

工业物联网感知节点信号弱的成因分析与组网增强技术探讨

朱维武

中科野六生态科技（深圳）有限公司，广东省深圳市，518000；

摘要：工业物联网（Industrial Internet of Things, IIoT）的关键基础设施是各种工业设备，如传感器、执行器、控制器和执行器，这些设备中的信号传递与采集是智能工业控制系统的重要组成部分。然而，在实际应用中发现，部分 IIoT 感知节点存在信号弱、误码率高、通信不稳定等问题，难以满足工业控制系统对实时性、可靠性和安全性等方面的要求。本文通过分析感知节点信号弱的成因，探讨了数据融合、拓扑优化、自适应功率控制与信道分配、干扰抑制与频谱管理等关键技术 IIoT 感知节点中的应用方法与实践案例。

关键词：工业物联网；感知节点信号弱；成因分析；组网增强技术

DOI: 10.64216/3080-1508.25.09.072

引言

随着我国工业互联网的快速发展，各类工业设备接入数量快速增长，对数据传输与采集的实时性、可靠性和安全性提出了更高要求。目前，工业物联网感知节点主要部署于企业内部的生产车间，其功能主要包括数据采集、数据融合、网络传输、数据分析等，是保障工业生产安全与控制智能化的重要基础设施。然而，在实际应用中发现部分 IIoT 感知节点存在信号弱、误码率高、通信不稳定等问题，难以满足工业控制系统对实时性、可靠性和安全性等方面的要求。本文基于上述问题，探讨了 IIoT 感知节点信号弱的成因分析与组网增强技术，并进行了实践验证与案例分析。

1 工业物联网感知节点与信号特性分析

根据不同的应用场景和传输介质，工业物联网感知节点主要包括传感器、执行器（如电机、阀门、变频器等）、控制器（如 PLC 等）及其他辅助设备（如监控摄像头、门禁系统等）。传感器作为工业互联网感知节点的核心组成部分，负责对工业设备状态进行采集；执行器是工业物联网感知节点的重要组成部分，通过对执行器输出的信号进行处理和分析，实现执行器的控制功能；控制器是工业互联网感知节点的重要组成部分，通过对执行器输出的信号进行处理和分析，实现执行器控制功能；其他辅助设备则用于存储感知节点采集到的数据，并与其他设备进行数据融合^[1]。

2 工业物联网感知节点的基本结构与功能

工业物联网感知节点通常由传感节点、网关、基站等部件组成。传感节点通常由传感器、数据采集单元（Data Acquisition Unit, DAU）、网络传输单元（Netwo

rk Transport Unit, NTA）和控制器等组成，其基本结构与功能。传感器为传感节点提供数据输入，将数据传输给数据处理单元；网关主要接收来自传感器的数据并进行解析，然后将解析后的数据进行存储、过滤和转发等操作，最后将处理后的数据通过 NTA 发送给控制器；控制器负责对感知节点进行管理、控制和维护^[2]。

3 感知节点信号弱的成因分析

3.1 物理环境因素

3.1.1 屏蔽与阻挡（墙体、金属、设备）

由于工业现场的环境复杂，各类金属或障碍物对电磁波的影响，在有线网络中常常会被忽略。如感知节点被金属设备屏蔽或阻挡时，通信质量会明显下降。实际应用中，可以通过以下方式改善：（1）使用金属网、金属管、金属框等作为感知节点的屏蔽物，使其与无线信道隔离。（2）在某些情况下，需要对感知节点进行物理上的修改，如将感知节点从无屏蔽的墙面更换为有屏蔽的墙体等。（3）对使用已久且故障频发的感知节点进行物理改造，如更换金属外壳、加固外壳等。（4）在一些特定的工业现场，为了防止某些设备的电磁干扰影响无线网络信号传输，需对感知节点进行物理上的屏蔽。

3.1.2 多径效应与信号衰减

在工业现场环境中，由于受到环境的影响，无线信号可能会受到来自不同方向的多径效应的干扰。由于无线信号是一种非平稳随机信号，在传播过程中，容易受到各种因素的干扰而使其产生多径传播现象。在这种情况下，无线信号将会产生多次反射、散射和衍射等现象。这些现象将导致通信质量下降，甚至无法正常通信。此

外,工业现场的无线信道大多为非对称信道,比如无线电波在自由空间和存在障碍物的环境中传播时,其传播距离将会不同。因此,在工业现场环境中的无线网络通信质量也会受到一定程度的影响。这也是无线网络感知节点组网性能变差的原因之一^[3]。

