

无线射频反向散射的现状、问题及发展趋势

韩子龙¹, 李雅菲¹, 王雨琪¹, 张悦豪¹, 郑黎明^{1,2}

(1. 天津先进技术研究院, 天津 300459; 2. 国防科技大学电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 无线射频反向散射具有共享频谱、低功耗、低成本等特点, 使其在通信、感知领域的终端设备、中继器市场占据一席之地。移动通信技术一直是发展的热点, 5G到6G的发展不仅是带宽的拓展, 更是从万物互联发展到万物智联; 然而移动通信技术和物联网技术都存在频谱稀缺、节能等需求, 因此它们与无线射频反向散射产生交集。首先通过移动通信技术、物联网技术等研究热点进行分析, 引出全面的无线射频反向散射。且通过回顾环境反向散射各种信号首篇论文、近几年论文、基本原理, 梳理出较为清晰的发展脉络, 并按不同维度对现状进行分类。随后通过对其发展脉络和现状分类进行梳理, 找出现存问题及部分问题解决方法。最后通过对前面章节汇总和思考, 预测下一阶段发展趋势。

关键词: 反向散射; 无线射频; 综述; 移动通信技术; 物联网

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.XXXX.

Wireless radio frequency backscatter communication: current status, issue, development trends

HAN Zilong¹, LI Yafei¹, WANG Yuqi¹, ZHANG Yuehao¹, ZHENG Liming^{1,2}

1. Tianjin Institute of Advanced Technology, Tianjin 300459, China

2. College of Electronic Science of National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract: Wireless radio frequency backscatter is characterized by shared spectrum, low power consumption, and low cost, making it a significant player in the terminal devices and repeater markets of communication and sensing. Mobile communication technology has always been a hotspot of development, the transition from 5G to 6G is not merely about speed but also about evolving from the Internet of Things to the Internet of Intelligent Things. Both mobile communication technology and IoT technology face challenges such as spectrum scarcity and energy efficiency, creating intersections with wireless radio frequency backscatter communication. By exploring research hotspots like mobile communication and IoT technologies, this study introduces wireless radio frequency backscatter communication. Through reviewing seminal papers on environmental backscatter communication, recent research, and fundamental principles, a clear developmental trajectory is mapped out, and the current state is categorized across different dimensions. Based on this developmental trajectory and classification, existing issues and partial solutions are identified. Finally, synthesizing insights from previous sections, this study predicts the next phase of development trends.

Key words: backscatter communication, wireless radio frequency, review, mobile communication technology, internet of things

1 引言

随着第五代移动通信技术(5G, 5th generation of mobile communication technology)商用化进程不断推进, 各国、各大企业已开始第六代移动通信

技术(6G, 6th generation of mobile communication technology)的研究。根据6G愿景^{[1][2][3][4]}及2021年爱立信移动市场报告预测, 到2027年全球移动网络总流量将突破370 EB/月, 物联网设备连接数量将超过302亿。面对指数级增长的数据流量与海量设备接入需求, 6G的研究已成为全球通信

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX

领域的战略焦点。在 6G 研发过程中, 出现以下情况。第一, 中低频段划分完毕, 高频段虽然带宽大, 但衰减也大, 虽然有多进多出 (MIMO, multiple-in multiple-out) 波束成形等技术, 但也会带来复杂度和成本等增加。第二, 按照《2030 年前碳达峰行动方案》统一部署, 有序推动以数据中心、5G 为代表的新型基础设施绿色高质量发展。进而推导出 6G 也需要绿色高质量发展。第三, 6G 持续对海量机器通信 (mMTC+, massive machine type of communication) 演进^[4], 需要对海量低成本终端连接。

物联网是未来无线通信系统发展的核心驱动力之一^{[5][6]}。随着物联网设备部署日益广泛, 频谱资源进一步紧张, 终端对持久电量的需求也随之增加。引起人们对共享频谱、低功耗、低成本特点的技术重视。反向散射凭借共享频谱、低功耗、低成本等特征, 在绿色 6G 网络应用场景中占据一席之地^[4], 也在无源物联网应用场景中占据核心地位之一。

2021 年 12 月, 在 3GPP SA#94-e 会议上确定的 5G-Advanced 第一个版本中, 关于 Rel-18 网络架构的 28 个立项, 其中就包括低功耗无源物联网的相关内容。在 2022 年 3 月的世界移动大会 (MWC, mobile world congress) 上, 中国移动联合华为、SKT、安立信等 24 家产业伙伴发布了《5G-Advanced 网络技术演进白皮书 2.0——面向万物智联新时代》, 其中无源物联网被列为 5G-Advanced 的关键技术。在可持续发展^[4]、近场技术^[7]、IMT-2030 (6G) 推进组发布的《2024 年面向 6G 的泛在实时通信网络场景需求与关键技术研究》和《6G 通信感知一体化安全需求与技术研究报告》等领域, 反向散射均被提及。

本文对研究论文和综述论文汇总分析, 找出在无线射频反向散射领域的研究热点, 从主要需求出发, 结合全面的无线射频反向散射进行论述, 从而展开本篇综述。具体结构如下: 第 1 节引言主要叙述无线射频反向散射在热点技术中的定位; 第 2 节发展现状主要按照首篇论文、近几年论文叙述发展脉络, 按照不同维度对现状分类, 并简要叙述基本原理; 第 3 节现存问题主要叙述反向散射发展过程中普遍规律性问题、及分类挖掘出的隐藏问题; 第 4 节发展趋势主要对前面章节汇总和思考, 预测反

向散射发展趋势; 第 5 节总结主要叙述基于需求、现状、现存问题及部分解决办法、预测趋势, 总结当前阶段的反向散射技术。

2 发展现状

发展现状包括反向散射发展过程、分类情况、基本原理的简要介绍。

2.1 发展过程

从反向散射发展历程看, 主要分为单站反向散射、双站反向散射和环境反向散射。同时, 其应用场景日益丰富, 按照应用场景^[8]可进一步细分为: 传统单站反向散射^[8]、双站反向散射^{[9][10][11]}、环境反向散射^{[12][13]}、基于全双工反向散射^[14]、转型反向散射^{[15][16][17][18]}、基于远距离无线电 (LoRa, long range radio) 反向散射^{[19][20][21]}、移动定位反向散射^[11]、并发反向散射^[22]、水声反向散射^[23]、声波反向散射^[24]、毫米波反向散射^{[25][26]}、太赫兹反向散射^{[27][28]}、光学反向散射^{[29][30][31]}。然而, 由于应用场景涉及无线射频、声波、光学等多学科领域, 跨度较大, 本文聚焦无线射频反向散射。无线射频反向散射其发展过程如图 1 所示。其中环境反向散射的射频源包括 ZigBee、电视 (TV, television)、蓝牙、无线网络通信技术 (WiFi, Wi-Fi)、调频 (FM, frequency modulation)、LoRa、移动通信技术等, 且虚框中内容为移动通信技术环境反向散射特有的技术, 也被称为共生反向散射^[32]。

无线射频反向散射通信技术起源于第二次世界大战, 具体工作流程如下: 首先在我方战机上安装标签, 接着我方雷达发射载波信号, 然后我方战机标签用我方雷达发射的载波信号进行调制并反射, 最后我方雷达接收反射信号来判别敌我双方战机身份^[33]。1948 年, Stockman 首次开发了反向散射通信技术^[34], 该技术允许标签在不产生有源射频 (RF, radio frequency) 信号的情况下, 通过调制和接收反射来的 RF 信号来传输数据, 并迅速成为低成本和低功耗无线通信系统的主要技术。发展到现在, 在工业界, 射频识别 (RFID, radio frequency identification) 产品已经广泛应用, 电子不停车收费系统 (ETC, electronic toll collection) 更是成为经典应用案例。2025 年重庆发布 5G+微波直驱变频技术 (MDFC, microwave direct frequency conversion) 无源物联网产业发展方案。



图1 反向散射发展过程图

在学术界，单站反向散射以RFID^[35]为代表的论文相对集中在2010年前后，双站反向散射由于需要专用的发射源，并很快就被环境反向散射取代，现阶段研究主要集中在环境反向散射。华盛顿大学JR Smith教授团队为环境反向散射起步和发展做了很大贡献。2013年发表首篇环境反向散射论文，也提出了第一个基于TV信号的反向散射原型系统^[12]。2014年发表首篇基于WiFi信号的反向散射原型系统^[36]的论文。2017年发表首篇基于FM信号的反向散射原型系统^[37]的论文。2017年发表首篇基于Lora信号的反向散射原型系统^[19]的论文。2017年发表首篇基于简易手机的反向散射原型系统^[38]的论文。2016年提出信号转换通信的反向散射原型系统^[15]的论文。清华大学何源教授团队也在上述领域也发表众多期刊，2020年以后在毫米波^[39]、声波^[40]、信号干扰^[41]方面进行拓展。基于上述原型系统论文发现，其设计原理：首先根据能量和信号理论计算（见2.3节），保证到达标签的能量满足标签信号处理好和调制工作，到达接收机的信号能够依据信噪比和编码方式进行解码。然后制作原型系统，用软件定义无线电（SDR，software defined radio）进行标签和接收机验证，验证成功后可以用专用集成电路（ASIC，application specific inte-

grated circuit）进行芯片打样。最后列举原型系统实验结果，按照误码率（BER，bit error ratio）、吞吐量、距离、功耗等多维度进行测试。环境反向散射被列入3GPP后，2024年发表首篇关于3GPP第19版本中环境反向散射的综述^[42]。2024年发表基于抗干扰和衰落反向散射的综述^[43]。2025年发表基于RIS辅助异构反向散射的综述^[44]。

总结反向散射发展过程发现，新一代反向散射技术解决上一代反向散射技术存在的问题，能更好的服务于人们。反向散射详细迭代过程如下：从传统的RFID^[35]（传统单站反向散射）到环境反向散射^[13]（使用移动通信技术、TV信号、FM信号、WiFi信号、LoRa信号等已有的环境信号）。其中移动通信技术从环境反向散射进一步演进到（融主被动）共生反向散射^[45]，发展逻辑请见表1。由于共生反向散射和融主被动反向散射是在环境反向散射的移动通信技术方向的演进，故图1中没有罗列出来。

