

无源物联网：背景、概念、挑战及研究进展

郑黎明* 刘培国 王宏义 吴建飞

(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

摘要：近年来，随着物联网(IoT)部署范围不断扩大，数以千亿计的智能设备将接入物联网，对网络接入能力、能量供应、成本等提出了极大挑战，无源物联网呼之欲出。该文梳理了无源物联网相关概念并给出其定义，首次系统研究了无源物联网面临的能量密度低、转化效率低、后向散射通信距离有限、能量信息同时传输兼顾难等4大挑战，详细分析了问题原因并对研究进展进行综述：针对能量密度低挑战，从波束成形、能量收集天线设计、智能反射表面3个方面综述；针对能量转换效率低挑战，从接收机架构优化、波形设计、阻抗匹配优化、整流器优化4个方面综述；针对后向散射通信距离有限挑战，从新的调制方式、频移型后向散射新机制、MIMO增强、新的信道编码机制、新的信号检测方法、智能反射表面增强以及半有源模式7个方面综述；针对能量信息同时传输兼顾难问题，从能量信息同时传输架构优化、能量信息兼容信道编码2个方面综述。针对每个优化方向，对比分析了各类方法的优劣并指出了未来研究方向。

关键词：无源物联网；射频能量收集；后向散射；能量信息同时传输

中图分类号： TN915; TP393

文献标识码： A

文章编号： 1009-5896(2023)07-2293-18

DOI: 10.11999/JEIT221219

Passive Internet of Things: Background, Concept, Challenges and Progress

ZHENG Liming LIU Peiguo WANG Hongyi WU Jianfei

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: In the past decades, the scope of Internet of Things (IoT) is expanded continuously. With hundreds of billions of smart devices connect to IoT, huge challenges are arisen from several aspects such as device cost, connectivity capability, and power supplies. Fortunately, the new paradigm - passive IoT is coming which is one of the effective solutions for these challenges. Some related concepts are analyzed and the definition of passive IoT is proposed. For the first time, the four challenges faced by passive IoT, such as low energy density, low conversion efficiency, limited distance of backscatter communication, and difficulty in transmission of power and information simultaneous, are studied. The problems are analyzed in deeply and the research progress are surveyed. For the challenge of low energy density, the research progress is reviewed from three aspects: beamforming, antenna design for energy harvesting, and intelligent reflecting surface. For the challenge of low energy conversion efficiency, from receiver architecture optimization, waveform design, impedance matching, rectifier optimization. For the challenge of limited distance of backscatter communication, the research progress is reviewed from seven aspects: new modulation scheme, new frequency-shifted backscattering scheme, MIMO, new channel coding scheme, new signal detection method, intelligent reflecting surface enhancing, and semi-active mode. Considering the difficulty in transmission of power and information simultaneous, the research progress is reviewed from two aspects: optimization of the receiver architecture and the energy information compatible signal coding scheme. For each aspect, the advantages and disadvantages of various methods are analyzed and the future research directions are pointed out.

Key words: Passive Internet of Things (IoT); Radio frequency energy harvesting; Backscatter communications; Simultaneous wireless information and power transfer

收稿日期: 2022-09-19; 改回日期: 2023-02-17; 网络出版: 2023-02-21

*通信作者: 郑黎明 lmzheng@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(52101391)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (52101391)

1 引言

随着可穿戴设备、智能家居、智能网联汽车、智慧城市等应用的不断普及,数以千亿计的设备将接入网络,实现真正的万物互联。然而现有物联网接入技术已经无法满足日益增长的接入需求,主要原因有:

接入能力方面。目前以窄带物联网(Narrow Band Internet of Things, NB-IoT)、远距离无线电(Long-Range Radio, LoRa)、SigFox为代表的低功耗广域网(Low Power Wide Area Network, LPWAN)技术能支持百亿级设备接入。但随着物联网应用朝着泛在化、大众化方向发展,即将面对千亿级海量设备,如何实现千亿级设备的可靠接入与高效管理,已成为当前物联网研究领域亟需解决的关键问题。

电源依赖方面。受限于分布的广泛性和位置的移动性,物联网设备通常采用电池供电,然而由于物联网设备部署环境通常比较恶劣,电池的寿命急剧减少,一般情况下,温度每升高10℃,电池使用寿命将减少50%,温度越高影响越大,极大限制了设备的部署范围,尤其是在工业制造、环境监测等物联网应用效益最明显的产业领域。此外,更换、回收电池成本很高,部分应用环境甚至不支持更换电池,如心脏起搏器、军用传感器等。

成本方面。目前采用LPWAN接入技术的设备成本最低,仅包含供电电池、处理器芯片、射频收发芯片、天线等少数核心功能部件,但成本依然达百元。如中国移动的NB-IoT无线传输模块销售价

格就接近50元,传感器其他物料及制造成本也居高不下。随着物联网应用的深度普及,联网设备越来越多,成本问题必将进一步凸显。

综上,支持海量设备接入、低成本、无源的网络接入技术成为当前制约物联网发展的关键问题,具有上述特征的无源物联网成为科技界和产业界近年来关注的焦点。

为了叙述方便,下面给出缩写表,如表1所示。

2 概念

无源物联网的本质是物联网的终端节点无源,即终端节点自身不配置电池,也不采用有线方式从电网中获取电能,而是从环境中获取所需能量,支撑终端节点的感知、计算和无线传输。5G-Advanced网络技术演进白皮书^[1]给出了无源物联网的功能、优势及用途,“无源物联网利用后向散射及环境能量采集等技术,实现目标节点在免电池且极低复杂度的情况下实现信息的高效传递,具有零功耗、低成本、易部署的显著优势,可广泛应用在智能仓储、智慧物流、智慧农业、工业无线传感网络、智慧交通、智慧医疗等领域,有望成为万物互联的基础性使能技术”。但迄今为止,无源物联网并没有形成统一认识,本文先阐述和无源物联网紧密相关的几个概念,对这些概念进行深入剖析,最后给出我们的定义。

2.1 相关概念分析

(1)RFEH

RFEH是收集空间中传播的电磁波并将其转化为可供利用的电能的过程,可分为环境RFEH和专

表 1 缩写表

| 缩写 | 英文内容 | 中文内容 | 缩写 | 英文内容 | 中文内容 |
|------|---------------------------------------------------|---------------|--------|------------------------------------------------------|------------|
| IoT | Internet of Things | 物联网 | NB-IoT | Narrow Band Internet of Things | 窄带物联网 |
| LoRa | Long Range Radio | 远距离无线电 | LPWAN | Low Power Wide Area Network | 低功耗广域网 |
| RFEH | Radio Frequency Energy Harvesting | 射频能量收集 | RFID | Radio Frequency Identification | 射频识别 |
| BC | Backscatter Communication | 后向散射通信 | SWIPT | Simultaneous Wireless Information and Power Transfer | 能量信号同时传输 |
| IRS | Intelligent Reflecting Surface | 智能超表面 | WET | Wireless Energy Transmission | 无线能量传输 |
| WIT | Wireless Information Transmission | 无线信号传输 | ASK | Amplitude-shift Keying | 幅移键控调制 |
| FSK | Frequency-shift Keying | 频移键控调制 | PSK | Phase-shift Keying | 相移键控调制 |
| BER | Bit Error Ratio | 误码率 | MIMO | Multiple Input Multiple Output | 多进多出 |
| MISO | Multiple Input Single Output | 多进单出 | POW | Power Optimized Waveforms | 最大功率波形 |
| OFDM | Orthogonal Frequency Division Multiplexing | 正交频分复用 | DLI | Direct Link Interference | 直接传输干扰 |
| OOK | On-off Keying | 开关调制 | BPSK | Binary Phase Shift Keying | 二进制相移键控 |
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation | 正交振幅调制 | MSK | Minimum Shift Keying | 最小频移键控 |
| MOS | Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor | 金属-氧化物半导体场效应管 | CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor | 互补金属氧化物半导体 |

用RFEH，相关研究进展可参看综述文献[2-4]。环境RFEH可收集无线电广播、无线通信基站发射的电磁波，包括AM/FM、移动蜂窝网络、电视广播信号、Wi-Fi等。RFEH系统整体结构如图1所示，包括天线、阻抗匹配电路、整流器、能量管理电路及能量存储器。

在图1中，天线耦合空间中的电磁波，将其转化为电信号。在实际能量传输过程中，天线及芯片端口会反射部分能量，通常被定义为反射系数 Γ ，当天线阻抗与芯片阻抗共轭匹配时，实现最大功率输出，反射系数为0，当天线阻抗与芯片阻抗失配时，在天线和芯片之间会造成反射，为减少反射导致的功率损耗，需要在天线和芯片之间增加阻抗匹配电路。整流器将接收的交流电转换为可供其他电路直接使用的直流电。能量存储器主要是采用电容阵列或者超级电容将收集的能量进行高效存储，供其他电路使用。

(2)RFID

RFID是一种非接触式自动识别技术，可分为低频、高频、超高频、微波等，低频和高频RFID传输距离较短，微波RFID一般需要电池供电，本文关注应用最为广泛的超高频RFID，后文中RFID都特指超高频RFID，其原理如图2所示。读写设备通过发射电磁波给电子标签供电并读写电子标签内存储的信息，电子标签通过天线耦合读写设

备发射的电磁波来获取工作能量，通过后向散射方式反射或吸收读写设备发送的电磁波进行信息传输。

(3)BC

BC指散射体利用接收到的外部射频信号作为载波，通过调节阻抗或基带信号的频率等方式实现幅值、频率、相位的改变，将信息调制到反射载波上，实现无线通信[5]。最简单的BC系统如图3所示，散射体接收外部已有正弦波信号，依据需要发送的信息来调节阻抗，当需要发射信号1时，调整成电阻相等电抗相反，载波完全反射，当需要发射信号0时，阻抗精确匹配，载波完全被吸收，无反射；接收机接收到散射体反射的信号，通过包络检波区分出0和1，再通过解码还原出原始信息。相关研究进展可参看综述文献[6,7]。

BC最大的优势是不需要自己产生载波，这样就不需要频率综合器、锁相环、功率放大器等高功耗模块。从综述文献[7]中可知，大量的BC芯片功耗低至微瓦级别，非常适合超低功耗无线传输。但受限于直射干扰、调制解调方式、反射损耗等制约，其传输距离短、传输数据率偏低。

(4)SWIPT

从上述概念可知，RFEH技术的发展为远程射频能量传输奠定了基础，BC为超低功耗无线通信提供了一种新的技术方案，在此基础上将两者融合就形成了SWIPT系统，现已成为广大研究者和产

