

学校代码: 10589



学号: 13085208210006

分 类 号: _____

密级: _____

海南大学

硕 士 学 位 论 文

题 目: 基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位
系统研究

作 者: 洪惠鹏

指导教师: 沈重 教授

专 业: 电子与通信工程

时 间: 二〇一六年五月

Research on UWB indoor positioning system based on TDOA algorithm

A Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

*For the Master Degree in the College of Information Science &
Technology*

By

Hong Hui-peng

Supervisor: Shen Chong

Major: Electronics and Communication Engineering

Submitted time : May, 2016

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：洪嘉鹏

日期：2016年5月24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。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：洪嘉鹏
日期：2016年5月24日

导师签名：江太亮
日期：2016年5月24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：洪嘉鹏
日期：2016年5月24日

导师签名：江太亮
日期：2016年5月24日

摘 要

随着无线通信技术的快速发展以及人们对定位服务需求的日益增多,无线室内定位技术正在获得越来越多的关注。由于全球定位系统(Global Positioning System, GPS)是专门针对无线室外定位功能而组建的具有特定结构的室外定位系统,其用于室内定位无法获得所需的有效信息。故如何选取一个无线通信技术用于室内定位系统非常关键。

相比于目前室内定位所采用的无线通信技术如 WIFI、蓝牙、红外、超声波、射频识别等,超宽带(Ultra Wideband, UWB) 技术具有低功耗、低成本、抗多径干扰能力和穿透能力强等优点。它是一种新的共享使用频谱方式,可用于任何一类通信系统,其在 10 米左右的范围内可实现数百 Mbit/s 甚至数 Gbit/s 的数据传输速率,远远超过其他通信系统。

本文首先对 UWB 无线通信技术和基于接收信号的到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)算法的国内外发展现状做了简单说明介绍。之后对 UWB 室内定位系统的应用进行了详细的说明,并对几种定位算法的实现进行了理论分析和推导。在此基础之上,通过对 UWB 室内定位系统的硬件模块介绍,提出了 TDOA 算法在嵌入式室内定位系统中的实现。最后,通过在 Hainan EVK 实验平台进行室内定位测试,对定位结果进行误差分析并测量系统功耗。大量的实验分析和性能比较表明基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位系统在精确定位的同时,能减少基站与终端的相互通信,从而降低系统的功耗,在一定程度上更适合于多标签大规模的室内精准定位。

关键词: UWB 技术; TDOA 算法; 室内定位系统

Abstract

With the rapid development of wireless communication technology and growing demand for location-based services, the wireless indoor positioning technology has gained growing attention. However, GPS specifically aims at wireless outdoor positioning function which formed with a specific structure of the outdoor positioning system, it can not obtain the required information effectively in the room. Therefore, how to select a wireless communication technology used in indoor positioning system is critical.

Compared with the wireless communication technologies in indoor positioning such as WIFI, Bluetooth, Infrared, Ultrasonic, RFID, UWB(Ultra Wideband) technology has the advantages of low power consumption, low cost, anti-multipath interference and strong penetrating power etc. It is a new spectrum sharing technology and can be used for any kind of communication system. In addition, it's 10 meters range can be realized in hundreds of Mbit/s even several Gbit/s data transmission rates, far more than any other communication systems.

Firstly, this paper briefly introduces the development status at home and abroad of UWB wireless communication technology and TDOA algorithm. Secondly, it illustrates the application of UWB indoor positioning system in detail, and derives and analyses the several kinds of localization algorithm. On this basis, through the introduction to the hardware module of UWB indoor positioning system, the paper puts forward the TDOA algorithm which is implemented in embedded indoor positioning system. Finally by the Hainan EVK experiment platform test, it analyzes error and measures system power consumption based on the positioning result. A large amount of experimental analyses and performance comparisons prove that UWB indoor positioning system based on TDOA algorithm at the same time of accurate positioning, can reduce the intercommunication between the base station and terminal, so as to reduces the power consumption of the system. To some extent, it can be more suitable for more labels and large-scale indoor accurate positioning.

Key words: UWB technology; TDOA algorithm; Indoor positioning system

目 录

1 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 UWB 无线通信技术的国内外研究现状.....	2
1.2.2 室内定位算法的国内外研究现状.....	3
1.3 研究内容及组织结构.....	5
2 UWB 室内定位概述.....	7
2.1 UWB 技术概述.....	8
2.1.1 UWB 定义.....	8
2.1.2 UWB 实现方式.....	9
2.1.3 UWB 技术应用.....	11
2.2 UWB 室内定位算法.....	12
2.2.1 RSSI 定位算法.....	12
2.2.2 AOA 定位算法.....	13
2.2.3 TOA 定位算法.....	14
2.2.4 TDOA 定位算法.....	14
2.3 UWB 室内定位系统.....	17
2.3.1 系统总体介绍.....	17
2.3.2 UWB 室内定位系统优势与应用.....	17
2.4 本章小结.....	19
3 UWB 定位平台硬件介绍.....	20
3.1 Hainan EVK 定位系统硬件.....	20
3.2 硬件模块组成.....	21
3.2.1 主控模块.....	22
3.2.2 室内定位模块.....	23
3.2.3 电源模块.....	24
3.2.4 通信模块.....	26
3.3 本章小结.....	27
4 系统软件总体介绍.....	28
4.1 TDOA 算法在 UWB 室内定位系统中的实现.....	28
4.2 基站间无线时钟同步的实现.....	29
4.3 上位机介绍.....	31
4.3.1 中央定位服务器.....	31
4.3.2 控制器.....	32

4.3.3 客户显示端.....	33
4.4 本章小结.....	34
5 系统测试与分析.....	35
5.1 实验环境及布置.....	35
5.2 软件配置步骤.....	36
5.3 系统测试分析.....	40
5.3.1 测试方式.....	40
5.3.2 测试结果分析.....	42
5.4 本章小结.....	43
6 总结与展望.....	44
6.1 本文总结.....	44
6.2 课题展望.....	44
参考文献.....	45
硕士期间科研成果.....	47
致 谢.....	48

1 绪论

1.1 课题研究背景及意义

随着无线通信技术的快速发展及人们对定位服务的需求与日俱增,无线室内定位技术正在得到日益增长的重视。然而, GPS 是专门针对无线室外定位功能而组建的具有特定结构的室外定位系统。对于信号到达较为容易的开阔室外环境, GPS 可以提供高精度的定位信息。但对于室内环境而言,由于建筑物本身的遮挡以及建筑物内部结构包括墙壁、门窗等对信号的阻挡和实时变化的人员走动,室内环境中能接收到的 GPS 信号极其微弱,从而无法获得定位所需的有效信息。因此,人们考虑建立一种室内定位系统,为日益增长的室内定位需求提供可靠的服务。

超宽带(Ultra Wideband, UWB)技术是一种新的共享使用频谱方式,可用于任何一类通信系统。相比于目前室内定位所采用的无线通信技术如 WIFI、蓝牙、红外、超声波、射频识别等, UWB 无线通信技术的优点是低功耗、低成本、抗多径干扰能力和穿透能力强。另外, UWB 无线通信在 10 米左右的范围内可实现数百 Mbit/s 甚至数 Gbit/s 的数据传输速率,远远超过其他通信系统。基于 UWB 的定位技术除具备 UWB 通信的所有特点外,还具有精度高、安全性好、系统复杂度低等优点,它将成为未来无线室内定位技术的首选。

随着工业 4.0 标准的提出及物联网技术的不断升级发展,各行业对人员、货物、资产设备等实时定位的应用场景不断增多,故低功耗、高抗干扰能力的 UWB 定位技术应用于安防监控、国防航空航天、无人工业化操作、海域勘探、数字化旅游等新兴领域具有重大意义。例如,在商场、宾馆等场所遇到了恐怖袭击或者火灾等紧急情况的时候,我们希望能借助精确的室内定位导航系统来找到最快的撤离路径或安全出口,同时也可向救援人员提供受困人员精确的位置信息;在物流系统中,室内定位可用于对货物出入库、运输及储存等智能化管理,减少管理者工作量,加大安全保障等(叶佳卉, 2013)。随着无线室内定位技术的应用市场迅速扩大,代表其发展方向的 UWB 定位技术的发展前景也会更加广阔。

TDOA (Time Difference of Arrival) 是一种利用时间差进行定位的算法,它是通过某一被测信号源发射无线信号到达不同基站的时间差来确定信号源的位置。TDOA 定位算法因其不必对现有网络设备加以大规模改造就可完成对移动台的精确定位,极大降低了时间同步的要求,所以受到了国内外研究学者越来越广泛的关注,并得到了广泛的研究应用。目前,基于 TDOA 无线定位技术主要应用于雷达定位系统、移动通信网络定位服务、紧急救援、汽车导航、智慧城市、蜂窝系统优化设计和无线传感网络等,而研究 TDOA 定位算法与 UWB 无线通信技术的结合也将具有重大的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 UWB 无线通信技术的国内外研究现状

UWB 无线通信技术一直以来都是国内外射频通信领域的研究热点。IR-UWB 技术在 1989 年被美国国防部确定为 UWB 技术的标准。2002 年, 美国联邦通讯委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 批准 UWB 无线电在严格限制条件下可在公众通信频段 3.1GHz-10.6GHz 上运行, 这一措施有力地推进了 UWB 通信的发展, 随之而来的便是各种技术方案围绕国际标准的制定方面展开激烈的竞争。2007 年 3 月, 国际标准化组织 (International Organisation for Standardisation, ISO) 正式通过了多宽带正交频分复用 (Multi Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing, MB-OFDM) 技术标准, 被认为是 UWB 技术的第一个国际标准(M.El-Hadidy et al., 2012)。2007 年 3 月 IEEE 发布了基于 UWB 物理层的 IEEE 802.15.4a-2007 标准, 这一标准旨在为无线个域网中使用超低数据速率、超低功耗和超低复杂度的器件进行短距离数据传输时提供技术支持。IEEE 802.15.4a 协议是 IEEE 802.15.4 协议的修订版, 有两种物理层实现方式, 即超宽带技术 UWB 和 Chirp 扩频(Chirp Spread Spectrum, CSS)技术。其中, UWB 物理层可以工作在 1GHz、3~5 GHz 以及 6~10 GHz 这三种频率范围, 工作效率高, 即使在较低的发送功率下仍具有较好的鲁棒性(E.I.Shah Saadon 2 et al., 2013)。

近年来, UWB 无线通信技术研究在国际上倍受关注, 各个国家都致力于超宽带技术及其产品的研发与应用。在美国国防部, 他们的重点技术计划连续几年都把 UWB 列为研究项目中的重点课题。许多著名的大学和重点实验室, 如美国 MIT Lincoln 实验室、Los Alamos 国家实验室、Ohio 州立大学、Georgia 理工学院、英国 RSRE 实验室等都开展了对 UWB 技术的研究。这其中美国的 AETHER-WIRE&LOCATION、Ubise 等多家公司推出的基于 UWB 技术的芯片和系统都走在了世界前列。他们公司开发的一款名为 Localizers 的基于 UWB 技术的室内定位系统中, 测距精度在 1cm 左右, 两点之间最大的距离为 30-60m, 通过待定位的 UWB 接收机和几个参考收发信机间的脉冲通信, 再通过检测携带信号中的伪随机码时延用来判断到不同参考点距离, 而知道 3 个或 3 个以上参考点就可确定标签的三维坐标; 而英国 Multispectral Solutions gonsi 公司开发一款名为 Sapphire 的 UWB 室内定位系统, 由至少 4 个漫游器和接收机, 还有一个与计算机系统相连的控制中心组成, 定位精度为 0.3m, 经数据平滑后精度可达到 0.1m(唐春玲, 2008)。

另外, 荷兰、爱尔兰、日本等国家也不甘落后, 都在抓紧对 UWB 技术进行研发, 以期能率先抢占 UWB 技术的市场。其中爱尔兰 Decawave 公司开发的一系列名为 ScenSor 的集成电路产品中, 符合 IEEE802.15.4a 标准, 能以极低的成本、超低的功耗和以往难以企及的 $\pm 10\text{cm}$ 精度, 识别室内环境中的任意人或物的具体位置。其中一款名为 DWM1000 模块的产品中 (如图 1 所示), 集成了射频无线电设计所需的全

部元器件,包括 DW1000 芯片、天线、平衡-不平衡变换器、石英晶体及无源元件,均集成在一个 $23 \times 13 \times 2.9$ 立方毫米的 24 针侧边城堡形封装(side-castellation package)中。DWM1000 模块是一款符合 IEEE802.15.4-2011 超宽带标准的无线收发模块。它以 DecaWave 的 DW1000 芯片为基础,定位精度达到 ± 10 厘米。它支持高达 6.8 Mb/s 的数据传输率,特别适合无线传感器网络(WSN),同时能提供比以往更精确、更经济和更节能的室内定位功能。它还有不错的通信距离,直视距离达 290 米,非直视距离为 35 米,有助于降低系统成本及对额外基础设施的需求。

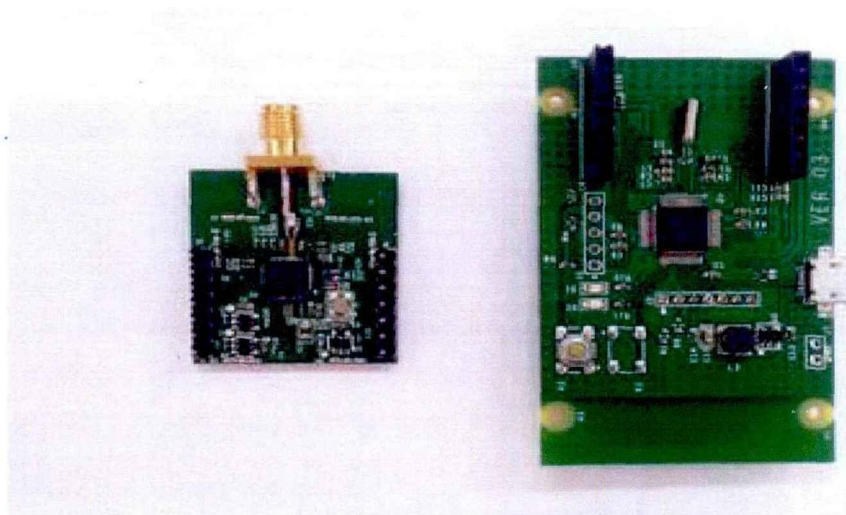


图 1 DWM1000 室内定位模块

Fig.1 DWM1000 indoor positioning module

我国 UWB 相关研究起步相对较晚但发展迅速。2001 年,国家“863”计划启动了高速 UWB 实验演示系统研发项目,经过遴选,由东南大学、清华大学、中国科技大学分别进行研发,各自提出 UWB OFDM、UWB 脉冲等数据传输方案(L.Zhiwei et al., 2011)。在 2011 年的中国国际信息通信展览会上,深圳国人通信有限公司推出了超宽带数字光纤分布系统,可实现多制式多业务共同接入、协同发展以及共建共享解决方案,已在国家大剧院等处应用(G.Ting et al., 2010)。以海尔集团、环旭电子集团为代表的国有企业在基于 UWB 技术的产品研发上也走在了世界的前列,他们与飞思卡尔半导体有限公司一起合作推出的 UWB 高清电视及家庭数字化媒体中心等系列产品,标志着中国企业在高新技术应用开发的领域上正逐步迈向世界先进的行列。

1.2.2 室内定位算法的国内外研究现状

在传统的室内定位算法中,比如 Chan 算法(Y.Chan et al., 1994)、泰勒级数展开法、Friedlander 算法等,都应用了 LS(Least Squares)以二乘误差最小为优化目标的算法或者是 WLS(Weighted least Squares)以加权最小二乘误差最小为目标算法(K.Yu et al., 2004)(K.Yu et al., 1994)(J.J.Caffery et al., 1998),只有当系统测量误差为零均值的高斯分布时,这些算法才能得到较高的精度。但这只是理想的环境,在实际

环境中非视距误差 (Non-Line-Of-Sight, NLOS) 对定位性能的影响是非常严重的。目前对非视距误差的主要处理思路是鉴别出当前信道的 NLOS 状态信息, 然后进行相关算法处理。现在国内外专家学者在研究室内定位算法中的 NLOS 误差时, 大多是以蜂窝网络为背景的。文献 (S.Venkatesh et al., 2007) (K.Yu et al., 2009) 提出利用历史观测值的标准差与某一门限进行比较, 采用二元假设检验, 识别出 NLOS 状态, 精度不高并且实时性较差。文献 (I.Guvenc et al., 2009) 使用扩展卡尔曼滤波进行定位, 使用 AOA 作为辅助消除 TOA 估计中的 NLOS 误差。文献 (A.Tayebi et al., 2009) 和 (W.Ke et al., 2011) 都将 NLOS 误差消除与目标追踪结合, 首先使用有偏卡尔曼滤波对测量值进行平滑、滤波处理, 然后将平滑的 TOA/TDOA 数据使用扩展卡尔曼滤波估计目标的位置。

由于硬件起步较晚, 加上无线时钟同步 (C.McElroy et al., 2014)、标签容量模型 (C.Yin et al., 2013) 及网络可扩展 (S.Won-Yong et al., 2010) 等通信协议难点, 故目前国内外 UWB 技术还主要集中在带宽应用及高速率接入等方向, 但基于 UWB 的室内定位算法设计的研究也是如火如荼。文献 (邹金平, 2008) 和 (Choliz J et al., 2011) 研究了视距 (Line of Sight, LOS) 传播环境下的几种经典定位算法, 包括 Fang 算法、Chan 氏算法和 Taylor 算法, 分析了 NLOS 多径传播对 TOA/TDOA 定位的影响并给出了相应的仿真实现, 并评估了在室内场景下不同定位和跟踪算法的性能; 文献 (徐劲松等, 2009) 重点建立了基于 UWB 的室内定位系统模型, 确定了系统的发射机和接收机结构, 对系统定位算法、接收同步技术以及信道估计等关键技术等进行了深入研究; 文献 (Yuechun Chu et al., 2005) 则提出了一个基于室内环境的 3D 定位系统, 包括分层位置的方案设计和一个基于 UWB 的, 由传感器和标签组成的定位网络。该定位系统充分利用了 UWB 的低功率传输、鲁棒性、多同步传输等特点; 文献 (张忠娟, 2012) 在研究了 UWB 技术基本概念、信道模型等的基础上, 分析了传统无线定位方法和算法, 在已有混合算法的基础上提出了一种质心 Taylor 混合定位算法。该算法可以在提高 Taylor 初值质量的前提下减少预设参考节点数目, 降低系统硬件成本; 文献 (林传分, 2014) 进一步提出了基于小波分析除噪的全质心定位算法, 降低了测距误差, 充分利用了全质心定位方法对测距值的不敏感性, 进一步提高了系统定位精度, 而且得到了更佳的鲁棒性。

另外, 基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位系统的研究, 文献 (韩笑楠, 2013) 基于卡尔曼滤波 (Kalman Filter, KF) 具有良好的跟踪性能特点, 提出了一种 TDOA 定位算法, 并给出了定位算法性能的运动轨迹和理论界, 从而建立了一个基于天线阵列的单基站高精度 UWB 定位系统; 文献 (屠晓东, 2015) 则提出一种改进算法, 充分考虑了 CRLB 定理, 即 TDOA 的估计精度与信号的有效带宽成正比, 并采用 2 个 IR-UWB 信号参与互相关运算, 从而获得 TDOA 值; 文献 (Kietlinski-Zaleski J et al., 2010) 和 (Evennou F et al., 2005) 分别基于 TDOA 算法, 通过实验验证了一种只需 3 个基站就能测距并实现精确定位的 UWB 室内定位模型。