随着侧重于应用场景的环境反向散射原型系统逐渐增多，环境反向散射^[13]、信号能量同步传输^[46]、环境反向散射信号处理^[47]、3GPP第19个版本环境物联网^[42]等综述逐步出现，后续内容将对当前研究论文和综述论文进行汇总并分析。

2.2 现状分类

反向散射与长期演进技术（LTE，long term evolution）^{[48][49]}、5G^{[50][51]}、6G^{[52][53][32]}、TV^[12]、FM^[37]、WiFi^[36]、LoRa^[19]、蓝牙低功耗（BLE，bluetooth low energy）^{[54][55]}、ZigBee^{[56][57]}、毫米波（mmWave，millimeter wave）^{[26][58]}、太赫兹^[59]、RFID^[60]、信号转换通信^[61]、单站反向散射^{[62][63]}、双站反向散射^{[64][65]}、环境反向散射^[13]、共生反射^{[66][67]}、下一代反向散射^{[68][69]}、物联网（IoT，internet of things）^[70]、无源物联网^{[71][72]}、编码^{[73][74]}、调制^{[75][76]}、信道^{[77][78][79][80]}、标签^{[81][82]}、接收机^{[83][84]}、MIMO^{[85][86]}、智能超表面技术（RIS，reconfigurable intelligent surface）^{[87][88]}、网络^{[89][90]}、抗干扰^{[91][43]}、衰落^{[92][93]}、无线携能通信（SWIPT，simultaneous wireless information and power transfer）^[94]、通感一体化^{[95][96]}、人工智能（AI，artificial intelligence）^{[97][98]}、安全^{[99][100]}、手机^[55]、应用^{[101][102]}等关键词关联。研究论文种类较多且繁杂，为方便了解，我们按照信号种类、与现有商品可集成性进行

表 1 反向散射网络架构优势劣势对比

网络架构	优势	劣势	应用场景
单站反向散射	结构简单、成本低,易于部署	双重路径损耗,载波对消,通信距离短,需要额外的频谱资源	适用于低成本、低速率的短距离场景
双站反向散射	避免双重路径损耗,扩大传输距离	需要专用载波发射器和额外的频谱资源	适用于有一定速率要求、成本预算较高的场景
环境反向散射	使用已有环境射频源代替专用载波发生器,不需要额外的频谱资源,降低成本和功耗	存在直射干扰,部分场景环境射频源不稳定	适用于低成本、低速率和有一定速率要求、环境资源丰富的场景
共生反向散射	利用主次链路协作,克服直射干扰问题;来自次系统的信号可作为主系统的多径,给主系统信号接收带来增益	目前只适用于移动通信技术,其他环境信号种类适用性不高,次系统通信容量低	适用于移动通信技术等接收机性能较好的场景
融主被动反向散射	提高次系统通信容量	目前只适用于移动通信技术,其他环境信号种类适用性不高,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	适用于移动通信技术等接收机性能更好、次系统速率较高的场景

分类。综述论文种类也较多,为方便了解,我们按照综述方向及数量进行分类。

按照信号种类分类,请见表 2。因为论文当前重点研究环境反向散射,所以单站

表 2 按照信号种类分类

论文	年份	类型	信号种类	功耗	最大吞吐量	最大吞吐量距离	信号源到标签距离	标签到接收机距离	误码率
[103]	2018	单站反向散射	RFID	45 uW	N/A	N/A	23 m	23 m	N/A
[104]	2012	单站反向散射	RFID	1.49 mW	96 Mbps	17.01 m	17.01 m	17.01 m	N/A
[105]	2014	双站反向散射	UHF	N/A	1 kbps	134 m	2.8 m	134 m	3.03%
[48]	2020	环境反向散射	LTE	几十 uW	13.63 Mbps	36.5 m	7.3 m	48.8 m	1%
[49]	2023	环境反向散射	LTE	N/A	400 bps	28 m	N/A	N/A	N/A
[50]	2021	环境反向散射	5G	N/A	N/A	N/A	184~695 m 38~143 m RCS:0.000 4 □	184~695 m 38~143 m RCS:0.000 4 □	N/A
[12]	2013	环境反向散射	TV	N/A	1 kbps	0.76 m(室外) 0.46 m(室内)	N/A	N/A	N/A
[106]	2017	环境反向散射	TV (ATSC)	N/A	1 kbps	9 m	N/A	12.4 m	N/A

续表

论文	年份	类型	信号种类	功耗	最大吞吐量	最大吞吐量距离	信号源到标签距离	标签到接收机距离	误码率
[37]	2017	环境反向散射	FM	11.07 uW	3.2 kbps	4.9 m	N/A	18.3 m	N/A
[107]	2024	环境反向散射	FM	N/A	333 bps	58 m	N/A	100 m	N/A
[36]	2014	环境反向散射	WiFi	N/A	1 kbps	2.1 m	N/A	2.1 m	N/A
[14]	2015	环境反向散射	WiFi	N/A	5 Mbps	1 m	N/A	5 m	N/A
[108]	2016	环境反向散射	WiFi	N/A	300 kbps	34 m	N/A	54 m	N/A
[109]	2021	环境反向散射	WiFi	30 uW	500 kbps	30+ m	N/A	30+ m	N/A
[19]	2017	环境反向散射	LoRa	9.25 uW	37.5 kbps	237.5 m	N/A	2.8 km	N/A
[21]	2018	环境反向散射	LoRa	2.591 mW	6.25 kbps	300 m	N/A	1.1 km	N/A
[110]	2020	环境反向散射	LoRa	0.3 mW	199.4 kbps	50 m	N/A	300 m	N/A
[111]	2024	环境反向散射	LoRa	94.7 uW	19.6 kbps	10 m	180 m	N/A	N/A
[55]	2015	环境反向散射	BLE	N/A	1 Mbps	9.4 m	N/A	9.4 m	N/A
[54]	2017	环境反向散射	BLE	N/A	N/A	13 m	30 m	1 m	
[112]	2020	环境反向散射	BLE	37 uW	16.6 kbps	2 m	0.5 m	56 m(室外) 25 m(室内)	N/A
[113]	2021	环境反向散射	BLE	51.5 mW	8.275 kbps	2 m	0.5 m	2 m14 m	0.04%0.68%
[114]	2025	环境反向散射	BLE	450.9 uW	974 kbps	N/A	N/A	N/A	N/A
[56]	2022	环境反向散射	ZigBee	N/A	16.8 kbps	17 m	N/A	N/A	N/A
[57]	2023	环境反向散射	ZigBee	N/A	218 kbps	20 m	N/A	N/A	1%
[115]	2017	环境反向散射	mmWave	N/A	4 Gbps	N/A	N/A	N/A	N/A
[26]	2021	环境反向散射	mmWave	N/A	2 Gbps	0.5 m	0.5 m	0.5 m	N/A
[116]	2016	环境反向散射	Bluetooth Wifi	45 uW	48.7 kbps	N/A	N/A	4.8 m	N/A

续表

论文	年份	类型	信号种类	功耗	最大吞吐量	最大吞吐量距离	信号源到标签距离	标签到接收机距离	误码率
					23.8				
					MHz				
			Wifi	371.2 uW	247.1				
[117]	2022	环境反向散射	ZigBee	80.1 uW	kbps	N/A	5 m	3.1 m	N/A
			Bluetooth	89.2 uW	986.5			9.5 m 4.2 m	
			LoRa	47.8 uW	kbps			206 m	
					27.3				
					kbps				

反向散射、双站反向散射在表 2 罗列较少。

表 2 中环境反向散射部分按照信号种类原型系统的首篇论文以及最新论文排列。TV 信号最新论文较少。ZigBee 信号论文刚发表不久。mmWave 信号虽然也处于起步阶段，但是已有天线和调制的印刷原型系统。信号转换通信可以参考更多的论文^{[118][119]}。移动网络信号（LTE、5G）、FM 信号、WiFi 信号、LoRa 信号、蓝牙信号（BLE）发表早且持续发表。但是基于太赫兹^[120]反向散射尚处于起步阶段，离原型系统的实现还有段距离，故未纳入表 2。

按照与现有商品可集成性分类，请见表 3。RFID 需配套的读写器配合使用。移动网络、WiFi、蓝牙、信号转换通信可依托于手机使用。TV 需配套电视机顶盒使用，FM 需配套车载收音机使用，FM 接收电路也可在 3G、4G 手机集成使用。LoRa 和 ZigBee 适用于室内外环境，但需要配套接收机。mmWave 车载雷达早已商用。除 RFID 和移动网络已有商用反向散射产品外，其他均处于实验室阶段。

按照综述方向及数量分类，请见表 4。不考虑

表 3 按照与现有商品可集成性分类

信号种类	现有商品	手机	实验室阶段
RFID	√	/	/
移动网络	√	√	/
TV	√	/	√
FM	√	√	√
WiFi	√	√	√
LoRa	√	/	√
蓝牙	√	√	√
ZigBee	√	/	√
mmWave	√	/	√
信号转换通信	√	√	√

反向散射和环境反向散射等综合方向，原因是 48 篇综述都与反向散射综合方向相关。通过表 4 发现，移动通信技术、无源物联网、网络、RIS、能量收集等综述较多。其中，现阶段 RIS 与移动通信技术的相关性高于与非蜂窝 MIMO 绿色通信网络的相关性^[121]，能量收集属于无源物联网核心技术之一^[122]，而网络与其他方向都相关。进行方向合并和分析，发现移动通信技术和物联网技术是反向散射发展的主要驱动力。

与移动通信技术相关的细分方向包括：环境物联网与 3GPP 结合^[42]，环境物联网与 6G 标准结合^[126]，6G 与大量物联网接入结合^[140]，6G 与物联网结合^[141]，6G 与近场 MIMO 结合^[142]，6G 与反向散射非相干技术结合^[52]，6G 与共生反射结合^[32]，6G 与反向散射 RIS 结合^[143]，NOMA 与 IRS 结合^[131]，NOMA 与反向散射结合^[144]。6G 与全面的无线射频反向散射结合的论述还未出现。

