

反向散射通信网络资源分配综述

徐勇军^{1,2}, 杨浩克¹, 叶迎晖², 陈前斌¹, 卢光跃²

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;

2. 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: 随着物联网技术的发展, 无线网络呈现出大规模用户接入、高功耗、高吞吐量需求等特点。为了满足传输和降低能耗的需求, 反向散射通信技术被认为是解决上述问题最有效的方案之一。面对复杂的网络场景, 提高网络的频谱效率、系统容量以及节点的能量管理, 成为了当前反向散射通信资源分配领域亟待解决的问题。针对该问题, 着重对反向散射通信网络资源分配算法进行了综述。首先, 介绍了反向散射通信的基本概念, 并对不同的反向散射通信网络架构进行了分析; 然后, 根据不同的网络类型、优化目标以及天线数量, 对反向散射通信网络的资源分配算法进行了阐述; 最后, 对反向散射通信网络资源分配问题所面临的挑战以及未来的研究趋势进行了展望。

关键词: 无线通信; 反向散射通信; 频谱效率; 资源分配

中图分类号: TP181

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00215

A survey on resource allocation in backscatter communication networks

XU Yongjun^{1,2}, YANG Haoke¹, YE Yinghui², CHEN Qianbin¹, LU Guangyue²

1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

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

Abstract: With the development of Internet of things (IoT) technology, wireless networks have the characteristics of massive user access, high power consumption, and high capacity requirements. In order to meet the transmission requirements and reduce energy consumption, backscatter communication technology was considered to be one of the most effective solutions to the above problems. In the fact of complex network scenarios, the improvement of spectrum efficiency, system capacity, and energy management has become an urgent problem of resource allocation areas in backscatter communications. For this problem, resource allocation algorithms in backscatter communications were surveyed. Firstly, the basic concept and different network architectures of backscatter communication were introduced. Then, resource allocation algorithms in backscatter communication networks were analyzed according to different network types, optimization objectives, and the number of antennas. Finally, the challenges and future research trends of resource allocation problems in backscatter communication networks were prospected.

Key words: wireless communications, backscatter communication, spectrum efficiency, resource allocation

收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2021-01-08

通信作者: 徐勇军, xuyj@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61601071, No.62071078); 重庆市自然科学基金面上项目 (No.cstc2019jcyj-xfkxX0002), 陕西省信息通信网络及安全重点实验室开放课题 (No.ICNS201904); 重庆市教委科学技术研究计划基金资助项目 (No.KJQN201800606); 陕西省高校科协青年人才托举计划项目 (No.20210121)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61601071, No.62071078), Natural Science Foundation of Chongqing (No.cstc2019jcyj-xfkxX0002), Open Funding of Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security (No.ICNS201904), The Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (No.KJQN201800606), The Young Talent Fund of University Association for Science and Technology in Shaanxi (No.20210121)

1 引言

物联网这一概念最早于 20 世纪 90 年代被提出，至今，物联网已发展 20 余年，与移动通信相比，物联网的发展相对缓慢。随着通信技术的飞速发展以及移动设备的迅猛增长，物联网将会遍布在日常生活中的每个角落。

在大规模部署物联网时，节点电池的能量问题将会成为制约网络发展的一个主要因素。虽然更换电池或给电池充电可以有效延长节点的运行周期，但会大大提高成本，并且有时不易实现。为此学术界和工业界提出了无线功率传输（WPT, wireless power transfer）、无线信息与功率同传（SWIPT, simultaneous wireless information and power transfer）以及反向散射通信（BackCom, backscatter communication）等技术解决这个问题。WPT 是通过电磁波替代电线实现能量传输的技术，从而为现有的物联网设备消减电线^[1]。常见的应用有电动汽车、机器人等^[2]。与 WPT 不同，SWIPT 是利用射频信号既可作为能量源也可以作为信息载体的这一特征实现能量与信息协同传输^[3-4]。该技术向用户同时传输信息和能量，并且通过调整功率分流因子将一部分收集的能量用于信息解码，从而避免消耗自身电池电量。常见的应用场景是 Ad Hoc 网络。然而，BackCom 是一种通过反向散射信号进行数据传输的无线通信技术^[5]。该技术通过反射入射的射频信号通信，且不需要高功耗器件来产生载波信号以及数模转换，因此具有低功耗、低成本等特点，常应用于短距离射频识别（RFID, radio frequency identification）系统。综上所述，3 种技术的特点如表 1 所示。由于 BackCom 的传输原理比其他技术更具有优势，因此吸引了众多学者的研究，并将其作为 6G 绿色通信的关键技术之一。

表 1 技术特点分类

分类	技术特点	应用场景
WPT	只向设备供电	电动汽车、机器人
SWIPT	同时传输信息与收集能量	Ad Hoc 网络
BackCom	低功耗、低成本	短距离 RFID 系统

文献[5]对环境反向散射通信的基本原理、信道编码、调制方案等方面进行了综述。文献[6]从信号处理、网络设计等方面介绍了无线供电反向散射通信网络。文献[7]总结了反向散射通信技术在物联网

中的应用。文献[8]从环境反向散射系统的信号检测角度出发，提出了利用曼彻斯特编码、特征值检测以及多进制调制等方法，改善系统的性能。文献[9]简要介绍了采用反向散射技术的无线无源智能标签的实际应用场景，并且从能量采集、反向散射技术对无线信道的影响等方面进行讨论。然而，上述工作都没有考虑到 BackCom 网络的资源分配问题，为了实现节能通信以及提高网络资源的利用率，本文从该角度出发，对 BackCom 网络的相关资源分配问题进行了详细阐述，提出了目前存在的挑战以及未来的研究方向，主要贡献如下：首先，介绍了 3 种的基本概念并且对不同的 BackCom 网络架构进行了分析；其次，根据非中继和中继协作 BackCom 网络、单天线与多天线系统以及优化目标（如吞吐量、能效），对 BackCom 网络的资源分配算法进行了综述，这将有利于该领域的学者更加清晰地掌握研究现状；最后，从信息安全、绿色通信以及用户公平性等角度出发，提出 BackCom 网络目前所面临的挑战并对未来的研究趋势进行了展望。

2 BackCom 简介

BackCom 的概念是 Stockman^[10]在 1948 年发表的学术论文中首先提出的。BackCom 技术最早应用于 RFID 系统^[11]。在 RFID 系统中，标签由读写器驱动，并通过反向散射将数据传输给读写器。在 2013 年和 2014 年，来自美国华盛顿大学的研究团队先后设计出基于电视信号和基于 Wi-Fi 信号的 BackCom 技术的原型硬件系统，实现了能量收集和反向散射通信功能^[12-13]。因此可以看出，BackCom 具有信号传输和收集能量的特点。

2.1 BackCom 的分类及优缺点

传统 BackCom 是一种反射入射射频信号进行数据传输的无线通信技术。该技术通过改变反射系数将射频信号分为两部分，一部分发送到读写器中，另一部分用于收集能量。图 1 中标签反射信号为 $\sqrt{\alpha P g} s(t) + n_i(t)$ ，读写器的接收信号为 $\sqrt{\alpha P g f} s(t) + n_r(t)$ ，其中， α 表示反射系数， P 表示射频源的发射功率， g 表示读写器到标签的信道增益， h 表示射频源到读写器的信道增益， f 表示标签到读写器的信道增益， $s(t)$ 表示射频源的发射信号， $n_i(t)$ 表示噪声， $i \in (1, 2, 3, r)$ ，且噪声服从均值为 0、方差为 σ_i^2 的高斯分布， E_j^{total} 表示系统的总

能量消耗, $j \in (1, 2, 3)$, 常应用于短距离 RFID 系统。射频源产生射频信号来激活标签, 标签调制并反射来自射频源的射频信号, 将数据传输到接收机。系统主要分为两部分: 标签和读写器, 其中读写器由射频源和接收机组成。

