



# 反向散射通信的未来应用与技术挑战\*

崔子琦<sup>1</sup>, 王公仆<sup>1</sup>, 魏旭昇<sup>2</sup>, 姜大洁<sup>2</sup>, 秦飞<sup>2</sup>, 艾渤<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044;

2. 维沃移动通信有限公司, 北京 100083;

3. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

【摘要】 反向散射通信技术是“绿色”物联网和6G网络设计的关键技术之一, 能够实现低功耗、低成本、易部署的“绿色”通信。简要回顾了传统反向散射通信技术的起源及原理, 综述了新型反向散射通信技术和最新相关研究进展, 预测了反向散射通信技术未来潜在应用并分析了其面临的关键问题。

【关键词】 反向散射通信; 高速率传输; 物联网; 无源传感器; 可穿戴设备

doi:10.3969/j.issn.1006-1010.2021.04.005 中图分类号: TN929.5

文献标志码: A 文章编号: 1006-1010(2021)04-0029-08

引用格式: 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.

OSID:



扫描二维码  
与作者交流

## Future Applications and Technical Challenges of Backscatter Communications

CUI Ziqi<sup>1</sup>, WANG Gongpu<sup>1</sup>, WEI Xusheng<sup>2</sup>, JIANG Dajie<sup>2</sup>, QIN Fei<sup>2</sup>, AI Bo<sup>3</sup>

(1. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. vivo Mobile Communication Co., Ltd., Beijing 100083, China;

3. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

【Abstract】 Backscatter communication technology is one of the critical technologies in "green" Internet of Things and 6G network design, which can realize "green" communication with low power consumption, low cost, and easy deployment. This paper briefly reviews the origin and principle of the traditional backscatter communication technologies, overviews novel backscatter technologies and the latest related research, predicts the potential applications of backscatter communication technologies, and analyzes the key issues.

【Keywords】 backscatter communication; high-speed transmission; Internet of Things; passive sensors; wearable devices

## 0 引言

物联网 (IoT, Internet of Things) 是继计算机、互联网之后的世界信息产业发展的第三次浪潮。物联网以“万物互联”的思想将各类物体连接在一起, 摆脱了传统通信中需要特定设备接入网络的局限, 方便人们工作生活并提高各行业生产效率。我国 IMT-2020 (5G) 推进组提出了“信息随心至, 万物触手及”的 5G 愿景, 万物互联是 5G 的核心目标之一; IMT-2030 (6G) 推进组进一步提出了“万物智联、数字孪生”的 6G 愿景<sup>[1]</sup>。文献 [2] 指出物联网技术是建设

工业物联网的技术基石, 是制造业数字化转型的重要赋能者。文献 [3] 表明物联网技术是 6G 设计中推动无线通信从“万物互联”到“智能互联”的重要演变关键技术之一。

反向散射通信 (Backscatter Communications) 是构建绿色节能、低成本、可灵活部署的未来物联网的关键技术之一, 是实现“万物智联”的重要手段。传统的反向散射技术主要应用于射频识别 (RFID, Radio Frequency Identification) 系统。典型的 RFID 系统由一个读写器 (Reader) 和多个标签 (Tag) 组成 (如图 2(a) 所示), 利用反向散射技术进行通信。然而, 传统反向散射技术中需要特定的射频源作为激励信号, 且在通信过程中无线信号会经历往返的双重路径衰落, 因此路径损耗大, 有效通信距离短<sup>[4-6]</sup>。

针对传统反向散射技术需要特定射频源、有效通信距离短的问题, 学术界提出了一系列新型反向散射通信

收稿日期: 2021-06-09

\*基金项目: 国家自然科学基金“基于无源反向散射通信技术的物联网基础理论研究” (NSFC-61871026); 国家自然科学基金“面向高速铁路典型场景业务与应用的新一代移动通信理论与关键技术研究” (NSFC-U1834210)

技术,以降低通信的能耗和运行成本,延长设备的使用寿命。由于新型反向散射技术的无源设备可以利用第三方的信号(例如蜂窝无线信号、广播电视信号、Wi-Fi信号或蓝牙信号等)来传输自己的信息,因此新型反向散射技术也被称为“共生通信”。全球首份6G白皮书<sup>[7]</sup>指出,新型反向散射技术为实现超低功率通信提供了可能,契合了6G“无处不在”的设计目标。同时,新型的反向散射通信技术能满足“绿色”物联网广覆盖、低能耗、可持续的设计目标,成为6G网络设计和“绿色”物联网关注的焦点。本文将逐一介绍新型反向散射通信技术的原理、研究进展和潜在应用及技术挑战。

