带宽的关系表示为：

式（1.3）

距离分辨率与带宽的关系即为：

式（1.4）

其中，c为光速，如图2.1所示。



图2.1 超宽带信号示意图

Fig2.1 Ultra wideband signal schematic

FCC规定了3.1-10.6GHz为超宽带系统的工作频段，同时对超宽带的辐射功率进行了限定[14]，各类定位技术频谱对比图如图2.2所示。其等效各向同行辐射功率（Equivalent Isotropic Radiated Power, EIRP）不得超过-41.3dBm/MHz，如图2.3所示。

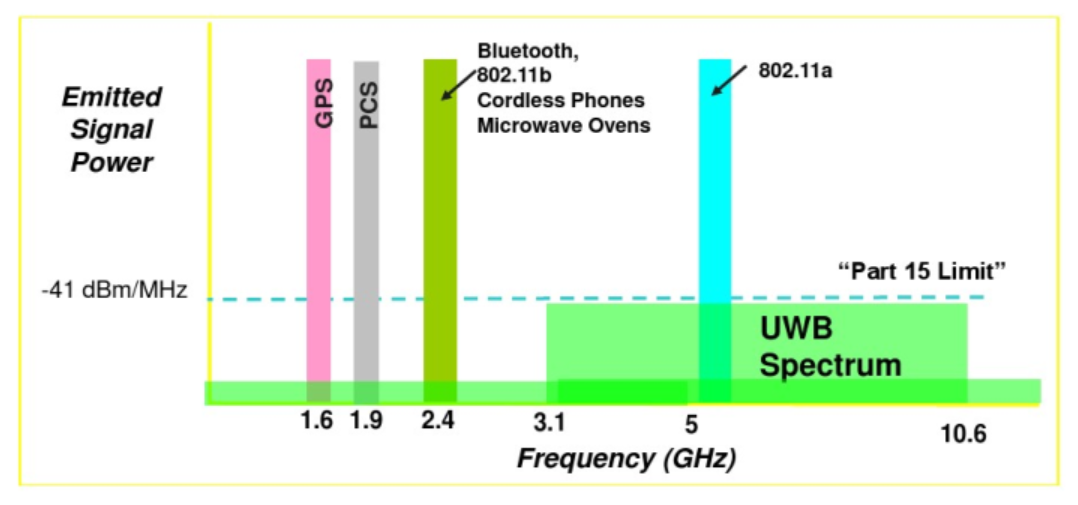


图2.2 各类定位技术频谱对比

Fig2.2 Comparison of various [localization](javascript:;) technology spectrum

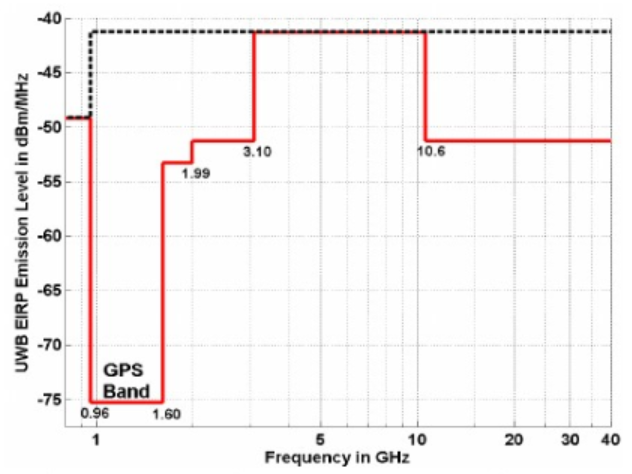


图2.3 室内环境下UWB发射功率的限制

Fig2.3 The limitation of UWB emission power in indoor environment

根据超宽带的定义，可以用多种方式产生UWB信号，例如冲激无线电（IR-UWB），多载波码分多址（MA-CDMA），多频带正交频分复用（MB-OFDM）等。其中冲激无线电（IR-UWB）通过采用纳秒或者亚纳秒级的极窄脉冲传递信息，具有GHz量级的带宽、极高时间分辨率和极强抗多径能力。同时由于信号并不需要经过载波调制进行射频变换，脉冲成型后可以直接发射出去，因此对设备的要求较低，目前最常用的超宽带实现方式即为冲激无线电。本文涉及的超宽带信号均是由IR-UWB方法产生。

## 2.2 UWB技术优势

UWB系统是通过发送频谱从直流到吉赫兹的短脉冲序列得到的[15]，信号的宽频带可以覆盖到大部分的频段。

基于UWB的室内定位系统有如下优势：

（1）隐蔽性好、保密性强

超宽带无线电的射频带宽可达1GHz以上，且低发射功率带来了低发射功率谱密度[16]，因此信号中的信息可以完全隐藏于环境的噪声中。因此，超宽带信号很难被普通的频谱搜索设备捕获到，有较高的安全性和较强的保密性。

（2）多径分辨能力强

传统的无线定位系统发射的信号多为连续的，多径传播效应为定位带来了误差，而超宽带系统发射的是持续时间极短的单周期极窄脉冲，信号的多径分量在时间上互不重叠，有很高的时间分辨率，因此通过检测到直射分量准确的传播时间可以获得精确的距离测量值。

（3）穿透能力强

超宽带信号频谱中含有低频的长波，使得超宽带信号的穿透能力很强，能够穿透室内环境中的各种障碍物[17]。因此，可以用于室内和地下等环境的目标定位，有很高的定位精度。

（4）低功耗、低成本

UWB系统不需要传统收发器上的变频器、功率放大器和混频器等设备，更容易实现全数字化的结构。由于FCC规定UWB信号的等效各向同行辐射功率（EIRP）必须小于-41.3dBm/MHz，因此，UWB系统的电磁辐射水平和发射功率很低，加上简单的收发设备，使得UWB系统很容易由电池供电使用。

（5）传输速率高，抗干扰性强

由香农公式可以看出，信号的带宽越大其传输速率越高，因此超宽带信号的传输速率可达几个Gbps。同时高带宽可以有效降低信噪比，使得UWB系统还具有很强的抗干扰性。

综上所述，UWB兼具通信和定位上的双重优势。因此在室内场景的应用有着广阔的前景。

## 2.3 超宽带信号的实现

在实际应用中，UWB信号的实现可以采用冲激无线电（IR，Impulse Radio） [17,19]和多频带（Multi-Band）的方式[20]。冲激无线电是最常使用的实现方式，根据超宽带脉冲信号标准中对频谱范围和功率的要求得到多频带的实现方式。

### 2.3.1 冲激无线电

冲激无线电[21]是UWB通信最常用的实现方式，利用脉冲宽度可达纳秒甚至亚纳秒级，占空比极低脉冲来携带并传递信息。常选择方波和高斯脉冲等方式作为载波传输信号。由于高斯脉冲与正弦脉冲相似，且直流成分微弱，因此利于窄脉冲传播，同时相干算法还更易识别出信号中的有用信息。其发射机[22]基本结构如图2.4所示。



图2.4 冲激无线电发射机结构

Fig2.4 The basic structure of the IR-UWB signal transmitter

图2.4中，信源经过信道编码减弱了传输环境中其他因素的影响，增强了在信道中的可靠性。接着使用极窄波形处理，再对信号进行射频变换附加增益即可通过天线进行发送。

图2.5所示为传统通信系统发射机基本结构[23]，可以看到超宽带系统不需要传统通信体制内的载波，不需要对信号进行低、高频的变换。原因是超宽带改变的是基带参数，其频谱已经在在射频频段，无需经过载波调制就可以直接发射。



图2.5 传统通信系统发射机结构

Fig2.5 The basic structure of the traditional communication system transmitter

通过对发射脉冲相关参数的调制来传递信息，通常有脉冲相位调制（PPM， Pulse Position Modulation）、脉冲幅度调制（PAM，Pulse Amplitude Modulation）、二进制相移键控（BPSK，Binary Phase Shift Keying）等调制方式。

为了克服不同用户在同一系统内的互相干扰，常用跳时码进行伪随机调制，使得脉冲在时间轴上发生偏移，即通过给不同用户分配不同的码元来完成区分，这种方法便是跳时超宽带（TH-UWB，Time-Hopping UWB）。若通过改变幅值大小来完成信息的传递，则为直接序列超宽带（DS-UWB，Direct-Sequence UWB）。下面模拟超宽带信号的生成。

### 2.3.2 冲激无线电信号的生成

常采用正弦波的窄脉冲、升余弦脉冲信号、高斯脉冲或者是它的各阶导数[24]等来表示窄脉冲信号。最常用的波形为高斯脉冲，其表达式为：

式（2.1）

其中均值为零()，方差为。令，为高斯脉冲的宽度，则高斯脉冲(Gaussian)的表达式写为：

式（2.2）

使用Matlab对超宽带信号进行仿真，在时域画出脉冲波形，在频域画出能量谱密度ESD，如图2.6所示。



图2.6 高斯脉冲波形及能量谱密度

Fig2.6 Gaussian pulse waveform and energy spectral density

由于，因此越大，越大，高斯波形越宽。



图2.7 高斯脉冲波形及能量谱密度

Fig2.7 Gaussian pulse waveform and energy spectral density

从仿真出的一系列宽度不同的高斯脉冲的波形和ESD，可以看出随着的增加，脉冲宽度变宽，频带变窄。脉冲类型的不同会影响能量谱密度ESD的大小。峰值频率可以表示为：

式（2.3）

其中，表示高斯脉冲的峰值频率，k是高斯脉冲的阶数，是高斯脉冲的宽度。实际应用中，由于高斯函数脉冲频谱中有直流分量，常采用高斯各阶导函数。由于式（2.2）中的幅度大小与t无关，将其归1留负得：

式（2.4）

其一阶导数表达式为：

式（2.5）

二阶导数表达式为：

式（2.6）

三阶导数表达式为：

式（2.7）

对前15阶高斯脉冲的波形进行仿真，结果如图2.8所示。



图2.8 前15阶高斯脉冲波形

Fig2.8 The first 15th order gaussian pulse waveform

对1-15阶高斯脉冲的能量谱密度（ESD）和峰值频率进行仿真：



图2.9 1-15阶高斯脉冲能量谱密度

Fig2.9 1-15 order Gaussian pulse energy spectral density



图2.10 1-15阶高斯脉冲ESD峰值频率

Fig2.10 1-15 order Gaussian pulse ESD peak frequency

对图2.9进行分析，可以看到能量谱密度随高斯脉冲阶数的升高而向高频方向移动，即高斯脉冲信号能量可以通过微分搬移到更高频区域。

从图2.10可以看到，峰值频率随高斯导函数阶数的升高而变高。在同阶的高斯脉冲中，峰值频率随着的增大而降低，当达到一定值时峰值频率变化趋于平缓。接着通过上面介绍的超宽带信号最常用的两种调制过程来研究如何具体实现。

