

面向工业物联网的低功耗广域网络传输协议优化

张明霞

日海恒联通信技术有限公司 河南 郑州 450016

摘要: 针对工业物联网场景中设备密集部署引发的数据冲突频繁、网络生命周期较短及数据传输可靠性不足等问题,文章主要探讨了低功耗广域网络传输协议优化方法,包括基于符号分段跳信道的抗冲突机制(CHLoRa)、静态和动态资源分配策略优化,以及信号处理与链路质量预测的可靠性提升方案,仿真实验结果表明,该方法有效降低了数据冲突率,延长了网络生命周期,提升了整体通信可靠性。

关键词: 工业物联网;低功耗广域网;LoRaWAN;传输协议优化

引言

随着工业互联网的快速发展,工业物联网(IIoT)逐渐成为提升工业生产效率与安全水平的关键技术。然而,由于工业环境复杂多样,存在着数据传输实时性要求高、可靠性需求严苛以及设备能耗限制严格的特殊挑战,传统低功耗广域网络(LPWAN)协议难以有效应对设备高密度部署导致的数据碰撞频繁、能耗分配不均及信道干扰严重等问题^[1]。因此,开展面向工业场景的LPWAN传输协议优化研究,改善通信质量与网络性能,具有重要的理论意义和工程应用价值。

1 工业物联网场景特点分析

工业物联网(Industrial Internet of Things, IIoT)将先进的信息技术与传统工业生产紧密结合,涉及多种复杂且多样化的生产场景,对数据传输提出了特殊需求和挑战。

IIoT的数据传输需求主要体现在实时性、可靠性与低功耗三个方面^[2]。(1)实时性方面,工业生产线往往需要在极短的时间内完成数据的传输与处理,例如生产过程控制、设备状态监测及安全预警系统对通信延迟的容忍度极低。(2)可靠性方面,工业生产过程中,尤其是危险环境或自动化生产线,对数据的准确性和传输稳定性有较高的要求,任何数据丢失或传输错误可能导致生产中断、设备损坏甚至安全事故。(3)低功耗方面,许多IIoT终端部署于不易维护或偏远区域,电池更换成本高且困难,因此通信设备需要具备极低的功耗特性,以延长设备的使用寿命和降低维护成本。

2 低功耗广域网络技术类型及原理

低功耗广域网络(Low-Power Wide-Area Network, LPWAN)技术是为满足物联网设备低功耗与长距离通信需求,主要包括LoRaWAN、NB-IoT和Sigfox^[3]。

LoRaWAN基于扩频调制技术(Chirp Spread Spectrum, CSS),通过扩展信号频谱提高信号的穿透性与抗干扰性,具有显著的远距离传输优势,覆盖范围通常可达数公里甚至数十公里。LoRaWAN采用星型拓扑结构,简化了网络管理并降低了终端能耗,适用于设备数量庞大但通信量较低的工业环境,如工业设备监测和远程数据采集场景。

NB-IoT(窄带物联网)技术基于蜂窝网络架构,通过窄带频谱(约200kHz)实现高效频谱利用与广泛覆盖。其信号穿透能力强,能够有效应对地下室、建筑物内或地下设施等遮挡较多场景中的通信问题。NB-IoT与现有蜂窝网络兼容,可直接利用已有的LTE基础设施通过软件升级进行部署,显著降低了网络建设成本,因此特别适用于智能仪表、地下设施监测及城市智能化管理领域。

Sigfox技术采用超窄带(Ultra Narrow Band, UNB)调制技术,每次传输的数据量极少但距离极远,通信速率较低且能耗极低,尤其适合部署于长距离传输、低数据量及极低功耗的场景。Sigfox采用全球统一的网络架构和协议标准,部署成本低廉,但数据传输的实时性和容量较受限,更适用于简单监测类应用,如环境监测、资产追踪等应用场景。