## 1 新型反向散射通信技术

### 1.1 反向散射通信技术原理与起源

反向散射技术起源于二战,是军方为了辨认己方战机在机身上安装标签,根据标签反向散射的雷达信号进行身份判别<sup>[8]</sup>。随后,大批基于反向散射技术的应用兴起,主要运用于RFID系统,其中电子不停车收费系统(ETC, Electronic Toll Collection)是反向散射技术大规模商业化的经典案例<sup>[9]</sup>。

反向散射通信设备利用其他设备或者环境中的射频信号进行信号调制来传输自己的信息。调制电路如图1所示,设备通过调节其内部阻抗来控制电路的反射系数 $\Gamma$ ,进而改变入射信号的幅度、频率或相位,实现信号的模拟或数字调制。式(1)表示电路反射系数:

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} = |\Gamma| e^{j\theta_\Gamma} \quad (1)$$

其中 $Z_0$ 为天线特性阻抗, $Z_1$ 是负载阻抗。假设入射信号为 $S_{in}(t)$ ,则输出信号为 $S_{out}(t) = |\Gamma| S_{in}(t) e^{j\theta_\Gamma}$ 。模拟调制调节内置模拟电路来改变阻抗 $Z_1$ ,数字调制利用控制器改变阻抗 $Z_1$ 。

无源反向散射通信设备首先需从外界射频信号中获取能量(Energy harvesting),供给内部电路模块工作,然后再反向散射射频信号进行通信,做到零功耗通信。

### 1.2 新型反向散射通信技术

自2013年以来,业界提出了一系列新型反向散射通信技术,以下给出八个案例。

2014年Kimionis等人提出了双站反向散射(Bistatic Backscatter),该系统在标签附近设置一个载波发生器(如图2(b)所示),能有效减少路径损耗,扩大了标签和读写器之间的通信距离,在供能载波功率为20 mW时,

标签通信距离为130 m左右<sup>[10]</sup>。

Liu、Parks等人于2013年和2014年提出了环境反向散射(Ambient Backscatter)<sup>[11-12]</sup>,该技术不需要载波发生器,利用标签周围已有的电视广播和Wi-Fi等无线信号来触发通信(如图2(c)所示)。目前相关的研究已设计出了传感器、接收信号能量检测的原型电路<sup>[11,13]</sup>和通信协议<sup>[14]</sup>,展示了该技术的商业应用的潜力。

2015年Bharadia等人提出了基于全双工的反向散射技术,利用多天线的Wi-Fi网关协助用户和标签同时通信<sup>[15]</sup>,实现高效全双工通信(如图2(d)所示)。Wi-Fi网关支持多种调制方式,在通信距离为1 m时,数据速率可达5 Mbit/s。

2016年提出的转型反向散射技术(Inter-Technology Backscatter)通过改变标签的阻抗,将蓝牙信号的频率搬移置Wi-Fi信号或者ZigBee信号的频带(如图2(e)所示),在信号速率为2 Mbit/s时,所需信号的功率仅为 $28 \mu\text{W}$ ,扩大了反向散射通信的应用范围<sup>[16]</sup>。

2017年提出的基于LoRa的反向散射技术(LoRa Backscatter)利用了LoRa信号高灵敏度(-149 dBm)和扩频编码技术,实现远距离反向散射通信(如图2(f)所示),实验通信距离最远可达475 m<sup>[17]</sup>。

2017年及2018年提出的基于反向散射的智能表面辅助通信技术,能够智能重构和增强无线信道环境<sup>[18-20]</sup>。

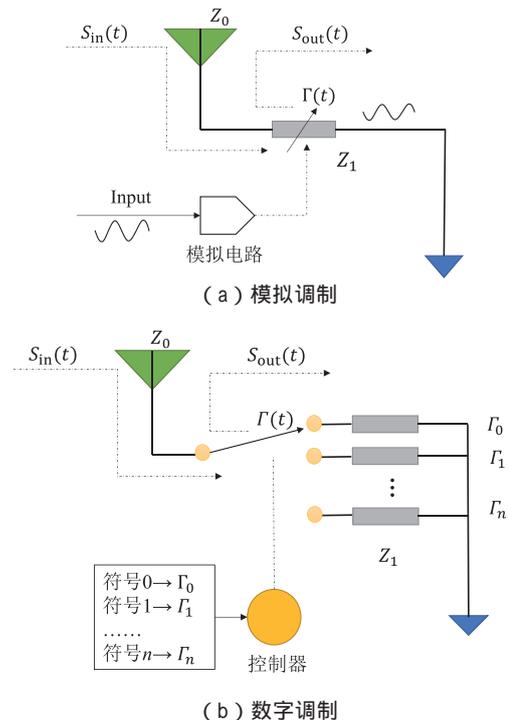


图1 反向散射模拟和数字调制电路

智能表面由多个反射单元构成,每个反射单元都可与入射信号进行交互(如图2(g)所示)。东南大学设计的一种智能表面,通过调节反射信号的相位实现了8PSK调制,通信速率可达6.144 Mbit/s<sup>[20]</sup>。