（1）PPM-TH-UWB

对信号进行脉冲相位调制，并用二进制跳时码作为伪随机序列的多址方式，则2PPM-TH-UWB信号的发射方案如图2.11所示。



图2.11 PPM-TH-UWB信号生成

Fig2.11 PPM-TH-UWB signal generation scheme

将要发射的脉冲序列表示为，其传播速率为，首先进行信道编码，信息的每一位数值都重复次，产生一个新的序列a，其速率为。然后通过发送编码器，二进制序列应用伪随机整数序列，可产生一个新的实数值序列，它的每个元素，其中和是常数，且满足的条件。接着将信号输入PPM调制模块，可产生速率为(脉冲/s)的序列。脉冲的相位在上偏移了，则发射时间可表示为。最后将信号通过脉冲形成器，其冲激响应为p(t)，经过完整调制过程后输出的信号s(t)[25]:

式（2.8）

经过调制编码，产生了所需的脉冲序列。将其调制成为二阶高斯脉冲的波形，设置仿真信号参数如下，仿真模拟整个过程：

表2.1 PPM-TH-UWB仿真参数

Table2.1 The parameter settings of PPM-TH-UWB simulation

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 二进制比特数 | 采样频率fc(GHZ) | 每个symbol的脉冲数量Ns | Chip宽度Tc(ns) | 脉冲宽度Tm(ns) | 脉冲波形因子tau(ns) | 跳时码码元最大值Nh | TH-PR的循环周期Np | PPM时移dPPM(ns) |
| 2 | 50 | 5 | 1 | 0.5 | 0.25 | 3 | 5 | 0.5 |

得到的信号为：



图2.12 PPM-TH-UWB信号波形

Fig2.12 PPM-TH-UWB signal waveform

如图2.12所示调制后脉冲的相位发生了偏移，生成的跳时码TH为[0 1 2 2 0]。

（2）PAM-DS-UWB

使用直接序列扩谱（DS）来进行信号的调制，则直接序列UWB信号生成的具体过程如图2.13所示。



图2.13 PAM-DS-UWB信号生成

Fig2.13 PAM-DS-UWB signal generation scheme

待发射的二进制脉冲序列为，其传播速率为。首先将脉冲进行信道编码，通过信息的每一位数值都重复次得到一个新的序列，其信号速率为，然后将其转换为只有正值和负值量的序列，其中每个元素。发射编码中，将一个周期为元素均为的二进制序列c，与序列a相乘得到序列d，其元素。经过PAM调制器调制后，得到速率(脉冲/s)的单位脉冲，其相位为。最后信号进入脉冲形成器，其冲激相应为p(t)，得到调制后输出的信号s(t)[19]为：

式（2.9）

设置信号参数如下，并进行仿真：

表2.2 PAM-DS-UWB仿真参数

Table2.2 The parameter settings of PAM-DS-UWB simulation

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 二进制比特数 | 采样频率fc(GHZ) | 每个symbol的脉冲数量Ns | Chip宽度Tc(ns) | 脉冲宽度Tm(ns) | 脉冲波形因子tau(ns) | DS-PR的循环周期Np |
| 2 | 50 | 10 | 2 | 0.5 | 0.25 | 10 |

得到的信号为：



图2.14 PAM-DS-UWB信号波形

Fig2.14 PAM-DS-UWB signal waveform

10个脉冲表示一个比特的信息，二进制码元产生的序列为[1 0]，从仿真波形中得到Ds码为[-1 -1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1]。

### 2.3.3 多频带调制

为了使频谱的利用率提高，人们开始考虑使用多频带调制，越来越多的公司也开始了多频带的超宽带传输系统的开发。多频带UWB是将频谱分成若干最小带宽为500MHz的若干子带，在不同的时间根据用户的具体要求动态分配子带资源，通过同时发送不同频带的多个UWB信号来提高频带利用效率[26]。信号间由于频率的不同不会相互干扰。但是为了满足超宽带系统的要求，多频带调制技术需要实时测量每个子带的带宽，同时由于每个UWB信号都可以进行标准的调制，使得其在接收端解调前必须先被分离，因此多频带调制实现起来复杂度较高。

## 2.4 超宽带信道模型

### 2.4.1 信道模型研究意义

实际信道通过信道模型的建立可以用一个传递函数表示，使信号在经过信道传输后，能够在接收机被预测出来。UWB室内定位性能在不同的传播环境下有不同的表现，选择一个适合当前环境的信道模型有利于定位性能的提高与定位系统的仿真。因此通过对信号在信道中传播特性的研究将有利于对基于UWB的室内定位算法与跟踪算法的研究，能够为后文算法的设计做好铺垫。

### 2.4.2 IEEE802.15.4a标准信道模型

目前对超宽带室内信道模型的研究有两个IEEE的工作组，IEEE 802.15.3a工作组发布了适用于室内高速信号传输的信道模型，但对于室内高精度定位，此模型的传输速度过高，因此针对低速率、低功耗的要求，提出了新的信道模型标准—IEEE802.11.4a[27]。该标准对UWB信号在LOS（line-of-sight，LOS）和NLOS（non-line-of-sight，NLOS）环境下的功率延时衰减谱进行了规定，因此本文选择IEEE802.15.4a信道作为研究信道。

IEEE802.15.4a信道模型是针对超宽带信号的频率范围从2-10GHz，在不同测量场景下的应用所制定的，且经过了大量的理论推导与实验。依据使用场景的不同可以分为：一般室内信道、办公场所信道、工业区域信道、室外信道或农业/农场信道。下面对信道模型进行介绍：

（1）路径损耗模型

UWB信号的路径损耗PL可由关于频率f和距离d函数的乘积表示：

式（2.10）

式（2.10）中，路径损耗关于频率的函数与频率满足[27]：

式（2.11）

其中，K表示发射信号的频率对路径损耗的影响因子。

路径损耗与信号传播距离的关系可以表示为：

式（2.12）

其中，n为损耗指数，其值与收发节点间环境是否为视距有关[28]；为参考距离；表示参考距离处的路径损耗；S表示由于阴影效应导致的均值为0方差为的高斯随机变量，用来对路径损耗进行修正[29]。

（2）多径模型

IEEE802.15.4a工作组在借鉴S-V信道模型的基础上提出了多径信道模型，并在实际环境中对大量的不同信道进行了测试，该多径信道模型的冲击响应可以表达为[30]：

式（2.13）

其中，是第l簇中第k径的抽头权值，即多径时延系数;表示第l簇的时延，表示第l簇中的第k径相对于簇到达时间的时延,相位在上服从均匀分布。L表示簇的数量，其服从泊松分布，分布密度函数为:

式（2.14）

其中是簇数量的均值，假设，则簇到达时间服从速率为的泊松分布，密度函数为：

式（2.15）

根据IEEE802.15.4a工作组划分的4种环境，居住环境和室内办公环境下径的到达时间为两个混合的泊松分布[31]：

式（2.16）

其中表示混合概率，和是每一簇中信号的到达率。在居住环境和室内办公环境下多径时延系数满足如下关系：

式（2.17）

式（2.17）中是第l簇的能量，是簇内衰减的时间常数，线性依赖于簇的到达时间：

式（2.18）

其中表示簇内时延常数随时间的变化，第l簇的能量为：

式（2.19）

式（2.19）中，服从标准差为的正态分布，表示簇的能量损耗因子。

信号在非视距的室内办公和工业环境中传播时多径时延模型所有不同，其表达式为：

式（2.20）

其中，表示随时间增长而产生的衰减，表示功率延迟谱的增长速度，表示首径分量的衰减情况。

（3）小尺度衰落模型

小尺度衰落常用Nakagami分布来描述：

式（2.21）

式（2.21）中，表示伽马函数，m是Nakagami的m因子，其值大于0.5，是幅度的均方值。用转换公式变换成rice分布为：

式（2.22）

式（2.23）

其中K为rice因子，对m建模可得，一个随即均值和标准差的表达式为：

式（2.24）

式（2.25）

对于每簇的首径分量m因子是固定的，与延时相互独立，即：。

## 2.5 UWB的接收方式

理想状态下脉冲不会受到时间误差的影响，环境中传输的脉冲串在不同的时间进行着信息传递。但是在实际过程中，非视距因素会增加信号时延，不同用户间可能存在干扰，环境中还可能会受到未知噪声的影响。因此有效信息的提取就需要选择合适的接收机。通常检测处理信号使用相干和非相干两种手段。相干接收机结构如图2.15所示[32]。



图2.15 相干接收机结构

Fig2.15 The basic structure of the coherent receiver

天线在检测到脉冲波形后，首先去除噪声和射频附加增益，然后在相关器和模板信号做运算，通过解调还原出附加的有用信号，最后通过信道解码发送给信宿。将接收到的一组脉冲表示为：

式（2.26）

其中是经过信道传输加入时延和衰落等变化以后的结果，假设系统处于AWGN环境中，n(t)表示符合高斯特性的随机噪声。通过改变相位的方法变换信号：

式（2.27）

其中表示能量的大小，表示因调制而产生的时移。改写为正交函数的形式：

式（2.28）

其中，,,。可以用相关器实现上述功能，如图2.16所示。



图2.16 PPM-TH相关接收机结构

Fig2.16 The basic structure of PPM-TH correlation receiver

将接收到的脉冲乘以相关掩模，输出为，其中：

式（2.29）

若发送信号、等概率，用表示每个脉冲的能量，则检测到错误信息的概率为：

式（2.30）

非相干接收机的基本结构如图2.17所示。



图2.17 非相干接收机结构

Fig2.17 The basic structure of non-coherent receiver

非相干接收与相干接收相比最大的区别是对信号的检测方式。非相干接收不用处理波形，通过判断脉冲包络来实现，因此不需要模板发生器，更易于实现。

## 2.6 本章小结

本章中首先介绍了超宽带信号的基本原理和技术优势，研究了信号的产生并仿真实现了两种调制方法，接着重点介绍了基于IEEE 802.15.4a标准的信道模型，最后对超宽带信号的发射机和接收机结构作了说明，为后续的定位方法研究做了准备。

