

## 面向零功耗物联网的反向散射通信综述

张晓茜<sup>1,2</sup>, 徐勇军<sup>1,3</sup>

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 数智化通信新技术应用研究中心, 重庆 400065;  
3. 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

**摘 要:** 物联网能够提升人们的生活质量, 但同时带来能量消耗剧增与网络传输拥堵的问题。为此, 面向零功耗物联网的反向散射通信技术被提出, 分析与研究该技术的发展现状及所面临的技术难题有着非常重要的意义。首先, 阐明了零功耗物联网与反向散射通信的基本定义与技术特点; 其次, 描述了 6G 网络中零功耗反向散射通信的典型应用场景; 再次, 给出了零功耗物联网反向散射通信的系统架构, 并对面向 6G 零功耗物联网的反向散射通信关键技术进行了探讨; 最后, 浅析了零功耗反向散射通信所面临的技术挑战与未来潜在的研究方向。此外, 所提观点有望推动物联网向全场景、全频谱、全业务方向发展, 具有重要的理论意义与现实价值。

**关键词:** 零功耗物联网; 反向散射通信; 6G; 智能反射表面

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022199

## Survey on backscatter communication for zero-power IoT

ZHANG Xiaoxi<sup>1,2</sup>, XU Yongjun<sup>1,3</sup>

1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China  
2. Research Center of New Digital Intelligent Telecommunication Technology Applications, Chongqing 400065, China  
3. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing 400065, China

**Abstract:** Although Internet of things (IoT) can enhance the quality of people's life, but it also brings the problems of energy consumption and network transmission congestion. To solve the above problems, backscatter communication technology for zero-power IoT has been proposed. Thus, it is of great significance to survey the state-of-the-art technologies and study the relevant challenges. Firstly, the basic definition and technical characteristics of zero-power IoT and backscatter communications were presented. Secondly, several typical application scenarios for zero-power backscatter communications in 6G were introduced. Thirdly, the system structure of zero-power backscatter communications was given and the potential key technologies of zero-power backscatter communications for 6G applications were also discussed. Finally, the technical challenges and potential research directions for zero-power backscatter communications were analyzed. Additionally, the proposed overview was of important theoretical significance and practical values for promoting the development of IoT toward full scenes, full spectrum, and many types of services.

**Keywords:** zero-power IoT, backscatter communication, 6G, intelligent reflecting surface

收稿日期: 2022-08-16; 修回日期: 2022-09-29

通信作者: 徐勇军, xuyj@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62271094); 重庆市教委科学技术研究重点项目 (No.KJZD-K202200601); 重庆市博士后研究项目特别资助项目 (No.2021XM3082); 重庆邮电大学高等科学研究院基金资助项目 (No.E011A2022324)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62271094), Scientific and Technological Research Key Program of Chongqing Municipal Education Commission (No.KJZD-K202200601), Special Support for Chongqing Postdoctoral Research Project (No.2021XM3082), Foundation of the Institute of Advanced Science of Chongqing University of Posts and Telecommunication (No.E011A2022324)

## 0 引言

2021 年,工业和信息化部等八部门发布《物联网新型基础设施建设三年行动计划(2021—2023 年)》,其中指出“我国要加速推进全面感知、泛在连接、安全可信的物联网新型基础设施建设,加快技术创新,壮大产业生态,深化重点领域应用,推动物联网全面发展,不断培育经济新增长点,有力支撑制造强国和网络强国建设”。同年 12 月,陕西省人民政府办公厅发布《“十四五”制造业高质量发展规划》,其中强调“要积极探索物联网在智慧城市、智能制造、智慧农业等方面的应用创新,大力引导和支持企业物联网智能终端研发成果产业化”。截止到 2022 年 8 月,全国有 31 个省(自治区、直辖市)相继推出物联网技术发展相关政策,为物联网行业发展注入催化剂。因此,物联网技术对整个国家及区域经济发展具有重要意义。

物联网技术的蓬勃发展使人们的日常生活更加绚丽多彩,例如,智慧停车场可以实现停车位查找、自动停车、分区信息显示等功能;智慧物流可以实现车辆跟踪、物品追溯等功能<sup>[1-6]</sup>。另外,物联网技术也在智慧城市、智能交通、智慧工厂等众多的垂直领域有着广泛的应用,从而对传感器的尺寸、成本、电池寿命等提出了更高的要求。基于此,零功耗物联网技术应运而生。2022 年 4 月,OPPO 研究院提出了业内首个《零功耗通信》白皮书,并指出“零功耗物联网技术能够实现与现有物联网通信技术的良好互补,从而满足多层次、多维度的物联网通信需求,将是下一代物联网技术发展的必经之路”<sup>[7]</sup>。

零功耗物联网技术对实现 6G 全场景、全频谱、全业务、立体深度覆盖有着重要作用<sup>[8-21]</sup>。基于该技术的超低功耗、多功能、极简结构、灵活部署和极低成本等特点,零功耗物联网技术可以满足多种应用场景的需求,例如,在密度数据传输的智慧农业场景中部署零功耗传感器来收集作物、土壤、环境等信息;在高流通量的智慧物流场景中部署零功耗标签,对物品进行定位与追踪甚至溯源。具体而言,零功耗物联网技术具有如下优势。

### 1) 免电池

零功耗物联网技术能够收集环境中的射频能量,并以低功耗的方式进行反向散射数据传输。因此,该技术对功耗需求极低,进而可以实现无源通信。能够应用于如列车轨道监测、工业产线、高寒

地带环境监测(如青海海北高寒草地生态环境监测系统)等物联网场景,不需要过多的人力维护。

### 2) 易部署

在零功耗物联网中,通信节点主要包含反向散射通信模块和超低功耗电路模块,能够做到极简化的结构设计。因此,通信节点能够以小巧的形态嵌入服饰,既有装饰作用又有定位功能;同时,其可嵌入智能家具,满足用户需求与提升使用体验。

### 3) 全覆盖

在零功耗物联网中,通信节点利用环境射频能量收集来保障数据传输畅通。通过在物联网系统中部署合适的射频源,就可以满足大规模、广分布的零功耗设备在全时域、全区域、全频段不间断地进行无线供能与数据传输的需求。

综上所述,反向散射通信是零功耗物联网中的一种核心技术。在面向零功耗物联网的反向散射通信物联网系统中,射频源广播发送射频能量信号,反向散射节点(含有射频能量收集模块、信息传输模块等)收集环境中的射频能量,以天线阻抗匹配的方式调节反向散射系数大小,并将自身信息以反向散射的方式发送给信号接收设备;与此同时,通过无线能量收集模块给设备本身自供电。典型的零功耗物联网反向散射通信场景如图 1 所示。本文内容的逻辑结构如图 2 所示。

