

光接入网络智能化运维与体验保障

Intelligent Operation and Maintenance and Service Guarantee for Optical Access Network

胡蕾雅, 朱景龙, 赵子飘(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

Hu Leiya, Zhu Jinglong, Zhao Zipiao (China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China)

摘要:

近年来,在产业政策的牵引下,千兆光网快速发展,已成为支撑社会数智化转型的坚实光底座。千兆业务发展驱动光接入网从单一带宽提升向千兆、全光连接、极致体验、智能化等能力综合提升演进,运营商加速从带宽经营全面转向体验经营。面对上述发展趋势,通过分析光接入网的业务演进需求及面临挑战,提出了新型智能光接入网整体架构,并对光接入网差异化承载及智能化运维关键技术进行探讨分析。

关键词:

智能化光接入网; PON+FTTR 切片; 智能化运维; 光层 OAM

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.08.006

文章编号: 1007-3043(2025)08-0024-06

中图分类号: TN913

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

In recent years, driven by industrial policies, the gigabit optical networks develop rapidly and have become a solid foundation to support the digital transformation of society. Moreover, gigabit services have catalyzed the evolution of optical access networks from bandwidth improvement to comprehensive enhancements including all-optical gigabit connections, ultra-high-quality experiences, and intelligent networks, and telecom operators are accelerating the transition from bandwidth-operation to experience-operation. In response to these trends, it analyzes the requirements of user services and challenges faced by optical access networks. An innovative architecture of intelligent optical access networks is proposed while the key technologies of differentiated service delivery and intelligent operation and maintenance are also fully discussed.

Keywords:

Intelligent optical access network; PON+FTTR slicing; Intelligent operation and maintenance; Optical OAM

引用格式: 胡蕾雅, 朱景龙, 赵子飘. 光接入网络智能化运维与体验保障[J]. 邮电设计技术, 2025(8): 24-29.

1 概述

近年来,我国持续实施数字经济跃升工程,将千兆光网等新型基础设施作为推动产业转型升级、促进高质量发展的重要抓手。国家层面陆续出台信息通信顶层设计和产业政策,加速推动千兆光网发展。截至2024年底,我国固定宽带接入用户规模达6.7亿户,千兆用户达2.07亿户,光纤到房间(Fiber to the Room, FTTR)用户规模已突破3 500万户,千兆建设成效显

著^[1]。

云游戏、云VR等千兆新型业务的普及发展,对接入网络提出了大带宽、低时延、高可靠、网络切片等差异化承载网络需求^[2-3]。随着国家“人工智能+”行动的开展^[4],光接入网与算力、AI不断融合,赋能网络管控能力数智化。运营商正从带宽经营全面转向体验经营。

面向上述发展趋势,基于有线宽带网络发展所面临的需求和挑战,本文提出了智能光接入网总体架构,阐述了光接入网差异化承载及智能化运维的关键技术,并通过产业推进及标准引领推动光接入网数智

收稿日期: 2025-07-10

化发展。

2 接入网发展的需求及挑战

2.1 业务差异化综合承载需求

新兴业务对无源光网络(Passive Optical Network, PON)的稳定低时延、高可靠性、差异化综合承载提出了更高要求。

面向家宽市场,云游戏、极速云存储、3D云交互业务涌现,4K/8K平面视频向XR/裸眼3D等空间视频演进。VR/云游戏等强交互、高清视频类应用的发展对网络带宽、时延、丢包率提出了更高要求,如云VR需要100 Mbit/s~1 Gbit/s的带宽,4K云游戏除了带宽要求外还要求时延小于5 ms^[5]。

面向垂直行业市场,PON网络逐渐向工业、教育、医疗等领域渗透,工厂AOI质检、虚拟仿真教学、3D阅片、远程医疗等新兴业务对光接入网提出了更高的要求。在工业场景中,工业质检除了工业相机采用原始数据回传带来的高带宽需求外,当其工作在高帧率、实时采集模式下时,对网络传输时延的确定性要求也非常高,比如120 FPS要求抖动不大于1帧(8 ms)^[6]。同时,工业园区中存在办公、安防等不同业务,这些业务之间需要相互隔离,实现独立的运维管理。光接入网需满足不同业务的差异化综合承载需求,以保障用户体验。

