



综述

反向散射通信技术的研究与发展

叶迎晖, 徐瑞, 田雨佳, 卢光跃

(西安邮电大学陕西省信息通信网络及安全重点实验室, 陕西 西安 710121)

摘要: 反向散射通信作为物联网部署的重要技术手段, 其主要思想是利用入射信号进行低功耗被动通信和能量收集, 以期实现物联网节点的能源自持。为了加深对该技术的认识并推动相关领域的发展, 对现有研究展开综述并对未来发展进行展望。首先, 阐述了反向散射通信的基本原理及架构演进。其次, 针对不同的通信架构, 对已有工作进行了综述。在此基础上, 给出了融主被动传输的互惠共生反向散射通信架构, 并进行了初步的研究和仿真分析。最后, 结合已有研究探讨了所提通信架构的未来研究方向。

关键词: 物联网; 反向散射通信; 融主被动传输的互惠共生反向散射通信

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024001

Research and development of backscatter communications technology

YE Yinghui, XU Rui, TIAN Yujia, LU Guangyue

Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security,
Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China

Abstract: As an important technology for the deployment of Internet of things (IoT), backscatter communication performs low-power passive communication and energy harvesting by applying the incident signals, which is expected to achieve energy self-sustainability of the IoT node. In order to deepen its understanding and promote the development of related fields, a review of existing research was conducted and the future development prospects were presented. Firstly, the basic principle of backscatter communication and its architecture evolution were elaborated. Secondly, in terms of different communication architectures, the existing research works were surveyed. On this basis, the hybrid active-passive mutualistic symbiotic backscatter communication was proposed, and preliminary research and simulation analysis were conducted. Finally, future research directions of the proposed communication architecture were explored based on the existing research.

Key words: Internet of things, backscatter communication, hybrid active-passive mutualistic symbiotic backscatter communication

收稿日期: 2023-08-20; 修回日期: 2023-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62201451); 中铁一院科研项目 (No.2022KY52ZD(ZNXT)-03)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62201451), The Research Program of China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. (No.2022KY52ZD(ZNXT)-03)



0 引言

通过大量物联网节点与互联网相连,物联网可在任何时间、任何地点实现人、机、物的互联互通^[1]。基于物联网终端的通信与实时处理能力^[2],物联网终端大致可分为两类:强终端和弱终端。强终端通常具备强大的通信能力和实时处理能力,其应用包括大型无人机和智能汽车等场景。弱终端的数量通常多且部署范围大,目的是实现万物的广覆盖,因此主要面向智慧城市和智慧家居等大规模物联网应用场景,并且强调低功耗、大连接、长“寿命”等特性(本文围绕物联网弱终端开展综述,下文将物联网弱终端简称为物联网节点)。由爱立信公司的相关报告^[3]可知,到2027年,全球的移动网络数据流量预计达到380 EB/月,物联网连接数预计从2022年的146亿增加到302亿,复合增长率为13%。然而,若想满足日益增长的网络数据流量和物联网节点的接入需求,物联网必须解决如下两个难点^[4-5]。

(1) 频谱短缺

为了构建万物智联的全覆盖物联网应用场景,需要充分利用现有频谱资源。然而,目前适用于物联网通信的频谱资源十分匮乏,无法满足爆炸式增长的物联网节点数目和网络数据流量对频谱资源的迫切需求。未来物联网的应用领域将更加广泛,这必然会产生海量的节点数目与数据流量,从而对频谱资源提出更高的需求与挑战。因此,频谱资源短缺是物联网领域亟待解决的一项关键问题。

(2) 能量受限

物联网节点通常由自身配备的电池供电。然而,受节点尺寸和制造成本的影响,电池容量很难满足长达数十年的工作时长要求。此外,对于部署在复杂或极端环境的物联网应用,节点的电池寿命通常无法维持正常水平。虽然将物联网节

点接入电网或更换电池可以延长其工作时长,但节点分布的广泛性和无规律性会使其产生过高的维护成本,且在部分应用环境(如医疗领域中的传感器和芯片等)下不便于实现。因此,节点的能量受限问题是制约物联网发展的重要因素之一。

为了有效解决物联网发展所面临的“一短一限(频谱短缺与能量受限)”问题,势必要发展具有超低功耗和高谱效等特点的无线通信技术。低功耗不仅符合“十四五”规划强调的节能环保绿色发展理念,而且有可能通过结合能量收集技术来实现无源通信。在这一背景下,基于无线能量收集的反向散射通信(下文简称反向散射通信)引起了学术界与工业界的广泛关注。在现有的反向散射通信中,基于反向散射的共生通信^[6-7]能够充分利用能量与频谱域的互惠共享特性,从而更有效地缓解物联网节点所面临的频谱与能量双重受限问题。基于反向散射的共生通信主要包含主系统与次系统两个系统。主系统通常以主动通信的形式完成信息传输,而次系统利用主系统发射的射频信号进行低功耗的反向散射通信(下文也称为被动信息传输)与能量收集。

综上所述,基于反向散射的共生通信能够有效解决物联网节点所面临的“一短一限”问题。《“十四五”信息通信行业发展规划》^[8]指出,应加快推进低、中、高速率物联网全面发展。然而,基于反向散射的共生通信系统中的次用户仅采用了被动信息传输,其通信容量较低^[9],导致其无法支撑一定量数据传输需求的应用场景。因此,速率受限问题是基于反向散射的共生通信中亟待解决的一项关键问题。笔者围绕这一问题,首先回顾反向散射通信基本原理及其架构演进的相关知识,总结不同反向散射通信架构的优缺点。随后介绍不同反向散射通信架构综述的已有工作,旨在让读者了解各通信架构下的研究内容及局限

性。受此启发,给出融主被动传输的互惠共生反向散射通信架构,并通过初步研究和仿真实验展示性能优势。此外结合已有工作的研究内容,指出所给通信架构的潜在研究问题与挑战。最后对全文进行总结与展望。

1 反向散射通信原理与架构演进

1.1 反向散射通信基本原理

反向散射通信技术的低功耗特性受到学术界与工业界的广泛关注,并使其步入快速发展的轨道。1948 年,文献[10]提出了利用反射功率进行通信的概念,奠定了反向散射技术的理论基础。与传统的通信方式不同^[11-12],反向散射节点通过调节反射系数将入射信号划分为两部分:一部分作为载波,利用低速、简单的调制方案将信息调制到该载波上,并将已调信号通过天线反射出去,实现低功耗的被动信息传输;另一部分用于能量收集来维持自身电路运行,缓解能量受限问题,反向散射电路原理如图 1 所示。具体地,反向散射节点通过调整负载阻抗以生成不同的反射系

数,进而将比特序列映射为射频信号,反射系数的计算式可以表述为:

$$\beta_i = \frac{Z_i - Z_a^*}{Z_i + Z_a} \quad (1)$$

其中, Z_a 代表天线阻抗, $*$ 代表复共轭操作, i 代表开关状态, Z_i 代表不同状态相应的负载阻抗。通常情况下, $i=1,2$, 即二进制负载调制。

为了更加深刻地理解反射电路的基本原理,笔者将结合反向散射二进制负载调制进行详细说明,如图 2 所示。图 2 中,开关通过在 Z_1 和 Z_2 两个负载上切换以生成不同的反射系数,从而实现信息的调制。当 $Z_i=Z_a$ 时,天线阻抗与负载阻抗相互匹配,反向散射节点进入吸收状态,即入射信号全部进入能量收集电路,不存在信号反射,此时该状态对应数据“0”。当 $Z_i \neq Z_a$ 时,天线阻抗与负载阻抗失配,反向散射节点进入反射状态,即反射系数将入射信号划分为两部分,一部分作为载波,将信息调制到该载波上并将其反射出去,另一部分进入能量收集电路,此时该状态对应数据“1”。

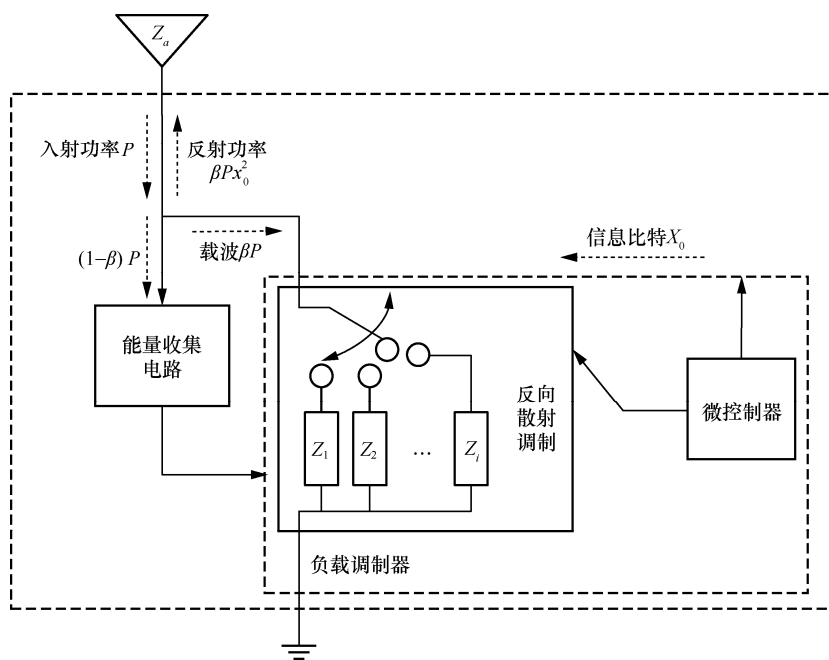


图 1 反向散射电路原理

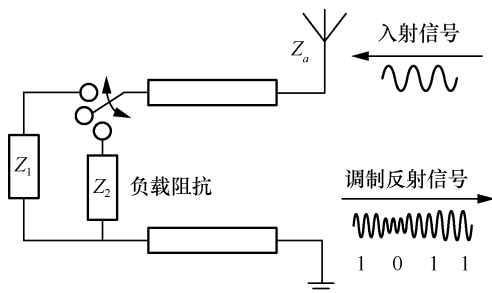


图2 反向散射二进制负载调制

1.2 反向散射通信架构

传统反向散射通信的网络架构包括单站反向散射和双站反向散射网络^[11],如图3所示。

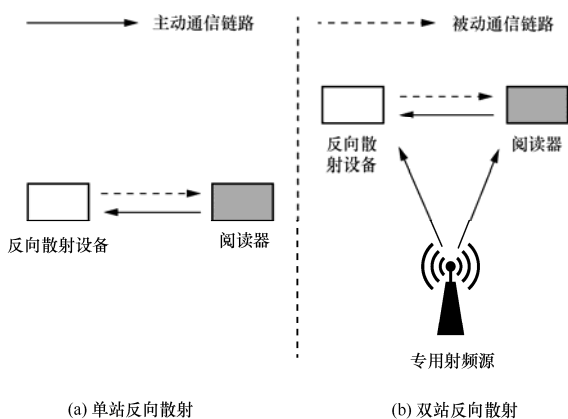


图3 传统反向散射通信的网络架构

单站反向散射的典型应用是射频识别 (radio frequency identification, RFID) 系统^[13],如图3(a)所示,在 RFID 系统中,阅读器发送射频信号来激活反向散射设备电路,反向散射设备将自身信息调制到射频信号上并回传至阅读器。由于射频源与反向散射接收机通常被同时集成在阅读器中,因此信号可能产生往返路径损耗^[14]。因此,当反向散射设备离阅读器较远时,单站反向散射系统将面临双重远近效应的问题,从而导致能量中断概率变大且反射信号强度减弱,很大程度上限制了通信的传输距离,其仅适用于短距离通信。