Mehrdad 等人于2019年提出的反向散射大规模接入机制(NetScatter)使用了联合开关键控的分布式啁啾(chirp)扩频编码机制(如图2(h)所示),可支持多设备并发接入,同时接入256个设备时,通信带宽仅为500 kHz<sup>[21]</sup>。

Taekyung 等人于2020年提出的全信号反向散射技术(AnyScatter)根据非相干信道天线之间的相位差是恒定的这一现象,利用接收信号的相位差判别接收符号信息(如图2(i)所示),消除了现有研究中对特定类型射频信号的反向散射技术的依赖<sup>[22]</sup>。

### 1.3 新型反向散射通信技术研究进展

新型反向散射通信技术已成为研究热点,相关研究迅速增长。我们就系统传输设计与性能分析、低功耗可穿戴设备相关技术与应用两个方面举例说明。

#### (1) 新型反向散射通信系统传输设计与分析

新型反向散射通信系统研究内容丰富,以下仅给出

系统性能分析、信道估计、信号检测和编码调制等部分研究结果。

在系统中断和容量分析方面,文献[23]研究了反向散射通信系统的信道容量,给出了高信噪比情况下系统中断概率的渐进值,其结果表明复高斯信号的容量不完全是实高斯信号容量的两倍。类似地,Zhao 等人推导了反向散射信道分布表达式,并分析了系统在真实高斯信道下的中断性能<sup>[24]</sup>。

在信道估计方面,考虑到实际中信道信息获取困难,Qian 等人分析了接收端在没有导频的情况下采取了差分检测的可行性<sup>[25]</sup>,Ma 等人提出了一种基于期望最大化算法的盲信道估计方案<sup>[26]</sup>。

在信号检测方面,Chen 等人研究了全双工反向散射通信系统中信号检测的问题,设计了最大似然检测器,并推导了相应的误码率表达式<sup>[27]</sup>。文献[28]针对共生反向散射通信系统提出了最大似然检测器,并设计了低复杂度的线性检测方法。

