

DOI:10.13382/j.jemi.B2508496

UWB 有线时钟同步定位方法研究*

韦子辉^{1,2,3,4} 冯款培^{1,2,3,4} 赵新月^{1,2,3,4} 王阳^{1,2,3,4} 孔祥杰^{1,2,3,4}

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071002;
3. 河北省能源计量与安全检测技术重点实验室 保定 071002;
4. 零碳能源建筑与计量技术教育部工程研究中心建设项目 保定 071000)

摘要:时钟同步是保证 TDOA 定位精度的关键,目前 TDOA 定位系统多采用无线时钟同步方式,需要主从基站间频繁的对时通信,存在易受干扰,占用信道,影响标签容量等问题,为此提出了一种基于 UWB 有线时钟同步的 TDOA 定位系统设计方案。设计了时钟与同步信号差分远传电路,采用 D 触发器、或非门设计同步信号的调制与解调电路,保证了时钟与同步信号的相位一致性,并设计了时钟同步校准方法补偿系统误差。经测试同步精度达到 0.5 ns,选用的标准超 5 类网线最长有效距离可达 100 m,优于传统无线时钟同步精度,并构建了主基站-次级主基站-从基站的多层级联时钟同步架构,实现系统的高可扩展性。在室内环境下进行 TDOA 定位实验验证,实验结果表明,解算得到的标签定位精度 R95 平均值可达 9.75 cm 左右,该系统提升了超宽带 TDOA 定位的精确度和稳定性,减少了超宽带 TDOA 定位的无线信道占用。

关键词:有线时钟同步;超宽带 TDOA 定位;时钟同步校准

中图分类号: TN966

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.50

Research on positioning method of UWB wired clock synchronization

Wei Zihui^{1,2,3,4} Feng Kuanpei^{1,2,3,4} Zhao Xinyue^{1,2,3,4} Wang Yang^{1,2,3,4} Kong Xiangjie^{1,2,3,4}

(1. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. National&Local Joint Engineering Research Center of Metrology Instrument and System, Baoding 071002, China; 3. Hebei Key Laboratory of Energy Metering and Safety Testing Technology, Baoding 071002, China; 4. Engineering Research Center of Zero-carbon Energy Buildings and Measurement Techniques, Ministry of Education, Baoding 071000, China)

Abstract: Clock synchronization is the key to ensuring the accuracy of time difference of arrival (TDOA) positioning systems. Currently, most TDOA systems adopt wireless clock synchronization methods, which necessitate frequent timing exchanges between master and slave base stations. Such wireless synchronization scheme suffers from susceptibility to interference, channel occupation issues, limited tag capacity and so on. Accordingly, a design for a TDOA positioning system utilizing UWB-based wired clock synchronization is proposed. This system has designed a differential remote transmission circuit for clock signal and synchronization signal. Particularly, the circuit for modulation and demodulation of the synchronous signal employs D flip-flop and NOR gate to ensure the phase alignment between the clock signal and the synchronization signal. Moreover, a clock synchronization calibration method designed to compensate for system errors, which confirms a synchronization accuracy of 0.5 ns with a maximum operational range of 100 m via standard Category 5e cables, superior to conventional wireless clock synchronization methods. In addition, a multi-tier cascaded clock synchronization architecture (Master → Submaster → Slave) was implemented to achieve high system scalability. Experimental verification in indoor environments demonstrates that the tag positioning derived from this TDOA positioning implementation yields an average R95 accuracy of approximately 9.75 cm. To sum up, the developed system enhances both precision and stability in UWB-based TDOA localization and reduce wireless channel occupancy of ultra-wideband TDOA positioning.

Keywords: wired clock synchronization; UWB-based TDOA localization; clock synchronization calibration

收稿日期: 2025-06-24 Received Date: 2025-06-24

* 基金项目: 河北省中央引导地方科技发展资金项目(自由探索类基础研究)(246Z0402G)资助

0 引言

全球导航卫星系统 (GNSS) 以及室内定位系统 (IPS) 广泛应用于交通导航、无人驾驶、物联网 (IoT)、智能制造、医疗健康、无人农场、智能安防等多个领域^[1]。随着智慧城市和智慧安防等复杂应用场景的出现,实时、高精度定位技术已成为实现高效自动化、保障公共安全和提高生产力的关键因素。具体而言,在智能交通中,高精度的定位技术可有效管理流量、缓解拥堵;在无人驾驶与自动化物流中,高精度定位保障车辆安全运行与高效配送。GNSS 技术在室外环境中能够提供较为准确的定位信息,但无法获得准确的室内定位信息^[2]。全球室内定位的普遍需求,促使了室内定位技术研究的快速发展。

为了有效应对室内定位精度不足的挑战,学术界和工业界在过去几十年里提出了多种解决方案。早期的室内定位技术主要依赖于低功耗蓝牙 (BLE)^[3]、Wi-Fi^[4]、射频识别 (RFID)^[5]、声波技术^[6] 以及图像处理技术^[7] 等。这些技术在部署成本、应用广度和灵活性上具备一定优势,但普遍存在定位精度不够理想的问题,无法满足厘米级精度要求。随着 UWB 技术的出现,其超宽频谱的特性为室内定位技术带来了革命性的进展。UWB 具有高精度时间分辨率和强抗多径干扰能力^[8],在高精度定位应用中展示出了极大的潜力。目前采用的主要定位方案有 3 种:到达时间 (TOA)^[9],到达角度 (AOA)^[10] 和到达时间差 (TDOA)^[11]。其中 TDOA 定位方案一直是核心的研究热点,已有多位学者进行了深入的探索^[12]。为了求得目标节点位置的最优近似解,需要依据情况引入鲁棒性优化策略。针对该问题,研究人员先后采用了 Chan 算法^[13]、Taylor 算法、卡尔曼滤波^[14]、粒子滤波 (particle filter, PF)^[15-16]、群智能优化算法^[17] 等 TDOA 定位算法来对以上方程组进行解算。TDOA 定位广泛应用于危险化学品工厂、养老院、机场大厅等具有高度动态变化的环境中。这些技术的快速发展不仅提升了定位精度,也促进了各种实时定位系统的落地应用。