与单站反向散射不同,双站反向散射^[11]将射频源与接收器分离,如图3(b)所示,通过在反向散射设备附近部署专用的射频源来减少信息传

输过程中经历的双重路径损耗。一方面,灵活部署专用射频源的位置可有效提升系统性能;另一方面,反向散射设备可从距离最近的射频源收集能量并反向散射信息,减轻了远近效应。虽然双站反向散射通信系统能够提升通信性能及通信距离,但需要额外部署专用射频源,增加了物联网节点的体积及布设成本。

上述两种反向散射架构均可实现低功耗的被动信息传输,但都需要特定的射频激励信号,增加了网络的部署成本且限制了网络部署的灵活性。环境、共生反向散射通信架构如图4所示。环境反向散射^[11,15]利用环境中存在的射频信号(如电视塔、蜂窝基站和 Wi-Fi 接入点的信号)进行反向散射通信,其模型可表示为图4(a)。将环境中的射频信号作为射频源具备如下优势:一方面,无须部署与维护专用的射频源,降低了网络部署成本与能耗;另一方面,无须分配额外的频谱资源,提升了频谱资源利用率。因此,环境反向散射以频谱复用的方式实现了被动信息传输,可以很好地缓解物联网面临的“一短一限”问题。但环境反射通信系统(由反向散射设备与阅读器构成,以下简称次系统)和传统的主动通信系统(由环境射频源和传统用户构成,以下简称主系统)之间不存在协作关系,那么具有未知特性与不可控特性的环境射频信号将会使被动通信链路受到较强的干扰,从而导致环境反向散射通信系统性能受限。

为了解决上述问题,必须在环境反向散射通信的基础上充分考虑主、次系统间的有机协作来进一步提升系统性能。受此启发,学者们提出了共生反向散射通信^[6-7],如图4(b)所示,其核心思想是允许次系统利用主系统的射频信号实现自身电路驱动与低功耗被动信息传输。根据主、次用户符号周期的关系,共生反向散射通信可被分为寄生反向散射通信与互惠共生反向散射通信。

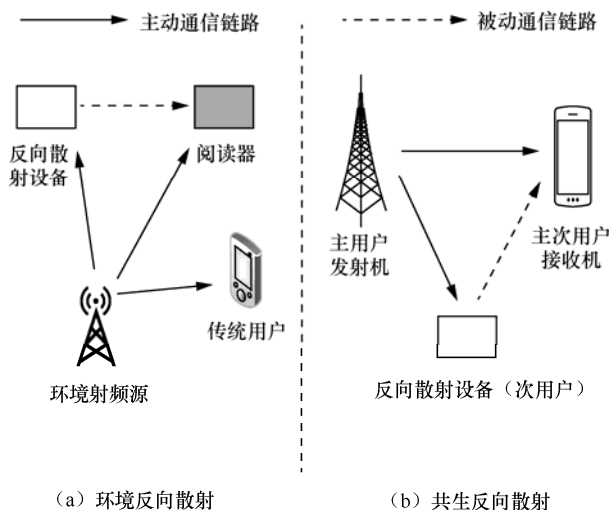


图4 环境、共生反向散射通信架构

在寄生反向散射通信中，主、次用户符号周期长度相当，此时主、次用户之间均存在共道干扰，但接收机可利用串行干扰消除（successive interference cancellation, SIC）技术弱化甚至消除主用户对次用户的强干扰，其依据总结如下：由于次用户的反射信号在经历双重路损后强度较小，因此接收机可以利用 SIC 技术优先解码主用户的信息，将其移除后再解码次用户的信息，与此同时，主用户的性能受损。而在互惠共生反向散射通信中，次用户符号周期远大于主用户符号周期，其帧结构如图 5 所示。由于次用户的反射信号中同时包含主、次用户的信息，接收机可采用联合信号检测方法将次用户的反向散射信号“转化”为主用户有益的多径分量，从而提高主用户的通信容量，与此同时，次用户获得频谱接入与能量收集的机会，从而形成了主、次系统间的互惠共生关系。

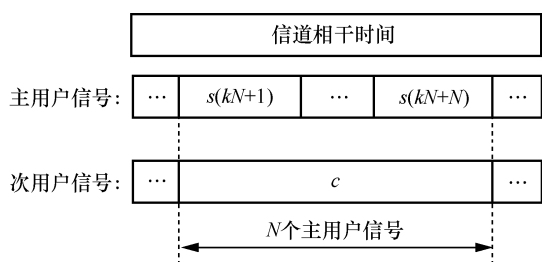


图5 互惠共生反向散射通信的帧结构

总的来说，共生反向散射通信利用主、次系统间的有机协作解决了被动通信链路遭受的强干扰问题，但次用户的被动信息传输方式导致通信速率受限，无法良好支撑有一定数据传输需求的物联网场景。为进一步提升次用户的传输性能，学者们利用主动通信和被动通信在能耗与速率上的互补特性，在次用户信号传输过程中引入主动通信，提出融主被动传输的寄生反向散射通信架构^[16-17]。融主被动传输的寄生共生反向散射通信架构如图 6 所示，该网络中反向散射设备，即次用户，同时配备了能量收集、反射调制、主动调制等电路，且主、次用户符号周期长度相当。在整个传输时隙内，主用户通过主动通信的方式传输信息。次用户将整个传输时隙划分为两个阶段，即反向散射阶段 t_1 和主动传输阶段 t_2 。在反向散射阶段，次用户利用主用户的射频信号进行被动通信，入射的射频信号被划分为两部分，一部分用于载波，将次用户信息调制并发射至接收机，剩余部分进入次用户的能量收集电路。在主动传输阶段，次用户利用在反向散射阶段收集的能量进行主动通信。相对于共生反向散射通信，该网络能够进一步提升次用户的传输性能，但来自次用户的干扰会导致主用户性能受损，从而降低主用户参与协作的积极性。

基于上述讨论，反向散射通信架构的优缺点对比见表 1。

本节简单地介绍了反向散射通信的基本原理，回顾了反向散射通信架构的演进过程，并总结了不同通信架构的优缺点，旨在让读者了解现有通信架构的不足之处，从而寻找新的通信架构实现低功耗、大连接、高速率的物联网部署。

2 研究进展

本节针对不同的反向散射通信架构，分别从信道估计、资源优化、性能分析、信号检测等方面对现有研究工作进行了梳理和总结。其中，信道估计的目的是结合信道估计理论设计

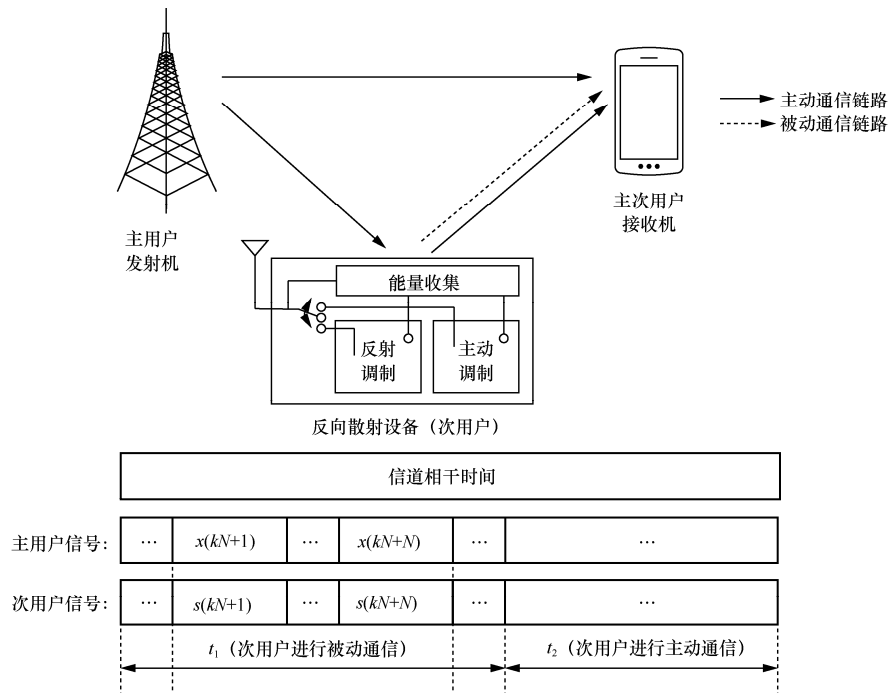


图6 融主被动传输的寄生共生反向散射通信架构

表1 反向散射网络架构的优缺点对比

网络架构	优点	缺点	应用场景
单站反向散射	结构简单, 成本低, 易于部署	易遭受双重路损和双重远近效应, 通信性能不佳, 需要额外的频谱资源	适用于低成本、低速率的短距离通信场景
双站反向散射	避免往返路径损耗, 克服双重远近问题, 扩大传输距离	需要专门的载波发射器和额外的频谱资源, 部署成本高	适用于有一定速率要求、成本预算较高的通信场景
环境反向散射	不需要部署专用载波发射器, 降低成本和功耗; 提高频谱资源利用率	存在共道干扰, 给反向散射链路性能带来损失	适用于频谱短缺、低成本、低速率且环境射频频源丰富的通信场景
寄生反向散射	考虑主次链路有机协作, 克服了共道干扰问题, 提升了次系统通信容量	来自次系统的信号对主系统带来干扰, 造成主系统性能损失	适用于频谱短缺、次用户有一定的速率要求且接收机性能较好的通信场景
互惠共生反向散射	利用主次链路协作, 克服了直连链路干扰问题, 提升了次系统传输性能; 来自次系统的信号可作为主系统的多径, 给主系统传输性能带来增益	次系统通信容量低	适用于频谱短缺、次用户有一定的速率要求、主/次用户互惠且接收机性能较优的通信场景
融主被动传输的寄生反向散射	提高了次系统通信容量	次系统进行主被动通信时均会对主系统造成干扰, 使主系统通信容量受损	适用于频谱短缺、次用户速率要求较高且接收机性能较好的通信场景