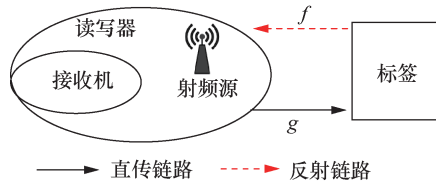


图 1 传统反向散射通信系统模型

然而, 传统 BackCom 存在通信距离短、路径损耗严重等不足^[14-15]。为了克服这些不足, 近年来学术界提出了几种新型反向散射技术, 例如: 环境反向散射 (ambient backscatter)、双站反向散射 (bistatic backscatter)^[7]。由于上述两种技术不需要频繁地更换电池, 因此可以节省人工维护的成本。基于上述分析, 下面将从环境反向散射通信和双站反向散射通信两个方面进行讨论。

环境反向散射通信是利用周围环境中已存在的环境射频信号与用户进行数据传输的通信技术^[12]。该技术的主要特点在于系统能够直接利用电视信号、Wi-Fi 信号等现有的周边环境射频信号, 使标签与读写器之间通信, 其主要应用于无线供电通信网络。美国华盛顿大学教授 Liu 等^[12]提出利用电视信号作为环境反向散射通信的信号来源, 其优点为: 第一, 电视塔可以源源不断地提供电视信号, 为环境反向散射通信提供了信号源; 第二, 电视信号是振幅变化很快的信号, 不易受外界干扰。系统模型如图 2 所示, 标签接收来自射频源的环境射频信号, 通过调整内部的天线阻抗来反射接收到的环境射频信号, 将数据发送到读写器中。图 2 中标签反射信号为 $\sqrt{\alpha P_g} s(t) + n_2(t)$, 读写器的接收信号为 $\sqrt{P}(\sqrt{\alpha g f} + \sqrt{h})s(t) + n_r(t)$ 。

假设在空旷地带或偏远地区, 周围区域的环境射频信号将会变得不稳定且不易获取, 环境反向散射通信的实现将会具有挑战性, 因此学者们提出了双站反向散射通信^[16]。双站反向散射通信是一种利用标签反射载波信号进行数据传输的通信技术。通过在标签附近部署载波发射器, 减少路径损耗, 提高通信距离。载波发射器向标签发射载波信号, 标签接收后反射部分载波信号到读写器。双站反向散

射通信技术的传输原理是: 将载波发射器作为一个独立的节点, 用于给标签发送载波信号, 读写器接收来自标签反射的载波信号^[17-18]。系统模型如图 3 所示, 标签的反射信号为 $\sqrt{\alpha P_g} s(t) + n_3(t)$, 读写器的接收信号为 $\sqrt{P}(\sqrt{\alpha g f} + \sqrt{h})s(t) + n_r(t)$, 常应用于远距离 RFID 系统。综上所述, 3 种 BackCom 的信号传输模型以及特点如表 2、表 3 所示。

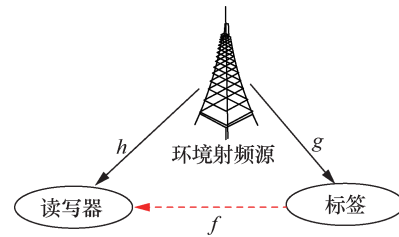


图 2 环境反向散射通信系统模型

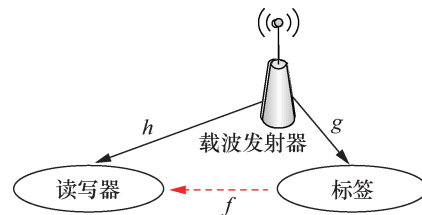


图 3 双站反向散射通信系统模型

2.2 BackCom 网络架构

针对不同的通信场景, BackCom 网络对应不同的传输模式和网络架构, 如中继辅助的单/多天线 BackCom 系统、认知无线电技术的引入, 使得 BackCom 网络具有不同的传输模式与网络架构, 如图 4 所示。由于资源分配问题与具体的网络模型有关, 因此, 需要分析 BackCom 网络中常见的网络架构, 以便后期资源分配算法的设计。

由于不同的技术会对 BackCom 网络结构带来不同程度的影响, 其资源分配的结果也不相同, 因此本文将 BackCom 蜂窝网络分为非中继网络和中继协作网络, 以下对不同的网络场景进行了分析。

1) 基于 NOMA 的 BackCom 系统

针对频谱资源稀缺、紧张等问题, 非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 技术允许在同一个网络资源块下为多个用户同时服务。近年来, 学者们将 NOMA 引入到 BackCom 系统中, 系统模型如图 4 所示, 假设近基站蜂窝用户为用户 A, 远基站蜂窝用户为用户 B, 由图 4 可知, 基站在同一资源块中同时向用户 A 和用户 B 发送信息, 反向散射设备 (BD, backscatter device) 通过反射接收到

表 2 BackCom 信号传输模型

网络场景	读写器接收信号	反射信号	信噪比	优化问题		优化变量
				最大化吞吐量	能效最大	
传统 BackCom	$\sqrt{\alpha P_g f} s(t) + n_r(t)$	$\sqrt{\alpha P_g} s(t) + n_1(t)$	$\gamma_1 = \frac{\alpha P_g f}{\sigma_r^2}$	$\max R_1 = \text{lb}(1 + \gamma_1)$	$\max \frac{R_1}{E_1^{\text{total}}}$	α 功率 时间 分配 分配
环境 BackCom	$\sqrt{P}(\sqrt{\alpha g f} + \sqrt{h})s(t) + n_r(t)$	$\sqrt{\alpha P_g} s(t) + n_2(t)$	$\gamma_2 = \frac{\alpha P_g f}{\sigma_r^2}$	$\max R_2 = \text{lb}(1 + \gamma_2)$	$\max \frac{R_2}{E_2^{\text{total}}}$	α 功率 时间 分配 分配
双站 BackCom	$\sqrt{P}(\sqrt{\alpha g f} + \sqrt{h})s(t) + n_r(t)$	$\sqrt{\alpha P_g} s(t) + n_3(t)$	$\gamma_3 = \frac{\alpha P_g f}{\sigma_r^2}$	$\max R_3 = \text{lb}(1 + \gamma_3)$	$\max \frac{R_3}{E_3^{\text{total}}}$	α 功率 时间 分配 分配

表 3 BackCom 的特点

网络模型	优点	不足	应用场景
传统 BackCom 网络	低功耗、系统结构简单	通信距离受限	短距离 RFID 系统
环境 BackCom 网络	不需要专用射频源	环境射频信号不稳定、不易获取	无线供电通信网络
双站 BackCom 网络	减少路径损耗	载波发射器成本较高、不易部署	RFID 系统

