

基于 RFID 的无源感知机制研究综述^{*}

王楚豫¹, 谢磊¹, 赵彦超², 张大庆^{3,4}, 叶保留¹, 陆桑璐¹

¹(计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学), 江苏 南京 210023)

²(南京航空航天大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

³(高可信软件技术教育部重点实验室(北京大学), 北京 100871)

⁴(北京大学 计算机学院, 北京 100871)

通信作者: 谢磊, E-mail: lxie@nju.edu.cn



摘要: 随着物联网技术的飞速发展与广泛部署, 物联网领域的应用需求逐步从“万物互联”转变成“人-机-物”的感知融合. 在众多感知技术之中, 射频识别技术 (radio frequency identification, RFID) 作为物联网领域的核心技术之一, 由于标签的轻量级、可标记、易部署等特征, 成为“无源感知”的重要媒介. 为深入剖析无源感知的研究方法, 了解当前无源感知的研究进展, 以基于 RFID 的无源感知研究为主要切入点, 根据感知研究的一般流程, 从感知渠道、感知方法、感知范畴以及感知应用这 4 个层面对近年来基于 RFID 的无源感知研究工作进行阐述和分析. 我们着重在各个层面上分析相关技术的研究进展, 比较不同技术在感知应用中的优势和劣势, 总结当前阶段无源感知的主要研究趋势, 并对未来发展方向进行展望.

关键词: 射频识别技术; 无源感知; 信号处理; 无线感知

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 王楚豫, 谢磊, 赵彦超, 张大庆, 叶保留, 陆桑璐. 基于 RFID 的无源感知机制研究综述. 软件学报, 2022, 33(1): 297–323. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6344.htm>

英文引用格式: Wang CY, Xie L, Zhao YC, Zhang DQ, Ye BL, Lu SL. Survey on RFID-based Battery-less Sensing. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2022, 33(1): 297–323 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6344.htm>

Survey on RFID-based Battery-less Sensing

WANG Chu-Yu¹, XIE Lei¹, ZHAO Yan-Chao², ZHANG Da-Qing^{3,4}, YE Bao-Liu¹, LU Sang-Lu¹

¹(State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210023, China)

²(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

³(Key Lab of High Confidence Software Technologies (Peking University), Ministry of Education, Beijing 100871, China)

⁴(School of Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: With the rapid development and deployments of the Internet of Things (IoT) technology, the demands of IoT applications have changed from the connections of the ubiquitous passive objects to the fusion among “human-computer-objects”. As one of the key technologies in IoT, radio frequency identification (RFID) becomes one significant intermediary of battery-less sensing, due to the lightweight, labelling, and easy deployment of the RFID tags. In order to understand the research progress and methods, this study focuses on the battery-less sensing research based on RFID technology. Particularly, this paper describes and analyzes the research work on four aspects: signal sources, sensing modes, sensing targets, and application scenarios, according to the working flow of sensing research. This paper introduces the research progress in RFID-based sensing from these four aspects, and also discusses the advantages and disadvantages of different technologies among the four aspects. Finally, the existing research is summarized and promising directions are presented for future research.

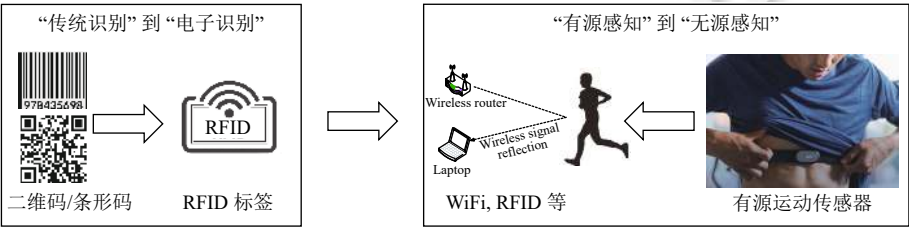
* 基金项目: 国家自然科学基金 (61902175, 61872174, 61832008, 61832005); 江苏自然科学基金 (BK20190293, BK20200067); 北大百度基金 (2019BD005)

收稿时间: 2020-12-15; 修改时间: 2021-01-13; 采用时间: 2021-04-12; jos 在线出版时间: 2021-05-20

Key words: RFID; battery-less sensing; signal processing; wireless sensing

1 引言

近年来,随着物联网、工业互联网以及工业 4.0 等一系列智能化概念的提出,新型的计算模式与感知技术被充分应用于生产生活中.而在这些技术中,射频识别技术 (radio frequency identification, RFID) 作为条形码以及二维码的替代产物,已经成为物联网应用的核心支撑技术之一,在学术界与工业界得到了广泛关注.如图 1 所示,RFID 标签由于无源传输、远距离通信以及唯一标识等特点,替代条形码,被广泛部署在日常物体之上,应用于物流管理、目标检测、安全访问控制等一系列智能化应用中,为人们的生活与工作提供更加便捷的智能化体验.



RFID从“识别”到“感知”的蜕变

图 1 基于 RFID 的感知演进历程

在众多智能化应用中,智能感知是连接计算机世界与物理世界的关键桥梁,是其他智能应用的重要基石.如图 1 所示,传统的智能感知往往使用专用传感器对特定的感知目标进行测量,实现精准的物理世界感知.例如,智能手机与智能手环等利用灵敏度与准确度较高的专用运动感知模块^[1]进行运动感知.而随着智能设备的广泛使用,基于泛在智能设备、以非接触方式进行的无源感知逐渐受到关注,成为学术界的一大研究热点.例如,声音感知只需麦克风与扬声器即可完成感知^[2],WiFi 等日常环境中广泛部署的无线设备,为用户提供了多维度的感知信息^[3,4],可见光感知则能够利用环境中广泛部署的可见光源进行用户行为识别^[5].无源感知网络,是指节点自身不配备或不是主要依赖自身的电源设备供电,而是通过从环境中获取能量支撑其计算、感知和通信与组网^[6].而在无源感知研究中,RFID 由于标签的可标记性,完美地解决了传统无源感知技术无法区分多目标的问题;同时,标签价格低廉^[7]使得可以通过在日常物体上广泛部署标签进行泛在感知,成为感知万物的一种有效方式.如图 1 所示,基于 RFID 的无源感知技术实现了 RFID 从“识别”到“感知”的蜕变,是可标记无源感知中的典型技术,成为近年来无源感知的一个热门研究领域.

基于上述认识,本文关注基于 RFID 的无源感知技术研究,以可标记无源感知的核心技术为主要出发点,分别从无源感知应用研究中的感知渠道、感知方法、感知范畴以及感知应用这 4 个层面对 RFID 技术的感知研究进行剖析与解读.一般而言,实现这样的无源感知应用需要在这 4 个层面分别满足:(1)感知渠道信号稳定,(2)感知方法部署可行,(3)感知范畴目标准确,(4)感知应用场景普适.首先,感知渠道是指感知所使用的信号特征来源,在实际环境中无线信号容易受到各种环境噪音的干扰,选取合适稳定的感知渠道能够为鲁棒的感知应用提供最重要的基础保障;其次,感知方法是指感知所采取的信号模型以及场景部署等,对于不同的感知应用需求,构建合理有效的感知方法,部署切实可行的感知设备,是感知应用能够实际使用的关键;再次,感知范畴是指感知方法所对应的算法目标,确定真实有效的感知范畴,并实现准确鲁棒的目标感知是智能感知技术中的核心问题;最后,感知应用是指感知技术在实际生活中的应用场景,通常需要感知应用具有一定的泛化性,能够解决一类的应用场景.综上所述,挖掘出泛化的应用需求,并进行准确的感知,是基于 RFID 无源感知研究的最终目的.

深入研究这 4 个层面,我们发现这 4 个层面紧密相关,且相互影响:感知推理模型决定了设备的部署方式与感知渠道;感知应用的需求决定了感知范畴的选取;同时,感知应用的场景限制了感知方法中设备部署的可行性;感知范畴的准确性依赖于感知方法的选择等.因此,在实际感知研究中,这 4 个层面是相互关联、相互依存.在设计

感知应用时需要结合多种因素考虑, 从而实现更加可靠的感知应用。

本文接下来将从 RFID 感知的机遇和挑战展开, 对感知渠道、感知方式、感知范畴和感知应用依次介绍。首先, 第 2 节就当前 RFID 感知中的核心问题以及存在的机遇和挑战进行阐述, 并根据无源感知的 4 个层面对其机遇和挑战进行分析; 第 3 节针对感知渠道进行详细介绍, 分析了感知技术演变过程中, 研究人员对不同感知渠道的理解; 第 4 节针对感知方法的各个部分进行介绍, 详细阐述了不同的设备部署方式、标签绑定方式、感知驱动方式等在感知研究中的优劣势; 第 5 节针对不同的感知范畴进行阐述, 介绍了不同感知范畴之间的关联与区别; 第 6 节针对感知应用进行介绍, 描述了不同感知技术的实际应用类型; 第 7 节展望了 RFID 感知技术的未来; 最后对本文进行总结。

2 问题与挑战

随着射频识别技术的蓬勃发展, 大量的实际应用将 RFID 标签作为二维码的替代产品, 用于普通物体的远距离非接触识别, 进一步促进了基于 RFID 技术的感知应用发展。如图 1 所示, RFID 已经实现了从“识别”到“感知”的蜕变, 成为智能感知的一项关键技术。相比于传统的有源感知技术 (例如, 智能手机、智能手环等有源传感器) 以及其他无源感知技术 (例如, WiFi 无线信号、可见光信号等), RFID 技术由于其独特的反向散射通信原理 (back scattering communication) 为无源感知应用提供了以下机遇。

低成本: RFID 标签 (主要指超高频 UHF 标签) 由于无源特性, 无需外接电池供电, 且通常采用印刷电路进行大规模生产, 因而价格低廉, 适合大规模部署与应用。

高敏感: 由于反向散射的通讯机制, RFID 标签的多种信号特征对环境变化十分敏感, 能够用于感知不同的目标信息, 为不同的应用需求都提供了感知可能。

强关联: 多个 RFID 标签可以构成标签阵列, 标签间存在信号的关联与冗余。合理高效地利用标签之间的信号关联能够拓展 RFID 标签的感知能力, 从而形成 RFID 技术特有的感知方法。

易定制: RFID 标签的天线能够进行简单改造, 而并不会显著影响标签的通信性能, 这为各种定制化的感知需求提供了便利, 为可标记无源感知带来重要机遇。

尽管如此, 为了使用 RFID 标签进行准确有效的无源感知, 基于 RFID 技术的感知应用往往需要克服多种挑战性问题。其中主要的挑战性问题总结如下:

特征难区分: 针对不同的感知需求, 如何有效区分感知信号特征, 构建模型并抽取准确的信号进行感知? 传统的有源传感器往往针对特定的感知需求进行设计制造, 因而只能用于感知某一特定目标。与此不同, RFID 标签主要是针对物体识别进行设计的, 感知只是其信号特征的衍生功能, 环境中的多种变化因素都会对信号产生影响。例如, 若将标签贴在人体胸部位置, 不仅人的移动会影响标签信号, 手臂的挥动、呼吸时胸部的起伏、甚至是心脏的跳动都会影响标签的信号。因此, 如何从复杂的信号变化之中, 抽取出有效的信号特征, 并实现目标的行为感知, 是基于 RFID 无源感知应用中的一个重要问题。

噪音难量化: 在实际的感知应用中, 如何应对环境的动态变化, 设计构建准确鲁棒的感知系统, 使其在各种环境中均能完成感知需求? 相比于室外的感知环境, 室内环境更加复杂多变, 因此对感知应用的稳定性也产生巨大影响。例如, 无关人员的走动会动态地改变多径传播路径, 影响感知信号; 家具等设施的位置会改变室内静态的多径传播路径, 影响感知的信号。因此, 如何构建感知模型并设计有效的感知算法, 来解决不同感知环境带来的信号干扰是另一个挑战性问题。

干扰难去除: 由于无源 RFID 标签的通信能力弱于传统有源设备, 基于 Aloha 方式的通信协议造成标签读取的不稳定, 如何设计算法应对感知过程中标签读取在时间、空间、频率等多个维度的干扰? 一方面, 由于 RFID 系统采用了基于帧-时隙的 Aloha 通信协议, 由阅读器来主导完成信号的传输, 这导致多标签选择同一时隙传输时产生信号冲突, 造成了时间维度上的信号干扰。另一方面, 邻近的标签虽然在时间上是分开读取的, 但是空间上邻近标签之间具有信号干扰。最后, 在实际应用中, 由于标签的反向散射信号十分微弱, 极易受到邻近频带其他信号的干扰, 造成感知信号的不稳定。因此, 如何针对特定应用背景, 有效解决这些干扰问题在 RFID 感知系统中也是一

个挑战性问题.

一个传统的基于 RFID 技术的无源感知生态系统,通常包含感知渠道、感知方法、感知范畴以及感知应用 4 个部分. 为了更加深入准确地分析并利用这些潜在的机遇与挑战,如图 2 所示,我们将基于 RFID 技术的感知研究分成感知渠道、感知方法、感知范畴以及感知应用 4 个部分,从这 4 个角度对当前的机遇与挑战问题进行分析与解读. 这 4 部分从感知应用设计的 4 个方面对“用什么感知”“如何感知”“感知什么”以及“为什么感知”进行了阐释,以便我们能够从各个层面更加清晰明确地理解这些机遇与挑战在感知应用设计中发挥的作用.

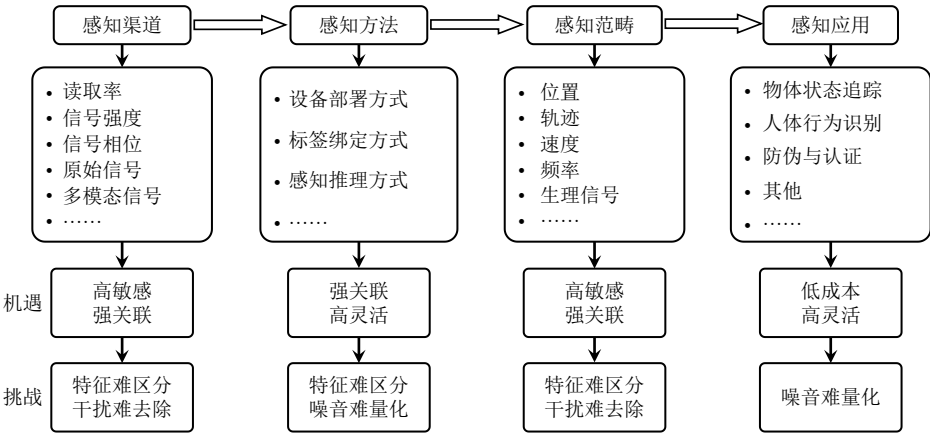


图 2 基于 RFID 的无源感知机遇与挑战

图 2 中,感知渠道主要指感知所用的信号特征.就 RFID 技术而言,标签的信号特征与距离、角度等信道参数具有稳定的函数关系,标签信号特征与信道参数间的高敏感性与强关联性为基于 RFID 的无源感知提供了机遇.但一方面,多种行为变化对特定信号特征均有影响(如呼吸和心跳会同时影响标签信号),造成多种特征难以区分;另一方面,RFID 的随机读取方式造成信号采样不稳定,采样干扰难去除.

感知方法主要指感知过程使用感知渠道的具体方式,包括不同感知设备的部署方式、感知技术的工作原理等等.就 RFID 技术而言,RFID 标签适合灵活的多标签部署,且多个标签间信号具有较强的关联性,为 RFID 感知提供了机遇;但一方面,多个标签信号特征同时受多种行为影响,难以统一区分;另一方面,真实环境中的噪音信号以及多标签间的相互干扰十分复杂,难以通过统一模型进行量化去除.

感知范畴主要指感知工作在技术层面所最终需要实现的感知目标.就 RFID 技术而言,RFID 的信号特征与标签位置、多径反射等环境因素敏感度高与关联性强,为多种范畴的目标感知提供了机遇.但依然存在诸多挑战,一方面,感知范畴内的多种目标状态变化会对同一种信号特征产生影响,难以有效区分;另一方面,标签的随机读取带来不稳定的标签读取,这为实时的连续行为感知带来巨大挑战.

感知应用主要指感知工作应用层面所适用的具体场景.就 RFID 技术而言,无源标签的通用性为实际应用提供了成本低廉、部署灵活、改造方便等优势,为感知应用带来了机遇.但感知应用场景中也存在一些挑战,在真实复杂环境下的 RFID 应用极易受到多种环境噪音影响,真实环境下的无线噪音难以被有效量化削减.

