

室内人员定位与生理信息监测系统研究

苗健¹, 李锋¹, 赵建军¹, 吴文谊¹, 杜国莉¹, 彭艳芳²

(1. 中国人民解放军军事科学院 国防工程研究院, 北京 100036;

2. 湖南天通防务科技有限公司, 长沙 410006)

摘要: 为满足对室内高精度定位与人员生理信息进行实时监测的需求, 提出一种基于超宽带 (UWB)、蓝牙低功耗 (BLE) 和射频分布技术的融合定位系统; 采用 UWB 实现高精度定位, 结合 BLE 进行信号补偿, 通过射频分布技术扩大覆盖范围, 解决复杂环境中的信号遮挡与精度下降问题; 经测试, 系统在无遮挡环境下定位精度优于 5 厘米, 遮挡环境下通过多技术融合保持 30 厘米精度; 生理监测模块实现心率、血氧浓度及汗液参数采集, 误差小于 10%; 参考工业生产、密闭空间等典型应用场景, 设计了适用性及性能对比实验, 证明系统设计的合理性和应用价值。

关键词: 室内定位; 生理信息监测; 超宽带; 低功耗蓝牙; 射频分布

Research on Indoor Personnel Positioning and Physiological Information Monitoring System

MIAO Jian¹, LI Feng¹, ZHAO Jianjun¹, WU Wenyi¹, DU Guoli¹, PENG Yanfang²

(1. Academy of Military Science, National Defense Engineering Academy of the People's Liberation Army Department, Beijing 100036, China; 2. Hunan Tiantong Defence Technology Co., Ltd., Changsha 410006, China)

Abstract: To meet the demands for real-time monitoring of indoor high-precision positioning and personnel physiological information, a fusion positioning system based on ultra-wideband (UWB), Bluetooth low energy (BLE), and radio frequency (RF) distribution technology is proposed. The UWB is used to achieve high-precision positioning, combined with the BLE for signal compensation, and a RF distribution technology is employed to expand coverage, effectively addressing issues such as signal occlusion and accuracy degradation in complex environments. Testing results show that the system achieves the positioning accuracy of over 10 cm in unobstructed scenarios, while maintaining an accuracy of 30 cm in obstructed environments through multi-technology fusion. The physiological monitoring module enables the functions of heart rate, blood oxygen saturation, and sweat-related parameter collection, with measurement errors below 10%. With reference to typical applications such as industrial production and confined space operations, it is possible to make adaptive and comparative experiments in designed scenarios, demonstrating that the system design is reasonable and has a practical application value.

Keywords: indoor positioning; UWB; BLE; RF distribution

0 引言

随着物联网和智能制造技术的迅速发展, 室内定位技术在许多工业领域中变得至关重要^[1-3]。特别是在封闭空间、工业生产车间以及智能仓储等复杂环境中, 精确定位人员、设备和车辆不仅关系到工作效率, 还涉及到安全管理和应急响应能力^[4-6]。这些场景往往伴随着复杂的物理结构、遮挡严重、环境闭塞等问题, 传统的定位技术 (如 Wi-Fi、蓝牙) 难以提供足够的精度和信

号稳定性^[7-9]。此外, 在这些高风险工作场景中, 实时监测人员的生理状态, 预防疲劳、突发健康问题或安全事故, 也成为提高工作安全性的重要需求^[10]。例如: 2024 年某化工企业干馏生产线发生氮气泄漏, 事故责任人在未检测气体浓度情况直接指挥工人进入高氮气环境维修, 工人因缺氧窒息失能后, 多位同事未佩戴防护装备即盲目爬入人孔施救并酿成多人伤亡的重大安全事故; 若现场工人配备血氧饱和度与心率监测装置, 可在工人血氧骤降时触发警报, 阻止进入并避免盲目施救。

收稿日期: 2025-04-08; 修回日期: 2025-09-28。

作者简介: 苗健 (1979-), 男, 硕士, 高级工程师。

通讯作者: 吴文谊 (1978-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 苗健, 李锋, 赵建军, 等. 室内人员定位与生理信息监测系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(7): 20-26.

在另一案例中,某造船厂进行舱室改造时工人中暑并落入舱室内部,进而因信号失联造成亡故。若通过穿戴设备监测疲劳指数(如体温、心率变异性)以及工人位置,可及时预警、暂停作业并快速抵达现场进行救援。因此,如何在这些复杂环境中实现高精度定位与生理信息监测的融合技术,成为亟待解决的技术难题。