2.2 运维挑战

光接入网作为连接用户的“最后一公里”网络^[7-8],其运维质量直接影响着用户的直观业务体验。随着网络技术迭代加速和业务场景复杂化,传统光接入网运维体系面临挑战。从接入网的多元异构设备故障定位难题,到引入FTTR带来的拓扑复杂性升级,运维压力逐级增长。同时,用户对网络中断的容忍时间已从小时级缩短至分钟级,这对接入网故障响应速度提出了更苛刻的要求。

a) 多元异构设备引发的运维定界难题。当前光接入网系统中的光线路终端(Optical Line Terminal, OLT)设备、FTTR设备、光网络单元(Optical Network Unit, ONU)设备均为各厂家异构组网,涉及数十家厂商。当用户体验受损时,需同时分析OLT板卡光模块性能、光链路中分光器插损值、ONU接收灵敏度等参数,而在异构环境下,需要结合各设备信息进行协同分析,制约了运维效率。

b) 引入FTTR架构的拓扑复杂性挑战。FTTR的

引入解决了用户Wi-Fi信号覆盖不足的问题^[9-12],光接入网的拓扑也从一级P2MP网络演变为两级P2MP网络,使光链路损耗计算模型更为复杂。同时,在故障定位时需要考虑更多的问题,如FTTR主从设备引起的Wi-Fi信道干扰、主从设备供电异常、房间内光纤弯曲损耗等,大大提高了接入网运维的复杂度。

面对以上需求及挑战,光接入网一方面需要不断增强网络基础能力,通过构建大带宽、低时延、高可靠的传输能力,满足业务需求;另一方面需引入AI技术,通过对业务质量的实时感知、AI故障定界定位、智能预测,构建从被动响应到主动分析告警的接入网智能化运维体系。

3 接入网智能化目标架构

接入网作为接入运营商网络的第一跳入口,面临着业务差异化承载的需求及运维难度大的挑战,需要提升网络的带宽、时延和确定性等网络基础能力,还需融合网络感知和网络切片能力,并将以上能力向下延伸,直达用户终端,支撑端到端面向服务的差异化网络和链路承载资源的匹配和调度,从而提升用户体验。智能化接入网总体架构如图1所示,主要包括基础接入网、管控分析层及算网服务层。

a) 基础接入网。光接入网从FTTH进一步向FTTR延伸,构建了PON+FTTR协同的新型架构。同时,根据接入业务特点,进一步定义了长、中、短3层AI智能化闭环模型。长周期闭环指10 min以上的AI闭环模型,典型场景包含业务切片路由自动调整、AI节能等,此类闭环需要网管平台参与完成。中周期闭环指秒级AI闭环模型,典型场景包含光路调优、通道化接口参数调优等。短周期闭环指毫秒级AI闭环模型,典型场景包括Wi-Fi调优、Wi-Fi MAC重传、服务质量(Quality of Service, QoS)队列调优等。OLT引入智能板,一方面智能板可以下发推理模型,协助OLT、FTTR完成短周期的决策闭环。另一方面,智能板负责边缘数据采集、数据预处理和压缩,向上层OMC/EMS管控系统主动推送数据,协助OMC/EMS管控系统完成中/长周期的数据分析和闭环决策下发。

b) 管控分析层。基于PON+FTTR的集中端到端管控技术,通过Telemetry、光层操作、管理和维护(Operation, Administration and Maintenance, OAM)、消息队列遥测传输(Message Queuing Telemetry Transport, MQTT)等技术协议实时收集OLT设备、FTTR设备及

