

基于无源反向散射技术的智能标签：应用与挑战

郭颖, 王公仆, 李宗辉, 何睿斯, 钟章队

(北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044)

摘要: 射频识别 (RFID, radio frequency identification) 技术自被提出以来, 因其便捷高效的独特优势逐渐被广泛应用于交通、物流、工业和商业等领域。RFID 标签作为存储可识别数据的载体, 在 RFID 系统中具有至关重要的作用, 越来越多的功能与模块被嵌入 RFID 标签, 并发展成为不同应用领域的智能标签。近年来, 随着物联网和各种新型反向散射技术的发展, 无线无源智能标签逐渐兴起。无线无源智能标签应用无源反向散射技术, 借助射频信号获取能量并传输信息。从 RFID 技术入手, 简要介绍了 RFID 的发展历史和传统智能标签, 比较了传统智能标签和无线无源智能标签的区别, 总结了无线无源智能标签的优点, 列举了其在不同领域的具体应用, 并分析了当前面临的挑战性问题。

关键词: 射频识别; 无线无源智能标签; 反向散射技术; 智能表面; 射频能量采集

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00183

Smart tags based on the batteryless backscatter technology: applications and challenges

GUO Ying, WANG Gongpu, LI Zonghui, HE Ruisi, ZHONG Zhangdui

School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract: Since the radio frequency identification (RFID) technology was put forward, it has been widely used in the transportation, logistics, industry and business due to its convenience and high efficiency. As a carrier for storing recognizable data, the RFID tags play a crucial role in the Internet of things (IoT). More and more functions and modules are embedded in the RFID tags and developed into smart tags in different application fields. Recently, wireless batteryless smart tags have arisen and grown rapidly with the development of the IoT and various emerging backscatter technologies. Wireless batteryless smart tags use the passive backscatter technology to harvest the energy and transmit information through radio frequency signals. Starting from the RFID technology, the history of the RFID and smart tags was introduced briefly, the differences between traditional smart tags and emerging wireless smart tags were compared, the advantages of wireless batteryless smart tags were concluded, several specific applications of it in different fields were listed, and the open challenges were analyzed.

Key words: radio frequency identification, wireless batteryless smart tag, backscatter technology, intelligent surface, radio frequency energy harvesting

1 RFID 与传统智能标签

1.1 RFID

RFID 技术是从雷达技术演变而来的一种利用

射频信号在空间耦合实现无接触信息传输、并通过所传输的信息自动识别目标对象的技术。RFID 系统的识别信息存储在电子载体 (如标签) 中, 电子标签的天线通过电磁场将被标识物体的数据信息

收稿日期: 2020-05-18; 修回日期: 2020-08-05

通信作者: 王公仆, gpwang@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U1834210, No.61871026)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.U1834210, No.61871026)

发送至附近的读写器，读写器对接收的数据进行收集和处理。RFID系统结构如图1所示。

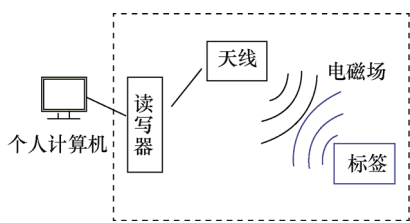


图1 RFID系统结构

RFID技术的应用最早可以追溯至第二次世界大战期间，英国空军为了识别返航的飞机，在盟军的飞机上安装一个无线电收发器，该无线电收发器反射控制塔发送的射频信号，然后控制塔根据回传信号识别飞机。

20世纪70年代末，美国政府通过Los Alamos科学实验室将RFID技术推广至民用领域。20世纪80年代，美国和欧洲的一些公司开始生产电子标签，RFID被广泛应用于各个领域。为了推进RFID技术的发展，1999年美国麻省理工学院成立Auto-ID中心，对RFID技术进行研发，通过创建RFID标准并利用网络技术形成了EPC（electronic product code）系统，为建设全球物联网而努力^[1]。21世纪初，随着RFID相关标准的推出，RFID技术得到进一步的研究与应用。

1.2 传统智能标签

在1998年第4期《Labels and Labeling》杂志上，美国德州仪器设备公司TIRIS部门战略经理Chris发表了《智能标签的本质与发展》一文，对智能标签的本质及发展进行阐述。该文对智能标签的定义为：RFID设备旨在用于安全识别和追踪商业领域及国内外市场上畅行的各种商品类目，将物流信息输出至一枚常见、轻薄的小标签上。其中，智能是指在标签生产过程中将数据分层嵌入标签承印材料，让标签具有新特征，如非接触、非视距读取及可设计编程、动态数据存储以及与其他类似标签即时、有效互通信息的能力。从某种角度来看，所有标签均可被称为智能标签，因为其都在传递重要信息，即使该信息可能只是一个日期或批号。

传统智能标签主要包括两种，即具有诊断或检测功能的标签和采用信息技术的标签。

1) 具有诊断或检测功能的标签

该类标签主要包括时间—温度指示器（TTI, time-temperature indicator）标签、新鲜度指示标签、氧指示标签、二氧化碳指示标签、包装泄露指示标

签、致病菌指示标签等。

TTI标签通常基于时间和温度累积化学变化效果，如聚合反应、氧化反应等；基于生物变化原理，如酶反应、乳酸反应等；基于物理特性、过程引发的变化，如扩散、热致变色等。利用以上原理产生不可逆的变化，显示时间和温度的累积效应。CheckPoint是一种酶促反应型TTI，其工作原理是TTI上的脂质底物经过酶促反应后导致pH降低，引起酸碱指示剂的颜色变化^[2]；WarmMark是一种扩散型TTI，其工作原理是化学试剂受热融化，并沿一定的轨迹扩散流动，引起颜色变化，WarmMark标签如图2所示。