与物联网相关的细分方向包括：物联网与无源结合^[72]，物联网与低功耗结合^[133]，物联网与 RFID 感知结合^[137]，绿色物联网与感知结合^[95]，异质无蜂窝绿色通信网络与 MIMO 结合^[121]。其中，物联网与无源结合、物联网与低功耗结合等方向包括射频、太阳能、震动、热能等，物联网与 RFID 感知结合方向只包括射频中的 RFID。物联网与全面无线射频反向散射结合的论述还未出现。

与最新发表的反向散射综述论文^[45]对比，其综述提出架构演进顺序是：单站反向散射、双站反向散射、环境反向散射、寄生反向散射、互惠共生反向散射、融主被动传输的寄生反向散射。其中，共生反向散射是梁映敞团队提出，融主被动传输的寄生反向散射是其综述^[45]提出，且其综述主要集中于移动通信技术的反向散射，无线射频反向散射其他

表 4 按照综述方向及数量分类

综述方向	论文	数量
反向散射	[123][124][45][74]	48
环境反向散射	[101][13][125][42][126][47][127]	7
供能/能量收集	[125][128][129][130][90]	5
网络	[90][52][121][87][131][132][102]	7
低功耗/无源/绿色/无电池物联网	[133][134][135][136][122][137][95][72][138][139]	10
移动通信技术/3GPP/6G/共生反射/NOMA	[42][140][141][142][126][52][32][143][87][131][144]	11
MIMO/RIS	[142][121][87][44][145][131]	6
AI	[98]	1
链路计算	[146]	1
编码技术	[74]	1
信号检测	[47]	1
抗干扰和衰落	[43]	1
传感器	[95]	1
频谱共享	[127]	1
资源分配	[132]	1
信号转换通信	[61]	1
标签	[82]	1
下一代反向散射	[68]	1
应用	[102][147][148]	3

信号种类很少提及。与最新发表的环境反向散射综述论文^[101]对比，其综述的移动通信技术内容只有LTE，没有5G和6G。最新五年全面无线射频反向散射论述还未出现。

本文主要贡献在于：从反向散射的主要驱动力出发，结合全面的无线射频反向散射进行论述，展现出最新且主流的反向散射内容。并进行多方面对

比，梳理出较为清晰的演进脉络。

根据本文的特点，从移动通信技术和物联网技术出发，进行全面的无线射频反向散射自身调制与反射调制对比。其中，对编码、调制、天线和反向散射调制等维度进行汇总，请见表5。其中，毫米波和6G处于实验室阶段且原型系统实现仍有一定距离，故没有列在表5中。

表 5 无线射频自身调制与反射调制对比

信号种类	编码	调制	天线	反射调制
UHF RFID	FM0	ASK/PSK	偶极子天线	OOK
LTE	Turbo/级联码/LDPC	OFDM	MIMO	FSK
5G	LDPC/Polar	OFDMA/ NOMA	MIMO	BPSK
TV	向前纠错码/ nQAM	OFDM	引向天线/全向天线	OOK
FM	模拟信号/RDS编码	FM调频	全向天线	OOK/FSK/4PAM
WiFi	1024QAM	OFDMA	MIMO	BPSK
LoRa	循环纠错码	Chirp调制	全向天线/ 定向天线	OOK/FSK
蓝牙	LC3编码	GFSK	倒F型天线	OQPSK
ZigBee	帧结构编码	BPSK/ OQPSK	全向天线	频率相移

通过表 1 内容分析, 随着反向散射网络架构迭代, 反向散射通信距离有一定的提升, 通信速率有较高的提升, 对接收机性能需求也进一步的提升。通过表 5 内容分析, 随着反向散射网络架构迭代, 信号种类也从 UHF RFID 发展到 5G, 信号自身的编码、调制、天线性能和复杂度逐步提升, 反向散射调制还处于初级阶段且变化不大。通信技术从 UHF RFID 发展到 5G, 在编码、调制、天线、通信距离、通信速率、接入数量、网络覆盖范围、终端高性能及复杂度、核心网性能及复杂度、网络资源分配、方便人们生活等维度都有很大的提升, 5G 和 6G 作为现阶段无线射频通信技术的前沿典范, 开拓 6G 移动通信技术的研究, 可以给其他无线射频通信技术发展提供借鉴。

通过表 2 和表 3 内容分析, 与人们越贴近、与现有商品可集成性越高, 该种类的无线射频反向散射通信技术发展越快。通过表 4 内容分析, 移动通信技术和物联网技术是反向散射发展的主要驱动力。通过表 2 内容分析, 多种无线射频反向散射通信技术在其无可取代的场景中各自发展, 呈现出万物互联的多样性。因此, 反向散射既要借鉴 6G 的优势技术, 又要重视在各自场景中无可取代的物联网技术锚点。

2.3 基本原理

反向散射技术可细分为单站反向散射、双站反向散射、环境反向散射、共生反向散射、融主被动共生反向散射。其演进过程如图 1 和表 1 所示。融主被动共生反向散射^[45]在共生反向散射基础上, 标签端增加主动传输信号功能。共生反射、融主被动共生反向散射中标签反射给主次级接收机的信号原理与环境反向散射的信号原理类似。因此, 把共生反向散射、融主被动共生反向散射划分到环境反向散射大类中。

对上述反向散射通用原理进行简化和分类, 可形成第一类、第二类模型, 并分别进行能量和信号分析。单站反向散射系统 (MBCS, monostatic backscatter communications systems) 分类为第一类模型, 双站反向散射通信系统 (BBCS, bistatic backscatter communications systems) 和环境反向散射系统 (ABCS, ambient backscatter communications systems) 分类为第二类模型。

2.3.1 第一类模型能量分析

为简化模型, 设定工作在理想条件下, 采用弗里斯 (Friis) 传输方程对能量信号的远场传播过程进行建模, 能量传播过程如图 2 所示:

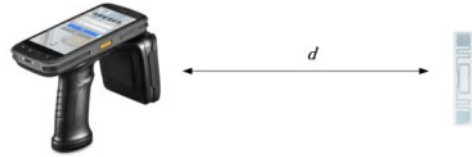


图 2 第一类模型能量示意图

其中 P_T 是发射机的发射功率, G_T 是发射机的天线增益, d 为发射机和散射体 (标签) 之间的距离, G_S 是散射体的天线增益, P_S 是散射体的接收功率, 散射体对射频信号的反射系数为 Γ , P_{BC} 是散射体对外反射的功率, G_R 是接收机的天线增益, P_R 是接收机的接收功率。为了降低模型的复杂度, 不考虑发射机的波束成形, 假设从发射机天线发射的能量均匀辐射到空间所有方向, 传输过程中的损耗为常数 L_d , 散射体采用半波偶极子天线, 则散射体天线接收的功率 P_S 如式 (1) 所示:

$$P_S = \frac{P_T G_T G_S \lambda^2}{(4\pi d)^2 L_d} \quad (1)$$

假设接收机和散射体接收方式相同, 能量传输过程也类似, 则接收机接收的能量 P_R 如式 (2) 所示:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_S^2 G_R \lambda^4}{(4\pi)^4 d^4 L_d^2} |\Gamma|^2 \quad (2)$$

2.3.2 第一类模型信号分析

为简化模型, 给出幅移键控 (ASK, amplitude shift keying) 反向散射信号分析模型。相移键控 (PSK, phase-shift keying) 请参考文献^[49], 频移键控 (FSK, frequency shift keying) 请参考文献^[19]。其中 $B(n) \in \{0,1\}$ 是经散射体调制自身二进制数据, $\eta \in [0,1]$ 是散射体内部的信号衰减因子, $w(n)$ 是加性高斯白噪声 (AWGN, additive white gaussian noise), C_r 为读写器到标签的衰落信道, C_t 为标签到读写器的衰落信道, $s(leak)$ 为混合的载波泄露信号 (图 3 中的 $S_{leakage}$), $s(n)$ 是载波信号。接收机接收来自标签反射信号 (如图 2 所示)、载波泄露信号 (如图 3 所示) 和噪声信号, 需要消除载波泄露。接收机端信号 $y(n)$ 表示如式 (3)

所示：

$$y(n) = C_{sr}\eta B(n)C_{st}s(n) + s(leak) + w(n) \quad (3)$$

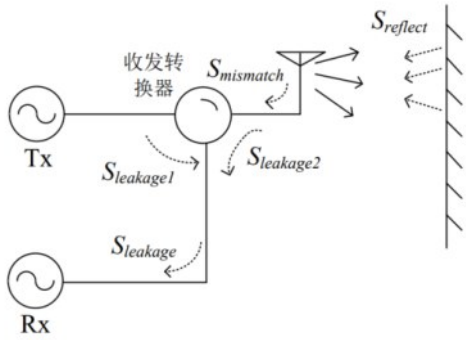


图3 载波泄露示意图

2.3.3 第二类模型能量分析

为简化模型，设定工作在理想条件下，采用弗里斯（Friis）传输方程对能量信号的远场传播过程进行建模，能量传播过程如图4所示：

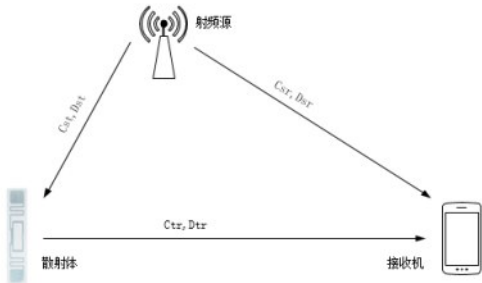


图4 第二类模型能量示意图

其中 P_T 是射频源的发射功率， G_T 是射频源的天线增益， D_{st} 为射频源和散射体之间的距离， G_S 是散射体的天线增益， P_S 是散射体的接收功率，散射体对射频信号的反射系数为 Γ ， P_{BC} 是散射体对外反射的功率， G_R 是接收机的天线增益， P_R 是接收机的接收功率， D_{sr} 为散射体和接收机之间的距离。为了降低模型的复杂度，不考虑射频源的波束成形，假设从射频源天线发射的能量均匀的辐射到空间所有方向， C_{st} 为射频源到散射体的衰落信道，散射体采用半波偶极子天线，则散射体天线接收的功率 P_S 如式（4）所示：

$$P_S = \frac{P_T G_T G_S \lambda^2}{(4\pi D_{st})^2 C_{st}} \quad (4)$$

假设接收机和散射体接收方式相同，能量传输过程也类似， C_{sr} 为散射体到接收机的衰落信道， D_{sr} 为射频源和接收机之间的距离， C_{sr} 为射频源到