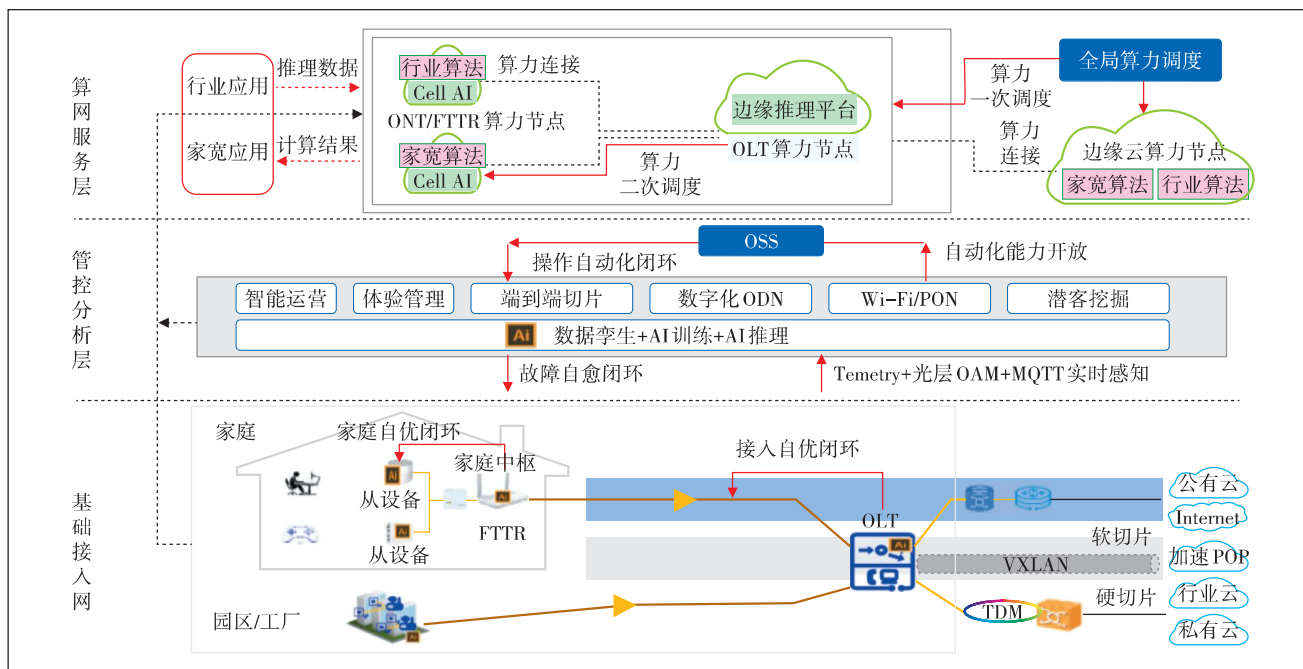


图1 智能化接入网总体架构

业务的流量、运行状态和异常数据,叠加数据驱动和AI学习,实现接入网故障的自动感知预测以及网络辅助决策甚至自主决策。同时,通过集中管控,实现PON+FTTR的协同网络切片配置与业务的差异化承载。

c) 算网服务层。依托光接入网端侧FTTR算力及边侧OLT算力连接组成了接入网的“算网服务层”,结合算力全局调度及域外算力节点形成全局算力网络。接入算力网络不仅可提供边缘计算的基础设施,基础接入网和管控分析层的网络内生数据也可以开放给行业及家庭应用,比如终端类型感知数据、应用体验数据、网络能力数据等。目前已实现基于智能板的算力开放技术,可以在智能板卡上加载运营商APP,同时屏蔽各智能板厂家差异性。

4 光接入网智能化关键技术

4.1 Telemetry+光层OAM+MQTT构建高速数据采集底座

接入网智能化运维数据包括网络设备产生的数据及用户业务感知数据。要实现网络体验可运维可量化,需关注实际业务的用户体验指标而不仅是设备KPI。为了及时获取和感知这些数据,需构建高速的数据采集底座。

a) PON侧。Telemetry是一项可提供实时高速数据采集功能的技术^[13],OLT设备通过Telemetry协议向上层平台上报网络KPI信息,智能板通过镜像上下游流量,进行流解析及时钟恢复后,分别计算业务上下游丢包、时延等指标,然后将采集指标结构化上报给分析平台。网络KPI及业务KPI采集及上报示意图如图2所示,基于OLT设备及智能板可实现网络KPI与业务KPI的全量秒级采集,以支撑上层平台的关联分析。Telemetry采集项及采集间隔要求如表1所示,智能板业务KPI采集项要求如表2所示。

b) FTTR侧。FTTR网络引入原生管控接口。基于光层OAM协议,实现OLT直管MFU和SFU,从而实现OLT对MFU、IFDN以及SFU光路信息的直接采集。同时,构建上层MQTT协议,支持发布/订阅消息模式,实现Wi-Fi等数据的周期采集。