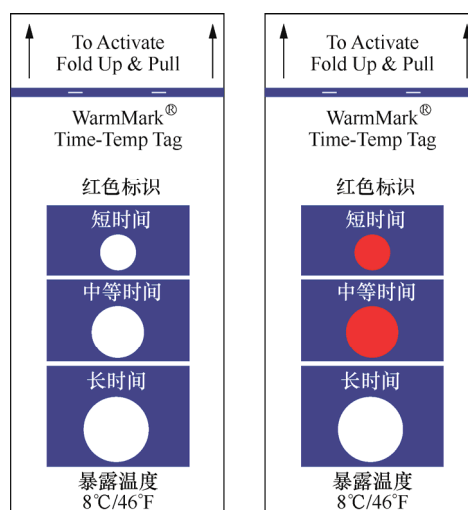


图2 WarmMark标签

新鲜度指示标签利用食品在储藏过程中释放的某些特征气体，与特定指示剂发生特征颜色反应或者酶作用等，引起指示标签的颜色变化，从而表征食品的新鲜度。Fresh-Check标签是一种新鲜度指示标签，可用于显示食品的保质期。Fresh-Check标签的活性中心圆暴露在空气中，随着时间的推移，活性中心圆的颜色不可逆地变暗，当活性中心圆的颜色深度超过外圈的颜色深度时，则指示食品已完全变质。因此，Fresh-Check标签可以很容易显示食品的新鲜度，表征食品是否能够食用^[2]，Fresh-Check标签如图3所示。

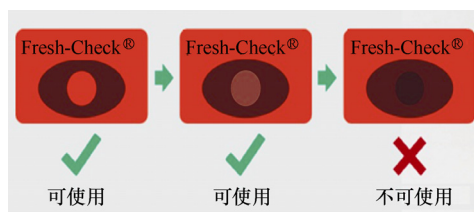


图3 Fresh-Check标签

2) 采用信息技术的标签

该类标签主要指 RFID 电子标签, RFID 电子标签分为无源标签、有源标签和半有源标签, 是 RFID 系统中存储可识别数据的电子装置, 在 RFID 系统中具有至关重要的作用, 具有存储量高、ID 唯一等特点, 可用作防伪标签, 在酒类包装、药类包装以及票务证件等方面得到了广泛应用^[3]。RFID 标签一般被做成各种不同形状, 并向小型化与多样形态发展, 可以应用于不同产品。RFID 电子标签示例如图 4 所示, 图 4 给出了 5 款 RFID 电子标签, 其适用频率为 860~960 MHz, 可应用于人员进出管理、图书管理、票卡、箱包、服装管理等领域。

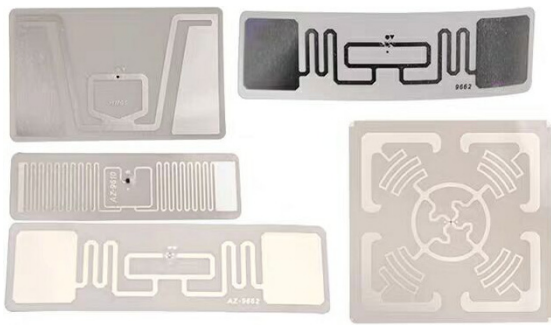


图 4 RFID 电子标签示例

2 无线无源智能标签

2.1 新型反向散射技术

传统反向散射技术的有效通信距离较短, 并且需要一个专用的射频信号, 为了改善上述情况, 各种新型反向散射技术相继被提出, 包括双站反向散射技术、环境反向散射技术等。

1) 双站反向散射技术

双站反向散射技术将载波发生器和读写器分离, 由一个专门的载波发生器发送固定载波, 读写器仅负责解码、解调标签发送的信息。通过将载波发生器放置在标签附近, 可以减少路径损耗, 有效扩大通信距离^[4]。

2) 环境反向散射技术

环境反向散射技术不需要载波发生器, 而是利用周围环境中的现有信号 (包括电视信号、Wi-Fi 信号等), 实现射频供电设备的无线通信, 该技术通过电子标签反射与不反射现有未知信号两种状态完成设备间的数据传输。

2.2 无线无源智能标签原理

近年来, 随着物联网和各种新型反向散射技术的

发展, 基于无源反向散射技术的智能标签 (即无线无源智能标签) 逐渐兴起。需要注意的是, 无线无源智能标签不同于传统智能标签, 两者的重要区别在于能量来源、功能模块以及是否应用新型反向散射技术。

传统智能标签通常不需要能量 (如 TTI 标签、新鲜度指示标签) 或者不需要利用内置电池 (如有源 RFID 标签)、阅读器 (如无源 RFID 标签) 激活产生能量。无线无源智能标签基于环境反向散射技术, 从周围环境中的现有信号 (如无线电视信号、无线广播信号和 Wi-Fi 信号) 中获取能量, 并通过数据采集单元感知信息, 如被依附物体的位置信息或所处环境的温度、湿度等环境信息, 最后通过切换反射和不反射两种状态完成数据传输, 无线无源智能标签工作原理如图 5 所示。英特尔公司 (Intel Corporation) 西雅图研究中心总工程师 Smith 等^[5]开发了无线识别和感应平台 (WISP, wireless identification and sensing platform), 研究可获取射频能量的无线无源智能标签。

