



基于 5G 边缘云的港口统一通信方案研究与实践

宁岩¹, 张蕾², 陆肖元¹

(1. 上海宽带技术及应用工程研究中心, 上海 200436;
2. 青岛港国际股份有限公司, 山东 青岛 266011)

摘要: 5G 边缘云具有分布式、灵活组网、快速部署和本地流量分流等优势, 在港口等垂直工业领域有很广泛的应用前景, 同时对实现港口统一通信也提出了一定的要求。在研究基于 5G 边缘云的港口统一通信架构的基础上, 提出了针对港口现场全域各类要素实现全面感知、支撑自动化业务改造的 5G 边缘云功能框架。此功能框架能很好地适用于港口场景的有线无线网络融合的统一承载, 可作为目前复杂环境下的港口网络统一通信的网络基础设施。最后在某港口码头上对该方案进行了实际验证。

关键词: 5G 边缘云; 异构网络融合; 港口网络自运营; 统一通信

中图分类号: TP292.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022254

Research and practice of 5G edge cloud based port unified communication scheme

NING Yan¹, ZHANG Lei², LU Xiaoyuan¹

1. Shanghai Engineering Research Center for Broadband Technologies and Applications, Shanghai 200436, China
2. Qingdao Port International Co., Ltd., Qingdao 266011, China

Abstract: With the advantages of distribution, flexible networking, rapid deployment, and local data offloading, 5G edge cloud has a wide range of application prospects in the vertical industrial field such as ports, and also puts forward certain requirements for the realization of unified communications in ports. On the basis of studying the unified communication architecture of ports based on 5G edge cloud, a functional framework of the 5G edge cloud that realized a comprehensive perception of various elements of the port site and supported the transformation of automated services was proposed. The functional framework could be well applied to the unified hosting of wired and wireless network integration in port scenarios, and could be used as the network infrastructure of unified communication of port networks in the current complex environment. Finally, the scheme was applied to a port terminal for practical verification.

Key words: 5G edge cloud, heterogeneous network fusion, port network self-operating, unified communication

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-08-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1710805)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1710805)



0 引言

近年来,5G 网络业务的垂直应用探索为许多典型传统工业场景的智能化、数字化转型提供了创新应用落地的基础连接支撑。在工业领域内,复杂的终端形态、异构化的传输方式、连续或离散型的多源业务流程特征都泛在互联、多源感知、智能决策的实现提出了挑战。Nowak 等^[1]对 5G 网络通信在工业垂直领域的需求特征进行了归纳,5G 网络技术可以提供基于控制、有效且灵活目的设备间的实时通信(用于模拟和维护的实时协作交互),以及端到端的远程控制通信在服务端、手持终端等设备间的连接(用于生产与组装等业务节点的交互和传递)。同时,在网络体系设计方面,以港口为典型场景,对 5G 组网连接方案提出了更加严格的要求,为了保证业务的稳定、连续和安全性,受限于业务保障需要,对网络通信提出了数据不出港的绝对数据闭环管理需求。Rostami^[2]对比了面向垂直工业领域的独立 5G 网络的部署和应用模型,5G 网络架构的灵活性将为面向不同需求的场景提供定制化网络部署架构,将 5G 网络的控制面和管理面进行本地化分离,在可用性和鲁棒性方面,灵活的 5G 网络本地化部署仅依赖本地资源和组件,从而降低核心面的控制约束带来的数据管理风险。

在垂直工业领域的典型场景中,传统工业不仅要面临现场网络复杂、前端接入条件恶劣的问题,还要面临用于不同生产场景的设备不统一带来的数据互通问题。而港口的网络建设与部署更加具有高度定制化的需求^[3],5G 技术的应用在港口中面临业务种类复杂、参与主体复杂、差异化通信、组网复杂等问题。有相关研究提出了一种独立 5G 专网组网架构^[4],满足垂直行业客户的数字化转型过程中对网络、边缘、云、应用等方面的差异化需求,私有化部署在融合网络环境下实现对网络质量的保证,减少端到端时延,通过定

制基于深度神经网络(deep neural network, DNN)或者专用切片标注数据网络与路由隔离,并对网络性能进行服务质量(quality of service, QoS)优化。同时,也有相关研究提出了针对港口的 5G 专网组网架构^[5],非生产业务数据的上网流量直接连接公网,本地生产业务数据通过港区部署多接入边缘计算(multi-access edge computing, MEC)和用户面功能(user plane function, UPF)路由接入港区业务应用系统,满足港区数据技术要求,但对数据不出港的管理风险要求满足度较低。

5G 技术在工业领域的探索还旨在解决现场级海量零散、异构化数据的及时汇聚与分析问题,以及与云端通信的协同问题,实现业务的高效协同,提升工业生产作业整体效率。基于 5G 技术的 MEC 平台对于工业场景的数据整合显得十分重要^[6],将云端和边缘的服务单元融合到靠近终端的物联网(Internet of things, IoT)通信架构,在云端进行功能虚拟化,通过 MEC 边缘侧对终端对象进行服务,解耦对基础设施强依赖的数据服务,进而在云端和边缘侧形成有效数据流动。大多数港口场景下的生产作业面临缺乏统一的通信协议及架构描述的问题,对异构的物联网数据、大型机械设备作业命令数据、人机通信等数据很难实现通信路由的自动配置与转换,Kherani 等^[7]对 MEC 与 5G 结合的框架提出一种基于处理流程的 UPF 设置来满足数据低时延传输的方法,不同功能的 UPF 可以更加动态地运行和连续协同管理任务,同时将边缘业务与云端业务处理进行分离。另外,文献[8]提出了一种将启发式的跨集群容器编排策略应用于边缘计算平台的方法,实现对集群任务计算时延的优化。5G 网络切片技术也被广泛用于工业制造、智慧港口等领域,先后提出将基于 5G+MEC 的方案用于全场景的高清视频回传和视觉智能理货等业务的创新方案^[9],基于定制需求的网络切片技术和方案将提升网络的弹性和低时延处置能力,在基于 5G 的边缘网络上构建可

动态适配对时延敏感的虚拟化网络功能（virtual network function, VNF），基于就近原则选择合适的网络功能服务单元，从而降低整体网络通信时延。Mlika 等^[10]提出了一种网络切片方法，利用连续时间内就近最优选择方法，在边缘云低时延环境下保证了业务数据的连续性和弹性容错能力。

当前，对 5G 技术的探索和创新仍然在持续，而差异化明显的工业垂直领域成为极受欢迎的 5G 落地验证场景选择。在港口领域的业务场景内，还没有解决港口现场业务的统一通信问题，本文主要提出了一种基于 5G 边缘云的港口统一通信架构解决方案，并通过实际数据进行方案可行性验证。