光接入网通过Telemetry、光层OAM和MQTT实现了高速、全量的数据采集,构建起覆盖网元、物理链路、逻辑链路、应用流等各层的数据,并能够覆盖光宽带网络各网络分段的大数据底座,支持网络运维向智能化演进。

4.2 智能业务识别及AI故障定界定位

4.2.1 业务小类识别

智能板通过特定五元组识别、深度包检测及深度

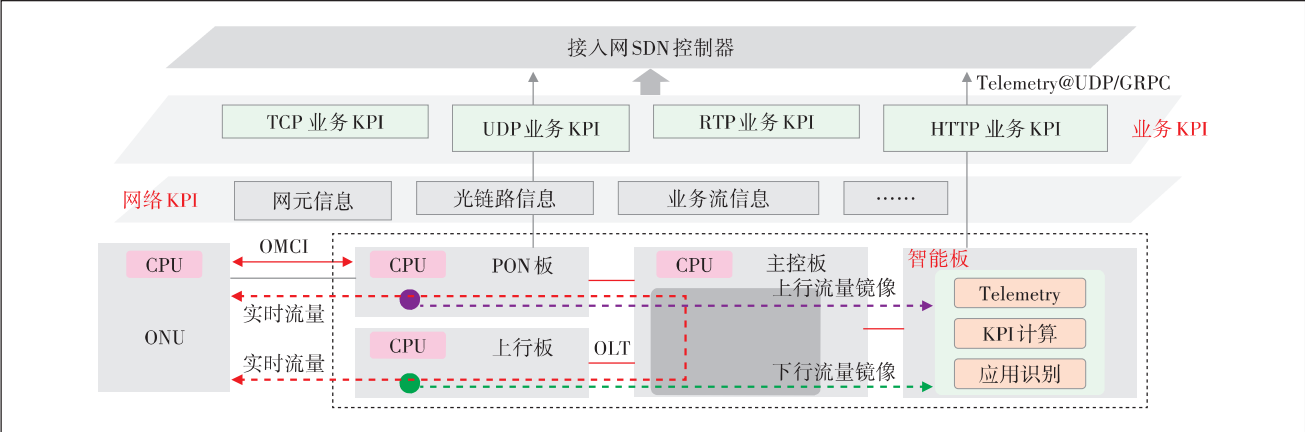


图2 网络KPI及业务KPI采集及上报示意

表1 Telemetry采集项及采集间隔要求

分类	采集项	采集间隔
流量	上联口流量	≤1 s
	PON口流量	≤1 s
	队列流量	≤1 s
	ONU流量	≤3 s
	业务流流量	≤3 s
光链路	OLT光模块	≤1 min
OLT信息采集	OLT信息	≤1 min
ONU信息采集	ONU在线信息(近端)	≤5 min
	ONU上行链路信息(近端)	≤5 min
	ONU光模块信息(远端)	≤15 min
	ONU状态及下行链路信息(远端)	≤15 min

表2 智能板业务KPI采集项要求

各业务类型	采集指标
DNS	主要包括DNS客户端与服务端IP、请求次数、成功响应数、请求平均响应时延
TCP	主要包括RTT时延、RTT时延抖动、丢包率、速率、TCP建链成功率及TCP建链时延
UDP	主要包括上下行速率、上下行发送字节数
RTP	主要包括上下行发送字节数、速率、丢包、抖动指标
HTTP/HTTPS	主要包括HTTP请求成功率、HTTP首次GET响应时延和HTTPS响应时延

流检测技术,动态精准识别用户使用的各业务小类。通过识别各业务小类并对比各段业务KPI数据,可以为故障定界定位提供依据。同时通过业务小类识别,也可以在业务转发时智能选路,为用户业务提供相应的差异化承载。

4.2.2 AI故障定界定位

上层网管控制器利用人工智能及大数据技术分析Telemetry、光层OAM、MQTT协议上报的多种业务指标并进行结果的可视化呈现,通过网络质量评估、用户感知画像、感知评估等操作,实现对网络质量和质差用户的精准识别。网管通过采用AdaBoost、K-means等机器学习算法进行异常点识别与异常数据清洗,实现特征工程、异常指标识别。基于分段业务KPI信息,准确定位导致质差的应用或网元,实现故障问题的定界(见图3)。通过综合弱监督学习模型、卷积神经网络等AI算法,时空关联精准分析质差产生的根因,实现网络故障问题的定界定位。针对不同的故障类型,网络采取相应的优化措施,通过主动整治及派单的方式提高运维效率。

