

# 物联网 (IoT) 中的低功耗广域网 (LPWAN) 技术综述与展望

刘津廷

润建股份有限公司 广西 南宁 530000

**摘要:** 本文对物联网中低功耗广域网LPWAN (Low-PowerWide-AreaNetwork) 技术进行全面综述。阐述其低功耗、广覆盖、大连接和低成本的特点及分类, 深入分析物理层、网络层与功耗优化核心技术; 探讨在智慧城市、工业、农业等领域的典型应用; 展望未来与5G、AI等技术融合创新、应用场景拓展及产业标准化发展趋势。LPWAN技术为物联网发展提供关键支撑, 极具研究与应用价值。

**关键词:** 物联网; 低功耗广域网; 技术综述; 发展展望

## 1 物联网 (IoT) 中的低功耗广域网 (LPWAN) 技术概述

物联网 (IoT) 中的低功耗广域网 (LPWAN) 技术, 专为物联网设备打造, 致力于解决传统无线网络功耗高、覆盖有限的难题。它以低功耗实现长距离通信, 设备电池寿命在特定工况下 (如1%占空比) 可长达数年甚至十年以上, 且具备广覆盖、大连接、低成本的显著优势, 能满足海量物联网设备在广阔区域的通信需求。LPWAN技术主要分为工作于未授权频谱 (如LoRa、Sigfox) 和授权频谱 (如NB-IoT、LTE-M) 两类。其核心技术涵盖物理层的特色调制与频段选择、网络层的星型架构和轻量级协议, 以及设备端、网络层和应用层的功耗优化策略<sup>[1]</sup>。在应用上, LPWAN广泛应用于智慧城市、工业物联网、农业物联网等领域, 实现智能抄表、设备监测、精准农业等功能。未来, LPWAN将与5G、AI、大数据等技术融合创新, 拓展更多应用场景, 推动物联网产业发展, 同时促进相关标准规范的完善。

## 2 LPWAN 核心技术分析

### 2.1 物理层技术

LPWAN的物理层技术是实现低功耗广域通信的基础。在调制技术方面, 不同的LPWAN技术采用了各具特色的调制方式。在调制域创新方面, LoRa采用扩频调制技术(ChirpSpreadSpectrum), 通过线性调频信号的频率变化承载信息, 其处理增益 $G_p = 10\log(BW/B_m)$ 可达15-20dB, 使得在远距离传输过程中信号能够保持稳定。相较之下, Sigfox使用超窄带调制技术UNB(UltraNarrowBand), 采用100Hz级带宽的DBPSK调制, 将信号压缩在极窄的频带内进行传输, 其功率谱密度 $PSD = P_{Tx}/BW$ 特性显著降低同频干扰概率, 同时减少

功耗, 但需权衡Ackermann自同步算法的实现复杂度。在频段选择上, 工作于未授权频谱的LoRa和Sigfox可以在全球通用的ISM频段 (如433MHz、868MHz、915MHz等) 上运行, 这些频段无需授权即可使用, 降低了网络部署成本和门槛。而NB-IoT和LTE-M工作于授权频谱, 能够获得稳定的频谱资源, 避免未授权频谱可能存在的干扰问题, 保证网络的可靠性和安全性。另外, 天线技术在LPWAN物理层中也起着重要作用。为了实现广域覆盖, LPWAN设备通常采用高增益天线, 以增强信号的发射和接收能力。

### 2.2 网络层与协议

LPWAN的网络层负责设备与网络之间的数据传输和管理。在网络架构方面, 常见的LPWAN网络采用星型拓扑与分层路由结合结构, 物联网设备作为终端节点, 通过基站 (网关) 与核心网络进行通信。这种架构简单且易于管理, 终端节点只需与最近的基站建立连接, 降低了设备的复杂度和功耗。在协议设计上, LPWAN技术采用了轻量级的通信协议, 以减少数据传输过程中的开销, 降低功耗。例如, LoRaWAN协议定义了设备与网络之间的通信规则和接口, 支持不同类型的设备接入网络, 并提供了安全加密机制, 保障数据传输的安全性。NB-IoT基于3GPP标准协议, 继承了蜂窝网络的成熟协议体系, 具有良好的兼容性和扩展性, 能够实现设备的远程管理和控制。

### 2.3 功耗优化技术

功耗优化是LPWAN技术的关键特性之一, 其核心在于通过多维度策略降低能耗, 延长设备使用寿命。在设备端, 低功耗芯片与传感器的采用是基础。低功耗芯片在满足设备基本功能的同时, 能最大限度减少工作电