随着移动通信产业进入了3G/4G时代,作为LTE核心网络技术解决方案的OFDM技术和MIMO技术备受瞩目,同时应用该技术解决室内无线定位问题也取得了大量的研究成果。其中文献(倪浩等,2009)和(Fang Zhao et al., 2007)为了在OFDM中的无线网络定位服务(LBS)实现准确的到达时间(TOA)测量,提出了一种TOA的估计新算法。这种算法将TOA估计,分为整数采样周期和小数采样周期的TOA估计。接收机以迭代搜索的方法,利用训练符号时频特性来获得小数采样周期的TOA估计,并利用估计出来的结果来修正小数采样周期时延所带来的相关谱扩展来获得精确的室内定位效果。在室内定位算法取得大量研究成果的同时,研究机构和学者同样对动态跟踪算法进行了深入的研究和探讨。如文献(吕宝红,2013)针对临近空间的低动态目标在进行圆周运动时,提出一种TDOA-CVCSCT算法。在TDOA-CVCS算法模型集基础上,该算法增加了协同转弯(CT)的模型,改进圆周运动的角速度计算方法。在跟踪匀速圆周运动时,这种算法能有效降低TDOA-CVCS算法的误差,对复杂机动目标跟如匀速圆周运动等的跟踪精度较高。文献(Mehdi Rasti et al., 2010)提出了一个分布式动态跟踪功率控制算法,在无线蜂窝网络中利用TPC和OPC选择性的方式,有效提高了系统的吞吐量。

1.3 研究内容及组织结构

本文在前人的研究成果基础之上,重点分析了UWB室内定位系统的应用问题,特别讨论了几种定位算法特别是TDOA定位算法在室内定位系统中的应用。接着文章分析了系统的硬件模块电路及上位机软件,并针对现有的TDOA定位算法的特点,完成TDOA算法在UWB室内定位系统中的实现,并通过在Hainan EVK嵌入式实验平台上测试,证明了TDOA算法在UWB室内定位系统中的应用优势。本文由六章组成,其章节安排如下:

第1章绪论,对本课题的研究意义及研究背景等进行简要概述,对UWB技术及室内定位算法的国内外研究现状进行详细的分析讨论,最后对本课题的主要研究内容、组织结构进行总结说明。

第2章是整个论文研究的理论基础,首先对UWB技术包括其定义、实现方式、应用等进行概述,然后对几种室内定位算法特别是本论文所用到的TDOA定位算法进行重点介绍,最后对本文所设计的UWB室内定位总体系统进行简要分析,再对其一些优势与应用前景进行了简单介绍和说明。

第3章对本论文设计的系统所使用的UWB定位平台的硬件部分作一个详细的介绍。首先介绍了Hainan EVK超宽带实时定位系统的组成及工作原理,其次再对基站所使用的EVK 1000嵌入式开发板进行了总体硬件结构图的介绍,最后再介绍开发板各个模块的芯片工作原理、电路图等等。

第4章从系统软件部分入手,先对TDOA算法在UWB室内定位系统中的实现作了一个总体的介绍,然后详细说明了基站之间无线时间同步算法的实现,包括对卡尔

曼滤波算法的介绍等，最后对上位机软件模块进行了一个详细的说明，包括中央定位服务器、控制器、客户显示端的介绍等等。

第 5 章在 Hainan EVK 实验平台上对基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位系统进行了系统测试并分析。在对实验环境，软件配置步骤进行一个总体介绍的基础上，对实验结果进行系统分析并评估。

第 6 章对本文所做的工作取得的研究成果进行总结，得出结论，同时对课题其他方面的研究方向进行展望。

2 UWB 室内定位概述

如图 2 所示, 相对于目前其他室内定位所采用的无线通信技术如 WIFI、蓝牙、红外、超声波、射频识别 等, IEEE 802.15.4a UWB 技术如果用于定位, 其在精确度、实时性能和数据带宽等方面都具有绝对的优势。UWB 实时响应频率可达到 10~40Hz, 而其他定位技术普遍在 1Hz 以下; 脉冲无线电超宽带 (Impulse Radio Ultra - Wideband, IR - UWB) 的脉冲宽度仅为纳秒级或亚纳秒级, 响应频率和脉冲宽度决定了 UWB 的定位精度在理论上可以达到厘米级。UWB 技术抗多径能力优秀, 且时间分辨率很高, 具有一定的穿透能力, 这些特点都有利于在室内复杂多径环境中进行实时定位和动态数据的收集。通过 UWB 网络的自身扩展, 或者结合传感器网络或无线局域网异构组网技术, 可以实现室内广域范围内的大规模节点精确定位。近年来, UWB 室内定位凭借着其众多的优势及广阔的应用前景, 已经得到了国内外的广泛关注。本章是整个论文研究的理论基础, 主要对 UWB 技术、几种室内定位算法、UWB 室内定位总体系统及其应用前景进行介绍。

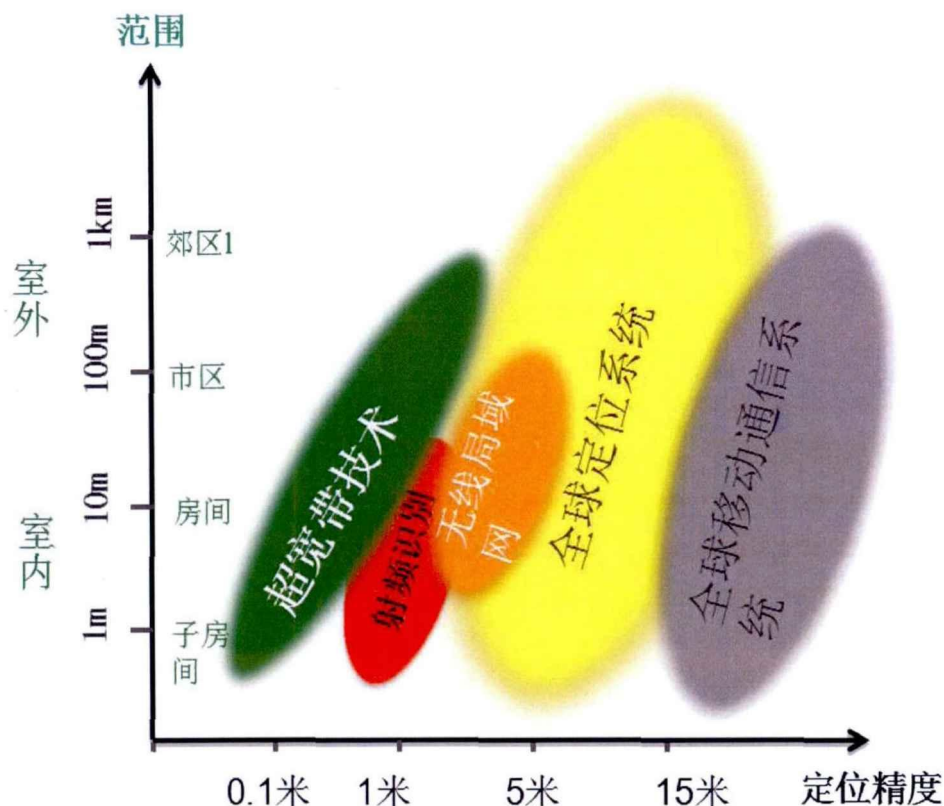


图 2 不同定位技术在室内外的定位精度比较

Fig.2 Positiong accuracy comparision of different position technology in indoor and outdoor

2.1 UWB 技术概述

UWB 是一种短距离无载波的无线通信技术，它利用纳秒乃至微微秒级的非正弦波窄脉冲来传输数据。有人认为它是无线电领域的一次革命性的进展，将成为未来短距离无线通信的主流技术。UWB 在早期被用来做近距离的高速数据传输，近年来则被国内外开始用来做近距离的精确室内定位。

2.1.1 UWB 定义

超宽带技术是指具有很高的带宽比(射频带宽和其中心频率之比)的无线电的技术。2002 年 2 月，美国 FCC 对于 UWB 的定义如下：

$$\frac{(f_H - f_L)}{f_c} > 20\% \quad (\text{或者总带宽为 } 500\text{MHz}) \quad (2-1)$$

式中， f_H 、 f_L 分别是功率较峰值功率下降了 10dB 时与其对应的上限频率和下限频率， f_c 为中心频率或者载波频率，如图 3 所示。可见，UWB 信号带宽与通常所定义的 3dB 带宽不同。

事实上，目前一些被称作“超宽带”的系统，他们的带宽比未必都是 20%，例如美国高级国防研究计划所对超宽带的特征定义为相对带宽大于 25%。也有一些定义相对带宽为 10%左右，但这已不是基于正弦载波的无线电系统概念，而是特别针对一种利用冲激脉冲作为信息载体的非正弦载波的无线电系统。

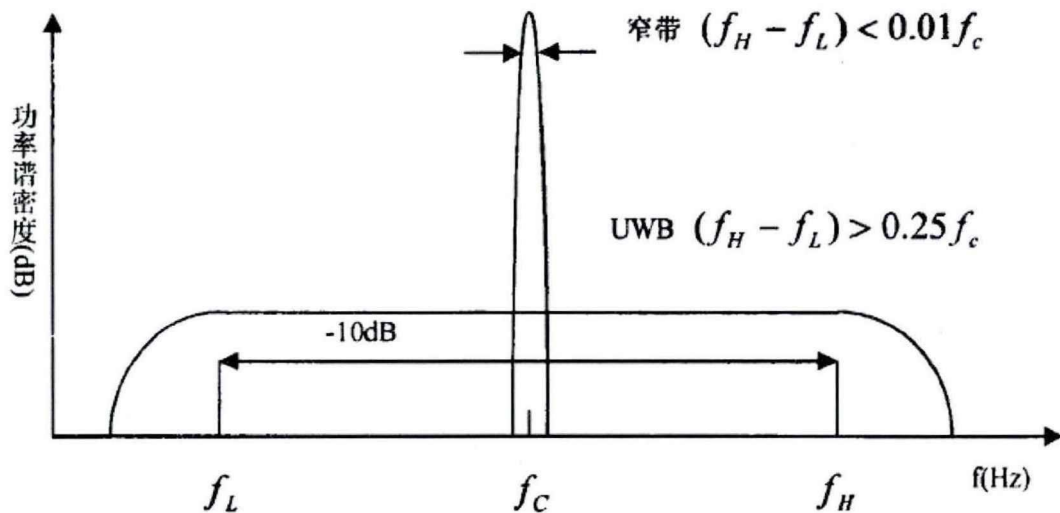


图 3 超宽带信号与窄带信号的比较

Fig.3 The architecture of wireless sensor network

由香农信道容量公式 $C = B \log_2(1 + P / BN_0)$ (式中 B 为信道带宽， N_0 为高斯白噪声的功率谱密度， P 为信号功率) 可看出，增大通信的容量有两种实现方式，一是通过增加信号的功率 P ，二是增大传输的带宽。UWB 技术就是通过增大传输带宽从而来获得较高的传输速率。

2.1.2 UWB 实现方式

目前, FCC 所公布的 UWB 定义, 是从信号带宽的角度来定义无线电信号, 但没有指明相对应的实现方式。“超宽带无线电”的主要实现方式分别有脉冲无线电(又称冲激无线电)技术(M.Z.Win et al., 1998)和多频段 UWB 技术(Naiel Asdar et al., 2003)。

(1) 脉冲无线电

脉冲无线电指的是采用冲激脉冲或者超短脉冲作为信息载体的无线电技术。这种技术的特点是对非常窄的(往往小于 1ns)脉冲信号来进行调制, 从而获得非常宽的带宽用来传输数据。将传统的窄带通信系统和脉冲无线电收发信机进行对比, 可看出在实现方式上两种技术有着明显差别。窄带系统一般是采用正弦载波调制来实现频谱搬移, 信道上传输的是射频的已调信号, 接收机需要经过逐级的下变频之后再来进行解调, 以恢复原始信息。脉冲无线电则将经过的频谱成形之后的宽带窄脉冲直接发射出去, 信道上传输的是基带信号, 接收机上主要是一个相关检测器, 结构比传统的窄带通信系统简单得多。

为了能使天线把信号的能量有效辐射出去, 必须对所用脉冲频谱特性提出一定的要求(即不含直流分量, 低频分量少, 信号能量主要集中在射频部分)(G.F.Ross, 2007)。因此, 脉冲无线电是采用高斯函数的各阶导数来作为发射脉冲波形, 通过选择脉冲宽度与阶数从而获得不同的带宽与中心频率位置。UWB 信号有多种形式: 高斯单脉冲、高斯包络脉冲、三角包络窄脉冲、基于正弦波的窄脉冲等等, 我们常用的脉冲波形是高斯脉冲。下面我们将主要介绍高斯脉冲和它的各阶倒数脉冲的波形。

高斯脉冲信号表达式如下:

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

令 $\sigma^2 = \alpha^2 / 4\pi$, 有

$$s(t) = \frac{\sqrt{2}}{\alpha} e^{-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}} \quad (2-3)$$

适当的选取时间参数 α 时, 可使信号 $s(t)$ 成为比较合适的脉冲。 α 会影响脉冲的带宽与幅度, 故 α 被称为脉冲波形的成形因子, α 增大, 脉冲幅度减小, 脉冲宽度变宽。

下面讨论基本的高斯脉冲微分特性。基本高斯脉冲波形定义如下:

$$p(t) = A_p e^{-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}} \quad (2-4)$$

其能量为

$$E_p = \int_{-\infty}^{+\infty} p^2(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} A_p^2 e^{-\frac{4\pi t^2}{\alpha^2}} dt = \frac{A_p^2 \alpha}{2} \quad (2-5)$$

可以看出, $p(t)$ 具有的单位能量条件为

$$A_p = \pm \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \quad (2-6)$$

对基本高斯脉冲波形的函数进行微分运算, 可得到基本高斯脉冲的一阶到三阶导数波形的函数如下:

一阶导数:

$$p'(t) = A_p \sqrt{e} \frac{t}{t_p} e^{-\frac{t^2}{2t_p^2}} \quad (2-7)$$

二阶导数:

$$p''(t) = A_p \frac{4\pi}{\alpha^4} e^{-\frac{2\pi t^2}{2t_p^2}} \quad (2-8)$$

三阶导数:

$$p^{(3)}(t) = A_p \frac{(4\pi)^2}{\alpha^6} t e^{-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}} [3\alpha^2 - 4\pi t^2] \quad (2-9)$$

目前最普遍采用的脉冲波形是高斯函数的二阶导数 (M.Gabriella et al., 2005)。脉冲无线电的这种传输方式, 在中低速应用场景中具有系统实现简单、成本低、功耗小、抗多径能力强、空间(时间)分辨率高等优点, 是超宽带技术早期发展首先采用的方式, 在许多领域都具有广泛的应用前景。脉冲无线电也是本论文采用的 UWB 实现方式。

(2) 多频段 UWB

随着超宽带技术的快速发展, 目前出现的一些新的超宽带技术中, 最具有代表性的是多频段 (Mufti-band) 技术。这种技术是一种和冲激无线电不同的超宽带实现方式。根据美国 FCC 对 UWB 技术定义, 信号的带宽超过 500Mhz 的信号, 都被认为是超宽带信号, 故采用冲激脉冲并不是唯一的实现超宽带通信的途径。多带传输系统可以将可用的 UWB 频谱划分成若干个子带, 每个子带宽度不小于 500MHz。通信时, 可以根据信息速率、系统功耗要求及与其他系统一起共存的要求等, 动态地使用部分或者全部的子带, 通过同时发送多个不同的频带 UWB 信号从而来提高频谱的使用率。因为这些 UWB 信号的频率不同, 所以它们不会相互干扰。

2.1.3 UWB 技术应用

当前, 移动通信技术演进不断取得新的进展, 对于新技术的应用研究也在不断丰富。作为下一代无线网络的关键技术之一, MIMO 技术成为最热门的超宽带候选技术, 同时也给帧结构设计、资源分配、信道设计等技术带来了新的发展机遇。MIMO 技术

作为一个系统技术,其提出和设计主要是为了满足市场的长足发展,大幅度地提升系统性能,保持相对于其它技术的竞争力。这些未来无线技术的应用前景都值得关注。

通常认为,短距离无线网络主要指无线局域网(WLAN)和无线个域网(WPAN)。从网络覆盖半径区分,WLAN覆盖50~100m的范围,WPAN覆盖围绕个人空间10m左右的地理范围。根据对超宽带的容量分析可知:UWB的容量优势主要体现在10m左右的覆盖区域。因此,UWB的应用主要定位于WPAN,结合多跳自组织网络(Adhoc)技术,网络拓扑可以灵活变化,覆盖范围可以不断延伸。目前,UWB技术凭借其自身的技术特点,在高、低速WPAN应用中都有很强的竞争力。

(1) 在高速 WPAN 中的应用

高速 WPAN 的主要目标是解决个人空间内各种办公设备及消费类电子产品之间的无线连接,以实现信息的快速交换、处理、存储等,其应用场合包括办公室、家庭。个人空间内的设备类型非常丰富,大体分为三大类:电脑及其外围设备、家用音视频娱乐设备、便携式终端。这些设备大部分对通信速率和实时性要求很高,当前它们之间主要通过通用串行总线(USB)、1394 总线等高速总线进行连接,通信速率高达几十兆比特每秒至几百兆比特每秒。采用 UWB 技术为这些设备提供高速无线连接将是比较理想的解决方案,配合上层协议灵活地改变网络拓扑,既可以实现点对点连接,也可以实现多个设备互联。典型的应用如家庭多媒体应用(如图4所示)、计算机桌面应用及多媒体会议应用等等。

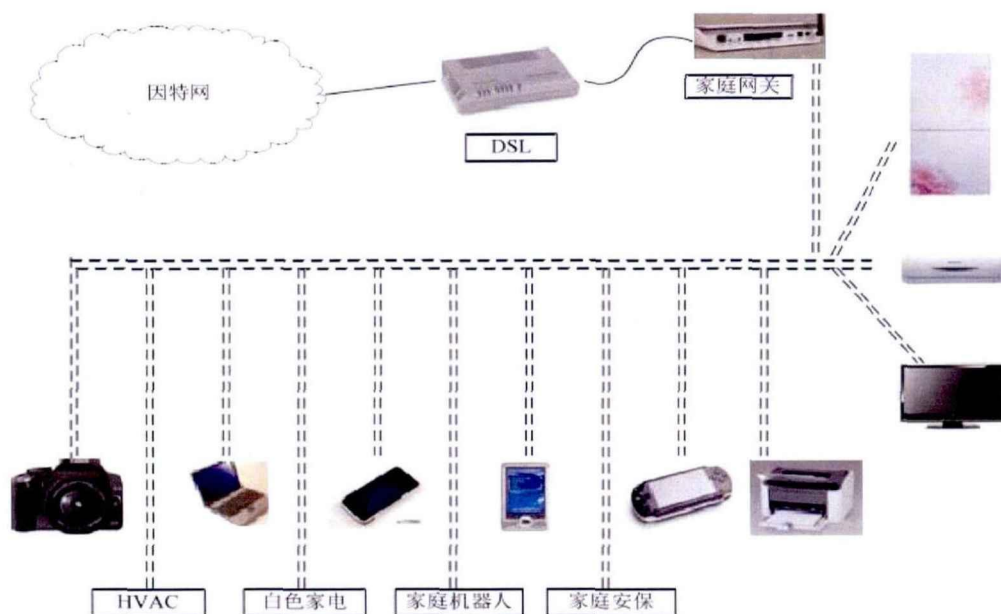


图4 UWB 在智能家庭中的应用

Fig.4 UWB applications in intelligent home

(2) 在低速 WPAN 中的应用

低速 WPAN 的主要应用包括家庭自动化、资产跟踪、工业控制、医疗监护、安全与风险控制等。这类应用对传输速率要求较低,通常为几千比特每秒至几万比特每秒,但它们对成本和功耗的要求很高,在很多应用中还要求提供精确的距离或定位信

