

作为 IEEE802 网桥的 5G LAN 系统架构

5G LAN System Architecture as IEEE802 Bridge

李涵宇(天津科技大学电子信息与自动化学院,天津 300457)

Li Hanyu(School of Electronic Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

摘要:

为了实现 5G 网络对局域网业务的支持,解决现有 5G 局域网技术推广问题,提出了作为 IEEE802 网桥的 5G 局域网系统架构。首先说明了 5G 局域网技术的应用场景和现状,并阐述了现有 5G 局域网技术的方案及其局限性。然后进行针对性的改进,把 3GPP 标准终端解耦为终端设备和移动终端,把移动终端改进为 IEEE802 标准端口,与核心网、接入网和承载网组合成为 IEEE802 标准网桥。实现了 IEEE802 局域网与 5G 无线通信网络的融合,在融入 IEEE802 技术的基础上推动 5G 局域网技术的应用。最后对该架构的应用前景进行了展望。

关键词:

5G 局域网;终端;终端设备;移动终端;IEEE802 网桥;端口;站;MAC 中继实体

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2026.01.018

文章编号:1007-3043(2026)01-0087-06

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

In order to support 5G local area network (LAN) services and solve the problem of promoting the existing 5G LAN technology, the 5G LAN system architecture as the bridge of IEEE802 is proposed. First, the application scenario and status quo of 5G LAN technology are described, and then the technical solutions and limitations of existing 5G LAN are described. Then the targeted improvements are put forward. The 3GPP standard UE is decoupled into terminal equipment (TE) and mobile terminal (MT), and MT is upgraded into IEEE802 standard port, which is combined with core network, access network, and bearer network to form an IEEE802 standard network bridge. It realizes the integration of IEEE802 LAN and 5G wireless communication network, and promotes the application of 5G LAN technology on the basis of integrating IEEE802 technology. Finally, the application prospect of this architecture is forecasted.

Keywords:

5G LAN; UE; TE; MT; IEEE802 bridge; Port; Station; MAC relay entity

引用格式:李涵宇. 作为 IEEE802 网桥的 5G LAN 系统架构[J]. 邮电设计技术, 2026(1): 87-92.

1 概述

2020 年 7 月, 3GPP 发布了第 2 个 5G 版本 R16, 实现了国际电信联盟定义的三大应用场景, 包括增强移动宽带(eMBB)、超可靠低延时通信(uRLLC)和海量机器通信(mMTC), 并针对垂直行业的需求进行了扩展

和增强^[1]。在这三大场景中, 应用局域网(LAN)业务的 3 个垂直行业典型场景为家庭局域网中的数据共享、企业办公网络中的设备互联以及工厂局域网络下的工业控制器和执行设备互操作^[2]。为了支持这 3 个应用场景, 促进 5G 无线通信技术在局域网场景的应用, 基于 5G 无线技术构建局域网的 5G LAN 技术应运而生。在 3GPP R16 中, 5G 无线通信技术扩展了 3GPP 所定义技术的应用范围, 提出为满足住宅、办公、企业和工厂领域细分市场的要求, 5G 需要提供与局域网类

基金项目: 国家级创新训练项目(202510057043)

收稿日期: 2025-12-16

似功能的服务,并且通过5G的高性能、远程无线接入、移动性和安全性等特性对局域网进行改进。3GPP称这种类型的服务为5G LAN类型服务,对5G LAN类型服务的功能提出了详细要求,随后对满足5G LAN类型服务的系统架构和实现方法进行了标准化,这就是目前的5G LAN技术^[3]。

现有的5G LAN技术由于其本身的技术局限以及现有局域网技术的根深蒂固,虽经通信技术(CT)运营商和设备供应商以试点工程的方式大力推广,但并未在市场上实现商业化。在5G ToB和工业互联网的实践中,除了几项试点工程的报道,尚未见到现有5G LAN技术的广泛应用。

为了打破5G LAN在技术上的局限性,本文在阐述现有5G局域网技术的方案及其局限性后,在其基础上提出新的5G LAN系统架构——作为IEEE802网桥的5G LAN系统架构。这种技术架构可用于企业办公网络中的设备互联以及工厂局域网络中的工业控制器和执行设备互操作。