流,从而显著延长电池寿命。选择如低功耗温湿度传感器、低功耗压力传感器等,也能进一步降低整体功耗。在网络层,通信机制的优化是降低功耗的有效途径。设备在距离基站较近且信号良好时,通过提高数据传输速率,实现数据的快速传输;而在距离较远或信号较弱时,则降低数据传输速率,减少因信号不佳导致的重传次数,进而节省功耗。引入唤醒机制,使设备大部分时间处于休眠状态,仅在需要传输数据时唤醒,进一步节省了能量。在应用层,合理的数据采集和传输策略同样对功耗优化至关重要。对于实时性要求不高的应用场景,如环境监测,可以适当延长数据采集间隔,减少数据传输次数,从而降低功耗。同时,对采集到的数据进行本地处理和压缩,减少数据传输量,也是降低网络传输过程中功耗的有效手段。为量化功耗优化效果,可构建能量消耗模型,如应用 $E = P \times T$ 公式(其中 $E$ 代表能量消耗, $P$ 代表功率, $T$ 代表时间)。以LoRa设备为例,假设其工作功率为50mW(即0.05W),每次数据传输持续时间为1秒,则每次传输消耗能量为0.05J。若通过优化策略,如降低工作功率或缩短传输时间,都能有效降低能量消耗,进而延长设备电池寿命<sup>[2]</sup>。

#### 2.4 主流技术对比

在LPWAN领域,LoRa、NB-IoT和Sigfox各具技术优势与应用适配性。传输距离上,LoRa在郊区可达15公里、城区2-5公里;NB-IoT依托基站,城区覆盖1-3公里;Sigfox郊区覆盖数十公里,城区3-10公里。数据速率方面,LoRa为0.3kbps-50kbps可调,NB-IoT约100kbps,Sigfox仅100bps-1kbps。功耗特性中,LoRa设备电池寿命5-10年,NB-IoT通过PSM等模式实现2-5年续航,Sigfox凭借超窄带技术可维持数年低功耗运行。技术选型可依据场景需求决策:若需超10公里传输、低于1kbps速率及5年以上长续航,Sigfox为首选;传输距离5-15公里、速率0.3-50kbps且注重功耗时,LoRa更优;当传输距离1-5公里、需较高数据速率(100kbps),并依赖运营商网络稳定性,NB-IoT则是最佳选择。如偏远山区监测适合Sigfox,城市智能交通适用NB-IoT,智慧农业场景下LoRa更能满足需求。

### 3 物联网(IoT)中的LPWAN技术的典型应用场景

#### 3.1 智慧城市应用

在智慧城市构建中,LPWAN技术担当了核心角色。智能抄表是LPWAN技术应用的亮点之一。通过在各类表具上,如水表、电表、燃气表等,嵌入LPWAN通信模块,能够自动并远程传输数据。相较于传统人工抄表,LPWAN技术确保了数据的实时性与准确性,极大提升了

抄表效率,降低了人力成本与误差。利用这些数据,城市管理部门能执行精细的能源调控,推动节能减排。智能路灯系统同样受益于LPWAN技术,通过整合传感器与LPWAN通信模块,路灯实现了远程智能操控与亮度调节。依据光线强度与人流量,路灯可自适应调整亮度,节约能耗。管理人员能集中监控路灯状态,及时发现故障并处理,提升了照明系统的效能与维护质量。LPWAN技术还广泛应用于城市环境监测,涵盖空气质量、水质等。大量传感器节点实时收集数据,并通过LPWAN网络传至监测中心,助力管理部门迅速响应环境问题。以智慧水务为例,LoRaWAN技术的SF12配置在实际部署中展现了其对电池寿命的显著影响。通过优化SF12参数,传感器节点的电池寿命可延长至数年,大大降低了维护频次与成本,进一步验证了LPWAN技术在智慧城市应用中的优势与潜力<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 工业物联网应用

在工业物联网领域,LPWAN技术为工业设备智能化管理奠定了坚实基础。设备状态监测是其核心应用之一,通过在设备上部署LPWAN传感器,实时捕捉运行参数,如温度、振动、压力等,并将数据传输至监控中心。管理人员凭借数据分析,能预判设备故障,及时维护,避免生产中断,提升设备可靠性和生产效率。供应链管理方面,LPWAN技术同样表现出色,它能在物流过程中对货物位置、温湿度等信息进行实时监测和追踪。借助LPWAN设备,货物或运输车辆的数据被实时上传至物流管理系统,实现供应链全程可视化,增强安全性和效率,降低损耗与丢失风险。此外,在复杂工业生产环境中,LPWAN技术还支持远程监控与控制。

