

工业互联网园区的5G定制化专网

严苗苗 史锦斌

天元瑞信通信科技股份有限公司 陕西 西安 710065

摘要: 针对工业互联网园区多维网络需求,研究了5G定制化专网的组网架构演进与关键技术。提出基于独立非公共网络(SNPN)的三云分离架构方案,将5G网络解耦为虚拟化控制云、接入云与转发云,实现控制面与用户面灵活分离及边缘计算下沉。深入分析了网络切片感知与保护机制、软件定义空口(SDAI)定制化能力、5G与时间敏感网络(TSN)融合、用户中心虚拟小小区协作传输、毫米波与MassiveMIMO增强覆盖、5GLAN组通信及融合定位等关键技术。结果表明,5G定制化专网通过架构软化、空口定制与边缘智能协同,能有效满足工业园区多类型业务接入与数据不出园区安全需求,为数字化转型提供网络基础设施支撑。

关键词: 工业互联网园区; 5G定制化专网; SNPN; 三云架构; SDAI; 网络

0 引言

5G以“信息随心至,万物触手及”为愿景,定义了增强移动宽带(eMBB)、海量机器类通信(mMTC)和超可靠低时延通信(uRLLC)三大场景,使移动通信从服务个人延伸至工业制造等垂直行业^[1]。5G不仅是空口速率提升,更是端到端架构革新——以SDN/NFV实现控制转发分离与网元虚拟化,以网络切片实现多业务逻辑隔离,以边缘计算实现数据本地处理与超低时延响应。

工业互联网园区对网络提出无线化覆盖、多类型业务并发接入、数据不出园区安全隔离、异构终端互通、精准定位、自主运营管理等8项关键需求。传统园区有线网络难以满足移动设备无线连接及差异化性能需求,5G定制化专网提供了全新解决方案。本文系统研究5G定制化专网的组网架构演进与关键技术,为园区5G专网建设提供参考。

1 工业互联网园区的网络需求分析

园区网络建设聚焦8项核心需求:(1)无线化——AGV等移动设备需室内外无线连续覆盖;(2)多类型业务接入——4K/8K视频上行>25Mbps、运动控制时延<5ms/可靠性99.9999%、海量传感器连接密度>10⁶/km²,需支持TSN纳秒级抖动;(3)安全——数据不出园区为基本要求;(4)异构终端管理——兼容3GPP、Wi-Fi、以太网、工业总线等多协议;(5)园区内外交互业务;(6)5GLAN组通信——电力FA毫秒级组播;(7)融合定位;(8)自主运营管理。

2 5G定制化专网的组网架构演进

2.1 SA独立组网与SNPN方案

SA架构采用全新5GC和NR,完整支持三大场景,为网络切片、边缘计算等定制化能力提供基础支撑。园区

推荐采用SNPN方案,与公网物理隔离,企业自主运营,网络组成包括5G终端、基站、MEC、轻量化核心网与网络管理平台,数据通过专网UPF本地终结,通过N3IWF实现与公网按需互通^[2]。

2.2 三云分离架构

5G的本质是网络架构变革。三云架构将5G网络解耦为虚拟化控制云(流控、移动性管理、MANO编排、网络能力开放)、接入云(S-RAN,含MEC、UDN、多连接、D2D/V2V)和转发云(5G交换机、业务使能器)三个平面^[3]。在园区场景中,控制云使企业自主运营控制面功能并支持4G/5G双连接保障业务连续性;接入云通过MEC下沉满足超低时延和数据不出园区需求;转发云与SDN结合实现灵活路由。三层架构有效性已得到业界验证。

2.3 轻量化核心网与开放平台

核心网采用轻量化设计——裁剪合设网元、去除非必要功能。UPF定制化增强支持工业以太网协议转换、确定性网络保障与MEC一体化部署。相关研究指出,5G架构演进核心在于灵活功能切分与基站虚拟化,传统基站被拆分为云化层与远程L1,实现控制面与用户面物理分离与远程部署。在开放网络生态驱动下,Open5G平台推进GPP替代ASIC的软硬件解耦,使园区专网可基于开放软件栈灵活构建与快速迭代。

3 5G定制化专网的关键技术

3.1 网络切片技术

网络切片基于SDN/NFV创建逻辑独立的虚拟网络,在园区可划分为生产网(硬隔离uRLLC)、企业网(eMBB)和公网三个逻辑域。核心网实现计算/存储/网络三层资源隔离;承载网采用层次化切片——硬切片