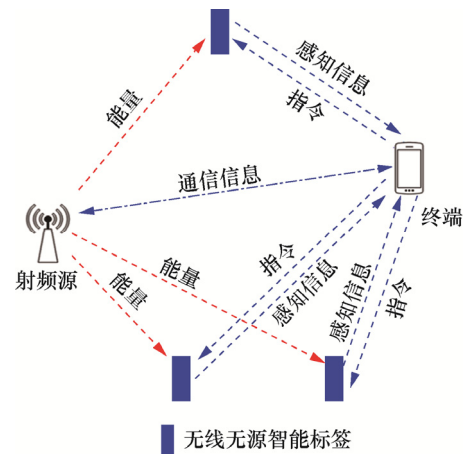


图 5 无线无源智能标签工作原理

在图 5 中, 无线无源智能标签从射频源信号中获取能量, 无线无源智能标签与终端之间为双向通信, 由无线无源智能标签向终端传输感知信息, 终端可以向无线无源智能标签传输指令。射频源与终端之间可以进行双向通信, 如射频源为基站, 终端为智能手机。

2.3 无线无源智能标签的反射强度

无线无源智能标签对于电磁波的反射损耗远小于其他介质对电磁波的反射损耗, 即无线无源智能标签反射无线信号的强度远大于其他介质反射无线信号的强度。经不同反射面反射的电磁波如图 6 所示, 假设射频源发出的电磁波经玻璃、石灰

石、金属和无线无源智能标签 4 种不同第二介质反射，并分别计算电磁波经不同第二介质反射的反射损耗，与标签的反射损耗进行对比说明。

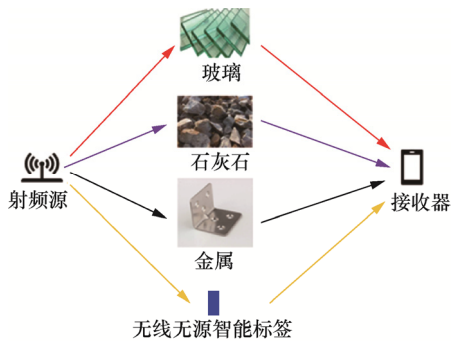


图6 经不同反射面反射的电磁波

假设第一介质为自由空间，且第一介质与第二介质的透射率相等，垂直极化和水平极化两种情况下的反射系数分别为

$$\Gamma_1 = \frac{-\varepsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\varepsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (1)$$

$$\Gamma_2 = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (2)$$

其中， θ_i 为入射角， ε_r 为电介质的介电常数^[6]。玻璃、石灰石和金属的介电常数分别为 $\varepsilon_r = 4$ 、 $\varepsilon_r = 7.51$ 和 $\varepsilon_r = 10$ ，在水平极化和垂直极化两种情况下，不同反射材料与不同入射角下的反射系数如图 7 所示，根据该实验结果可进一步得到反射损耗。

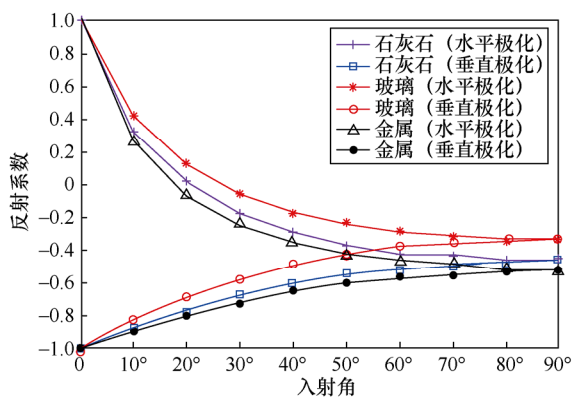


图7 不同反射材料与不同入射角下的反射系数

根据反射损耗 $RL = -20 \lg |\Gamma|$ ，得到不同入射角下电磁波的反射损耗，不同反射材料与不同入射角下的反射损耗如图 8 所示。智能标签对电磁波的反射损耗为 2~4 dB，而在图 8 所示结果中，其余

反射材料对于电磁波的反射损耗在大多数情况下高于智能标签对电磁波的反射损耗，说明了标签可大大降低对电磁波的反射损耗。具体来说，假设入射电磁波的功率为 1 W，经不同反射面反射后的电磁波功率如表 1 所示。经智能标签反射后，电磁波功率为 0.4~0.63 W。在水平极化情况下，经智能标签反射后的电磁波功率比经其他反射面反射后的高约 0.3~0.5 W；在垂直极化情况下，经智能标签反射后的电磁波功率比经其他反射面反射后的高约 0.2~0.4 W。