1 港口通信研究现状

作为港口建设发展的核心支撑能力之一，网络通信技术正在逐步深入港口的各项核心业务，网络通信为港口向智能化、数字化、高效协同化的发展提供了连接基础。传统的港口面临工作环境差、码头前沿固定移动设备等多业务同时工作带来的电磁干扰、运营效率深度依赖基于经验的判断、现场通信形成数据“孤岛”等瓶颈问题。随着 5G 技术和垂直应用的持续演进与探索，集卡运输、大型机械装卸、集装箱理货、堆场巡检等业务将逐步向数字化、智能化、智慧化转型，但是仍然没有解决统一通信问题。虽然当前港口已经运用 Wi-Fi、光纤、RTK、4G 等通信方式，但是各项业务场景的通信受基础通信设施铺设、终端通信异构等限制，无法实现统一通信的网络构建。

1.1 港口发展现状

当前，世界各大港口都已开始探索向下一代港口转变。一些先进港口，如德国汉堡港、荷兰鹿特丹港、新加坡港都在积极探索与实践。全球智慧港口发展已经呈现向港口运营智慧化、港口

物流供应链协同化、港口贸易便利化、数据服务场景化、港口业态开放化、生态圈和谐化趋势演进^[11]，港口的数字化基础设施建设需要先进信息技术的融合，结合大数据、物联网、高速通信网络、智能计算等技术手段，强化码头现场平面运输作业、堆场管理与调度作业、道口进出管理等的自动化、数字化控制。基于数字孪生、数据分析、AI 学习等新兴技术的定制化场景应用，融合以 5G 网络为典型通信基础的网络布局，对港口作业数据进行深入分析和预测，为港口生产力的提升提供最优方案。

网络通信能力的建设是基于场景应用需求逐步建立的，港口典型的应用场景包括岸桥装卸货、水平运输、堆场管理、进出港关卡等，港口区域内作业环境十分复杂，各类大型机械设备协作情况较多，因此，统一通信的网络基础能力建设已经成为推动智慧港口发展的关键因素。随着超大型综合港口的不断整合，港口管理模式呈现集团化、多港口、多业态、港城数据联动等特点，涉及的业务环境复杂、管理难度大，信息化平台建设无法满足集团化管控、港口业务创新发展的需求；业务管理系统和先进的装卸设备自动控制系统缺乏深度融合，造成各系统发展水平不一；先进的硬件设备、滞后的管理体系与管理信息系统无法有效融合，严重制约了智慧港口的整体建设，效率与效益无法有效达成；多数港口企业形成了以码头公司为单位的部门级应用和数据，信息化管理条块分割，缺乏整体性、系统性，各系统功能模块之间彼此关联少，信息“孤岛”现象严重。

中国作为世界港口吞吐量领先的国家，港口的发展对经济的影响举足轻重，智慧港口的建设已经成为国家重要战略之一。作为连接水路运输与陆地运输的关键枢纽节点，港口的自动化、数字化、智能化转型的核心是港口生产作业和管理在 5G 等新型信息技术的推动下的深度重塑。通过不断将大数据、区块链、物联网、5G、人工智能



等新技术应用于港口生产和管理,引导自动化集装箱码头、堆场库场改造,推动港口建设养护运行全过程、全周期数字化,加快港站智能调度、设备远程操控、智能安防预警和港区自动驾驶等综合应用,已经成为智慧港口的关键实施路径。

5G 通信技术的先进性对以港口场景为典型的工业领域应用演进产生了重要影响。在港口转型升级关键阶段上,5G 通信以多频组网全覆盖、大带宽、低时延、高可靠的无线传输技术优势,为海量数据采集、多类复杂业务协同、多要素数据互通、数据安全保护提供了技术可行性,推动结合物联网、AI 等新技术在典型核心业务环节的融合应用水平提升。5G 网络部署结合工业物联网、人工智能技术对港口作业车辆、船舶、港口作业机械设备上的全面信息进行全要素的自动感知与分析,在水平运输业务的无人驾驶集卡、垂直装卸业务的远程控制、堆场作业智能化理货等关键业务上,5G 技术提供了基于高清视频回传的远程设备运维、基于人工智能的低时延自动化远程控制等应用创新,如集卡定位、无人驾驶自动导引车(automated guided vehicle, AGV)车路协同、基于大规模数据采集与建模的高精度三维空间可视化管理等,助力智慧港口自动化垂直装卸与水平运输体系协同,实现港口作业流程自动化、智慧化,在提高港口运转效率的同时降低整体作业能耗,显著提升港口的竞争力。

1.2 港口通信需求

传统港口存在多种业务形态,包括港机设备的可靠控制、无人集卡的可靠控制、堆场的调度、办公流转等,类型复杂,网络需求多样化。其与一般公网业务最大的区别在于,智慧港口的网络建设与部署具有非常强的高度定制化需求,在不同货种的作业场景下,对网络的覆盖、时延、可靠性、安全性以及传输带宽等方面能力,需求差异很大。

目前,港口无线数据传输通信系统主要采用 400 MHz 窄带数据传输网络、2.4 GHz 无线局域网

络、分时长期演进(time division long term evolution, TD-LTE)宽带集群通信网络,其中 400 MHz 窄带数据传输网络采用封闭技术,正逐步淘汰;2.4 GHz 无线局域网受其技术特性影响,存在覆盖差、信号抗干扰差、承载业务有限、维护成本高等问题;TD-LTE 宽带集群通信网络可解决智慧港区大部分的无线数据传输需求,但由于带宽限制,其无法满足智慧港口无人驾驶集卡、机械设备远程控制等大带宽、低时延的无线数据传输需求。

网络通信业务作为智慧港口的基础支撑之一,存在以下 6 个特征。

- 港口业务种类复杂:涵盖了从传统的互联网信息服务到自动驾驶/靠泊、远程操作、车路协同等特殊行业应用。
- 港口环境复杂,电磁干扰多:港口大型机械较多,且移动机械需要进行运输作业,货物移动等易形成强电磁干扰,导致通信不稳定。
- 网络覆盖铺设困难:光纤通信必须在码头建设时专门设计、敷设与设备对接的地下通信管网,而且光纤通信方式在移动设备上需要设计专门的随动机构,又会造成设备的结构复杂,制造、运行和维护的成本比较高,另外,近海作业区最易受到海潮影响,不适合大面积铺设线路,在海风影响下,作业区不允许架空线路。
- 通信需求差异大:不同的港口业务对网络的覆盖需求、时延需求、带宽需求和可靠性需求等存在较大的动态范围。
- 组网要求复杂:港口的组网包括固定和移动网络的共存、生产网和办公网的隔离、局域和广域网络的协同,以及传统多制式接入业务的兼容问题。
- 参与通信的主体复杂^[3]:参与的主体包括各种人(作业、驾驶、管理)、车(AGV、自动港口集卡、传统物流卡车)、船、岸