本文提出一种基于UWB、BLE及射频分布等多种无线通信手段融合的定位技术,旨在实现大空间和通道区域的高精度定位,同时克服复杂环境中的信号遮挡和传输问题。超宽带(UWB, ultra-wideband)^[11]技术凭借其厘米级的高精度定位能力,已成为现代定位系统的重要选择。该技术通过测量信号飞行时间(TOF)实现精确测距,利用纳秒级超窄脉冲特性,在复杂环境中也能保持稳定性能。此外,UWB具有出色的抗干扰能力、良好的穿透性能(可穿透非金属材料)以及亚毫秒级响应速度,使其在自动跟随、工业自动化、无人驾驶、医疗健康和物流管理等领域得到广泛应用。相比传统定位技术,UWB的定位精度比蓝牙高50倍以上,比Wi-Fi高20倍以上,定位精度较好,在视距条件下可实现分米级定位,为各类高精度定位需求提供了可靠解决方案,但其性能容易受到大型物体遮挡的影响;研究通过引入蓝牙低功耗(BLE, bluetooth low energy^[12])和射频分布技术^[13]与UWB技术相结合,优化了狭小空间、密闭空间以及遮挡严重区域的定位效果和数据回传功能。射频分布系统通过天线和射频馈线,将无线信号有效分布到复杂的环境中,显著提升了系统的覆盖范围和信号稳定性。BLE定位技术是基于低功耗蓝牙的无线定位方案,广泛应用于室内场景。其核心原理通过测量信号强度(RSSI)或利用蓝牙5.1引入的到达角(AOA)和出发角(AOD)技术,结合指纹库匹配或几何算法,实现分米级至米级高精度定位。这类定位技术具有低功耗、低成本、易部署等优势,尤其适合人员追踪、资产管理和室内导航等场景。例如,医院可通过BLE标签实时定位医疗设备和患者,商场可利用iBeacon信标提供导航服务。相较于UWB定位技术来讲,BLE定位传输距离较好(典型范围10~100 m),但存在复杂环境中信号干扰等问题,通过多锚点部署、信号增强算法(如滤波处理)及融合UWB等技术可有效提高其定位稳定性。随着AOA/AOD技术的普及,BLE定位精度已显著优化,成为工业物联网、智慧物流等领域的重要支撑技术。综合UWB/BLE等不同定位信号通讯制式,融合形成的射频分布定位技术是一种基于多节点协同的无线定位方案,通过部署多个射频信号收发设备(如读写器、标签或基站),结合信号强度(RSSI)、相位差、时间飞行(TOF)等参数,实现对目标位置的高精度追踪。其核心原理是利用分布式节点间的

信号交互与数据融合,构建动态定位模型。

除了各类定位原理、功能之外,系统还集成了生理信息采集模块,能够实时监测人员的心率、血氧浓度和皮电等生理参数。这一功能使得系统不仅能够进行精确的人员定位,还可以为人员的健康状态提供实时反馈,尤其适用于需要高强度工作的工业场景和密闭空间环境。通过这一综合技术架构,系统在实现高精度定位的同时,大幅降低了复杂环境中的定位盲区,并有效提升了数据传输的稳定性。本研究将详细介绍该系统的设计方案、核心技术及实际测试结果,展示其在复杂工业环境中的应用潜力。

1 总体方案设计

本研究提出建设基于UWB+BLE+射频融合、生命体征+位置+环境数据综合分析技术的室内定位与人员生理信息监测系统,旨在解决人员定位和生理检测等问题,提供全面的室内环境监控能力。系统中的主基站是一种核心设备,负责实现组网通信、无线网络射频覆盖以及内部通信定位数据的交换功能,确保系统内部数据的高效传输。同时,主基站还为射频网络中的蓝牙(BLE)信标提供稳定电力供应,支持其持续运行。系统中的从基站则利用UWB定位技术来实现对人员定位标签和车辆定位标签的精确定位功能,提供厘米级的位置精度。结合系统中的射频分布网络,从基站提供宽窄带融合通信的射频信号覆盖,确保信号在复杂室内环境中的稳定传播。宽带通信专门用于支持音视频通信及智能终端设备的高带宽接入,而窄带通信则用于可穿戴设备等物联网低功耗终端设备的低功耗接入,满足不同类型设备的连接需求。吸顶天线内置了蓝牙(BLE)信标,与从基站的定位技术共同实现融合定位,有效提升系统的定位准确性和覆盖范围。这种集成设计显著降低了建设部署工程的复杂程度和成本,实现了无线组网、设备供电和射频信号覆盖的有机融合,同时大幅提高系统的可维护能力和整体可靠性。

一套基本室内定位与生理信息监测系统组成有定位基站模块2套(主基站1套(1个),从基站1套(5个));人员定位标签5个;车辆和设备定位标签5个;人员生理信息采集模块5个;其他功分器、吸顶天线数量根据现场环境、区域布置确定。系统组成如图1所示。

超宽带(UWB)定位的常见工作原理如图2左侧所示,它通过测量空中定位信号的飞行时间进行测距,即计算信号从UWB标签传输到UWB基站的时间差来确定距离,并基于多基站三角测量实现精确位置定位。然而,在这种传统模式下,如果空中路径被障碍物如墙壁、家具或人体遮挡,会显著干扰信号传播,导致测距误差和定位失效。尽管UWB技术理论上支持标签与基

