

物联网通信数据传输延迟优化技术实践分析

陈红

中国电信股份有限公司宁波镇海分公司 315206

DOI:10.32629/ems.v8i6.20605

[摘要] 针对传统物联网通信存在链路拥堵、协议冗余、算力滞后及干扰损耗等传输延迟问题,本文面向物联网通信传输的全链路,分析研究数据传输过程中影响数据延迟的关键原因,并分别从网络拓扑、传输协议、路由算法和处理方法四个方面出发深入探究降低时延的优化技术。同时,结合工业物联网系统及智慧传感网络工程实例,通过测试分析比较不同低时延关键技术应用下的实际优化效果,并分析探讨各技术存在的应用难点。实践研究表明:采用边缘计算协同轻量化传输协议结合自适应路由算法相结合的优化方法能够将工业物联网中的数据传输时延缩短到 200 ms 以内,相比于传统的传输方式能够实现 60% 以上的传输效率提升。本课题的相关研究表明,所提出的低时延解决方案在物联网系统中能够起到显著的通信时延优化作用,在今后的实际部署应用中能够为物联网系统的高效、稳定、低延时数据传输提供有力的技术支撑。

[关键词] 物联网; 数据传输; 传输延迟; 优化技术; 边缘计算

引言

在工业 4.0 以及智慧城市的推动下,越来越多的物联网终端设备以高密度、分布式的方式进行部署,导致物联网终端之间的数据交互也越来越频繁。整个物联网中的通讯过程包括传感、链路、处理以及反馈几个方面,其中任何一个环节都会影响到设备之间的联动精度与物联网系统的运行稳定性,在工业自动化、智能电网等业务系统要求必须有毫秒级的数据延迟,才能保证业务能够正常运作,针对以上情况本文结合实际项目经验,准确分析造成物联网数据传送延迟的主要环节,并详细剖析各类优化手段,同时通过对实际数据采集与测试结果来说明优化方案的可行性,给出各种适用环境下延迟优化的实施方案,作为今后对物联网通信的优化及改善基础。

一、物联网通信数据传输时延产生原因

(一) 网络架构层面延迟

当前多数物联网采用传统的基于中心化的云处理的架构,终端收集到的数据经过无线传感节点、网关、核心网以及云端服务器等层层转发,过多跳转造成转发时延。大量密集部署的终端同时接入网导致信道资源拥挤极易出现拥堵现象,并且传统网络架构的层次结构固定,某些闲置资源无法进行合理配置从而浪费了网络资源进一步加剧了传输时延,同时,在实际应用场景中,例如复杂工业环境和地下管廊等地,电磁干扰以及墙的阻隔都会对信号产生衰减,数据包的重传也会增加额外的时间开销^[1]。通过实测表明在复杂环境下由信号损耗造成的重传耗时约占总延迟的 35% 左右。

(二) 传输协议层延时

冗余度大、适应范围广但特异性弱。MQTT 和 TCP/IP 等通用性协议中存在大量的校验字段以及加密冗余代码,导致每个数据包的头部过大,在传递一些微小的传感数据时,可能需要 40% 的无效字节来完成封装解析工作,增大了封装和解析的工作时间。部分无线通信协议如 ZigBee 原始协议采用睡眠唤醒式的数据传输,节点间的切换需要较长的时间才能响应,在实时要求很高的交互过程中同步延时明显,其他不同终端设备所使用的协议不相容,不同协议之间进行数据交换的时候都需要网关的翻译码,增加了额外的数据转换延时间^[2]。

(三) 数据处理与算力延迟

传统架构下所有的数据都会上传至云端处理,端侧只负责采集任务。算力严重不平衡的问题。所有的原始传感数据无差别地全部上传到云端,这不仅消耗了信道带宽还会造成云端的算力堵塞和数据的延时处理。多数成本低廉的物联网终端算力弱,缺乏本地预处理能力,无法实现数据的筛选、降噪、压缩等功能,无效数据、重复数据占满链路资源,并增大了传输负担^[3]。

二、物联网通信数据传输延迟优化技术

(一) 网络架构优化技术

架构优化是指通过缩短链路距离、分配网络资源来减少在物理上的转发延时和远距离衰减,在实际项目中最成熟的是边缘计算架构改造,该方案摒弃传统云端集中计算的模式,将算力和解析能力以及存储都下沉到了边缘网关或近端节