桥、集装箱、堆场、闸口、港口内部封闭路、办公管理中心、路边/岸边基础设施（感知系统、环境监控）、自动巡检设备（摄像头、无人机）等。

港口网络部署局域化不同于公共网络广范围覆盖的需求，港口行业用户对网络覆盖的需求聚焦在局部区域，例如在智能港口领域，港口的地理位置偏远，占地面积广，需要对吊车作业区域进行针对性的网络覆盖与优化。同时智慧港口作业效率是关键，岸桥装卸区和堆场区的远程作业对无线网络的时延要求极为苛刻，大约为 20 ms，而公网发生断连、拥塞会对港口的生产效率产生影响。通过在港区范围内部署专网对所有生产作业区域进行重点覆盖的方式，保障港区数据安全、降低数据传输时延，提高港口的调度能力及运输效率。港口网络部署难点主要包括以下 5 个方面。

（1）部署环境恶劣

港口港机远控、智能理货、无人集卡等业务的视频数据对上行大带宽要求较高，单用户要求为 20~30 Mbit/s；单小区用户数量较多，各类业务终端数可能超过 15 台，单小区上行容量逼近 1 Gbit/s。为了满足行业应用的上行大带宽诉求，最简单直接的办法就是改变当前 5G 时分双工（time division duplexing, TDD）系统中的时隙配比。目前 5G 主流时隙配比为 8D2U 和 7D3U 等，分配的下行资源远高于上行。若改变时隙配比，将更多的资源分配给上行，就可以提升上行峰值速率和容量。

（2）移动设备跨区作业信号无缝切换

在多个基站切换，导轨长度超过 400 m 的情况下，工作人员反馈切换基站会带来网络抖动的问题，要求满足工业互联网抖动可控的需求，否则影响生产网络。采用 700 MHz 基站实现广域及深度覆盖，可避免基站切换。

（3）高遮挡密集信号覆盖

在集装箱堆高的情况下，例如，5 层集装箱堆

叠下，金属遮挡导致 5G 信号出现盲点，3.5 GHz 和 2.6 GHz 基站都有该问题，使用 700 MHz 基站则盲点大幅减少。700 MHz 由于频谱低、波长长、覆盖远、深度覆盖能力强，适用于高遮挡密集信号覆盖场景。同时使用 3.3 GHz NR 进行补盲，与 700 MHz 网络协同，形成多层立体覆盖网络。

（4）网络安全

港口网络安全要求明确且严格，需要确保生产数据不出网，确保生产网络可管可控可自运营。

（5）集团管理、码头作业、互联网用户服务协同

港口业务种类等级要求多，需要对办公、生产、视频网络等进行隔离，因此对港口网络的统一承载提出挑战，需要兼顾无线 5G/万兆主备冗余组网。网络设备需要向小型化演进，向边缘侧集合，在现场的终端尽量减少。

2 基于 5G 边缘云的港口统一通信方案

基于 5G 边缘云的港口统一通信需要融合现有网络基础，构建统一的有线无线融合接入网络架构和边缘云功能业务平台，实现在港口范围内的多源异构数据互联互通，统一管理和运维，多频组网环境下港口全域覆盖、低时延网络无缝切换，多模多网冗余安全备份，实现各类远控业务、视频监控、堆场作业调度等场景的全数据可靠传输。港口 5G 边缘云平台能够灵活组合可弹性扩展的业务组件，实现对各类港口业务的智能分析与预测，对港口办公、作业业务、监控视频等多种网络实现切片管理，满足港口大型作业机械远程控制与多路视频监控回传等的高效、可靠传输需求，对岸桥远控、轨道吊远控、无人驾驶运输、可视化实时运维等集装箱码头主要业务的高性能网络传输升级，助力建设性能强大（支持千万级箱量）、功能适度超前、可灵活定制拓展、运行稳定且能满足自动化、半自动化改造需求的超大型综合港口数字化、智能化统一通信方案。



2.1 关键技术

实现港口 5G 边缘云统一通信,以及边缘侧业务处理实时化、数据处理本地化、信息交换高效化,需要对 MEC 本地分流、5G 网络切片技术、多频组网、5G 多载波聚合、高精度时空同步等技术进行分析。

(1) MEC 本地分流

面向边缘计算的 MEC 本地分流技术,与 5G 网络去中心化的特征吻合,通过本地分流来降低时延,在降低带宽资源的情况下,满足港口场景下的远程控制、智能理货等低时延业务操作要求,同时将原本在云端才能具备的计算能力下沉到网络边缘位置,在靠近现场侧实现统一的边缘接入汇聚。通过将满足业务过滤规则的数据包转发到指定路径的上行分流方法^[12],主要考虑动态负载、相对静态容量、UPF 位置、会话类型等因素,在边缘云架构内为数据动态或者半动态地选择 UPF 本地分流策略,缩短了传输时延,提高了传输效率。在靠近码头用户侧的港区应用 MEC 本地分流技术,部署 MEC 服务平台,从而满足港口数据不出港和时延要求。港内大型机械与设备的控制和作业需要海量视频数据回传和低时延控制指令下达,港口的垂直装卸与水平运输业务根据码头货种的不同存在一定的差异化网络需求,港口机械设备(如岸桥、轨道吊、龙门吊等设备)的远程操作与集卡、AGV 的远程驾驶、操控中心对设备的远程访问与指令下达都对数据流量提出了资源调度需求,MEC 将传统的核心网 UPF 进行本地分流,按需接入港口的运营系统,如航空站运营系统(terminal operation system, TOS)、设备控制系统(equipment control system, ECS)、船舶监控系统(vessel monitoring system, VMS)以及外联的政府应用系统。MEC 本地分流可以采用虚拟和容器方式来分流来自不同应用的差异化数据服务,并且实现本地不同 MEC 服务的相互备份与容灾。

另外,在工业场景需求下,基于软件定义网

络(software defined network, SDN)的本地分流技术可以快速使应用由终端移动性引起网络拓扑变化^[13],保证业务连续性,基于 5G 边缘云的港口统一通信架构设计,MEC 本地分流的本质就是实现 ICT 融合,根据感知到的网络接入点的变化动态生成最优路由转发策略,通过边缘应用提供网络服务方式,灵活选择合适的算力位置,合理调度算力资源,动态配置 UPF 网元,最终实现业务、连接和服务的最优配置。