在编码方面,文献[29]在标签端使用曼彻斯特编码,并在阅读器端设计了相应的译码机制,有效降低了误码率。文献[30]提出了一种用于反向散射通信的空时编码,

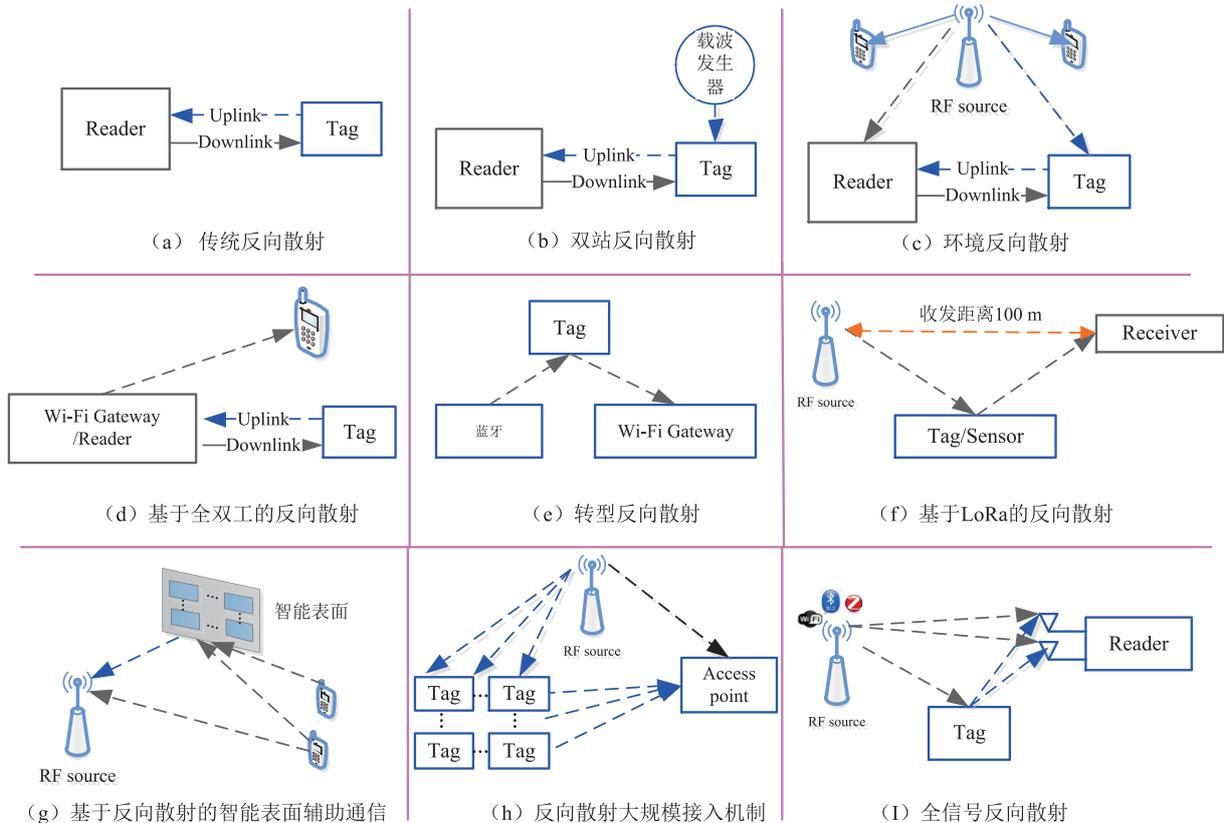


图2 新型反向散射通信技术

并分析指出反向散射通信系统中空时编码的性能几乎与 Alamouti 码相同,而且电路实现简单,具有良好的应用前景。

## (2) 低功耗可穿戴设备的技术支持与应用

基于反向散射技术的低功耗可穿戴设备是当前研究热点。由于目前市面上应用的大多数可穿戴设备利用蓝牙或者 Wi-Fi 信号通信,因此,目前学术界的一个热点是利用已有的 Wi-Fi 或蓝牙信号实现与商用设备可靠的通信。

为了降低可穿戴设备通信时 Wi-Fi 或者蓝牙信号的同频干扰,文献 [31] 提出基于频移的反向散射技术 (FS-Backscatter),在标签安装一个 20 MHz 的振荡器,将反向散射信号搬移至与原信号频率相差 20 MHz 的频带,提高了通信可靠性。

文献 [32] 提出的蓝牙反向散射系统,利用已有蓝牙信号与商用蓝牙终端通信。调制过程如图 3 所示,首先生成单音信号作为调制载频,然后分别将该载频搬移不同的分量来表示符号“0”和“1”。该系统还可通过调节本地的时钟频率进行动态信道配置,避开干扰严重的信道。

文献 [33] 利用 Wi-Fi 信号 MAC 层的帧聚合 (A-MPDU) 特性来实现反向散射通信,通信过程如图 4 所示。无源设备根据要加载的数据信息反向散射信号,选择性地改变子帧 (MPDU) 传输过程中的信道。由于一个 A-MPDU 传输过程中只进行一次信道估计,接入点 (AP) 无法恢复被干扰的 MPDU,此时 AP 返回的表示 MPDU 是否被恢复的 ACK 信息即为无源设备要传输的信息。

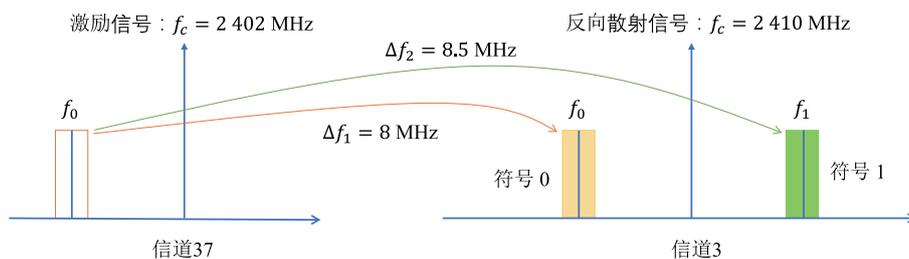


图3 调制过程示意图

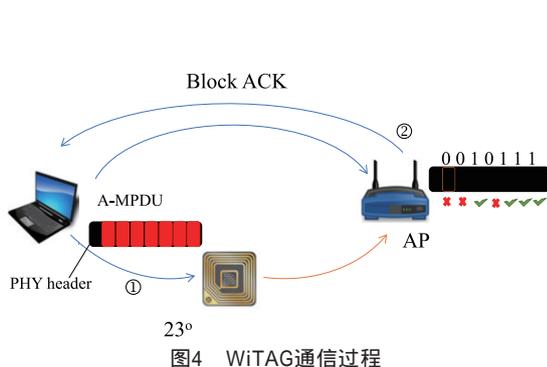


图4 WiTAG通信过程

可穿戴设备工作时贴附人体,因此评估和降低人体对反向散射通信的影响也是低功耗可穿戴设备实际推广的关键之一。然而学术当前鲜有相关的测试,为此我们搭建了测试环境来评估人体对反向散射信号强度的影响,如图 5 所示。我们利用通用软件无线电外设和 WISP<sup>[34]</sup> 无源标签进行通信,使用频谱仪测量标签反射信号强度。测试结果表明,当标签贴附人体时,反向散射的信号强度会降低 5 dB 到 10 dB。