接收机的衰落信道，则接收机接收的能量 P_R 如式（5）所示：

$$P_R = \frac{P_T G_T G_S^2 G_R \lambda^4}{(4\pi)^4 D_{st}^2 D_{sr}^2 C_{st} C_{sr}} |\Gamma|^2 + \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi D_{sr})^2 C_{sr}} \quad (5)$$

2.3.4 第二类模型信号分析

为简化模型，由射频源、接收机和散射体组成的第二类模型信号系统，如图5所示。在射频源与其传统主用户（智能手机）进行通信的同时，也作为散射体和接收机的射频源。首先散射体从射频源中获取能量，然后通过反向散射与接收机进行通信。

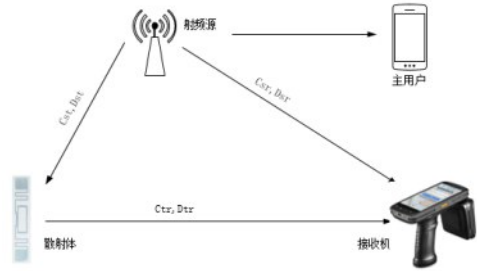


图5 第二类模型信号示意图

其中 C_{sr} 、 C_{st} 和 C_{sr} 分别为射频源—接收机、射频源—散射体和散射体—接收机的衰落信道。其中 $s(n)$ 是射频源发送信号， $B(n) \in \{0,1\}$ 是经散射体调制自身二进制数据， $\eta \in [0,1]$ 是散射体内部的信号衰减因子， $w(n)$ 是AWGN。接收机接收来自直接链路（射频源—接收机）和反射链路（射频源—散射体—接收机）的信号，需要消除直射干扰。接收机端信号 $y(n)$ 表示如式（6）所示：

$$y(n) = C_{sr}s(n) + C_{sr}\eta B(n)C_{st}s(n) + w(n) \quad (6)$$

3 现存问题

随着反向散射持续发展，其应用逐步拓展至农业^{[150][151][152]}、智慧城市^[37]、车联网^[153]、无人飞行载具（UAV, unmanned aerial vehicle）^[154]、身体健康^[102]、5G^{[155][156]}等领域，相关论文逐步出现。从首篇环境反向散射论文及原型系统问世，到不同信号种类反向散射论文兴起，再到《重庆市推动5G+MDFC无源物联网产业集群化发展与规模化应用工作方案》发布，最后基于环境反向散射的商品陆续推出。然而，无线射频反向散射其他信号仍处于原型系统阶段，发展滞后。近期，随着反向散射继续演进，性能不足和网络问题也更新迭代。不远的未

来,随着部署数量和风险增加,信息安全问题将受到人们重视。

3.1 其他反向散射信号发展滞后问题

通过2.2节对表1至表5内容分析发现,既要重视5G和6G无线射频通信技术等前沿典范,又要重视在各自场景无可取代的物联网技术锚点。其中,5G与TV、FM、WiFi、LoRa、BLE、ZigBee、信号转换通信等频谱不重叠,且应用场景也有差异。

目前,5G反向散射已实现商用化。而其他信号反向散射仍处于原型系统阶段,且具备较大发展空间。经汇总发现,5G反向散射发展速度最快,WiFi、BLE、信号转换通信、FM、LoRa发展速度次之,TV、mmWave、ZigBee发展速度较慢。分析原因发现,5G与日常生活频繁使用的手机关联度最高,WiFi、BLE、信号转换通信与手机关联度次之。美国2025年刚实现5G全覆盖,此前部分3G、4G手机支持FM功能。LoRa是最远反向散射通信,且LoRa芯片实现国产化。TV和ZigBee反向散射需要同时设计标签和接收机,但是TV属于常见环境信号。mmWave虽然与5G、6G关联度高,但是它属于高频段且开发较少。总之,信号种类与人们生活关联度越高,发展越快。

TV、FM反向散射原型系统还有频移的解决办法:在标签使用超过工作频段的频移^[116],实现无直射干扰,接收机可直接解码。采用标签验证板和软件无线电可以进行验证。也可使用上述原型系统在没有5G信号的情况下进行性能摸底,并结合专用场景需求进行性能评估。还有TV、FM、ZigBee接收机等低成本的解决办法:在一些对成本不敏感的专用场景中,支持接收机定制或者融合到商用网关设备里。

3.2 性能不足问题

3GPP与环境反向散射结合,存在天然的问题:标签由于低功耗、低成本、低性能和广泛部署等自身特点,造成标签自身轻量级协议仅有媒体接入控制层(MAC, media access control layer)和物理层(PHY, physical layer)。传统的用户设备(UE, user equipment)和基站(BS, base station)的协议有无线电资源控制(RRC, radio resource control)/服务数据适配协议(SDAP, service data adaptation protocol)、分组数据汇聚协议层(PDCP, packet data con-

vergence protocol)、无线链路控制层(RLC, radio link control)、MAC、PHY层。所以在应用场景中协议接口整合仍处于早期阶段^[42],要实现普适性的mMTC反向散射场景仍是个开放性问题。

户外场景中5G反向散射给出了代表性解决方法,室内场景中商用WiFi结合MIMO反向散射^[157]也给出实用解决方法。无线射频反向散射标签通信距离都短,5G属于长距离的无线广域网,在组网过程中,各种反向散射信号都会与5G进行转换,或者反向散射信号之间进行转换^[117],所以信号转换通信在实际场景中处于必要的辅助位置。而且,信号转换通信与MIMO结合场景^[158]需求、射频计算最新综述^[158]内容描述,都说明信号转换通信还有很大的发展空间。

性能不足问题,需要在信道与算法、多通信协议等领域进行提升。信道与算法:从链路预算^[146]发展到信道估计^[159],再发展到信号检测^[47];可以使用AI对信道与算法跨维度优化。多通信协议:在通信过程中,可以根据部署场景动态调整误码率、吞吐量、距离、功耗等参数,实现性能均衡。

3.3 反向散射通信网络研究不足

3GPP中定义四种环境反向散射网络拓扑^[126]。在拓扑1和拓扑4中,标签与BS、标签与UE直连。但标签与UE和BS协议接口整合仍处于早期阶段,拓扑1和拓扑4存在较大的发展空间。在拓扑3和拓扑4中,标签、中间/辅助节点、BS之间相互连接,需要中间/辅助节点进行协议转换。由于5G是无线广域网,各种反向散射信号都会与5G的BS进行转换。但5G与其他反向散射信号转换暂未出现。

异构型网络中的环境反向散射主要节点与基站^[121]连接后,形成异构反向散射网络架构,与此同时,网络资源分配^[132]和协议整合也需要进行相应调整。在不完美的信道状态信息(CSI, channel state information)场景下网络资源分配的鲁棒性资源分配、资源分配的公平性、灵活组网的资源分配等方面仍存在问题。

3.4 信息安全问题

在反向散射网络架构^{[121][126][132]}中,信息安全问题集中在标签通信的链路,信息安全问题包括内容窃听、模拟合法用户进行欺骗等。因为标签计算能力有限的特点,所以只能使用轻量级的安全方法。安全方法包括轻量级设备身份验证、物理层安全技

术^{[160][161][162]}和隐蔽通信技术^[131]等。

轻量级设备身份验证已广泛应用到反向散射信息安全中，在避免恶意访问的场景发挥作用，但是窃听能力不强。为了提高安全性，提出物理层安全技术，但是随着窃听技术的发展，物理层安全技术加密的信息也有可能被破译，而且物理层安全技术每次只允许一个节点传输有用信息，在复杂调度中是不能承受的。再次提高安全性，提出隐蔽通信技术，但是隐蔽通信技术只适用于低速率但万无一失的场景，而且其主要瓶颈在于如何在极低的信噪比下恢复有用的信息。未知和不稳定的环境射频源，对上述安全方法都有负面影响，因此，如何在不完美的CSI场景下进行安全方法量身定制仍是需要解决的问题。

RIS^{[163][164][165]}结构提供丰富的灵活性和自由度，可以改变反向散射波束形状和方向，进而提升安全性。但是也会增加系统能量消耗和设备成本。

4 发展趋势

随着反向散射不断演进，5G和6G反向散射不断创新，并带动其他反向散射信号种类持续发展，共同构建以6G无线广域网为枝干、海量有源和无源（无线射频反向散射为无源的典型代表之一）终端为树叶的异构型网络。在异构型网络中，6G反向散射有可能会降维占据其他反向散射信号种类生存空间。结合发展现状、现存问题，推演出以下几种未来发展趋势。

4.1 新型反向散射机制不断出现

3GPP与环境反向散射结合^{[42][126]}，将引发新型的协议整合、网络拓扑出现。重庆市推动5G+MDFC无源物联网产业集群化发展与规模化应用工作，将引发性能均衡、网络资源分配优化迭代。5G反向散射商用化带动下，将引发其他反向散射信号快速发展。6G高频段的发展，将引发完整的毫米波反向散射机制、近场通信反向散射机制出现。多种反向散射信号与RIS融合，将引发通信距离增加和信息安全提升。与现有基础设施融合，将引发改善人们生活的技术变化。在反向散射发展推动下，单独ZigBee射频源的反向散射已在近3年内出现。随着无源物联网接收机和标签的优化迭代，射频计算、混合数字/模拟反向散射机制逐渐显现。