(2) 5G 网络切片技术

5G 网络切片技术具有解决端到端问题的特定网络能力,提供了网络资源的灵活分配、网络能力的弹性扩展,采用基于 QoS 机制的业务等级区分方式,提供面向工业、港口等领域区分大带宽视频回传业务、低时延 PLC 控制业务等差异化服务的固移协同组网的技术保障 5G 网络切片通常可以分为软切片和硬切片两种方式^[14],软切片一般通过设置优先级来抢占共享资源,从而实现调度的逻辑隔离;硬切片一般通过对资源隔离、专用调度预留等方式的实现物理隔离,通过切片标识的虚拟局域网(virtual local area network, VLAN)映射实现端到端的网络业务隔离,实现多种接入类型互通的组网方式。面向港口统一通信的 5G 切片技术,通过组合调度策略来规定不同业务的调度优先级,可以以港口业务划分对网络通信的切片策略,例如在集装箱码头以岸桥、轨道吊、轮胎吊、无人集卡、AGV 等大型机械为主要设备的高精度控制与定位切片,直接影响码头装卸和水平运输周转效率,进而影响对码头前端作业现场的多泊位、多机械协同工作的整体调度控制,这一部分的网络切片应对带宽、时延、丢包、抖动敏感问题,需要提供最高优先级的调度保障;对于大型机械的远程维护,港口手持终端的集群对讲通信在一定程度上关系到前端现场与后端堆场、操控中心的工作效率,也应分配较高优先级的网络通信保障;港口日常监控安防视频、

办公系统通信、闸口管理系统等对优先级和实时性的敏感性相对较低。基于 5G 切片策略,实现网络端到端切片,为港口重要作业业务应用构建逻辑通道传输,进而实现生产系统数据、视频网数据、办公网、外部公网数据的安全隔离,提升整体网络传输的可靠性和安全性。

(3) 多频组网

多频组网不仅可以提升网络容量和覆盖,还能够降低互操作带来的业务感知时延^[15],高低频协同在工业场景的网络覆盖能提升广度覆盖和深度覆盖,实现广域区域的连续覆盖。当前,5G 频谱的分配包括:中国移动获得 2 515~2 675 MHz 共 160 MHz,频段号为 n41,以及 4 800~4 900 MHz 共 100 MHz,频段号为 n79;中国联通获得 3 500~3 600 MHz 共 100 MHz,频段号为 n78;中国电信获得 3 400~3 500 MHz 共 100 MHz,频段号为 n78;中国广电获得 703~733 MHz、758~788 MHz 频段、4.9 GHz 实验频谱,以及中国电信、中国联通、中国广电共同使用 3 300~3 400 MHz 频段用于 5G 室内覆盖。根据场景需求,对场景内容量和建筑物类型进行综合分析,低频段可以进行广域覆盖,提供覆盖基础,高频段进行深度热点补盲覆盖。在港口构建基于 5G 技术的自动化码头,首先应实现通信全域覆盖,主要覆盖岸桥、AGV 运输车、轨道吊、周边办公楼、辅建区等区域,可以采用 5G 宏基站与微基站结合的错频组网覆盖规划部署方法。

(4) 5G 多载波聚合

作为 5G 网络性能增强的关键技术之一,多载波聚合技术可以将多个不同的频段进行整合,灵活按需地使用连续或非连续的频谱,将带宽扩展到满足工业场景需求,用多频谱结合提升上下行覆盖均衡能力。在码头作业中,低时延的远程控制和视频远程监控的作业任务对网络上下行带宽和时延提出要求,5G 时频多载波聚合技术将多个不同的频段进行整合,灵活地使用连续或非连续

的频谱,将带宽扩展到 100 MHz 甚至更多,利用频分多工(frequency division duplexing, FDD)和 TDD 频谱结合提升上下行覆盖均衡能力,提升网络覆盖和网络时延可靠性,实现视频传输上行带宽承载以及远程控制命令反馈的低时延下行传输。

(5) 高精度时空同步

在 5G 通信中,高精度时空同步技术通过采用共视法和高精度地基授时系统专用光纤网络参考源,提供了时频一体化支撑网并对 5G 网络中的重点节点进行时频检测支撑^[16],5G 网络对时间同步的精度和可靠性均提出新的要求,现有的地面高精度时间同步技术主要为基于 1588v2^[17]的时间同步网络,可以满足 5G 无线业务基本的 $\pm 1.5 \mu\text{s}$ 精度要求,但是 100 ns 甚至 10 ns 量级的同步需求则需要新的技术和网络支撑。要实现高精度时间同步需要从同步源到末端进行端到端的提升优化,采用多种技术手段共同提升同步精度、同步网快速部署和智能管理能力,其中的主要关键技术有高精度同步源技术、高精度同步传送技术、高精度同步监测技术、智能时钟运维技术等。高精度时空同步技术在智慧港口的自动化系统中提供了精准的位置信息,从而提升了港口作业效率和智慧化水平^[18]。

2.2 面向港口场景的 5G 边缘云方案架构

港口 5G 边缘云统一通信网络拓扑如图 1 所示,通过 5G+MEC 设计,对港口现场全域各类要素实现全面感知,支撑自动化生产作业及码头自动化运营管理,将流量卸载到港口本地网络,下沉式处理各类生产管理系统、作业设备系统所需数据,以集中一体的网络切片服务平台为垂直业务提供高可靠、强性能、易部署的专网承载,满足在实时、智能、安全与隐私保护等方面的要求,显著提高港口作业自动化水平和数据安全性。每个码头使用 MEC 边缘云对数据进行汇聚,可以将数据按需传递给码头云(码头各类业务系统部署位置),向上连接集团数据中心,将码头——