2 现有5G LAN技术

2.1 技术方案

在通用5G系统架构的基础上,3GPP对用户面架构进行了改进,增加2种改进的用户面架构作为选项,分别为基于本地交换机的非漫游用户面架构以及基于N19口的非漫游用户面架构^[1]。针对这3种用户面架构(原有架构和2种改进架构),3GPP根据不同的场景需求定义了3种转发方式,分别为原有的基于N6接口的转发(即通用5G系统架构的用户面架构下的转发方式)、基于Local Switch的转发以及基于N19接口的转发^[1]。

在通用5G系统架构的用户面架构下的转发方式中,2个UE必须分别作为客户端通过外部的数据网络(DN)服务器来相互通信。DN服务器作为2个终端(UE)之间的代理,而不是2个UE直接通信,这是传统3GPP网络中的客户端—服务器(CS)通信模式。而在改进的2个架构中,2个UE之间的通信不再需要通过外部的DN服务器^[4]。

为了与上述3种5G LAN用户面架构相配合,构成3种5G LAN系统架构,实现5G LAN类型的服务需求,3GPP还提出了5G虚拟网络组(Virtual Network Group, VN Group)的概念^[1]。5G VN Group组由一组使用专用通信的UE组成,通信只在组内UE之间进行,用于5G

局域网类服务。实际上,3GPP把一个5G VN Group的3GPP网络视为一个局域网,由3种5G LAN用户面架构支持的5G VN Group实现了类似局域网的服务。准确来说,这种5G LAN技术应该称为5G VN Group技术。目前在最新的5G版本R19中,5G LAN技术只有5G VN Group一种,因而目前实际上是把5G VN Group技术等同于5G LAN技术。

2.2 技术局限性

作为一种新的局域网技术,5G LAN无法与市场上占统治地位的传统局域网技术竞争。3GPP提出5G LAN是为了提供类似局域网的服务,但是在3GPP希望满足的住宅、办公、企业和工厂领域的细分市场中,已经存在着真正的局域网——IEEE802局域网,其中最常用的是IEEE802.3 Ethernet。Ethernet技术在1973年出现之后,曾经面对IEEE802.4令牌总线、IEEE802.5令牌环、FDDI等多种局域网技术的竞争,但是经过几十年的竞争,唯有IEEE802.3 Ethernet技术得以应用至今,目前可以把局域网等同于以太网。作为一种新推出的局域网技术,5G LAN与IEEE802技术不存在继承与发展关系,而是竞争关系。从目前市场形势来看,5G LAN找不到非其不可的应用领域,而在IEEE802的应用领域中又无法对其进行替代。

3 作为IEEE802网桥的5G LAN系统架构

3.1 设计思路

本文的方案旨在基于IEEE802标准提出一种新的5G LAN系统架构,它融合了5G通信技术和IEEE802标准网桥技术,能够作为IEEE802标准网桥。从IEEE802标准方面来说,该方案所提出的新5G LAN系统架构,是一种新的基于5G通信技术的IEEE802标准网桥的实现方案。从5G通信方面来说,该架构所演进出的新网桥不是新的或者说不是与IEEE802网桥相对立的技术,而是符合IEEE802标准要求并融入了5G通信技术的新IEEE802网桥。因此,该方案能够解决5G LAN与IEEE802网桥的市场竞争问题。同时,这将推动5G LAN技术在市场中的推广,使得eMBB、uRLLC和mMTC这三大5G无线通信技术的特性真正应用于3GPP所提出的局域网业务的3个垂直行业典型场景。

由于IEEE802.1标准规定,一个网桥至少包括一个连接网桥端口的媒体接入控制(MAC)中继实体,且至少有2个端口,另外包括至少一个生成树协议(STP)实体的高层实体^[5]。因此本方案将3GPP标准的5G

