

面向6G物联网的主被动互惠传输关键技术

伍明江, 类先富, 李里, 唐小虎

(西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 611756)

摘要: 大规模机器类通信 (mMTC, massive machine-type communication) 被列为 5G 网络的三大应用场景之一, 但真正成熟的万物互联需要到未来 6G 网络才能实现。6G 物联网将同时提供高速率、低时延、高可靠、大连接等全方位服务, 实现深度沉浸式泛在连接。首先, 展望了 6G 技术和 6G 物联网的技术挑战, 总结了现有物联网的物理层传输技术。然后, 重点介绍和讨论了一类新型的面向 6G 物联网的主被动互惠传输技术, 为 6G 物联网传输提供一种新的解决方案和实现途径。最后, 讨论了在 6G 物联网主被动互惠传输方面具有重要意义的研究方向。
关键词: 6G; 物联网; 环境反向散射技术; 智能反射面通信; 互惠传输

中图分类号: TN919

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00152

Key technologies of symbiotic transmission for 6G Internet of things

WU Mingjiang, LEI Xianfu, LI Li, TANG Xiaohu

School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: mMTC (massive machine-type communication) is one of the three major application scenarios of 5G network, but it is highly likely that the truly mature Internet of everything may not be realized until the future 6G network. In order to realize the deep immersive ubiquitous connection network, 6G IoT will simultaneously provide all-round services such as high data rate, low latency, high reliability and massive connections. Firstly, the 6G was prospected and the technical challenges of 6G IoT were summarized. Then the existing physical layer transmission technologies of IoT were reviewed. Next, the promising symbiotic transmission technologies for 6G IoT were introduced and discussed, which enable the possibility that active transmission and passive transmission facilitates each other and provide a new solution for 6G IoT transmission. Finally, some possible future research directions were presented for symbiotic transmission in 6G IoT.

Key words: 6G, Internet of things, ambient backscatter technology, intelligent reflecting surface communication, symbiotic transmission

1 引言

1.1 6G 展望

6G 将突破 5G 以网络为中心的通信架构, 重新定义通信方式, 建立以人的个性化需求为中心的沉浸式网络。为了实现该目标, 学术界和产业界已经开始探索 6G 的特征和演进方向, 包括依托的基础理论、愿景、应用场景和关键技术等方面, 但目前

相关的思考和认识还处在发散阶段。文献[1]将 6G 愿景概括为: 智慧连接、深度连接、全息连接和泛在连接, 这四大连接一起构建了“一念天地, 万物随心”的 6G 总体愿景。在应用场景方面, 文献[2]在 5G 的基础上提出了进一步增强移动宽带 (FeMBB, further-enhanced mobile broadband)、超大规模机器通信 (umMTC, ultra-massive machine-type communication)、极可靠低时延通信 (ERLLC,

收稿日期: 2020-01-27; 修回日期: 2020-03-03

通信作者: 类先富, xfei@swjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2019YFB180003400)

Foundation Item: The National Key R&D Program of China (No.2019YFB180003400)

extremely reliable and low-latency communication)、极低功耗通信(ELPC, extremely low-power communication)和远距离高移动性通信(LDHMC, long-distance and high-mobility communication)等5种应用场景,以期6G能够提供更快、更大规模、更安全、更可靠、更低功耗、更强覆盖和更高移动性的深度全保障通信。关于6G关键技术,现已经提出的技术包括:微蜂窝、环境反向散射技术(AmBT, ambient backscatter technology)、智能反射面(IRS, intelligent reflecting surface)辅助通信、人工智能(AI, artificial intelligence)辅助通信、基于卫星通信的空天地海一体化网络^[3]、太赫兹通信等。但这些技术仍处于探索阶段,还需要进行深入的研究和论证。总体来说,6G只是处在预研阶段,各方面都具有很大的不确定性,所以,需要社会各行人士一起努力,共同推动6G的创新和发展。