4.3 PON+FTTR协同端到端切片体验保障

面向不同应用的差异化承载需求,光接入网应根

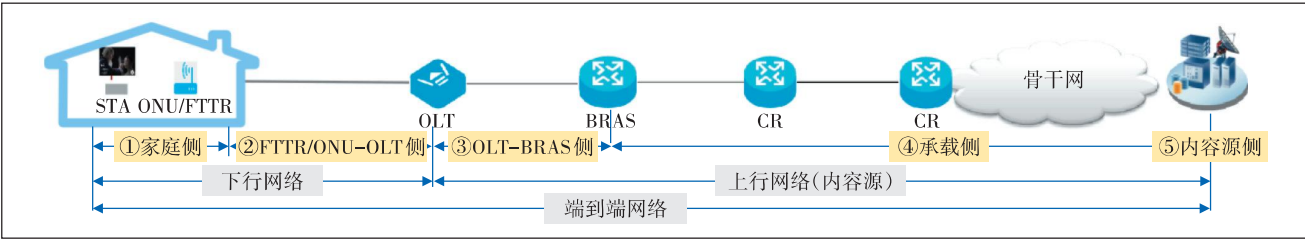


图3 故障定界示意

据应用的SLA 按需给用户 提供带宽、时延、抖动、误码率等网络质量差异化配置。通过协同调度 FTTR Wi-Fi、FTTR 主从设备 DBA 与 PON DBA, 实现整网 Wi-Fi 与光层 QoS 协同, 实现业务端到端的有序收发和低时延调度, 构建从有线到无线的接入网端到端直达用户业务和终端的 QoS 能力。同时, 网管控制器具备对不同切片的独立管理和运维能力, 可满足不同业务的相互隔离需求, 保障用户体验。

PON+FTTR 网络的集中管控是 PON+FTTR 端到端切片能力构建的基础。FTTR 作为新一代全光组网技术, 将 PON 的光层 OAM 能力延伸至 FTTR 主设备及从设备, 从而实现两段 P2MP 网络端到端原生集中管控, 是进一步构建千兆网络能力的关键技术。

PON+FTTR 协同端到端切片技术由管理面协同及数据面协同实现, 其架构如图 4 所示。管理面协同基

于 PON+FTTR 协同管控基础, 通过 YANG 模型及 eOMCI 协议实现切片的整网一体化配置。OMC 向 OLT 发送接入网段应用切片配置模型, 包括切片关联终端、保障业务类型、需满足的接入与家庭网络侧切片业务 SLA。数据面协同转发包括 FTTR 设备内、PON 链路、PON 设备的协同。FTTR 设备具备业务识别能力, 并可将识别到需保障的业务信息通知到各从设备, 同时需配置相应的 Wi-Fi 调度、主从设备链路调度、上行 WAN 口调度策略, 以转发不同优先级的应用。在 PON 链路及设备侧, 通过 DBA、HQos 等技术实现各网络切片的独立转发。OLT 上行需具备多边缘组网技术, 根据不同业务类型转发至不同的城域网类型, 从而实现接入和城域网的切片拉通。