然而,尽管 UWB 技术在高精度定位中展现出巨大的应用潜力,但在实际应用中仍面临许多技术挑战。尤其是在 TDOA 定位方法中,时钟同步精度是影响系统性能的关键因素之一。虽然不需要与标签时钟同步,但是 TDOA 定位方法依赖于多个基站之间的精确时钟同步,以确保信号到达时间差的准确性。通常情况下,时钟同步的精度要求达到亚纳秒级别^[18],这对系统设计提出了极高的挑战。目前室内定位中的时钟同步方案主要是无线时钟同步。Decawave 公司^[19] 比较了线性插值、反馈控制算法 (PI, PID, PII) 和卡尔曼滤波三种室内定位系统无线时钟同步算法,实际测量频率误差为 -0.2 ppm 左右,

其中卡尔曼滤波算法的定位方法得到最优 R95 为 11.3 cm。传统无线时钟同步需要基站频繁发送同步信号,为保证同步精度,发送同步信号时间间隔需要在 200 ms 以内,同步信号与标签定位请求信号不可避免存在冲突,当标签数量较多,由于同步信号丢失,不可避免会影响同步及定位精度,另外无线时钟同步要求主从基站之间满足视距通信要求,对基站安装位置有严格要求。

而有线时钟同步以有线通信方式将高精度时间信号分发至各个基站,基站之间无需满足视距通信要求,安装位置更灵活,基站间时钟一致性好,同步精度不受标签定位请求信号影响,因此在定位标签数量较多,对定位精度和可靠性要求较高的场合,有线时钟同步方案优势明显。

王远西等^[20] 采用超 5 类网线以星型拓扑架构连接电脑、有线时钟同步分配器和 12 台基站构建了超宽带有线时钟同步 TDOA 定位系统,针对三维室内超宽带定位过程中非视距目标定位的静态和动态误差问题,提出一种基于自适应卡尔曼滤波的有线时钟同步 3D 室内定位测量方法,在室内工业环境下,静态和动态定位均达到平面定位偏差小于 10 cm,高度定位偏差小于 20 cm,且漂移小稳定性高。但有线时钟同步的缺点在于现场布线缆工程量,线路规划复杂,并需研发专用的时钟同步控制装置,该装置需实现时钟频率信号与同步信号的远距离传输,并严格保证频率信号与同步信号之间的相位一致性。

针对目前超宽带 TDOA 定位有线时钟同步应用中存在问题,本文提出了一种有线时钟同步方案,主要工作包括:1) 提出了一种有线时钟同步控制电路设计方案,将主基站有源温补晶振通过有线传输作为所有从基站的频率基准,同时主基站发送同步信号保证从基站的相位一致。为保证同步信号的信号完整性,设计了同步信号的调制解调及差分传输电路,将时钟信号与同步信号调制为携带了同步信息的时钟信号的合成信号(下文简称为同步合成信号),并生成多个同源副本,通过差分传输方式发送至次级主基站或终端从基站后还原出同步信号。2) 针对线缆不同材质不同长度的传输延迟问题,本系统通过测量固定的信号传输延迟,在基站安装部署后进行一次必要校准补偿,以消除线缆信号传输过程中引入的时间延迟,保证同步精度。3) 在上述有线时钟同步研究基础上,设计开发了定位主基站、定位从基站,通过 CAT-5e 网线连接主从基站,主基站可为多个从基站提供时钟和同步信号,从基站可以接收和转发时钟和同步信号,实现了主基站-次级主基站-从基站的多层级联时钟同步架构,降低了现场布线缆施工难度。4) 为了验证该系统的性能,本文构建了一个包含 4 个基站的 TDOA 有线时钟同步测试平台,完成了同步精度校准、定位坐标计算、定位精度评估,并与其他无线同步方案进行了对比。实验

结果表明,相比需要多次反复进行同步校准的无线时钟同步方案,本文提出的有线时钟同步方案定位精度更优,且从原理上避免了同步信号受干扰的问题。

1 有线时钟同步设计方案

在实际应用场景中,由于存在多层楼结构、密集隔断环境等复杂情况,一主多从星型布线时往往面临线束过多,距离过远等问题。为此多区域时钟同步模型在多区域定位系统中,将定位基站划分为主基站、次级主基站和终端从基站 3 类。主基站负责全局时钟同步;次级主基站作为中继节点接收主基站信号后,经增强处理转发至终端从基站或下一级次级主基站,形成链式扩展结构,实现系统的高可扩展性;终端从基站作为终端节点接收并完成时钟同步。虽然多级中继引入了累积时延,但通过预设的时延补偿机制可以进行有效修正。级联时钟同步的系统结构如图 1 所示。

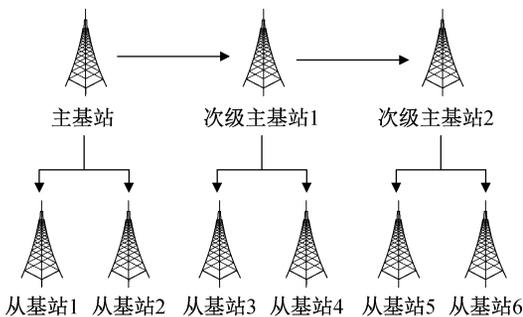


图 1 多层级联时钟同步架构

Fig. 1 Multi-level cascaded clock synchronization architecture

基站间有线时钟同步需要实现时钟信号远传用以频率同步,另外需要同步信号远传实现相位同步,为保证高精度的时钟同步,还需要保证同步信号上升沿与时钟信号某一周期上升沿同步,为此本文设计方案将时钟信号和同步信号的调制为一同步合成信号,用以远距离差分传输,并设计电路保证两信号解调后的相位锁定,具体工作流程如图 2 所示,工作流程概括为:

1) 主基站将时钟信号和同步信号的调制为一同步合成信号,下发次级主基站或终端从基站;

本文设计系统中,主基站有源晶振产生原始时钟信号作为系统的核心时序基准,控制器产生原始同步信号。鉴于原始时钟信号与同步信号非同源,其相位关系呈现非确定性特征,因此采用基于时钟信号上升沿触发的同步机制,通过 D 触发器对同步信号进行时序校准,将处理后的同步信号利用逻辑门电路调制到时钟信号中,合成同步合成信号,由时钟信号来携带同步信号。由于逻辑门本身存在的输入输出延迟特性,同步合成信号与原始

的基准时钟信号之间会产生一个微小的相位差,这个相位差通常在数纳秒量级,其相位关系如图 2 主基站信号调制流程中显示。

2) 次级主基站时钟信号和同步信号中继流程:

次级主基站作为中继基站,首先将接收到的主基站发送的时钟信号和同步合成信号进行复制,生成多个同源的副本,转发给从基站或下一级次主基站,接收到的时钟信号一路为次级主基站提供外部时钟基准,另一路与接收到的同步合成信号进行相位对比以恢复同步信号。

3) 从基站时钟信号和同步信号还原流程:

从基站作为终端节点接收上层基站发送的时钟信号和同步合成信号,与次级主基站的信号恢复流程相同。从基站单端时钟信号复制为两路输出:一路为接下来的定位模块提供时钟;另一路通过与同步合成信号进行相位对比,最终重建同步信号。

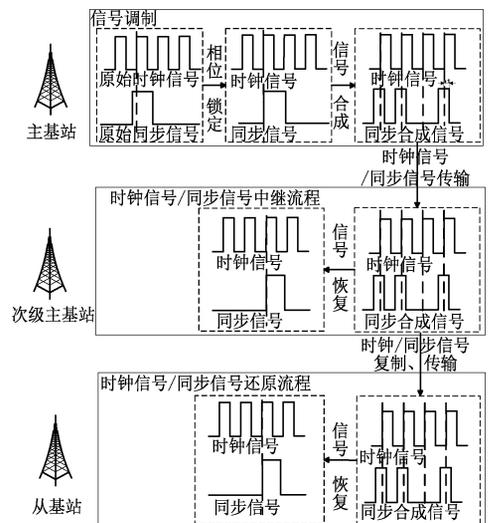


图 2 基站间有线时钟同步的工作原理

Fig. 2 Operational mechanism of inter-site wired clock synchronization

2 时钟及同步信号调制解调方案设计

基于该方案进行设计,为确保时钟与同步信号的相位一致性,系统采用两级同步器处理机制,该部分处理流程与信号对应关系如图 3 所示。原始时钟信号经时钟缓冲器进行阻抗匹配和信号增强后,分路为三路同源信号,其中基准路直接输出,第二路接入 D 触发器的 CLK 端,同时将单片机产生的同步信号接入 D 端。由于 D 触发器的时序保持特性:当同步信号在 CLK 上升沿前满足建立时间和保持时间要求时,D 触发器会采样 CLK 上升沿到来时 D 端的值并锁存到 Q 端,Q 端输出将在时钟上升沿同步更新,实现两信号的相位锁定,为下一步的信号合成操作进行准备。

为了实现同步信息在时钟信号中的调制,时钟缓冲器生成的第三路时钟信号与同步信号被同时连接到或非(NOR)逻辑门的输入引脚。在每一个时钟信号的上升沿判断同步信号的电平:当同步信号为高电平时,或非逻辑门的输出为低电平;当同步信号为低电平时,或非逻辑门的输出则与时钟信号相反。通过这种方式,同步信号的信息被调制到了时钟信号中,实现了两者在传输过程中的绑定。或非逻辑门在这里起到了信号合成的作用,其输出信号即为携带了同步信息的时钟信号的合成信号,即同步合成信号。在利用 NOR 门进行信号合成的过程中,由于逻辑门本身存在的输入输出延迟特性,同步合成信号与原始的基准时钟信号之间会产生一个微小的相位差,该相位差处于纳秒量级,典型值范围为 3~4 ns。

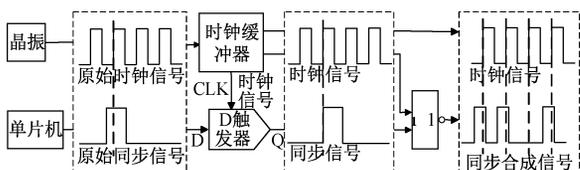


图 3 时钟/同步信号调制流程

Fig. 3 Modulation procedure of clock/synchronization signals

在正常情况下,即没有同步信号参与调制时,或非门的传播延迟导致输出信号存在固定时移,此时时钟信号的上升沿会正好对应同步合成信号的高电平状态。然而,在携带同步信息的特定时段内,时钟信号的上升沿则会对应同步合成信号的低电平状态。在基站接收到上一级基站经差分处理传输的时钟信号和同步合成信号后,解调过程的信号状态与处理流程如图 4 所示。为了实现同步信号的恢复,本文在接收端选了一个带有反相输出功能的上升沿 D 触发器,该触发器的 CLK 端接收时钟信号,D 端则接入同步合成信号。由于同步合成信号在携带同步信息时会会在时钟上升沿呈现低电平状态,而 D 触发器在 CLK 上升沿时会采样 D 端的状态并将其输出到 Q 端,此时 Q 端输出低电平。又因为触发器具有反相输出功能,则正常情况下触发器的 Q 端输出低电平,携带同步信息的特定时段 Q 端输出高电平,这一输出状态即可被视为恢复出的同步信号。还原后的同步信号与调制前的同步信号相位关系稳定相差一个时钟周期,为后续固定延迟的校准提供了理论依据。

3 基于有线时钟同步定位基站设计

基站的定位功能选用 Decawave 公司(现已被 Qorvo 收购)的 DW1000 射频芯片进行实现。这款芯片采用 IR-UWB 通信技术,其带宽为 500 MHz。DW1000 内置的 40 位计数器计时分辨率达 15.65 ps,可确保信号飞行时间

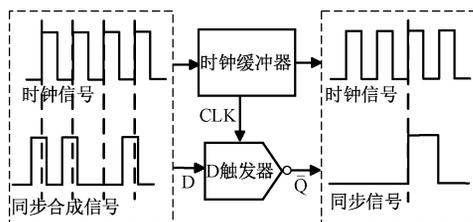


图 4 时钟/同步信号解调还原流程

Fig. 4 Demodulation and recovery procedure for clock/synchronization signals

的精确测量。DW1000 具有时钟计数复位引脚 SYNC,该引脚可配置为检测到上升沿即对计数器复位,由于是在每个时钟周期的上升沿开始检测 SYNC 引脚状态,因此只有保证同步信号和时钟信号上升沿一致才能保证时钟同步精度。该芯片的外部时钟源自主基站上的一颗精度 0.5 ppm 的 38.4 MHz 有源温补晶振,为减小电源噪声采用 LDO(线性稳压器)为晶振和核心电路供电。图 5 所示为主基站的实物图片,其中模块①、②、③分别为 MCU,以太网模块和定位模块,模块④为信号处理模块,基站在模块⑤线缆接口部分设计了差分转换模块,用于将时钟信号和同步合成信号转换为差分形式进行传输。