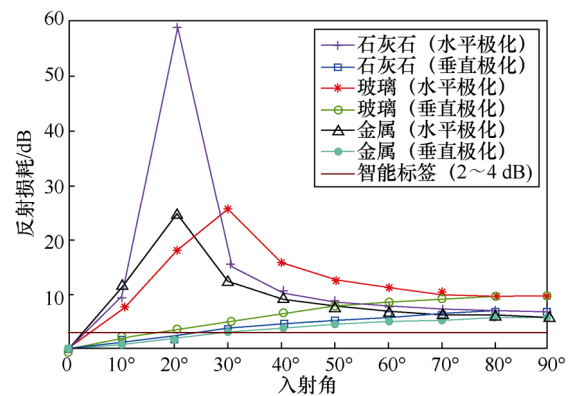


图8 不同反射材料与不同入射角下的反射损耗

表1 经不同反射面反射后的电磁波功率

反射面	水平极化/W	垂直极化/W
石灰石	0.06	0.25
玻璃	0.05	0.40
金属	0.12	0.40

2.4 无线无源智能标签的优点

无线无源智能标签具有很多优点，具体如下。

1) 不需要电池：无线无源智能标签从周围的射频信号（如电视、收音机和手机基站等其他源头发射的信号）中获取能量，供自身工作使用。

2) 部署方便：无线无源智能标签的物理尺寸通常足够小，可以贴附或集成于几乎任何物体上，部署广泛，实现了在需要时被唤醒，降低了标签在部署方面的要求。

3) 智能信号增强：无线无源智能标签对于电磁波的反射损耗较低，且标签可在相邻区域内进行广泛部署，多个标签均可用于向终端传输信息，从而增强终端接收信号的强度。

4) 感知信息传输：无线无源智能标签采取反向散射技术，反向散射技术作为一种通信技术，尤其

适用于人工、有线通信方式不方便或者不安全的场景下信息的感知与传输^[7]。

基于上述优点,无线无源智能标签能有效增强终端的通信信息传输能力、感知信息获取能力以及重要物品定位能力。

3 无线无源智能标签的应用

在实际应用中,无线无源智能标签可以解决如下 4 个问题。

1) 终端对周边感知信息缺乏有效获取方式

无线无源智能标签可贴附或集成于几乎任何物体上,采集物体或物体周边的信息,并通过反向散射向终端传输感知信息,有效增强了终端的感知信息获取能力。

2) 贵重物品缺乏有效监督或跟踪

监督或跟踪贵重物品的传统智能标签已应用于物流追踪、商场和仓库等商业场所的防盗方面,但传统智能标签一般需要读写器读取信息,不适合在家庭和个人生活等场景下使用。

目前,市场上已发布了多款用于确定物品位置的蓝牙追踪器。来自意大利的科技创业家 Lapo 推出了一款宽度仅为 6 mm 的小型追踪器 filo, Tile 公司发布了防盗追踪器 tile, filo 和 tile 分别如图 9、图 10 所示。filo 和 tile 内置蓝牙芯片,通过蓝牙与手机连接,将其附在贵重物品上,可确定物品位置。当物品丢失时会在手机端发出警报,能够帮助人们寻找物品、追踪定位,然而,filo 和 tile 均采用可拆卸式纽扣电池供电,电量耗尽后需回收换新,增加了人工成本。

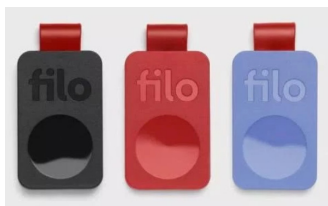


图 9 filo



图 10 tile

将无线无源智能标签附于贵重物品上,采用反向散射技术从射频信号中提取能量用于传输信息,

可以在有效追踪物品位置的同时,避免了更换电池的人工维护问题。

3) 无线传感器能源问题

当前,多数传感器需要使用存储式电源,如电池供电或者太阳能供电,其能量有限或者受限于外部条件。此外,当传感器在危险或人们不便接近的环境下工作时,无法及时补充能量。利用电池或者太阳能作为能源的传感器使用不够便捷,需要人工维护。

无线无源智能标签不需要电池,并且可被集成应用于人们不便到达的地区,如在钢筋混凝土结构中嵌入 WISP 标签(基于 WISP 的电子标签可简称为 WISP 标签),可探测大楼是否在地震中受损;WISP 标签和一个内嵌式水感应标签可以被放置在屋顶的瓷砖下,通过定期读取标签检查漏水情况,可以在造成更大损失前让用户快速离开和修复漏洞。

4) 传统无线通信发射载波功耗大

无线无源智能标签用于感知信息传输,能极大地降低数据传输功耗,主要原因在于相比于传统无线技术,反向散射技术的功耗更低。

智能机与功能机各模块功耗如表 2 所示,表 2 总结了智能机与功能机各模块的功耗,包括液晶显示器(LCD, liquid crystal display)功耗、系统功耗(除去 LCD 功耗)、射频功能(强、弱信号)CAT4 模式下的功耗等。由表 2 可知手机在 2G、3G、4G 模式下发送射频信号时的典型电流消耗值,且手机电池的额定电压为 3.7 V,由 $P=UI$ 可得发送射频信号时的功耗为 592~2 220 mW。若标签不依赖于环境中已有的无线信号,而是依靠于智能机发送载波信号进行通信,则功耗在几百毫瓦以上。与传统无线技术,如 Wi-Fi(几十毫瓦)、蓝牙/蓝牙低功耗(几毫瓦)和通用移动通信技术的长期演进(几百毫瓦)相比,反向散射通信的功耗约为传统无线通信功耗的千分之一,甚至万分之一,部分反向散射通信研究项目的关键性能如表 3 所示。

表 3 总结了部分反向散射通信研究项目的关键性能^[8]。反向散射通信的功耗在微瓦量级,约为 1~100 μ W,相比于传统无线通信,其功耗大幅度降低,这是反向散射技术在物联网设备通信中的重要优势,是实现大规模物联网部署的关键。

可以预见,无线无源智能标签在今后将得到更广泛的应用,对相关的应用场景举例说明如下。

表 2 智能机与功能机各模块功耗

模块	尺寸与模式	消耗电流值
LCD	2.4 inch (1)	一般小于 80 mA
LCD	3.5 inch (2)	一般小于 120 mA
LCD	4 inch (2)	一般小于 160 mA
LCD	4.5 inch (2)	一般小于 200 mA
LCD	5 inch (2)	一般小于 240 mA
LCD	5.5 inch (2)	一般小于 280 mA
系统 (除去 LCD)	播放 MP3 (1)	80~120 mA
系统 (除去 LCD)	Wi-Fi 播放视频 (2)	200~280 mA
射频功能 (强、弱信号) CAT4 模式下	2G 模式下	100~280 mA, 典型的电流消耗值为 160 mA
射频功能 (强、弱信号) CAT4 模式下	3G 模式下	200~800 mA, 典型的电流消耗值为 400 mA
射频功能 (强、弱信号) CAT4 模式下	4G 模式下	200~1 150 mA, 典型的电流消耗值为 600 mA