3.2 网络部署与拓扑因素

3.2.1 节点布局不合理

有些设备(如无线开关、智能电表等)的布局较为凌乱,分布于生产现场的不同区域,且与生产设备、电缆等存在一定距离,因此在采集数据时,每个设备需要多次转换信号。另外,当感知节点布置在屋顶、围墙等非功能区域时,由于金属建筑等遮挡物对信号的阻碍作用,可能会导致信号覆盖范围过小或出现多径干扰。例如,某企业有一生产车间,现场各感知节点分散且分布不合理,且相邻设备之间的距离较远。由于各个节点所处的区域不同,因此在采集数据时往往需要多次转换信号。上述情况使得各节点间信号相互干扰、传输不畅,无法有效获取数据信息。

3.2.2 节点密度与距离

节点密度与距离对无线信号的影响很大,在某一区域内,无线网络节点的密度与距离有一个最优值。当节点密度为0.71个/平方米时,无线信号强度达到最大值。随着节点密度的增大,无线信号强度先增加后减小。因此,在实际部署中应结合环境与设备布局对无线网络的节点密度和距离进行优化。在实际应用中,一般以10~100个节点为宜,不同的应用场景有不同的最优值。若实际部署时节点数量过少或位置较偏,会导致信号覆盖不佳和信号衰减过大,无法满足网络覆盖要求^[4]。

3.3 硬件与能耗限制

3.3.1 天线设计与能耗约束

在工业现场环境中,由于存在各种不同的干扰因素,无线信号的传输质量会受到一定程度的影响。因此,在设计无线网络感知节点天线时,必须考虑到传感器网络通信对天线提出的要求。在工业现场环境中,由于无线网络感知节点多为电池供电,因此天线设计需要满足能量消耗最小化的目标。天线设计方面应尽量选择低损耗、低噪声、高增益的天线。在传感器网络通信中,为了获得更高的通信质量,通常选用无线传感器节点天线。但由于传感器节点大多安装在现场设备上,因此需要考虑到节点耗电、发热等问题。因此,在设计天线时,应选用低功耗的无线传感器节点天线。

3.3.2 设备故障与信号发射功率

在工业现场环境中,无线通信设备的故障率较高,其主要原因在于射频天线、射频模块和射频芯片等模块的设计存在缺陷或功能不完善。此外,现场环境中的电磁干扰也会影响无线网络的信号质量。针对此问题,可以采用以下方式改善:(1)增加无线节点数量,并在节点中增加冗余;(2)升级设备,在现场环境中选用可靠性较高的设备;(3)使用滤波功能的射频模块,防止外界干扰。

3.4 无线干扰与共信道干扰

在无线网络通信过程中,不同频率的无线信号容易发生相互干扰。无线干扰包括同频干扰和邻频干扰。对于同频干扰,一般采取的解决方法是采用频谱隔离技术;对于邻频干扰,一般采取的解决方法是在节点之间采用扩频技术进行通信。在无线网络通信中,一些节点会使用一些其他网络设备,比如 ZigBee、蓝牙等。这些设备之间可能会共用信道资源,相互干扰。当多个节点同时使用这些共用信道时,由于信号的相互影响和叠加,将会导致网络通信质量下降。解决这一问题的方法是在每个节点上加装同频隔离器或采用信道分配技术来限制占用信道的设备数量,从而保证网络通信质量。

3.5 软件与协议层面因素

在物联网技术发展的初期,许多工业现场的无线通信都是采用基于串行通信的方式,即采用 RS232、RS485 或 RJ45 等通信接口来进行数据的传输。这种通信方式存在着设备成本高、安装调试复杂等问题,这在一定程度上制约了工业物联网的发展。随着工业物联网技术的不断成熟,更多的感知节点都采用基于 TCP/IP 协议栈的方式来进行数据通信。由于 TCP/IP 协议栈中没有专门针对工业现场无线通信进行优化,因此在工业现场中,无线通信的可靠性、稳定性和实时性将会受到一定程度上的影响。这也是无线网络感知节点信号弱的一个原因之一。

4 工业物联网组网增强技术探讨

4.1 节点部署与网络拓扑优化方法

工业物联网感知节点部署与网络拓扑优化方法,传统的基于信号传播距离、信道容量等参数的组网方法并不适用于工业物联网。在传统的部署方法中,工业物联网感知节点应根据所处位置的实际情况,在信号最强区域进行部署。而由于工业现场环境复杂、信号不佳、干