1.2 6G 物联网的技术挑战

从1G到4G都是面向人的移动通信,实现了人与人的连接,5G技术扩展到了人与物、物与物的连接^[4],开启了物联网世界的大门。而6G将深度结合物联泛在接入、智能感知和智能物联平台与关键应用等多领域技术,建立无所不连、无所不知的沉浸式智能互联世界,6G物联网如图1所示。智慧城市依托于6G物联网的全场景解决方案,可

以实现智能经济、智能移动、智能环境、智能生活和智能治理一体化服务,从而打造一个真正的数字化智能社会。海量智能物联网设备是实现万物互联的最关键基础设施。据预测,到2030年,全球的电子设备接入数量将超1 250亿,机器类通信将会成为6G更主要的通信方式。如此巨大的接入数量对6G网络容量提出了超高要求,文献[2]将6G网络容量的技术指标设定为1 000万连接数/km²,是5G最大接入数量的10倍。毫无疑问,实现如此海量的物联网连接是一项巨大的技术挑战。由于频谱资源有限,不可避免地会出现资源竞争和信号干扰问题,导致传输效率低下。同时,大规模在网设备将会形成超高能耗网络,这与绿色环保的发展理念不相符。所以,如何实现高频谱效率和超低功耗传输成为6G物联网的关键问题。如图1所示的基于环境反向散射技术和IRS的主被动互惠传输技术在频谱效率和低功耗方面具有显著优势,为6G物联网提供了可行的解决方案,本文将重点探索主被动互惠传输技术在6G物联网中的应用和挑战。

2 现有物联网传输技术

本节主要介绍在物联网领域的主动式传输技术和被动式反向散射传输技术,物联网传输技术如表1所示,对典型技术及其特征进行了总结。

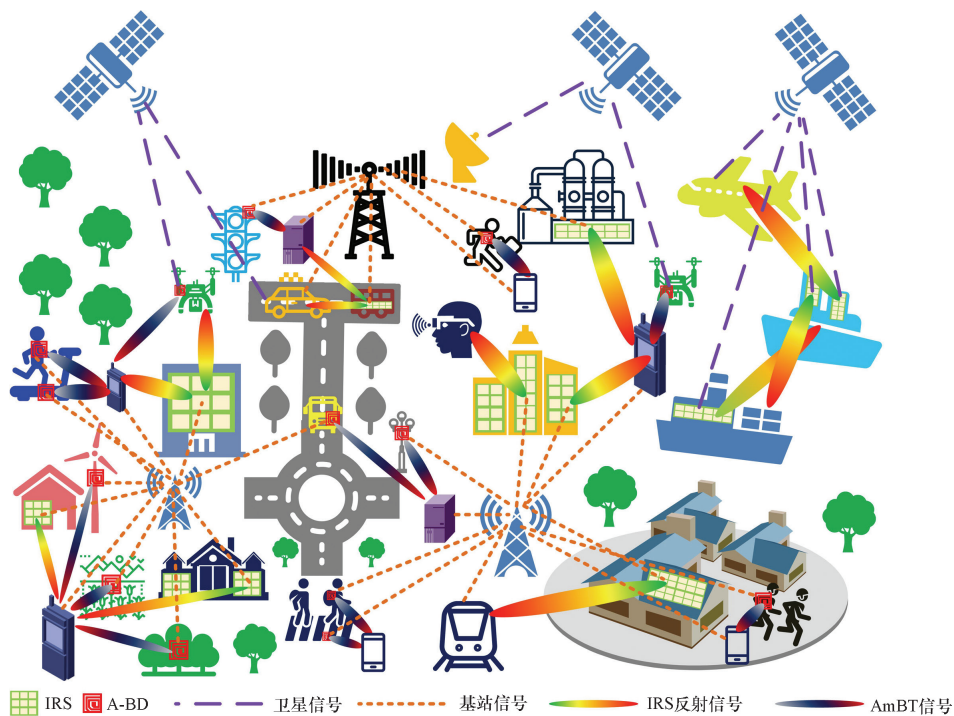


图1 6G 物联网

2.1 主动式物联网传输技术

目前，基于主动式传输的物联网技术在实际中应用更广泛，主要包括 Sigfox、LoRa、NB-IoT、蓝牙和 ZigBee 等。其中，Sigfox、LoRa 和 NB-IoT 属于广域网通信技术，蓝牙和 ZigBee 属于短距离通信技术。与传统的蜂窝网通信一样，上述主动式物联网技术通过有源发射机主动发射无线信号进行信息传输，主动式物联网的物理层传输技术如表 2 所示。

