

doi:10.3969/j.issn.1003-3114.2025.05.011

引用格式: 骆东鑫,李晶,徐勇军,等. 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,2025,51(5):976-988. [LUO Dongxin, LI Jing, XU Yongjun, et al. Review of Low-power Internet of Things Research: Principles, Architectures, and Application Scenarios [J]. Radio Communications Technology, 2025, 51(5): 976-988.]

低功耗物联网研究综述:原理、架构与应用场景

骆东鑫¹,李晶¹,徐勇军¹,陈莉¹,唐鹏²,赵耘³

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院,重庆400065;

2. 中翼翰维(重庆)智能科技有限公司,重庆401122;

3. 中国电信股份有限公司重庆分公司,重庆401121)

摘要:随着物联网技术的蓬勃发展,大量终端设备广泛部署,海量终端设备能量补充难题以及频谱拥挤状况愈发突出。这些问题不仅限制了物联网的进一步发展,还对现有网络基础设施提出了严峻考验。低功耗物联网作为应对这些问题的关键技术,受到了广泛关注。基于此,对低功耗物联网进行了研究。对低功耗物联网进行概述,包括其原理及多种低功耗通信技术;在现有研究成果的基础上,分析了低功耗物联网的主要传输架构;针对物联网中复杂的通信环境,给出了不同传播环境下低功耗物联网的通信架构;讨论了现有低功耗物联网的典型应用场景,展现其在多个领域的潜在价值;对低功耗物联网的未来研究趋势进行展望。

关键词:低功耗物联网;低功耗无线通信技术;网络传输架构;可重构智能超表面

中图分类号:TN919.23

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1003-3114(2025)05-0976-013



Review of Low-power Internet of Things Research: Principles, Architectures, and Application Scenarios

LUO Dongxin¹, LI Jing¹, XU Yongjun¹, CHEN Li¹, TANG Peng², ZHAO Yun³

(1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of

Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Zhongyi Hanwei (Chongqing) Intelligent Technology Corporation, Chongqing 401122, China;

3. China Telecom Corporation Limited Chongqing Branch, Chongqing 401121, China)

Abstract: With the vigorous development of Internet of Things technology, a large number of terminal devices have been widely deployed. As a result, the challenging issues of energy replenishment for massive terminal devices and the congestion of the frequency spectrum have become increasingly prominent. These not only limit the further development of the Internet of Things but also pose a severe challenge to existing network infrastructure. Low-power Internet of Things, as a key technology to address these issues, has received extensive attention from researchers. As a result, a survey on low-power Internet of Things is studied in this paper. Firstly, an overview of low-power Internet of Things is provided, including its principles and various low-power communication technologies. Secondly, based on existing research achievements, main transmission architectures of low-power Internet of Things are analyzed. Subsequently, aiming at the complex communication environment in the Internet of Things, communication architectures of low-power Internet of Things under different propagation environments are presented. Then, typical application scenarios of existing low-power In-

收稿日期:2025-04-27

基金项目:国家自然科学基金(U23A20279, 62271094);新重庆青年创新人才项目(CSTB2024NSCQ-QCXMX0059);重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-LZX0009, CSTB2023NSCQ-LZX0079);重庆研究生科研创新项目(CYB23241)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (U23A20279, 62271094); New Chongqing Youth Innovative Talent Program (CSTB2024NSCQ-QCXMX0059); Chongqing Natural Science Foundation (CSTB2022NSCQ-LZX0009, CSTB2023NSCQ-LZX0079); Chongqing Graduate Student Scientific Research Innovation Project (CYB23241)

Internet of Things are discussed, demonstrating its potential value in multiple fields. Finally, future research trends of low-power Internet of Things are prospected and outlined.

Keywords: low-power Internet of Things; low-power wireless communication technology; network transmission architectures; RIS

0 引言

物联网自 20 世纪 90 年代被提出,至今已成为继计算机、互联网之后的世界信息产业发展的第三次浪潮。随着无线通信技术的飞速发展,物联网已经从万物互联扩展到万物智联,涵盖了人、车、家用电器和公共基础设施等泛在物体^[1-4]。这些技术的普及和应用,也推动了物联网在更多领域的广泛应用,大量的物联网终端和节点构成了与传统物联网结构所不同的体系。由《6G 总体愿景与潜在关键技术》白皮书可知,6G 通信技术因其超高速率、超低时延与海量连接的特性,极大地扩展了物联网的应用范围,这使得物联网设备入网数量以指数级增长^[5]。

然而,随着物联网市场规模不断扩大,物联网设备的广泛部署和应用,使得海量终端设备的能量补充成了一大难题^[6-10]。具体而言,物联网技术的持续发展使得设备的功能和性能不断提升,节点设备的传感器更加复杂、处理器更加强大,导致能量消耗不断增加。此外,大量终端设备同时接入物联网使得频谱资源受限^[11-14],这些问题对物联网的发展造成了很大的限制。

针对物联网发展中面临的能量补充与频谱资源受限等问题,已提出多种低功耗无线通信技术。目前,研究者们从多个方向对多种低功耗无线通信技术进行了研究,包括增强网络覆盖范围^[15]、提高吞吐量^[16-17]、优化性能^[18-19]等。还有研究者进一步从改进调制方式^[20]、物理层安全^[21-22]以及多种技术融合等角度对低功耗无线通信技术进行了研究^[23-24]。然而,现有技术面临两大核心问题:一是终端设备能量受限与长续航需求的矛盾,物联网节点的通信功能能耗占较高,即便采用低功耗技术,传感器精度提升与处理器性能增强仍会导致整体能耗上升。对于有障碍物阻挡的通信链路,采用单一的低功耗技术会使终端设备提升发射功率以穿透障碍物,导致终端设备的存续时间降低。二是频谱资源拥挤与海量设备接入的矛盾,未经授权的 ISM 频段(如 2.4 GHz)在设备密度过高时,冲突避免协议的碰撞概率将极大提高。而授权频段中,低功耗通信技术虽依托蜂窝网络保障通信稳定性,但其频段资源由运营商统一管理,海量节点接入时易出现信道

分配冲突,且部署成本较高。在未来 6G 推动下,物联网设备数呈指数级增长,传统固定频谱分配模式无法适应动态需求,采用特定的调制方式虽可缓解部分干扰,但在城市复杂电磁环境中,多节点并发传输仍会导致信噪比下降,进一步加剧频谱拥挤。这些问题本质上源于传统无线技术的固有局限,亟需从通信架构与技术机制层面突破。

为了解决上述问题,低功耗物联网近年来受到了产业界及学术界广泛而深入的关注^[25-28]。低功耗物联网通过采用低功耗通信技术和合理的传输架构,极大地降低了终端设备的能耗,同时缓解了网络频谱拥挤的问题,因而在多个领域具有巨大发展潜力。低功耗物联网具有以下优势:

① 存续时间长。低功耗物联网通过设计低功耗的传输架构,降低电池的电流消耗并提升能量的利用率,能够显著延长电池的使用寿命。这意味着物联网终端设备可以长时间工作,而无需频繁更换电池或进行充电,从而降低了维护成本和用户的使用负担。这一优势在智能家居、智能穿戴设备等应用场景中尤为突出。

② 低成本。低功耗物联网的低成本优势体现在多个方面。首先,低功耗物联网设备的制造成本相对较低,使得物联网系统能够在各种预算范围内实现部署;其次,低功耗特性降低了设备的运营成本,包括电池更换和充电等费用;最后,低功耗物联网技术的部署和维护成本也相对较低,因为设备可以长时间稳定运行,减少了维护工作的频率和成本。