## 2 新型反向散射技术应用展望

反向散射技术能够使设备摆脱电池的束缚,降低设备生产和维护成本,契合了 5G 与 6G 的更低功耗、更低成本、更广连接的需求,除了传统反向散射技术已经应用的仓库货物盘点等场景外,在未来有更广泛的潜在应用,下文给出典型应用示例。

### 2.1 低功耗可穿戴设备

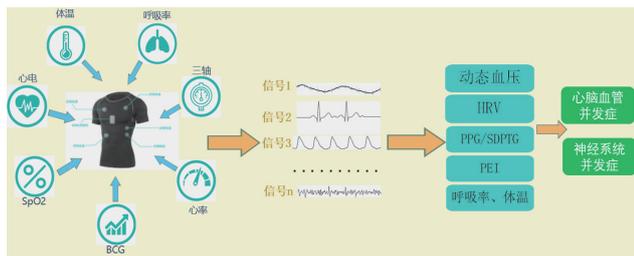
可穿戴设备可借助反向散射技术来降低设备功耗,延长续航时间。当周边的射频信号可供设备通信时,设备利用反向散射技术将采集的信息传送给智能终端。如图 6 (a) 所示,智能手表将采集的步数、心率等信息利用手机发出的蓝牙、Wi-Fi 等射频信号反向散射到手机终端显示给用户。可穿戴多生理参数监测衣物内嵌反向散射传感单元,实时获取人体体温、呼吸率、心电等生理参数信号,利用外界射频信号将信息返回智能终端以供分析,如图 6 (b) 所示。



图5 测试方案图



(a) 低功耗智能手表



(b) 低功耗智能可穿戴多生理参数监测衣物

图6 低功耗智能可穿戴设备示例

## 2.2 生物内置传感芯片

生物芯片嵌入生物体内,利用外部射频源工作。如图7所示,芯片采集到脑部生物信息数据后,利用外部射频源将数据反射回手机终端,终端分析接收信号并恢复脑部信息。



图7 生物内置传感芯片

## 2.3 铁路系统运营维护

文献[35]首次把反向散射通信技术用于铁路无线网络传输,降低了高速铁路信号的穿透损耗和信道快速时变带来的影响。反向散射通信技术在铁路领域还可能应用于轨道入侵检测、接触网监控、货运跟踪和人员物品定位等方面。

(1) 轨道异物入侵监测。如图8所示,在铁路周边部署无源标签收集轨道周边状态信息,并反向散射给智能终端进行分析,来监测动物闯入、桥梁损坏或倒塌,水管爆裂等危险事件信息。

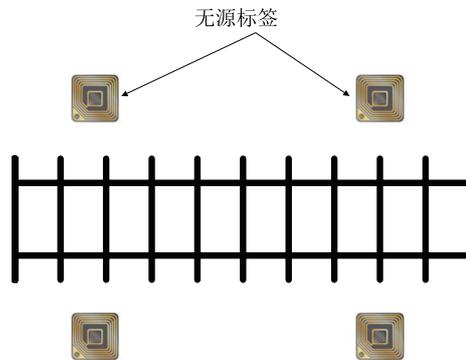


图8 轨道异物入侵监测

(2) 接触网智能监测。如图9所示,在铁路接触网电缆安装无源标签,实时收集电缆张力数据,传给监控中心,实现对接触网状态的高效实时分析与监控,避免因张力异常而引发的电力事故。

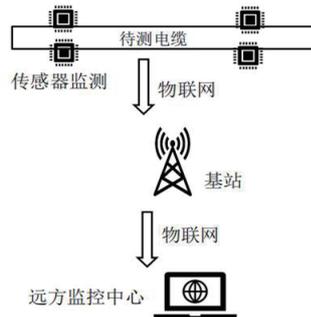


图9 接触网智能监测

(3) 货运实时远程跟踪。列车货运业务场景如图10所示,货物贴上无源标签,车厢内阅读器定时读取并刷新货物信息记录;车内阅读器通过列车无线网络和铁路货运网络进行信息交互;寄货方和收货方可通过手机APP或者网上读取货物实时位置和状态等信息。