3 感知渠道

感知渠道主要指该感知技术所使用的信号类型,感知渠道的信号通常被用于感知算法的输入中,感知渠道既包含不同模态的信号(如 RFID 信号与视觉信号),也包含同一模态信号的不同特征(如 RFID 信号中的信号强度、信号相位等).例如,在 WiFi 相关的感知研究中,研究人员就在不断突破传统,从 RSSI 逐渐转移至 CSI,来完成更加细致精确的感知任务^[8].因此在感知系统中,合理灵活地使用不同的感知渠道是实现相应感知系统的关键.在传统 RFID 系统中,RFID 标签的主要用途是通过反向散射机制读取无源标签内部的存储信息,从而实现非接触式的

标签识别, 并获取标签的信号特征. 当前的主流商用 RFID 设备往往提供多种不同的信号特征, 以便用户在读取标签之余, 对标签的状态进行分辨. 而这些不同的信号特征作为感知的基本原料, 为基于 RFID 标签的感知系统提供了诸多可能, 为 RFID 系统实现从“识别”到“感知”的蜕变带来了契机. 通常, 在基于纯 RFID 的感知系统中, 根据射频信号特征所处的网络层级, 可以分成应用层、链路层以及物理层信号特征; 此外, 将 RFID 的感知渠道与其他模态设备的感知渠道相融合进行感知的方式, 我们称之为多模态感知.

3.1 应用层——读取率

在 RFID 系统发展初期, 应用层的标签读取是感知应用中的主要信号来源. 通常, 这一类型的工作主要采取的方式包括概率估算模型以及 Bloom 过滤器.

1) 概率估算模型: 利用时隙-帧 ALOHA 协议的随机性, 可以根据不同时隙的响应情况对标签数目进行估算. 该模型的核心在于如何使用最少的标签读取时隙, 准确地对标签的整体规模进行估算. 例如, Kadialam 等人^[9]提出利用空时隙与冲突时隙的分布情况对标签总数进行估算; 而 Chen 等人^[10]进一步使用全部三种时隙的分布对标签总数进行估算; 此外, Han 等人^[11]创新性地使用第一个标签响应的时隙位置对标签数目进行估算, 避免了整个帧的读取; Shahzad 等人^[12]将标签的响应情况转化成‘0-1’二进制串, 并利用连续二进制‘1’子串的平均长度对标签的规模进行估算; 牛炳鑫等人^[13]提出通过对比真实时隙帧与虚拟时隙帧的差异, 估计每类标签的确实数量, 从而实现 TOP-k 热门标签的快速查询.

2) Bloom 过滤器: 另一类广泛应用于标签读取中的模型是 Bloom 过滤器, 它利用标签响应的伪随机性, 根据帧内时隙的分布情况对标签的存在与否进行感知. 例如, Li 等人^[14]提出了一种基于标签伪随机响应特性的遗失标签检测算法; Qiao 等人^[15]提出了一套高效的轮询协议, 通过使用标签排序进行编码, 降低随机读取的轮询开销, 并进一步采用基于分块的 Bloom 过滤器提高轮询的性能; 而 Chen 等人^[16]进一步提出基于单级哈希以及多级哈希的方式有效降低轮询时间. 此后, 虽然还有一系列工作对标签轮询感知进行细化, 但是整体框架依然基于传统的哈希函数以及 Bloom 过滤器.

小结: 综上所述, 针对基于标签读取率的感知工作, 主要利用以上两种模型, 利用标签响应的随机性进行感知. 由于应用层提供的信息是粗粒度的“读取/丢失”两类标签状态, 因此整体的感知粒度也较粗, 应用形态较为单一, 感知能力也较弱.

3.2 链路层——信号强度与信号相位

随着对 RFID 研究的深入, RFID 标签逐渐突破了传统“识别”设备的局限, 被当做一类特殊的“感知”设备, 基于 RFID 信号特征的无源感知应运而生. 在 RFID 的感知研究中, 被广泛使用的一类信道特征就是链路层的信号特征——信号强度和信号相位.

3.2.1 信号强度

RFID 系统作为一种标准的无线通讯设备, 其中最常见的特征即为信号强度 (received signal strength, RSS). 通常, 基于信号强度的感知技术主要分为信号衰减模型和参考标签模型两大类.

1) 信号衰减模型: 信号强度感知中最直接的方式是构建 RSS 与距离之间的信号衰减模型, 从而直接根据测量的 RSS 值估算出通信距离. 基于通信距离我们可以进一步利用集合关系等对目标进行定位^[17]. 根据 Friis 公式^[18], RFID 系统的接收信号强度 R 与通信距离 r 的信号衰减函数为:

$$R = P_{TX} T_b G_{\text{reader}}^2 G_{\text{tag}}^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^4 \quad (1)$$

其中, P_{TX} 为阅读器的发送功率, T_b 为反向传输信号损失, G_{reader} 为阅读器天线的信号增益, G_{tag} 为标签天线的信号增益, λ 为信号波长. 从式 (1) 中可以看出, 接收信号强度 R 是通信距离 d 的反比例函数, 因此根据信号强度 R 可以估算通信距离. 但是, 在实际环境中 RSS 极易受到多径效应、无线信号噪音、信号吸收等多种环境问题的影响, 最终造成 RSS 的信号衰减模型在实际使用时极不稳定. 为了解决这一问题, 一些研究者使用聚合算法^[19]、动态更新映射方式^[20]以及多路传输模型^[21]来弥补 RSS 动态变化的缺陷, 降低基于经验数据的映射误差. 这些方法虽

然提升了定位精度, 但并没有解决衰减模型的本质问题.

2) 参考标签模型: 区别于使用信号衰减函数进行距离估算, 另一类感知方式是基于参考标签模型的测量. 其基本原理在于利用信号指纹在时空关系中的稳定性和特异性, 构建指纹数据库, 在定位时利用数据库内的指纹进行匹配定位. 例如, Deyle 等人^[22]预先收集标签的信号强度值构建相应的 RSS 指纹库, 并以此对目标进行定位; 为了提高指纹库的实时性, Ni 等人^[23]提出一种基于参考标签的目标定位方式, 在监控区域内部署位置已知的参考标签, 实时收集指纹进行定位; VIRE 系统^[24]引入虚拟标签来降低环境中有限参考标签的缺陷; Chen 等人^[25]进一步将其扩展至被动 RFID 系统中, 并通过 RSS 模型对定位精度进行优化; Liu 等人^[26]和 Zhang 等人^[27]利用人体对于参考标签的 RSS 信号干扰, 对人的运动轨迹进行感知; Liu 等人^[28]通过在床上部署标签阵列, 利用不同标签的信号变化, 感知用户的睡姿变化.

小结: 综上所述, 信号衰减模型能够快速根据 RSS 值进行位置估算, 因此部署和实现都相对简单, 但是感知精度比较低, 且极易受到动态变化的环境影响; 而在参考标签模型中, 环境的动态变化能够被参考标签有效捕捉, 因此感知精度更高, 能够达到 30 cm^[25], 但是参考标签的部署开销比较大, 且每次定位需要读取所有的参考标签特征. 表 1 对两者的具体差异进行了比较.

表 1 信号强度感知方法比较

方法	代表工作	精度 (m)	优势	劣势
信号衰减模型	[19–21]	1	简单	泛化性弱
参考标签模型	[22–25]	0.3	泛化性强	部署困难

3.2.2 信号相位

虽然 RSS 能够对目标的位置进行感知, 但由于 RSS 信号粒度粗, 且容易受到周围环境的影响, RSS 往往只适用于精度要求较低的感知场景中. 除了 RSS 外, 链路层的信号相位被广泛使用, 成为 RFID 系统的另一主要信号特征. RFID 系统中的相位信息与传输距离 d 和信号的载波波长 λ 相关:

$$\theta = \left(\frac{d}{\lambda/2} \cdot 2\pi + \theta_{\text{offset}} \right) \bmod 2\pi \tag{2}$$

其中, RFID 相位的取值范围在 $0 \sim 2\pi$ 间周期变化函数; θ_{offset} 表示硬件工艺造成的相位偏移. 基于信号相位的工作通常可分为基于单标签相位以及基于多标签相位的感知两大类.

1) 单标签相位: 信号相位最简单的使用方式是直接利用单个标签的信号相位进行感知. 对比信号强度与信号相位, 整体上相位的感知粒度与敏感度都比信号强度更高, 但是, 相位的周期性导致标签位置的不确定性. Yang 等人^[29]提出使用标签相位的连续变化周期估算标签的振动频率, 他将标签的振动偏移通过旋转轴转化为相位的变化, 对振动周期进行感知. 由于标签振动产生的相位变化在半波长之内, 单标签能够感知标签的振动, 但单标签无法确认相位的周期变化, 所以无法进行更加复杂的标签感知.

2) 多标签相位: 由于单标签相位难以唯一确定标签的位置状态, 许多研究工作使用多个标签, 构成一组相位对目标状态进行感知. 例如, Nikitin 等人^[30]提出基于多天线的相位差模型, 使用多天线的到达信号相位差对目标方向进行感知; Miesen 等人^[31]充分利用雷达感知中的技术, 采用类合成孔径雷达技术 (synthetic aperture radar, SAR) 对目标进行准确定位; Azzouzi 等人^[32]提出利用天线阵列中相邻天线基带信号的相位差构建入射角模型 (Angle of Arrival, AoA) 对目标进行定位估算; Yang 等人^[33]使用相位差分的形式解决了单个标签的固有相位偏差, 设计了基于差分全息图的高精度位置估算方法; Wang 等人^[34]部署 RFID 多天线, 利用多天线的相位组合, 模拟波束成型对目标进行定位; Lin 等人^[35]、Bu 等人^[36]进一步对多相位模型进行优化, 用于不同场景中; Shangguan 等人^[37]在位置感知中引入了调频技术; Wei 等人^[38]将多标签方式用于角度感知; Ding 等人^[39]和 Wang 等人^[40]将其用于人体行为感知.

小结: 基于 RFID 相位信号的无源感知极大地改善了 RSS 由于敏感度低、信号噪音大等影响造成的定位精度

低等问题, 在 RFID 感知中实现了突破性的转折. 表 2 对各类基于相位感知的代表工作进行小结, 对比表 1, 我们不难发现相位感知精度远高于 RSS 感知, 且感知技术更加成熟.

3.3 物理层——原始信号

通常, 复杂的多径被刻画成多条原始信号的线性叠加, 因此, 为了有效刻画多径等信号反射, 研究人员在 RFID 系统中引入原始信号. 一般, 我们可以将原始信号分成合成信号与物理层信号两大类.

1) 合成信号: 主要指将商用阅读器所提供的 RSS 信号以及相位信号根据原始信号的模型进行合成. 假设, 阅读器所测得的信号强度为 r dBm, 所测量获得的相位为 θ 弧度, 则可以获得合成复数信号为: $S = \alpha e^{j\theta}$. 其中, j 为单位虚数, S 表示由信号强度和相位所组成的复数信号, α 表示由信号强度计算获得信号幅度. 虽然它无法从根本上反映物理层的传输情况, 但依然能够刻画信号在多径传输过程中的变化.

基于这一 IQ 平面内的合成信号特征, 研究人员进行了大量的相关研究. 例如, Yang 等人^[41]首先提出了使用 RFID 标签阵列进行穿墙感知的定位方式, 如图 3 所示, 他们利用墙外预先部署的标签对运动用户进行位置和简单的行为感知. 虽然此前 WiFi 相关的非绑定式感知已经有一定发展^[42,43], 但 Yang 等人利用商用的 RFID 系统, 构建合成信号的反射传播模型进行感知, 实现了新的突破. 他利用事先收集的自由空间内的视距信号, 根据信号的差分, 从接收信号中抽取标签的反射信号进行感知. 此后, Ding 等人^[44]利用手臂对于标签阵列的影响, 根据合成信号实现了简单的笔划感知; Wang 等人^[45]进一步优化感知模型, 通过有效地部署标签阵列, 实现对于手指微动作的有效感知以及轨迹追踪.

表 2 相位感知工作比较

	代表工作	感知模型	感知粒度
单标签相位	Tagbeat ^[29]	压缩感知	0.36 ms
多标签相位	Hologram ^[31]	全息图+SAR	30 cm
	Tagoram ^[33]	差分全息图+SAR	6 cm
	RF-IDraw ^[34]	入射角模型	4.9 cm
	RF-Kinect ^[40]	三维入射角模型	4.6 cm
	Tagball ^[35]	扩展卡尔曼滤波	1.5 cm
	RF-Dial ^[36]	双天线+平行波	0.6 cm
	Tagyro ^[38]	相位差	4°

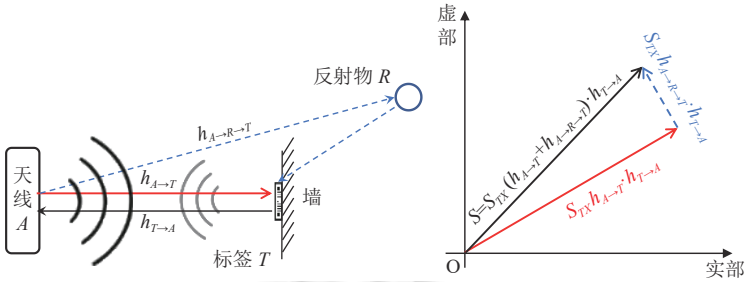


图 3 多径反射后的射频信号

2) 物理层信号: 主要指从无线设备中直接获取的原始信号. 随着软件无线电 (software defined radio) 技术的发展, 其开发平台 USRP (universal software radio peripheral) 成为一类主流的物理层信号获取平台, 许多研究人员基于软件无线电技术对物理层信号的感知模型进行探索. 图 4 展示了在实验室环境下使用 USRPn210 获取的 RFID 原始信号. 在众多物理层信号的感知工作中, Wang 等人^[46]提出的 PinIt 系统, 利用合成孔径雷达技术, 通过融合不同位置的物理层信号, 实现位置感知; Wang 等人^[47]利用 USRP 测量包裹上贴有的 RFID 标签物理层信号特征, 判

断包裹内物品是否被破坏; Wang 等人^[48]通过对物理层信号中的冲突信号分解, 从中提取出相位信息, 对大规模移动标签进行检测; 此外还可以对物理层信号进行分解, 提高标签信号的吞吐率^[49,50]; Zanetti 等人^[51]和 Han 等人^[52]利用 USRP 去捕获标签在制造过程中的不完美所带来的物理层信号特征, 对标签的唯一性进行识别与验证.

小结: 对比链路层 RSS 和信号相位, 原始信号能够捕捉到更加细微的动作变化, 能够敏锐地识别多种多径效应传输的变化, 因此被用于敏感度需求较高的感知场景中. 此外, 物理层信号包含更加丰富的环境信息以及传输信息, 除无源感知外, 还能够对标签设备以及信号冲突等多种问题进行研究.

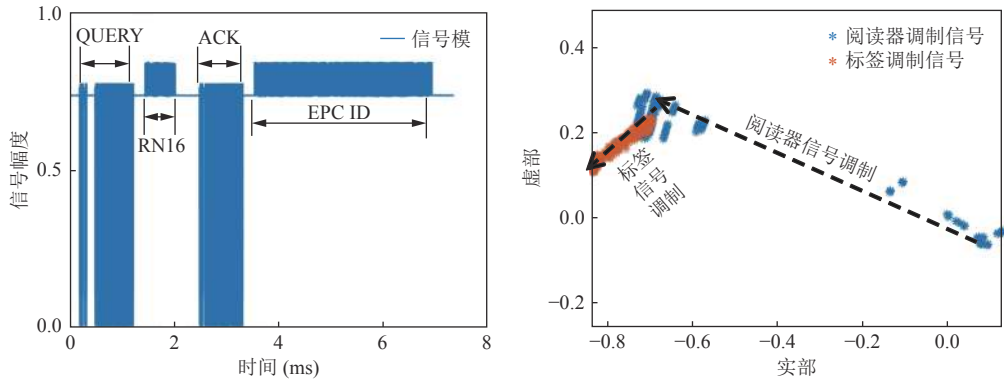


图4 USRP 采集的物理层信号特征

3.4 RFID 信号的拓展——多模态感知

除了单纯地使用 RFID 信号外, 研究人员进一步将 RFID 与其他感知信号进行融合, 实现多模态感知. 针对 RFID 系统而言, 多模态感知即融合 RFID 信号特征与其他感知设备信号特征进行感知.

当前, 较为常见的多模态感知是将 RFID 标签与计算机视觉技术相结合: RFID 用于识别, 而计算机视觉则通过捕捉的图像, 分析物体的运动状态, 多模态感知将二者融合, 对物体的运动状态以及环境上下文等作出综合的判断. 例如, Deyle 等人^[22]提出将 RFID 与摄像头结合, 利用 RFID 生成的 RSS 图像与摄像头捕捉的物体进行匹配; Xie 等人^[53,54]根据标签相位对目标标签的位置进行感知, 同时利用景深摄像头对目标物体的位置进行追踪, 为摄像头内的物体提供标签内的文本信息; Li 等人^[55]利用 RFID 结合景深摄像头对移动目标进行匹配, 根据移动目标在图像中的变化与 RFID 标签的信号变化进行动态匹配; Wang 等人^[56]使用双天线环境下的多径效应与室内噪音等信号干扰, 从而有效缓解实际环境对于 RFID 信号的影响; Duan 等人^[57]提出将 RFID 技术与计算机视觉技术相结合, 从众多移动物品中识别出目标物品, 利用视觉技术有效地防止物品的错误移动等.

