

学校代码: 10589

分 类 号: _____



学号: 16081000210013

密级: _____

海南大学

硕 士 学 位 论 文

题 目: 超宽带精准实时定位系统的 TDOA 定位算法研究

作 者: 朱振海

指导教师: 沈重 教授

专 业: 信息与通信工程

时 间: 二〇一九年五月

Research on TDOA Location Algorithm for Ultra-wideband Precision Real-Time Location System

A Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

For the Master Degree in Economics

By

Zhu Zhen-hai

Supervisor: Shen Chong

Major: Information and Communication Engineering

Submitted time: May,2019

海南大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名：朱振海

日期：2019 年 5 月 30 日

学位论文版权使用授权说明

本人完全了解海南大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。学校可以为存在馆际合作关系兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。本人授权海南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密论文在解密后遵守此规定。

论文作者签名：朱振海
日期：2019 年 5 月 30 日

导师签名：[Signature]
日期：2019 年 5 月 30 日

本人已经认真阅读“CALIS 高校学位论文全文数据库发布章程”，同意将本人的学位论文提交“CALIS 高校学位论文全文数据库”中全文发布，并可按“章程”中规定享受相关权益。同意论文提交后滞后：☐半年；☐一年；☐二年发布。

论文作者签名：朱振海
日期：2019 年 5 月 30 日

导师签名：[Signature]
日期：2019 年 5 月 30 日

摘 要

随着工业 4.0 的提出, 各行各业对例如人员、物品、设备等的精准定位需求在不断地增加。面对日趋饱和的频谱资源, 超宽带室内定位技术因其自身的特点, 迅速在众多室内定位技术中脱颖而出。目前, 如何减小超宽带室内定位误差成为了整个超宽带定位系统必须解决的关键问题。

UWB TDOA 定位算法因其数学模型简单, 数据运算量相对较少, 成为目前 UWB 技术常用算法。本文基于 TDOA 定位算法的基础上, 以 Hainan EVK RTLS 3.0 硬件平台为辅助手段, 重点研究无线时钟同步协议和 UWB 室内定位网络扩展两个方面。在无线时钟同步协议方面, 针对传统 TPSN 协议所存在的缺陷, 提出一种结合神经网络的时钟同步 TPSN 协议。与传统 TPSN 协议相比, 所提算法充分考虑相对漂移的影响, 通过对学习样本不断重复学习, 减少了随机时延对时钟同步精度的影响。为了防止掉入局部极小值, 导致永不收敛, 提出一种学习率在线自我调节的方法, 有效增强 BP 神经网络模型的稳定性, 从而提高所提算法的性能, 时钟同步误差得到有效降低。在 UWB 室内定位网络扩展方面, 针对不同的应用场所, 在单蜂窝场景的基础上, 来验证 UWB 室内定位系统网络扩展的可行性。实测结果表明不同子区域的室内定位精度均能满足 UWB 定位技术的厘米级定位要求, 且相对单一区域来说, UWB 室内定位系统的性能得到提升。

关键词: 超宽带; TDOA 定位算法; 时钟同步协议; 网络扩展; 神经网络

Abstract

With the introduction of Industry 4.0, the demand for precise positioning of people, goods, equipment, etc. in various industries is constantly increasing. In the face of increasingly saturated spectrum resources, UWB indoor positioning technology quickly stands out among many indoor positioning technologies due to its own characteristics. At present, how to reduce the ultra-wideband indoor positioning error has become a key issue that must be solved in the entire ultra-wideband positioning system.

The UWB TDOA positioning algorithm is a commonly used algorithm for UWB technology because of its simple mathematical model and relatively small amount of data computation. Based on the TDOA location algorithm, this paper focuses on the wireless clock synchronization algorithm and the UWB indoor positioning network extension with the Hainan EVK RTLS 3.0 hardware platform as an auxiliary method. In terms of wireless clock synchronization algorithm, a wireless clock synchronization algorithm combined with neural network is proposed for the defects of traditional TPSN protocol. Compared with the traditional TPSN protocol, the proposed algorithm fully considers the influence of relative drift. By repeatedly learning the learning samples, the influence of random delay on clock synchronization accuracy is reduced. In order to prevent the local minimum value from falling, and never converge, a method of online self-regulation of learning rate is proposed to effectively enhance the stability of the BP neural network model, thereby improving the performance of the proposed algorithm and effectively reducing the clock synchronization error. In terms of UWB indoor positioning network expansion, the feasibility of UWB indoor positioning system network expansion is verified on the basis of single-cell scenarios for different application sites. The measured results show that the indoor positioning accuracy of different sub-areas can meet the centimeter-level positioning requirements of UWB positioning technology, and the performance of UWB indoor positioning system is improved relative to a single area.

Keywords: UWB; TDOA location algorithm; wireless clock synchronization protocol; network extension; neural network

目 录

1 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 超宽带技术的国内外研究现状及其应用前景.....	2
1.2.1 UWB 的国外发展现状.....	2
1.2.2 UWB 的国内发展现状.....	3
1.2.3 UWB TDOA 定位技术的发展动态.....	3
1.3 本文研究内容及内容安排.....	4
2 UWB 室内定位概述.....	6
2.1 UWB 基本概念和定义.....	6
2.2 UWB 实现方式和产生.....	9
2.2.1 超宽带系统的脉冲信号.....	9
2.2.2 UWB 信号的产生.....	9
2.3 UWB 无线特性.....	10
2.3.1 UWB 技术的特点.....	10
2.3.2 UWB 技术的传播特性.....	12
2.4 IEEE 802.15.4a UWB 信道模型.....	12
2.4.1 UWB 路径损耗模型.....	13
2.4.2 UWB 多径时延模型.....	14
2.4.3 UWB 小尺度衰落模型.....	14
2.5 本章小结.....	15
3 UWB 技术的各种常用定位算法.....	16
3.1 UWB 定位算法.....	16
3.1.1 RSSI 定位算法.....	16
3.1.2 AOA 定位算法.....	18
3.1.3 TOA 定位算法.....	19
3.1.4 TDOA 定位算法.....	20
3.2 影响 UWB 定位精度的主要来源.....	22
3.2.1 多径效应.....	22
3.2.2 非视距传播(NLOS)误差.....	22
3.2.3 多址干扰.....	22
3.3 UWB 评价标准.....	22
3.3.1 均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE).....	23
3.3.2 圆误差概率(CEP).....	23

3.3.3 几何精度因子(GDOP).....	23
3.4 本章小结.....	24
4 传统 TPSN 时钟同步协议的改进.....	25
4.1 三种时钟同步协议的介绍.....	25
4.1.1 基于服务端-服务端时钟同步协议.....	25
4.1.2 基于客户端-服务端单向时钟同步协议.....	25
4.1.3 基于客户端-服务端双向时钟同步协议.....	26
4.2 时钟同步基本原理.....	26
4.2.1 影响时钟同步的主要因素.....	26
4.2.2 改进的时钟同步参数的设计.....	27
4.3 结合神经网络的 TPSN 时钟同步协议.....	27
4.3.1 系统模型的建立与实现.....	27
4.3.2 实测结果与性能分析.....	32
4.4 本章小结.....	34
5 基于单蜂窝场景的网络扩展.....	35
5.1 网络扩展模型.....	35
5.2 测试环境与结果分析.....	37
5.2.1 测试环境.....	37
5.2.2 结果分析.....	40
5.3 本章小结.....	42
6 总结与展望.....	43
6.1 总结.....	43
6.2 展望.....	43
参考文献.....	44
硕士期间科研成果.....	48
致谢.....	49

1 绪论

1.1 课题研究背景

定位技术作为物联网、CPS(Cyber Physical System)的一项重要感知技术,对“物”进行精确的定位、跟踪和操控,从而对实现灵活全面的人-物通信、物-物通信起着关键作用(王彪等,2013)。无线定位在指定的空间内通过测量无线电波的物理特性对待定位目标进行全天候实时监控。随着工业 4.0 的提出,各行各业对例如人员、物品、设备等的精准定位需求在不断地增加;同时,监狱和银行的安保监控、国家航天系统、仓库的无人操作、数字化旅游的盛行、深海资源探测等各方面领域对全天候全天时定位系统(Real Time Location System, RTLS)的需求也在与日俱增。无线定位技术主要分为室外无线定位技术和室内无线定位技术(邹洪良,2012),室外无线定位技术典型代表是全球导航系统(Global positioning System, GPS),对于视野比较空旷的室外场景,信号比较容易到达,GPS 能提供非常准确的位置信息。但在室内场景中,由于房屋与房屋之间的互相遮挡以及在房屋的内部例如柜子、门窗、柱子、空调以及人员走动等,容易对 GPS 信号产生阻挡,从而不能获得某待定位物体的精准实时定位信息。因此,人们不再满足室外无线定位技术所带来高效便捷的室外位置服务,更加趋向于室内无线定位技术。但室内无线定位技术面临着种种严苛的危机,现如今迫切需要寻找一套高精度低成本的室内无线定位技术,为今后人类的日常室内活动提供高精度、稳定可靠的定位服务。

最近几年,随着室内无线通信定位技术的高速发展,针对如何提高室内定位精度,众多研究人员和机构参与其中,新型室内无线定位技术接连问世,常见的室内无线定位技术有:Wifi 无线通信定位技术、蓝牙无线通信定位技术、超声波无线通信定位技术、ZigBee 无线通信定位技术等,但因室内环境极其复杂,上述室内无线通信定位技术不能稳定提供有效精准实时位置信息。同时,在可分配的频谱资源日趋紧张的情况下,人们对室内无线定位技术的需求却在不断地增加,越来越希望能出现较高精度、极低成本、功耗较小和极高传输率的新一代室内无线定位技术。在这些需求下,超宽带(Ultra-Wide Band, UWB)室内无线定位技术已被众多研究人员所关注,显然已成为室内无线通信定位技术领域的一个研究热门、一颗冉冉升起的新星。相对于其他传统室内定位技术,IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)发布的 802.15.4-2011 超宽带协议标准如果用于定位,由于 UWB 技术特有的高效抗多径时延能力、定位精度可达厘米级、对障碍物具有优秀穿透能力、可操作性简单等优势,迅速脱颖而出成为主流(W.Wanrong et al., 2010)。UWB 技术基于以上优势,可在复杂环境中使用超高数据速率进行精确短距离测距,从而可实现高精度室内定位。

实际上,室内定位环境大多数为复杂环境,对定位精度的影响因素有很多,常见的有非视距误差、多径效应、基站的摆放位置等,如果不能有效消除影响因素,可能

会导致 UWB 室内定位精度偏差过大，甚者出现无法实时准确定位目标的位置坐标。因此，如何减小 UWB 室内定位误差成为了整个超宽带定位系统必需解决的关键问题。针对如何提高 UWB 室内定位精度，国内外科学员所主要关注的是 TDOA(Time Difference of Arrival)室内无线测距算法，因其数学模型简单易懂、数据运算量小（胡雯等，2012）。TDOA 定位算法准确获取物体的即时位置信息的前提是需基站之间满足严格时钟同步，所关注的是如何通过某种规则、协议、时钟同步算法等，在全网中让所有基站共同拥有一个公共时钟。因此，如何解决定位基站时钟不同步的弊端是当今作为提高 UWB 室内定位精度关键所在，这也是本文所需探究的重点内容。

UWB 室内定位技术的研究在中国、特别是在海南省等新兴地区崭新发展形势下有着深远广阔的意义。海南作为海上丝绸之路“一带一路”路线的城市之一，港口运营至关重要，利用 UWB 精确定位技术实施货物全自动运输管理是现代通信技术条件下港口管制的有效手段之一；在安防监控领域，UWB 定位系统适配成手环形式，可以用于监狱人员、社矫人员、审讯室犯罪嫌疑人的全流程管理等；在室内大型场所如飞机场等，UWB 技术可以用于室内精准导航，而 UWB 形成的电子围栏这可以用于人员及物理范围内跟踪；海南昌江核电站、海南海马汽车厂、文昌卫星发射中心等大型企业事业单位在今后必然进入无人工业化操作时代，基于 UWB 的精确定位为无人操作、精准测距提供了必要条件；定位标签一旦嵌入篮球、足球等或可穿戴器具，则可以提升运动训练的质量以及用于赛场违规的判定。

1.2 超宽带技术的国内外研究现状及其应用前景

1.2.1 UWB 的国外发展现状

在射频通信领域中，UWB 室内定位技术作为国内外研究人员长时间研究的一个热点，主要的研究方向是带宽应用和高精度定位等。为了处理困惑定向天线多年的有关传输方向的难题，相关人员提出可利用 UWB 定位技术持续时间极短的脉冲信号来传输数据，因为其无线信道容量可达到几 GHz（夏小凤等，2010）。在 1989 年，美国国防部正式确定脉冲 UWB 定位技术作为 UWB 定位技术标准。13 年后，在严格限制条件下美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）正式批准 UWB 定位技术可在公众通信频段 3.1GHz~10.6GHz 上运行，这一举措象征着 UWB 定位技术民用化，有力地促进了 UWB 定位技术的蓬勃兴起，民用各行业围绕着 UWB 国际定位标准应运而生的各种定位技术方案在制定方面展开激烈的竞争和讨论。UWB 技术的第一个国际标准是多宽带正交频分复用（Multi Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing, MB-OFDM）标准，由国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）在 2007 年 3 月正式批准通过（L.MeI et al., 2011）。从 1990 年开始，国外众多知名高校和国家级中心试验室，例如美国 MIT Lincoln 试验室、Los Alamos 国家试验室、Ohio 州立大学、Georgia 理工学院、英国 RSRE 试验

室等相继对 UWB 定位技术相关课题项目开展了研究 (S.Won-Yong et al., 2010)。世界上兼容 IEEE802.15.4-2011 协议标准的第一款 UWB 集成电路是由爱尔兰 DecaWace 公司研发的 DW1000, 在世界范围上每年销售量可达千万片以上, 其支持厘米级别的精准室内定位精度, 最远通讯距离可达 300m 以及最高通讯能力可达 6.8Mbps。随着时代的进步, 越来越多的著名科研机构和上市公司不断推出自己新型 UWB 产品, 几乎覆盖了各个领域, 有利的推动了 UWB 商业化进程的飞速发展。

1.2.2 UWB 的国内发展现状

国内科研机构、大学等对 UWB 技术的探究起步稍缓慢, 但兴起的趋势非常迅速, 已经把 UWB 精准室内定位技术列入国家级重点研发项目中, 例如为了鼓动各科研机构对 UWB 室内定位技术的积极研究, 2001 年国家“863”规划启动了 UWB 定位技术创新性研究项目; 在 2016 年国家科技部明确要求必须在 5 年内研制室内外无缝链接的混合 UWB 定位系统。为了能更好地支持国家科技需求, 必须对基于 UWB 厘米级精准室内定位技术的 UWB RTLS 系统重点研究开发; 最近几年, UWB 定位技术相关领域的各方面研究已被纳入“十三五”发展规划中, 这标志着 UWB 定位技术在国内发展历程上达到一个新的高度。

国内 UWB 定位技术虽然得到了飞速发展, 但是众多科研机构对 UWB 定位技术的研究大部分还只是停留在理论部分, 而实际商业性产品开发几乎没有, 这引起了国家通信管理局、科技部、工信部、信息产业部的高度重视。为了能改善国内 UWB 商业市场这一窘迫, 除了对其商业产品开发的投入力度逐年加大外, 国家相关部门也在积极筹划, 颁布了一些有利于 UWB 商业化发展的政策, 目的是让有关 UWB 定位技术的科研机构、公司能真正参与其中, 而不再是局限于理论研究。2013 年, 小米集团首次将 UWB 技术同智能音响相结合, 实现了 UWB 技术在家庭智能播放设备上的融入 (周群等, 2018)。2015 年 6 月, 阿尔郎公司首次发布具有跟随功能的智能平衡车, 其内部核心部件是 UWB 芯片, 原理是利用了 UWB 技术阵列单元的特性 (刘建伟等, 2014)。UWB 商业性产品开发国内代表性企业有环旭电子集团、深圳润安、小米 ninebot、清研迅科、遥光等已处于世界范围的前列, 这标志着中国高型性技术企业已在 UWB 定位技术的各方面领域上逐步走向世界前端。虽然国内 UWB 定位技术得到飞速发展, 但是与国外相比实际上还相差甚远, 这现实督促我们必须坚持不懈紧追其后, 才能不断缩小与其的差距。