基于L1TDM隔离 (FlexE) 满足uRLLC需求, 软切片基于L2/L3VPN满足eMBB需求。关键技术要求包括: 切片感知——单切片资源不超限额, 公共资源可跨切片共享; 切片保护——拥塞隔离使切片间互不影响; 切片管理——提供切片级网络管理即服务。端到端切片可行性已在业界测试床中得到验证。通过切片粒度化的资源编排与策略控制, 可在同一物理网络上同时保障工业控制业务的超低时延抖动容忍度和视频监控业务的大带宽稳定传输, 为园区多业务差异化SLA提供可承诺的确定性保障。

3.2 软件定义空口与定制化波形

SDAI将物理层模块化为可配置组合, MAC控制器根据业务类型和CSI动态配置参数, 实现空口"量体裁衣"。在园区场景中, SDAI定制化体现在: 灵活帧结构支持动态DL/UL配置与可变TTI长度 (uRLLC短TTI实现1ms空口时延, mMTC长TTI降低功耗); 灵活多址统一框架支持OMA与NOMA (SCMA、MUSA、PDMA等) 按场景配置; 灵活波形支持OFDM、F-OFDM、FBMC等多波形可配置聚合^[4]; 灵活双工支持TDD/FDD/全双工融合与动态配比。这种空口参数按需组合能力使园区专网能适配从毫秒级运动控制到海量低功耗传感器采集的极端异构需求, 同时通过波形优化降低终端基带处理复杂度, 为工业模组成本控制留出设计余量。

3.3 5G与TSN融合技术

5GRel-16引入5G-TSN融合架构, 5G系统作为逻辑TSN桥, 通过NW-TT和DS-TT翻译互通, 支持冗余传输与时延抖动补偿。5G承载网需提供高精度时间同步 (TDD优于3us, 协同需65ns级别), 承载节点处理时延需降至10us以内。融合方案将5G无线接入的灵活性与TSN有线网络的确性桥接能力有机结合, 使园区工业以太网设备能够无缝接入5G网络, 同时保持时间触发流量的门控调度特性, 从而在AGV协同、多轴同步等场景中实现有线级抖动性能, 降低园区有线改无线的迁移门槛。

3.4 用户中心虚拟小小区与协作传输

近年来提出的用户中心虚拟小小区概念, 在宏小区内分布式部署天线, 靠近用户的一组天线动态组成虚拟小小区, 将传统切换转化为天线选择问题, 降低移动性管理复杂度。虚拟小小区内采用STBC分集与发射频域均衡实现协作传输; 多用户MIMO采用MMSE-SVD方案——基站MMSE发射滤波抑制用户间干扰, 终端特征模态接收消除天线间干扰, 并做注水功率分配。TDD信道互易性使基站可利用上行CSI完成发射均衡, 降低工业终端复杂度。该架构尤其适用于园区密集移动场景 (如

多台AGV同时运行), 通过动态天线分组和协作预编码, 可有效消除小区边缘干扰, 提升频谱效率, 同时减少频繁切换带来的信令开销和时延抖动^[5]。

3.5 毫米波与MassiveMIMO增强覆盖

毫米波不利传播特性反而允许密集频率复用, 宽连续带宽可实现高数据率和低时延。宏辅助毫米波可行, 独立部署更具挑战——异构宏/毫米波架构通过宏覆盖毫米波盲点。毫米波混合波束成形是功耗与硬件复杂度最优折衷——RF模拟波束成形+基带数字预编码, 总天线 $m \times n$, 大幅降低RF链路数量。毫米波子系统采用模块化封装 (Active Antennain Package), 推动GaAs向硅基工艺迁移。Sub-6GHz Massive MIMO采用数字波束成形, CMOS射频可实现有源天线紧凑形态, 3D全维度覆盖实现用户专属波束成形。毫米波与Sub-6GHz协同构成园区双频覆盖策略的理论基础, 低频层保障广域连续覆盖和基础移动性, 毫米波层在热区提供容量爆发和极低时延空口, 两者通过智能负载均衡和波束管理实现园区室内外全场景无缝体验。

3.6 5GLAN组通信与融合定位

5GLAN支持静态/动态组管理、组播/广播、地理区域限制, 为电力FA毫秒级组播提供支撑。5G+BLE融合定位精度约3米, MassiveMIMO窄波束结合TDOA可实现亚米级定位精度。5GLAN的组播能力还能有效减少工业控制中多设备同步指令的重复单播开销, 提升空口效率; 融合定位则利用5G大带宽和MassiveMIMO角度分辨优势, 辅助BLE/UWB等室内定位技术, 在仓储物流和人员安全管理场景中实现高精度三维位置感知, 并与5G网络资源调度联动, 为动态业务移动性管理提供位置驱动的依据。