4.2 性能持续提升

从链路预算^[146]、信道估计^[80]、干扰对消^[43]、信号检测^[47]、网络资源分配^[132]、等方面都在持续优化提升。链路预算性能提升方法有高效能量收集电路、RIS辅助通信、MIMO标签/读写器、标签端信道编码方法等。未来向实际应用场景的链路预算发展。信道估计性能提升方法有考虑相位噪声和杂散的有效信道估计迭代算法，使其在实际应用场景中能够有效估计信道。干扰对消针对直射干扰（DLI, direct link interference）、相互干扰（MI, mutual interference）、双径衰落（DPF, double path fading）等问题有对应性能提升方法。DLI性能提升方法有相继干扰消除（SIC, successive interference cancellation）、正交频分复用（OFDM, orthogonal frequency division multiplexing）、频移等。MI性能提升方法有多址、标签筛选、跳时扩频等。DPF性能提升方法有有源和无源混合传输、中继辅助传输、RIS辅助传输等。未来向DLI管理、MI管理等自适应对消算法发展。信号检测性能提升方法有已知参数的统计检测、未知参数的统计检测、相干/非相干检测、基于AI的信号检测等。未来向信道模型与硬件匹配发展。网络资源分配按照非中继、中继、单天线、多天线、单用户、多用户等场景进行吞吐量最大、能效最大、最大最小效用等方向进行算法优化。未来向不完美CSI情况下鲁棒资源分配、资源分配公平性、灵活组网、信息安全、AI等发展。

4.3 AI与反向散射融合

无线射频反向散射与AI结合^[98]，主要在信道估计、信号检测、信息安全、网络资源分配等场景发挥作用，目前使用的算法主要有监督学习、非监督学习、强化学习、深度学习等。未来，AI将辅助异构反向散射网络中继节点、源节点、目的节点之间数据传输，从而实现高效且低功耗。AI将辅助异构反向散射网络的RIS、无人机、车载等动态网络业务，从而实现连续性。AI将辅助异构反向散射网络的信息安全，从而实现性能提升。

4.4 安全性不断提升

随着无线射频反向散射发展并实际部署，对信息安全技术不断重视。首先是轻量级设备身份验证，然后是物理层安全技术，接着是隐蔽通信技术，最后是AI及RIS实现信息安全。物理层安全技

术、隐蔽通信技术都无法满足同时多用户接入场景。在不完美且不稳定的 CSI 场景下，前三种信息安全技术都受到影响。AI 结合信道估计、信号检测、网络资源分配可以减少影响。AI 结合 RIS 可以改善信道和非视距 (NLOS, non-line-of-sight) 传输，进一步减少影响。未来，AI 和 RIS 将辅助反向散射网络的信息安全实现性能提升。

4.5 与 5G/6G 深度融合

随着 5G 网络商用部署及 6G 开始研究，全球移动通信技术呈现蓬勃发展。我国 6G 论文发文量居全球首位^[166]，拥有国际领先的重大原创成果^[167]，彰显在 6G 领域的优势。3GPP 与环境反向散射结合^{[42][126]}，3GPP 与其他反向散射信号种类通过中继转换或者信号转换通信实现交互，与移动通信技术网络基础设施一起构建成低功耗物联网，如图 6 所示。

在无线射频反向散射与 5G/6G 融合的基础上，有以下几种未来发展趋势。首先，打破网络协议壁垒，实现多技术协议与 5G/6G 协议兼容，比如射频计算、信号转换通信、混合数字/模拟反向散射机制。其次，研究超材料与反向散射的集成，设计 RIS 与反向散射标签的协同架构，动态调控射频源信号的反向路径，增加与 5G/6G 通信质量。再次，在 5G/6G 反向散射网络中，AI 与 RIS、网络资源分

配、信息安全协作，实现自动化调优。最后，在 5G/6G 反向散射网络中，多个 RIS 相互协作来实现鲁棒性。

5 总结

本文通过研究热点的移动通信技术和物联网技术，找到它们与无线射频反向散射的交集，进而引出无线射频反向散射。通过叙述无线射频反向散射各种信号的首篇论文、近几年论文来描绘出发展脉络，通过研究论文和综述论文汇总分析，并按照不同维度对现状进行分类，并叙述反向散射基本原理。通过发展脉络和现状分类，找出存在的规律。通过现状、存在的规律，找出现存问题。汇总上述情况，并细分相关内容，引出发展趋势。目前，无线射频反向散射处于一个持续发展的阶段，未来 6G 的实现将给无线射频反向散射带来研究的蓝海。

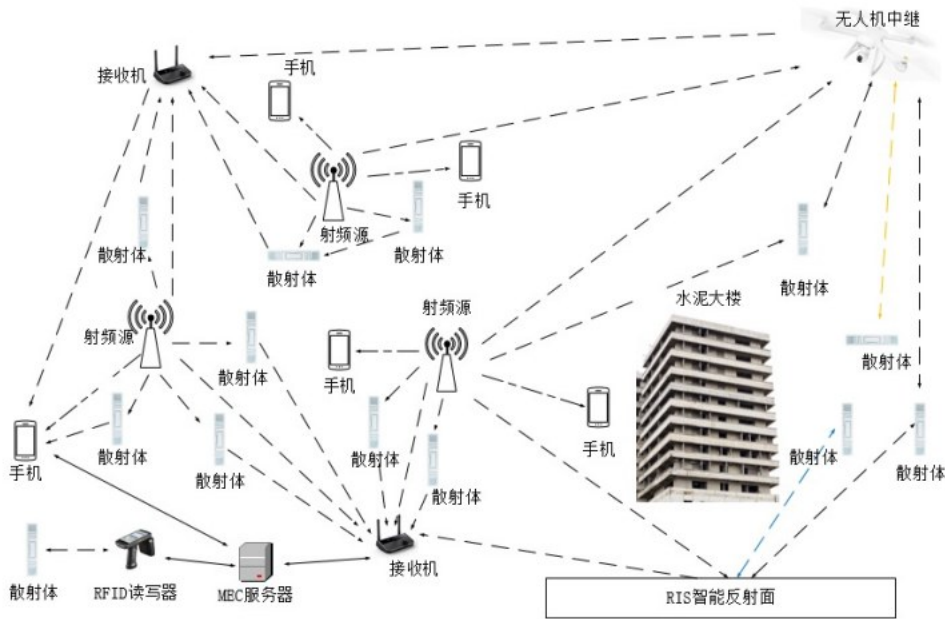


图 6 低功耗物联网

参考文献:

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021.
IMT-2030 (6G) Promotion Group. White Paper on 6G Vision and Candidate Technologies[R].2021.
- [2] 广东省新一代通信与网络创新研究院,清华大学,北京邮电大学,等.6G无线热点技术研究白皮书[R].2020.
Guangdong Communications & networks institute, Tsinghua University, Beijing University of Posts and Telecommunications, et al. 6G Wireless Hotspot Technology Research White Paper[R]. 2020.
- [3] 尤肖虎,尹浩,邬贺铨. 6G与广域物联网[J]. 物联网学报, 2020年3月第4卷第1期.
YOU X H, YIN H, WU H Q. On 6G and wide-area IoT[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020.
- [4] [加]童文(Wen Tong)、[加]朱佩英(Peiyang Zhu).6G:无线通信新征程 跨越人联、物联,迈向万物智联[M]. 北京:机械工业出版社, 2021年9月.
Wen Tong, Peiyang Zhu. 6G The Next Horizon From Connected People and Things to Connected Intelligence. [M]. Beijing: China Machine Press, 2021.9
- [5] Atzori L, Iera A, Morabito G. The internet of things: A survey [J]. Computer networks, 2010, 54(15): 2787-2805.
- [6] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions[J]. Future generation computer systems, 2013, 29(7): 1645-1660.
- [7] 赵亚军,戴凌龙,张建华等. 6G近场技术白皮书[R], 南京, 2024. doi:10.12142/FuTURE.202404001.
Y. J. Zhao, L. L. Dai, J. H. Zhang, et al, 6G Near-field Technologies White Paper, [R], ForumFuTURE, Nanjing, China, Apr 2024. doi:10.12142/FuTURE.202404002.
- [8] 赵文晶. 反向散射通信系统性能分析理论研究[D]. 北京:北京交通大学, 2022(07).
W. J. Zhao. Theoretical Research on Performance Analysis of Backscatter Communication Systems. [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022(07).
- [9] Choi S H, Kim D I. Backscatter radio communication for wireless powered communication networks[C]// Proceedings of 2015 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Kyoto: IEEE Press. 2015. 370 - 374.
- [10] Kimionis J, Bletsas A, Sahalos J N. Increased range bistatic scatter radio[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(3): 1091 - 1104.
- [11] Iyer V, Nandakumar R, Wang A, et al. Living IoT: A flying wireless platform on live insects[C]// The 25th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2019: 1-15.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] D. Bharadia, K. R. Joshi, M. Kotaru, and S. Katti, "BackFi: High throughput wifi backscatter," [C]// in Proc. of ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication, London, United Kingdom, Aug. 2015, pp. 283-296.
- [15] Iyer V, Talla V, Kellogg B, et al. Inter-technology backscatter: Towards internet connectivity for implanted devices[C]// Proceedings of Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference, 2016. 356 - 369.
- [16] Guo X, He Y, Zheng X, et al. ZigFi: Harnessing Channel State Information for Cross-Technology Communication[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, PP(99): 1-11. DOI: 10.1109/TNET.2019.2962707.
- [17] Guo X, He Y, Zheng X, et al. Lego-fi: Transmitter-transparent ctc with cross-demapping[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(8): 6665-6676.
- [18] Z Yu, C Jiang, Y He, X Zheng, X Guo. Crocs: Cross-technology clock synchronization for wifi and zigbee[J]. arXiv preprint arXiv: 2209.15407, 2022
- [19] Talla V, Hesar 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.
- [20] Ambuj Varshney, Oliver Harms, Carlos Pérez-Penichet, Christian Rohner, Frederik Hermans, Thiemo Voigt, "LoRea: A Backscatter Architecture that Achieves a Long Communication Range" [C]// ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys'17). ACM, YorkNew, NY, USA, 14 pages.
- [21] Yao Peng, Longfei Shangguan, Yue Hu, Yujie Qian, Xian-shang Lin, Xiaojiang Chen, Dingyi Fang, Kyle Jamieson. 2018. PLoRa: A Passive Long-Range Data Network from Ambient LoRa Transmissions. In SIGCOMM '18: SIGCOMM 2018, August 20 - 25, 2018, Budapest, Hungary. ACM, New York, NY, USA, 14 pages.
- [22] Hesar M, Najafi A, Gollakota S. Netscatter: Enabling large-scale backscatter networks[C]// 16th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. BOSTON, United States, 2019: 271-284.
- [23] Jang J, Adib F. Underwater backscatter networking[C]// Proceedings of Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication, 2019. 187 - 199.
- [24] KUESTER D, POPOVIC Z. How good is your tag?: RFID backscatter metrics and measurements[J]. IEEE Microwave Magazine, 2013, 14(5): 47-55.
- [25] 黄文奎. 毫米波汽车防撞雷达的设计与实现[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海微系统与信息技术研究所), 2006(02).
W. K. Huang. Design and Production of Millimeter-wave Automotive Radar for Collision Avoidance Application [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,