小结: 基于 RFID 技术的多模态感知是对 RFID 感知渠道的拓展延伸, 当前主要以结合计算机视觉技术为主, 而与其他模态的感知结合仍然有待研究. 如何有效地通过跨领域的多模态信号融合, 实现更加准确高效的感知应用, 依然是该研究方向的关键问题. 多模态感知的核心技术在于挖掘不同模态信号之间的优劣以及互补性, 利用其他感知信号的优势去补足 RFID 感知信号的不足, 从而实现综合的感知.

3.5 感知渠道小结

近二三十年来, 基于 RFID 技术的无源感知技术得到了飞速的发展, 研究人员在利用不同的信号特征进行感知的研究中都取得了长足的进步. 整体上, 读取率为“识别”到“感知”的蜕变提供了研究线索, 信号强度为“感知”提供了基础解决方案, 相位特征为细粒度感知提供了保证, 而合成信号与原始信号则为细粒度感知提供了可能. 图 5 统计了感知渠道逐步深入的发展趋势.

总体上, RFID 的感知渠道呈现出由表及里的发展趋势. 在早期, RFID 感知渠道集中于应用层信号; 至中期, 感知渠道逐步深入, 在链路层扩散; 发展至今, 感知渠道已经进一步延伸至物理层信号. 目前各类特征信号被广泛使用, 众多技术会穿插使用进行感知, 而高阶感知通常利用复杂度更高、更加底层的信号特征. 其主要原因在于, 读

取率与信号强度难以实现高精度、细粒度的感知,而物理层的原始信号与相位等信号特征能够感知毫米级的动作变化,逐步受到研究人员的关注.我们可以发现,自 2013 年以来,基于 RFID 技术的无源感知在感知精度与感知能力方面都得到了迅速的发展,极大地带动了基于 RFID 技术的感知研究.此外,利用多模态信号的感知技术一直穿插在 RFID 感知研究的演进之中,不断拓展 RFID 系统的感知应用领域.在表 3 中,我们对比了不同的感知渠道在感知中的优劣势.合理选取相应的感知渠道并构建多渠道之间的信号关联,能够有效从信号层区分不同的目标特征,从而为目标的感知提供准确的信号输入.

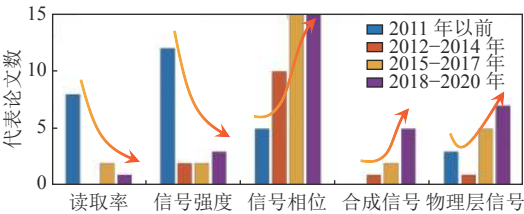


图 5 感知渠道演进小结

表 3 不同感知渠道的优劣势对比

指标	代表工作	优势	劣势
读取率	[11,12,14]	稳定、通用	粒度粗
信号强度	[23,58,59]	通用、距离敏感	受环境影响大
信号相位(合成信号)	[33,34,41,45]	距离敏感、干扰敏感	相位信号跳变、频率相关
原始信号	[46,60]	准确、完整信号	不支持商用设备、数据量大
多模态信号	[53,55,57,61]	全方位、多角度	设备同步、设备部署复杂

4 感知方法

除感知渠道外,在基于 RFID 的无源感知研究中,另一个重要的因素就是感知方法的选择.不同于感知渠道简单的分类方法,感知方法通常涵盖了多个方面.本文接下来分别从硬件、软件这两个层面来介绍感知方法的重要作用:其中针对硬件,我们将从设备部署方式、标签绑定方式这两点介绍硬件的选择部署以及硬件和感知对象的绑定关联;针对软件选型,我们从感知推理方式进行分析如何从感知渠道得到感知结果.

4.1 设备部署方式

在 RFID 系统的众多参数设置中,首先需要考虑的就是硬件的选择与部署:我们根据天线的个数以及状态分成单天线、双天线、多天线以及动态天线这四类进行介绍,阐述不同天线数量搭配各种标签部署的感知研究.

4.1.1 单天线

单天线的感知通常被认为是最简单的部署方式,该方式无需考虑天线的摆放位置等即可对目标进行有效地感知.例如, Yang 等人 [29] 和 Li 等人 [62] 仅利用一个天线持续读取单个标签的信号变化,从而获取标签的振动周期等; Pradhan 等人 [63] 使用单天线感知手指对于不同标签的触摸变化.由于单个天线获取的信号维度较少,许多研究人员进一步部署标签阵列来提升感知的位置: Shangguan 等人 [7] 提出将多个标签部署在日常物品上,使用单天线对物体的运动轨迹进行追踪感知; Wei 等人 [38] 将多个标签部署在日常物品上,利用多个标签间的信号关联进行角度感知; Duan 等人 [64] 拓展了单标签振动感知,利用双标签实现了动态环境下的振动感知,解决单标签抗干扰的问题.

小结:综上所述,单个天线一方面能够从时间维度根据信号变化进行感知;另一方面能够依靠标签阵列的部署获取空间的信号关联进行感知.但是总体上,单个天线的简单部署依然会限制感知的维度,使得其感知的应用场景较为受限.

4.1.2 双天线

双天线作为单个天线的拓展,近年来被越来越多的研究人员所关注.一方面,两个天线之间的距离关联能够构建空间感知模型,进行信号互补;另一方面,双天线提供了更多维的信号渠道,为感知提供更多机遇.例如, Wang 等人^[34]提出基于双天线的定位方案,利用双天线获取的信号相位差,构建图 6 所示 AoA 模型,对目标标签的方向角度进行估算. AoA 模型巧妙地在信号相位与入射角之间搭建了一道桥梁,被广泛应用: Liu 等人^[65]优化双天线的感知方式,构建双曲线模型,利用多条双曲线的重合区域来估算标签的位置; Wang 等人^[40]在肢体上部署多个标签,使用双天线获取标签的相位,利用相位变化来追踪人体骨骼运动;此外,利用正交部署的一组双天线, Bu 等人^[36]与 Gong 等人^[66]利用平行波的信号特性,挖掘双天线相位信号之间的关联与区别,实现目标的旋转平移追踪.

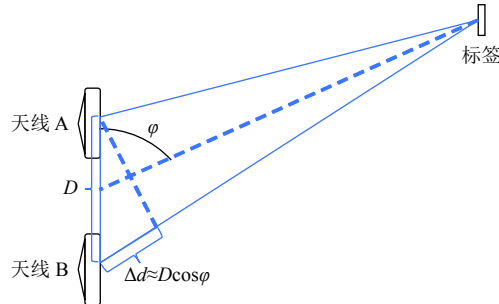


图 6 AoA 感知模型

小结:综上所述,双天线模型能够极大地拓展单天线感知的维度问题,提升空间感知的精度.虽然,双天线部署与双标签是等价的,但由于 AoA 模型精度受到设备间距的影响,双天线以较大间距进行部署时能够有效提升感知精度.因此,双天线受到诸多研究团队的青睐,在感知研究中起到关键作用.

4.1.3 多天线

将天线数目进一步拓展,可以利用天线构建阵列进行更加复杂地感知.一方面,多个天线可以从更多的角度对标签进行读取,因此获得的信号是和具体天线的位置相关联的;另一方面,利用雷达的相关知识,对多天线的信号进行融合感知.例如, Lin 等人^[35]利用 4 个天线对多个标签所部署的物体在空间中的状态变化进行追踪; Ni 等人^[23]和 Zhao 等人^[24]利用多天线构建信号指纹,实现目标的有效定位; Wang 等人^[67]将多个天线构建天线阵列,利用天线阵列间的信号关联对区域内的用户位置进行感知.

小结:多天线能够进一步扩充双天线的信号维度,提升其感知精度,因此也曾受到许多研究人员的重视,并研究得到众多优秀的感知方法.但是,多天线感知在部署开销和设备成本上相比单天线和双天线都有所增加,在系统的实用性上有所降低.

4.1.4 动态天线

除了静态的天线部署外,另一个比较常用的感知方法是使用动态天线对目标进行感知,即利用移动天线或者旋转天线对目标进行感知.相比于静态的感知系统,动态天线实际上是可以转化为多个天线在不同位置或者以不同方向进行读取,从而获得更加丰富的数据维度,对目标进行综合感知.图 7 展示了两类典型的动态扫描方式.在动态天线感知中, Miesen 等人^[31]、Parr 等人^[68]、Yang 等人^[33]、Wang 等人^[46]结合合成孔径雷达技术进行综合位置感知; Shangguan 等人^[69]、Liu 等人^[70]、Zhang 等人^[71]、Bu 等人^[72]则利用移动中的相位变化进行相对位置感知; Wang 等人^[73]利用滑轨上的移动天线对目标物体的三维轮廓刻画.在旋转扫描感知中, Nemmaluri 等人^[61] Wang 等人^[74]在水平面内移动天线进行位置感知; Liu 等人^[59]、Wang 等人^[75]则旋转线性极化天线,进行标签的方向角度感知.

小结:综上所述,动态天线感知已经受到越来越多的关注,在某些特定场景之下往往能发挥静态天线所不具备的感知能力.相比于静态天线,动态天线主要依靠其运动特征,实现了单个天线在不同位置的采样,因此动态天线往往能够获得更高的信号特征维度.但是动态天线却损失了采样的实时性,动态天线的移动扫描或者旋转扫描都

需要消耗更多的时间, 因此更加适合静态目标的感知工作.

4.1.5 设备部署小结

图 8 统计了近年来的主要研究工作, 从发展历程来看, 设备部署方式经历了 3 个曲折的过程. (1) 在 RFID 感知初期, 为了获得更多可靠的信号特征, 他们通常使用较多的天线来实现高精度的感知技术. (2) 随着 RFID 技术的深入以及雷达等技术的融合, 仅使用少量 RFID 天线就能够对标签进行厘米级的准确定位, 因此, 单天线感知逐渐增加, 而多天线感知在减少. 同时, 基于多标签的感知逐步替代基于单标签的感知, 成为主流的部署方式. 其中 2015–2017 年的单标签感知工作集中于防伪认证中. (3) 目前, 随着感知应用场景的日益复杂, 包括移动天线在内的双天线感知方式受到更多关注, 以获取高维的感知特征; 而多标签有效解决了天线有限的问题, 成为一个研究热点, 为感知方法提供更加丰富的信号维度.

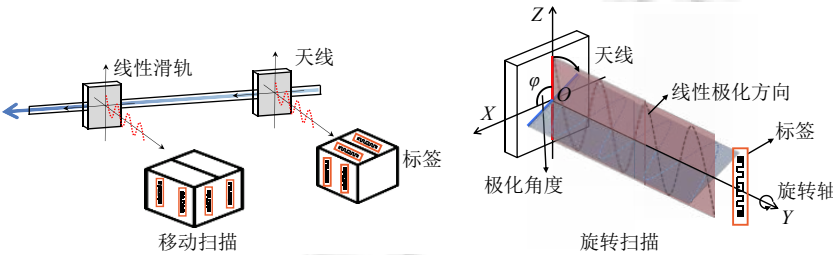


图 7 动态天线感知

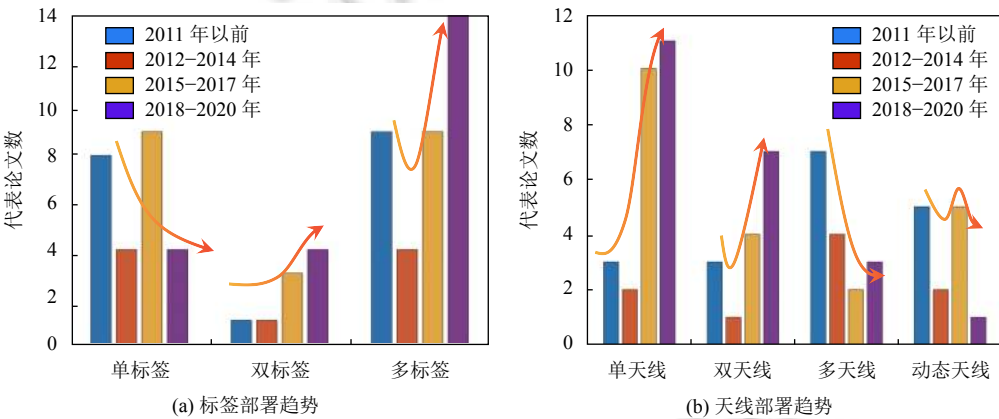


图 8 设备部署演进趋势

我们进一步用表 4 对不同设备部署的优劣势进行总结. 从整体趋势上, 我们发现当使用更多的天线组成阵列进行感知时, 无论是感知精度或者感知领域都实现了突破, 但是由于设备增多, 其成本开销增大, 部署更加多变. 综上所述, 当前的研究重点在于, 如何使用有限的天线数量, 基于少量标签的阵列实现复杂的感知, 在尽可能减小部署开销和设备成本的基础上, 实现更加复杂精确的感知应用.

表 4 设备部署性能对比

	代表工作	优势	劣势
单天线	[7,29,39,41,45,60,63]	部署简单, 价格便宜	感知维度低
双天线	[36,38,40,58,65,66,76]	部署简单, 信号具有一定区分度	有一定部署开销, 感知维度一般
多天线	[23,34–36,40,66,67,77,78]	感知维度高、信号稳定	昂贵、轮询时间长、天线部署麻烦
动态天线	[37,59,61,72–75]	感知维度高、部分避免多径影响	部署开销大、需要准确的位置角度测量

4.2 标签绑定方式

除了感知设备的使用部署外,感知应用中标签的绑定方式作为设备与感知对象之间的关联,是决定感知方法的另一个重要因素.通常,现有工作关注两个主要的标签绑定方式:绑定式感知(device-based sensing)和非绑定式感知(device-free sensing).其中,绑定式感知主要指标签绑定在感知目标上,我们可以根据标签的感知姿态状态,对目标的位置状态进行推导感知;与此相对的非绑定式感知,主要指感知目标无需佩戴任何标签等设备,我们利用感知目标状态对标签信号的反射影响,构建模型进行感知.图9展示了两种方式的示意图,Ding等人^[39]提出的FEMO系统将标签绑定在哑铃之上,利用标签信号变化绑定式地感知用户运动姿态;而Wang等人^[45]将标签部署在环境中,利用手指对于标签信号的反射,非绑定式地对手指的移动进行感知.

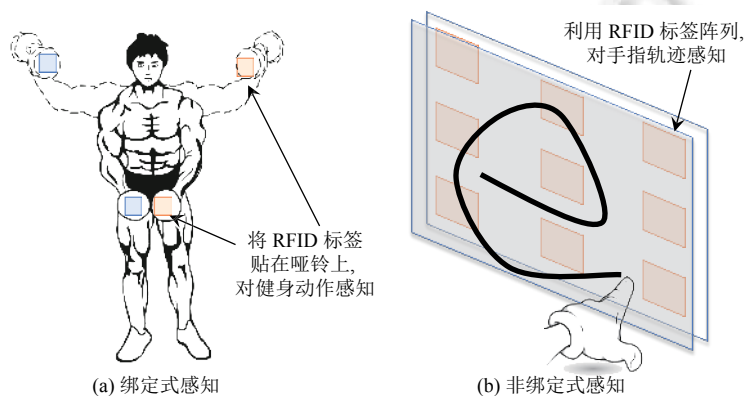


图9 标签绑定方式感知

4.2.1 绑定式感知

由于RFID标签在初期的应用形态为普通二维码的替代品,因此RFID标签自然而然地被部署在物品上,对物品的诸多状态进行识别,这也为绑定式感知的发展奠定了现实基础.例如,Ni等人^[23]提出的LANDMARC定位工作以及Hightower等人^[19]提出SpotOn定位工作,将单个标签部署在物体上,利用标签位置对目标物体位置进行感知,该绑定式定位方法随着技术的演进在逐步提升^[33,34,46,79],部分工作突破静止目标物体的位置,拓展至对目标的运动轨迹进行感知.此外,越来越多的研究人员使用标签阵列进行绑定式感知:Lin等人^[35]将标签阵列部署在球体之上,通过感知标签阵列的状态变化对球体的平移旋转进行追踪;Shangguan等人^[7]为货架上的每个商品部署多个标签,估算标签阵列的运动轨迹,对目标物品进行轨迹追踪;Wang等人^[40]利用用户躯干之上的标签阵列,感知用户的运动姿态;Bu等人^[72]将二维标签阵列部署在日常物体上,感知目标物体的旋转平移的等.