# 3 无线定位技术

## 3.1 无线定位方法的分类

无线定位技术根据是否需要测距可分为基于测距(range-based)的定位和无需测距(range-free)的定位。无线定位技术即通过己知节点的位置等信息，经过不同的定位技术与算法得到目标节点的位置[33]。基于测距的定位方法需要先得到基站和目标节点的距离，然后通过定位算法的计算确定出目标节点的位置。而无需测距的定位方法是通过系统中已知位置节点与未知位置节点的联系，再经过定位算法的计算得到目标节点的位置[34]。虽然无需测距的定位技术成本和功耗较低，但定位的精度远不如基于测距的定位技术，故本文主要对基于测距技术的定位方法进行研究。

## 3.2 基于测距的定位方法

在基于测距的定位技术中，根据获取的测量参数的不同，可分为基于信号到达时间（Time of Arrival，TOA）法、基于信号到达时间差（Time Difference of Arrival，TDOA）法、基于信号到达角度（Angle of Arrival，AOA）法和基于信号接收强度（Received Signal Strength Indication，RSSI）法等[35]。下面将对这几种定位方法进行详细的介绍。

### 3.2.1 TOA定位方法

TOA距离估计 [36]是通过测量目标节点发射的信号达到不同基站的飞行时间（Time of Fight，TOF），用测得的飞行时间乘以电磁波的传播速度来估计目标节点与基站间的距离[37]。按照基站与目标节点间时钟是否同步，又可分为基于时钟同步的单向测距（One Way Ranging，OWR）和非时钟同步的双向测距（Two Way Ranging，TWR），下面来分别介绍。

（1）TOA单向测距OWR



图3.1 TOA单向测距示意图

Fig3.1 TOA unidirectional ranging schematic

在图3.1所示的单向测距中，A在时刻向B发送了一个包含时间信息的消息，B在时刻接收到，若A、B间的时间完全同步，通过与的时间差乘以电磁波的传播速度（c）即可得到A、B间距离的估计值。

TOA定位算法通过信号的到达时间来获得节点间的距离，根据己知的基站坐标，通过三边定位的方法即可得到目标节点的位置估计[38]，通常目标节点在二维平面中的定位，至少需要三个不在同一直线上的基站参与。如图3.2所示设三个基站、、的坐标分别为()、()、()，目标节点的坐标为，则以目标节点与基站间的距离为半径作圆，三个圆的交点坐标即为目标节点的位置，其中，为目标节点发射或反射的信号到达基站的时间，c为光速。



图3.2 基于TOA定位原理图

Fig3.2 Schematic based on TOA ranging

由此得到方程组为：

式（3.1）

将方程组中后两个方程分别与第一个方程相减可得：

式（3.2）

式（3.3）

将式（3.2）（3.3）转化为矩阵形式得：

式（3.4）

式（3.4）简化为如下形式可得：

式（3.5）

其中，，。

由式（3.5）可得目标节点的位置坐标为：

式（3.6）

其Cramer-Rao下限测为[64] :

式（3.7）

式中c为光速，为效带宽，其满足如下关系：

式（3.8）

图3.3和图3.4中分别表示了TOA定位最小标准差与信噪比和有效带宽的关系。



图3.3 不同信噪比下TOA定位理论下界与有效带宽的关系

Fig3.3 The relation between the lower bound and the effective bandwidth of TOA [localization](javascript:;) with different SNR



图3.4 不同带宽下TOA定位理论下界与信噪比的关系

Fig3.4 The relation between the lower bound and SNR of TOA [localization](javascript:;) with different bandwidth

从图中可以看出，随信噪比的降低或信号有效带宽的增加，TOA定位方法的最小标准差可以降低到50cm以下。

OWR测距是充分利用了超宽带信号时间分辨率高的优势，可以在一定程度上改善障碍物对信号的影响。但其要求系统中的所有基站和目标节点的时钟要完全同步，然而保持系统中所有设备的同步需要增加系统资源。下面介绍TWR测距方法。

（2）TOA双向测距TWR



图3.5 双程测距示意图

Fig3.5 Double range ranging schematic

如图3.5所示，双程测距过程中基站与目标节点的时钟不同步。在时刻，A向B发送发出信号，B在经过一个TOF的时间接受到此信号，接着经过一定的响应时间后，B给A发送确认信号，A在经过两个TOF时间和一个响应时间后收到该信号。在双程测距中完成一个来回的时间为：

式（3.9）

其中，指的是从A发送测距信息开始到A接收到B返回的测距信息为止经过的一个来回的时间。由式（3.9）可得TOF的值为：

式（3.10）

TWR定位不需要目标节点与基站间的时钟同步，但是要求响应时间能够被精准地测定，或者提前商定好响应时间的大小，因为的准确程度直接影响了定位的精度。

### 3.2.2 TDOA定位方法

TDOA定位与TOA定位相比优势在于不要求目标节点与基站之间严格时钟同步，只需要各基站间的时钟保持同步[39]。在实际中，通过一起连接到控制主机上，基站就可以实现时钟的同步，因此TDOA定位相较于TOA定位相对地简化了系统，降低了成本。TDOA采用目标节点到不同基站的距离差来实现目标节点位置的估计[40]，其基本思想是，所有基站之间时钟同步，各基站将接收到目标节点信号的不同时刻记录下，相减可得目标信号的到达时间差，再通过公式计算即可得到目标节点到不同基站的距离差值，其测距原理图3.6所示。



图3.6 TDOA测距原理图

Fig3.6 Schematic based on TDOA ranging

通过计算出的基站1、2之间的距离差，可以得到一条唯一的双曲线，通过至少三个基站建立一组双曲线方程组，求解此方程组来得到二维平面中目标节点的坐标位置。二维平面三基站的TDOA定位的示意图如图3.7所示。



图3.7 TDOA双曲线定位示意图

Fig3.7 The Schematic of hyperbolic [localization](javascript:;)

如图3.7所示，、、为位置已知的基站，N为待定位的目标节点，设为基准基站，基站的坐标为，目标节点N的坐标为，由目标节点发送信号到达基站的时刻为，表示目标节点到第i个基站的距离与到基准基站的距离差值：

式（3.11）

其中c为信号的传播速度即光速，由式（3.11）可得双曲线方程组为：

式（3.12）

解此方程组即可求得目标节点N的位置坐标。

在实际应用中双曲线会因为误差的影响而无法相交于一点，因此需要额外的信息来提高定位精度。通常使用3个以上的基站，通过获得冗余的TDOA值来提高定位的精确程度，降低误差的影响。

### 3.2.3 AOA定位方法

基于到达角度(Angle of Arrival, AOA)的定位方法[41]是通过测得的目标节点信号到达基站的入射角度大小，再由相应算法的计算得到目标节点的位置估计。设有M个基站，坐标分别为，目标节点的坐标为，各基站测得的目标节点的到达角度为，其定位原理示意图如图3.8所示。



图3.8 AOA定位原理示意图

Fig3.8 AOA [localization](javascript:;) principle schematic

根据目标节点到达角度的正弦值得到关于距离的方程组：

式（3.13）

将式（3.13）转化为：

式（3.14）

定义一个变量为测量误差向量，其可表示为：

式（3.15）

其中，，，

对式（3.15）采用最小二乘法求解可得目标节点的位置估计值为：

式（3.16）

AOA定位方法到达角度的测量是通过目标节点信号的到达时间获得的，当目标节点垂直于天线阵列时，由于信号的到达时间相同，因此无法测得到达角，这就需要目标节点与天线阵列要保持一定角度，角度越大，则到达天线的时间差也越大。

基于AOA的定位算法中，当有M个等距离(距离为)排列的基站时，其达角度为的克拉美罗下限可以表示为：

式（3.17）

从式（3.17）中可以看出其测量角度的克拉美罗下限会随着信噪比的增大、基站间距离的增加或基站数量的增加而减小。

如果目标节点与基站间存在直达路径，则最先到达基站的信号都是沿此路径到达的，因此AOA定位方法是通过多个基站的智能天线矩阵测得目标节点最先到达的信号角度，来计算出目标节点的估计位置。图 为AOA天线阵列测量角度方法。



图3.9 AOA天线阵列角度测量示意图

Fig3.9 AOA antenna array angle measurement schematic

由于AOA定位方法没有对基站和目标节点间的多径传播干扰进行处理，在障碍物较多的环境中，定位误差将会增大，因此该方案适合在LOS环境下的目标节点的定位。同时虽然AOA方案定位过程简单，但是对天线的较高要求使其布置成本略高。

### 3.2.4 RSSI定位方法

基于信号接收强度法是根据接收信号强度和信号传输距离关系的一种测距方法，根据发射信号的强度，通过己知的信号衰落模型来得到基站与目标节点间的距离[42]。在获得多个距离测量值后，通过使用相应的定位算法便可获得待测目标节点的位置。理想环境下，无线信号在二维空间传播过程中的信号强度衰减示意图为：



图3.10 传播过程中信号强度衰减示意图

Fig3.10 Signal intensity attenuation during propagation schematic

己知信号的发射功率，通过接收功率即可得到信号传播过程中的损耗大小。其关系为：

式（3.18）

其中，d表示信号的传播距离，表示发射功率值，和分别表示发射和接收天线增益，是信号的波长，k为损耗因子，表示接收设备检测到的接收功率值。

式（3.18）表示的是无线电信号在理想状态下的传播模型，在实际中，由于多径和非视距传播的影响，传播损耗模型可由式（3.19）表示：

式（3.19）

其中，表示基站和目标节点距离为d时的信号强度，为基站与目标节点间距离为参考距离时的信号强度，为路径损耗指数，是均值为0方差为的高斯变量，用来表示真实和估计得到的路径损耗误差，d表示基站和目标节点间的真实距离。由此公式即可得到目标节点与基站的距离，其Cramer-Rao下限为[43] :

式（3.20）

其中，式（3.20）中为d的无偏估计，可以看到，RSSI距离估计的最小标准差随收发节点间距离的变大而变大，且很容易受到室内环境的影响，虽然RSSI定位算法机制对设备要求不高，实施相对简单，但是基于RSSI的距离测量方法并不适用于基于UWB的定位系统，基于测距的TOA/TDOA方法才是目前UWB室内定位的主流，RSSI与AOA常用于辅助。