1.2.3 UWB TDOA 定位技术的发展动态

本文重点研究内容是 UWB TDOA 基础算法的改进和优化, 同时也是 RTLS 定位系统的核心问题之一, 开发一套定位误差较低、成本极低、功耗较小的 UWB 室内定位系统。随着室内定位技术的发展以及商业市场大量需求的提升, UWB TDOA 定位算法以其数学模型简单易懂、定位跟踪性能优越, 吸引了全世界诸多科学家的重点留

意以及对其深入探究,并对 UWB TDOA 定位算法的发展做出了巨大贡献。针对传感器之间信号的低截获率 (Low Probability of Intercept, LPI) 影响 TDOA 定位算法性能的问题,孙飞等人提出了一种快速稀疏 TDOA (Sparse TDOA) 定位算法,将传感器接收到的空间信号变为其在频域上的稀疏值和时延,简化了传感器之间的计算方式,提升了数据共享率,与传统的 TDOA 算法相比,提高了定位性能(孙飞,2015)。黄越洋等人提出了一种基于迭代的约束加权最小二乘法 (Constraint Weighted Least Squares, CWLS) 方法来消除噪声影响下的 TDOA 与到达频率差 (Frequency Difference of Arrival, FDOA) 联合定位方式,拥有较低的数据运算量,适用于全天时定位,其在一些温和条件下,提出的算法甚至可以收敛到全局最优解,达到克拉美罗下界 (Cramer-Rao lower bound, CRLB) 精度(黄越洋等,2017)。

科研人员不再将目光局限于 UWB TDOA 基础算法方向的探究,而是愈加向着 UWB TDOA 联合定位算法方向的探究。除此之外,还有 UWB 通信滤波方式、无线时钟同步算法、复杂室内环境下的抗多径时延干扰和消除非视距传播误差方法的研究,UWB 室内定位精度性能的评测,以及各种 UWB 室内测试数据的融合算法的研究等。大部分探讨主要集中在 UWB TDOA 测距算法的优化和改进上,其最具有象征性的如:郭文娟等人提出对 TDOA 数据进行残差分析,将 Fang 算法获得的估计值作为泰勒级数的开始位置值,构成 Fang-Taylor 级数联合方法来估算 NLOS 非视距传播情形下的位置测量值,该方法充分利用冗余的信息,有效提升了定位精度,但需要用更多的通信传感器来提高定位性能(郭文娟等,2010)。陈斌等人针对传感器节点在位置感知服务中的准确定位问题,提出使用 TDOA 和神经网络联合进行精确节点定位的算法,在一定程度上提高了节点定位的精度,但此结果仅适用于 LOS 视距传播的情形下,在 NLOS 非视距传播的情形下并不适用(陈斌等,2016)。张春梅等人提出了一种用于 TDOA 定位区域扩展的统一模型,不再需要判断移动标签与定位基站的远近进行选取,并用高斯-牛顿迭代算法进行最大似然估计,且该模型没有阈值效应;但在实践中,由于 TDOA 信号获取的限制,若信噪比不足,该模型及算法的阈值仍然可能存在(张春梅等,2013)。

最近几年,各国科研人员通过自身和团队的不懈努力,研究出许多基于标准 TDOA 定位算法的改进和优化算法以及开发出许多稳定可靠的 UWB TDOA 定位系统。在一定程度上,每种改进和优化算法都解决了标准 TDOA 定位算法在某方面上的问题。同时,又因为标准 TDOA 自身存在的一些问题使得改进和优化算法存在局限性,只能针对特定的应用场景使用不同的算法来解决不同的实际问题,目前还没有任何一种改进和优化算法能做到适用于各种应用场景和室内环境。

1.3 本文研究内容及内容安排

本论文以 Hainan EVK RTLS 3.0 硬件平台为辅,以提高 UWB 室内定位精度为目的,深入研究 TDOA 的无线时钟同步协议和 UWB 室内定位网络扩展两个主要内容。

首先,对传统无线时钟同步协议的缺陷,提出了一种结合神经网络的时钟同步 TPSN 协议;然后在基于单蜂窝场景的基础上,验证 UWB 室内定位网络扩展的可行性。本文分为六个章节,具体安排如下:

第 1 章 简单介绍超宽带技术的研究背景,对其国内外研究现状做了叙述,然后对本文的基础算法 UWB TDOA 定位算法的发展动态做了介绍。

第 2 章 对 UWB 室内定位技术进行整体概述,重点介绍基于 IEEE 802.15.4a 协议的 UWB 信道模型。

第 3 章 首先介绍了 UWB 室内定位算法(RSSI、AOA、TOA、TDOA 等);然后简单介绍影响 UWB 室内定位精度的三大重要因素;最后介绍了各种 UWB 定位性能评价标准。

第 4 章 TPSN 协议是典型双向同步交换协议,针对传统 TPSN 协议无法修正时钟漂移的缺陷,结合神经网络算法,提出一种改进的无线时钟同步 TPSN 协议,并对其建立了相应的系统模型。

第 5 章 先对不同的应用场景根据实际定位需求划分成各个子区域,然后对在不同子区域的待测移动标签采用 TDOA 测距算法来实际测量 UWB 室内定位的精度,来验证 UWB 定位网络扩展的可行性。

第 6 章 对本文进行整体总结,在研究过程中对所出现的问题或没有考虑到的问题提出了展望,希望能在今后的研究工作中重点解决。

2 UWB 室内定位概述

2.1 UWB 基本概念和定义

实际上，UWB 定位技术并不是一项全新室内无线通信技术。早在 100 多年前，发明者马可尼设想可以利用电磁波进行远距离通信，而不需要线路作为载体。1898 年马可尼首次尝试短距离发射电磁波，翌年他发射的电磁波成功穿越了英吉利海峡，马可尼所发射的电磁波比一般电磁波具有更宽的带宽，只是在当时这种电磁波并不称为超宽带。直到 1960 年前后，这种电磁波才有了现代意义上的别名：超宽带电磁波，通常习惯被称为脉冲电磁波（Impulse Radio, IR）。1973 年，美国著名 Sperry 研究所的罗斯博士是最早获得相关 UWB 技术在室内无线通信系统中应用的专利权（Hosseini-Asl et al., 2016），进一步推动了超宽带室内无线通信系统的飞速发展，标志着超宽带室内无线通信系统在其发展历程上达到了一个全新的高度。在 20 世纪 90 年代初，UWB 定位技术主要被美国军方所掌控，其为美国军方的雷达通信和军事设备移动通信系统服务。到了 20 世纪 90 年代末，民众不满意 UWB 定位技术只为军方服务，极力要求需将 UWB 定位技术开放于民用。2002 年，美国联邦通信委员会 FCC 迫于压力正式公布：UWB 定位技术不再只服务于军方，且为 UWB 定位技术民用化提供可用频率覆盖 3.1G~10.6G 共 7.5G 的免授权频段(L.Chung-Hsin et al., 2010)，UWB 信号免授权频段与其他无线信号频段之间的关系如图 1 所示。

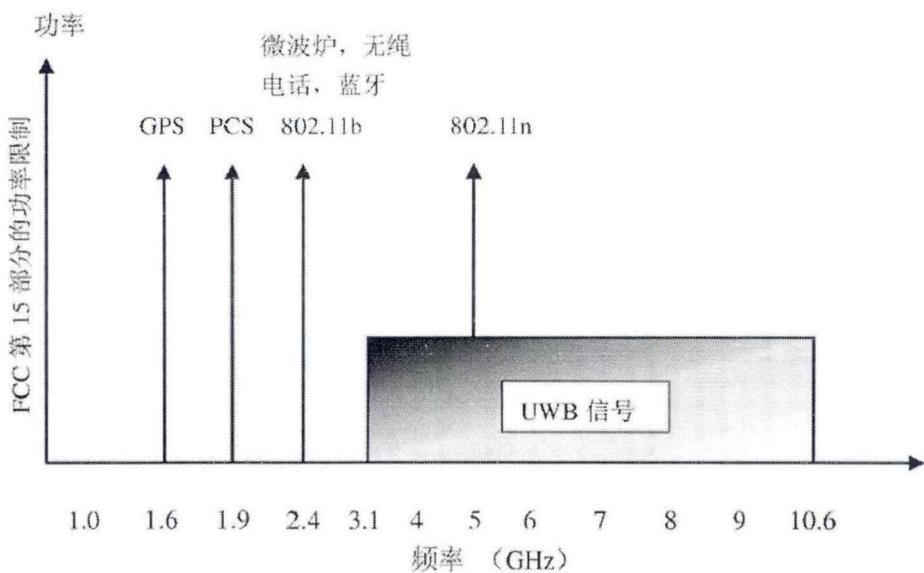


图 1 UWB 信号免授权频段与其他无线信号频段之间的关系

Fig.1 Relationship between UWB signal unlicensed band and other wireless signal bands

美国联邦通信委员会 FCC 对 UWB 定位技术的标准定义是：电磁波波形的绝对带宽大于 500MHz，且电磁波波形的相对带宽大于 20~25%的无线移动通信系统。表达式如下：

$$f_c = \frac{f_H + f_L}{2} \tag{2-1}$$

式中， f_c 为中心频率， f_H 和 f_L 分别为电磁波信号下降 10dB 时对应的频率上限和频率下限。

$$B = f_H - f_L \geq 500MHz \tag{2-2}$$

$$B_f = \frac{B}{f_c} = \frac{f_H - f_L}{2(f_H + f_L)} \geq 20\% \tag{2-3}$$

其中， B 为电磁波波形的绝对带宽， B_f 为电磁波波形的相对带宽。除此之外，FCC 还规定，任一电磁波信号在-10dB 辐射点的绝对带宽如果大于 500MHz，不管该电磁波信号的相对带宽有多宽，都可将其视为超宽带信号。

表 1 电磁波信号的带宽比较

Table1 Comparison of bandwidth of electromagnetic wave signals	
电磁波波形的 B_f 或 B	
窄带	$B_f \leq 1\%$
宽带	$1\% \leq B_f \leq 20\%$
超宽带	$B_f \geq 20\%$ 或 $B \geq 500MHz$

由美国联邦通信委员会 FCC 对标准 UWB 技术规定可知，UWB 技术可使用的频段范围为 3.1~10.6GHz，共 7.5GHz 免授权频段，其带宽是相当的宽。在此频段范围内，包括了大容量微波中继通讯(3.6-4.2GHz)、大容量微波中继通讯(5.85-8.5GHz)、数字通讯、卫星通讯等重要移动通讯频段（Zhang et al., 2015）。如果不对 UWB 移动通信系统的辐射功率谱密度加以严格限制，那么它会对现存用户已申请的频段造成非常严重的干扰和影响。为此，美国联邦通信委员会 FCC 对 UWB 脉冲信号的辐射功率谱密度也制定了一系列的规则，图 2 和图 3 分别为在室内环境和室外环境下超宽带信号在每个重要频段点上的等效全向辐射功率谱密度值。

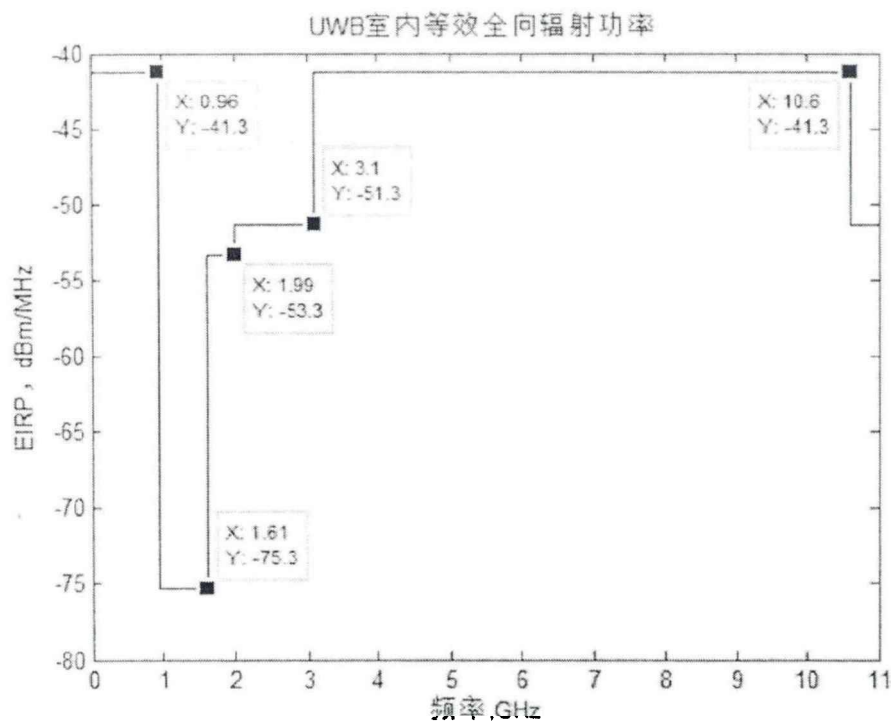


图 2 在室内环境下对 UWB 脉冲信号辐射功率的限定

Fig.2 Limitation of UWB pulse signal radiated power in indoor environment

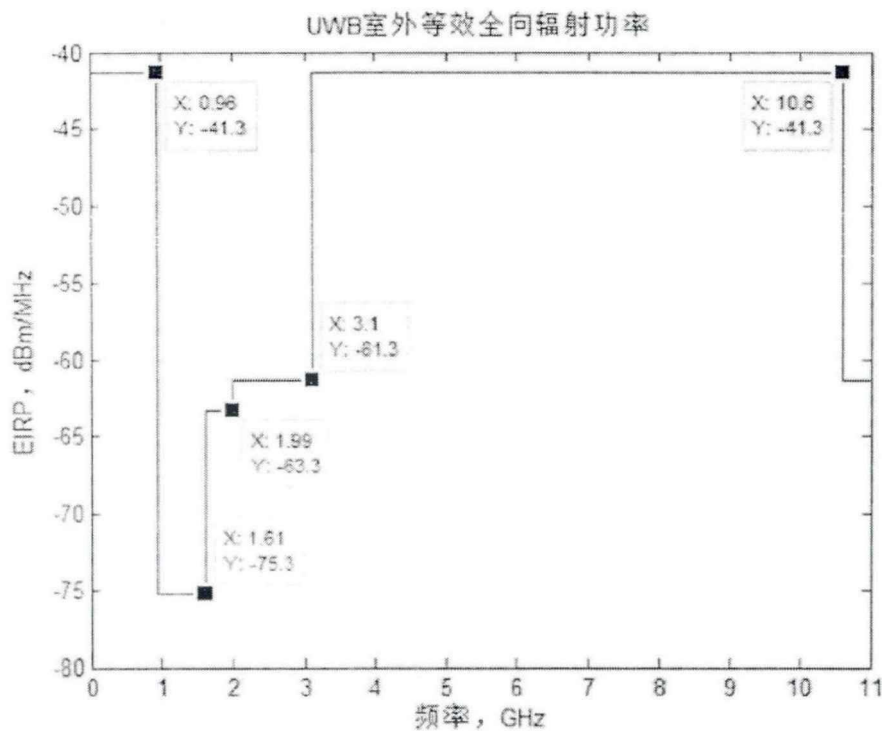


图 3 在室外环境下对 UWB 脉冲信号辐射功率的限定

Fig.3 Limitation of UWB pulse signal radiated power in outdoor environment

2.2 UWB 实现方式和产生

2.2.1 超宽带系统的脉冲信号

UWB 室内无线定位系统能够实现厘米级别的高精度定位，全靠持续时间极其短的脉冲信号来进行数据的传输。对于 UWB 定位系统来说，这与传统的正弦载波有很大的区别，因此脉冲波的正确选择对 UWB 定位系统能否实现厘米级定位至关重要。为了能有利于 UWB 脉冲信号的长距离通信，且能增加信号的可识别性，规定超宽带脉冲波是不能含有直流分量，这是在理想的状况下。同时，还应该使超宽带脉冲波的功率谱接近于平坦，目的是为了提高 UWB 脉冲信号的频谱利用率。常见的脉冲波有：高斯脉冲、高斯脉冲的导数、厄米特脉冲等（李谦，2014）。

