

基于数字孪生的 5G 物联网通信系统集成技术研究

李建梁

(中国联合网络通信有限公司温州市分公司, 浙江 温州 325000)

摘要 5G 与物联网技术的深度融合推动了通信系统向高并发、低时延与泛在连接方向发展, 而传统通信架构在设备异构、调度协同与运行透明度等方面存在明显制约。数字孪生技术依托对物理通信节点的虚拟建模与实时映射机制, 为通信系统的集成优化提供了新路径。在 5G 物联网体系中引入数字孪生机制, 可构建“设备—网络—平台”间的联动模型, 从而在智能调度、信息追踪与安全管理等多个维度实现协同增强。本文从数字孪生的核心建模机制出发, 分析其在通信场景中的协同控制逻辑, 并围绕 5G 物联网通信系统的虚实映射机制、节点建模策略、多源调度协同与安全防护体系展开路径探讨, 以期对 5G 通信系统的智能演化与平台级融合提供理论参考。

关键词 数字孪生; 5G 物联网; 通信系统集成; 虚实映射; 协同控制

中图分类号: TP393

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.009

0 引言

传统集成模式在面对高密度终端接入与动态资源调度时效率受限, 难以支撑广域通信环境下的智能化运行需求。数字孪生作为构建物理世界与虚拟系统交互通道的重要技术形态, 在制造、能源等领域已展现出显著的运行感知与实时控制优势。将其嵌入通信系统集成路径, 有助于在网络状态建模、资源调度优化与系统运行透明化等方面形成协同机制, 不仅限于架构层级的映射, 更在于运行过程的精细联动与安全防护逻辑的延展。

1 数字孪生技术的核心机制与应用延展

数字孪生构建虚实交互体系, 适用于对通信设备、网络结构与环境状态的动态建模与同步调控。在 5G 物联网集成背景下, 其建模流程往往包括三步: 物理实体识别、状态参数采集与虚拟模型映射。通信设备的状态采集常依托功率模块、电磁干扰感知模块与信道质量分析单元进行参数提取, 核心指标包括发射功率、电压稳定度、链路误码率 (BER)、接收信号强度 (RSSI) 与信噪比 (SNR) 等。在采集节点完成一次性硬件接入配置后, 可借助边缘智能芯片完成高频采样任务, 并利用压缩感知算法对低价值冗余数据进行降维处理, 保证传输效率。

虚拟模型构建阶段, 通信系统倾向采用面向指标

约束的参数驱动建模路径。系统以有限状态机 (FSM) 或动态贝叶斯网络 (DBN) 为基础构建节点行为模型, 结合高频数据流生成动态图结构, 形成节点—链路—区域的三级状态同步结构。在网络侧部署孪生体时, 常配合物理网络拓扑以拓展式部署方式展开, 即以关键基站、路由节点与调度平台为锚点生成多层次映射, 模型之间通过共享状态映射表与压缩指令集建立关联关系, 实现通信场景下多节点协同更新。从建设逻辑看, 数字孪生嵌入 5G 物联网系统一般包含三类基础内容。一是对象接入, 将摄像机、传感器、PLC 控制器、门禁终端、表计设备、AGV、环境监测单元等现场对象接入平台, 并完成设备身份标识、位置绑定与运行参数归集。二是状态映射, 将设备在线状态、告警信息、网络质量、业务执行进度等数据与场景模型对应起来, 形成车间、园区、楼宇、仓库或站点的可视化运行界面; 三是联动响应, 当系统识别到设备离线、温湿度异常、人员越界、能耗偏高或链路不稳等情况时, 可自动触发告警推送、视频联动、工单派发或远程控制, 使数字孪生不只是展示工具, 还成为业务管理入口。

2 数字孪生赋能通信系统的协同优势

5G 通信作为目前通信领域最热门的通信技术, 已逐步改善了人们的生活, 深刻影响着社会经济的变革^[1]。在 5G 物联网通信集成系统中, 节点结构高度异

作者简介: 李建梁 (1976-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 信息系统集成。

构,业务链路响应时间敏感,常规按需调度策略已难以满足海量接入终端间的稳定协调。而数字孪生提供了跨节点、跨网络的状态统一建模与集中调度能力,为集成过程注入了“状态同步—路径预测—参数修正”的实时控制链条。以通信路径调度为例,孪生系统在建模时将网络状态映射为图论结构,每个通信节点为图中顶点,链路为边,节点状态如延迟、带宽、丢包率被映射为边权重。