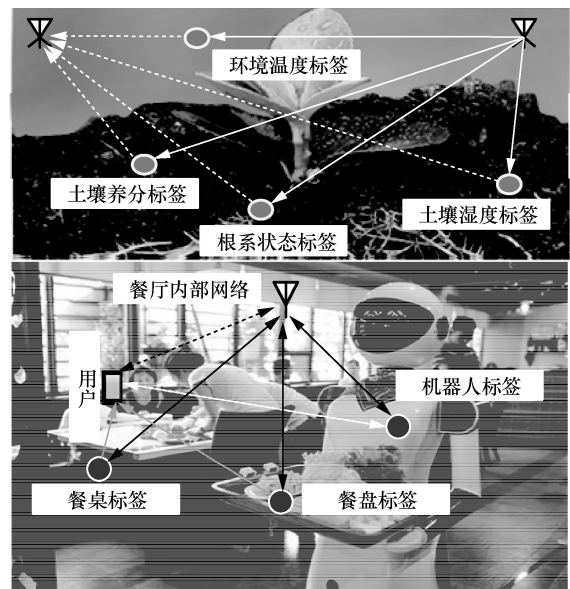


图 1 典型的零功耗物联网反向散射通信场景

## 1 零功耗反向散射通信技术简介

零功耗反向散射通信技术是一种通过收集通

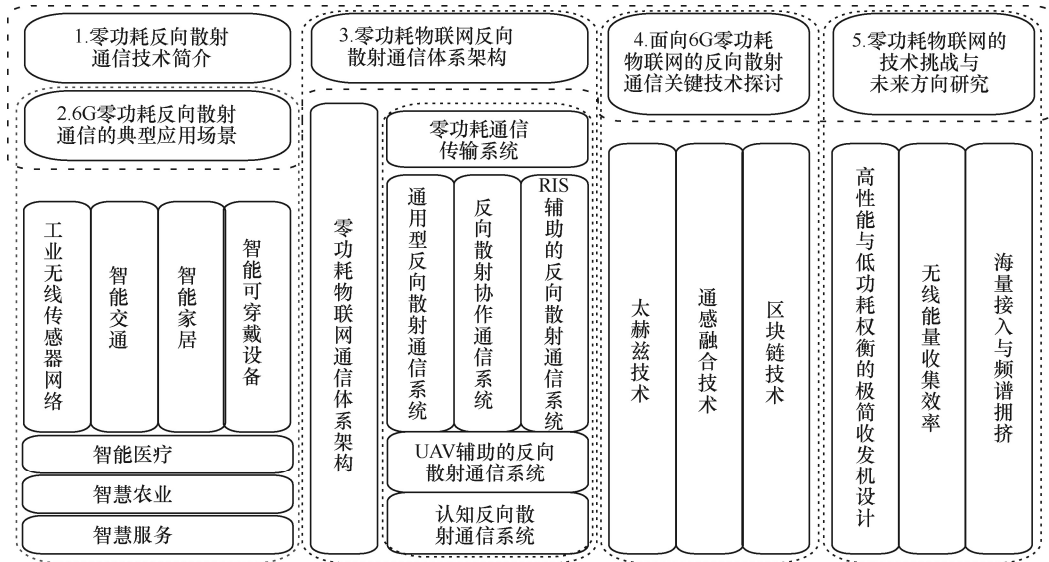


图 2 本文内容的逻辑结构

信节点周围的射频无线电获得能量以驱动无源终端工作的新型传输模式，在该系统中通信节点可以同时实现无线能量收集与反向散射通信。另外，无源节点具有简单的射频和基带电路结构，满足极简结构、极低成本与超低功耗的全场景物联网通信设计的需求<sup>[22-30]</sup>。零功耗反向散射通信的基本原理如图 3 所示。

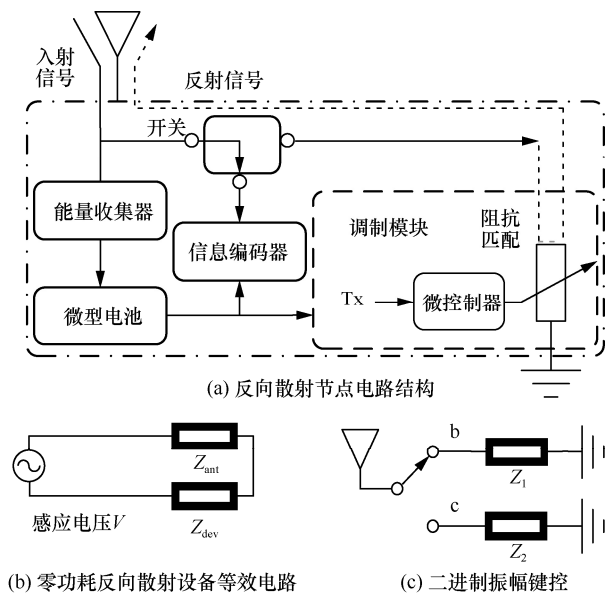


图 3 零功耗反向散射通信基本原理

反向散射系统主要包含 3 个部分：射频源、反向散射节点、信息接收机。从图 3(a)中可以发现，反向散射节点的电路结构主要由能量收集器、微型电池、调制模块、信息编码器和开关组成。该节点可以收集周围环境中的入射信号并以反向散射的方

式进行信号传输，且将多余的能量存储于微型电池中。为了更好地体现反向散射通信系统低功耗传输特点，表 1 总结了几种反向散射模式的功耗与速率<sup>[26]</sup>。

表 1 反向散射模式的功耗与速率

模式	最小发送功率/ $\mu\text{W}$	最大传输速率/ $(\text{kbit}\cdot\text{s}^{-1})$	距离/m
环境反向散射	0.79	10	0.4
Wi-Fi 反向散射	9.65	1	—
LoRa 反向散射	9.25	37.5	—
FM 反向散射	11.07	3.2	4.9

反向散射通信的实现过程如下。反向散射主要利用电磁波反向散射耦合方式进行通信，在发射激励信号的前提下通过改变天线的阻抗来实现通信。当信号到达具有不同阻抗或密度的 2 种介质之间的边界时，该信号被反射，反射量通常由阻抗或密度值的差异决定。调节天线端口处的阻抗可以调制入射信号从而使设备自身信息能够被反射出去。而实现这一功能主要是靠调节天线阻抗和改变天线反射能量的开关。该开关由连接在偶极子天线的 2 个分支上的晶体管组成，开关的输入信号是一组 01 序列。标签（即反射节点）采用二进制键控的方式实现信息传送。当开关输入信号为 0 时，晶体管关闭，阻抗匹配，反射信号减少；当开关输入信号为 1 时，晶体管导通，短路天线的 2 个分支产生较大的反向散射信号幅度。因此，开关在反射和吸收状态之间进行切换，以将数据传送到信息接收机，从而达到反射通信的目的<sup>[27]</sup>。

零功耗反向散射设备等效电路如图 3(b)所示，

其中,  $V$  是受激励信号而产生的感应电压,  $Z_{\text{ant}}$  是天线阻抗,  $Z_{\text{dev}}$  是设备的等效阻抗。天线受激励后反射信号的场强为  $\vec{E} = \vec{E}_A - \varepsilon I_A \frac{\vec{E}_a}{I_a}$  [28], 其中,  $\vec{E}_a$  是该设备在无激励信号时, 通过大小为  $I_a$  的电流所产生的信号场强;  $\vec{E}_A$  是通过天线阻抗  $Z_{\text{ant}}$  的电流  $I_A$  所产生的场强,  $\varepsilon$  是该设备的反向散射系数。

当反向散射节点受激励时,  $S(t)$  为激励信号,  $T(t)$  为设备自身信息信号,  $A$  为振幅,  $f$  为频率,  $\theta$  为相位,  $t$  为时间, 则可以得到反向散射节点的反射信号<sup>[29-30]</sup>为

$$S(t) = A_S e^{j(2\pi f_S t + \theta_S)}$$

$$T(t) = A_T e^{j(2\pi f_T t + \theta_T)}$$

$$R(t) = S(t)T(t) = A_S A_T e^{j(2\pi(f_S + f_T)t + (\theta_S + \theta_T))}$$

1) 改变振幅。二进制振幅键控反向散射调制原理如图 3(c)所示, 从图 3(c)中可以得到反向散射系数随阻抗变化的关系。当分别连通 b 端和 c 端时, 得到的反向散射系数表达式分别为  $\varepsilon_b = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$ ,

$\varepsilon_c = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$  [30]。因此, 微控制器就可以通过控制开关

在多个阻抗之间切换, 实现对反射信号幅度的调节。

2) 改变相位。设备通过在时域中延迟信号来改变相位。为了在反射信号上引入一个附加的相位  $\Delta\theta$ , 可以将设备信息信号延迟  $\frac{\Delta\theta}{2\pi f t}$ 。在设备上产生的  $\Delta\theta$  相位偏移会导致反向散射信号偏移  $\Delta\theta$  [27]。

3) 改变频率。设备只需要改变射频晶体管的频率即可实现<sup>[27]</sup>。

## 2 6G 零功耗反向散射通信的典型应用场景

“绿色泛在”是 6G 物联网发展的重要方向, 零功耗反向散射通信技术凭借其自身的免电池、易部署等特点, 在 6G 网络中将发挥重要作用<sup>[7,31-42]</sup>。在某些特定情况下, 如工业无线传感器网络、智慧农业、智能交通等大规模物联网设备连接场景, 仅依靠传统的有源物联网技术会产生巨大的能量消耗, 且受设备自身复杂结构限制, 无法满足超低功耗、灵活部署、低成本的需求。下面将阐述 6G 零功耗反向散射通信的典型应用场景。

### 2.1 工业无线传感器网络

由于工业环境的特殊性, 感知设备在其性能、

体积、材质等方面需要满足一定的指标要求。6G 网络中工业物联网的发展要求大量的传感节点具备抗腐蚀性、耐高温、结构小巧、低成本、灵活部署等特性<sup>[38-39]</sup>。然而, 当前的工业物联网传感器功耗较大, 并不满足未来 6G 低功耗的需求。因此, 将零功耗反向散射通信技术引入工业无线传感器网络中, 可以保障工业物联网传感器在工业生产中以低功耗的方式实现信息交互, 这将大大降低网络建设成本与能量成本, 如图 4 所示。