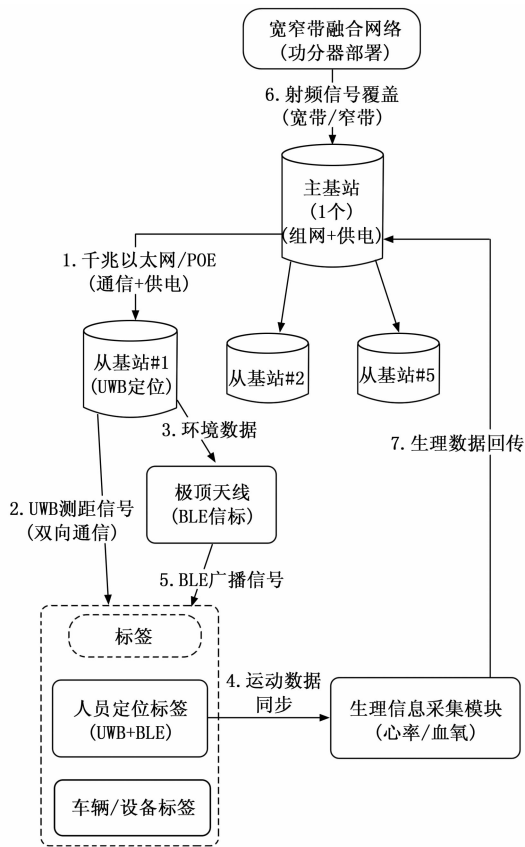


图 1 系统组成

站间最远 300 米的通信距离，但在实际工程部署中，UWB 定位基站的间距往往被控制在 50 至 100 米左右，远低于理论最大值。这是因为随着距离增大，信号被遮挡的概率急剧上升，例如在室内环境中，长距离传输更容易遭遇多径效应或完全阻断，从而影响定位可靠性。

图 2 右侧展示了改进方案，采用射频拉远技术将 UWB 基站的射频输出通过射频电缆连接到远程天线。由于电磁波在电缆中和空中的传播速度相同，约为光速，且射频电缆的长度是固定且预先校准的，因此同样能通过测量信号飞行时间实现准确的测距与定位。这种设计的核心优势在于，它无需额外增加 UWB 基站数量，而是构建一个射频分布网络，部署多个天线节点。这些天线将被定位区域分割为多个细分的蜂窝单元，每个单元覆盖范围较小，从而有效降低信号因长距离传输而被遮挡的概率增大现象，例如在复杂建筑结构中，缩短传输距离减少了障碍物干扰的几率。射频分布网络中多个天线的存在意味着有多种电缆路径连接到同一基站。为了区分这些路径，在每个天线处集成蓝牙信标模块，发射唯一的 ID 标识信号；同时，在 UWB 标签中增加蓝牙识别模块。通过捕获蓝牙信标的 ID 信息，系统可以识别具体的电缆路径，结合 UWB 测距数据，实现更精准的位置判别，避免路径混淆问题。

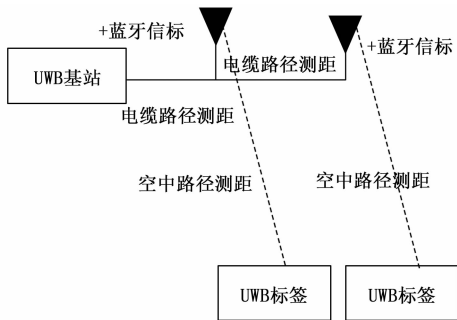


图 2 系统原理图

2 综合监测系统硬件设计

系统硬件主要包括定位基站、人员定位标签、车辆和设备定位标签、生理信息采集模块，以及射频分布设备等关键部件。

2.1 定位基站

系统使用两类基站：主基站和从基站。主基站负责整个系统的无线通信信号覆盖与数据传输，支持 UWB 和 BLE 信号混合传输，支持融合定位。通过射频分布网络（由射频线缆、耦合器、功分器、吸顶天线等组成），主基站能够将信号覆盖到大空间和通道区域，保证良好的通信质量。图 3 为主基站原理框图。

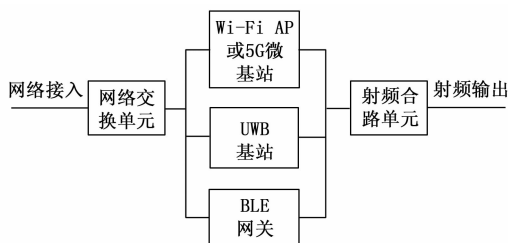


图 3 主基站原理框图

从基站采用常用的 UWB 及蓝牙定位模式，负责人员、车辆和设备的具体定位功能，采用 UWB 技术提供分米级精度的定位。为了提高复杂密闭空间内的信号覆盖能力，从基站也配备了 BLE 信标，实现对狭小房间和遮挡区域的有效定位。从基站的接口说明列于表 1。