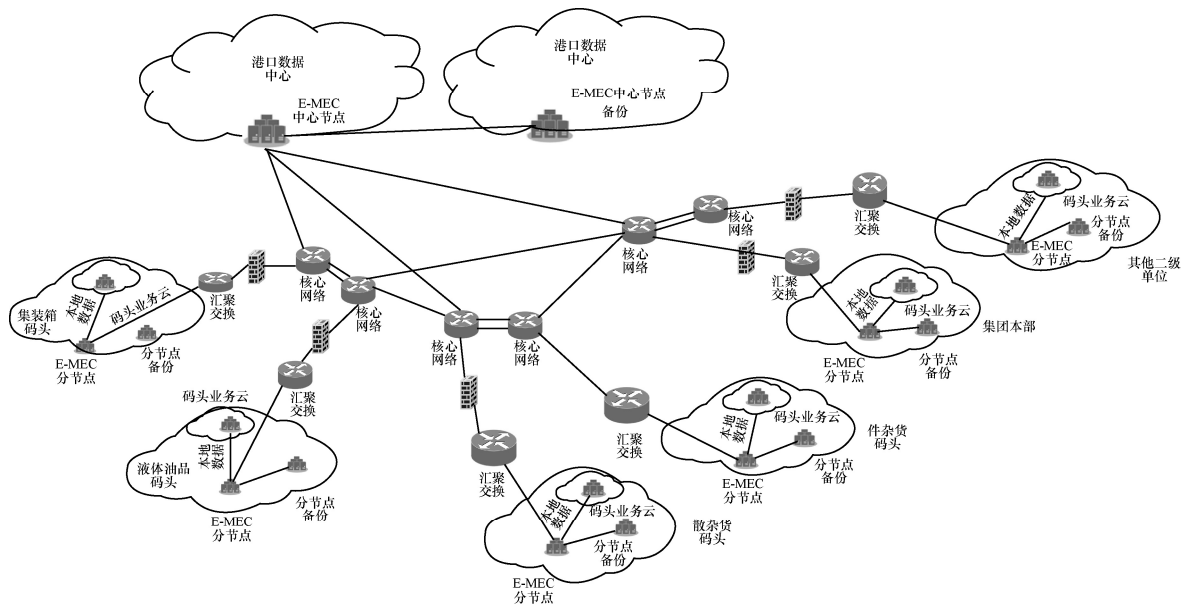


图1 港口5G边缘云统一通信网络拓扑

MEC 边缘云作为分中心并且在码头备份 MEC，在集团位置部署 MEC 中心节点及其备份。集团中心节点 MEC 连接各个码头的分中心节点 MEC。系统服务器采用集中式部署模式，实行数据集中管理。数据库服务器、Web 服务器均架设在信息部门，由 IT 人员进行统一的管理，用户通过内网访问，达到实时共享数据、提高网络安

全整体水平、降低系统部署复杂度的目的。

本方案充分利用边缘节点的动态资源，将具有存储和计算资源的 MEC 节点部署在接入网内，为各类现场接入终端、设备提供具有弹性的网络服务。港口 5G 边缘云异构网络统一通信架构如图 2 所示，港口各类码头现存的异构网络，如以太网、RFID、RTK 定位、4G、IoT 专网等统一接

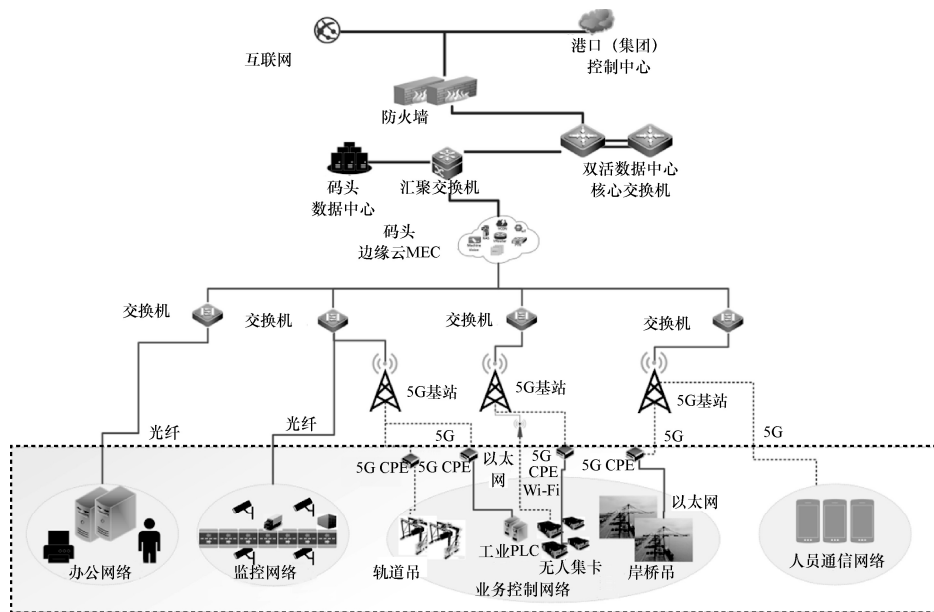


图2 港口5G边缘云异构网络统一通信架构

入 5G 边缘云内,形成数据的统一汇聚和处理,充分将控制功能下沉到边缘云内,MEC 可以部署在码头现场,也可以部署在数据中心,通过边缘交换机或者汇聚交换机进行数据访问与交换。通过对基于业务差异的办公网络、监控网络、业务控制网络、人员通信网络进行切片隔离,保证数据通信不被干扰和通信安全。

本方案构建基于 5G 边缘云的超大型综合港口统一通信网络,需结合现有有线、LTE 网络基础,通过 5G 宏基站立体组网、MEC 多边接入与本地分流、网络切片、多载波聚合等关键技术构建一张广覆盖、大容量、高可靠的有线无线融合网络,实现多模多网冗余,保障在网络任何单节点故障或者连接不通时,码头业务能正常运行,收发控制信号和数据不丢失。因此,本方案具备以下 3 个特征。

(1) 异构网络固移融合承载

本方案在港口原有承载网络的基础上通过分层部署 E-MEC 设备(码头部署分节点,集团部署中心节点),实现固移融合接入和统一承载。确保可实现网络的平滑升级,满足各类业务发展需求,同时可保证后续有计划、有步骤地向 IPv6 升级演进。通过 IP 承载网集中统一规划和建设,采用全网统一技术,实现业务策略、路由策略、技术选择和网络结构的一致性。IP 承载网在保证网络结构层次化的同时,采用大容量和高密度的设备以减少网络端到端的跳数。

(2) 边云协同架构

港口业务复杂,在实现有线无线融合组网的同时,还需要兼顾网络自动化改造、超大型综合管理平台的网络支撑能力,支持码头智能化数字化演进,以低成本方案的技术路线演进。每个码头部署 E-MEC 分节点,E-MEC 分节点主要提供边缘通信、边缘业务、边缘存储、边缘智能四大功能。各码头同时部署主备 E-MEC 分中心进行冗余保护。在集团位置部署 E-MEC 中心节点,同时