高斯脉冲的表达式如下：

$$f(t) = \pm \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (2-4)$$

如果 $\sigma^2 = \tau^2/4\pi$ 成立，则有

$$f(t) = \pm \frac{\sqrt{2}}{\tau} e^{-\frac{2\pi^2}{\tau^2}} \quad (2-5)$$

式中 τ 为高斯脉冲的影响因子，高斯脉冲的宽度和幅度随着 τ 的增加分别逐渐变宽和逐渐增大。经常也将高斯脉冲的各阶导数作为 UWB 脉冲发射信号来传输数据。

2.2.2 UWB 信号的产生

标准 UWB 脉冲信号的实现方式有两种：无载波调制通信和有载波调制通信。脉冲无线电 IR 是无载波调制通信的典型代表，基于单载波的 DS-CDMA(Direct Sequence CDMA)和基于多载波的 MBOA(Multi-Band OFDM Alliance)是有载波调制通信的典型代表（G.Bo et al., 2009）。

脉冲超宽带定位系统(IR-UWB)是一种无载波调制的 UWB 室内无线定位系统，数据的稳定传输是以持续时间为纳秒级的窄脉冲信号作为载体来进行的（Zhong et al., 2016）。在该系统中，待发射的信源信息经过扩频处理后直接发射，将在接收端接收到的模板信号进行解调，从而获得完整的信源信息。通常由高斯脉冲及其各阶导数形成待发射的信源信息，由此可知信源信息的带宽可以被调节。二进制移相键控（Binary Phase Shift Keying, BPSK）、脉冲位置调制（Pulse Position Modulation, PPM）以及脉冲幅度调制（Pulse Amplitude Modulation, PAM）等是 IR-UWB 的各种常用调制方式（王义波，2017）。美国电子与电气工程师协会 IEEE 发布的超宽带 802.15.4a 协议标准中，明确规定将 IR-UWB 作为物理层的主要标准。目前许多短距离的数据传输都是采用这种方法，通常将其作为超宽带室内无线定位系统的规范，因为

IR-UWB 使得超宽带信号拥有良好的时间分辨率特性。

目前基于有载波调制通信的方式主要有 DS-CDMA 和 MBOA 技术。DS-CDMA 称为直接序列码分多址（Jun et al., 2012），在发射端为了获得经扩频处理后的发射信号，需要先分别对信源信号和地址码进行分开处理，接收端通过使用相同地址码对信源信号解扩，其具有以下优势：容错性高、覆盖范围广、复杂性低、干扰影响小等。MBOA 称为多频带正交频分复用，MBOA-UWB 的频带划分成了 14 个频段，UWB 信号可以在多频段之间跳转（Saadon et al., 2013）。MBOA 技术的频带利用率极高，因为其采用多频带的方式进行数据传输，可将超宽带脉冲信号搬移到绝对理想的频段上。现今，DS-CDMA 和 MBOA 技术相互竞争发展，但各自又不会向对方妥协，这有利于有载波调制的 UWB 长距离通信的发展与进步。DS-CDMA 技术先于 MBOA 技术问世，处于绝对领先竞争地位，随着时间的推移，DS-CDMA 技术的发展处于缓慢状态；MBOA 技术作为后起之秀，其具有以下特点：功耗小、体积更小、成本低、频带利用率极高、抗多径时延能力突出，有着赶超 DS-CDMA 技术的发展势头。

表 2 有载波调制和无载波调制 UWB 通信方案的比较

Table2 Comparison of UWB communication schemes with carrier modulation and carrierless modulation

有载波调制的 UWB 通信方案		无载波调制的 UWB 通信方案
电路结构	简单	复杂
产品成本	极低	较高
功率损耗	极低	较高
频谱利用率	极低	极高
定位性能	高	较高
距离	短距离数据传输	长距离数据传输

2.3 UWB 无线特性

2.3.1 UWB 技术的特点

相比于其他传统定位技术，超宽带定位技术在军事战略、航天航空、民用室内、商业产品上具有重大发展潜力。以下是超宽带技术的一些主要特点：

（1）超宽带室内无线定位系统结构较简单

传统移动通信系统的数据传输是需要用载波来发射信源信号，而超宽带移动通信系统的数据传输是通过纳秒级的脉冲信号来进行通信，因此 UWB 系统无需使用正弦载波。在发射端只需用脉冲波激励天线，就能将信源信号发射出去，可知 UWB 发射器的价格十分低廉，因为不需要考虑变频、功率放大以及混频技术。同样的，UWB

接收器相比于传统接收器，少了中频、射频电路。综上所述，基于 UWB 系统的硬件设备体积会更小、商业成本会更低。

(2) 数据传输速率极快

由香农公式可知，超宽带室内无线定位系统的容量与绝对带宽之间的关系如下：

$$C = B \log_2(1 + S_N) \quad (2-6)$$

式中， C 为 UWB 系统容量， B 为绝对带宽， S_N 为信噪比。UWB 系统用于室内定位时，其数据传输距离一般在 10 米以内，假设信噪比 S_N 固定不变，可知 UWB 系统容量与绝对带宽成正比。换句话说，UWB 系统可以用极宽的带宽来换取数据传输速率的提升，一般 UWB 带宽大于 500MHz 时，就可以实现极快的传输速率。

(3) 安全性高

超宽带脉冲信号的带宽极其宽，可达几 GHz。对于一般移动通信系统来说，其发射功率较低，因此可将 UWB 信号看成白噪声信号，易被其他噪声和干扰信号所覆盖，很难被电子设备所监测。UWB 信号在军事战略方面具有巨大潜力，一般很难被敌军窃听和捕获，确保整个军事系统的安全。

(4) 功耗低

超宽带脉冲信号的持续时间为纳秒级，通常在 0.1ns 到 1.0ns 之内上下浮动，其占空比极低。UWB 系统用于室内功耗仅为 1-2 mW 之间，甚者低至 μW 级，只需提高较低电源功率就能维持整个 UWB 系统的正常运作。

(5) 频谱资源可共享

FCC 规定超宽带脉冲信号的发射功率仅为 -41.3dBm/MHz，如此低的发射功率能有效避免对其他移动通信系统造成干扰。今天，可用的频谱资源逐渐告急，如果将 UWB 系统用于室内定位，将能实现频谱资源共享。这一特性使得 UWB 技术在灾难救援、特殊空间探测以及军事间谍侦探等领域具有无可比拟的优势。

(6) 拥有优秀穿透能力、对多径分量的分辨极强

超宽带移动通信系统很容易在时域上将多径信号分离，因为其采用的是扩频通信技术，能使产生的窄脉冲信号的带宽只有纳秒级或亚纳秒级 (Long et al., 2016)。UWB 系统相比于其他通信系统来说，其抗多径时延能力要更强一些，因为 UWB 脉冲信号对多径分量有良好的分辨能力。与具有相同带宽宽度的传统无线电磁波信号对比，超宽带脉冲信号拥有更强的穿透能力，UWB 信号能解决传统无线电磁波信号不能在大山深处进行数据传输的问题，且能实现隔墙成像，积极地被应用于地下室内停车场定位，能实时获取汽车的动态位置。

(7) 室内定位精度高

UWB 脉冲信号的可持续时间为 ns 级别，与 GPS 技术的米级定位精度相比，在

理论上可使超宽带移动通信系统的定位精度达到厘米级别，广泛使用于工业领域，如监控高空蜘蛛人的生命财产安全；医疗监护领域，如全天候、实时监视病人的行走轨迹等。

通过以上对超宽带技术特点的分析，可知超宽带技术具备短距离数据通信和高精度室内定位以及高效实时性的三重功能，在各个实际应用领域中 UWB 技术具有深远的意义。

2.3.2 UWB 技术的传播特性

UWB 脉冲信号的传播特性主要有两种情形：视距传播（Line of Sight, LOS）和非视距传播（Non-Line of Sight, NLOS）。LOS 视距传播是指定位基站与待测移动标签的数据传输方式为直线传输，在其传输路线上没有任何遮挡物进行遮挡。NLOS 非视距传播虽然定位基站与待测移动标签的传输路线也是直线传输，但是会有遮挡物对其遮挡，此时超宽带脉冲信号会经过穿透、反射、衍射等方式，以多条路径的形式最终到达待测目标。

2.4 IEEE 802.15.4a UWB 信道模型

UWB 信号在无线信道中传输数据时，较易受到室内外环境的干扰。为了能较好的研究 UWB 信号的传播特性，必须对超宽带信道模型进行准确的建模。IEEE 802.15.4a UWB 信道模型的特点：支持长距离的数据传输、定位精度高、功率损耗极低、数据传输速率较低等。该信道模型按初始条件的不同在总体上又可以细分为 4 种信道模型，2-10GHz 的标准 UWB 信道模型、2-6GHz 的身体周围信道模型、100-900MHz 的室内办公环境信道模型以及 1MHz 载频的窄带信道模型（吴魁等，2017）。本论文主要讨论分析 2-10GHz 的标准 UWB 信道模型，该信道模型按应用环境的不同可以划分为 4 种环境模型，室内居住环境模型、室内办公环境模型、户外环境模型以及工业环境模型，以上 4 种环境模型按照视距传播和非视距传播情形又可以细分为 8 种（宋焕生等，2018），见表 3。接下来将重点分析这些环境模型是如何具体实现的，将从以下三个模型展开介绍。

表 3 IEEE 802.15.4a 标准 UWB 信道模型
Table3 IEEE 802.15.4a standard UWB channel model

应用环境		距离/频率
CM-1 信道	室内环境 LOS 视距传播	7-20m
CM-2 信道	室内环境 NLOS 非视距传播	10GHz
CM-3 信道	室内办公环境 LOS 视距传播	3-28m
CM-4 信道	室内办公环境 NLOS 非视距传播	2-8GHz
CM-5 信道	户外环境 LOS 视距传播	5-17m
CM-6 信道	户外环境 NLOS 非视距传播	3-6GHz
CM-7 信道	工业环境 LOS 视距传播	2-8m
CM-8 信道	工业环境 NLOS 非视距传播	/

2.4.1 UWB 路径损耗模型

上述可知，UWB 信号的可持续时间为 ns 级别，带宽很宽。此时不能像传统无线通信系统一样，忽略频率对路径损耗的影响，即 UWB 路径损耗函数即与距离有关，也与频率有关（屠晓东，2012）。UWB 路径损耗函数表达式如下：

$$PL(f,d) = PL(f)PL(d) \tag{2-7}$$

UWB 路径损耗函数与频率、距离之间对应关系分别如下：

$$\sqrt{PL(f)} \propto f^{-K} \tag{2-8}$$

$$PL(d) = PL_0 + 10n\log_{10}(\frac{d}{d_0}) + S \tag{2-9}$$

其中， f 为频率， K 为 f 对 UWB 路径损耗函数 $PL(f,d)$ 的影响因子； d 为脉冲信号发射源与接收源之间的距离； d_0 为参考距离，一般设为 1m； PL_0 为参考点处的路径损耗； n 为 UWB 路径损耗衰减指数； S 为因阴影效应所产生的路径损耗，其服从高斯分布。

2.4.2 UWB 多径时延模型

超宽带脉冲信号在无线信道中传播存在分簇到达的现象，IEEE 用冲激响应表达式来描述 UWB 多径时延模型：

$$h(t) = \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K \alpha_{k,l} e^{(j\phi_{k,l})\delta(t-T_l-\tau_{k,l})} \quad (2-10)$$

式中， $\alpha_{k,l}$ 为 UWB 多径增益系数，表示第 l 簇中第 k 径的幅度增益； T_l 为第 l 簇的基准时延； $\tau_{k,l}$ 为第 l 簇中第 k 径相对于基准时延 T_l 的时延；相位 $\phi_{k,l}$ 在 $[0, 2\pi)$ 上服从均匀分布（孙顺，2017）。

L 为簇的数量，服从泊松分布，UWB 多径时延模型受其影响较大，用均值 $\bar{L}$ 来描述 UWB 信号分簇到达的分布特性：

$$pdf_l(L) = \frac{(\bar{L})^L e^{(-\bar{L})}}{L!} \quad (2-11)$$

簇的到达时间分布函数如下：

$$p(T_l | T_{l-1}) = \Lambda_l e^{[-\Lambda_l(T_l - T_{l-1})]} \quad l \geq 0 \quad (2-12)$$

式中， Λ_l 为第 l 簇的到达速率。

某簇内各多径分量的到达时间分布函数随应用场景的不同而不同（苑令诩，2015），具体分为两种情形，如下：

（1）户外和工业环境：

$$p(\tau_{k,l} | \tau_{(k-1),l}) = \lambda \exp[-\lambda(\tau_{k,l} - \tau_{(k-1),l})] \quad k \geq 0 \quad (2-13)$$

（2）室内和室内办公环境：

$$p(\tau_{k,l} | \tau_{(k-1),l}) = \beta \lambda_1 \exp[-\lambda_1(\tau_{k,l} - \tau_{(k-1),l})] + \dots \\ (\beta - 1) \lambda_2 \exp[-\lambda_2(\tau_{k,l} - \tau_{(k-1),l})] \quad k \geq 0 \quad (2-14)$$

式中， β 为混合频率， λ_1 和 λ_2 为某簇内某多径分量的到达速率。

2.4.3 UWB 小尺度衰落模型

UWB 小尺度衰落的幅值服从 Nakagami 分布（李如平等，2016）：

$$pdf(x) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} x^2\right) \quad (2-15)$$

式中， $\Gamma(m)$ 为伽玛函数； Ω 为某簇的平均能量； m 为随机变量，服从对数正态

分布，且满足：

$$\mu_m(\tau) = m_0 - k_m \tau \quad (2-16)$$

$$\sigma_m(\tau) = \hat{m}_0 - \hat{k}_m \tau \quad (2-17)$$

其中， μ_m 和 σ_m 分别为对数正态分布的均值和标准差。

2.5 本章小结

本章主要对 UWB 室内定位技术进行整体概述，首先介绍 UWB 技术的基本概念和定义，然后介绍 UWB 技术的实现方式，并对 UWB 技术的特点重点介绍，最后介绍基于 IEEE 802.15.4a UWB 信道模型，对 8 种环境模型如何实现做了具体分析。

3 UWB 技术的各种常用定位算法

3.1 UWB 定位算法

3.1.1 RSSI 定位算法

基于接收信号场强强度的定位算法（Receive Signal Strength Indication, RSSI）是指在已知 UWB 脉冲信号的发射功率和 UWB 信道模型的基础上（傅艺绮等，2017），结合不同应用场景下的路径损耗模型，且通过计算获得接收信号的场强强度值，进而能估算出定位基站与待测移动标签之间相距的距离，最后通过该距离值完成室内定位。在二维坐标系上，需要事先知道三个或三个以上已知位置坐标的接收机(定位基站)，通过接收机来接收并测量待测移动标签所发射的场强强度值，从而获得待测移动标签的真实位置，可通过添加接收机的数量来提高 UWB 室内定位精度。如图 4 所示。

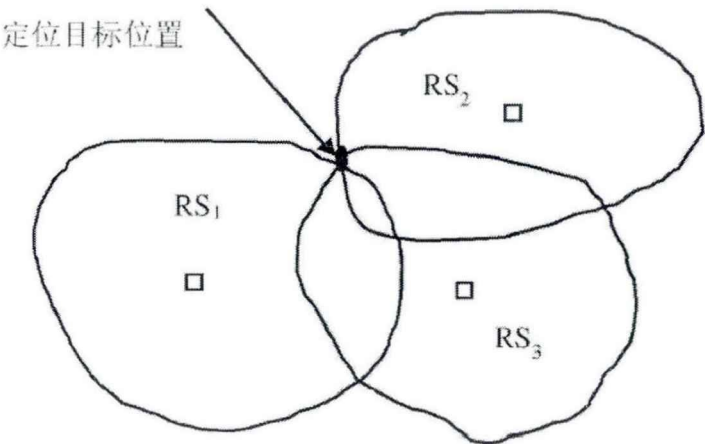


图 4 接收信号的场强强度分布图

Fig.4 Field strength intensity map of the received signal

在图 4 中，三个接近圆形的线圈代表了场强强度相同的位置，即该位置为待测移动标签的真实位置。接收机接收到信号的功率函数如下：

$$\bar{P}(d) = P_0 - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \tag{3-1}$$