表 1 从基站接口及作用

编号	名称	作用
1	WIFI 接口	外接 2.4 G 天线
2	通信接口	外接 2.4 G 天线
3	定位接口	外接 UWB 天线
4	电源 & 网口	连接 12 V DC 电源线接口和网口线
5	光纤接口	连接光纤跳线

2.2 人员定位标签

定位标签采用 UWB 和 BLE 双重技术，能够实时定位人员、车辆和设备的具体位置，并支持轨迹回放、区域管理、欠电告警等功能。标签外形设计为胸牌式或

悬挂式,便于佩戴和安装。人员定位标签内包含 UWB 和 BLE 两个模块,模块之间通过串口通信,天线分立,在 UWB 基站测距模式下,UWB 标签将自身的 ID 经 BLE 模块绑定上传,在 UWB 标签测距模式下,UWB 标签将测距结果与自身的 ID 经 BLE 模块绑定上传。通过两种技术的结合,一方面实现了利用 UWB 定位技术高精度特性,在信号良好区域内能够实现快速精确定位;另一方面可在受到信号遮蔽区域,依靠 BLE 技术的信号广播能力实现弱无线电信号环境下的概略方位定位,有利于在各类复杂条件下实现对人员或高价值物品的迅速定向。本研究就此对各类遮蔽环境下的定位精度进行了对比,实验结果在第 4.2 节中进行了描述。

2.3 人员生理信息采集模块

疲劳是一种复杂的生理和心理现象,实际中,对疲劳的定义和检测通常是依照受试者的行为能力、作业绩效等^[14];疲劳通常是指由于长时间的工作而导致行为能力的明显衰退,作业绩效降低,时常还表现出疲倦感等相应主观症状的一种规律性的生理现象。在密闭空间场景下,氧气/二氧化碳含量、负离子、灯光亮度/色温、环境噪音等多种非日常场景的环境因素均会不同程度的影响人的生理机能参数;同样,在不同位置上长时间工作或休息可能会导致办公室疲劳和宿舍疲劳,主要表现在人的感觉器官功能降低,感知能力下降,甚至导致心理抑郁^[15]。因此,把生命体征、位置信息和环境数据综合起来分析,对解决人员的疲劳症状会更有效准确。皮电(EDA, electrodermal activity)^[16-17]是反映仅受交感神经(自主神经分支)支配的汗腺分泌的活性程度。引起其变化的主要因素是皮肤的电阻,而皮肤电阻受很多因素的影响,其中影响最大也最有意义的是汗腺的分泌。汗腺的分泌受交感神经的控制,当交感神经兴奋性异常时,汗腺分泌发生改变,导致皮肤的电阻增大或减小,皮电的相关参数随即发生相应变化。同时,当交感神经兴奋性异常时,情绪紧张或抑郁,从而导致疲劳的提前出现。交感神经的异常从整体上看导致了疲劳的出现,从局部上看,导致了皮电的变化^[18],二者在某种程度上具有很大的相关性,所以,用皮电这个客观指标来评定疲劳这种主观症状,开辟了一条综合评定疲劳的新途径。皮电的影响因素很多,皮肤温度、皮肤汗液、性别、年龄、测量部位等都会影响皮电的参数。但在疲劳评定这方面,只把皮肤汗液作为处理因素,对于其他影响因素,尽量将其设定在各自对皮电反应较敏感范围内。生理信息采集模块集成了心率、血氧浓度、汗液监测功能,采用 BLE 通信技术与定位基站同步传输生理数据。模块设计为腕戴型,支持长时间佩戴与连续监测。该模块还具备 SOS 紧急求救功能,在紧急情况下可通过长按触发告警,系统会实时接收到人员的位置

信息与生理状态。

2.4 射频分布系统

射频分布系统在复杂环境中起到关键作用,特别是在全金属结构或密闭空间等无线信号难以穿透的区域^[19-20]。结合射频分布系统工作特性,该系统设计采用射频馈线技术,将信号从主基站高效传输到天线,确保信号在整个覆盖区域内的均匀分布和长距离稳定传输,从而保障了高精度的定位性能和可靠的数据回传稳定性。本系统的创新性设计架构巧妙地将主基站的传输功能与定位功能解耦,主基站专注于信号的传输任务,而定位功能则由定位终端与 BLE 信标协同完成,通过精确的信号处理和交互实现定位计算,无线通信信号和定位信号在主基站内部通过分频段处理进行混合,利用频分复用技术整合后接入到射频分布系统,实现了在同一射频分布系统内两种不同通信体制的共网复用传输。这种设计实现了系统组网、设备供电和无线信号覆盖的高度集成,显著减少了所需基站的数量、工程实施的复杂性以及整体系统成本,同时大幅提升了系统的可靠性和可维护性。通过射频分布系统,定位终端与基站之间形成了一跳星型组网结构,极大简化了网络拓扑,避免了多跳路由的延迟和故障点,降低了无线组网的开销,优化了接入与传输的效率和速度,进一步增强系统的可靠性。此外,基站的每路射频端口均配备了独立的定位模块,有效实现了负载的均衡分布,确保在高并发场景下系统响应迅速,从而显著提升基站的终端接入能力和整体系统性能。