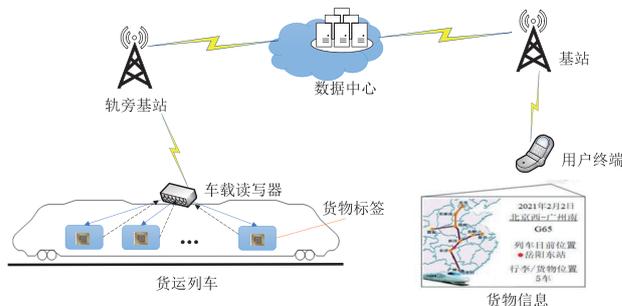


图10 货运远程跟踪

(4) 乘务员及餐车定位。如图11所示,在客运列车中,每个乘务员、餐车都贴附有加载其相关信息的无源标签,车厢内阅读器实时读取标签位置并更新,用户可通过列车内部网络获取乘务员及餐车实时位置。



图11 乘务员及餐车定位

## 2.4 智慧农业

文献 [36] 设计了一种昆虫物联网平台，平台实物和电路图分别如图 12 (a) 和图 12 (b) 所示。无源传感器贴在活体昆虫上，传感器利用反向散射技术与固定站点之间通信。智慧农业场景如图 12 (c) 所示，在昆虫上安装水分、温湿度、光照等传感器，获得作物的生长环境、授粉状态等信息，传回固定站点，站点分析后及时给出调控方案，实现精细化农业生产控制。

## 2.5 工业传感器网络

未来的智慧工厂将会部署大量的无线传感器，组成一个无线传感器网络，其目标是在工业环境中监测相关过程和参数<sup>[37]</sup>。这种环境通常使用各种类型的传感器进行

监测，如麦克风、二氧化碳传感器、压力传感器、光传感器等。各种类型的传感器采集并传递信息给中央控制节点，其速率要求一般低于 2 Mbit/s，电池续航时间要求是几年，此外还有设备尺寸小、成本低的需求。通过反向散射技术可以很好地满足工业传感器网络的相关需求。

## 2.6 水下物联网

文献 [38] 将压电材料应用于无源标签，利用材料的压电效应实现水下的反向散射通信。如图 13 所示，将带有温湿度、酸碱度等监测模块的无源传感器部署在水下，收集水体数据，利用反向散射技术将信息传送回终端，实现低能耗、易部署的水体监测。

## 3 新型反向散射技术面临的挑战及未来研究方向

新型反向散射通信技术也面临着一系列的挑战，以下给出六个方面的挑战和对应的研究方向。

(1) 新型反向散射通信的理论性能分析，例如考虑灵敏度受限的理论性能分析。现有的反向散射研究多数都没有考虑电路灵敏度，而在实际中，当无源设备接收到射频信号能量超过某阈值时，其内部电路才被激活。因此，结合实际中无源设备灵敏度的约束来分析容量、覆盖等