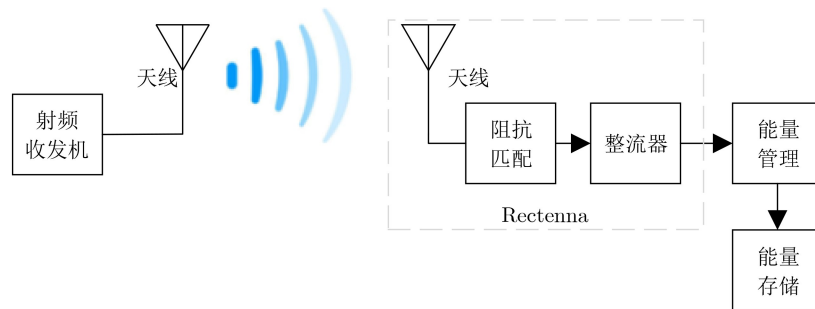


图1 射频能量收集系统框图

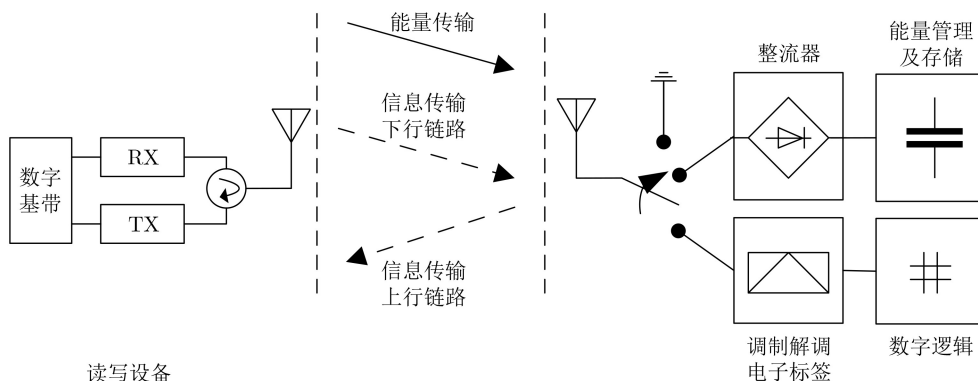


图2 RFID系统框图

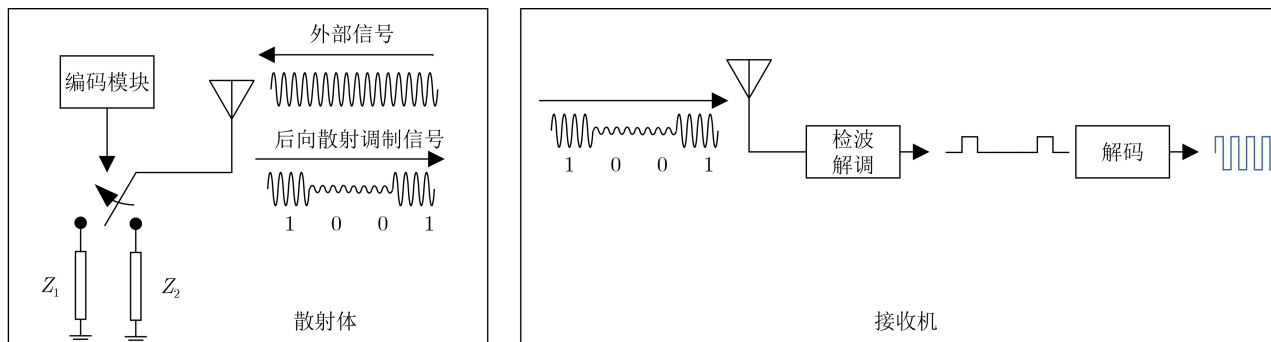


图3 后向散射系统框图

业界关注的重点,文献[8, 9]对相关研究进行了全面综述, RFID系统是一种典型的SWIPT系统。随着5G标准的不断演进及6G研究工作的开启, SWIPT成为无线接入网络的新热点, 同时也面临能量传输和信息传输折中问题, 如重新设计天线、编码、波形及处理自干扰等问题。

2.2 无源物联网概念

无源物联网内在驱动力是解除传感器对电池的依赖, 降低成本、尺寸及部署要求, 为海量、低价值物体接入网络提供一种新的可能, 本质上是一个产业概念。本文将无源物联网定义为: “针对泛在、海量、低成本连接需求, 充分利用环境能量收集技术从环境中获取能量, 利用BC等技术手段实现超低功耗无线通信, 无限延长电池寿命并最终摆脱对电池依赖的特种物联网。”

从本质上看各种环境能量收集技术都可用于无源物联网, 如太阳能、风能、机械能等, 只是射频能量收集具有空间时间上相对稳定、可远距离收集、与无线通信共用电路能降低成本减少体积、适用条件广等优势, 现有研究多聚焦射频能量收集, 本文定义无源物联网时强调采用环境能量收集技术, 在反向散射通信距离有限章节介绍了利用收集太阳能、机械能的方式增加后向散射通信距离的成果。所提概念还突出了无源物联网是一个产业概念, 最大的驱动力来源于能为海量的低价值物体提供超低成本、泛在的接入能力。最后, 所提概念强调收集环境能量来延长电池寿命, 为了提高系统的可用性, 很长时间内, 无源物联网可能还需要超级电容类电能存储器, 实现含电容等储能元件的一体化芯片设计是未来重要发展方向, 由于篇幅限制不展开讨论。

3 面临的挑战及研究进展

以RFID为代表的无源物联网技术, 为新一代无线通信技术提供了一种接入能力强、成本低、无需电池供电的无线接入方式, 但也面临着一系列技

术挑战, 其影响因素、影响程度各异^[10, 11]。从它的两大关键技术上看, RFEH存在功率密度低、能量转化效率低等难题^[12], BC存在通信距离有限问题, 此外, 两者之间还存在兼容难问题。

3.1 功率密度低

3.1.1 问题及原因分析

环境中的射频信号功率谱密度普遍较低, 文献[13]是在加拿大蒙特利尔市中心测量的环境中射频信号平均功率密度曲线, 整个频谱上最大功率密度城市最大仅为 -35.5 dBm, 郊外最大仅为 -47.68 dBm。国内情况类似, 文献[14]在广州佛山市顺德区多个地点测试了功率谱密度, 城市地区处于 $-38 \sim -30$ dBm, 郊外平均值为 -38.99 dBm。

主要原因分析如下: (1)发射功率受限。为减少多个基站信号之间的干扰及避免对人体的辐射伤害, 国际组织及各个国家严格限定各个频段的最大辐射功率, 以超高频RFID为例, 美国FCC规定EIRP(Effective Isotropic Radiated Power)为36 dBm, 欧洲国家普遍规定ERP(Effective Radiated Power)为33 dBm, 我国无线电管理委员会规定ERP为33 dBm。(2)对在自由空间传播的电磁波而言, 可接收功率随着传输距离呈负指数幂衰减。另外, 在电磁波传输过程中, 地表障碍物会对信号传播形成遮挡与多径效应, 将进一步降低功率传输质量。(3)现有环境中绝大部分电磁波设计为传递信号, 随着无线通信技术的进步, 接收机的灵敏度越来越低, 如5G小基站灵敏度通常为 -94 dBm、LoRa灵敏度则达 -149 dBm, 同等情况下极大减少了需要发射的功率, 也减少了环境中射频信号的功率密度。

3.1.2 优化研究进展

(1)波束成形

波束成形应用于无源物联网主要是在阵列天线工作时, 通过控制不同天线阵元上的馈电和天线阵元排列的空间结构, 调整信号的相位、振幅, 使得最终形成的无线信号功率集中于指定的方向上, 在其他方向上无线信号功率很小。它能极大提升无源

物联网各项性能,如减少多径效应提升传输效率、增大覆盖范围、减少各种干扰等,但不可避免的也有覆盖角度有限、复杂度高、功耗高、成本高、体积大等弊端^[15]。相关研究主要聚焦于波束成形系统的设计,对整个传输过程进行建模,依据应用场景选取不同的优化目标和限制条件,最后求解出最优波束成形方案。

文献[16]对广播网络下SWIPT系统MIMO波束成形进行了建模,按照接收机结构区分为独立、时分、功分、天线选择等不同场景,提出了码速率-能量评价指标,最终将波束成形设计问题转化为最优化求解问题。文献[17]研究了MISO波束成形设计问题,设定接收机有服务质量和能量收集限制,接收机为功分结构,设定了迫零、正则化迫零、最小均方误差及最小均方误差和迫零混合4类预编码方案。文献[15]更是对2018年以前应用波束成形技术增强SWIPT系统设计方面的工作进行了综述,按照不同的网络结构、不同的设计目标进行了分门别类整理。最近几年,也有大量这方面的研究工作,如文献[18]针对SWIPT系统,考虑了亚阈值状态,采用了非线性射频能量收集模型,对能量分配和波束成形设计进行了建模,并针对非凸优化问题提出了近似计算方法。文献[19]分析了数字波束成形、模拟波束成形并提出了数模混合波束成形方法,通过模型分析和仿真证明数模混合波束成形方法优于另外两类波束成形方法。

大量的研究者采用波束成形技术提高能量传输和信号传输的质量,但波束成形的设计需要建立复杂的模型,且求解过程一般是非凸优化问题,计算复杂度高。在实际求解过程中通常需要根据实际情况做一些条件假设,降低模型复杂度,由此,模型的适应性受到限制。另外,波束成形一般应用于MIMO等多天线系统,受到天线尺寸的限制,一般仅用于微波、毫米波等较高的频段。但采用MIMO进行波束成形能显著增强传输的可靠性、覆盖范围和吞吐量,也是当前5G的核心关键技术。随着计算资源的不断增加、无线通信向更高的频段发展,波束成形是解决功率密度低最有效的方法,更高效的波束成形机制设计、在保证精度情况下设计计算复杂度低的近似计算方法等方面成为未来的发展方向。

(2) 能量收集新天线设计

能量传输系统的天线设计追求高增益、宽带宽、小尺寸、广覆盖角度(圆极化)等,但是多指标之间存在制约关系,如高增益天线一般尺寸较大;天线阵列、定向天线能减少路径衰落,但一般尺寸较大且存在覆盖角度问题。在无源物联网领域,为

了收集更多的能量,一方面是增加单个频段的能量转化效率,另一方面则是增大天线的带宽,能收集尽量多频段上的能量。

文献[20]对能量收集用天线设计进行了综述,为了提高单天线增益研究者提出了很多新型天线,如螺旋天线、像素天线等,为了能收集多个频段的射频能量,大量的研究者提出了多频段天线,如双频段、三频段、四频段。为了减少多天线带来的尺寸问题并同时实现多频段能量收集,研究者采用共面波导馈电扩展天线宽频段^[21],也有采用缝隙结构扩展天线带宽^[22]。另外,也有研究者采用多种复合方式来增加带宽、减少尺寸,如文献[23]提出的共面波导宽频段微带缝隙天线,其带宽达2100 MHz。国内中山大学郑少勇团队^[24]做了大量相关研究,提出过6波束天线,峰值增益达8.3 dBi,水平面3 dB波束角度达62°,垂直面波束角度达56°,还提出过自动匹配三频段天线、频谱平坦化天线等。为克服天线增益有限的问题,还有研究者采用天线阵列和波束成形的办法^[25],但尺寸过大且辐射角度受限,又有广大研究者提出采用多样化极化来提高覆盖角度,如双重线性极化^[26]和双重圆极化^[27]。