3 软件架构设计

室内外定位平台是集合信息展板、数据分析和定位地点的交互工具,平台支持监控、热图、回放、电子围栏、数据分析、告警、设备管理等功能,可整合和分析项目数据,便于项目的整体管理与监测。系统软件平台包括上位机监控平台、数据库、历史轨迹查询算法、电子围栏管理算法、生理信息显示与查询算法等。

3.1 上位机监控平台

上位机是工业自动化、智能制造等领域中与下位机(如 PLC、单片机、传感器等)进行通信和控制的计算机系统。它的核心作用是通过软件和硬件协同,实现对工业设备的监控、数据采集、参数调整和远程控制。上位机监控平台通过与基站和定位标签的数据交互,实现对人员、车辆、设备的实时监控。平台具备用户管理、设备管理(标签管理,基站管理)、告警管理等功能,支持用户对系统的全面控制与监测。

3.2 软件实现流程

历史轨迹查询算法支持对特定时间段内的人员或设备轨迹进行回放,便于分析其移动路径及停留区域,其

流程如图 4 所示。电子围栏管理算法则允许高级用户(管理员)设置特定区域的虚拟边界,一旦人员或设备越界,系统会自动触发告警。图 5 为围栏管理算法流程。

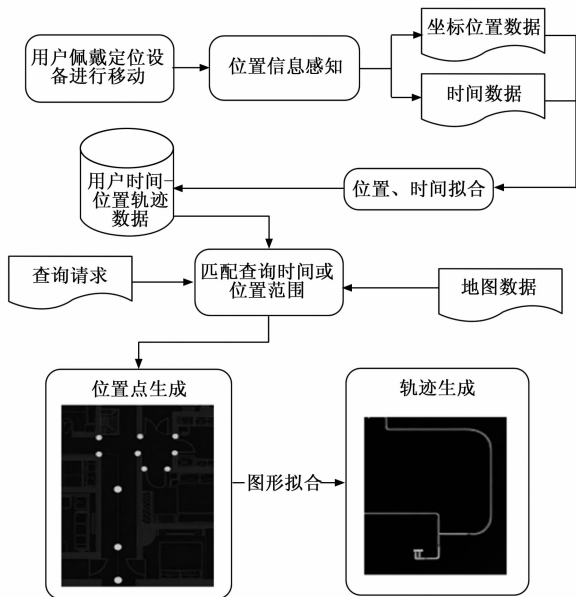


图 4 历史轨迹功能流程

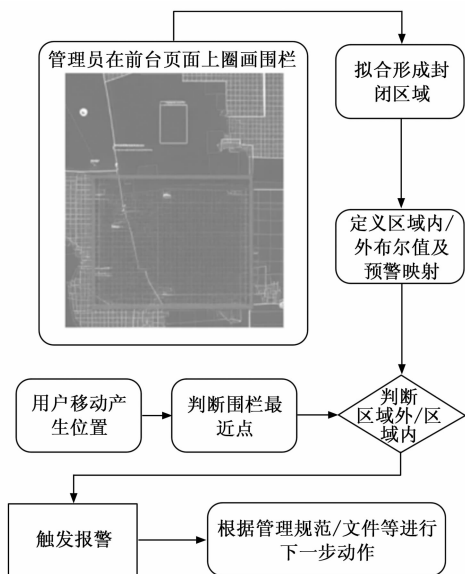


图 5 围栏管理算法流程

3.3 数据库与生理信息查询

系统的数据库从软件及数据层面存储所有的定位信息、轨迹数据以及生理监测数据,确保数据的完整性和可追溯性,并支持用户对历史数据的便捷回顾与精准查询,包括按时间范围或特定事件筛选功能。同时,生理信息查询算法能够实时显示心率、血氧浓度等多项生理参数,通过直观的界面呈现,并自动生成详细且结构化的健康报告,这些报告为安全管理风险评估和健康评估的综合分析提供可靠依据。