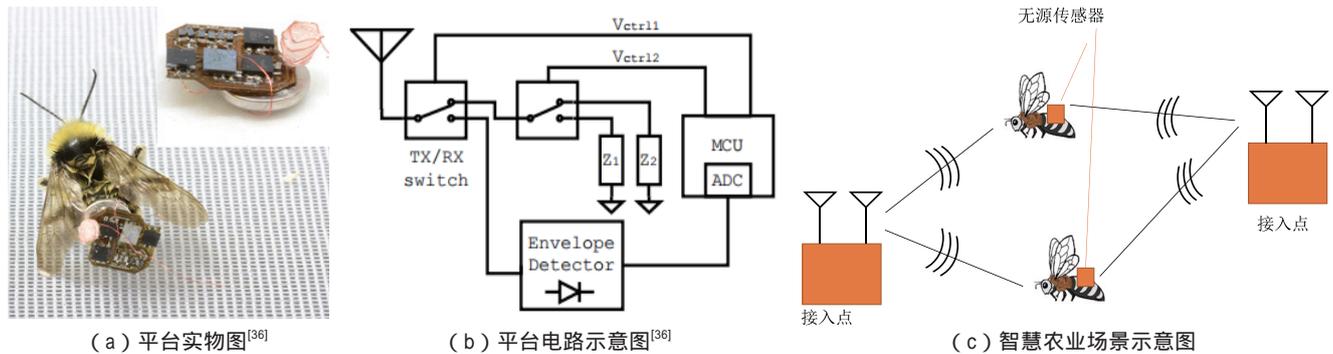


图12 智慧农业平台

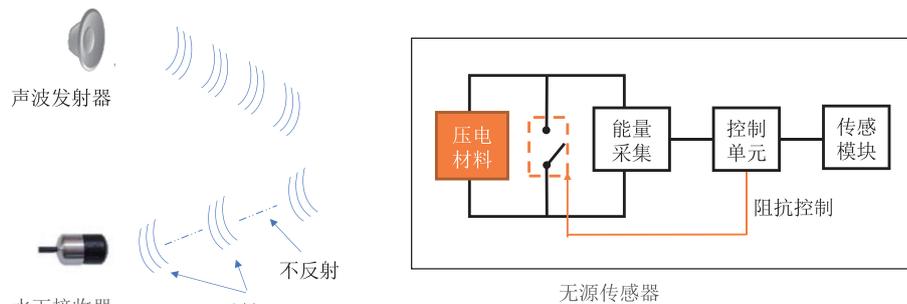


图13 水体监测系统

系统性能有重要研究价值和工程指导意义。

(2) 信道估计和复杂信号检测。反向散射通信系统中的无源设备发送导频的能力受限,接收端收到的信号是反射信号与射频源信号的叠加,尤其在多用户接入时,接收信号如何建模、信道参数如何提取、反射信号如何检测都是新兴的研究方向。

(3) 大规模用户接入。无源设备存储和计算能力有限,传统网络中的防冲突算法很难适用于大规模无源设备接入。设计大量用户接入场景下的防冲突算法是有实用价值的研究方向。

(4) 自干扰消除。无源反向散射通信系统中的接收信号是有用的反射信号和泄露的自干扰信号的叠加,自干扰信号的强度可能远大于反射向散射信号强度。传统方法采取射频和基带自干扰消除,从强自干扰信号中恢复有用信号是一个重要挑战。

(5) 广域覆盖。由于受到信道衰减和外界信号干扰的影响,反向散射传输的距离受限。当前通过中继、扩频和LoRa技术等方法能提高通信距离,未来结合大规模反射阵列、蜂窝物联网和多层异构网络,实现广覆盖是网络演进方向之一,覆盖和功率时间等资源的权衡也是值得研究的理论课题。

(6) 近距离高速率传输方案设计。无源设备由于能量限制一般采用低阶调制,且受制于晶振稳定性以及同步和干扰的挑战,因此其通信速率较低。近距离中高速率绿色通信是未来6G需求之一,如何进一步提高近距离传输速率,例如通过引入MIMO、高阶调制,提升自干扰消除的性能等手段来提高传输速率,是反向散射通信走向实用的关键挑战之一。

## 4 结束语

反向散射通信设备利用其他设备或者环境中的射频信号进行信号调制来传输自身信息,新型反向散射通信技术的低功耗、低成本、易维护、好部署等特点能有效满足未来6G网络的应用需求。本文介绍了新型反向散射通信技术的原理和发展历程,阐述了最新研究进展,并给出了应用前景展望和未來研究方向。希望产业界一起推动新型反向散射通信技术走向成熟。

## 参考文献:

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

[2] 中德智能制造合作企业对话工作组(AGU),工业互联网专家组. 工业4.0 x 工业互联网:实践与启示[R]. 2020.

[3] 广东省新一代通信与网络创新研究院,清华大学,北京邮电大学,等. 6G无线热点技术研究白皮书[R]. 2020.

[4] WANG Y-PE, LIN X, ADHIKARY A, et al. A primer on 3GPP narrowband Internet of Things[J]. IEEE communications magazine, 2017,55(3): 117-123.

[5] SAAD W, ZHOU X, HAN Z, et al. On the physical layer security of backscatter wireless systems[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2014,13(6): 3442-3451.

[6] WANG G, GAO F, FAN R, et al. Ambient backscatter communication systems: Detection and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016,64(11): 4836-4846.

[7] University of Oulu. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence [EB/OL]. (2019-09-01)[2020-04-30]. <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526223544.pdf>.

[8] DOBKIN D M. The RF in RFID: UHF RFID in practice[M]. USA: Newnes, 2012.

[9] KUESTER D, POPOVIC Z. How good is your tag?: RFID backscatter metrics and measurements[J]. IEEE Microwave Magazine, 2013,14(5): 47-55.

[10] KIMIONIS J, BLETSAS A, SAHALOS J N. Increased range bistatic scatter radio[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014,62(3): 1091-104.

[11] LIU V, PARKS A, TALLA V, et al. Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air[C]//ACM SIGCOMM. ACM, Hong Kong, China, 2013: 1-13.

[12] PARKS A N, LIU A, GOLLAKOTA S, et al. Turbocharging ambient backscatter communication Review[C]//ACM SIGCOMM. ACM, Chicago, United States, 2014: 1-12.

[13] VYAS R J, COOK B B, KAWAHARA Y, et al. E-WEHP: A batteryless embedded sensor-platform wirelessly powered from ambient digital-TV signals[J]. IEEE Transactions on microwave theory techniques, 2013,61(6): 2491-2505.

[14] KELLOGG B, PARKS A, GOLLAKOTA S, et al. Wi-Fi backscatter: Internet connectivity for RF-powered devices[C]//ACM SIGCOMM. ACM, Chicago, United States, 2014: 1-12.