## 3.3 基于非测距的定位方法

无需测距的定位算法主要利用了无线网络中已知位置节点和未知位置节点间的关联性信息来完成未知位置目标的测距与定位。

### 3.3.1 质心定位方法

质心定位方法通过相邻基站和其他参考节点确定出目标节点的估计位置区域，再求得估计区域的质心即为节点的估计位置[44]。定位原理如图3.11所示。



图3.11 质心定位原理

Fig3.11 The principle of centroid location

假设在估计区域的的边上有k个位置已知的点，则目标节点的估计坐标值为：

式（3.21）

质心定位方法比较简单，容易实现，但该方法的定位精度取决于网络中基站的密度和均匀程度，无法做到精确地定位。

### 3.3.2 DV-Hop定位方法

DV-Hop定位方法通过计算出的信标节点间最小跳数与平均跳距相乘得到节点间的距离[45]。先根据协议确定出网络中所有节点距离信标节点的跳数，再计算出网络中节点间每跳的平均跳距[46]，通过目标节点与信标节点间的跳数与每跳的跳距相乘得到目标节点与信标节点间的距离，最后使用三边测量等算法得到目标节点的估计坐标。原理如图3.12所示。



图3.12 DV-Hop定位原理

Fig3.12 The principle of DV-Hop localization

如图3.12己知信标节点、、之间的最小跳数和平均跳距，便可计算出信标节点与目标节点A之间的距离，最后通过三边测量法即可得到目标节点的位置估计。

基于非测距的方法虽然对硬件要求较测距方法低，且无需节点间的绝对位置，但使用跳段距离代替直线距离其误差大小无法达到室内精确定位的要求，只能实现目标节点位置的粗略估计。

## 3.4 影响定位精度的主要因素

在理想条件下通过定位方法都可以获得目标节点的精确位置，但在实际的定位应用中，定位的过程会受到各种因素的影响，从而导致得到的定位结果是一个有误差的估计值。为了提高定位系统对待测目标的定位精度，首先需要了解常见的影响定位精度的主要因素[47]。

（1）多径传播

多径传播指的是无线信号从发射设备发射出来后，会在空间中沿多个不同路径到达接收设备的传播现象。由于信号在空间中传播时，空间中各种各样的物体会对信号产生影响，使其不同程度的反射、折射和散射，传输环境的变化也会使得信号在振幅、相位和时延上产生弥散。当接收设备接收到沿不同路径发送来的信号时，会使得信号产生小尺度衰落和失真，最终对定位的精度产生影响。

（2）非视距因素

在室内无线定位系统中，信号在非视距（Non Line of Sight，NLOS）环境下传播也是影响定位精度的一个很重要的因素[48]。在实际室内环境中，基站与目标节点间信号的传播通常是在视距（Line of Sight，LOS）传播和非视距传播两者共同存在的情况下进行的[49]。基站与目标节点间由于障碍物的遮挡，信号无法通过直达路径到达，在遇到障碍物时信号或者穿透障碍物或者通过反射、散射等形式传播，导致信号的传播速度、传播方向、电磁场强度等特性发生改变，从而影响了信号的达到时间。在实际应用中，超宽带信号由于非视距因素的影响，信号的到达时间比视距条件下的到达时间更大，导致了距离测量值的标准差远大于视距条件[50]，影响了定位的精度。

（3）多址干扰

网络中不同用户间的信号会产生相互干扰，在实际中通过对不同用户进行分组，让不同组的用户在不同的时间段内进行信号的传播与消息的处理，以此来降低多址干扰的影响。但也无法完全消除其影响，而且还会降低频谱的利用率。

（4）所用探测器数的限制

通常要完成定位至少需要两个信号基站的参与，然而在实际的场景中，布置的基站越多其定位系统的成本越高，同时在室内较小的空间下布置，对工程的实现也是考验，而且对于一些定位方法过多的探测器虽然可以在理论上增加无线定位的精度，但是探测器间的信号干扰将无法忽略。而在未知的复杂环境中，如果只有较少的探测器能接收到信号，将同样导致接收信号误差较大，无法准确定位目标节点的位置，因此环境中无线探测器的数量和布置也会影响无线定位的精确程度。

## 3.5 本章小结

本章主要讨论了UWB的无线定位技术，对基于TOA，TDOA，AOA和RSSI等四种无线定位方法进行了分析和相关数学模型的建立，通过分析对比发现基于TDOA定位方法更适合应用于超宽带定位技术中。并介绍了几种无需测距的定位算法和影响定位精度的因素，为后文选用合适的定位算法进行相应的研究做好了铺垫。

# 4 定位算法分析及优化

## 4.1 基于TDOA定位算法的研究

第三章介绍分析了几种无线定位方法，其中在基于测距的定位方法中只要得到目标节点到基站的距离，通过关于目标节点方程组的建立，求解即可得到节点的估计位置坐标。在实际应用中，由于建立的方程组常为非线性方程组，较难求得其最优解，因此出现了一些不同复杂度和精度的定位算法来处理得到的非线性方程组，常见的有最小二乘法、加权最小二乘法、Fang算法、Chan算法和Taylor级数算法等[51][52]。

本章在这些经典算法的基础上还介绍了Chan和Taylor协同算法，同时针对移动过程中目标节点的定位，使用了卡尔曼滤波定位算法参与定位，在此基础上还加入了Chan算法的使用加以改进。由于基于TDOA的定位方法较其他方法有明显的优势，因此本章对基于TDOA定位方法的算法进行了研究

## 4.2 经典定位算法

### 4.2.1 LS算法

最小二乘法是无线定位中最为经典的算法，常应用于基于TOA或TDOA的定位方法中，其不需要任何先验信息，通过TOA或TDOA的距离测量值建立以目标节点坐标为未知量的特征方程，然后求解此方程即可实现对目标节点的定位[53]。



图4.1 最小二乘法示意图

Fig4.1 Schematic of least squares

假设在二维环境中，目标节点的坐标为，基站坐标为，目标节点到基站的距离分别为，建立如下方程组：

式（4.1）

将式（4.1）的前n-1项依次减去第n项，并整理成矩阵形式可得：

式（4.2）

可以写成：

式（4.3）

其中，

，，

由于测距误差的存在，定义误差为维的向量，即：

式（4.4）

求X值的大小即要求误差的平方和最小，设关于X的函数为：

式（4.5）

式（4.5）中T代表转置，要求出误差平方和的最小值，只要求出式（4.5）的极值点即可，因此对f(X)求导并令其导数为零得：

式（4.6）

当，即非奇异时，得最小二乘解为：

式（4.7）

其中，是辅助因子。若A为非奇异的方阵，则可以得到唯一解：

式（4.8）

实验证明，最小二乘法在基站数目大于三个的时候可以在一定程度上提高定位的精度。

### 4.2.2 WLS算法

在实际的定位计算中，基站与目标节点之间存在的NLOS信道会影响测量精度，根据每个测量值的误差大小，给不同误差大小的测量值分别乘以不同的权值，使得较为精准的测量数据对节点的位置估计提供较大贡献，即把加权矩阵用在最小二乘算法中，得到了加权最小二乘算法。假设存在加权矩阵W，对式（4.4）进行加权，并函数化可以得到：

式（4.9）

对式（4.9）中的X求偏导，并使等式为零可得：

式（4.10）

解得加权最小二乘解得表达式为：

式（4.11）

WLS算法中最重要的是权重的选择，要使误差的方差最小，加权矩阵必须是测量值误差方差矩阵，且是逆矩阵，常用的加权方式是将测距误差方差的倒数作为加权系数。

### 4.2.3 Fang算法

Fang算法是将基站到目标节点间建立的双曲线方程线性化，然后再近似求解得到目标节点的估计位置[54]。Fang算法可用于在二维、三维平面中目标节点的定位，在二维平面的定位中只需要已知三个基站的坐标即可得到目标节点的位置。

下面在二维平面中进行理论推导，假设二维平面中存在三个基站为，目标节点N的坐标为，为目标节点到第i个基站的距离，为目标节点到第i个基站与到第j个基站之间的距离差值。可知：

式（4.12）

将式（4.12）两边平方得到：

式（4.13）

令，式（4.13）可写为：

式（4.14）

由于，平方化简合并后可得：

式（4.15）

联立（4.14）（4.15）两式可得

式（4.16）

令得到：

式（4.17）

将等式（4.16）减去等式（4.17）可得：

式（4.18）

将式（4.18）中的，，看成未知数，则近似可以得到一个线性方程，了计算的简便，可以设三个基站的坐标分别为、、，由距离差式：

式（4.19）

结合式（4.12）后简化可得：

式（4.20）

方程组（4.20）中两式相减可得：

式（4.21）

上式中令，，

则（4.21）式可以写为：

式（4.22）

将式（4.22）中y的值带入式（4.20）可以得到一个关于x的一元二次方程，解此方程得到的两个解，根据先验信息舍去一个，即可得到目标节点N的坐标值。

Fang算法只需要目标节点的坐标数和非线性方程数相同就能求得节点坐标实现定位，其计算相对简单因此运算速度较快[55]，但是由于算法中使用的TDOA测量值为固定值，无法充分利用获得的其他测量数据，当使用的测量数据中存在误差较大的测量数据时，算法的定位精度也会受到严重影响。

### 4.2.4 Chan算法

Chan算法的求解非递归双曲线方程组的算法[56]，其基于TDOA测距方式，假设定位时噪声服从高斯分布，通过使用两次加权最小二乘法对方程组进行处理，来得到目标节点的位置估计。

假设二维平面区域内部署了N个基站，第i个基站的坐标为，目标节点坐标为，若基站到目标节点的路径为LOS，则每个基站到目标节点的距离为：

式（4.23）

根据TDOA的测量值得到目标节点到第1个基站和到第i个基站之间的距离差为：

式（4.24）

将式（4.24）平方后，带入式（4.23）经过变换可得：

式（4.25）

式中；；。设目标节点的位置向量为，将当做未知参数，得到未知向量，将式（4.25）转换成矩阵形式：

式（4.26）

其中，

,

定义为无噪声时的表达式，则由（4.25）可得观测噪声下的误差矢量为：

式（4.27）

其可以看作是服从正态分布的随机矢量，协方差为：

式（4.28）

其中，Q为服从高斯噪声矢量的协方差矩阵，C为电磁波在空气中的传播速度，即光速。利用加权最小二乘估计可得到近似解为：

式（4.29）

由于B中包含有目标节点的真实位置，无法得到协方差，因此用Q近似代替，则上式可替换为：

式（4.30）

通过式（4.29）的求解进行第一次加权最小二乘估计，可以获得B的值，由式（4.30）的近似计算可以获得目标节点的位置估计，接着进行第二次加权最小二乘估计提高目标节点位置的定位精度。误差矢量还可以表示为：