- 2006(02).
- [26] Kimionis J, Georgiadis A, Daskalakis S N, et al. A printed millimetre-wave modulator and antenna array for backscatter communications at gigabit data rates[J]. *Nature Electronics*, 2021, 4 (6): 439-446.
- [27] Siegel P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 2002, 50(3): 910-928.
- [28] Sabery S M, Bystrov A, Navarro-Cia M, et al. Study of low terahertz radar signal backscattering for surface identification[J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 2954.
- [29] 樊博璇,陈桂明,常亮,常东,赵喆. 激光雷达技术在军事领域应用现状及发展趋势[J]. *航天制造技术*, 2021,(03):66-72.
B. X. Fan, G. M. Chen, L. Chang, D. Chang, Z. Zhao. Application Status and Development Trend of Lidar Technology in Military Field[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2021,(03):66-72.
- [30] Ullah M H, Gelli G, Verde F. Visible light backscattering with applications to communication and localization in healthcare: A survey[J]. *Procedia Computer Science*, 2022, 203: 745-752.
- [31] Ullah M H, Gelli G, Verde F. Visible light backscattering with applications to the Internet of Things: State-of-the-art, challenges, and opportunities[J]. *Internet of Things*, 2023, 22: 100768.
- [32] 张倩倩,王俊,梁应敞. 面向6G的共生散射通信技术:原理、方法与应用[J]. *中国科学:信息科学*, 2022,(08):1393-1416.
Qianqian Zhang, Jun Wang, Yingchang Liang. Symbiotic backscatter communications for 6G: principles, approaches, and applications[J]. *Scientia Sinica(Informationis)*, 2022,(08):1393-1416.
- [33] DOBKIN D M. *The RF in RFID: UHF RFID in practice*[M]. USA: Newnes, 2012.
- [34] Stockman H. Communication by means of reflected power[J]. *Proceedings of the IRE*, 1948, 36(10): 1196 - 1204.
- [35] Boyer C, Roy S. —invited paper—backscatter communication and RFID: Coding, energy, and MIMO analysis[J]. *IEEE Transactions on communications*, 2013, 62(3): 770-785.
- [36] 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*. 2014: 607-618.
- [37] Wang A, Iyer V, Talla V, et al. {FM} backscatter: Enabling connected cities and smart fabrics[C]//14th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 17). 2017: 243-258.
- [38] Talla V, Kellogg B, Gollakota S, et al. Battery-free cellphone[J]. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2017, 1(2): 1-20.
- [39] Zhang J, Zhou Y, Xi R, et al. AmbiEar: mmWave based voice recognition in NLoS scenarios[J]. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2022, 6 (3): 1-25.
- [40] Wang W, He Y, Jin M, et al. Meta-speaker: Acoustic source projection by exploiting air nonlinearity[C]//*Proceedings of the 29th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. 2023: 1-15.
- [41] Yu Z, Li P, Boano C A, et al. BiCord: Bidirectional coordination among coexisting wireless devices[C]//2021 IEEE 41st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). IEEE, 2021: 304-314.
- [42] Qu M, Zhao Y, Tang X, et al. Ambient IoT in 3GPP Release 19: A Survey[C]//2024 IEEE Smart World Congress (SWC). IEEE, 2024: 2181-2186.
- [43] Gu B, Li D, Ding H, et al. Breaking the interference and fading gridlock in backscatter communications: State-of-the-art, design challenges, and future directions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024.
- [44] Xu Y, Xu J, Li X, et al. RIS-assisted heterogeneous backscatter communications: A robust design[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025.
- [45] 叶迎晖,徐瑞,田雨佳,卢光,.. 反向散射通信技术的研究与发展[J]. *电信科学*, 2024, (01):1-23.
Yinghui Ye, Rui Xu, Yujia Tian, Guangyue Lu. Research and development of backscatter communications technology. [J]. *Telecommunications Science*. 2024,(01):1-23.
- [46] Perera T D P, Jayakody D N K, Sharma S K, et al. Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): Recent advances and future challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 20(1): 264-302.
- [47] Zargari S, Hakimi A, Rezaei F, et al. Signal Detection in Ambient Backscatter Systems: Fundamentals, Methods, and Trends[J]. *IEEE Access*, 2023. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3341416.
- [48] Chi Z, Liu X, Wang W, et al. Leveraging ambient lte traffic for ubiquitous passive communication[C]//*Proceedings of the Annual conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*. 2020: 172-185.
- [49] Feng Y, Chen S, ** W, et al. Heartbeating with LTE networks for ambient backscatter[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 23(5): 4246-4258.
- [50] Liu Q, Sun S, Yuan X, et al. Ambient backscatter communication-based smart 5G IoT network[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021, 2021(1): 34.
- [51] Biswas R, Lempiäinen J. Assessment of 5G as an ambient signal for outdoor backscattering communications[J]. *Wireless Networks*, 2021, 27(6): 4083-4094.
- [52] Nawaz S J, Sharma S K, Mansoor B, et al. Non-coherent and backscatter communications: Enabling ultra-massive connectivity in 6G wireless networks[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 38144-38186.
- [53] Khan W U, Javed M A, Nguyen T N, et al. Energy-efficient resource allocation for 6G backscatter-enabled NOMA IoV networks [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 23(7): 9775-9785.
- [54] Ensworth J F, Reynolds M S. BLE-backscatter: Ultralow-power IoT nodes compatible with Bluetooth 4.0 low energy (BLE) smart-

- phones and tablets[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(9): 3360-3368.
- [55] Ensworth J F, Reynolds M S. Every smart phone is a backscatter reader: Modulated backscatter compatibility with bluetooth 4.0 low energy (ble) devices[C]//2015 IEEE international conference on RFID (RFID). San Diego: IEEE Press, 2015: 78-85.
- [56] Xu Z, Gong W. Enabling zigbee backscatter communication in a crowded spectrum[C]//2022 IEEE 30th international conference on network protocols (ICNP).Lexington: IEEE Press, 2022: 1-11.
- [57] Xu Z, Gong W. BumbleBee: Enabling the vision of pervasive Zig-Bee backscatter communication[C]//2023 IEEE international conference on pervasive computing and communications (PerCom). Atlanta: IEEE Press, 2023: 252-261.
- [58] Sun Y, He Y, Zou Y, et al. A Survey of mmWave Backscatter: Applications, Platforms, and Technologies[J]. *ACM Computing Surveys*, 2025, 57(9): 1-36.
- [59] Simonjan J, Unluturk B D, Akyildiz I F. In-body bionanosensor localization for anomaly detection via inertial positioning and THz backscattering communication[J]. *IEEE Transactions on NanoBio-science*, 2021, 21(2): 216-225.
- [60] 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.
- [61] He Y, Guo X, Zheng X, et al. Cross-technology communication for the Internet of Things: A survey[J]. *ACM Computing Surveys*, 2022, 55(5): 1-29.
- [62] Winters D W, Shea J D, Madsen E L, et al. Estimating the breast surface using UWB microwave monostatic backscatter measurements[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2007, 55(1): 247-256.
- [63] Guo J, Durrani S, Zhou X. Monostatic backscatter system with multi-tag to reader communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(10): 10320-10324.
- [64] Kimionis J, Bletsas A, Sahalos J N. Bistatic backscatter radio for tag read-range extension[C]//2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA). Nice: IEEE Press, 2012: 356-361.
- [65] Wang Y, Yan S, Yang W, et al. Energy-efficient covert communications for bistatic backscatter systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(3): 2906-2911.
- [66] Zhang Q, Zhang L, Liang Y C, et al. Backscatter-NOMA: A symbiotic system of cellular and Internet-of-Things networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 20000-20013.
- [67] Liang Y C, Zhang 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.
- [68] Liu W, Huang K, Zhou X, et al. Next generation backscatter communication: systems, techniques, and applications[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019(1): 1-11.
- [69] Abrudan T E, Patel K, Kimionis J, et al. Next-Generation Backscatter Networks for Integrated Communications and RF Sensing [J]. arxiv preprint arxiv:2509.12954, 2025.
- [70] 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.
- [71] Xu C, Yang L, Zhang P. Practical backscatter communication systems for battery-free Internet of Things: A tutorial and survey of recent research[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, 35(5): 16-27.
- [72] Jiang T, Zhang Y, Ma W, et al. Backscatter communication meets practical battery-free Internet of Things: A survey and outlook[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(3): 2021-2051.
- [73] Liu Y, Wang G, Dou Z, et al. Coding and detection schemes for ambient backscatter communication systems[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 4947-4953.
- [74] Rezaei F, Galappaththige D, Tellambura C, et al. Coding techniques for backscatter communications—A contemporary survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(2): 1020-1058.
- [75] 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.
- [76] Thomas S J, Wheeler E, Teizer J, et al. Quadrature amplitude modulated backscatter in passive and semipassive UHF RFID systems[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(4): 1175-1182.
- [77] 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.
- [78] Ma S, Wang G, Fan R, et al. Blind channel estimation for ambient backscatter communication systems[J]. *IEEE Communications letters*, 2018, 22(6): 1296-1299.
- [79] 赵文晶,王公仆,高飞飞,艾渤. 物联网中的环境反向散射通信技术——反向散射信道统计特性研究[C]//. 长春:第十九届中国科协年会——分9“互联网+”:传统产业变革新动能论坛.2017-06-24
Wenjing Zhao, Gongpu Wang, Feifei Gao, Bo Ai. Ambient Backscatter Technology in Internet of Things -- Statistics of Backscatter Channel [C]. Changchun: The 19th Annual Conference of the China Association and Technology. 2017
- [80] 王若珩,董岚,刘铭,王公仆,艾渤. 环境物联网中的信道估计 [J]. *物联网学报*, 2024,(04):110-118.
Ruoheng Wang, Lan Dong, Ming Liu, Gongou Wang, Bo Ai. Channel estimation for ambient Internet of things. [J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2024,(04):110-118
- [81] Mishra D, Larsson E G. Sum throughput maximization in multi-