LAN 系统架构中的 UE 改进为 IEEE802.1 标准的端口与端站,并增添 MAC 中继实体以及 STP 高层实体,而这也使得新的 5G LAN 系统架构演化出了符合 IEEE802 标准的虚拟局域网(VLAN)网桥架构和 MAC 网桥架构。新网桥至少要具备 IEEE802.1 标准下的端口和连接端口的 MAC 中继实体以及一个 STP 高层实体,并且新网桥在基于 5G 通信技术的情况下可实现 STP 协议的实施、VLAN 的配置以及其他 IEEE802 标准所规定的功能。同时,该架构也具备 3GPP 标准下的 5G LAN 架构的报文转发方式。由于新的 5G LAN 系统架构能够作为 IEEE802 标准网桥,因此报文的转发无需像标准 5G LAN 那样涉及 OSI 标准下的 3 层及以上的通信,报文只需在 2 层进行转发,因此摒弃了基于 N6 接口的流量转发方式。综上,新系统架构具有基于本地交换机的转发方式以及基于 N19 接口的跨 UPF 的转发方式。

IEEE802 局域网中,端站与端口是相连接的,需要与端口一同进行改进。3GPP 标准的系统架构将用户面(UP)功能与控制面(CP)功能分离,这为本文的改进提供了基础^[1]。

3.2 设计网桥的端口和端站

3GPP 标准的 5G 系统架构和现有的 5G LAN 系统架构都没有端口这一属于 IEEE802 标准的概念,可以从 3GPP 标准现有 UE 概念改进而来。3GPP 的 UE 配置如图 1 所示^[6],改进而成的端口(Port)和端站(End Station)的配置如图 2 所示。

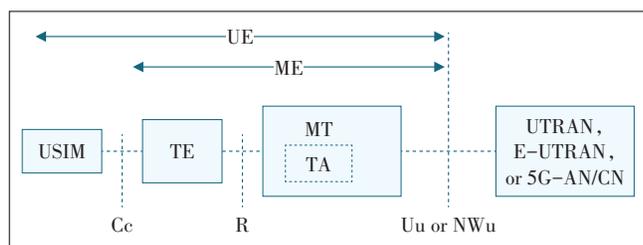


图 1 PLMN 接入参考配置

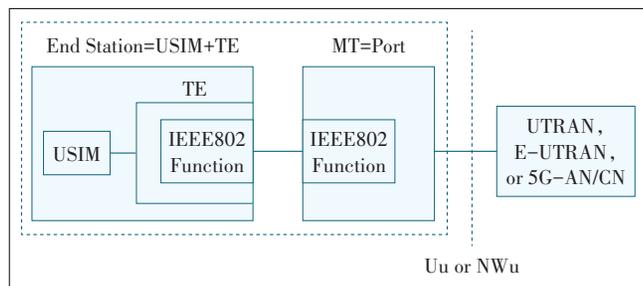


图 2 作为 IEEE802 网桥的 5G LAN 系统架构的 UE 配置

图 1 中的移动设备(Mobile Equipment, ME)可以进一步细分为几个实体,如移动终端(Mobile Terminal, MT)(执行无线电传输和相关功能的实体)和终端设备(Terminal Equipment, TE)(包含端到端应用程序的实体,如连接到移动电话的笔记本电脑或终端设备)。

图 2 中的 UE 配置分为端口和端站 2 个部分且均符合 IEEE802 标准。其中,端口从 3GPP 标准的 MT 扩展 IEEE802 功能而来,既能实现 3GPP 标准功能,又能实现 IEEE802 功能,作为 IEEE802 标准的端口且支持增强内部子层服务(Enhance Internal Sublayer Service, EISS)或内部子层服务(Internal Sublayer Service, ISS)。MT 作为执行无线电传输和相关功能的移动终端为网桥的端口赋予了移动性。管理人员可以在 5G 系统中按需求配置网桥标识和其所具有的端口数量并编号以组成一个网桥,配置工作可由网络管理员完成,也可以通过 AF 或其他网络功能动态管理。

图 2 中的端站由 3GPP 标准的通用用户识别模块(USIM)、TE 以及新扩展的 IEEE802 功能模块构成。从该架构的设想看,端站需要通过 IEEE802 标准网线与端口近距离连接,端口与交换机的 MAC 中继实体远距离无线连接,而传统的 IEEE802 网桥中端口和 MAC 中继实体为近距离有线连接,这也导致了端口固定,没有移动性。