部署主备 E-MEC 中心节点进行冗余保护。E-MEC 节点部署 UCMO 统一通信管理编排器,负责各类资源整体分配优化。

(3) 广覆盖频谱选择

本方案通过低频谱(700 MHz 频段)进行 5G 网络覆盖,700 MHz 由于频谱低、波长长、覆盖远、深度覆盖能力强,适合作为大面积网络覆盖,组网成本最低。700 MHz 将在 mMTC 和 URLLC 场景发挥作用。700 MHz 广覆盖的低频组网形态通过采用独立(standalone, SA)组网支撑全业务服务。

2.3 港口 5G 边缘云关键功能

面向港口统一通信的 5G 边缘云的核心是在港口复杂环境下的通信感知融合,将 5G 通信和泛在感知 IoT 统一接入,形成港口超融合通信网络。港口 5G 边缘云功能架构如图 3 所示,边缘云的主要功能包括控制面功能、管理面功能、数据面功能、互联网网关、安全管理功能、统一通信编排器六大功能模块。

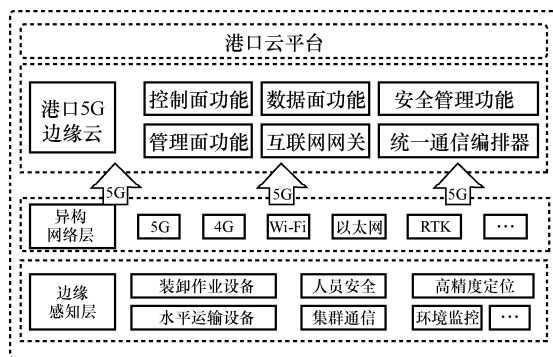


图3 港口 5G 边缘云功能架构

港口 5G 边缘云的主要功能设计如下。

(1) 控制面功能: 基于云原生和 SBA 服务化架构,并承载虚拟网元下沉,控制面功能使用轻量化接口通信,实现云边功能的解耦,完成 5G 边缘云的高效化、软件化、开放化快速接入和业务本地分流,并支持依据切片需求进行跨分布式部署。

(2) 管理面功能: 主要针对边缘云中南向接



入的设备信息管理的获取和转发,从而有效对灵活组网进行管理和控制。通过对接入边缘云的感知层设备的统一管理,对虚拟化资源和非虚拟化资源的拓扑、性能、警告等进行监控。

(3) 数据面功能:借助网络功能虚拟化与容器化技术,在边缘云服务器内部配置虚拟化 UPF 网元,支持 3GPP 定义的 N3、N4、N6、N9 接口的协议及数据转发。

(4) 互联网网关:用于连接外部网络,包括数据中心、中心云或其他相关机构,通过支持多种传输协议兼容,减轻路由器转发负载。

(5) 安全管理功能:网络中网络安全隔离策略应用和功能部署,对网络系统内的硬件、软件及相关数据进行保护。

(6) 统一通信编排器:对业务进行灵活管制、协同调度、弹性编排和负载均衡等策略实施,与中心云交互基于机器学习的训练推演模型,实现业务的最优自动化编排管理。

2.4 网络性能关键指标规划

基于前期研究工作中对港口网络通信的性能需求分析,对港口网络指标维度和考量方式进行设计,网络关键性能指标及要求见表 1。

表 1 网络关键性能指标及要求

关键性能指标	具体要求
速率	上行、下行需要支持多路视频和各类作业设备同时传输需求
终端接入能力	需要支持区域内有线、无线终端全接入
连接密度	需要支持单位区域内最大终端连接数
时延	满足岸桥远程控制、AGV 高精度定位可接受的时延范围
可靠性	港口业务需要满足电信级可靠要求
移动性	需要满足区域内最快速移动终端的切换连续性
带宽	需要满足港口业务峰值传输带宽
安全性	需要满足港口设备、业务的冗余备份,视频、生产、办公网等隔离
运营维护	需要支持港口日志、图形化管理、自发卡运营
统一管理	对港口内异构网络的统一管理

3 港口场景下的 5G 边缘云实现验证

3.1 场景描述

根据上述基于 5G 边缘云的港口统一通信方案设计思路,选取某港口集装箱码头堆场围绕港口 5G 边缘云的功能和稳定性进行实践验证。某港口集装箱码头的堆场形状如图 4 所示,基本上是一个矩形,长约 3 200 m,宽约 800 m,集装箱最高堆高为 15 m。某港口集装箱码头目前有桥吊、轮胎吊、集卡拖车等大型机械协同作业,现场电磁环境干扰以及高遮挡干扰情况较严重,现有的无线通信系统主要由 2.4 GHz、5.8 GHz Wi-Fi 网络以及千兆以内的数字集群通信系统组成,Wi-Fi 网络存在易受外部干扰、支持并发用户容量低、覆盖范围受限等通信瓶颈,导致人员通信、设备指令数据传输并不稳定,难以满足大型集装箱码头全域作业在码头装卸、水平运输、堆场堆存作业等多个环节的信息自动采集和集成控制的数据信息实时传输需求,从而对码头作业效率产生影响。相较于新建的集装箱码头,传统集装箱码头中的大多数岸桥、场桥仍需要人员在现场高空作业,虽然已经有一部分光纤、波导管等通信方案被提出,但是升级改造成本高、对设备本身 PLC 控制系统的通信模块改造难度高,非授权频谱带宽受限,灵活性差,可靠性、时延、速率等网络性能较差,无法满足码头向自动化作业改造转型的发展需求。

本文选取 5G 700 MHz 频段作为测试频段,使用 1 台 700 MHz 宏基站,由于测试现场 700 MHz 尚未清频,本次验证开通了 5 MHz NR 带宽,某港口集装箱码头的堆场形状如图 4 所示,在测试点位置部署 1 套边缘云设备,以及 1 台辅助验证的 5G 手持终端,通过连接现场作业设备,开展对本文提出的 5G 边缘云架构下的数据上/下行时延、边缘云控制面功能、现场信号极远点覆盖能力、边缘云切换恢复等维度功能和指标测试。

