



无源 RFID 感知技术综述:从身份识别到 普适智能的演进与展望

王 举,荆周钰,于宁平,牛晶娣,常俪琼

(西北大学 计算机学院[软件学院],陕西 西安 710127)

摘要 普适感知是实现万物互联的关键使能技术,而传统传感方式受限于成本、功耗与部署复杂度,难以成为万物互联这一愿景的感知基石。无源射频识别(RFID)感知技术凭借其免电池、低成本、微型化及原生 ID 等独特优势,展现出从单一“身份标识”迈向“感知末梢”的巨大潜力,为实现普适感知提供了新技术范式。该文系统回顾无源 RFID 感知技术的演进历程,内容涵盖其在身份管理等基础应用到空间感知、行为识别、环境感知以及生命健康监测等前沿领域的相关研究,进一步讨论了 RFID 感知技术在性能、智能化集成及安全隐私等方面所面临的核心挑战,并展望其作为未来物联网关键使能技术的发展前景。

关键词 无源射频识别;物联网;无线感知

中图分类号:TN99 DOI:10.16152/j.cnki.xdxbr.2025-06-001

A review of passive RFID sensing technology: The evolution from identity recognition to pervasive intelligence and prospects

WANG Ju, JING Zhouyu, YU Ningping, NIU Jingdi, CHANG Liqiong

(School of Computer Science [School of Software], Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract Pervasive sensing is a key enabling technology for the Internet of everything. However, conventional sensing modalities, constrained by cost, power consumption, and deployment complexity, struggle to serve as the sensing cornerstone for this vision. Battery-free radio frequency identification (RFID) sensing technology, leveraging its unique advantages such as battery-free operation, low cost, miniaturization, and inherent ID capability, demonstrates significant potential in transitioning from a mere "identity identifier" to a versatile "sensing terminal", thereby offering a new technological paradigm for pervasive sensing. This paper systematically reviews the evolution of this technology, covering its progression from fundamental applications like identity management to advanced frontiers including spatial perception, behavior recognition, environmental sensing, and health monitoring. Finally, the paper discusses the core challenges this technology faces in terms of performance, intelligent integration, and security & privacy, and outlines its future prospects as a key enabling technology for the internet of things.

Keywords passive radio frequency identification; internet of things; wireless sensing

收稿日期:2025-09-20

基金项目:国家自然科学基金(62372372);陕西省创新团队项目(2024RSCXTD05)。

第一作者:王举,男,教授,博士生导师,从事物联网、人工智能、无线网络与系统研究,wangju@nwu.edu.cn。

随着物理世界与数字世界的深度融合,“万物互联”已成为信息技术发展的核心愿景。在此愿景下,为仓库中的一个货箱、手腕上的一块手表、农田中的一寸土壤等海量物理实体赋予感知能力,将是实现全面数字化、智能化、自动化的基础。然而,传统的基于传感器的感知技术范式在实现大规模、高密度部署时,面临以下三大核心瓶颈。①成本与部署复杂度:现有的传感器节点由微控制器(MCU)、模数转换器(ADC)、专用传感元件及通信模块等构成^[1],这导致其成本与部署复杂度居高不下,制约了其在亿万级别物体上的海量部署。②能效与维护成本:依赖电池供电的模式带来了有限的设备寿命和高昂的后期维护成本,难以构建真正可持续、免维护的感知系统与网络。③物理形态限制:传感器节点的体积、功耗与刚性形态限制了其在微小、柔性或严苛物理环境中的应用。

在此背景下,无源射频识别(radio frequency identification, RFID)技术^[2]提供了一条截然不同且极具颠覆性的解决范式,其凭借独特的优势,正从根本上重塑着传统感知架构。①无源特性:感知端无需电池,通过射频能量收集从环境中获取能量,彻底摆脱了续航限制。②极致成本:基于简单的芯片与天线结构,单标签成本可低至数分钱,为海量部署提供了经济可行性。③微型与柔性:其轻薄、可弯折的物理形态使其能够易于附着或嵌入到各种物体表面。④原生 ID 身份:每个标签与生俱来的唯一 ID,为管理和区分海量感知个体提供了无冲突的解决方案。更重要的是,诸多前沿研究已经证明,通过巧妙的设计,无源 RFID 能够完全绕开传统传感器“MCU + ADC + 通信模块 + 电池”的复杂架构,直接实现对多种物理量的感知^[3-6]。例如 GasTag 系统^[7]直接将气体敏感材料集成于标签;BioScatter 系统^[8]利用反向散射读取电化学反应;而 ZEROECG 系统^[9]更是实现了无源、无线的心电信号监测。这些工作证明,RFID 可为构建新一代无源、低代价的智能物联网感知系统提供全新的思路。

本文遵循从基础标识功能到前沿感知应用的层次化论述结构,系统性回顾无源 RFID 感知技术的演进路线。首先,以 RFID 在身份标识领域的传统应用为基点;然后,阐述其在空间感知领域的技术发展,涵盖了其从存在性检测到高精度定位与动态跟踪的技术演进;在此基础上,进一步归

纳了该技术在人体活动识别中的应用范式;随后,论述范围扩展至环境感知领域,分析了其作为多维度物理量传感器的潜力与实现方法;最终,聚焦于人体生理信号监测这一前沿领域,探讨了 RFID 技术在构建新型人机交互与健康监护应用中的关键作用。

1 无源 RFID 系统:从识别到感知

射频识别(RFID)技术作为一种利用无线射频信号进行非接触式自动识别与数据交换的核心技术,已广泛渗透于现代社会的各个角落。一个典型的无源 RFID 系统由阅读器(reader)和无源标签(tag)构成,其系统结构如图 1 所示。

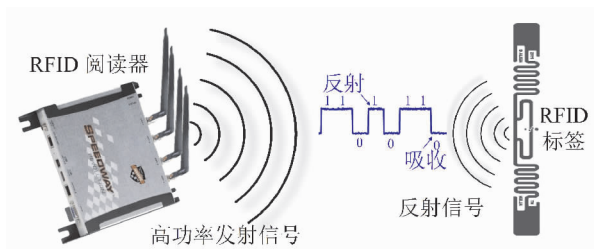


图 1 射频识别 RFID 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an RFID system

超高频 RFID 阅读器发射的射频信号频率是 860 ~ 960 MHz^[10],但不同国家会基于无线电磁频谱管理政策和本地化应用需求而对 RFID 频段进行限制,在中国其范围是 920 ~ 925 MHz^[11]。RFID 标签内部集成了用于数据存储与处理的微芯片及用于信号收发的天线,实现与阅读器的信息交换。射频识别具备无源特性,即当 RFID 标签接收到阅读器发来的高频无线电电磁波信号时,其天线会产生感应电流,标签即可在无电池情况下进行工作。在此基础上,标签芯片通过改变自身天线阻抗来调制其对阅读器信号的反射特性,这一过程被称为反向散射调制(backscatter modulation),通过天线高反射(对应逻辑“1”)和高吸收(对应逻辑“0”)2 种状态切换,标签可完成二进制数据的编码与传输。

1.1 关键信号特征

在该系统架构下,RFID 阅读器能够获取由标签反向散射回的调制信号,通过对其进行下变频处理可获取到低频的基带信号,该信号包含原始的幅度和相位等信息,随后通过模数转换器将其采样为数字信号。在上位机对这些信号的同相(in-phase, I)和正交(quadrature, Q)分量进行实

时分析后,还可获得信号接收强度(received signal strength, RSS)、相位(Phase)等微观信息。这些信息不仅是通信链路质量的重要指标,更是 RFID 技术从传统的识别功能向新兴感知功能演进的物理层基础。

信号接收强度(RSS)表示阅读器收到由 RFID 标签反向散射回来的信号功率强度。RSS 值(式中记为 S_{RSS})可由 Griffin 等提出的无线信号链路传播模型^[12]近似描述为

$$S_{RSS} = P_{TX} + G_t + G_r + G_m - 20 \lg(\frac{4\pi d}{\lambda}) - L$$

(1)

式中: P_{TX} 为阅读器发射功率; G_t 和 G_r 分别为标签和阅读器天线增益; G_m 为调制因子; $20 \lg(\frac{4\pi d}{\lambda})$ 为自由空间路径损耗; λ 为信号波长; d 为标签与阅读器天线间的直线距离; L 为系统其他损耗。理论上,RSS 值可为距离估算提供依据,但在实际环境中,RSS 极易受到多径传播、电磁干扰及标签朝向等环境因素的影响,稳定性较差,通常仅适用于如存在性检测、区域级定位等粗粒度的感知任务。

相位信息(Phase)精确地反映了信号从阅读

器到标签再返回的整个传播路径中所经历的相位偏移,其数学模型可表示为

$$\Phi = (\frac{4\pi d}{\lambda} + \phi_0) \bmod 2\pi$$

(2)

式中: d 为标签与阅读器天线间的距离; λ 为信号波长; $\frac{4\pi d}{\lambda}$ 精确刻画了信号往返路径长度所引入的相位变化; ϕ_0 是由阅读器射频电路和标签芯片反射特性共同引入的系统固有相位偏移,通常被视为一个硬件相关的常数。从式(2)可以看出,相位信息对路径长度的变化表有极高的敏感性,这是由于信号波长通常在分米级别,即使是毫米级的微小位移也会引起显著的相位变化。相位信息可用于实现高精度定位、动态追踪等关键物理层观测量。

自 RFID 技术商用化以来,研究人员尝试利用不同的信号特征去进行识别与感知,包括但不限于标签 ID、信号接收强度 RSS、信号相位 Phase 等特征。其中,标签 ID 一般用于身份标识,而信号接收强度和相位特征则为感知分别提供了粗粒度和细粒度的感知基础能力,本文在表 1 中总结并对比了不同信号特征的优缺点以及典型应用。

表 1 信号特征优劣势对比及其典型应用

Tab. 1 Comparison of the advantages and disadvantages of signal characteristics and their typical applications