在实际应用过程中需要根据不同的应用类型和场景要求,在高增益、宽带宽、小尺寸、广覆盖、制造复杂度等多个指标之间反复取舍,仔细选择天线类型或设计新型天线。但随着频率的增加,天线尺寸越来越小,能实现更复杂的新型天线,是未来的发展方向,如在毫米波及更高频段,研究者提出了透镜天线,能够显著增强方向性、有效性和空间分集^[28];又如采用不同的材料、不同的超结构设计多频和宽频天线。

(3) 智能反射表面增强

IRS技术也被广泛应用于无线信号的传输增强,智能反射表面对所有反射单元进行联合控制,达到调控反射波束的目的,这样可让反射波束和发射机到接收机之间的直射信号进行相干叠加,增强射频信号的强度或抑制非目标接收机的干扰。文献[29]最早提出了采用IRS来增强SWIPT系统性能,随后大量的学者对该问题进行了研究,如文献[30]在文献[29]的基础上,进一步拓展到多天线场景,并针对非凸优化问题提出了复杂度低的近似迭代计算算法;文献[31]提出了分布式IRS来解决SWIPT的信道衰落问题。文献[32]采用IRS来增强双站后向散射系统的散射功率,使发射机需要发射的功率最小化,结合波束成形设计,将整个通信过程进行了建模并提出了非凸优化的近似计算方法。我国电子科技大学梁应敞及杨刚团队针对他们提出的共生

无线电,也采用IRS对通信过程进行了增强^[33],对整个IRS辅助通信过程进行了建模,最后归结为非凸优化的求解问题。

IRS是5G/6G研究热点,这里只阐述了采用IRS增强能量传输部分内容,关于采用IRS增强后向散射通信见3.3.2节。但是该方案需要在环境中选择合适的位置部署IRS,增加了部署成本;现有的IRS单元普遍采用MEMS器件实现,耗电较大,需要电池或者外部电网供电,制约了IRS的大规模应用。但正如我国崔铁军院士所言,IRS能对电磁波的传播过程进行动态控制,提供了一种新的可能,现在还处于初期阶段,随着6G超大规模天线阵列及太赫兹频段的使用,将显著改善网络覆盖区域的信号强度、网络容量和用户速率,应用效益也将越来越明显。

3.2 能量转化效率低

3.2.1 问题及原因分析

有大量RFEH文献提到整流器最大能量转换效率超过80%,但深入对比分析后发现,该高转换效率都是理想情况下的仿真结果,且能量转化效率峰值通常出现在输入能量较大时,在射频功率密度很低时,设计高效的RFEH系统具有相当的难度。功率密度低时,天线输入功率及电压有限,二极管处于亚阈值状态,导致其能量转换效率也很低,如文献^[12]提到,在输入功率为10 mW时整流效率为80%,100 μ W时为40%,10 μ W时为20%,1 μ W时为2%。前文提到环境中存在的射频信号功率谱密度普遍较低,整个频谱上最高能量密度也仅为-35 dBm左右,在绝大部分情况下,整流器可利用天线输入功率通常很低,即整流器在绝大部分工作时间内整流效率都极低。

其主要原因有:(1)动态阻抗匹配难。天线和整流器在共轭条件下才能实现最大功率输出,但是天线内阻随部署环境变化、整流器及整流器后的负载随频率及输入功率变化、输入信号频率随环境变化,需要在天线和整流器之间设计合适的动态阻抗匹配算法适配所有可能的环境并覆盖所有可能频率,难度极高。(2)当环境中射频功率密度很低时,输入信号的幅值很小,整流器中二极管长期工作在亚阈值状态,内阻大,极大降低了整流器的能量转化效率。(3)RFEH电路通常和射频信号接收、信号处理等实现在同一芯片上,为降低成本一般采用CMOS工艺生产制造,采用CMOS工艺实现整流器时,CMOS器件有相对其他工艺更高的开启电压,开启速度也更慢、漏电更大,不利于能量收集^[4]。

3.2.2 优化研究进展

(1)接收机架构优化

无源物联网中接收机既收集射频能量又接收无线信号,可能的结构有功分、时分和天线分离方式^[9],文献^[16]已经证明在MIMO情况下,功分结构在射频到基带处理不引入噪声的情况下是最优的,天线分离结构性能最差,在一般条件下功分和时分架构互有优劣。文献^[34]进一步指出,没有一种结构在所有场景下性能都最优,在干扰信道情况下,时分结构好于其他结构,在干扰控制比较好的场景下,功分结构性能更优。文献^[35]在MIMO能量传输系统中证明了RF组合明显优于DC组合,因为RF组合更好地利用了二极管的非线性特性。

接收机架构对能量收集、信息收集及能量信息同时收集性能影响机理还没有完全研究清楚,文献^[34]更是提出“没有一种结构在所有场景下性能都最优”,需要根据不同的应用场景选择合适的接收机架构。当接收机采用MIMO技术时,每个接收机工作状态不一样,天线的选择和波束成形发射向量的求解相对复杂,给架构设计带来了极大挑战。根据系统设计对整个无线系统进行建模并确定最优化目标,针对系统应用场景对系统模型进行简化,最后选择最合理的接收机架构是未来的发展方向。

(2)波形设计

由于Rectenna能量转化模型呈非线性,MOS管工作在亚阈值与饱和状态时差异很大,通过设计波形确保MOS尽可能工作在饱和状态能有效增加整流效率。文献^[36]最早提出了最大功率波形(Power Optimized Waveforms, POW)概念,提出高斯POW和升余弦POW具有最好的能量转化效率;文献^[37]最早提出采用Multisine波型来提高能量传输系统的覆盖范围。文献^[38]克服已有方法缺乏细致模型、多路径衰落等问题,首先采用非线性Rectenna模型对能量收集进行建模,提出根据信道状态信息调整Multisine参数实现最优能量转化。随后,大量的研究针对拓展能量传输覆盖范围,提出了各种新的波形设计方法^[39,40],也有研究者对波形设计的实际效果进行了对比分析^[41],发现在多载波情况下OFDM是最优的,单载波情况下,方波是最优的。

广大研究者提出了多种波形,但都聚焦于提高输入信号峰均比,尽可能减少二极管工作于亚阈值区的时长。但该方法也存在系列问题,如最优波形参数随着信道状态信息不断变化,计算复杂;峰均比大的波形能提高绝大部分接收机的能量转化效率,但对于处于特定位置的接收机来说反而会降低

转化效率, 公平性难以保证; 很多新波形提高了整个系统的复杂度, 如OFDM信号提高了信号处理和功率放大器的复杂度, 需要再深入分析。上述文献都只分析了波形对提高整流器能量转化效率的帮助, 波形对天线结构、整流器和其他电路带来的影响并没有充分考虑, 这些都是未来的研究方向。

(3) 阻抗匹配优化

RFEH系统通常需要覆盖更多的频段, 但芯片阻抗随着频率和输入功率动态变化, 天线的阻抗也受部署环境影响, 实现芯片动态阻抗和天线动态阻抗动态匹配具有相当的难度。常用的阻抗匹配网络有L, Π 和T型匹配网络, 文献[42]通过实验证明相对常用的50 Ω 固定阻抗, 自适应阻抗匹配网络能提高容量增益44%, 文献[43]提出在芯片层面通过MOS管控制电容和电感, 实现阻抗自动匹配。近年来, 开始对天线和整流器进行一体化设计, 通过增加天线的阻抗来减少阻抗匹配电路, 文献[44]设计了off-center-fed偶极子天线, 该天线在相当宽的频带上具有高的输入阻抗, 且该阻抗能根据后端整流器的阻抗自动调整, 这样省略了阻抗匹配网络, 文献[45]采用偏角馈入来增大天线的感抗和阻抗的实部, 这样也通过增大阻抗实现了节约阻抗匹配网络的目的。

作者团队在实现RFID标签芯片的过程中, 采用可调谐电容阵列、基于搜索的递归调节算法实现了动态阻抗匹配, 通过分析得到动态阻抗匹配网络通常占用芯片面积大、电路复杂^[46]。设计高阻抗新型天线, 并和整流器一体化设计能去除阻抗匹配电路, 成为未来发展的方向。

(4) 整流器优化

根据实现方式不同, 整流器分为CMOS和非CMOS式, CMOS整流器具有制造成本低的优势, 但漏电流大、开启电压高, 非CMOS具有开启电压低、漏电流少的优势, 但体积大且不利于集成制造, 本文关注CMOS整流器。CMOS整流器最经典的是Dickson整流器, 应用效果最好的是桥式整流器。整流器主要优化方向是实现阈值电压的自动补偿、反向漏电流的自适应抑制, 文献[47]在整流管的栅漏极之间增加电阻来抑制漏电流, 在高频情况下, 灵敏度达-15.2 dBm, 能量转化率最高达65%。文献[48]在文献[47]基础上采用二极管替代电阻, 具有转换效率高、灵敏度高、不依赖负载阻抗、动态范围宽等优点, 该整流器的效率达到86%, 具有-19.2 dBm的灵敏度。文献[49]提出双模嵌套反馈电路提高低输入功率条件下的整流效率, 在输入-40 dBm以下时整流效率达10%。文献[50]采用自举电容实现阈

值补偿、采用一个CMOS反向器减少漏电流, 通过仿真和流片实测, 能量转化效率高于文献[47]和文献[48]。文献[51]针对经典结构动态补偿电压通常低于阈值电压而不能达到最佳补偿效果的问题, 采用桥式整流器进行10级级联, 在相邻的两级之间, 将后一级PMOS管的栅压来补偿前一级的栅压, 在100 M Ω 负载情况下, 灵敏度高达-29 dBm。

大量的研究者就整流器设计及优化问题进行了研究, 但很多研究片面强调整流效率, 特别是整流效率的最大值。然而, 在RFEH领域一般来说功率密度很低, 芯片绝大部分时间工作在亚阈值状态, 无法达到最大整流效率对应的输入功率, 所以更应提高在低输入情况下的整流效率。另外, 大部分研究采用一级整流电路实现整流, 补偿电压也局限于一级整流器内部各处的电压, 但为提高低输入情况下的整流效果, 更多倾向于多级级联, 多级级联之间将有更多的参考补偿电压, 这成为未来发展的方向。