4 实验结果与分析

研究通过系列实验对系统的定位精度、信号覆盖范围以及生理信息监测功能进行了全面验证。实验主要分为 3 个部分:定位精度测试、有效覆盖范围测试以及生理信息采集测试。

4.1 系统实现的核心技术参数

4.1.1 定位技术参数

表 2 定位技术参数

指标	技术规格
定位技术	UWB+BLE 双模协同定位
无遮挡定位精度	≤ 5 cm(符合 UWB 标准 ≤ 10 cm)
部分遮挡定位精度	≤ 12 cm(复杂室内环境适用)
完全遮挡定位精度	≤ 1 m(BLE 补偿 UWB 信号衰减)
最大覆盖距离	50 m(无障碍大空间)
复杂环境覆盖距离	10 m(混凝土/金属结构狭小空间)
信号穿透能力	支持玻璃、混凝土及金属结构(衰减可控)

4.1.2 生理信息监测参数

表 3 生理信息监测参数

指标	技术规格
监测参数	心率、血氧浓度、体表汗液趋势
心率监测误差	1.2%~10%(运动状态适应性高)
血氧监测误差	0%~1.2%(接近医疗级精度)
汗液监测能力	实时反映体表汗液动态变化
响应延迟	<1 秒(实时传输)

4.2 实际应用测试与性能分析

4.2.1 定位精度验证实验

测试方法:实验在 3 种典型环境(无遮挡、部分遮挡、完全遮挡)下进行。于各环境中分别设置 10 米、20 米、30 米距离的基准点,并使用高精度测量仪器标定其真实三维坐标。测试过程中,部署的 UWB+BLE 双模定位标签持续实时采集位置数据,并通过无线网络上传至监控上位机进行记录与分析。部分遮挡环境的构建采用多种常见建筑及装饰材料模拟现实障碍,具体包括:5 mm 厚透明玻璃幕墙(模拟大型窗户或隔断)、12 mm 厚实木板材(模拟家具或轻质隔墙)、以及带有标准门窗结构的实体砖墙(厚度 240 mm)。完全遮挡环境则使用 8 mm 厚均质钢板形成封闭空间,以模拟对无线电信号具有强屏蔽作用的场景(如金属设备间、电梯井等)。不同遮挡条件对定位信号强度、稳定性及最终定位精度的影响详见表 4 数据。

为系统评估本研究所提多模融合定位方案的性能优势,在表 5 中不仅记录了融合方案的定位精度验证结果,还特别设计了对比实验:在保持基站布局、天线高度及环境参数严格一致的条件下,通过软件配置选择性屏蔽标签终端的特定通讯模块,分别独立测试纯 BLE 定位方案和纯 UWB 定位方案在相同场景下的性能表现。

表 4 定位精度受遮挡影响对比

遮挡环境	误差影响	信号衰减
5 mm 玻璃幕墙	无明显衰减, 精度无损失	衰减轻微, 精度略有下降
12 mm 木板	无明显衰减, 精度无损失	衰减轻微, 精度略有下降
24 cm 砖墙 + 门窗	精度出现降低, 定位和实际差距 10~50 cm 左右	单堵砖墙衰减 30~45 dB, 门窗处衰减 15~20 dB
8 mm 钢板	围蔽区域外无线信号完全阻断, 定位精度降低到米级	围蔽区域外无线信号完全阻断

对比结果同步汇总于表 5。综合验证实验表明：多模融合技术从功能层面确保了全场景（尤其是复杂遮挡场景）下的定位可用性，且在遮挡条件下仍能维持可控的定位精度；从性能指标来看，在部分遮挡环境下，系统可自动调用 UWB 模式提供厘米级（≤20 cm）高精度定位，满足室内导航、资产追踪等对精度要求严苛的应用需求；在信号穿透难度大的完全遮挡环境（如钢板房内），系统可无缝切换至 BLE 模式，利用其强绕射特性实现亚米级（<1 m）的可靠定位。相较于单一依赖 BLE（精度有限）或 UWB（覆盖易中断）的传统方案，本研究成功实现了 BLE 广域覆盖能力与 UWB 超高精度特性的优势互补与协同应用。

表 5 定位精度验证实验结果

测试环境	精度(<i>p</i>)、误差(<i>e</i>)验证		
	完整系统	单独 UWB	单独 BLE
无遮挡	$p \leq 10\text{ cm}$ $2 < e < 5(\text{cm})$	$p \leq 10\text{ cm}$ $2 < e < 5(\text{cm})$	$p \leq 0.8\text{ m}$ $0.2 < e < 0.5(\text{m})$
部分遮挡	$p \leq 20\text{ cm}$ $10 < e < 20(\text{cm})$	$p \leq 20\text{ cm}$ $5 < e < 12(\text{cm})$	$p \leq 0.8\text{ m}$ $0.2 < e < 0.5(\text{m})$
完全遮挡	$p \leq 1.0\text{ m}$ $0.5 < e < 1.0(\text{m})$	$p \leq 5\text{ m}$ $0.5 < e < 6.0(\text{m})$ 基本失去定位能力	$p \leq 1.0\text{ m}$ $0.5 < e < 1.0(\text{m})$