特征	优势	劣势	典型应用
标签 ID	实现简单,可靠性高	功能单一,无法提供环境信息	资产管理、商品溯源等需要唯一标识的场景
信号接收强度 RSS	获取容易,计算复杂度低	稳定性差,精度低,易受环境干扰	粗粒度定位与跟踪
信号相位 Phase	精度高,对传播路径微小变化敏感	存在相位模糊问题、易受环境干扰	高精度定位、呼吸/心率等生命体征监测等
原始射频信号	信息量最完整	数据量大,计算复杂,需要专用设备	前沿研究、基于深度学习的新型感知模型等

1.2 传统应用:作为身份标识的 RFID

在 RFID 技术应用的早期阶段,仓储物流、资产管理等领域长期面临效率瓶颈,传统人工记录或条形码识别方式存在耗时耗力、读取距离短、无法批量操作等局限。RFID 技术以其非接触、远距离、可批量读取等优势,逐步成为提升供应链可视化与管控精度的关键工具,广泛应用于零售、物流及防伪溯源等场景。例如沃尔玛等企业通过推行商品级 RFID 标签实现库存精准化管理;顺丰利用 RFID 实现集装箱自动化追踪;茅台则基于 RFID 的唯一标志构建防伪体系,如图 2 所示。



(a) 库存管理 (b) 物流追踪 (c) 防伪标识

图 2 传统 RFID 的应用

Fig. 2 Traditional applications of RFID

在系统架构层面,以 Karthikamani 等提出的 RFID 资产追踪系统^[13]为例,其基本构成包括标

签、RFID 阅读器、上位机与报警模块。通过将标签与资产相连,阅读器与上位机相连,用户可以实时查看资产位置、状态等信息,当特定资产被带离阅读区域时,上位机则触发警报并通知相关人员,如图 3 所示。

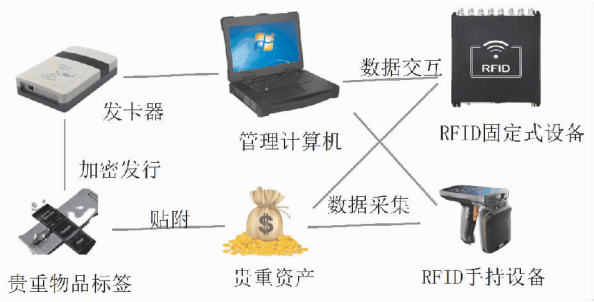


图 3 RFID 资产追踪系统架构

Fig. 3 RFID asset tracking system architecture

然而,此类系统虽在应用中表现稳定,但其功能主要依赖于 ID 识别与基础逻辑控制,架构趋于同质化^[14-15],难以突破“识别-定位-报警”的范式限制。

1.3 新型应用:作为感知载体的 RFID

为拓展 RFID 技术的感知维度,研究者逐渐将重点转向其物理层信号特征。即基于标签反射信号中的相位 (Phase) 与信号接收强度 (RSS) 等参数,RFID 的应用场景开始向人本身及其所处的环境精细化感知扩展。在无源 RFID 具有可长期监测、无源、成本低等优势基础上,这一转变为 RFID 在环境监测、人体识别、医疗健康监测等新兴日常场景中的应用奠定了理论和现实基础。

与 Wi-Fi^[16-17]、蓝牙^[18] 等依赖终端设备主动通信的技术相比,RFID 的无源工作模式从根本上避免了终端设备的续航瓶颈。同时,由于 Wi-Fi、蓝牙是通用的通信系统,其信道中会包含大量与感知无关的业务信息,感知与通信功能相互干扰。相较之下,RFID 系统中阅读器与标签之间是一对一受控交互,其物理层信号具有更高的信噪比,对特定目标的微动特征响应更为敏锐;相较于超声波^[19]、毫米波^[20] 等感知方式,RFID 具备非视距感知能力,且在硬件成本与部署复杂度方面更具普适性;而与计算机视觉技术相比,RFID 从感知机理上避免采集可视信息,从而在源头上降低了隐私泄露风险。

尽管目前 RFID 感知仍面临专用阅读器部署成本较高、感知范围受限的挑战,但这些挑战更多属于物联网基础设施建设过程中的阶段性瓶颈。

而 RFID 阅读器如同无线网络接入点一般广泛嵌入环境的愿景,正沿着一条清晰的技术路径实现:即设备小型化到功能模块化,最后实现设备集成化。

首先,设备的小型化是一切的基础。例如行业领导者 Impinj 已推出 Impinj R700 系列阅读器^[21],其尺寸与普通书籍相当;VirtualExpo 等公司也推出工业级手持式 RFID 阅读器^[22],其重量轻、体积小,且读取距离超过 12 m。这些工作都促使 RFID 阅读器完成灵活部署。其次,RFID 阅读器成为标准化、即插即用的形态可降低其使用门槛。例如 ThingMagic 的 USB 阅读器^[23] 支持电脑、手机等设备通过 USB 接口完成控制和标签读写,在不使用外部天线的基础上,该产品读写距离仅有 1.2 m,性能较差。基于以上,若协议层面在未来有进一步提升,RFID 阅读器的核心射频功能被吸收到网关的通信模组中,最终实现设备集成化也是值得期待的,例如华为等公司就在不断尝试推动多功能融合的边缘计算物联网关,如 AR502H 系列^[24]。

在此背景下,后续章节将基于 RFID 物理层信号的新型感知机理,系统性阐述和剖析 RFID 感知技术在定位、人机交互等具体场景下的应用,展现其构建可持续、高隐私保护的普适感知网络的潜力。

2 基于 RFID 的定位与跟踪:从存在到精准

随着物联网应用的深化,对物体位置信息的需求已从简单的“存在性”判断演进至“空间性”的精细化感知^[25-26]。同时,RFID 技术凭借无源、唯一 ID 表示等诸般优势,也迅速成为室内定位与跟踪领域的研究热点^[27-28]。根据目标是否携带标签,RFID 定位技术主要可分为主动式与被动式两大类。

2.1 主动式定位及跟踪

主动式定位中要求目标携带 RFID 标签,系统通过联合分析多个阅读器天线接收到的反向散射信号来推算其位置。早期的研究主要采用基于信号接收强度 (RSS) 的方法,经典系统 SpotON^[29] 便是其中代表,该系统利用测量标签到至少 3 个位置已知的阅读器天线处的 RSS 值,并根据信号传播模型将相应的 RSS 转换为距离估计,从而解

算出标签的二维坐标,如图 4(a)所示。

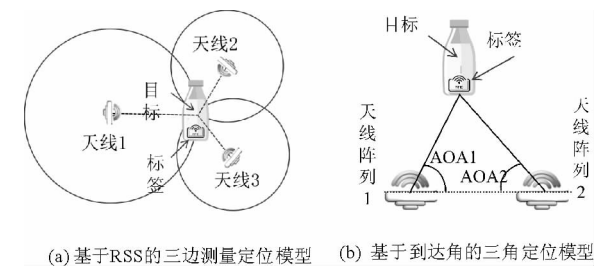


图 4 基于 RFID 的 2 种定位模型
Fig. 4 Two positioning models based on RFID

这种基于 RSS 的三边测量法(trilateration)奠定了 RFID 定位的基础,然而多径、非视距(NLoS)等干扰因素会极大影响 RSS 值,进而导致基于 RSS 的定位方法精度受限。针对该问题,相关研究人员尝试去改良其性能,例如 Gui 等面向封闭空间的 RFID 标签定位场景提出一种 RFRP(reference-free RSS-profile)的定位方案^[30],其结合峰值不对称因子和 RSS 波形相似性等特征,使用 RSS 路径损耗模型实现了 90% 以上的相对定位精度,该方法能够克服非视距、多径传播等干扰因素。然而,其依旧存在标签密度依赖性强、标签部署要求高、实时性差等问题。同时,Wang 等也提到标签的部署方向等因素也会影响 RSS 值^[31],而这些问题导致基于 RSS 值的定位方法依旧在鲁棒性、精度上受限。

为克服 RSS 方法的局限性,近年来的研究重心逐渐转向利用对路径长度变化更敏感的相位信息 Phase^[32-33]。主流方法是基于到达角(angle of arrival, AoA)的定位,通过在阅读器端部署天线阵列,系统可测量信号到达不同天线时的相位差,从而精确计算出信号的到达角,随后结合多个位置或多个天线阵列的到达角,即可估算出标签的具体位置,如图 4(b)所示。然而,这类技术仍面临一项重大挑战,即如何有效抑制非视距(NLoS)场景下的多径干扰。为克服该挑战,研究人员提出了 2 种主流的高鲁棒定位技术范式。一方面,合成孔径雷达(SAR)技术被引入 RFID 定位领域^[34-35]。该技术通过移动单个天线来模拟一个大型虚拟天线阵列,利用孔径合成和信号处理技术有效分离直达路径(LoS)信号并抑制多径干扰,从而提升定位精度。但该方法需要移动天线,限制了其在静态部署的应用,同时,由于需要处理大规模合成孔径数据,实时性较差。另一方面,与将多径视为干扰的传统思路不同,Dina Katabi 团

队提出了颠覆性的 PinIt 系统^[36],其创新性地将多径效应转换为一种稳定且独特的空间信道特征,即“信道指纹”。该方法在定位前,通过天线阵列采集不同标签位置的多径特征,建立“指纹”数据库,在定位时,利用动态时间规整(dynamic time warping, DTW)算法实时匹配采集的信号特征与数据库的“指纹”,实现了厘米级精度定位,并在多径干扰严重和 NLoS 环境中表现出卓越的鲁棒性。然而该系统需要预先采集指纹数据库,耗时耗力且对环境的改变敏感,同时,指纹匹配算法计算复杂度高,也限制了其在嵌入式设备的兼容。

在静态定位的基础上,对移动目标的实时高精度追踪是更进一步的挑战。Yang 等创新性地利用标签的移动特性构建多个虚拟标签组成的天线阵列,并结合差分增强全息(differential augmented hologram, DAH)方法,提出了高精度定位与跟踪系统 Tagoram^[37],该系统实现了对移动 RFID 标签的厘米级定位和跟踪精度。通过与海南航空公司合作,该系统已被部署于 BCIA T1 和 SPIA 机场,但其大规模推广仍需解决多标签干扰、环境适应性、计算复杂度高等问题。