3.3 BC距离有限

3.3.1 问题及原因分析

BC通常分为单站模式、双站模式和环境散射等3种类型, 已经有大量的文章对BC进行了建模分析^[5], 单站模式主要应用于RFID, 双站模式通信距离一般优于单站模式, 而环境散射不需要部署专门的发射机, 但存在发射信号不稳定问题。得益于华盛顿大学Shyamnath教授团队在BC方面所做的突出贡献, 已有大量的BC新机制, 如Wi-Fi散射、Interscatter、FM散射、DTV散射等, 但它们的传输距离都比较近, 在散射体靠近信号源时传输距离大约几十米, 在散射体距离信号源和接收机距离相同时, 传输距离大约数米。当然传输距离和数据传输速率相互制约, 当距离较远时则传输数据率低, 距离较近时则传输数据率可适当增加。

其通信距离有限的主要原因有: (1)因散射体通常能量有限, BC一般基于散射体输入端反射系数 Γ 的变化将有用信号调制到反射的载波上, 因此通常仅支持幅移键控调制(ASK)、相移键控调制(PSK)等相对简单的调制方式, 限制了芯片的灵敏度, 从而限制了通信距离。(2)信号能量随着传输距离呈负指数衰减, 地表障碍物会对信号传播形成遮挡且形成多径效应, 文献[52]更是证明在BC系统中, 信道呈现双向特性, 相比典型无线信道模型衰落更加严重; 另一方面, 反射调制过程本身存在很大损耗, 通常达-6 dB, 进一步限制了BC传输距离。(3)BC系统中接收机在接收散射信号的同时还会接收发射机直接发射的信号, 由于BC传输的数据量通常很少, 如RFID系统中反向链路基带频率

都少于640 kHz, 在频谱上看, 调制后的散射信号和发射机直接发射的信号在频谱上间隔很短, 无法用滤波器滤除, 且因为调制损耗的存在, 发射机直接发射的信号幅度通常是散射信号的数倍, 该直接传输干扰(Direct-Link Interference, DLI)问题给散射信号的解调带来极大的挑战。

3.3.2 优化研究进展

很多研究者提出了复杂的BC方法, 如电子科技大学杨刚教授提出基于OFDM载波的BC^[53], 北京交通大学王公仆教授团队^[54]对BC的信道估计及BC用于物联网进行了很多研究, 但文献^[53]的散射过程涉及扩频等复杂运算, 信道估计方法一般适用于有源型BC, 本文聚焦于无源物联网, 所以未包括上述研究成果。另外, 还有很多混合结构、协议设计方法来增大传输距离, 本文聚焦最基本的数据链路层增强技术。

(1)新的调制方式

在RFID领域, 经典的调制方式有ASK和PSK, 这两种方式能为标签一直提供能量且接收机实现简单, 但是对噪声和干扰很敏感。文献^[55]就提出采用OOK调制(On-off keying)和频移键控调制(FSK)克服发射机和接收机之间的频率偏差, 接收机性能提高3 dB, 在20 mW发射功率下通信距离达130 m。文献^[56]提出采用差分调制的方式来解决环境散射中接收信号的检测问题, 减少对信道信息的依赖并给出了对应的非相干解调方法。文献^[57]采用FSK调制方式增加双站散射的通信距离及覆盖范围, 该调制方式对信号的幅度和噪声具有较好的弹性, 但占用带宽是ASK的2倍。文献^[58]采用BPSK调制方式, 以Wi-Fi信号作为载波, 接收机芯片功耗低至几十 μW , 当接收机和发射机距离散射体距离相等时, 通信距离达21 m; 当散射体距离发射机1 m时, 通信距离大于90 m。文献^[59]通过实验证明BPSK方法及对应信号检测方法相对OOK及非相干检测方法提高5 dB以上的增益。广大研究者还提出了很多其他调制方式, 如QAM, MSK, GFSK, m -PSK等, 可参考BC相关综述, 在此不再赘述。

每一种调制方式都具有相应的优势也有相应的缺点, 如QAM能增加频谱效率并提高数据传输率, 但易受噪声影响, FSK调制对信号的幅度和噪声具有较好的弹性, 实现简单且能有效降低误码率^[60], 但占用带宽多, 适合于拓展双站模式的覆盖范围; 如作为FSK的一种, MSK能有效抑制各种干扰, 增大通信距离; PSK能实现较大的通信速率, 但复杂度高, 经常用于环境散射通信。综上, 在系统设计和实现时, 需要根据实际情况建立精细

的模型, 设定误码率、传输距离、最低功耗等不同优化指标, 寻找最适合的调制方式, 这也是未来的发展方向。

(2)频移型BC新机制

DLI是因为直接传输和散射信号时间相近、频谱重叠, 广大研究者提出了许多新的BC机制, 只有频移型的通信距离能达几百米甚至上千米, 其核心思想是精确控制散射体进行频谱搬移, 接收机在频谱上能将两个信号区分开来。文献^[61]最早提出了LOREA接收机, 该接收机通过频率综合器等将散射信号迁移到临近信道上, 在接收机上通过滤波器滤除干扰信号, 发射功率28 dBm, 传输距离达3.4 km, 但都要求散射体距离发射机1 m。华盛顿大学Shyamnath教授团队在2016年提出了Inter-Technology BC^[62], 通过单边带BC调制的方式实现几十MHz的频移, 利用Bluetooth信号进行散射, 在散射过程中进行频移并调制成Wi-Fi兼容的信号。随后该团队充分借助chirp调制方式灵敏度高特点, 在不改变商用LoRa信号特性的情况下, 采用频率综合器产生偏移频率, 并对入射信号进行频率调制, 极大地提高了传输距离, 散射体距离发射机5 m, 最大达2.8 km, 数据率达37.5 kbit/s, 当散射体距离发射机和接收机距离相等时, 传输距离为337.5 m^[63]。在此基础上, P²LoRa^[64]采用并行化LoRa思想, 接收机接收来自多个P²LoRa散射体散射的信号, 进行并行化解码提高信噪比, 传输距离达2.2 km。

频移型BC在通信距离上有巨大的优势, 但会占用更多的频率, 甚至经常超出规定的频带。此外, 为了减低功耗通常采用方波信号代替正弦波信号, 这样会带来多次谐波问题, 如文献^[63]针对多次谐波问题提出了谐波消除方法。虽然有上述问题, 但频移型BC技术无疑是无源物联网中BC技术未来的发展方向。

(3)MIMO增强

MIMO技术通过空间分集和极化分集能有效减少信道衰落、降低误码率提高传输可靠性、抑制直接传输干扰, 被研究者大量应用于RFID及散射通信。前面已经阐述了发射端通过波束成形增强能量传输, 这里聚焦通过MIMO来增大BC通信距离。

文献^[65]最早提出了多天线BC系统, 主要是针对散射体无法采用复杂的解调方法来解调信号, 采用模拟电路的方式直接解调能有效提高灵敏度, 在散射体之间通信时, 接收机采用线性多天线接收散射信号, 提出了 μmo 和 μcode 机制, μmo 主要通过计算信号强度的比值来区分0和1, μcode 主要通过

直接监测正弦函数类波形来解调, 而不需要精确的同步, 该方法能将传输距离增大40倍。文献[66]最早在RFID系统中采用多天线标签, 相对单天线, 在同等误码率条件下能减少发射功率10 dB, 在同等发射功率下传输距离增加78%。电子科技大学梁应敞及杨刚团队在认知BC系统中, 在读写器上采用多天线抑制直接传输干扰, 提出了对应的散射符号检测方法, 仿真实验证明能极大增大通信距离[67]。文献[68,69]对 M 个发射天线、 L 个散射天线、 N 个接收天线的RFID信道进行了建模, 发现采用时空分组编码时查询分集(时间分集)可有效提高传输性能, 提出了酉矩阵查询方法, 该方法能带来5~10 dB的增益。还有文献采用和MIMO类似的方法, 将散射体的天线换成反向天线阵, 相对普通散射体需要40 dB衰落余量, 所提散射体仅需13 dB衰落余量[70]。

MIMO是典型的多天线技术, 如上述波束成形所述, 受到天线尺寸的限制, 一般仅用于微波、毫米波等较高频段。MIMO技术增加了整个系统的复杂性, 信道模型也不同于以往通信技术, 提高了整个通信系统的成本, 也带来了巨大的计算量。但随着计算资源的不断增加、无线通信向更高的频段发展, 采用MIMO技术提高BC系统的覆盖范围依然是未来的发展方向。

(4)新的信道编码机制

信道编码是为了提高接收机正确解调数据的概率, 在RFID领域, Miller, FM0因为简单、抑制噪声、增强信号可靠性等特点, 被ISO 18000-6C和GB/T 29768-2013等空中接口协议采纳为编码方法, 但是这些编码存在诸多问题, 如FM0传输“0”的能耗显著高于传输“1”。本文聚焦增加传输距离的信道编码方法, 增加吞吐量的信道编码方法可参考综述文献[71]。

文献[72]指出采用信道编码能有效增加传输距离和双站散射通信的可靠性, 但码字一般应足够简单, 散射体和接收机信号处理功耗应很低[73], 因为里德-马勒编码简单且纠错能力强, 所以采用里德-马勒编码对BC信号进行编码, 随后又发现前向链路和散射链路之间存在信道交织, 为解决信道交织问题, 又提出了去交织和分块编码联合技术, 确保突发差错只会影响特定的码字, 实验表明在发射功率13 dBm时传输距离达134 m, 数据率为1 kbit/s。文献[57]在文献[55, 72]基础上, 采用Interleaved编码来减少编码计算的复杂度, 提出相干检测方法来评估信道中未知参数, 实验表明在发射功率13 dBm时传输距离达150 m, 数据率为1 kbit/s。文献[74]

提出当占空比接近50%时, 散射体散射的功率会增加, 为实现该目标在射频前端加入模拟开关和LC网络, 实验表明在发射功率13 dBm时传输距离达250 m。浙江大学朱艺华团队做了大量工作, 针对传输不同符号能耗存在差异问题, 提出EEDDS编码方法[75], 该方法能有效减少散射体的编码功耗, 但发射机和接收机需存储大的译码本, 且会导致一定时间的延迟; 随后针对文献[75]的不足, 提出了EFPC编码来减少译码本的尺寸, 只有当数据块的能量消耗比特数大于或等于设定的阈值时才进行编码; 最近又提出了MMBC多前缀译码本, 在不牺牲吞吐率的情况下有效降低能耗。另外文献[76]提出了Sozu极化编码方法, 能根据信道质量自适应调节编码速率, 实验表明最大传输距离在PLoRa的基础上扩展1.8倍。