4.2.2 信号覆盖范围验证实验

测试场景：大空间（50 m×50 m）、狭小复杂空间（10 m×10 m）及金属/混凝土结构房间。

结论：在强干扰环境中仍维持基础覆盖，满足人员在封闭室内工厂、地下设施空间内作业等场景的信号检测、人员定向及定位需求。

4.2.3 生理信息监测精度实验

考虑室内人员定位主要面向工业行业场景应用，选取实验志愿者 10 名，年龄分布为 19~61 岁，其中男性 7 人，女性 3 人；健康状况均为良好。志愿者分静止/轻

表 6 性能对比

环境类型	最大覆盖距离	稳定性	技术优势
大空间无障碍	50 m	良好	超远距离稳定传输
大空间+玻璃遮挡	42 m	良好	抗轻度衰减能力突出
混凝土/金属房	10 m	中等-良好	射频优化保障复杂环境可用性

微运动/高强度运动三状态测试。系统测试结果与医疗器械进行对比，其中心率对比设备为乐普 ER2-S（医疗器械注册编号：粤械注准 20202071405），血氧对比设备为鱼跃 YX306（医疗器械注册编号：苏械注准 20172071070）。验证实验结果如表 7 所示。

表 7 生理信息精度验证结果

受试者 年龄/性别	心率误差范围(静止/轻微运动/高强度运动, 百分数)	血氧误差范围(静止/轻微运动/高强度运动)
19/男	1.4/4.7/8.2	0.1/0.1/1.1
21/男	1.3/3.9/7.6	0.0/0.1/1.0
23/男	1.3/4.2/9.1	0.0/0.1/1.0
27/女	1.2/3.3/7.5	0.0/0.1/1.0
32/男	1.3/4.6/7.1	0.0/0.1/1.0
39/女	0.9/3.8/6.5	0.0/0.1/1.2
40/男	1.2/3.9/7.5	0.0/0.1/1.1
46/女	1.0/4.0/7.6	0.0/0.1/1.0
53/男	1.2/3.7/7.1	0.0/0.1/1.1
61/男	1.1/3.9/6.5	0.0/0.1/1.0

结论：在设备全部元器件集成工作条件下，相比于医疗器械检测结果，经对比表明血氧监测误差≤1.2%，具备医疗级可靠性；心率监测在运动状态下误差可控（极端值 10%对应轻微运动）；汗液趋势实时追踪能力为体力劳动安全监控提供支持。

5 结束语

本研究开发的基于“UWB+BLE+射频分布”的室内定位与人员生理信息监测系统，成功实现了在复杂环境下的高精度定位和实时生理信息监测。通过实验验证，系统在无遮挡环境中的定位精度优于 5 厘米，并在遮挡环境下通过融合 BLE 技术和射频分布系统，显著提高了信号覆盖范围和数据回传能力。生理信息采集模块能够精准监测心率、血氧浓度和汗液等生命体征，表现出较高的可靠性和监测精度。本系统在工业生产、密闭空间等领域，具有广泛的应用前景，特别是在复杂和密闭空间内的人员定位和健康监控中，能够有效提升生产安全性和管理效率。未来的工作可以进一步优化系统的硬件设计，提升生理信息采集模块的续航能力，并探索更多传感器技术的集成，以实现更全面的空间内人员及关键设备管理。

参考文献：

[1] 利俊伟. 基于 UWB/INS 数据融合的抗遮挡室内定位方法[J]. 工业控制计算机, 2024, 37 (11): 19-20.

[2] HAYWARD S J, VAN LOPIK K, HINDE C, et al. A survey of indoor location technologies, techniques and applications in industry [J]. Internet of Things, 2022, 20: 100608.