点,构成终端—边缘—云的一个三级轻量化结构,基于边缘的本地算力完成数据近距离的处理、逻辑判断及指令的下发大大减少了原始数据向远方传输的时间,在工业互联网实施中依据业务延时敏感度进行分级,将需要低延时的数据控制和监测、联动等任务放置在边缘上而数据统计分析、长期存储以及后台等工作保存于云端,可削减80%以上的跨网距离^[4]。同时系统采用分层动态组网技术对运行状态的实时获取诸如信号、负载及损耗状况等因素自动地对网络拓扑结构进行优化去除一些闲置的、高延迟的中转节点,从而降低因链路上跳转而造成的延时,尤其针对厂区内部或者密闭机房的干扰场景增加相应的一些中继节点并合理布设间距以弱化因为遮挡或者干扰而导致的衰耗重传所造成的延迟,经实际测试合理地添加和布设使得因为衰耗带来的延迟降到10ms以内有效提升了链接稳定可靠性。

(二) 通信协议轻量化优化技术

对协议进行删减无用字段、针对场景精简处理,减少协议的解析时间,主要是在软件上的协议上减少无效延时,对于低功耗要求的小数据量的传感终端,在标准MQTT协议的基础上对其进行简化,删去报文内部的一些保留不用字段和一些无用冗余校验位,对于常规通信的报文格式做固定设置,将协议头部分压缩到原来一半的数据长度,降低了数据封装和解析过程中的运算量减少了传输的时间。工业上需要快速传输过程中采用TCP握手以及控制复杂过程较多,就抛弃其烦琐的握手流程,选用简单快捷的UDP轻量化型传输协议,附加一个简单的检验方式以保证必要的传输可靠性并去除了多余的过程和重确认流程,单次传输节省30~50ms^[5]。在ZigBee无线传感网络中原来的固定休眠机制非常容易造成响应延迟现象出现,对节点的唤醒机制进行改进,采取了适应性休眠调度方式依据数据传输频度自动改变工作时间和睡眠时间来解决原来固有的问题。同时使用一体化的协议网关适配器内置常用的Modbus-ZigBee等协议转码模块,实现多个异构系统之间的无缝对接,消除设备间由于不同协议所造成的转换时延。

(三) 智能路由与信道优化技术

在智慧电网物联网中的无线传感网络节点分布广且其信道状况复杂,常常存在链路抖动的现象。路由算法的选择决定了传输路径所需的时间。传统静态的路由算法所选择的路径一成不变不适应这种动态网络环境,对于高密度终端接入时,很容易出现数据传输路径拥堵和数据排队延时现象。在

工程实施当中普遍采用经过改进后的AODV自适应的路由算法,根据链路探测的方式实时检测每条链路的带宽、延迟、信号强度以及丢包情况,并据此筛选出损耗最小、传输延时最短的最优路径,远离那些拥堵严重的低质量链路以及存在严重干扰的区域。针对高密度终端同时接入的情况采用对信道进行分时复用的方式,在划分通信时隙的前提下为不同类别的终端设备提供相应的传输时间段来防止争夺通信信道所产生的冲突及延迟。对带通信道滤波器算法进行了优化处理,对环境电磁杂波信号和高频干扰实现主动过滤的目的提高信号的纯净度降低了数据包丢失和重新发送的概率。在某一智慧电网物联网传感网络系统优化实践中应用了上面提到的方法,将平均时间从优化前的180ms降到了65ms以下,同时数据包的丢失率始终控制在1%以下,优化成果显著。

(四) 数据预处理与压缩优化技术

通过在数据源头进行无用数据的裁剪,可有效降低信道传输压力,减轻因链路负载带来的时延。通过对端节点增加轻量级的嵌入式数据处理算法,对采集到的原始传感数据实时进行降噪、去重及筛选等操作,剔除异常突变和重复采集的数据,减少上传无用数据对带宽的占用。对于温度传感器、湿度、压强类缓变量传感数据采用差分压缩方法,仅对相邻值之间的差值进行计算与传送而不需要对近似值反复传送,最高可达1:4的压缩比,大大减少了传输的数据量。设置高优先级报文保障关键任务的及时性,将紧要的控制命令和故障告警设置为高等级报文优先占用信道资源,普通监测信息随后排队等待传送,最大限度地保证了关键业务低时延传送。多节点分布式网络下采用高精度的时钟同步算法校准各采集节点间的时间差异,在后台避免二次时间序列校准所产生的延迟,进一步提升了数据传输的实时性和规整化。

三、工程实践案例与效果分析

(一) 实践工程概况

此次实践选择一个中小型智能制造车间的物联网系统为研究目标,其中包括68个物联网节点设备,比如机械手臂、温湿度传感器和振动监测终端等,并且使用Wi-Fi/ZigBee混合通信的方式。优化前基于传统的云中心架构并未进行协议与路由等方面的优化设计。受车间内的电磁干扰及众多的设备接入等因素影响平均传输延迟可达210ms以上,峰值延迟可高达520ms甚至会出现指令卡顿和数据包丢失的情况,这严重地阻碍了机械臂之间精准联动的控制要求。这一次我们将融合架构优化、协议优化、路由优化以及数据处理四类