注：对于标注 (1)、(2) 的分项，其对应电流值分别为功能机、智能机所耗；对于无标注的分项，智能机和功能机在对应模式下所耗电流相同；表 2 中的尺寸指手机屏幕对角线的长度。

表 3 部分反向散射通信研究项目的关键性能

名称	是否实现频移	标签调制方式	最小功率/ μ W	最大比特率		距离		部署	
				比特率	距离/m	发射器到标签/m	标签到接收器/m	发射器	接收器
BackFi ^[9]	否	数字 (QPSK)	N/A	5 Mbit/s	1	7	7	环境 Wi-Fi	软件定义的无线电
环境反向散射 ^[10]	否	数字 (ASK)	0.79	10 kbit/s	0.4	N/A	2.5	环境 TV	定制硬件
Wi-Fi 反向散射 ^[11]	否	数字 (ASK)	9.65	1 kbit/s	N/A	N/A	2.1	商用 Wi-Fi	商用 Wi-Fi
无源 Wi-Fi ^[12]	是	数字	14.5 (IC)	11 Mbit/s	N/A	3.7	16.8	定制硬件	商用 Wi-Fi
HitchHike ^[13]	是	数字	14.5 (IC)	300 kbit/s	34	1	54	商用 Wi-Fi	商用 Wi-Fi
半导体反向散射 ^[14]	是	数字 (GFSK)	28 (IC)	11 Mbit/s	N/A	0.9	27.4	商用 BLE	商用 Wi-Fi/ZigBee
无电池手机 ^[15]	否	模拟 (AM)	3.48	N/A	N/A	15.2	15.2	定制硬件	定制硬件
LoRa 反向散射 ^[16]	否	模拟 (CSS)	9.25 (IC)	37.5 kbit/s	N/A	5	2 800	定制硬件	商用 LoRa
FM 反向散射 ^[17]	是	模拟	11.07(IC)	3.2 kbit/s	4.9	N/A	18.3	环境 FM	商用 FM

注：对于所有标注 (IC) 的数字，其值是集成电路 IC (integrated circuit) 的仿真结果。

1) 轨道环境入侵检测

列车在露天高速行驶过程中的环境因素不可预测，轨道异物（如山体滑坡、泥石流塌方、滞留在轨道上作业的工作人员等）严重影响列车的运行安全。目前，轨道环境入侵检测方法主要有安装探测电缆、视频内容分析、雷达监测技术等，但安装探测电缆的可靠性较差，视频监控系统中的人工参与性高，雷达监测成本较高。而无线无源智能标签可以进行大范围部署，不需要电池，可以代替高成本、高能耗的传感器设备集成在检测区域中，每个标签对一定区域中的物体进行信息采集并传输，终端分析并判断物体是否在入侵区域中。

2) 分布式的大规模反向散射

在当前无线频谱资源日趋紧张的情况下，大规模多输入多输出 (MIMO, multiple-input-multiple-output) 系统能够深度利用空间维度的无线资源，显著提升系统频谱效率和功率效率，是当前的研究热点之一，其在毫米波段通信中的应用也引起了学者们的关注。针对时分多工 (TDD, time division duplex) 和频分多工 (FDD, frequency division duplex) 大规模 MIMO 系统，文献[18]从阵列信号处理的角度研究了大规模 MIMO 系统中的双宽带效应，即空间宽带效应和频率宽带效应，并提出了解决策略。文献[19]建立了空间基扩展模型表示参数维数更少的上行/下传信道，降低了信道估计的训

练开销，有效提高了频谱效率。

作为大规模 MIMO 系统的延伸,可重构智能表面 (RIS, reconfigurable intelligent surface) 又被称为大型智能表面 (LIS, large intelligent surface), 得到了广泛关注。RIS 技术保留了大规模 MIMO 系统的所有优势, 如三维空间能量聚焦, 可以实现无线充电、超精确遥感和数据传输^[20]。RIS 技术是集成式的大规模反向散射技术, 由许多接近无源的反射器组成, 每个反射器都能以软件控制方式与信号进行交互。具体来说, 每个反射器可以根据感知的信道状态信息 (CSI, channel state information) 改变入射信号的相位, 不需要复杂的解码、编码和射频处理操作, 从而实现高性能的通信链路, RIS 原理如图 11 所示。

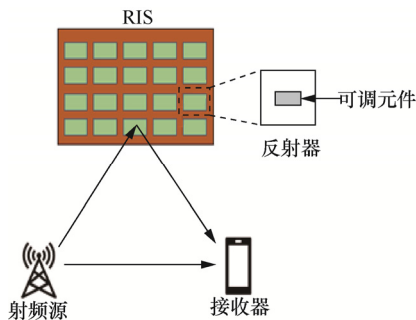


图 11 RIS 原理

由 RIS 辅助的无线通信系统可以构建智能无线环境, 即可控、可重新配置的传播环境。在 RIS 的前期研究中, 主要考虑反射元件的连续相移, 但由于硬件的限制, 在实际应用中难以实现。文献[21]研究了离散相移约束下 RIS 辅助无线通信的波束成形优化问题, 并验证了使用离散相移的 RIS 可以显著降低发射功率, 在可达速率和接收信噪比等其他指标方面表现良好。文献[22]将反向散射链路与 RIS 进行集成, 通过推导复合信道中反向散射信道占主导地位的概率确定反射器的数量, 增强反向散射通信, 同时辅助直接通信。文献[23]考虑了基于 RIS 的、支持高可靠物联网通信的反向散射系统, 对智能相位调整和随机相位调整的符号误差概率 (SEP, symbol error probability) 进行分析研究。结果表明, 在 RIS 上有大量反射元素可减小 SEP, 在中度信噪比下可以实现高可靠性, 这说明 RIS 方案很可能是未来物联网领域有前途的候选方案之一。