主动式传输能提供更好的覆盖和更高的传输速率，但是每个收发设备都需要完整的射频链路，这提高了设备成本，也增大了传输功耗，还会使频谱资源更紧张。面对超大规模物联网，上述主动式传输技术的缺点将更突出，因此，需要研究超低功耗和高频谱效率的传输技术。

2.2 被动式反向散射传输技术

传统反向散射技术的原理是读写器发送射频信号，标签对入射信号进行反射，然后读写器接收反射的被动信号，进而解调标签的信息，传统反向散射技术如图 2(a)所示，其典型技术是 RFID，RFID 广泛应用于商品识别、电子不停车收费、智能卡转账和身份识别等方面^[10]。传统反向散射技术的显著缺点是需要专用的读写器发送射频信号，这显然限制了反向散射技术的使用范围和场景，并且增加了物联网部署的成本。为了克服上述缺点，学术界近年来提出了新型的反向散射技术——环境反向散射技术。环境反向散射技术如图 2(b)所示，环境反向散射技术不需要专门的读写器发送射频信号，它通过反射环境中的射频源如基站、Wi-Fi 接入点 (AP) 等发射的射频信号来调制信息。具体的调制方法是：通过调整天线阻抗，使天线工作在信号反射状

态或不反射状态，不同的状态分别映射为“0”信息和“1”信息，接收机通过检测反射信号来解调信息^[11]。环境反向散射技术的优势主要体现在：不需要专用的射频源，减少了信号处理的射频组件，降低了系统功耗；与射频源信号共享频谱，提高了频谱效率，降低了环境中的电磁干扰。

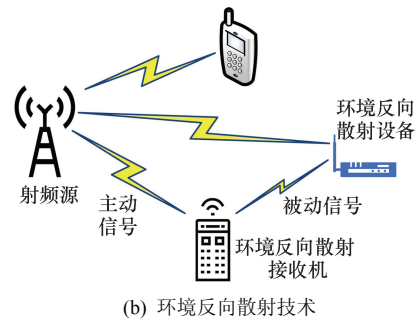
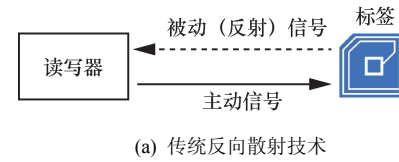


图 2 反向散射技术

被动式的环境反向散射技术为物联网突破能量限制和频谱限制提供了可行的解决思路，是物联网传输技术的重要创新，可能成为 6G 物联网的物理层关键技术。

3 新型主被动互惠传输技术

环境反向散射技术从一定程度上提高了频谱效率和能量效率，但是主被动通信之间没有协作，主动信号（即射频源信号）会对被动信号（即反射信号）造成强烈的干扰，如图 2(b)所示，导致被动

表 1 物联网传输技术

| 传输技术类型 | 技术代表 | 特征 |
|-------------|------------------------------|---------------------------|
| 主动式传输技术 | Sigfox、LoRa、NB-IoT、蓝牙、ZigBee | 有源发射机、高组件成本、高功耗、高速率、传输距离远 |
| 被动式反向散射传输技术 | RFID | 无源发射机、低组件成本、低功耗、低速率、传输距离短 |