③ 应用场景的广泛适应性。在低功耗物联网中,设备具有优秀的软硬件兼容性和可扩展性,可以轻松接入现有的物联网网络,设备的管理和维护也更加便捷。这使得低功耗物联网可以应用在各种场景中,相比传统的物联网具有更高的灵活性和适应性。例如,在有通信资源拥挤的环境中,可以通过将基站架设在高楼或者引入分布式架构,提升通信容量的同时还降低了延迟;在障碍物阻挡的通信链路中,会导致信号衰减或者传输中断,此时可以引入可重构智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)^[29-34]技术,绕过障碍物重新构建可靠的通信路径,提升了低功耗物联网在复杂环境下的运行效率与稳定性。

综上所述,低功耗物联网可以有效解决物联网中海量节点所面临的能量受限问题。《世界万物智联数字经济白皮书》^[35]指出,随着物联网技术的不断发展和应用场景的不断拓展,万物智联时代正在加速到来。然而,在传统物联网体系中,节点设备的连续工作时间较短,无法满足万物智联对设备持久运行和即时响应的高要求。因此,能量受限是制约物联网向万物智联转型升级的一个关键问题。围绕这一问题,首先,对低功耗物联网进行了概述,包括其定义及多种低功耗通信技术;其次,通过对现有研究成果的分析梳理,从多个方面总结了低功耗物联网的传输架构;然后,针对不同的传播环境,讨论了有 RIS 和无 RIS 下低功耗物联网的通信架构;最后,阐述现有低功耗物联网的应用场景以及未来研究方向。

1 低功耗物联网概述

低功耗物联网旨在通过技术和架构优化来降低终端设备能耗、提高频谱利用率,进而延长续航、降低成本、支持大规模部署,构建起高效绿色的物联网系统。其创建了一个平台,配备了低功耗通信技术、广泛的传感器网络和互连的嵌入式设备,可以通过网络通信和共享信息来更准确地执行工作。因此,研究低功耗物联网,对于贯彻绿色发展的理念具有重要意义。本节介绍了低功耗物联网的基本原理以及典型的低功耗无线通信技术。

1.1 低功耗物联网基本原理

与传统物联网不同,低功耗物联网利用低功耗无线通信技术,将各种智能设备、传感器和控制器等连接起来,形成一个庞大的网络体系。在这一体系中,终端设备能够在保持较低功耗的同时,实现数据的采集、传输、处理和分析,从而满足各种物联网应用的需求。低功耗物联网的核心优势在于能够在长距离通信的同时保持极低的能耗,这对于部署在偏远地区、难以频繁更换电池或接入电源的设备尤为重要。通过采用低功耗的无线通信技术,低功耗物联网确保了终端设备能够长时间稳定运行,极大地延长了设备寿命,缓解了频谱拥挤。

在架构上,低功耗物联网由 3 个关键部分组成:感知层、网络层和应用层^[36]。感知层由各种智能设备、传感器和控制器组成,负责采集环境或者物体的状态信息,如温度、湿度、位置、运动状态等。网络层利用低功耗无线通信技术,将感知层收集到的数据可靠传输至云端或数据中心。应用层则负责对传输

来的数据进行处理、分析和应用,通过智能算法和大数据分析,为用户提供多样化和特定的服务。

物联网节点的结构与物联网的层次结构存在一定的对应关系。物联网节点主要由传感、处理和通信三大模块组成^[37],其中传感模块属于感知层,通信模块属于网络层。随着电子技术的飞速发展,处理模块和传感模块的功耗有望持续降低。而通信模块,由于需要持续地进行数据传输,消耗了大量的能量,成为了节点能量受限的主要影响因素。因此,传统无线技术难以适应物联网大规模、低功耗的设备组网要求,需要使用低功耗的无线通信技术来降低通信模块的功耗。

1.2 低功耗通信技术

低功耗物联网经过长期研究,已经融合了多种低功耗无线通信技术,从传输距离来看,可以分为长距离无线通信技术和短距离无线通信技术。长距离无线通信技术能够覆盖更广泛的区域,适用于需要远程监控和数据传输的物联网系统;而短距离无线通信技术则更适用于设备密集、数据传输量较小的物联网环境。在不易更换电池以及频谱资源有限的复杂通信情况下,采用反向散射通信(Backscatter Communication, BackCom)技术,借助环境中的现有射频信号,可以实现数据的高效传输。终端设备所使用的信息传输技术是物联网发展中的一个重要领域,物联网中的低功耗通信技术分类如图 1 所示。

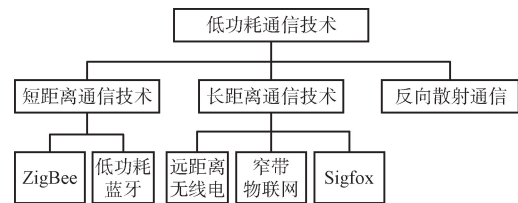


图 1 低功耗通信技术分类

Fig. 1 Classification of low-power communication technologies

1.2.1 长距离低功耗通信技术

窄带物联网^[38]是基于蜂窝无线网络的专用网络,由运营商及电信设备制造商提出并驱动。其运行在蜂窝网络授权的频段内,确保了通信的稳定性和安全性,避免了其他无线设备的干扰。在物理层中,窄带物联网采用频分双工进行通信,上行链路使用单载波频分多址调制,下行使用正交频分多址调制,这 2 种调制方式在窄带条件下高效利用频谱资源、降低功耗。此外,窄带物联网技术提供了多种省电模式,可根据实际应用场景和需求进行灵活选择,从而延长

物联网设备的电池使用寿命。典型的窄带物联网网络可以支持 3~10 km 的通信距离,节点在电池供电下可持续工作 5~10 年。但窄带物联网依赖运营商进行部署和维护,在蜂窝基础设施不完善的地区难以开展应用^[39]。

与传统电信运营商只在蜂窝授权频段部署网络不同,Sigfox 工作在非授权频段,运营商通过建设专用网络为其提供连接服务^[40]。其低功耗的核心在于采用超窄带调制技术,每次通信仅占用 200 Hz,使得设备在发送和接收信号时所需的能量大大降低。Sigfox 网络中的终端设备具有很低的占空比,即设备在大部分时间都处于休眠状态,只在特定的时间窗口内发送或接收数据。Sigfox 的优势在于超远传输距离,能在郊区实现最远 50 km、城市内最远 10 km 的覆盖。但其也面临实际应用限制,包括:下行能力受限,不适用于需要频繁下行通信的应用场景;设备将数据发送到 Sigfox 云端平台进行处理和分析,数据的安全性低。

在非授权频段还有一类以远距离无线电(Long Range Radio, LoRa)^[41-42]为代表的长距离低功耗无线通信技术,可以以低成本实现自主网络设置,具有良好的可扩展性。LoRa 采用 Chirp 扩频调制,将信号在一个较宽的频带上进行传输,减少了每个频率上的功率。这种调制方式使得信号具有抗噪声、抗衰落、抗多普勒效应等特性,支持远距离低功耗传输。在城市环境中,LoRa 能实现约 5 km 的通信距离,而在郊区则可达到 15 km,极大地拓展了物联网的应用范围。LoRa 的工作机制非常高效,只会在传输之前检查信道中的前导码。每当一个节点需要传输时,LoRa 就会唤醒并检查通道状态,传输并重新进入睡眠状态,极大地降低了工作能耗。但是,LoRa 的传输速率相对较低,不适用于需要高速数据传输和实时性的物联网应用场景。