息。这些应用很多可以归纳到无线传感器网络 (WSN) 的范畴, 而 UWB 具有功耗低、复杂度低、定位精度高的特点。因此, 在 WSN 中采用 UWB 作为无线连接手段, 不但可以满足低成本、低功耗的要求, 同时可以提供非常精确的定位信息。

2.2 UWB 室内定位算法

UWB 室内定位算法属于无线定位算法的一种, 定位原理可按其测量参数的不同分为基于接收信号的强度法 (Received Signal Strength Indication, RSSI)、基于接收信号的到达角度法 (Angle of Arrival, AOA)、基于接收信号的到达时间法 (Time of Arrival, TOA) 和基于接收信号的到达时间差法 (Time Difference of Arrival, TDOA) 等。RSSI 通过接收到的信号强弱来测定信号点与接收点的距离, 然后根据相应的数据进行定位; AOA 通过某些硬件设备来感知发射信号的到达方向, 计算接收节点和发射节点间的相对方位或角度, 再利用三角测量方法或其他方式来计算出未知节点的位置; TOA 由接收信号的传播时间来估计距离, 再根据相应数据的计算进行定位; TDOA 则通过检测信号到达了两个基站的时间差从而确定移动台的位置。下面将从系统的角度来分析这几种定位算法特别是本文所用到的 TDOA 算法。

2.2.1 RSSI 定位算法

RSSI 定位算法是利用接收信号的强度与移动台到基站的距离成反比的关系, 通过检测出接收信号场强值、已知信道衰落模型与发射信号场强值来估算出收发信号机间的距离, 根据多个距离值就能估计出移动台的位置。在路径损耗模式基础上, 通过测量一个节点上接收信号的强度, 可以计算出两个节点之间的距离。这种基于距离的定位方法至少需三个参考节点才能实现 1 个未知结点的二维定位。用 RSSI 确定距离, 必须清楚信道的特性。因此, 基于 RSSI 的定位算法对这些信道参数的估计很敏感。

电磁波在自由空间的传播损耗是传输距离的函数, 接收信号功率函数表示为:

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi l} \right)^2 \quad (2-10)$$

其中 P_t 是信号的发射功率, G_t 是发射增益, G_r 是接收增益, $P_r(d)$ 是接收信号功率。可看出在发射信号的频率 (波长) 一定的情况下, 接收信号功率与信号传播距离有函数关系。信号在自由空间的传播损耗 $L(d)$ 的公式为:

$$L(d) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{(4\pi d)^2}{G_t G_r \lambda^2} \right) \quad (2-11)$$

如果测得距离信源 d_0 处的接收信号功率为 $P_r(d_0)$, 则相对接收功率 $P_r(d)$ 定义为:

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad (2-12)$$

但在实际的生活或工业环境中，电磁波相对接收功率 $P_r(d)$ 表示为：

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^n \quad (2-13)$$

式中 n 为路径损耗因子。在自由空间中 $n=2$ ，但在实际环境中， n 就不一定是 2，而是根据实际测出的数据估算出来的，此外 n 的值也对环境非常敏感。因此，RSSI 定位算法的精度只依赖于信道参数和两个节点间的距离。在 UWB 定位中若使用 RSSI 定位算法，虽然 UWB 信号带宽非常宽，但这个特点并不足以改善定位的精度。

2.2.2 AOA 定位算法

AOA 定位算法就是通过确定信号的到达方向或者角度来确定信号的位置。这种定位方法一般采用两个或多个参考节点，通过检测接收信号的到达角度来估计目标节点的位置，如图 5 所示。当信号存在有直达路径时，最先到达的信号都会沿直达路径到达，因此 AOA 算法可以通过多基站的智能天线矩阵，测量定位目标中最先到达信号的到达角度，从而估算定位目标的位置。在障碍物较少的地区，采用 AOA 定位方法可得到较高的准确度，但若是在障碍物较多的环境里面，由于无线传输存在着多径效应，误差将会增大。另外，AOA 算法要建立在智能天线基础上才能有效实现。

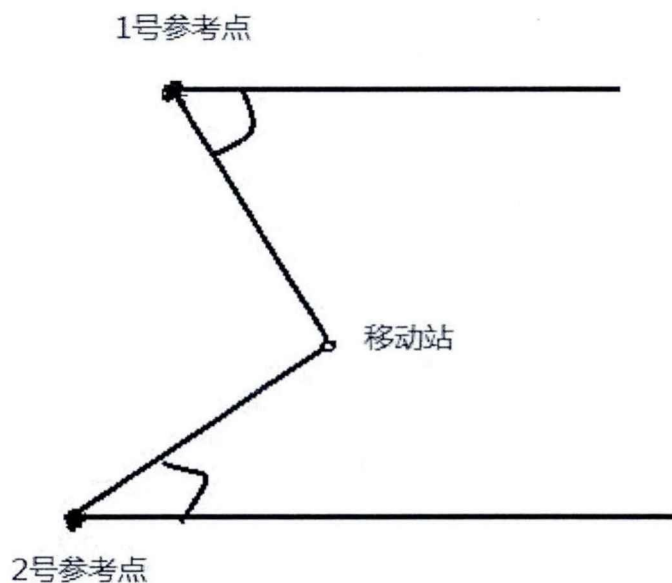


图 5 基于 AOA 的定位原理示意图

Fig.5 Location principle diagram based on AOA

因此，AOA 定位算法并不适用于 UWB 的定位。首先，使用天线阵列会增加整个系统的总成本，UWB 无线电收发机在成本低上的优势将大大削减。其次，UWB 无线电信号有非常宽的带宽，这使得其多径效应非常明显，尤其是在室内环境下，从各个物体上反射回来的信号会严重影响角度的估计。

2.2.3 TOA 定位算法

TOA 定位算法依赖于节点间信号的传输时间测量。如果两个节点能保持时间同步,则接收信号的节点可通过参考节点的时间信息从而确定接收信号的到达时间。对于单路径的加性高斯白噪声(AWGN)信道来说,TOA 定位算法是非常适合进行 UWB 无线定位的,这主要归功于 UWB 非常宽的带宽。TOA 的估计精度用其估计错误的方差 σ_r^2 表示,实际上该精度与信号带宽和接收机的信噪比有关。根据 ML 估计一般理论,在 AWGN 噪声情况下,估计方差 σ_r^2 下限是通过 Cramer-Raode 的下限给出的。

$$\sigma_r^2 \geq \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sqrt{SNR}\beta} \quad (2-14)$$

其中 SNR 是信噪比,是 β 有效信号带宽, β 定义如下:

$$\beta \approx [\int_{-\infty}^{+\infty} f^2 |S(f)|^2 df] / [\int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)|^2 df] \quad (2-15)$$

其中, $S(f)$ 是发射信号的功率谱密度。由上式可知,与 RSSI 技术不同,TOA 定位算法可通过提高信噪比或者有效利用信号带宽的方式来改善定位精度。根据 FCC 规定,室内 UWB 通信实际使用的频谱范围为 3.1GHz-10.6GHz,在这一范围内,有效等方性发射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)不超过-41.3dBm/MHz,信道带宽范围为 500MHz-7.5GHz 时,信号的最大通信距离为 10m(王金龙等,2005)。假如 UWB 脉冲完全使用 3.1GHz-10.6GHz 频带,在信噪比 SNR=0dB 条件下,定位误差将会是厘米级。但是由于 TOA 太依赖于节点间信号的传输到达时间测量,这就对节点的时间同步要求非常高,此时必须再加入特定的卡尔曼滤波算法来确保节点间精确的时间同步,从而才能提高移动台的定位精度。例如,厘米级的精确定位要求其绝对的同步时间要小于 1ns,这就使得应用 TOA 定位算法的硬件平台成本较高。另外,TOA 定位算法在测距时要求基站与移动台之间必须完成 3 次有效的来回通信,这也将大大增加基站和移动台的功耗。

2.2.4 TDOA 定位算法

TDOA 定位算法一般是通过利用终端对两个已知节点收到的信号来进行互相关的处理,从而计算目标节点与已知节点之间的距离(J. Caffery, 2000),因此对于待测节点与已知节点的时间同步要求相对较弱。TDOA 的时间同步是已知节点之间的时间同步,相对于待测节点的同步,已知节点间的时间同步显然更容易于实现。TDOA 定位算法的定位精度相对较高,比较适合于室内环境,在测距时基站与移动台之间最多只需进行一次通信,这将大大降低基站与移动台的功耗。TDOA 算法也是本篇论文用来研究 UWB 室内定位所采用的算法。

TDOA 定位算法的几何基本原理是:用一组 TDOA 的测量值来确定一对双曲线,该双曲线以测量该 TDOA 的两个接收节点为焦点,需要定位的目标的节点就在这对双曲线某一条的分支上,即通过求两组 TDOA 的值,确定两对双曲线的交点,就可

以得到目标节点的准确位置。TDOA 的定位算法可以分为以下几步：1、接收天线接收时间收到两种不同的信号的到达时间差；2、将时间差转换为距离，带入双曲线方程形成双曲线方程组；3、利用可行算法例如三角算法等求解该方程组，得到的解即为位置的估计值（朱永龙，2014）。其原理图如下：

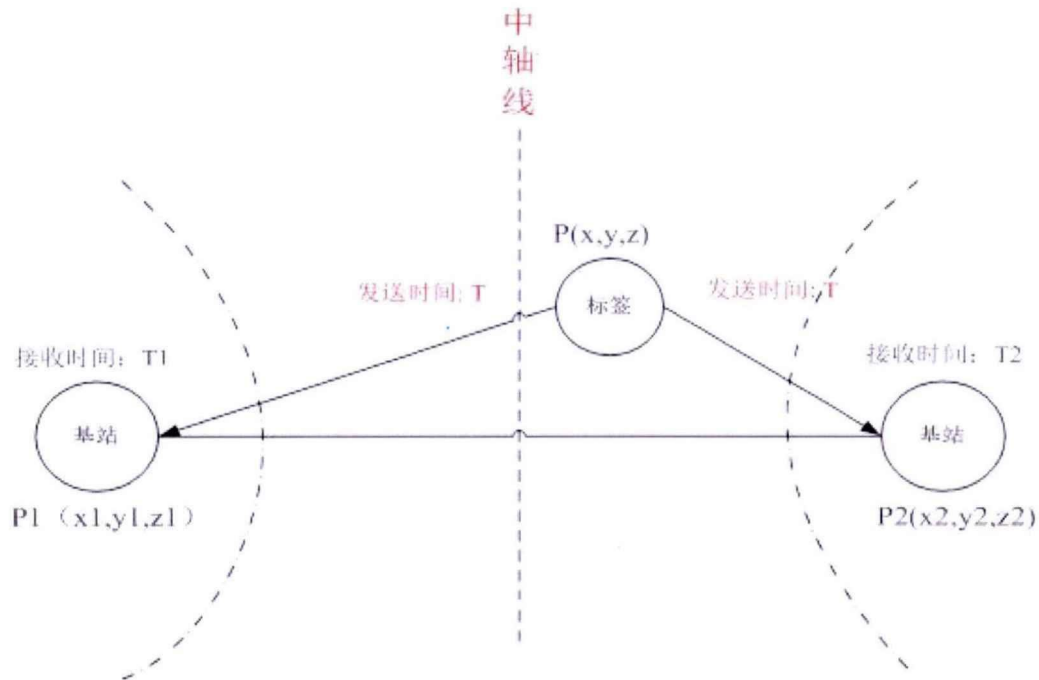


图6 TDOA 定位原理

Fig. TDOA location principle

如图6所示，标签在室内中处于移动状态，可以将它看成双曲线的动点，而基站1与基站2在室内中心为静态节点，可将它们看做成双曲线的2个定点（Huipeng Hong et al., 2015）。那么根据双曲线定义可知，基站1到标签的距离与基站2到标签的距离的差的绝对值为常数 $2a$ ，由此可得：

$$[(T_1 - T) - (T_2 - T)] * c = 2a \quad (2-16)$$

由式（2-16）即可求得常数 a ，从而确定了距离差。

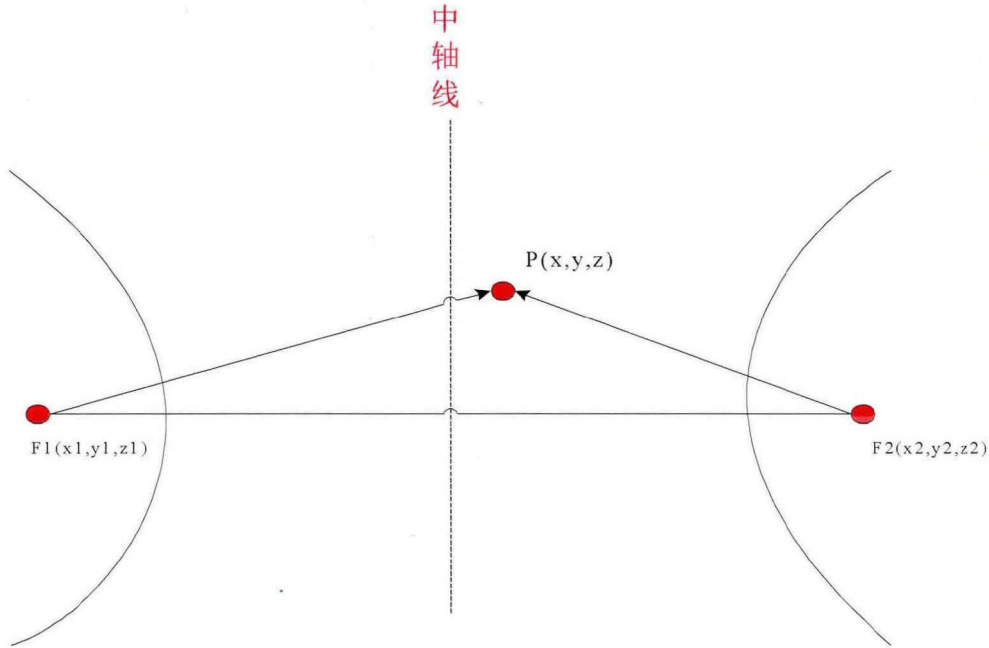


图 7 三角算法确定标签坐标

Fig.7 Triangle algorithm get tag coordinate

再由图 7，根据三角算法公式有：

$$F_1P = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \quad (2-17)$$

$$F_2P = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} \quad (2-18)$$

将式 (2-17) 与式 (2-18) 代入公式 (2-16) 可得：

$$\left| \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} - \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} \right| = 2a \quad (2-19)$$

每个标签可接收到三个以及三个以上的基站信息，由此可得：

$$\left| \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} - \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} \right| = 2a \quad (2-20)$$

同理，可得：

$$\begin{aligned} & \left| \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} - \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} \right| = 2a \\ & \left| \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \right| = 2a \\ & \left| \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} - \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} \right| = 2a \end{aligned} \quad (2-21)$$

由式 (2-19) (2-20) (2-21) 即可求得标签节点 $P(x, y, z)$ ，从而确定标签的位置。

2.3 UWB 室内定位系统

2.3.1 系统总体介绍

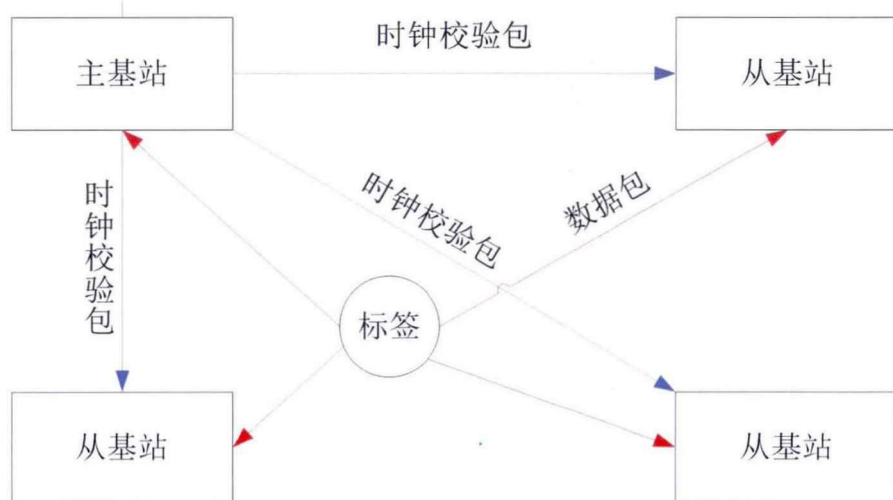


图 8 基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位系统原理框图

Fig.8 The principle block of UWB indoor positioning system based on TDOA algorithm

如图 8 所示，根据 TDOA 定位算法的特性，在本论文所设计的 UWB 室内定位系统中，先在室内环境中的四个角落布置四个基站，分别为一个主基站和三个从基站。定位工作开始时，主基站会定时向每个从基站发送时钟校验包，同时标签会以窄脉冲 UWB 信号形式向所有的基站发送包含有标签发包序号的数据包。从基站接收到主基站的时钟校验包和标签的数据包后会进行一个相对的时间同步计算，得到一个标签到达时间值，再把这个标签到达时间值包括自身 ID 号返回给上位机软件。上位机软件根据接收到的相关数据通过双曲线、三角等算法的计算，即可得到标签的坐标，从而获取标签的实时位置信息。

2.3.2 UWB 室内定位系统优势与应用

UWB 室内定位系统与传统的通信系统工作原理迥异，相比于其它的室内定位技术，超宽带室内定位系统具有独特的优势（王一强等，2009）（吴微威等，2005），具体如下：

（1）系统功耗低、成本低

UWB 室内定位系统传输数据时使用间歇脉冲，持续时间为 0.20ns 至 1.5ns 之间，占空因数很低。超宽带频谱宽度为 1.5Ghz 左右，全向辐射功率小于 -9.54dBm。超宽带设备电磁辐射低，发射功率低，系统功耗小。由于超宽带设备中，射频前端与信号处理模块实现全数字化都比较容易，因此能大大降低成本。

（2）速率传输高

在民用方面，UWB 室内定位系统短距离内传输速率最高可达 500Mbit/s，是个人通信与无线局域网中的一种理想的调制技术。UWB 以非常宽的频率带宽来换取高速数据传输，因而用于室内定位能快速获取定位目标的位置信息。

(3) 安全性高

由于超宽带信号能把信号能量扩散在极宽的频带范围内,对于其他通信系统,超宽带的信号相当于白噪声信号,并且一般的 UWB 室内定位系统采用扩频通信的直接序列扩频或跳时技术,接收机若不知道扩频码,就不能解调出发射数据,故其安全性与保密性都比其它的定位系统高。