同时, 基于 OLT 内置的智能板可实时感知切片业务 KPI 技术及体验预测技术, OLT 设备可实时感知业

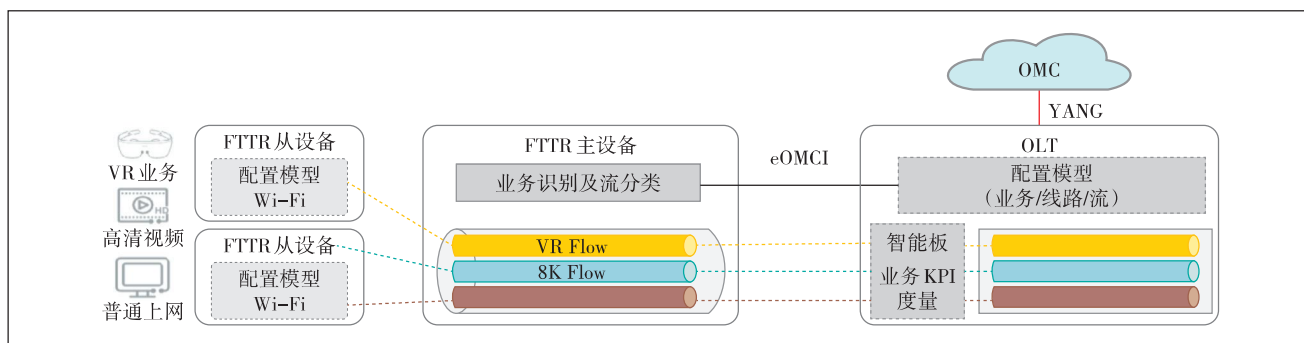


图4 PON+FTTR协同端到端切片架构

务 KPI 是否满足需求, 并结合上联多边缘组网技术, 实现切片动态智能选路调度, 保障用户体验。在 PON 网络切片、PON+FTTR 网络切片中, OLT 设备可向 FTTR 主设备/ONU 下发业务受损指示, FTTR 主设备/ONU 通过分析比较 Wi-Fi 信道配置, 进行 Wi-Fi 调优。

4.4 算力开放实现云边端协同

随着智家智企新业务发展, 算力需求快速增加。边缘计算可以就近处理数据, 减少数据传输延迟, 提高数据处理效率和安全性。通过在 OLT 设备提供边缘算力服务, 同时与 FTTR 算力融合, 可以为用户提供更便捷高效的服务。

目前, OLT 设备上的智能板卡已实现算力开放, 运维模型可以通用容器的方式安装和部署在智能板卡中(见图 5), 同时通过标准化接口调用板卡的算力、存储、业务识别及 SLA 度量能力。智能板卡支持按需加载/卸载各类运维软件, 屏蔽不同厂家智能板差异。未

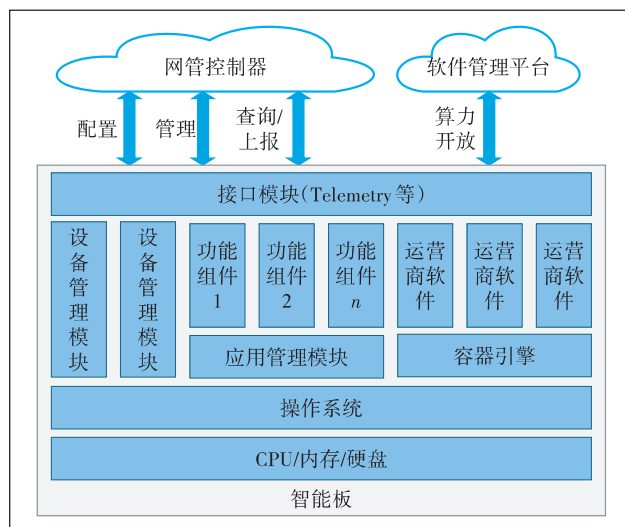


图5 智能板算力开放架构

来, 基于云边端协同架构, 接入网可在网管控制器、

OLT设备、ONU/FTTR设备侧分层部署智能化运维模型,分级实现Wi-Fi侧、OLT侧等故障优化,简化运维流程,提升运维效率。

5 标准进展及产业推进

近几年,光接入网智能化与差异化保障已成为业界关注的焦点,CCSA等标准组织也陆续启动了相关技术方案的标准化工作^[14-16]。在PON+FTTR端到端切片实现业务差异化承载方面,《接入网切片总体技术要求》行业标准与《PON与FTTR协同的端到端切片技术研究》研究课题为PON+FTTR端到端网络切片提供了技术支撑。《接入网运维智能化技术要求:总体》及系列标准重点围绕不同智能化运维分级及相关技术进行了研究。

当前中国移动已在浙江、广东、陕西、福建、天津等超过20个省、市部署了基于智能板+Telemetry技术的接入网智能运维系统,以提升接入网运维能力及效率。以某省移动为例,该系统能够精准定位网络问题,大大缩短了装维人员现场排障及修复时间,将传统的投诉问题处理时长从4h缩短为10min,投诉处理效率提高23倍。基于多维数据复杂处理与异常分析预测网络潜在风险,在投诉发生前进行主动告警,家宽网络质量类投诉客户总量同比降低41%。