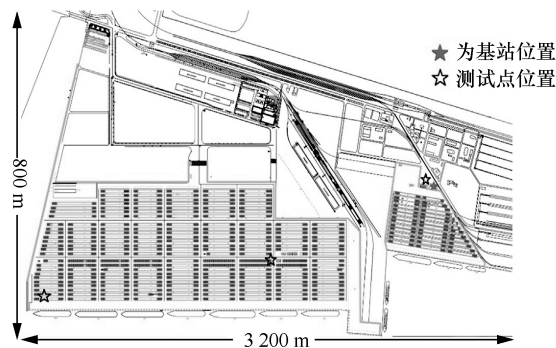


图4 某港口集装箱码头的堆场形状

3.2 方案验证与分析

5G 边缘云方案验证拓扑架构如图 5 所示, 考虑配置选项、节点性能和可部署性, 边缘云网络可以配置多个 UPF, 以实现所需容量的弹性扩展, 根据流量类型将流量引导到不同路径通道, 目的是验证基于上述 5G 边缘云方案架构下的港口主要机械设备的远程作业通信指令下发和作业视频回传、远距离 5G 集群通信覆盖能力, 并对前期 4G 专网和 Wi-Fi 网络的多个盲区做了进一步的极限测试。验证方案将 5G 边缘云平台上连港口码头云平台, 通过远程调试服务器配置, 对 5G 边缘云进行动态管理, 将已经在集装箱码头现场的 5G 基站北向接入 5G 边缘云, 数据指令锚定基站后转发给 5G 边缘云, 5G 边缘云通过 5G 基站对某港口码头的 5G 手持终端以及港口作业设备进行通信交互。选取码头前沿作业的集群通信终端进行 5G 通信功能改造, 用于远距离 5G 集群对讲通信

验证, 基于现有的港口设备岸桥的操作系统, 通过客户终端设备 (customer premise equipment, CPE) 转接数据, 进行 5G 通信改造, 用来传输作业指令和视频流拉取验证, 借助超低时延、超大带宽的 5G 通信网络对在大型机械上搭载的高清摄像机等辅助设备数据进行采集, 测试将港机的视频等信息发送给码头后端的操控指挥室, 指挥室通过 5G 通信网络将控制命令下发给港机系统, 实现对港机的远程自动化控制和作业画面高清视频监控。经过 5G 改造的手持通信终端, 通过 5G 基站将数据转发到 5G 边缘云平台, 港口的作业设备通过 CPE 接入 5G 基站, 将通信数据传输给边缘云, 边缘云通过 5G 基站对手持终端、作业设备进行数据获取和转发。

经过验证, 本文提出的基于 5G 边缘云的统一通信架构方案, 通过在某港口集装箱码头堆场部署 5G+MEC 边缘云, 保障港口核心生产数据不出港区, 实现网络本地化运维管理, 围绕 MEC 方案稳定性、5G NR 空口能力、5G 终端改造的兼容性和集装箱堆场的 5G NR 信号覆盖能力展开分析。主要对 4 项关键指标进行了验证与分析, 包括上/下行时延、5G 边缘云控制面、现场信号极远点 3 km 覆盖、系统切换恢复, 具体指标见表 2。在港口场景下的 5G 上/下行时延实现了最小时延小于 6 ms, 主要原因是虽然 5G 空口时延技术可以实现最小时延小于 1 ms, 但是实际应用业务上线

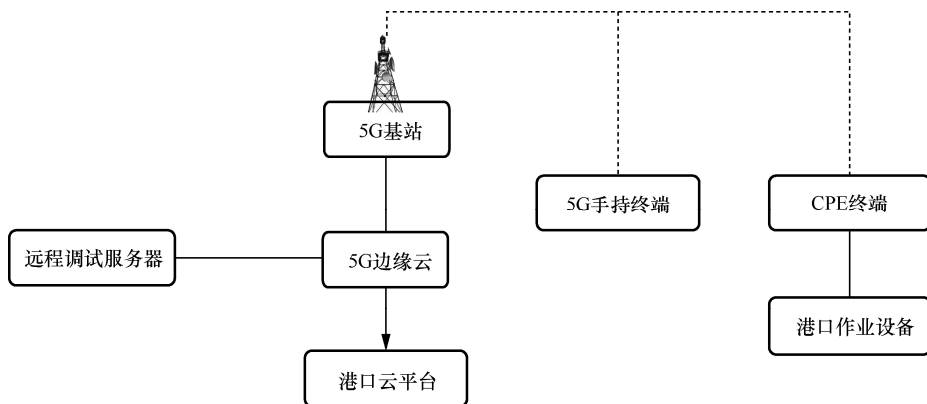


图5 5G 边缘云方案验证拓扑架构



后,网络通信时延高低的关键在于网络业务的时延,通过不断优化通信策略和波频算法,本方案实测时延小于 6 ms,满足港口大型机械远程控制指令下达对网络传输的需求。5G 边缘云控制面指标主要用于衡量边缘云整体系统的承载能力,确保用户面接口具备所需的吞吐量,在港口虚拟化网络功能的复杂环境中,对混合类型流量按 UE 吞吐量进行测试,经过验证,实现最高吞吐率为 900 Mbit/s,满足港口大型机械的视频回传需求。在方案覆盖区域下设计最远点现场信号覆盖性指标,主要考虑作业堆场和前端码头的移动机械(如轮胎吊、集卡司机对讲通信等)需要服务全场跨区域作业,系统内多用户干扰将对通信产生一定干扰。分析测试结果发现,信号覆盖强度中等,信号接收质量较好(主要受到传输距离和范围内其他通信信号以及集装箱等货物金属物质遮挡干扰),信噪比较好(主要是由于 5G 通信中 MIMO 技术对干扰进行抵消),通过对码头极远点进行测试,室外能够发起各种业务,可获得一定速率的数据业务,基本满足码头跨区域作业任务的对讲通信和作业指令传输需求。港口系统面临着复杂的业务系统协同工作,系统切换恢复指标作为衡量异常情况下边缘系统保护机制的重要指标,通过对网络连接和安全性接入服务边缘化体系进行融合及优化,实现硬切换恢复时间均小于 5 min,满足港口码头作业的状态保存和功能恢复需求,以及对边缘云的用户变更进行状态切换的需求,从而提升边缘与云之间的无缝连通性。5G 边缘云通信指标见表 2。

表 2 5G 边缘云通信指标

指标	描述
上/下行时延	连续 ping 服务器 323 795 次不丢包,最小时延为 5.620 ms
5G 边缘云控制面	最高吞吐率为 900 Mbit/s
现场信号极远点 3 km 覆盖	RSRP 为-94 dBm, RSRQ 为-10 dBm, SINR 为 11 dBm
系统切换恢复	最长硬切换恢复时间为 5 min

经过验证分析,采用独立组网模式的港口 5G 边缘云统一通信架构,将改进上行发射通道,利用 5G 多频段基站、超级上行技术增加上行带宽,可以将边缘计算节点灵活部署在不同的网络位置,开展对时延、带宽有不同需求的边缘计算业务,进一步实现面向港口通信的高电磁干扰、遮挡环境下的 5G 网络全面覆盖、低时延传输、业务高可靠通信、核心数据安全可控。