3.3 系统架构及其转发方式

作为 IEEE802 网桥的新 5G LAN 系统架构,转发报文功能从现行 5G LAN 架构的 3 种转发方式改进而来。基于 N6 的报文转发方式需要通过外部数据网络 DN,这与 IEEE802 局域网的概念不符。DN 涉及 OSI 三层及以上的通信,而 IEEE802 标准网桥仅限于 OSI 二层通信,故作为 IEEE802 网桥的 5G LAN 系统架构中不应存在 DN,也就不会有基于 N6 接口的流量转发方式。最为契合 IEEE802 局域网概念的转发方式是基于本地交换机,也就是同一个协议数据单元会话管理锚点用户面功能(PSA UPF)进行转发,而基于 N19 接口的转发方式涉及 2 个 PSA UPF 之间的转发,存在中转且传送距离远,可能在时间性能方面不及基于本地交换机的转发方式,但是也可以作为一个选项。基于本地交换机转发方式的作为 IEEE802 网桥的 5G LAN 系统架构如图 3 所示,基于 N19 接口转发方式的作为 IEEE802 网桥的 5G LAN 系统架构如图 4 所示。

3.4 设计 MAC 中继实体并配置 STP 高层实体

上述 2 种作为 IEEE802 网桥的 5G LAN 系统架构,

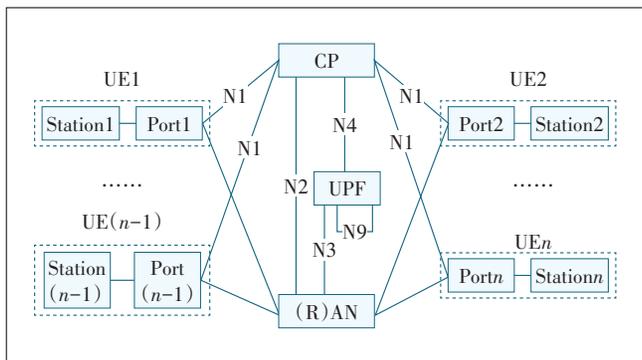


图3 基于本地交换机的作为 IEEE802 网桥的 5G LAN 系统架构

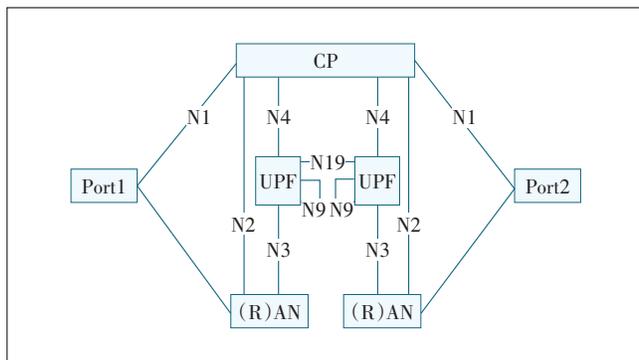


图6 基于 N19 接口的 2 个端口的 MAC 中继实体架构

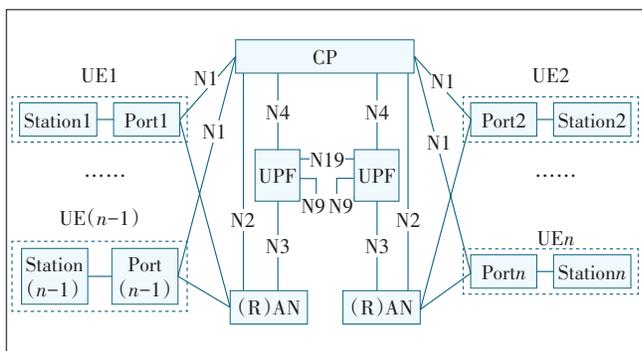


图4 基于 N19 接口的作为 IEEE802 网桥的 5G LAN 系统架构

分别形成 2 种 MAC 中继实体,基于本地交换机转发方式的 2 个端口的 MAC 中继实体架构如图 5 所示,基于 N19 接口转发方式的 2 个端口的 MAC 中继实体架构如图 6 所示。

除增加 MAC 中继实体外,还应在 5G 系统 AF 或其他控制面网络功能中配置 STP 高层实体,实施 STP 协议功能,从而符合 IEEE802 标准的要求。

3.5 符合 IEEE802 标准的 VLAN 和 MAC 网桥架构

通过上述改进,在完成作为 IEEE802 网桥的 5G LAN 系统架构设计的基础上,设计了符合 IEEE802 标准的端口、MAC 中继实体,配置了 STP 高层实体,三者

