



面向工业场景的 5G 专网解决方案研究

董石磊, 赵婧博

(中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209)

摘要: 5G 网络具有大带宽、广覆盖、低时延等优点, 将人与人之间的通信, 拓展到人与物、物与物之间的通信, 开启万物互联时代, 但由于网络规划设计及安全、管理等原因, 现有 5G 2C 网络不适用于行业企业。因此, 各大运营商正倾力打造 5G 2B 专网。特别地, 将 5G 赋能传统工业, 可以促进传统行业的智慧化、数字化以及网络化, 有效提升生产效率以及生产质量。基于此, 在研究 5G 关键技术的基础上, 结合了国内某工厂实际工业场景, 探索 5G 专网与传统工业制造领域深度融合的解决方案, 从而实现工厂智慧化改造。

关键词: 5G 专网; 行业应用; 智慧工厂

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021250

Research on 5G private networking schemes for industry

DONG Shilei, ZHAO Jingbo

Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China

Abstract: 5G network with large bandwidth, and the advantages of wide coverage, low latency, the interpersonal communication, extended to the communication between the people and things, things and objects, open everything connected age, but as a result of network planning and design and safety, management and other reasons, the existing 5G network does not apply to 2C industry enterprises. Therefore, the major operators are striving to build 5G 2B private network. In particular, enabling 5G to traditional industries can promote the intelligence, digitization and networking of traditional industries, and effectively improve production efficiency and quality. Based on the research of 5G key technology, combined with the actual industrial scene of a domestic factory, the solution of deep integration of 5G private network and traditional industrial manufacturing field was explored, so as to realize the intelligent transformation of the factory.

Key words: 5G private networking, industry application, smart factory

1 引言

相比于 4G, 5G 在速率、时延、可靠性、安全性和连接数等关键性能指标方面均有很大程度

的提升, 能够更好地面向特定行业实现专网定制, 满足网络速率、时延、安全隔离等指标的差异化需求, 从而驱动垂直行业的快速数字化转型。但我国现阶段的大部分企业仍处于网络化、数字化、

收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-11-11

通信作者: 董石磊, dongshl@chinatelecom.cn



智能化发展水平较低的阶段,工厂所用外网很大程度上依赖于公网,无法具体到个性化应用场景^[1]。另外,行业用户和公网用户对网络的需求差异明显,公网的网络规划难以服务于行业用户,所以应通过专网定制为垂直行业提供服务。基于上述背景,本文针对国内某工厂这一实际工业场景,以满足行业用户通信需求为基本原则,同时兼顾个性化、灵活、有弹性的设计原则,切实为该工厂提供定制化专网部署方案^[2]。

2 5G 行业专网部署现状

5G 的应用场景丰富多样,如何推动“5G+行业”的整体产业发展是 5G 应用关注的焦点。现阶段,虽然我国各企业应用 5G 实现数字化、智慧化转型的积极性很高,但在建设方面仍然面临着很多挑战。

2.1 5G 行业应用解决方案

目前,传统网络方案难以满足企业日新月异、

多种多样的业务生产需求,国内外 5G 专网部署工作蓬勃发展,正不断地向各垂直行业延伸,国内外 5G 赋能行业专网的部分解决方案^[3-4]见表 1。

5G 正以专属网络的形式广泛部署在工业行业数字化应用场景,利用 5G 推动生产要素数字化转型势在必行,根据用户对网络的差异化需求提供定制网络服务的必要性愈发显著。

2.2 专网部署面临的困难

为工业部署 5G 专网的初衷是弥补当前工业互联网连接方式的不足,即安全性低、覆盖范围有限、性能不稳定、通信标准不统一、运维成本较高等问题。部署 5G 专网势在必行,但也面临以下挑战。

- 复杂度:将 5G 赋能于工业,会导致复杂化企业的综合业务管理系统网络和工业生产过程的协同合作,增加整体工业生产流程的管理难度。
- 经济性:将 5G 应用于工业网络之前,需要