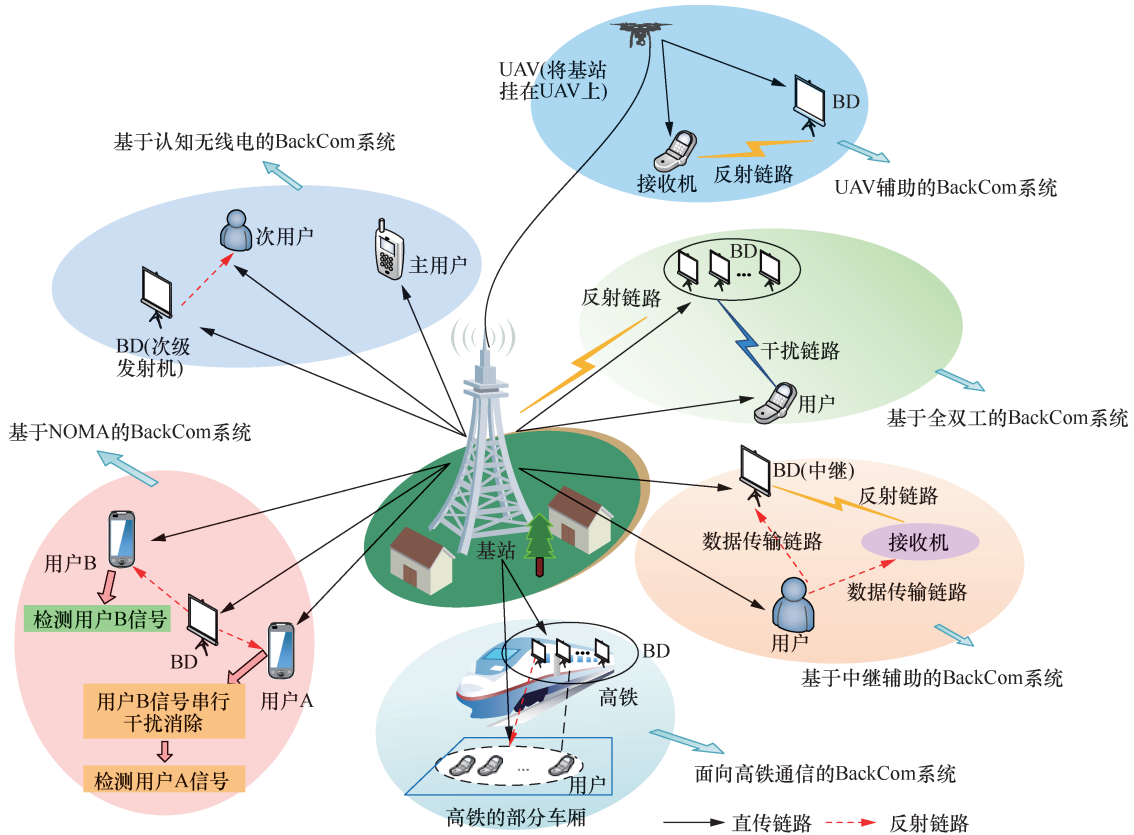


图 4 BackCom 网络架构模型

的基站信号向用户 A 和用户 B 发送信息。在用户 A 处采用串行干扰消除技术，将用户 B 的信号视为噪声，首先检测并提取出来，即可得到用户 A 所需信号。

2) 基于全双工的 BackCom 系统

为了降低系统的传输延迟以及提高频谱利用

率，将全双工技术与 BackCom 系统相结合，通过在接入点处配备收发天线，实现信息的双向传输/接收。系统模型如图 4 所示，全双工接入点向用户传输下行信号，与此同时在同一频段上接收来自 BD 的上行信号。

3) 基于认知无线电的 BackCom 系统

由于认知无线电技术可以通过频谱检测检测主用户或周围无线电环境中的频谱空洞,从而解决频谱稀缺的问题,因此将认知无线电引入到 BackCom 系统中^[24-26]。基于认知无线电的反向散射通信系统是一种新型的频谱共享系统,其中主系统由主发射机和主用户组成,次级系统由次级发射机和次用户组成,其中 BD 作为次级发射机。系统模型如图 4 所示,主发射机向主用户发送信息, BD 将来自主发射机的信号反射到次用户中。

4) UAV 辅助的 BackCom 系统

在以上的 BackCom 系统中大多数需要使用射频源向用户传输信号,然而在偏远地区或通信出现故障时,射频源可能无法正常使用,如何解决通信受限的问题将会成为具有挑战性的困难。考虑到无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)具有灵活的机动性、部署方便以及成本低等特点,将 UAV 作为射频源,与接收机之间进行通信,此方案的提出受到了学术界和工业界的高度重视^[27]。系统模型如图 4 所示,UAV 向 BD 发射激励信号,BD 通过反射部分激励信号向接收机中发送信号。

5) 面向高铁通信的 BackCom 系统

在高速铁路场景下,由于列车的高速移动性,无线信号在穿过车厢时,会产生较大的衰落,从而导致用户通信质量差。另外,当高铁经过隧道时,甚至会出现通信中断的情况。为了解决该问题,可以通过在高铁车厢顶部或隧道上方部署反射节点,以提高高铁通信系统的传输性能。例如,文献[28]

中提出了一种基于反向散射辅助的高铁通信方案。该方案可以获得信道统计信息为信道估计奠定基础,与直传方案相比,具有较高的信道估计准确性。文献[29]推导出了反向散射辅助的高铁通信系统信道容量的上界和下界。

6) 基于中继辅助的 BackCom 系统

上述不同的系统虽然在一定程度上增加了 BackCom 系统的传输距离,但是效果并不明显。基于此,考虑到中继是无线通信中常见的增加传输距离、增强接收信号功率的方法,因此将中继节点应用于 BackCom 网络中^[30]。系统模型如图 4 所示,从图 4 可以看出,BD 作为中继节点,协助信息传输。用户采用收集再传输(HTT, harvest-then-transmit)模式进行传输,用户从信号源中收集能量,然后将信息传输给 BD 和接收机。BD 作为中继节点,反向散射接收到的信号,将其发送到接收机。

3 BackCom 网络资源分配研究现状

本文将 BackCom 网络资源分配算法分为两大类:非中继 BackCom 网络资源分配算法;基于中继的 BackCom 网络资源分配算法。本节将针对不同的网络类型和优化目标,对 BackCom 网络的资源分配算法进行讨论,归纳总结如图 5 所示。