在资源分配层面,孪生模型可将设备连接密度、任务负载情况与时间窗口约束纳入调度输入变量,生成分布式资源矩阵。系统通过边缘控制器对该矩阵进行子区段分解,结合接入请求预测趋势进行资源预配置。在安全策略方面,孪生平台支持场景级攻击模拟与应急机制嵌入,常用于构建DDoS攻击、假信号注入、干扰源重叠等场景下的通信安全模型。系统在虚拟环境中依托多状态对比分析法与异常行为阈值动态调整机制,对链路变化速率、异常行为频次与误报率进行建模评估。安全策略引擎将判定结果回写至物理平台,触发频率管控、功率调整或链路隔离等操作,形成自适应闭环防护。

3 基于数字孪生的5G物联网通信系统集成技术路径

3.1 虚实同步的数据映射机制

数据映射机制是数字孪生嵌入通信系统集成的核心基础之一,其关键在于构建物理实体与虚拟模型之间的数据通路,并维持二者在状态维度上的高频一致性。通信系统中涉及的实体单元包括基站、路由器、传感终端与边缘计算节点,这些组件在运行过程中会持续输出功率、频段、速率、丢包率与链路稳定性等多维运行参数。系统在部署初期通常借助嵌入式采集模块以构建物理层参数通道,将上述指标转化为标准状态向量,并在本地嵌套状态分级结构,以支持多场景、多周期的数据截取与筛选。虚拟模型构建过程不直接依赖图像建模,而是以指标体系为底层结构,结合通信协议层级进行状态映射。此过程中较多采用滑动时间窗口与动态属性标签体系,适于表达节点状态的波动区间、路径压力变化趋势与干扰响应滞后特征。数据上传阶段则依托边缘网关中的本地判别算法,将运行状态初步压缩后编码为指令序列,通过MQTT或低开销UDP协议传输至控制中枢。

在高频状态变动场景中,系统倾向于部署基于特征重叠度的状态判别机制。每一个孪生体都被绑定唯

一状态哈希索引,当物理设备运行参数出现超出预测区间的突变,平台将自动调用历史状态模板,执行快速重校与动态补充过程。这一操作往往嵌套在状态演化图谱识别机制中,通过识别状态路径中断点与偏移率,重构映射路径并向主控制平台回送校正结果。状态重构完成后,将同步更新虚拟模型的运算逻辑与边界判断机制,确保后续反馈与控制指令基于最新状态结构生成。

3.2 通信节点的动态建模与状态反馈

通信节点在运行过程需构建具备响应性、预测性与适应性的数字模型。该建模过程以节点物理结构参数为基础,结合实际运行数据展开迭代训练,适宜采用状态驱动建模策略而非静态属性封装方式^[2]。数据维度通常覆盖节点的通信时延、信号强度、接入频次、缓存使用率与瞬时带宽负荷等指标,在边缘侧同步建立状态参数集与行为映射表,便于节点动态特征归档。建模任务由本地智能单元触发,以状态标识的时间序列特征为输入,在模型中嵌入归一化模块与滑窗预测结构,构建多层状态抽象图。模型训练过程中往往借助自回归算法(AR)与轻量神经网络(GRU-Lite),实现对节点状态变化趋势的拟合与预测区间构建。状态标签被实时绑定至孪生节点索引,平台端结合其波动幅度与稳定性评分,对各通信单元生成分类权重,用于后续调度优先级分配与路径选择参考。

状态反馈机制同步展开,在状态偏移率超过预设浮动门限时,由孪生模型自动触发反馈通道,借助边缘节点中的低功耗通信模组发送高频数据摘要与状态变异指令包^[3]。控制中枢接收到该信息后将结合历史稳定运行段进行相似性比对,并调取行为模式库进行交叉验证,识别该节点是否处于临界负载、干扰波动或短时退化状态。识别完成后,系统生成节点调控建议,如限载运行、路径旁路或临时延迟处理机制,并构建控制建议编号绑定于反馈指令链中。节点完成反馈响应后,本地孪生模型状态需根据回收数据包信息进行补正,并同步更新状态预测路径与参数浮动范围,确保下一周期的状态跟踪具有延展性与适配性。反馈链路并非单一数据回传结构,而是融合实时识别、分类建议与局部调度接口的结构性路径,可嵌入多层级资源监测系统中,为构建高密度接入环境下的通信系统状态闭环管控机制提供必要支撑。通过云边协同、轻量级持续学习,实现业务实时更新、优化计算等需求,根据边缘AI模型监测设备状态并部署模型^[4]。