表 1 国内外 5G 工业应用

企业名称	项目名称
中国移动通信集团有限公司、爱柯迪股份有限公司	中国移动-爱柯迪全 5G 数字化工厂解决方案
中国移动通信集团有限公司杭州分公司、新华三集团	新华三-杭州移动 5G 智慧工厂专网项目
中国移动通信集团有限公司江苏分公司、爱立信(中国)通信有限公司	爱立信-移动南京 5G 智能工厂专网项目
中国移动通信集团有限公司、阿里巴巴有限公司	阿里巴巴 5G 智慧园区专网项目
中国移动通信集团有限公司陕西分公司、博世力士乐	博世力士乐智能工厂 5G 网络项目
中国联合网络通信集团有限公司广东分公司、华为技术有限公司、珠海格力电器股份有限公司	珠海格力 5G 专网改造项目
中国电信集团有限公司青岛公司、国家电网有限公司青岛供电公司、华为技术有限公司	青岛 5G 智能电网项目
中国电信集团有限公司、美的集团有限公司	基于电信 5G 2B-SA 专网的美的美云工业平台项目
西门子股份公司、高通公司	纽伦堡西门子汽车测试中心 5G 专网项目
m3connect、宝马公司	基于 5G 专网的“自主互联物流”研究项目
大众集团	基于 5G 专网的带宽密集型工业任务项目
日本电气股份有限公司	基于 5G 专网的智能工厂 NEC DX Factory 项目
爱立信公司、Telia、沃尔沃集团	沃尔沃建筑设备公司 5G 工业网络项目

首先升级装备设施和生产线,目前我国很多企业尚未完成数字化转型,正处于初期的探索阶段,这会导致应用 5G 时投资成本过高,阻碍“5G+行业”的创新应用进程。

- 成熟度:工业互联网的需求主要是安全性、可靠性以及差异化 3 个方面,需要保证行业数据的安全隔离、业务不能出园区/分域管理,保证可供使用的网络资源、根据不同的业务提供差异化服务,为满足以上需求需升级改造整体架构、终端、应用等多方面,这对专网部署来说仍然存在不确定性,亟须开展新的行业模式探索。

3 5G 专网工厂部署方案

5G 网络凭借高带宽、低时延、多接入这三大特性,可以为未来的工业互联网奠定稳定的网络基石。大多数工业企业希望 5G 专网可以提供较高的安全性和隐私性、可控的时延、业务优先级的调整控制能力以及较高的覆盖和容量,从而确保工厂内部的全方位无死角覆盖^[5]。但也不是所有的工业企业均需上述 5G 网络的所有特性,5G 专网可以根据不同工业场景、生产类型等提供定制化的自由度。据统计,按工业差异化的网络指标需求,70%的工业场景需求可以由 5G 网络提供服务。

3.1 工厂专网部署应用场景

当前该工厂面临着网络线路复杂、计算需求不断增长、网络建设维护成本高、信息共享困难以及人员成本高等多个痛点问题,传统的 Wi-Fi 不仅存在干扰大的问题,网络时延也难以控制,而且有线网络线路会导致工厂车间设备布局受限。此次部署 5G+MEC (mobile edge computing) 定制专网可以使该工厂从生产制造、智慧物流、智慧园区、智能研发、视觉管理等多个方面落地 5G 应用,贯穿业务全流程,切实为工厂生产制造做到“去机房化、少人化、数据驱动智能应用”。具体来说,主要包括六大典型的应用场景,应用