3.1 非中继 BackCom 网络资源分配

3.1.1 基于单天线的 BackCom 网络

基于单天线的 BackCom 系统是 BackCom 网络最基本的网络模型,其结构简单,无须考虑波束成形设计,只需要集中对功率控制、反射系数以及反

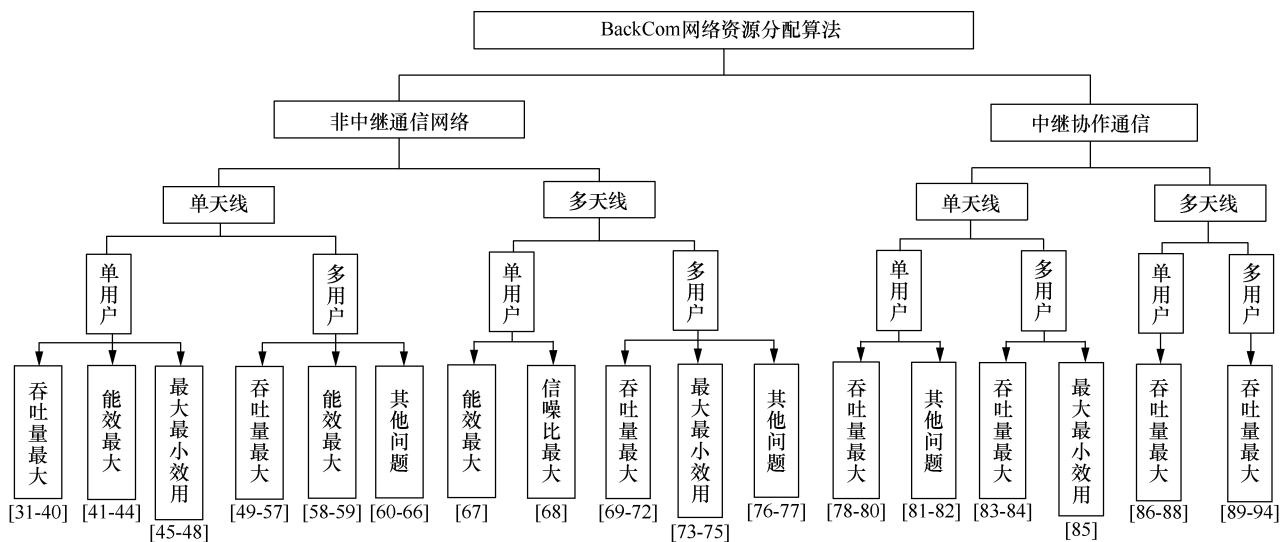


图 5 BackCom 网络资源分配算法归类

射时间等方面进行讨论,并且通常单天线的资源分配问题比多天线或中继节点的问题简单,也是目前学者们研究最为集中的问题。

针对单用户的吞吐量最大化问题,文献[31]首次将 BackCom 和 HTT 模式应用于无线体域网中,通过优化反射系数、传感器的传输功率以及时间分配,提出了一种两阶段方法,以获得最优解。文献[32]考虑共生无线网络场景,通过联合优化主发射机的发射功率和 BD 的反射系数,最大化遍历加权和速率。为了克服频谱增长的现象,提出了两种传输方案。对于共生传输,推导出了基于凸优化理论的最优功率分配方案;对于寄生传输,采用凹-凸过程推导出了次优解,通过减小主系统的传输速率来获得更高的反向散射传输速率。文献[33]将 UAV 引入到 BackCom 网络中,针对 BD 与接收机之间的链路可用的情况,提出传输-反向散射协议。在 UAV 的机动性约束和能量收集的约束下,通过联合优化无人机的飞行轨迹、时间分配以及反射系数来最大化系统的吞吐量。在文献[33]的基础上,文献[34]针对 BD 与接收机之间的链路不可用的情况,提出传输-反向散射-中继协议,运用连续凸近似和块坐标下降法(BCD, block coordinated decent),提出了3层迭代算法以获得最大化吞吐量。文献[35]考虑 WPT 与环境反向散射通信相结合的无线网络场景,在信道估计均方误差、误码率和收集能量的限制下,通过采用蒙特卡洛模拟,最大化传感器的传输速率。文献[36]首次考虑无线供电多载波 BackCom 网络场景,在最大发射功率和最小功耗的约束下,提出了一种基于迭代的资源分配算法,所提算法可以找到最优解。文献[37]首次考虑填充式射频供电认知网络场景,分析了能量收集和 BackCom 之间的折中,提出了次级系统传输速率最大化问题,由于所提出的问题为凸优化问题,因此可以得到全局最优解。在此基础上,文献[38]增加了下垫式网络场景,假定主信道总是处于忙碌状态且次级系统对主系统的干扰必须在预先设定的阈值下,通过在反向散射时间、能量收集时间以及发射时间之间进行最优折中,最大化总传输速率。文献[39]考虑在满足服务质量(QoS, quality of service)约束下,对优化问题采用内点法求解,在反向散射时间和能量收集时间之间找到最优的折中,使得多个次级发射机能够共享时间。由于主信道的动态性和次发射机能量状态的不确定性,次级接收机很难

找到一种使系统吞吐量最大化的时间调度机制,因此文献[40]采用双层深度 Q 网络模型和深度强化学习算法,使得网关能够学习最优策略。

在上述文献[31-40]中,针对吞吐量最大化问题,众多学者已经做出了卓越贡献,但是对于能效问题的研究相对较少。文献[41]考虑双站反向散射通信系统模型,在满足能量约束和 QoS 约束的前提下,通过联合优化发射功率、反射系数以及时间分配,提出能效最大化的优化问题,通过引入辅助变量和利用目标函数的单调性,以获得最优的资源分配方案。文献[42]在无线供电 BackCom 网络场景下,提出了一种基于丁克尔巴赫方法的高效迭代算法,以最大限度提高能效。文献[43]在干扰约束和不完美频谱感知的限制下,通过优化检测阈值、数据传输时间以及能量收集时间,量化了 HTT 模式和环境反向散射通信模式的最优折中。文献[44]建立多载波无线供电反向散射通信网络,通过联合优化发射功率、传输时间、反射系数以及能量收集分配系数,提出了能效最大化问题。由于问题的非凸性,采用 Dinkelbach 方法和拉格朗日对偶理论获得解析解。

针对无源标签发送导频信号或反馈信道状态信息(CSI, channel state information)困难的问题,考虑在不完美 CSI 的情况下,文献[45]通过联合优化时间分配和功率反射系数,研究了最大化最小吞吐量的优化问题,提出了基于伯恩斯坦型不等式与条件风险价值的安全近似方法。在文献[46]中,作者考虑全双工环境反向散射通信网络场景,由于受到用户的吞吐量约束以及 BD 的收集能量限制,且为了确保公平性,通过联合优化 BD 的反射时间、反射系数以及全双工接入点的子载波功率分配来最大化 BD 的最小吞吐量。与此同时,作者分析两种情况:针对于单个 BD,提出了一种基于拉格朗日对偶方法的高效算法;对于多个 BD 的情况,运用 BCD 和连续凸优化方法,提出了一种具有低复杂度的迭代算法。文献[47]提出了基于 NOMA 的动态时分多址接入传输方案,仿真结果表明,所提方案在吞吐量方面要明显优于动态时分多址接入方案,并且具有较低的复杂度。文献[48]考虑基于 NOMA 的双站反向散射通信网络场景,在 QoS 约束和多个 BD 收集能量的限制下,通过联合优化反向散射时间和反射系数,提出了一种求解非凸问题次优解的迭代算法。

综上所述, 文献[31-48]在单天线单用户 BackCom 网络场景下, 设计了丰富的资源分配算法。然而, 在实际的物理通信场景中, 往往会存在多个用户。于是, 在此基础上对于多用户网络场景的研究受到越来越多的关注, 为了便于学者们的研究, 下面将对其进行详细总结。

针对多用户 BackCom 网络的吞吐量最大化问题。文献[49]考虑基于全双工的认知 BackCom 网络场景, 在主用户速率的限制下, 联合优化时间调度、传输功率分配和反射系数, 提出了一种利用 BCD 和凹-凸过程来解决资源分配问题的迭代算法。仿真结果表明, 该算法收敛性较好并且能够显著提高 BD 的吞吐量。文献[50]考虑有源无线电与反向散射无线电共存的混合无线网络, 有源无线电通过自身产生的载波信号传输信息; 反向散射无线电则根据周围的射频信号来调制信息。为了使系统的吞吐量最大化, 联合优化用户传输调度和功率分配, 提出了一种具有保证收敛性的分布式解决方案。仿真结果表明, 所提出的两种无线通信模式具有互补性, 且减少了计算复杂度。在文献[51]中, 作者提出了采用 HTT 和反向散射模式的混合无线供电通信网络模型, 通过寻找最优的传输策略——用户的最优工作模式和时间分配, 最大化网络的吞吐量。文献[52]考虑将功率源与接入点分开, 即功率源和接入点不会同时位于混合接入点中, 这样可以避免由于双重远近问题和往返路径损耗导致用户不公平性的问题。在用户电池能量的约束下, 提出了收集/反向散射再传输协议, 对功率源的能量传输时间、用户反向散射和信息传输时间进行了最优分配。文献[53]考虑一个主系统和次级系统共存的环境反向散射认知无线网络场景, 提出了一种基于马尔可夫决策过程的优化决策方案, 优化次级用户的主信道状态、能量存储能力, 设计了低复杂度的在线强化学习算法, 使得次级发射机能够通过交互学习来找到最优策略, 最大化系统吞吐量。文献[38]提出在信道空闲时使用 HTT 协议, 在信道忙碌时使用 BackCom 提高次级系统的数据速率。然而在实际通信场景中可能并非如此, 例如, 电视塔一直在传输电视信号, 空闲时间将会非常少。于是文献[54]提出利用次级系统估计干扰并通过传统的无线电传输数据, 通过优化能量收集时间和反向散射时间, 获得了最大化次级系统传输速率的时间比。为了减小 RFID 系统中读写器之间的干扰问题, 文献[55]

提出了一种基于遗传算法的资源分配方法, 该方法的编码方案和适应度函数可以为 RFID 系统获得最优分配。文献[56]提出 HTT 和 BackCom 的混合模式, 通过联合优化反向散射、能量收集以及 HTT 模式的最优时间折中, 最大化网络的吞吐量, 使用卡罗需-库恩-塔克条件, 求得了认知用户的闭式最优解。文献[57]在最小发射功率和传感器收集能量的约束下, 提出了最优的时间分配问题, 并利用凸优化理论进行求解。

文献[58]考虑在 BD 的吞吐量和收集能量等约束下, 联合优化 BD 的功率反射系数、载波发射器的传输功率以及 UAV 的轨迹, 提出了一种求解非凸问题的迭代算法。仿真结果表明, 所提算法与悬停-飞行方案相比, 显著提高了网络能效。文献[59]在无线供能边缘计算网络中, 通过优化边缘服务器和用户的计算频率与时间、边缘用户的发射功率与卸载时间、能量收集时间、本地计算时间及专用能量站的发射功率, 建立了能效最大化模型, 提出一种迭代算法来获取原问题的最优解。