小结:绑定式感知方法一直是RFID标签在感知应用中的核心感知场景.由于RFID标签通常被用来贴在物体之上对其进行识别,因此如何复用已有的RFID标签,实现识别之外的应用成为研究人员所关注的研究问题.但是,绑定式感知方法往往需要对标签的部署进行设计,且感知目标需要携带标签.

4.2.2 非绑定式感知

相比于绑定式感知,非绑定式感知将用户从设备中解放,无需携带任何感知设备即可以进行感知.在传统的无线感知问题中,非绑定式感知是一类主流的感知方案:针对WiFi信号,Pu等人^[80]实现人体动作的非绑定式感知;Sun等人^[81]实现手写输入的非绑定式感知;Adib等人^[42]实现了穿墙的人体轨迹追踪等.而RFID标签属于无源设备,其通信能力更加弱小,利用人体对于标签的反射信号,研究人员依然在此基础上做了大量的研究工作.例如,Liu等人^[26]利用人体运动对标签的信号干扰,对工人的运动情况进行追踪;Han等人^[82,83]在书架上部署多组双标签对,基于双标签间的电感耦合特性,来感知环境中异常走动的用户;Yang等人^[41]利用人体对标签阵列的反射影响,通过信号消除法去除环境的干扰信号,提取人体相关信号并实现了穿墙的人体位置追踪;Ding等人^[44]和Wang等人^[45]利用手臂和手指对标签的影响,实现了手势非绑定式感知;此外,Wang等人^[84]进一步利用心跳对胸

口标签的信号影响, 通过信号模型消除呼吸对于信号的干扰, 抽取心跳信号并实现人体心跳的细粒度感知。

小结: 相比于绑定式感知, 非绑定式感知有效地将用户从设备中脱离出来, 减小了用户的设备部署开销。为了有效实现非绑定式感知, 许多研究工作使用信号的消除模型, 通过和预先采集的环境干扰进行信号消除, 来实现对特定目标的准确感知。此外, 由于 RFID 的无源特点, 我们甚至可以将绑定式与非绑定式感知进行结合, 弥补非绑定式感知中多用户难以区分的问题, 实现有效的多用户非绑定式感知。

4.2.3 标签绑定方式小结

作为两种标签绑定方式, 绑定式与非绑定式感知在 RFID 的感知研究中具有重要的影响与价值。一方面, 绑定式感知将 RFID 从目标“识别”拓展至行为“感知”, 开拓了 RFID 的功能; 另一方面, 非绑定式感知则进一步将标签从目标上去除, 不仅拓宽了感知模式, 更提供了一种标签的复用方案, 为未来的感知应用提供了更多可能性。表 5 对二者的优劣势进行详细比较: RFID 标签一方面由于其易部署特性, 能够在绑定式感知中提供轻量级的设备部署感知方案; 另一方面在非绑定式感知中由于人体对标签信号的反射影响, 非绑定式感知能够对任意用户进行感知, 满足多种应用对于无关人员行为检测的需求。

表 5 标签绑定方式优劣势比较

绑定方式	代表性工作	优势	劣势
绑定式感知	[7,23,40,72]	利用标签标记目标, 感知信号稳定	需要携带设备, 部署成本高
非绑定式感知	[41,44,45,82-84]	无需携带设备, 能够对未知入侵者进行检测	难以区分多人, 信号易受环境影响

4.3 感知推理方式

在感知方法中, 除了硬件方面的选择搭配之外, 在软件层面如何选择感知推理方式, 从感知渠道推导得到感知结果是另一个受到普遍关注的问题。我们将从传统的信号模型驱动方式以及新型的数据驱动方式这两方面进行介绍。

4.3.1 模型驱动感知

基于信号模型的感知方式一直是无线感知中的主要手段。利用信号在传播过程中的衰减等变化, 从信号特征中抽取距离相关参数, 并通过信号融合与模型, 估算最终的感知目标。例如, Seidel 等人^[17]提出使用路径损耗模型以及三角定位模型进行位置估算; Wang 等人^[34]利用不同传输路径的相位差别构建 AoA 感知模型, 对目标的位置进行估算; 此后, 一系列工作对 AOA 相位模型进行扩展, 实现了从单标签向多标签感知的拓展^[7,35,36,40,77], 实现更加丰富的感知应用。Wang 等人^[46,85]与 Yang 等人^[33]利用移动天线扫描, 基于合成孔径雷达模型, 对目标进行准确定位; 基于雷达信号的传输模型, 一系列工作进一步将人体的信号反射引入到传输模型中, 大大地拓展了 RFID 的感知领域^[41,44,45]。

此外, 针对现有感知模型容易受到室内多径效应影响的问题, 一些研究工作进一步从信号模型入手, 尝试消除或者降低室内多径效应造成的噪音。例如, Wang 等人^[46]通过物理层信号构建多径效应配置文件, 并将其用于标签的位置感知中; Shangguan 等人^[37]等人使用调频的方式检测多径效应, 从而选取出没有多径的信号用于标签定位; Zhang 等人^[86]首先提出一种高效的多径检测方式, 能够以约 93% 的准确率判断不同的遮挡物, 为多径的存在问题提供一套行之有效的检测方案; Wang 等人^[87,88]设计了一套多径环境下的感知技术, 通过构建信号的多径模型, 能够从原始信号中抽取干净的物理层感知信息, 并用于精确地标签定位与人体动作感知中。

小结: 总体而言, 模型驱动的感知方法往往是针对感知应用中距离相关的一些目标, 利用无线信号在传输或者反射过程中的变化, 结合设备部署情况, 构建信号传输模型, 基于不同的信号模型, 不仅能够有效将不同的信号特征区分开, 实现鲁棒性较高的感知应用; 还能够准确分析多径环境与视距传输环境的信号特征差异, 为更加精确鲁棒的感知提供可能。

4.3.2 数据驱动感知

虽然模型驱动的感知方法泛化能力更强, 但由于环境中的多径信号相互叠加、相互影响, 难以使用简单的传

播模型进行刻画,因此一系列基于数据与训练的感知方法应运而生.例如,Ni 等人^[23]打破传统基于信号衰减模型的定位方式,提出的基于 K 近邻算法 (KNN) 与参考标签的定位方式,该方案后来被 Wang 等人^[46]进一步细化提升,实现细粒度的位置感知.此外,WiFi 领域中数据驱动算法获得的巨大成功^[80,89-92],以及基于雷达波反向散射信号的感知技术对于机器学习算法的高效利用^[93-95],进一步带动了 RFID 在行为感知中的发展.例如,Ding 等人^[39]利用单标签的信号变化特征,使用动态时间规整 (dynamic time warping, DTW) 方法对用户的健身动作进行识别;Liu 等人^[28]通过图像分析和模式匹配的方式对睡姿进行感知;Ding 等人^[44]使用图像技术对标签阵列上的手势轨迹进行感知识别;而 Wang 等人^[45]使用卷积神经网络对多指动态手势进行识别感知;Zhao 等人^[96]则利用不同人对于标签的不同影响,使用支持向量机等分类算法实现用户物理层特征的防伪认证;Wang 等人^[97]使用定制化的 RFID 柔性标签,将其附着在用户皮肤上,并使用自然语言处理技术来感知用户的唇语;Ding 等人^[98]提出一种新型的多分枝 1D-CNN 网络,能够直接利用 RFID 信号同时对用户动作以及用户的 ID 进行准确区分;Yu 等人^[99]结合 CNN 与 LSTM 提出一套实时的手势识别系统 EUIGR,用其对不同的交通手势进行实时识别感知;Dian 等人^[100]提出一个基于多模态卷积神经网络 (MCNN) 的系统 RFree-GR,利用数据驱动的方式识别多种手语动作的识别.

小结:数据驱动的感知工作逐渐受到关注,相关工作主要包含两大类:其一,在人体的行为感知中,从原始数据中抽取相应特征,并利用机器学习方法的强大分类回归能力实现感知识别功能;其二,在用户认证中,从数据中学习用户的独有生理特征,并使用该特征进行用户认证.在基于数据驱动的感知工作中,诸如神经网络等机器学习的方法被用于特征的抽取以及目标的感知之中,通过数据驱动的方式实现从特征抽取分离到目标感知的完整过程,是部分模型不明确的场景下重要的感知解决方法.

4.3.3 感知推理方式小结

整体而言,模型驱动和数据驱动的感知方法相辅相成,模型驱动从原理层解释了感知信号到感知对象的识别机理,从而保证了感知应用在不同环境下的鲁棒性与模型的泛化能力.数据驱动则是从统计数据特征学习角度,说明感知任务在信号层的特征关联,而这些关联信息能够被机器学习方式捕获,并基于大量数据进行区分,实现多样的感知任务.从 RFID 技术发展的角度而言,模型驱动的推理方式偏向传统,为 RFID 感知技术的进一步发展打下坚实的基础,为其他应用提供理论支撑;而数据驱动的推理方式则紧跟潮流,一方面解决实际问题,另一方面,使用大数据技术为无线模型的完善提供支撑,为新模型的构建提供线索.我们在表 6 中对这两类的感知方法进行详细比较.

表 6 感知推理方式对比

感知方法	代表性工作	优势	劣势
模型驱动	RSS模型 ^[17,59] 相位模型 ^[33,46,85]	拥有理论指导,无需采集大量训练数据,鲁棒性高	需要针对不同的感知场景构建不同的模型
数据驱动	参考标签 ^{[23][46]} 模式匹配 ^{[39][28][45]}	使用方便,针对不同感知场景仅需要少量修改即可以使用	需要采集大量的训练样本,缺乏理论支持

4.4 感知方法小结

本节中,我们从设备部署方式、标签绑定方式、感知推理方式 3 个方面,对感知方法的不同部分进行介绍与比较.实际上,这 3 个层面并非单独存在,而是存在诸多关联.因此,部分研究内容会重复在多个段落进行不同侧重的介绍.例如,绑定式感知由于信号衰减模型的成熟,往往采用模型驱动的感知方法;而非绑定式感知由于反射信号难以准确刻画,且标签信号容易受到多种反射影响,数据驱动的感知方法往往能起到更好的感知效果.从整体而言,针对特定的感知对象,部署更多的标签与天线能够提供更高的数据维度,从而提升感知精度与感知能力;针对特定的应用需求,绑定式感知保证高精度感知,非绑定式感知将用户从设备中脱离,提升感知应用的使用范围;模型驱动方式增加了感知系统的设计难度,但是提升其泛化性,而数据驱动则从统计意义上保证了应用的可执行性.在感知应用中,确定合适的感知方法,能够从信号层面有效地削弱不同的环境噪音,并利用信号之间的时空关联性去除不同的干扰因素,为应用提供泛化能力更强的感知结果.

5 感知范畴

在基于 RFID 的无源感知研究中, 感知范畴作为感知技术的目标, 往往决定了感知渠道与感知方法的选择, 是感知应用设计中首要确定的要素. 目前, 大量的研究工作针对不同的感知范畴展开, 提升 RFID 在不同感知范畴下的感知能力. 传统的感知研究往往依赖于信号的传输衰减模型, 因此通信距离为主要感知目标, 并延伸至目标定位、轨迹追踪等. 而近年来随着感知应用的日新月异, 研究人员进一步从多个维度拓展射频识别技术的感知范畴, 实现包括速度、频率、以及生理体征信号的有效感知. 根据现有的研究工作, 我们从室内定位、轨迹追踪以及其他感知范畴这 3 方面入手, 具体介绍相关的研究进展.

5.1 室内定位

室内定位一直是无线感知中最为重要与基础的感知范畴, 本质而言, 室内定位可以被认为是大部分感知范畴的感知基础. 实际上, 利用 RFID 技术进行目标定位始终贯穿 RFID 的感知研究历史, 研究人员始终尝试革新技术, 在不同场景下提升 RFID 的定位精度.

例如, 在感知发展的初期, 大批研究工作进行 RFID 标签室内定位相关的研究^[19,20,23,25,30,61,79], 其中, 2003 年的研究工作 LANDMARC^[23], 虽然其定位精度只有 1 m 左右, 难以达到人们对于室内定位的需求, 但是由于其前瞻性的基于参考标签的感知方法, 以及对于室内定位这一任务的理解方式, 对此后十余年的位置感知产生了深远的影响. 其参考标签定位框架在 2013 年 SIGCOMM 的定位工作中依然被沿用^[46], 并将定位精度也从米级提升至厘米级. 此后, 基于 RFID 标签的室内定位技术进一步发展, Tagoram^[33]系统利用合成孔径雷达技术以及差分全息图方式, 将实验室内定位精度提升至毫米级; MobiTagbot^[37]进一步利用跳频技术, 缓解实际环境下多径传输对于相位信号的影响, 提升实际使用的感知精度; RFind^[101]则提出将商用 RFID 标签结合超宽带传输技术, 从而实现高精度的位置感知.

小结: 纵观 RFID 标签室内定位的历史, 一方面感知精度已经达到了甚至超越了一系列室内定位应用的精度需求, RFID 技术在室内定位领域已经充分展现了其突出的感知实力; 另一方面我们依然发现, 在实际系统中 RFID 的室内定位并未广泛推广, 虽然许多研究工作在实验室场景下能够取得极高的精度, 但在真实环境下, 依然容易受到许多环境干扰.

5.2 轨迹追踪

轨迹追踪通常被认为是定位技术在时间维度上的扩展, 即一段时间内目标位置点所构成的轨迹. 因此, 轨迹追踪也是当前感知研究中的一类重要研究. 相比于室内定位偏向于静态的位置估算, 轨迹追踪则需要对运动目标的动态位置变化进行准确地追踪, 因此具有更广泛的感知场景.

针对这一问题, Liu 等人^[26]提出对厂房内工人的移动轨迹进行追踪, 从而有效避免工人由于走捷径造成的生产危险; Han 等人^[82]在走廊、过道等环境下检测非法用户的入侵, 并对非法入侵者的行动轨迹进行追踪; 而 Yang 等人^[33]和 Wang 等人^[34]提出将标签部署在手指或者小物体上, 通过标签的相位信号, 追踪标签的二维运动轨迹; Shangguan 等人^[7]将多标签部署在同一物体上进行追踪追踪; 此外, Shangguan 等人^[58]还提出一套利用线性极化天线的追踪单标签运动轨迹的解决方案; Wei 等人^[38]对目标的旋转轨迹进行追踪, 实现类似陀螺仪的旋转角度感知; Ding 等人^[44]与 Wang 等人^[45]利用标签阵列, 实现了非绑定式的手指细粒度轨迹追踪; Bu 等人^[36]、Lin 等人^[35]、Jiang 等人^[102]与 Wang 等人^[75]则将简单的二维轨迹追踪进行拓展, 在三维空间内对目标的位移与旋转进行综合感知; Wang 等人^[40]与 Jin 等人^[77]将标签贴在用户肢体上, 对用户的肢体三维运动轨迹进行感知追踪.

小结: 早期的研究工作专注于解决定位的精准度问题, 轨迹追踪主要也基于室内定位技术, 通常利用现有的定位技术, 其主要的性能提升在于轨迹追踪的准确性上. 而随着二维轨迹追踪的日趋成熟, 研究人员则将目光放在更加复杂的轨迹追踪以及更加普适的场景部署之上, 诸如三维轨迹、旋转、多标签等感知场景成为研究的主要目标, 复杂的追踪场景以及普适的应用场景成为新的研究热点问题.

5.3 其他感知形态

伴随着位置轨迹感知技术日趋成熟, 基于无线技术的感知技术也向细粒度、多元化等方面不断发展, 越来越

多的研究人员参考不同无线技术的感知形态, 不断挖掘 RFID 在相关领域的感知能力. 而一系列 WiFi 等无线信号在呼吸 [90,91,103,104]、心跳 [105,106] 以及步态识别 [4,107] 等方面的感知形态也刺激着 RFID 在此类形态上的感知发展, 多样的 RFID 感知应用形态也在被研究人员不断探索挖掘.

例如, Yang 等人 [29] 和 Duan 等人 [64] 提出使用 RFID 标签对物体的振动频率进行感知; Li 等人 [62] 进一步将振动感知细化, 实现了高频振动的感知; Yang 等人 [108] 使用天线对标签的振动进行感知, 进而对声音的频率进行感知; Hou 等人 [109] 提出使用 RFID 对用户的呼吸进行感知; Wang 等人 [84] 进一步提出使用 RFID 标签对用户的呼吸和心率进行细粒度感知; 徐晓翔等人 [110] 利用 RFID 标签阵列对用户睡眠状态下的呼吸状况进行感知; Zhao 等人 [96] 利用 RFID 标签来捕获人体生理特征并用于认证检查; Wang 等人 [73] 提出使用 RFID 移动天线对目标进行扫描, 对物体的形状进行感知; Wang 等人 [47] 提出使用 RFID 天线扫描包裹内的物品, 对包裹状态进行感知.