3 低功耗广域网络传输协议优化设计

3.1 面向冲突消解的传输协议优化设计

低功耗广域网络中,数据包冲突问题是制约系统性能的重要因素,尤其在工业场景中,设备密度高导致大

作者简介: 张明霞(1992.10-),女,汉族,籍贯:河南省太康县,专科,工程师,研究方向:通信技术

量节点同时发送数据，传统的LoRa网络因使用ALOHA随机接入方式而难以避免数据碰撞。CHLoRa是将传统LoRa数据包中的单一符号进一步细分为若干子符号（subchirp），每个子符号按照随机生成的信道序列分配到不同的频率信道上发送。利用不同数据包所采用的随机信道序列互异，在信道维度上减少多个数据包同时发送时的干扰程度。具体而言，发送端首先通过随机信道序列将符号段分散至多个信道中，并在数据包起始部分内嵌该随机序列信息，接收端通过识别该信息实现符号的准确重组和解调，有效降低LoRa终端设备密集部署时数据冲突对通信质量的负面影响，增强网络整体抗干扰性能。

为更进一步提高数据包冲突消解能力，结合LoRa数据包特有的时频域特征，采用冲突分离机制。利用LoRa调制信号的线性调频扩频特性，在频域检测数据包间细微的频谱偏差和时域错位，实现对叠加信号的有效分离和解调。通过信号检测器识别频域峰值特征、精确定位数据包的起始位置和频谱结构，达到在重叠信号中区分和恢复各自数据的目的。通过CHLoRa与基于时频域特征的冲突分离机制结合，可以实现双重冲突缓解策略，有效提高LoRa网络中工业场景下的多终端通信可靠性。

3.2 面向网络生命周期延长的资源分配策略优化

工业物联网中设备部署数量庞大且分布广泛，设备通常依赖电池供电，因此如何有效延长网络生命周期成为重要问题之一。LPWAN协议中的资源分配策略，尤其是信道和扩频因子的分配，对网络生命周期有着直接的影响^[4]。

首先，在静态资源分配优化方面，通过深入分析工业环境下LoRa设备的传输特性，制定了更精细的信道分配和扩频因子选择策略。采用多目标优化算法，根据节点位置、链路质量、数据传输频率以及能耗需求等因素，分配最适合节点通信的信道及扩频因子。信道分配时，尽量使通信链路质量差异最小化，避免个别节点频繁重传数据造成额外的能耗。合理选择扩频因子，考虑扩频因子越高，通信距离越长，但数据传输时间和能耗也相应增加。因此，针对节点与网关之间距离、信道环境进行精细调节，以达到能耗与可靠性平衡的最优点。

其次，针对实际环境中的信道动态变化，提出了动态资源分配调整机制。根据工业现场环境条件的变化，如信道衰减、设备位置移动以及干扰情况变化等因素，动态调整节点使用的信道和扩频因子，实时维护网络性能。具体实施中，采用反馈机制和自适应控制算法，使网关或中心节点能及时检测链路质量变化情况，并向终

端设备发送资源分配的更新指令，避免因链路质量恶化造成的数据丢包和重传，延长整体网络的生命周期。通过机器学习算法预测网络状态变化趋势，主动进行资源调整，提前规避潜在风险，优化能耗管理。

3.3 面向工业环境的数据传输可靠性提升方法

面向工业环境的数据传输可靠性优化方法主要包括信号处理与干扰消除技术以及链路质量预测与路径调度优化策略^[5]。信号处理方面，通过高级滤波与干扰消除技术改善数据通信质量。利用自适应滤波技术，如卡尔曼滤波或维纳滤波，实时估计和补偿工业现场中的动态干扰，实现对数据包中干扰信号的有效去除。通过增强的信号解调算法，降低工业场景下多径传播引起的信号失真问题，提高数据传输准确性。

在链路质量预测和路径调度优化方面，通过建立工业现场无线通信的链路质量预测模型，准确评估节点间通信链路质量。模型基于历史链路状态数据、实时干扰强度测量和环境状态参数，结合机器学习算法，如随机森林或神经网络，预测链路未来时段质量变化趋势。基于预测结果，系统采用主动路径调度机制，将数据传输路径动态调整至链路质量更优、干扰更少的链路。通过该策略，提高了数据传输的成功率，还显著减少了由于重传导致的额外能耗。

4 性能验证方法设计

4.1 实验仿真环境搭建

为验证工业物联网低功耗广域网络（LPWAN）传输协议优化方案的有效性，基于网络仿真平台NS-3搭建仿真实验环境。网络覆盖面积为2km×2km，包含1个中心网关与500个随机分布的终端节点。各节点随机放置于仿真区域内，节点间距从几十米到数百米不等，以模拟实际工业环境中的密集部署状况。仿真参数如表1所示：