针对机器人导航场景,Wang 等提出了 RF-Compass 系统^[38]。该系统通过在机器人上部署多个无源 RFID 标签,并利用创新的迭代优化算法对空间进行分区与细化,实现了厘米级的机器人导航精度,展现了 RFID 在复杂场景下超越视觉方案的潜力。然而在机器人上部署多个无源 RFID 标签本身就增加了其硬件负担,且迭代优化算法收敛慢,会影响实时性能。

此外,针对物体间精细相对位置获取的应用需求,Shangguan 等提出基于时空相位特征分析方法(spatial-temporal phase profiling, STPP)^[39]。该方法通过分析移动的阅读器在经过多个邻近标签时所采集到的相位 Phase 变化特征曲线,利用相位对位置变化的敏感性,可推断出标签之间的相对空间顺序。尽管该方法在图书、行李排序等任务中取得了优异的成果,但阅读器的移动也限制了其在固定阅读器部署场景中的应用,同时,该方法对标签相对位置敏感,但无法提供绝对位置信息,使用场景受限。

主动式 RFID 定位技术的发展脉络清晰地体现在其利用的信号特征从粗粒度的 RSS 转向细粒度的相位信息上,该领域的演进本质是感知信噪比的提升。相位对距离的极高敏感性催生了 AoA、

指纹匹配等一系列高精度方案。表 2 系统对比了 这些方案在信号利用与精度等方面的差异。

表 2 主动定位工作总结

Tab. 2 Summary of proactive positioning work

系统/方法	信号特征	核心技术	定位精度	主要优势	主要缺陷
SpotON ^[29]	RSS	三边测距法	米级	原理简单	精度和鲁棒性低
AoA 定位 ^[32-33]	相位差	到达角估计	厘米级-分米级	精度较高	需部署天线阵列,对 NLoS 敏感
PinIt ^[36]	多径下的相位指纹	动态时间对齐算法	厘米级	将多径转换为优势,NLoS 下鲁棒性强	需提前采集指纹库,泛化性差
Tagoram ^[37]	相位 + 多普勒	虚拟阵列加 DAH 算法	厘米级	利用标签移动性,实现动态目标跟踪	计算复杂度高
RF-Compass ^[38]	相位	多标签迭代优空间优化	厘米级	可为机器人提供高精度导航	实时性差,有较高硬件负担
STPP 方法 ^[39]	时空相位剖面	相位变化曲线分析	相对顺序	可非视距获取相对顺序	无法提供绝对位置

2.2 被动式定位及跟踪

在感知目标非合作场景(如安防入侵、老人监护)中,主动式定位面临局限^[40]。因此,无需目标携带任何设备的被动定位(device-free localization)技术,因其非侵入、无负担的特性,成为实现普适性定位的关键。其核心原理是:人体或物体的移动会扰动环境中已存在的无线信号的传播路径,进而导致信号特征(如 RSS 或 Phase)的变化。通过分析这些变化,即可反演出目标的位置与轨迹。

早期 Ni 等提出的被动定位系统 LANDMARC^[41]通过在目标区域内预部署参考标签阵列,将被动目标的定位问题转化为 RSS 匹配问题,如图 5 所示。该方法利用固定的参考标签作为“地标”,通过比较待定位位置标签的特征与这些地标信号特征的相似性,进而使用 k 近邻算法估算位置。然而,受限于 RSS 信号的粗粒度特性和部署密度,这类方法的定位精度通常在米级,难以满足精细化应用的需求。

为了提升感知精度,Han 等利用紧邻标签间电磁耦合效应,提出被动感知系统 Twins^[42],该系统经过巧妙设计,当 2 个平行部署的标签 A、B 间距为 d 时,该标签对的信号恰好处于“可读”与“不可读”的临界状态,如图 6 所示,叉号表示不可读,对号表示可读。

在 Twins 系统中,其选取 Impinj E41-b 商用标

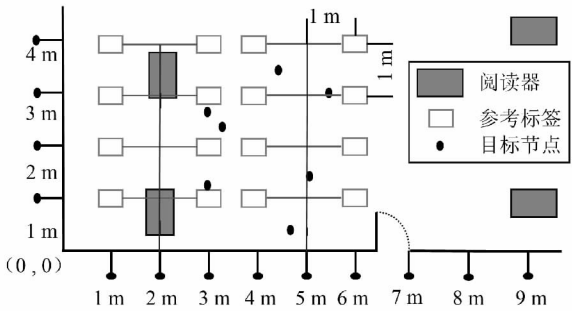


图 5 LANDMARC 系统部署示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the LANDMARC system deployment

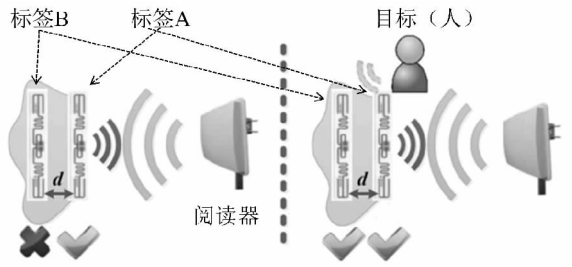


图 6 Twins 系统工作原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the working principle of the Twins system

签, d 等于 10 mm。在图 6 左图中,当无目标出现时,由于耦合效应,标签 A 会“遮挡”标签 B,阅读器发出的 RF 波并不能激活标签 B,即标签 B 不可读;在图 6 右图中,当出现移动目标时,目标

会充当障碍物将 RF 波反射或折射到标签 B 处,标签 B 状态会发生显著跳变。尽管该方法利用链路通断状态实现了高灵敏度,但其部署需要精心调整标签的位置和间距,实用性和可扩展性差,仅适用于单目标运动检测。

实现高精度的多目标被动定位,是一个公认的难题。为解决该问题,Wang 等提出的 D-Watch 系统^[43]利用天线阵列和独创的 P-MUSIC 算法,不仅能精确解析出目标的到达角(angle of arrival, AoA)信息,还能将多径信号分离开来,并将每一条路径都视为一个独立的“虚拟传感器”,如图 7 所示。具体来说,图 7(a)表明任一阅读器天线都

会收集标签的到达角,进而生成对应 AoA 链路谱,当标签部署数量增加时,可利用的 AoA 链路将进一步增加,如图 7(b)所示。当目标遮挡某个链路时,该链路方向的信号强度会下降,即可推算出目标的 AoA 方向,结合多个 AoA 信息,可利用三角定位法定位目标,如图 7(c)所示。该系统的优势在于无需预先知晓标签的精确位置,故可随意部署标签,系统部署方便,该系统虽然利用多径信号作为虚拟传感器虽提高了精度,但算法复杂,计算资源要求高,且系统依赖多路径信息,在稀疏场景上性能可能不稳定。

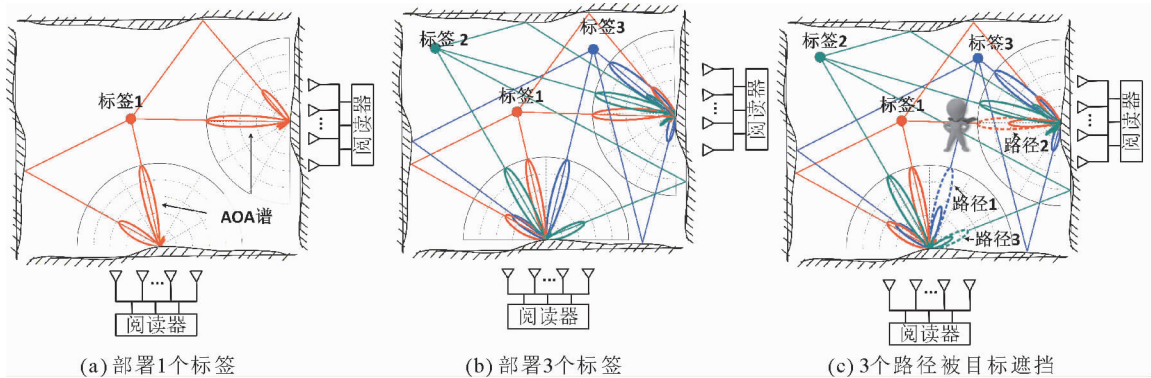


图 7 D-Watch 利用多径信号实现目标定位的核心思想示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the core idea of D-Watch for target localization using multipath signals

3 基于 RFID 的活动及手势识别:解码肢体语言

随着人机交互、智能家居、医疗健康等领域的兴起,社会对人体活动及手势的精准识别需求日益迫切。传统的行为识别方法主要基于计算机视觉方案^[44-45],该方法基于视频数据并利用计算机视觉分析人类行为,虽然直观,但面临计算量大、成本高、易受遮挡、光照影响以及存在隐私泄露风险等诸多挑战。基于 RFID 的无线感知技术为此提供了一条全新的路径,它无需摄像头,仅需借助轻量级、无感的 RFID 标签,即可实现对人体姿态与动作的感知,具有非侵入、低成本、保护隐私等显著优势。RFID 活动与手势识别同样可分为主动与被动 2 种范式。

3.1 主动式识别:基于佩戴式标签的动作捕捉与交互

主动式识别通过在用户身体关键部位(如关节、指尖)佩戴或贴附无源 RFID 标签,进而将人

体运动转化为标签信号变化。早期的研究主要利用信号接收强度(RSS)的波动来区分人体的静止与运动状态,适用于睡眠监测等粗粒度活动识别^[46-48]。

为实现更精细的动作捕捉,Krigslund 等探索了信号的极化特性^[49],其系统核心原理在于,标签天线反射信号的极化状态与其空间朝向密切相关。如图 8 所示,他们通过在大腿和小腿上贴附 RFID 标签 T 和 S,并利用双极化天线可测量 RFID 标签反射信号的极化角变化,进而推算出人体腿段相较于水平轴的绝对角度,最终捕获到单腿行走时的矢状面运动,为低成本人体运动捕捉开辟了新思路,然而该系统对标签贴附位置敏感,且人体运动可能引起标签脱落和朝向变化,影响系统稳定性。

在人机交互领域中,高精度的手势轨迹追踪极具价值^[50]。Wang 等利用多分辨率波束融合算法,提出了仅用少量天线即可实现厘米级的空中手写轨迹追踪系统 RF-IDraw^[51]。其通过在指夹板上附上 1 个 RFID 标签实现虚拟触控屏,如图 9