场景及其网络需求如下。

- 应用 5G+AGV (automated guided vehicle) 集群调度,AGV 不掉线、不停摆,可以自动进行生产线物料配送,稳定可靠连接,从而避免 Wi-Fi 不稳定导致的业务指令丢包及作业轨迹丢失,提升车间物流效率;该应用场景的网络需求需实现 4 万平方米并发 50 台以上 AGV,并且保证时延在 50 ms 以内。
- 应用 5G+AGV 协同搬运,多 AGV 协同替代高价单 AGV,可以大大降低大件的搬运总成本;该应用场景的带宽需包含位置、电机状态、运动状态、告警等关键信息,并且保证时延在 20 ms 以内。
- 应用 5G+4K+AI 识别,按需部署视频监控节点,可以节省施工、维护成本,实现产线全要素智能监控;该应用场景的网络需求需实现 4K 高清,单个终端带宽 20 Mbit/s,并且保证时延在 100 ms 以内。
- 应用 5G+机器视觉,通过机器视觉实时上传,秒级检验,可以有效降低人工专业性要求,极大地提升产线焊缝检测效率;该应用场景的网络需求需满足带宽 457 Mbit/s,并且保证时延在 350 ms 以内。
- 应用 5G+机器视觉+AGV,可以实现生产全流程的自动拣选,替代人工拣选,从而减少人工使用,提升效率;该应用场景所需的单个相机带宽为 80 Mbit/s,总计 250 Mbit/s,AGV 时延在 50 ms 以内。
- 应用 5G+机器视觉+定位,可以适配各种小件,且动作不会老化,使能堆垛车无人自动上下架,可以实现 7×24 h 作业,降低人工成本;该应用场景所需的单个相机带宽为 80 Mbit/s,3D 相机需 500 万像素,时延约 3 s。

部署 5G 全连接工厂架构,可以使该工厂实现云网边端协同,5G 专网部署可以跟踪工厂从钢板



到自动分解再到机器人选型这一整体流程,有效减少厂区现有的网络线路的复杂和维护成本,利用 MEC 边缘云 (multi-access edge cloud) 可以有效降低服务器的运维成本。

3.2 定制化设备选型方案

在已知专网部署定制化需求的基础上,本文首先考虑优化网络设备部署以确保提供高质量可扩展的网络服务。定制化设备选型需要综合考虑工厂的各生产要素,需做到全面协调配合,打通工厂内部的全部产业数据链。只有从整体系统架构、生产产业链、管理等各方面完成定制化设备转型,5G 网络才能以高可靠性、低时延、多链接等特性提供高效、便捷的服务,从而搭建可以满足工厂生产持续性创新的产业技术平台体系。该工厂场景部署备选的网络设备的性能参数见表 2。

工厂为满足不同的生产、调度指挥、人员管理等指定需求,需根据对网络技术的不同侧重选择相匹配的设备,从而实现从设计研发、制造生产、管理运行这一整体流程的智能化、数字化。该工厂典型的业务主要有数据采集类、生产操作类、监控管理类以及内网办公类。下面根据不同的业务类别需求,为不同的区域选择特定的设备类型。

数据采集类业务需要采集工厂各类环境数据、生产数据和运营运维数据,该类业务对设备的需求为可提供连接量大的业务,因此选择设备 2;生产操作类业务负责与生产相关的操作、控制以及管理反馈等内容,需满足高可靠、低时延、高

安全性的技术要求,因此选择设备 2 和设备 3;监控管理类业务需要保证生产安全、数据获取权限管理调度及业务检测等内容,此类业务对带宽的要求较高,因此选择设备 1 和设备 2;内网办公类业务需要满足上网、实时会议以及内外网之间的通信等内容,同样地,对带宽的要求较高,因此选择设备 1 和设备 2。

3.3 5G 专网组网架构

运营商可以在现有的有线或无线网络的基础上,通过部署 5G 资源向工厂提供定制化按需网络设计,从而解决现存网络在实际生产时面临的局限性。结合该工厂对隔离性、安全性、QoS (quality of service) 的要求,该工厂专网部署可以使用公网频谱作为其专享载频,工厂内公网与专网可以共享无线侧基站,通过控制网元的特殊化定制,为该工厂按需定制大带宽、低时延、高安全性的专属化网络^[6]。

5G 独立专网架构示意图如图 1 所示,公网和专网之间共享核心网控制面,同时核心网用户面下沉到工厂本地网络,从而做到专网独享,进而保证工厂内部生产数据仅在内部传输的需求。通过本地下沉的 UPF (user plane function),工厂无线数据流量可以实现分流,公网的流量可以流向公网 UPF,工厂内部流量可以直接流向专网 UPF 或者 MEC 承载的应用平台,而信令流量则可以按需选择,既可以流向公网的核心网,亦可流向专网独立的核心网。该工厂专网用户可以通过使用定制化 DNN (deep neural network) 的专网卡,其