3.3 多源协同的集成控制策略

在 5G 物联网通信系统中,集成控制策略需适应跨设备、跨协议与跨平台的协同场景。通信网络内部节点状态变化速度快、结构变化频繁,若仅依靠中心式静态调度将导致响应迟滞与资源错配。为构建具备实时响应能力与柔性调度特征的控制机制,系统通常借助数字孪生平台构建多源信息融合通道,形成状态感知、策略生成与控制执行的闭环控制链。策略协同机制以多源数据聚合为起点,边缘设备端实时上传链路状态、节点负载与区域网络热度等信息,经由边缘计算单元压缩编码后进入孪生平台策略融合层。以智慧园区为例,当夜间某区域出现人员异常进入、照明能耗异常升高与设备间门禁开启等复合情况时,平台可自动汇聚门禁记录、视频画面、照明运行参数与现场环境数据,在孪生界面中同步标记异常区域,并触发安防告警、视频联动和人员通知,若在工业场景中发现某生产单元温度升高、振动异常和网络时延抖动同时出现,平台则可将此判断为潜在设备风险,优先推送巡检任务,必要时联动控制系统调整设备运行状态。

在策略生成层,系统引入基于自适应权重分配机制的策略融合算法,按任务紧急度、历史成功率与链路稳定性等因素计算节点可调度值。策略引擎以此为基础,在平台内部构建策略片段集并结合状态阈值触发逻辑排序输出。当前区域内某节点出现负载过高与频段冲突叠加现象时,策略引擎将优先调用“切换频段+临时路径迁移+降载运行”策略组合,打包为轻量控制指令包下发至节点本体。控制响应由执行层承担,各通信单元基于指令包中附带的状态标签与策略编号快速查找本地执行映射表,完成参数调整、链路重构或节点休眠等控制动作。执行过程配合孪生模型的状态反馈模块进行回传,平台据此记录策略执行结果、响应时间与系统抖动变化值,进一步用于策略评分与模型修正^[5]。

3.4 面向安全性的孪生防护体系设计

通信系统在集成运行过程中易暴露出多类安全脆弱点,尤其是在多终端异构接入与边缘节点快速切换场景下,传统基于静态防火墙与加密协议的保护方式已难以应对动态攻击路径与深层入侵行为。数字孪生平台为此类风险防控构建了模拟预警、行为识别与策略联动的虚拟安全防护体系,能够在系统未遭受实质破坏前完成威胁建模与应急策略生成。该体系的基础为状态级安全感知结构,平台借助分布式采集单元在

链路层、传输层与控制层同步布设状态感知点,实时捕捉异常信道扰动、设备接入突变与数据流量偏移信号。每个感知点对应不同维度的行为参数,如链路时延异常梯度、接入指令频次剧增或信道干扰功率波动,通过状态匹配算法生成异常概率标签。

在策略生成阶段,系统以行为模拟引擎为核心构建攻击路径推演模块,结合既往攻击样本库与当前状态特征,构造可能发生的攻击链路径,常见于 DDoS 流量淹没、伪基站劫持、信号欺骗干扰等场景模拟^[6]。模拟引擎采用状态路径重演机制,对节点响应时延、链路阻塞级别与路由节点抖动幅度进行虚拟演练,生成一组应急策略组合方案。策略模块以策略片段为单位构建响应指令队列,预设包括频段切换、流量削减、链路迁移与访问临时冻结等操作手段,由安全执行模块打包为指令集分发至边缘设备。

4 结束语

在 5G 物联网架构持续深化与系统异构性加剧背景下,通信系统集成正面临结构弹性、状态同步与策略响应等多重挑战。数字孪生技术依托其虚实映射、行为预测与模型驱动能力,正在重塑通信系统的运行逻辑与控制结构。其赋能路径不仅限于建模精度与数据反馈,更在于激发通信节点间的协同潜力与平台间的调度韧性。构建虚拟运行空间与物理状态通道之间的高耦合联动机制,有助于增强系统稳定性、提升响应闭环速度与拓展集成边界,为复杂网络体系在泛在感知环境下的智能运行提供结构支撑与技术通路。

参考文献:

- [1] 王健,杨闯,闫宁宁.面向 B5G 和 6G 通信的数字孪生信道研究[J].电波科学学报,2021,36(03):340-348,385.
- [2] 张创基,陈运胜,孙令真.5G 专网数字孪生技术及在网络管理中的应用[J].智能计算机与应用,2022,12(12):88-92.
- [3] 李文正.数字孪生流域系统架构及关键技术研究[J].中国水利,2022(09):25-29.
- [4] 蔡畅,王军生,刘佳伟.基于 5G 现场网协同的数字孪生架构及通信技术[J].冶金自动化,2023,47(01):35-42.
- [5] 孙滔,周铨,段晓东,等.数字孪生网络(DIN):概念、架构及关键技术[J].自动化学报,2021,47(03):569-582.
- [6] 吴维农,莫婷,赵妍妍,等.5G 电力虚拟专网和数字孪生相结合的系统架构和构建[J].半导体光电,2023,44(05):803-810.