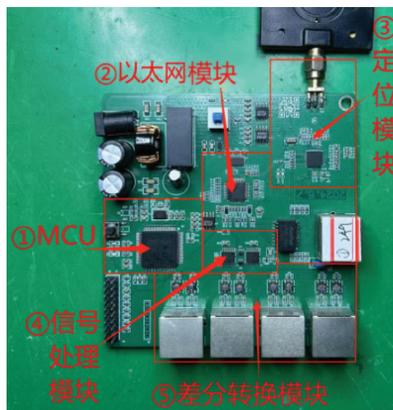


图 5 主基站的实物图

Fig. 5 Hardware implementation of master base station

主基站同步信号处理系统框图如图 6 所示。有源晶振作为定位芯片 DW1000 的外部时钟源,输出频率为 38.4 MHz 的稳定时钟信号,由输入引脚输入至时钟缓冲器,该芯片能够最多复制出 12 路输出时钟。随后其中一路的时钟提供给主基站上的定位模块,一路时钟用于后续处理,其余多路时钟进行差分转换并通过线缆接口分发至下一级基站——次级主基站或者从基站。下一级次级主基站处理接收的时钟信号,将再次使用相同型号的时钟缓冲器进行差分转换和分发操作。

同步信号由单片机产生,与时钟信号无直接关联,导致两者之间存在相位差和建立/保持时间的不确定性。

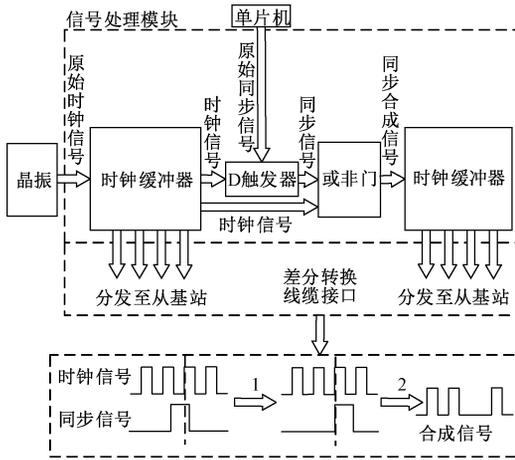


图 6 主基站同步信号处理模块图

Fig. 6 Synchronization signal processing architecture in master base station

信号处理部分目的在于关联时钟信号与同步信号的相位关系,并利用时钟信号的周期性传递同步命令。信号处理部分的具体步骤为:1)通过D触发器使时钟信号与同步信号进行相位对齐,使其上升沿保持一致且同步信号的高电平保持时间为时钟周期的整数倍;2)使用或非门对时钟信号和同步信号进行调制处理,使时钟信号在同步信号保持时间内维持低电平状态,从而生成一个被“挖去”若干峰的同步合成信号。这个同步合成信号在此处的时钟违例即为同步的标志。

在该同步过程中,由于元器件的输入-输出延迟和电信号在线缆中的传输延迟,因此通过同步信号进行重置后的各基站不能在事实上达到绝对同步,而是会产生一个固定的系统误差。本系统将在后续校准算法优化过程中对信号传输延迟进行精细化建模与量化分析,并基于此设计系统级校准流程及动态补偿机制,以提升定位精度。

从基站接收处理模块系统框图如图7所示。从基站包含主控制器、电源管理系统及UWB定位模块等核心单元。信号接收模块负责恢复主基站传输给从基站的差分化信号。定位模块将恢复的时钟信号作为外部时钟的参考,帮助同步合成信号恢复为同步信号。

接收处理模块的作用是将主基站获得的同步合成信号重新恢复为同步信号。该步骤利用D触发器的机制,将同步合成信号作为目标信号,以时钟信号作为时钟参考对其进行采样检测,当检测到同步合成信号的该周期内上升沿信号空缺,便将同步信号恢复出来。该恢复出来的同步信号上升沿与时钟存在绑定关系。对于进行有线同步的所有基站来说,所接收到的同步信号都是在时钟信号的第某个相同周期产生的,规避了不确定性,因此可以实现更高的时钟同步精度。

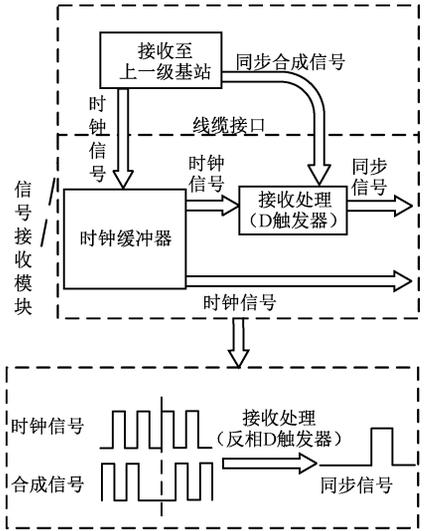


图 7 从基站同步信号接收处理模块图

Fig. 7 Synchronization signal reception architecture in slave base station

在单区域时钟同步系统中,只依靠主基站和从基站搭配即可完成定位系统的组成。而多单元时钟同步系统中,主基站和从基站之间加入了一级次级从基站。次级主基站在还原同步信号之前先实现中继功能,将恢复的时钟信号和同步合成信号进行差分处理并传递至下一级基站,以实现基站同步的多级级联功能。与从基站相比,次级主基站在差分信号组合电路和同步合成信号还原电路之间嵌入了时钟缓冲器作为核心转发单元,这样当差分输入信号经差分信号组合电路后,首先由时钟缓冲器进行时钟同步和信号复制,生成多个同源的低抖动副本,其中主信号继续流向同步合成信号还原电路完成后续处理,而副本信号经平衡变压器差分处理后再次发送到下级从基站,实现主从基站之间的级联通信和信号同步。这种设计既保持了主链路的信号完整性,又通过时钟缓冲器复制降低了多节点传输中出现时序偏差的风险。整个次级主基站接收处理模块系统框图如图8所示。

4 有线时钟同步校准及精度测试

4.1 时间差测量误差源分析

对有线时钟同步系统来说,其同步信号从主基站电路板通过传输线缆传输到从基站,必然会存在传输时间,导致从基站的同步时间要晚于主基站。由于主从基站的电路板设计已经确定,并且采用的是统一的硬件规格,因此元器件延迟和信号处理延迟等因素导致的信号在基站上的传输延迟可以认为是固定值,在测量一次后便可以确定。而传输线时延作为空间依赖变量,其值随线缆长度、介质特性及阻抗参数变化,需根据具体设备场景进