表 2 设备性能参数

	MIMO 数	支持频段	吞吐量	网络制式	后续可预留扩容
设备 1	2TR, 可更换支持 8TR	3.3 ~3.4 GHz	80~110 Mbit/s	TDD	可升级支持 200 MB, 可级联同型号设备进行小区分裂
设备 2	2TR, 可更换支持 8TR	3.3 ~3.6 GHz	150~200 Mbit/s	TDD	可升级支持 300 MB, 可级联同型号设备进行小区分裂
设备 3	4TR	2.1 GHz 频段	120~170 Mbit/s	FDD	可升级支持 1.8 GHz+2.1 GHz, 可级联同型号设备进行小区分裂

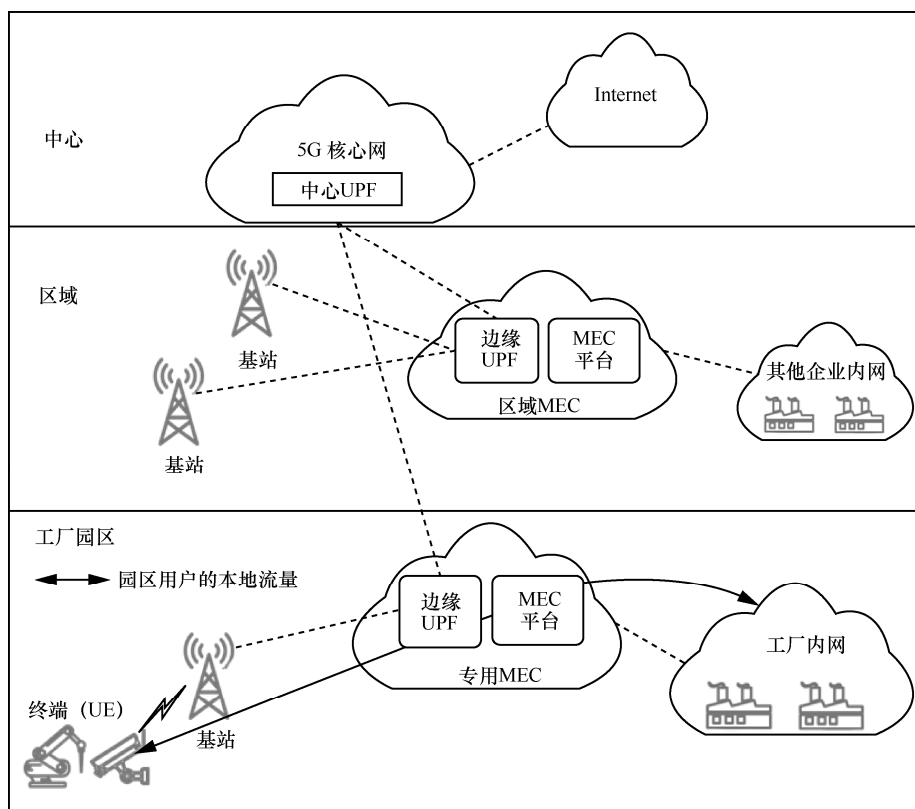


图1 5G独立专网架构示意图

数据流向工厂本地 MEC，可以方便地进行网络运维，管理可接入的用户权限；而其公网用户可以通过配备公网 DNN 的公网卡使用公网的业务服务。该专网架构可以保证该工厂专网部署强调提高数据安全性的设计需求，所有数据能够满足厂区内无线移动且不出厂区，而且普通公网用户没有权限访问专网，可以形成独立的数据采集网络。

进一步地，该工厂 5G 独立专网架构的 MEC 组网拓扑示意图如图 2 所示，网络配置方面，可以通过划分平台基础运维管理平面和用户业务服务平面，部署防火墙实现业务平面及区域的隔离及互访控制。

在成本方面，该工厂公网和专网共享基站，可以极大地降低网络部署成本。其次，将部分公网频段划分为专网的独享频段，可以避免公网与专网之间的频率干扰，该专网组网架构可以实现工厂内数据的本地卸载以及本地化存储，可以保