由于大量引入MIMO技术, 给信号的编码、检测、信道估计等带来了新的挑战, 成为近年来的研究热点。在BC系统中发射端无法获取信道状态信息, 在这样的MIMO通信系统中通常采用时空编码(STBC)来提高分集增益, 文献[77]最早对RFID散射通信信道进行了建模, 在此基础上提出了正交时空编码(OSTBC), 提高系统分集增益, 上章节提到的文献[68,69]也是采用STBC编码。文献[73]提出了 2×2 STBC编码, 该编码方法虽然在常规信道上比STBC差, 但在BC条件下性能相似, 且能极大降低散射体的设计复杂度。文献[78]在文献[68,69]基础上将MIMO技术应用到单站BC系统, 提出在 $M \times L$ 信道条件下, 采用块酉矩阵查新和OSTBC能获得最大的分集阶数 $ML/2$ 。文献[79]在MIMOBC系统中采用广义空间调制(GSM)来降低误码率并提高频谱效率, 随后作者将广义空间调制拓展到时间维度, 在多天线阵列中选取两根天线采用STBC, 性能得到进一步优化。文献[80]提出BC系统通常不是100%处于工作状态, 即存在占空比问题, 提出了 2×2 OSTBC编码, 相对已有的编码方法, 能有效提高增益。

信道编码能有效降低从噪声信道中恢复正确信号的难度, 但是编码通常采用数字基带完成, 数字基带功耗相对较高, 取得功耗和编码带来效益之间的平衡至关重要, 成为单天线编码研究的新趋势。当采用MIMO技术后, 有效利用天线的时空相关性提高增益、拟制噪声成为未来发展趋势, 文献[78]更是获得了最大分集阶数, 但整体计算量大、实现复杂、功耗增大。

(5)新的信号检测方法

对散射信号的检测是BC系统的关键, 也是难

点,如在环境BC系统中,发射机直接传输的信号会对散射体散射信号造成极大的干扰,对信道进行估计也具有很大难度,优化信号检测、信道估计能有效提高系统的吞吐率和传输距离。由于信道估计增加了散射体设计难度,这里主要关注无需信道状态信息的信号检测方法。文献[81]通过对比不同时间段信号的能量来区分0和1,这也是最经典的非相干信号检测算法。为了克服对信道状态信息的依赖,文献[82]设计了半相干检测方法,通过少量的导频信号来减少信号的冗余和解码的计算复杂度。为了减少信道估计过程,文献[83]以比特误码率为优化目标,对非相干检测基本原理进行了深入研究,提出了联合能量检测方法及阈值计算方法。文献[84]基于接收信号的联合概率密度函数提出了两种信号检测方法,一种是直接用联合概率密度函数做假设检验,另一种是利用接收的信号对信道进行估计,在此基础上进行假设检验,仿真实验证明第1种方法还优于第2种方法。还有大量的研究采用机器学习的方法检测信号,如文献[85]针对普通机器学习方法需要大量导频信号的问题,提出训练好的深度神经网络几乎在所有信道条件下表现良好,为克服信道动态变化问题,采用权值动态调整的深度神经网络来检测信号。

在通信系统中引入MIMO技术,将增加信号处理的难度,如在BC系统中,散射体一般能量有限,要求传输的符号尽可能少,给信号检测和信道估计带来了很大的挑战。北京交通大学王公仆团队在文献[86]中提出,在读写器采用多天线技术场景下采用比例检波器来探测每个天线上信号强度的比值,然后推导出了近似最优阈值计算方法,作者还发现天线数量从2增加到4时,增加天线能获得比较大的增益,但当天线数据超过4时,增加天线仅能带来很少的增益。文献[87]针对发射源信息不可知的情况,提出了一种基于广义似然比检测的盲信息检测方法,该方法不利用信道状态、信号强度和噪声信息,分析后发现,在选用两根天线进行散射通信的情况下,检测器性能达到最优。电子科技大学梁应敞团队在文献[67]中主要针对直接传输导致的干扰信号消除问题,在认知环境散射系统中,利用多天线的空间分集提出了两种消除地板效应的能量检测器,第1种方法采用接收波束成形处理直接传输导致的干扰问题,利用检测接收信号的能量区别0和1,第2种方法采用似然比检测,该方法能达到理论最优值。随后在文献[88]中提出了3种不需要信道状态信息的信号检测方法,即卡方测验、F检测、拔雷特氏检测,后两种是盲信息检测方法。我

国西安交通大学团队在文献[89]中提出了双阈值检测方法,采用极大似然方法综合多个能量检测器的结果来提高检测精度并减少读写器端的计算复杂度。

因为不需要信号状态信息且实现简单,非相干解调依然是BC主流解调方法,但是,一方面它仅适用于ASK和FSK调制,不能用于PSK调制,另一方面,非相干解调在高信噪比的情况下精度较好,当信噪比较低时则精度变差,虽然有大量的研究不断提高低信噪比情况下的解调精度,但相对相干解调依然存在不少差距。未来主要发展方向有两个,一个是研究既有非相干解调的简单优势又具有相干解调精度的综合解调方法、半相干解调方法,另一个是采用机器学习中的分类、自适应阈值预测等智能算法提高检测精度。

(6)智能反射表面增强

前文总结了IRS增强能量信号同时传输,这里主要关注利用IRS增强BC。文献[90]利用IRS增强OFDM调制的BC,相对未采用IRS增强时获得较低的误码率和较好的网络吞吐率。文献[91]对IRS增强的单站散射系统进行了全面分析,证明在中度信噪比情况下,大规模IRS能显著降低符号误码率。文献[92]针对IRS辅助BC系统信道状态信息不可或缺但获取困难的问题,基于IRS反射矩阵来估计信道状态信息,通过仿真进行了验证。文献[93]提出了一个实际的IRS增强BC系统。文献[94]在发射机到接收机、发射机到散射体、双链路3种情况下分别采用IRS增强,推导了平均误码率,仿真实验证明当发射机到接收机链路上IRS单元增加时环境散射系统性能下降,当发射机到散射体链路上IRS单元增加时环境散射系统性能提升,双链路增强时,效果大致抵消略有增强。文献[32]采用IRS增强双站BC系统,以最小发射功率为优化目标,综合计算波束成形传输向量和IRS相位变换矩阵,确保BC性能。我国电子科技大学梁应敞团队[95]对IRS增强BC进行了综述,重点关注IRS增强非调制BC和IRS增强环境散射、IRS增强共生无线电3类情况,并阐述了其应用、技术挑战和未来发展方向。

BC和IRS都是5G/6G重要的技术,IRS能改变无线电传输信道,实现对无线电传输过程的调控,通过合理的设计能显著增强BC,但IRS的加入,必然对直接传输干扰造成影响,增加系统设计复杂度[94]。作者认为针对BC设计针对性IRS,增强微弱信号的反射是未来的发展方向。

(7)半有源方式

文献[96]利用光伏高效的能量转化效率,通过在标签表面添加一层光伏薄膜,增强RFID标签吸

收能量的效率, 从而提高感知距离。文献[97]为RFID标签添加一个振动能量收集器来对RFID标签进行供电, 增大标签的工作功率, 从而使得标签反射信号更强, 感知范围更大, 实验结果表明该标签可以将感知距离拓宽到15 m。除了为标签添加额外电源外, 文献[98]通过利用量子隧道效应, 显著增加了反向散射无线电链路的覆盖范围, 反向散射信号增益高达35 dB, 灵敏度低至-81 dBm。

半有源解决了后向散射通信中散射体能耗问题, 可以实现信道估计、调制等复杂操作, 极大提高后向散射通信性能, 但半有源也限制了应用范围, 有有源通信的一系列劣势, 成本也更高。但半有源方式更容易实现, 具有现实可行性, 特别是利用新材料、新机制实现后向散射^[98], 往往可能带来革命性提升, 值得大力探索。

3.4 能量信息同时传输兼顾难

3.4.1 问题及原因分析

为控制成本、提高频谱利用效率, 产业界和学术界不断尝试将能量传输和信息传输整合到一起, 即能量信息同时传输系统, 但两者存在较大差异, 如能量传输系统尽可能采用大信号, 但信息传输系统希望误码率足够低, 大信号往往会带来大的干扰, 恶化信息传输质量, 这样给系统整合带来了诸多挑战。

其主要原因有: (1)设计和优化目标不同, 能量传输系统设计目标是传输尽可能多的能量, 即提高整个链路上的能量转换效率, 信息传输系统设计目标是传输尽可能多的信息, 设计、优化目标不一致, 导致最优信号、信道编码、MIMO设计、阻抗匹配设计等都不一致, 很难同时兼顾。(2)信号处理方式不同, 能量传输系统需将天线收集的交流信号转换为直流信号, 为其他部件供电, 但是信息传输系统对交流信号进行解调, 获得数字基带信号, 再进行数字信号处理, 两者无法同时进行, 必须从时间、能量等维度分开处理。(3)干扰和噪声的处理方式也不同, 在信息传输系统中, 抑制干扰信号和噪声是提高信息传输速率的重要手段, 所以广泛使用滤波器、自干扰抑制部件等, 但是对于能量传输系统来说, 干扰信号和噪声都带有能量, 反而是越多越好。(4)接收机灵敏度存在很大差异, 如前文所述, 能量传输系统的灵敏度一般高于-40 dBm, 信息传输系统灵敏度一般低于-100 dBm, 即使是用于传感器或物联网终端, 检测能力有限, 其灵敏度也能低至-90 dBm, 两者之间存在近50 dB的差异^[99]。

3.4.2 优化研究进展

(1)能量信息同时接收架构优化

文献[100]最早提出了实现能量信息同时接收的

理想接收机, 但在工程实践中很难实现, 随后提出了时分和功分架构, 文献[34]对时分和功分架构各自适用的场景进行了分析。文献[101]在时分和功分的基础上提出了动态功分架构(功率分配的比例动态调整), 设计了直接分离、综合接收机架构, 在分离架构中接收信号直接分离为信息和能量支路, 在综合架构中信息处理支路和能量接收支路联合部分模块共用, 提出了速率-能量综合评价指标, 通过仿真和实验证明了当电路能耗较低时分离架构优于综合架构, 当电路能耗较高时综合架构优于分离架构。文献[102]基于整流器的非线性模型, 将速率-能量作为优化目标, 对动态功分、开关功分一型(通过开关控制功率支路的开启和关闭)、静态功分、时分4种架构进行了分析, 然后提出了广义开关功分架构。文献[103]提出了开关功分二型架构, 首先在帧结构上区分为能量信息同时传输和仅信息传输两部分, 在能量信息同时传输时, 采用功分结构将射频信号分配到能量支路和信息支路, 它是广义开关功分架构的一个特例, 发现采用整流器非线性模型与整流器线性模型的分析结果有很大差异, 采用整流器非线性模型时, 无论电路能耗多和少, 开关功分二型和广义开关架构具有最好的性能; 当输入信号功率很小时, 时分架构基本上是最优的; 当输入信号功率较大时, 静态功分和功分一型架构最优。文献[104]提出了频分架构, 因为高峰均比信号能提高能量转换效率, 但发射机需要高功率放大器, 这样会带来失真问题, 作者设计了频分接收架构杜绝高功率放大器非线性失真问题, 能量通过单频载波传输, 数据通过该中心频率附件的频带传输。文献[8]采用和文献[104]相同的信号传输方法, 以减少接收机复杂度和信息解调功耗为优化目标, 设计了一种新的综合架构, 对接收信号进行整流、过滤变成数字基带后再进行功率分配, 这样减少了接收过程所需的高能耗主动器件。