文献[60]提出基于用户公平性的最大-最小能效问题, 通过联合优化功率源的传输功率和 BD 的反射系数, 提出了一种迭代算法, 使得系统可以获得最优的资源分配。文献[61]提出利用人工噪声来辅助 BD 反向散射传输, 在保密速率和收集能量的约束下, 通过联合优化反向散射时间和功率分配, 提出求解非凸问题最优解的迭代算法, 并且此算法具有低复杂度和较好的收敛性。文献[62]针对 BackCom 系统传输距离短的问题, 提出采用无人驾驶车辆与 BackCom 系统相结合的方案, 无人驾驶车辆可以通过不断地改变位置进行数据传输。作者制定了具有 QoS 约束的能耗最小化问题, 提出了一种自动平衡无人驾驶车辆移动轨迹和通信能耗的算法。文献[63]考虑射频供电系统下的动态 Wi-Fi 卸载资源分配问题, 提出了两种方案: 当移动设备接入 Wi-Fi 网络时, 可以采用环境反向散射技术来反射环境射频信号进行数据传输; 当移动设备访问蜂窝网络时, 只能在 HTT 模式下工作, 通过联合优化子载波分配和传输功率等参数, 最小化能耗和数据传输时间的加权和, 设计了一种渐近最优算法和次优算法, 以保证系统的性能。文献[64]在无线供电传感器网络中引入边缘计算服务器, 其中边缘计算服务器为功率和计算不足的边缘设备提供计算和缓存能力。作者考虑一种混合数据卸载方案,

所有边缘设备均由混合接入点无线供电。通过优化每个边缘设备的卸载策略和功率分配来最小化能耗,提出分布式迭代算法。仿真结果表明,在传输功率固定的情况下,所提方案能够显著提高系统卸载吞吐量。文献[65]提出了一种人工噪声辅助的射频识别读写器安全传输方案,将人工噪声叠加在连续载波信号上,以防止主动窃听者窃听信息,建立了保密速率最大化的资源优化模型,将读写器与主动窃听者建立为分层的安全博弈,使其达到均衡。文献[66]在用户服务质量约束和能量收集约束下,通过优化发射功率、时间分配,建立了最大化最小能效模型,提出了用户公平性能效迭代算法,以求取问题的最优解析。

3.1.2 基于多天线的 BackCom 网络

上述文献针对单天线 BackCom 系统从不同的优化目标(例如吞吐量、能效),已经设计了较为丰富的资源分配算法。然而,在面对大规模用户接入、高系统容量的通信场景时,单天线 BackCom 网络无法满足通信需求,此外,由于多天线技术通过基站发送多个波束,提升接收机的分集增益,能够提高用户接入数量和系统容量,因此将会成为学者们下一阶段的研究热点。

在多天线单用户的 BackCom 网络场景中,文献[67]建立多输入单输出的非协作和协作下行链路共生无线电系统,反向散射链路采用有限块长度信道编码,基于此,提出最小化发射功率和能效最大化的资源分配问题,由于优化问题是非凸的,采用半定规划松弛和连续凸近似设计发射波束成形向量,并且降低了半定规划松弛解的计算复杂度。针对最大信噪比问题,文献[68]在读写器上引入全双工技术,通过联合优化正交导频数量和能量分配,得到了信噪比的单峰性以及优化变量的解析解。

针对多天线多用户的 BackCom 网络场景。文献[69]在同构和异构网络下,考虑用户使用分段线性能量收集模型,在最大功率和时间的约束下,通过联合优化用户能量收集、反向散射以及主动无线传输的时间分配以及射频源处的波束成形向量,提出了吞吐量最大化问题,通过利用 BCD 方法,将优化变量分为时间分配块和波束成形向量块,从而找到最优的资源分配。文献[70]联合优化收发器设计和标签处的反向散射系数来最大化系统吞吐量,其中采用下行能量波束成形和上行维纳滤波,使得标签处的反向散射系数可以简化为二进制的功率

控制问题,提出了低复杂度的迭代算法,该算法可以实现联合次优设计,通过对多天线读写器进行智能信号处理,扩大系统的覆盖范围。文献[71]使用随机几何方法对多天线 BackCom 系统进行分析,推导出能量收集和反向散射过程中能量和信息的中断概率,分析了两个阶段的持续时间之间最优折中。文献[72]在时间调度、带宽分配以及功率分流比的约束下,提出了一种基于组合协议的多传感器自适应波束成形算法。

针对最大-最小效用的问题,文献[73]设计了一种基于最小二乘的信道估计器,用于多天线读写器和半无源标签之间的信道估计,提出了低复杂度算法,以实现标签之间的吞吐量公平性。文献[74]提出分层多址方案,即组间采用基于波束成形的空间分割多址接入, NOMA 用于组内多个用户接入。作者通过联合优化波束成形矩阵和反射系数,提出了最大-最小吞吐量的优化问题,以获得总吞吐量与公平性之间的最优折中,设计了一种新的分层调度算法,以保证系统的性能。文献[75]在功耗约束下,联合优化能量分配权重、发射功率和信道估计时间,提出了一种基于估计反向散射信道状态信息的波束成形方案,用于网络的能量供应和信息传输。文献[76]在大规模超低功耗反向散射传感器网络中,设计了一种基于最大比合并方法的迫零线性检测器,并且在导频干扰消除和频率子信道分配的约束下,提出了最大和消息传输算法。仿真结果表明,与传统的凸优化方法相比,该算法的收敛时间显著减少。文献[77]提出基于估计 CSI 的能量波束成形方案,通过优化多波束成形的信道训练能量和波束成形能量的分配权值,最大化收集能量的总效用,设计了基于 BCD 的算法,该算法可以找到闭式最优解。综上所述,基于非中继的 BackCom 网络资源分配如表 4 所示。

3.2 中继辅助的 BackCom 网络资源分配

3.2.1 基于单天线的协作 BackCom 网络

由于 BackCom 网络传输距离有限,某些边缘用户的通信质量较差,通过中继节点的辅助传输,让边缘用户实现更高的通信质量变为可能。因此中继节点被广泛地应用到 BackCom 网络中。

在单天线单用户 BackCom 网络场景下,文献[78]提出中继采用有/无嵌入电源两种方案进行信息转发,通过对用户信息反向散射、用户的信息转发或中继能量收集的时间进行最优分配,以实现最大化

表 4 非中继 BackCom 网络资源分配

网络类型	优点	不足	用户场景	优化目标		
				吞吐量	能效	最大最小效用
非中继单天线 BackCom 网络	结构简单	传输速率较低	单用户	[31-40]	[41-44]	[45-48]
			多用户	[49-57]	[58-59]	[60-66]
非中继多天线 BackCom 网络	大规模用户接入、提高系统容量	系统通信范围有限	单用户	—	[67]	—
			多用户	[69-72]	—	[73-75]

的系统吞吐量。文献[79]在上述文献的基础上，根据文献[78]所提的两种方案，进一步研究了传输时间最小化问题，并求得了最优闭式解。文献[80]中将网关作为中继节点，辅助系统传输，通过优化数据反向散射、能量收集和转发之间的时间分配，制定了最大化和速率问题，所提算法的和速率增益高达 34%。文献[81]提出中继采用 HTT 模式进行解码转发信息，在标签的电路能量损耗和中继能量的约束下，联合优化功率分流因子和时间分配，提出了一种具有较低复杂度的算法，使得系统的总效用最大化。文献[82]采用 BD 作为中继节点，在功率控制的约束下，提出最小化误比特率问题，推导出了最优和高斯近似检波器。仿真结果表明，由于中继到接收机的链路是误比特率性能的瓶颈，因此功率源必须分配大部分功率以支持中继的传输。

在多用户 BackCom 网络场景下，文献[83]考虑中继采用无线供电设备而非嵌入电源，联合优化反射系数和时间分配，提出了一种多步迭代优化方案，该方案将原问题分解为两个子问题，再利用凸优化方法求得最优闭式解。仿真结果表明，所提方案显著提高了系统吞吐量。文献[84]考虑异构网络，提出一种分布式波束成形方案。基于此，在收集能量的约束下，设计了最优时间分配算法。针对最大—最小吞吐量问题，文献[85]通过对中继的反向散射、信息转发和能量收集时间进行最优分配，提出了有效算法。仿真结果表明，所提算法既能显著提高系统的吞吐量，又能保证用户的公平性。