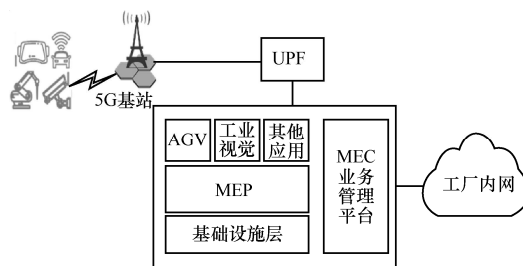


图2 MEC组网拓扑示意图

证专网数据传输的安全性，实现数据不出园区。同时，由于 MEC 和 UPF 的下沉，也可以提供低时延服务，从而满足该工厂的 QoS 指标要求。

4 网络性能评估

5G 专网的基本设计要求包括高速率、大带宽和高容量等，另外还有额外网络需求包括低时延、低抖动等高性能需求，尤其是工业控制领域的一些生产应用对报文时延和抖动等性能指标有着相对较高的要求。单向的端到端网络



时延是无线空口处理时延、传输路径时延、传输设备时延、核心网设备时延、承载网设备时延的总和,其中传输路径时延、核心网设备时延以及承载网设备时延可以通过下沉的 UPF 和 MEC 来缩短。端到端网络时延主要由设备部署、信道状况、负载数量等决定,5G 专网可以通过 MEC 分流、空口优化等方式提供相对精确的时延保障。为验证上述专网部署的网络性能指标,在不同的负荷程度下,对该厂区的网络时延进行了测试,50%负荷加载时延比例情况见表 3,95%负荷加载时延比例情况见表 4。在无线侧负荷不超过 50%的情况下,终端发送短包的时延几乎不受影响,平均时延在 13 ms 左右,在无线侧负荷接近满载的情况下,终端发送短包平均时延可控制在 30 ms 以内,偶尔会出现丢包和时延相对较大的情况。

为进一步验证时延性能,对该专网长包时延进行了测试,结果见表 5。在 8 h 可靠性时延测试情况下,终端发送 1 500 包的时延基本稳定,与短期测试结果的差异不大,与短包时延测试结果相近,个别差异为偶然现象,与该工厂自测 Wi-Fi 在无干扰情况下的平均性能相当,且时延抖动表现更优。而且,经测试,Wi-Fi 在初始干扰或有满负荷加载用户情况下,短期内对时延和丢包影响严重,需要较长时间才可实现多用户的竞争资源情况的稳定。

表 3 50%负荷加载时延比例情况

时延区间/ms	数量/个	比例
(0, 10]	81	2.02%
(10, 20]	3 820	95.50%
(20, 25]	96	2.40%
(25, 30]	3	0.08%
(30, 35]	0	0
(35, 40]	0	0
(40, 50]	0	0
(50, 100]	0	0
(100, 200]	0	0
(200, 343]	0	0

表 4 95%负荷加载时延比例情况

时延区间/ms	数量/个	比例
(0, 10]	0	0
(10, 20]	351	38.36%
(20, 25]	268	29.29%
(25, 30]	123	13.44%
(30, 35]	77	8.42%
(35, 40]	49	5.36%
(40, 50]	41	4.48%
(50, 100]	6	0.66%
(100, 200]	0	0
(200, 1 000]	0	0

表 5 5G 长包时延对比

20 min ping 1 500 时延统计						
ping 包 大小/byte	ping 业务 请求次数	ping 业务 成功次数	ping 包 成功率	ping 包 平均时延/ms	ping 包 最大时延/ms	ping 包 最小时延/ms
1 500	1 023	1 023	100.0%	11.88	152.00	8.93
8 h 连续 ping 1 500 时延统计						
ping 包 大小/byte	ping 业务 请求次数	ping 业务 成功次数	ping 包 成功率	ping 包 平均时延/ms	ping 包 最大时延/ms	ping 包最 小时延/ms
1 500	30 000	29 993	100.0%	11.29	214.00	8.63