小结: 综上所述, 除了定位和轨迹等基础的感知范畴之外, 越来越多的研究工作尝试拓展 RFID 信号的感知能力, 他们充分挖掘了 RFID 信号的不同影响因素, 利用无线信号的关联关系以及时频分析等对时间维度的目标信息、目标物理层的本征信息、乃至生理信号特征进行感知, 实现复杂的感知应用.

5.4 感知范畴小结

根据感知研究发展的脉络, 我们将感知范畴分成室内定位、轨迹追踪以及其他形态感知 3 个部分, 阐述了 RFID 感知范畴的发展与变化. 图 10 对近年来相关领域的经典工作进行了总结, 随着 RFID 感知技术的发展, 一方面, 感知的领域也在逐步拓展, 从最简单的室内定位, 在时间维度拓展形成轨迹追踪、在空间维度拓展形成人体行为感知、在目标层次维度拓展形成生理信号感知、在频率维度拓展形成振动频率感知等等, 基于 RFID 技术的无源感知在不同领域逐步拓展, 往更加复杂的感知范畴以及更加细致的感知粒度中不断拓展; 另一方面, 针对每一个单独的感知范畴, 有一系列新型的研究工作不断推陈出新, 在维持普适环境中的便捷部署与低价成本上, 在各个领域实现更高精度的感知范畴. 感知范畴的准确选取能够有效地避免不同范畴间的目标干扰, 为特征的准确抽取提供可能.

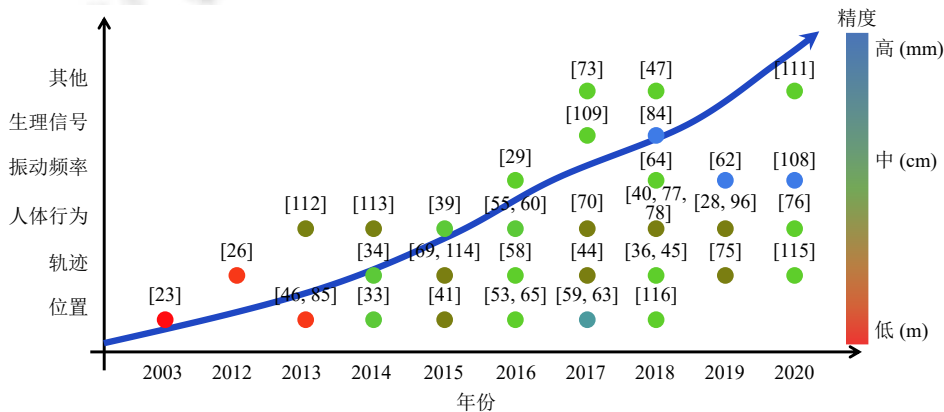


图 10 感知范畴演进趋势

6 感知应用

感知应用是感知技术最终的应用形态, 是感知技术的研究动机与落地方式. 与感知范畴相比, 感知范畴主要关注通信技术所能实现的感知目标, 从技术层面介绍感知的实施目标; 而感知应用则更加关注该感知技术所能使用的应用形态, 着眼于用户相关的应用场景. 例如, 对于标签的轨迹追踪工作, 我们即可以用于仓储货物、行李物品的运动追踪, 也能够用于人体的躯干运动、手指运动追踪等等. 因此, 不难看出, 感知范畴和感知应用并非一一对应, 但二者之间却也息息相关. 在确定了感知范畴之后, 我们进一步介绍当前感知范畴所对应的主要的感知应用形

态, 将感知技术和应用需求真正结合。

6.1 物体状态追踪应用

RFID 标签最初被设计用来替代条形码以及二维码, 贴在待识别的物体之上, 实现远距离、无接触的目标识别, 将普通的廉价物品转化成物联网环境之下的智能物品。因此, RFID 标签最直接的应用形态即为对该物体的状态进行有效的识别追踪。

通常, 物体的状态感知可以从以下几个方面来具体表述: (1) 盘点应用: 该类别主要应用于仓储管理、货物整理等大规模物品的盘点管理中。例如, 文献 [9–12] 主要通过估算技术对大规模环境下物品的总数进行感知, 而文献 [14–16] 通过应用 Bloom 过滤器, 对大规模环境下的遗失标签进行检测, 实现快速的物品盘点。(2) 定位应用: 除了简单的存在感知之外, 部分应用需要对存在物体的位置进行进一步估算, 这里可以包含物体的绝对位置以及物体之间的相对位置。例如, 许多定位研究工作^[23–25,37,46]等通过给每个标签进行定位来对物体在特定区域内的绝对位置进行感知; Wang 等人^[85]和 Liu 等人^[59]感知物体在环境中的放置角度, Shangguan 等人^[69]和 Liu 等人^[70]对图书馆内的书籍相对位置进行追踪感知。(3) 追踪查询: 仓储环境下的物体会被经常性地移动, 一些应用需要对此类物体的移动进行准确感知, 从而避免物体错位。例如, Yang 等人^[33]和 Shangguan 等人^[111]利用行李上的标签, 对分拣仪器上的行李轨迹进行准确追踪; Wei 等人^[38]对普通物体的旋转轨迹进行追踪, 以便观测诸如门、卫生纸等物体的状态; Chen 等人^[76]使用双天线对商品的运动状态进行追踪, 并对其内部物质进行感知。

小结: 当前, RFID 技术在物体的状态感知应用中已经获得了广泛的使用。当环境中的一般物体都贴有 RFID 标签时, 这些标签不仅提供了物体的标识信息, 用于物品盘点; 这些标签的信号特征也提供了位置感知、轨迹感知等众多物体相关状态感知的契机, 实现了普通物体向智能物体的转换。

6.2 人体行为识别应用

除了简单的物体状态感知之外, 许多研究人员尝试将基于 RFID 的无源感知技术应用于人体相关的行为识别应用中。一方面, 环境中的大量物体部署了 RFID 标签, 这为与此类物体相关的人体行为感知提供了可能性; 另一方面, 我们可以让用户穿着部署 RFID 标签的衣物, 或者让用户手持配备 RFID 标签的设备, 利用标签感知用户的行为动作, 实现智能化的人机交互。

通常, 人体的行为识别应用可以从以下几个方面来具体介绍: (1) 人体躯干行为: 在人体行为识别应用之中, 最先受到关注的是人体躯干的识别应用, 这里既包括人体的位置轨迹感知以及移动主导的相关应用。例如, Yao 等人^[112]在室内部署 RFID 标签阵列, 检测老年人的行为, 用于摔倒意外情况下及时报警提醒; Han 等人^[113]、Shangguan 等人^[114]以及 Liu 等人^[115]根据商品上 RFID 标签的信号变化, 感知消费者的行为, 判断消费者对于不同商品的偏好程度等; Liu 等人^[59]将标签部署在床上检测睡姿变化, 避免患者长时间保持一种睡姿造成褥疮等疾病。(2) 人体肢体行为: 主要是指对用户的手臂、腿部行为姿态进行动态识别感知, 其感知粒度更细、复杂度更高。例如, Ding 等人^[39]将 RFID 标签部署在健身器材之上, 对用户的肢体健身动作进行感知; Shangguan 等人^[7]利用商品上部署的标签, 对用户手持商品时的手臂动作进行感知; Bocanegra 等人^[116]提出使用多天线对用户购物车内的衣物进行扫描, 实现快速的购物结算; Wang 等人^[40]和 Jin 等人^[77]将标签部署在用户身体上, 对用户的肢体动作进行实时追踪; Ding 等人^[44]利用手掌对于标签阵列的反射影响, 对手掌移动轨迹进行感知。(3) 人的手指行为: 另一类广泛被用户使用的是手指的手势识别, 通过对用户的手指动作进行识别, 在智能环境下提供人性化的人机交互功能。例如, Xie 等人^[78]将 RFID 标签部署在手套之上, 对用户的手指动作进行捕捉识别; Zou 等人^[117]利用手势对环境中标签的相位信号变化, 对用户的手势动作进行识别; Wang 等人^[45]利用手指对平面标签阵列的反射影响, 对手势微动作进行行为识别; Li 等人^[118]将标签定制成交互工具, 实现手指在标签上的滑动操作, 完成简单的日常交互工作。(4) 其他感知: 除以上肢体等物理运动感知外, 还有许多研究尝试对人体的生理体征变化进行感知, 从而有效地对用户健康状况进行检测。例如, Hou 等人^[109]检测用户的呼吸, 从而对呼吸异常等情况进行有效预警; Wang 等人^[84]利用 RFID 标签进行心率检测, 有效地对用户的心率行为进行观测, 从而对早搏、心律不齐等细粒度心跳问题进行预警。

小结:我们从4种主要的人体行为识别应用阐述了RFID在行为识别中的使用情况.通常,用户的行为感知应用可分成两类:一是对直接的行为动作进行感知识别,包括人的动作、生理信号、睡姿等等,可以将这些获取的行为的感知结果直接用于人机交互或智慧医疗中;二是对行为进行延伸应用,将行为识别更好地应用于生活之中,我们可以将商场内用户行为和导购应用绑定,为用户提供更丰富的服务.

6.3 防伪与认证

与用户行为感知应用同样备受研究人员关注的另一大类应用就是防伪与认证应用研究.RFID标签在引入物联网领域中替代条形码时,它的两个主要功能就是识别与认证.传统的识别与认证技术^[119,120],主要依赖于RFID标签内部定义的一系列安全认证方法,此类方法在理论上能够提供稳定安全的认证,但由于商用标签的性能都比较受限,因此在真实RFID系统中通常难以实施.而随着研究人员对于RFID感知应用的研究深入,RFID标签的一些固有特性被不断挖掘,并用于防伪认证中.

例如,Yang等人^[33]指出标签的相位具有特殊的偏差值,并进一步^[121]将这一特征应用于标签阵列之中,进行商品的防伪认证;Zanetti等人^[51]和Han等人^[52]基于每个标签的反向散射频率都具有硬件特异性进行标签认证;Han等人^[83]利用双标签相互干扰的特性,将两个标签间的干扰用于认证是否为合法标签对;Wang等人^[122]提出的虎符系统,有效地解决了物理层标签认证中的重放攻击,利用标签的内在特征实现了标签认证;Wang等人^[47]利用包裹内物体对标签的反射影响,对包裹的真伪进行认证,从而检测包裹是否曾被人拆开;Zhao等人^[96]利用人体对标签的影响,来认证持卡用户的真伪,从而有效地解决了偷卡顶替或者伪造卡片的攻击方式;Chen等人^[123]提出使用标签内部的电容放电时间,对标签的真伪进行判定,实现了基于商用阅读器的物理层特征感知.

小结:综上所述,我们可以将RFID标签的防伪认证工作简单分成两大类:(1)针对标签的防伪工作,这些工作主要利用标签在制造过程中的硬件特异性,对标签进行认证,并且此类工作已经从单标签往多标签认证演化;(2)针对环境中的商品或者人进行认证,其主要特征在于,利用标签去感知商品或人的固有特征,并使用抽取的信号特征进行感知认证.

6.4 其他感知应用

除了以上这3类比较常见的感知应用之外,我们进一步罗列当前学术界中一些其他的感知应用方向,主要包含小幅度高频感知应用,以及智能数据管理与中间件等.

例如,Yang等人^[29]在2016年使用RFID标签对振动频率进行感知,从而可以根据周期判断血液成分分离机是否处于稳定的工作频率;Li等人^[62]使用谐波技术进一步对声音等更高频率的振动信号进行感知,实现基于RFID的声音拾音应用;Yang等人^[108]使用RFID对乐器的声音进行感知;Wang等人^[73]用RFID标签阵列对物体的形状进行识别重构,实现了类似X光的扫描应用;Jin等人^[124]提出使用RFID去判断物体表面的弯曲形状以及弯曲程度,从而使用RFID技术去检测路面或桥面平整状况.除了直接的感知应用之外,许多研究人员将基于RFID的智能感知作为基础硬件架构,与上层应用结合,实现多种数据管理等中间件应用.例如,谢磊等人^[125]总结大量数据管理与协议优化等工作,对RFID在数据管理方面进行详细介绍;鄂晓征等人^[126]利用标签的存储空间实现了快速的数据管理,从而保证RFID技术在物流管理中的快速查询等;Liu等人^[127]利用C1G2协议中的命令特征查找具有某些ID特征的标签,实现批量标签的快速读取.

小结:综上所述,除了传统的物体追踪、人体感知以及防伪认证之外,当前的感知研究虽然逐步拓展至其他应用形态.此外,在应用层面如何将感知数据与上层应用需求进行紧密结合也至关重要,使用RFID技术搭建智能中间件,进行快速的数据管理也是重要的应用之一.

6.5 感知应用小结

在这一节中,我们介绍了当前RFID感知技术在实际环境中的应用形态.从时间维度来看,感知应用的发展经历了由“物”逐渐到“人”的主体转化:1)在物联网概念被提出的初期,RFID标签主要用来标识各种商品、物品等,因此无论是状态感知或者是防伪认证,RFID的相关应用主要集中于物品感知;2)随着物品感知应用的不断拓展,研究人员逐渐意识到一方面物品由人操控,因而物品状态的改变能够用来推演人的行为,另一方面,当环境中携带

标签的物品逐渐增多时,大量的标签能够为环境中用户行为的感知提供可能,因而部分工作利用现有标签对人的行为进行感知;3)当研究人员挖掘出标签在人体行为感知中的广阔前景后,许多工作进一步主动地设计并部署标签或者标签阵列,将其用于某些特定的人体行为感知应用中,将标签转化为一个轻量级的无源传感设备;4)在研究人员挖掘标签的感知能力过程之中,不再局限于人体行为感知,而是创新性地将标签作为轻量级的无源传感器用于各个方面,如声音感知、振动感知等,真正实现了标签从识别到感知的蜕变。

整体而言,一方面,在应用层 RFID 技术实现了“人-机-物”的融合,在人与计算机、物体这三者中充当了信息交换的纽带,技术上为未来智能应用提供了基础;另一方面,在真实环境下,基于 RFID 技术的应用并没有被广泛部署,虽然理论上当前研究工作解决了很多行为感知的技术难题,但是真实复杂环境下的信号噪音依然难以解决,RFID 技术的应用落地有待研究人员进一步地深入探索与积极尝试。因此,如何选取合适的应用形态,并降低应用过程中的多种环境噪音影响是 RFID 技术从应用到落地的关键。

7 未来研究方向

随着感知设备的革新提升以及感知算法的演进发展,智能的感知应用已经渗入工业生产以及日常生活的多个方面,为用户提供智能化的服务。而支撑这些应用的不同感知技术各具特色,为智能感知应用提供了多种可能:基于视觉的感知技术精度高、能力强^[128,129];基于声音的感知技术设备便宜、定制化简单^[130-133];基于无线信号的感知技术穿透力强、敏感度高等^[4,43,80,91,106,107,134]。对比这些感知技术,我们进一步用表 7 对其优劣势进行对比与总结。

表 7 不同感知技术的对比

感知技术	优势	劣势
RFID	无源可标记感知,价格低廉,适合大范围部署,可定制化强	标签信号容易受到干扰,标签的部署存在限制,采样率受标签数目限制
WiFi	广泛部署,信号特征丰富	容易受到环境干扰,难以区分多个目标,缺少鲁棒性的感知模型
超声波	感知设备普遍,定制化强,波长短感知粒度细	容易受到环境干扰,方向性差,无法穿墙
视觉	感知精度高,感知稳定性强,受环境影响小,已逐渐商用化	涉及用户隐私,计算复杂度高,数据量大,受光线影响,需要视距传输
毫米波	波长短感知粒度细,基于雷达原理的感知基础较成熟, MIMO 传输特征丰富	容易受到环境干扰,难以高效感知复杂的环境

虽然基于 RFID 技术的感知应用研究已经取得了一些成果,但是仍然有许多问题亟待解决。当前,物联网、工业互联网的迅速发展,普适计算以及智慧健康、智慧物流等多种智能化解决方案的提出,给基于 RFID 技术的感知应用带来了新的发展契机,主要表现在以下几个方面。

1) 感知渠道上深化 RFID 通信模型、挖掘新型信号特征。当前,主流的感知信号模型依然依赖于传统雷达通信中的感知技术,属于现有技术的拓展性应用,虽然该技术在 RFID 感知应用中已经取得了很好的成绩,实现了高精度的感知目标,但是 RFID 标签的一些基本特性依然没有被充分挖掘。因此,深化通信模型主要是指当前 RFID 的信号模型依然没有被充分研究,其信号强度、相位等信号特征在不同环境下的变化机理依然尚不明确。例如,针对不同的标签极化方向,其信号强度乃至信号相位都会有明显区别,而不同的多径效应对标签的信号具有不同的干扰作用。因此,如何利用好 RFID 标签这一可标记无源感知设备的特点进行感知应用的探索是未来感知研究中的一个重点问题。同时,如何将标签的通信模型进一步细化、深化也是做好 RFID 感知的一个关键。

2) 感知方法上结合多种信号源信息。当前,主流的研究仅使用 RFID 技术或者其他无线技术等单一的感知渠道进行无源感知的尝试,这对于理解不同信号特征具有良好的促进作用。但是,无论任何一种感知技术,都有自身的短板与盲区,无法满足多变的感知应用需求,因此,合理结合多种感知信号的优势,进行优势互补是未来感知研究中的一类重点方向。而针对 RFID 标签而言,当前的多模态感知主要集中于 RFID 标签与计算机视觉技术的有效结合,这种结合依赖于视觉技术对于图像的准确处理以及 RFID 标签对于普通物体的被动识别以及追踪。除了计

算机视觉的感知之外, 基于运动传感器、麦克风、光敏传感器等技术近期涌现出一系列研究工作, 而鲜有 RFID 技术与这些技术结合的感知研究. 如何将两者的优势结合、补足二者在感知之中的不足之处, 将会为 RFID 感知带来更多机遇. 另一方面, 基于多标签的感知研究目前尚处于起步阶段, 虽然众多研究在使用标签阵列, 但是主要是基于雷达应用中的线性天线阵列以及合成孔径雷达技术进行感知, 对于标签阵列的部署乃至于标签之间的干扰等等依然缺乏细致的分析与理解. 因此, 如何利用好 RFID 标签在无源感知中易于部署的优势, 构建合理的信号模型, 针对不同的感知应用设计合理的标签阵列, 结合多种信号源的信息, 实现相应对象的准确感知, 这些都是未来感知方法研究中的重点问题.