(a)所示。当用户使用附在手指夹上的 RFID 在空中写下任何单词或命令时,RF-IDraw 将基于阅读器所收集到的 RFID 信息重建用户的文字或手势,并将其转换为所需通信设备的输入,如图 9 (b)所示。该系统的不足在于要求用户佩戴标签,侵入性强,可能会影响自然交互,同时在多人场景下也会面临标签混淆问题。

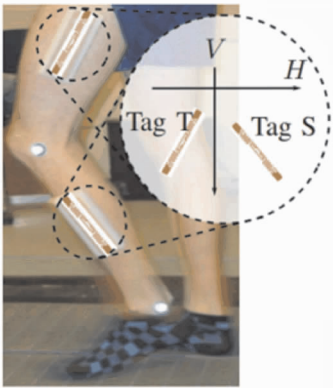
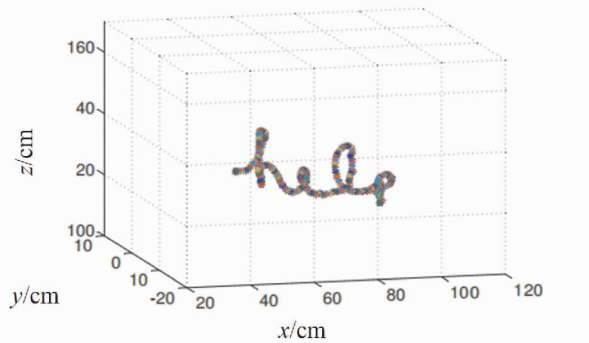


图 8 基于 RFID 的腿部运动捕捉系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the RFID-based leg motion capture system



(a) 指尖佩戴RFID示意图



(b) RF-IDraw恢复的手写字迹

图 9 RF-IDraw 系统将任意平面转变为虚拟触控界面

Fig. 9 The RF-IDraw system transforms any surface into a virtual touch interface

由于传统 RFID 定位系统仅能定位标签位

置,无法估计朝向^[52-53]。Shangguan 团队创造性地将电磁波的极化 (polarization) 特性引入到 RFID 标签的运动追踪领域,进而提出高部署灵活性的运动追踪系统 PolarDraw^[54],如图 10 (a)所示。该系统利用双极化天线可对贴有 RFID 标签目标的位置和朝向实现同时的高精度估算,因此该系统可应用于追踪带有 RFID 标签的手写笔的输入,如图 10(b)所示。然而,该系统虽然能够同时估计位置和朝向,但仍需双极化天线和复杂信号处理,硬件要求高且位置校准繁琐。

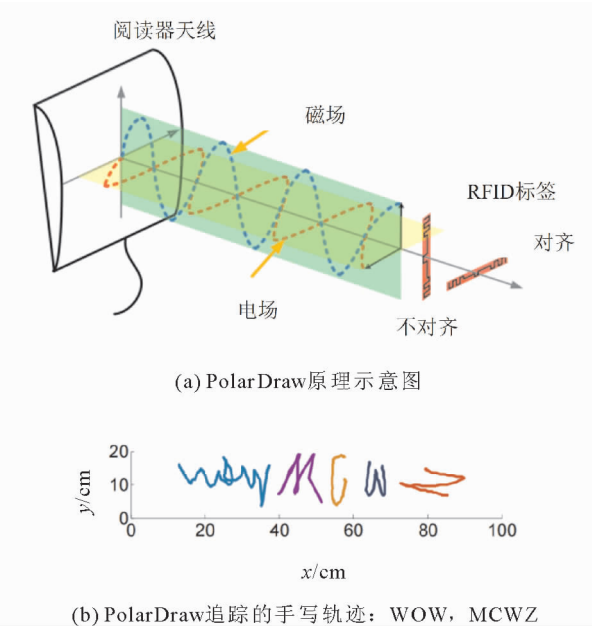


图 10 PolarDraw 系统追踪的手写字母轨迹

Fig. 10 Handwritten letter trajectories tracked by the PolarDraw system

然而,上述系统面临着在多环境下对大量训练样本的依赖问题。为解决此问题,Ma 等提出了 RF-Siamese 系统^[55],该系统创新性地引入了孪生神经网络结构。其核心思想是利用孪生神经网络学习手势相位特征之间的相对“距离”,而非直接学习手势的绝对特征。该网络通过共享权重的双分支结构提取特征,并利用对比损失函数使得同类手势在特征空间中聚集,异类手势相互远离。该系统有效提升了模型在跨环境场景下的泛化能力,但仍需一定量训练数据且网络训练计算量大,不适合低功耗设备。

主动式识别通过佩戴标签,将人体运动直接映射为标签信号特征的变化。其技术精度与信号维度紧密相关,表 3 总结了上述方案的优缺点与核心技术。

表 3 主动式动作识别工作总结
Tab. 3 Summary of active action identification work

系统/方法	信号特征	核心技术	感知维度	主要优势	主要缺陷
Krigslund 等 ^[49]	原始射频信号 + 极化	极化特性分析	肢体绝对角度	低成本	对标签朝向敏感、需要双极化天线
RF-IDraw ^[51]	相位	多分辨率波束融合	空中手写轨迹	精度较高,厘米级轨迹追踪	侵入性强
PolarDraw ^[54]	相位 + 极化	联合估计位置和朝向	轨迹与工具朝向	能同时捕捉位置和朝向信息	硬件要求高,信号处理复杂
RF-Siamese ^[55]	相位	孪生神经网络	手势识别跨环境泛化	泛化能力强	计算复杂度高

3.2 被动式识别:基于环境扰动的无设备感知

被动式感知范式利用人体作为“散射体”对环境中预设 RFID 链路的扰动进行识别,因其非侵入性而备受关注。以 Wang 等提出的 RF-finger 手势识别系统^[56]为例,其平面图如图 11 所示。其核心思想是构建一个由标签阵列覆盖的感知区域,当用户手指在区域上方移动时,其手指反射会改变标签到阅读器的信号传播路径,形成一个独特的相位变化图谱。系统通过分析捕捉到的二维相位变化图谱,并结合深度学习等模型实现高精度单指轨迹追踪和多指手势识别感知。该工作验证了利用环境中的标签阵列进行精细化被动感知的可行性。

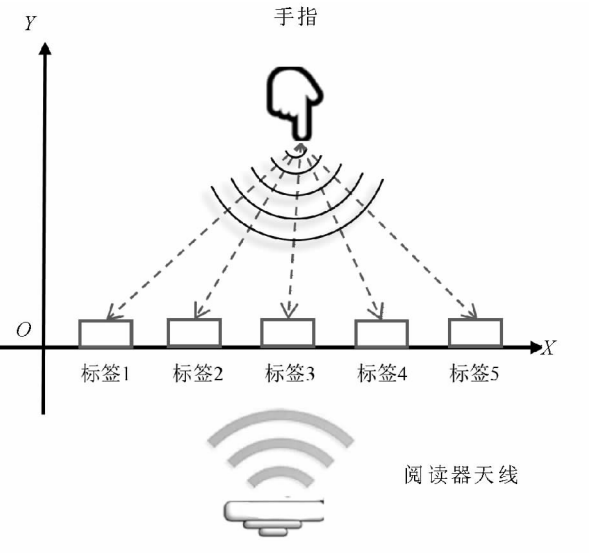


图 11 RF-finger 系统的平面图
Fig. 11 Plan of the RF-finger system

然而,在许多被动感知场景中,系统无法直接获取由运动引起的明确信号,且无法预部署密集标签阵列。与此同时,依赖深度学习的特征提取方法受限于对大规模标注数据的依赖。为此,Wang 等提出了一种名为 TACT 的非侵入式人体活动识别系统^[57],其核心思想在于摒弃了对神经网络的依赖,构建了一套精细化特征工程方法来量化射频相位变化与人体活动之间的内在关联。

具体而言,TACT 首先利用动态时间规整 (DTW) 算法对齐不同动作序列以补偿时间上的差异。随后,系统提取了一个双层特征集:①粗粒度特征,如估算的移动速度、距离和活动持续时间,用以描绘活动的宏观轮廓;②细粒度特征,即相位波形本身的模式与形态,用以捕捉动作的细微差异。最终,分类器利用这一丰富的、多层次的特征集实现了对不同活动的有效区分。当然,这类方法极度依赖特征设计,识别率受限,且系统虽然无需神经网络,但仍需分类器训练,实时处理中计算开销大。

4 基于 RFID 的环境感知

在智慧农业、工业物联网、智能楼宇等场景中,对温度、湿度乃至振动等环境参数的实时、大规模感知是实现智能化的前提^[58-60]。传统的传感器网络在成本、功耗和部署复杂度方面面临显著挑战。相比之下,基于无源 RFID 的环境感知范式是一种极具吸引力的替代方案。该方案利用信号传播特性对无源 RFID 标签进行功能化设计,可将 RFID 标签转变为一个无源、低成本、小

型化且集成了传感、计算与通信功能的节点。近几年,研究者不断提出基于无源 RFID 的新型低功耗感知系统,并将其应用于温湿度、光照、气体、液体识别、工厂振动等物理量的检测中。

4.1 基于 RFID 的光照及温度感知

将功能材料与 RFID 天线结合是实现环境感知的直接路径。Wang 等提出的方案是这一范式的典型代表^[61]。其核心思想是在 RFID 标签天线的特定位置处裁剪并在断口处接入一个对物理量敏感的无源元件(如用于测温的热敏电阻,或用于测光的光敏二极管),如图 12 所示。环境物理量的变化会引起该元件阻抗的改变,进而调制了整个标签天线的阻抗特性,导致其反向散射信号的 RSS 和 Phase 发生相应的变化。通过建立物理量(如光照强度或温度)与信号特征之间的映射关系,即可实现无源感知。

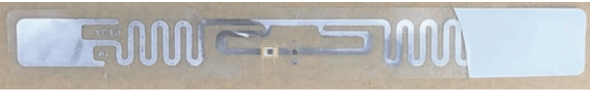


图 12 基于 RFID 的无源、低代价光照感知标签
Fig. 12 RFID-based passive and low-cost light sensing tag

然而,此类方法所使用的无源敏感器件的阻抗变化范围通常较窄,感知精度和灵敏度受限。尽管在设计过程中对该器件天线进行了重设计,标签通信的距离依旧会有所衰减,限制了其在远距离感知场景的应用。