3.7 安全增强技术

5G专网四域安全增强: 接入域5GAKA+EAP-AKA'双向认证、网络域NFV可信计算、业务域IPSec/SSLVPN加密隧道、管理域防火墙隔离。极高安全场景采用高级密码系统替换算法、安全芯片可信根、端到端全报文加密。开放网络生态支持企业部署自研安全VNF或灰盒联合定制。此外, 专网可结合用户面下沉与本地UPF分流, 确保敏感生产数据物理不出园区, 并结合零信任架构对每类业务流进行细粒度访问控制, 同时利用网络切片的逻辑隔离特性实现安全域分层, 即使某一切片遭受攻击也不会影响其他切片业务的正常运行, 构建端到端纵深防御体系。

4 5G专网的部署模式与方案比较

4种主流部署方案各有优劣: 方案一 (端到端切片虚

拟专网,全共享,安全隔离低,成本最低)适合非核心试点,资源复用但服务质量难保证;方案二(RAN+控制面共享仅部署UPF,数据不出园区可保证,存在N4绑定问题)需处理绑定,施工快但运维复杂度有所增加;方案三(RAN共享新建核心网,无N4绑定,成本适中)规避绑定瓶颈,性价比均衡,为多数企业优选;方案四(物理隔离独立专网,安全最高,成本最高)全套独立部署,满足能源等高安全合规场景。推荐SNPN独立专网+租用独占频段方案,室外低频RRU+热点64TR AAU+室内pRRU,双频协同保障覆盖与容量,同时企业可自主运维,数据全链路不出园区,且为5G-A演进预留平滑升级接口。

5 5G 定制化专网的应用场景

工业生产网为最核心场景,涵盖AGV调度、运动控制、机器视觉质检等,采用硬隔离uRLLC切片,5G-TSN提供确定性传输,SDAI短TTI实现1ms空口时延,虚拟小小区为AGV提供无缝覆盖,同时通过边缘计算实现本地实时分析与闭环控制,有力支撑产线柔性调整与多品种混流生产,显著降低停机调整成本。企业信息网提供eMBB切片支撑办公业务,与生产网逻辑隔离,支持高清视频会议、云端协同设计与大文件高速传输,确保办公数据与生产数据物理分流、互不干扰,提升园区运营协同效率。公共服务网通过专用切片承载安防监控与环境监测,5G+BLE定位提供位置服务,结合AI视频智能分析可对异常闯入和安全隐患主动预警,定位信息赋能物资追踪与人员紧急求助,实现园区全域可视化安全管控与快速应急响应。

6 面临的挑战与展望

频谱资源瓶颈——行业无专属5G频段,依赖运营商租用或NR-U,毫米波为潜在高容量补充但需与Sub-6GHz协同。行业终端瓶颈——5G工业终端以CPE为主,模组定制化能力不足,SDAI灵活波形设计为终端低成本化提

供路径。测试验证标准化——OTA测试与信道建模验证体系仍在标准化探索阶段,工业场景毫米波信道实测数据匮乏。

未来方向:网络能力开放构建多层次生态;核心网向独立CaaS容器平台演进;AI实现网络自优化与故障自愈;移动基站概念引入园区形成移动微网络;5G-A/6G技术演进进一步提升关键指标。

结束语

5G定制化专网以SA架构、三云分离设计、SNPN独立组网、轻量化核心网与开放平台、网络切片感知与保护、SDAI软件定义空口、5G-TSN融合、虚拟小小区协作传输、毫米波与MassiveMIMO增强覆盖、5GLAN组通信、融合定位与安全增强等关键能力,为工业园区提供了满足多类型业务接入、数据不出园区、自主运营管理的综合方案。差异化切片实现业务隔离与性能保障统一,SDAI使空口按需定制,虚拟小小区为密集移动场景提供新范式,毫米波与MIMO实现覆盖与容量互补。频谱、终端和测试标准化仍是规模化瓶颈,随行业频段推进、模组丰富化、开放生态构建和5G-A演进,5G定制化专网将在园区数字化转型中发挥更关键的基础设施作用。

参考文献

- [1]许驰.5GLAN赋能工业无线网络:架构、关键技术及未来方向[J].信息与控制,2026,55(01):21-37.
- [2]楚俊生,王涵.工业5G独立专网为新型工业网络构建专属数字底座[J].信息通信技术与政策,2025,24(01):162-167.
- [3]赵际洲.5G双域专网定制化解决方案与工业园区应用[J].移动通信,2022,46(18):32-37.
- [4]朱瑾瑜.5G与TSN融合的工业园区定制专网关键技术[J].中兴通讯技术,2023,29(02):53-59.
- [5]罗凤娅.5G定制专网典型部署模式及工业园区标准化应用分析[J].邮电设计技术,2025,17(03):41-46.