[15] BHARADIA D, JOSHI K R, KOTARU M, et al. Backfi: High throughput wifi backscatter[C]//ACM SIGCOMM. ACM, London, United Kingdom, 2015: 1-14.

[16] IYER V, TALLA V, KELLOGG B, et al. Inter-technology

- backscatter: Towards internet connectivity for implanted devices[C]//ACM SIGCOMM. ACM, Florianopolis, Brazil, 2016: 356-369.
- [17] TALLA V, HESSAR M, KELLOGG B, et al. Lora backscatter: Enabling the vision of ubiquitous connectivity[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2017(3): 1-24.
- [18] LI L, CUI T J, JI W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. Nature communications, 2017,8(1): 1-7.
- [19] 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.
- [20] TANG W, DAI J Y, CHEN M, et al. Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter[J]. Electronics Letters, 2019,55(7): 417-420.
- [21] HESSAR M, NAJAFI A, GOLLAKOTA S. Netscatter: Enabling large-scale backscatter networks[C]//16th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. BOSTON, United States, 2019: 271-284.
- [22] Kim T, Lee W. AnyScatter: Eliminating Technology Dependency in Ambient Backscatter Systems[C]//IEEE INFOCOM. IEEE, Toronto, Canada, 2020: 1-10.
- [23] ZHAO W, WANG G, FAN R, et al. Ambient backscatter communication systems: Capacity and outage performance analysis[J]. IEEE Access, 2018(6): 22695-22704.
- [24] ZHAO W, WANG G, ATAPATTU S, et al. Outage analysis of ambient backscatter communication systems[J]. IEEE Communications Letters, 2018,22(8): 1736-1739.
- [25] QIAN J, GAO F, WANG G, et al. Noncoherent detections for ambient backscatter system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016,16(3): 1412-1422.
- [26] MA S, WANG G, FAN R, et al. Blind channel estimation for ambient backscatter communication systems[J]. IEEE Communications letters, 2018,22(6): 1296-1299.
- [27] CHEN C, WANG G, GAO F, et al. Signal detection with channel estimation error for full duplex wireless system utilizing ambient backscatter[C]//Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Signal Processing(WCSP). Nanjing, China, 2017: 1-5.
- [28] YANG G, ZHANG Q, LIANG Y C. Cooperative ambient backscatter communications for green Internet-of-Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018,5(2): 1116-1130.
- [29] TAO Q, ZHONG C, LIN H, et al. Symbol detection of ambient backscatter systems with Manchester coding[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018,17(6): 4028-4038.
- [30] HE C, LUAN H, LI X, et al. A simple, high-performance space-time code for MIMO backscatter communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020,7(4): 3586-3591.
- [31] ZHANG P, ROSTAMI M, HU P, et al. Enabling practical backscatter communication for on-body sensors[C]//ACM SIGCOMM. ACM, Florianopolis, Brazil, 2016: 1-14.
- [32] ZHANG M, ZHAO J, CHEN S, et al. Reliable backscatter with commodity BLE[C]//IEEE INFOCOM. IEEE, Toronto, Canada, 2020: 1-9.
- [33] ABEDI A, DEHBASHI F, MAZAHARI M H, et al. WiTAG: Seamless WiFi Backscatter Communication[C]//ACM SIGCOMM. ACM, Virtual Event, United States, 2020: 1-13.
- [34] Wiki. WISP[EB/OL]. (2020-05-23)[2020-05-30]. <https://sites.google.com/uw.edu/wisp-wiki/home>.
- [35] ZHAO W, WANG G, AI B, et al. Backscatter Aided Wireless Communications on High-Speed Rails: Capacity Analysis and Transceiver Design[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020,38(12): 2864-2874.
- [36] IYER V, NANDAKUMAR R, WANG A, et al. Living IoT: A flying wireless platform on live insects[C]//ACM MobiCom. ACM, Los Cabos, Mexico, 2019: 1-15.
- [37] 3GPP. Study on Communication for Automation in Vertical Domains[R]. 2020.
- [38] JANG J, ADIB F. Underwater backscatter networking[C]//ACM SIGCOMM. ACM, Beijing China, 2019: 1-13.

## 作者简介



崔子琦 (orcid.org/0000-0003-3227-8085): 北京交通大学在读博士研究生, 研究方向为无线信号处理与移动互联网。



王公俊: 博士毕业于加拿大阿尔伯塔大学, 现任北京交通大学教授、博士生导师, 研究方向为无线信号处理与移动互联网。



魏旭昇: 博士毕业于英国爱丁堡大学, 现任职于维沃移动通信有限公司, 研究方向为5G标准化和6G预研。