式（4.31）

已知，代入式（4.31）可得：

式（4.32）

保留式（4.32）中的线性扰动部分，结合式（4.30）（4.31）得和的协方差矩阵为：

式（4.33）

式（4.34）

的各分量分别为，，，其中，，为分量的误差，和分别与，相减，并对三个分量平方可得：

式（4.35）

得到新的误差矢量：

式（4.36）

其中，，，。此时认为的误差比较小，可近似得到的协方差矩阵为：

式（4.37）

其中，，服从正态分布，则的加权最小二乘估计为：

式（4.38）

由于中有目标节点的真实位置，因此只能利用近似估计，的协方差为：

式（4.39）

式（4.39）可简化为：

式（4.40）

最终，可得目标节点的估计结果为：

式（4.41）

根据先验信息排除其他几个解，得到目标节点的最优位置估计。

Chan算法的特点是通过增加基站的数目可以获得冗余的TDOA测距信息，通过利用这些信息，能够进一步提高算法的定位精度。其在噪声服从高斯分布时定位精度较高，且计算量小，增加基站的数目还可以改善定位精度。但在实际的环境中，还会有其他误差的影响，当在非视距环境下进行定位的时候，不服从高斯分布的误差将会大大影响Chan算法的定位精度。

### 4.2.5 Taylor算法

Taylor算法是一种基于泰勒级数展开进行多次迭代从而得出目标节点位置的定位算法[57]。该算法通过对一个有一定精度的初始值进行泰勒级数展开，并求解测距误差的局部最小二乘解来修正目标节点的位置坐标，以逐渐提高目标的定位精度到一个合理的误差范围。

设目标节点N的实际坐标为，初始估计位置为，基站的位置为，n是参与定位的基站个数，则目标节点到基站的距离可以表示为：

式（4.42）

将式（4.42）开方化简后可得：

式（4.43）

其中，根据TDOA定位方法，目标节点到不同基站与到基站1的距离差可以由式（4.44）表示：

式（4.44）

将式（4.44）在处用Taylor级数展开，忽略二阶以上的高阶展开项可以转化为：

式（4.45）

其中，，，，和为估计误差，对式（4.45）进行加权最小二乘求解可得：

式（4.46）

其中，Q是TDOA估计值的协方差矩阵，对NLOS误差具有良好的抑制作用。通过式（4.46）可以得到下一轮迭代的初始值：

式（4.47）

将式（4.47）中的值带入式（4.44）进行下一轮的Taylor级数展开，重复以上步骤，直至和小于事先设定的门限值，满足：

式（4.48）

此时的值即为目标节点的最终坐标位置。

Taylor算法适用于有三个及以上基站系统的定位，在初始值有较小误差的情况下一般都能得到较准确的计算结果，但当基站的排列为直线或其他非标准排列的时候，算法可能会不收敛，且递归运算的计算量也较大，同时初始估计值的误差大小也在一定程度上影响着定位结果的准确程度。

## 4.3 定位性能指标

为了分析对比不同定位算法定位精度的差异，需要一些评价定位精度的指标来分析算法的性能。目前针对无线定位与跟踪常用的评价指标有：均方误差/均方根误差（MSE/RMSE）、累积概率分布函数（CDF）和圆误差概率（CEP）等。在实际应用中，还有几何精度因子（GDOP）、克拉美罗下界（CRLB）、概率密度函数（PDF）和相对定位误差（RPE）也是经常被用于算法性能评价指标

（1）均方误差/均方根误差

均方误差，指的是目标节点位置与估计值差平方的期望。MSE的值越小，说明定位结果越准确。实际情况下，常使用均方根误差来评价定位性能，即使用目标节点位置与估计值之差平方的平方根的期望值来表示定位的精度，在二维平面定位中均方误差和均方根误差定义公式如下：

式（4.49）

式（4.50）

其中，为目标节点的实际坐标位置，为目标节点经定位算法估计的位置坐标。

（2）累积分布函数

累积分布函数是概率密度函数的积分，可以用来描述定位精度在误差范围内的次数在总定位次数中出现的概率。即定位误差低于门限误差的定位次数占全部定位次数的比重就是CDF值。CDF值越大表明定位算法的精度越高。其公式可表示为：

式（4.51）

式中x为定位误差，a为门限误差。

（3）圆误差概率

圆误差概率是指实际定位误差与定位误差参考量为半径的分布指标。在二维空间中，对同一标签进行多次定位，由于多种不同因素的影响，定位估计值在目标节点真实坐标周围分散排布，以估计均值为圆心，包含多于一半估计值坐标点的圆半径即是该算法的圆概率误差。圆半径越小说明算法的准确度越高。对基于TDOA定位方式的算法，其值大小可近似为：

式（4.52）

式中和为二维定位估计值的方差。

## 4.4 经典定位算法仿真对比

通过前面定位算法的介绍，对常用的Fang、Chan和Taylor三种算法进行仿真对比，观察算法的定位精度受基站个数的影响情况。由于Fang定位算法在二维平面中参与定位的基站数为固定的3个，因此先不参与分析对比；在高斯白噪声环境下、对Chan算法、Taylor算法在基站数目为3-7个情况下的定位性能进行仿真比较，可得：



图4.2 不同基站数目下Chan算法的性能对比

Fig4.2 Comparison of performance of Chan algorithm with different number of base stations



图4.3 不同基站数目下Taylor算法的性能对比

Fig4.3 Comparison of Taylor algorithm performance with different number of base stations

从图4.2的对比中可以看出，在高斯噪声环境下， Chan定位算法由于能够利用冗余的TDOA测量值，因此随着参与定位的基站数的增加，定位的精度也在增加。当基站数数量达到5个及以上后，基站数量对定位精度的提升就放缓了。因此可以得到结论，Chan定位算法需要至少3个基站参与定位，当基站的数量达到5个以上时，定位精度达到最高。

从图4.3的对比中可以看出，Taylor算法由于是迭代算法，其定位性能受基站数目的影响较小，当基站数目达到4个及以上时，定位精度达到最高，但是次于Chan算法。高斯白噪声环境下，TDOA标准差为0.1、0.2、0.3、0.4和0.5us时三种算法的性能比较：



图4.4 4基站下三种算法性能比较

Fig4.4 Performance comparison of three algorithms with four base stations



图4.5 5基站下三种算法性能比较

Fig4.4 Performance comparison of three algorithms with five base stations



图4.6 6基站下三种算法性能比较

Fig4.4 Performance comparison of three algorithms with six base stations

图4.4-图4.6是理想环境下三种算法在不同基站数目下定位误差均值与高斯噪声标准差之间的关系，环境无NLOS误差，仅考虑TDOA检测设备的测量误差对定位结果的影响，其中假定测量误差分别服从均值为0，标准差分别为0.1、0.2、0.3、0.4和0.5μs的高斯分布。从图中可以看出，在理想的状态下，三种算法中Chan算法的误差最低，其次是Taylor，Fang算法最差。仿真的结果也说明了Chan算法和Taylor算法的优势，即可以利用所有的TDOA信息，从而得出的解较为精确，适应性更强。

实际环境下三种算法在TDOA标准差为0.1us时误差均值的比较：



图4.7 4基站实际性能比较

Fig4.7 Comparison of actual performance with four base stations



图4.8 5基站实际性能比较

Fig4.7 Comparison of actual performance with five base stations



图4.9 6基站实际性能比较

Fig4.7 Comparison of actual performance with four base stations

图4.7-图4.9是在实际的信道环境下对三种定位算法的平均定位误差的进行仿真。其中设备测量误差服从N(0,1)高斯分布，从图中的对比可以看出，在实际信道环境中，Chan算法和Taylor法的性能较好，其中Taylor法较Chan算法稍好。

由于Chan算法的推导过程中假设了误差服从零均值的高斯分布，因此在非高斯的信道环境中定位误差变大了。虽然Taylor法在实际环境中表现较好，但是其定位受初始估计值的影响较大，可能会有不收敛的情况发生。Fang算法性能虽然较好，但是由于其本身对测量数据使用的限制，当某个测量值误差较大时，其定位效果将不理想。

## 4.5 Chan和Taylor联合定位算法

初始值的选取对Taylor级数展开法的定位结果影响很大，如初始值误差较大，可能会导致Taylor算法不收敛[58]。因此，如何得到一个较为精确地初始值成为了提高Taylor级数展开法定位精度的关键，常常先使用某种定位算法，对测量数据进行处理，得到一个有一定精度的初始值再带入Taylor算法中进行下一步运算，最终得到一个更精确地定位结果[59]。虽然，Chan算法受非视距因素影响较大，但其定位结果仍具有相当的精度，可以为Taylor算法提供一个有较好精确程度的估计值，利于Taylor算法的定位与收敛。

该算法首先使用Chan算法对目标节点进行初始的定位，将定位结果带入Taylor算法中进行泰勒级数的展开，忽略二阶以上的高阶展开项可以得到一个线性方程组，对此方程进行加权最小二乘求解可以得到第一次迭代的估计误差，用此误差值修正初始值后再进行下一次的迭代运算，经过多次的迭代，当估计误差小于事先设定的门限值时，停止运算，用最后得到的误差值加上Chan算法的初始值即是最终的估计位置。联合定位算法的流程如图4.10所示。



图4.10 联合定位算法流程图

Fig4.10 Joint [localization](javascript:;) algorithm flow chart

Chan和Taylor联合定位算法可以结合两种算法的优势，使用Chan算法的定位结果作为初始估计值还可以有效避免Taylor算法可能的不收敛问题。

## 4.6 Chan和Taylor联合定位仿真分析

联合定位算法与传统Chan算法和Taylor算法的仿真对比图如下：



图4.11 联合算法与传统算法误差对比

Fig4.11 comparison between Joint algorithm error and traditional algorithm error

仿真结果表明，Chan和Taylor的联合定位算法相比于传统的Chan算法和Taylor算法提高了定位的精度，利用Chan算法的估计值作为Taylor算法的初始值进行迭代，还能有效降低Taylor算法不收敛的风险。

## 4.7 UWB移动定位算法

在常见的定位系统中，定位算法通常需要三个及以上的测距值才可以完成目标节点的定位，但在实际应用中，也会出现仅有两个测距信息有效并可以使用的情况。在之前介绍的定位算法中都是通过使用某一时刻的测距信息来对目标节点进行定位，当目标处于移动状态的时候，如何持续的对目标跟踪，将其过去的信息与现在的信息有效联系起来就需要新的算法来实现，目前最为通用的目标跟踪算法即为卡尔曼滤波算法。