个基站发送脉冲信号,当 3 个基站接收到信号时,便会向上位机发送此时此刻的计数器计数值。

通过交换机将各基站连接至上位机,上位机接收来自 3 个基站的 16 进制计数器时间戳数据。选取主基站为基准,分别计算次级主基站和从基站相对主基站的时间差,记为 $\text{diff}[0]$ 和 $\text{diff}[1]$,在测试中记录了 6 253 组数据。

对主基站与次级主基站的时间同步精度数据进行统计,数据波动情况如图 11 所示。该主基站与次级主基站的时间差测试样本平均值为 42.261 4 ns,标准差为 0.101 5 ns,表明数据整体具有较高的稳定性。在收集的 6 000 多组数据中,仅发现 3 个点存在明显的离群现象,其余数据均表现稳定,整体波动范围控制在 0.5 ns 以内。实验验证表明,在标准 CAT-5e 双绞线传输条件下,所提出的有线时钟同步校准方案可实现最长 100 m 的有效距离,同步精度保持在 0.5 ns 范围内。

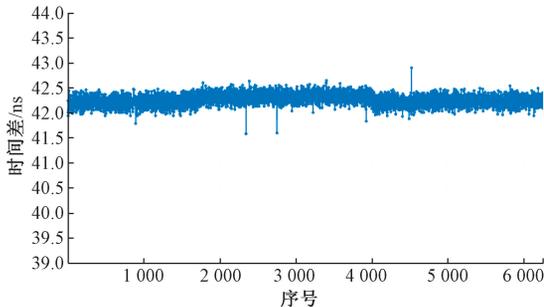


图 11 主基站与次级主基站同步精度

Fig. 11 Synchronization precision of master base station and subordinate master base station

主基站与从基站的时间同步精度数据如图 12 所示。该主基站与从基站的时间差测试样本平均值为 78.704 0 ns,样本标准差为 0.105 1 ns。在收集的 6 000 多组数据中,仅发现两个点存在明显的离群现象,其余数据表现同样稳定,总体波动范围控制在 0.5 ns 以内,与次级主基站精度一致。

为了同时对比次级主基站和从基站的同步情况,将两者都通过平均值进行补偿,随后放在同一坐标系内进行比较。观察图 13 数据可以发现,次级主基站相对误差中存在 3 个明显的离群值,它们分别位于第 2 344 位、2 751 位和 4 523 位。而对于从基站,同样也观察到了两个离群值,它们分别出现在第 4 289 位和 4 450 位。两者的离群值位置并不对应。

从基站上的离群值并未在次级主基站的对应序号位置出现,这表明两者之间的不同步并非由中继转发过程中的问题所引起,更有可能是 DW1000 设备本身的时间分辨率偶发问题导致的严重误差。在实验过程中需要

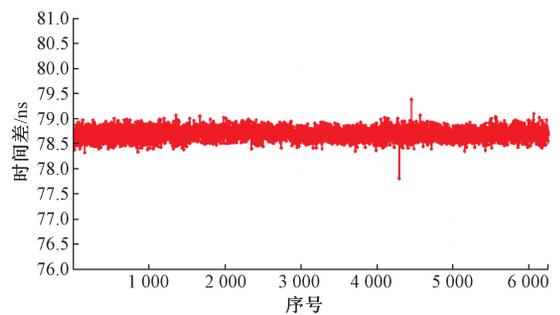


图 12 主基站与从基站同步精度

Fig. 12 Synchronization precision of master base station and slave base station

采取相应措施减少或消除 DW1000 这些偶发误差对系统性能的影响。

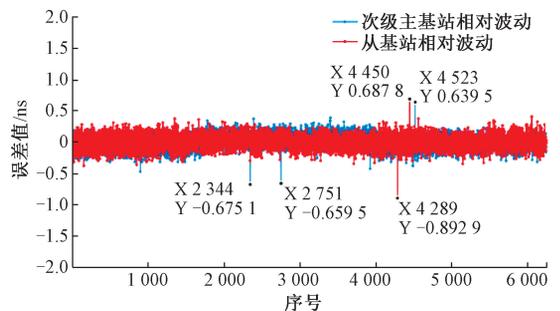


图 13 两组时钟同步精度对比

Fig. 13 Time synchronization precision: master-slave vs. master-submaster architectures

4.4 同步复位误差验证

有线时钟同步系统通过将基站计数器复位来实现时钟基准同步的目的。为了评估时钟同步系统在反复复位操作下的有效性,本文设计了补偿后多次复位的一致性测试。

在原始测试实验中,基站 1 的两次计数值从 76ca4ed1e1 变为了 09d2c4af45。这一情况说明在这两次计数过程之间,该基站的计数器发生了复位,没有计满就从零开始重新计数。基站 2 也发生了相同的变化,表明整体的时钟同步系统都发生了一次同步复位。

对主基站编程设定,使其每隔 10 s 发送一次同步命令,这一过程重复 10 次。同时每秒记录一次时间差,累计记录 100 组数据。

对多次复位的重复性误差测试数据分析如图 14 所示,其中蓝色虚线表示在此处进行一次复位。该样本的标准差为 0.104 7 ns,同时总体的时间精度范围在 0.5 ns 以内。该数据标准差与范围均与上一节所测定的时钟精度吻合,系统的重启或复位对时钟同步不造成影响。

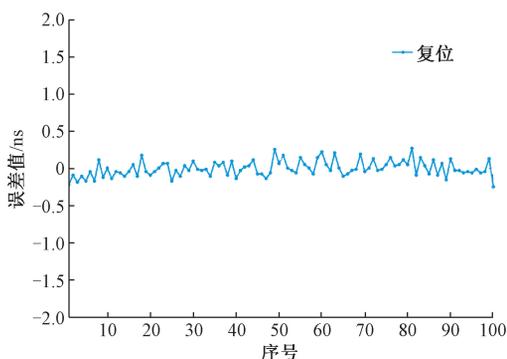


图 14 重复性误差测试

Fig. 14 Repeatability error test

4.5 有线时钟同步精度测试

本研究将校准后的有线时钟同步系统在 150 ms 对钟时间间隔下进行 3 个基站之间的时钟同步精度测试,记录主基站与次级主基站之间的时间差、主基站与从基站之间的时间差和主基站多次复位的时间差,通过统计 3 组数据的波动范围和标准差分析其离散特性,结果如表 1 所示。