1.2.2 短距离低功耗通信技术

ZigBee 是一种基于 IEEE 802.15.4 的短距离无线通信协议^[43],具有低功耗、低成本、支持大量网络节点的特点。ZigBee 采用直接序列扩频调制技术,通过信号分割传输和回复确认机制,提高了抗干扰能力和可靠性。其可在 780 MHz(中国)、868 MHz(欧洲)、915 MHz(北美和澳大利亚)和 2.4 GHz(全球可用)ISM 频段工作,数据速率最高可达 250 kb/s。其降低功耗的核心在于节点设备的工作周期短,降低帧的开销使得收发信息功率低,并采用了休眠模式。因此,ZigBee 节点设备功耗非常小,可在不更换电池的

情况下运行数月甚至数年,非常适合对数据传输速率要求不高的短距离物联网场景。

低功耗蓝牙(Bluetooth Low Energy, BLE)^[44]是另一种广泛使用的低功耗短距离通信技术。在传统蓝牙技术中,终端设备一旦激活就会始终保持连接、持续消耗能量,因此其功耗相对较高。与传统蓝牙技术不同,BLE 的功耗非常低,因为它消除了在对等设备之间建立和维护专用会话的需要,不需要持续连接。在物理层中,BLE 采用跳频扩频技术,在多个频率间迅速切换,提高通信的稳定性和可靠性。此外,BLE 减少了广播频段的使用数量,仅使用 3 个广播频段,简化了频段管理过程,进一步提升了能效。相较于 ZigBee,BLE 的连接速度非常快,通常能在 3 ms 内完成连接设置并开始传输数据。这使得 BLE 非常适合需要快速连接的应用场景,如可穿戴设备、医疗设备等。

上述 5 种无线通信技术的主要特点在于深度休眠和唤醒功能,极大地降低了节点设备的能耗。在不需要通信时,模块可以进入休眠模式,此时设备的功耗极低,几乎不消耗电能。当需要通信时,通信模块会自动唤醒,进行数据传输,完成后再次进入休眠状态。这种灵活的技术机制,使得节点设备在保证通信需求的同时,实现能耗的有效控制。

1.2.3 BackCom

近年来,BackCom^[45-46]因其卓越的低功耗特性被业界公认为是解决低功耗物联网节点能量受限的一项关键技术。其核心思想是基于 BackCom 的物联网节点借助入射的射频信号,同时实现低功耗的被动通信与能量收集,从“节流”“开源”2 个角度共同缓解节点的能量受限问题。具体而言,反向散射节点通过调节反射系数将入射信号划分为 2 个部分:一部分作为载波,利用低速、简单的调制方案将信息调制到该载波上,并将已调信号通过天线反射出去,实现低功耗的被动信息传输;另一部分用于能量收集来维持自身电路运行,缓解能量受限问题^[47]。BackCom 节点通过反射入射射频信号到目标接收器来实现数据传输,而无需依赖射频合成器和模数转换器等高耗电且昂贵的无线电组件^[48]。接收机根据反向散射信号包络的功率电平变化或采用更高级的方法解调数据。由于不需要主动传输,标签的功耗可以低至微瓦水平,并且该设备的成本非常低^[49]。此外,BackCom 还具备高频谱利用率的优点,能够通过共享现有环境中的射频信号资源,在无需额外频谱分配的情况下实现数据传输。

然而,BackCom 的被动通信方式导致其通信容量较低,无法有效支撑具有一定数据传输需求

的物联网通信^[50]。

低功耗通信技术性能对比,如表 1 所示。

表 1 低功耗通信技术性能对比

Tab. 1 Performance comparison of low-power communication technologies

技术类型	部署方式	工作频段	通信距离	应用方式
LoRa	私有部署	免授权频段	城市 5 km, 郊区 15 km	适用于智慧农业、智能电表等长距离场景
Sigfox	运营商部署	免授权频段	城市 10 km, 郊区 30 km	常用于资产追踪、环境监测等场景
窄带物联网	运营商部署	电信授权频段	城市 3 km, 郊区 10 km	多用于智能停车、智能电表等场景
ZigBee	自组网部署	2.4 GHz, 868 MHz、915 MHz 免授权频段	传输范围一般介于 10~100 m	智能家居系统中设备间的互联互通
BLE	设备自部署	2.4 GHz 免授权频段	室内 10~100 m, 户外开阔地可达几百米	常用于智能医疗设备间短距离通信
BackCom	—	可工作于多个频段, 基于射频源信号	几米到几十米, 受环境射频源强度影响	适用于无源传感器、智能标签等

2 低功耗物联网传输架构分类

低功耗物联网中部署了各类低功耗终端设备,能够在保证能效的前提下,有效地进行数据传输。这些终端设备集成了低功耗通信技术和智能传感功能,以适应不同应用场景的需求。尽管从结构层次上看,低功耗物联网有着清晰的架构划分,感知层专注于数据采集,网络层负责数据传输与交互,应用层承担数据处理与价值挖掘,但是在实际部署中,考虑到不同环境的特点和需求,低功耗物联网采用了多样化的组网结构和通信技术,包括集中式、分布式和混合式架构,以确保网络的稳定性和效率^[51]。

2.1 集中式低功耗物联网架构

在低功耗物联网中,由终端设备、基站、网关、核心网、物联网云平台组成的通信网络架构,称为集中式通信网络架构,如图 2 所示。其中,网关负责收集来自各个节点设备的数据,并进行协议转换与数据汇聚,以确保这些数据能够高效且准确地传输至核心服务器。网关在整个网络架构中的功能是数据中转,其核心作用在于构建起稳固可靠的网络连接链路,实现节点设备与物联网云平台之间稳定、高效的数据传输。处于末端的物联网云平台,是整个架构的“智慧中枢”,负责接收来自各网关的海量数据,并对其展开深度处理、安全存储以及精细化管理。同时,依据不同的业务需求与应用场景,低功耗物联网云平台能够灵活地向客户端等其他外部系统提供便捷的数据访问通道以及标准化的接口服务。

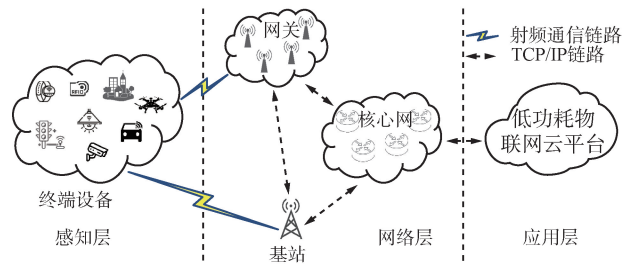


图 2 集中式低功耗物联网架构

Fig. 2 Centralized low-power IoT architecture

由图 2 可以看出,在感知层和网络层之间还有另一种数据传输路径,即以基站作为中继节点。由于终端设备广泛分布于物联网的各个角落,而非仅集中在靠近核心网的区域,只依赖网关传输终端设备的数据无法满足低功耗物联网对于覆盖范围的要求。因此,当感知层中设备部署在离核心网较远的区域时,基站可以充当中继节点,终端设备的数据可以先发送至基站,基站再转发到网关或者核心网。此外,对于采用窄带物联网和 Sigfox 技术的终端设备,基站更是不可或缺的。基站可以是现有的蜂窝网络基站经过升级后支持相应技术,也可以是专门部署的物联网基站。通过对基站的合理部署和配置,可以进一步提升低功耗物联网网络的覆盖范围、传输效率和能耗表现。