(4) 多径分辨能力强

多径传播影响了大多数常规的无线通信质量,因为传统的无线通信信号大多为连续信号或者是持续时间远大于多径传播的时间。而 UWB 室内定位系统传输利用的是占空比非常低的短脉冲,所以其多径信号在时间上可分离出多径分量与发射信号的能量。实验表明,对常规无线电的信号多径衰落高达 10dB 至 30dB 的多径环境中, UWB 信号的衰落最多不到 5dB。故其在室内定位传输信号时衰减将大大减小,从而提高定位精度。

(5) 定位精度高

UWB 室内定位系统使用冲击窄脉冲来传输数据,具有很高的时间分辨率,能提供精确信号到达时间值,而传统无线通信难以做到这点。UWB 具有很强的穿透能力,在室内甚至地下环境中,其脉冲定位器可给出相对位置,定位精度能达到厘米级。

随着通信技术的不断发展,在很多室内场合都需要精确的定位信息。试想一下,当你身处巨大的会展中心要寻找你想去的展台时,当你身在庞大的停车场要寻找你的车辆时,当你身在大型商场要寻找你要的商品和出口及厕所时,当你在机场要寻找你的登机口和行李时,这些都不是 GPS 和 COMPASS 等全球导航系统能解决的问题,此时就需要精确的室内定位系统来为我们服务。而 UWB 室内定位系统凭借着其自身独特的许多优势,将会大大应用在我们生活的很多场景之中(如图 9 所示)。其在下列应用领域已显现出或估计会有很大的发展潜力:

(1) 在室内的大型仓储、医院或一些实验室环境下,对物品、病人及相关实验器材来进行精确的定位跟踪,可以让仓储货物、病人的医护及实验等效率大大的提高。

(2) 在一些自然或者人为灾难现场进行搜救行动,如在火灾、地震交通事故、矿井塌方等一些紧急事故现场时,里面若有配置室内定位系统,则借助其高精度的定位,可以使救援人员的搜救工作起到事半功倍的效果。

(3) 随着工业 4.0 的提出,一些大型工厂货运在今后必然会进入无人工业化操作时代,基于 UWB 的室内精确定位将会为无人操作提供了必要条件。

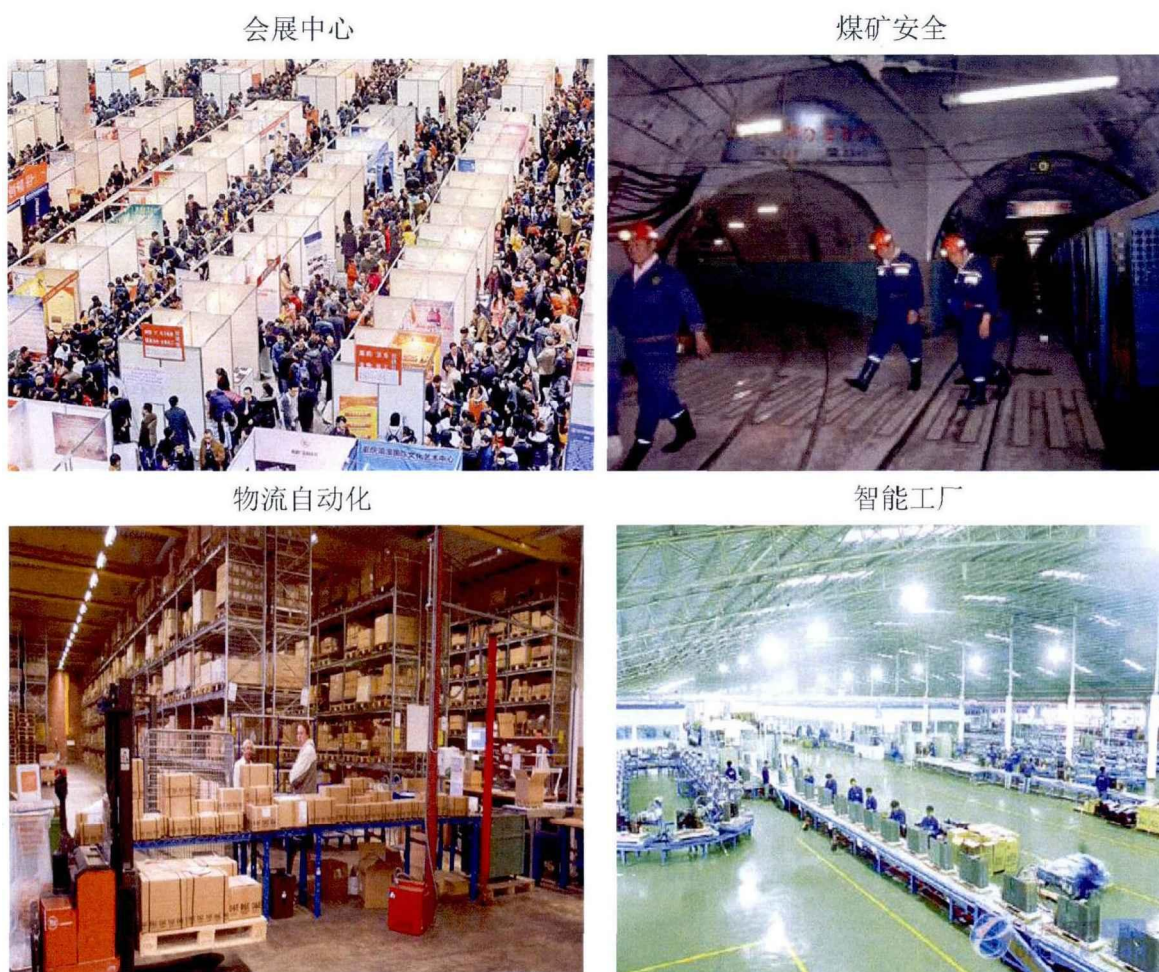


图 9 UWB 室内定位系统的应用场景

Fig.9 The application scenario of UWB indoor positioning system

2.4 本章小结

本章是整个论文研究的理论基础，首先对 UWB 技术包括其定义、实现方式、应用等进行概述，然后对几种室内定位算法特别是本论文所用到的 TDOA 定位算法进行重点介绍，最后对本文所设计的 UWB 室内定位总体系统进行简要分析，再对其一些优势与应用前景进行了简单介绍和说明。

3 UWB 定位平台硬件介绍

本论文所设计的 UWB 定位系统是基于 Hainan EVK UWB 定位平台实现的。下面将逐一介绍定位系统的硬件部分。

3.1 Hainan EVK 定位系统硬件

Hainan EVK 超宽带实时定位系统，由标签、基站、交换机、上位机组成。被定位的人或者物体携带标签，标签是一个超宽带射频信号发射器，能通过设置使之以 1Hz 到 100Hz 的频率工作。各个基站在定时做同步时间的同时，接收到标签发送的 UWB 射频信号的数据包。另外，各个基站分别通过有线连接路由器，把接收到标签数据包的到达时间包括自身 ID 号上传给上位机进行计算处理，就可以得到标签的坐标，并在上位机软件界面显示标签的位置。基站根据建筑的布局安装在合适的地方，一般在房间的四个角落分别布置一个基站。下面对 Hainan EVK 定位系统的硬件组成逐一介绍：

(1) 标签

标签（如图 10 左图）作用是向基站发送超宽带数据包，它是一块基于 DW1000 定位芯片的 UWB 嵌入式开发板，DW1000 芯片可用来配置标签参数，包括 UWB 的传输速率等。标签的供电可由更换的纽扣电池提供，一般可用 1.5 到 3 年，功耗很低。

(2) 基站

基站（如图 10 右图）由主基站和从基站组成。主基站的定位芯片里面加了一些时间同步等算法，用来定时的向从基站发送时间校验包。主从基站都可以接收标签发出的射频信号，对数据解析生成到达时间戳，再通过交换机把这些到达时间戳传输给上位机进行处理。基站由带有 Poe 供电功能的交换机来供电。

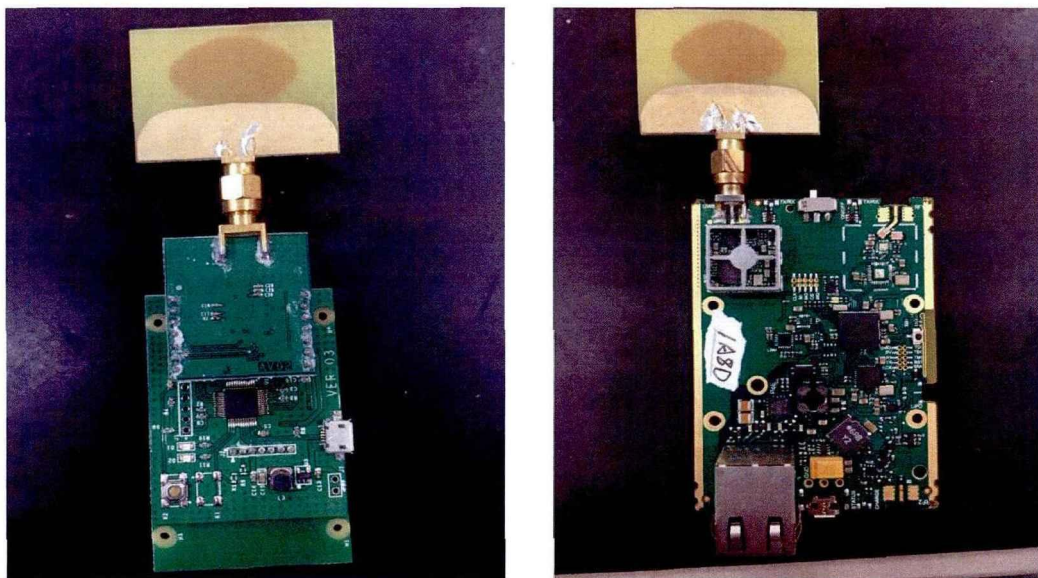


图 10 标签与基站图

Fig.10 Tag and Anchor

(3) 交换机

与各个基站通过有线连接，采用 10M 到 100M 的局域网模式，主要用来传输各个基站发过来的到达时间戳给上位机进行处理，同时给基站供电。

(4) 定位上位机

计算机通过局域网与基站相连，上位机的主要功能包括用相关算法处理接收到的数据，然后对定位结果进行界面演示和数据的存储等等。

3.2 硬件模块组成介绍

本论文基站与标签都是基于爱尔兰 Decawave 公司的 EVK 1000 嵌入式开发板开发的，它们的硬件模块结构大同小异。其中基站的硬件资源包括有嵌入式处理器、UWB 定位芯片模块、供电模块、天线模块、网络通信模块等，才能满足 UWB 室内定位的应用需求。另外，其还拥有丰富接口，如 JTAG 调试下载程序接口、有线通信接口、外置天线接口等等。总体硬件结构图如图 11 所示：

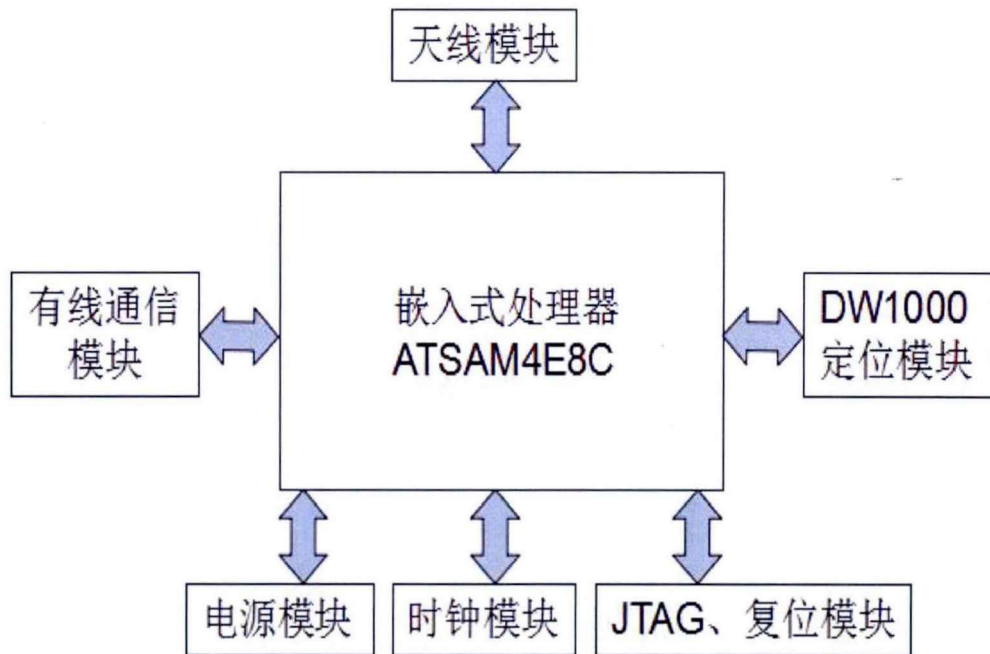


图 11 总体硬件结构图

Fig.11 The general hardware structure

3.2.1 主控模块

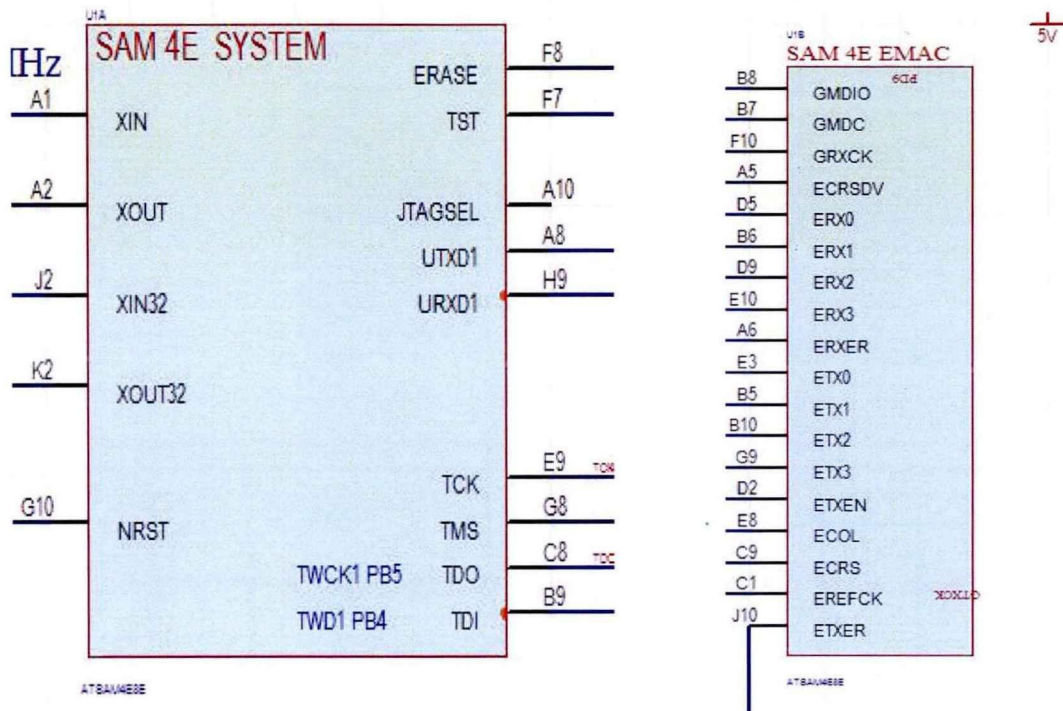


图 12 ATSAM4E8C 主控芯片

Fig.12 ATSAM4E8C major control chip

如图 12，主控模块基于 Atmel 公司开发的 ATSAM4E8C 芯片。它是一款高性能的 32 位 ARM Cortex-M4 RISC 处理器，包括一个浮点单元(Floating Point Unit, FPU)。它的最高运行速度为 120 MHz，具有高达 1024 KB 的闪存，2 KB 的高速缓存和高达 128KB 的 SRAM。它有 3 个三通道的通用 32 位定时器（有步进制电机和正交解码器逻辑支持），同时提供低功耗的 RTC 和 RTT，256 位的通用备份寄存器，还有 2 个模拟前端接口（16 位 ADC，DAC，MUX 和 PGA）及一个 12 位 DAC（2 通道）和一个模拟比较器。此外，SAM4E 芯片提供了丰富的外设接口，包括 10/100 Mbps 以太网 MAC，支持 IEEE 1588 和双 CAN。由于拥有一个单精度的 FPU，先进的模拟功能及全套的定时和控制功能，故这款芯片是工业自动化、楼宇控制、机器对机器通信、汽车售后市场和能源管理应用的理想解决方案。

该 SAM4E 芯片有三种软件可选的低功耗模式：休眠、等待和备份。在休眠模式下，处理器停止工作，但其他所有功能可以保持运行；在等待模式下，所有的时钟和功能都停止，但在预先设定的条件下，一些外设可以配置用来唤醒系统。此外，芯片有一个实时事件管理系统，允许外接设备在没有处理器干预的运行或休眠模式下接收，处理并发送事件。选择这款芯片作为处理器的原因是其具有一个 10/100 Mbps 的以太网通信接口及高速的内存等等，适合本论文 UWB 室内定位的开发。