表 2 主动式物联网的物理层传输技术

| 主动式物联网技术 | 传输技术 |
|----------|--|
| Sigfox | 100 Hz 超窄带宽 (UNB), BPSK ^[5] |
| LoRa | 基于线性调频的窄带扩频技术 ^[6] |
| NB-IoT | 正交频分多址 (OFDMA) / 单载波频分多址 (SC-FDMA), BPSK/QPSK ^[7] |
| 蓝牙 | 跳频扩频 (FHSS), GFSK ^[8] |
| ZigBee | 直接序列扩频 (DSSS), BPSK/QPSK ^[9] |

信号接收机需要复杂的干扰消除技术才能完成信号接收^[12]。复杂接收机算法给物联网接收设备带来了挑战，限制了环境反向散射技术的应用。最近兴起的主被动协作传输技术能够使主被动信号避免互相干扰，实现互惠传输，因而引起了许多研究者的关注，也为物联网传输技术开辟了新的研究方向。

3.1 基于环境反向散射的主被动互惠传输技术

为了解决环境反向散射技术中存在的主被动信号间互干扰问题，文献[13-14]改进了环境反向散射技术，提出了协作式主被动互惠传输技术，基于环境反向散射技术的主被动互惠传输系统模型如图 3 所示，主动通信和被动通信共享同一个协同接收机，该接收机将分别解调发射射频频源的主动信号与反射环境反向散射设备（A-BD, ambient backscatter device）的被动信号。主被动协作的好处是：A-BD 反射的被动信号没有严重改变主动信号的波形特征，主被动信号之间干扰程度低，使得被动信号成为主动信号的有用多径成分，给主动信号带来了空间分集增益，进而增强了主动通信的性能。同时，主动通信为被动通信提供了射频载波，所以称该主被动协作传输为主被动互惠传输。

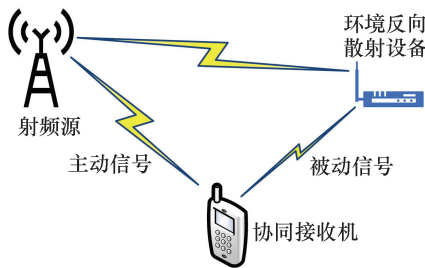


图 3 基于环境反向散射技术的主被动互惠传输系统模型

能否实现主被动互惠传输主要取决于信号的调制技术。如果 A-BD 采用的调制方式显著改变了主动信号的波形特征，被动信号必然会与主动信号在接收机处互相干扰，则无法形成互惠效果。文献[14]提出 A-BD 采用扩频技术调制被动信息，与主动信号分别在不同信号空间传输信息，从而避免了反射自 A-BD 的被动信号对主动信号形成干扰。接收信号建模为

$$y = h_d S + h_r SC + w \quad (1)$$

其中， h_d 表示射频源到接收机的平坦衰落信道， S 表示主动信号， h_r 表示射频源信号经过 A-BD 到达协同接收机的联合信道， C 表示被动信号， w 表示

加性高斯白噪声。来自基站或 AP 等射频频源的主动信号 S 比被动信号 C 具有更高的符号速率，因为被动物联网设备的通信速率一般低于主动通信速率，这种速率差也为被动信息使用扩频调制提供了条件。主动信号的符号速率为 R_s ，被动信号的符号速率为 R_c ，满足 $R_s = KR_c$ ，其中，扩频因子 K 为正整数。若扩频因子 K 越大，则表明主动信号和被动信号的符号周期间隔也越大，产生的效果是被动信号对主动信号的波形特征改变越小，主被动互惠效果也越好。仿真结果表明，当 $K=4$ 时，采用最大似然接收机算法，主动信号相比无 A-BD 辅助时，其性能增益最大可达 5~6 dB，同时，被动信号也因为更低的符号速率获得了更好的误码性能。显然，此种互惠式环境反向散射技术相比于基本环境反向散射技术具有更高的频谱效率与能量效率，符合绿色通信理念，具有广阔的应用前景。