采用集中式低功耗物联网架构,通过合理的设备组合与布局,可以实现从局部到全局的无缝覆盖。这种集中式的传输机制确保了数据能够从分散的终端准确、高效地汇聚到云平台,避免了多点分散管理的繁琐。此外,终端设备采用低功耗

的无线通信协议,极大地降低了设备的维护成本。然而,终端设备的数据需要集中到核心服务器进行处理,导致实时数据难以及时处理,同时新设备的接入也因资源紧张受阻。因此,集中式物联网架构适用于终端设备规模较小、对实时性要求不高的应用场景。

2.2 分布式低功耗物联网架构

在物联网中边缘设备数量众多且广泛分布的应用场景下,采用集中式低功耗物联网架构将导致数据拥堵、处理延迟急剧增加。为了应对这一挑战,分布式架构是一种很好的解决方案,它将计算、存储和联网功能分散到更接近终端设备的边缘节点上^[52]。具体而言,分布式低功耗物联网将高度集中于云服务器的云计算,分散至更靠近设备的各个边缘网关和边缘基站上,从而以多种方式增强物联网^[53]。其网络结构涵盖终端设备、边缘基站、边缘网关、核心网以及云服务器,如图3所示。

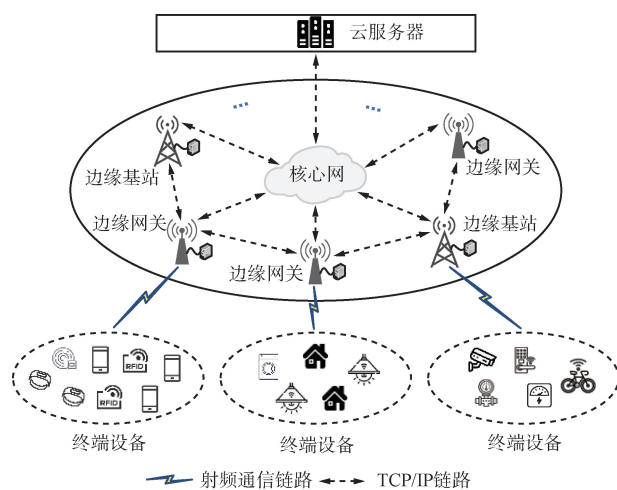


图3 分布式低功耗物联网架构
Fig. 3 Distributed low-power IoT architecture

为了服务需要实时数据处理的物联网设备,同时减轻云服务器的负担,分布式低功耗物联网将边缘计算节点整合到网络中,使得终端设备的数据能够就近在边缘节点进行处理。边缘网关以及边缘基站在这一架构中扮演着核心角色,不仅负责数据的收集与转发,更关键的是执行边缘数据处理与决策制定。通过边缘网关,管理员可直接远程配置、监控和维护终端设备,无需依赖云端连接。即使云端服务中断,本地设备仍可维持基础操作。此外,各个边缘计算节点之间还会通过无线网络进行通信,所有计算任务和数据都在边缘设备之间共享,从而构建了一个协同工作的分布式网络体系。

将计算和通信开销从能量供应有限的节点转移到具有大量电力资源的边缘网关,可以延长各个节点的生命周期,从而延长整个物联网网络的寿命。在分布式架构中,边缘网关更加靠近终端设备,使得节点设备的通信延迟降低。终端设备生成的数据可以由边缘节点存储和预处理,边缘节点只需要将少量处理后的数据发送回中央数据中心,这一过程可以减少网络负载。因此,与集中式低功耗物联网架构相比,分布式架构合理利用网络资源的同时还降低了通信延迟,为最终用户提供更好的服务质量(Quality of Service, QoS)。

2.3 混合式低功耗物联网架构

在低功耗物联网中,由于应用场景的多样性和用户分布密度的不均衡性,单独采用集中式或分布式的网络架构往往难以满足所有终端设备的QoS需求。因此,将这2种架构结合形成混合式低功耗物联网架构,通过分层协同机制实现资源动态优化,如图4所示,左半部分为分布式架构部署,右半部分为集中式架构部署。具体而言,在用户密集区域部署边缘计算节点,支持设备间自主组网和本地数据处理;在广域稀疏场景则通过集中式架构实现远距离低功耗连接,同时依托中心云平台实现全局资源调度与智能决策。

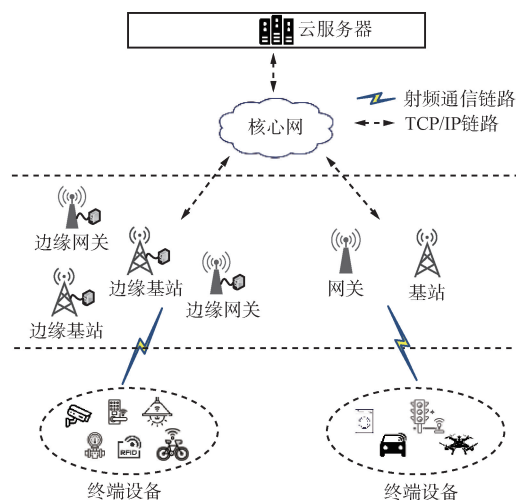


图4 混合式低功耗物联网架构
Fig. 4 Hybrid low-power IoT architecture

混合式低功耗物联网是一种将云计算和边缘计算相融合的传输架构,既发挥了集中式架构的强大数据处理能力,又利用了分布式架构的快速响应特性,从而显著提升了覆盖范围与响应速度。其在提升低功耗物联网覆盖范围的同时,也使得整个架构

的管理变得复杂。由于这 2 种架构在通信协议、数据处理方式以及资源管理策略上存在显著差异,为了确保信息的准确传递和系统的稳定运行,二者之间需要进行协议转换和数据同步。

3 种低功耗物联网架构各有其优势和不足,需要依据不同的应用场景采用不同的架构,其对比如表 2 所示。

表 2 低功耗物联网传输架构对比

Tab. 2 Comparative analysis of low-power IoT transmission architectures

架构类型	数据处理中心	应用场景	优点	不足
集中式	云服务器	终端设备规模较小	数据集中处理,管理简便	数据传输延迟大,可扩展性有限
分布式	边缘计算节点	终端设备大规模部署	数据本地处理,响应速度快、延迟低	数据分散,整合难度大
混合式	云服务器+边缘计算节点	应用场景适用性广泛	灵活分配计算资源,提高资源利用率	架构设计和管理复杂

3 面向不同传播环境的低功耗物联网架构

随着物联网接入设备的数量不断增加以及通信技术的持续多样化,物联网中的通信环境变得日益复杂。根据信号传输特性的不同,无线通信传播环境可划分为视距 (Line of Sight, LOS) 和非视距 (Non-Line of Sight, NLOS)^[54] 2 类,其传播特性对网络的通信性能、覆盖范围及功耗产生了不同的影响。在 LOS 和 NLOS 环境下,讨论了能量优化如何与信号传输效率相协调,为未来低功耗物联网架构的设计与部署提供指导。

3.1 面向 LOS 场景的低功耗物联网架构

在 LOS 环境中,信号传输路径上的障碍物较少,信号衰减相对较小,这不仅提升了通信速率和可靠性,还有助于降低设备的发射功率。在此环境下,在终端设备和云服务器的链路之间引入基站,能够进一步降低信号衰减,扩大低功耗物联网的覆盖范围。由于 LOS 下良好的通信质量和低功耗特性,研究 LOS 下低功耗物联网架构能够有助于理解其优势与应用潜力。根据不同的覆盖方式,低功耗物联网在 LOS 下的架构主要分为地面通信架构和空地融合架构。