- tag backscattering to multiantenna reader[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(8): 5689-5705.
- [82] 郭颖,王公仆,李宗辉,何睿斯,钟章队. 基于无源反向散射通信技术的智能标签:应用与挑战[J]. *物联网学报*, 2020, (03): 20-29.
Ying Guo, Gongpu Wang, Zonghui Li, Ruisi He, Zhangdui Zhong. Smart tags based on the batteryless backscatter technology: applications and challenges. [J]. *Chinese Journal on Internet of Things*. 2020.(03):20-29.
- [83] Yang G, Liang Y C, Zhang Q. Cooperative receiver for ambient backscatter communications with multiple antennas[C]//2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Paris: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [84] Duan R, Menta E, Yigitler H, et al. Hybrid beamformer design for high dynamic range ambient backscatter receivers[C]//2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Shanghai: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [85] Liu X, Chi Z, Wang W, et al. {VMscatter}: A versatile {MIMO} backscatter[C]//17th USENIX symposium on networked systems design and implementation (NSDI 20). 2020: 895-909.
- [86] 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.
- [87] Basharat S, Hassan S A, Mahmood A, et al. Reconfigurable intelligent surface-assisted backscatter communication: A new frontier for enabling 6G IoT networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2022, 29(6): 96-103.
- [88] Zhao W, Wang G, Atapattu S, et al. Performance analysis of large intelligent surface aided backscatter communication systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(7): 962-966.
- [89] Wang J, Hassanieh H, Katabi D, et al. Efficient and reliable low-power backscatter networks[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2012, 42(4): 61-72.
- [90] 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.
- [91] Liu W, Huang K, Zhou X, et al. Full-duplex backscatter interference networks based on time-hop** spread spectrum[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(7): 4361-4377.
- [92] Jameel F, Ristaniemi T, Khan I, et al. Simultaneous harvest-and-transmit ambient backscatter communications under Rayleigh fading[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019(1): 1-9.
- [93] Alhassoun M, Durgin G D. Spatial fading in backscatter channels: Theory and models[C]//2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Las Vegas: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [94] Shah S T, Choi K W, Lee T J, et al. Outage probability and throughput analysis of SWIPT enabled cognitive relay network with ambient backscatter[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(4): 3198-3208.
- [95] Toro U S, Wu K, Leung V C M. Backscatter wireless communications and sensing in green Internet of Things[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, 6(1): 37-55.
- [96] Galappaththige D, Tellambura C, Maaref A. Integrated sensing and backscatter communication[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(12): 2043-2047.
- [97] Khan W U, Nguyen T N, Jameel F, et al. Learning-based resource allocation for backscatter-aided vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 23(10): 19676-19690.
- [98] Xu F, Hussain T, Ahmed M, et al. The state of ai-empowered backscatter communications: A comprehensive survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(24): 21763-21786.
- [99] Li X, Zhao M, Zeng M, et al. Hardware impaired ambient backscatter NOMA systems: Reliability and security[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(4): 2723-2736.
- [100] Li X, Zheng Y, Khan W U, et al. Physical layer security of cognitive ambient backscatter communications for green Internet-of-Things[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, 5(3): 1066-1076.
- [101] Wu W, Wang X, Hawbani A, et al. A survey on ambient backscatter communications: Principles, systems, applications, and challenges[J]. *Computer Networks*, 2022, 216: 109235.
- [102] Jameel F, Duan R, Chang Z, et al. Applications of backscatter communications for healthcare networks[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(6): 50-57.
- [103] Amato F, Peterson C W, Degnan B P, et al. Tunneling RFID tags for long-range and low-power microwave applications[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2018, 2(2): 93-103.
- [104] Thomas S J, Reynolds M S. A 96 Mbit/sec, 15.5 pJ/bit 16-QAM modulator for UHF backscatter communication[C]//2012 IEEE International Conference on RFID (RFID). Orlando: IEEE Press, 2012: 185-190.
- [105] P. N. Alevizos, N. F. Hilliard, K. Tountas, N. Agadakos, N. Kargas, and A. Bletsas, "Channel coding for increased range bistatic backscatter radio: Experimental results," [C]// in Proc. of IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA), Tampere, Finland, Sept. 2014, pp.38-43.
- [106] Yang C, Gummesson J, Sample A. Riding the airways: Ultra-wideband ambient backscatter via commercial broadcast systems [C]//IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications. Atlanta: IEEE Press, 2017: 1-9.
- [107] Xu K, Gong W, Li Y, et al. FM rider: Two-FSK modulation-based ambient FM backscatter over 100 m distance[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024.

- [108] Zhang P, Bharadia D, Joshi K, et al. Hitchhike: Practical backscatter using commodity wifi[C]//Proceedings of the 14th ACM conference on embedded network sensor systems CD-ROM. 2016: 259-271.
- [109] Dunna M, Meng M, Wang P H, et al. {SyncScatter}: Enabling {WiFi} like synchronization and range for {WiFi} backscatter communication[C]//18th USENIX symposium on networked systems design and implementation (NSDI 21). 2021: 923-937.
- [110] Guo X, Shanguan L, He Y, et al. Aloba: Rethinking ON-OFF keying modulation for ambient LoRa backscatter[C]//Proceedings of the 18th conference on embedded networked sensor systems. 2020: 192-204.
- [111] Guo X, He Y, Nan J, et al. A low-power demodulator for LoRa backscatter systems with frequency-amplitude transformation[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2024, 32(4): 3515-3527.
- [112] Zhang M, Zhao J, Chen S, et al. Reliable backscatter with commodity BLE[C]//IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications. Toronto : IEEE Press, 2020: 1291-1299.
- [113] Zhang M, Chen S, Zhao J, et al. Commodity-level BLE backscatter[C]//Proceedings of the 19th annual international conference on mobile systems, applications, and services. 2021: 402-414.
- [114] Dong H, Wu Y, Li F, et al. PassiveBLE: Towards Fully Commodity-Compatible BLE Backscatter[J]. arXiv preprint arXiv:2503.11490, 2025.
- [115] Kimionis J, Georgiadis A, Tentzeris M M. Millimeter-wave backscatter: A quantum leap for gigabit communication, RF sensing, and wearables[C]//2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). Honolulu : IEEE Press, 2017: 812-815.
- [116] Zhang P, Rostami M, Hu P, et al. Enabling practical backscatter communication for on-body sensors[C]//Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference. 2016: 370-383.]
- [117] Guo X, He Y, Yu Z, et al. RF-transformer: A unified backscatter radio hardware abstraction[C]//Proceedings of the 28th annual international conference on mobile computing and networking. 2022: 446-458.
- [118] Pengyu Zhang, Colleen Josephson, Dinesh Bharadia, Sachin Katti, Freerider: Backscatter communication using commodity radios, [C]// in: Proceedings of the 13th International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies, 2017, pp. 389 - 401.
- [119] Jung J, Ryoo J, Yi Y, et al. Gateway over the air: Towards pervasive internet connectivity for commodity IoT[C]//Proceedings of the 18th international conference on mobile systems, applications, and services. 2020: 54-66.
- [120] Kludze A, Kono J, Mittleman D M, et al. A frequency-agile retro-directive tag for large-scale sub-terahertz data backscattering[J]. Nature communications, 2024, 15(1): 8756.
- [121] 朱鹏程, 江鹏, 钱宇, 祁栋华, 宋元盟, 异质无蜂窝MIMO绿色通信网络[J]. 信号处理, 2024, (08):1408-1423.
- Pengcheng Zhu, Peng Jiang, Yu Qian, Donghua Qi, Yuanmeng Song. Heterogeneous Cell-Free MIMO Green Communication Network. Journal of Signal Processing. 2024,(08):1408-1423.
- [122] 郑黎明, 刘培国, 王宏义, 吴建飞, 无源物联网: 背景、概念、挑战及研究进展[J]. 电子与信息学报, 2023, (07):2293-2310.
- Liming Zheng, Peiguo Liu, Hongyi Wang, Jianfei Wu. Passive Internet of Things: Background, Concept, Challenges and Progress. [J]. Journal of Electronics & Information Technology. 2023,(07): 2293-2310.
- [123] Niu J P, Li G Y. An overview on backscatter communications[J]. Journal of communications and information networks, 2019, 4 (2): 1-14.
- [124] 崔子琦, 王公仆, 魏旭昇, 姜大洁, 秦飞, 艾渤, 反向散射通信的未来应用与技术挑战[J]. 移动通信, 2021, (04):29-36.
- Ziqi Cui, Gongpu Wang, Xusheng Wei, Dajie Jiang, Fei Qin, Bo Ai. Future Applications and Technical Challenges of Backscatter Communications. [J]. Mobile Communications. 2021,(04):29-36.
- [125] Memon M L, Saxena N, Roy A, et al. Ambient backscatter communications to energize IoT devices[J]. IETE Technical Review, 2020, 37(2): 196-210.
- [126] Zheng K, Xu R, Mei J, et al. Ambient IoT towards 6G: Standardization, Potentials, and Challenges[J]. IEEE Access, 2024.
- [127] Li X, Wang X, Zeng M, et al. Spectrum Sharing for Ambient Internet-of-Things: Principle, Applications and Open Issues[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2025, 8(3): 56-63.
- [128] Song C, 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.
- [129] Moloudian G, Hosseinifard M, Kumar S, et al. RF energy harvesting techniques for battery-less wireless sensing, Industry 4.0, and Internet of Things: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(5): 5732-5745.
- [130] Sanislav T, Mois G D, Zeadally S, et al. Energy harvesting techniques for internet of things (IoT) [J]. IEEE access, 2021, 9: 39530-39549.
- [131] 李兴旺, 田志发, 张建华, 许晓东, 彭红星, 李立华, IRS辅助NOMA网络下隐蔽通信性能研究[J]. 中国科学:信息科学, 2024, (06):1502-1515.
- Xingwang Li, Zhifa Tian, Jianhua Zhang, Xiaodong Xu, Hongxing Peng, Lihua Li. Performance analysis of covert communication in IRS-assisted NOMA networks. [J]. SCIENTIA SINICA Informationis. 2024,(06):1502-1515.
- [132] 徐勇军, 杨浩克, 叶迎晖, 陈前斌, 卢光跃, 反向散射通信网络资源分配综述[J]. 物联网学报, 2021, (03):56-69.
- Yongjun Xu, Haoke Yang, Yinghui Ye, Qianbin Chen, Guangyue Lu. A survey on resource allocation in backscatter communication networks. [J]. Chinese Journal on Internet of Things. 2021, (03):56-69.
- [133] 骆东鑫, 李晶, 徐勇军, 陈莉, 唐鹏, 赵耘, 低功耗物联网研究综