综合架构具有很多好处, 如接收信号全部进入整流电路, 提高了能量转化效率, 解调过程不需要高能耗主动器件, 但到信息解调时已经丢失很多相位、频谱信息, 导致信息传输过程的速率、吞吐率等指标受到一定影响, 仅适合于低功耗、数据传输量少的应用场景^[105]。文献[106]提出自适应模式切换架构, 采用深度学习方法来确定采用哪种架构及架构阈值, 成为未来发展方向。

(2)能量信息兼容信道编码

上述章节对采用信道编码方法提高BC距离的相关成果进行了综述, 特别指出信道编码应足够简单, 在能量信息同时传输系统中同样适用。从原理

上看,信道编码需增加冗余位,这样才能纠正信道传输过程带来的差错,从能量传输角度看,这些冗余位同样承载了能量,从信息传输角度看,降低了误码率,但从接收端看,增加了接收端信号处理的复杂度。另外,从编码基本理论可知,每个符号出现的概率存在差异,按照出现的概率进行编码能提高解码效率,但增加了解码复杂度。

文献[107]把子块常重复码用于能量信息同时传输信道编码,每个子块都具有相同的固定组成结构,包括能量比特位和信息比特位,通过仔细调整参数,能实现信息传输速率和能量传输总量之间的折中。在文献[107]的基础上,文献[108]指出子块常重复码中子块的长度对能量供应影响较大,给出了避免接收机电力供应中断的必要且充分条件—子块长度范围。在文献[107,108]的基础上,文献[109]提出了广义子块常重复码,确保在每个子块传输过程中都传输了足够的能量,特别是为每个滑动窗口设定了每个符号最低平均能量传输值。文献[110]提出了多频点振幅调制方法(MAM)和对应的接收机架构,MAM码元是一个2维信号,包括振幅和副载波数量,在接收端通过整流器电流强度和能量峰均比进行解码,仿真结果证明所提方法能提高符号误码率并实现大的能量传输。因为一元编码方法解码实现容易且码字结构具有足够的弹性,文献[111]在SWIPT系统中采用一元编码对信息和能量进行联合编码,通过对所有编码码字输入的分布情况进行优化,提高能量传输系统性能的同时满足信息传输系统的性能要求。基于文献[111],文献[112]指出信道编码和调制方式对SWIPT的性能都有重要影响,不能仅通过信道编码来判定SWIPT的性能,结合M-QAM调制方法提出了一种新的一元编码方法,在信道编码和调制方式两个维度对信息和能量比值进行调优。

每种信号编码方法都具有自己的优势也有不足,能量信号同时传输系统传输模型复杂,优化指标多样,针对应用场景,对能量信号同时传输系统进行全面建模,按照应用的最优化指标要求,综合考虑调制方式、架构等因素,设计最合理的信号编码成为未来研究的重点。

4 结束语

本文围绕无源物联网,分析了无源物联网的需求,梳理了紧密相关的概念,给出无源物联网的概念,随后详细接收了RFEH和BC两个关键技术的基本原理,重点围绕挑战及研究进展,分析了射频能量密度低的原因,从波束成形、RFEH天线设计、透镜、智能反射表面等增强技术研究进展进行

了整理;分析了能量转化效率低的原因,从接收机架构优化、波形设计、阻抗匹配优化、整流器优化等方面整理了研究进展;分析了BC距离有限的原因,从新的BC机制研究、MIMO增强、新的信道编码机制研究、新的信号检测方法等方面整理了优化研究进展,分析了能量信息同时传输兼顾难的原因,对能量信息同时接收架构优化、能量信息兼容信号编码等研究进展进行了综述。

参考文献

- [1] 中国移动, 中国电信, 中国联通, 等. 5G-Advanced网络技术演进白皮书2.0(2022)——面向万物智联新时代[R]. 2022. China Mobile, China Telecom, China Unicom, et al. 5G - advanced technology evolution from a network perspective 2.0(2022)[R]. 2022.
- [2] GU Xiaoqiang, HEMOUR S, and WU Ke. Far-field wireless power harvesting: Nonlinear modeling, rectenna design, and emerging applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(1): 56–73. doi: 10.1109/JPROC.2021.3127930.
- [3] LU Xiao, WANG Ping, NIYATO D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2): 757–789. doi: 10.1109/COMST.2014.2368999.
- [4] RAMALINGAM L, MARIAPPAN S, PARAMESWARAN P, et al. The advancement of radio frequency energy harvesters (RFEHs) as a revolutionary approach for solving energy crisis in wireless communication devices: A review[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 106107–106139. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3098895.
- [5] VAN HUYNH N, HOANG D T, LU Xiao, et al. Ambient backscatter communications: A contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2889–2922. doi: 10.1109/COMST.2018.2841964.
- [6] MURATKAR T S, BHURANE A, and KOTHARI A. Battery-less internet of things-A survey[J]. *Computer Networks*, 2020, 180: 107385. doi: 10.1016/j.comnet.2020.107385.
- [7] WU Weiqi, WANG Xingfu, HAWBANI A, et al. A survey on ambient backscatter communications: Principles, systems, applications, and challenges[J]. *Computer Networks*, 2022, 216: 109235. doi: 10.1016/J.COMNET.2022.109235.
- [8] CHOI K W, HWANG S I, AZIZ A A, et al. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) for internet of things: Novel receiver design and experimental validation[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(4): 2996–3012. doi: 10.1109/JIOT.2020.2964302.
- [9] PERERA T D P, JAYAKODY D N K, SHARMA S K,

- et al.* Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): Recent advances and future challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(1): 264–302. doi: [10.1109/COMST.2017.2783901](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2783901).
- [10] CLERCKX B, HUANG Kaibin, VARSHNEY L R, *et al.* Wireless power transfer for future networks: Signal processing, machine learning, computing, and sensing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021, 15(5): 1060–1094. doi: [10.1109/JSTSP.2021.3098478](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3098478).
- [11] KIM J, CLERCKX B, and MITCHESON P D. Signal and system design for wireless power transfer: Prototype, experiment and validation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(11): 7453–7469. doi: [10.1109/TWC.2020.3011606](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3011606).
- [12] CLERCKX B, ZHANG Rui, SCHOBER R, *et al.* Fundamentals of wireless information and power transfer: From RF energy harvester models to signal and system designs[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(1): 4–33. doi: [10.1109/JSAC.2018.2872615](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2872615).
- [13] GU Xiaoqiang, 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. doi: [10.1109/JIOT.2021.3065683](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3065683).
- [14] ANDRENKO A S, LIN Xianyang, and ZENG Miaowang. Outdoor RF spectral survey: A roadmap for ambient RF energy harvesting[C]. 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, China, 2015: 1–4. doi: [10.1109/TENCON.2015.7373140](https://doi.org/10.1109/TENCON.2015.7373140).
- [15] ALSABA Y, RAHIM S K A, and LEOW C Y. Beamforming in wireless energy harvesting communications systems: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 1329–1360. doi: [10.1109/COMST.2018.2797886](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2797886).
- [16] ZHANG Rui and HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(5): 1989–2001. doi: [10.1109/TWC.2013.031813.120224](https://doi.org/10.1109/TWC.2013.031813.120224).
- [17] TIMOTHEOU S, KRIKIDIS I, ZHENG Gan, *et al.* Beamforming for MISO interference channels with QoS and RF energy transfer[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(5): 2646–2658. doi: [10.1109/TWC.2014.032514.131199](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.032514.131199).
- [18] CANTOS L and KIM Y H. Max-min fair energy beamforming for wireless powered communication with non-linear energy harvesting[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 69516–69523. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2918649](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2918649).
- [19] LI Ang and MASOUIROS C. Energy-efficient SWIPT: From fully digital to hybrid analog–digital beamforming[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4): 3390–3405. doi: [10.1109/TVT.2017.2782775](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2782775).
- [20] WAGIH M, WEDDELL A S, and BEEBY S. Rectennas for radio-frequency energy harvesting and wireless power transfer: A review of antenna design [Antenna Applications Corner][J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2020, 62(5): 95–107. doi: [10.1109/MAP.2020.3012872](https://doi.org/10.1109/MAP.2020.3012872).
- [21] SHI Yanyan, FAN Yue, LI Yan, *et al.* An efficient broadband slotted rectenna for wireless power transfer at LTE band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(2): 814–822. doi: [10.1109/TAP.2018.2882632](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2882632).
- [22] PALAZZI V, DEL PRETE M, and FANTUZZI M. Scavenging for energy: A rectenna design for wireless energy harvesting in UHF mobile telephony bands[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2017, 18(1): 91–99. doi: [10.1109/MMM.2016.2616189](https://doi.org/10.1109/MMM.2016.2616189).
- [23] HAROUNI Z, CIRIO L, OSMAN L, *et al.* A dual circularly polarized 2.45-GHz rectenna for wireless power transmission[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10: 306–309. doi: [10.1109/lawp.2011.2141973](https://doi.org/10.1109/lawp.2011.2141973).
- [24] DENG Wenhui, WANG Shuihong, YANG Boru, *et al.* A multibeam ambient electromagnetic energy harvester with full azimuthal coverage[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(11): 8925–8934. doi: [10.1109/JIOT.2021.3119417](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3119417).
- [25] VANDELLE E, BUI D H N, VUONG T P, *et al.* Harvesting ambient RF energy efficiently with optimal angular coverage[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(3): 1862–1873. doi: [10.1109/TAP.2018.2888957](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2888957).
- [26] SUN Hucheng and WEN Geyi. A new rectenna with all-polarization-receiving capability for wireless power transmission[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 814–817. doi: [10.1109/LAWP.2015.2476345](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2476345).
- [27] SONG Chaoyun, HUANG Yi, CARTER P, *et al.* A novel six-band dual CP rectenna using improved impedance matching technique for ambient RF energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(7): 3160–3171. doi: [10.1109/TAP.2016.2565697](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2565697).
- [28] QUEVEDO-TERUEL O, LIAO Qingbi, CHEN Qiao, *et al.* Geodesic lens antennas for 5G and beyond[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2022, 60(1): 40–45. doi: [10.1109/MCOM.001.2100545](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2100545).
- [29] WU Qingqing and ZHANG Rui. Weighted sum power