[3] URADZINSKI M, GUO H, LIU X, et al. Advanced indoor

- positioning using zigbee wireless technology [J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 97: 6509–6518.
- [4] 张东宝. 钻锚机器人定位性能试验台设计与研究 [J]. *煤矿机械*, 2024, 45 (12): 7–9.
- [5] CHEN J, XU S, LIU K, et al. Intelligent transportation logistics optimal warehouse location method based on internet of things and blockchain technology [J]. *Sensors*, 2022, 22 (4): 1544.
- [6] 王伯君. 智慧矿山中无人驾驶技术发展趋势研究与总体设计 [J]. *煤炭科技*, 2024, 45 (5): 24–31.
- [7] PADOVANO A, FURGIUELE F, LONGO F. Emergency preparedness in industrial plants: an industry 4.0 driven training solution [Z]. 2019.
- [8] 周琳, 邓杰夫, 庄浩锦, 等. 基于人工智能的医学教育智慧课堂设计 [J]. *现代医院*, 2024, 24 (8): 1302–1305.
- [9] 荆有波, 邱昕, 郭瑞, 等. 一种宽窄带融合自组网通信装置及其控制方法 [P]. CN202211278976.6 [2024-08-26].
- [10] 徐一菲, 金龙哲, 魏祎璇, 等. 有限空间作业人员生理状态监测设备研制 [J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31 (3): 82–89.
- [11] 丁锐, 钱志鸿, 王雪, 等. 基于 TOA 和 DOA 联合估计的 UWB 定位方法 [J]. *电子与信息学报*, 2010, 32 (2): 313–317.
- [12] JUNHO H, KYUNGRYONG S. An indoor location-based control system using bluetooth beacons for IoT systems [J]. *Sensors*, 2017, 17 (12): 2917.
- [13] 李嘉杰, 梁礼嘉. 一种基于超高射频识别技术的展会人员定位法: CN201910966996.4 [P]. CN110795950A [2025-03-12].
- [14] SAMAREH-MOUSAVID S S, CHEN X, MCGUGAN M, et al. Monitoring fatigue delamination growth in a wind turbine blade using passive thermography and acoustic emission [J]. *Structural Health Monitoring*, 2024 (5): 23.
- [15] TURNER A P, HARTOONIAN N, SLOAN A P, et al. Improving fatigue and depression in individuals with multiple sclerosis using telephone-administered physical activity counseling [J]. *Journal of Consulting & Clinical Psychology*, 2016, 84 (4): 297–309.
- [16] QUINN T, VAHEDI Z, CAVUOTO L. Exploring physiological responses through electrodermal activity (EDA) for evaluating the impact of universal design features in a hotel environment [J]. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 2025, 1 (1): 1–11.
- [17] KOVACOVA V, MACEJOVA A, TONHAJZEROVA I, et al. Effect of acute ketamine treatment on sympathetic regulation indexed by electrodermal activity in adolescent major depression [J]. *Pharmaceuticals*, 2024, 17 (3): 15.
- [18] 汉纳·斯托尔姆. 评估或监测活体对象的皮肤交感神经活动的方法和装置 [P]. CN202180047665.6 [2025-03-12].
- [19] 宋伟坪, 马海军, 丁海斌, 等. 小基站射频分布系统应用研究 [J]. *广东通信技术*, 2023, 43 (10): 42–46.
- [20] HAZELL P, BARON S, GOUSIOU E, et al. Phase stability compliancy testing of a White Rabbit based solution for the LHC RF and timing distribution backbone upgrade [J]. *Journal of Instrumentation*, 2024, 19 (12): C12019.
- (上接第 19 页)
- [11] 佐明慧, 张翠恒, 聂品, 等. 纳秒激光辐照彩色 CCD 探测器损伤实验研究 [J]. *应用光学*, 2025, 46 (2): 451–457.
- [12] 李可, 储世伟, 顾杰斐, 等. 基于 IDACL 深度度量学习的零件表面缺陷检测 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2024, 52 (6): 32–38.
- [13] 王晓龙, 石海超, 熊江涛, 等. 基于自适应多尺度形态学梯度乘积运算的发电机振动信号特征增强检测 [J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45 (8): 3195–3205.
- [14] 卢奥煊, 季天瑶, 李梦诗, 等. 基于数学形态学和 Pearson 相关系数的风电变流器开路故障识别方法 [J]. *电工技术学报*, 2025, 40 (11): 3446–3459.
- [15] 张亚奇, 赵娅, 李盼池. 任意大小二值图像的量子描述及形态学处理方法 [J]. *量子电子学报*, 2025, 42 (1): 56–69.
- [16] 李政豪, 刁燕, 史生坤, 等. 基于形态学方法与边缘检测的原竹几何特征识别 [J]. *林产工业*, 2024, 61 (2): 18–23.
- [17] 平金珍, 温沁润. 基于电子图像处理技术的锂电池表面缺陷检测 [J]. *储能科学与技术*, 2025, 14 (6): 2512–2514.
- [18] 丁子天, 喜文飞, 钱堂慧, 等. 结合多特征的无人机雾天影像识别 [J]. *红外技术*, 2025, 47 (7): 833–841.
- [19] 郝博, 闫俊伟, 尹兴超, 等. 多特征联合的薄壁零件表面缺陷检测方法 [J]. *工具技术*, 2023, 57 (8): 147–152.
- [20] 刘子豪, 张佳欣, 薛峰, 等. 基于改进 YOLO-v8 的精密管件表面缺陷检测方法 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2025, 59 (7): 1514–1522.
- [21] 陈皓宇, 罗璟, 杨灏泉, 等. 优化装箱填充率的改进鲸鱼模拟退火算法 [J]. *科学技术与工程*, 2025, 25 (15): 6477–6485.
- [22] 尤国桥, 刘曼茜, 柯宜龙. 基于奇异值分解的径向基函数神经网络的改进算法研究 [J]. *计算数学*, 2024, 46 (4): 501–515.