3.2.2 室内定位模块

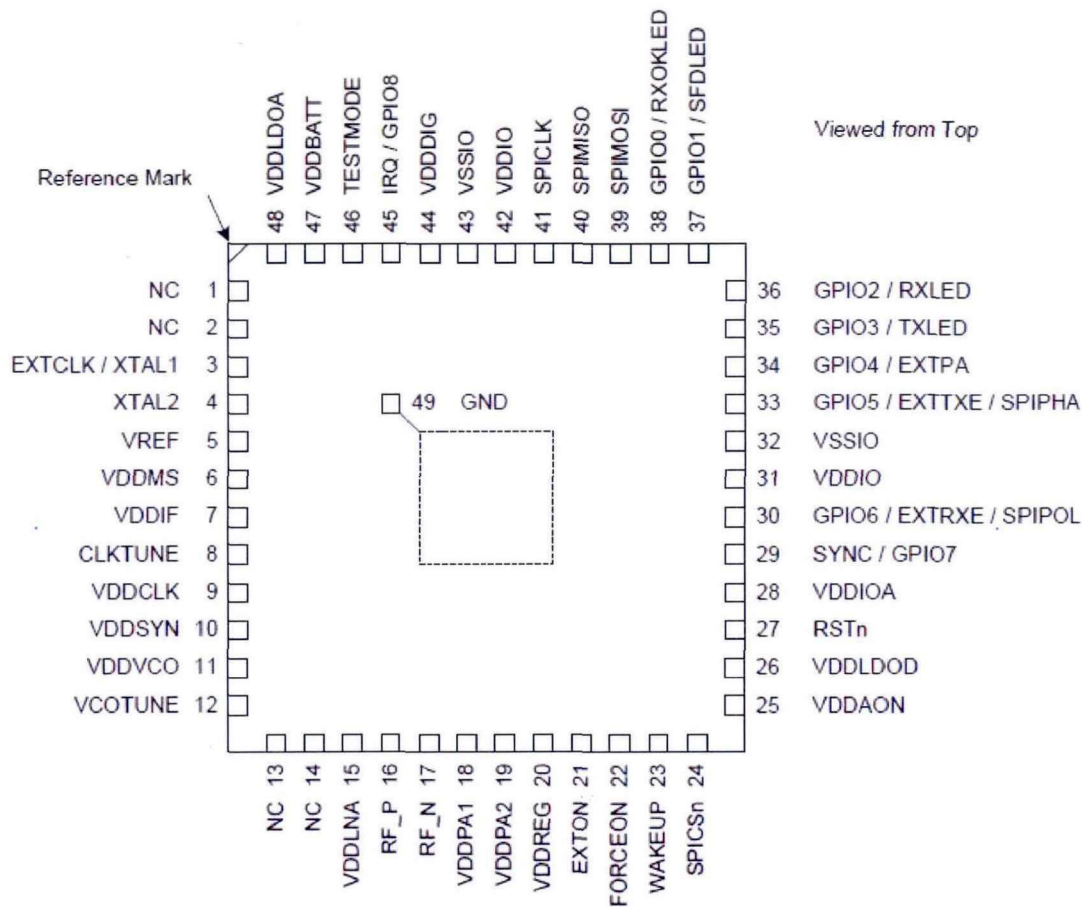


图 13 DW1000 芯片引脚图
Fig.13 DW1000 chip pin figure

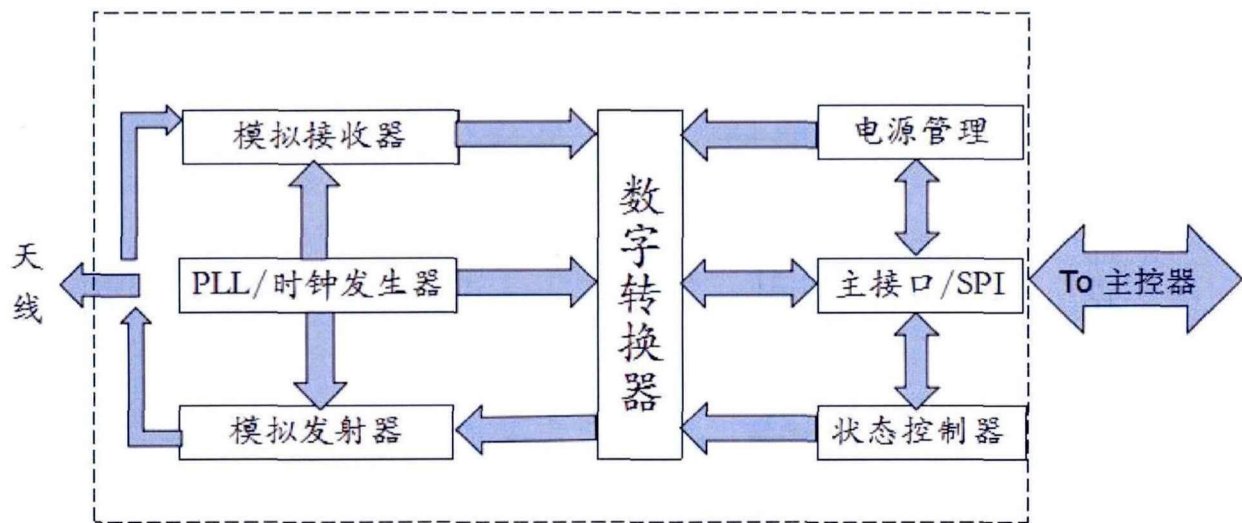


图 14 DW1000 定位芯片原理框图
Fig.14 The block of DW1000 positioning chip principle

如图 13、图 14 所示，室内定位模块主要基于 DW1000 定位芯片。它是爱尔兰 DecaWave 公司研发的一款符合 IEEE802.15.4-2011 UWB 标准的，完全集成的单片、低功耗、低成本的收发器芯片。它可支持最高达 6.8 Mbps 的数据传输速率，可以用于两路测距或者应用于 TDOA 室内定位系统，最高可达到 10cm 的定位精度。

DW1000 由一个模拟前端（包含一个接收器和一个发射器）和一个数字后端（连接到一个片外主处理器）组成。接收器优化了带宽，线性度和噪声系数等，它的射频部分的阻抗匹配为 50 欧姆，采用 3-7GHz 的频段通信，不同的通信模式其对应的传输速率各不相同，有 110kbps、850kbps 和 6.8Mbps 等几种数据传输速率。此外，射频部分还有一个低噪声放大器，用来放大接收到的信号，然后再将解调的基带信号和接收到的数据通过 SPI 接口传输给主控制器。SPI 接口用于设备的通信和配置及实现一些 MAC 功能（CRC 产生、校验和接收过滤帧）。

DW1000 的时钟部分基于 3 个主电路：晶体振荡器，时钟锁相环和射频锁相环。片上振荡器以 38.4MHz 的频率运行，芯片内有一次性可编程（OTP）存储器。这个存储器可用于存储校准数据，例如发射功率电平、晶振初始频率误差调整和范围精度调整等。这些调整值在需要时可以被自动检索。TX /RX 开关用于连接发射器或接收器到天线端口。芯片上还有温度和电压监控器。

3.2.3 电源模块

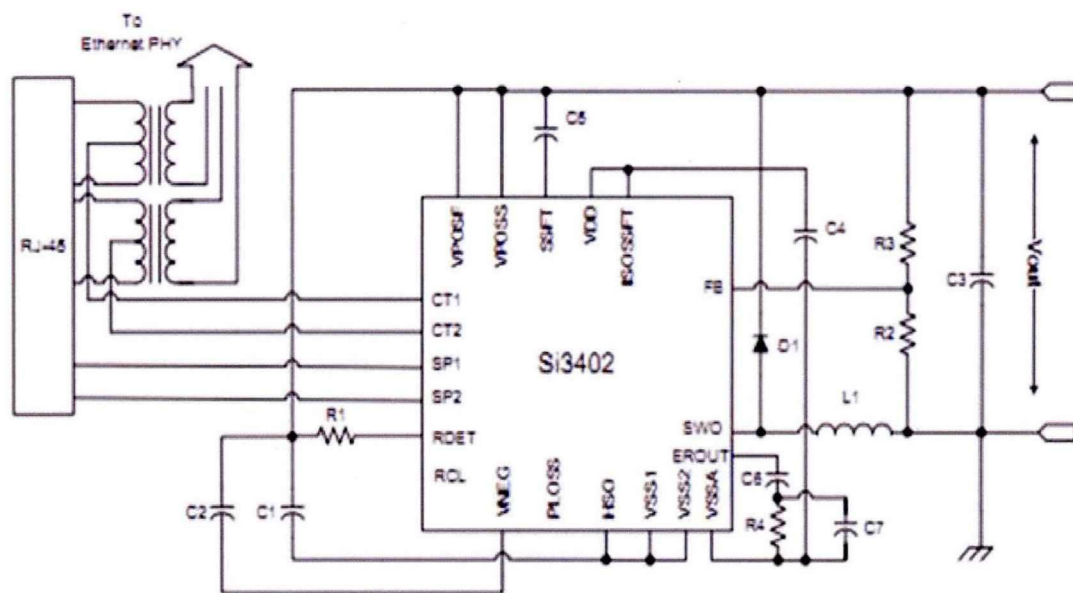


图 15 Si4303 应用电路图

Fig.15 Si4303 application circuit diagram

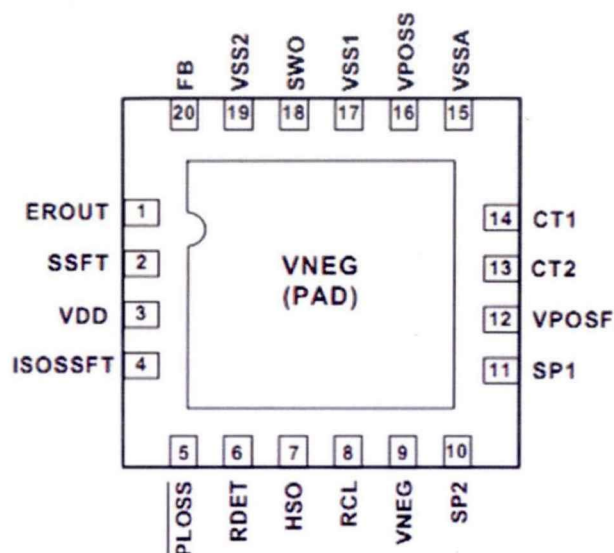


图 16 Si3403 封装图

Fig.16 Si3403 encapsulation figure

电源模块由 2 部分组成，首先以太网供电部分（Power Over Ethernet, POE），供电模块芯片为 Si3402，如图 15、图 16 所示。Si3402 是业内集成度最高的，符合 IEE 802.3 规范的 POE PD 接口和低电磁干扰的开关稳压器、热插拔控制器和高效的脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）开关稳压器。通过设置新的实现设备集成、最低整体 BOM 成本、效率和可靠性，Si3402 可让设计人员轻松将 POE 功能添加到其以太网产品中。当在诸如无线接入点或 VoIP 电话等启用了 POE 的系统中连接时，Si3402 可将以太网铜质 UTP 布线提供的高电压（通常 $\pm 48\text{ V}$ ）转换为稳定的低压直流电源（5v，本系统的基站供电电压）。

其次是低压差线性变压器（Low Dropout Regulator, LDO）模块，如图 17 所示。它用来将 POE 提供的 5v 电压转换为 3.3v 或 1.8v，3.3v 为主控模块和 DW1000 芯片以及其他外围电路提供的电压。此处 LDO 转换效率较低，但其产生的噪声很小，这是选取 LDO 的主要原因。

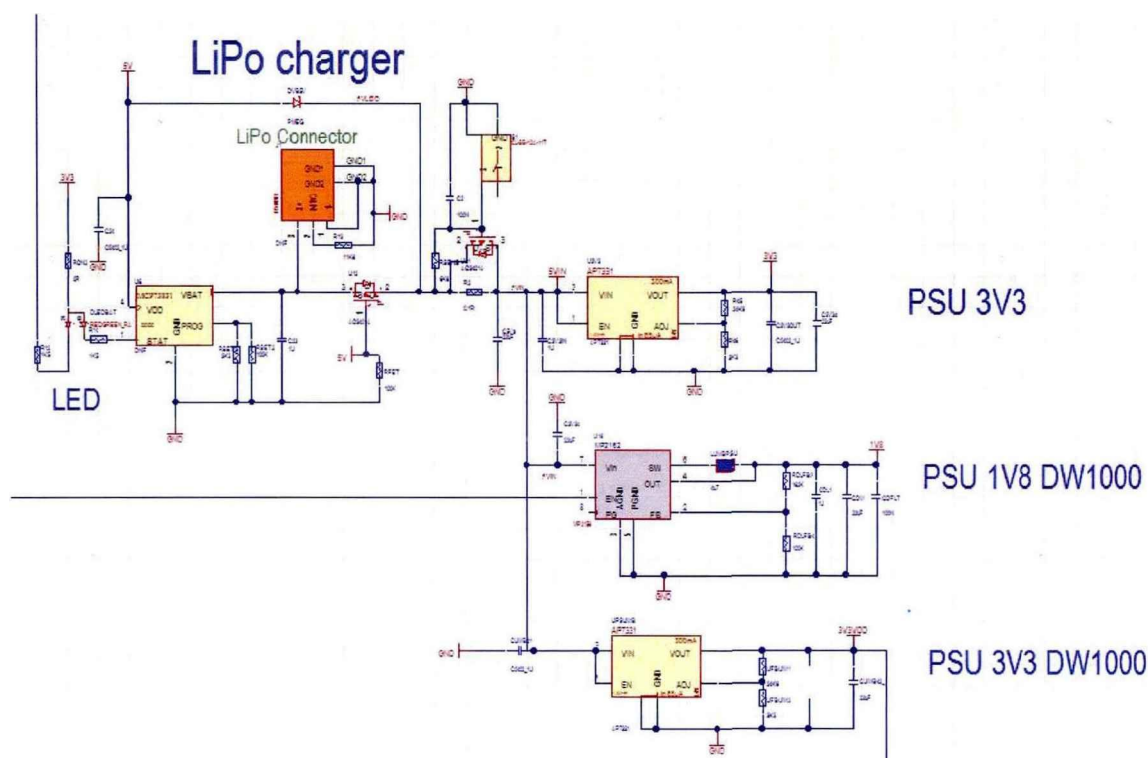


图 17 LDO 电路图

Fig.17 LDO circuit diagram

3.2.4 通信模块

有线通信模块可用来使基站通过以太网与电脑进行通信,即把接收的到达时间数据包传输给上位机进行处理。此模块基于 Microchip 公司的 KSZ8081 系列芯片,如图 18 所示。它是单电源 10Base-T/100Base-TX 的以太网路由层收发器,能通过标准的 CAT-5 非屏蔽式双绞线 (UTP)进行数据传输与接收。KSZ8081 系列芯片是高度整合的 PHY 解决方案,整合低噪声稳压器 1.2 V 供电,因此能减少 PCB 板的成本并简化 PCB 板的布局。

此款芯片可直接连接 MII/RMII 适用的以太网 MAC 层处理器和交换机。使用 25 MHz 的晶振产生所有必要的时钟，包括 KSZ8081MNL 的 50MHz RMII 参考时钟输出。KSZ8081 还提供诊断功能，有助于系统针对生产测试和产品部署进行启动和检查错误。参数式 NAND 树状支撑能在 KSZ8081 的 I/O 接口与板件之间进行故障侦测。

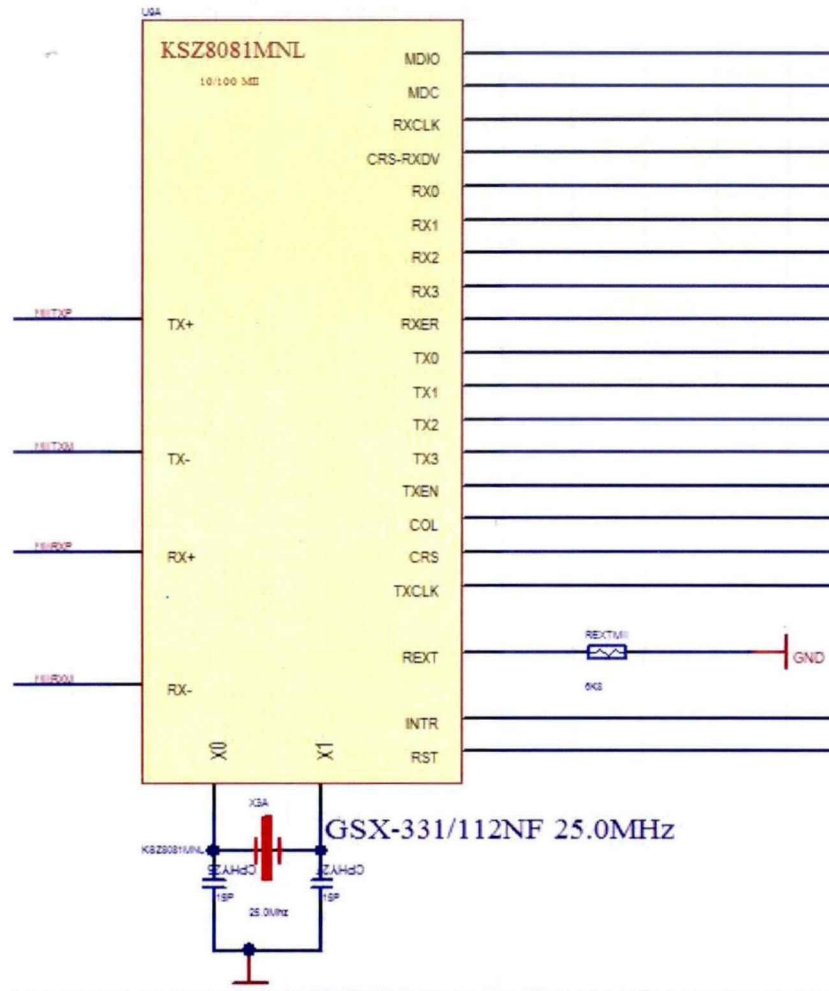


图 18 通信模块 KSZ8081MNL 芯片

Fig.18 The KSZ8081MNL chip of communication module

3.3 本章小结

本章对本论文设计的系统所使用的UWB定位平台的硬件部分作了一个详细的介绍。首先介绍了 Hainan EVK 超宽带实时定位系统的组成及工作原理，其次再对基站所使用的 EVK 1000 嵌入式开发板进行了总体硬件结构图的介绍，最后再介绍开发板各个模块的芯片工作原理、电路图等等。本章内容是后续算法实验工作得以开展的平台载体。

4 系统软件总体介绍

在上一章中,对 UWB 室内定位平台硬件部分作了详细的介绍,也对基站的嵌入式开发进行了分模块介绍。本章将从系统软件部分入手,先介绍 TDOA 算法在 UWB 室内定位系统中的实现,包括基站之间无线时间同步算法的实现;接着对上位机软件模块进行了一个详细的说明,包括中央定位服务器、控制器、客户显示端的介绍等等。

4.1 TDOA 算法在 UWB 室内定位系统中的实现

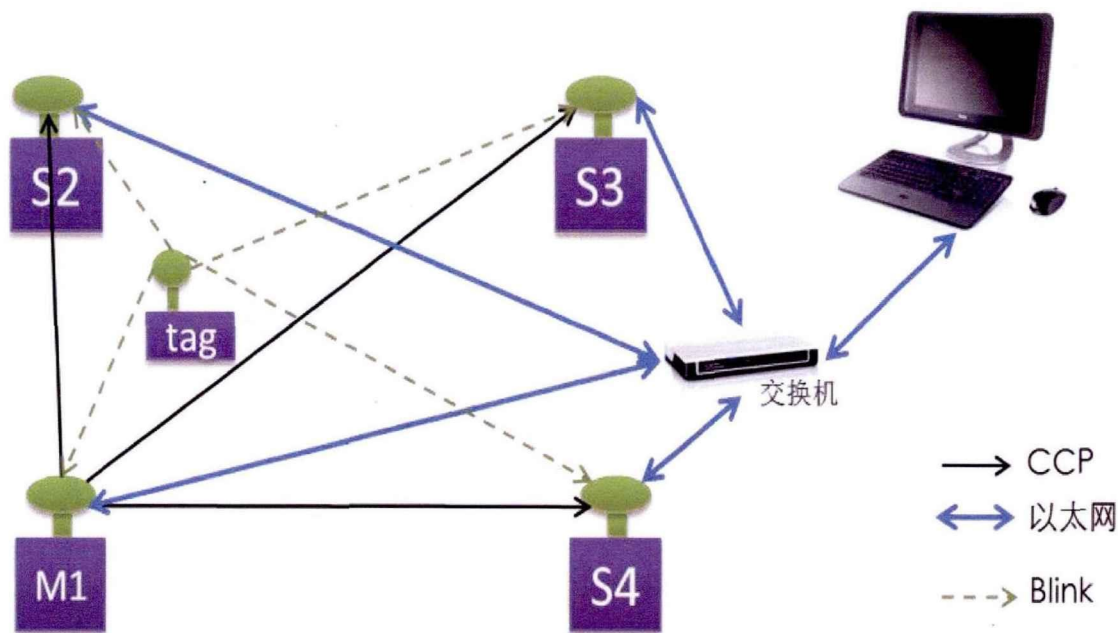


图 19 TDOA 算法实现过程

Fig.19 The realization process of TDOA algorithm

如图 19 所示, M1、S2、S3、S4 分别为布置在房间四个角落的四个基站,其中 M1 为主基站,其余 3 个为从基站。tag 为被定位的物体或人携带的标签。定位工作开始时,主基站 M1 会定时向每个从基站发送包含有自身时间信息的时钟校验包(Clock Correct Packet, CCP),同时标签会以窄脉冲 UWB 信号形式向所有的基站发送包含有发包序号信息的数据包(Blink)。从基站接收到主基站的时钟校验包和标签的数据包后会进行一个相对的时间同步计算,得到一个 Blink 的到达时间值,再连同主基站把所有 Blink 的到达时间值包括自身 ID 号等通过有线以太网(Ethernet)交换机返回给上位机进行处理。上位机的中央定位服务器(Central Location Server, CLS)会对这些基站返回的到达时间值通过 TDOA 算法(双曲线、三角等算法)的计算,得到标签 tag 的坐标,然后在上位机显示界面(Display Client)显示标签的实时位置。