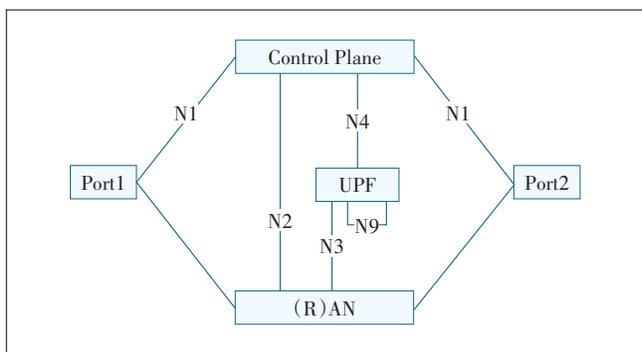


图5 基于本地交换机的 2 个端口的 MAC 中继实体架构

结合演化出符合 IEEE802 标准的 VLAN 网桥架构和 MAC 网桥架构。根据网桥是否支持 VLAN,网桥分为 VLAN 网桥和 MAC 网桥 2 种,VLAN 网桥架构的 MAC 中继实体负责处理与媒体访问方法无关的功能,如在桥接端口之间中继帧、过滤帧和学习过滤信息。它使用每个网桥端口提供的 EISS。MAC 网桥与 VLAN 网桥架构的主要区别在于,它不使用 EISS,而是使用 ISS。

作为 5G LAN 系统架构的 IEEE802 标准网桥,可在 5G 系统的控制面功能中配置 IEEE802 标准所规定的过滤数据库、学习、老化、泛洪、VLAN 等功能,其端口也可以互相连接形成拓扑。外部功能与以往交换机类似,但内部基于 5G 实现。

4 应用场景分析

“4G 改变生活,5G 改变社会”^[4]。5G 技术出现之初,人们曾寄予厚望,希望在 4G 推动了消费互联网的大发展之后,5G 能推动被视为互联网下半场的产业互联网的大发展。为实现这一目标,政府举全国之力发动全社会为 5G 寻找应用场景。然而,经过几年的推广,发现产业互联网是一个碎片化的市场,在与已有碎片化的工控标准的红海竞争之中,5G 只能作为一个补充,在垂直行业的边边角角上去谋得一丝生存空间^[7]。由于 5G 覆盖范围远小于 4G 的覆盖范围,CT 运营商的投资成本远高于 4G,但是既没有在消费互联网领域出现新的爆款应用,又没有在产业互联网领域得到预期的大发展,导致 5G 的技术优势并没有得到充分发挥和利用,CT 运营商还是只能像在 4G 时代那样卖流量收回成本。目前移动通信正在向 5G-A 和 6G 发展,在技术发展浪潮的推动下,CT 运营商又面临新一轮的投资,而是否能依靠新技术创造新的业务收入还存在不确定性。这不仅是现有 5G LAN 技术 5G VN

Group 面临的窘境,也是整个 5G 技术面临的窘境。

本文所提出的 5G LAN 系统架构自带应用场景,并依靠 5G 的技术优势革新互联网从而获得市场空间,从现在狭窄的垂直行业 5G+ 概念转换为未来广阔的各行各业“5G 即互联网”概念,从而使得 CT 运营商从老本行 CT 行业进入信息技术(IT)行业的互联网基础设施运营领域,获得新的业务收入。因为这种 5G LAN 系统架构本身就是 IEEE802 标准的网桥,即 IT 行业互联网基础设施中的交换机,可以在传统交换机的应用场景中找到适用场景。作为 IEEE802 标准交换机,该 5G LAN 架构支持某些文献重点提到的 5G VN Group 应用场景,如支持二层通信、支持广播等^[4],不存在技术问题。

从主流交换机供应商根据应用场景营销产品的情况来看,目前交换机的应用场景主要分为数据中心网络、园区(也有称之为公司)网络和工业网络。另外,在现有交换机产品未涉及的领域,如家用网络业务等,能否找到应用场景也值得探讨。

