

面向室内高精度定位的 UWB 定位终端硬件 电路优化设计研究

楼圣¹, 陈浙波^{2*}

1. 中国电信股份有限公司杭州萧山区分公司, 浙江 杭州 311200

2. 浙江博颖装饰工程有限公司, 浙江 杭州 311100

DOI: 10.61369/TACS.2025140010

摘 要 : 室内高精度定位技术在智能制造、仓储物流、人员安全管理、设备跟踪与人机协同等场景中具有重要应用价值。与传统基于接收信号强度的室内定位方法相比, 超宽带技术具有时间分辨率高、抗多径能力较强、定位精度高等特点, 适合构建高可靠室内定位系统。然而, 在复杂室内环境下, UWB 定位终端仍面临射频链路稳定性不足、参考时钟一致性不高、供电噪声干扰明显、低功耗运行能力有限以及长期工作可靠性不足等问题, 这些因素会直接影响测距精度和定位稳定性。为此, 本文围绕面向室内高精度定位的 UWB 定位终端展开研究, 在分析其硬件电路构成与典型问题的基础上, 从信号采集与状态监测、射频前端与天线匹配、时钟与同步支撑、电源管理与低功耗控制、主控接口协同以及抗干扰与防护等方面提出系统化优化设计思路。研究结果表明, 面向工程应用的硬件电路优化不仅能够改善终端测距一致性和通信稳定性, 还能够为室内高精度定位系统的小型化、低功耗化和高可靠性提供设计参考。

关 键 词 : UWB; 室内高精度定位; 定位终端; 硬件电路; 优化设计

Research on Optimized Hardware Circuit Design for UWB Positioning Terminals Targeting Indoor High-Precision Positioning

Lou Sheng¹, Chen Zhebo^{2*}

1. Hangzhou Xiaoshan District Branch, China Telecom Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311200

2. Zhejiang Boying Decoration Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311100

Abstract : Indoor high-precision positioning technology holds significant application value in scenarios such as intelligent manufacturing, warehousing and logistics, personnel safety management, equipment tracking, and human-machine collaboration. Compared to traditional indoor positioning methods based on received signal strength, ultra-wideband (UWB) technology offers high time resolution, strong resistance to multipath interference, and high positioning accuracy, making it suitable for constructing highly reliable indoor positioning systems. However, in complex indoor environments, UWB positioning terminals still face challenges such as insufficient stability of the radio frequency (RF) link, inconsistent reference clocks, noticeable power supply noise interference, limited low-power operation capabilities, and inadequate long-term operational reliability, all of which directly affect ranging accuracy and positioning stability. To address these issues, this paper focuses on the research of UWB positioning terminals targeting indoor high-precision positioning. Based on an analysis of their hardware circuit composition and typical problems, systematic optimization design ideas are proposed from aspects such as signal acquisition and status monitoring, RF front-end and antenna matching, clock and synchronization support, power management and low-power control, main control interface collaboration, and anti-interference and protection. The research results indicate that hardware circuit optimization for engineering applications not only improves the ranging consistency and communication stability of the terminals but also provides design references for miniaturization, low-power consumption, and high reliability of indoor high-precision positioning systems.

Keywords : UWB; indoor high-precision positioning; positioning terminal; hardware circuit; optimized design

引言

随着工业互联网、智能物流与数字化管理水平的不断提升, 室内空间中对高精度位置感知的需求日益增强^[1]。传统室内定位方法虽然部署成本较低, 但在复杂遮挡、金属反射和多径干扰环境下, 往往难以同时兼顾定位精度、响应速度与系统稳定性^[2]。超宽带技术由于具备较高的时间分辨能力和较强的路径区分能力, 已成为室内高精度定位的重要技术路线之一^[3]。特别是在仓储货位跟踪、工业人员作业管理、机器人协同定位和资产追踪等场景中, UWB 定位终端作为系统前端感知节点, 其性能直接关系到整个定位系统的应用效果。

从工程应用角度看, 室内高精度定位并不仅仅取决于上层算法设计, 终端侧硬件电路结构同样具有决定性作用。若射频前端设计不

合理, 天线匹配欠佳, 电源纹波较大或参考时钟稳定性不足, 即使采用较优的定位算法, 也难以在真实场景中获得持续稳定的定位结果。同时, 室内部署环境往往存在设备密集、空间封闭、供电条件多样、电磁干扰复杂等现实问题, 这对 UWB 定位终端的硬件设计提出了更高要求。因此, 从终端电路层面分析现有问题, 并提出针对性的优化方案, 具有较强的工程意义和应用价值^[4]。