式中， d_0 为参考距离，一般设为 1m； d 为信源与 d_0 相距的距离； $\bar{P}(d)$ 和 P_0 分别为 d_0 和 d 处的平均接收功率； n 为 UWB 路径损耗衰减指数，其大小随应用环境的不同而变化。在室内环境中，UWB 脉冲信号在传播路径上不可避免地会受到衍射、反射等干扰，对接收机接收到的信号会产生小尺度衰落现象（李力等，2017）。即：

$$\overline{P}(d)=\frac{1}{T}\int_0^T|r(t,d)|^2dt \tag{3-2}$$

式中， $r(t,d)$ 为在 d 处接收机接收到的信号。与此同时，在接收到的信号中阴影效应不可以被忽略，又可知阴影效应服从对数正态分布，即实际的接收信号的功率函数为：

$$10\log_{10}P(d)\sim N(\overline{P}(d),\sigma_{sh}^2) \tag{3-3}$$

式中， σ_{sh}^2 为对数正态分布的方差。可以使用克拉美罗下界（Cramer-Rao Lower Bound, CRLB）来界定距离的估计（史昕等，2014）。即：

$$\sqrt{\text{Var}\{\hat{d}\}}\geq \frac{\ln 10\sigma_{sh}}{10n}d \tag{3-4}$$

式中， $\hat{d}$ 为 d 的无偏距离估计，由式(3-4)可知，UWB 路径损耗衰减指数 n 越小，克拉美罗下界越大。简单地说，RSSI 定位算法的性能随着定位基站与待测移动标签之间距离的增大而变差（陈东成，2015）。只要获得与应用环境相对应的 n 和 σ_{sh}^2 ，见表 4，就能通过上述 RSSI 定位算法求得待测移动标签的真实位置。

表 4 UWB 应用环境信道模型的参数

Table4 Parameters of UWB application environment channel model

应用环境	指数 n	方差 σ_{sh}^2
室内环境 LOS 视距传播	1.79	2.22
室内环境 NLOS 非视距传播	4.58	3.51
室内办公环境 LOS 视距传播	1.63	1.9
室内办公环境 NLOS 非视距传播	3.07	3.9
户外环境 LOS 视距传播	1.76	0.83
户外环境 NLOS 非视距传播	2.5	2
工业环境 LOS 视距传播	1.2	6
工业环境 NLOS 非视距传播	2.15	6

对表 4 分析， n 和 σ_{sh}^2 随着应用环境的不同而发生改变，在 NLOS 非视距传播情形下，其将会发生严重的恶化。在实际应用中，UWB 脉冲信号会受到电磁波的干扰、UWB 信道参数会随着应用环境的变化而改变，会导致 UWB 室内定位性能下降，定位误差增大。在一些要求高精度定位的室内环境中，RSSI 定位算法并不能很好地满

足。

3.1.2 AOA 定位算法

基于信号达到角度的定位算法（Angle of Arrival, AOA）是指通过测量定位基站与待测移动标签之间的角度来实现定位（林晓林等，2018）。一般需要事先知道两个或两个以上已知位置坐标且共线的定位基站，先选取某方向作为定位基站的基准方向，然后待测移动标签发射信源信号，定位基站通过测量信号的达到角度作射线，两条射线的交点即为待测移动标签的真实位置，如图 5 所示。

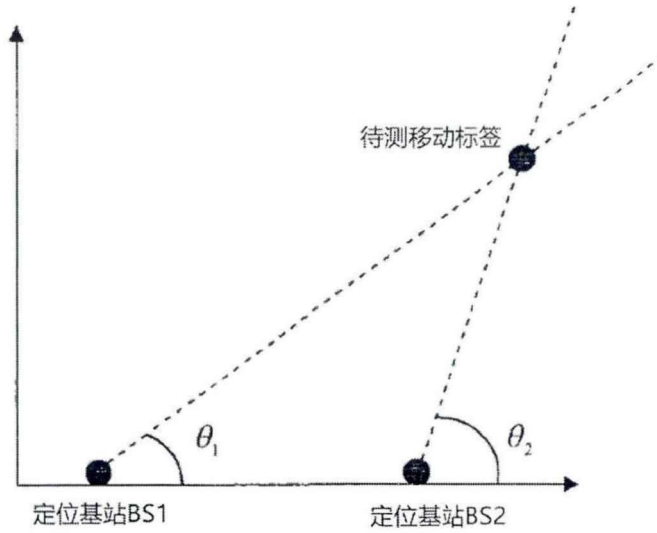


图 5 基于二维坐标系的 AOA 定位算法原理图

Fig.5 Schematic diagram of AOA positioning algorithm based on two-dimensional coordinate system

设定位基站 BS_1 和 BS_2 的真实位置分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ， (X, Y) 为待测移动标签 A 的未知坐标，虚线为信源信号的传输路径，选取 X 轴方向作为定位基站的基准方向，通过测量 A 达到 BS_1 和 BS_2 的角度分别为 θ_1 、 θ_2 ，则待测移动标签 A 的未知坐标 (X, Y) 由下式获得：

$$\begin{cases} \tan(\theta_1) = \frac{Y - y_1}{X - x_1} \\ \tan(\theta_2) = \frac{Y - y_2}{X - x_2} \end{cases} \quad (3.5)$$

注： BS_1 、 BS_2 和 A 不能三者共线，否则方程组(3-5)无解，只能寻找其他定位基站来求解待测移动标签的位置。室内定位环境大多数为复杂环境，UWB 脉冲信号在传播过程中会产生多径分量，多径分量会对 AOA 定位算法带来干扰，使得 UWB 室内定位精度严重下降。为此，定位基站大多配备方向性极强的智能天线阵列，但是智

能天线会使得 UWB 定位系统的复杂性增强, 商业成本提高。综上所述, AOA 定位算法的实现是基于阵列天线来完成的, 因此并不适用于 UWB 室内定位技术, 但由于 UWB 信号拥有良好的多径分辨能力, 其广泛应用在军事防空雷达等领域。

3.1.3 TOA 定位算法

基于 TOA 的测距算法 (Time of Arrive, TOA) 是指通过测量待测移动标签到定位基站之间的信号到达时间 (王信等, 2017), 然后乘以光速 c (信号在真空中传播的速度) 估计出待测移动标签到定位基站之间的距离, 通过多个距离公式组成的距离方程组来求解待测移动标签的实际位置。在测量过程中, 如果不存在人为误差, 则见图 6。

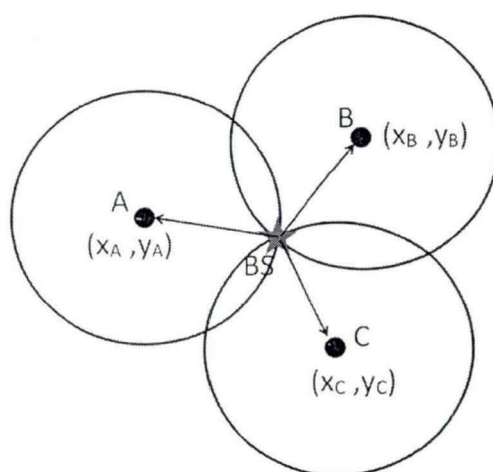


图 6 TOA 测距算法原理图

Fig.6 TOA ranging algorithm schematic

如图 6 所示, A 、 B 、 C 为定位基站, 其位置坐标 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 、 (x_C, y_C) 事先已知, 通过估计待测移动标签 BS 到各个定位基站的到达时间 t_A 、 t_B 、 t_C , 可知待测移动标签到定位基站的直线距离估计满足 $d_i = c \times t_i$ 。以各定位基站为圆心, 分别以 d_A 、 d_B 、 d_C 为半径画圆, 三圆会相交于一点, 该点即为待测移动标签 BS 的未知坐标 (X, Y) 。由两点间距离公式可知:

$$\begin{cases} (x_A - X)^2 + (y_A - Y)^2 = d_A^2 = (c \times t_A)^2 \\ (x_B - X)^2 + (y_B - Y)^2 = d_B^2 = (c \times t_B)^2 \\ (x_C - X)^2 + (y_C - Y)^2 = d_C^2 = (c \times t_C)^2 \end{cases} \quad (3-6)$$

由式(3-7)可解出待测移动标签的实际位置 (X, Y) :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_A - x_c) & 2(y_A - y_c) \\ 2(x_B - x_c) & 2(y_B - y_c) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_A^2 - x_c^2 + y_A^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_A^2 \\ x_B^2 - x_c^2 + y_B^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_B^2 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

TOA 定位算法要求各节点之间必须满足严格时钟同步，否则会严重影响 UWB 室内定位精度。为了满足这一要求，各定位基站和待测移动标签需多次重复发送同步消息，会使得 UWB 室内定位系统功耗增加，从而影响系统的稳定性和可靠性，因此 TOA 定位算法并不适用于多标签定位中。如果测量过程中存在人为误差，此时公式 (3-6) 不会收敛，三圆不会相交于同一点，会出现图 7 所示的阴影部分，这也会严重影响 UWB 室内定位精度。

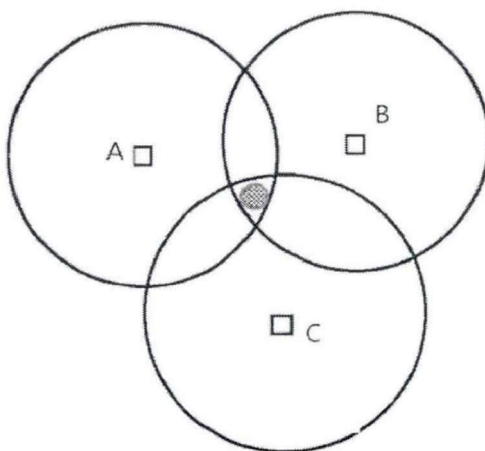


图 7 存在人为误差的 TOA 模型

Fig.7 TOA model with human error

3.1.4 TDOA 定位算法

与 TOA 定位算法不同的是，TDOA 定位算法通过测量待测移动标签所发射的信号源信号到各个定位基站之间的达到时间差，乘以光速 c 得到待测移动标签与各个定位基站之间的距离差，从而实现定位（罗勃等，2017）。在二维坐标系上，至少需要三个或三个以上的定位基站才能准确获取待测移动标签的未知坐标，如图 8。同理，在三维坐标系上，只需要多增加一个定位基站就可以构建出三个双曲线方程。通常，在 TDOA 定位算法中可以通过适当增加定位基站的数量，利用冗余信息来提高 UWB 室内定位精度。但如果只一味地增加定位基站的数量，反而会使 UWB 室内定位精度有所下降（辜阳等，2017）。

TDOA 定位算法具体实现过程：先随意选取一个定位基站作为主基站，其余为从基站；然后在双曲线数学模型上，分别让主基站和从基站作为双曲线的左焦点和右焦点，可知双曲线上的某点到两个焦点之间的距离差即为待测移动标签到两个定位基站之间的距离差；最后多条双曲线会相交于同一点，该点即为待测移动标签的未知坐标。

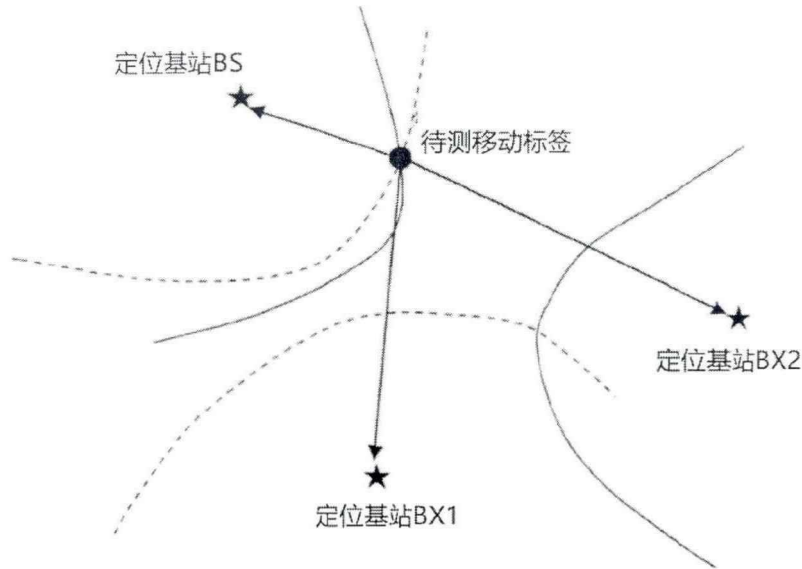


图 8 TDOA 定位算法的数学模型

Fig.8 Mathematical model of TDOA localization algorithm

如图 8 所示， BS 、 BX_1 、 BX_2 为定位基站，其位置坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 事先已知，其中 BS 为主基站， BX_1 、 BX_2 为从基站。设待测移动标签 A 到各个定位基站的距离为 R_i ，距离差公式如下：

$$R_{i,1} = (t_i - t_1) \times c = R_i - R_1 \quad (3-8)$$

式中， $R_{i,1}$ 为待测移动标签到定位基站 i 与到定位基站 1 的距离差， t_i 为定位基站 i 的 TOA 估计值，TDOA 定位算法的数学模型如下：

$$\begin{cases} \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ = (t_2 - t_1) \times c = R_2 - R_1 \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ = (t_3 - t_1) \times c = R_3 - R_1 \end{cases} \quad (3-9)$$

待测移动标签的未知坐标 (x, y) 可由式(3-9)求得。

TDOA 定位算法具有以下优势：一、只要求各定位基站满足严格时钟同步，定位基站之间实现时钟同步比较容易，具体实现过程将在第四章详细介绍。二、待测移动标签只需向定位基站发送一次信息报文就能实现定位，使得 UWB 室内定位系统的功率损耗有所降低，有利于增强系统的稳定性与可靠性。综上所述，TDOA 定位算法比较适合于 UWB 室内定位，且能获得较高的室内定位精度。本论文对传统无线时钟同步协议的改进主要是以 TDOA 定位算法为基础。

3.2 影响 UWB 定位精度的主要来源

3.2.1 多径效应

室内环境大多数为复杂环境，UWB 脉冲信号在传输过程中容易受到墙体、门窗、桌椅等干扰，使信号能量的振幅、相位和时间延迟产生弥散（张文华，2017），会产生多径效应现象。多径效应会导致信源信号到达接收端的直达路径不再是最强路径，且在接收端接收到的信号为一串随意分布在时间轴上的各多径分量。各多径分量之间会相互干涉，会导致信号失真以及产生小尺度衰落，使得信号信噪比下降，最终导致 UWB 室内定位误差增大。多径效应对 RSSI、AOA 等定位算法影响较大，而对 TOA、TDOA 等定位算法影响较小，但是也会产生测量误差。

为了提高室内定位精度，务必尽可能地控制多径效应。常见的控制算法有，MUSIC、ESPRIT、边缘检测技术等（陆音等，2015）。

3.2.2 非视距传播(NLOS)误差

非视距传播是指 UWB 脉冲信号在直线传输路径上，以反射、衍射和透射等方式穿过障碍物，最终通过多条路径到达接收机（M.El-Hadidy et al., 2012）。存在非视距误差的情形下，对待测目标所在位置的精准定位是比较困难的，因为信号首达路径的到达时间并不能作为真实值，从而会对 UWB 室内定位性能造成一定程度上的影响。UWB 各室内定位算法要想实现精确室内定位必须满足的条件是 LOS 视距传播，但是在实际室内环境中要想满足这一条件，却不是那么简单的一件事。

NLOS 定位误差对 TOA 的估计干扰较大，如何消除 NLOS 定位误差是提高 UWB 室内定位精度的关键。通常消除 NLOS 误差的方法：先判断定位基站是处于 NLOS 情形下还是 LOS 情形下，研究表明，处于 NLOS 情形下 TOA 测量值的标准差要比 LOS 情形下大很多。因此，可以通过调整 TOA 测量值的权重大小来消除 NLOS 定位误差对 UWB 室内定位精度的影响。

3.2.3 多址干扰

UWB 室内定位系统如果同时存在多个用户的情况，那么用户之间会相互产生干扰，对待测目标的精准定位带来困难，严重时会降低室内定位的精度，影响室内定位性能。通常减弱多址干扰的方法是在时间上对不同的用户信号进行分离，或者使用 ALOHA 容量算法来减小不同用户信号之间相互碰撞的几率。

3.3 UWB 评价标准

UWB 定位算法性能的好坏，不能通过其测量值直接得出结论，必须要建立 UWB 定位性能评价标准。目前广泛使用的算法性能评价标准有均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE)、几何精度因子(GDOP)、圆误差概率(CEP)和克拉美罗下界(CRLB)

等 (Zhao et al., 2017)。除上述以外, 还有概率密度函数(PDF)、累计概率分布函数(CDF)和相对定位误差(PPE)等算法性能评价标准也经常应用于实际工程中 (Wang et al., 2017)。

3.3.1 均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE)