与集成式 RIS 不同, 设想应用无线无源智能

标签可以实现分布式的大规模反向散射, 多个无线无源智能标签分布式部署解决了环境障碍物导致的难以通信的问题。分布式是指不要求无线无源智能标签集中集成, 仅在需要时被唤醒。分布式大规模反向散射如图 12 所示, 在回字形办公楼内, 由于墙壁阻碍, 接收器无法接收来自射频源的信号, 将无线无源智能标签分布式嵌入周围墙壁, 由智能标签通过反向散射向接收器传输信息, 实现射频源与接收器之间的无线通信, 此时各个智能标签仅反射接收的无线信号, 不采集周边信息。利用无线无源智能标签不需要电池以及可广泛部署的特点, 可以将其嵌入衣服、家具、墙壁和建筑立面等对象, 符合未来低成本、低能耗、无处不在的无线通信的愿景。

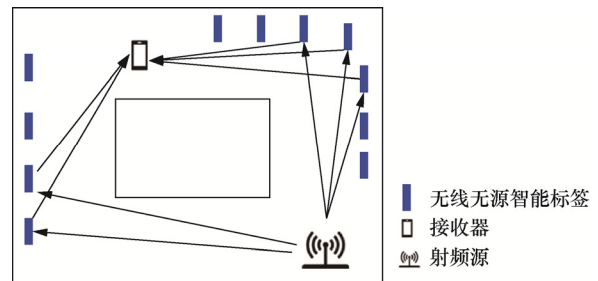


图 12 分布式大规模反向散射

4 无线无源智能标签发展面临的挑战

4.1 射频能量采集

相比于电池能量有限的传感器设备, 无线无源智能标签不需要电池, 而是采用能量收集 (EH, energy harvesting) 技术^[24-25]从环境射频信号或者专用射频源中获取能量, 来自射频信号的能量不受天气等环境影响, 是一种稳定、持续的能量来源。

能量采集由射频能量采集器件完成, 美国 Powercast 公司是将无线电中的射频能量转换成直流电的远程、超功率无线充电技术的先驱和领导者。该公司制造了 915 MHz 射频能量采集器件 P1110B 和 P2110B, 应用领域涉及工业监控、智能电网、建筑自动化等, P1110B 原理结构、P2110B 原理结构分别如图 13、图 14 所示。

1) P1110B

P1110B 将射频能量转换成直流电, 并提供给附加的存储元件。当存储元件的电压达到可调电压阈值时, P1110B 自动停止充电。

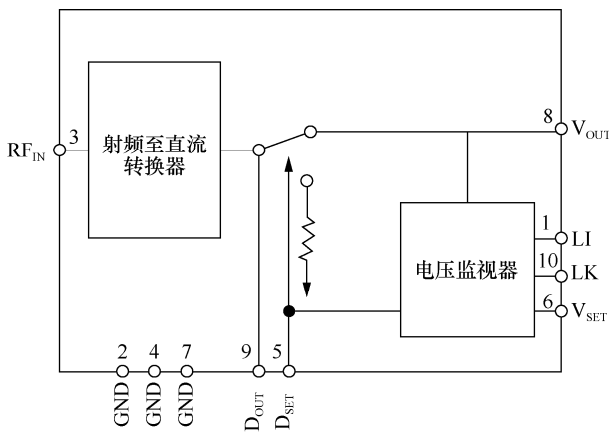


图 13 P1110B 原理结构

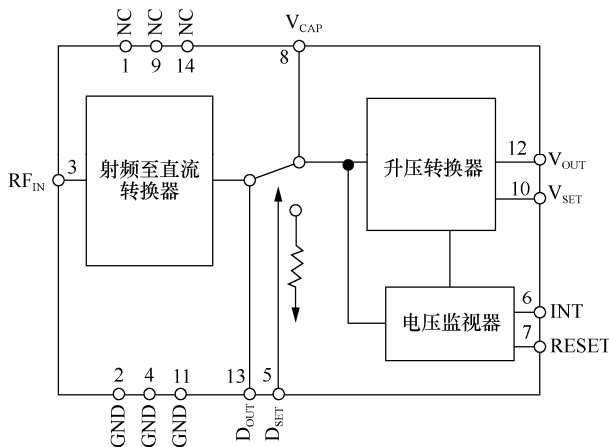


图 14 P2110B 原理结构

2) P2110B

P2110B 将射频能量转换成直流电并存储在电容器中。当电容器的电压达到充电阈值时，P2110B 将电压调至设定的输出电压电平并输出电压。当电容器上的电荷下降到低电压阈值时，电压输出被关闭。

近年来，无线能量采集产业不断发展，国外由 Powercast 公司推出的 PowerSpot 发射器可同时为 30 台设备提供无线能量，覆盖距离达 24 m；Energous 公司与 Dialog 公司合作推出的 WattUp 射频无线充电平台可使设备在距离发射器 4.6 m 内完成充电。我国杭州钛比科技有限公司推出了基于射频能量收集的可充电无线传感器节点 TB-Powercast，其最大充电距离可达 10 m；南京启纬芯微电子有限公司推出了基于 TurboNFC 技术的 TN21 系列与 TN31 系列芯片，无线功率接收可达 250 mW。尽管无线充电技术已经取得了重大进展，射频能量采集器件在无源设备的实际应用中仍然存在很多限制性问题。