#### 3.3 农业物联网应用

在农业领域,LPWAN技术正引领智慧农业的新纪元。精准农业是LPWAN技术大展身手的舞台之一。通过密布农田的传感器网络,包括土壤湿度、温度、光照等传感器,借助LPWAN技术实时收集环境数据。农民据此精准调控灌溉、施肥与喷药,实现资源高效利用,提升作物产量与质量,降低生产成本。畜禽养殖同样受益于LPWAN技术,为畜禽佩戴标签或安装传感器,实时监测其活动、健康及生长环境信息,优化养殖管理。农产品溯源也是LPWAN技术的用武之地,在生产、加工、运输、销售各环节,LPWAN设备记录关键信息,上传至溯源系统,让消费者通过扫描二维码,即可洞悉农产品的全程历史,确保食品安全。值得注意的是,在智慧农业场景下,Sub-GHz与2.4GHz频段的LPWAN技术在路径损耗模型上存在显著差异。Sub-GHz频段因其较长的波长,

具有更好的穿透力与绕射能力,尤其适合农田复杂环境下的数据传输,路径损耗相对较低。而2.4GHz频段虽然数据传输速率较高,但在遇到障碍物时路径损耗较大,可能影响数据传输的稳定性与覆盖范围。因此,在选择LPWAN技术时,需根据农田的具体环境与需求,权衡频段特性,以实现最优的通信效果。

#### 4 物联网 (IoT) 中的 LPWAN 技术的未来发展趋势与展望

##### 4.1 技术融合与创新趋势

LPWAN技术正加速与5G、AI及大数据融合。5G的高速率与低延迟特性,与LPWAN的低功耗、广覆盖优势互补,可满足智能工厂实时监控、自动驾驶远程控制等对数据传输要求较高的场景需求。在3GPP R18标准中,RedCap与NB-IoT协同演进,前者作为5G轻量化技术,专注中低速率物联网应用,二者通过共享5G基础设施,实现网络资源高效分配,适用于智能电表快速数据上传、智能物流货物追踪等场景。AI与大数据技术的融入,推动LPWAN网络智能化升级。AI算法可自动优化网络参数、预测设备故障,提升网络运行效率;大数据分析则从海量数据中挖掘价值,为交通规划、精准种植等应用提供决策支持。同时,LPWAN自身技术持续迭代,物理层探索更高效调制技术与频段利用方案,网络层优化协议设计,以降低开销、增强兼容性<sup>[4]</sup>。

##### 4.2 应用场景拓展趋势

LPWAN技术应用场景不断延伸。智能家居领域,其实现设备远程智能控制,提升家居便捷性;智能建筑中,通过实时采集电梯、空调等设备数据,优化运维与能耗管理,降低运营成本。在新兴领域,智能海洋依托LPWAN实现海洋环境数据实时传输,支撑资源开发与生态保护;智能太空则利用该技术实现卫星远程监测与控制,拓展太空探索边界。

##### 4.3 产业发展前景

LPWAN技术成熟与场景拓展,驱动物联网设备市场爆发式增长,带动芯片、传感器等产业链协同发展。网络运营商加速扩大覆盖、提升服务,吸引企业与用户接入;服务提供商基于多样化场景,推出智慧城市、工业物联网等定制化解决方案。标准化进程方面,ETSI LTN协议与LoRaWAN互操作性研究取得进展,若实现互通,将打破技术壁垒,促进全球LPWAN产业融合。但技术发展面临安全挑战,量子计算对AES-128等加密算法构成威胁,研发抗量子攻击加密技术成为保障LPWAN安全的关键。未来,国际合作将推动技术标准统一,为物联网全球化发展筑牢基础。

##### 结束语

综上所述,LPWAN技术凭借独特优势在物联网领域发挥重要作用,从核心技术到多元应用已展现强大潜力。随着技术融合创新加速、应用场景持续拓展及产业标准逐步完善,LPWAN技术将进一步推动物联网产业升级,为智慧城市、工业互联网等发展注入新动力,在未来数字化社会建设中占据重要地位,拥有广阔发展前景。

##### 参考文献

- [1]卢振强,陶弋卿,熊文林,等.基于LPWAN技术的电网建设现场电源监测研究[J].通信电源技术,2024,41(23):125-127. DOI:10.19399/j.cnki.tpt.2024.23.042.
- [2]吴振辉,周靖,陈丽霞,等.基于LPWAN的低压配电网拓扑自动识别技术研究[J].科学技术创新.2022,(3). DOI:10.3969/j.issn.1673-1328.2022.03.047.
- [3]曹扬,许爱东,陶文伟,等.电力物联网LPWAN性能分析与仿真[J].南方电网技术.2020,(8). DOI:10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.08.001.
- [4]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.