3.2 基于 IRS 的主被动互惠传输技术

IRS 也称作大规模智能表面、编码超材料、超表面等，目前尚无规范和统一的名称。IRS 是一种人造超材料，其中，超材料是指其具有自然材料不具备的物理特性^[15]。IRS 由大量具有低成本、亚波长结构和独立可控的反射单元组成，其最主要的功能是可以软件编程方式任意操控环境中入射的电磁波，如改变电磁波的相位、幅度和频率等，以实现无线传播环境的智能控制。随机的无线信道通常被视为移动通信的最大阻碍。然而，IRS 可以智能操控电磁波，使得移动通信有了新的发展机遇。目前，IRS 在移动通信领域最重要的应用是根据信道参数调节反射信号相位，使得经每个基本单元反射后的信号能够在接收端实现同相叠加，以提高通信质量，实现增强容量和覆盖的目的，IRS 通信模型如图 4 所示。在 IRS 通信领域，研究者主要在波束赋形参数设计^[16]、物理层安全^[17]、多用户检测^[18]以及毫米波通信^[19]等方向展开研究。

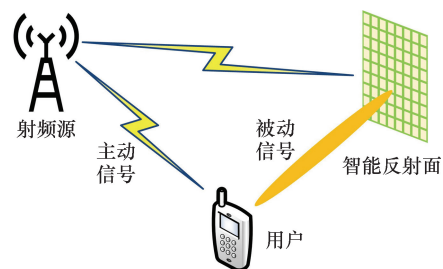


图 4 IRS 通信模型

IRS 具有大量反射单元，可以视作一个大规模无源天线阵列，因此，具有实现空间调制的天然优势，空间调制属于索引调制范畴，具有高频谱效率和高能量效率，在 MIMO 系统中有大量的研究工作^[20-21]。基于 IRS 实现空间调制的被动传输可以和主动传输协作，形成良好的主被动互惠传输效果。文献[22]率先提出在多天线接收机场景中，利用 IRS 实现基于接收机天线索引的空间调制，利用 IRS 和空间调制实现主被动互惠传输如图 5 所示，基于接收机天线索引如图 5(a)所示。其实现方法是将待传输比特流分成两部分，一部分比特通过主动信号使用传统调制方法如 m -PSK、 m -QAM 等进行传输，另一部分比特的传输方式是 IRS 形成到接收机某根天线的反射波束，对该天线进行激活，不同激活图案表示不同比特流。仿真结果表明，该空间调制能有效提高系统频谱效率和能量效率。虽然该主被动联合传输方法并不涉及物联网信息传输，其被动传输的信息是主动待传输信息的一部分，但是将 IRS 关联到物联网设备后，此种空间调制方法可以直接实现物联网数据传输。文献[23]在物联网场景下，提出了一种基于 IRS 和空间调制的主被动互惠传输技术，基于反射单元“开—关”图案如图 5(b)所示，IRS 与传感器均连接到微控制器，微控制器将传感器信息通过 IRS 使用空间调制方式进行传输。该空间调制方法与基于多天线发射机实现空间调制的方法类似，通过控制 IRS 每个反射单元的“开—关 (ON-OFF)”状态形成激活图案，不同的激活图案对应不同的比特信息（即被动信息）。研究表明，在 IRS 的辅助下，主动通信的误码性能增益最大可达 8~10 dB，实现了良好的主被动互惠性能，展示了 IRS 在实现主被动互惠传输中的

巨大潜力。IRS 除了能实现空间调制，也能通过控制反射信号的相位来实现相位调制，文献[24]将不同比特流映射到反射信号的不同相位，接收机通过导频信号和串行解调技术来分离主被动信号，然后解调主被动信息。与文献[22]所提方法一样，该方法传输的被动信息并不是来自独立的物联网设备，而是属于主动信息的一部分，可以直接应用到如图 5(b)所示的物联网场景中，以实现面向物联网的主被动互惠传输。