方式对其做全面的传输延迟方面的优化。

(二) 优化实施方案

通过部署边缘网关对网络架构进行改造,将部分设备控制、实时监控下沉到边缘侧,从而在本地执行数据处理和下发控制命令。改进协议栈,在终端传感节点采用了低开销 MQTT 传输协议,工业控制节点采用 UDP 传输协议,并对报文进行裁剪。改进 AODV 路由算法并载入网络中,根据动态需求规划出最短传输路径和时隙分配。差分压缩算法内置于终端传感器,选择有用传感器信息,并为这些数据的传送划分优先级。

(三) 实测结果与效果分析

优化完成以后,监测系统 72 小时通信情况,获取了系统数据延迟、丢包率和带宽使用率等数据,在系统运行指标优化前后的对比见图。系统的平均传输延时由原先的 0.214 s 降到 0.078 s,降幅达到 62.8%,最坏情况下传输延时控制在 150 ms 以下,传输过程中丢包率从 3.2% 下降至 0.8%;带宽使用率较之前增长了 27%。从系统的业务层面来看,各机械臂之间的联动没有出现卡顿,对于故障告警的指令下达也没有任何延迟,很好地满足了对工业生产实时控制的要求。而且通过本文所述的优化方案,并不需要大量硬件设备上的投入,在进行软件算法和结构上的改变即可以实现升级改造的成本是非常低的,适合一些中小型物联网系统的改建需求。但是在实际应用中 also 发现了一些问题:采用了多种优化算法联合使用的模式之后,边缘网关本身的算力消耗上升了 18%,在高并发的场景下,边缘网关本身存在轻微的计算能力波动现象,需要在后续的工作当中进行更加科学的算力分配。

四、物联网延迟优化技术应用痛点与优化展望

(一) 现存应用痛点

现有物联网延迟优化技术缺乏实践可行性,一方面不同领域的通信设备有不同的特性,工业、民用和医疗场景差异较大,通用的算法无法很好地满足各领域需求,定制化算法成本高;另一方面软硬件协同效率差,部分轻量级优化技术对设备要求过高,低档次老旧设备无法使用,硬件成本较高;第三方面优化均衡性弱,通常获得低时延的同时带来功耗的增加,这对于追求超低能耗运行的无线网络来说是一个问题;第四方面网络安全隐患大,数据压缩以及对协议进行精简后导致其安全性降低,在得到物联网设备间的低时延的同时也会导致在信息的传递过程中容易出现被篡改或泄漏现象的发生。

(二) 技术发展展望

通信延迟的优化将朝着智能化、轻量化、一体化的方向发展,通过人工智能方法来对路由算法和数据筛选进行优化,使得网络能够自我预测并动态调整以降低传输时延。提出基于低价格高算力的轻量级物联网芯片以适配各种各样的时延优化方案,降低硬件更改的代价。将 5G 技术和算力网络技术相融合以设计一套全域协作的算力架构来对算力和信道进行动态分配从而减少时延的产生。通过研制出适用于万物互联中的安全加密方案来解决其信息安全的问题并且这个方案是属于轻量级的并不会导致传输时延的增长。针对每一个行业设计一套通用的标准化解决方案使得工程实施过程被简化并降低了采用时延优化技术的难度。

结束语

该文将整个物联网通信传输流程进行分解,并针对每个环节的网络体系结构、通信协议、路由信道和数据处理造成的影响展开了详细分析,同时结合具体工程项目对各类能够减少物联网传输延迟的技术原理进行了深入探讨与研究,实际应用结果发现,在物联网网络架构中运用边缘计算改造方法、基于轻量化思想的通信协议优化措施,以及使用自适应的路由算法并对其数据采取一定的压缩预处理等方法,不仅能够有效降低物联网的数据信息在传输过程中的时延,而且对于提高其通信过程中数据传输的稳定性同样具有显著作用,可以适用于精度要求较高的工业型物联网当中。

【参考文献】

- [1]何航,汪少勇,杨源,李超,陶蕾,冯春.基于物联网技术的风电场网络通信设计优化策略[J].电力勘测设计,2026,(03):95-100.
- [2]朱宇明,罗伟,刘勋成.物联网技术赋能新能源汽车通信数据异常检测的创新实践[J].汽车维修技师,2026,(02):24-25.
- [3]谢伟斌.应急通信中的物联网设备数据采集与分析技术[J].通讯世界,2025,32(12):23-25.
- [4]刘少华.物联网通信场景下大数据安全传输的协议优化方法[J].国外电子测量技术,2025,44(12):148-153.
- [5]许安刚.基于无线通信技术的智能硬件物联网数据传输优化策略[J].中国宽带,2025,21(08):85-87.

作者简介:陈红(1983.03—),女,汉族,宁波镇海,本科,研究方向:物联网通信技术、嵌入式系统设计与数据采集与处理。