高精度、低复杂度的估计算法; 资源优化通常以吞吐量最大化、能效最大化、和速率最大化、时延最小化、能耗最小化等为目标, 结合优化理论, 通过优化相关网络参数使系统性能达到最优; 性能分析主要以误码率、中断概率、可达速率、保密中断概率、保密容量等作为性能

指标, 结合随机过程理论, 推导性能表达式的闭式解或渐进解, 以此来探究网络参数对系统性能的影响机理; 信号检测主要结合信号检测与估值理论设计接收机处的最佳检测算法或最佳检测器。接下来, 基于不同的通信架构对已有工作展开综述。

2.1 单站反向散射通信

对于单站反向散射通信网络,研究学者们从信道估计、资源优化和性能分析等方面开展了相关的研究,具体总结如下。

(1) 信道估计

针对单个多天线阅读器、单个单天线标签的单站反向散射通信系统,文献[18]推导了反向散射信道的最小二乘估计器并获得了线性最小均方误差估计。基于此,推导了反向散射平均信干噪比的近似解析表达式,并通过优化信道估计与信息解码阶段的正交导频数和能量分配来最大化平均信干噪比。文献[19]首先推导了一个用于前向和后向反向散射链路的最小二乘估计量,在此基础上,通过优化信道估计和信息解码阶段的能量最大限度地提高了平均反向散射信噪比。针对单个多天线阅读器、单个多天线标签的单站反向散射通信系统,文献[20]研究了多输入多输出反向散射信道下由查询矩阵和编码矩阵联合设计的编码和解码方案。文献[21]考虑了一个单个多天线阅读器、多个单天线标签的单站反向散射通信系统,对具有正交导频的反向散射信道进行了线性信道估计,并研究了信道估计误差对检测性能的影响。

(2) 资源优化

围绕单站反向散射通信网络,学者们在不同网络场景下基于不同的优化目标也展开了相关的研究。针对多天线阅读器辅助的单站反向散射网络,文献[22]基于最大似然检测器,推导了最优检测阈值、误码率以及全局最优反射系数的封闭表达式来最小化误码率。对于多个标签,文献[23]针对基于非正交多址辅助的单站多天线反向散射通信网络,联合优化发射波束、接收波束及反射系数以最大化反向散射节点的最小速率来保证网络的公平性。文献[24]和文献[25]均针对单站反向散射通信存在的残余自干扰问题,在残余自干扰限制约束及标签能量约束下,通过联合优化阅读器的预编码器、组合滤波器以及标签的反射系数

以最大化系统和速率。文献[26]考虑了一个配备缓冲器的多天线单站反向散射通信系统,针对不同的效用函数设计相应的在线任务策略来确定缓存器中存储的数据量,此外通过联合优化反向散射节点的发射波束、接收波束以及反射系数以最大化吞吐量的效用函数,从而获得一个在线数据控制策略。针对多个单天线阅读器的单站反向散射网络,文献[27]以最大化系统吞吐量和反向散射距离为目标,设计阅读器的最优接收机及标签间的最优位置。

(3) 性能分析

近年来,学者们面向多节点或多天线的单站反向散射通信网络场景展开性能分析。文献[28]考虑了一个由单个多天线阅读器、单个单天线标签所构成的单站反向散射通信网络,在静态的功率划分和时间切换策略下推导了速率—能量域,并利用信道状态信息优化了动态策略下的速率—能量域。文献[29]针对多个多天线阅读器、单个单天线标签的单站反向散射通信网络,在考虑配备定向天线阅读器和级联衰落信道的条件下,推导了标签检测概率的封闭表达式。针对单个单天线阅读器、多个单天线标签的单站反向散射通信网络,文献[30]将非正交多址接入技术引入网络,推导了阅读器成功解码率的解析表达式,并提出了一个反射系数设置准则来提高系统性能。文献[31]基于标签选择准则,利用随机几何理论推导了平均遍历吞吐量和有效吞吐量的解析表达式,并在标签数量较多的条件下获得了平均有效吞吐量的简化封闭渐近表达式,同时推导了适用于多种二进制调制方案的平均误码率的统一解析表达式。为了减小多标签间的接入冲突,文献[32]设置了标签进行反向散射的阈值,基于随机几何理论推导了阅读器成功解码信息的平均标签数量,并且说明了可通过调节反向散射阈值来最大化系统性能。面向单个多天线阅读器、多个单天线标签的单站反向散射通信网络,文献[33]基于不同的波束



形成方案推导了和速率的容量下界的渐进表达式,在此基础上,推导了最大化和速率时的最优反射系数。文献[34]研究了标签间多弹跳散射效应的额外自由度对系统性能的影响,推导了可实现和速率的紧密下界并对其进行了渐近分析。针对多个多天线阅读器、多个单天线标签的单站反向散射通信网络,文献[35]面向密集多路径场景下的反向散射通信系统,利用测距误差界和定位误差界研究了系统的测距和定位性能。文献[36]将智能反射面引入单站反向散射系统,推导了该系统平均可达速率的闭式解及其渐进表达的闭式解。

尽管学者们从上述 3 个方面对单站反向散射通信进行了研究且尝试提出各种方法来提高其传输性能,但其结果表明,单站反向散射通信调制后的信号强度低,只适合于短距离通信。

2.2 双站反向散射通信

双站反向散射网络通过部署专用射频源有效地克服了双重路径损耗和远近效应问题,因此引起了学者们的广泛关注,现有研究主要从信号检测、资源优化及性能分析等方面展开,具体总结如下。

(1) 信号检测

在双站反向散射通信网络中,反向散射信号会受同频载波信号的干扰,这对信号检测技术提出了很高的要求。针对双站反向散射通信网络,文献[37]获得了用于开/关键控标签调制的次优检测器,并分析了其误码率性能。文献[38]基于标签分流网络分析了误码率性能。基于双天线阅读器的双站反向散射通信网络,文献[39]设计了一种最大似然检测器,并分析了其误码率性能。对于具有多天线功率站和阅读器的双站反向散射通信网络,文献[40]提出了一种抑制直接链路干扰的算法,并推导了检测性能的封闭表达式。文献[41]考虑了一个采用非相干频移键控的阅读器,并研究了频移键控调制方案下的误码率性能。

(2) 资源优化

针对不同的物联网应用场景,双站反向散射

通信常与其他通信技术相结合,从而形成不同的网络架构,满足不同的性能需求。本节主要从典型的双站反向散射通信网络、融主被动信息传输的双站反向散射通信网络、非正交多址辅助的双站反向散射通信网络、智能反射面辅助的双站反向散射通信网络、反向散射辅助的无线供能移动边缘计算网络、无人机辅助的反向散射通信网络等方面展开综述。

针对典型的双站反向散射通信网络,文献[42]在保证能量因果约束和服务质量约束的基础上,通过联合优化功率站的发射功率、反射系数以及睡眠阶段和活动阶段的时间,设计了网络能量效率最大化资源分配方案。文献[43]通过联合优化时间资源、反射系数和功率站的发射功率来最大化网络的能量效率。将单节点拓展到多节点,文献[44]研究了一个基于能效的最大最小公平性问题,通过联合优化功率站的发射功率及反射系数来保证反向散射链路间的公平性。文献[45]研究了功率站的最佳放置位置,从而最大限度地保证网络的覆盖距离。文献[46]通过联合优化反射系数和混合接入点的工作模式最大化网络的吞吐量,并推导了最优反射系数的封闭表达式。

为了进一步提高反向散射通信的速率,充分利用主动通信和被动通信在能量和速率上的互补特性,将主动通信引入反向散射网络,形成了融主被动信息传输的双站反向散射通信网络。针对该网络,文献[47]以最大化最小吞吐量为目标,通过联合优化用于能量收集、反向散射和主动通信的时间、反射系数以及主动通信的功率来保证多节点间的公平性。文献[48]考虑了每个节点的最小传输速率需求约束,通过联合优化主动、被动通信间的时间分配、主动通信的功率、反射系数以及功率站的发射功率来设计基于节点总传输时间最小化的资源分配方案。文献[49]考虑了节点的能量约束,通过优化主动、被动传输时间来最大化网络吞吐量。文献[50]优化了功率站发射功率、主

动通信功率以及用于反向散射通信和主动通信的时间来最大化网络的能量效率。

为进一步缓解频谱资源短缺问题,将非正交多址引入多节点双站反向散射通信网络,形成非正交多址辅助的多节点双站反向散射通信网络。针对该网络,文献[51]通过联合优化反射系数以及用户进行能量收集、反向散射和非正交多址传输的时间来最大化网络总吞吐量。文献[52]将单天线阅读器扩展到多天线,基于最大最小化准则,通过联合优化各节点反向散射时间和功率反射系数以保证各节点间的公平性。文献[53]在信道估计误差存在的情况下,通过优化载波发射器的发射功率及反向散射系数来最大化网络能效。文献[54]在不确定性信道和非线性能量收集的假设下,研究了非正交多址辅助反向散射通信网络的鲁棒资源分配问题。针对反向散射辅助的协作非正交多址系统,文献[55]考虑了不完美串行干扰消除下的能效最大化问题。

对于智能反射面辅助的双站反向散射通信网络,文献[56]通过优化智能反射面的相移与功率站的发射波束形成矢量来最小化发射功率。将单天线阅读器扩展到多天线,文献[57]考虑了多节点场景下传输功率最小化优化问题,并提出一种交替优化算法来求解智能反射面的最优相移。文献[58]考虑了智能反射面辅助的主被动混合通信网络,在物联网节点的最小吞吐量需求约束下,通过联合优化智能反射面的相移、主被动信息传输的时间、物联网节点和功率站的发射功率来最大化系统能效。

为解决物联网节点面临的能量受限与计算能力受限问题,面向反向散射辅助的无线供能移动边缘计算网络,文献[59]考虑非线性能量收集模型和部分卸载策略,通过联合优化反射系数、每个边缘用户的传输功率、本地计算频率和执行时间、执行主动通信和被动通信的时间,设计了一个基于最大化最小计算能效的资源分配方案,从而确保了多节点间的公平性。文献[60]考虑部分卸载策