表 1 有线时钟同步精度测试

Table 1 Timing accuracy of wired clock synchronization

基站间时钟同步精度	波动范围/ns	标准差/ns
主基站与次级主基站	0.5	0.101 5
主基站与从基站	0.5	0.105 1
补偿后同步复位	0.5	0.104 7

根据表 1 中的数据可验证本实验所设计的有线时钟同步系统在授时稳定性方面效果较好,数据波动范围在 0.5 ns 以内,标准差在 0.105 ns 左右。通过 3 个基站之间的时钟同步精度测试和多次复位的一致性测试,验证了补偿校准设计的有效性。

5 系统测试与分析

5.1 有线时钟同步定位工作流程

如图 15 所示为有线时钟同步系统测试示意图,该系统采用主从基站信号同步处理的链状扩展架构。主基站即为定位系统的时钟源,在参与目标定位的同时,还额外承担着与从基站同步时钟的任务。从基站使用 CAT-5 网线作为传输同步时钟的线缆与主基站相连,与主基站实现时钟同步。主基站与从基站之间的连接具体可分为两类。第 1 种方式是直接连接,如示意图中主基站与基站 1,基站 2,基站 3 的连接方式。一个主基站能够同时与多个从基站建立同步。第 2 种方式是级联连接,如示意图中主基站与基站 1,基站 1-1 的连接方式。在该方式下主

基站连接至从基站,该从基站再连接至下一级从基站,以此类推,形成链状扩展结构。两种连接方式可以同时工作,互不影响。

在有线时钟同步系统进行定位工作时,首先主基站需要给其所连接的从基站发送同步信号(SYNC),如果是级联连接的从基站,接收到同步信号后还需转发给下一级从基站,各基站接收到同步信号后进行复位操作。如果是级联连接的从基站,接收到同步信号后还需转发给下一级从基站。各基站接收到同步信号后即进行同步操作,不需要进行回复;各个基站均接收来自定位标签发送的定位帧(BLINK)参与定位,各基站连接交换机将定位数据发送至上位机进行处理。

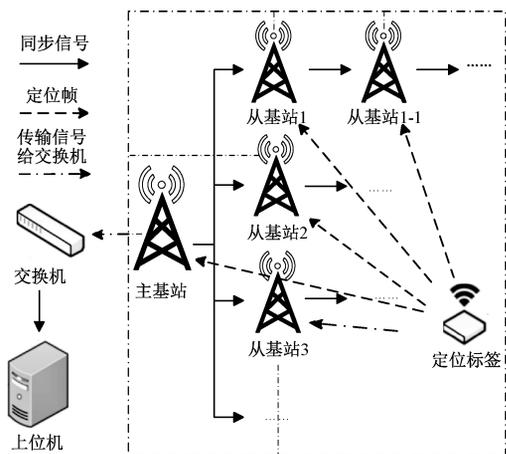


图 15 有线时钟同步系统测试示意图

Fig. 15 Schematic diagram of wired clock synchronization system test

5.2 静态定位测试

有线时钟同步定位系统由定位主基站,从基站,定位标签,交换机和计算机组成,如图 16 所示为实验场景图,对有线时钟同步定位系统进行定位性能测试。定位标签放置于实验场地中间,固定于三脚架顶端,高度与基站持平。4 个定位基站坐标依次为 (0, 0), (300, 0), (0, 400), (300, 400)。测试人员用卷尺测量确定坐标,并用黑色胶带在地面进行标记。将固定了定位标签的三脚架依次放置在坐标 (40, 100)、(90, 100)、(140, 100)、(40, 180)、(90, 180)、(140, 180) 共 6 个待测点进行测量。测距与定位时,首先打开定位标签,标签通过预先配置好的程序发送 4 GHz,带宽 500 MHz 的超宽带信号,时间间隔为每秒一次,各基站将接收到的标签信号经由交换机传输给上位机处理,在每个测试点进行 100 次定位计算。

定位系统的静态实验结果如图 17 所示。对测量数据统计其最大残差和圆概率误差 (R95) 并标注在图中。在定位单元中心区域获得的结果较好,而在单元边界区域,由于算法迭代所需步数较多,定位误差波动较大,特

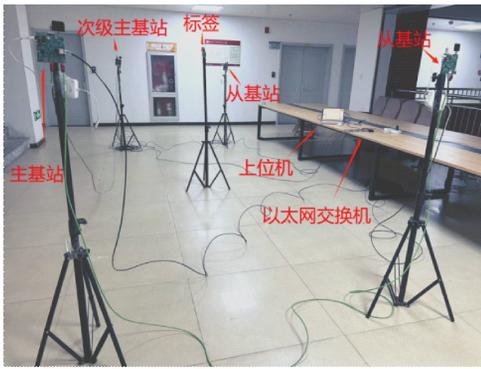


图 16 静态定位实验场景图

Fig. 16 Static positioning experimental setup diagram

别是在测量点(40, 100)的定位计算中,出现了较明显的离群值。

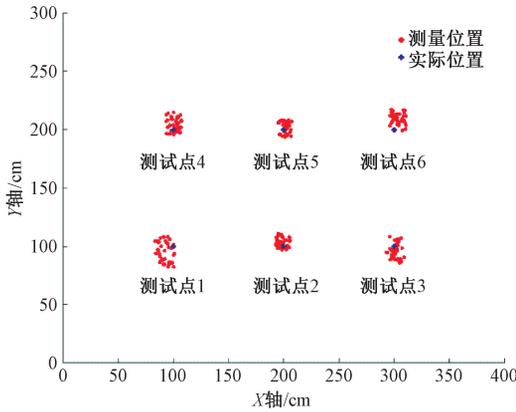


图 17 定位系统的静态目标定位实验结果

Fig. 17 Experimental results of static target positioning for localization system

对测量数据统计其最大残差、均方根误差、平均误差和 R95(95%圆概率误差)并制作表 2。在 6 个测试点中,最大残差和最大 R95 出现在测试点 4,最大均方根误差和最大平均值误差出现在测试点 1;最小残差和最小 R95 均为测试点 2,最小均方根误差和平均误差均为测试点 5,其次为测试点 3。综合对比所有测试点的定位精度,可以观察到测试点 2,测试点 5 和测试点 3 定位结果较为集中较高,而测试点 1、4、6 则误差相对较大。