3.2.2 基于多天线的协作 BackCom 网络

基于多天线的协作 BackCom 网络不仅可以显著增加通信系统的传输距离，还能够提高用户接入数量和系统容量。因此，本节从单用户和多用户的角度，对多天线协作 BackCom 网络的资源分配算法进行总结。

考虑多天线单用户的协作 BackCom 网络通信场景。文献[86]从频谱共享的角度建立了协作环境反向散射通信系统模型，其中协作接收机解码来自多天线主发射机和标签的信息，通过对主发射机波束成形向量优化，提出了和速率最大化问题，将此问题转化为两个凸的半定规划问题后，设计了基于半定松弛 (SDR, semidefinite relaxation) 方法求解近似解的算法，与此同时，提出了一种低复杂度的波束成形优化方案。文献[87]考虑认知 BackCom 网络，在射频源的最小速率和 BD 最小能量的限制下，通过优化波束成形权值来最大化和速率，提出了基于顺序参量凸近似的算法，该算法通过使用半定规划来迭代逼近原始问题，从而找到最优解。文献[88]提出当采用 HTT 模式的设备距离接入点较近时，将其作为中继节点辅助 BD 传输信息，反之亦然。通过联合优化时间调度、功率分配以及能量波束成形，制定了加权和速率最大化问题。由于优化问题的非凸性，采用变量替换和 SDR 方法来获得最优解。

针对多用户的资源分配问题，文献[89]考虑基于中继的终端直通 BackCom 系统，通过联合优化中继策略和功率源的波束成形，利用 SDR 方法对

表 5 中继辅助的 BackCom 网络资源分配

网络模型	优点	不足	用户场景	优化目标	
				吞吐量	其他问题
基于单天线的协作 BackCom 网络	结构简单、提高通信范围	传输速率较低	单用户	[78-80]	[81-82]
			多用户	[83-84]	[85]
基于多天线的协作 BackCom 网络	大规模用户接入、提高系统容量	能耗较高	单用户	[86-88]	—
			多用户	[89-94]	—

原非凸问题进行求解，并且提出了一种低复杂度的迭代算法。在文献[89]相同的网络场景下，文献[90]通过联合优化中继策略和波束成形向量，提出减少通信开销和降低复杂度的迭代算法。此外考虑信道的不确定性，当信道存在估计误差时，通过交替优化来最大化鲁棒性能，以保证问题的收敛性。文献[91]首次提出以射频供电网关作为中继节点，将信息从无源设备传输到混合接入点，由于网关可以随机部署在无源设备周围，可以显著扩大网络覆盖范围。作者通过联合优化混合接入点的能量波束成形向量、时间调度以及功率分配，利用波束成形的特性、变量替换和 SDR 方法，提出了低复杂度的算法以获得最优闭式解。文献[92]在混合无线网络场景中，联合优化节点的传输策略、时间分配和波束成形策略，设计了次优算法，该算法将策略更新分发给功率发射器和混合无线电。在此基础上，提出基于博弈论的无源中继方案，证明了所提方案可以近似收敛到唯一的纳什均衡，并且通过单独求解局部优化问题来迭代更新中继策略。文献[93]利用边缘控制器连接功率源和基站，提出了一种基于连续凸近似的次优算法，该算法通过迭代来优化中继的反射系数。文献[94]提出中继采用放大转发协议进行信息传输，通过联合优化混合接入点波束成形策略、中继能量收集和模式选择策略来最大限度地提高吞吐量，利用连续凸近似的方法求出优化问题的可行下界。

综上，基于中继辅助的 BackCom 网络资源分

配算法的总结，如表 5 所示。

4 存在的问题及挑战

根据上述内容，本文对 BackCom 网络的资源分配算法做了全面总结，虽然在 BackCom 网络的资源分配上，学者们已经做出了众多贡献，但是仍存在着以下几个方面的问题有待进一步研究，如图 6 所示。

1) 信息安全是未来 6G 物联网发展过程中的重要问题。在进行多反射节点传输时，由于 BackCom 的信号传输特性（如 BackCom 是无源通信，传输速率较低、信号较弱以及抗干扰能力较差），因此，物联网将会面临信息窃听、信息丢失等问题。考虑具有安全约束的 BackCom 网络资源分配算法，将会是一项重要挑战。

2) 基于参数不确定性的鲁棒资源分配问题。在 BackCom 网络场景下，现有的大多数文献都是基于完美的 CSI 所进行的工作。然而在实际的通信场景中，传统无线信道衰落对信道参数造成的不确定性、BD 通过调节天线阻抗改变反射系数时，将会对硬件电路产生零点漂移和 IQ 不平衡等问题，导致参数存在不确定性以及时延、量化误差，CSI 的估计不精确是必然的，因此考虑将含有动态参数的鲁棒资源分配算法与硬件电路相结合，将会是下一代通信关键技术之一。

3) 基于降低能耗的绿色通信资源分配问题。目前的 5G 基站中已经加入大规模阵列天线，在未来

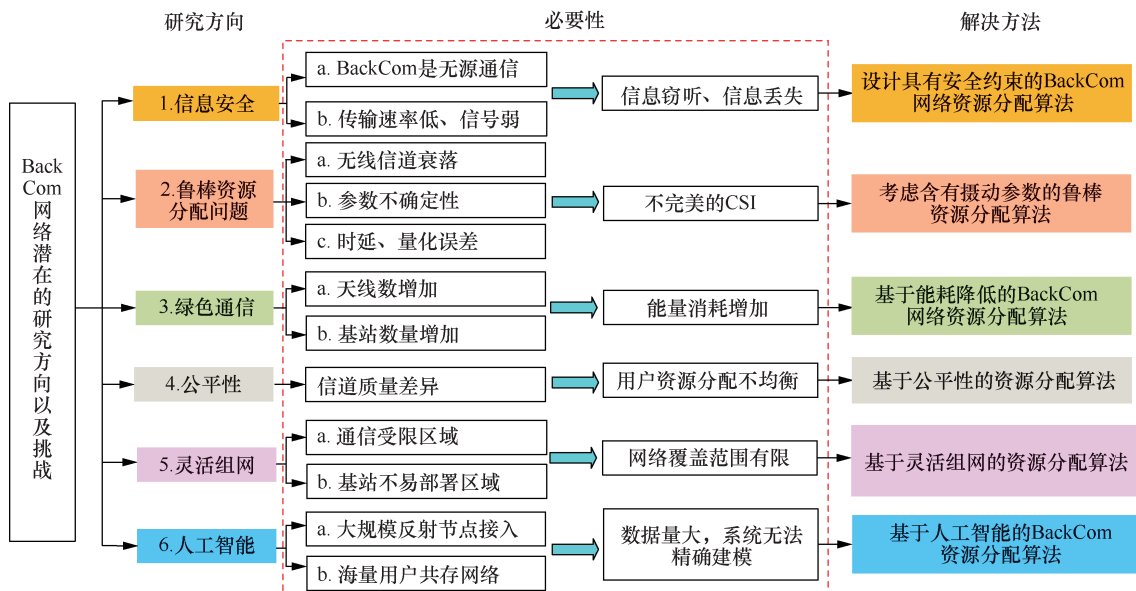


图 6 BackCom 网络潜在的研究方向及挑战

6G 物联网中, 基站的天线数量将进一步增加, 与此同时, 用户接入数和系统容量会提高数倍, 然而也会导致系统的能耗大幅度提升, 仅仅依靠单一的网络进行数据传输是远远不够的, 因此有必要考虑将绿色通信与 BackCom 网络相结合。