4.2 基于 RFID 的土壤湿度感知

在智慧农业中,精准的土壤湿度监测是实现节水灌溉的关键^[62]。Wang 等提出首个基于 RFID 的无源土壤湿度感知系统 GreenTag^[63],其结构如图 13 所示。该系统利用近场耦合效应对介电常数的敏感性实现土壤湿度感知,当标签贴在花盆外侧时,土壤湿度会影响标签天线的辐射近场,从而改变标签的最小激活功率(minimum response threshold, MRT),通过测量 MRT 值即可推算出土壤湿度。然而,该系统并未考虑不同土壤类型场景下的感知,且局限于容器栽培,不适合大田场景。

4.3 基于 RFID 的气体感知

气体检测在环境污染检测等领域极为重要,但不同于环境温湿度、光照强度的简单检测,气体成分的无线检测需解决分子特异性识别、低浓度高灵敏度的双重难题。Sun 等创新性地将基于石墨烯的气敏材料嵌入到无源 RFID 标签中,提出

了基于 RFID 的气体检测 GasTag 系统^[7](见图 14)。其核心思想是将一层气体敏感材料(如还原氧化石墨烯-导电聚合物)嵌入到 RFID 标签的天线结构中,当特定气体分子被吸附时,敏感材料的导电性发生变化,从而改变标签的阻抗,带来 RFID 标签信号特征(如 RSS 和 Phase)的变化。因此,在阅读器端通过观测 GasTag 标签的信号特征,并结合机器学习算法,可以估算出气体的浓度。为了提升气体感知的灵敏度,通过对敏感材料的纳米结构进行优化,GasTag 实现了对 CO、CO₂ 及 CH₄ 等气体的高灵敏度检测,且成本极低,总花费小于 5 元。

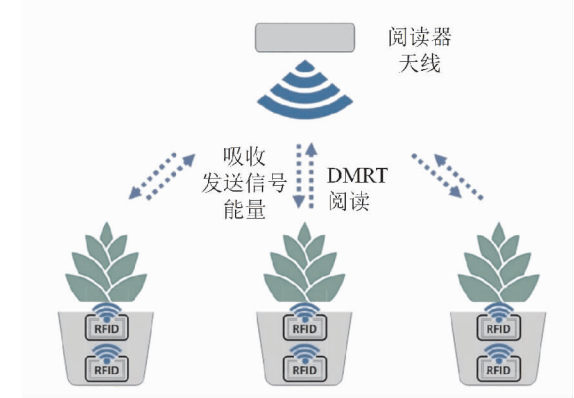


图 13 基于 RFID 的无源土壤湿度感知 GreenTag 系统示意图
Fig. 13 Diagram of the RFID-based passive soil moisture sensing GreenTag system

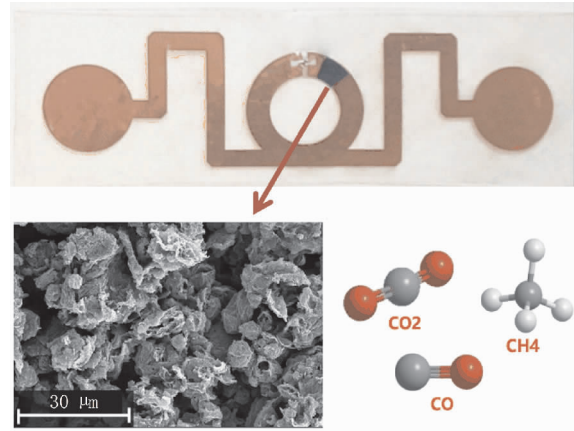


图 14 基于 RFID 的无源气体感知 GasTag 系统示意图
Fig. 14 Diagram of the RFID-based passive gas sensing GasTag system

4.4 基于 RFID 的液体识别

非侵入式的液体和材料识别在安检、工业质检等领域有重要应用,例如地铁中液体安全或危险的检验,传统方式需要借助昂贵的专业分析仪

器。为此,Wang 和 Xie 等先后提出了基于 RFID 的便携、低代价液体识别系统 TagScan^[64]和 Tag-Tag^[65](见图 15)。



图 15 基于 RFID 的低代价液体识别系统
Fig. 15 RFID-based low-cost liquid identification system

TagScan 系统架构如图 15(a)所示,该系统利用 RFID 信号穿透物体时发生的信号能量衰减和相移特性来识别材料,其特点是“隔空检测”,即感知系统无需接触待检测物体,适合一些非接触式场景,如因重大传染病导致的场所封控情况下的检测。TagScan 系统实现了对 10 种常见液体(如牛奶、可乐、水、醋、酱油等)超过 94% 的检测精度。另一方面,TagTag 系统则利用标签天线与被测物体表面接触时,因不同待测物体的介电常数而引起近场耦合效应,使得标签天线阻抗变化,进而产生标签信号特征如 RSS 和相位的变化,以此作为液体识别的依据,如图 15(b)所示。该系统适合将 RFID 标签贴附于物体表面的场景,如仓库管理或者贵重物品(如香水、电子件)的监管场景,这些已贴附无源 RFID 标签的物品本身可用于实现自动化盘点与防盗。TagTag 系统实现了对 23 种常见液体超过 95% 的检测精度,且支持多标签并发监测,其低廉的成本、快速的检验时间拥有很好应用前景。TagScan 与 TagTag 系统虽解决了材料识别的便携化、低成本需求,但其可识别的物质类型有限,仅针对常见液体,同时,这些

系统在实验中并未考虑多个贴标物体密集摆放时标签信号相互干扰所带来的识别混淆。

4.5 基于 RFID 的振动感知

设备异常振动监测在工业安全中至关重要。然而,传统振动传感器通常采用分立式架构设计,存在体积大、能耗高的缺点,难以适用于空间和功耗受限的苛刻工业环境。为应对这一挑战,Yang 等提出了一种基于 RFID 的振动频率监测系统 Tagbeat^[66],系统架构如图 16 所示。该系统将标签附着于振动源附近,当设备产生周期性振动时,标签会随之发生微移动,从而改变阅读器与标签之间的距离 d (初始距离为 d_0)。在阅读器向标签发送射频信号后,标签反射信号的相位会随距离变化而发生周期性波动,且该波动与振动频率 f_v 呈线性关系。通过分析反射信号相位的周期性变化规律,即可精确估计振动源(如发动机)的振动频率,进而判断设备是否存在异常振动、是否处于正常工作状态。

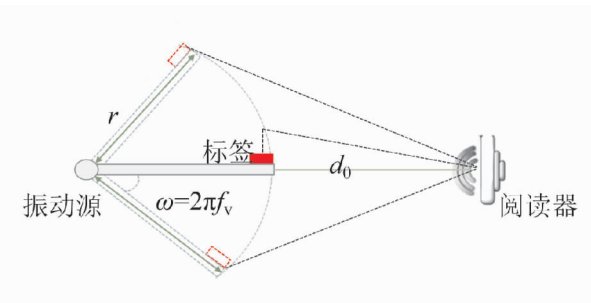


图 16 Tagbeat 振动感知系统框图
Fig. 16 Diagram of the Tagbeat vibration sensing system

振动频率的感知固然重要,但如何以非接触方式同时感知振动的幅度,是另一个具有挑战的问题。为此,Xie 等提出一种基于 RFID 的非接触式振动感知系统 TagSMM^[67]。该系统巧妙地将监测振动源放置在菲涅尔区的特定边界位置(第奇数阶),在该位置,从振动源反射到标签的动态路径信号和从阅读器到标签的静态路径信号之间的相位差将是信号半波长的奇数倍,进而在信号叠加时两者会发生相消干涉,动态路径的任何微小变化都会导致叠加信号发生剧烈变化,如图 17 所示。同时,为了消除实际应用中噪声对感知精度的影响,该系统通过引入耦合标签和精细的 RFID 发射器功率控制 2 种方法,在进一步增加振动感知灵敏度的同时也过滤掉耦合标签所带来的有害动态信号,最终实现对亚毫米级振动幅度的非接触式高精度感知。

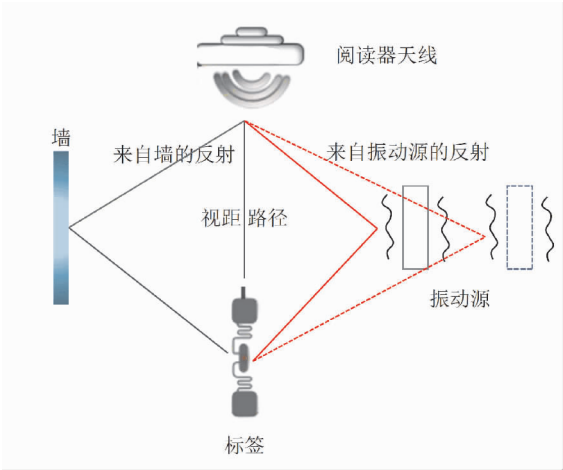


图 17 TagSMM 振动感知系统框图

Fig. 17 Diagram of the TagSMM vibration sensing system

表 4 基于 RFID 的环境感知工作总结

Tab. 4 Summary of RFID based environmental perception work

感知类型	信号特征	核心技术	主要优势	主要缺陷
光照/温度 ^[61]	RSS、相位	敏感元件接入天线	直接、有效	感知范围与灵敏度受限
土壤湿度 ^[63]	标签激活功率、RSS、相位	参考标签的应用 + 近场耦合效应	无源	受土壤类型影响大
气体 ^[7]	RSS、相位	气敏材料修饰天线	高灵敏度、低成本	敏感材料寿命较短
液体 ^[64-65]	RSS、相位	近场耦合特性	非接触、快速	识别种类受限、且容易相互干扰
振动 ^[66-67]	相位周期性变化	非涅尔区干涉	非接触,可测振动频率与幅度	单参数难以全面诊断故障

5 人机交互及生命健康感知

人体感知是 RFID 技术极具发展前景的垂直应用方向,该技术的核心是利用无源 RFID 标签,构建面向人机交互与生命健康监测的低成本、专用感知终端,然后通过数米外的 RFID 阅读器来给该感知器供电并获取人机交互指令或生命健康指标。RFID 技术凭借其普适性(易于与现有基础设施集成)、高灵敏度(能有效捕获微弱信号)、小型化(易于集成到可穿戴设备中)等特点,正被广泛应用于不同类型的人体感知场景中。