4.2 基站间无线时钟同步的实现

由于每个基站都有自己独立的时钟源,使得每个基站测量得到的标签信号到达时间(Time Of Arrival, TOA)没有一定的联系;另外,每个基站的时钟源所用的晶振存在频率偏差,这个频率偏差并不是个常数,而是随着温度的变化呈现出非线性变化;每个基站的启动时间不同也会导致标签信号的到达时间存在差异。以上种种原因使得TDOA算法无法准确地应用于室内定位。因为TDOA定位算法要求所有参与定位的基站都基于相同的时钟基准,所以就使得主从基站之间的时钟同步显得尤其重要。

上文已经提到了主基站会定时发送一个时间校验包(CCP)给从基站从而使基站间保持一个相对的时间同步。由于主从基站晶振的频率特性、温度和老化效应的不同,导致晶振频率会产生漂移,其中晶振的温度漂移是造成其精确度偏差的主要原因,这就导致主从基站的时钟之间会存在偏差。但是传输网络中的各种干扰又使得主从基站时钟之间的偏差无法进行精确测量。无线时钟同步算法采用卡尔曼滤波算法能更精确的估算时间偏差,消除信号传输过程中所带来的干扰。所以,我们需要通过卡尔曼滤波算法来使得从基站的时钟偏移能够与主基站的时钟偏移保持一致。卡尔曼滤波是以最小均方误差为估计的最佳准则,来寻求一套递推估计的算法,其基本思想是:采用信号与噪声的状态空间模型,利用前一时刻地估计值和现时刻的观测值来更新对状态变量的估计,求出现时刻的估计值(C.McElroy, 2014)。

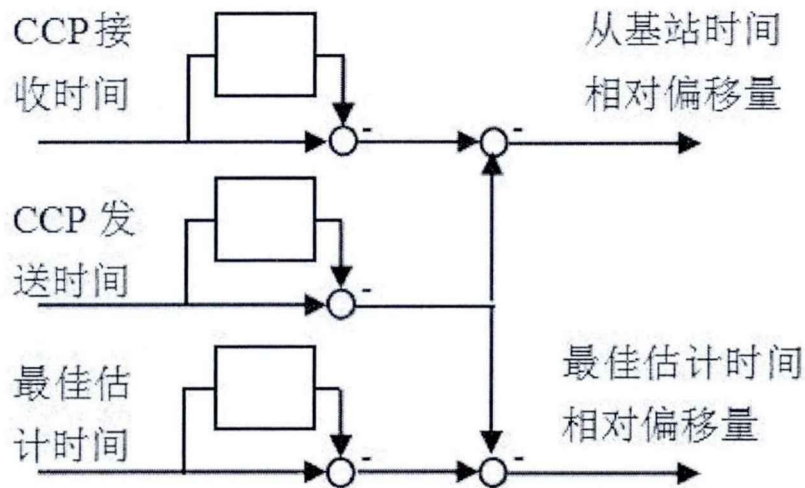


图 20 相对时间偏移量的提取

Fig.20 Extracting the variations of relative time

如图 20 所示,在具体的实现过程中,通过第 n 个同步周期的时间信息精确估计第 $n+1$ 个同步周期主从时钟间的偏差与漂移。在这里我们定义 T 为时钟同步周期, $U_{\theta,n}$ 、 $U_{\gamma,n}$ 分别为第 n 个同步周期对时钟偏差和时钟漂移的修正值, θ_n 、 γ_n 分别为 nT 时刻主从节点间的时钟偏差值和时钟漂移值,即第 n 个同步周期修正前的时钟偏差和

时钟漂移值。 θ_{n+1} 、 γ_{n+1} 分别为 $(n+1)$ T 时刻主从节点间的修正前的时钟偏差值和时钟漂移值。

在 $(n+1)$ T 时刻, 相邻时钟同步周期内时钟偏差与时钟漂移的关系式为:

$$\theta_{n+1} = \theta_n - U_{\theta,n} + (\gamma_n - U_{\gamma,n}) + \omega_{\theta,n} \quad (4-1)$$

$$\gamma_{n+1} = \gamma_n - U_{\gamma,n} + \omega_{\gamma,n} \quad (4-2)$$

式中, $\omega_{\theta,n}$ 为时钟偏差干扰, $\omega_{\gamma,n}$ 为时钟漂移干扰。

假定 $\omega_n = [\omega_{\theta,n} \quad \omega_{\gamma,n}]^T$, 其协方差矩阵为 Q, 定义向量与矩阵如下:

$$x_n = [\theta_n \quad \gamma_n]^T \quad u_n = [U_{\theta,n} \quad U_{\gamma,n}]^T \quad (4-3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -1 & -T \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

则 $(n+1)$ T 时刻的状态方程为:

$$x_{n+1} = Ax_n + Bu_n + \omega_n \quad (4-5)$$

其中 ω_n 是代表过程噪声的高斯随机变量, 而向量 u_n 是输入。

观测矩阵为:

$$Z_{n+1} = \begin{bmatrix} \theta_{s,n+1} & \gamma_{s,n+1} \end{bmatrix}^T = H_{n+1}x_{n+1} + v_{n+1} \quad (4-6)$$

v_{n+1} 为观测过程中引入的具有高斯分布特性的干扰; H_{n+1} 为单位矩阵。

根据卡尔曼滤波原理, 其迭代算法过程如下:

(1) 预测。

$$\hat{x}_{n+1|n} = Ax_n + Bu_n \quad (4-7)$$

(2) 最小预测均方误差矩阵。

$$P_{n+1|n} = AP_nA^T + Q \quad (4-8)$$

式中, P_n 为估计值 x_n 的最小均方误差矩阵。

(3) 卡尔曼增益矩阵。

$$K_{n+1} = P_{n+1|n}(H_{n+1})^T(R_{n+1} + H_{n+1}P_{n+1|n}(H_{n+1})^T)^{-1} \quad (4-9)$$

式中, R_{n+1} 为观测噪声, v_{n+1} 的协方差矩阵。

(4) 修正。

$$\hat{x}_{n+1} = \hat{x}_{n+1|n} + K_{n+1}(Z_{n+1} - H_{n+1}\hat{x}_{n+1|n}) \quad (4-10)$$

(5) 最小均方误差矩阵。

$$P_{n+1} = (I - K_{n+1})P_{n+1|n} \quad (4-11)$$

通过卡尔曼滤波算法，第 $n+1$ 时钟同步周期修正后的 $\hat{x}_{n+1} = [\hat{\theta}_{n+1} \ \hat{\gamma}_{n+1}]^T$ ，相应的设置 $u_{n+1} = \hat{x}_{n+1}$ ，对时间偏差以及时钟漂移进行补偿，从而确保主从基站间的时钟同步。

```

k0 = p0 / (measNoiseVar + p0);
k1 = p2 / (measNoiseVar + p0);
x0 = k0*measuredError + x0;
x1 = k1*measuredError + x1;
if (x0 < 0.0) { x0 += CLOCK_PERIOD_SEC; }
else { x0 = fmod(x0, CLOCK_PERIOD_SEC); }
if (outlier_counter > 0) { outlier_counter--; }
p3 = p3 - k1*p1; p2 = p2 - k1*p0; p1 = p1 - k0*p1; p0 = p0 - k0*p0;
prevTxTime = fmod(timeTxs, CLOCK_PERIOD_SEC);
else { x0 = timeRx; x1 = 1.0; init = true; }
prevTxTime = fmod(timeTxs, CLOCK_PERIOD_SEC); }

double CS_Kalman::syncTOA(double blinkTime)
{ double timeSinceLast = blinkTime - x0;
  if (timeSinceLast < 0) { timeSinceLast += CLOCK_PERIOD_SEC; }
  return fmod(prevTxTime + timeSinceLast*x1, CLOCK_PERIOD_SEC); }

```

图 21 部分代码截图

Fig.21 Part of the code printscreen

如图 21 为无线时钟同步的嵌入式代码部分截图，代码中的 $x0$ 即为通过卡尔曼滤波算法计算得到的相对时钟漂移量， $blinkTime$ 为基站以自己的时间戳记录标签发过来的数据包的到达时间。 $timeSinceLast$ 即为从基站经过时间校正以后与主基站保持相对时钟同步的时间。

4.3 上位机介绍

在本论文所设计的 UWB 实时室内定位系统中，上位机部分主要由三大模块组成：中央定位服务器（Central Location Server, CLS）、控制器（Controller）、客户显示端（Client Display）。下面将逐一介绍：

4.3.1 中央定位服务器

中央定位服务器（CLS）是控制，配置和处理基站信息的软件实体，如图 22 所示。CLS 包含有数据库、控制平面层和数据平面层等。控制平面层由控制器配置并与基站相互作用；数据平面层用来排序和管理所有的 TOA 报告，CCP 发送和接收报告。同时，CLS 可连接实时定位系统的控制客户端和数据客户端，用来实现控制和数据的传输。CLS 可以定期向控制器发送各种状态信息（有连接基站、通信传输测试、通信结果测试、测距测试等状态模式），用来表明系统、CLS 或者基站的当前状态。

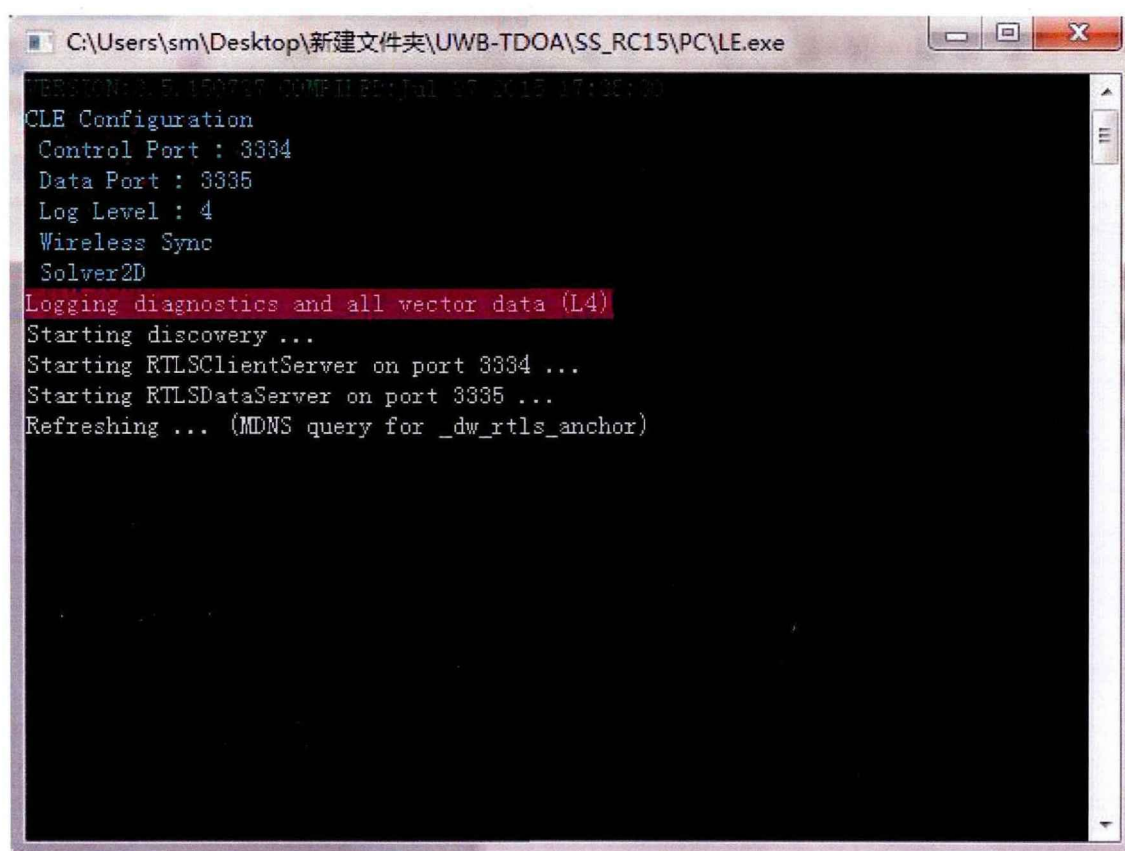


图 22 CLS 显示窗口

Fig.22 CLS display window

当 CLS 启动时, 它会开始寻找定位系统中存在的基站。基站被找到后, CLS 会更新基站的数据库。当控制客户端连接到 CLS 时, CLS 会把在定位系统中发现的基站列表通过控制端口发送给它。控制器请求 CLS 连接定位系统中的基站并处理基站发送过来的信息, 客户显示端可以与 CLS 连接, 显示从 CLS 接收到的任何标签的位置信息。

当实时定位系统完全设置好以后, 假如各个基站的时钟是同步的, 那么 CLS 就能计算出标签的坐标。在各个基站的时钟同步过程中, 控制器会通过 CLS 发送“RTLS 启动”的命令给所有的基站, 此时主基站开始发送时钟同步帧, 同时从基站开始发送时钟同步报告, 此时 CLS 就可跟踪到主基站和从基站之间的相对时钟漂移。同时 CLS 还能处理系统内任何标签发送的校正过后的 Blink 时间戳从而生成标签的位置信息, 再把位置信息发送给控制器和客户显示端。

4.3.2 控制器

控制器用于配置和控制 CLS, 并通过 CLS 配置实时定位系统里面的基站节点坐标。由于界面简洁需要, 控制器与客户显示端集成在一个图形用户界面中 (Graphical User Interface, GUI)。控制器应用程序的主要部分包括: 数据模型、CLS 连接、控制客户端、数据客户端等。CLS 连接部分是用于建立和监控 CLS 与控制器的连接, 并传输 TCP socket 数据。控制客户端通过一个处理函数, 用来处理通过控制器与 CLS

间的所有 API 消息；而数据客户端处理从 CLS 数据端传来的消息，这些消息包括：

- (1) RTLS_DATA_ANCHOR：给出了实时定位系统里的基站列表
- (2) RTLS_DATA_TAGPOSITION：给出了标签 ID 和它的 x, y 和 z 坐标。数据客户端也将使用所接收的 x, y 和 z 的信息来计算标签的平均位置。
- (3) RTLS_DATA_STATS：给出了标签 ID 和它的统计数据（Blink 数据包的接收速率和多点定位的成功率）。

当收到上述任何类型的消息时，数据客户端将发送信号给显示端用来更新应用程序显示窗口上的相关信息。一旦建立了连接，数据客户端将打开一个日志文件，用来保存接收到的任何数据。要创建新的日志文件时，控制客户端需要重新启动。

4.3.3 客户显示端

客户显示端用来显示 CLS 发送的标签实时位置。如图 23 所示，显示端应用程序包括：

- (1) 主窗口：主要的用户界面，包含了：
 - 下拉菜单：RTLS, Advanced, View, Help
 - 主显示区：显示标签和基站在平面的位置
- (2) RTLS / CLS 控制：格式配置、传输 XML 消息给 CLS 并处理 CLS 的响应。它处理的是控制端口的连接。
- (3) GUI 客户端：用来处理标签位置和统计信息的信息。它处理的是数据端口的连接。
- (4) 基站列表：这是一个基于树形拓扑结构的数据模型。
- (5) 标签列表：这是已知标签的列表，里面会存储标签的属性（例如 X, Y, Z 轴的坐标等）。
- (6) 基站参数和系统配置的加载和保存等。

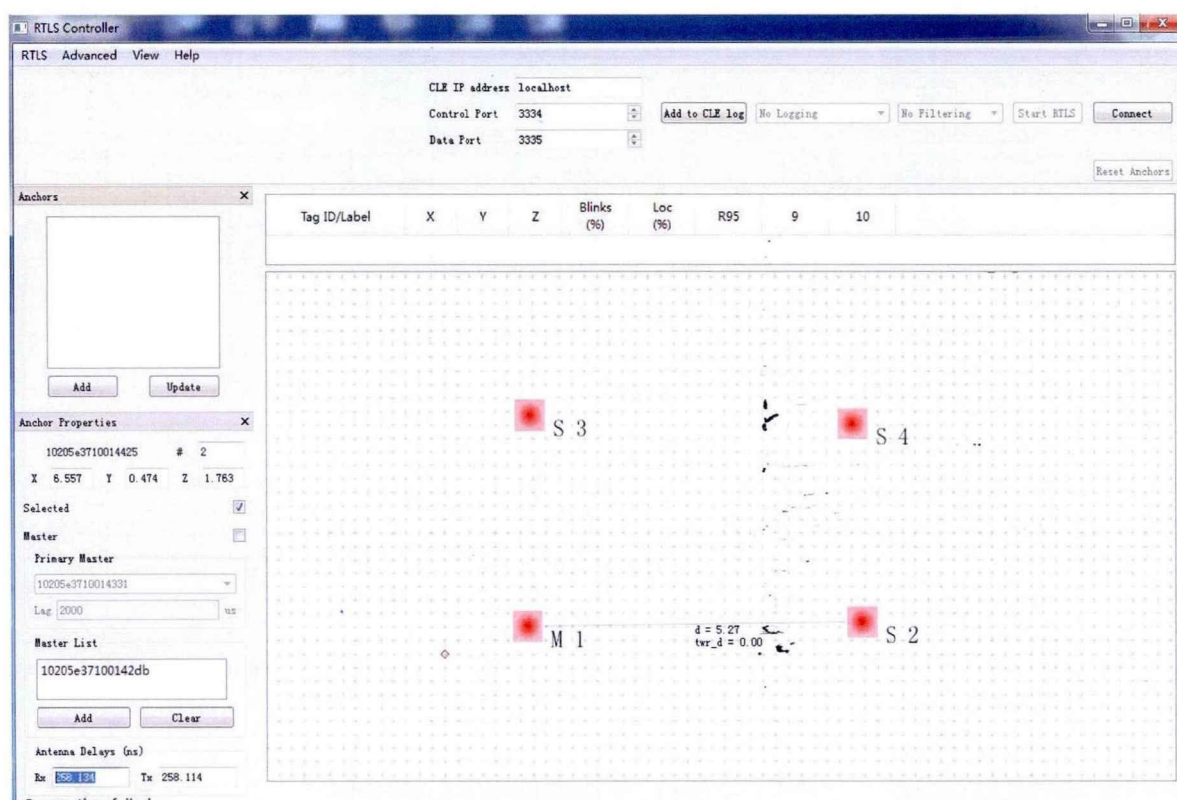


图 23 客户显示端界面

Fig.23 Client display interface

4.4 本章小结

本章从系统软件部分入手,先对 TDOA 算法在 UWB 室内定位系统中的实现作了一个总体的介绍,然后详细说明了基站之间无线时间同步算法的实现,包括对卡尔曼滤波算法的介绍等,最后对上位机软件模块进行了一个详细的说明,包括中央定位服务器、控制器、客户显示端的介绍等等。

5 系统测试与分析

本章在 Hainan EVK 实验平台上对基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位系统进行实验验证。首先对实验环境，软件配置步骤作一个总体的介绍，再对实验结果进行系统分析并评估。