最后,对5G灌包情况进行了测试对比,结果见表6、表7。短期测试时终端上行速率较高,平均速率可达232 Mbit/s。在持续灌包可靠性测试时,终端上行平均速率回落到177 Mbit/s,可在99%情况时上行速率保持在150 Mbit/s以上。经上述时延和终端速率测试,在无线侧不同等级负荷情况下,终端发送长包的时延几乎不受任何影响,终端平均速率基本可以保持在150 Mbit/s以上,显著优于Wi-Fi城域专线测试结果。

表6 20 min 灌包速率统计

速率区间/(Mbit·s ⁻¹)	数量/个	比例
(0, 100]	1	0.10%
(100, 150]	1	0.10%
(150, 180]	18	1.80%
(180, 200]	98	9.81%
(200, 220]	306	30.63%
(220, 240]	99	9.91%
(240, 260]	329	32.93%
(260, 280]	147	14.71%
(280, 300]	0	0

表7 6 h 连续灌包速率统计

阈值	点数	PDF (probability density function)
(-∞, 30)	56	0.42%
[30,60)	4	0.03%
[60,90)	4	0.03%
[90,120)	4	0.03%
[120,150)	31	0.24%
[150,180)	8 820	66.86%
[180,210)	3 788	28.72%
[210,240)	210	1.59%
[240,270)	274	2.08%
[270,+∞)	0	0

5 结束语

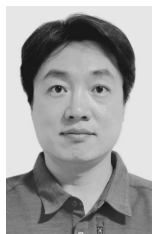
5G低时延、高可靠及大带宽等特点,为新一轮信息通信技术革命提供了发展方向,将推动工业等各垂直行业的数字化、智能化和网络化转型。目前,5G商用化进程正在蓬勃发展,5G网络建

设正在加速推进,5G与垂直行业的融合将成为未来社会发展的关键环节。本文在总结当前5G行业应用的基础上,针对国内某工厂这一实际场景,分析了该工厂对工业专网的需求,提出了专属化的5G组网方案,并测试验证了该方案部署的优越性。

参考文献:

- [1] 刘豪,梁峰. 5G专网发展状况与架构分析[J]. 通信企业管理, 2021(4): 38-40.
LIU H, LIANG Z. Development status and architecture analysis of 5G private network[J]. C-Enterprise Management, 2021(4): 38-40.
- [2] 迟海东,胡博,王鑫,等. 5G行业专网部署模式探究[J]. 信息通信技术, 2020, 14(5): 18-24.
CHI H D, HU B, WANG X, et al. Deployment mode of 5G industry private network[J]. Information and Communications Technologies, 2020, 14(5): 18-24.
- [3] 中国移动. 中国移动爱柯迪全5G数字化工厂解决方案[J]. 通信世界, 2021(10): 42-43.
China Mobile. China Mobile IKD Solution of full 5G digital factory solution[J]. Communications World, 2021(10): 42-43.
- [4] 爱立信(中国)通信有限公司,中国移动通信集团有限公司江苏分公司. 爱立信-移动南京5G智能工厂专网项目[J]. 通信世界, 2021(10): 52-53.
Ericsson (China) Communication Co., Ltd, China Mobile Communications Group Co., Ltd Jiangsu Branch. Ericsson-Mobile Nanjing 5G intelligent factory private network project[J]. Communications World, 2021(10): 52-53.
- [5] 孙丽楠,朱红绿,孙慧. 面向工业的5G组网方案研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(5): 5-10.
SUN L N, ZHU H L, SUN H. Research on 5G networking schemes for industry[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(5): 5-10.
- [6] 李富强,周华,宋晓伟. 行业用户5G无线专网组网方案及其技术实现[J]. 电信科学, 2020, 36(10): 134-139.
LI F Q, ZHOU H, SONG X W. 5G wireless private network scheme and its technical implementation for industrial users[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(10): 134-139.

[作者简介]



董石磊(1980-),男,中国电信股份有限公司研究院高级工程师,主要研究方向为5G行业应用、5G定制网、数字孪生。

赵婧博(1981-),女,中国电信股份有限公司研究院工程师,主要研究方向为5G定制网、5G行业应用。