3.1.1 基于地面通信的低功耗物联网通信架构

在城市环境中,复杂的电磁环境导致信号传输衰减严重。通过将基站架设在高楼上,可以减少障碍物遮挡和信号之间的干扰,增强终端设备的连接稳定性。此外,高楼基站可服务较大区域内的物联网设备,避免了基站的过多部署,实现了能量的合理利用。图 5 给出了基于地面通信的低功耗物联网架构,基站作为中继节点,能够解决网络覆盖问题。由于没有障碍物阻挡,终端设备的数据能够稳定、准确地传输到位于高楼的基站。同时,高楼基站也为反向散射设备提供了良好的 LOS 链路,射频能量衰减尽可能小地到达反向散射设备,使其能够获得稳定的能量供应。因此,研究 LOS 下地面通信的低功耗物联网架构对未来物联网技术的进一步发展具有重要参考价值。

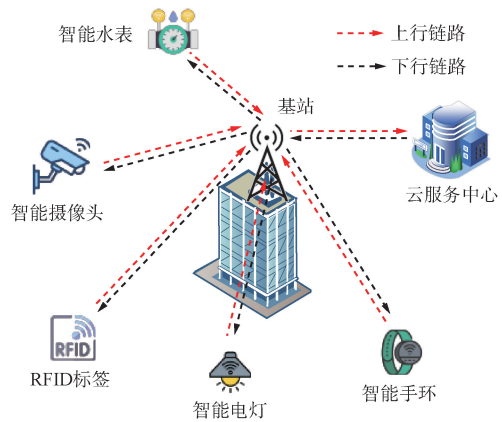


图 5 基于地面通信的低功耗物联网架构
Fig. 5 Ground-based low-power IoT architecture

3.1.2 空地融合的低功耗物联网架构

无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 具有高机动性、低成本和灵活性等优势,将其引入物联网有助于解决物联网中网络拓扑不灵活、偏远地区覆盖不足和资源分配不合理等问题。

由于是 LOS 占主导地位的连接,将基站部署在 UAV 上不仅能够克服几何限制,还能为物联网设备的数据收集提供可靠的服务^[55]。将携带基站的 UAV 与高楼基站相结合,可以形成空地融合的低功耗物联网,其架构如图 6 所示。

在该架构中,空中基站为距离较远或者难以到达的区域提供服务,实现中继功能;而高楼基站则为附近的物联网终端设备提供服务,并接收空中基站的数据,再将这些数据转发到网关。值得注意的是,UAV 因搭载的机载电池容量有限,且在空中难以进行及时有效的能量补充,具有能量受限的特点^[56],无法长时

间执行任务。由于采用低功耗的无线通信技术,终端设备在大部分时间处于休眠状态,只在需要时发送数据。这种低功耗特性与 UAV 的能量受限特点相契合,因此,空地融合的物联网架构在农田数据采集或反向散射设备的能量补充等领域具有很大潜力。

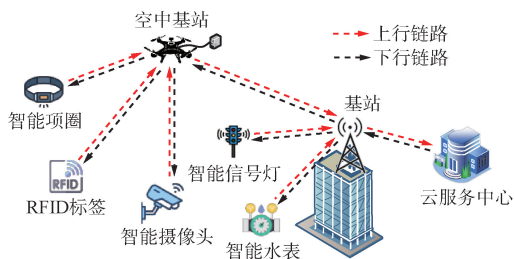


图 6 空地融合的低功耗物联网架构

Fig. 6 Air-ground integrated low-power IoT architecture

3.2 面向 NLOS 场景的低功耗物联网架构

NLOS 环境对低功耗物联网提出了更大的挑战。信号在传播过程中容易受到建筑物、植被等障碍物的阻挡和散射,导致信号强度衰减、传输延迟增加以及数据包丢失率上升。为了克服这些障碍,物联网设备需要提高发射功率以确保信号的可靠传输,这无疑会增加能耗。同时,为了弥补 NLOS 环境下的覆盖范围限制,需要增加基站或中继节点的数量,这加大了部署成本和整体功耗。通过在网络中引入 RIS 技术,可以有效解决 NLOS 下的低功耗物联网所面临的信号衰减和频谱资源受限等问题。

RIS 面板是一种平面超表面结构,能够动态控制电磁波,由单独配置的反射阵元组成,这些阵元可调整反射信号的相位和幅度,以促进无线传播。值得注意的是,RIS 反射阵元几乎是无源的,不会产生额外的功耗,通过将 RIS 与低功耗通信技术结合,可以显著提升 NLOS 环境下的通信性能,同时保持整体的低功耗特性。基于 RIS 的不同信号增强方式,本节探讨了反射 RIS 辅助以及同时反射和透射的可重构智能超表面 (Simultaneously Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surface, STAR-RIS) 辅助的低功耗物联网通信架构,为未来低功耗物联网的发展提供新的解决方案。

3.2.1 反射 RIS 辅助的低功耗物联网通信架构

在 6G 通信的大背景下,低功耗通信技术对于物联网的发展至关重要。RIS 和 BackCom 因具备低功耗特性而得到广泛应用,将二者结合形成的 RIS 辅助的 BackCom 系统^[57],为物联网的发展提供了新的思路。RIS 不仅能够助力 BackCom,还可以与

其他低功耗通信技术相结合^[58],如 LoRa、窄带物联网等。基于不同的部署方式,RIS 辅助的低功耗物联网架构可分为地面 RIS 和空中 RIS,以下是对这 2 种架构的详细介绍。

如图 7 所示的地面 RIS 辅助的低功耗物联网架构,为解决基站到终端设备通信链路受障碍物阻挡的问题,可在高楼部署反射 RIS,通过构建基站到 RIS 的直连链路和 RIS 到终端设备的反射链路重构受阻链路^[59]。在收到 RIS 加强的能量信号之后,反向散射设备根据要传输的数据动态改变反射系数,将信息加载到反射信号上,并发送至 RIS,RIS 再将信号反射至基站,完成上行数据传输^[60]。在 RIS 辅助的其他低功耗技术中,信号衰减问题也得到了有效缓解,频谱利用率显著提高。通过将反射 RIS 部署在高楼,该架构有效延长了终端设备的存续时间,提高了 NLOS 下低功耗物联网的频谱利用率^[61]。

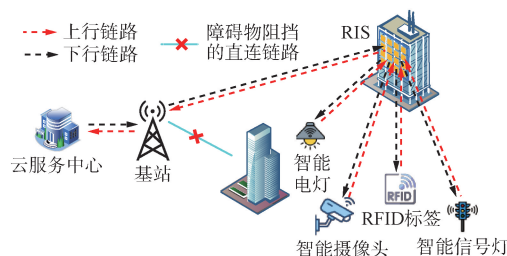


图 7 地面 RIS 辅助的低功耗物联网架构

Fig. 7 Ground-based RIS-assisted low-power IoT architecture

图 8 给出了空中 RIS 辅助的低功耗物联网架构,核心在于将 RIS 与 UAV 结合,形成协同的智能反射网络。在此架构中,通过 UAV 搭载的 RIS 实现动态覆盖与灵活调控,克服了传统静态 RIS 的部署局限^[62-63],同时利用 RIS 提供定向信号增强,扩展了通信范围并增强了网络鲁棒性。具体而言,终端设备将传感数据上传到空中 RIS,空中 RIS 精准调控电磁波的传播路径,将数据传输至基站。