4) 基于公平性的资源分配问题。从大规模物联网接入角度考虑, BackCom 技术具有低功耗、低成本等特点, 所以将其引入到大规模物联网中。在大量用户接入网络时, 用户分布的范围广泛, 此时由于信道质量的差异将会导致用户资源分配不均衡, 因此为不同用户分配合适的带宽以及有效缓解远近效应, 显得尤为重要。如何设计出兼顾考虑用户性能与公平性的资源分配算法是当前研究的重点和难点。

5) 基于灵活组网的资源分配问题。利用 UAV 或汽艇灵活的移动性、易于部署等特点, 在 UAV 或汽艇上部署小基站, 与 BackCom 网络进行灵活组网, 这将会形成新的网络架构。因此, 考虑能量受限的 UAV 或汽艇进行灵活组网的 BackCom 网络资源分配, 将会是一个亟待解决的问题。

6) 基于人工智能的 BackCom 网络资源分配问题。在未来超大规模反射节点接入的 BackCom 网络中, 必将会面临数据量大、无法精确建模等问题。因此, 考虑利用人工智能对数据进行训练与学习, 通过性能预测对通信网络进行优化与管理, 以达到提高系统性能与降低算法复杂度的目的。

5 结束语

本文对当前 BackCom 网络资源分配算法的研究现状进行了综述。首先, 简要介绍了 BackCom 的分类与优缺点以及不同的网络架构; 其次, 从非中继和中继协作 BackCom 网络、单天线与多天线系统、优化目标的角度, 对 BackCom 网络的资源分配算法进行了详细阐述; 最后, 对未来该领域潜在的研究方向进行了展望。

参考文献:

- [1] LIU W C, HUANG K B, ZHOU X Y, et al. Next generation backscatter communication: systems, techniques, and applications[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019(1): 1-11.
- [2] MOU X L, SUN H J. Wireless power transfer: survey and roadmap[C]//2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [3] PONNIMBADUGE P T D, 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.
- [4] XU Y J, LI G Q, YANG Y, et al. Robust resource allocation and power splitting in SWIPT enabled heterogeneous networks: a robust minimax approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 10799-10811.
- [5] 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.
- [6] REZAEI F, TELLAMBURA C, 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.
- [7] 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.
- [8] 陶琴, 钟财军, 张朝阳. 面向无源物联网的环境反向散射通信技术[J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 28-34.
TAO Q, ZHONG C J, ZHANG Z Y. Ambient backscatter communications technology for batteryless IoT[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(2): 28-34.
- [9] 郭颖, 王公仆, 李宗辉, 等. 基于无源反向散射技术的智能标签: 应用与挑战[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 20-29.
GUO Y, WANG G P, LI Z H, et al. Smart tags based on the batteryless backscatter technology: applications and challenges[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 20-29.
- [10] STOCKMAN H. Communication by means of reflected power[J]. Proceedings of the IRE, 1948, 36(10): 1196-1204.
- [11] 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.
- [12] LIU V, PARKS A, TALLA V, et al. Ambient backscatter: wireless communication out of thin air[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM. New York: ACM Press, 2013: 39-50.
- [13] 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.
- [14] BOYER C, ROY S. Backscatter communication and RFID: coding, energy, and MIMO analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(3): 770-785.
- [15] KIM D, INGRAM M A, 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.
- [16] KIMIONIS J, BLETSAS A, SAHALOS J N. Increased range bistatic scatter radio[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 62(3): 1091-1104.
- [17] LU X, NIYATO D, JIANG H, et al. Ambient backscatter assisted wireless powered communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 170-177.
- [18] CHOI S H, KIM D I. Backscatter radio communication for wireless powered communication networks[C]//2015 21st Asia-Pacific Conference on Communications. IEEE, 2015: 370-374.

- [19] LIU Y W, QIN Z J, ELKASHLAN M, et al. Nonorthogonal multiple access for 5G and beyond[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(12): 2347-2381.
- [20] XU Y J, HU R Q, LI G Q. Robust energy-efficient maximization for cognitive NOMA networks under channel uncertainties[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(9): 8318-8330.
- [21] XU Y J, LI G Q. Optimal and robust interference efficiency maximization for multicell heterogeneous networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 102406-102416.
- [22] XU Y J, LI G Q, TANG J H, et al. Robust resource allocation for uplink sum rate maximization in multi-cell heterogeneous networks[C]//2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE, Press 2018: 1-6.
- [23] XU Y J, HU R Q, QIAN Y. Robust max-min fairness energy efficiency in NOMA-based heterogeneous networks[C]//ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [24] XU Y J, HU Y, CHEN Q B, et al. Optimal power allocation for multiuser OFDM-based cognitive heterogeneous networks[J]. *China Communications*, 2017, 14(9): 52-61.
- [25] XU Y J, HU Y, CHEN Q B, et al. Robust resource allocation for multi-tier cognitive heterogeneous networks[C]//2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [26] XU Y J, YANG Y, LI G Q, et al. Robust resource allocation and transmission time optimization for OFDMA-based heterogeneous networks[C]//2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [27] WU Q Q, ZENG Y, ZHANG R. Joint trajectory and communication design for UAV-enabled multiple access[C]//GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [28] 窦中兆, 赵文晶, 刘杨, 等. 高速铁路场景下环境反向散射辅助的无线传输方案[J]. *电讯技术*, 2020, 60(11): 1303-1310.
DOU Z Z, ZHAO W J, LIU Y, et al. Transmission schemes and link budget for backscatter aided wireless communications on high speed rails[J]. *Telecommunication Engineering*, 2020, 60(11): 1303-1310.
- [29] ZHAO W J, WANG G P, AI B, et al. Backscatter aided wireless communications on high-speed rails: capacity analysis and transceiver design[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(12): 2864-2874.
- [30] 徐龙腾. 环境反向散射通信的性能分析与资源分配研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
XU L T. Performance analysis and resource management of ambient backscatter communication[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [31] LING Z, HU F Y, LI D. Optimal resource allocation in point-to-point wireless body area network with backscatter communication[C]//2020 International Conference on Computing, Networking and Communications(ICNC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 780-784.
- [32] GUO H Y, LIANG Y C, LONG R Z, et al. Resource allocation for symbiotic radio system with fading channels[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 34333-34347.
- [33] HUA M, SWINDLEHURST A L, LI C G, et al. UAV-aided backscatter networks: joint UAV trajectory and protocol design[C]//2019 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [34] HUA M, YANG L X, LI C G, et al. Throughput maximization for UAV-aided backscatter communication networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(2): 1254-1270.
- [35] DARSENA D, GELLI G, VERDE F. Resource allocation for sensors with wireless power transfer and ambient backscatter transmission[C]//2017 International Symposium on Wireless Communication Systems(ISWCS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 366-371.
- [36] XU Y J, GUI G. Optimal resource allocation for wireless powered multi-carrier backscatter communication networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(8): 1191-1195.
- [37] HOANG D T, NIYATO D, WANG P, et al. The tradeoff analysis in RF-powered backscatter cognitive radio networks[C]//2016 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [38] 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.
- [39] HOANG D T, NIYATO D, WANG P, et al. Optimal time sharing in RF-powered backscatter cognitive radio networks[C]//2017 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [40] ANH T T, LUONG N C, NIYATO D, et al. Deep reinforcement learning for time scheduling in RF-powered backscatter cognitive radio networks[C]//2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [41] LIU Y F, SHENG X T, FANG K P, et al. Energy efficiency maximization in bistatic backscatter communications with QoS constraint[C]//2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 920-925.
- [42] YE Y H, SHI L Q, HU R Q, et al. Energy-efficient resource allocation for wirelessly powered backscatter communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(8): 1418-1422.
- [43] KISHORE R, GURUGOPINATH S, SOFOTASIOS P C, et al. Opportunistic ambient backscatter communication in RF-powered cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2019, 5(2): 413-426.
- [44] 徐勇军, 谷博文, 陈前斌, 等. 基于能效最大的无线供电反向散射网络资源分配算法[J]. *通信学报*, 2020, 41(10): 202-210.
XU Y J, GU B W, CHEN Q B, et al. Energy efficiency maximization resource allocation algorithm in wireless-powered backscatter communication network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(10): 202-210.
- [45] ZHANG Y, LI B, GAO F F, et al. A robust design for ultra reliable ambient backscatter communication systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 8989-8999.
- [46] YANG G, YUAN D D, LIANG Y C, et al. Optimal resource allocation in full-duplex ambient backscatter communication networks for wireless-powered IoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 2612-2625.
- [47] LIAO Y T, YANG G, LIANG Y C. Resource allocation in NOMA-enhanced full-duplex symbiotic radio networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 22709-22720.
- [48] YANG G, XU X Y, LIANG Y C. Resource allocation in NO-