基于此, 本文以面向室内高精度定位的 UWB 定位终端为研究对象, 结合其硬件组成和典型工作场景, 分析当前终端电路在测距一致性、时钟同步、功耗控制与抗干扰能力等方面存在的不足, 并围绕关键功能模块提出优化设计思路, 以期对相关系统的设计与应用提供参考。

一、面向室内高精度定位的 UWB 定位终端硬件电路现状分析

(一) 硬件电路构成单元解析

UWB 定位终端通常由主控单元、UWB 收发单元、参考时钟单元、天线与匹配网络、电源管理单元、状态采集与辅助接口单元以及防护电路单元构成^[5]。主控单元主要负责终端工作流程管理、测距任务调度、数据缓存、状态控制和外设接口管理; UWB 收发单元承担脉冲信号发射、接收与时间信息提取等核心功能, 是实现高精度测距的关键部分; 参考时钟单元则为收发链路和主控逻辑提供稳定时基, 其稳定性直接影响时间戳质量。与此同时, 天线及其匹配网络决定了能量辐射效率和链路一致性, 电源管理单元则负责将电池或外部输入转换为各功能模块所需的稳定供电, 保障终端在不同工作模式下可靠运行。

对于室内定位系统而言, 终端既可以作为移动标签使用, 也可以作为固定基站节点使用, 两类终端在设计重点上存在差异。移动标签更强调体积、续航和便携性, 要求硬件结构紧凑且平均功耗较低; 固定基站则更强调长时间连续运行能力、时钟同步支撑能力以及与上位设备之间的稳定连接能力。因此, 同一类 UWB 技术在不同终端角色中的电路设计侧重点并不完全一致, 必须结合实际应用场景进行结构划分和方案选取。

(二) 测距精度波动与射频链路一致性不足

在高精度室内定位中, 测距结果的稳定性是影响最终定位质量的核心因素之一。UWB 虽然具备较强的时间分辨优势, 但终端在复杂室内环境中仍容易出现测距波动偏大的问题。产生这一现象的原因, 一方面来自环境中的遮挡、多径和反射, 另一方面则与终端自身硬件链路一致性密切相关。例如, 不同批次终端若在天线参数、匹配网络、前端损耗和布局结构上存在差异, 就可能导致收发性能不一致, 从而引起测距偏差累积^[6]。

此外, 若射频区与数字控制区未进行有效隔离, 主控开关噪声和高速接口跳变会通过供电或布线耦合至射频链路, 使接收波形质量下降, 进而影响时间信息提取的准确性。对于室内高精度定位系统而言, 这类问题往往不会表现为完全失效, 而是体现为测距结果离散度变大、定位点不稳定、轨迹漂移明显等现象, 因而更具隐蔽性。

(三) 参考时钟稳定性不足制约定位精度提升

UWB 定位终端对时间基准质量高度敏感。无论是基于双向测距的工作方式, 还是基于时间差的定位方式, 终端内部参考时钟的精度、抖动和温漂都会影响时间信息的一致性。当终端在连续运行过程中受到温度变化、供电波动或外部噪声影响时, 时钟稳定度下降, 容易引起测距结果漂移, 严重时还会影响多节点协同定位效果^[7]。

在实际工程中, 部分终端设计中对时钟单元的重视程度不足, 仅将其视为常规基础电路, 而没有从定位精度需求出发进行专门优化。例如, 时钟器件选型偏重成本控制, 去耦和布局不够合理, 时钟信号线靠近高干扰区域, 都会降低时基质量。对高精度室内定位系统而言, 这类问题会成为制约系统精度上限的重要因素。

(四) 功耗控制与长期稳定运行能力有待增强

室内定位终端通常需要长时间持续工作, 尤其是移动标签类设备, 多依赖电池供电, 要求具备较强的低功耗运行能力^[8]。然而在实际设计中, 一些终端存在休眠控制不细、外设上电时序不合理、发射峰值电流应对能力不足等问题, 导致系统平均功耗偏高, 续航能力受限。与此同时, 若电源管理设计缺乏分域控制和动态调度, 不仅会增加能耗, 还可能由于电压瞬态波动影响收发链路稳定性。

另外, 室内应用环境中常伴随设备集中布设、频繁启停以及电磁环境变化等问题, 终端需要具备较好的抗扰能力和长期运行稳定性。若防护设计、接地设计和接口隔离措施不足, 系统在长时间运行后容易出现异常复位、通信不稳或状态漂移等问题, 影响定位系统的整体可用性。