5.1 实验环境及布置

本次系统测试选取室内实验室作为系统实验环境，如图 24 所示。



图 24 实验室室内环境

Fig.24 Indoor environment in the laboratory

实验布置如图 25 所示：在实验室四个角落分别布置一个基站，四个基站分别命名为 M1、S2、S3、S4，以 M1 为主基站，其余为从基站。其中，要求基站位置两米以上，四个基站高度相同，为增加精准度，应减少基站间的其他物体阻挡。四个基站通过网线与运行 CLE 的主机在一个局域网内进行通信，四个基站由 POE 供电。移动标签通过移动电源方式供电，它在室内的运动，可通过四个基站与标签的通信，再由上位机计算实时得出标签坐标，并在屏幕上形成轨迹。基站与移动标签通过 Blink 时间数据包的形式进行通信，基站间的通信为 CCP 时钟校验包形式。

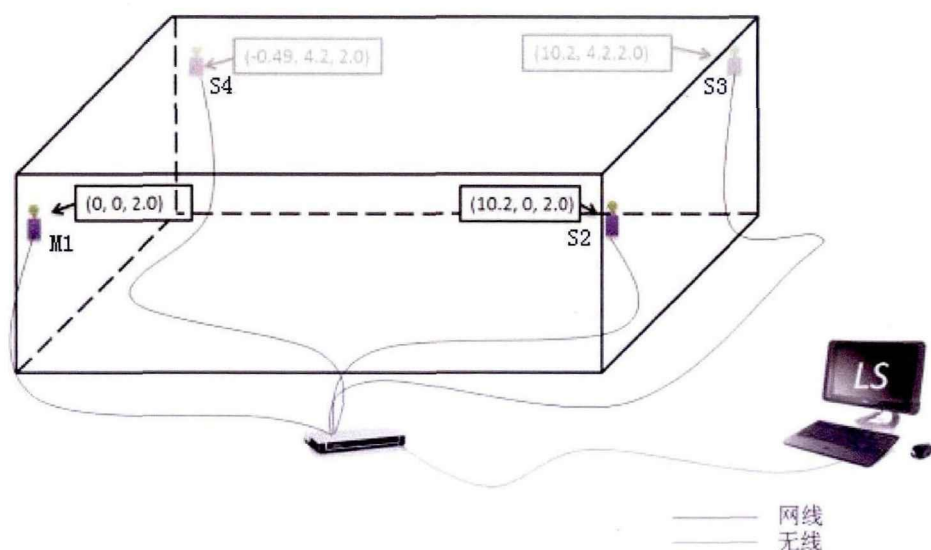


图 25 实验室基站布置

Fig.25 Anchor arrangement in the laboratory

5.2 软件配置步骤

- (1) 在电脑上运行 LS.exe (Location Server)，分别给基站分配 ID。
- (2) LS 每连接到一个基站，会在 LS 上显示的基站的 IP 和 ID 结果，直到 4 个基站的 ID 记录完毕，如图 26 所示。

如：Anchor <1> discovered : 10205E371001436B at 3000:192.168.1.13
 Anchor <2> discovered : 10205E3710011FB8 at 3000:192.168.1.20
 Anchor <3> discovered : 10205E3710012055 at 3000:192.168.1.11
 Anchor <4> discovered : 10205E3710011F89 at 3000:192.168.1.14

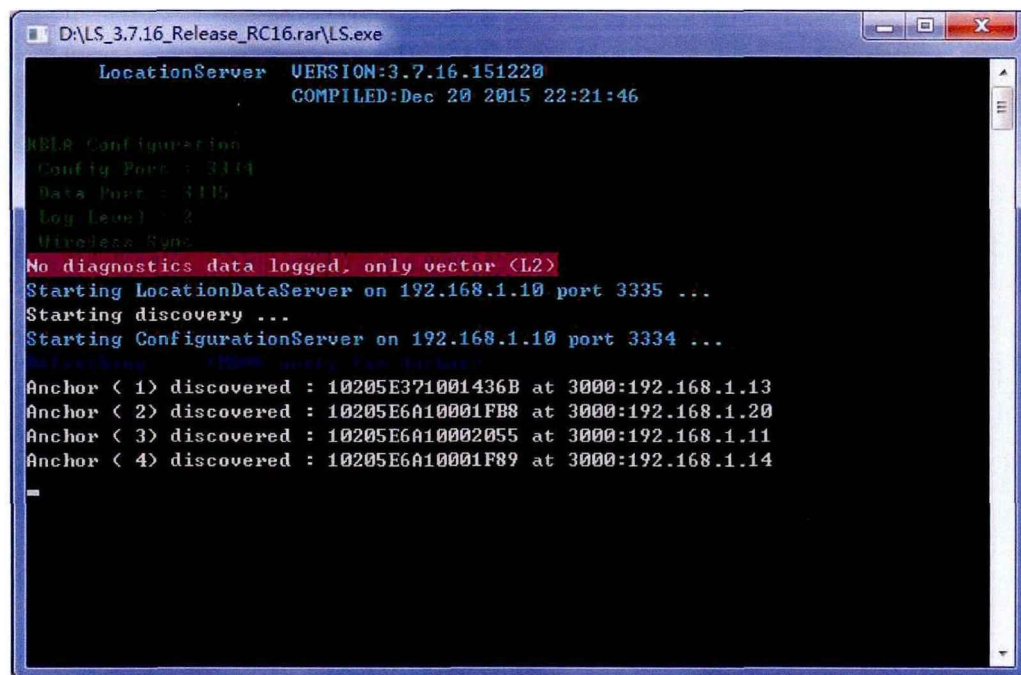


图 26 基站 ID 配置

Fig.26 Anchor ID configuration

(3) 打开 Anchor Config, 如图 27 所示。当 LS 和 Anchor Config 在同一台设备运行时他们能自动识别连接, 故无需设置 IP 和端口; 但当 LS 与 Anchor Config 在不同的设备上时则需要填写 CLS IP address (运行 LS 设备的 IP), 并点击“Connect LS”实现远程连接, 如图 28。

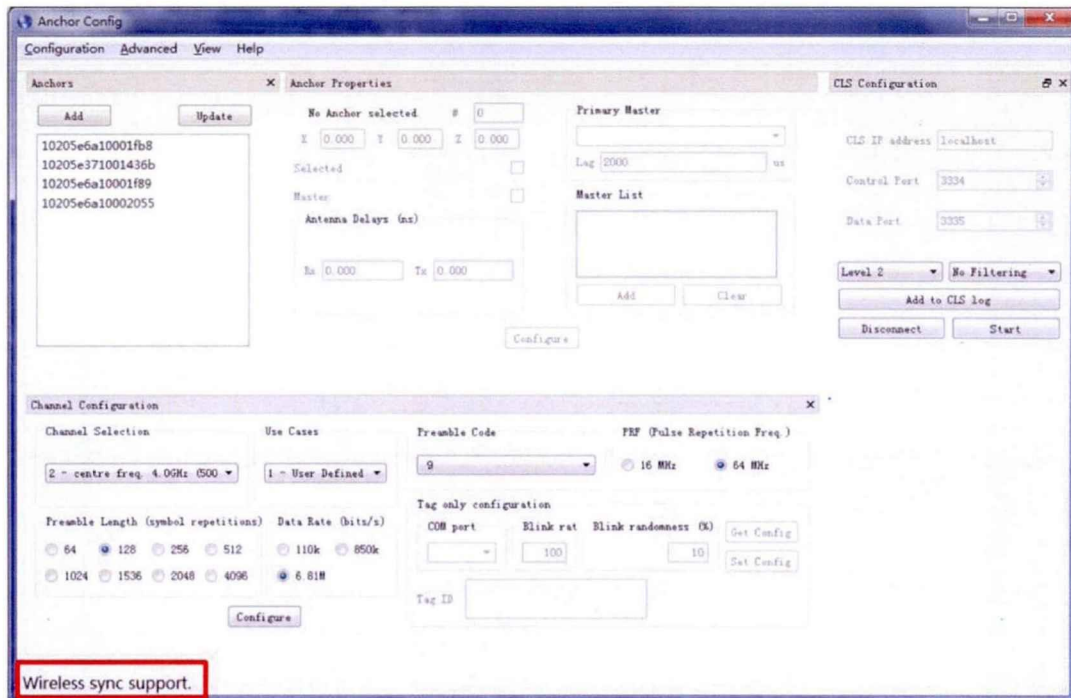


图 27 基站配置

Fig.27 Anchor configuration

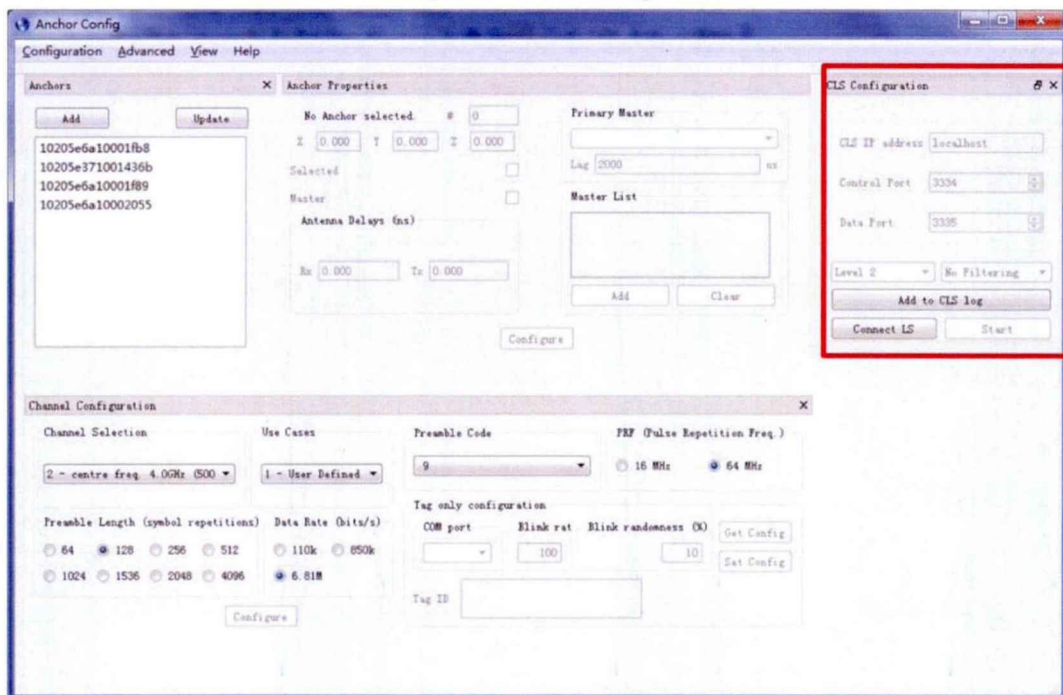


图 28 基站与 LS 远程连接

Fig.28 The remote connection of anchor and LS

(4) 根据 “Anchors” 栏中的 ID 号, 在 “Anchor Properties” 栏中相应填入四个基站实际的位置配置坐标, 并在 “#” 旁填写序号以作区分, 只有主基站需要再勾选 “Master” 和 “Selected”, 其他从基站只需勾选 “Selected”。配置从基站时需要点击 “add”, 添加主基站。

如图 29 是主基站的设置图, 序号为 1, 填写坐标, 勾选 “Selected” 和 “Master”。

图 29 主基站设置

Fig.29 Master anchor configuration

如图 30 是从基站的设置图, 基站序号从 2~4, 填写坐标, 勾选 “Selected”, 点击 “add”, 弹出窗口选择与其工作的主基站的 ID, 在 “Master List” 里显示出主基站 ID, 则设置完成。

图 30 从基站设置

Fig.30 Slave anchor configuration

(5) 重复(4)的步骤直至全部基站配置完毕, 然后点击“configuration”, 选择“Save Configuration”。如图 31 所示。

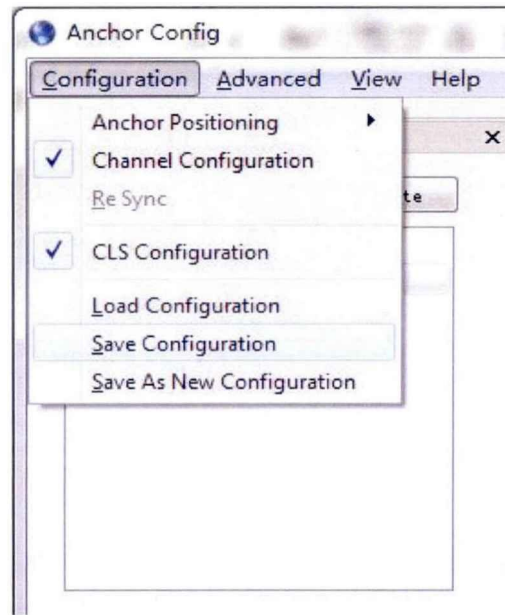


图 31 存储配置

Fig.31 Save configuration

(6) 完成基站配置后, 在“Configuration”中选择“Channel Configuration”。配置如图 32 所示:

- 1) “Channel Selection”选 2-centre freq. 4.0GHz (500MHz bandwidth);
- 2) “PRF”选 64MHz, “Preamble Code”选 9;
- 3) “Data Rate”选 6.81M 时, “Preamble Length”选 64 或 128;
“Data Rate”选 110k 时, “Preamble Length”选 1024 或者更大;
- 4) 单击“Configure”保存配置。

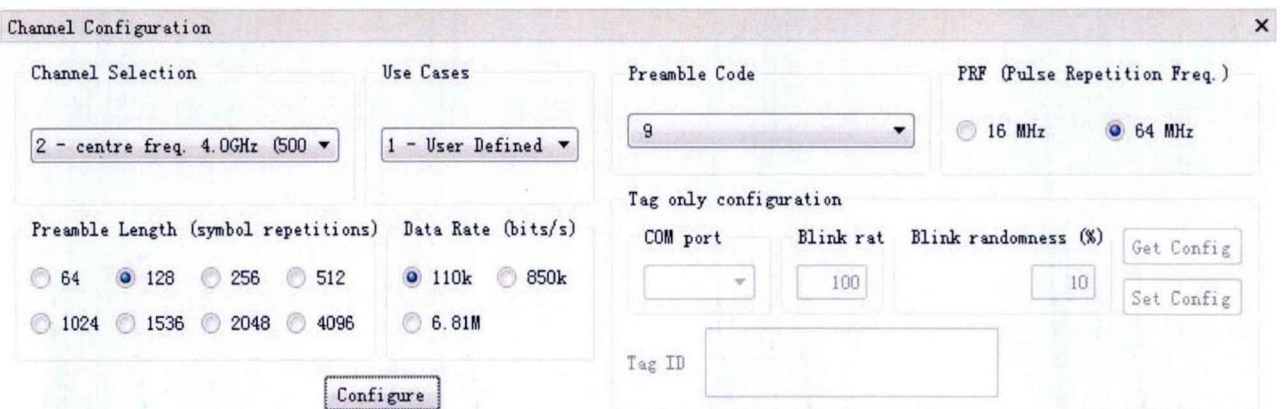


图 32 传输信道配置

Fig.32 Transmission channel configuration

(7) 整个系统配置完成后, 给标签上电, 单击“Start”, 如图 33 所示, 整个系统就将开始工作。此时“Tag table” 会显示移动标签的坐标数据, 如图 34 所示。

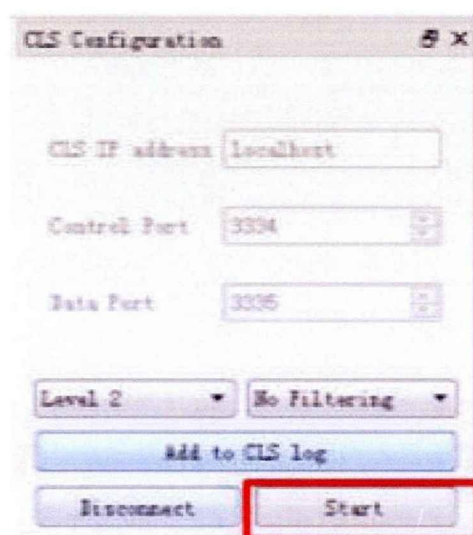


图 33 系统开始工作

Fig.33 Start the system

	Tag ID/Label	X	Y	Z	Blinks (%)	Loc (%)	R95	9	10
1	0xdeca010010001196	7.555 m	-1.628 m	0.000 m	92.75	94.8787	5.912 m		

图 34 标签坐标显示

Fig.34 Display the tag coordinate

5.3 系统测试分析

5.3.1 测试方式

如图 35 所示, 在实验室内定位环境中布置 8x3 的网格, 每个格子间距是 1m。在网格每一个交点上做定点的定位测试。X 坐标从 2m 到 9m, Y 坐标从 1m 到 3m。4 个基站的配置如下:

Anchor 1 (0, 0, 1.11)	ID 10205E6A100011F89	master
Anchor 2 (-0.49, 4.2, 2.1)	ID 10205E6A100011FB8	slave
Anchor 3 (10, 4.2, 1.35)	ID 10205E371001436B	slave
Anchor 4 (10, 0, 2.1)	ID 10205E6A10002055	slave

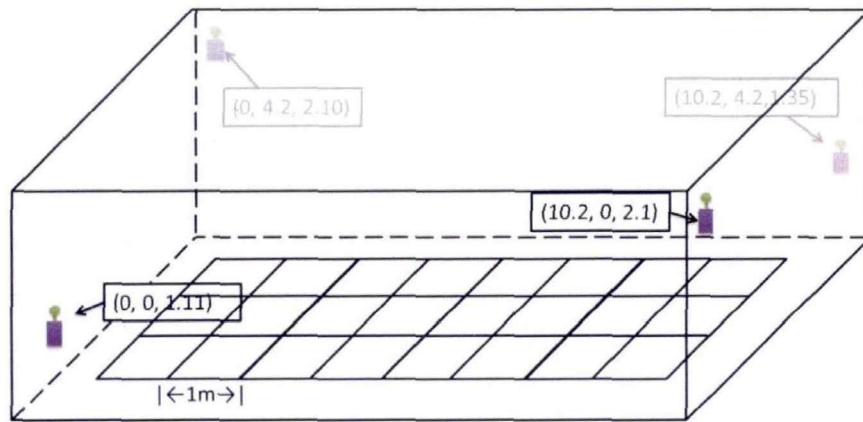


图 35 室内定点定位测试

Fig.35 Fixed-point location test in the indoor

实验参数配置如表 1 所示：

表 1 实验参数配置

Table1 Experiment parameters configuration

channel	2
Preamble	9
PRF	64MHz
Preamble Length	128
Datd Rate	110k bit/s

标签定位效果如图 36 所示，图中蓝点、黄点即为标签。

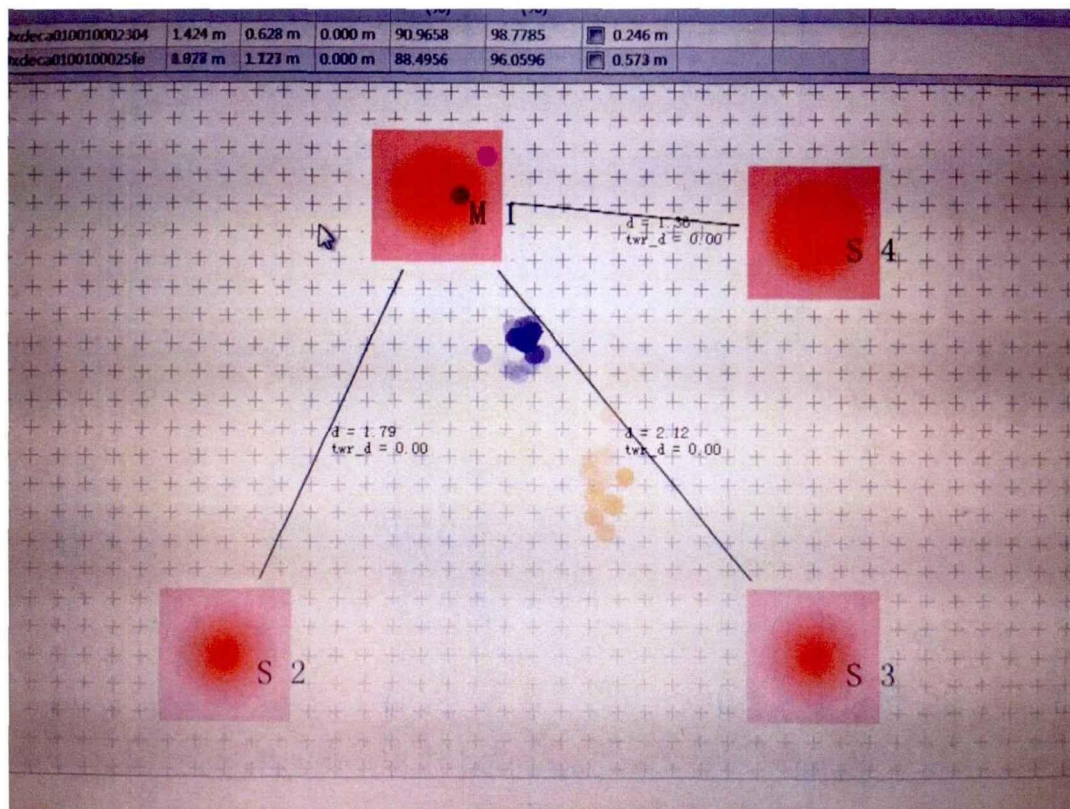


图 36 客户端显示标签位置

Fig.36 The display of tag location in the client

5.3.2 测试结果分析

表 2 室内网格定点标签的发包成功率 (%)