均方误差(MSE)和均方根误差(RMSE)都是用来反映估计值与真实值之间的偏差, 在二维坐标模型上, 均方误差(MSE)的公式如下:

$$MSE = E[(x - X)^2 + (y - Y)^2] \quad (3-10)$$

同理, 均方根误差(RMSE)的公式如下:

$$RMSE = E\sqrt{[(x - X)^2 + (y - Y)^2]} \quad (3-11)$$

式中, (x, y) 和 (X, Y) 分别为待测移动标签的实际位置和估计位置, 选取均方根误差作为本论文 UWB 室内定位系统性能的评价标准。

3.3.2 圆误差概率(CEP)

圆误差概率是一种高效率而且可靠的定位精度测量手段 (张桀等, 2016)。圆误差概率通常有两种指标: “R50” 和 “R95”, “R95” 指在一组实验数据中, 要求落在所划圆域内的实验数据占比要达到 95%, 能较好的满足 UWB 定位系统对高精度的需求。在测距定位算法中, 圆误差概率公式如下:

$$CEP \approx 0.75\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (3-12)$$

式中, σ_x^2 和 σ_y^2 为待测移动标签的估计位置的方差。

3.3.3 几何精度因子(GDOP)

实际上, UWB 室内定位系统对待测移动标签的定位精准性在很大程度上取决于定位基站与待测移动标签之间的几何位置关系 (隋心等, 2016)。几何精度因子 GDOP 是指各定位基站之间不同的摆放方式对定位精准性的影响。在测距定位算法中, 几何精度因子公式如下:

$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} / \sigma_s \quad (3-13)$$

GDOP 越小, 说明 UWB 室内定位系统的定位精准性越好。由式(3-12)可知几何精度因子与圆误差概率之间的关系:

$$CEP \approx (0.75\sigma_s)GDOP \quad (3-14)$$

3.4 本章小结

首先介绍了 UWB 室内定位算法(RSSI、AOA、TOA、TDOA 等);然后简单介绍影响 UWB 室内定位精度的三大主要因素,并为消除或减弱对室内定位精度的影响提出了解决办法;最后介绍了各种 UWB 定位性能评价标准,并选取均方根误差作为本论文 UWB 室内定位系统性能的评价标准。

4 传统 TPSN 时钟同步协议的改进

UWB TDOA 算法定位的准确性很大程度上取决于时钟同步性能，传统 TPSN(Timing-Sync Protocol for Sensor Networks)时钟同步协议没有充分考虑时钟漂移和各种随机时延对时钟同步精度的影响，严重限制时钟同步性能。本章在基于传统 TPSN 协议基础上，提出一种结合神经网络的无线时钟同步协议。并通过在 Hainan EVK RTLS 3.0 硬件平台上实测，可知所提协议比传统 TPSN 协议获得了更高的时钟同步精度，时钟同步性能得到大幅提升。

4.1 三种时钟同步协议的介绍

4.1.1 基于服务端-服务端时钟同步协议

客户端节点(参考节点)向四周传播同步信息，在传播区域范围内的两个服务端节点都能接收到同步信息，分别记下接收到同步信息的时刻 T_1 和 T_2 。其中一个服务端节点计算两个时刻的差值，即为两个服务端节点的时钟偏差，并以该差值校正自己的本地时钟 $T = T + T_2 - T_1$ ，从而与另一个服务端节点实现时钟同步。服务端-服务端时钟同步协议模型如图 9 所示。

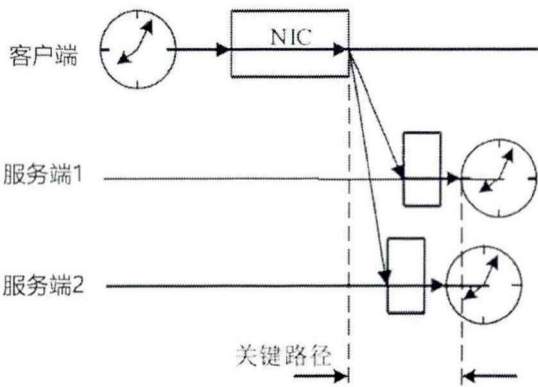


图 9 服务端-服务端时钟同步协议模型

Fig.9 Server-server clock synchronization protocol model

4.1.2 基于客户端-服务端单向时钟同步协议

客户端节点向四周传播包含本地时刻的同步信息，在传播区域范围内的服务端节点接收到同步信息后记录下到达时刻，把本地时刻与到达时刻的差值作为两个节点的时钟偏差，服务端节点依据这个时钟偏差来修正自己的本地时钟，从而实现时钟同步。客户端-服务端单向时钟同步协议模型如图 10 所示。

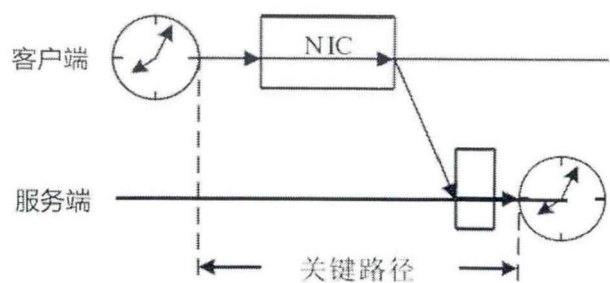


图 10 客户端-服务端单向时钟同步协议

Fig.10 Client-server one-way clock synchronization protocol

4.1.3 基于客户端-服务端双向时钟同步协议

客户端-服务端双向时钟同步协议模型如图 11 所示，TPSN 协议参考上述模型，通过两次信息的交换计算出时钟偏差，实现时钟同步。具体实现过程：服务端节点在 T_1 时刻向客户端节点传播同步请求信息，客户端节点在 T_2 时刻接收到同步请求信息；并在 T_3 时刻向服务端节点回复应答信息，服务端节点在 T_4 时刻接收到应答信息。根据一系列时间戳信息估计出两个节点的时钟偏差为 $[(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)] / 2$ ，服务端节点利用这个时钟偏差来修正自己的本地时钟，从而实现时钟同步 (F.Kirschl et al., 2009)。

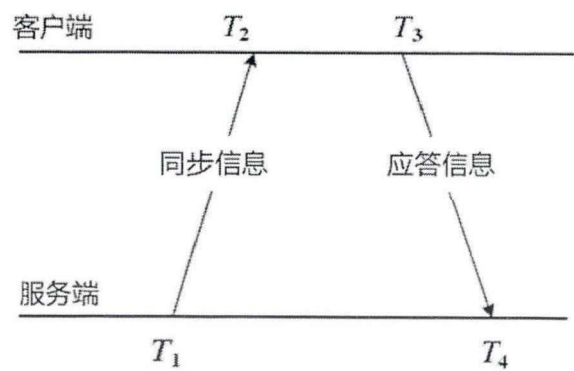


图 11 客户端-服务端双向时钟同步协议模型

Fig.11 Client-server bidirectional clock synchronization protocol model

4.2 时钟同步基本原理

4.2.1 影响时钟同步的主要因素

在超宽带定位系统中，干扰定位基站时钟不同步的因素有很多，主要有以下两种：一、定位基站在发送和接收同步信息过程中的时间不确定性，定位基站间通过交换同步信息实现时钟同步，在交换同步信息过程中会产生传输时延，传输时延容易受多种环境因素的影响，造成时间上的不确定性。二、各定位基站的晶体振荡频率不同，容易导致各定位基站的时钟速率不同，使得定位基站间的时钟偏差增大，影响时钟同步

精度。

4.2.2 改进的时钟同步参数的设计

在 UWB TDOA 算法的研究中,无线时钟同步是提升 TDOA 测距算法性能的研究重点(L Yan-fen, 2012)。每个基站都有自己的本地时钟,通常搭配一个晶体振荡器;即便是同一批生产的晶振,随着运行时间增加,因其自身原因和受外界环境的影响,晶振的振荡频率依然会存在微小的偏差;同时,每个基站开始计时的初始时刻不同,导致相位偏差的值是随机的,哪怕在某一时刻实现时钟同步,从基站时钟最终会偏离真实的时钟(何清等, 2014)。

为了实现基站之间时钟同步,下面根据时钟参数模型给出两偏差的定义,主基站(A)在真实物理时钟 t 的本地时钟可表示为: $T_A(t)=t$ 。假设从基站(B)的本地时钟需同步于主基站的真实时钟,可知相对频率偏差在一段较短时间内认为是恒定不变的,则:

$$T_A(t) = \tilde{\lambda}_{AB} T_B(t) + \tilde{\theta}_{AB} \quad (4-1)$$

式中, $\tilde{\lambda}_{AB}$ 和 $\tilde{\theta}_{AB}$ 分别为主从基站间的相对时钟频率偏差和相位偏差。

主基站和从基站通过不断交换一系列时间戳信息,本章基于客户端-服务端双向同步交换协议的基础上,通过从基站接收到的信息去估计相对频偏和相对相偏,调整从基站的本地时钟与真实物理时钟一致,从而实现主从基站间时钟同步。

4.3 结合神经网络的 TPSN 时钟同步协议

4.3.1 系统模型的建立与实现

Hainan EVK RTLS 硬件平台的前身为无线传感器网络米级 ShowGuider 室内定位系统, Hainan EVK RTLS 3.0 主要包含(Microcontroller Unit, MCU)主控模块、Dw1000 模块、天线模块以及数据回传模块等,单个移动标签定位实测误差已经低于 10cm。UWB TDOA 算法中改进的无线时钟同步 TPSN 协议分为两阶段,分层阶段和同步阶段。在分层阶段中,给出一个基础场景,此场景考虑单蜂窝。一个标准单蜂窝由四个基站组成,然后通过不同蜂窝基站之间的时钟同步,实现全网基站时钟同步,具体过程将在第五章中详细介绍,这里不做过多阐述。如图 12 为分层阶段的生成树结构。

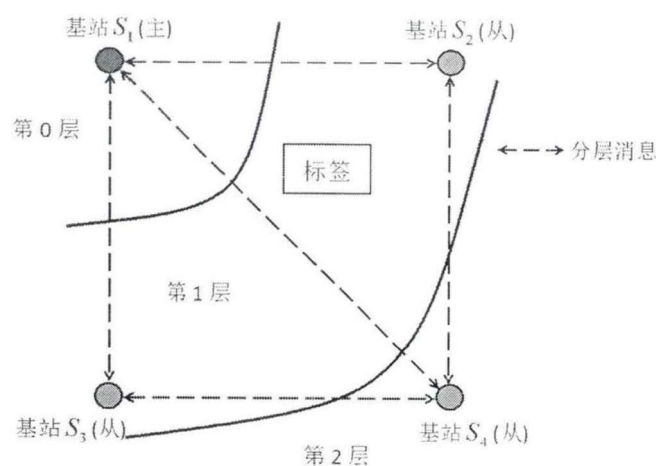


图 12 单蜂窝生成树结构

Fig.12 Single-cell spanning tree structure

在单蜂窝场景中，每个基站都有唯一的 ID 号，具有相同层次号的基站归为同一层。首先，任意选取一个主基站，本章以基站 S_1 作为主基站，主基站的本地时钟为公共时钟的基准，将主基站所在的层次归为 0 层；主基站周期性地向周围传播分层消息，在主基站传播区域范围内接收到分层消息的基站 S_2 和 S_3 ，将其归为第 1 层；基站 S_1 同基站 S_2 进行双向信息交换，基站 S_2 适时调整自身本地时钟，与主基站 S_1 的时钟保持一致，完成第 1 层时钟同步；各基站之间因为短距离传播分层消息，所以同步过程中产生的固定传播时延可以忽略不计；同理，基站 S_2 传播分层消息，基站 S_4 接收到分层消息，将其归为第 2 层，完成第 2 层时钟同步；以此类推，第 n 层基站传播分层消息以至第 $n+1$ 层基站接收到分层消息，已经分层的基站会自动忽略分层消息，上一层基站都会同下一层基站进行双向信息交换，直至所有层完成时钟同步，在保证自身所在蜂窝网络的时钟同步的同时，也实现了整个蜂窝网络的时钟同步。

基于神经网络的无线时钟同步 TPSN 协议首先思考的是如何将相对频偏和相对相偏矩阵化，使其作为输入神经元的特征向量。如图 13 可知，主从基站实现时钟同步的要求是具有相同振荡频率和相同初始计时时刻，即式(4-1)应满足相对频偏 $\tilde{\lambda}_{AB} = 1$ 和相对相偏 $\tilde{\theta}_{AB} = 0$ ，从而达到理想状态，实现时钟同步。但在实际情况中，每个基站受自身原因和环境原因的影响，并不能时时刻刻达到理想状态。

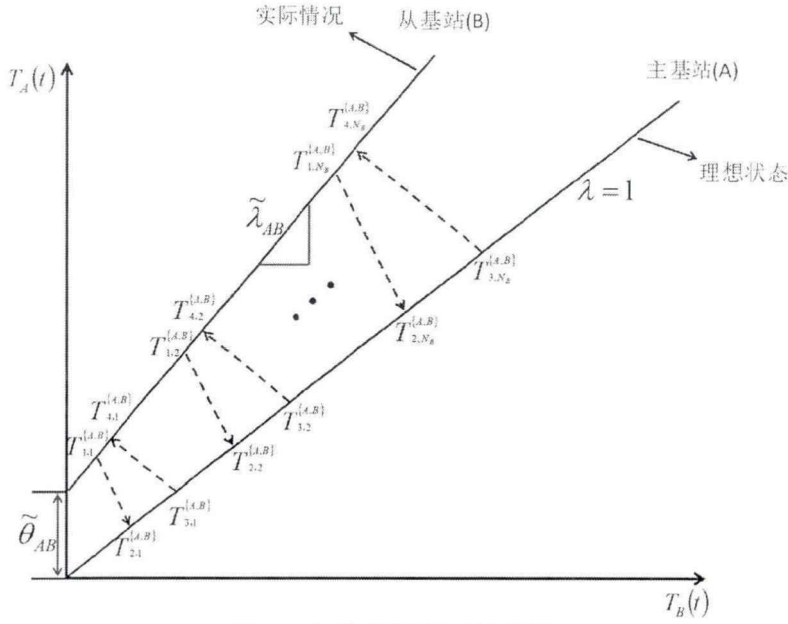


图 13 主从基站间时钟模型

Fig.13 Master-slave inter-base station clock model

在同步阶段中，本章以单跳的形式进行展开，双向同步交换协议如图 13 所示。在第 N_B 轮同步交换过程中，从基站在 $T_{1,W}^{\{A,B\}}$ 时刻向主基站发送同步消息和从基站的层次号，主基站在时刻 $T_{2,W}^{\{A,B\}}$ 收到同步消息；在经过一段时间等待后，在时刻 $T_{3,W}^{\{A,B\}}$ 向从基站回复应答消息和主基站的层次号，应答消息包括 $T_{1,W}^{\{A,B\}}$ 和 $T_{2,W}^{\{A,B\}}$ ，从基站在 $T_{4,W}^{\{A,B\}}$ 时刻收到应答消息。可知 $T_{1,W}^{\{A,B\}}$ 和 $T_{4,W}^{\{A,B\}}$ 时刻是在从基站记录得到的， $T_{2,W}^{\{A,B\}}$ 和 $T_{3,W}^{\{A,B\}}$ 时刻是在主基站记录得到的，因此可以得到一系列时间戳信息 $\{T_{1,W}^{\{A,B\}}, T_{2,W}^{\{A,B\}}, T_{3,W}^{\{A,B\}}, T_{4,W}^{\{A,B\}}\}_{W=1}^{N_B}$ 。上述同步交换过程可用下式表式：

$$T_{2,W}^{\{A,B\}} = \tilde{\lambda}_{AB} (T_{1,W}^{\{A,B\}} + X_W^{\{B \rightarrow A\}}) + \tilde{\theta}_{AB} \quad (4-2)$$

$$T_{3,W}^{\{A,B\}} = \tilde{\lambda}_{AB} (T_{4,W}^{\{A,B\}} - Y_W^{\{A \rightarrow B\}}) + \tilde{\theta}_{AB} \quad (4-3)$$

式中： $X_W^{\{B \rightarrow A\}}$ — 从基站到主基站同步过程中产生的随机时延

$Y_W^{\{A \rightarrow B\}}$ — 主基站到从基站同步过程中产生的随机时延

将(4-2)和(4-3)式进行数据整合得到第 N_B 轮同步交换的矩阵形式(4-4)，即：

$$\begin{bmatrix} T_{1,N_B}^{\{A,B\}} \\ -T_{4,N_B}^{\{A,B\}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{2,N_B}^{\{A,B\}} & -1 \\ -T_{3,N_B}^{\{A,B\}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\tilde{\lambda}_{AB} \\ \tilde{\theta}_{AB}/\tilde{\lambda}_{AB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{N_B}^{\{B \rightarrow A\}} \\ Y_{N_B}^{\{A \rightarrow B\}} \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