3) 感知范畴上拓展 RFID 的感知应用能力. 一方面, RFID 技术当前的感知范畴还比较有限, 感知应用能力的强弱缺乏理论支撑: 具体而言, 当前主流的感知技术通常关注距离与位置相关的感知, 感知范畴比较受限, 难以有效应对物联网时代智能化应用的感知需求. 此外, 对于 RFID 的具体感知能力缺乏理论与实践的研究, RFID 的感知极限等问题缺乏深层次的探讨. 另一方面, 在真实复杂环境下, 感知应用的鲁棒性问题缺乏切实有效的解决方案: 不同于实验室环境中, 感知技术的研发往往是处于理想环境下的. 而在真实环境之中, 感知场景周围的环境并不稳定, 环境中物体的位置与人的走动等都会对各种远距离传输的信号产生影响. 这些影响中的一部分是研究人员所关注的感知特征, 而另一部分则是影响感知结果的噪音信号, 做到去粗取精、去伪存真是在实际环境下提升感知鲁棒性的关键. 因此, 在感知范畴的层面, 如何做到理论、实践两手抓, 既从理论上提升 RFID 的感知应用能力, 又使得 RFID 在真实环境之中实现更加鲁棒的感知应用, 是每一个研究人员期望解决的问题.

4) RFID 新型应用模式的探索与研究. 除了识别与简单的感知之外, RFID 技术在其他领域是否存在潜在的价值, 这也是一个值得关注的问题. 由于在设计之初, RFID 标签只是用来远距离识别不同的物体. 而随着定位技术的发展, RFID 的位置感知潜能被挖掘. 此后的 RFID 感知应用主要延续传统的位置感知研究, 尝试从感知精度方面进行突破, 实现更加细粒度的感知. 如今, RFID 标签由于其特有的无源感知优势, RFID 技术的使用方式被不断挖掘, 应用形态也不断推陈出新. 例如, An 等人^[135]提出的跨协议通信, 将 RFID 与 WiFi 结合, 实现了利用 WiFi 信号读取 RFID 标签的目的; Yang 等人^[136]提出的 Hash 算法实现框架, 将理论中常见的 Hash 算法应用于商用标签等等. 新型应用模式的探索, 将为普适计算环境提供更丰富的感知场景和应用手段, 也将为更多的智能应用提供有效保障.

8 总 结

RFID 作为物联网领域的一项关键技术, 近年来受到广泛的关注与研究. 而智能感知作为人工智能时代发展中的一项纽带技术, 是连接计算智能与认知智能的关键桥梁. 本文关注基于 RFID 技术的无源感知技术, 根据感知研究的基本流程, 从感知渠道、感知方法、感知范畴以及感知应用这 4 个层面阐述和分析了基于 RFID 技术的无源感知研究进展. 在此基础上总结并展望了 RFID 无源感知发展的未来研究方向. 总体来说, 基于 RFID 的无源感知与其他感知技术相比, 在感知渠道方面, 无源的标签通讯带来了更多的信号干扰与感知挑战, 同时便捷的标签部署也提供了“万物皆可知”的感知机遇; 在感知方法方面, 标签和天线的灵活部署与定制化调整, 提供了更多的感知场景与针对性的感知解决方案; 在感知范畴方面, 绑定式与非绑定式感知都能利用广泛部署的 RFID 标签进行目标感知, 提升了感知的灵活性; 在感知应用方面, 物联网时代 RFID 标签的广泛部署为更丰富的感知应用提供了设备基础, 为众多潜在的应用提供保障.

References:

- [1] Xie L, Dong X, Wang W, Huang DW. Meta-activity recognition: A wearable approach for logic cognition-based activity sensing. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conf. on Computer Communications. Atlanta: IEEE, 2017. 1–9. [doi: 10.1109/INFOCOM.2017.8057209]
- [2] Peng CY, Shen GB, Zhang YG, Li YL, Tan K. BeepBeep: A high accuracy acoustic ranging system using COTS mobile devices. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Sydney: ACM, 2007. 1–14. [doi: 10.1145/1322263.1322265]
- [3] Xi W, Zhao JZ, Li XY, Zhao K, Tang SJ, Liu X, Jiang ZP. Electronic frog eye: Counting crowd using WiFi. In: Proc. of the IEEE

- INFOCOM 2014-IEEE Conf. on Computer Communications. Toronto: IEEE, 2014. 361–369. [doi: [10.1109/INFOCOM.2014.6847958](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2014.6847958)]
- [4] Wang W, Liu A X, Shahzad M, Ling K, Lu SL. Understanding and modeling of WiFi signal based human activity recognition. In: Proc. of the 21st Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Paris: ACM, 2015. 65–76. [doi: [10.1145/2789168.2790093](https://doi.org/10.1145/2789168.2790093)]
 - [5] Pathak PH, Feng XT, Hu PF, Mohapatra P. Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2047–2077. [doi: [10.1109/COMST.2015.2476474](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2476474)]
 - [6] Liu YH. Wireless sensing networks. Communications of the CCF, 2014, 10(6): 23–27 (in Chinese with English abstract).
 - [7] Shanguan L, Zhou ZM, Jamieson K. Enabling gesture-based interactions with objects. In: Proc. of the 15th Annual Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services. Niagara Falls: ACM, 2017. 239–251. [doi: [10.1145/3081333.3081364](https://doi.org/10.1145/3081333.3081364)]
 - [8] Yang Z, Liu YH. Wi-Fi radar: From RSSI to CSI. Communications of the CCF, 2014, 10(11): 55–60 (in Chinese with English abstract).
 - [9] Kodialam M, Nandagopal T. Fast and reliable estimation schemes in RFID systems. In: Proc. of the 12th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Los Angeles: ACM, 2006. 322–333. [doi: [10.1145/1161089.1161126](https://doi.org/10.1145/1161089.1161126)]
 - [10] Chen WT. An accurate tag estimate method for improving the performance of an RFID anticollision algorithm based on dynamic frame length ALOHA. IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, 2009, 6(1): 9–15. [doi: [10.1109/TASE.2008.917093](https://doi.org/10.1109/TASE.2008.917093)]
 - [11] Han H, Sheng B, Tan CC, Li Q, Mao WZ, Lu SL. Counting RFID tags efficiently and anonymously. In: Proc. of the 2010 IEEE INFOCOM. San Diego: IEEE, 2010. 1028–1036. [doi: [10.1109/INFCOM.2010.5461944](https://doi.org/10.1109/INFCOM.2010.5461944)]
 - [12] Shahzad M, Liu AX. Every bit counts: Fast and scalable RFID estimation. In: Proc. of the 18th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Istanbul: ACM, 2012. 365–376. [doi: [10.1145/2348543.2348588](https://doi.org/10.1145/2348543.2348588)]
 - [13] Niu BX, Liu XL, Xie X, Li KQ, Cao JN. A TOP-k query protocol for popular tag categories in large-scale dynamic RFID systems. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(2): 266–281 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.11897/SP.J.1016.2019.00266](https://doi.org/10.11897/SP.J.1016.2019.00266)]
 - [14] Li T, Chen SG, Ling YB. Identifying the missing tags in a large RFID system. In: Proc. of the 11th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Chicago: ACM, 2010. 1–10. [doi: [10.1145/1860093.1860095](https://doi.org/10.1145/1860093.1860095)]
 - [15] Qiao Y, Chen SG, Li T, Chen SP. Energy-efficient polling protocols in RFID systems. In: Proc. of the 12th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Paris: ACM, 2011. 25–33. [doi: [10.1145/2107502.2107535](https://doi.org/10.1145/2107502.2107535)]
 - [16] Yang L, Han JS, Qi Y, Liu YH. Identification-free batch authentication for RFID tags. In: Proc. of the 18th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols. Kyoto: IEEE, 2010. 154–163. [doi: [10.1109/ICNP.2010.5762764](https://doi.org/10.1109/ICNP.2010.5762764)]
 - [17] Seidel SY, Rappaport TS. 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1992, 40(2): 207–217. [doi: [10.1109/8.127405](https://doi.org/10.1109/8.127405)]
 - [18] Dobkin DM. The RF in RFID: UHF RFID in Practice. Amsterdam: Elsevier, 2007.
 - [19] Hightower J, Borriello G, Want R. SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength. Seattle: University of Washington, 2000.
 - [20] Xiao X, Jing XJ, You SQ, Zeng J. An environmental-adaptive RSSI based indoor positioning approach using RFID. In: Proc. of the 2010 Int'l Conf. on Advanced Intelligence and Awareness Internet. Beijing: IET, 2010. 127–130. [doi: [10.1049/cp.2010.0735](https://doi.org/10.1049/cp.2010.0735)]
 - [21] Brchan JL, Zhao LL, Wu JQ, Williams RE, Pérez LC. A real-time RFID localization experiment using propagation models. In: Proc. of the 2012 IEEE Int'l Conf. on RFID. Orlando: IEEE, 2012. 141–148. [doi: [10.1109/RFID.2012.6193042](https://doi.org/10.1109/RFID.2012.6193042)]
 - [22] Deyle T, Nguyen H, Reynolds M, Kemp CC. RF vision: RFID receive signal strength indicator (RSSI) images for sensor fusion and mobile manipulation. In: Proc. of the 2009 IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems. St. Louis: IEEE, 2009. 5553–5560. [doi: [10.1109/IROS.2009.5354047](https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5354047)]
 - [23] Ni LM, Liu YH, Lau YC, Patil AP. LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID. In: Proc. of the 1st IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications. Fort Worth: IEEE, 2003. 407–415. [doi: [10.1109/PERCOM.2003.1192765](https://doi.org/10.1109/PERCOM.2003.1192765)]
 - [24] Zhao YY, Ni LM. VIRE: Virtual reference elimination for active RFID-based localization. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2013, 17(3-4): 169–191.
 - [25] Chen X, Xie L, Wang CY, Lu SL. Adaptive accurate indoor-localization using passive RFID. In: Proc. of the 2013 Int'l Conf. on Parallel and Distributed Systems. Seoul: IEEE, 2013. 249–256. [doi: [10.1109/ICPADS.2013.44](https://doi.org/10.1109/ICPADS.2013.44)]
 - [26] Liu YH, Zhao YY, Chen L, Pei J, Han JS. Mining frequent trajectory patterns for activity monitoring using radio frequency tag arrays. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(11): 2138–2149. [doi: [10.1109/TPDS.2011.307](https://doi.org/10.1109/TPDS.2011.307)]
 - [27] Zhang DQ, Zhou JY, Guo MY, Cao JN, Li TB. TASA: Tag-free activity sensing using RFID tag arrays. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(4): 558–570. [doi: [10.1109/TPDS.2010.118](https://doi.org/10.1109/TPDS.2010.118)]
 - [28] Liu J, Chen XY, Chen SG, Liu XL, Wang YY, Chen LJ. TagSheet: Sleeping posture recognition with an unobtrusive passive tag matrix. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conf. on Computer Communications. Paris: IEEE, 2019. 1–9. [doi: [10.1109/INFOCOM.2019.8938282](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2019.8938282)]

- 2019.8737599]
- [29] Yang L, Li Y, Lin QZ, Li XY, Liu YH. Making sense of mechanical vibration period with sub-millisecond accuracy using backscatter signals. In: Proc. of the 22nd Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2016. 16–28. [doi: [10.1145/2973750.2973759](https://doi.org/10.1145/2973750.2973759)]
 - [30] Nikitin PV, Martinez R, Ramamurthy S, Leland H, Spiess G, Rao KVS. Phase based spatial identification of UHF RFID tags. In: Proc. of the 2010 IEEE Int'l Conf. on RFID. Orlando: IEEE, 2010. 102–109. [doi: [10.1109/RFID.2010.5467253](https://doi.org/10.1109/RFID.2010.5467253)]
 - [31] Miesen R, Kirsch F, Vossiek M. Holographic localization of passive UHF RFID transponders. In: Proc. of the 2011 IEEE Int'l Conf. on RFID. Orlando: IEEE, 2011. 32–37. [doi: [10.1109/RFID.2011.5764633](https://doi.org/10.1109/RFID.2011.5764633)]
 - [32] Azzouzi S, Cremer M, Dettmar U, Kronberger R, Knie T. New measurement results for the localization of UHF RFID transponders using an angle of arrival (AoA) approach. In: Proc. of the 2011 IEEE Int'l Conf. on RFID. Orlando: IEEE, 2011. 91–97. [doi: [10.1109/RFID.2011.5764607](https://doi.org/10.1109/RFID.2011.5764607)]
 - [33] Yang L, Chen YK, Li XY, Xiao CW, Li M, Liu YH. Tagoram: Real-time tracking of mobile RFID tags to high precision using COTS devices. In: Proc. of the 20th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Maui: ACM, 2014. 237–248. [doi: [10.1145/2639108.2639111](https://doi.org/10.1145/2639108.2639111)]
 - [34] Vasisht D, Wang J, Katabi D. RF-IDraw: Virtual touch screen in the air using RF signals. In: Proc. of the 6th Annual Workshop on Wireless of the Students, by the Students, for the Students. Maui: ACM, 2014. 1–4. [doi: [10.1145/2645884.2645889](https://doi.org/10.1145/2645884.2645889)]
 - [35] Lin QZ, Yang L, Sun YX, Liu TC, Li XY, Liu YH. Beyond one-dollar mouse: A battery-free device for 3D human-computer interaction via RFID tags. In: Proc. of the 2015 IEEE Conf. on Computer Communications. Hong Kong: IEEE, 2015. 1661–1669. [doi: [10.1109/INFOCOM.2015.7218546](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2015.7218546)]
 - [36] Bu YL, Xie L, Gong YY, Wang CY, Yang L, Liu J, Lu SL. RF-Dial: An RFID-based 2D human-computer interaction via tag array. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conf. on Computer Communications. Honolulu: IEEE, 2018. 837–845. [doi: [10.1109/INFOCOM.2018.8486309](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2018.8486309)]
 - [37] Shanguan L, Jamieson K. The design and implementation of a mobile RFID tag sorting robot. In: Proc. of the 14th Annual Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services. Singapore: ACM, 2016. 31–42. [doi: [10.1145/2906388.2906417](https://doi.org/10.1145/2906388.2906417)]
 - [38] Wei T, Zhang XY. Gyro in the air: Tracking 3D orientation of batteryless internet-of-things. In: Proc. of the 22nd Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2016. 55–68. [doi: [10.1145/2973750.2973761](https://doi.org/10.1145/2973750.2973761)]
 - [39] Ding H, Shanguan L, Yang Z, Han JS, Zhou ZM, Yang PL, Xi W, Zhao JZ. FEMO: A platform for free-weight exercise monitoring with RFIDs. In: Proc. of the 13th ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Seoul: ACM, 2015. 141–154. [doi: [10.1145/2809695.2809708](https://doi.org/10.1145/2809695.2809708)]
 - [40] Wang CY, Liu J, Chen YY, Xie L, Liu HB, Lu S. RF-Kinect: A wearable RFID-based approach towards 3D body movement tracking. Proc.s of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2018, 2(1): 41. [doi: [10.1145/3191773](https://doi.org/10.1145/3191773)]
 - [41] Yang L, Lin QZ, Li XY, Liu TC, Liu YH. See through walls with COTS RFID system! In: Proc. of the 21st Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Paris: ACM, 2015. 487–499. [doi: [10.1145/2789168.2790100](https://doi.org/10.1145/2789168.2790100)]
 - [42] Adib F, Katabi D. See through walls with WiFi! In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2013 Conf. on SIGCOMM. Hong Kong, China: ACM, 2013. 75–86. [doi: [10.1145/2486001.2486039](https://doi.org/10.1145/2486001.2486039)]
 - [43] Joshi K, Bharadia D, Kotaru M, Katti S. WiDeo: Fine-grained device-free motion tracing using RF backscatter. In: Proc. of the 12th USENIX Conf. on Networked Systems Design and Implementation. Oakland: USENIX, 2015. 189–204.
 - [44] Ding H, Qian C, Han JS, Wang G, Xi W, Zhao K, Zhao JZ. RFIPad: Enabling cost-efficient and device-free in-air handwriting using passive tags. In: Proc. of the 37th Int'l Conf. on Distributed Computing Systems. Atlanta: IEEE, 2017. 447–457. [doi: [10.1109/ICDCS.2017.141](https://doi.org/10.1109/ICDCS.2017.141)]
 - [45] Wang CY, Liu J, Chen YY, Liu HB, Xie L, Wang W, He BB, Lu SL. Multi-touch in the air: Device-free finger tracking and gesture recognition via COTS RFID. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conf. on Computer Communications. Honolulu: IEEE, 2018. 1691–1699. [doi: [10.1109/INFOCOM.2018.8486346](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2018.8486346)]
 - [46] Wang J, Katabi D. Dude, where's my card?: RFID positioning that works with multipath and non-line of sight. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2013 Conf. on SIGCOMM. Hong Kong: ACM, 2013. 51–62. [doi: [10.1145/2486001.2486029](https://doi.org/10.1145/2486001.2486029)]
 - [47] Wang G, Han JS, Qian C, Xi W, Ding H, Jiang ZP, Zhao JZ. Verifiable smart packaging with passive RFID. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2019, 18(5): 1217–1230. [doi: [10.1109/TMC.2018.2852637](https://doi.org/10.1109/TMC.2018.2852637)]
 - [48] Wang CY, Xie L, Wang W, Xue T, Lu SL. Moving tag detection via physical layer analysis for large-scale RFID systems. In: Proc. of the 35th Annual IEEE Int'l Conf. on Computer Communications. San Francisco: IEEE, 2016. 1–9. [doi: [10.1109/INFOCOM.2016.7524575](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2016.7524575)]