通过对上述新型的基于环境反向散射技术和 IRS 实现被动信息调制的研究，实现主被动互惠传输的关键在于设计合适的主被动信号调制技术，只有当主被动信号之间低干扰或者无干扰时，主被动互惠传输效果才能实现。显然，被动信号调制方法不能显著地改变主动信号的波形特征，否则将对其引入干扰。将被动信号调制到与主动信号不同的信号空间是实现主被动信号无干扰叠加的有效方式，上述用于被动信息传输的扩频调制和空间调制均是通过此方式实现了主被动信号无干扰叠加，达到了主被动信号互惠的效果。

在主被动互惠传输中，主被动设备互利式共享无线信号，显著地提高了频谱效率和能量效率。此外，被动设备硬件成本和功耗均较低（自身不发射无线信号），因此，主被动互惠传输技术对于物联网实现低成本部署和低功耗传输也具有突出优势。尤其对于 IRS，它拥有大规模的低成本反射单元，通过智能调整信号相位，对主动通信能够提供极大的分集增益，对被动通信也能提供多种调制方式和灵活可调的通信速率，所以在实现高速被动通信和增强主动通信方面具有巨大潜力。因此，研究主被动互惠传输技术对于 6G 实现泛在接入和互联具有极大的意义。

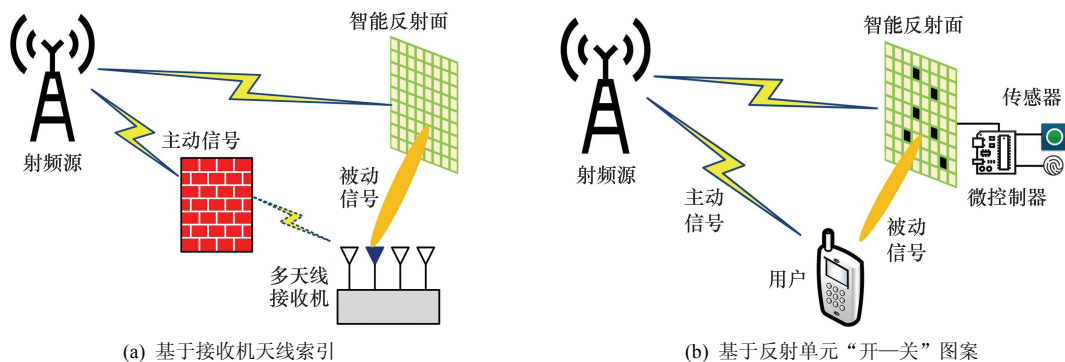


图 5 利用 IRS 和空间调制实现主被动互惠传输

4 未来研究方向

基于环境反向散射技术和 IRS 的主被动互惠传输技术因其突出的高频谱效率、低功耗和低成本优势,有望成为 6G 物联网的重要技术之一。然而,目前相关研究在学术界尚处于探索起步阶段,相关的基础理论还不成熟,许多关键问题未进行系统性研究,潜在的技术难题有待发现和解决。本节主要总结关于实现主被动互惠传输的一些潜在研究方向,以供读者参考,为后续开展研究提供一些思考和启发。

4.1 信道估计

通过对入射无线信号进行可编程相移,IRS 能够极大地提升无线通信性能,但前提条件是已知精确的信道参数,如果信道估计精度不够,将会导致其性能下降^[25]。因此,IRS 需要有良好的信道估计能力,但其主要由无源反射单元组成,不具备主动发送导频信号的能力,这给实现高精度信道估计带来了巨大的挑战。目前,只有少数研究者针对 IRS 的信道估计进行了研究,但提出的方法一般时间开销太大或计算复杂度高,对于低成本的 IRS 硬件而言不切实际。可以考虑基于压缩感知和 AI 等设计先进的信道估计方法,以降低信道估计的开销和计算复杂度。