利用最小二乘法得到关于 $[\tilde{\lambda}_{AB}, \tilde{\theta}_{AB}]$ 的估计值 $[\lambda_{AB}, \theta_{AB}]$ ，从基站根据所得的估计值对相对频偏和相对相偏进行修正，从而实现主从基站间时钟同步，但最小二乘法并不能消除随机时延对时钟同步精度的影响。因此，将估计值 $[\lambda_{AB}, \theta_{AB}]$ 放在神经网络框架里学习，进一步提高时钟同步的精度。

本章提出的算法可认为是从一系列时间戳信息中通过神经网络来消除各种随机时延的影响，得到期望的时钟参数值。首先，如图 14 所示，所采用的神经网络为 BP(Back Propagation)神经网络，是一种有监督的学习过程，其原理是“计算正向传播，误差反向传播”（Qu et al., 2017）。尝试将共 N_b 轮同步交换得到的共 N 组估计值 $[\lambda_{AB}, \theta_{AB}]_{i=1}^N$ 作为输入神经元的特征向量，即为学习样本。规定期望输出为理想状态下的各时钟参数值 $[\bar{\lambda}_{AB}, \bar{\theta}_{AB}]_{i=1}^N$ ，大量不断重复学习的目的是希望依据实际输出与期望输出之间的差值，沿着误差减小的方向，不断调整各层神经元之间的权值，以得到一个稳定的状态，即实际输出无限接近于期望输出（王庆福，2013）。

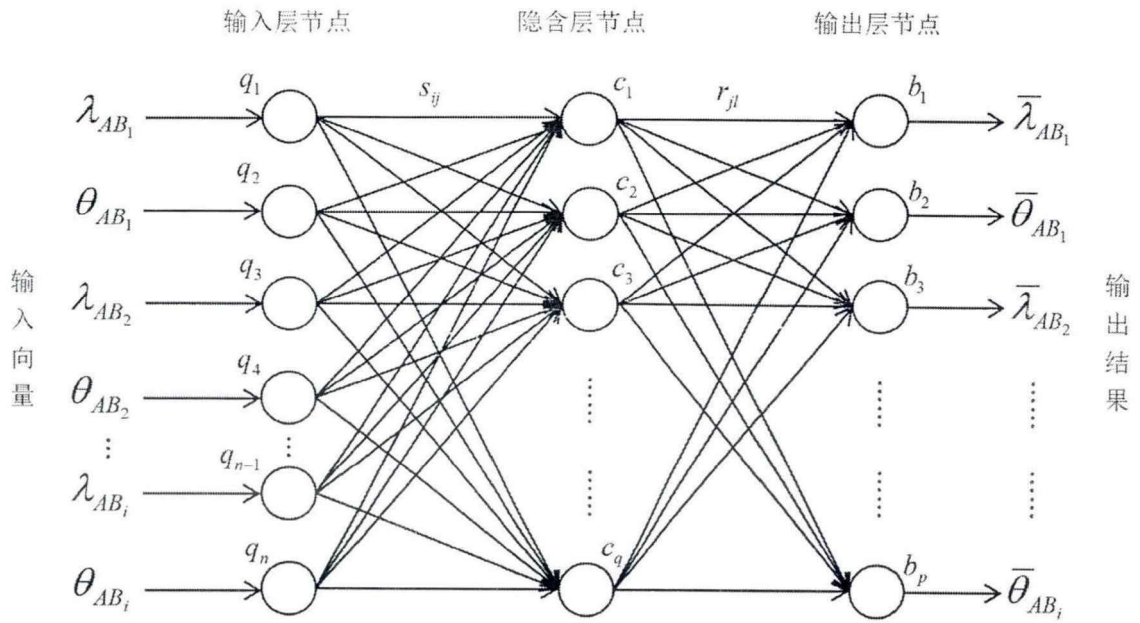


图 14 BP 神经网络示意图

Fig.14 BP neural network diagram

一个标准 BP 神经网络通常由三层：输入层、隐含层、输出层构成，假设每层神经元个数分别为 $n \ q \ p$ 。由图 14 可知，同一层神经元无连接关系，不同层之间神经元是全连接关系（朱军等，2015）。学习前，将 N 组学习样本进行归一化，得到 n 个输入向量 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ ，与之对应的期望输出向量为 $Z = (w_1, w_2, \dots, w_p)$ ； s_{ij} 和 r_{jl} 分别为输入层到隐含层、隐含层到输出层的权值； $\xi_j (j=1, 2, \dots, q)$ 和 $\psi_l (l=1, 2, \dots, p)$ 分别为

隐含层、输出层各神经元的阈值： $f_1(\cdot)$ 和 $f_2(\cdot)$ 分别为隐含层、输出层的激活函数。

隐含层各神经元通过对 N 组学习样本数据提取有价值的特征后，则隐含层第 j 个神经元的实际输出为：

$$c_j = f_1 \left(\sum_{i=1}^n s_{ij} q_i + \xi_j \right) (j=1,2,\dots,q) \quad (4-5)$$

输出层第 l 个神经元的实际输出为：

$$b_l = f_2 \left(\sum_{j=1}^q r_{jl} c_j + \psi_l \right) (l=1,2,\dots,p) \quad (4-6)$$

实际输出与期望输出的误差函数如下：

$$E = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^p (w_l - b_l)^2 \quad (4-7)$$

其中 w_l 为第 l 个神经元的期望输出。

依据误差减小的方向，反向逐层修正各层神经元间的权值。输出层权值修正：

$$\Delta r_{jl}(t) = -\alpha \frac{\partial E}{\partial r_{jl}} = -\alpha \frac{\partial E}{\partial b_l} \cdot \frac{\partial b_l}{\partial r_{jl}} \quad (4-8)$$

$$r_{jl}(t+1) = r_{jl}(t) + \Delta r_{jl}(t)$$

同理，隐含层权值修正：

$$\Delta s_{ij}(t) = -\alpha \frac{\partial E}{\partial s_{ij}} = -\alpha \frac{\partial E}{\partial b_l} \cdot \frac{\partial b_l}{\partial c_j} \cdot \frac{\partial c_j}{\partial s_{ij}} \quad (4-9)$$

$$s_{ij}(t+1) = s_{ij}(t) + \Delta s_{ij}(t)$$

式中， α 为 BP 神经网络的学习速率， t 为学习次数。

学习性能的好坏取决于学习率，固定的学习率难以满足权值调整多变的要求，权值容易越过梯度方向的最优值，导致无法收敛得到期望输出（Wang et al., 2016）。为了能加快收敛的速度，从局部极小值中跳出来，提出一种学习率在线自我调节的方法，基本想法是学习率能根据总误差 E 的大小变化自适应调节。

$$\alpha(t) = \begin{cases} a \times \alpha(t-1) & E(t) \leq E(t-1) \\ b \times \alpha(t-1) & E(t) \geq c \times E(t-1) \end{cases} \quad (4-10)$$

规则是：当实际输出与期望输出的总误差 E 增大时，学习率自适应减小为原来 b 倍。当实际输出与期望输出的总误差 E 减小时，学习率自适应增大为原来 a 倍。

存在一个误差门限 σ ，如果满足总误差 $E \leq \sigma$ ，说明各权值达到一种稳定状态，

学习精度满足要求,学习结束,最终得到一个反映时钟同步关系且已学习完成的神经网络模型。当第 N_B+1 轮同步交换后得到时钟参数估计值 $[\lambda_{AB}, \theta_{AB}]^{N_B+1}$, 将其输入到时钟同步神经网络模型中,自主输出时钟参数期望值 $[\bar{\lambda}_{AB}, \bar{\theta}_{AB}]^{N_B+1}$, 从而实现第 N_B+1 轮主从基站间时钟同步。

4.3.2 实测结果与性能分析

测试环境为 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 的正方形区域,室内环境都是可视的,单蜂窝场景的拓扑结构如图 12 所示。在单蜂窝场景中布设 1 个主基站, 3 个从基站, 基站的电路板结构如图 15。双向同步交换轮数为 $N_t = \{5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50\}$, 实验重复次数为 $n=100$ 。同步周期为 20ms , 即从基站每隔 20ms 向主基站发送一次同步请求。时钟参数误差是指在某一轮数下,调用神经网络算法后,第 N_t+1 轮主从基站间相对相偏和相对频偏的期望值与真实值之差在 100 次重复实验下的平均值。为了能更好表征时钟参数在神经网络框架里的学习程度,本章采用均方根误差(RMSE)来寻找时钟参数的最优期望值,如果时钟参数期望值越准确,则 RMSE 值越小,时钟同步精度越高。

$$RMSE(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\bar{\gamma} - \gamma)^2} \quad \gamma \in \{\lambda, \theta\} \quad (4-11)$$

式中, $\bar{\gamma}$ 为调用神经网络算法后时钟参数的期望值, γ 为时钟参数的真实值。

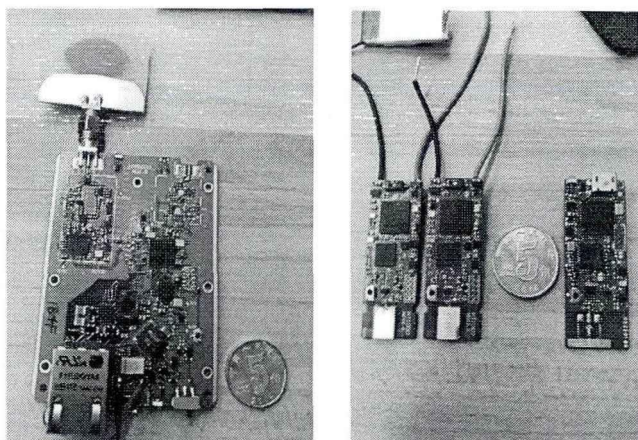


图 15 Hainan EVK3.0 基站和标签

Fig.15 Hainan EVK3.0 base station and label

由图 16 分析可知,随着学习样本数增多,误差逐渐减小,时钟参数期望值越准确。但不能一味通过增加训练样本的个数来换取更高的时钟同步精度,因为会增加本章算法的运算量和学习时间的长度,使得学习性能下降,反而影响时钟同步的精度。

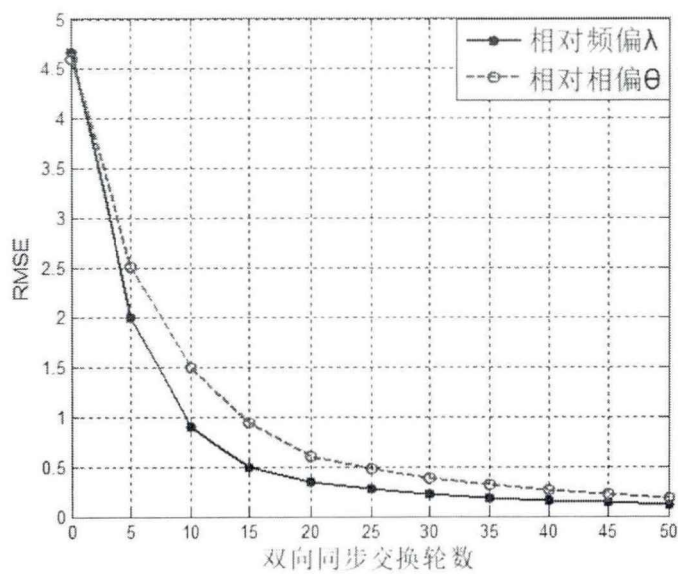


图 16 不同交换轮数的时钟参数 RMSE 值

Fig.16 Clock parameter RMSE value of different exchange rounds

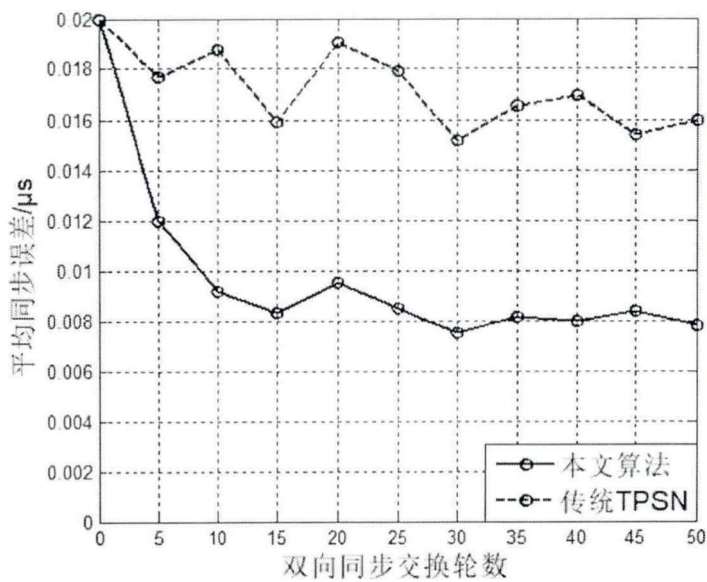


图 17 两种不同算法分别对应的时钟同步精度

Fig.17 Clock synchronization accuracy corresponding to two different algorithms

随着运行时间增加，从基站因晶振频率不一样和受环境因素的影响，从基站的本地时钟会逐渐偏离主基站的真实时钟。如图 17 可知，调用本章算法的时钟同步，因其神经网络良好的自我学习特性使得实线波动范围会平稳些，而传统 TPSN 协议未考虑时钟漂移对时钟同步精度的影响，虚线的波动范围会大些。还可知，随着双向同步交换轮数 N_i 的增大，本章算法的平均同步误差一直小于传统 TPSN 协议算法。当

$N_r = 30$ 时, 平均同步误差最大相差 $0.144 \mu s$, 这将极大的影响时钟同步精度。因此, 实测结果表明基于神经网络的无线时钟同步 TPSN 协议算法的性能大大优于传统 TPSN 协议算法, 这很有利于提高 UWB 室内定位的精度。

4.4 本章小结

TPSN 协议是典型双向同步交换协议, 本章针对传统 TPSN 协议无法修正时钟漂移的缺陷, 结合神经网络算法, 提出一种改进的无线时钟同步 TPSN 协议, 理论上时钟同步误差可达到 $0.001 \mu s$ 级别。利用神经网络不断重复学习的特性, 减少误差, 抵消时钟漂移的影响和抑制各种随机时延的不确定性。同时, 为了满足权值调整多变的要求, 还提出一种学习率在线自我调节的方法, 有效提高本章时钟同步协议的性能, 完成对传统 TPSN 协议的优化和改进。

5 基于单蜂窝场景的网络扩展

UWB 脉冲信号因其自身特点，在实际工程应用中并不适合中长距离通信。目前大多数 UWB 室内定位系统局限于单一区域或较小范围的定位，不能满足对扩展区域定位的需求。为扩展 UWB 室内定位系统的作用范围，本章将在单蜂窝场景的基础上，研究 UWB 定位技术的网络扩展。并以 Hainan EVK RTLS 3.0 硬件平台为辅助手段，来验证 UWB 室内定位系统网络扩展的可行性。

5.1 网络扩展模型

UWB 室内定位系统的网络扩展模型如图 18 所示，根据实际应用场所的不同，先为整个 UWB 定位网络划分区域。然后不同的区域通过自适应算法自动选取出本区域的主基站，在本区域中其他的基站定义为从基站。区域内的从基站通过同步信息的交换与主基站保持时钟同步，且只能与同一个区域内的基站交互信息。