- 述:原理、架构与应用场景[J]. 无线电通信技术, 2025, (05): 976-988.
- Dongxin Luo, Jing Li, Yongjun Xu, Li Chen, Peng Tang, Yun Zhao. Review of Low-power Internet of Things Research: Principles, Architectures, and Application Scenarios. [J]. Radio Communications Technology. 2025,(05):976-988.
- [134] 张晓茜, 徐勇军. 面向零功耗物联网的反向散射通信综述[J]. 通信学报, 2022, (11):199-212.
- Xiaoxi Zhang, Yongjun Xu. Survey on backscatter communication for zero-power IoT. [J]. Journal on Communications. 2022, (11):199-212.
- [135] 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, (02):28-34.
- Qin Tao, Caijun Zhong, Zhaoyang Zhang. Ambient backscatter communications technology for batteryless IoT.[J]. Chinese Journal on Internet of Things. 2019,(02):28-34.
- [136] 李源, 张雨露, 丁郁, 马帅, 肖善鹏, 肖建明, 李建. 无源物联网通信研究进展与演进思考[J]. 物联网学报, 2023, (03):15-23.
- Yuan Li, Yulu Zhang, Yu Ding, Shuai Ma, Shanpeng Xiao, Jianming Xiao, Jian Li. Research progress and evolution prospect of passive internet of things communication. [J]. Chinese Journal on Internet of Things. 2023,(03):15-23.
- [137] 黄宇红, 万鸿俊, 王楚豫, 王曦泽, 谢磊, 王晴, 魏颖慧, 李远航, 赵睿, 肖善鹏, 吴志强. 基于RFID的无源物联网无线感知研究现状与发展趋势[J]. 软件学报, 2026, (01):425-441.
- Huang YH, Wan HJ, Wang CY, Wang XZ, Xie L, Wang Q, Wei YH, Li YH, Zhao R, Xiao SP, Wu ZQ. RFID-based Passive IoT Wireless Sensing Technology: A Survey and Trends. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software (in Chinese). 2026,(01):425-441.
- [138] Memon M L, Saxena N, Roy A, et al. Backscatter communications: Inception of the battery-free era—A comprehensive survey [J]. Electronics, 2019, 8(2): 129.
- [139] Muratkar T S, Bhurane A, Kothari A. Battery-less internet of things - A survey[J]. Computer Networks, 2020, 180: 107385.
- [140] Guo F, Yu F R, Zhang H, et al. Enabling massive IoT toward 6G: A comprehensive survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(15): 11891-11915.
- [141] Nguyen D C, Ding M, Pathirana P N, et al. 6G Internet of Things: A comprehensive survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9(1): 359-383.
- [142] Cui M, Wu Z, Lu Y, et al. Near-field MIMO communications for 6G: Fundamentals, challenges, potentials, and future directions [J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 61(1): 40-46.
- [143] Janjua M B, Arslan H. Survey on symbiotic radio: A paradigm shift in spectrum sharing and coexistence[J]. arXiv preprint arXiv:2111.08948, 2021.
- [144] 许尧, 胡荣飞, 贾少波, 李博, 王钢, 张治中. 反向散射NOMA辅助的直传与中继协同互惠传输方法[J]. 电子与信息学报, 2025, (11):4264-4274.
- Yao Xu, Rongfei Hu, Shaobo Jia, Bo Li, Gang Wang, Zhizhong Zhang. Mutualistic backscatter NOMA method for coordinated direct and relay transmission system. [J]. Journal of Electronics & Information Technology. 2025,(11):4264-4274.
- [145] Xu Y, Bai Y, Jia Y, et al. Robust energy efficiency optimization for double-RIS-assisted wireless-powered backscatter communications[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2024.
- [146] Galappaththige D A L, Rezaei F, Tellambura C, et al. Link budget analysis for backscatter-based passive IoT[J]. IEEE Access, 2022, 10: 128890-128922.
- [147] 张陈鹏, 艾渤, 王公仆, 刘铭, 许荣涛. 基于反向散射的定位技术:原理与挑战及航空场景应用[J]. 航空学报. 2025.
- Chenpeng Zhang, Bo Ai, Gongpu Wang, Ming Liu, Rongtao Xu. Backscatter based localization technology: principles, challenges and its aviation applications. [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2025.
- [148] 李俊霞, 王欣, 黄高见, 徐勇军, 郝万明, 朱政宇, 李兴旺. 无源定位技术发展及其展望[J]. 无线电工程, 2024, (08):1825-1846.
- Junxia Li, Xin Wang, Gaojian Huang, Yongjun Xu, Wanming Hao, Zhengyu Zhu, Xingwang Li. [J]. Radio Engineering. 2024, (08):1825-1846.
- [149] CURTY J-P, DECLERCQ M, DEHOLLAIN C, et al. Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems [M]. 1st ed.: Springer Publishing Company Incorporated, 2010.
- [150] S. N. Daskalakis, G. Goussetis, S. D. Assimonis, M. M. Tentzeris, and A. Georgiadis, "A uW backscatter-morse-leaf sensor for low-power agricultural wireless sensor networks[J]," IEEE Sensors J., vol. 18, no. 19, pp. 7889 - 7898, Oct. 2018.
- [151] Daskalakis S N, Assimonis S D, Kampianakis E, et al. Soil moisture scatter radio networking with low power[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(7): 2338-2346.
- [152] Daskalakis S N, Assimonis S D, Goussetis G, et al. The future of backscatter in precision agriculture[C]/2019 IEEE international symposium on antennas and propagation and USNC-URSI radio science meeting. Atlanta : IEEE Press, 2019: 647-648.
- [153] Khan W U, Jameel F, Kumar N, et al. Backscatter-enabled efficient V2X communication with non-orthogonal multiple access [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(2): 1724-1735.
- [154] Hua M, Yang L, Li C, et al. Throughput maximization for UAV-aided backscatter communication networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 68(2): 1254-1270.
- [155] 秦洁, 刘政宁. 中国联通发布5G+MDFC无源物联网方案[N]. 人民网:2025年09月07日 19:46
- Jie Qin, Zhengyu Liu. China Unicom releases 5G+MDFC passive IoT solution. [N]. People's Daily Online. 2025.
- [156] 黄凌睿. 攀登者|芯昇科技与蜂窝无源物联网的创新之路[N]. 中国日报网:2025-06-23 11:37
- Lingrui Huang. Climbers | Innovation Path of Xinsheng Technol-

- ogy and Cellular Passive IoT [N]. China Daily. 2025.
- [157] Zhao H, Shuang Y, Wei M, et al. Metasurface-assisted massive backscatter wireless communication with commodity Wi-Fi signals[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 3926.
- [158] He Y, Sun Y M, Guo X Z. RF computing: A new realm of IoT research[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2025, 40(4): 941-956.
- [159] Zhao W, Wang G, 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.
- [160] Xu S, Liu J, Cao Y. Intelligent reflecting surface empowered physical-layer security: Signal cancellation or jamming? [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9(2): 1265-1275.
- [161] 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.
- [162] Han J Y, Kim M J, Kim J, et al. Physical layer security in multi-tag ambient backscatter communications - jamming vs. cooperation[C]//2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).Seoul: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [163] Wang C, Li Z, Zheng T X, et al. Intelligent reflecting surface-aided secure broadcasting in millimeter wave symbiotic radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(10): 11050-11055.
- [164] Cao Y, Xu S, Liu J, et al. IRS backscatter enhancing against jamming and eavesdropping attacks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(12): 10740-10751.
- [165] Han S, Wang J, Xiao L, et al. Broadcast secrecy rate maximization in UAV-empowered IRS backscatter communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(10): 6445-6458.
- [166] 邓会, 牛姗姗, 魏子舒, 许广洲. 6G 领域研究现状与热点分析[J]. 科学观察, 2025, (04):75-92.
Hui Deng, Shanshan Niu, Zishu Wei, Guangzhou Xu. Analysis of research status and hotspots in the 6G field. [J]. Science Focus. 2025,(04):75-92.
- [167] Zhang J, Zhu M, Lei M, et al. Demonstration of real-time 125.516 Gbit/s transparent fiber-THz-fiber link transmission at 360 GHz~ 430 GHz based on Photonic down-conversion[C]. Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2022: M3C. 2.