

光传输网络在数据通信中的应用与发展分析

常 婧

国网长治供电公司, 山西 长治 046011

[摘要]光传输网络依靠波分复用以及光交叉连接这两种主要的技术手段,塑造出了一种大容量、低时延、高可靠性的物理层传送体系,成为了数据通信基础设施的重要组成。由于 5G、6G、人工智能大模型训练、数据中心互联等各种业务对于带宽、时延提出了更高的要求,光传输网络正在由原来的静态管道向智能开放网络进行技术的转变。国际电信联盟的 ION-2030 技术报告认为,未来光网络不是单一的传输通道,它应该具有感知、计算、人工智能等智能技术并且有可持续发展的理念的一体化基础设施。对光传输网络在各种情况下应用的实践及未来的发展方向进行系统的分析,对网络规划和技术选择有实际的指导作用。

[关键词]光传输网络;数据通信;智能化

DOI: 10.33142/sca.v9i9.20364

中图分类号: TN9

文献标识码: A

Application and Development Analysis of Optical Transmission Network in Data Communication

CHANG Jing

State Grid Changzhi Power Supply Company, Changzhi, Shanxi, 046011, China

Abstract: Optical transmission networks rely on two main technical means, wavelength division multiplexing and optical cross connection, to create a high-capacity, low latency, and high reliability physical layer transmission system, which has become an important component of data communication infrastructure. Due to the higher requirements for bandwidth and latency in various services such as 5G, 6G, artificial intelligence large model training, and data center interconnection, optical transmission networks are undergoing a technological transformation from static pipelines to intelligent open networks. The ION-2030 technology report of the International Telecommunication Union believes that future optical networks are not a single transmission channel, but should have integrated infrastructure with intelligent technologies such as perception, computing, artificial intelligence, and sustainable development concepts. A systematic analysis of the practical applications and future development directions of optical transmission networks in various situations provides practical guidance for network planning and technology selection.

Keywords: optical transmission network; data communication; intelligentization

引言

数据通信业务呈指数级增长给底层传送网络带来了不断加大的扩容压力以及架构难题。视频流媒体、分布式存储、算力协同等应用使骨干网和城域网流量年均增长率一直保持较高水平,传统的以时分复用为基础的传送技术已经不能满足大颗粒 IP 业务的承载要求。光传输网络依靠自身在容量扩充、传输距离上的物理优势,慢慢由骨干网向城域接入、数据中心内部延伸,成了支撑数据通信业务的主要技术体系。同时提出 2030 年以后全球光网络的发展蓝图,下一代光网络要满足 6G、人工智能、数据中心、家庭和企业宽带和专线接入等各个领域对于光网络的

需求和技术发展。在此背景下,对光传输网络的技术特点和应用情况加以整理,探究其发展趋向,有益于促进网络基础设施的更新换代。

1 光传输网络的基本原理与技术特点

光传输网络是由国际电信联盟电信标准分局 G.872 系列建议所定义的,它的主要思想就是把光层和电层传送功能分开来,在光域内完成信号的复用、交换和保护。网络体系从功能上可以分为传送平面、控制平面、管理平面这三个层次。传送平面是光信号的物理传输和交叉连接场所,控制平面是路由计算和资源自动发现的地方,管理平面是性能监测和故障管理的地方。节点设备形态上,基于

电交叉的光传送体系设备以光通路数据单元为交叉颗粒,支持各种电层保护恢复功能;基于光交叉的可重构光分插复用器设备是以波长为交叉颗粒,减少光电光转换环节,但是需要处理色散、非线性效应和光信噪比等模拟传输的限制问题。

光业务单元技术的加入属于近几年来 OTN 领域的一项重要发展趋向。该技术可以支持 2Mbit/s 到 10Gbit/s 颗粒度的多业务统一承载,具有灵活调度和开放接口的特点,很好地解决了传统 OTN 技术承载小颗粒度以太网业务时带宽利用率低的问题。光传输网络相比传统的 SDH 技术和早期的 WDM 系统在传送效率、管理粒度、扩展性等各方面有明显的优势。SDH 用 VC 颗粒来实现交叉调度,在处理大带宽数据业务的时候会出现交叉容量瓶颈;WDM 系统虽然可以提供丰富的波长资源,但是没有对单个波长内部子速率通道进行监控和管理的能力。OTN 是在光层上叠加电层 ODU 交叉矩阵,可以实现大颗粒业务的波长级疏导,也可以完成小颗粒业务的子波长汇聚和调度,从而满足大容量传输和灵活接入的双重要求。