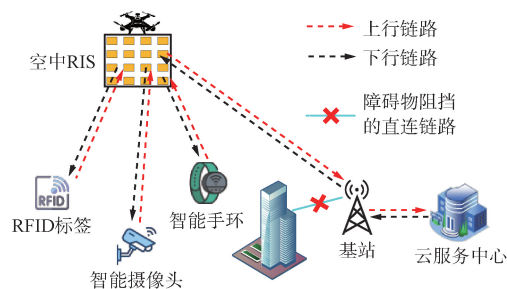


图 8 空中 RIS 辅助的低功耗物联网架构

Fig. 8 Aerial RIS-assisted low-power IoT architecture

此外,空中 RIS 也为反向散射设备提供了更高效的能量补充服务。UAV 携带 RIS 的网络架构,不仅解决了 NLOS 传输问题,还通过减少基站依赖实现了绿色节能的网络转型,为大规模低功耗物联网部署提供了兼具灵活性与可持续性的解决方案。

3.2.2 STAR-RIS 辅助的低功耗物联网通信架构

传统 RIS 只能实现半空间覆盖,严重限制了 RIS 部署的灵活性。在此基础上,一种新颖的 STAR-RIS 能够将入射的无线信号灵活地分成反射和透射 2 个部分,实现 360°全空间覆盖,有效突破了传统 RIS 难以满足设备位于其两侧场景需求的局限性^[64-65]。将 STAR-RIS 部署在低功耗物联网中的架构如图 9 所示,其被部署在墙体上,通过适当调整透射和反射的幅度系数,元件可在全透射、全反射以及同时传输和反射的模式间灵活切换。这一特性使得无论是室内还是室外的终端设备,均能通过 STAR-RIS 将传感数据传输到基站,有效解决了 NLOS 下信号衰减问题。此外,STAR-RIS 通过反射或者透射接收到的能量信号,为反向散射设备提供了更多的能量收集途径,使其能够高效地获取所需能量^[66]。未来,这一架构有望进一步发展,为物联网终端设备提供更高效、更灵活的能量收集和 NLOS 下信息传输的解决方案。

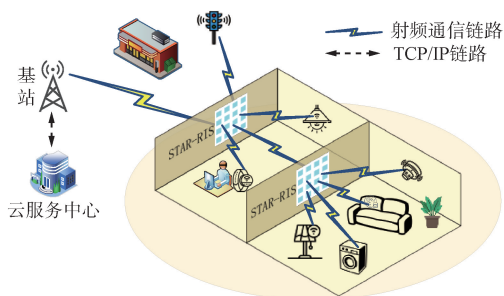


图 9 STAR-RIS 辅助的低功耗物联网架构

Fig. 9 STAR-RIS-assisted low-power IoT architecture

4 低功耗物联网应用场景

传统物联网应用常因设备功耗较高、更换电池需求频繁或频谱拥挤而难以实现大规模部署,特别是在依赖电池供电或地处偏远的场景中,运维成本高昂。

针对此问题,低功耗物联网通过优化通信协议、采用休眠机制及 BackCom 技术,显著降低了设备功耗,提升了频谱利用效率。基于这些优点,低功耗物联网支持广域覆盖和海量连接,在多个领域具

有很大的应用潜力,图 10 展示了低功耗物联网的典型应用场景。

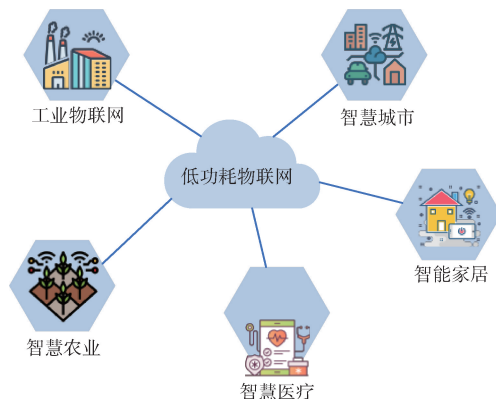


图 10 低功耗物联网应用场景

Fig. 10 Low-power IoT application scenarios

4.1 智能家居

智能家居以住宅作为核心平台,运用物联网技术,将各类家居设备有机集成起来,并广泛采用 Zig-Bee、BLE、BackCom 等低功耗物联网技术。这些技术的运用显著降低了设备能耗与运行成本,让家居管理变得更加智能、便捷与高效。例如,室内部署的终端设备在收集到传感数据之后,通过网关将数据上传到手机或者云端,使用户及时得知家中状况,而且室内的其他射频源还可以为反向散射设备供能,减少了设备的电池更换频率。因此,低功耗物联网能赋予智能家居更多的创新应用,如智能家电的远程操控与能耗管理、室内环境的精准监测等。

4.2 智慧城市

智慧城市的构建旨在借助低功耗物联网设备,为城市生活打造智能化、广泛化、高效化的管理体系,涵盖城市交通管理、环境监测及公共设施管理等多个关键领域,全面满足城市运作的各类需求。在低功耗物联网技术的推动下,城市能够实时捕捉并处理来自四面八方的传感信息,确保城市运作地平稳与高效。然而,随着物联网设备数量的激增,数据上传的集中性可能导致信道拥塞与时延上升。此时,智慧城市可借助分布式架构,使物联网设备将采集的数据就近传输至边缘节点,这些节点凭借本地处理能力,迅速对数据进行分析与响应,有效疏解了城市环境中数据传输瓶颈。低功耗物联网技术,以其低功耗、低成本的特点,为智慧城市提供了高效服务。

4.3 工业物联网

在工业物联网中,低功耗物联网技术深度融入各个环节,推动工业朝着智能化和结构化的方

向发展。在工业生产环节,其借助低功耗传感器,能实时监测设备的运行状态,如温度、压力、振动等参数,利用 LoRa、窄带物联网等低功耗通信技术将数据传输至管理系统。在供应链管理方面,低功耗物联网设备为货物贴上电子标签,通过 ZigBee 等技术构建的网络,可实时跟踪货物的位置、运输状态等信息。此外,低功耗物联网技术还可应用于工业环境监测,实时监测工厂周边的空气质量、水质等环境指标,确保生产活动符合环保要求。

4.4 智慧农业

传统农业生产容易受到自然条件的约束,无法及时应对环境变化对农作物和牲畜的影响,难以实现高效的供应链管理,导致农产品供需失衡。将低功耗物联网通信技术引入农业生产中,有效解决了这些问题。具体而言,基于 Sigfox、LoRa 和窄带物联网等技术的传感器节点通过对牲畜的健康、发情和位置追踪,实现智能化养殖管理,提升养殖效益;借助 BackCom 技术可监测土壤湿度、温度、光照等环境参数,精准调控灌溉、施肥时机与用量,提高资源利用效率。低功耗物联网以其低能耗特性,降低了智慧农业的网络建设和运营成本,有力地推动了智慧农业的发展。

4.5 智能医疗

低功耗物联网在智能医疗领域的应用正深刻改变着传统医疗模式。借助低功耗物联网通信技术,各类可穿戴设备和医疗传感器能够实时采集患者的生理数据,如心率、血压、血糖、睡眠状态等,并将数据稳定传输至医疗云平台或移动终端。同时,基于 BackCom 的微型传感器,可附着在患者身体或衣物上,利用环境中的射频信号进行数据传输,无需额外电源,大大降低了设备功耗和成本。基于这些优点,低功耗物联网技术正推动智能医疗向更高效、更经济、更人性化的方向发展。