略,通过联合优化功率站的操作时间及每个物联网节点在反向散射卸载阶段、主动通信卸载阶段以及本地计算阶段的计算频率、传输功率以及任务卸载比例来最小化所有节点用于数据卸载和计算的时延。文献[61]考虑二进制卸载策略及计算能力受限的移动边缘计算服务器,通过联合优化每个物联网节点二进制卸载决策、移动边缘计算服务器和物联网节点的计算频率和计算时间、物联网节点的反向散射时间和反向散射系数等获得移动边缘计算服务器能量消耗最小化资源分配方案。文献[62]考虑计算能力受限的移动边缘计算服务器和物联网节点的能量因果约束及服务质量约束,分别以总计算比特数和系统计算能效最大化为目标,通过联合优化边缘计算服务器和每个物联网节点的计算频率和时间、功率站和每个物联网节点的传输功率、反射系数以及能量收集和主被动通信的时间来获得最优的资源分配方案。文献[63]考虑将智能反射面引入反向散射辅助的无线供能移动边缘计算网络,通过联合优化物联网节点的时间分配、功率分配、本地计算频率、任务执行时间、反向散射系数以及智能反射面的相移来最大化系统能效。

考虑偏远地区或自然灾害导致通信故障的场景,无人机灵活的机动性、易部署性以及低成本等特点使其具备一定的优势。针对无人机辅助的反向散射通信网络,文献[64]首先分析了系统的平均中断概率并在无人机的能量约束下最大化系统能效。文献[65]在保证反向散射节点的能量因果约束下,通过联合优化时间资源、反向散射系数、功率站的发射功率以及无人机的轨迹来最大化系统能效。文献[66]通过联合优化无人机的发射功率和轨迹、节点的反射系数、主动通信的传输功率以及主被动通信的时间,设计物联网节点能效最大化资源分配方案。

(3) 性能分析

对于一个非正交多址辅助的双站反向散射通



信网络, 文献[67]在 Nakagami 衰落信道下推导了两节点簇群的误码率表达式。通过引入智能反射面技术, 文献[68]研究了双站反向散射通信网络的误码率性能。对于一个多标签双站反向散射通信网络, 文献[69]在一种标签选择方案下推导了保密中断概率的封闭解析表达式, 并分析了其分集增益。将单天线阅读器和窃听节点拓展到多天线, 文献[70]提出了一种标签选择策略来优化多标签双站反向散射通信网络的遍历保密容量和保密中断概率, 并推导了网络的遍历保密容量和保密中断概率。

综上所述, 学者们从上述 3 个方面对双站反向散射展开了研究, 并将多种技术与双站反向散射相结合构建适用于不同应用场景的网络架构, 尽可能地提高网络的传输性能。但该通信架构需要额外部署专用射频源, 这无疑增加了物联网节点的体积及布设成本。

2.3 环境反向散射通信

2014 年, 文献[71]提出了环境射频源作为唯一电源的通信技术——环境反向散射通信技术, 并设计电路硬件原型实现了两个无源设备的短距离通信, 验证了环境反向散射技术的可行性。在此基础上, 文献[72]与文献[73]利用反向散射技术分别实现了 Wi-Fi 协议与 LoRa 协议。受限于环境射频源的不可控特性, 环境反向散射技术的通信速率与范围不佳。为了提升环境反向散射技术的通信性能, 学者们开展了大量的研究, 主要包括性能分析、接收检测、信道估计等方向。

(1) 性能分析

文献[74]从信息论的角度推导了环境反向散射系统点对点链路的通信容量表达式。文献[75]分析了环境反向散射系统采用环境中正交频分复用信号时的最大可达速率, 并且指出了传统接收机与环境反向散射接收机集成在同一设备时, 反向散射过程产生的射频干扰可以转化为一种多径分集的形式。在此基础上, 文献[76]针对多标签环

境反向散射网络, 提出了一个标签选择策略和相应的检测方法, 并获得了近似误码率。文献[77]推导了实际有限字符信号下环境反向散射接收机基于能量检测的近似误码率, 并且得到了误码率中断概率的闭式解。在此基础上, 文献[78]研究了二进制调制下环境反向散射通信系统的互信息和中断概率, 获得了高信噪比状态下中断概率的渐进值。文献[79]推导了乘法高斯信道分布表达式, 并分析了环境反向散射系统的信道容量与中断概率。文献[80]考虑非线性能量收集模型及反向散射节点的能量因果关系, 在多小区场景中分析了反向散射链路为主用户链路的中断概率, 结果表明, 主次链路的共道干扰将会同时降低主次用户的中断性能。文献[81]考虑分布式天线的环境反向散射系统, 并分析了其中断性能, 结果表明, 分布式天线的通信性能优于集中式。文献[82]针对多天线环境反向散射信道分析了基于有限块长的最大可达速率和最大错误概率。文献[83]基于协作环境反向散射网络, 从物理层安全的角度推导了保密中断概率和保密能效。

(2) 接收检测

为探究环境反向散射系统的理论性能, 文献[84]研究了环境反向散射系统的信号检测及误码性能, 推导了误码率的闭式表达式, 并且通过最大似然比方法得到了最佳检测器。考虑阅读器难以获取信道状态信息, 文献[85]利用差分编码机制设计了非相干接收检测算法以避免信道状态依赖, 并推导了最小误码率检测器和最佳检测阈值。随后, 文献[86]利用差分编码的特性提出了一种联合能量检测算法解码反向散射信号, 在降低计算复杂度的同时有效提升了反向散射链路的误码率性能。但是, 基于差分编码的检测方案会导致部分信息丢失, 造成检测性能损失。因此, 文献[87]通过发射导频获取检测所需能量参数, 在信道状态信息不完美的情况下获得了最佳半相干检测器, 同时分析了误码率的中断概率。理论分析表

明, 半相干检测器在高信噪比场景下存在误码平台。为了避免对信道状态信息的依赖, 文献[88]利用聚类算法识别反向散射节点所调制的信息, 并且达到了较好的检测性能。文献[89]设计了基于曼彻斯特编码及差分曼彻斯特编码的半相干/非相干检测器, 有效提升了环境反向散射系统的误码率性能。文献[90]研究了 LDPC 编码的射频源信号下环境反向散射系统的检测性能, 此时误码率明显下降。为了增强能量检测器在低信噪比场景下的检测性能, 文献[91]提出了一种基于统计协方差的检测算法。文献[92]采用高阶相位键控调制方式进行反向散射传输以提升数据传输速率, 并设计了多门限的能量检测器。

受限于传统用户的直接链路干扰, 能量接收检测算法性能不佳。因此, 学者们从不同角度开展了相关研究。文献[93]通过部署双天线接收器提出了 μ mo 检测方案以消除直接链路干扰, 并通过实验平台搭建验证了方案的有效性及其可靠性。文献[94]提出了 Wi-Fi 接收器作为接收机的 BackFi 模型, 并利用全双工技术实现了自干扰消除。文献[95]提出了频移反向散射接收器, 通过将反射信号搬移到相邻频谱解码来避免直接链路干扰。文献[96]提出了一种反向散射波形设计方案, 并利用正交频分复用的循环前缀特性设计了相应的检测方案, 有效消除了直接链路的干扰。文献[97]基于 I/Q 不平衡的假设研究了环境反向散射系统中的符号检测问题。文献[98]基于多标签、多天线阅读器的环境反向散射系统, 提出了一种不需要任何信道状态信息下恢复出标签符号的非相干并行检测算法。

(3) 信道估计

为了避免发送导频资源, 文献[99]提出了一种基于期望最大化的盲估计算法来获得信道参数的模数值。在文献[99]的基础上, 文献[100]考虑具有多天线阅读器的环境反向散射系统, 并提出了一个基于协方差矩阵特征值分解的盲信道估计算法, 仿真结果表明此算法在低信噪比情况下也具

有良好的性能。由于基于特征值分解算法的复杂度具有较高的复杂度, 因此文献[101]借助最小二乘与傅里叶变换获得信道增益与波达方向估计值, 结果表明, 此算法有效提升了估计精度并降低了复杂性。文献[102]设计了通信协议以便获取环境反向散射通信系统的单个信道参数, 并且利用通信协议和导频信号提出了一个基于期望最大化的半盲估计算法。为了提高估计性能, 文献[103]研究频率选择性信道的环境反向散射模型信道估计问题, 并提出了一个基于最小二乘法的迭代算法来获得物联网设备处于不同状态时的信道参数估计。文献[104]将环境反向散射系统中的信道估计建模为去噪问题, 提出了一种基于卷积神经网络的深度残差学习去噪方案进行信道估计, 并采用多个三维去噪块来提高估计的准确性。考虑硬件的不理想情况, 文献[105]设计了基于先导的最大似然估计和期望最大化半盲估计算法用于联合估计信道、载波频率偏移和 I/Q 不平衡, 并证明了基于期望最大化的估计算法提高了频谱效率。文献[106]考虑全双工多天线环境反向散射系统, 分别提出了基于先导的最大似然估计算法、基于期望最大化和基于直接判决的半盲估计算法。仿真结果表明, 半盲估计算法具有更高的估计精度。

针对环境反向散射通信, 学者们在性能分析、接收检测及信道估计等方面做出了很多贡献, 但环境反向散射中的环境射频信号对被动通信链路造成的强干扰难以消除, 从而导致环境反向散射通信系统性能受限。

2.4 共生反向散射通信

2.4.1 寄生反向散射通信

(1) 性能分析

在寄生反向散射通信中, 主、被动系统符号周期长度相当, 此时, 次用户的接入给主系统带来共道干扰。为探讨共道干扰对主次系统的影响机理, 文献[107]考虑了由多个主用户与单个次用户组成的寄生反向散射通信网络, 在接收机采用



完美 SIC 的假设下, 推导分析了 Nakagami-m 信道衰落模型下各链路的中断概率闭式解及分集增益。文献[108]在不完美 SIC 及能量因果的约束下, 考虑了由主动通信系统发射机和多个反射设备组成的寄生反向散射系统, 推导了主、被动链路的中断概率。文献[107-108]的研究结果表明, 寄生共生中存在的共道干扰会导致主、次系统出现中断概率饱和现象, 即分集增益为 0。文献[109-110]研究了主动通信系统与多天线反射设备之间存在速率受限控制链路情况下的信道容量。文献[109]的研究结果表明, 通过将主系统的信息和反射设备的信息联合编码, 可使主链路的传输速率达到最大容量。文献[110]进一步推导出上述联合编码策略在高信噪比下信道容量的闭式解和在一般情况下信道容量的性能下界, 并提出了实际可行的低复杂度分层编码策略。

(2) 资源优化

在寄生反向散射通信系统设计中, 由于主、被动通信系统间涉及频谱、能量以及基础设施等多种通信资源共享, 因此合理的资源配置方案是提高寄生反向散射通信系统资源利用效率的关键因素之一。