扰严重等原因,使得感知节点部署在信号较差区域存在困难,此时可以通过对网络拓扑结构的优化来提高网络的鲁棒性。拓扑优化方法可分为两种:一种是针对有信号覆盖区域的节点进行拓扑优化,另一种是针对无信号覆盖区域的节点进行拓扑优化。两种方法可根据实际情况和需要进行选择。

4.2 多跳与中继通信技术

通过提高通信频带,利用多跳与中继通信技术增强感知节点的信号强度。在工业物联网组网中,传感节点一般部署在较高的频段,且往往采用星状、网状等拓扑结构,这样可以提高感知节点的信道容量,进而提高网络传输速率。同时,传感器节点部署在较高频段上时,由于工作在无线电干扰较小的频段上,因此在接收端信号强度相对较弱时可以利用多跳和中继通信技术提升感知节点的信号强度。然而多跳和中继通信技术也存在缺陷,如传输距离短、传输速率低、可靠性差等问题。因此,需要在工程中采取适当的措施对感知节点进行优化布置。

4.3 自适应功率控制与信道分配策略

为提高物联网感知节点在无线信道上的吞吐量,应在充分考虑感知节点能量、信道带宽、传输速率等参数的前提下,设计和制定功率控制和信道分配策略。采用自适应功率控制与信道分配策略,对无线网络进行功率控制和信道分配,以提高网络性能。功率控制是指根据无线信道的信道质量、网络负载等因素,对传输功率进行控制。信道分配是指根据无线信道的容量和无线资源的利用率等因素,对感知节点进行选择、配置。

4.4 干扰抑制与频谱管理技术

由于感知节点之间的信道接入将导致感知节点之间的干扰,因此需要对感知节点的信道接入进行干扰抑制,并对已接入信道进行频谱管理。在网络规划阶段,需要进行频谱资源评估,预测未使用的频段和空闲频段。在感知节点间,可采用干扰抑制技术、信号检测技术、频谱管理技术等提高频谱利用率,避免干扰。在无线通信网络中,采用基于资源分配的功率控制方式是一种非常有效的频谱管理方法,但这种方法将导致感知节点间的干扰。在不降低通信质量的前提下,可以通过智能天线和虚拟信道等技术来提高网络通信质量。此外,还可

以利用认知无线电技术来解决频谱资源不足问题^[5]。

4.5 网络冗余与故障自愈机制

网络冗余是指在网络中的所有节点都具备冗余的能力。网络冗余技术分为设备冗余和链路冗余。设备冗余是指在通信节点中增加硬件或软件,实现感知节点之间的信息交互,使感知节点的硬件或软件出现故障时,仍能通过通信链路传递数据。链路冗余是指在通信节点中增加网络互联设备,通过不同互联设备间的相互通信,实现感知节点之间的信息交互。工业物联网中感知节点数量众多,导致网络链路资源紧张、传输容量受限。因此,工业物联网的网络链路应该采用冗余机制。故障自愈是指当网络中某个或某些节点出现故障时,通过各种检测手段判断出故障节点并自动修复该节点。

5 结语

从技术角度来看,工业物联网感知节点信号弱的原因主要有:环境因素、无线干扰与共信道干扰、网络冗余与故障自愈机制、新型天线与智能硬件应用。从行业角度来看,工业物联网感知节点信号弱的原因主要有:物联网标准不统一、物联网通信协议不完善、感知节点规模小和数量多。本文从工业物联网感知节点信号弱的成因分析出发,提出了一些增强感知节点信号的建议。在工程实施方面,为满足工业物联网的实际需求,应该选择可靠性高、通信能力强的网络设备,同时对网络进行优化部署和组网。此外,还需针对感知节点信号弱的原因进行技术改进,以提高工业互联网感知节点的信号强度。

参考文献

- [1] 赵晶,殷振胜. 锂电池隔膜产线萃取设备自动控制系统设计[J/OL]. 电池工业, 1-8[2025-09-20].
- [2] 许德龙,潘森杉. 面向工业物联网的不可链接消息认证密钥协商协议[J]. 无线通信技术, 2025, 34 (03): 59-62.
- [3] 钟玉桂. 基于工业物联网的智能制造流程创新[J]. 模具制造, 2025, 25 (09): 180-182+185.
- [4] 吴毅,冯涛,柳春岩,等. 基于工业物联网的分层多设备认证密钥协商协议[J]. 网络与信息安全学报, 2025, 11 (04): 86-106.
- [5] 翁晨雷. 物联网技术在工业自动化中的应用研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (08): 30-32.