4.1 数据中心网络

经过 20 多年的发展,数据中心物理拓扑从接入—汇聚—核心三级网络架构演进到基于 Clos 的 Spine—Leaf 架构,但不变的是高性能交换机在其中所起到的基础作用^[8]。与一直使用的传统形态的交换机相比,本文 5G LAN 架构作为交换机的性能未来可期,但是考虑到数据中心一般处于一个建筑物室内,没有必要使用无线连接。从目前来看,数据中心网络不是本文 5G LAN 架构的应用场景。

4.2 园区(公司)网络

园区网络是企业或其他机构办公普遍使用的 IT 基础设施,与 3GPP 所期望垂直行业典型场景企业办公网络中的设备互联相契合,也契合 5G toB 的应用场景,但是之前这一领域只存在 5G+ 互联网的狭窄概念,未曾设想 5G 可以在其中起到普遍的 IT 基础设施的作用。根据园区网络规模的大小,物理网络通常可分为经典三层树形组网架构与极简二层树形组网架构。经典三层树形组网架构包含核心层、汇聚层和接入层,极简二层树形组网架构只包含核心层和接入层 2 层,接入层直接上行接入核心层^[9]。本文 5G LAN 架构作为交换机可以取代园区网络中应用最广泛的接入层交换机和汇聚层交换机。

a) 核心层是园区数据交换的核心,连接园区网的各个组成部分,如数据中心、汇聚层、出口区等,核心

层负责整个园区网络的高速互联。网络需要实现带宽的高利用率和网络故障的快速收敛,通常需要部署高性能的核心交换机^[9]。核心层交换机具有数据中心交换机类似的技术要求,且一般处于一个建筑物室内,也无必要采用无线连接。

b) 汇聚层是接入层与核心层园区骨干网之间的网络分界线,主要用于转发用户间的“横向”流量,同时转发到核心层的“纵向”流量。汇聚层可作为部门或区域内部的交换核心,实现与区域或部门专用服务器的连接^[9]。由于汇聚层是区域或部门的交换核心,通常与本区域或本部门的终端层设备组成一个局域网,而由于 5G 海量连接的技术特性,本文提出的 5G LAN 架构作为交换机能够使得一个局域网只有一个交换机且一个端口只有一个终端,这个交换机可以处于一个 5G 切片内,汇聚层交换机被取代了或者说汇聚层被取消了。

c) 接入层为用户提供各种接入方式,是终端接入网络的第一层。接入层通常由接入交换机组成,接入交换机在网络中数量众多、安装位置分散,通常是简单的二层交换机^[9]。采用本文提出的 5G LAN 架构作为交换机,用户接入交换机和部门/区域汇聚交换机可以是同一个交换机,仍然可以被称为接入层交换机,使得园区网络都变为极简二层树形组网。由于用户散布于整个园区(有多个建筑),本文提出的 5G LAN 架构作为交换机能最大程度上提供灵活性,并且免除了使用传统交换机作为接入交换机的布线成本,以及部署 Wi-Fi 无线系统的成本。在完善规划与部署 5G 通信设施的理想条件下,一旦 5G 通信设施完成部署,无论以后用户发生什么变化,都不会存在物理层面上的施工(如铺设光纤等),这在很大程度上免除了园区所属企业或机构的后期改造成本,因为端口和交换机 MAC 中继实体的连接是无线的,且端口的隔离与扩展都可以通过切片实现。现有 5G 技术特性完全能满足办公要求,比现在园区办公使用的附加于有线系统之上的 Wi-Fi 无线通信强大的多。

综上所述,把 5G 同园区网络联系起来,意味着园区中的 5G 网络必然是 5G 专网。现有园区网的基础设施一般作为最终客户的园区所属企业或机构的资产外包给专业的 IT 公司运营维护,如果采用本文 5G LAN 架构作为园区网接入交换机,那么园区网基础设施理应外包给 CT 运营商运营维护,因为 CT 运营商在各地本来就设有运营维护组织,无论从技术上,还是

从成本上,或者管理能力上,都优于上述 IT 公司为承接某个项目临时成立的运营维护组织。因此,由于新技术为最终客户所带来的价值,CT 运营商进入了新行业,获得了新收入,同时由于客户承担了重资产的投入成本,消减了 CT 运营商的投资成本。至于 CT 运营商能否使用最终客户的 5G 网络提供 CT 服务,这是需要另外讨论的问题。