5.1 基于 RFID 的课堂学生响应交互系统

课堂响应系统也称为“答题器系统”(clicker system)或学生响应系统(SRS),是一种用于课堂

以上这些系统虽解决了工业场景中振动监测的无源化、非接触需求,但在落地过程中依然存在一些问题。例如,设备故障往往需要多维度振动数据支撑,单一频率参数难以精准定位故障类型,且工业场景中容易受到电磁干扰,影响标签天线的性能。

总之,在环境感知中,无源 RFID 通过功能化标签设计,将环境量调整到射频信号特征上,其核心是将标签天线作为传感器,通过测量 RSS 或相位变化反演环境信息,表 4 总结了环境感知的相关工作。

教学的创新教育技术工具,它支持教师在课堂上实时向学生提问,并即时收集全体学生的回答和反馈。iClicker^[68]是该类系统中最著名、应用最广泛的代表性品牌之一。然而,现有课堂响应系统的终端设备存在成本高、能耗高等问题。针对该问题,Chang 等提出一种基于 RFID 的无源、低成本课堂响应系统 ID-Clicker^[69],其学生应答终端如图 18 所示。该系统基于 RFID 标签的唯一 ID 标志机制,将每个标签 ID 与学生信息及预设答案选项(如“A”、“B”等)进行绑定。通过在 RFID 标签上加装一个无源开关,当学生按下某个标签的按钮开关时,即可导通 RFID 芯片与天线之间的连接,使得阅读器能够读取到该标签,进而通过标签 ID 检索到对应的学生身份和所选答案。ID-Clicker 系统的用户终端具备低成本、无源工作的

特点,同时对环境变化、标签旋转及位置移动具有良好的鲁棒性,适用于课堂环境中响应交互信息的稳定采集。

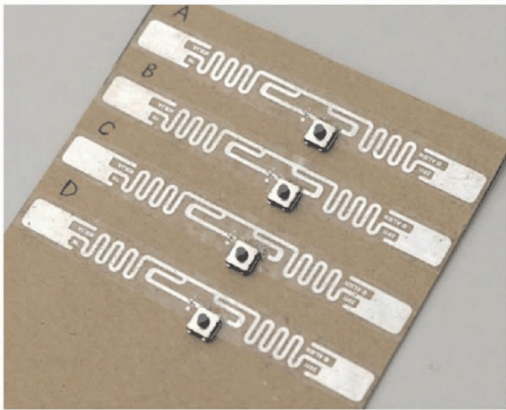


图 18 ID-Clicker 课堂交互系统

Fig. 18 ID-Clicker classroom interaction system

ID-Clicker 系统虽然缓解了传统课堂响应系统的成本与功耗问题,但从课堂教学交互需求来看,其依旧存在交互功能单一(无法适配主观题、多选题、填空题等题型)、性能受限(当在大规模课堂时,多个标签存在可能导致阅读器漏读)、与后台不适配(其仅支持基础的答案统计,与学习分析平台不兼容)等局限。

5.2 基于 RFID 的手指输入交互系统

在智能家居场景中,现有的控制方式如智能手机应用和语音交互仍存在一定局限性^[70-71]。智能手机控制通常涉及复杂的应用切换与配置流程,而语音控制在某些需要精细化操作的场景下(如需连续调节灯光亮度)效率较低、体验欠佳。RFID 标签因其易于嵌入日常物品的特性,为实现基于手势的输入感知与交互提供了新的可能。Wang 等提出了一种基于 RFID 传输线结构的手指输入感知系统^[72],如图 19 所示。该系统将 2 个 RFID 芯片通过微带线连接,构成 1 个可感知指尖输入的结构,当用户手指沿传输线上不同位置和方向滑动时,会引起传输线阻抗的变化,从而改变 2 个 RFID 标签的信号特征,这些变化可被 RFID 阅读器无线捕获,并进一步用于识别用户的交互手势。

此外,Katsuragawa 等提出的 Tip-Tap 系统则是用于可穿戴的二维指尖输入方案^[73],如图 20 (a)所示,该系统可在用户双指不同位置接触时检测到离散的输入行为。该系统由在拇指和食指指尖间的接触点阵列组成,每个接触点由 1 个

RFID 芯片与半波长天线构成,接触点阵列结构如图 20(b)所示。当用户双指接触时,2 个半天线串联形成一个完整的天线,使得这 2 个半天线上连接的 RFID 芯片被供电激活,进而阅读器可读取到这 2 个激活标签的 ID 组合,精确地识别二维离散点的输入信息。

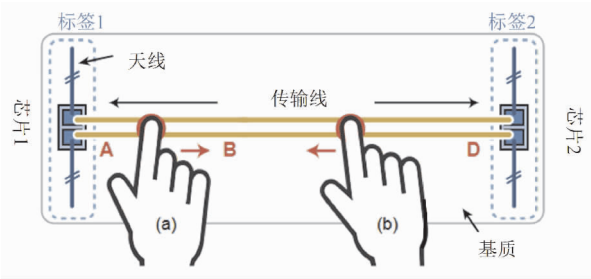
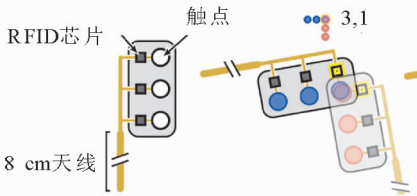


图 19 RFID 传输线手指滑动输入系统

Fig. 19 RFID transmission line finger sliding input system



(a) Tip-Tap 佩戴示意图



(b) Tip-Tap 的设计结构

图 20 Tip-Tap 系统示意图

Fig. 20 Schematic diagram of the Tip-Tap system

这 2 种 RFID 手势交互系统虽为智能家居提供了创新输入方式,但从实际使用来看依旧存在很多问题。例如交互能力与操作灵活性不足,前者仅支持沿传输线的线性滑动手势,后者仅能识别双指离散接触点的 ID 组合,均无法实现复杂手势(如旋转、按压、多指协同),难以满足智能家居精细化操作需求,操作约束与使用门槛高,限制了使用场景的灵活性。

5.3 基于 RFID 的汗液感知系统

RFID 感知技术不仅适用于人体动作与环境交互,还可以扩展至人体生命健康状态的监测。多项研究表明,基于 RFID 的健康状况感知系统在实现与专业设备相近的感知性能的同时,能够显著降低感知成本和功耗,为大规模、长时间感知提供了可能性。以汗液感知为例,汗液中所含的

为 ZEROECG 系统所测得的 ECG 信号,后者能够达到跟前者几近相同的 ECG 感知效果。

尽管 ZEROECG 系统实现了无源无线的心电信号长期监测,但其仍存在信号质量易受干扰、佩戴与运动适配不足等核心弊端。例如,该系统贴

附于体表时,用户运动时电极与皮肤的相对位移、肌肉收缩都会产生运动伪影,由于该系统缺乏主动降噪电路,运动状态下信号将严重失真,且长期佩戴该系统也可能对敏感肌人群造成困扰。

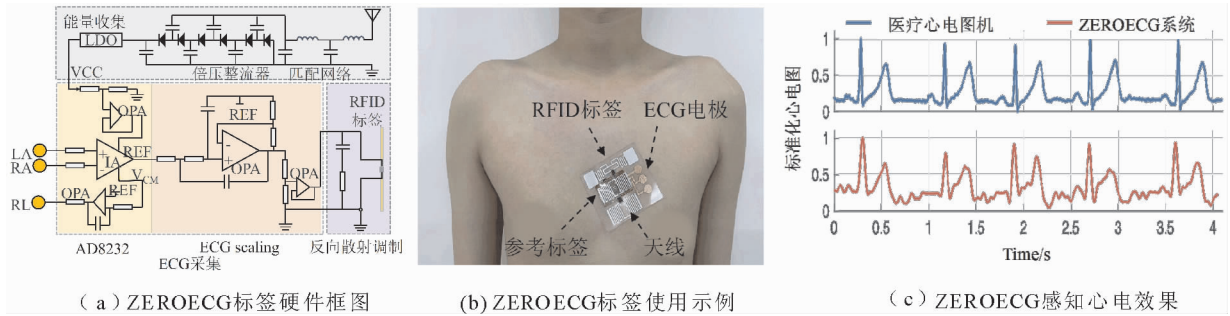


图 22 ZEROECG 心电感知系统框图及感知效果图

Fig. 22 Block diagram and perception effect diagram of ZEROECG electrocardiogram perception system

5.5 基于 RFID 的眼压感知系统

眼压是衡量眼部健康的一项重要指标,长期异常升高可能引发青光眼等严重眼部疾病^[75]。因此,及时监测眼压变化对早期发现和预防此类疾病具有重要意义。然而,传统眼压监测设备的读取距离通常只有几厘米,极大限制了其实际应用。为解决该问题,Li 等提出一种基于 RFID 及纳米材料的无源无线眼压监测系统 Cyclops^[76],如图 23(a)所示。当该系统进入工作时,RFID 阅读器首先发射查询信号并为无源 Cyclops 标签供能,此时眼压的变换会导致隐形眼镜的曲率发生改变,进而改变芯片天线的阻抗,使得天线阻抗值

与眼压形成映射关系,因此,RFID 芯片通过监测其与天线的匹配状态,可间接估计眼压,这些感知信息在反射信号中发送给 RFID 阅读器。感知眼压的标签采用了一种 3 层天线结构,如图 23(b)所示,包含 2 个不同形状的金属天线层(上部天线层和下部天线层)和 1 层由 PDMS 与 HCS 混合材料构成的中间传感层,该 3 层结构的天线最后被纯 PDMS 材料封装,其既是压力传感器又是通信天线。该工作通过结合纳米材料与 RFID 感知,实现了低代价、低功耗、远距离的眼压感知,解决了传统接触式传感器体积大、续航短的问题。