文献[111]基于非线性能量收集模型和动态电路能耗模型, 在接收机采用非理想 SIC 的假设下, 研究了寄生反向散射通信网络中用户通信容量公平性保障的资源分配方法。文献[112]在考虑收发机存在硬件损伤的基础上, 受反向散射节点的能量因果约束以及主用户通信服务质量约束, 分别构建了单、多用户寄生反向散射网络模型下的多维资源优化问题, 通过联合优化反向散射节点的反射时间、反射系数以及主系统发射机的发射功率, 获得了寄生反向散射通信容量公平性保障的资源分配方案。文献[113]分别在静态与动态电路能量消耗模型的假设下, 通过优化发射功率与反向散射系数来最大化反向散射节点的遍历容量。文献[114]提出了主、次用户接收机相融合的协作接收机, 分析了基于 SIC 解码速率, 并通过优化

主用户发射机的波束形成向量来最大化主、次用户速率之和。

(3) 接收机设计

环境反向散射通信常用的能量检测方案将直接链路信号当作干扰, 故其检测性能受限。在共生反向散射通信中引入了新颖的接收机设计方法。

文献[115]通过利用接收天线的空间分集特征设计了物联网设备信号检测方案, 可有效消除直接链路干扰, 且避免了误码率曲线出现平台现象。文献[116]引入了联合接收机对主、被动系统发送信号进行联合检测。联合接收机需同时恢复主、被动系统的发送信号, 并且已知主、被动系统的导频信息。在此情况下, 联合接收机可估计得到所需的信道状态信息。文献[116]提出了 3 种接收机设计方案, 分别为最大似然接收机设计方案、线性接收机设计方案、基于串行干扰消除的迭代接收机设计方案。

2.4.2 互惠共生反向散射通信

(1) 性能分析

文献[117]提出了一种基于蜂窝网络的互惠共生反向散射通信网络模型, 在该网络中主动通信系统发射机与联合接收机分别配备了 M 和 N 根天线。在联合接收机已知信道状态信息的条件下, 分别得到主链路和反射链路的遍历容量上界, 并进一步得到了网络的功率缩放律, 结果表明: 随着天线数量的增加, 主动通信系统的发射功率按比例 $\frac{1}{(\sqrt{M} + \sqrt{N})^2}$ 减少。在主、被动通信系统分

别采用四相移相键控 (QPSK) 和双相移键控 (BPSK) 的情况下, 文献[118]推导了主链路和反射链路的误码率, 并且得出了主被动系统传输信号符号周期比是影响主动通信系统传输性能的关键。文献[119]假设网络中各节点均配备单根天线, 且反射设备采用非线性能量收集模型, 利用杰森不等式分别推导得到主链路和反射链路的中断概率上界, 在瑞利衰落信道模型下, 与传统端到端主动

通信相比,由反射链路引入的有用多径使互惠协作模式下的主链路分集增益由 1 提升至 2。上述工作^[117-119]均在收发端理想的情况下展开,文献[120]推导了硬件损伤条件下互惠共生模式中主链路和反射链路的通信容量,并证明了硬件损伤会降低主被动通信系统的传输性能,使主链路和反射链路均存在速率上限,但不会破坏主被动通信系统间的互惠传输关系。由于遭受双重路损的单个反向散射节点提供的主链路性能增益极其有限,文献[121]针对大规模反向散射节点的多输入多输出共生反向散射通信系统,研究了主链路和反向散射链路的可达速率并进行了渐进分析。

(2) 资源优化

为进一步提高该通信系统的资源利用效率,文献[6]分别以最大化加权和速率以及最小化传输功率为目标,设计了主动通信系统最优传输波束成形算法,并利用该系统传输波束成形向量所具备的特殊结构进一步降低了所提算法的计算复杂度。文献[122]在多个物联网设备的场景下推导了主链路和反射链路的可达速率,优化了接收机的波束成形向量,从而最大限度地提高主链路的吞吐量。文献[123]考虑了一个下行多入单出的互惠共生反向散射通信系统,基于反向散射链路采用的有限块长度信道编码,分别推导了主链路和反射链路的可达速率,并提出了一种基于能效最大化的资源分配方案。文献[124]考虑了多个能量受限的反射设备,通过联合优化主动通信系统发射机发射功率、反射设备的反射系数以及时隙资源,最大化系统的能量效率。结果表明,主链路主导了系统的能量效率。在文献[124]的基础上,文献[120]在收发端均存在硬件损伤的情况下,通过联合优化每个反射设备的反射系数、发射功率以及时隙分配来最大化主链路和反射链路加权和速率。文献[125]基于空分多址和时分多址接入技术构建了不同的次用户和速率最大化问题,分别从主用户接收机单天线和多天线的角度求解了所建立的优化问题。

(3) 接收机设计

如何在接收端恢复出原始信号是互惠共生反向散射通信的一个研究方向。文献[7]设计了多种接收机方案用于恢复原始信号。具体地,当主被动系统间的导频信号互知时,可以采用诸如最大似然检测器、线性检测器以及基于 SIC 技术的检测器来设计相干接收机。当主被动通信系统间的导频信号不互知时,可以采用聚类框架的机器学习检测器来设计半盲接收机。

2.4.3 融主被动传输的寄生反向散射通信

文献[9]将主、被动混合通信模式用于反向散射节点的信息传输与能量收集,分别在填充式和下垫式两种频谱共享模式下研究了反向散射节点容量最大化的资源分配方法。为了削弱次用户对主用户的干扰,文献[16]根据主用户所受干扰的程度将次用户分为协作式和共存式,并基于上述场景研究了次系统和吞吐量最大化问题。为提高次系统的吞吐量,文献[17]将环境反向散射与非正交多址辅助的共生无线网络相结合,其中次用户可交替进行被动通信和主动通信。基于此,通过优化被动通信与主动通信的时间资源设计吞吐量最大化资源分配方案。文献[126]基于不同的用户位置,分别针对微波域及 Wi-Fi 域,通过优化时隙分配以最大化吞吐量。文献[127]通过优化联合反向散射、能量收集以及反向散射模式和收集再传输模式之间的时间分配来最大化被动通信系统的吞吐量。文献[128]优化了反向散射和能量收集之间的时间分配,以及多个发射机之间的时间分配,以此来最大限度地提高射频供电共生网络的吞吐量。

针对共生反向散射通信,学者们分别基于寄生反向散射、互惠共生反向散射及融主被动传输的寄生反向散射通信展开了研究。然而,寄生反向散射无法消除次用户给主用户带来的干扰,从而降低了主用户参与协作的积极性;而互惠反向散射虽然可以保证主用户的性能增益,但次用户传输速率较低,无法满足中高传输速率要求的物联网场景。



3 融主被动传输的互惠共生反向散射通信

基于现有反向散射通信演进框架的优缺点及研究内容,本节给出融主被动传输的互惠共生反向散射通信架构,针对该架构,考虑多个次用户的应用场景进行初步的研究并通过仿真给出相应的性能。

3.1 基本原理

融主被动传输的互惠共生反向散射通信将主被动混合携能通信与互惠共生反向散射通信相结合,充分利用主被动混合通信在速率和能耗方面的互补性以及主、次用户之间的互惠共生关系,在提高次用户传输速率的同时充分调动了主用户参与协作的积极性。融主被动传输的互惠共生反向散射通信架构如图 7 所示,该网络中反向散射设备(次用户)同时配备了能量收集电路、反射调制电路和主动调制电路,以便能够进行能量收集和主被动混合通信。在通信过程中,主用户采用主动通信的方式传输信息,次用户将整个传输时段划分为两个阶段,即反向散射阶段 t_1 和主动传输阶段 t_2 。在反向散射阶段,次用户利用主用

户的信号进行反向散射通信,且次用户的符号周期远大于主用户的符号周期,此时次用户的反射信号中同时包含主、次用户的信息,接收机可采用联合信号检测方法将次用户的反向散射信号“转化”为对主用户有益的多径分量,从而提高主用户的通信容量,然而该阶段次用户因采用被动通信方式导致传输速率较低。在主动传输阶段,主、次用户均进行主动通信,二者之间存在共道干扰,此时主用户的性能有所下降,而次用户可以获得较高的速率。综上所述,该网络中主、次用户的性能存在一定的权衡关系,相对于融主被动传输的寄生反向散射通信而言,所提通信架构可以通过设计高效的资源分配算法在提升次用户传输性能的同时为主用户传输性能带来增益,从而调动主用户参与协作的积极性。

3.2 系统模型

系统模型如图 8 所示,考虑由一个主用户(PT)、 K 个次用户($BD_i, i=1,2,\dots,K$)及一个接收机(R)组成的融主被动传输的互惠共生反向散射通信网络。在该网络中,整个传输阶段被划分为