1) 能量转换效率

能量转换效率是射频能量采集器件的重要性指标之一，当射频信号能量较低时，转换效率会迅速降低。在射频能量采集器件的设计中，目前提高转换效率的方法大多是通过降低由金属—氧化物—半导体场效应晶体管（MOSFET, metal-oxide-semiconductor field-effect transistor）构成的整流二极管的阈值电压减小级联泄漏电流，但效果不理想，需要进一步改进或发展其他新方法。

2) 灵敏度

灵敏度决定射频能量采集器件工作的最大范围。P2110B 的灵敏度约为 -11 dBm，这意味着集成 P2110B 的标签要接收功率为 -11 dBm 的信号进行激活后才能开始进行能量采集，极大地限制了标签的工作范围。通过提高灵敏度，可以允许在距射频能量源更远的距离范围内实现射频至直流电的电源转换。然而，随着标签与大功率节点之间距离的增加，标签的接收功率降低，使得转换效率降低，标签的充电时间也会明显延长，设计高增益的标签天线能够在一定程度上解决灵敏度对工作距离的限制。

假设无线无源智能标签以手机射频信号为射频源，按照 Friis 公式计算得到无线无源智能标签的接收功率为

$$P_{\text{tag}} = P_{\text{ms}} + G_{\text{ms}} + G_{\text{tag}} + 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d} - 3 \quad (3)$$

其中， P_{ms} 表示手机射频端口的输出功率为 23 dBm， P_{tag} 为无线无源智能标签接收的信号功率， G_{ms} 和 G_{tag} 分别为手机发射/接收天线增益与无线无源智能标签天线的增益，假设 $G_{\text{ms}} = 6$ dBi， d 为手机与无线无源智能标签之间的距离，假设手机天线与标签天线之间的极化损耗为 3 dBm。

手机信号的载波频率一般在 450 MHz、800 MHz、900 MHz、1 800 MHz 等频段，因此，在 450 MHz 频率、射频能量采集器件灵敏度分别为 -11 dBm、-20 dBm 的情况下（-11 dBm \approx 0.079 mW，-20 dBm \approx 0.01 mW），计算无线无源智能标签天线增益和手机与标签距离之间的关系，标签天线增益与激活距离的关系如图 15 所示。由图 15 可知，在增益相同的情况下，高灵敏度标签的激活距离比低灵敏度标签的激活距离更远；在灵敏度一定的情况下，天线增益越高激活距离越远，证明了高天线增益能够在

一定程度上降低灵敏度对标签工作距离的限制。然而在实际应用中不能无限提高天线增益,因此,需要针对如何提高射频能量采集器件的灵敏度问题进行重点研究。

4.2 反向散射对无线信道的影响

反向散射对无线信道的影响主要包括如下两方面。

1) 由于无线智能标签基于新型反向散射技术传输数据,所以终端还会接收来自环境的其他射频信号的干扰。但是对于终端来说,环境中的射频信号一般是未知的,即终端不知道信息是否为干扰信息,所以难以执行有效的干扰抑制或消除。

2) 新型反向散射的信道不同于传统的点到点系统或协作系统,信道特性也有区别。因此,需要进一步研究新的、适用的相关理论体系,包括反向散射信道衰落特性、路径损耗模型、信道估计、编码和检测等。

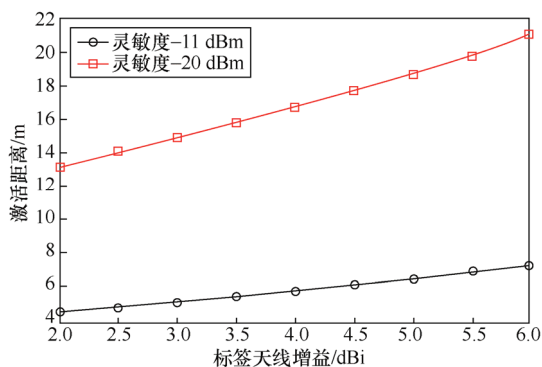


图 15 标签天线增益与激活距离的关系

4.3 多标签协调处理

随着无线无源智能标签灵敏度的提升以及反向散射技术的应用扩大了通信距离,终端识别区域内可识别的标签数量增多,多标签协调处理问题更突出。目前,研究者已提出一些防碰撞机制来协调终端与多标签之间的通信。现有的 RFID 系统常用以 ALOHA 算法为基础的改进算法,由于无法进行能量收集,所以不适用于环境反向散射通信系统。文献[26]提出了针对环境反向散射通信系统的、基于时分多址 (TDMA, time division multiple access) 的集中式机制。集中式 TDMA 机制缺乏灵活性,需要各节点进行精确的定时和同步,从复杂度、能耗和网络拓扑的动态性来看,不适用于零星传输、功率受限的反向散射通信,使有限的频谱资源更紧张。因此,设计合适的多标签协调处理机制对于提

高系统性能具有重要的实际意义。

4.4 其他挑战

除了上述问题,无线无源智能标签的发展还面临其他挑战。如无线安全问题,由于无线信号的空间传播特性,需要考虑如何防止无线无源智能标签与终端之间的通信被监听。此外,无线无源智能标签采集的能量,一部分用于自身工作,一部分用于反向散射传输信息,需要考虑如何对有限的能量进行优化利用等。

5 结束语

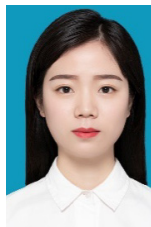
本文简要介绍了 RFID 技术和智能标签,比较了传统智能标签与无线无源智能标签的区别,总结了无线无源智能标签的优点,列举了相关应用场景,并分析了当前存在的挑战性问题,包括射频能量采集、反向散射对无线信道的影响、多标签协调处理等。总之,新兴的无线无源智能标签具有重要的潜在市场应用价值,同时也面临很多挑战,随着物联网市场的不断发展,该技术在各个领域的应用有待进一步探索。