表1 仿真参数设置

参数	值或描述	参数	值或描述
仿真平台	NS-3v3.35	扩频因子（SF）	SF7 ~ SF12
网络区域	2km×2km	信道带宽	125kHz
节点数量	500	数据包大小	20bytes
网关位置	中心位置 (1000m,1000m)	发送周期	5min/次
通信协议	LoRaWAN、NB-IoT、CHLoRa	发射功率	14dBm
工作频段	868MHz	仿真时长	7d

仿真平台集成了无线信道模型，考虑路径损耗、多径衰落及信号干扰等工业场景的典型特征，以真实反映实际部署环境中的信号传播特性。

4.2 实验评估指标体系设计

为全面准确评估传输协议优化方案的性能,定义了主要的性能指标,具体如下:

(1) 数据传输成功率(Packet Delivery Ratio, PDR): 定义为成功接收到的数据包数与发送数据包总数的比值,用于评价网络数据传输可靠性:

$$PDR = \frac{N_r}{N_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中, PDR为数据传输成功率; N_r 为成功接收到的数据包数; N_s 为发送数据包总数。

(2) 网络生命周期(Network Lifetime): 定义为网络首次出现节点电量耗尽(电量低于门限值)的运行时间,以天为单位,用于评估资源优化方案的效果。

(3) 功耗公平性(Energy Fairness): 采用Jain's公平指数定义,以评估不同节点之间能耗的均衡程度:

$$EF = \frac{\left(\sum_{i=1}^N E_i\right)^2}{N \sum_{i=1}^N E_i^2} \quad (2)$$

式中, E_i 为节点 i 的能耗, N 为节点总数。指数取值越接近1,表示功耗越公平。

4.3 实验方案与对比分析方法介绍

实验方案设计了三个对比场景进行性能分析:

(1) 传统LoRaWAN协议场景(基准组): 采用标准LoRaWAN协议,节点随机选择信道与扩频因子,以ALOHA方式随机发送数据,无特殊优化策略。

(2) 静态资源优化协议场景: 根据节点初始位置、通信距离和链路质量分配固定信道和扩频因子,不随时间变化动态调整。

(3) 提出的动态资源优化协议场景(CHLoRa机制): 节点根据工业环境动态变化,周期性评估链路状态并相应调整信道与扩频因子,同时使用符号分段跳信道抗冲突机制(CHLoRa),每小时更新一次资源分配。不同方案下PDR随时间变化趋势见图1。

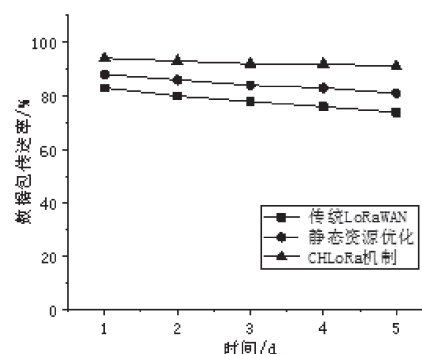


图1 不同协议下的数据传输成功率

通过收集仿真期间的数据传输成功率、节点剩余电量以及网络生命周期数据,采用MATLAB进行统计分析。

结语

综上,本文针对工业物联网场景的特殊通信需求,提出了适用于低功耗广域网的协议优化方法,包括抗冲突的CHLoRa机制、资源分配优化及链路质量预测与信号处理技术。实验仿真表明,所提方法在降低数据冲突概率、延长网络生命周期及提高数据传输可靠性等方面均有显著效果。

参考文献

- [1]禹晴.物联网中的低功耗广域网(LPWAN)技术与应用[J].电脑采购,2023(12):44-46.
- [2]郑凯文.低功耗广域网中抗冲突传输机制研究与实现[D].四川:电子科技大学,2024.
- [3]高伟峰.低功耗物联网的资源分配研究[D].四川:电子科技大学,2021.
- [4]谢恺泽,耿浩,丛铎,等.基于物联网技术的管道内检测器定位通信系统设计[J].价值工程,2022,41(19):97-100.
- [5]张伟康,曾凡平,陶禹帆,等.物联网无线协议安全综述[J].信息安全学报,2022,7(2):59-71.