6 总结

光接入网作为重要的网络基础设施,为数字经济的发展提供了强大的支撑。随着国家千兆普及发展,光接入网智能化以及用户体验保障成为运营商角逐市场的核心竞争力。光接入网需要不断增强网元IT和CT能力融合,在网管、OLT及FTTR/ONU侧集成算力及AI能力,通过网络与业务KPI数据全量采集分析,实现用户质差分析及故障定界定位等智能化能力,提升接入网智能化运维能力。同时,进一步构建PON+FTTR集中管控能力,通过PON+FTTR协同端到端切片技术为用户提供面向业务的差异化体验保障能力,打造面向体验的智能化光接入网。

参考文献:

- [1] 工业和信息化部网站. 2024年通信业统计公报解读:通信业高质量发展再上新台阶[EB/OL]. [2025-01-26]. https://www.gov.cn/li-anbo/bumen/202501/content_7003026.htm.
- [2] 宽带发展联盟. 固定家庭宽带高质量业务体验研究白皮书[R/OL]. [2025-02-30]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201906/>

P020190627496635216501.pdf.

- [3] 中国信息通信研究院. 中国宽带发展白皮书(2023年)[R/OL]. [2025-02-30]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202401/P020240326609069117205.pdf>.
- [4] 国务院国有资产监督管理委员会. 国务院国资委部署深化中央企业“AI+”专项行动[EB/OL]. [2025-02-01]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588020/n2877938/n2879597/n2879599/c32881575/content.html>.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. 基于电信网的云化虚拟现实网络技术要求:YD/T 4911-2024[S]. 北京:人民邮电出版社,2024.
- [6] 中国移动. 中国移动万兆网络白皮书[R/OL]. [2024-05-15]. https://www.10086.cn/aboutus/news/groupnews/index_detail_49804.html.
- [7] 顾华玺,罗勇. 全光接入网架构与技术[M]. 北京:清华大学出版社,2022.
- [8] 中国移动通信有限公司研究院. NGOAN技术发展白皮书[R/OL]. [2025-02-30]. <https://download.s21i.faiusr.com/13115299/01/ABUIABA9GAAgr-OfpAYogODYew.pdf? f=NGOAN% E6%8A% 80%E6%9C% AF% E5%8F% 91%E5%B1%95%E7%99%BD% E7%9A%AE%E4%B9%A6.pdf&v=1686632879>.
- [9] ZHANG D C, ZHU J L, LIU X, et al. Fiber-to-the-room: a key technology for F5G and beyond[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(9): D1-D9.
- [10] ZHANG S, LI J W, ZHU J L, et al. Consideration and practice of coordinated management of access and fiber in premises networks[C]// 2024 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Denver: IEEE, 2024: 46-50.
- [11] ZHU J L, LI J W, ZHANG N N, et al. First field trial of FTTR based on native management and control architecture for 5G small cell backhaul[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego: IEEE, 2023: 1-3.
- [12] 李俊玮,虞淼,张珊,等. 千兆时代FTTR技术发展和标准化研究[J]. 信息通信技术与政策, 2023, 49(10): 9-15.
- [13] VELASCO L, GONZÁLEZ P, RUIZ M. An intelligent optical telemetry architecture[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego: IEEE, 2023: 1-3.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. 接入网切片总体技术要求: YD/T 4613-2023[S]. 北京:人民邮电出版社出版,2023.
- [15] 刘姿杉,程强. 迈向自智的宽带接入网[J]. 通信世界, 2023(1): 44-46.
- [16] 中华人民共和国工业和信息化部. 接入网运维智能化技术要求 总体: YD/T 4847-2024[S]. 北京:人民邮电出版社,2024.

作者简介:

胡蕾雅,毕业于北京邮电大学,硕士,主要从事接入网智能化与体验保障领域相关技术研究、标准制定及现网推进工作;朱景龙,毕业于北京大学,博士,主要从事接入网和FTTR领域等相关技术研究、标准制定及现网推进工作;赵子飘,毕业于北京邮电大学,博士,主要从事接入网智能化领域相关技术研究、标准制定及现网推进工作。