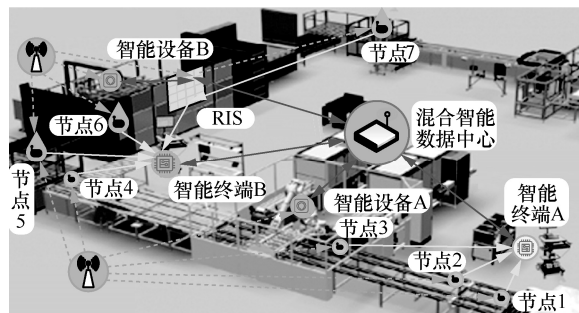


图 4 面向零功耗物联网的工业无线传感器网络

### 2.2 智能交通

在未来 6G 网络中, 智能交通可以解决交通拥堵、道路利用率不高、交通资源浪费、交通设施成本高等问题, 同时能够减少交通事故的发生, 从而有效地提升城市交通系统运行效率。图 5 给出了面向零功耗物联网的智能交通系统。在该系统中, 将零功耗路侧感知节点、零功耗压力传感器、零功耗视觉感知设备等广泛部署于交通沿线, 可以对道路车流量、路面状况、路侧人流量等进行监测, 并将数据上传至边缘智能终端, 进而通过数据运算对路面通行车辆进行有效疏导, 确保整个城市的交通系统高效有序地运转。

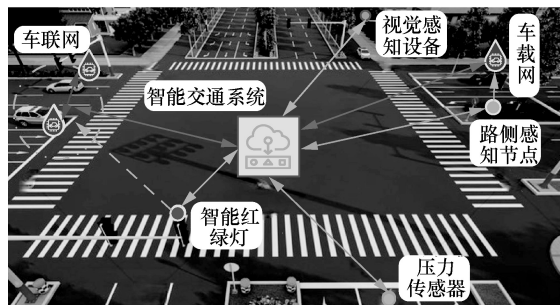


图 5 面向零功耗物联网的智能交通系统

### 2.3 智能家居

智能家居以住宅为平台, 通过物联网将室内外各种设备有机连接成一个整体, 利用多种智能传感器、

驱动装置来实现不同功能，使家居环境更加安全、便利。在零功耗物联网技术的加持下，未来智能家居系统将更具智能化与低功耗<sup>[43-44]</sup>。零功耗物联网技术赋予传感器、标签等无源设备灵活部署和易于维护的能力，例如，零功耗反向散射标签或传感器可以置于室内或室外。面向零功耗物联网的智能家居系统(如图 6 所示)利用部署在室内的多个射频源(如 Wi-Fi 路由)为零功耗节点供电，然后通过反向散射通信将数据传输到智能终端设备上。因此，零功耗反向散射通信技术能够拓展物联网在智能家居场景中的应用，如信息定位、数据监测、智能控制等。

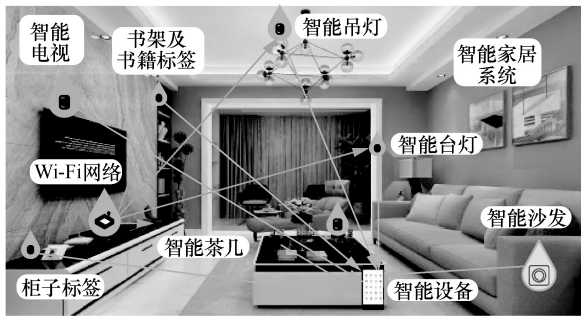


图 6 面向零功耗物联网的智能家居系统

### 2.4 智能可穿戴设备

智能可穿戴设备是以使用者为中心，通过物联网技术将使用者所佩戴的多种设备进行无线连接，在健康监测、移动感知、智慧生活、精确定位等领域中均得到了广泛应用<sup>[45-47]</sup>。目前流行的产品形态有智能眼镜、智能手表、可背负血压监测仪等，但这些设备的功耗较高且体积较大。在零功耗物联网技术的加持下，可穿戴设备的能量供给方式从传统的充电方式改变为无线供电的方式(即无线能量收集)。因此，未来零功耗穿戴设备兼具结构简单、功耗极低、柔性可折叠等特性，从而可以极大地改善用户体验。综上所述，零功耗物联网技术将更好地应用于智能可穿戴设备，如图 7 所示。

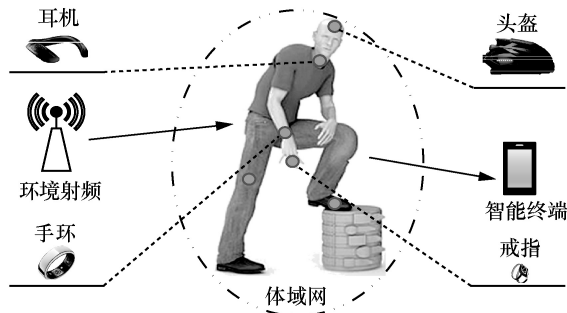


图 7 面向零功耗物联网的智能可穿戴设备

### 2.5 智能医疗

智能医疗以医患为重心，在 6G 网络中要实现患者与医务人员、医疗机构、医疗设备之间的良性互动，达到医疗信息化的目的<sup>[48-50]</sup>。在医院内部业务场景，可以通过物联网技术将医院内部业务信息化，例如，实现对医药物品与患者信息的智能化管理、医疗流程操作、手术与医疗办公的信息化等。在医院外部业务场景，主要是利用物联网传感器设备对患者身体状况进行监测。但是现有的医用物联网设备存在功耗偏高、体积较大等问题。因此，面向零功耗物联网的智能医疗系统(如图 8 所示)能有效解决上述问题。具体来讲，依托零功耗物联网技术的医疗器件能够提供极低时延的医疗数据传输与信息互联共享，满足极低的能耗和免电池配置需求，体积足够小巧且可以精准上传医疗数据。

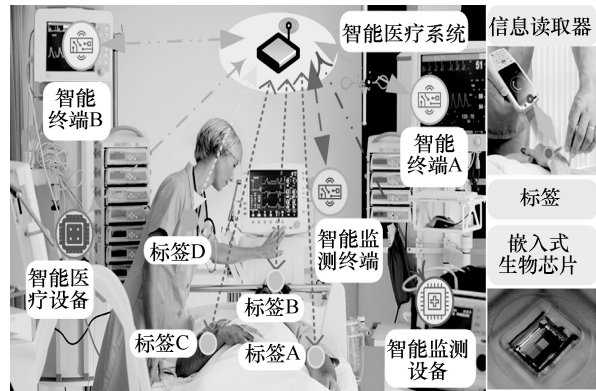


图 8 面向零功耗物联网的智能医疗系统

### 2.6 智慧农业

智慧农业是未来农业发展的必然趋势，物联网技术是实现农业数字化、智能化、精准化的重要科技手段，对促进增产增收和改善农业生态环境具有不可忽视的作用<sup>[51-52]</sup>。其体现为利用多种物联网传感器采集农业生产与环境数据，如土壤营养状况、环境状况、作物生长状况等，为作物的营养分析和生长调节提供数据支撑。智慧农业最主要的是实现精准农业，而实现精准农业需要监测大量的实时数据，从而会增加数据采集、能量消耗以及建设成本。因此，面向零功耗物联网的智慧农业系统(如图 9 所示)具有重要的发展潜力。例如，零功耗物联网传感器集超低功耗、极低成本、灵活部署、多连接等特点于一身，这恰恰满足了智慧农业在大规模数据监测与无线信息传输方面的需求。

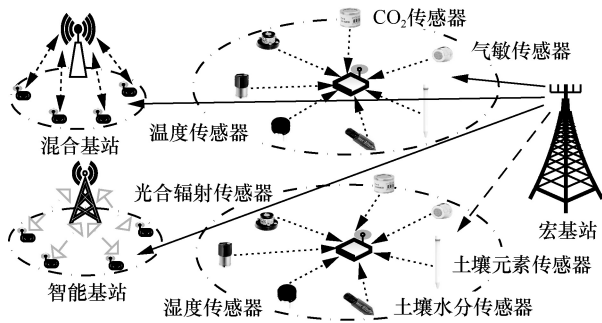


图 9 面向零功耗物联网的智慧农业系统

### 2.7 智慧服务

智慧服务旨在利用先进的科学技术为人们打造智能化、全面化、便捷化的生活，涉及物流、超市、图书馆等多个领域，全面涵盖日常生活的所有需求。在物联网技术的加持下，可实现服务信息的采集与识别、智能化管理运作、自主或半自主服务等。但与此同时，随着服务需求与服务质量的提升，需要部署大量的物联网节点与传感器，这使服务成本与功耗需求剧增。零功耗物联网技术具有低功耗与低成本、稳定可靠的数据采集与传输的特点，可以大大降低服务成本，实现人与设备、设备与设备之间实时性更高的数据交互，使服务更加透明化、高效化、精准化。因此，零功耗物联网技术是智慧服务行业发展的重要技术引擎，如图 10 所示。