### 4.7.1 基于卡尔曼滤波的定位算法

卡尔曼滤波作为高斯过程的最优滤波器，是最为广泛使用的目标跟踪算法。伴随着无线定位技术的发展，卡尔曼滤波器也开始被用于了移动目标的跟踪定位中[60]。卡尔曼滤波通过迭代算法对目标节点的预测状态和当前的观测数据进行平滑，更新当前时刻的状态信息并对下一时刻的状态进行预测。通过当前观测量和先前观测信息不断迭代，便可以获得目标节点的最优位置估计。由于滤波器在进行当前状态的更新时只需考虑前一时刻的状态信息，因此卡尔曼滤波有很好的实时处理特性。

运用卡尔曼滤波对目标进行跟踪，首先利用前一时刻的状态对当前时刻的状态进行估计，得到当前时刻的状态估计矩阵，公式为：

式（4.53）

其中为当前时刻的状态矩阵估计值，F和B分别表示状态转移矩阵和控制矩阵，为上一时刻的状态变量。利用上一时刻计算得到的估计误差协方差和过程噪声协方差预测当前的估计误差协方差矩阵，公式为：

式（4.54）

其中为先验估计误差协方差矩阵，其协方差矩阵用Q表示，为上一时刻状态的估计误差协方差矩阵，根据预测协方差矩阵得到卡尔曼系数，公式如下：

式（4.55）

其中H为观测模型矩阵，R为观测噪声协方差矩阵，根据式（4.55）得到的卡尔曼系数，它能够将残差的表现从观察域转换到状态域，是最优估计的组成比例调节器，其大小反映了在进行最优状态估计时，观测值和估计值所占比重的大小，它可以使估计值误差的协方差达到最小。得出卡尔曼系数后，根据预测值矩阵和观测矩阵，得到本次最优估计值为：

式（4.56）

同时更新本次估计误差协方差的值，用于下一轮的迭代，公式为：

式（4.57）

图4.12为状态矩阵运算流程图，图4.13为误差协方差运算流程图：



图4.12 状态矩阵运算流程图

Fig4.12 State matrix calculation flow chart



图4.13 误差协方差运算流程图

Fig4.13 Error covariance calculation flow chart

通过目标状态的不断预测与更新，可以获得其位置的最优线性估计，而且根据过程中获得的误差协方差矩阵还可以对误差进行分析。使用卡尔曼滤波器进行目标节点的跟踪定位，通过利用上一时刻的信息有效减小了当前时刻的估计误差，同时还对定位系统基站的数目放宽了限制，使其可以应用于基站数目较少的系统中。在实际应用中，当状态方程和观测方程均满足线性，观测噪声和过程噪声都满足高斯分布时，通过卡尔曼滤波获得的状态估计是线性均方误差标准下的最优估计。

### 4.7.2 卡尔曼滤波器目标跟踪仿真实验

对二维平面内的运动的目标进行观测，目标从二维坐标(0,1000)开始沿y轴作匀速直线运动，接着向x轴方向做90度的慢转弯，转弯加速度将降为零后又做了90度的快转弯，结束转弯后，进行了一段匀速运动。其中雷达扫描周期秒，观测噪声的标准差为90米。采用了Monte-Carlo方法，计算估计的误差均值和方差，取。目标真实航迹为：



图4.14 移动目标真实航迹

Fig4.14 Moving target real track

图4.14反应了目标运动的真实轨迹，接下来对x和y独立地进行观测，经过Kalman滤波后的估计的x轴方向上的航迹和理论值为：

****

图4.15 x轴方向的航迹对比

Fig4.15 Track comparison on the x-axis

y轴方向上的估计值和理论值对比为：

****

图4.16 y轴方向的航迹对比

Fig4.16 Track comparison on the y-axis

全程的目标跟踪示意图如图4.17所示。



图4.17 Kalman目标跟踪示意图

Fig4.17 Kalman target tracking schematic

对x轴方向和y轴方向滤波估计值的误差均值和标准差随着观测次数的增多而发生变化的情况进行了仿真。

****

图4.18 坐标轴方向误差均值变化

Fig4.18 Error mean change in Coordinate axis direction

****

图4.19 坐标轴方向误差标准差变化

Fig4.18 Error standard deviation change in Coordinate axis direction

通过使用Kalman滤波对二维平面中移动目标点的跟踪仿真，可以看出该算法对于动态目标的定位跟踪有良好的效果，对环境中的噪声可以较好地抑止。

### 4.7.3 改进的传统算法

鉴于卡尔曼滤波器在目标跟踪中的良好性能，使用卡尔曼滤波器对传统的Fang、Taylor和Chan算法进行改进。卡尔曼滤波器有预测和更新两个过程，预测阶段是通过上一时刻的最优状态和误差的协方差值对当前时刻状态进行预测[61]；更新阶段，主要是根据预测值矩阵和观测矩阵，通过更新方程得到本次最优估计，同时更新本次估计误差协方差的值。改进算法中卡尔曼滤波算法基本流程如图4.20所示。



图4.20 改进算法中卡尔曼滤波流程图

Fig4.20 The kalman filter flow chart in the improved algorithm

由于目标节点的位置在短时间内不会发生跳变，即其定位轨迹通常是平滑的[62]，并且卡尔曼滤波[63]能够在包含噪声的观测数据中，根据前一时刻的状态预测当前时刻的状态，具有良好的目标跟踪能力，用传统定位算法的输出估计值作为Kalman滤波的观测值，对目标节点位置跟踪作二次估计，从而可以得到一个更精确的位置坐标，算法的流程如图4.21所示。



图4.21改进定位算法流程图

Fig4.21 Improved [localization](javascript:;) algorithm flow chart

图4.21中，算法主要由算法的初始化和目标节点位置的估计两部分组成。在算法初始化完成后等待接收新的测量数据，新的数据会触发传统定位算法对目标节点位置的初次估计计算，将得到的初始估计值作为卡尔曼滤波器的观测值，对目标节点位置作二次估计，进而得到一个更精确的位置坐标。

### 4.7.4 改进定位算法的仿真分析

从测距精度和算法稳定性两个方面对比分析改进算法和传统定位算法的定位性能。对改进算法和传统算法的位置曲线和位置估计误差进行仿真比较。



图4.22 Fang-Kalman算法和Fang算法位置曲线对比

Fig4.22 Comparison of Location Curves of Fang-Kalman and Fang Algorithms



图4.23Fang-Kalman算法和Fang算法位置估计误差比对

Fig4.23 Comparison of Position Estimation Error between Fang-Kalman and Fang Algorithms



图4.24 Taylor-Kalman算法和Taylor算法位置曲线对比

Fig4.24 Comparison of Location Curves of Taylor-Kalman and Taylor Algorithms



图4.25Taylor-Kalman算法和Taylor算法位置估计误差比对

Fig4.25 Comparison of Position Estimation Error between Taylor-Kalman and Taylor Algorithms



图4.26 Chan-Kalman算法和Chan算法位置曲线对比

Fig4.26 Comparison of Location Curves of Chan-Kalman and Chan Algorithms

****

图4.27Chan-Kalman算法和Chan算法位置估计误差比对

Fig4.27 Comparison of Position Estimation Error between Chan-Kalman and Chan Algorithms

由对比仿真图可以看出，经过Kalman滤波器的改进，传统的定位算法的定位精度明显的到了提高，在三种算法的改进中，Chan-Kalman算法的效果更好，其可以结合Chan算法稳定性好、时间复杂度低的优势，和卡尔曼滤波器对移动目标有较好跟踪性的优势。用Chan算法的位置估计值作为Kalman滤波的观测值，既满足了算法的稳定性和实时性还提高了定位的精度。Fang和Taylor算法由于其本身的缺点，虽然通过卡尔曼滤波的改进可以提高其对于移动目标的定位精度，但不如Chan和Kalman滤波器结合的效果好。

## 4.8 室内定位实验

### 4.8.1 UWB定位模块介绍

UWB定位模块采用了某公司生产的UWB Mini3定位开发套件，由3个定位基站，1个目标节点组成，可对二维平面中的目标节点实现定位。UWB Mini3是对TREK官方原版进行了PCB的重绘与开发的产品，其在原版的基础上优化了设计，并删除了一些不必要的模块，使其缩小了体积，更方面使用。图4.28为UWB Mini3正反示意图。

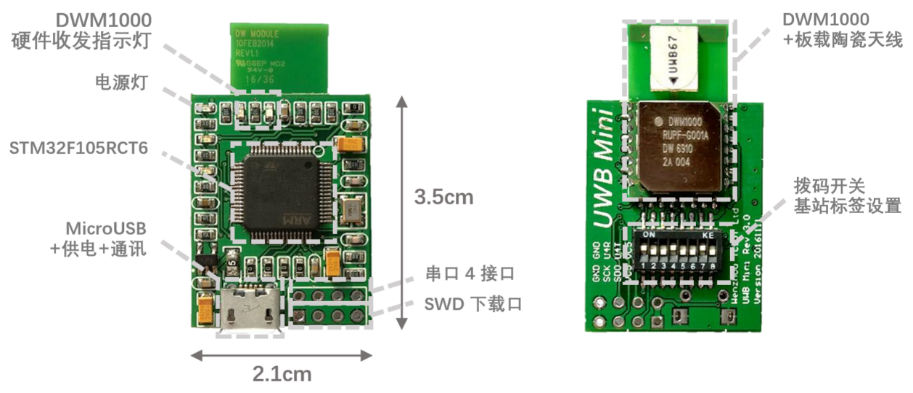


图4.28 UWB Mini3正反面示意图

Fig4.28 The front and back of UWB Mini3

如图4.28所示，UWB Mini3模块主控芯片为STM32F105单片机。外围电路包含：LED指示灯、拨码开关、DWM1000模块、供电通讯模块、复位电路等。通过拨码开关的切换即可以转换自身作为基站或节点的“身份”，定位模块间可以进行双向的数据传输。硬件参数如表4.1所示。

表4.1 UWB Mini3硬件参数

Tab4.1 UWB Mini3 hardware parameters

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 基本参数 | | 无线参数 | |
| PCB | 4层板-环氧树脂 | 通讯速率 | 110kbit/s,850kbit/s,6.8Mbit/s |
| 供电接口 | Micro-USB（5.0V） | 工作频率 | 3.5GHz-6.5GHz |
| 通讯接口 | Micro-USB（5.0V） | 工作频道 | IEEE802.15.4a-6信道 |
| 下载接口 | SWD（VCC SDIO SCK） | 发射功率 | -35dbm/MHZ--62dbm/MHZ可程控 |
| 主控制器 | STM32F105RCT6（64pin） | 最大包长 | 1023字节 |