二、面向室内高精度定位的 UWB 定位终端硬件电路优化设计

(一) 面向状态可感知的信号采集与辅助监测电路优化设计

虽然 UWB 定位终端的核心功能在于高精度测距, 但仅依赖收发链路本身并不足以支撑高可靠工程应用。为了提高系统可诊断性和运行稳定性, 终端应建立必要的状态采集与辅助监测机制。具体而言, 可将电池电压、关键电源轨电平、芯片温度、接口工作状态等信息纳入基础监测范围, 并通过主控单元周期采集与分析, 为运行策略调整提供依据。

在电路设计上, 状态采集部分应尽量与高频射频链路隔离布设, 防止低速采样电路引入额外噪声。对电源电压检测电路, 可采用高阻分压与缓冲输入相结合的方式, 在降低静态功耗的同时保证采样稳定性; 对温度监测和异常状态判断, 可利用片上资源与简单外围电路配合实现, 避免过度增加系统复杂度。若系统引入惯性器件用于辅助唤醒或运动判断, 则应单独规划其供电和接口滤波路径, 以减少数字总线对主定位链路的干扰。

该类优化的意义不在于提升单次测距极限指标, 而在于为终端运行状态建立可感知基础, 从而使系统能够根据环境变化和设备状态动态调整工作模式, 减少无效测距和异常工作带来的性能波动。

(二) UWB 射频前端与天线匹配电路的可靠性设计

射频前端是 UWB 定位终端最关键的硬件部分之一, 其设计质量直接影响信号收发效率和终端间一致性。为了提升系统在室

内复杂环境中的测距可靠性，首先应从天线与匹配网络入手进行优化。天线应结合终端安装方式、外壳结构和使用姿态进行选型，尽量保证在目标工作频段内具备较好的辐射稳定性；匹配网络则需围绕终端实际布局进行调整，避免仅依赖理论参数配置而忽视整机装配后的性能变化^[9]。

在布局布线方面，射频区应与数字处理区、电源转换区保持合理间隔，减少开关噪声和时钟干扰对接收端的影响。高频信号走线应尽量短直，减少不必要的过孔与拐角，保持特性阻抗连续；对于外接天线结构，还应在连接端附近配置适当的防护器件和地回路路径，防止静电和瞬态冲击对前端造成破坏。若工程环境对接收灵敏度有更高要求，可适当引入低噪声前端支撑，但必须兼顾增益、线性和系统稳定性，避免因前端过度放大而引入新的失真问题。

通过对射频前端与天线匹配网络的系统优化，可提升终端之间的收发一致性，减小部署后性能离散，从而为高精度定位提供更稳定的硬件基础。

（三）参考时钟与同步支撑电路的稳定化设计

高精度定位终端对时间基准具有较高依赖性，因此参考时钟与同步支撑电路必须作为重点优化对象。首先，在器件选择上，应优先考虑稳定度较高、抖动较小的时钟器件，并结合终端应用环境考虑温漂性能。对于需要长期连续工作的固定节点，时钟单元更应注重持续稳定性和环境适应性，而不是单纯关注初始成本。

其次，在电源与布局设计层面，应为时钟相关电路提供相对纯净的供电路径，避免与高频开关电源或大电流发射支路共用噪声较大的电源回路。时钟去耦电容应靠近器件布置，时钟走线应尽量短且远离高扰动区域，必要时可通过分区布局与接地围栏等方式减轻耦合影响。对于多节点定位系统，固定基站侧还应预留必要的同步支撑接口，为后续系统扩展和同步机制优化提供条件。

在工程实现中，很多定位误差并非由明显故障造成，而是来源于时钟质量不足引起的缓慢漂移和一致性下降。因此，强化参考时钟与同步支撑电路的设计，不仅有助于提高单节点测距稳定性，也有利于提升多节点协同定位系统的整体精度与长期可靠性。

（四）电源管理与低功耗控制电路的协同化设计

为了兼顾室内定位终端的续航能力与稳定运行需求，电源管理电路应采用分层分域设计思路。对主控数字处理部分，可优先采用效率较高的供电方案，以降低系统平均功耗；对射频前端、时钟单元以及对噪声敏感的辅助模拟电路，则应采用更稳定的供电支路，必要时通过局部滤波和隔离措施抑制噪声传播。通过这种方式，可在效率与稳定性之间实现相对平衡。