表 2 静态定位数据分析

Table 2 Analysis of static positioning data (cm)

测试点	最大残差	均方根误差	平均值误差	R95
1	13.08	9.41	6.42	12.29
2	7.82	4.64	2.68	6.77
3	8.47	5.26	4.23	7.73
4	13.18	8.34	3.52	12.30
5	8.00	4.40	2.38	7.67
6	12.34	7.03	4.01	11.74

该结果符合多基站定位系统的边界衰减效应,其中测试点 2、5 处于定位区域中心,环境较理想,其定位精度范围在 2.5 cm 左右,一定程度可以反映该定位系统的理论精度情况;靠近边界的测试点可能受到如几何精度因子恶化,双曲线发散导致算法精度下降等问题,定位效果可能较差;由于本实验只使用了 4 个基站进行测试,通常情况下可以通过增加基站数量,优化算法边界条件等方式来提高边界区域的定位精度。

本有线时钟同步系统 6 个测试点的定位结果 R95 处于 7~13 cm 之间,平均值在 9.75 cm 左右,与 Decawave 公司^[19]的 5 种无线时钟同步方案在室内静态定位场景的 xy 平面上的 R95XY 对比位置估计的性能指标进行对比,结果如表 3 所示。

表 3 有线时钟同步与无线时钟同步的定位 R95 精度对比

Table 3 R95 positioning accuracy: wired vs. wireless clock synchronization

定位方法	R95/cm
有线时钟同步	9.75
线性插值	14.6
PI	14.1
PID	16.9
PII	16.1
卡尔曼滤波	11.3

根据表 3 中的数据可知,本有线时钟同步系统的定位精度均优于各种算法的无线时钟同步系统。本有线时钟同步系统的 R95 均值为 9.75 cm,优于最佳无线时钟同步定位效果的卡尔曼滤波算法 R95 的 11.3 cm,将 R95 提升了 13.7%,最高优化无线时钟同步的 PID 算法 R95 至 42.3%。

在时钟同步精度和稳定性上,本文所提出的有线同步方案相比无线同步方案具有明显优势。无线同步方案中各节点依赖主节点间周期性无线报文授时以估计和补偿频率偏差和相位偏差。该方法易受到环境多径干扰、信道冲突所引入的随机误差影响。Decawave 公司^[19]探讨了多种算法在同步与定位过程中的应用,包括线性插值、PI、PID、PII 及卡尔曼滤波等。在定位精度方面,线性插值法和卡尔曼滤波表现相对较好,但随着时钟同步周期的延长,两者的性能均出现退化。即便采用较高精度的有源温补晶振(± 1 ppm),仍需要以 150 ms 周期广播同步信号,才能保证同步精度。另外线性插值法会引入最大一个同步周期的延迟,限制了其在实时高精度系统中的应用。另一方面,在多个单元部署时,定位标签数量较多或定位频率较高时,因信道冲突导致同步信号丢失不可避免,这将直接影响定位精度和稳定性。

相比之下,本文提出的有线时钟同步方案采用统一的主基站时钟源,通过物理有线介质直接向各节点传输

晶振时钟。无需校准时钟频率偏差,只需通过主基站发送同步信号校准相位偏差即可,相位偏差主要是由于传输距离差异造成,由于信号传输路径的延迟是固定且可精确测量的,可通过预校准予以消除,无需依赖复杂的滤波算法。

5.3 动态定位测试

动态测试场地与上相同,测试人员首先使用卷尺测量长度,确定移动轨迹,并使用黑色胶布粘贴在地板进行辅助,随后手持定位标签按照地板轨迹行走进行动态实验,从测量点(40,50)出发,经过(140,50)、(140,250)、(40,250),最终返回测量点(40,50),测算运动轨迹如图 18 所示。该定位系统以相等时间间隔进行测量,假定测试人员以匀速沿所设轨迹运动。最大误差出现在轨迹拐角处为 23 cm,整体误差基本在 15 cm 以内,考虑到因人体行走过程中的身体摆动引入的随机误差,实际定位效果依然良好。

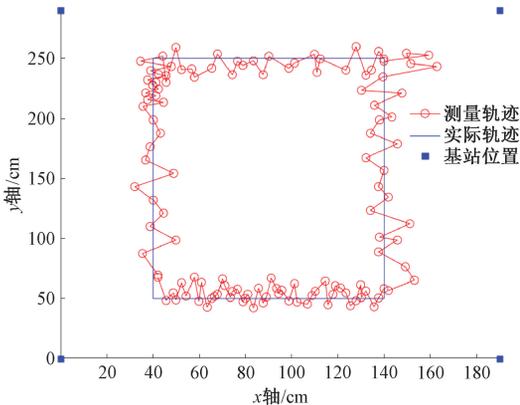


图 18 定位系统的动态目标定位实验结果

Fig. 18 Experimental results of dynamic target positioning for localization system

6 结论

本文针对 TDOA 定位的时钟同步需求,提出了使用 CAT-5 网线作为传输线缆的有线时钟同步设计方案,相对于无线时钟同步需要频繁无线同步通信,有线授时不占用无线信道、抗干扰能力强、定位精度更稳定,并设计开发有线时钟同步超宽带 TDOA 定位基站,对时钟同步精度、同步信号复位重复性精度进行了测试,结果表明相对于无线时钟同步,该方案能够有效提高 TDOA 定位的精度。静态目标可以实现 0.1 m 左右的分米级室内定位精度,并通过运动目标的定位轨迹测试,进一步验证了该定位系统在实际应用中的可行性。

参考文献

[1] 陈锐志,郭光毅,陈亮,等. 室内高精度定位技术研究应用现状与发展趋势[J]. 武汉大学学报(信息科

学版), 2023, 48(10):1591-1600.

CHEN R ZH, GUO G Y, CHEN L, et al. Application status, development and future trend of high-precision indoor navigation and tracking [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(10):1591-1600.

[2] SAMAMA N. Indoor Positioning: Technologies and Performance[M]. John Wiley & Sons, 2019.

[3] LEE C K M, IP C M, PARK T, et al. A Bluetooth location-based indoor positioning system for asset tracking in warehouse[C]. 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Macao:IEEE, 2019.

[4] 吴雅琴,陈林,侯云峰. 基于 CNN-GAN 的信道状态信息室内定位算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(24):119-126.

WU Y Q, CHEN L, HOU Y F. Channel state information indoor positioning algorithm based on CNN-GAN[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(24):119-126.