参考文献:

- [1] 单承贛, 单玉峰, 姚磊, 等. 射频识别(RFID)原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
SHAN C G, SHAN Y F, YAO L, et al. Principle and application of radio frequency identification (RFID)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [2] 赵冬菁, 仲晨, 朱丽, 等. 智能包装的发展现状、发展趋势及应用前景[J]. 包装工程, 2020, 41(13): 72-81.
ZHAO D J, ZHONG C, ZHU L, et al. Development status, tendency and application prospect of intelligent packaging[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(13): 72-81.
- [3] 高建良, 贺建颺. 物联网 RFID 原理与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
GAO J L, HE J B. RFID principle and technology of Internet of things[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [4] KIMIONIS J, BLETSAS A, SAHALOS J N. Increased range bistatic scatter radio[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(3): 1091-1104.
- [5] SMITH J R, SAMPLE A P, POWLEDGE P S, et al. A wirelessly-powered platform for sensing and computation[C]//Ubicomp: Ubiquitous Computing, International Conference. Springer, 2006.
- [6] THEODORE S R. 无线通信原理与应用(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
THEODORE S R. Principles and applications of wireless communication (2nd edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018.
- [7] KUESTER D, POPOVIC Z. How good is your tag?: RFID backscatter metrics and measurements[J]. IEEE Microwave Magazine, 2013, 14(5): 47-55.

- [8] XU C R, YANG L, ZHANG P Y. Practical backscatter communication systems for battery-free Internet of things: a tutorial and survey of recent research[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 35(5): 16-27.
- [9] BHARADIA D, JOSHI K R, KOTARU M, et al. BackFi: high throughput Wi-Fi backscatter[C]//ACM Special Interest Group Data Communication (SIGCOMM). ACM, 2015: 283-296.
- [10] LIU V, PARKS A, TALLA V, et al. Ambient backscatter: wireless communication out of thin air[C]//ACM Special Interest Group Data Communication (SIGCOMM). ACM, 2013: 39-50.
- [11] KELLOGG B, PARKS A, GOLLAKOTA S. Wi-Fi backscatter: Internet connectivity for RF-powered devices[C]//ACM Special Interest Group Data Communication (SIGCOMM). ACM, 2014: 607-618.
- [12] KELLOGG B, TALLA V, GOLLAKOTA S, et al. Passive Wi-Fi: bringing low power to Wi-Fi transmissions[J]. Getmobile Mobile Computing & Communications, ACM, 2017, 20(3): 38-41.
- [13] ZHANG P, BHARADIA D, JOSHI K R, et al. HitchHike: practical backscatter using commodity Wi-Fi[C]//ACM Conference of Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). ACM, 2016: 259-271.
- [14] IYER V, TALLA V, KELLOGG B, et al. Intertechnology backscatter: towards Internet connectivity for implanted devices[C]//ACM Special Interest Group Data Communication (SIGCOMM). ACM, 2016: 356-369.
- [15] TALLA V, KELLOGG B, GOLLAKOTA S, et al. Battery-free cellphone[C]//ACM International Joint Conference of Pervasive and Ubiquitous Computing (UBICOMP). ACM, 2017, 25: 1-20.
- [16] TALLA V, HESSAR M, KELLOGG B, et al. LoRA backscatter: enabling the vision of ubiquitous connectivity[C]//ACM International Joint Conference of Pervasive and Ubiquitous Computing (UBICOMP). ACM, 2017, 105: 1-24.
- [17] WANG A, IYER V, TALLA V, et al. FM backscatter: enabling connected cities and smart fabrics[C]//Networked Systems Design and Implementation (NSDI). 2017: 243-258.
- [18] WANG B L, GAO F F, JIN S, et al. Spatial-and frequency-wideband effects in millimeter-wave massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(13): 3393-3406.
- [19] XIE H X, GAO F F, ZHANG S, et al. A unified transmission strategy for TDD/FDD massive MIMO systems with spatial basis expansion model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(4): 3170-3184.
- [20] HU S, RUSEK F, EDFORS O. Beyond massive MIMO: the potential of data transmission with large intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(10): 2746-2758.
- [21] WU Q Q, ZHANG R. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(3): 1838-1851.
- [22] ZHAO W J, WANG G P, ATAPATTU S, et al. Is backscatter link stronger than direct link in reconfigurable intelligent surface-assisted system?[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(6): 1342-1346.
- [23] ZHAO W J, WANG G P, ATAPATTU S, et al. Performance analysis of large intelligent surface aided backscatter communication systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(7): 962-966.
- [24] XIONG K, FAN P Y, ZHANG C. Wireless information and energy transfer for two-hop non-regenerative MIMO-OFDM relay networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(8): 1595-1611.
- [25] VARSHNEY L R. Transporting information and energy simultaneously[C]//2008 IEEE International Symposium on Information Theory. IEEE, 2008: 1612-1616.
- [26] YANG G, LIANG Y C. Backscatter communications over ambient OFDM signals: transceiver design and performance analysis[C]// 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2016: 1-6.

[作者简介]



郭颖（1995-），女，河北保定人，北京交通大学硕士生，主要研究方向为无线信号处理与移动互联网。



王公仆（1980-），男，安徽安庆人，北京交通大学教授，主要研究方向为无线信号处理与移动互联网。



李宗辉（1986-），男，重庆人，北京交通大学讲师，主要研究方向为实时网络、异构网络融合、软/硬件协同优化与系统结构。



何睿斯（1987-），男，湖北襄阳人，北京交通大学教授，主要研究方向为无线信道建模与5G通信技术。



钟章队（1962-），男，湖南衡阳人，北京交通大学教授，主要研究方向为轨道交通无线通信与网络。