4.3 工业网络

工业网络是工业企业普遍使用的工业 IT 基础设施,即原先寄予厚望的 5G 应用的首要场景——产业互联网,与 3GPP 所期望的垂直行业典型场景(工厂局域网络下的工业控制器和执行设备互操作)相契合,也契合 5G toB 与 5G+ 产业互联网的应用场景。目前工业网络的主流技术工业以太网,作为园区网络的一部分,已经实现了与园区网络架构的融合,一般由工业企业自行运营维护。与传统园区网络类似,工业以太网目前普遍使用传统形态的交换机,而目前工业 5G 使用 5G 路由器接入工业以太网,主要应用在对移动设备的控制,如起重机、自动引导车等^[10]。另外,工业以太网技术标准繁多,呈现碎片化态势,每个标准都因为有着某方面的技术优势而占有自己的一部分市场份额。5G 技术具有超可靠低时延等技术特性,确实契合工业以太网实时通信的要求。本文提出的 5G LAN 架构作为工业以太网的接入交换机,在技术上具有可行性,并且具有打破工业控制标准碎片化现状和统一工业控制标准的潜力。

4.4 家庭网络

家庭网络是家庭普遍使用的 IT 基础设施,与 3GPP 所期望的垂直行业典型场景家庭局域网络中的数据共享相契合。另外,无能力或无必要自建园区网络的小型企业或机构,也应归入这一类应用。目前家庭网络大多采用光纤入户方式,再加上 Wi-Fi,足够满足家庭使用需求,没有必要进行本文所提出的 5G LAN 架构的改进。但是这一现状是基于人口密集居住区,且能够进行光纤敷设工程。在人烟稀少或不便进行光纤敷设工程的地方,就可以使用该技术提供家庭网络服务,使用附近的基站无线接入,在专用切片中设置所需端口,为用户提供一个具有三层接口的交换机。

至于目前经过数年群策群力所发展的 5G toB 应用,可以基于上述 5G LAN 系统架构实现,具体情况具体分析,理论上不影响其功能实现。

5 结束语

本文介绍了一种新的 5G LAN 系统架构。该系统架构是 5G 标准的基础,其科学性在于推动 5G 技术发展满足各行各业的需求。这种技术架构至少可以满足局域网业务的 3 个垂直行业典型场景中的第 2 种和第 3 种,即企业办公网络中的设备互联以及工厂局域网络下的工业控制器和执行设备互操作。因为在企业和工厂的局域网络所在区域中 5G 通信是必不可少的,而且传统的有线办公网络、有线工业以太网和 Wi-Fi 的功能都可以由 5G 通信所代替,所以语音通信、数据通信和实时通信都可以由 5G 通信实现,IT、OT 都融合到 CT 之中,真正实现 5G 一网到底。

参考文献:

- [1] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS):3GPP TS 23.501 [S/OL]. [2025-02-23]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [2] 谭仕勇,倪慧. 5G 标准之网络架构:构建万物互联的智能世界[M]. 北京:电子工业出版社,2020.
- [3] 3GPP. Service requirements for the 5G system:3GPP TS 22.261 [S/OL]. [2025-02-23]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [4] 陈婉璐,穆佳. 5G LAN 应用场景与关键技术分析[J]. 邮电设计技术,2021(9):982-986.
- [5] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks--bridges and bridged networks:802.1Q-2022[S/OL]. [2025-02-23]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10004498>.
- [6] 3GPP. GSM - UMTS public land mobile network (PLMN) access reference configuration:3GPP TS 24.002[S/OL]. [2025-02-23]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [7] 宋梁,陈铭松,蒋林华,等. 5G toB 从理论到实践[M]. 北京:电子工业出版社,2022.
- [8] 魏月华,陈晓,张征. 数据中心网络架构和底层协议演进[J]. 中兴通讯技术,2021,27(3):51-55.
- [9] 沈宁国,于斌,黄明祥,等. 园区网络架构与技术[M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社,2022.
- [10] 吴博,刘妹琦. 数字化时代工业通信与识别技术和应用[M]. 北京:机械工业出版社,2023.

作者简介:

李涵宇,天津科技大学电子信息与自动化学院,本科在读,主要研究方向为 5G、数据通信等。