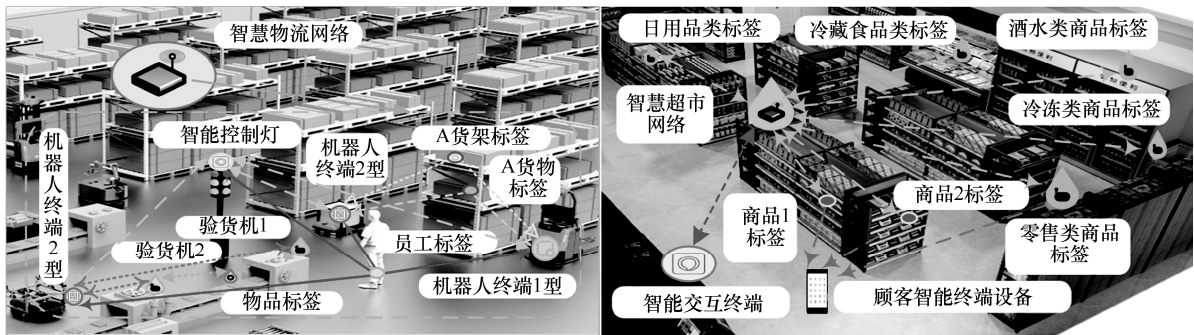


图 10 面向零功耗物联网的智慧服务系统

## 3 零功耗物联网反向散射通信体系架构

### 3.1 零功耗物联网通信体系架构

零功耗物联网技术涉及多个领域，在不同的行业通常具有不同的应用需求和技术形态。为此，需要设计不同的体系架构以满足不同场景中各节点与设备间的互联互通、互操作的通信需求。零功耗物联网通信体系架构主要包含集中式体系架构、分布式体系架构以及分散式体系架构，如图 11 所示。

#### 1) 集中式体系架构

集中式体系架构是指物联网系统中存在一个集中信息管理与资源调度的信息接入点或物联网网关，通过全局信息调度（如频谱、信道等）来实现网络高性能传输，如图 11(a)所示。在该体系架构中，所有的资源分配与性能评估都是基于全局信息，也就是说需要搜集各个反向散射节点的距离、空间位置、传输能力、能源状态等，实现全网信息集中式管理与优化。该架构的主要优势是可以掌握全局信息，改善边缘节点传输性能，能够适用于稀疏或密集型传感器通信场景，基于全局信息的掌控能有效提升系统维护与运营的效率。与此同时，该架构存在接入点缓存压力大、计算任务调度复杂、资源配置难以均衡等问题，且反射节点与接入点频

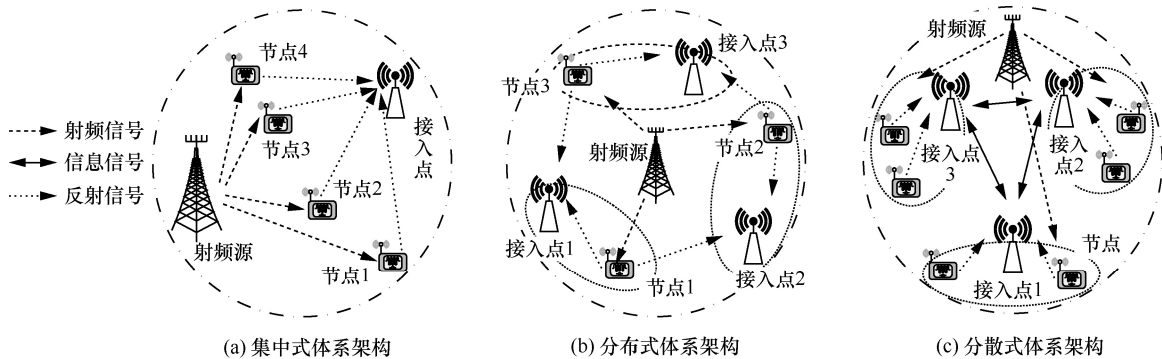


图 11 零功耗物联网通信体系架构

繁的信息交互会导致时延增大。

### 2) 分布式体系架构

分布式体系架构是指物联网系统中，无集中信息管理节点或控制单元，即通过去中心化思想来实现各节点的有效通信，如图 11(b)所示。该体系架构具有网络抗毁性优势，当某一节点毁坏或通信中断，原物联网系统通过网络拓扑自适应技术重新建立通信连接，这是与集中式体系架构最大的区别，即当集中式节点被毁坏时，整个网络将瘫痪。分布式体系架构能够减小网络传输时延，通过节点对周围环境与业务（即局部信息）的感知，而无须获取与估计全局信息，提高了网络调度与资源利用率的性能。此外，该体系架构不高度依赖于网管中心，从而可以有效拓展网络规模。

### 3) 分散式体系架构

分散式体系架构是上述 2 种体系架构的一种融合形式，即多个物联网节点通过分簇的形式形成多个子网络，每个子网络由一个中心节点进行集中式通信与网络控制，而多个分簇中心节点间可通过分布式方式实现通信，如图 11(c)所示。

## 3.2 零功耗通信传输系统

针对不同的应用场景，面向零功耗物联网应用的反向散射通信网络所展现的传输模式和通信系统存在较大差异，如智能反射表面（RIS, reconfigurable intelligent surface）辅助通信、无人机（UAV, unmanned aerial vehicle）通信、认知无线电等技术的引入会改变当前零功耗通信网络传输系统并提升系统性能。因此，本节主要从通用型反向散射通信系统、反向散射协作通信系统、RIS 辅助的反向散射通信系统、UAV 辅助的反向散射通信系统、认知反向散射通信系统 5 个方面进行概述。

### 1) 通用型反向散射通信系统

通用型反向散射通信系统包含环境反向散射通信系统和双站反向散射通信系统<sup>[53-55]</sup>，如图 12 所示。具体来讲，在环境反向散射通信系统中（图 12(a)），零功耗标签（即无源设备）利用周围环境射频源（如电视信号、Wi-Fi 信号）的电磁波信号，实现无线能量收集的同时将信息以反向散射的方式传送给信息接收机，如标签信息采集系统。在双站反向散射通信系统中（图 12(b)）中，零功耗标签利用部署在附近的载波发射器所产生的已知频率的载波信号，将标签自身信息加载到载波信号中，并反射给信息接收机，如射频识别系统。

### 2) 反向散射协作通信系统

反向散射协作通信系统通过在源端和终端之间部署零功耗中继节点，以对抗路损和双重衰落的影响，从而建立源端到终端的通信，旨在增强信号覆盖、提高信道容量、降低网络能耗等<sup>[56-60]</sup>。在该系统中主要包含三类典型网络传输系统（如图 13 所示）：零功耗网关中继通信传输系统、混合零功耗中继通信传输系统以及多跳零功耗中继通信传输系统。具体内容如下。

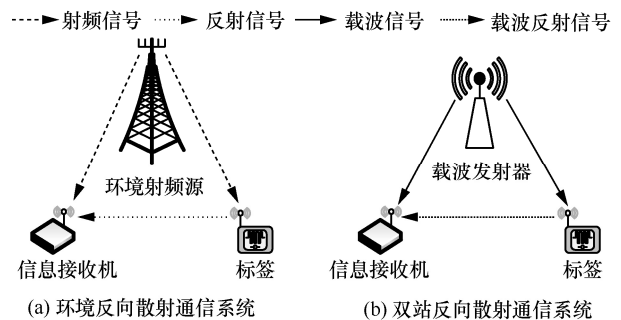


图 12 通用型反向散射通信系统

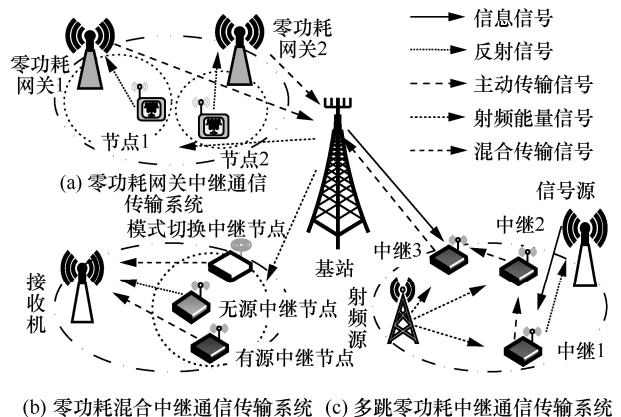


图 13 反向散射协作通信系统

① 零功耗网关中继通信传输系统（图 13(a)）。在该系统中，零功耗网关收集并存储周围环境中的射频能量，接收附近节点的反射信号并解码其信息，然后以主动传输的方式向基站转发。该系统适用于室内用户或通信节点，如智能家居场景。