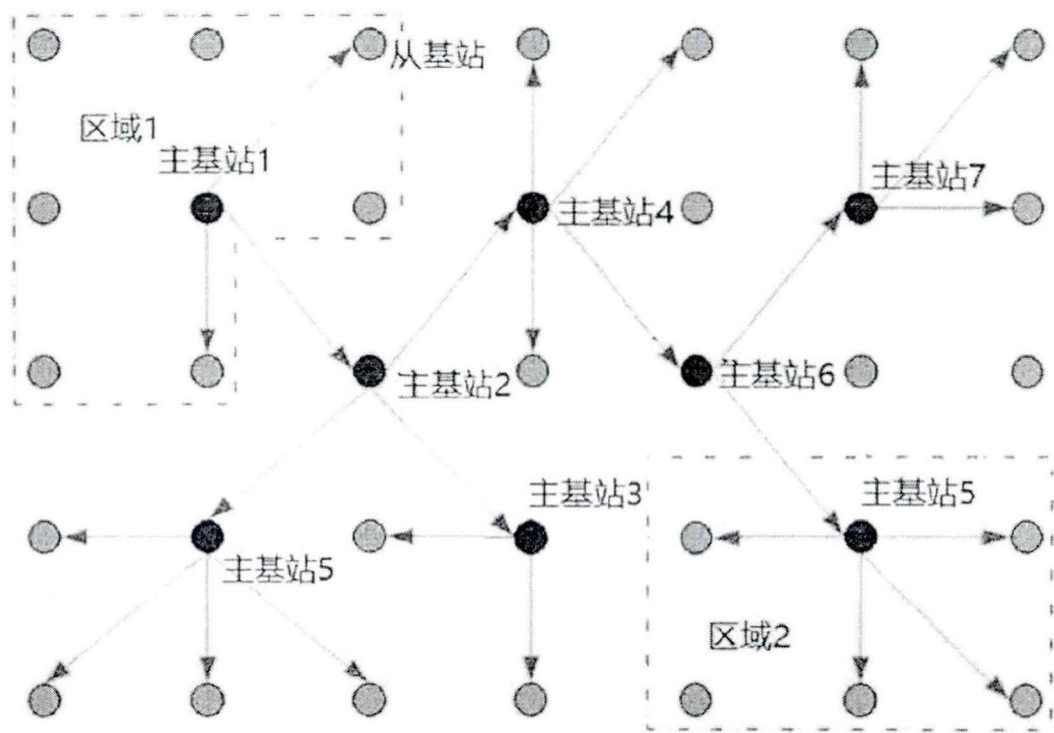


图 18 UWB 网络扩展模型

Fig.18 UWB network extension model

以单蜂窝场景为基础，通过不同蜂窝基站之间的时钟同步，实现全网基站时钟同步，具体过程如下：

（一）在不同的区域中，根据定位基站的摆放位置和通信能力，通过自适应算法自动选取出本区域的主基站，没有被选中的基站将其定义为从基站。

（二）同一区域内，各基站间采用基于客户端-服务端双向时钟同步协议实现时

钟同步。主基站向四周传播同步请求信息，从基站依据此信息来调整自己的本地时钟。其他区域的从基站也有可能接收到这一同步请求信息，通过在同步请求信息中添加区域标识符的方法，让从基站对不同区域主基站传播的同步请求信息不做任何应答。

（三）同一区域内，要实现本区域的全基站时钟同步，实现过程已经在 4.3.1 节中详细介绍过，本章以图 19 为例再次简单介绍下蜂窝场景分层阶段的过程。本章以基站 S_1 作为主基站，将主基站所在的层次归为 0 层；主基站周期性地向周围传播分层消息，在主基站传播区域范围内且处于同一层的基站 S_3 先进行双向信息交换，与主基站 S_1 的本地时钟保持一致，完成第 0 层时钟同步；同理，基站 S_3 传播分层消息，分别处于上层和下层的基站 S_8 和 S_5 接收到分层消息，将其归为第 1 层，完成第 1 层时钟同步；以此类推，直至所有层完成时钟同步，实现本区域全基站时钟同步。

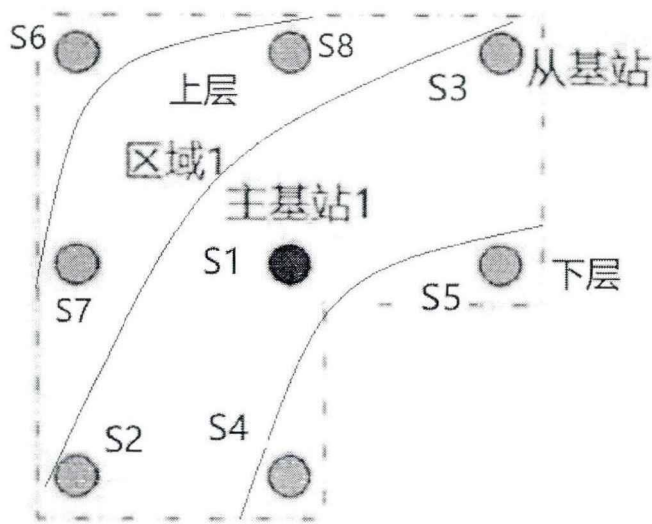


图 19 蜂窝场景的分层阶段

Fig.19 Layered phase of a cellular scene

（四）各个区域之间，只允许主基站间进行时钟同步信息的交换，区域内的从基站没有资格同其他区域的主基站进行通信。主基站不仅要向区域内的从基站传播同步请求信息来维持绝对同步，而且也要同相邻区域的主基站进行时钟同步信息的交换来维持相对同步，以便实现全网基站时钟同步。

5.2 测试环境与结果分析

5.2.1 测试环境

本章的实测场地选为海南大学南海海洋资源利用国家重点实验室 601 室以及室外的空旷平台，如图 20 所示。实验室 601 室为一个矩形区域，室内的门窗、桌椅、空调、人员走动以及电子设备等容易对 UWB 脉冲信号产生干扰，室内环境较为复杂；室外的空旷平台为理想实验环境，因遮挡物少，所以对信号的干扰较小。



图 20 实测场地
Fig.20 Measured site

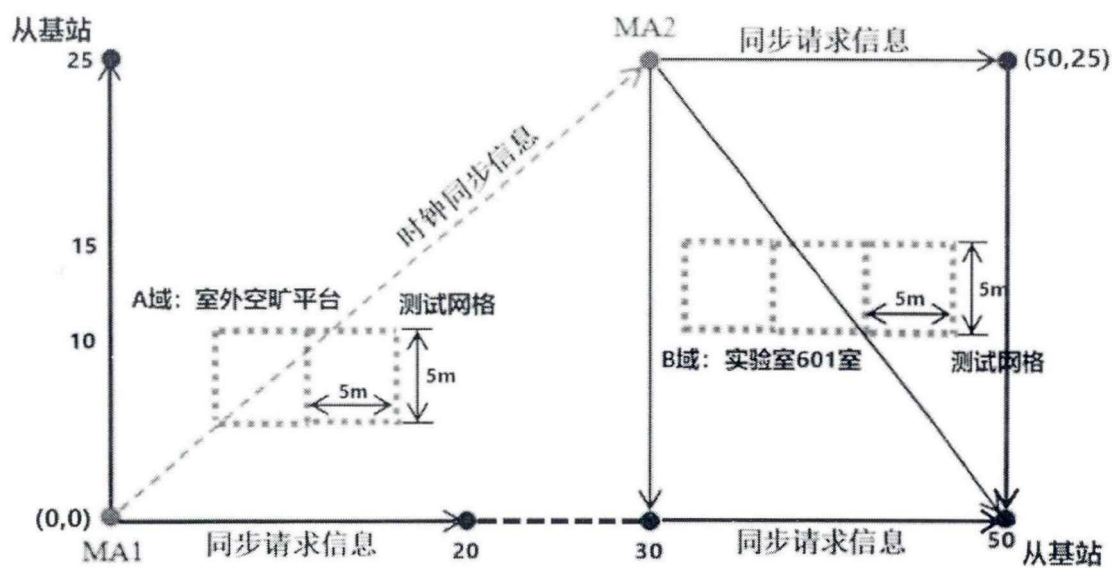


图 21 实测场地平面图

Fig.21 Measured floor plan

如图 21 所示，首先为 UWB 定位网络指定测试范围，组成一个 25×50m 的矩形测试区域。然后矩形测试区域中又划分两个子区域 A 和 B，分别代表室外的空旷平台和实验室 601 室。基站 MA1 和 MA2 分别为不同子区域的主基站，其余基站为从基站。将所有定位基站的高度布置为 1.5 米，各定位基站的真实位置分别为：(0, 25, 1.5)、(30, 25, 1.5)、(50, 25, 1.5)、(0, 0, 1.5)、(20, 0, 1.5)、(30, 0, 1.5)、(50, 0, 1.5)。在子区域 A 中划定 5×10m 的测试网格，让待测移动标签处于每一个交叉点上，然后计算每一个实测点的 RMSE 值。同理，在子区域 B 中划定 5×15m 的测试网格，共计 8 个实测点。表 5 为基于传统时钟同步 TPSN 协议的不同子区域 TDOA 定位算法的实测结果。

表 5 基于传统时钟同步的实测结果

Table5 Actual measurement results based on traditional clock synchronization

实测点	真实位置	最佳 RMSE 值(m)	最差 RMSE 值(m)	平均 RMSE 值(m)
1	(6,10)	0.241	0.342	0.270
2	(11,10)	0.203	0.314	0.236
3	(16,10)	0.217	0.357	0.248
4	(6,5)	0.238	0.428	0.304
5	(11,5)	0.182	0.296	0.201
6	(16,5)	0.227	0.394	0.257
7	(22,15)	0.326	0.513	0.355
8	(27,15)	0.292	0.442	0.328

9	(32,15)	0.306	0.399	0.333
10	(37,15)	0.284	0.445	0.319
11	(22,10)	0.266	0.408	0.293
12	(27,10)	0.301	0.421	0.324
13	(32,10)	0.251	0.386	0.287
14	(37,10)	0.273	0.437	0.312

由表可知，待测移动标签在子区域 A 中，最佳 RMSE 值为 0.182m，最差 RMSE 值为 0.428m。同理，待测移动标签在子区域 B 中，最佳 RMSE 值为 0.251m，最差 RMSE 值为 0.513m。虽然基于传统时钟同步 TPSN 协议的 TDOA 定位算法实现了厘米级定位，但是定位性能达不到最优。表 6 为结合神经网络的时钟同步 TPSN 协议的不同子区域 TDOA 定位算法的实测结果。

表 6 结合神经网络的时钟同步的实测结果

Table6 Combined measurement results of clock synchronization combined with neural network				
实测点	真实位置	最佳 RMSE 值(m)	最差 RMSE 值(m)	平均 RMSE 值(m)
1	(6,10)	0.168	0.243	0.203
2	(11,10)	0.125	0.206	0.143
3	(16,10)	0.137	0.211	0.166
4	(6,5)	0.142	0.224	0.178
5	(11,5)	0.109	0.169	0.131
6	(16,5)	0.159	0.255	0.192
7	(22,15)	0.265	0.374	0.293
8	(27,15)	0.253	0.334	0.277
9	(32,15)	0.191	0.267	0.231
10	(37,15)	0.260	0.352	0.284
11	(22,10)	0.224	0.291	0.253
12	(27,10)	0.262	0.329	0.274
13	(32,10)	0.231	0.303	0.262
14	(37,10)	0.247	0.342	0.285

由表可知，待测移动标签在子区域 A 中，最佳 RMSE 值为 0.109m，最差 RMSE 值为 0.255m。同理，待测移动标签在子区域 B 中，最佳 RMSE 值为 0.191m，最差 RMSE 值为 0.374m。采用第 4 章中结合神经网络的时钟同步 TPSN 协议，相比于传统时钟同步 TPSN 协议可知，定位精度在最佳的情况下提高了将近 1 倍，UWB 网络

扩展定位系统性能得到大幅提升。

5.2.2 结果分析

将上述两个表格的 RMSE 值进行汇总，如图 22、23 所示。

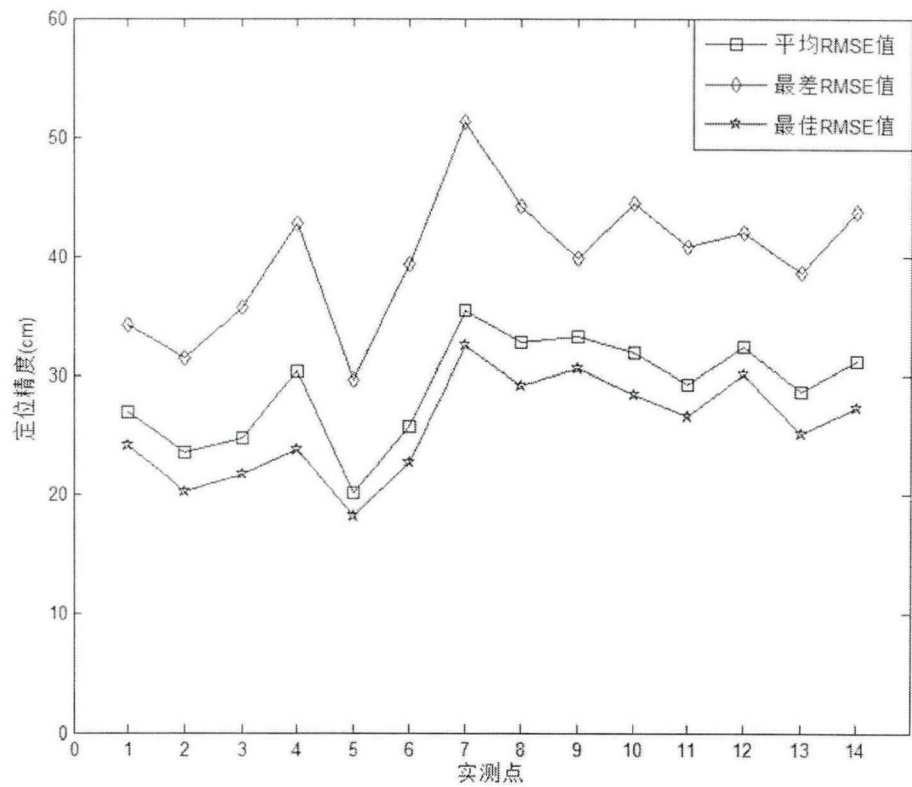


图 22 基于传统时钟同步的实测结果折线图

Fig.22 Measured line graph based on traditional clock synchronization

由图 22，根据待测移动标签的 RMSE 值可以很直观看出来：在子区域 A 中，UWB 室内最佳定位精度集中在(18~25cm)之间，最差定位精度集中在(29~43cm)之间，平均定位精度集中在(20~31cm)之间。而在子区域 B 中，UWB 室内最佳定位精度集中在(25~33cm)之间，最差定位精度集中在(38~52cm)之间，平均定位精度集中在(28~36cm)之间。

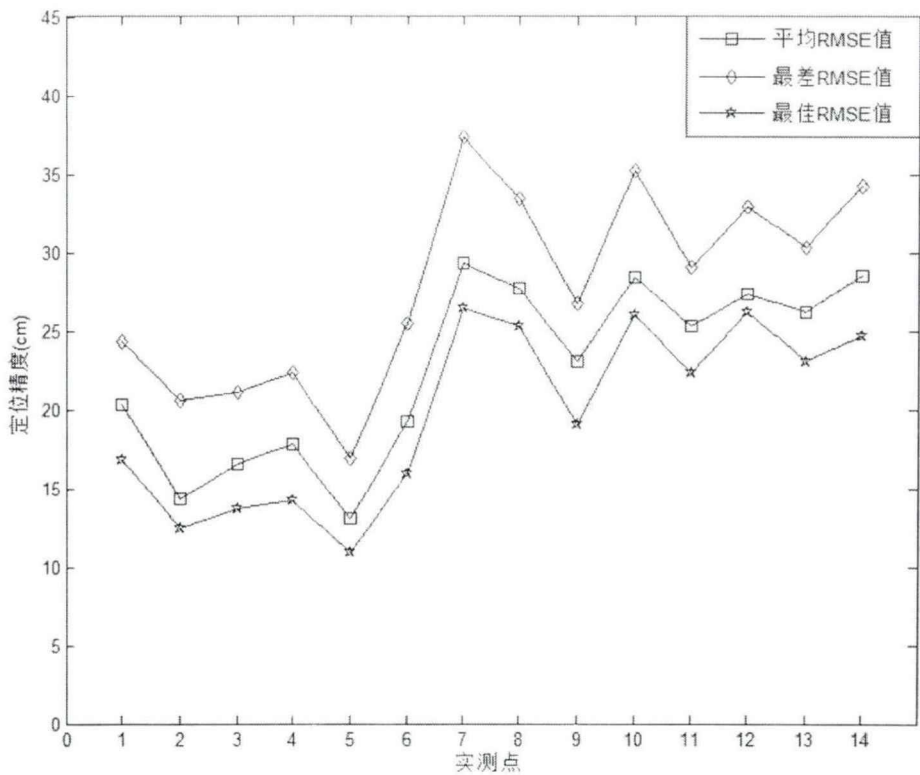


图 23 结合神经网络的时钟同步的实测结果折线图

Fig.23 A line graph of measured results of clock synchronization combined with neural network