[5] 谢良波,夏晨晖,张钰坤,等. 基于双频点载波相位的 RFID 室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5):267-277.

XIE L B, XIA CH H, ZHANG Y K, et al. RFID indoor localization algorithm based on dual-frequency point carrier phase [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5):267-277.

[6] HÖFLINGER F, HOPPE J, ZHANG R, et al. Acoustic indoor-localization system for smart phones [C]. 2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14). IEEE, 2014:1-4.

[7] 谢波,张国良,李歆,等. 一种单目 VIO 定位精度与跟踪稳定性优化方法[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(4):23-30.

XIE B, ZHANG G L, LI X, et al. Optimization method for positioning accuracy and tracking stability of monocular VIO [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(4):23-30.

[8] 蓝发籍,刘冉,郭林,等. 融合超宽带方位和距离的机器人定位[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(8):155-163.

LAN F J, LIU R, GUO L, et al. Mobile robot localization based on ultra-wideband bearing and ranging[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(8):155-163.

- [9] GENG Y, HE J, PAHLAVAN K. Modeling the effect of human body on TOA based indoor human tracking[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2013, 20(4):306-317.
- [10] 鹿浩, 侯玉涛, 杨晓倩, 等. 基于复域超多维标度的混合 TOA/AOA 定位算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(13):39-45.
- LU H, HOU Y T, YANG X Q, et al. Research on hybrid TOA/AOA location algorithm based on super multidimensional scale in complex domain [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46 (13): 39-45.
- [11] THOMAS N J, CRUICKSHANK D G M, LAURENSEN D I. Performance of a TDOA-AOA hybrid mobile location system [C]. 3G Mobile Communication Technologies. London: IET, 2001:216-220.
- [12] THUROW K. UWB-based real-time indoor positioning systems: A comprehensive review [J]. Applied Sciences, 2024, 14(23):11005.
- [13] 王红尧, 郑鸿林, 田劼, 等. 面向矿井动目标的 PSO-SVR 模型与 UWB Chan 优化距离指纹融合定位方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7):106-114.
- WANG H Y, ZHENG H L, TIAN J, et al. Fusion location method of PSO-SVR model and UWB Chan optimal fingerprint matching for mine moving target [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(7):106-114.
- [14] 杨承志, 张晓明, 张鸽. 基于 WLS-KF 的 UWB 室内定位滤波算法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(1):25-33.
- YANG CH ZH, ZHANG X M, ZHANG G. Research on UWB indoor localization filtering algorithm based on WLS-KF [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(1):25-33.
- [15] 洪鑫磊, 崔英花. 基于烟花优化粒子群的室内定位算法研究 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(14):59-64.
- HONG X L, CUI Y H. Research on indoor positioning algorithm based on fireworks optimized particle swarm [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (14): 59-64.
- [16] 翟彦蓉, 黄欢, 张申, 等. 改进粒子群优化算法在 TDOA 定位中的应用 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32(4):145-148, 152.
- ZHAI Y R, HUANG H, ZHANG SH, et al. Application of improved particle swarm optimization algorithm in TDOA positioning [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(4):145-148, 152.
- [17] 韦子辉, 王世昭, 叶兴跃, 等. 基于超宽带的 TDOA 相邻单元协同定位技术 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(1):77-83.
- WEI Z H, WANG SH ZH, YE X Y, et al. Cooperative location technology of TDOA adjacent units based on ultra wideband [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(1):77-83.
- [18] 冯帆, 王军, 陈小磊, 等. 超宽带室内定位无线时钟同步设计与实现 [J]. 电子技术应用, 2021, 47(9):105-110.
- FENG F, WANG J, CHEN X L, et al. Design and implementation of wireless clock synchronization for UWB indoor positioning [J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(9):105-110.
- [19] MCELROY C, NEIRYNCK D, MCLAUGHLIN M. Comparison of wireless clock synchronization algorithms for indoor location systems [C]. 2014 IEEE International Conference on Communications Workshops. Sydney: IEEE, 2014:157-162.
- [20] 王远西, 张浩, 房宏, 等. 有线时钟同步的超宽带 3D 室内定位 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(10):9-16.
- WANG Y X, ZHANG H, FANG H, et al. UWB 3D indoor positioning based on wired clock synchronization [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59 (10): 9-16.
- [21] KAVEH PAHLAVAN. IEEE 802.3-the ethernet [J]. Understanding Communications Networks-for Emerging Cybernetics Applications, 2022:307-347, DOI:10.1201/9781003339915-6.

作者简介



E-mail: zihui-wei@163.com

韦子辉, 1999 年于华北理工大学获得学士学位, 2002 年于海军工程大学获得硕士学位, 2009 年于河北工业大学获得博士学位, 现为河北大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为检测技术、室内定位技术。

Wei Zihui received his B. Sc. degree from North China University of Science and Technology in 1999, M. Sc. degree from Naval Engineering University in 2002 and Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2009, respectively. Now he is an associate professor and master tutor in Hebei University. His main research interest includes indoor positioning technology.



孔祥杰(通信作者),2001 年于河北大学获得学士学位,2007 年于天津大学获得硕士学位,现为河北大学硕士生导师,主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail:kwty@163.com

Kong Xiangjie(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hebei University in 2001, M. Sc. degree from Tianjin University in 2007, respectively. Now he is a master tutor in Hebei University. His main research interests include detection technology and automation devices.



冯款培,2023 年于南京信息工程大学获得学士学位,现为河北大学研究生,主要研究方向为室内定位技术。

E-mail:xwz8867@163.com

Feng Kuanpei received her B. Sc. degree from Nanjing University of Information Science and Technology in 2023. She is currently a postgraduate student at Hebei University. Her main research fields is indoor positioning

technology.



赵新月,2021 年于西安邮电大学获得学士学位,现为河北大学研究生,主要研究方向为室内定位技术。

E-mail:2634205592@qq.com

Zhao Xinyue received her B. Sc. degree from Xi'an University of Posts and Telecommunications in 2021. She is currently a graduate student at Hebei University. Her main research interest includes indoor positioning technology.



王阳,2019 年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2025 年于河北大学获得硕士学位,主要研究方向为超宽带定位系统与时钟同步。

E-mail:1533748278@qq.com

Wang Yang received his B. Sc. degree from Harbin Engineering University in 2019 and his M. Sc. degree from Hebei University in 2025. His main research interest is indoor positioning technology.