② 零功耗混合中继通信传输系统（图 13(b)）。在该系统中，零功耗中继节点包含无源反向散射中继节点（无电量存储能力）、有源反向散射中继节点（有限电量存储能力）以及模式切换中继节点（无源/有源）。在该系统中，反向散射节点作为中继节点通过反向散射通信、收集再转发通信以及混合通信模式进行数据的转发与中继传输。与图 13(a)相比，在该系统中，中继节点的选择与零功耗节点传

输模式的设计是很有挑战的。

③ 多跳零功耗中继通信传输系统 (图 13(c))。在该系统中, 由于物联网发射机和信息接收机之间的距离较远, 无法通过传统直传或两跳的模式实现信息传输, 因此需要多个中继节点进行级联通信。该系统可以有效解决终端距离较远而无法直接通信的问题。

### 3) RIS 辅助的反向散射通信系统

RIS 辅助的反向散射通信系统 (如图 14 所示) 利用低成本、低功耗的 RIS 来增强零功耗反向散射通信的绕障通信能力、信号增强能力以及传输安全能力。具体来讲, RIS 是 6G 的潜在关键技术之一, 它是一种具有可编程电磁特性的人工电磁表面结构, 由大量精心设计的电磁单元排列组成。通过给电磁单元上的可调元件施加控制信号, 可以动态地控制这些电磁单元的电磁特性, 从而以可编程的方式对空间电磁波进行主动智能调控, 形成幅度、相位、极化和频率等参数可控制的电磁波<sup>[61]</sup>。综上所述, RIS 可以使接收的电磁波绕开障碍物, 有效提高系统信号传输的覆盖范围和传输效率, 可以实现智能、可重构的无线环境<sup>[61-68]</sup>。基于此, RIS 辅助的反向散射通信将有效提升零功耗物联网的通信能力与系统性能, 其典型网络场景如图 14 所示。具体内容如下。

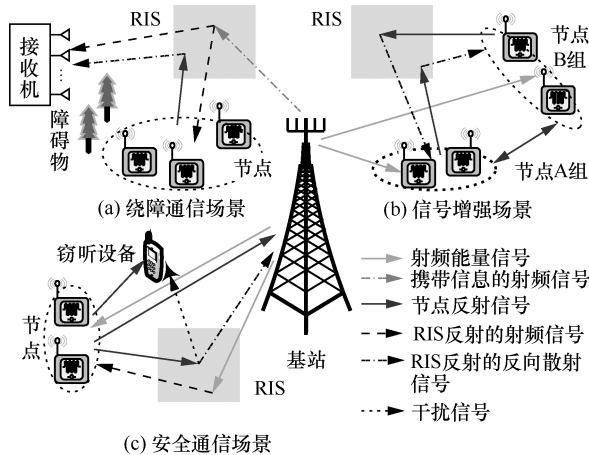


图 14 RIS 辅助的反向散射通信系统

① 绕障通信场景 (图 14(a))。在该场景中, RIS 可以解决反向散射节点与信息接收机之间经常受到障碍物 (如树木、建筑等) 阻挡而无法实现通信的问题, 由于 RIS 也是一种低成本、低功耗的器件, 因而不会急剧增加原零功耗物联网反向散射通信系统的能量消耗与网络建设成本, 以较小成本提

升原系统性能。

② 信号增强场景 (图 14(b))。在该场景中, 利用超强的电磁调控能力, RIS 可以解决无线供电设备信号传输能力弱的问题, 如 M2M/D2D 通信, 从而提高信息传输速率和网络联通性。

③ 安全通信场景 (图 14(c))。在传统零功耗反向散射通信系统中, 由于反射节点低功耗、低速率的传输特点, 容易受到外界干扰器或窃听设备的严重影响, 从而导致网络存在安全隐患。基于此, 面向安全通信的 RIS 辅助反向散射通信系统可以有效解决上述问题。例如, RIS 可以通过对窃听设备发送干扰信号以降低其接收信号质量, 或直接增强合法节点接收信号强度。

### 4) UAV 辅助的反向散射通信系统

针对零功耗物联网中射频源覆盖范围有限、反向散射节点数量众多且受双重远近效应影响的问题, 将 UAV 与反向散射通信结合可以有效解决该问题<sup>[69-72]</sup>。在 UAV 辅助的反向散射通信系统中, 主要包含 3 种典型通信系统 (如图 15 所示): UAV 辅助供能反向散射通信系统、UAV 辅助数据采集反向散射通信系统以及 UAV 辅助中继反向散射通信系统。具体内容如下。

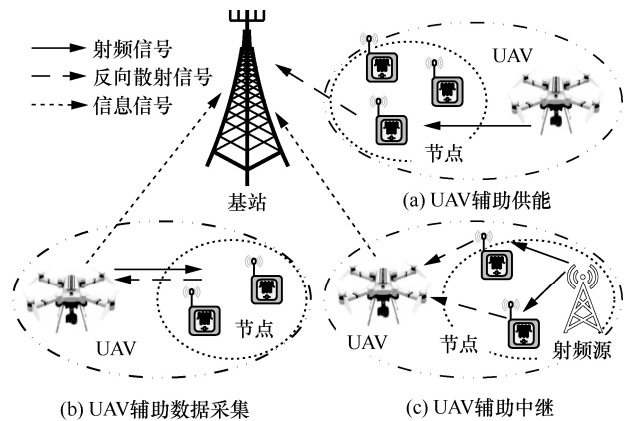


图 15 UAV 辅助的反向散射通信系统

① UAV 辅助供能的反向散射通信系统 (图 15(a))。在该系统中, UAV 通过装载射频信号源设备为地面无源反射节点供电, 节点以反向散射的方式将数据传输至物联网网关。因此, 该系统可用于地面缺少大型射频信号源、地面射频源覆盖有限以及需要提供视距传输的物联网场景中。

② UAV 辅助数据采集的反向散射通信系统 (图 15(b))。在该系统中, UAV 配置信息处理与通信模块, 零功耗物联网节点利用无人机携带的射频

源发出的射频信号，经反向散射回传至无人机。因此，无人机可以收集大量分布式零功耗物联网节点的相关信息，充当无线设备与地面基站的协作传输节点。

③ UAV 辅助中继通信的反向散射通信系统(图 15(c))。在该系统中，无人机作为移动中继将零功耗物联网节点信息中继至远处终端接收机。节点利用周围环境的电磁波，将自身数据经反向散射传输至 UAV，UAV 将数据中继至另一基站或其他终端。因此，在节点分布范围较广、与接收机相距较远等场景中，UAV 可以作为中继节点接入网络，为地面节点提供视距链路、改善通信质量。

### 5) 认知反向散射通信系统

随着物联网设备及传感器数量的增加，当前网络频谱拥挤现象日趋严峻，因此，如何在有限的频谱资源下进一步提升系统容量是一个亟待解决的问题。认知反向散射通信系统能有效解决该问题，传输系统如图 16 所示。

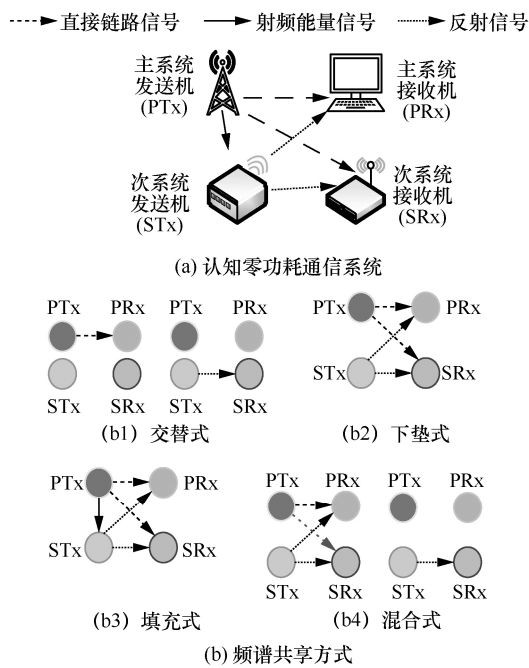


图 16 认知反向散射通信系统传输架构

认知反向散射通信系统由主系统与次系统组成(如图 16(a)所示)，主系统是频谱资源的拥有者，具有较高的频谱使用权限，例如 Wi-Fi 频段、蜂窝通信频段。次系统通常由多个反向散射节点与物联网网关组成，其通过频谱感知与接入技术共享主系统的频谱资源，并不需要开发新的频段(如毫米波、太赫兹)，从而以低成本、低开销的方式解决当前