- MA-enhanced backscatter communication networks for wireless powered IoT[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(1): 117-120.
- [49] XIAO S, GUO H Y, LIANG Y C. Resource allocation for full-duplex-enabled cognitive backscatter networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(6): 3222-3235.
- [50] CHEN W F, LI C M, GONG S M, et al. Joint transmission scheduling and power allocation in wirelessly powered hybrid radio networks[C]//2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 515-519.
- [51] LYU B, YANG Z, GUI G, et al. Wireless powered communication networks assisted by backscatter communication[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 7254-7262.
- [52] RAMEZANI P, JAMALIPOUR A. Throughput maximization in backscatter assisted wireless powered communication networks[C]// ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [53] HUYNH N V, HOANG D T, NGUYEN D N, et al. Reinforcement learning approach for RF-powered cognitive radio network with ambient backscatter[C]//2018 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2018:1-6.
- [54] PARK K H, MUNIR D, KIM J S, et al. Integrating RF-powered backscatter with underlay cognitive radio networks[C]//2017 International Conference on Information Networking (ICOIN). Piscataway: IEEE Press, 2017: 288-292.
- [55] SEO H, LEE C. A new GA-based resource allocation scheme for a reader-to-reader interference problem in RFID systems[C]//2010 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [56] LYU B, GUO H, 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.
- [57] VAN H 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.
- [58] YANG G, DAI R, LIANG Y C. Energy-efficient UAV backscatter communication with joint trajectory and resource optimization[C]//ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [59] 施丽琴, 叶迎晖, 卢光跃. 无线供能边缘计算网络中系统计算能效最大化资源分配方案[J]. *通信学报*, 2020, 41(10): 59-69.
- SHI L Q, YE Y H, LU G Y. Computation energy efficiency maximization based resource allocation scheme in wireless powered mobile edge computing network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(10): 59-69.
- [60] 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.
- [61] WANG P, WANG N, DABAGHCHIAN M, et al. Optimal resource allocation for secure multi-user wireless powered backscatter communication with artificial noise[C]//IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 460-468.
- [62] WANG S, XIA M H, WU Y C. Backscatter data collection with unmanned ground vehicle: mobility management and power allocation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(4): 2314-2328.
- [63] WANG F, ZHANG X. Joint WiFi offloading and resource allocation for RF-powered wireless networks assisted by ambient backscatter[C]//2018 IEEE International Conference on Communications(ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [64] ZOU Y Z, XU J, GONG S M, et al. Backscatter-aided hybrid data offloading for wireless powered edge sensor networks[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [65] ZHAO B Q, WANG H M, JIANG J C. Safeguarding backscatter RFID communication against proactive eavesdropping[C]// ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [66] 叶迎晖, 施丽琴, 卢光跃. 反向散射辅助的无线供能通信网络中用户能效公平性研究[J]. *通信学报*, 2020, 41(7): 84-94.
- YE Y H, SHI L Q, LU G Y. User-centric energy efficiency fairness in backscatter-assisted wireless powered communication network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(7): 84-94.
- [67] CHU Z, HAO W M, XIAO P, et al. Resource allocations for symbiotic radio with finite block length backscatter link[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020,7(9): 8192-8207.
- [68] 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.
- [69] RAMEZANI P, JAMALIPOUR A. Optimal resource allocation in backscatter assisted WPCN with practical energy harvesting model[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(12): 12406-12410.
- [70] MISHRA D, LARSSON E G. Sum throughput maximization in multi-tag backscattering to multi-antenna reader[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(8): 5689-5705.
- [71] YANG Q, WANG H M, ZHENG T X, et al. Wireless powered asynchronous backscatter networks with sporadic short packets: performance analysis and optimization[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(2): 984-997.
- [72] KWAN J C, FAPOJUWO A O. Optimized wireless energy harvesting sensor network with backscatter communication and beamforming[C]//2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC299-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [73] MISHRA D, LARSSON E G. Multi-tag backscattering to MIMO reader: channel estimation and throughput fairness[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(12): 5584-5599.
- [74] LI L H, HUANG X X, FANG X M, et al. Efficient hierarchical multiple access for ambient backscatter wireless networks[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [75] MA W Y, WANG W, JIANG T. Energy beamforming for wireless information and power transfer in backscatter multiuser networks[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [76] ALEVIZOS P N, BLETSAS A. Inference-based resource allocation for multi-cell backscatter sensor networks[C]//2019 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [77] YANG G, HO C K, GUAN Y L. Multi-antenna wireless energy transfer for backscatter communication systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(12): 2974-2987.

- [78] LYU B, YANG Z, XIE T Y, et al. Optimal time allocation in relay assisted backscatter communication systems[C]//2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC-spring). Piscataway: IEEE Press 2018: 1-5.
- [79] LYU B, YANG Z, GUO H Y, et al. Relay cooperation enhanced backscatter communication for Internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 2860-2871.
- [80] LYU B, HOANG D T. Optimal time scheduling in relay assisted batteryless IoT networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(5), 706-710.
- [81] LI D. Backscatter communication via harvest-then-transmit relaying[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6843-6847.
- [82] JIA X L, ZHOU X Y. Decode-and-forward relaying using a backscatter device: power allocation and BER analysis[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [83] ZHENG C M, CHENG W C, ZHANG H L. Optimal resource allocation for two-user and single-DF-relay network with ambient backscatter[J]. IEEE Access, 2019, 7: 91375-91389.
- [84] KIM S H, KIM D I. Backscatter based cooperative transmission in wireless-powered heterogeneous networks[C]//2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [85] LIU M H, JIANG R, Xu Y Y. Dual-hop wireless powered communication networks assisted by backscatter[C]//2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 198-203.
- [86] LONG R Z, YANG G, PEI Y Y, et al. Transmit beamforming for cooperative ambient backscatter communication systems[C]//GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [87] YANG G, ZHANG J P, LIANG Y C. Optimal beamforming in cooperative cognitive backscatter networks for wireless-powered IoT[C]//2018 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 56-61.
- [88] LYU B, HOANG D T, YANG Z. User cooperation in wireless-powered backscatter communication networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 632-635.
- [89] GONG S M, XU J, GAO L, et al. Passive relaying scheme via backscatter communications in cooperative wireless networks[C]//2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [90] GONG S M, HUANG X X, XU J, et al. Backscatter relay communications powered by wireless energy beamforming[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(7): 3187-3200.
- [91] LYU B, HOANG D T, YANG Z Z. Backscatter then forward: a relaying scheme for batteryless IoT networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(4): 562-566.
- [92] XU J, LI J C, GONG S M, et al. Passive relaying game for wireless powered Internet of things in backscatter-aided hybrid radio networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 8933-8944.
- [93] GONG S M, GAO L, XU J, et al. Exploiting backscatter-aided relay communications with hybrid access model in device-to-device

networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2019, 5(4): 835-848.

- [94] XIE Y T, XU Z Z, GONG S M, et al. Backscatter-assisted hybrid relaying strategy for wireless powered IoT communications[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.

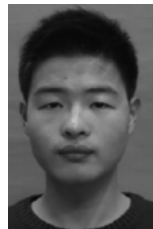
[作者简介]



徐勇军 (1986-), 男, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为反向散射通信、认知无线电、异构无线网络传输技术等。



杨浩克 (1996-), 男, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为反向散射通信、资源分配。



叶迎晖 (1991-), 男, 博士, 西安邮电大学讲师, 主要研究方向为认知无线电、携能中继、机器学习和边缘计算。



陈前斌 (1967-), 男, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信与网络。



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