在低功耗控制方面，终端应根据不同工作场景建立“唤醒—测距—处理—休眠”的闭环运行机制。对于移动标签，可根据运动状态、定位需求和上报频率动态调整工作节奏，避免长时间维持高活跃状态；对于固定节点，则可围绕持续工作需求优化待机功耗和峰值供电能力。为了防止发射瞬态引起供电跌落，还应在关键芯片附近合理配置去耦电容，并优化供电回路长度和回流路径，保证在高负载切换时系统不出现异常复位或波形畸变。

此外，电源管理不应仅停留在供电转换层面，还应与主控策略相结合，通过软件控制硬件开关实现外设按需上电、分阶段初始化和异常状态恢复，从而提升终端整体能效水平和可靠性。

（五）主控接口协同与抗干扰防护电路的系统化设计

UWB 定位终端中的主控单元承担着任务调度和外设管理功能，其与收发芯片之间的接口稳定性直接影响系统运行效果。为了提高整体协同性，主控与 UWB 单元之间的通信应尽量采用中断驱动或事件触发方式，减少低效轮询造成的功耗增加和时序冗余。接口布线应控制长度，必要时通过串联阻尼和合理端接抑制边沿振荡，提升数据传输稳定性。对于调试口、升级口等外部接口，则应做好静电防护和必要隔离，避免外部接入动作影响系统正常工作^[10]。

在抗干扰设计方面，应从系统层面统一规划射频区、数字区和电源区的布局关系，减少不同功能模块之间的串扰。关键信号回路应优先保证回流完整，避免跨分割面布线引起附加辐射和干扰；对终端外壳、连接器和裸露接口，则应结合应用环境增加静电泄放与保护路径。对于需要在设备密集环境中运行的室内定位终端，还应兼顾长期部署条件下的防尘、防潮和结构稳定性设计，以降低环境因素对电子性能的持续影响。

从工程实践看，很多定位系统的问题并不来自核心芯片性能不足，而是出现在接口时序、接地回路、防护措施和布线细节等环节。因此，将主控接口协同与抗干扰防护纳入统一设计框架，是提升 UWB 定位终端工程可用性的重要途径。

三、结语

本文围绕面向室内高精度定位的 UWB 定位终端硬件电路展开研究，在分析其硬件构成及典型问题的基础上，指出现有终端在射频链路一致性、参考时钟稳定性、功耗控制以及长期可靠性等方面仍存在不足。针对上述问题，本文从状态采集与辅助监测、射频前端与天线匹配、时钟与同步支撑、电源管理与低功耗控制、主控接口协同以及抗干扰防护等方面提出了系统化优化设计思路。整体来看，UWB 定位终端性能提升不应仅依赖上层算法优化，更需要从底层硬件结构出发建立稳定、低噪、协同和可维护的工程实现路径。该研究可为室内高精度定位终端的设计优化与工程应用提供参考。

参考文献

- [1] 杨奎河，胡新红. 室内定位技术研究综述 [J]. 信息通信, 2018, 31(8): 106-109.
- [2] 张胜利，焦诚，付永恒. 室内定位方法和技术综述 [J]. 数字技术与应用, 2018, 36(10): 73-74, 76.
- [3] 王远来，吕嘉妮，李佳豪，杨会. 基于 UWB 的高精度室内定位系统 [J]. 长江信息通信, 2021, 34(3): 111-114, 117.
- [4] 陈献，王贵鑫. 室内定位技术发展及应用研究 [J]. 科学技术创新, 2019(17): 83-85.
- [5] 张子明，王从庆. 基于超宽带技术的室内定位系统应用开发 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21(4): 76-80.
- [6] 郝晴晴. 基于 UWB 的超高精度室内定位系统 [J]. 无线互联科技, 2021, 18(16): 120-122.
- [7] 刘子恒，焦良葆，孙宏伟，袁枫，路绳方. 基于洪泛机制准同步的 UWB 定位效率优化研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(2): 207-214.
- [8] 王喆，周畅，刁攀. 基于 UWB 的可穿戴式人员定位设备设计与研究 [J]. 科学技术创新, 2021(11): 181-183.
- [9] 曹露露，张朝旭，于欣怡，吴松芮，谢印忠. 基于 UWB 室内定位系统应用与研究 [J]. 工业控制计算机, 2022(1): 72-74.
- [10] 赵俊蕾，李勇，刘海峰，王文轩. 基于 UWB 定位技术的变电站安全监控系统设计 [J]. 电气自动化, 2021, 43(2): 13-15.