同理，在子区域 A 中，UWB 室内最佳定位精度集中在(10~17cm)之间，最差定位精度集中在(16~26cm)之间，平均定位精度集中在(13~21cm)之间。而在子区域 B 中，UWB 室内最佳定位精度集中在(19~27cm)之间，最差定位精度集中在(26~38cm)之间，平均定位精度集中在(23~30cm)之间。再次验证了第 4 章结合神经网络的 TPSN 协议的可行性，相比于传统 TPSN 协议能获得更高的室内定位精度。

为了能更加直观的验证 UWB 定位网络扩展的可行性，将上述两个表格中的平均 RMSE 值做比较，如图 24 所示。首先，两个不同子区域的平均室内定位精度均能满足 UWB 定位技术的厘米级定位要求，验证了 UWB 定位网络扩展的可行性；因为实验室 601 室为复杂室内环境，室内中各种物体都会对 UWB 脉冲信号产生干扰，所以其平均定位精度均大于室外的空旷平台。同时，结合神经网络的时钟同步 TPSN 协议的性能大大优于传统时钟同步 TPSN 协议，室内定位精度整体得到大幅提高，使得 UWB 室内定位系统的稳定性有所加强。

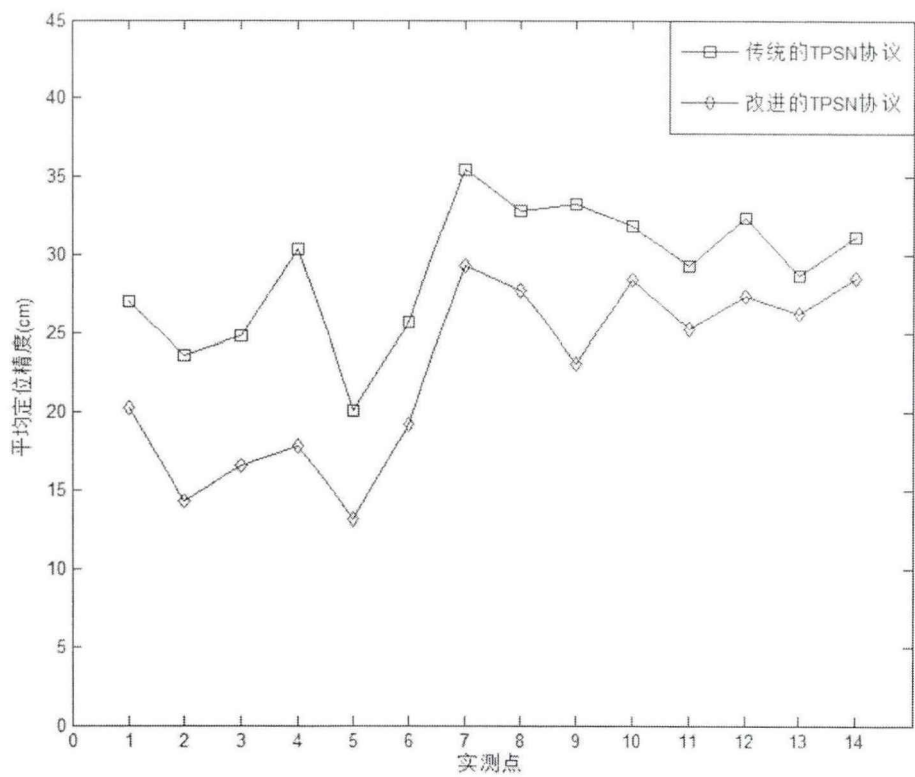


图 24 平均定位精度比较图

Fig.24 Average positioning accuracy comparison chart

5.3 本章小结

由于 UWB 信号自身的特点以及现今社会对定位的需求，本章将对 UWB 定位网络扩展进行讨论。首先，简单介绍了测试环境；然后对在不同子区域的待测移动标签采用 TDOA 定位算法来实际测量 UWB 室内定位的精度。实测结果表明，两个不同子区域的室内定位精度均能满足 UWB 定位技术的厘米级定位要求，从而验证了 UWB 定位网络扩展的可行性。

6 总结与展望

6.1 总结

UWB 室内定位技术因其自身带宽非常宽,可实现厘米级高精度定位,迅速在众多室内定位技术中脱颖而出。目前,如何减小超宽带室内定位误差成为了整个超宽带定位系统必须解决的关键问题。本文将在 TDOA 定位算法的基础上,一一介绍时钟同步算法和 UWB 定位网络扩展等两个重点研究内容,具体如下:

(一)简单介绍 UWB 室内定位技术的研究背景,对其国内外研究现状做了叙述,然后对本文的基础算法 UWB TDOA 定位算法的发展动态做了介绍。

(二)对 UWB 室内定位技术进行整体概述,重点对 UWB 技术的实现方式和基于 IEEE 802.15.4a UWB 信道模型做了详细讲解。

(三)简单介绍了 UWB 室内定位算法,并对 UWB 定位性能评价标准有了一定的认知。

(四)UWB TDOA 算法定位的准确性很大程度上取决于时钟同步性能,针对传统 TPSN 协议没有充分考虑时钟漂移和各种随机时延对时钟同步精度的影响,本文提出了一种结合神经网络的时钟同步 TPSN 协议。

(五)由于 UWB 定位技术自身的局限性,以及对扩展区域定位的需求,本文将在单蜂窝场景的基础上,对 UWB 定位技术的网络扩展进行研究。

6.2 展望

(一)改进的无线时钟同步 TPSN 协议在分层阶段过程中,本文使用的是生成树结构,如果某个基站在定位过程中出现故障,严重时可能会导致整个网络的瘫痪。在今后的研究工作中应该考虑使用分层阶段的其他结构,避免出现上述问题。

(二)在 UWB 定位网络扩展中,只考虑对一个待测移动标签进行实测,如果存在多个待测移动标签,此时各标签之间很有可能会出现相互碰撞的现象,这类问题应该在今后的研究工作中重点解决。

参考文献

- [1] 王彪, 傅忠谦. 基于超宽带技术的 TDOA 室内三维定位算法研究[J]. 微机与应用, 2013, 32(14).
- [2] 隋心, 杨广松, 郝雨时等. 基于 UWB TDOA 测距的井下动态定位方法[J]. 导航定位学报, 2016, 4(3): 10-14.
- [3] 邹洪良. 基于改进 TDOA 的超宽带室内定位技术研究[D]. 2012.
- [4] 罗勃, 沈重, 朱雨豪等. 无线时钟同步算法在 UWB 定位技术中的研究与应用[J]. 现代电子技术, 2017, 40(6).
- [5] 张桀, 沈重. 联合 TDOA 改进算法和卡尔曼滤波的 UWB 室内定位研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(13).
- [6] 王信, 汪友生. 基于深度学习与传统机器学习的人脸表情识别综述[J]. Applied Science and Technology, 2017, (44).
- [7] 王庆福. 基于神经网络的深度学习研究方法[J]. 软件研发与应用, 2013.
- [8] 辜阳, 杨大为. 分布式深度学习研究[J]. Technology Innovation and Application, 2017, 29.
- [9] 吴魁, 王仙勇, 孙洁, 黄玉龙. 基于深度学习的故障检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(10).
- [10] 朱军, 胡文波. 贝叶斯机器学习前沿进展综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(1): 16-26.
- [11] 何清, 李宁, 罗文娟, 史忠植. 大数据下的机器学习算法综述[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(4).
- [12] 陈东成. 基于机器学习的目标跟踪技术研究[D]. 中国科学院大学, 2015.
- [13] 宋焕生, 张向清, 郑宝峰, 严腾. 基于深度学习方法的复杂场景下车辆目标检测[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(4).
- [14] 林晓林, 孙俊. 基于机器学习的小目标检测与追踪的算法研究[J]. 2018, 35(11).
- [15] 屠晓东. 基于 UWB 信号的多基站与单基站定位算法的研究与性能分析[J]. 2012.
- [16] 张文华. 联合 TDOA_AOA 无线传感器网络半定规划定位算法研究[J]. 2017.
- [17] 孙顺. 基于 TDOA 与 GROA 的多运动站误差配准算法[J]. 2017.
- [18] 李力, 林懿伦, 曹东璞, 郑南宁, 王飞跃. 平行学习—机器学习的一个新型理论框架[J]. 自动化学报, 2017, 43(1).
- [19] 傅艺绮, 董威尹, 良泽, 杜雨晴. 基于组合机器学习算法的软件缺陷预测模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(3): 633-641.
- [20] 陆音, 王宝全, 丘颢玮. CHAN 算法在 LOS 和 NLOS 环境下的定位研究[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(9).
- [21] 苑令诩. 超宽带多标签协同精确定位系统及其应用的研究[D]. 北京邮电大学, 2015.

- [22] 黄越洋, 张嗣瀛, 井元伟, 石元博. 基于 TDOA 和 RSS 的可行域粒子滤波非视距定位算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(8).
- [23] 孙飞. 基于低位宽量化的超宽带室内测距与定位方法研究[D]. 中国科学技术大学, 2015.
- [24] 周群, 沈重, 张鲲, 陈小斯, 郑理强. 基于融合算法的 GPS/UWB/MARG 协同定位系统研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(8).
- [25] 刘建伟, 刘媛, 罗雄麟. 深度学习研究进展[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(07): 1921-1930+1942.
- [26] 李如平, 朱炼, 吴房胜, 徐珍玉. BP 神经网络算法改进及应用研究[J]. 菏泽学院学报, 2016, 38(02): 13-17.
- [27] 胡雯, 郑霖, 仇洪冰, 覃秀英. 基于生成树的无线传感器网络时钟同步算法[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(10): 3876-3878.
- [28] 郭文娟, 王英龙, 魏诺, 郭强, 周书旺. 基于卡尔曼滤波的无线传感器网络时钟同步协议[J]. 山东大学学报(理学版), 2010, 45(11): 32-36.
- [29] 史昕, 赵祥模, 惠飞, 杨澜. 基于分量解耦融合的无线传感网时钟同步算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(03): 623-627.
- [30] 夏小凤, 严斌宇, 刘方圆, 卢苇. 无线传感器网络 TPSN 的优化算法[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(06): 1465-1467.
- [31] 陈斌, 胡丽, 李昂, 陈祥健, 刘好武. 基于 BP 神经网络算法的仿真研究[J]. 信息技术, 2016, (08): 85-88+92.
- [32] 张春梅, 白凤山, 王平, 张绍臣. 一种改进的 TPSN 时间同步算法的实现[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2013, 44(03): 316-319.
- [33] 王义波. 无线传感器网络 TPSN 协议的低功耗改进[J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(16): 220-221.
- [34] 李谦. 无线传感器网络中时钟同步技术的研究及实现[D]. 南京邮电大学, 2014.
- [35] W.Wanrong, W.Qianping. "Energy-Efficient Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Networks", 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering Proceedings, pp.530-534, Singapore, Feb 26-28, 2010.
- [36] G.Bo. "Research on Clock Synchronization Mechanism in Wireless Sensor Networks", International Forum on Information Technology and Applications Proceedings, pp.57-60, Chengdu, May 15-17, 2009.
- [37] L.Mei, W.Yik-Chung. "Distributed Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks Using Belief Propagation", IEEE Transactions on Signal Processing, pp.5404-5414, 2011.
- [38] C.Bong Jun, L.Hao. "DCS: Distributed Asynchronous Clock Synchronization in Delay Tolerant Networks", IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems Proceedings, pp.491-504, 2012.

- [39] S.Won-Yong, D.E.Lucani. “ Multi-Hop Routing Is Order-Optimal in Underwater Extended Networks ” , IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings Proceedings, pp.510-514, June 13-18, Austin, 2010.
- [40] Xionghu Zhong, WeePeng Tay, Mei Leng. “ TDOA-FDOA Based Multiple Target Detection And Tracking In The Presence Of Measurement Errors And Biases ” , IEEE, 2016.
- [41] Zhihao Wang, Chong Shen, Gaoang Feng, and Chunhua Long. “ A TOA Cooperate with AOA Location Algorithm Basedon IR-UWB ” , International Journal of Future Computer and Communication, Vol. 5, No. 1, February 2016.
- [42] Chunhua Long, Chong Shen, Gaoang Feng, Yuhao Zhu and Zhihao Wang. “Research on Network Scalability Based on UWB Indoor Localization System” , MATEC Web of Conferences, 2016.
- [43] Hosseini-Asl, Ehsan, Zurada, Jacek M, Nasraoui, Olfa. “ Deep Learning of Part-Based Representation of Data Using Sparse Autoencoders with Nonnegativity Constraints ” , IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, pp.2486-2498, December 2016.
- [44] L.Chung-Hsin. “The Study for The RFID with Bluetooth Positioning System” , 3rd International Conference on Information Sciences and Interaction Sciences Proceedings, pp.386-391, Chengdu, China, June 23-25, 2010.
- [45] M.El-Hadidy, M.El-Absi. “ Artificial Diversity for UWB MB-OFDM Interference Alignment Based on Real-world Channel Models and Antenna Selection Techniques ” , IEEE International Conference on Ultra-Wideband Proceedings, pp.338-342, Syracuse, Sept 17-20, 2012.
- [46] E.I.Shah Saadon, J.Abdullah. “ Evaluating the IEEE 802.15.4a UWB physical layer for WSN applications”, IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications Proceedings, pp.68-73, Sept 22-25, 2013.
- [47] Jie Zhang, Fang Dong, Chong Shen. “ Analysis of The NLOS Channel Environment of TDOA Multiple Algorithms ” , IEEE Sensors, Busan, South Korea, 2015.
- [48] Yue Wang, K.C.Ho. “ TDOA Positioning Irrespective of Source Range ” , IEEE Journals & Magazines, pp.1447-1460, 2017.
- [49] Xiaomei Qu, Lihua Xie, Wenrong Tan. “ Iterative Constrained Weighted Least Squares Source Localization Using TDOA and FDOA Measurements ” , IEEE Transactions on Signal Processing, pp.3990-4003, 2017.
- [50] Yue Zhao, Zan Li, Benjian Hao, JiangBo Si, Pengwu Wan. “ Bias reduced method for TDOA and AOA localization in the presence of sensor errors ” , IEEE International Conference on Communications (ICC), pp.1-6, 2017.
- [51] F.Kirsch, M.Vossiek.“Distributed Kalman Filter for Precise and Robust Clock Synchronization in Wireless Networks” , In Radio and Wireless Symposium, pp.482-485, San Diego, Jan 18-22, 2009.

- [52] L Yan-fen. “Research on Adaptive Information Fusion Kalman Filter Algorithm” , International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) Proceedings, pp.1-4, Shenzhen, May 5-8, 2012.

硕士期间科研成果

发表论文:

- [1] 朱振海, 沈重. 一种基于人工智能-深度学习的无线时钟同步算法[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2018, 36(04): 310-316.

参与项目:

- [1] 海南省重点研发计划“基于超宽带的室内外消防员无缝精准定位系统”(ZDYF2016002), 2016.
- [2] 海南省自然科学基金创新团队项目“基于超宽带的室内精准实时定位系统研究”(2017CXTD0004), 2017.
- [3] 国家自然科学基金“MIMO 超宽带精准实时 PDOA 跟随及协同算法研究”, 2018.

致谢

韶华易逝，三年一瞬，研究生生活即将结束，即将踏上真正意义上的人生道路。回首过往，心潮难平，点点滴滴的往事值得记忆。

感谢沈重教授的无私奉献，沈教授平易近人、治学严谨、学识渊博。回首三年，沈教授对我科研能力的培养倾注了大量的心血，我的每一步成长都离不开您的指导与教诲。

感谢 601 实验室李明昊同学、梅雨茜同学、王成晓同学、冯晓敏同学对我的包容与帮助，因为你们的谦让，让我懂得了友谊的可贵，希望 5 年、10 年、20 年后我们还能相聚在一起，回忆难忘的过去。

感谢家人对我学业上的支持，感谢父母对我的养育之恩，感谢爷爷奶奶对我的关心与照顾，感谢姑姑对我的教诲。我最大的心愿就是希望家人身体健康、事事顺心、幸福快乐。

感谢我的女朋友李靖雅，正是因为有你，让我学会了爱一个人、珍惜一个人、包容一个人、保护一个人、关心一个人；正是因为有你，让我学会了什么是男人的责任与担当。

朱振海

二零一九年五月