4.2 主被动调制方法设计

为了实现主被动互惠传输,目前的研究主要针对被动反射信号的调制方案进行设计。为了实现更高效、性能更好的传输,可以根据 A-BD 和 IRS 的硬件特性,联合设计主被动调制技术^[28]和波形。除了充分利用空域、码域、时域、频域、功率域、相位和幅度等常规信号空间探索可能的调制方法外,利用 IRS 的存储特性^[29]引入可控的传输时延来进行信息调制也是一个值得探索的研究方向。

4.3 接收机算法

要实现高性能的主被动互惠传输,需要设计高效的信号检测算法。目前,用于 AmBT 和 IRS 通信的信号检测算法主要有能量检测^[22]、最大似然、串行干扰消除^[14]、奇异值分解、广义近似消息传递、正交匹配追踪^[23]等。但是,在上述算法中,性能较好的算法计算复杂度高,低计算复杂度的算法性能较差,没有实现性能和复杂度的平衡。所以,根据主被动调制方法设计与之匹配的低复杂度、高性能的信号检测算法也是一个重要的研究方向。

4.4 物理层安全

主被动互惠传输技术为 6G 物联网提供了物理层的解决方案,同时也带来了新的安全问题。主被动互惠传输需要主被动设备协同工作,然而这给攻击者提供了机会,尤其对于功能简单的被动设备,由于成本受限,无法运行复杂的安全协议,更容易受到攻击和窃听,危及主被动双链路的通信安全。可以利用 A-BD 和 IRS 的基于电磁波反射的通信特点,研究面向主被动互惠传输的物理层安全技术,从物理信号层面保证用户的信息安全。

4.5 多址接入协议设计

在传统无线通信多址接入方面,面临的主要问题是时频资源受限情况下,很难保证同时为海量用户分配正交的时频资源块。为了解决这个问题,研究者提出了非正交多址接入(NOMA, non-orthogonal multiple access)技术^[30],让多个用户以非正交方式共享传输资源。然而,对基于环境反向散射技术和 IRS 的物联网传输而言,主要问题是如何设计合适的多址接入协议,当多个射频源与多个被动物联网设备建立复杂关联时,既要保证所有被动设备公平通信,又能确保整个网络的互惠增益。此外,6G 物联网对时延、可靠性和速率都有严苛的要求,这对多址接入协议提出了严峻的挑战。

5 结束语

简单的物联网连接时代已经结束,未来的世界将是一个充满智能与泛在连接的共同体。本文从 6G 物联网对频谱和能耗的需求出发,总结了现有物联网的传输技术,重点探讨了基于环境反向散射技术和 IRS 的主被动互惠传输技术以及与之相关的潜在研究方向。主被动互惠传输技术在频谱效率和低功耗方面具有突出优势和极大的应用前景,有望成为 6G 物联网的关键候选技术之一。但是相关理论和技术还不成熟,尚待进一步发展和完善,还需要研究者继续攻坚克难,持续创新,以尽快实现“一念天地,万物随心”的 6G 愿景。

参考文献:

- [1] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987.
ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication network: vision, challenges and key technologies[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2019, 49(8): 963-987.
- [2] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. IEEE Vehicular