物联网频谱效率低的问题。图 16(b)中给出了 4 种频谱共享方式：交替式频谱共享、下垫式频谱共享、填充式频谱共享、混合式频谱共享<sup>[73-78]</sup>。不同的频谱共享模式只会影响次级反向散射节点功率控制策略的不同，不会影响整个传输系统架构。

综上所述，不同的网络传输架构具有不同的传输特点与对应的应用需求，针对现实、具体的零功耗物联网应用场景，融合各系统网络传输架构的优点能够形成具有鲜明特点、互补增强的新型体系架构，可以丰富零功耗物联网的网络传输架构体系、进一步增强边缘网络覆盖、提高系统频谱效率、保障系统安全，实现低成本、低功耗、低时延的数据通信，进而满足未来 6G 网络“万物智联、绿色泛在”的需求。

## 4 面向 6G 零功耗物联网的反向散射通信关键技术探讨

6G 以人类需求为根本的“随时随地随心的智慧网络”的基础上进行探索的新一代通信技术，实现无缝覆盖和绿色连接，提供全维度、个性化服务，满足海量接入、超低时延、低功耗、更高的能效和频谱利用率的通信需求。为了使零功耗物联网在 6G 各应用场景中大放异彩，需要关注面向 6G 零功耗物联网的反向散射通信关键技术。本节将从太赫兹、通感融合、区块链 3 个维度探讨关键技术与对应挑战问题的关系，如图 17 所示。

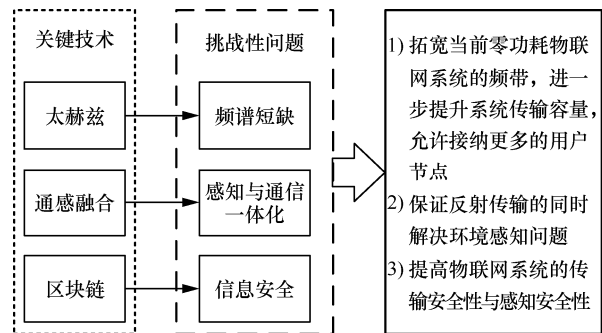


图 17 关键技术与挑战性问题的关系

### 4.1 太赫兹技术

太赫兹作为 6G 中最具突破性的技术，是解决未来网络频谱拥挤问题、满足高容量通信需求的关键<sup>[79-80]</sup>。物联网设备与传感节点数量的激增，使零功耗物联网频谱拥挤问题更加严峻、高容量系统优化更加复杂。虽然当前认知无线电技术可以解决频谱空洞的检测与发现主用户的活动情况，

但该技术也增加了零功耗物联网节点的频谱感知所带来的功耗剧增与复杂的信号处理等问题,使其无法在超低功耗物联网系统中进行应用(如心电监测、核环境监测等)。因此,迫切需要一种不增加反向散射收发机开销,且能提供更多频谱资源的先进技术。而太赫兹技术具备超宽频带特点,可将其应用于零功耗物联网系统中,有望实现上述目标。例如,利用太赫兹射频频源可以给低功耗反射节点提供更多的频谱资源与更强的能量密度,从而提升反向散射节点接收的能量强度并提供更多的频谱资源。

#### 4.2 通感融合技术

现有零功耗物联网系统的通信和感知是相互独立、相互平行的。要么利用节点的反向散射通信能力实现无线信息传输,要么将反射节点作为感知节点来实现环境感知、监测的能力,通信与感知层没有进行一体化设计。在零功耗物联网系统感知业务需求的激增和通信业务向着绿色、高效方向发展的总体趋势下,面向该系统的通感融合一体化设计显得尤为重要<sup>[81-82]</sup>。在零功耗物联网系统设计之初,考虑在不增加网络结构复杂性和建设成本的情况下,利用感知辅助通信和通信增强感知的手段来提升系统整体性能。因此,面向零功耗物联网的反向散射通感融合技术可以有效提升通信传输质量与环境感知精度实现感知/通信的高效性,且具备低功耗、低成本、结构简单、灵活部署等优点,可有效促进“双碳”政策的落地。

#### 4.3 区块链技术

当前,零功耗物联网系统的安全性设计主要是从物理层安全技术与传统加密技术来实现的,随着网络攻击、大规模节点接入以及伪基站的存在,使当前零功耗物联网系统安全性有待进一步加强。为此,将区块链技术<sup>[83-84]</sup>与零功耗物联网相结合能有效解决上述问题。例如,一方面,在反射节点计算能力有限的场景中,可以将区块链技术很好地融入物联网网关中,通过构建一个基于资源交易流程的区块链,用来记录无线资源的交互信息,采用智能合约避免窃听节点或伪节点接入网络,从而增强系统安全性;另一方面,随着芯片技术和制造工艺的发展,未来的反射节点将具有较强的计算能力,此时,可以在反射节点处融入区块链技术来提升数据上行传输的安全性。此外,对于移动边缘计算辅助的反向散射通信系统,在边

缘服务器处设计基于区块链的加密算法,可以提升系统安全性。综上所述,基于区块链的零功耗物联网反向散射通信系统利用区块链去中心化的加密方法应用于反射节点、物联网网关等设备中,从而提升信息数据的安全性。

### 5 零功耗物联网的技术挑战与未来研究方向

综上所述,面向零功耗物联网的反向散射通信技术得到了快速发展,但依然存在较多具有挑战性的问题。本节从零功耗反向散射通信的高性能与低功耗权衡的极简收发机设计、无线能量收集效率、海量接入与频谱拥挤3个维度对面向零功耗物联网的反向散射通信所存在的技术挑战与未来研究方向进行探讨。

#### 5.1 高性能与低功耗权衡的极简收发机设计

在面向零功耗物联网的反向散射通信系统中,虽然低功耗是该系统的一个关键特征,但在未来技术发展趋势中,高吞吐量与极致系统性能也需要得到重点关注,如虚拟现实和增强现实。然而,在无线通信系统中,高吞吐量性能往往是通过较高的传输功率得到的,较低的同频干扰与中断概率可以由功率调节来实现,因此,低功耗与高性能之间的权衡在未来技术发展中显得更加重要。如何设计极简反向散射收发机,如低功耗振荡器、低功耗微处理器等,对该技术在该方向的突破具有重要意义。

#### 5.2 无线能量收集效率

在6G零功耗物联网场景中(如智慧城市、智慧农场等)需要部署大量反向散射通信节点用于数据采集与信息传输。然而,当前的半导体、相关元器件和硬件电路设计等并不能支持更高的能量收集效率,加之不合理的射频源部署导致节点供能不足问题的出现,从而导致节点传输中断与节点失能。

为解决该问题,可从网络优化和射频源部署2个方面进行探究。在网络优化方面,当前大部分研究都采用固定的反向散射系数,使无线能量收集效率并不高,因此可以基于动态的频谱空间和信道资源实现节点反向散射系数的自适应调节,从而确保高效的能量收集。在射频源部署策略方面,未来需要更具智能化的射频源,能够根据所在场景、时段、业务类型自适应地调整功率大小,动态控制射频覆盖范围,从而能够结合业务需求自主激活相应的工作状态。此外,在射频源部署方面,通过多个射频

源协同供能与空间位置优化，可以有效提升射频频覆盖范围、覆盖时段以及节点附近的射频信号强度，进而提高零功耗物联网能量收集效率。

### 5.3 海量接入与频谱拥挤

随着日常生活的不断丰富，信息交互与共享越来越频繁，物联网节点接入密度也随之呈指数级增长，使零功耗物联网通信朝着大规模连接、多场景应用以及更加高效通信的方向发展。由此使海量接入与频谱拥挤的矛盾日益凸显。6G 太赫兹技术的出现使上述矛盾有所缓解，凭借超宽频带特性能给大量接入节点更多的可接入频段来缓解频谱拥挤，但是当前反向散射通信技术无法适配太赫兹物联网，并且需要探索合适的接入方式（如非正交多址接入）与设计新的节点接入协议，以满足大量物联网节点的接入需求，降低各密集节点数据传输的链路干扰，保证互联互通。