表4.1 （续）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 基本参数 | | 无线参数 | |
| 外部晶振 | 12Mhz | 通讯距离 | 室内30m，空旷距离50m |
| PCB尺寸 | 35mm\*21mm | 数据抖动 | 20厘米以内 |

### 4.8.2 定位环境布置

实验的硬件有UWB定位套件，由3个定位基站A0、A1、A2和1个目标节点T0组成，还有Turtlebot3移动机器人平台和笔记本电脑。在实验时，目标节点T0固定在移动平台上，3个定位基站高度相同固定于支架上，基站A0通过USB与笔记本电脑相连作为主基站。图4.29为实验用的定位模块。

****

图4.29 实验定位模块示意图

Fig4.29 Experimental [localization](javascript:;) module schematic

在定位实验时，移动机器人平台安装目标节点T0，且节点高出平台10cm以上，以防天线被遮挡。3个基站固定于离地至少1.5米的支架上，且离墙体至少30cm。在定位中，目标节点T0由移动机器人供电，基站A1、A2由移动电源供电，主基站A0通过笔记本电脑供电并进行数据的接收与处理。图4.30为移动机器人平台配置。



图4.30 移动机器人平台配置

Fig4.30 Mobile robot platform configuration

由于系统采用的是基于TDOA的定位方法，只需要基站间的时钟保持同步即可。将3个基站放在距目标节点相同距离的位置，节点向基站广播脉冲信号，各基站记录下接收到信号时的本地时钟，通过交互记录对比计算出时钟的偏移量，最后在实际定位中对此偏移量进行修正就可让基站间的时钟保持同步。图4.31为3基站UWB定位示意图。

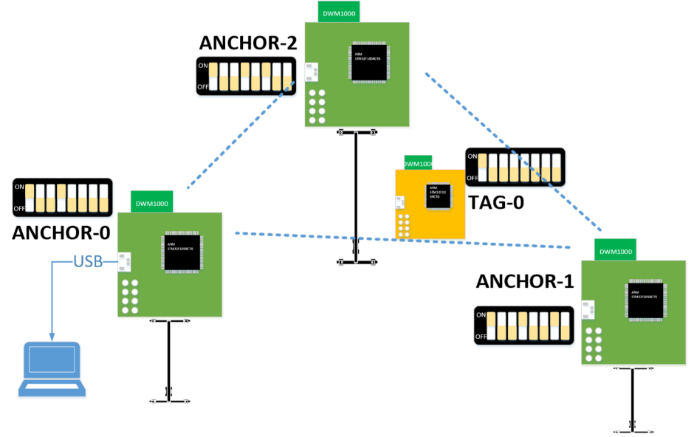


图4.31 3基站UWB定位示意图

Fig4.31 UWB [localization](javascript:;) with three base stations

### 4.8.3 实验结果

实验的软件界面为使用C/C++编写的Qt程序，在软件中需要先设置基站的坐标参数才可以完成目标节点位置的定位。实验的环境为6(L)x3(W)x2(H)m的室内环境。使用Turtlebot3移动机器人作为测试集成平台，通过将目标节点放置于移动平台上来测试目标节点在静止、移动状态下的定位情况。移动机器人平台的移动通过另一台电脑控制。实验软件界面如图4.32所示。

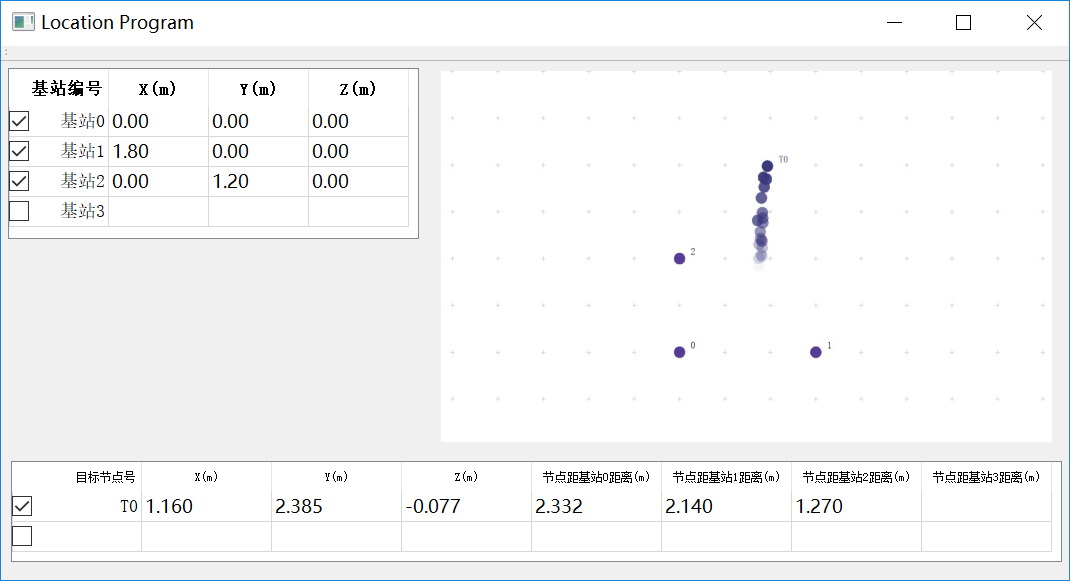


图4.32 实验软件界面

Fig4.32 Software interface for experimentation

在实验场地中选取了20个定位点进行定位对比，定位结果与误差由表 4.2所示。

表4.2 定位实验结果与误差

Tab4.2 The results and errors in the [localization](javascript:;) experiment

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实际位置坐标（cm） | 定位坐标（cm） | 误差值（cm） | 实际位置坐标（cm） | 定位坐标（cm） | 误差值（cm） |
| （60,60） | （64,68） | 8.94 | （120,240） | （125,249） | 10.3 |
| （120,60） | （126,64） | 7.21 | （180,240） | （187,248） | 10.63 |
| （180,60） | （193,68） | 15.26 | （60,300） | （66,313） | 14.32 |
| （60,120） | （63,131） | 11.4 | （120,300） | （126,294） | 8.49 |
| （120,120） | （124,129） | 9.84 | （180,300） | （187,302） | 7.28 |
| （180,120） | （188,123） | 8.54 | （60,360） | （71,351） | 14.21 |
| （60,180） | （65,174） | 7.81 | （120,360） | （128,372） | 14.42 |
| （120,180） | （130,191） | 14.86 | （180,360） | （196,372） | 20 |
| （180,180） | （189,185） | 10.3 | （60,420） | （72,429） | 15 |
| （60,240） | （67,228） | 13.9 | （120,420） | （131,433） | 17.03 |

从获得的数据比较中可以看到，定位误差在20cm范围内，结果满足系统的要求，也证明了基于卡尔曼滤波改进的Chan算法可以很好的对室内移动目标进行精确地定位，且具有一定的可行性。

## 4.9 本章小结

本章首先介绍了LS算法、WLS算法、Fang算法、Chan算法和Taylor算法等几种经典的定位算法及公式推导，通过仿真对比了Fang算法、Taylor级数算法和Chan算法的定位精度，接着介绍了Chan和Taylor的联合定位算法并进行了仿真对比，说明了联合定位的优势，针对移动目标的定位，介绍了卡尔曼滤波算法，并使用卡尔曼滤波对二维目标进行跟踪仿真，体现了其在目标跟踪定位上的性能，结合传统的定位算法进行了改进，经过仿真比对说明了使用卡尔曼滤波对Chan算法改进的效果最好，其定位精度较传统的Chan算法有较大的提高的同时算法的时间复杂度较低，适合系统的实现。最后使用移动机器人平台和定位套件对算法进行了实验，验证了算法的可行性，其定位精度满足设计要求。

# 5 总结与展望

## 5.1 总结

本文主要对超宽带信号进行了分析并对其在定位方面的应用进行了研究，并对基于TDOA定位方法的现有算法进行了分析比对和改进。主要完成的工作有：

(1)总结了超宽带通信技术的原理，特点以及应用领域。对国内外的研究现状进行了简单的介绍。分析对比了不同无线定位技术的优缺点，说明了超宽带系统在室内定位方面的优势。

(2)对超宽带信号的产生进行了研究，并仿真实现了两种调制方式。介绍了信号的信道模型，对超宽带信号的发射机和接收机结构作了说明。

(3)介绍了常用的定位方法，讨论了超宽带下几种定位方法的优缺点，对基于TDOA方法的算法做了研究与理论推导，提出了Chan和Taylor的协同定位算法，在目标的移动定位中，使用卡尔曼滤波改进传统的Chan算法对目标节点位置进行定位估计，与经典定位算法相比提高了定位精度。

(4)使用MATLAB工具仿真对了几种定位算法与算法的改进，验证了改进算法对提高定位精度的有效性。

## 5.2 对未来研究工作的展望

本文对基于UWB的移动定位算法进行了研究，但由于自身水平和时间有限，还有以下方面可以进一步研究与改进：

（1）本文对定位算法的研究部分是在LOS环境下进行的，而在实际的环境中，复杂的室内环境下，如何更好的消除NLOS误差会对定位精度造成影响，将是定位系统在实际应用中必须考虑的复杂问题。