5 未来研究方向

根据上述内容,本文对低功耗物联网的技术特点和架构进行了全面总结,未来该领域还将持续发展,在提升系统性能的同时实现绿色低碳发展。基于此,本文探讨了低功耗物联网的未来研究方向。

① 无源物联网可以进一步降低物联网网络的能耗。无源物联网以 BackCom 为核心,通过环境射频信号实现零功耗的数据传输与能量收集。未来研究可聚焦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射路径,从而拓展无源标签的通信距离并提升能量

收集效率。在无源物联网中还可以探索多射频源协同技术,融合 LoRa、窄带物联网等多种射频信号解决偏远地区射频源强度不足问题。

② 构建低功耗物联网全架构协同优化与安全防护体系。面向感知层、网络层与应用层的协同需求,设计贯穿全架构的联合优化协议,通过轻量化设计与智能调度降低系统开销。具体而言,可以在感知层采用压缩感知减少数据量,网络层借助动态时分多址降低交互损耗,应用层通过自然语言处理提取语义实现精准传输。针对低功耗物联网中终端设备资源受限的特点,可以构建跨层安全防护体系,在物理层利用 RIS 构建动态电磁加密环境,实现其安全防护。

③ 打破异构网络协议壁垒,实现多技术融合部署的兼容。当前,LoRa、窄带物联网、ZigBee、BLE 等协议在功耗、覆盖范围和速率上各有优势,但协议差异导致网络割裂、数据交互困难。因此,可开发支持多种协议的多模网关,实现动态选择最优协议传输。此外,还可制定跨协议的 API 接口规范,允许不同设备直接通信,避免数据经云端中转导致的延迟。

④ 基于人工智能的低功耗物联网智能化重构。通过在终端侧部署轻量化神经网络,实现数据预处理与特征提取;边缘节点运行强化学习算法,优化路由选择与本地决策;云端则通过大规模数据训练全局资源分配模型,实现能耗、时延、可靠性的多目标协同优化。另外,还可利用人工智能技术构建智能预测模型,动态感知网络负载与环境变化,实时调整设备工作模式与资源分配策略,使低功耗物联网向自主化方向发展。

6 结束语

未来,物联网将朝着低功耗方向发展,以满足 6G 通信中万物智联,物联网设备泛在连接的要求。本文对低功耗物联网的总体研究进行了全面综述,介绍了其基本定义、原理以及低功耗无线通信技术。在此基础上,分析了集中式、分布式、混合式 3 种低功耗物联网传输架构,并进行了对比和总结。从不同传播环境的角度阐述了 LOS 和 NLOS 下低功耗物联网的通信架构,讨论了其典型应用场景和未来研究趋势。

参考文献

- [1] 孙其博,刘杰,黎彝,等.物联网:概念、架构与关键技术研究综述[J].北京邮电大学学报,2010,33(3):1-9.

- [2] LIN J, YU W, ZHANG N, et al. A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(5): 1125–1142.
- [3] NGUYEN D C, DING M, PATHIRANA P N, et al. 6G Internet of Things: A Comprehensive Survey [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(1): 359–383.
- [4] 刘森, 夏雨虹, 赵海涛, 等. 面向 6G 工业物联网的联邦学习: 从需求、愿景到挑战、机遇 [J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(12): 4335–4353.
- [5] IMT-2030(6G) 推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书 [R]. 北京: IMT-2030(6G) 推进组, 2021.
- [6] MOSTAFA A E, WONG V W S. Transmit or Backscatter: Communication Mode Selection for Narrowband IoT Systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(5): 5477–5491.
- [7] DU R, TIMOUDAS T O, FISCHIONE C, et al. Comparing Backscatter Communication and Energy Harvesting in Massive IoT Networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(1): 429–443.
- [8] WU D X, LIEBEHERR J. A Low-cost Low-power LoRa Mesh Network for Large-scale Environmental Sensing [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(19): 16700–16714.
- [9] YEGANEH R S, OMIDI M J, GHAVAMI M. Multi-BD Symbiotic Radio-aided 6G IoT Network: Energy Consumption Optimization with QoS Constraint Approach [J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, 7(4): 2067–2080.
- [10] XU Y J, JIANG S Q, XUE Q, et al. Throughput Maximization for NOMA-based Cognitive Backscatter Communication Networks with Imperfect CSI [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(22): 19595–19606.
- [11] JIANG T, ZHANG Y, MA W Y, et al. Backscatter Communication Meets Practical Battery-free Internet of Things: A Survey and Outlook [J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2023, 25(3): 2021–2051.
- [12] XU Y J, ZUO X X, YANG G, et al. Outage-constrained Throughput Maximization for MISO Symbiotic Radio Systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(11): 16725–16734.
- [13] XU Y J, TIAN Q Y, ZHANG H B, et al. RIS-Enhanced Cognitive BackCom Networks: Robust Resource Allocation and Passive Beamforming Design [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(23): 38815–38828.
- [14] YANG H C, DING H Y, ELKASHLAN M, et al. A Novel Symbiotic Backscatter-NOMA System [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(8): 11006–11011.
- [15] SAFIU A G, GERHARD P H, ADNAN M A M. Interference-Aware and Coverage Analysis Scheme for 5G NB-IoT D2D Relaying Strategy for Cell Edge QoS Improvement [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(2): 2224–2235.
- [16] WANG W J, XU K J, YAN Y G, et al. Relay Selection-based Cooperative Backscatter Transmission with Energy Harvesting: Throughput Maximization [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(7): 1533–1537.
- [17] YANG Y Z, YAN S. Joint Throughput Maximization and Energy Management for Ultralow Power Ambient Backscatter Communication in WBANs by Distributed Deep Reinforcement Learning [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(24): 42484–42499.
- [18] ZHOU Y, MA H, FANG Y, et al. Design and Performance Analysis of a Novel Constellation-aided LoRa Communication System [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2025, 14(4): 1234–1238.
- [19] XU H, YAN Z J, LI B, et al. Modeling and Analysis of the Performance for Bluetooth Low Energy [J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(3): 732–736.
- [20] JAC M K. On the LoRa Modulation for IoT: Preamble Designs for Channel Estimation with Single- and Multi-chirp Transmission Strategies [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(17): 27981–27993.
- [21] HUNG W L, MANDAVI D, HSUEH W T. LAEBLE: A Lightweight Authentication and Encryption Mechanism for the E-health System in Bluetooth Low Energy [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(21): 26712–26727.
- [22] LI X W, JIANG J 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.
- [23] PENG Y X, HE S Y, ZHANG Y, et al. Ambient LoRa Backscatter System with Chirp Interval Modulation [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(2): 1328–1342.
- [24] JUAN P B, MARCEL G, MATIAS M, et al. LoRa, Sigfox, and NB-IoT: An Empirical Comparison for IoT LPWAN Technologies in the Agribusiness [J]. *IEEE Embedded Systems Letters*, 2024, 16(3): 283–286.
- [25] BUURMAN B, KAMRUZZAMAN J, KARMAKAR G, et al. Low-Power Wide-area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 17179–17220.
- [26] JIANG X F, ZHANG H, YI E A B, et al. Hybrid Low-power Wide-area Mesh Network for IoT Applications [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(2): 901–915.
- [27] NARAYANAN R, KUMAR S, MURTHY C S R. Cross Technology Distributed MIMO for Low Power IoT [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2022, 21(5): 1609–1624.
- [28] LIU Q, FU M X, LI W, et al. RIS-assisted Ambient Backscatter Communication for SAGIN IoT [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(11): 9375–9384.