- Technology Magazine, 2019, 14(3): 28-41.
- [3] SAAD W, BENNIS M, CHEN M. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems[J]. arXiv: 1902.10265, 2019.
- [4] 郭贺铨. 物联网技术与应用的新进展[J]. 物联网学报, 2017, 1(1): 1-6. WU H Q. Technology and application progress on Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(1): 1-6.
- [5] 田敬波. LPWA 物联网技术发展研究[J]. 通信技术, 2017, 50(8): 1747-1751. TIAN J B. LPMA IoT technology[J]. Communications Technology, 2017, 50(8): 1747-1751.
- [6] SELLER O B, SORNIN N. Low power long range transmitter[P]. United States: US9, 252, 834, 2016.
- [7] 戴博, 袁弋非, 余媛芳. 窄带物联网(NB-IoT)标准与关键技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016. DAI B, YUAN Y F, YU Y F. NB-IoT standard and key technologies[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.
- [8] 石明明, 鲁周迅. 三种无线通信协议综述[J]. 通信技术, 2011, 44(7): 72-73. SHI M M, LU Z X. An overview of three wireless protocols[J]. Communications Technology, 2011, 44(7): 72-73.
- [9] 赵景宏, 李英凡, 许纯信. ZigBee 技术简介[J]. 电力系统通信, 2006(7): 54-56. ZHAO J H, LI Y F, XU C X. ZigBee technology introduction[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006(7): 54-56.
- [10] 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.
- [11] VAN H 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] 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.
- [13] GUO H, LIANG Y C, LONG R, et al. Cooperative ambient backscatter system: a symbiotic radio paradigm for passive IoT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(4): 1191-1194.
- [14] YANG G, ZHANG Q, LIANG Y C. Cooperative ambient backscatter communications for green Internet-of-things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 1116-1130.
- [15] DI R M, DEBBAH M, PHAN-HUY D T, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: an idea whose time has come[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019(1): 1-20.
- [16] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [17] YU X, XU D, SCHOBBER R. Enabling secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[J]. arXiv: 1904.09573, 2019.
- [18] CAO Y, LYU T. Delay-constrained joint power control, user detection and passive beamforming in intelligent reflecting surface assisted uplink mmWave system[J]. arXiv: 1912.10030, 2019.
- [19] PRADHAN C, LI A, SONG L, et al. Hybrid precoding design for reconfigurable intelligent surface aided mmWave communication systems[J]. arXiv: 1912.00040, 2019.
- [20] WEN M, ZHENG B, KIM K J, et al. A survey on spatial modulation in emerging wireless systems: research progresses and applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(9): 1949-1972.
- [21] DI R M, HAAS H, GHRAYEB A, et al. Spatial modulation for generalized MIMO: challenges, opportunities, and implementation[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 102(1): 56-103.
- [22] BASAR E. Large intelligent surface-based index modulation: a new beyond MIMO paradigm for 6G[J]. arXiv: 1904.06704, 2019.
- [23] YAN W, YUAN X, KUAI X. Passive beamforming and information transfer via large intelligent surface[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019.
- [24] KARASIK R, SIMEONE O, DI RENZO M, et al. Beyond Max-SNR: joint encoding for reconfigurable intelligent surfaces[J]. arXiv: 1911.09443, 2019.
- [25] GONG S, LU X, HOANG D T, et al. Towards smart radio environment for wireless communications via intelligent reflecting surfaces: a comprehensive survey[J]. arXiv: 1912.07794, 2019.
- [26] NADEEM Q U A, KAMMOUN A, CHAABAN A, et al. Intelligent reflecting surface assisted multi-user MISO communication[J]. arXiv: 1906.02360, 2019.
- [27] CHEN J, LIANG Y C, CHENG H V, et al. Channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided multi-user MIMO systems[J]. arXiv: 1912.03619, 2019.
- [28] GUO S, LYU S, ZHANG H, et al. Reflecting modulation[J]. arXiv: 1912.08428, 2019.
- [29] NAKANISHI T, OTANI T, TAMAYAMA Y, et al. Storage of electromagnetic waves in a metamaterial that mimics electromagnetically induced transparency[J]. Physical Review B, 2013, 87(16): 161110.
- [30] DING Z, LEI X, KARAGIANNIDIS G K, et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2181-2195.

[作者简介]



伍明江(1995-), 男, 四川达州人, 西南交通大学信息科学与技术学院博士生, 主要研究方向为下一代移动通信物理层关键技术和智能反射面通信等。



类先富(1981-), 男, 江苏连云港人, 西南交通大学副教授, 主要研究方向为无线通信理论和下一代 Wi-Fi 关键技术等。

李里(1983-), 男, 四川成都人, 西南交通大学副教授, 主要研究方向为极化码编译码算法、大规模随机接入理论和非正交多址技术等。

唐小虎(1972-), 男, 四川绵竹人, 西南交通大学教授, 主要研究方向为编码技术、信息论和网络信息安全等。