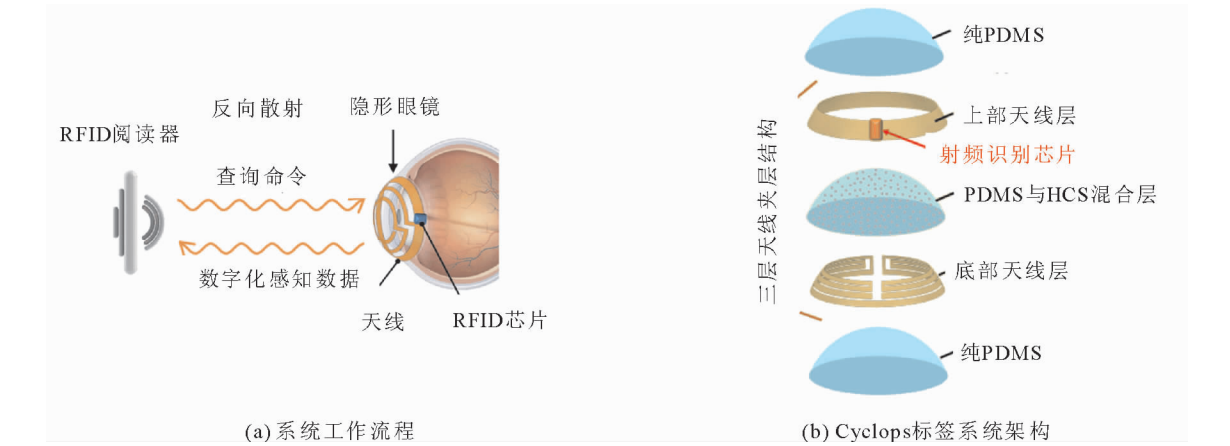


图 23 Cyclops 眼压监测系统框图

Fig. 23 Diagram of Cyclops intraocular pressure monitoring system

Cyclops 系统虽突破了传统眼压监测的距离和功耗限制,但其还存在很多不足。例如,其实验中仅仅在猪脑上完成,并未考虑人体相容性,且并未考虑感知精度与稳定性关系,即佩戴位置偏移、

眼睛贴合度、眼球动作等可能会改变天线曲率,从而造成阻抗映射失真。

此章节展示了 RFID 在构建专用化感知终端方面的应用,其信号利用方式更加多样和巧妙,覆

盖范围从简单的 ID 读取到复杂的生理信号调制，表 5 总结了上述方案的核心技术和优缺点。

表 5 基于 RFID 的人机交互与健康感知系统总结

Tab. 5 Summary of RFID based Human-computer interaction and health perception systems

应用领域	信号特征	核心技术	主要优势	主要缺陷
课堂交互 ^[69]	读取 ID	无源开关触发标签 ID 读取	终端无源、低成本	交互功能单一、易漏读
手指输入(智能家居) ^[72-73]	原始射频信号、读取 ID	传输线阻抗变化、ID 组合	创新交互方式	交互维度有限、灵活性不足
汗液感知 ^[8]	原始射频信号	电化学传感器电流调制反向散射	功耗低	检测物指标有限
心电感知 ^[9]	原始射频信号	ECG 电压调制天线阻抗	无源、无线、长期监测	易受运动干扰
眼压感知 ^[76]	原始射频信号	压力致天线形变改变阻抗匹配	突破传统眼压感知距离	易受运动干扰

6 总结及展望

本文系统性地梳理了无源 RFID 感知技术从基础的身份识别到精准的定位跟踪,再到用户的活动手势识别、多维度的环境感知,乃至精细入微的人机交互与生命健康监测的演进历程。由此可见,无源 RFID 技术正凭借其无源、低成本、小型化和自带 ID 的独特优势,深刻地改变着我们与物理世界交互的方式,将“万物皆可感知”的愿景推向现实。尽管取得了显著进展,但无源 RFID 感知技术仍面临着一系列挑战,这些挑战也恰恰指明了未来的发展方向。

首先,在性能极限的突破上,当前系统在感知距离、信噪比和抗干扰能力上仍有提升空间。如何从信号处理、天线设计和编码调制的角度进一步挖掘弱信号的感知潜力,突破距离与环境的限制,是未来的核心课题。

其次,系统的鲁棒性与可扩展性亦是关键挑战。复杂的多径环境、多标签间的碰撞与干扰,以及环境的动态变化,仍然是制约系统稳定性的关键因素。因此,研究能够自适应环境变化、支持大规模标签并发感知的智能算法与协议,是技术走向规模化应用的必由之路。

同时,在智能化层面,目前许多系统仍依赖于复杂的特征工程或大量的标注数据,这限制了技术的易用性与普及。如何将先进的机器学习、深度学习甚至大模型技术与 RFID 感知深度融合,

实现端到端的、具有强泛化能力的感知智能,减少对人工标注的依赖,是提升技术易用性和实现智能化跃迁的关键。

此外,随着感知能力的日益精细,由无线信号带来的隐私泄露风险也日益凸显。如何在物理层和应用层构建轻量级、高效率的安全与隐私保护机制,确保感知数据的安全可信,是技术获得社会广泛接纳的根本保障。

展望未来,无源 RFID 感知技术将继续向着更深、更广、更智能化的方向发展。可以预见,这项低功耗、低成本的技术将成为构建未来万物智联世界的关键使能技术之一。

参考文献

[1] THIYAGARAJAN N, SHANMUGASUNDARAM N. An investigation on energy consumption in wireless sensor network[C] //2022 8th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). Coimbatore, India; IEEE, 2022: 1359-1364.

[2] MURATKAR T S, BHURANE A, KOTHARI A. Battery-less internet of things: A survey[J]. Computer Networks, 2020, 180: 107385.

[3] PHILIPOSE M, SMITH J R, JIANG B, et al. Battery-free wireless identification and sensing[J]. IEEE Pervasive Computing, 2005, 4(1): 37-45.

[4] ROSA R L, ZOPPI G, DI DONATO L, et al. A battery-free smart sensor powered with RF energy[C] // 2018 IEEE 4th International Forum on Research and

- Technology for Society and Industry (RTSI). Palermo, Italy: IEEE, 2018: 1-4.
- [5] LIU V, PARKS A, TALLA V, et al. Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 Conference. Hong Kong, China: ACM, 2013: 39-50.
- [6] WANG Y X, CHEN Z M, HUANG T C, et al. Battery-free flexible wireless sensors using tuning circuit for high-precision detection of dual-mode dynamic ranges[J]. Nano Energy, 2025, 133: 110492.
- [7] SUN X, XIONG J, FENG C, et al. Gastag: A gas sensing paradigm using graphene-based tags[C]//Proceeding of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Washington, D. C., USA: ACM, 2024: 342-356.
- [8] JIAO W L, LI Y L, XI X D, et al. BioScatter: Low-power sweat sensing with backscatter[C]//Proceeding of the 21st Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Services. Helsinki, Finland: ACM, 2023: 191-204.
- [9] JIAO W L, WANG J, GAO X Z, et al. ZEROECG: Zero-sensation ECG monitoring by exploring RFID MOSFET[C]//Proceeding of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Washington D. C., USA: ACM, 2024: 1237-1251.
- [10] SATO America. Basics in RFID[EB/OL]. (2002-05-08) [2025-09-10]. https://www.satochina.com/resource/learning_materials_details.aspx?cid=28.
- [11] 工业和信息化部. 关于发布 800/900MHz 频段射频识别(RFID)技术应用试行规定的通知[EB/OL]. (2021-02-09) [2025-09-10]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/wgj/wjfb/art/2021/art_20a89cc5aba0447b846f84f790e21368.html.
- [12] GRIFFIN J D, DURGIN G D. Complete link budgets for backscatter-radio and RFID systems[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2009, 51(2): 11-25.
- [13] KARTHIKAMANI, KRISHNAN A, BOOPATHI E, et al. RFID-enabled IoT asset management system and machine learning integration[C]//2023 8th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). Coimbatore, India: IEEE, 2023: 1239-1244.
- [14] JONES P, HILLIER D J, COMFORT D, et al. The benefits, challenges and impacts of radio frequency identification technology (RFID) for retailers in the UK[J]. Marketing Intelligence & Planning, 2005, 23(4): 395-402.
- [15] TAM S H, CHOI K C. Indoor item finding based on RSSI and RFID tags[C]//Proceedings of the 2024 5th International Conference on Computing, Networks and Internet of Things. Tokyo, Japan: ACM, 2024: 564-570.
- [16] XIAO R. Exploiting and securing WiFi for pervasive human sensing[C]//Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. Anaheim, CA, USA: ACM, 2025: 645-646.
- [17] ZHANG Y W, LIU Z, WU C, et al. WiCG: heartbeat sensing using COTS WiFi devices with common antenna[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2025, 21(5): 1-30.
- [18] ELMAGROUS A A. Buried wireless sensor node based on internet Wi-Fi and bluetooth technology for precision agriculture[J]. Journal of Computing Sciences in Colleges, 2022, 38(4): 72-73.
- [19] LIAN J, DU C L, LOU J D, et al. EchoSensor: Fine-grained ultrasonic sensing for smart home intrusion detection[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2024, 20(1): 1-24.
- [20] VAN BERLO B, ELKELANY A, ÖZÇELEBI T, et al. Millimeter wave sensing: A review of application pipelines and building blocks[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10332-10368.
- [21] IMPINJ. Impinj R700 RAIN RFID reader[EB/OL]. (2000-03-28) [2025-09-10]. <https://www.impinj.com/zh-cn/products/readers/impinj-r700>.
- [22] 深圳 Hopeland 科技有限公司. 手持式 RFID 读写器-HY820[EB/OL]. (2017-07-19) [2025-09-10]. <https://www.hopelandrfid.com/product/handheld-and-PDA-rfid-reader-wing-HY820.html>.
- [23] NOVANTA. ThingMagic? USB Pro ultra-high frequency RAIN RFID reader[EB/OL]. (2020-11-12) [2025-09-10]. <https://www.jadak.com.cn/?content/163>.
- [24] 华为技术有限公司. AR502H 系列边缘计算物联网关[EB/OL]. (2000-01-11) [2025-09-10]. <https://e.huawei.com/cn/products/routers/ar502h-agile>.
- [25] PADHIARY M, KUMAR A, SETHI L N. Emerging technologies for smart and sustainable precision agriculture[J]. Discover Robotics, 2025, 1(1): 6.
- [26] SOORI M, AREZOO B, DASTRES R. Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review[J]. Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 2023, 3: 192-204.