4 结束语

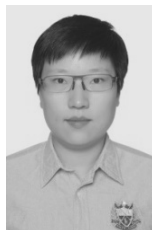
本文提出的基于 5G 边缘云的港口统一通信方案,充分考虑了当前港口高遮挡、高电磁环境干扰等复杂情况对全连接网络覆盖的限制,通过将港口各类码头现存的异构网络包括以太网、RFID、RTK 定位、4G、IoT 专网等统一接入 5G 边缘云内,将边缘侧的网络资源充分统一调度与管理,实现面向港口数据边缘汇聚的有线无线融合网络,为港口向自动化、智能化发展提供了网络基础设施支撑。基于分布式的边缘云部署和管理,灵活弹性的组件配置提供了网络快速部署,每个边缘云既可以独立管理下挂的各类大型机械作业设备、通信终端,又可以实现边缘云间的信息交互。基于 SDN 的动态感知网络最优接入策略,实现港口海量生产作业等数据的本地分流与处置优化。基于 QoS 机制的港口网络切片策略将港口生产、办公、视频等多类型业务进行区分与安全隔离,结合多点备份和多链路连接策略,实现基于切片网络的业务安全运行和多模多网冗余。接下来,5G 边缘云的港口统一通信方案一方面将在差异化性能、多类型业务承载、基于 AI 的智能分析等方向做进一步的研究探索,另一方面将在数字孪生系统构建、超大型综合智能管理平台等方面做融合演进研究。

参考文献:

- [1] NOWAK T W, SEPCZUK M, KOTULSKI Z, et al. Verticals in

- 5G MEC-use cases and security challenges[J]. IEEE Access, 2021(9): 87251-87298.
- [2] ROSTAMI A. Private 5G networks for vertical industries: deployment and operation models[C]//Proceedings of 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). Piscataway: IEEE Press, 2019: 433-439.
- [3] IMT-2020(5G)推进组. 智慧港口 5G 专网应用白皮书[R]. 2020. IMT-2020 (5G) Promotion Group. White paper on smart port 5G private network application[R]. 2020.
- [4] 董石磊, 赵婧博, 黄鹏. 物流智能仓储的 5G 专网性能[J]. 电信科学, 2021, 37(9): 153-158.
DONG S L, ZHAO J B, HUANG P. Performance of logistics intelligent storage scene in 5G private network[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(9): 153-158.
- [5] 陈俊明, 王岱, 封镭, 等. 港口 5G 专网方案探讨[J]. 通信技术, 2021, 15(5): 71-78.
CHEN J M, WANG D, FENG L, et al. Discussion on 5G NPN solution for port[J]. Information and Communications Technologies, 2021, 15(5): 71-78.
- [6] DATTA S K, BONNET C. MEC and IoT based automatic agent reconfiguration in industry 4.0[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [7] KHERANI A A, SHUKLA G, SANADHYA S, et al. Development of MEC system for indigenous 5G test-bed[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 131-133.
- [8] 杨术, 陈子腾, 崔来中, 等. 功能分发网络: 基于容器的智能边缘计算平台[J]. 软件学报, 2021, 32(12): 3945-3959.
YANG S, CHEN Z T, CUI L Z, et al. Function delivery network: container-based smart edge computing platform[J]. Journal of Software, 2021, 32(12): 3945-3959.
- [9] 李克武. 面向数字未来的智慧港口建设方案[J]. 港口科技, 2020(12): 7-9.
LI K W. Smart port construction scheme for the digital future[J]. Port Science & Technology, 2020(12): 7-9.
- [10] MLIKA Z, CHERKAOUI S. Network slicing for vehicular communications: a multi-agent deep reinforcement learning approach[J]. Annals of Telecommunications, 2021, 76(9/10): 665-683.
- [11] 罗本成. 从新加坡港看全球智慧港口的发展趋势[J]. 中国港口, 2020(11): 5-9.
LUO B C. The development trend of global smart ports from the port of Singapore[J]. China Ports, 2020(11): 5-9.
- [12] 陈云斌, 王全, 黄强, 等. 5G MEC UPF 选择及本地分流技术分析[J]. 移动通信, 2020, 44(1): 48-53.
CHEN Y B, WANG Q, HUANG Q, et al. 5G MEC UPF selection and traffic offloading technology analysis[J]. Mobile Communications, 2020, 44(1): 48-53.
- [13] 张力方, 程奥林, 赵雪聪, 等. 5G 专网关键技术及设计部署方案研究[J]. 邮电设计技术, 2021(10): 1-8.
ZHANG L F, CHENG A L, ZHAO X C, et al. Study on key technology of 5G private network and deployment scheme[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021(10): 1-8.
- [14] 张艳. 基于 5G 切片专线的组网技术和实现方法[J]. 电信科学, 2021, 37(10): 143-151.
ZHANG Y. Networking technology and implementation method based on 5G slice private line[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(10): 143-151.
- [15] 袁满, 刘晓燕, 王科. 5G 多频段组网和优化策略研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(10): 16-21.
YUAN M, LIU X Y, WANG K. Research on 5G multiband networking and optimization strategy[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(10): 16-21.
- [16] 胡煜华, 沈文超, 王振华. 5G 网络时间同步研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 34(8): 82-86.
HU Y H, SHEN W C, WANG Z H. Research on clock synchronization in 5G network[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2021, 34(8): 82-86.
- [17] 卢建福, 程明, 蒋清宏. 1588v2 协议在 PTN 中的实现[J]. 光通信技术, 2021, 45(9): 59-62.
LU J F, CHENG M, JIANG Q H. Implementation of 1588v2 protocol in PTN[J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(9): 59-62.
- [18] 王燕伟, 霍思宇, 张澜. 智慧港口高精度定位技术的应用讨论[J]. 邮电设计技术, 2021(7): 55-60.
WANG Y W, HUO S Y, ZHANG L. Discussion on application of high-precision positioning technology for smart ports[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021(7): 55-60.

[作者简介]



宁岩 (1987-), 女, 上海宽带技术及应用工程中心实验室技术负责人, 主要研究方向为 5G/6G 关键技术、AIoT 边缘智能计算、算力网络及垂直工业领域行业应用。



张蕾 (1961-), 女, 青岛港国际股份有限公司副总工程师、首席信息官, 主要研究方向为港口信息技术、港口智能化技术、工业互联网技术、工业大数据技术、现代物流技术。



陆肖元 (1975-), 男, 上海宽带技术及应用工程技术研究中心副主任、教授级高级工程师, 主要研究方向为新型通信网络与数字孪生技术等。