- [29] XU Y J, WANG M Y, JIA Y J, et al. Robust Beamforming and Rate Optimization for RIS-aided Symbiotic Radio Systems with RSMA [J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(10): 2328–2332.
- [30] XU Y J, GU B W, GAO Z M, et al. Applying RIS in Multi-user SWIPT-WPCN Systems: A Robust and Environmentally-friendly Design [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2024, 10(1): 209–222.
- [31] YANG M, XU Y J, HUANG C W, et al. Sum-rate Maximization in RIS-aided Wireless-powered D2D Communication Networks[C]//2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Kyoto: IEEE, 2022: 307–312.
- [32] ZHOU C Y, XU Y J, LI D, et al. Energy-efficient Maximization for RIS-aided MISO Symbiotic Radio Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(10): 13689–13694.
- [33] XU Y J, TIAN Q Y, CHEN Q B, et al. Robust Secure Beamforming Design for Multi-RIS-Aided MISO Systems with Hardware Impairments and Channel Uncertainties [J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(3): 1517–1530.
- [34] WANG G N, LIU J, YANG H Y, et al. On the Achievable Rate Maximization in RIS Enhanced Ambient Backscatter Communication Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2025, 14(2): 380–384.
- [35] 世界物联网大会. 世界万物智联数字经济白皮书[R]. 北京: 世界物联网大会执委会, 2024.
- [36] MAGAIA N, GOMES P, SILVA L, et al. Development of Mobile IoT Solutions: Approaches, Architectures, and Methodologies [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(22): 16452–16472.
- [37] 卢宁宁, 张海鹏, 杨悦, 等. 近零功耗物联网及其关键技术研究[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(4): 343–350.
- [38] LIN J C. NB-IoT Physical Random Access Channels (NPRACHs) with Inter-carrier Interference (ICI) Reduction [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(3): 5427–5438.
- [39] MARINI R, MIKHAYLOV K, PASOLINI G, et al. Low-power Wide-area Networks: Comparison of LoRaWAN and NB-IoT Performance [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(21): 21051–21063.
- [40] YAMAZAKI S, NAKAJIMA Y. A Sigfox Energy Consumption Model via Field Trial: Case of Smart Agriculture [J]. IEEE Access, 2023, 11: 145320–145330.
- [41] 童率, 王继良. 低功耗广域网 LoRa 技术进展与研究挑战 [J]. 电子学报, 2024, 52(10): 3623–3642.
- [42] ALDHAHERI L, ALSHEHHI N, MANZIL I I J, et al. LoRa Communication for Agriculture 4.0: Opportunities, Challenges, and Future Directions [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(2): 1380–1407.
- [43] YAO J, HUANG H L, SU J K, et al. Enabling Cross-technology Coexistence for ZigBee Devices Through Payload Encoding [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(8): 8289–8306.
- [44] ASSAYAG Y, OLIVEIRA H, SOUTO E, et al. Adaptive Path Loss Model for BLE Indoor Positioning System [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(14): 12898–12907.
- [45] 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, 43(11): 199–212.
- [46] WANG X Y, FEI Z S, WU Q Q. Integrated Sensing and Communication for RIS-Assisted Backscatter Systems [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(5): 13716–13726.
- [47] 徐勇军, 邱友静, 张海波. 智能反射面辅助的环境反向散射通信系统信道估计算法研究 [J]. 电子与信息学报, 2025, 47(1): 75–83.
- [48] LIN J L, WANG G G, XU R T, et al. Versatile-modulation and Megabit-rate Backscatter System: Design, Implementation, and Experimental Results [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(5): 8240–8252.
- [49] 徐勇军, 杨浩克, 李国军, 等. 多标签无线供电反向散射通信网络能效优化算法 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(10): 3492–3498.
- [50] 王晔, 朱铭凯, 李龙泽, 等. 智能反射表面辅助的反向散射通信系统研究综述 [J]. 无线电通信技术, 2023, 49(3): 447–454.
- [51] 陈亮, 李峰, 任保全, 等. 软件定义物联网研究综述 [J]. 电子学报, 2021, 49(5): 1019–1032.
- [52] LIU J L, ZHOU A, LIU C H, et al. Reliability-enhanced Task Offloading in Mobile Edge Computing Environments [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(13): 10382–10396.
- [53] KONG X J, WU Y H, WANG H, et al. Edge Computing for Internet of Everything: A Survey [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(23): 23472–23485.
- [54] 徐勇军, 鲁承壮, 陈前斌. 可重构智能表面辅助通信系统网络架构演进综述 [J]. 无线电通信技术, 2024, 50(2): 294–302.
- [55] YANG G, YAO Y. Resource Allocation Control of UAV-assisted IoT Communication Device [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(11): 13341–13349.
- [56] MENG A Q, GAO X Z, ZHAO Y, et al. Three-dimensional Trajectory Optimization for Energy-constrained UAV-enabled IoT System in Probabilistic LOS Channel [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(2): 1109–1121.

- [57] XU Y J, LU C Z, ZHANG H, et al. QoS-driven Robust Resource Allocation for RIS-assisted Backscatter Communication with Imperfect CSI[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(4): 6650–6655.
- [58] LIANG Z K, CAI G F, HE F G, et al. RIS-enabled Anti-interference in LoRa Systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(10): 6599–6616.
- [59] 徐勇军, 姜思巧, 王公仆, 等. 基于不完美 CSI 的认知反向散射通信吞吐量最大化算法[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(7): 2325–2333.
- [60] 徐勇军, 田秦语, 陈前斌, 等. RIS 辅助认知反向散射通信网络吞吐量最大化算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(8): 1970–1982.
- [61] 徐勇军, 徐娟, 田秦语, 等. 基于统计信道状态信息的智能反射面辅助反向散射通信系统鲁棒资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1986–1995.
- [62] ADAM A B M, OUAMRA M A, WAN X Y, et al. Secure Communication in UAV-RIS-Empowered Multiuser Networks: Joint Beamforming, Phase Shift, and UAV Trajectory Optimization[J]. IEEE Systems Journal, 2024, 18(2): 1009–1019.
- [63] ZHANG H J, HUANG M L, ZHOU H, et al. Capacity Maximization in RIS-UAV Networks: A DDQN-based Trajectory and Phase Shift Optimization Approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(4): 2583–2591.
- [64] LI Y X, WANG J, ZOU Y X, et al. Weighted Sum Power Maximization for STAR-RIS Assisted SWIPT Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(12): 18394–18408.
- [65] HUANG A, MU X D, GUO L. STAR-RIS Assisted Downlink Active and Uplink Backscatter Communications with NOMA[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(11): 14516–14530.
- [66] DU W N, CHU Z, CHEN G J, et al. STAR-RIS Assisted Wireless Powered IoT Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(8): 10644–10658.

作者简介:

骆东鑫 男, (2002—), 硕士研究生。主要研究方向: 智能反射面、反向散射通信等。

李 晶 男, (2002—), 硕士研究生。主要研究方向: 进场通信、物理层安全等。

徐勇军 男, (1986—), 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 智能反射面、反向散射通信、资源分配等。

陈 莉 女, (1979—), 工程师。主要研究方向: 反向散射通信、智能反射面等。

唐 鹏 男, (1978—), 工程师。主要研究方向: 反向散射通信、资源分配等。

赵 耘 男, (1991—), 工程师。主要研究方向: 通感一体化、智能超表面等。