- [49] Ou JJ, Li M, Zheng YQ. Come and be served: Parallel decoding for COTS RFID tags. In: Proc. of the 21st Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Paris: ACM, 2015. 500–511. [doi: [10.1145/2789168.2790101](https://doi.org/10.1145/2789168.2790101)]
- [50] Jin M, He Y, Meng X, Fang DY, Chen XJ. Parallel backscatter in the wild: When burstiness and randomness play with you. In: Proc. of the 24th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. New Delhi: ACM, 2018. 471–485. [doi: [10.1145/3241539.3241544](https://doi.org/10.1145/3241539.3241544)]
- [51] Zanetti D, Danev B, Čapkun S. Physical-layer identification of UHF RFID tags. In: Proc. of the 16th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Chicago: ACM, 2010. 353–364. [doi: [10.1145/1859995.1860035](https://doi.org/10.1145/1859995.1860035)]
- [52] Han JS, Qian C, Yang PL, Ma D, Jiang ZP, Xi W, Zhao JZ. GenePrint: Generic and accurate physical-layer identification for UHF RFID tags. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2016, 24(2): 846–858. [doi: [10.1109/TNET.2015.2391300](https://doi.org/10.1109/TNET.2015.2391300)]
- [53] Xie L, Sun JQ, Cai QL, Wang CY, Wu J, Lu SL. Tell me what I see: Recognize RFID tagged objects in augmented reality systems. In: Proc. of the 2016 ACM Int'l Joint Conf. on Pervasive and Ubiquitous Computing. Heidelberg: ACM, 2016. 916–927. [doi: [10.1145/2971648.2971661](https://doi.org/10.1145/2971648.2971661)]
- [54] Xie L, Wang CY, Bu YL, Sun JQ, Cai QL, Wu J, Lu SL. TaggedAR: An RFID-based approach for recognition of multiple tagged objects in augmented reality systems. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2019, 18(5): 1188–1202. [doi: [10.1109/TMC.2018.2857812](https://doi.org/10.1109/TMC.2018.2857812)]
- [55] Li HC, Zhang PJ, Al Moubayed S, Patel SN, Sample AP. Id-match: A hybrid computer vision and RFID system for recognizing individuals in groups. In: Proc. of the 2016 CHI Conf. Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. San Jose: ACM, 2016. 4933–4944. [doi: [10.1145/2851581.2889430](https://doi.org/10.1145/2851581.2889430)]
- [56] Wang ZQ, Xu M, Ye N, Wang RC, Huang HP. RF-Focus: Computer vision-assisted region-of-interest RFID tag recognition and localization in multipath-prevalent environments. proc. of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2019, 3(1): 29. [doi: [10.1145/3314416](https://doi.org/10.1145/3314416)]
- [57] Duan CH, Rao X, Yang L, Liu YH. Fusing RFID and computer vision for fine-grained object tracking. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conf. on Computer Communications. Atlanta: IEEE, 2017. 1–9. [doi: [10.1109/INFOCOM.2017.8057161](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2017.8057161)]
- [58] Shangguan L, Jamieson K. Leveraging electromagnetic polarization in a two-antenna whiteboard in the air. In: Proc. of the 12th Int'l on Conf. on Emerging Networking EXperiments and Technologies. Irvine: ACM, 2016. 443–456. [doi: [10.1145/2999572.2999601](https://doi.org/10.1145/2999572.2999601)]
- [59] Liu J, Chen M, Chen SG, Pan QF, Chen LJ. Tag-compass: Determining the spatial direction of an object with small dimensions. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conf. on Computer Communications. Atlanta: IEEE, 2017. 10–19. [doi: [10.1109/INFOCOM.2017.8057159](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2017.8057159)]
- [60] Ding H, Qian C, Han JS, Wang G, Jiang ZP, Zhao JZ, Xi W. Device-free detection of approach and departure behaviors using backscatter communication. In: Proc. of the 2016 ACM Int'l Joint Conf. on Pervasive and Ubiquitous Computing. Heidelberg: ACM, 2016. 167–177. [doi: [10.1145/2971648.2971699](https://doi.org/10.1145/2971648.2971699)]
- [61] Nemmaluri A, Corner MD, Shenoy P. Sherlock: Automatically locating objects for humans. In: Proc. of the 6th Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services. Breckenridge: ACM, 2008. 187–198. [doi: [10.1145/1378600.1378621](https://doi.org/10.1145/1378600.1378621)]
- [62] Li P, An ZL, Yang L, Yang PL. Towards physical-layer vibration sensing with RFIDs. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conf. on Computer Communications. Paris: IEEE, 2019. 892–900. [doi: [10.1109/INFOCOM.2019.8737592](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2019.8737592)]
- [63] Pradhan S, Chai E, Sundaresan K, Qiu LL, Khojastepour MA, Rangarajan S. RIO: A pervasive RFID-based touch gesture interface. In: Proc. of the 23rd Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Snowbird: ACM, 2017. 261–274. [doi: [10.1145/3117811.3117818](https://doi.org/10.1145/3117811.3117818)]
- [64] Duan CH, Yang L, Lin QZ, Liu YH, Xie L. Robust spinning sensing with dual-RFID-tags in noisy settings. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2019, 18(11): 2647–2659. [doi: [10.1109/TMC.2018.2877985](https://doi.org/10.1109/TMC.2018.2877985)]
- [65] Liu TC, Liu YH, Yang L, Guo Y, Wang C. BackPos: High accuracy backscatter positioning system. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2016, 15(3): 586–598. [doi: [10.1109/TMC.2015.2424437](https://doi.org/10.1109/TMC.2015.2424437)]
- [66] Gong YY, Xie L, Wang CY, Bu YL, Lu SL. RF-Brush: 3D human-computer interaction via linear tag array. In: Proc. of the 15th Int'l Conf. on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Chengdu: IEEE, 2018. 290–298. [doi: [10.1109/MASS.2018.00051](https://doi.org/10.1109/MASS.2018.00051)]
- [67] Wang J, Xiong J, Jiang HB, Chen XJ, Fang DY. D-Watch: Embracing “Bad” multipaths for device-free localization with COTS RFID devices. In: Proc. of the 12th Int'l on Conf. on Emerging Networking EXperiments and Technologies. Irvine: ACM, 2016. 253–266. [doi: [10.1145/2999572.2999589](https://doi.org/10.1145/2999572.2999589)]
- [68] Parr A, Miesen R, Vossiek M. Inverse SAR approach for localization of moving RFID tags. In: Proc. of the 2013 IEEE Int'l Conf. on RFID. Orlando: IEEE, 2013. 104–109. [doi: [10.1109/RFID.2013.6548142](https://doi.org/10.1109/RFID.2013.6548142)]
- [69] Shangguan L, Yang Z, Liu AX, Zhou ZM, Liu YH. Relative localization of RFID tags using spatial-temporal phase profiling. In: Proc. of the 12th USENIX Conf. on Networked Systems Design and Implementation. Oakland: USENIX, 2015. 251–263.
- [70] Liu J, Zhu F, Wang YY, Wang X, Pan QF, Chen LJ. RF-scanner: Shelf scanning with robot-assisted RFID systems. In: Proc. of the

- IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conf. on Computer Communications. Atlanta: IEEE, 2017. 1–9. [doi: [10.1109/INFOCOM.2017.8056985](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2017.8056985)]
- [71] Zhang Y, Xie L, Bu YL, Wang YN, Wu J, Lu SL. 3-dimensional localization via RFID tag array. In: Proc. of the 14th Int'l Conf. on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Orlando: IEEE, 2017. 353–361. [doi: [10.1109/MASS.2017.22](https://doi.org/10.1109/MASS.2017.22)]
- [72] Bu YL, Xie L, Liu J, He BB, Gong YY, Lu SL. 3-dimensional reconstruction on tagged packages via RFID systems. In: Proc. of the 14th Annual IEEE Int'l Conf. on Sensing, Communication, and Networking. San Diego: IEEE, 2017. 1–9. [doi: [10.1109/SAHCN.2017.7964911](https://doi.org/10.1109/SAHCN.2017.7964911)]
- [73] Wang J, Xiong J, Chen XJ, Jiang HB, Balan RK, Fang DY. TagScan: Simultaneous target imaging and material identification with commodity RFID devices. In: Proc. of the 23rd Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Snowbird: ACM, 2017. 288–300. [doi: [10.1145/3117811.3117830](https://doi.org/10.1145/3117811.3117830)]
- [74] Wang CY, Xie L, Lu SL. Search for a needle in a haystack: An RFID-based approach for efficiently locating objects. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Istanbul: IEEE, 2014. 2144–2149. [doi: [10.1109/WCNC.2014.6952641](https://doi.org/10.1109/WCNC.2014.6952641)]
- [75] Wang CY, Xie L, Zhang KY, Wang W, Bu YL, Lu SL. Spin-antenna: 3D motion tracking for tag array labeled objects via spinning antenna. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conf. on Computer Communications. Paris: IEEE, 2019. 1–9. [doi: [10.1109/INFOCOM.2019.8737372](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2019.8737372)]
- [76] Chen ZY, Yang PL, Xiong J, Feng YH, Li XY. TagRay: Contactless sensing and tracking of mobile objects using COTS RFID devices. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conf. on Computer Communications. Toronto: IEEE, 2020. 307–316. [doi: [10.1109/INFOCOM41043.2020.9155531](https://doi.org/10.1109/INFOCOM41043.2020.9155531)]
- [77] Jin HJ, Yang ZJ, Kumar S, Hong JI. Towards wearable everyday body-frame tracking using passive RFIDs. Proc. of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2017, 1(4): 145. [doi: [10.1145/3161199](https://doi.org/10.1145/3161199)]
- [78] Xie L, Wang CY, Liu AX, Sun JQ, Lu SL. Multi-touch in the air: Concurrent micromovement recognition using RF signals. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2018, 26(1): 231–244. [doi: [10.1109/TNET.2017.2772781](https://doi.org/10.1109/TNET.2017.2772781)]
- [79] Zhao YY, Liu YH, Ni LM. VIRE: Active RFID-based localization using virtual reference elimination. In: Proc. of the 2007 Int'l Conf. on Parallel Processing. Xi'an: IEEE, 2007. 56. [doi: [10.1109/ICPP.2007.84](https://doi.org/10.1109/ICPP.2007.84)]
- [80] Pu QF, Gupta S, Gollakota S, Patel S. Whole-home gesture recognition using wireless signals. In: Proc. of the 19th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing & Networking. Miami: ACM, 2013. 27–38. [doi: [10.1145/2500423.2500436](https://doi.org/10.1145/2500423.2500436)]
- [81] Sun L, Sen S, Koutsonikolas D, Kim KH. WiDraw: Enabling hands-free drawing in the air on commodity wifi devices. In: Proc. of the 21st Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Paris: ACM, 2015. 77–89. [doi: [10.1145/2789168.2790129](https://doi.org/10.1145/2789168.2790129)]
- [82] Han J, Qian C, Wang X, Ma D, Zhao JZ, Xi W, Jiang ZP, Wang Z. Twins: Device-free object tracking using passive tags. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2016, 24(3): 1605–1617. [doi: [10.1109/TNET.2015.2429657](https://doi.org/10.1109/TNET.2015.2429657)]
- [83] Han JS, Qian C, Yang YQ, Wang G, Ding H, Li X, Ren K. Butterfly: Environment-independent physical-layer authentication for passive RFID. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2018, 2(4): 166. [doi: [10.1145/3287044](https://doi.org/10.1145/3287044)]
- [84] Wang CY, Xie L, Wang W, Chen YY, Bu YL, Lu SL. RF-ECG: Heart rate variability assessment based on COTS RFID tag array. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2018, 2(2): 85. [doi: [10.1145/3214288](https://doi.org/10.1145/3214288)]
- [85] Wang J, Adib F, Knepper R, Katabi D, Rus D. RF-compass: Robot object manipulation using RFIDs. In: Proc. of the 19th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing & Networking. Maimi: ACM, 2013. 3–14. [doi: [10.1145/2500423.2500451](https://doi.org/10.1145/2500423.2500451)]
- [86] Zhang SG, Yang CW, Jiang DM, Kui XY, Guo S, Zomaya AY, Wang JX. Nothing blocks me: Precise and real-time LOS/NLOS Path recognition in RFID systems. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5814–5824. [doi: [10.1109/JIOT.2019.2907555](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2907555)]
- [87] Wang G, Qian C, Cui KY, Ding H, Cai HF, Xi W, Han JS, Zhao JZ. A (near) zero-cost and universal method to combat multipaths for RFID sensing. In: Proc. of the 27th Int'l Conf. on Network Protocols. Chicago: IEEE, 2019. 1–4. [doi: [10.1109/ICNP.2019.8888143](https://doi.org/10.1109/ICNP.2019.8888143)]
- [88] Wang G, Qian C, Cui KY, Shi XF, Ding H, Xi W, Zhao JZ, Han JS. A universal method to combat multipaths for RFID sensing. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conf. on Computer Communications. Toronto: IEEE, 2020. 277–286. [doi: [10.1109/INFOCOM41043.2020.9155240](https://doi.org/10.1109/INFOCOM41043.2020.9155240)]
- [89] Xiao J, Zhou ZM, Yi YW, Ni LM. A survey on wireless indoor localization from the device perspective. ACM Computing Surveys, 2016, 49(2): 25. [doi: [10.1145/2933232](https://doi.org/10.1145/2933232)]
- [90] Liu XF, Cao JN, Tang SJ, Wen JQ, Guo P. Contactless respiration monitoring via off-the-shelf WiFi devices. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2016, 15(10): 2466–2479. [doi: [10.1109/TMC.2015.2504935](https://doi.org/10.1109/TMC.2015.2504935)]
- [91] Liu J, Wang Y, Chen YY, Yang J, Chen X, Cheng J. Tracking vital signs during sleep leveraging off-the-shelf WiFi. In: Proc. of the 16th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Hangzhou: ACM, 2015. 267–276. [doi: [10.1145/2746285.2746303](https://doi.org/10.1145/2746285.2746303)]
- [92] Wang Y, Liu J, Chen YY, Gruteser M, Yang J, Liu HB. E-eyes: Device-free location-oriented activity identification using fine-grained