Table2 The sent packet success rate of mess fix-point tag in the indoor (%)

Y(m)\X(m)	2	3	4	5	6	7	8	9
1	93.6329	93.6836	93.7392	93.7859	93.8221	93.8686	93.8491	93.8536
2	93.8907	93.5190	93.3535	93.1440	93.1548	92.9452	92.8339	92.7148
3	93.9549	93.9795	93.9727	93.8958	93.9212	93.9342	93.8511	93.8640

表 3 网格定点标签的实际坐标与测试坐标对比 (m)

Table3 The comparison of real coordinate and test coordinate of mess fix-point tag (m)

Y(m)\X(m)	2	3	4	5	6	7	8	9
1	(1.937, 1.062)	(3.184, 1.080)	(3.859, 1.08)	(4.829, 1.376)	(5.854, 1.053)	(6.799, 1.107)	(7.902, 1.018)	(8.559, 1.036)
2	(1.978, 2.245)	(3.016, 2.029)	(4.125, 2.118)	(5.038, 2.118)	(5.951, 2.097)	(7.014, 2.155)	(7.916, 2.150)	(8.866, 2.168)
3	(1.958, 3.262)	(2.928, 2.934)	(4.026, 3.176)	(4.958, 3.029)	(6.058, 3.194)	(6.903, 3.273)	(7.838, 3.183)	(8.825, 3.242)

表 4 网格定点标签的定位距离误差平均值 (cm)

Table4 The location distance error average value of mess fix-point tag (cm)

Y(m)\X(m)	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10.2000	19.8000	15.8000	17.2000	16.8000	15.7000	19.9000	11.7000
2	25.1000	22.3000	16.7000	13.9000	17.7000	17.3000	14.4000	13.7000
3	14.4000	18.2000	13.8000	14.8000	14.3000	11.3000	18.2000	13.2000

由表 2 可以看出, 标签在实验室网格中各个定点的发包成功率几乎都在百分之 93 以上, 这表明了标签在与基站通信时发包情况良好。标签发包的成功率高低与否直接关系到标签的定位精度, 一般发包成功率需高于百分之 80 以上对标签的定位数据才算有效, 而要对标签进行精确定位, 发包成功率至少要百分之 90 以上。而本次测试中定点标签的发包成功率几乎都在百分之 90 以上, 证明测试中标签的定位误差并不大, 在可控范围内。

表 3 是对实验室网格中定点标签的实际坐标和测试坐标进行了一个比较, 从坐标数据可以看出, 网格中每个定点的测试坐标与实际坐标相差不大, 坐标误差值几乎都在正负 0-20 厘米范围内上下浮动。而表 4 则比较了实验室网格中定点标签的实际坐标位置与测试的标签坐标位置的一个直线距离, 得出的距离误差平均值在 10-20 厘米范围内。这表明了本论文设计的基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位系统基本达到了厘米级精确定位的要求, 定位精度可达到 10 厘米到 20 厘米左右。而一些误差的产生原因可能有:

(1) 测量因素: 包括基站标签坐标的人为测量误差等等, 这任何技术都无法避免的;

(2) 系统因素：整个系统的软硬件在工作的过程中都会或多或少有些许误差，包括一些设备的老化等等；

(3) 环境因素：室内环境若遮挡物较多，则很容易对基站与标签的通信造成影响，从而影响标签的定位精度。另外，若室内环境面积越大，对无线信号的传输造成干扰会越大，同样会影响标签定位的精度。

另外，在对标签进行室内定位测试的同时，对基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位系统的功耗进行了测量（测量 30 次产生一组数据），然后再与基于 TOF 算法的室内定位系统的功耗作了一个比较，如图 37 所示。从中可以看出，TDOA 模式的定位系统的平均功耗要比 TOF 模式的平均功耗低 20dBm 左右，这证明了基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位系统在精确定位的同时，系统的功耗也大大降低了。这是因为在理想情况下，标签与基站间只需进行一次通信就能对标签进行定位，故系统的功耗较小。

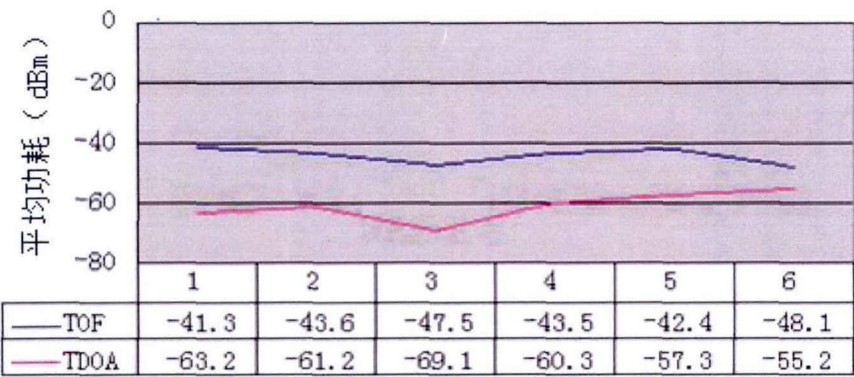


图 37 两种不同定位算法的系统功耗比较

Fig.37 The comparison of system power dissipation in two different location algorithm

5.4 本章小结

本章在 Hainan EVK 实验平台上对基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位系统进行了系统测试并分析。在对实验环境，软件配置步骤进行一个总体介绍的基础上，对实验结果进行系统分析并评估，最后得出本论文所设计的系统可以在室内进行厘米级的精确定位，同时与其它算法设计的系统比较，基于 TDOA 算法的室内定位系统的系统功耗明显较低。

5 总结与展望

5.1 本文总结

随着无线通信技术的快速发展以及人们对定位服务需求的日益增多,无线室内定位技术正在获得越来越多的关注,各行业对人员、货物、资产设备等实时定位的应用场景也在不断增多。而相比于目前室内定位所采用的无线通信技术如 WIFI、Bluetooth、红外、超声波、RFID 等,UWB 无线通信技术有低功耗、低成本、抗多径干扰能力和穿透能力强等优点,故研究 UWB 的室内定位系统有着重大意义。本论文完成的主要工作总结如下:

(1) 通过对 UWB 技术和室内定位算法的国内外研究发展现状的分析,仔细剖析了 UWB 室内定位技术的研究意义。

(2) 对 UWB 技术及几种定位算法的实现进行了详细介绍,通过对各个算法优缺点的分析基础上,选择了 TDOA 算法并介绍了其在 UWB 室内定位系统中的实现。

(3) 通过对 Hainan EVK 嵌入式实验平台的软硬件的介绍后,本文对设计的室内定位系统进行了搭建并测试,同时对定位结果进行误差分析并测量了系统功耗。

(4) 大量的实验分析和性能比较表明,基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位系统确实能做到厘米级的精确定位,同时由于 TDOA 算法本身的特性,当它应用于室内定位系统中时,基站与标签最多只需进行一次通信就能对标签进行定位,从而极大降低了系统的功耗。在一定程度上,本系统更适合于多标签大规模的室内精确定位。

5.2 课题展望

室内定位技术有很高的实用价值,是一项前景非常广阔的研究课题。本文设计的基于 TDOA 算法的 UWB 室内定位系统,已通过测试表明系统适合于室内精确定位且耗能较少。然而,这只是在室内只有一个标签进行定位的情况下得到的结果。当室内存在多个标签需要进行定位时,各个标签与基站之间的通信过程可能会互相碰撞冲突,导致信息节点的丢包率加大,从而大大影响标签的定位精确度,故后续课题可以从多标签的容量模型方向研究,提高系统容量从而减少多标签系统中信息的碰撞。另外,本文的系统测试环境只是在实验室一个比较小的空间里面,若是在大型的展览馆或者物流仓库等,本系统将不能满足如此大的空间的室内定位需求,故室内定位系统网络的可扩展性也是一个后续的研究课题。最后,由于 TDOA 算法是基于到达时间差的定位方法,故其对基站间的时钟同步要求非常高。本文虽然在基站加入了卡尔曼滤波算法确保了基站间有较高的时钟同步,但基站间的无线时钟同步算法还有很大的研究空间,如时钟同步算法还得进一步考虑跟定位的实际环境想匹配等等。本文只是从 TDOA 算法和 UWB 技术相结合的角度研究了室内定位的一个小小系统,后续对于跨区域大容量多标签的实时精确定位系统,则还有很大的研究空间。

参考文献

- [1] 叶佳卉.基于 TDOA 的室内定位算法设计与实现[D].华中科技大学,2013.
- [2] 唐春玲. UWB 定位系统研究[D].西南大学,2008.
- [3] 邹金平.超宽带室内定位研究[D].昆明理工大学,2008.
- [4] 徐劲松,卢晓春,边玉敬. 基于 UWB 的室内定位系统设计与仿真[A].全国时间频率学术会议论文集,2009.
- [5] 张忠娟.基于 UWB 的室内定位技术研究[D].天津大学,2012.
- [6] 林传分.基于超宽带的室内定位算法研究[D].新疆大学,2014.
- [7] 韩笑楠. 基于 IR-UWB 和 ZigBee 的 TDOA 定位方案[D].吉林大学,2013.
- [8] 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[D].中国海洋大学,2012.
- [9] 倪浩,任光亮,常义林.一种无线网络估计新算法西安电子科技大学学报(自然科学版)36(1):17-21,2009.
- [10] 吕宝红.地基雷达对临近空间低动态目标定位跟踪算法研究[D].东北大学,2013.
- [11] Maria-Gabriella Di Benedetto, Guenno Gianicola 著, 葛利嘉, 朱林, 等译. 超宽带无线电基础[Z]. 电子工业出版社, 2005 年, pp.19-98.
- [12] 王金龙,王呈贵,阚金荣.无线超宽带(UWB)通信原理与应用[M].pp.15-19,2005.
- [13] 朱永龙. 基于 UWB 的室内定位算法研究与应用[D].山东大学,2014.
- [14] 王一强,孙罡,侯祥博.UWB 超宽带技术研究及应用[D].通信技术,2009.(3),pp.70-72.
- [15] 吴微威,王卫东,卫国. 基于超宽带技术的无线传感器网络 [D]. 中兴通讯技术,2005,11(4),pp.28-31.
- [16] M.El-Hadidy, M.El-Absi. Artificial Diversity for UWB MB-OFDM Interference Alignment Based on Real-world Channel Models and Antenna Selection Techniques[C].IEEE International Conference on Ultra-Wideband Proceedings, pp.338-342, Syracuse, Sept 17-20, 2012.
- [17] E.I.Shah Saadon, J.Abdullah. Evaluating the IEEE 802.15.4a UWB physical layer for WSN Applications[J]. IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications Proceedings, pp.68-73, Sept 22-25, 2013.
- [18] L.Zhiwei, P.Xiaoming. Performance Evaluation of DC-OFDM System in China UWB Standard[C].International Conference on Computational Problem-Solving Proceedings, pp.656-660, Chengdu, Oct 21-23, 2011.
- [19] G.Ting, L.Wei. Flexible Analog Baseband for WiMedia MB-OFDM and China UWB Standard[C]. 10th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings, pp.433-435, Shanghai, Nov 1-4, 2010.
- [20] Y.Chan,K.Ho. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,42(8),pp.1905-1915,1994.
- [21] K.Yu,I.Oppermann. UWB positioning for wireless embedded networks[J]. IEEE Radio and Wireless Conference,pp.459-462,2004.
- [22] K.Yu,I.Oppermann. Performance of UWB position estimation based on time-of-arrival measurements[C]. Utra Wideband System, IEEE Joint with Conference on Ultrawideband Systems and Technologies Joint UWBST & IWUWBS 2004 International Workshop on,pp.400-404,2004.
- [23] J.J.Caffery,G.L.Stuber. Overview of radiolocation in CDMA cellular system[J]. IEEE Communications Magazine,36(4),pp.38-45,1998.

- [24] I.Guvenc,C.C.Chong. A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,11(3),pp.107-124,2009.
- [25] A.Tayebi,J.Gomez,F.M.Saez de Adana, et al. The application of ray-tracing to mobile localization using the direction of arrival and received signal strength in multipath indoor environments[J]. Progress In Electromagnetics Research,91,pp.1-15,2009.
- [26] W.Ke,L.Wu. Mobile location with NLOS identification and mitigation based on modified Kalman filtering[J]. Sensor,11(2),pp.1641-1656,2011.
- [27] C.McElroy. Comparison of Wireless Clock Synchronization Algorithms for Indoor Location Systems[C]. IEEE International Conference on Communications Workshops Proceedings, pp.157-162, Sydney, June 10-14, 2014.
- [28] C.Yin. Throughput Capacity of ALOHA MANETs[C]. IEEE/CIC International Conference on Communications in China-Workshops Proceedings, pp.71-75, Xi'an, Aug 12-14, 2013.
- [29] S.Won-Yong, D.E.Lucani. Multi-Hop Routing is Order-Optimal in Underwater Extended Networks[C].IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings Proceedings, pp.510-514, June 13-18, Austin, 2010.
- [30] Cholz J,Eguizabal M,Hernandez-Solana A,Valdovinos A.Comparison of Algorithms for UWB Indoor Location and Tracking Systems[J].Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd Pages: 1 - 5, 2011.
- [31] Yuechun Chu,Ganz A. A UWB-based 3D location system for indoor environments Broadband Networks[J].2nd International Conference on,Vol. 2,Pages:1147-1155,2005.
- [32] Kietlinski-Zaleski J,Yamazato T,Katayama M. TDoA UWB positioning with three receivers using known indoor features[J].Ultra-Wideband (ICUWB), 2010 IEEE International Conference on, Volume: 2,Pages:1-4,2010.
- [33] Evennou F,Marx F,Nacivet S. An experimental TDOA UWB location system for NLOS environments[J]. Vehicular Technology Conference, 2005. VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd, Volume:1 Pages: 420 - 423,2005.
- [34] Fang Zhao,Wenbing Yao,Yonghua Song. Super-resolution TOA Estimation in OFDM System for Indoor Environments[C]. London,UK,IEEE International Conference on Networking Sensing and Control,pp.723-728,April 2007.
- [35] Mehdi Rasti,R.Sharafat,Jens Zander.A Distributed Dynamic Target-SIR-Tracking Power Control Algorithm for Wireless Cellular Networks[J]. Vehicular Technology Conference, Volume:2 Pages: 33 - 35,2010.
- [36] M.Z.Win,R.A.Schohz. Impulse radio: How it works[J].IEEE Communication Letters.1998,2(2),pp.36.
- [37] Naiel Asdar,Robeno Alello.Interference Analysis of IEEE 802.11a on UWB Systems[Z].2003
- [38] G.F.Ross. Transmission and Reception System for Generation and Receiving Base-band Duration Pulse Signals without Distortion for Short Base-BAND Pulse Communication System[C].U.S.Patent 3728632,Apr.23,2007.
- [39]J. Caffery. Wireless location in CDMA cellular radio systems[J]. Springer,2000.
- [40] Huipeng Hong, Yuhao Zhu, Fang Dong, Liqiang Zheng and Chong Shen. A Low Power Consumption Indoor Tracking Method Research Based on UWB Technology[C]. ICEECE Phuket Thailand, 2015.
- [41] C.McElroy. Comparison of Wireless Clock Synchronization Algorithms for Indoor Location Systems[C]. IEEE International Conference on Communications Workshops Proceedings, pp.157-162, Sydney, June 10-14, 2014.

硕士期间科研成果

发表论文

- [1] Huipeng Hong, Yuhao Zhu, Fang Dong, Liqiang Zheng and Chong Shen. A Low Power Consumption Indoor Tracking Method Research Based on UWB Technology[C]. ICEECE Phuket Thailand, 2015.

获奖

- [1] 2014 年海南省“大唐杯”大学生移动通信技术大赛一等奖
[2] 2015 年“华为杯”第十届中国研究生电子设计竞赛华南赛区团队二等奖

参与项目

- [1] 国家农业科技成果转化资金项目“融合臭氧监测传感器网络中试及农业生产应用与示范”（2013GB2E200394）；
[2] 海南省重点科技计划项目“海上全天候视频传感器研究与应用开发”（ZDXM2014085）。

致 谢

时光飞逝，转眼间三年的硕士研究生生涯就要结束，在此诚挚地感谢三年中给予我关怀、指导、支持和帮助的所有良师益友以及我的家人！

首先要特别感谢我的导师沈重教授，在这三年的硕士研究生学习生活当中，沈教授给予我悉心的指导和照顾。沈教授严谨科学的治学态度、实事求是的创新精神以及渊博精深的知识，让我在科研实践和生活过程当中获益颇多。在此论文完成之际，我怀着最诚挚的情感向沈重教授致以深深的谢意。

感谢信息学院各位领导、教授对我的无私帮助和谆谆教诲。他们平易近人、严谨治学，在做人、治学、处世、修养等方面的优良品质都是我今后工作、生活中的模范标杆。

感谢我的室友以及同门师兄弟们朱雨豪、罗勃、冯高昂等同学在这三年当中所提供的支持和帮助，大家一路相伴并结下了深厚的情谊，我将终身难忘。

最后，深深地感谢我勤劳、朴实、善良的父母，在我多年的求学道路上一直默默地支持我，为我的成长倾注了毕生心血，感谢你们为我做的一切！

洪惠鹏

二〇一六年五月