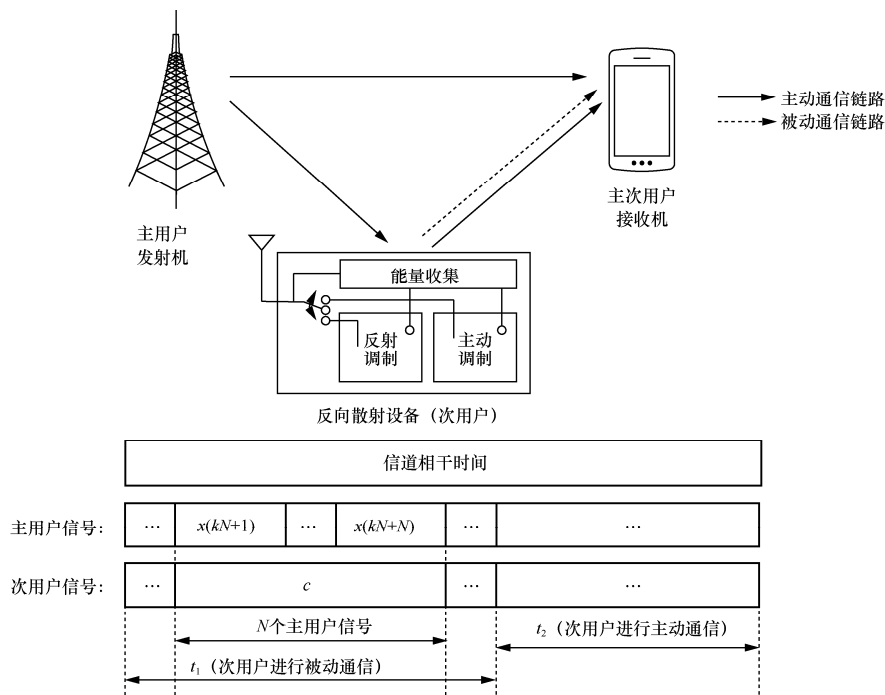


图 7 融主被动传输的互惠共生反向散射通信架构

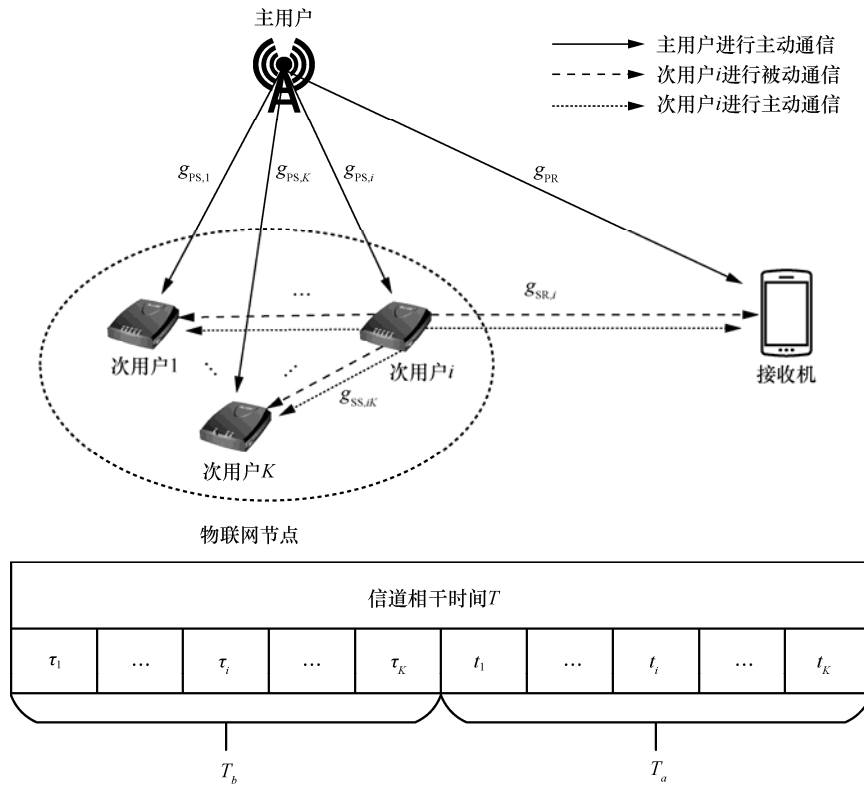


图 8 系统模型

被动通信阶段 T_b 和主动通信阶段 T_a 。在被动通信阶段，次用户以时分多址的方式依次进行被动通信，不进行被动通信的次用户利用主用户的信号及次用户的反向散射信号进行能量收集。在主动通信阶段，次用户以时分多址的方式依次进行主动通信，不进行主动通信的次用户利用主用户的信号及次用户进行主动通信的信号来收集能量。针对该模型，以最大化次用户和速率为目标，在主用户速率增益约束和各次用户能量因果约束下，通过联合优化主用户发射功率、次用户进行被动通信和主动通信的时间、次用户反向散射系数及主动通信的发射功率，构建一个多维资源非凸优化问题。针对所建立的优化问题，经过一系列的数学操作将其转化为计算机易求解的凸优化问题，最后利用 MATLAB 中的 CVX 工具包进行求解和仿真。由于本文属于综述性文章，不便放置很多计算式，因此省略了优化问题的构建与求解过程，仅展示部分仿真结果。

3.3 仿真分析

为了便于分析，在仿真过程中笔者考虑了 $K=2$ ，即存在两个次用户的情况，并将相关参数设置如下：PT、BD₁、BD₂、R 的坐标分为(0, 0)、(0.8, 0)、(0, 1)、(100, 1)，信道带宽为 10 kHz，噪声功率为 -60 dB，能量转换效率为 0.8，反向散射电路功耗为 1×10^{-5} W，次用户进行主动通信的电路功耗为 1×10^{-3} W，各条路径间的路损因子 $\alpha_i = (3.5, 2.5, 2.9, 2.5, 2.9, 2.5)$ ， $i \in \{\text{PR}, \text{PBD}_1, \text{BD}_1\text{R}, \text{PBD}_2, \text{BD}_2\text{R}, \text{BD}_1\text{BD}_2\}$ 。

基于上述参数设置，不同方案下次用户和速率随主用户功率变化曲线如图 9 所示，给出了所给融主被动传输的互惠共生反向散射通信网络与互惠共生网络中次用户和速率随主用户发射功率变化的曲线。该互惠共生网络由一个主用户、 K 个次用户以及一个接收机组成，在该网络中，次用户仅采用被动通信进行信息传输。不难看出，在不同的主用户发射功率下，所提出的融主被动传输的互惠共



生反向散射通信网络中,次用户和速率均远大于互惠共生网络中的次用户和速率。除此之外,所给网络中次用户和速率会随着主用户最小速率增益的增大而减小,这是由于主用户速率的增加要求次用户进行被动通信的时间增加,当总传输时间一定时,次用户进行主动通信的时间降低,从而造成次用户和速率降低。为进一步探究主用户速率与次用户和速率之间的相对变化关系,次用户和速率与主用户最小速率增益的关系如图 10 所示,给出了所给融主被动传输的互惠共生反向散射通信网络的次用户和速率随主用户最小速率增益的变化曲线,由图 10 可知,次用户和速率随着主用户最小速率增益的增加而减少。通过比较主用户最小速率增益与次用户和速率的变化幅度,可以发现:在一定范围内,次用户和速率的下降幅度略低于主用户最小速率增益变化,这是因为次用户在被动通信阶段会产生对主用户有益的多径分量,从而补偿次用户在主动通信阶段对主用户造成的干扰;但是,当主用户的最小速率增益增加到一定值时,次用户和速率的下降幅度逐渐高于主用户最小速率增益变化,这是因为,次用户在被动通信阶段为主用户带来的性能增益不足以抵消主动传输阶段对主用户传输速率造成的损失。

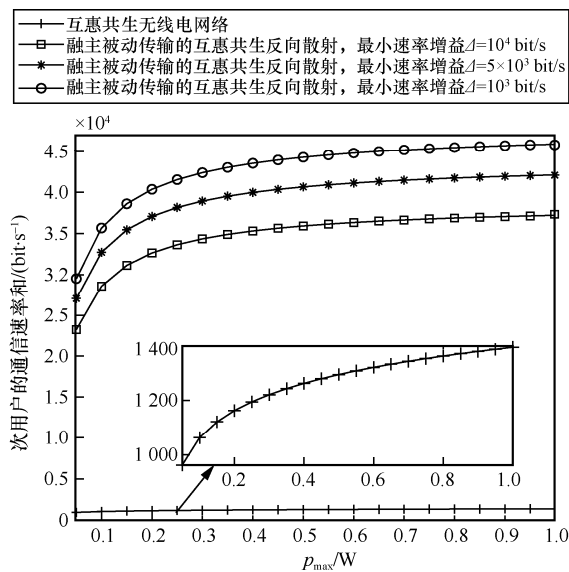


图 9 不同方案下次用户和速率随主用户功率变化曲线

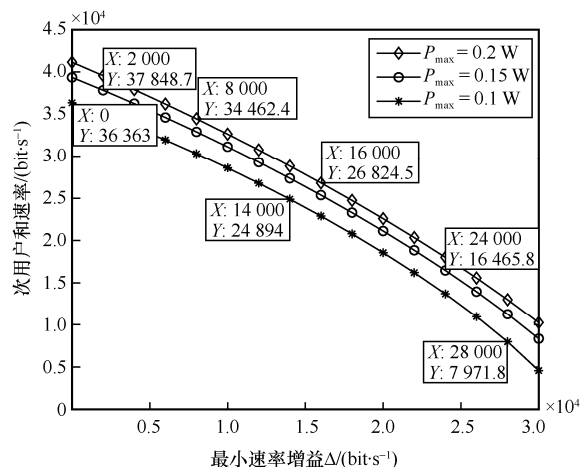


图 10 次用户和速率与主用户最小速率增益的关系

通过上述分析可得,融主被动传输的互惠共生反向散射通信能够在提升次用户传输性能的同时,为主用户传输性能带来增益,从而调动主用户参与协作的积极性,但接收机的解码复杂度较高,适用于频谱短缺、次用户速率要求较高、主次用户互惠且接收机性能较优的通信场景。

4 未来研究展望

融主被动传输的互惠共生反向散射通信将融主被动混合携能通信与互惠共生通信相结合,充分利用二者自身的潜在优势,以期实现互惠共生网络中次用户传输性能的增强。现阶段,该技术的发展正处于萌芽期,其理论研究面临诸多挑战。结合反向散射通信相关研究内容,本节旨在展望该技术的未来研究方向,为后续研究提供思路和启发。

受前期相关研究工作的启发,笔者将从信道估计、资源优化及性能分析 3 个方面讨论融主被动传输的互惠共生反向散射通信的研究趋势。

(1) 信道估计

融主被动传输的互惠共生反向散射通信中,主、次用户间存在的共道干扰问题对系统性能有着重要的影响,现有基于最大似然估计或 SIC 技术的检测算法性能很大程度上依赖于信道估计的

性能, 而反向散射通信所特有的乘性信道给这一问题带来了挑战。因此, 如何设计合理的导频方案、提出精确且复杂度较低的信道估计算法是一个重要的研究方向。随着深度学习的发展, 将深度学习技术与信道估计相结合, 可以有效估计复杂的信道环境, 对于提高反向散射通信性能具有重要作用。与此同时, 基于精确的信道估计, 如何借助信号检测与估值理论设计合适的接收机, 从而在接收端恢复得到原始信号同样是一个值得探索的问题。

(2) 资源优化

不同于互惠共生反向散射通信, 由于主动通信和被动通信在能量和传输速率上的互补特性, 融主被动传输的互惠共生反向散射通信中次用户的主被动混合通信方式使得主、次系统性能存在一定的权衡关系。因此, 如何面向不同的应用场景设计高效的资源分配方案以保证整个系统互惠增益, 与此同时还提升次用户的传输性能, 这是一个值得探索的研究方向。由于融主被动传输的互惠共生反向散射通信网络较为复杂, 所构建的多维资源分配问题存在多个耦合关系, 此时可以借助优化理论进行问题求解。

(3) 性能分析

由于融主被动传输的互惠共生反向散射通信是互惠共生网络和融主被动混合携能通信网络的有机融合体, 其信道容量表达式不同于互惠共生网络和融主被动混合携能通信网络。因此, 已有的基于互惠共生网络或融主被动混合携能通信网络的性能描述, 不再适用于融主被动传输的互惠共生反向散射通信, 例如, 所提系统需要考虑次用户进行主被动混合通信的时隙划分以及接收机解码顺序对系统性能的影响机理。因此, 针对融主被动传输的互惠共生反向散射通信网络, 如何借助随机过程、随机几何等理论展开性能分析是一个重要的研究方向。

5 结束语

本文围绕反向散射通信技术展开了综述。首先, 简单回顾了反向散射通信的基本原理及演进架构, 总结了不同网络架构的优缺点。其次, 针对不同的网络架构对现有工作进行了综述。基于此, 给出了融主被动传输的互惠共生反向散射通信架构, 进行了初步的研究并给出相应的性能分析。最后, 结合已有工作研究方向, 对所给通信架构的研究趋势进行了展望。融主被动传输的互惠共生反向散射通信不仅能够有效缓解物联网所面临的频谱与能量双重受限问题, 而且可以提高共生反向散射通信中次用户的传输速率, 有望成为物联网的关键技术之一。

参考文献:

- [1] HU J, WANG Q, YANG K. Energy self-sustainability in full-spectrum 6G[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 28(1): 104-111.
- [2] 宋一杭. 面向物联网弱终端的低功耗通信及接入理论和关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
SONG Y H. Research on low power communication and access theory and key technologies for weak terminals of Internet of Things[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [3] Ericsson. Ericsson mobility report Q4 2021 update[S]. 2021.
- [4] SONG C Y, DING Y, EID A, et al. Advances in wirelessly powered backscatter communications: from antenna/RF circuitry design to printed flexible electronics[J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 110(1): 171-192.
- [5] 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.
- [6] LONG R Z, LIANG Y C, GUO H, et al. Symbiotic radio: a new communication paradigm for passive Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 7(2): 1350-1363.
- [7] LIANG Y C, ZHANG Q Q, LARSSON E G, et al. Symbiotic radio: cognitive backscattering communications for future wireless networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(4): 1242-1255.