- WiFi signatures. In: Proc. of the 20th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Maui: ACM, 2014. 617–628. [doi: [10.1145/2639108.2639143](https://doi.org/10.1145/2639108.2639143)]
- [93] Zhao MM, Liu YC, Raghu A, Zhao H, Li TH, Torralba A, Katabi D. Through-wall human mesh recovery using radio signals. In: Proc. of the 2019 IEEE/CVF Int'l Conf. on Computer Vision. Seoul: IEEE, 2019. 10113–10122. [doi: [10.1109/ICCV.2019.01021](https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.01021)]
- [94] Zhao MM, Tian YL, Zhao H, Alsheikh MA, Li TH, Hristov R, Kabelac Z, Katabi D, Torralba A. RF-based 3D skeletons. In: Proc. of the 2018 Conf. of the ACM Special Interest Group on Data Communication. Budapest: ACM, 2018. 267–281. [doi: [10.1145/3230543.3230579](https://doi.org/10.1145/3230543.3230579)]
- [95] Zhao MM, Li TH, Alsheikh MA, Tian YL, Zhao H, Torralba A, Katabi D. Through-wall human pose estimation using radio signals. In: Proc. of the 2018 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City: IEEE, 2018. 7356–7365. [doi: [10.1109/CVPR.2018.00768](https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00768)]
- [96] Zhao C, Li ZJ, Liu T, Ding H, Han JS, Xi W, Gui RW. RF-mehndi: A fingertip profiled RF identifier. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conf. on Computer Communications. Paris: IEEE, 2019. 1513–1521. [doi: [10.1109/INFOCOM.2019.8737419](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2019.8737419)]
- [97] Wang JX, Pan CF, Jin HJ, Singh V, Jain Y, Hong JI, Majidi C, Kumar S. RFID tattoo: A wireless platform for speech recognition. Proc. of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2019, 3(4): 155. [doi: [10.1145/3369812](https://doi.org/10.1145/3369812)]
- [98] Ding H, Guo L, Zhao C, Wang F, Wang G, Jiang ZP, Xi W, Zhao JZ. RFnet: Automatic gesture recognition and human identification using time series RFID signals. Mobile Networks and Applications, 2020, 25(6): 2240–2253. [doi: [10.1007/s11036-020-01659-4](https://doi.org/10.1007/s11036-020-01659-4)]
- [99] Yu YG, Wang D, Zhao R, Zhang Q. RFID based real-time recognition of ongoing gesture with adversarial learning. In: Proc. of the 17th Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2019. 298–310. [doi: [10.1145/3356250.3360045](https://doi.org/10.1145/3356250.3360045)]
- [100] Dian C, Wang D, Zhang Q, Zhao R, Yu YG. Towards domain-independent complex and fine-grained gesture recognition with RFID. Proc. of the ACM on Human-Computer Interaction, 2020, 4(ISS): 187. [doi: [10.1145/3427315](https://doi.org/10.1145/3427315)]
- [101] Ma YF, Selby N, Adib F. Minding the billions: Ultra-wideband localization for deployed rfid tags. In: Proc. of the 23rd Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Snowbird: ACM, 2017. 248–260. [doi: [10.1145/3117811.3117833](https://doi.org/10.1145/3117811.3117833)]
- [102] Jiang CK, He Y, Yang SZ, Guo JC, Liu YH. 3D-OmniTrack: 3D tracking with COTS RFID systems. In: Proc. of the 18th Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks. Montreal: ACM, 2019. 25–36. [doi: [10.1145/3302506.3310386](https://doi.org/10.1145/3302506.3310386)]
- [103] Wang H, Zhang DQ, Ma JY, Wang YS, Wang YX, Wu D, Gu T, Xie B. Human respiration detection with commodity wifi devices: Do user location and body orientation matter? In: Proc. of the 2016 ACM Int'l Joint Conf. on Pervasive and Ubiquitous Computing. Heidelberg: ACM, 2016. 25–36. [doi: [10.1145/2971648.2971744](https://doi.org/10.1145/2971648.2971744)]
- [104] Zhang FS, Zhang DQ, Xiong J, Wang H, Niu K, Jin BH, Wang YX. From fresnel diffraction model to fine-grained human respiration sensing with commodity Wi-Fi devices. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2018, 2(1): 53. [doi: [10.1145/3191785](https://doi.org/10.1145/3191785)]
- [105] Adib F, Mao HZ, Kabelac Z, Katabi D, Miller RC. Smart homes that monitor breathing and heart rate. In: Proc. of the 33rd Annual ACM Conf. on Human Factors in Computing System. Seoul: ACM, 2015. 837–846. [doi: [10.1145/2702123.2702200](https://doi.org/10.1145/2702123.2702200)]
- [106] Zhao MM, Adib F, Katabi D. Emotion recognition using wireless signals. In: Proc. of the 22nd Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2016. 95–108. [doi: [10.1145/2973750.2973762](https://doi.org/10.1145/2973750.2973762)]
- [107] Wang W, Liu AX, Shahzad M. Gait recognition using wifi signals. In: Proc. of the 2016 ACM Int'l Joint Conf. on Pervasive and Ubiquitous Computing. Heidelberg: ACM, 2016. 363–373. [doi: [10.1145/2971648.2971670](https://doi.org/10.1145/2971648.2971670)]
- [108] Yang PL, Feng YH, Xiong J, Chen ZY, Li XY. RF-Ear: Contactless multi-device vibration sensing and identification using COTS RFID. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conf. on Computer Communications. Toronto: IEEE, 2020. 297–306. [doi: [10.1109/INFOCOM41043.2020.9155251](https://doi.org/10.1109/INFOCOM41043.2020.9155251)]
- [109] Hou YX, Wang YW, Zheng YQ. TagBreathe: Monitor breathing with commodity rfid systems. In: Proc. of the 37th Int'l Conf. on Distributed Computing Systems. Atlanta: IEEE, 2017. 404–413. [doi: [10.1109/ICDCS.2017.76](https://doi.org/10.1109/ICDCS.2017.76)]
- [110] Xu XX, Chang XM, Chen FJ. Continuous respiratory volume monitoring system during sleep based on radio frequency identification tag array. Journal of Computer Applications, 2020, 40(5): 1534–1538 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.11772/j.issn.1001-9081.2019111971](https://doi.org/10.11772/j.issn.1001-9081.2019111971)]
- [111] Shangguan LF, Li ZJ, Yang Z, Li M, Liu YH. OTrack: Order tracking for luggage in mobile RFID systems. In: Proc. of 2013 Proc. IEEE INFOCOM. Turin: IEEE, 2013. 3066–3074. [doi: [10.1109/INFCOM.2013.6567119](https://doi.org/10.1109/INFCOM.2013.6567119)]
- [112] Yao L, Sheng QZ, Ruan WJ, Gu T, Li X, Falkner N, Yang Z. RF-care: Device-free posture recognition for elderly people using a passive RFID tag array. In: Proc. of the 12th EAI Int'l Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services. Coimbra: ICST, 2015. 120–129. [doi: [10.4108/eai.22-7-2015.2260064](https://doi.org/10.4108/eai.22-7-2015.2260064)]
- [113] Han JS, Ding H, Qian C, Xi W, Wang Z, Jiang ZP, Shangguan LF, Zhao JZ. CBID: A customer behavior identification system using

- passive tags. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2016, 24(5): 2885–2898. [doi: [10.1109/TNET.2015.2501103](https://doi.org/10.1109/TNET.2015.2501103)]
- [114] Shangguan L, Zhou ZM, Zheng XL, Yang L, Liu YH, Han JS. ShopMiner: Mining customer shopping behavior in physical clothing stores with COTS RFID devices. In: *Proc. of the 13th ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*. Seoul: ACM, 2015. 113–125. [doi: [10.1145/2809695.2809710](https://doi.org/10.1145/2809695.2809710)]
- [115] Liu TC, Yang L, Li XY, Huang HY, Liu YH. TagBooth: Deep shopping data acquisition powered by RFID tags. In: *Proc. of the 2015 IEEE Conf. on Computer Communications*. Hong Kong: IEEE, 2015. 1670–1678. [doi: [10.1109/INFOCOM.2015.7218547](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2015.7218547)]
- [116] Bocanegra C, Khojastepour MA, Arslan MY, Chai E, Rangarajan S, Chowdhury KR. RFGo: A seamless self-checkout system for apparel stores using RFID. In: *Proc. of the 26th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. London: ACM, 2020. 54. [doi: [10.1145/3372224.3419211](https://doi.org/10.1145/3372224.3419211)]
- [117] Zou YP, Xiao J, Han JS, Wu KS, Li Y, Ni LM. GRfid: A device-free RFID-based gesture recognition system. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2017, 16(2): 381–393. [doi: [10.1109/TMC.2016.2549518](https://doi.org/10.1109/TMC.2016.2549518)]
- [118] Li HC, Brockmeyer E, Carter EJ, Fromm J, Hudson SE, Patel SN, Sample A. PaperID: A technique for drawing functional battery-free wireless interfaces on paper. In: *Proc. of the 2016 CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems*. San Jose: ACM, 2016. 5885–5896. [doi: [10.1145/2858036.2858249](https://doi.org/10.1145/2858036.2858249)]
- [119] Tan CC, Li Q, Xie L. Privacy protection for RFID-based tracking systems. In: *Proc. of the 2010 IEEE Int'l Conf. on RFID*. Orlando: IEEE, 2010. 53–60. [doi: [10.1109/RFID.2010.5467261](https://doi.org/10.1109/RFID.2010.5467261)]
- [120] Sarma SE, Weis SA, Engels DW. Radio frequency identification: Secure risks and challenges. RSA Laboratories Cryptobytes, 2003.
- [121] Yang L, Peng P, Dang F, Wang C, Li XY, Liu YH. Anti-counterfeiting via federated RFID tags' fingerprints and geometric relationships. In: *Proc. of the 2015 IEEE Conf. on Computer Communications*. Hong Kong: IEEE, 2015. 1966–1974. [doi: [10.1109/INFOCOM.2015.7218580](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2015.7218580)]
- [122] Wang G, Cai HF, Qian C, Han JS, Li X, Ding H, Zhao JZ. Towards replay-resilient RFID authentication. In: *Proc. of the 24th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. New Delhi: ACM, 2018. 385–399. [doi: [10.1145/3241539.3241541](https://doi.org/10.1145/3241539.3241541)]
- [123] Chen XY, Liu J, Wang X, Liu HS, Jiang D, Chen LJ. Eingerprint: Robust energy-related fingerprinting for passive RFID tags. In: *Proc. of the 17th USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation*. Santa Clara: USENIX, 2020. 1101–1113.
- [124] Jin HJ, Wang JX, Yang ZJ, Kumar S, Hong J. WiSh: Towards a wireless shape-aware world using passive RFIDs. In: *Proc. of the 16th Annual Int'l Conf. on Mobile Systems*. Munich: ACM, 2018. 428–441. [doi: [10.1145/3210240.3210328](https://doi.org/10.1145/3210240.3210328)]
- [125] Xie L, Yin YF, Chen X, Lu SL, Chen DX. RFID data management: Algorithms, protocols and performance evaluation. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(3): 457–470 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.3724/SP.J.1016.2013.00457](https://doi.org/10.3724/SP.J.1016.2013.00457)]
- [126] E XZ, Li S, Chen DF. Design and development of RFID middleware for datastore. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2013, 24: 73–79 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13025.htm>
- [127] Liu J, Chen XY, Liu HS, Gong HL, Wang YY, Chen LJ. Time-efficient range detection in commodity RFID systems. In: *Proc. of the 28th Int'l Conf. on Network Protocols*. Madrid: IEEE, 2020. 1–10. [doi: [10.1109/ICNP49622.2020.9259371](https://doi.org/10.1109/ICNP49622.2020.9259371)]
- [128] Li ZT, Wei W, Zhang TZ, Wang M, Hou SJ, Peng X. Online multi-expert learning for visual tracking. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2019, 29: 934–946. [doi: [10.1109/TIP.2019.2931082](https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2931082)]
- [129] Li ZT, Zhang J, Zhang KH, Li ZY. Visual tracking with weighted adaptive local sparse appearance model via spatio-temporal context learning. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2018, 27(9): 4478–4489. [doi: [10.1109/TIP.2018.2839916](https://doi.org/10.1109/TIP.2018.2839916)]
- [130] Sun K, Zhao T, Wang W, Xie L. VSKin: Sensing touch gestures on surfaces of mobile devices using acoustic signals. In: *Proc. of the 24th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. New Delhi: ACM, 2018. 591–605. [doi: [10.1145/3241539.3241568](https://doi.org/10.1145/3241539.3241568)]
- [131] Wang W, Liu AX, Sun K. Device-free gesture tracking using acoustic signals. In: *Proc. of the 22nd Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM, 2016. 82–94. [doi: [10.1145/2973750.2973764](https://doi.org/10.1145/2973750.2973764)]
- [132] Yun SK, Chen YC, Zheng HH, Qiu LL, Mao WG. Strata: Fine-grained acoustic-based device-free tracking. In: *Proc. of the 15th Annual Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services*. Niagara Falls: ACM, 2017. 15–28. [doi: [10.1145/3081333.3081356](https://doi.org/10.1145/3081333.3081356)]
- [133] Lu L, Yu JD, Chen YY, Liu HB, Zhu YM, Liu YF, Li ML. LipPass: Lip reading-based user authentication on smartphones leveraging acoustic signals. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conf. on Computer Communications*. Honolulu: IEEE, 2018. 1466–1474. [doi: [10.1109/INFOCOM.2018.8486283](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2018.8486283)]
- [134] Zhang DQ, Wang H, Wu D. Toward centimeter-scale human activity sensing with Wi-Fi signals. *Computer*, 2017, 50(1): 48–57. [doi: [10.1109/MC.2017.7](https://doi.org/10.1109/MC.2017.7)]
- [135] An ZL, Lin QZ, Yang L. Cross-frequency communication: Near-field identification of UHF RFIDs with WiFi! In: *Proc. of the 24th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. New Delhi: ACM, 2018. 623–638. [doi: [10.1145/3241539.3241569](https://doi.org/10.1145/3241539.3241569)]
- [136] Yang L, Lin QZ, Duan CH, An ZL. Analog on-tag hashing: Towards selective reading as hash primitives in gen2 RFID systems. In:

Proc. of the 23rd Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Snowbird: ACM, 2017. 301–314. [doi: [10.1145/3117811.3117835](https://doi.org/10.1145/3117811.3117835)]

附中文参考文献:

- [6] 刘云浩. 无源感知网络. 中国计算机学会通讯, 2014, 10(6): 23–27.
- [8] 杨铮, 刘云浩. Wi-Fi雷达: 从RSSI到CSI. 中国计算机学会通讯, 2014, 10(11): 55–60.
- [13] 牛炳鑫, 刘秀龙, 谢鑫, 李克秋, 曹建农. 大规模动态RFID系统中针对热门标签类别的TOP-k查询协议. 计算机学报, 2019, 42(2): 266–281. [doi: [10.11897/SP.J.1016.2019.00266](https://doi.org/10.11897/SP.J.1016.2019.00266)]
- [110] 徐晓翔, 常相茂, 陈方进. 基于RFID标签阵列的睡眠期间呼吸量连续监测系统. 计算机应用, 2020, 40(5): 1534–1538. [doi: [10.11772/j.issn.1001-9081.2019111971](https://doi.org/10.11772/j.issn.1001-9081.2019111971)]
- [125] 谢磊, 殷亚凤, 陈曦, 陆桑璐, 陈道蓄. RFID数据管理: 算法、协议与性能评测. 计算机学报, 2013, 36(3): 457–470. [doi: [10.3724/SP.J.1016.2013.00457](https://doi.org/10.3724/SP.J.1016.2013.00457)]
- [126] 鄂晓征, 李松, 陈定方. 面向存储管理的RFID中间件设计与实现. 软件学报, 2013, 24: 73–79. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13025.htm>



王楚豫(1990—), 男, 博士, 助理研究员, CCF 专业会员, 主要研究领域为智能感知, 普适计算, RFID.



张大庆(1964—), 男, 博士, 教授, IEEE Fellow, 博士生导师, CCF 杰出会员, 主要研究领域为普适计算, 情境感知计算, 城市计算, 物联网.



谢磊(1982—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 杰出会员, 主要研究领域为物联网, 智能感知, 移动计算.



叶保留(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 杰出会员, 主要研究领域为边缘计算, 云计算.



赵彦超(1985—), 男, 博士, 副教授, CCF 专业会员, 主要研究领域为无线感知, 分布式计算.



陆桑璐(1970—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 杰出会员, 主要研究领域为分布式计算, 普适计算和感知.