## 6 结束语

面向零功耗物联网的反向散射通信由于具有低功耗、低成本、无线能量收集与数据传输等特点，必将成为下一代物联网的重要技术之一。本文根据零功耗反向散射通信特性与当前研究现状，对反向散射通信技术的基本定义、通信原理、应用场景与发展现状进行了总结与概括，分别从零功耗工业无线传感器网络、智能交通、智能家居、智能可穿戴设备、智能医疗、智慧农业、智慧服务 7 个方面对现有典型垂直应用场景进行了分类与总结。在此基础上，提出了集中式、分布式、分散式 3 种零功耗物联网体系架构，与通用型网络、协作式网络、RIS 辅助网络、无人机辅助网络、认知网络 5 种网络传输系统，并对网络传输系统的设计与传输原理进行了分类总结。然后，对 6G 零功耗物联网反向散射通信中太赫兹、通感融合、区块链等潜在关键技术进行阐述。最后，从收发机设计、能量收集效率、海量接入频谱拥挤 3 个角度对面向零功耗物联网反向散射通信的未来研究方向进行了展望，满足智简、高效的通信需求。

### 参考文献：

[1] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2347-2376.

[2] 张平, 牛凯, 田辉, 等. 6G 移动通信技术展望[J]. *通信学报*, 2019,

40(1): 141-148.

ZHANG P, NIU K, TIAN H, et al. Technology prospect of 6G mobile communications[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(1): 141-148.

[3] 孙其博, 刘杰, 黎彝, 等. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述[J]. *北京邮电大学学报*, 2010, 33(3): 1-9.

SUN Q B, LIU J, LI S, et al. Internet of things: summarize on concepts, architecture and key technology problem[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2010, 33(3): 1-9.

[4] LIN J, YU W, ZHANG N, et al. A survey on Internet of things: architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(5): 1125-1142.

[5] XU Y J, LI G Q, YANG Y, et al. Robust resource allocation and power splitting in SWIPT enabled heterogeneous networks: a robust minimax approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(6): 10799-10811.

[6] 徐勇军, 谷博文, 陈前斌, 等. 基于能效最大的无线供电反向散射网络资源分配算法[J]. *通信学报*, 2020, 41(10): 202-210.

XU Y J, GU B W, CHEN Q B, et al. Energy efficiency maximization resource allocation algorithm in wireless-powered backscatter communication network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(10): 202-210.

[7] OPPO 研究院. 零功耗通信白皮书[R]. 2022.

Oppo Research Institute. White paper on zero power communication[R]. 2022.

[8] IMT-2030 (6G) 推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021.

IMT-2030 (6G) Promotion Group. 6G overall vision and potential key technology white paper[R]. 2021.

[9] 大唐移动通信设备有限公司. 全域覆盖 场景智联——6G 愿景与技术趋势白皮书[R]. 2020.

DTmobile. Global coverage, scene smart connection——6G vision and technology trend white paper[R]. 2020.

[10] 中国联合网络通信有限公司研究院. 中国联通 6G 白皮书[R]. 2021.

China Unicom Research Institute. China Unicom 6G white paper[R]. 2021.

[11] 中国移动通信有限公司研究院. 2030+愿景与需求白皮书[R]. 2020.

China Mobile Research Institute. 2030+vision and needs white paper[R]. 2020.

[12] XU Y J, XIE H, LIANG C C, et al. Robust secure energy-efficiency optimization in SWIPT-aided heterogeneous networks with a nonlinear energy-harvesting model[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(19): 14908-14919.

[13] 徐勇军, 胡圆, 李国权, 等. 异构携能通信网络稳健资源分配算法[J]. *通信学报*, 2019, 40(7): 186-196.

XU Y J, HU Y, LI G Q, et al. Robust resource allocation algorithm for heterogeneous wireless network with SWIPT[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(7): 186-196.

[14] XU Y J, GUI G, GACANIN H, et al. A survey on resource allocation for 5G heterogeneous networks: current research, future trends, and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 668-695.

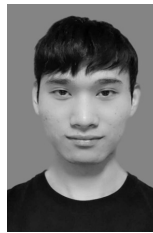
[15] HU J, WANG Q, YANG K. Energy self-sustainability in full-spectrum

- 6G[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(1): 104-111.
- [16] LIU C, WEI Z Q, NG D W K, et al. Deep transfer learning for signal detection in ambient backscatter communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(3): 1624-1638.
- [17] NGUYEN P X, TRAN D H, ONIRETI O, et al. Backscatter-assisted data offloading in OFDMA-based wireless-powered mobile edge computing for IoT networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(11): 9233-9243.
- [18] GU X Q, GRAUWIN L, DOUSSET D, et al. Dynamic ambient RF energy density measurements of montreal for battery-free IoT sensor network planning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(17): 13209-13221.
- [19] MA W Y, WANG W, JIANG T. Joint energy harvest and information transfer for energy beamforming in backscatter multiuser networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(2): 1317-1328.
- [20] TANG X Q, XIE G H, CUI Y Q. Self-sustainable long-range backscattering communication using RF energy harvesting[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(17): 13737-13749.
- [21] DU R, OHLSON TIMOUDAS T, FISCHIONE C. Comparing backscatter communication and energy harvesting in massive IoT networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(1): 429-443.
- [22] 王公仆, 熊轲, 刘铭, 等. 反向散射通信技术与物联网[J]. *物联网学报*, 2017, 1(1): 67-75.  
WANG G P, XIONG K, LIU M, et al. Backscatter communication technology and Internet of things[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2017, 1(1): 67-75.
- [23] 陶琴, 钟财军, 张朝阳. 面向无源物联网的环境反向散射通信技术[J]. *物联网学报*, 2019, 3(2): 28-34.  
TAO Q, ZHONG C J, ZHANG Z Y. Ambient backscatter communications technology for batteryless IoT[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2019, 3(2): 28-34.
- [24] 崔子琦, 王公仆, 魏旭昇, 等. 反向散射通信的未来应用与技术挑战[J]. *移动通信*, 2021, 45(4): 29-36.  
CUI Z Q, WANG G P, WEI X S, et al. Future applications and technical challenges of backscatter communications[J]. *Mobile Communications*, 2021, 45(4): 29-36.
- [25] VAN HUYNH N, HOANG D T, LU X, et al. Ambient backscatter communications: a contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2889-2922.
- [26] 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.
- [27] 钱玉洁. 基于 Wi-Fi 信号反向散射通信系统高并发低功耗研究[D]. 西安: 西北大学, 2020.  
QIAN Y J. Research on high concurrency and low power backscatter communication system based on Wi-Fi signal[D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [28] BOYER C, ROY S. Backscatter communication and RFID: coding, energy, and MIMO analysis[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(3): 770-785.
- [29] XU Y J, GU B W, LI D, et al. Resource allocation for secure SWIPT-enabled D2D communications with  $\alpha$  fairness[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(1): 1101-1106.
- [30] 刘璐. 无处理器的 LoRa 反向散射通信系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.  
LIU L. Design of processor-free LoRa backscatter communication system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [31] NGUYEN D C, DING M, PATHIRANA P N, et al. 6G Internet of things: a comprehensive survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(1): 359-383.
- [32] JI B F, WANG Y N, SONG K, et al. A survey of computational intelligence for 6G: key technologies, applications and trends[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(10): 7145-7154.
- [33] VERMA S, KAUR S, KHAN M A, et al. Toward green communication in 6G-enabled massive Internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(7): 5408-5415.
- [34] MARAQA O, RAJASEKARAN A S, AL-AHMADI S, et al. A survey of rate-optimal power domain NOMA with enabling technologies of future wireless networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2192-2235.
- [35] MA D, LAN G H, HASSAN M, et al. Sensing, computing, and communications for energy harvesting IoTs: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(2): 1222-1250.
- [36] LUO Z Q, ZHANG Q, WANG W, et al. Single-antenna device-to-device localization in smart environments with backscatter[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(12): 10121-10129.
- [37] LI L H, HUANG X X. Promoting energy efficiency and proportional fairness in densely deployed backscatter-aided networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(13): 10518-10530.
- [38] SISINNI E, SAIFULLAH A, HAN S, et al. Industrial Internet of things: challenges, opportunities, and directions[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(11): 4724-4734.
- [39] XU Y J, XIE H, LI D, et al. Energy-efficient beamforming for heterogeneous industrial IoT networks with phase and distortion noises[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(11): 7423-7434.
- [40] MEHMOOD Y, AHMAD F, YAQOOB I, et al. Internet-of-things-based smart cities: recent advances and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(9): 16-24.
- [41] JI B F, CHEN Z Z, MUMTAZ S, et al. SWIPT enabled intelligent transportation systems with advanced sensing fusion[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(14): 15643-15650.
- [42] CHEN E H, WU P R, WU Y C, et al. UGV-assisted wireless powered backscatter communications for large-scale IoT networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(5): 3147-3161.
- [43] WOŹNIAK M, ZIELONKA A, SIKORA A, et al. 6G-enabled IoT home environment control using fuzzy rules[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(7): 5442-5452.
- [44] XIAO N, YANG P L, YAN Y B, et al. Motion-fi: recognizing and counting repetitive motions with passive wireless backscattering[C]// *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communica-*