- [8] 工业和信息化部. “十四五”信息通信行业发展规划[EB]. 2021.
MIIT. The 14th Five-Year Plan for the development of the information and communication industry[EB]. 2021.
- [9] HOANG D T, NIYATO D, WANG P, et al. Ambient backscatter: a new approach to improve network performance for RF-powered cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(9): 3659-3674.
- [10] STOCKMAN H. Communication by means of reflected power[J]. *Proceedings of the IRE*, 1948, 36(10): 1196-1204.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] GRIFFIN J D, DURGIN G D. Complete link budgets for backscatter-radio and RFID systems[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2009, 51(2): 11-25.
- [14] KIMIONIS J, BLETSAS A, SAHALOS J N. Increased range bistatic scatter radio[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(3): 1091-1104.
- [15] LU X, NIYATO D, JIANG H, et al. Ambient backscatter assisted wireless powered communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(2): 170-177.
- [16] LIU Z X, ZHAO S H, YANG Y, et al. Toward hybrid backscatter-aided wireless-powered Internet of things networks: cooperation and coexistence scenarios[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(8): 6264-6276.
- [17] ZHUANG Y D, LI X, JI H, et al. Optimal resource allocation for RF-powered underlay cognitive radio networks with ambient backscatter communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15216-15228.
- [18] MISHRA D, LARSSON E G. Optimal channel estimation for reciprocity-based backscattering with a full-duplex MIMO reader[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(6): 1662-1677.
- [19] MISHRA D, LARSSON E G. Optimizing reciprocity-based backscattering with a full-duplex antenna array reader[C]//*Proceedings of 2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [20] HE C, CHEN S D, LUAN H X, et al. Monostatic MIMO backscatter communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1896-1909.
- [21] YERZHANOVA M, KIM Y H. Design of a multi-device backscatter communication system with a multi-antenna reader[C]//*Proceedings of 2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 975-977.
- [22] MISHRA D, YUAN J H. Optimizing backscattering coefficient design for minimizing BER at monostatic MIMO reader[C]//*Proceedings of ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 9165-9169.
- [23] SACARELO G, KIM Y H. Beamforming and reflection coefficient control for multiantenna backscatter communication with nonorthogonal multiple access[J]. *IEEE Access*, 2021(9): 56104-56114.
- [24] HAKIMI A, ZARGARI S, TELLAMBURA C, et al. Sum rate maximization of full-duplex MIMO monostatic backscatter networks under residual self-interference[C]//*Proceedings of 2022 17th Canadian Workshop on Information Theory (CWIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 103-108.
- [25] HAKIMI A, ZARGARI S Y, TELLAMBURA C, et al. Sum rate maximization of MIMO monostatic backscatter networks by suppressing residual self-interference[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(1): 512-526.
- [26] MOVAHEDNASAB M, PAKRAVAN M R, MAKKI B, et al. On energy allocation and data scheduling in backscatter networks with multi-antenna readers[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021(2): 1674-1689.
- [27] BI D M, MISHRA D, ATA KARAMIANS S, et al. Optimal designs for throughput and range maximization in backscattering tag-to-tag network[C]//*Proceedings of 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-7.
- [28] SACARELO G, KIM Y H. Rate-energy tradeoffs of wireless powered backscatter communication with power splitting and time switching[J]. *IEEE Access*, 2021(9): 10844-10857.
- [29] BEKKALI A, ZOU S C, KADRI A, et al. Performance analysis of passive UHF RFID systems under cascaded fading channels and interference effects[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(3): 1421-1433.
- [30] GUO J, ZHOU X Y, DURRANI S, et al. Backscatter communications with NOMA (invited paper)[C]//*Proceedings of 2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [31] AL-BADARNEH Y H, ALOUINI M S, GEORGHIADES C N. Performance analysis of monostatic multi-tag backscatter systems with general order tag selection[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(8): 1201-1205.

- [32] GUO J, DURRANI S, ZHOU X Y. Monostatic backscatter system with multi-tag to reader communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 10320-10324.
- [33] AL-NAHARI A, JANTTI R, MISHRA D, et al. Massive MIMO beamforming in monostatic backscatter multi-tag networks[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(4): 1323-1327.
- [34] AL-NAHARI A, JANTTI R, DUAN R F, et al. Multi-bounce effect in multi-tag monostatic backscatter communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(1): 43-47.
- [35] HINTEREGGER S, LEITINGER E, MEISSNER P, et al. MIMO gain and bandwidth scaling for RFID positioning in dense multipath channels[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on RFID (RFID). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [36] KHAN Y, AFZAL A, DUBEY A. Capacity analysis of RIS-aided backscatter communication systems[C]//Proceedings of 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.
- [37] KIMIONIS J, BLETSAS A, SAHALOS J N. Bistatic backscatter radio for tag read-range extension[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA). Piscataway: IEEE Press, 2012: 356-361.
- [38] HUA M, YANG L X, LI C G, et al. Bistatic backscatter communication: shunt network design[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 8(9): 7691-7705.
- [39] YANG B X, WANG S L, DING H Y, et al. Signal detection for bistatic backscatter with dual antennas[C]//Proceedings of 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1195-1199.
- [40] KAPLAN A, VIEIRA J, LARSSON E G. Dynamic range improvement in bistatic backscatter communication using distributed MIMO[C]//Proceedings of GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 2486-2492.
- [41] KIMIONIS J, BLETSAS A, SAHALOS J N. Bistatic backscatter radio for power-limited sensor networks[C]//Proceedings of 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2013: 353-358.
- [42] LIU Y F, SHENG X T, FANG K P, et al. Energy efficiency maximization in bistatic backscatter communications with QoS constraint[C]//Proceedings of 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 920-925.
- [43] YE Y H, SHI L Q, HU R Q Y, et al. Energy-efficient resource allocation for wirelessly powered backscatter communications[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(8): 1418-1422.
- [44] YANG H H, YE Y H, CHU X L. Max-Min energy-efficient resource allocation for wireless powered backscatter networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(5): 688-692.
- [45] JIA X L, ZHOU X Y. Power beacon placement for maximizing guaranteed coverage in bistatic backscatter networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(11): 7895-7909.
- [46] XU R, YE Y H, SUN H J, et al. Wireless powered opportunistic cooperative backscatter communications: to relay or not?[C]//Proceedings of 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [47] YE Y H, SHI L Q, CHU X L, et al. Throughput fairness guarantee in wireless powered backscatter communications with HTT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 10(3): 449-453.
- [48] YE Y H, SHI L Q, CHU X L, et al. Total transmission time minimization in wireless powered hybrid passive-active communications[C]//Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [49] VAN HUYNH N, HOANG D T, NIYATO D, et al. Optimal time scheduling for wireless-powered backscatter communication networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(5): 820-823.
- [50] SHI L Q, HU R Q Y, GUNTHER J, et al. Energy efficiency for RF-powered backscatter networks using HTT protocol[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 13932-13936.
- [51] LIU Y F, ZHANG Z H, SHI L Q, et al. Backscatter assisted wireless powered non-orthogonal multiple access systems[C]//Proceedings of 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 339-343.
- [52] YANG G, XU X Y, LIANG Y C. Resource allocation in NOMA-enhanced backscatter communication networks for wireless powered IoT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 9(1): 117-120.
- [53] IHSAN A, CHEN W, KHAN W U, et al. Energy-efficient backscatter aided uplink NOMA roadside sensor communications under channel estimation errors[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(5): 4962-4974.
- [54] XU Y, XU R, LI D, et al. Robust resource allocation for wireless-powered backscatter communication systems with NOMA[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(9): 12288-12299.
- [55] ASIF M, IHSAN A, KHAN W U, et al. Energy-efficient backscatter-assisted coded cooperative NOMA for B5G wire-