- maximization for intelligent reflecting surface aided SWIPT[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(5): 586–590. doi: [10.1109/LWC.2019.2961656](https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2961656).
- [30] PAN Cuhua, REN Hong, WANG Kezhi, *et al.* Intelligent reflecting surface aided MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1719–1734. doi: [10.1109/JSAC.2020.3000802](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000802).
- [31] GALAPPATHTHIGE D L and BADUGE G A. Exploiting distributed IRSs for enabling SWIPT[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(4): 673–677. doi: [10.1109/LWC.2021.3134630](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3134630).
- [32] JIA Xiaolun, ZHOU Xiangyun, NIYATO D, *et al.* Intelligent reflecting surface-assisted bistatic backscatter networks: Joint beamforming and reflection design[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2022, 6(2): 799–814. doi: [10.1109/TGCN.2021.3127190](https://doi.org/10.1109/TGCN.2021.3127190).
- [33] XU Xinyue, LIANG Yingchang, YANG Gang, *et al.* Reconfigurable intelligent surface empowered symbiotic radio over broadcasting signals[C]. Proceedings of 2020 IEEE Global Communications Conference, Taipei, China, 2020: 1–6. doi: [10.1109/GLOBECOM42002.2020.9348236](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM42002.2020.9348236).
- [34] SHEN Chao, LI Weichang, and CHANG T H. Wireless information and energy transfer in multi-antenna interference channel[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(23): 6249–6264. doi: [10.1109/TSP.2014.2355781](https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2355781).
- [35] SHEN Shanpu and CLERCKX B. Beamforming optimization for MIMO wireless power transfer with nonlinear energy harvesting: RF combining versus DC combining[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(1): 199–213. doi: [10.1109/TWC.2020.3024064](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3024064).
- [36] TROTTER M S, GRIFFIN J D, and DURGIN G D. Power-optimized waveforms for improving the range and reliability of RFID systems[C]. Proceedings of 2009 IEEE International Conference on RFID, Orlando, USA, 2009: 80–87. doi: [10.1109/RFID.2009.4911196](https://doi.org/10.1109/RFID.2009.4911196).
- [37] BOAVENTURA A S and CARVALHO N B. Maximizing DC power in energy harvesting circuits using multisine excitation[C]. Proceedings of 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Baltimore, USA, 2011: 1–4. doi: [10.1109/MWSYM.2011.5972612](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2011.5972612).
- [38] CLERCKX B and BAYGUZINA E. Waveform design for wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(23): 6313–6328. doi: [10.1109/TSP.2016.2601284](https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2601284).
- [39] HUANG Yang and CLERCKX B. Waveform design for wireless power transfer with limited feedback[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(1): 415–429. doi: [10.1109/TWC.2017.2767578](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2767578).
- [40] ABEYWICKRAMA S, ZHANG Rui, and YUEN C. Refined nonlinear rectenna modeling and optimal waveform design for multi-user multi-antenna wireless power transfer[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021, 15(5): 1198–1210. doi: [10.1109/JSTSP.2021.3086988](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3086988).
- [41] GAUTAM S, KUMAR S, CHATZINOTAS S, *et al.* Experimental evaluation of RF waveform designs for wireless power transfer using software defined radio[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 132609–132622. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3115048](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115048).
- [42] VASILEV I, PLICANIC V, and LAU B K. Impact of antenna design on MIMO performance for compact terminals with adaptive impedance matching[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(4): 1454–1465. doi: [10.1109/TAP.2016.2521885](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2521885).
- [43] MOHAN A and MONDAL S. An impedance matching strategy for micro-scale RF energy harvesting systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, 68(4): 1458–1462. doi: [10.1109/TCSII.2020.3036850](https://doi.org/10.1109/TCSII.2020.3036850).
- [44] SONG Chaoyun, HUANG Yi, ZHOU Jiafeng, *et al.* Matching network elimination in broadband rectennas for high-efficiency wireless power transfer and energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(5): 3950–3961. doi: [10.1109/TIE.2016.2645505](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2645505).
- [45] SONG Chaoyun, HUANG Yi, CARTER P, *et al.* Novel compact and broadband frequency-selectable rectennas for a wide input-power and load impedance range[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(7): 3306–3316. doi: [10.1109/TAP.2018.2826568](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2826568).
- [46] LI Songting, LI Cong, CAI Lei, *et al.* A -20 dBm passive UHF RFID Tag IC with MTP NVM in 0.13- μm standard CMOS process[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, 67(12): 4566–4579. doi: [10.1109/TCSI.2020.3007952](https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.3007952).
- [47] OUDA M H, KHALIL W, and SALAMA K N. Self-biased differential rectifier with enhanced dynamic range for wireless powering[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2017, 64(5): 515–519. doi: [10.1109/TCSII.2016.2591263](https://doi.org/10.1109/TCSII.2016.2591263).
- [48] ALMANSOURI A S, OUDA M H, and SALAMA K N. A CMOS RF-to-DC power converter with 86% efficiency and -19.2-dBm sensitivity[J]. *IEEE Transactions on*

- Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(5): 2409–2415. doi: [10.1109/TMTT.2017.2785251](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2785251).
- [49] ALMANSOURI A S, KOSEL J, and SALAMA K N. A dual-mode nested rectifier for ambient wireless powering in CMOS technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(5): 1754–1762. doi: [10.1109/TMTT.2020.2970913](https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.2970913).
- [50] KHAN S R and CHOI G S. High-efficiency CMOS rectifier with minimized leakage and threshold cancellation features for low power bio-implants[J]. *Microelectronics Journal*, 2017, 66: 67–75. doi: [10.1016/j.mejo.2017.06.002](https://doi.org/10.1016/j.mejo.2017.06.002).
- [51] NOGHABAEI S M, RADIN R L, SAVARIA Y, *et al.* A high-sensitivity wide input-power-range ultra-low-power RF energy harvester for IoT applications[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2022, 69(1): 440–451. doi: [10.1109/TCSI.2021.3099011](https://doi.org/10.1109/TCSI.2021.3099011).
- [52] KIM D, INGRAM M A, and SMITH W W. Measurements of small-scale fading and path loss for long range RF tags[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(8): 1740–1749. doi: [10.1109/TAP.2003.814752](https://doi.org/10.1109/TAP.2003.814752).
- [53] YANG Gang, LIANG Yingchang, ZHANG Rui, *et al.* Modulation in the air: Backscatter communication over ambient OFDM carrier[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(3): 1219–1233. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2772261](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2772261).
- [54] YAO Chaochao, LIU Yang, WEI Xusheng, *et al.* Backscatter technologies and the future of internet of things: Challenges and opportunities[J]. *Intelligent and Converged Networks*, 2020, 1(2): 170–180. doi: [10.23919/ICN.2020.0013](https://doi.org/10.23919/ICN.2020.0013).
- [55] KIMIONIS J, BLETSAS A, and SAHALOS J N. Increased range bistatic scatter radio[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(3): 1091–1104. doi: [10.1109/TCOMM.2014.020314.130559](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2014.020314.130559).
- [56] QIAN Jing, GAO Feifei, and WANG Gongpu. Signal detection of ambient backscatter system with differential modulation[C]. Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Shanghai, China, 2016: 3831–3835. doi: [10.1109/ICASSP.2016.7472394](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2016.7472394).
- [57] FASARAKIS-HILLIARD N, ALEVIZOS P N, and BLETSAS A. Coherent detection and channel coding for bistatic scatter radio sensor networking[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(5): 1798–1810. doi: [10.1109/TCOMM.2015.2412546](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2412546).
- [58] WANG P H P, ZHANG Chi, YANG Hongsen, *et al.* A low-power backscatter modulation system communicating across tens of meters with standards-compliant Wi-Fi transceivers[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2020, 55(11): 2959–2969. doi: [10.1109/JSSC.2020.3023956](https://doi.org/10.1109/JSSC.2020.3023956).
- [59] WANG Xiyu, YIGITLER H, DUAN Ruifeng, *et al.* Coherent multiantenna receiver for BPSK-modulated ambient backscatter tags[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(2): 1197–1211. doi: [10.1109/JIOT.2021.3079333](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3079333).
- [60] NAGARAJ S and YAQO R. A frequency modulation technique for SNR improvement in backscatter radios[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(12): 3956–3959. doi: [10.1109/LCOMM.2021.3117735](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3117735).
- [61] VARSHNEY A, PÉREZ-PENICHER C, ROHNER C, *et al.* LoRea: A backscatter architecture that achieves a long communication range[C]. Proceedings of the 15th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, Delft, Netherlands, 2017: 50. doi: [10.1145/3131672.3136996](https://doi.org/10.1145/3131672.3136996).
- [62] IYER V, TALLA V, KELLOGG B, *et al.* Inter-technology backscatter: Towards internet connectivity for implanted devices[J]. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 2017, 21(3): 35–38. doi: [10.1145/3161587.3161597](https://doi.org/10.1145/3161587.3161597).
- [63] 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, 1(3): 1–24. doi: [10.1145/3130970](https://doi.org/10.1145/3130970).
- [64] JIANG Jinyan, XU Zhenqiang, DANG Fan, *et al.* Long-range ambient LoRa backscatter with parallel decoding[C]. Proceedings of the 27th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, New Orleans, USA, 2021: 684–696. doi: [10.1145/3447993.3483261](https://doi.org/10.1145/3447993.3483261).
- [65] PARKS A N, LIU Angli, GOLLAKOTA S, *et al.* Turbocharging ambient backscatter communication[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014, 44(4): 619–630. doi: [10.1145/2740070.2626312](https://doi.org/10.1145/2740070.2626312).
- [66] GRIFFIN J D and DURGIN G D. Gains for RF tags using multiple antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(2): 563–570. doi: [10.1109/TAP.2007.915423](https://doi.org/10.1109/TAP.2007.915423).
- [67] GUO Huayan, ZHANG Qianqian, XIAO Sa, *et al.* Exploiting multiple antennas for cognitive ambient backscatter communication[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(1): 765–775. doi: [10.1109/JIOT.2018.2856633](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2856633).
- [68] HE Chen, WANG Z J, MIAO Chunyan, *et al.* Block-level unitary query: Enabling orthogonal-like space-time code with query diversity for MIMO Backscatter RFID[J]. *IEEE*

- Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(3): 1937–1949. doi: [10.1109/TWC.2015.2497240](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2497240).
- [69] HE Chen, WANG Z J, and LEUNG V C M. Unitary query for the $M \times L \times N$ MIMO backscatter RFID channel[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(5): 2613–2625. doi: [10.1109/TWC.2015.2390220](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2390220).
- [70] ALHASSOUN M and DURGIN G D. Spatial fading in retrodirective channels: An experimental study[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(9): 5812–5820. doi: [10.1109/TWC.2021.3070384](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3070384).
- [71] REZAEI F, TELLAMBURA C, and HERATH S. Large-scale wireless-powered networks with backscatter communications—a comprehensive survey[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 1100–1130. doi: [10.1109/OJCOMS.2020.3012466](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3012466).
- [72] ALEVIZOS P N, FASARAKIS-HILLIARD N, TOUNTAS K, *et al.* Channel coding for increased range bistatic backscatter radio: Experimental results[C]. 2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference, Tampere, Finland, 2014: 38–43. doi: [10.1109/RFID-TA.2014.6934197](https://doi.org/10.1109/RFID-TA.2014.6934197).
- [73] HE Chen, LUAN Huixu, LI Xiaoya, *et al.* A simple, high-performance space–time code for MIMO backscatter communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(4): 3586–3591. doi: [10.1109/JIOT.2020.2973048](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2973048).
- [74] DASKALAKIS S N, ASSIMONIS S D, KAMPIANAKIS E, *et al.* Soil moisture scatter radio networking with low power[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(7): 2338–2346. doi: [10.1109/TMTT.2016.2572677](https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2572677).
- [75] ZHU Yihua, LI Ertao, and CHI Kaikai. Encoding scheme to reduce energy consumption of delivering data in Radio frequency powered battery-free wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4): 3085–3097. doi: [10.1109/TVT.2017.2776170](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2776170).
- [76] SONG Guochao, YANG Hang, WANG Wei, *et al.* Reliable wide-area backscatter via channel polarization[C]. 2020 IEEE Conference on Computer Communications, Toronto, Canada, 2020: 1300–1308. doi: [10.1109/INFOCOM41043.2020.9155391](https://doi.org/10.1109/INFOCOM41043.2020.9155391).
- [77] BOYER C and ROY S. Space time coding for backscatter RFID[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(5): 2272–2280. doi: [10.1109/TWC.2013.031313.120917](https://doi.org/10.1109/TWC.2013.031313.120917).
- [78] HE Chen, CHEN Shangdong, LUAN Huixu, *et al.* Monostatic MIMO backscatter communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1896–1909. doi: [10.1109/JSAC.2020.3000823](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000823).
- [79] GOUDELI E, PSOMAS C, and KRIKIDIS I. Spatial-modulation-based techniques for backscatter communication systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 10623–10634. doi: [10.1109/JIOT.2020.3005832](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3005832).
- [80] LUAN Huixu, XIE Xie, HAN Luyang, *et al.* A better than alamouti OSTBC for MIMO backscatter communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(2): 1117–1131. doi: [10.1109/TWC.2021.3102111](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3102111).
- [81] LIU V, PARKS A, TALLA V, *et al.* Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013, 43(4): 39–50. doi: [10.1145/2534169.2486015](https://doi.org/10.1145/2534169.2486015).
- [82] QIAN Jing, GAO Feifei, WANG Gongpu, *et al.* Semi-coherent detection and performance analysis for ambient backscatter system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(12): 5266–5279. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2738001](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2738001).
- [83] QIAN Jing, GAO Feifei, WANG Gongpu, *et al.* Noncoherent detections for ambient backscatter system[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(3): 1412–1422. doi: [10.1109/TWC.2016.2635654](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2635654).
- [84] GURUACHARYA S, LU Xiao, and HOSSAIN E. Optimal non-coherent detector for ambient backscatter communication system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 16197–16201. doi: [10.1109/TVT.2020.3034317](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3034317).
- [85] LIU Chang, WEI Zhiqiang, 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. doi: [10.1109/TWC.2020.3034895](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3034895).
- [86] MA Shuo, WANG Gongpu, WANG Yanwen, *et al.* Signal ratio detection and approximate performance analysis for ambient backscatter communication systems with multiple receiving antennas[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2018, 23(6): 1478–1486. doi: [10.1007/s11036-017-0980-0](https://doi.org/10.1007/s11036-017-0980-0).
- [87] CHEN Chen, WANG Gongpu, DIAMANTOULAKIS P D, *et al.* Signal detection and optimal antenna selection for ambient backscatter communications with multi-antenna tags[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(1): 466–479. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2946799](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2946799).
- [88] CHEN Chen, WANG Gongpu, GUAN Hao, *et al.* Transceiver design and signal detection in backscatter communication systems with multiple-antenna tags[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(5): 3273–3288. doi: [10.1109/TWC.2020.2971990](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2971990).
- [89] LIU Yuan, REN Pinyi, DU Qinghe, *et al.* Performance

- enhancement for differential energy signal detection of ambient backscatter communications[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2022, 33(7): e4483. doi: [10.1002/ett.4483](https://doi.org/10.1002/ett.4483).
- [90] NEMATI M, DING Jie, and CHOI J. Short-range ambient backscatter communication using reconfigurable intelligent surfaces[C]. 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Seoul, Korea (South), 2020: 1–6. doi: [10.1109/WCNC45663.2020.9120813](https://doi.org/10.1109/WCNC45663.2020.9120813).
- [91] ZHAO Wenjing, WANG Gongpu, ATAPATTU S, *et al.* Performance analysis of large intelligent surface aided backscatter communication systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(7): 962–966. doi: [10.1109/lwc.2020.2976934](https://doi.org/10.1109/lwc.2020.2976934).
- [92] ABEYWICKRAMA S, YOU Changsheng, ZHANG Rui, *et al.* Channel estimation for intelligent reflecting surface assisted backscatter communication[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(11): 2519–2523. doi: [10.1109/LWC.2021.3106165](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3106165).
- [93] FARA R, PHAN-HUY D T, RATAJCZAK P, *et al.* Reconfigurable intelligent surface-assisted ambient backscatter communications-experimental assessment[C]. 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops, Montreal, Canada, 2021: 1–7. doi: [10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473842](https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473842).
- [94] CHEN Yunfei. Performance of ambient backscatter systems using reconfigurable intelligent surface[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(8): 2536–2539. doi: [10.1109/LCOMM.2021.3083110](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3083110).
- [95] LIANG Yingchang, ZHANG Qianqian, WANG Jun, *et al.* Backscatter communication assisted by reconfigurable intelligent surfaces[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(9): 1339–1357. doi: [10.1109/JPROC.2022.3169622](https://doi.org/10.1109/JPROC.2022.3169622).
- [96] KANTAREDDY S N R, MATHEWS I, BHATTACHARYYA R, *et al.* Long range battery-less PV-powered RFID tag sensors[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(4): 6989–6996. doi: [10.1109/JIOT.2019.2913403](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2913403).
- [97] LU Yingxian, BASSET P, and LAHEURTE J M. Performance evaluation of a long-range RFID tag powered by a vibration energy harvester[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1832–1835. doi: [10.1109/lawp.2017.2682419](https://doi.org/10.1109/lawp.2017.2682419).
- [98] AMATO F, TORUN H M, and DURGIN G D. RFID backscattering in long-range scenarios[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(4): 2718–2725. doi: [10.1109/TWC.2018.2801803](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2801803).
- [99] HU Jie, YANG Kun, WEN Guangjun, *et al.* Integrated data and energy communication network: A comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 3169–3219. doi: [10.1109/COMST.2018.2860778](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2860778).
- [100] GROVER P and SAHAI A. Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer[C]. 2010 IEEE International Symposium on Information Theory, Austin, USA, 2010: 2363–2367. doi: [10.1109/ISIT.2010.5513714](https://doi.org/10.1109/ISIT.2010.5513714).
- [101] ZHOU Xun, ZHANG Rui, and HO C K. Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(11): 4754–4767. doi: [10.1109/TCOMM.2013.13.120855](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2013.13.120855).
- [102] KANG J M, KIM I M, and KIM D I. Wireless information and power transfer: Rate-energy tradeoff for nonlinear energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 1966–1981. doi: [10.1109/TWC.2017.2787569](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2787569).
- [103] FANG Zhaoxi, YUAN Xiaojun, and WANG Xin. Distributed energy beamforming for simultaneous wireless information and power transfer in the two-way relay channel[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(6): 656–660. doi: [10.1109/LSP.2014.2365718](https://doi.org/10.1109/LSP.2014.2365718).
- [104] JANG H H, CHOI K W, and KIM D I. Novel frequency-splitting SWIPT for overcoming amplifier nonlinearity[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 826–829. doi: [10.1109/LWC.2020.2971983](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2971983).
- [105] CLERCKX B, KIM J, CHOI K W, *et al.* Foundations of wireless information and power transfer: Theory, prototypes, and experiments[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(1): 8–30. doi: [10.1109/JPROC.2021.3132369](https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3132369).
- [106] PARK J J, MOON J H, LEE K Y, *et al.* Transmitter-oriented dual-mode SWIPT with deep-learning-based adaptive mode switching for IoT sensor networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(9): 8979–8992. doi: [10.1109/JIOT.2020.2999892](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2999892).
- [107] TANDON A, MOTANI M, and VARSHNEY L R. Constant subblock composition codes for simultaneous energy and information transfer[C]. The 11th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking Workshops, Singapore, 2014: 45–50. doi: [10.1109/SECONW.2014.6979704](https://doi.org/10.1109/SECONW.2014.6979704).
- [108] TANDON A, MOTANI M, and VARSHNEY L R. Real-time simultaneous energy and information transfer[C]. 2015 IEEE International Symposium on Information Theory, Hong Kong, China, 2015: 1124–1128. doi: [10.1109/ISIT.2015.7282630](https://doi.org/10.1109/ISIT.2015.7282630).
- [109] TANDON A, MOTANI M, and VARSHNEY L R.

- Subblock-constrained codes for real-time simultaneous energy and information transfer[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(7): 4212–4227. doi: [10.1109/TIT.2016.2559504](https://doi.org/10.1109/TIT.2016.2559504).
- [110] IM C, LEE J W, and LEE C. A multi-tone amplitude modulation scheme for wireless information and power transfer[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(1): 1147–1151. doi: [10.1109/TVT.2019.2954860](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2954860).
- [111] HU Jie, LI Mengyuan, YANG Kun, *et al.* Unary coding controlled simultaneous wireless information and power transfer[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(1): 637–649. doi: [10.1109/TWC.2019.2947491](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2947491).
- [112] ZHAO Yizhe, HU Jie, YANG Kun, *et al.* Unary coding design for simultaneous wireless information and power transfer with practical M-QAM[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(5): 2850–2862. doi: [10.1109/TWC.2020.3044722](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3044722).
- 郑黎明: 男, 副研究员, 研究方向为物联网、传感器、后向散射通信、能量收集.
- 刘培国: 男, 教授, 研究方向为物联网、电磁兼容、电磁防护.
- 王宏义: 男, 研究员, 研究方向为物联网、传感器、后向散射通信、能量收集.
- 吴建飞: 男, 副研究员, 研究方向为物联网、传感器、电磁兼容.

责任编辑: 马秀强