- [27] PAN Z M, CHEN C, YU Y S, et al. Research on SVM-based RFID indoor location[C]//2023 International Conference on Intelligent Sensing and Industrial Automation. New York, NY, USA: ACM, 2023: 18.
- [28] LIU H, DARABI H, BANERJEE P, et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2007, 37(6): 1067-1080.
- [29] HIGHTOWER J, BORRIELLO G, WANT R. SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength[R]. Seattle: University of Washington, 2000.
- [30] GUI L Q, XU S W, XIAO F, et al. Non-line-of-sight localization of passive UHF RFID tags in smart storage systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(10): 3731-3743.
- [31] WANG J, CHANG L Q, ABARI O, et al. Are RFID sensing systems ready for the real world? [C]//Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. Seoul, Republic of Korea: ACM, 2019: 366-377.
- [32] 王楚豫, 谢磊, 赵彦超, 等. 基于RFID的无源感知机制研究综述[J]. 软件学报, 2022, 33(1): 297-323.
WANG C Y, XIE L, ZHAO Y C, et al. Survey on RFID-based battery-less sensing[J]. Journal of Software, 2022, 33(1): 297-323.
- [33] 周俊儒. 基于RFID的室内定位技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 31-37.
- [34] MOTRONI A, NEPA P, MAGNAGO V, et al. SAR-based indoor localization of UHF-RFID tags via mobile robot[C]//2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Nantes, France: IEEE, 2018: 1-8.
- [35] BERNARDINI F, MOTRONI A, NEPA P, et al. SAR-based localization of UHF-RFID tags in smart warehouses[C]//2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech). Split, Croatia: IEEE, 2020: 1-6.
- [36] WANG J, KATABI D. Dude, where's my card?: RFID positioning that works with multipath and non-line of sight[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 51-62.
- [37] YANG L, CHEN Y K, LI X Y, et al. Tagoram: Real-time tracking of mobile RFID tags to high precision using COTS devices[C]//Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Maui, Hawaii, USA: ACM, 2014: 237-248.
- [38] WANG J, ADIB F, KATABI D, et al. RF-Compass: Robot object manipulation using RFIDs[R]. Cambridge: MIT CSAIL, 2013.
- [39] SHANGGUAN L F, YANG Z, LIU A X, et al. STPP: Spatial-temporal phase profiling-based method for relative RFID tag localization[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(1): 596-609.
- [40] PALIPANA S, PIETROPAOLI B, PESCH D. Recent advances in RF-based passive device-free localisation for indoor applications[J]. Ad Hoc Networks, 2017, 64: 80-98.
- [41] NI L M, LIU Y, LAU Y C, et al. LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID[C]//Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Fort Worth, TX, USA: IEEE, 2003: 407-415.
- [42] HAN J S, QIAN C, WANG X, et al. Twins: Device-free object tracking using passive tags[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(3): 1605-1617.
- [43] WANG J, XIONG J, JIANG H B, et al. D-watch: Embracing "bad" multipaths for device-free localization with COTS RFID devices[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(6): 3559-3572.
- [44] ZHU Y, LI X Y, LIU C H, et al. A comprehensive study of deep video action recognition [EB/OL]. (2020-11-11) [2025-09-10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.06567>.
- [45] DHAMSANIA C J, RATANPARA T V. A survey on Human action recognition from videos[C]//2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET). Coimbatore, India: IEEE, 2016: 1-5.
- [46] HUSSAIN Z, SAGAR S, ZHANG W E, et al. A cost-effective and non-invasive system for sleep and vital signs monitoring using passive RFID tags[C]//Proceedings of the 16th EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services. Houston, Texas, USA: ACM, 2019: 153-161.
- [47] SHIN H, SHIM S, CHO M, et al. Extremely low-resolution RFID vision for real-time and visually-anonymized action recognition[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2025: 3715697.
- [48] LIU C, XIONG J, CAI L, et al. Beyond respiration: Contactless sleep sound-activity recognition using RF signals[J]. Proceedings of the ACM on Interactive,

- Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2019, 3(3): 1-22.
- [49] KRIGSLUND R, DOSEN S, POPOVSKI P, et al. A novel technology for motion capture using passive UHF RFID tags[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2013, 60(5): 1453-1457.
- [50] FENG Y H, HUANG J Y, ZHANG Y W, et al. RF-eye: Commodity RFID can know what you write and who you are wherever you are[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2025, 21(4): 1-26.
- [51] WANG J, VASISHT D, KATABI D. RF-IDraw: Virtual touch screen in the air using RF signals[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(4): 235-246.
- [52] WEI T, ZHANG X Y. Tracking orientation of battery-less internet-of-things using RFID tags: Demo [C] // Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York City, NY, USA: ACM, 2016: 483-484.
- [53] YANG C, WANG X Y, MAO S W. RFID-based 3D human pose tracking: A subject generalization approach[J]. Digital Communications and Networks, 2022, 8(3): 278-288.
- [54] SHANGGUAN L F, JAMIESON K. Leveraging electromagnetic polarization in a two-antenna whiteboard in the air[C] // Proceedings of the 12th International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies. Irvine, California, USA: ACM, 2016: 443-456.
- [55] MA Z J, ZHANG S G, LIU J, et al. RF-Siamese: Approaching accurate RFID gesture recognition with one sample[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(1): 797-811.
- [56] WANG C Y, LIU J, CHEN Y Y, et al. Multi-touch in the air: Device-free finger tracking and gesture recognition via COTS RFID[C] // IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2018: 1691-1699.
- [57] WANG Y W, ZHENG Y Q. Modeling RFID signal reflection for contact-free activity recognition[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2018, 2(4): 1-22.
- [58] MUSA P, SUGERU H, WIBOWO E P. Wireless sensor networks for precision agriculture: A review of NPK sensor implementations[J]. Sensors, 2024, 24(1): 51.
- [59] LU Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2017, 6: 1-10.
- [60] RAY P P. Internet of Things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction[J]. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 2017, 9(4): 395-420.
- [61] WANG J, ABARI O, KESHAV S. Challenge: RFID hacking for fun and profit [C] // Proceedings of the 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New Delhi, India: ACM, 2018: 461-470.
- [62] WANG J, CHANG L Q, AGGARWAL S, et al. Sustainable and low-cost greenhouse soil moisture monitoring using battery-free RFID sensors[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2025, 21(2): 1-28.
- [63] WANG J, CHANG L Q, AGGARWAL S, et al. Soil moisture sensing with commodity RFID systems[C] // Proceedings of the 18th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services. Toronto, Ontario, Canada: ACM, 2020: 273-285.
- [64] WANG J, XIONG J, CHEN X J, et al. TagScan: Simultaneous target imaging and material identification with commodity RFID devices[C] // Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Snowbird, Utah, USA: ACM, 2017: 288-300.
- [65] XIE B B, XIONG J, CHEN X J, et al. Tagtag: Material sensing with commodity RFID[C] // Proceedings of the 17th Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, NY, USA: ACM, 2019: 338-350.
- [66] YANG L, LI Y, LIN Q Z, et al. Making sense of mechanical vibration period with sub-millisecond accuracy using backscatter signals [C] // Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York City, NY, USA: ACM, 2016: 16-28.
- [67] XIE B B, XIONG J, CHEN X J, et al. Exploring commodity RFID for contactless sub-millimeter vibration sensing[C] // Proceedings of the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Virtual Event Japan: ACM, 2020: 15-27.
- [68] iClicker. Student response system features and login guide[EB/OL]. (2004-05-04) [2025-09-10]. <https://www.iclicker.com>.
- [69] CHANG L Q, WANG J, ABARI O, et al. ID-Clicker: A battery-free in-class response system using RFID tags[C] // 2020 IEEE/ACM Fifth International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation

(IoTDI). Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2020: 238-244.

[70] CHAMUNORWA M, MÜLLER H, BOLL S. Enhancing smart home user experience: A study of everyday objects for smart home control[J]. Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 2025, 9(5): 1-29.

[71] MAHMOOD A, WANG J X, HUANG C M. Situated understanding of errors in older adults' interactions with voice assistants: A month-long, in-home study [EB/OL]. (2024-09-23) [2025-09-10]. <https://arxiv.org/abs/2403.02421>.

[72] WANG J, LI J Y, MAZAHERI M H, et al. Sensing finger input using an RFID transmission line[C] // Proceedings of the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Virtual Event Japan: ACM, 2020: 531-543.

[73] KATSURAGAWA K, WANG J, SHAN Z Y, et al. Tip-Tap: Battery-free discrete 2D fingertip input[C] // Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. New Orleans, LA, USA: ACM, 2019: 1045-1057.

[74] Heal Force. Easy ECG monitor-Prince 180B [EB/OL]. (1999-11-03) [2025-09-10]. <https://en.heal-force.com/prince-180b1-portable-ecg-monitor.html>.

[75] GEDDE S J, VINOD K, WRIGHT M M, et al. Primary open-angle glaucoma preferred practice pattern® [J]. Ophthalmology, 2021, 128(1): 71-150.

[76] LI L, SHANG B, WU Y, et al. Cyclops: A nanomaterial-based, battery-free intraocular pressure (IOP) monitoring system inside contact lens[C] // Proceedings of the 21st USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. Santa Clara, CA, USA: USENIX Association, 2024.

(编辑 李 静)

作者简介



王举,西北大学计算机学院(软件学院)教授,博士生导师,国家级高层次青年人才计划入选者。致力于物联网、人工智能、无线网络与系统研究,先后获得2017年中国计算机学会CCF优秀博士学位论文奖、2019年陕西省高等学校科学技术一等奖等奖励。曾任加拿大三星人工智能研究院高级研究员,博士后访学加拿大滑铁卢大学。研究成果发表在ACM MobiCom、IEEE INFOCOM、ACM UIST、ACM Ubicomp/IMWUT、ACM/IEEE ToN、IEEE TMC等CCF-A类旗舰会议及期刊上,授权国内技术发明专利25件、美国技术发明专利6件。主持和参与了多项国家级和加拿大国家研究委员会(NRC)的科研项目,并与华为诺亚方舟实验室、三星人工智能研究院等著名企业有深度合作。