- less communications[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2023, 7(1): 70-83.
- [56] JIA X L, ZHAO J, ZHOU X Y, et al. Intelligent reflecting surface-aided backscatter communications[C]//Proceedings of GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [57] JIA X L, ZHOU X Y, NIYATO D, et al. Intelligent reflecting surface-assisted bistatic backscatter networks: Joint beamforming and reflection design[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 6(2): 799-814.
- [58] MAO S, YANG K, HU J, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless powered hybrid backscatter-active communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(1): 1383-1388.
- [59] SHI L Q, YE Y H, ZHENG G, et al. Computational EE fairness in backscatter-assisted wireless powered MEC networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(5): 1088-1092.
- [60] YE Y H, SHI L Q, CHU X L, et al. Delay minimization in wireless powered mobile edge computing with hybrid and AT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(7): 1532-1536.
- [61] SHI L Q, YE Y H, CHU X L, et al. Energy-efficient resource allocation for backscatter-assisted wireless powered MEC[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(7): 9591-9596.
- [62] YE Y H, SHI L Q, CHU X L, et al. Resource allocation in backscatter-assisted wireless powered MEC networks with limited MEC computation capacity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(12): 10678-10694.
- [63] ZARGAII S, TELLAMBURA C, HERATH S. Energy-efficient hybrid offloading for backscatter-assisted wirelessly powered MEC with reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 22(9): 5262-5279.
- [64] YANG S Z, DENG Y S, TANG X X, et al. Energy efficiency optimization for UAV-assisted backscatter communications[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(11): 2041-2045.
- [65] 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, 2020, 20(2): 926-941.
- [66] 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, 2021, 21(5): 2876-2891.
- [67] NAZAR A W, HASSAN S A, JUNG H, et al. BER analysis of a backscatter communication system with non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(2): 574-586.
- [68] USMAN M, BASHARAT S, PERVAIZ H, et al. On the BER performance of RIS-enhanced NOMA-assisted backscatter communication under nakagami-m fading[C]//Proceedings of 2022 IEEE 42nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW). Piscataway: IEEE Press, 2022: 163-168.
- [69] LIU Y T, YE Y H, HU R Q Y. Secrecy outage probability in backscatter communication systems with tag selection[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(10): 2190-2194.
- [70] LIU Z P, YE Y H, CHU X L, et al. Secrecy performance of backscatter communications with multiple self-powered tags[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(12): 2875-2879.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] KELLOGG B, PARKS A, GOLLAKOTA S, et al. Wi-Fi backscatter: internet connectivity for RF-powered devices[C]//Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM. New York: ACM Press, 2014: 607-618.
- [74] DARSENA D, GELLI G, VERDE F. Performance analysis of ambient backscattering for green Internet of things[C]//Proceedings of 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [75] DARSENA D, GELLI G, VERDE F. Modeling and performance analysis of wireless networks with ambient backscatter devices[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(4): 1797-1814.
- [76] ZHOU X Y, WANG G P, WANG Y W, et al. An approximate BER analysis for ambient backscatter communication systems with tag selection[J]. IEEE Access, 2017(5): 22552-22558.
- [77] ZHANG Y, QIAN J, GAO F F, et al. Outage probability for ambient backscatter system with real source[C]//Proceedings of 2017 IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [78] ZHAO W J, WANG G P, ATAPATTU S, et al. Outage analysis of ambient backscatter communication systems[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(8): 1736-1739.
- [79] ZHAO W J, WANG G P, FAN R F, et al. Ambient backscatter communication systems: capacity and outage performance

- analysis[J]. IEEE Access, 2018(6): 22695-22704.
- [80] SHI L Q, HU R Q Y, YE Y H, et al. Modeling and performance analysis for ambient backscattering underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6563-6577.
- [81] RAO L, TAO Q, ZHONG C J. Outage performance of ambient backscatter communication system with distributed antennas[C]//Proceedings of 2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [82] SUI L, LIN Z, XIAO P, et al. Performance analysis of multiple-antenna ambient backscatter systems at finite block-lengths[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(18): 16061-16075.
- [83] LI X, JIANG J, WANG H, et al. Physical layer security for wireless-powered ambient backscatter cooperative communication networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2023, 9(4): 927-939.
- [84] QIAN J, GAO F F, WANG G P, et al. Symbol detection and performance analysis of the ambient backscatter system[C]//Proceedings of 2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [85] WANG G P, GAO F F, FAN R F, et al. Ambient backscatter communication systems: detection and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(11): 4836-4846.
- [86] QIAN J, GAO F F, WANG G P, et al. Noncoherent detections for ambient backscatter system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1412-1422.
- [87] QIAN J, GAO F F, WANG G P, et al. Semi-coherent detection and performance analysis for ambient backscatter system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(12): 5266-5279.
- [88] ZHANG Q Q, GUO H Y, LIANG Y C, et al. Constellation learning based signal detection for ambient backscatter communication systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(2): 452-463.
- [89] TAO Q, ZHONG C J, LIN H, et al. Symbol detection of ambient backscatter systems with Manchester coding[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(6): 4028-4038.
- [90] HU Y K, WANG P, LIN Z H, et al. Performance analysis of ambient backscatter systems with LDPC-coded source signals[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(8): 7870-7884.
- [91] ZENG T C, WANG G P, WANG Y W, et al. Statistical covariance based signal detection for ambient backscatter communication systems[C]//Proceedings of 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [92] QIAN J, PARKS A N, SMITH J R, et al. IoT communications with M-PSK modulated ambient backscatter: algorithm, analysis, and implementation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(1): 844-855.
- [93] PARKS A N, LIU A L, GOLLAKOTA S, et al. Turbocharging ambient backscatter communication[C]//Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM (SIGCOMM'14), Association for Computing Machinery. New York: ACM Press, 2014: 619-630.
- [94] BHARADIA D, JOSHI K R, KOTARU M, et al. BackFi: high throughput Wi-Fi backscatter[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2015, 45(4): 283-296.
- [95] ZHANG P Y, ROSTAMI M, HU P, et al. Enabling practical backscatter communication for on-body sensors[C]//Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference. New York: ACM Press, 2016: 370-383.
- [96] YANG G, LIANG Y C, ZHANG R, et al. Modulation in the air: backscatter communication over ambient OFDM carrier[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 66(3): 1219-1233.
- [97] YE Y H, ZHAO J J, CHU X L, et al. Symbol detection of ambient backscatter communications under IQ imbalance[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(5): 6862-6867.
- [98] YANG G, LUO Z, JIN N, et al. Non-coherent parallel detection of ambient backscatter communications with multiple tags[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(4): 5344-5349.
- [99] MA S, WANG G P, FAN R F, et al. Blind channel estimation for ambient backscatter communication systems[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(6): 1296-1299.
- [100] ZHAO W J, WANG G P, ATAPATTU S, et al. Blind channel estimation in ambient backscatter communication systems with multiple-antenna reader[C]//Proceedings of 2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 320-324.
- [101] ZHAO W J, WANG G P, ATAPATTU S, et al. Channel estimation for ambient backscatter communication systems with massive-antenna reader[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 8254-8258.
- [102] MA S, ZHU Y, WANG G P, et al. Machine learning aided channel estimation for ambient backscatter communication systems[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 67-71.



- [103] ZHU Y, WANG G P, TANG H L, et al. Channel estimation for ambient backscatter systems over frequency-selective channels[C]//Proceedings of 2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 384-388.
- [104] LIU X M, LIU C, LI Y, et al. Deep residual learning-assisted channel estimation in ambient backscatter communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 10(2): 339-343.
- [105] ABDALLAH S, SALAMEH A I, SAAD M. Joint channel carrier frequency offset and I/Q imbalance estimation in ambient backscatter communication systems[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(7): 2250-2254.
- [106] ABDALLAH S, VERBOVEN Z, SAAD M, et al. Channel estimation for full-duplex multi-antenna ambient backscatter communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(5): 3059-3072.
- [107] ELSAYED M, SAMIR A, EL-BANNA A A A, et al. When NOMA multiplexing meets symbiotic ambient backscatter communication: outage analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(1): 1026-1031.
- [108] YE Y H, SHI L Q, CHU X L, et al. On the outage performance of ambient backscatter communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(8): 7265-7278.
- [109] KARASIK R, SIMEONE O, DI RENZO M, et al. Beyond max-SNR: joint encoding for reconfigurable intelligent surfaces[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 2965-2970.
- [110] KARASIK R, SIMEONE O, RENZO M D, et al. Adaptive coding and channel shaping through reconfigurable intelligent surfaces: an information-theoretic analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(11): 7320-7334.
- [111] 高晓娜, 卢光跃, 叶迎晖, 等. 认知反向散射网络通信容量公平的资源优化[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(6): 26-32.
- GAO X N, LU G Y, YE Y H, et al. Throughput fairness guarantee in cognitive backscattering networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(6): 26-32.
- [112] GAO X N, SHI L Q, LU G Y. Throughput fairness in cognitive backscatter networks with residual hardware impairments and a nonlinear EH model[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2022(1): 1-16.
- [113] KANG X, LIANG Y C, YANG J. Riding on the primary: a new spectrum sharing paradigm for wireless-powered IoT devices[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(9): 6335-6347.
- [114] LONG R Z, YANG G, PEI Y Y, et al. Transmit beamforming for cooperative ambient backscatter communication systems[C]//Proceedings of GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [115] GUO H Y, ZHANG Q Q, XIAO S, et al. Exploiting multiple antennas for cognitive ambient backscatter communication[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(1): 765-775.
- [116] YANG G, ZHANG Q Q, LIANG Y C. Cooperative ambient backscatter communications for green Internet-of-things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 1116-1130.
- [117] ZHOU S Q, XU W, WANG K Z, et al. Ergodic rate analysis of cooperative ambient backscatter communication[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(6): 1679-1682.
- [118] ZHANG Q Q, LIANG Y C, YANG H C, et al. Mutualistic mechanism in symbiotic radios: when can the primary and secondary transmissions be mutually beneficial?[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(10): 8036-8050.
- [119] 叶迎晖, 田雨佳, 卢光跃, 等. 基于能量收集的互惠共生无线电中断性能分析[J]. 电子与信息学报, 2022, 45(7): 2350-2357.
- YE Y H, TIAN Y J, LU G Y, et al. Outage performance of commensal symbiotic radio based on energy harvesting[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 45(7): 2350-2357.
- [120] YE Y H, SHI L Q, CHU X, L et al. Mutualistic cooperative ambient backscatter communications under hardware impairments[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(11): 7656-7668.
- [121] XU J, DAI Z, ZENG Y. MIMO symbiotic radio with massive backscatter devices: asymptotic analysis and precoding optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(9): 5487-5502.
- [122] XU J R, DAI Z Y, ZENG Y. Enabling full mutualism for symbiotic radio with massive backscatter devices[C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [123] CHU Z, HAO W M, XIAO P, et al. Resource allocations for symbiotic radio with finite blocklength backscatter link[J]. IEEE Internet of Things journal, 2020, 7(9): 8192-8207.
- [124] YANG H H, YE Y H, LIANG K, et al. Energy efficiency maximization for symbiotic radio networks with multiple backscatter devices[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021(2): 1431-1444.
- [125] JIN N, YANG G, LIANG Y C, et al. Joint beamforming and backscatter communication design for symbiotic radio net-

works[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3246101.

[126]KIM S H, KIM D I. Hybrid backscatter communication for wireless-powered heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(10): 6557-6570.

[127]LYU B, GUO H Y, YANG Z, et al. Throughput maximization for hybrid backscatter assisted cognitive wireless powered radio networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(3): 2015-2024.

[128]HOANG D T, NIYATO D, WANG P, et al. Optimal time sharing in RF-powered backscatter cognitive radio networks[C]// Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.

[作者简介]



叶迎晖（1991—），男，西安邮电大学副教授，主要研究方向为携能通信、移动边缘计算等。



徐瑞（2000—），女，西安邮电大学硕士生，主要研究方向为反向散射通信等。



田雨佳（1998—），男，西安邮电大学硕士生，主要研究方向为反向散射通信等。



卢光跃（1971—），男，西安邮电大学教授，主要研究方向为信号与信息处理、频谱感知、大数据分析等。