（2）本文的仿真时都是在标准的室内信道模型下进行的，在实际中如何消除多径问题对的信道模型的影响将是一个很好的研究方向。

（3）本文仅对单一目标节点进行了定位研究，如何实现多目标在同一环境中的同时定位将更具实际的意义和价值，有必要对此进行进一步的研究。

# 参考文献

1. Guolin Sun, Jie Chen, Wei Guo, et al. Signal processing techniques in network-aided positioning: a survey of state-of-the-art positioning designs[N], Signal Processing Magazine IEEE, 2005,22(4):12-23.
2. Huan L, Bo R. Wireless location for indoor based on UWB[C], Chinese Control Conference, 2015:6430-6433.
3. 杨静. 短距离无线通信技术对比及其应用研究[J], 无线互联科技，2016(13):12-13.
4. 詹炉. 基于RFID技术的监狱人员定位识别系统研究与设计[D], 中山大学，2014.
5. 刘鹏达. 非视距环境下WSN移动节点定位算法研究[D], 东北大学，2014.
6. 邹亮，潘洲. 基于2.4 GHz与5 GHz信号的WiFi指纹定位算法研究[J], 科学技术与工程，2015, 15(3):280-284.
7. 施东辉. 基于ZigBee无线传感网络智能医院实时定位系统设计研究[J], 中国新通信，2014(24):122-123.
8. 蔡红. 基于UWB的定位方法研究[D], 北京邮电大学，2015.
9. 吴松林. 超宽带信号指纹定位算法的研究[D], 中国海洋大学，2014.
10. 董家志. 基于UWB的室内定位与跟踪算法研究[D], 电子科技大学，2015.
11. 安宝强. UWB定位系统中信号同步问题的研究[D], 中国海洋大学，2014.
12. 陈莉莉. 宽带无线接入技术比较以及应用分析[J], 科技资讯2009(10):27-27.
13. FCC 02-48. First Report and Order[R]. Adopted: February 14, 2002 Released: April 22, 2002.
14. 法拉纳克，任品毅，廖学文，梁中华. 超宽带通信原理及应用[M]. 西安:西安交通大学出版社，2007,25-27.
15. 毕晓君, 郑静. DS-UWB和TH-UWB系统的信道估计性能比较[J], 应用科技 2008(5): 13-17.
16. 高臣, 朱红军. 超宽带无线电抗干扰性能研究[J], 科技经济导刊, 2015(4):13-14.
17. 张喆, 扈海滨. 浅谈超宽带技术的研究与应用[J], 科学时代, 2013(17):25-26.
18. Scholtz R. Multiple access with time-hopping impulse modulation[C]. Military Communications Conference, 1993. MILCOM'93. Conference Record. Communications on the Move., IEEE. IEEE, 1993, 2: 447-450.
19. Win M Z, Scholtz R A. Impulse radio: How it works[J], IEEE Communications Letters, 1998, 2(2):36-38.
20. Firoozbakhsh B, Pratt T G, Jayant N. Analysis of IEEE 802.11 a interference on UWB systems[C]. Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003 IEEE Conference on. IEEE, 2003: 473-477.
21. 熊海良, 肖竹, 杨宏, 田红心, 易克初. 无人机载软件接收机同步方案研究[J], 电子与信息学报2009,31(11): 2671-2676 (EI Compendex: 20095112567087).
22. 尹勇. 基于IR-UWB安全通信接收机结构与算法理论研究[D], 中国科学技术大学，2006.
23. 吴微威. 基于IR-UWB的无线传感网络研究[D], 中国科学技术大学，2007.
24. Zhang J, Orlik P V, Sahinoglu Z, et al. UWB Systems for Wireless Sensor Networks[J], Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2):313-331.
25. Martret. C. J, L, Giannakis. G. B. All-digital PAM impulse radio for multiple-access through frequency-selective multipath[J], IEEE Global Telecommunications Conference, 2010:77-81.
26. 杨建华. 基于Turbo迭代原理的OFDM和UWB系统关键技术研究[D], 哈尔滨工程大学，2008.
27. Qiu R C, Lu I T. Multipath resolving with frequency dependence for wide-band wireless channel modeling[J], IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999,48(1):273-285.
28. 石欣, 印爱民, 陈曦. 基于RSSI的多维标度室内定位算法[J], 仪器仪表学报 2014(2): 261-268.
29. 刘海博, 吴怡, 无线移动信道特性分析[J], 现代电子技术, 2010(23): 45-48.
30. A. Saleh and R. A. Valenzuela. A statistical model for indoor multipath propagation[J], IEEE J. Selected Areas Comm., 1987, vol. 5: 137-138.
31. 解武, 曹家年, 刘世航, 吕学龙. IEEE 802.15.4a信道对UWB功率谱影响分析[J], 深圳大学学报（理工版）, 2010(1):43-48.
32. 赵为春. 基于脉冲超宽带(UWB)无线接收机若干关键技术的研究[D], 北京邮电大学，2006.
33. Win M Z, Scholtz R A. Characterization of ultra-wide bandwidth wireless indoor channels: a communication-theoretic view[J], IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 20(9):1613-1627.
34. 肖竹，黑永强，于全，等. 脉冲超宽带定位技术综述[J], 中国科学:信息科学，2009,39(10):1112-1124.
35. 唐春玲. UWB定位系统研究[D], 重庆:西南大学，2008: 21-25.
36. 范志平，邓平，刘林.蜂窝网无线定位[M]. 北京:电子工业出版社，2002.
37. 李娟, 崔学荣, 吴春雷. 超宽带无线传感网中多节点协同定位协议的研究[J], 微型电脑应用, 2013(8): 5-7.
38. Li X, He J, Xu L, et al. The effect of multipath and NLOS on TOA ranging error and energy based on UWB[C], IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan. IEEE, 2016:1-2.
39. 卢靖宇, 余文涛, 赵新, 孙广毅. 基于超宽带的移动机器人室内定位系统设计[J], 电子技术应用, 2017(5): 25-28.
40. 马灵芝. 基于TDOA无线传感定位算法的研究及应用[D], 济南:山东大学，2012: 21-23.
41. Zhen B, Li H B, Kohno R. UWB Ranging and Crystal Offset[J], 2006, 3:1445-1449.
42. 孔勇平，钟致民，杨广龙，等. 基于RSSI的室内定位系统设计与实现[J], 移动通信，2014, 38(5):34-38.
43. ZHEN, Bin, LI, Huan-Bang, KOHNO, Ryuji. Clock Offset Compensation in Ultra-Wideband Ranging(Wide Band Systems)[J], Ieice Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences, 2006,89:3082-3088.
44. 朱浩，顾宗海，苏金，等. 一种基于交点质心求解的RSSI定位算法及其优化[J], 郑州大学学报:工学版，2010, 31(6): 43-46.
45. 曹珊, 何志琴, 杨靖. 无线传感器网络中一种改进的DV-HOP定位算法[J], 现代机械, 2012(4): 71-73.
46. 张品, 徐智福, 孙岩. 基于无线传感器网络的一种改进DV-Hop算法[J], 电子器件, 2009(6): 1091-1093.
47. 张钦. 基于UWB的非视距测距和定位技术的理论研究[D], 北京邮电大学，2013.
48. 毛科技, 邬锦彬, 金洪波, 苗春雨, 夏明, 陈庆章. 面向非视距环境的室内定位算法[J], 电子学报, 2016(5): 1174-1179.
49. Shujaee K, Ebaid A, George R, et al. Channel modeling and range extension for UWB communications using directional antenna in LOS and NLOS path loss models[C], World Automation Congress. IEEE, 2008:1-6.
50. 杨英杰，张文龙，胡义轩. 基于UWB泊车定位的OVSF-TH改进算法研究[J], 重庆邮电大学学报(自然科学版)，2015, 27(4):529-534.
51. 周康磊.蜂窝网络中移动台的无线跟踪算法研究[D], 西安:西安邮电学院，2010: 22-28.
52. 万瑶. 无线电定位技术的研究[D], 太原:中北大学，2013: 25-31.
53. 吴晨烨. NLOS环境中基于TDOA和TOA的无线定位研究[D], 南京邮电大学，2014.
54. N. Okello, F. Fletcher, D. Musicki, et al. Comparison of recursive algorithms for emitter localization using TDOA measurements from a pair of UAVs[J], IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1723-1732.
55. Miao ZM, Zhao LW, Yuan WW, et al. Application of One-Class Classification in NLOS Identification of UWB Positioning[C], International Conference on Information System and Artificial Intelligence. IEEE Computer Society, 2016:318-322.
56. Y. T. Chan and K. C. Ho. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J], IEEE Trans. on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915.
57. Wang Y, Kuhn M J, Fathy A E. Advanced system level simulation of UWB three-dimensional through-wall imaging radar for performance limitation prediction[C], Microwave Symposium Digest. IEEE, 2010:165-168.
58. 易伟建，周云，李浩. 基于贝叶斯统计推断的框架损伤诊断研究[J] , 工程力学，2009, 26( 5) : 121-129.
59. 张瑞峰, 张忠娟, 吕辰刚. 基于质心-Taylor的UWB室内定位算法研究[J], 重庆邮电大学学报（自然科学版）, 2011(6): 717-721.
60. 陈素梅. 非视距下基于卡尔曼滤波的无线定位方法[D], 山东大学，2010.
61. 万群，郭贤生，陈章鑫.室内定位理论、方法和应用[M]. 北京:电子工业出版社，2012. WAN Qun, GUO Xian-sheng, CHEN Zhang-xin. Indoor Positioning Theory, Method and Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2012.
62. Bargh M S, de Groove R. Indoor Localization based on Response Rate of Bluetooth Inquiries[C]. Proceedings of the First ACM International Workshop on Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments ACM,2008:49-54.
63. Kalman R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems[J], Journal of Basic Engineering,1960,82(01):35-45.
64. R. Hach, “Symmetric double side Two Way Ranging,” IEEE 802.15WPAN documents, 15-05-0334-r00.

# 致谢

时间如白驹过隙，三年的时间就这样匆匆的流走了，在此论文完成之际，我要感谢在这三年中给予我学习和生活上很大帮助的你们。

首先我要感谢的是我的导师※※※教授，在他的关心和悉心指导下我才能顺利完成此文，在三年的学习生活中，老师对待科研一丝不苟的态度，和对待每一件事情精益求精、认真负责的工作作风无不深深的感染到了我，又无时无刻关心温暖着每一个他的学子，同时还有感谢※※※老师在论文写作中给予的帮助，耐心的帮助我们完善了论文中的每一个点，他们对待学术的严谨和追求都将使我在以后的工作和生活中收益匪浅。

接着我要感谢我研究生同学们和师哥师姐，他们在学习和生活中给予了我很大的帮助，让我在这三年中的学习生活并不孤单，也让我克服了一个又一个的困难，从他们的身上我也一直在学习，特别感谢你们，也希望你们的未来无限光明，无限开阔，让我们一起加油吧。

同时我还要感谢山东科技大学，感谢你给予了我一个这么好的学习平台，让我在这里学习进步，感谢你这三年对我的培养。

最后我还要感谢我的家人，感谢你们对我的养育和支持，让我可以顺利的完成学业，也希望我没有让你们失望，我也会一直努力的成为你们眼中的骄傲，成为所有人眼中的骄傲。

学生生涯即将结束，从小上学到现在，也该到了去社会中进行更多历练的时候了，在今后的道路，我会脚踏实地，一步一个脚印的做好每一件事，在社会上去实现自己的价值，同时时刻怀有一颗感恩的心一路前行。

# 攻读硕士期间主要研究成果

※※※，男，1992年生。

2015年9月至今，就读于山东科技大学电子通信与物理学院，专业是电子与通信工程，研究方向是电子与通信工程化技术。