- tions. Piscataway: IEEE Press, 2018: 2024-2032.
- [45] BIANCHI V, BASSOLI M, LOMBARDO G, et al. IoT wearable sensor and deep learning: an integrated approach for personalized human activity recognition in a smart home environment[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 8553-8562.
- [46] YANG J F, ZOU H, JIANG H, et al. Device-free occupant activity sensing using WiFi-enabled IoT devices for smart homes[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(5): 3991-4002.
- [47] LEAL-JUNIOR A G, RIBEIRO D, AVELLAR L M, et al. Wearable and fully-portable smart garment for mechanical perturbation detection with nanoparticles optical fibers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 2995-3003.
- [48] ZHANG H B, LI J P, WEN B, et al. Connecting intelligent things in smart hospitals using NB-IoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(3): 1550-1560.
- [49] ABDEL-BASSET M, MANOGARAN G, GAMAL A, et al. A novel intelligent medical decision support model based on soft computing and IoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(5): 4160-4170.
- [50] WANG Q Q, GUAN Q S, CHENG J L, et al. Ultrasonic backscatter communication for implantable medical devices[J]. *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications*, 2022: doi.org/10.1109/TMBMC.2022.3182572
- [51] AHMED N, DE D, HUSSAIN I. Internet of things (IoT) for smart precision agriculture and farming in rural areas[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(6): 4890-4899.
- [52] FEI J, CHIN K W, YANG C L, et al. Data collection in multihop mobile sink-aided backscatter IoT networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(14): 12001-12013.
- [53] 徐勇军, 杨浩克, 叶迎晖, 等. 反向散射通信网络资源分配综述[J]. *物联网学报*, 2021, 5(3): 56-69.
- XU Y J, YANG H K, YE Y H, et al. A survey on resource allocation in backscatter communication networks[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2021, 5(3): 56-69.
- [54] 叶迎晖, 施丽琴, 卢光跃. 反向散射辅助的无线供能通信网络中用户能效公平性研究[J]. *通信学报*, 2020, 41(7): 84-94.
- YE Y H, SHI L Q, LU G Y. User-centric energy efficiency fairness in backscatter-assisted wireless powered communication network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(7): 84-94.
- [55] LU X, NIYATO D, JIANG H, et al. Ambient backscatter assisted wireless powered communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(2): 170-177.
- [56] 徐勇军, 谷博文, 谢豪, 等. 全双工中继协作下的移动边缘计算系统能耗优化算法[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(12): 3621-3628.
- XU Y J, GU B W, XIE H, et al. Energy consumption optimization algorithm for full-duplex relay-assisted mobile edge computing systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(12): 3621-3628.
- [57] LYU B, YANG Z, GUO H Y, et al. Relay cooperation enhanced backscatter communication for Internet-of-things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 2860-2871.
- [58] GAO X Z, NIYATO D, YANG K, et al. Cooperative scheme for backscatter-aided passive relay communications in wireless-powered D2D networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(1): 152-164.
- [59] LONG Y S, HUANG G F, ZHENG H, et al. Cooperative multirelay network design with hybrid backscatter and wireless-powered relaying[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(19): 18445-18460.
- [60] XU J, LI J C, GONG S M, et al. Passive relaying game for wireless powered Internet of things in backscatter-aided hybrid radio networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 8933-8944.
- [61] IMT-2030(6G)推进组. 智能超表面技术研究报告[R]. 2021. IMT-2030(6G) Promotion Group. Research report on reconfigurable intelligent surface technology[R]. 2021.
- [62] 徐勇军, 高正念, 王茜竹, 等. 基于智能反射面辅助的无线供电通信网络鲁棒能效最大化算法[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(7): 2317-2324.
- XU Y J, GAO Z N, WANG Q Z, et al. Robust energy efficiency maximization algorithm for intelligent reflecting surface-aided wireless powered-communication networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(7): 2317-2324.
- [63] LI S Y, BARIAH L, MUHAIDAT S, et al. Outage analysis of NOMA-enabled backscatter communications with intelligent reflecting surfaces[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(16): 15390-15400.
- [64] XU Y J, GAO Z N, WANG Z Q, et al. RIS-enhanced WPCNs: joint radio resource allocation and passive beamforming optimization[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(8): 7980-7991.
- [65] HU J J, LIANG Y C, PEI Y Y. Reconfigurable intelligent surface enhanced multi-user miso symbiotic radio system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(4): 2359-2371.
- [66] XU Y J, XIE H, WU Q Q, et al. Robust max-min energy efficiency for RIS-aided HetNets with distortion noises[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(2): 1457-1471.
- [67] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106-112.
- [68] 徐勇军, 徐然, 周继华, 等. 面向窃听用户的 RIS-MISO 系统鲁棒资源分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(7): 2253-2263.
- XU Y J, XU R, ZHOU J H, et al. Robust resource allocation algorithm for RIS-assisted MISO systems with eavesdroppers[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(7): 2253-2263.
- [69] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 36-42.
- [70] XU Y J, LIU Z J, HUANG C W, et al. Robust resource allocation algorithm for energy-harvesting-based D2D communication underlying UAV-assisted networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(23): 17161-17171.
- [71] YANG H H, YE Y H, CHU X L, et al. Energy efficiency maximization for UAV-enabled hybrid backscatter-harvest-then-transmit communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(5): 2876-2891.
- [72] YANG G, DAI R, LIANG Y C. Energy-efficient UAV backscatter

- communication with joint trajectory design and resource optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(2): 926-941.
- [73] 徐勇军. 下垫式认知无线网络动态资源分配问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- XU Y J. Research on dynamic resource allocation for underlay cognitive radio networks[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [74] 徐勇军, 赵晓晖. 认知无线电系统的顽健资源分配算法[J]. 通信学报, 2014, 35(4): 124-129, 140.
- XU Y J, ZHAO X H. Robust resource allocation algorithm for cognitive radio system[J]. Journal on Communications, 2014, 35(4): 124-129, 140.
- [75] XU Y J, ZHAO X H, LIANG Y C. Robust power control and beamforming in cognitive radio networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 1834-1857.
- [76] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [77] XU Y J, HU R Q, LI G Q. Robust energy-efficient maximization for cognitive NOMA networks under channel uncertainties[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(9): 8318-8330.
- [78] AL-BADARNEH Y H, ELZANATY A, ALOUINI M S. On the performance of spectrum-sharing backscatter communication systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(3): 1951-1961.
- [79] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.
- [80] ADIBELLI S, JUYAL P, PRVULOVIC M, et al. THz bistatic backscatter side-channel sensing at a distance[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(2): 1440-1450.
- [81] STURM C, WIESBECK W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(7): 1236-1259.
- [82] QI Q, CHEN X M, ZHONG C J, et al. Integrated sensing, computation and communication in B5G cellular Internet of things[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(1): 332-344.
- [83] DORRI A, STEGER M, KANHERE S S, et al. BlockChain: a distributed solution to automotive security and privacy[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(12): 119-125.
- [84] ZHAO Y, ZHAO J, JIANG L S, et al. Privacy-preserving blockchain-based federated learning for IoT devices[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(3): 1817-1829.

### [作者简介]



张晓茜(1997-), 男, 河南周口人, 重庆邮电大学博士生, 主要研究方向为反向散射通信、智能反射表面、资源分配等。



徐勇军(1986-), 男, 湖北赤壁人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 博士生导师, 主要研究方向为反向散射通信、智能反射表面、通感一体化等。