2 光传输网络在数据通信中的应用需求

2.1 数据通信业务对光传输网络的需求

数据通信业务多样化发展给底层光传输网络提出分层的要求。就容量而言,云计算和人工智能训练集群之间需要有单纤传输容量达到 Tbit/s 的要求,并且还要具有可扩展的能力来满足算力规模不断扩大的需求。时延上高频交易、远程存储访问、实时交互类应用对端到端时延有严格的限制,需要网络提供非常高的确定性极低的转发延迟。从可靠性角度来说,关键业务数据的传送要达到 99.999% 的可用性标准,网络要有多种保护以及快速恢复手段。算力网络技术的发展使得算力、网络和业务应用之间相互协调的需求越来越明显,OTN 由于具有高速、大带宽、低时延、高可靠等特点,是算力网络的重要承载基础。这些需求不是孤立存在的,而要求光传输网络在同一个物理平台上提供不同的服务。

2.2 光传输网络的主要技术优势

光传输网络在数据通信领域具有优势,是因为它的技术架构有内在特点。波分复用技术可以在一根光纤上同时传输几十到上百个波长的信号,配合偏振复用和高阶调制方式,单纤容量可以比现有的要大很多^[1]。ODU 交叉连接具有物理层的硬管道隔离功能,不同的业务流之间互不影响,不需要依靠统计复用来保证带宽独占,对于金融专线、政务网络等高安全等级业务来说尤为重要。OTN 开销字节体系给运维管理赋予了诸多监测和管理手段,融

合数字孪生技术之后能达成对光通道性能的准确建模与评价,而且依靠 AI 及大数据剖析可以完成网络能耗的动态改善。该技术特性让光传输网络在大容量骨干传输,高品质专线接入,数据中心互联这些地方有着无法替代的作用。

3 光传输网络在数据通信中的应用分析

3.1 光传输网络在骨干通信网络中的应用

骨干网属于光传输网络最主要的应用场景,负责大量信息传输工作。骨干层面用 ROADM、OXC 做主要节点,形成全国性的光层调度平面。提高单通道速率、系统容量成为骨干网代际演进的主要动力,AI 技术的迅猛发展又使骨干网络传输容量需求水涨船高。目前单通道速率已经由原来的 400G 向 800G 甚至更高 1.6T 发展,提高波特率、改善调制码型等方式在有限的频谱资源里达到更高的传输效率^[2]。频谱扩展上 C 波段和 L 波段联合使用可以大大增加可用频谱资源,S 波段和 U 波段的研究也开始进行。骨干 OTN 网络依靠光层波长级调度和电层子波长级疏导的相互配合,把各种业务有效地汇集到相应的长途链路上去,从而减小了中间节点的处理开销。

3.2 光传输网络在城域通信网络中的应用

城域网存在着接入层汇聚流量和核心层下行业务两种压力,对光传输网络的灵活调度能力有更高的要求。传统的城域网架构以南北向流量为主,随着内容分发网络下沉、边缘计算节点部署,东西向流量占比不断上升,网络架构正朝着以云为中心的扁平化方向发展。随着业务流量方向的变化,城域网络由原来的南北向架构变成了以云为中心的 low latency 高品质 T 型网络架构。城域场景下 OTN 设备要兼顾大容量传送和灵活上下路,城域节点一般都要承担汇聚和疏导的功能。基于 OSU 技术的细粒度调度方案在城域接入层有应用前景,可以以 2Mbit/s 为最小颗粒度对各种业务流进行统一承载和灵活调度,比传统的 ODUk 交叉有更好的带宽利用率。OSU 技术使用轻量化的帧结构来降低封装时延和芯片处理的复杂度,使城域接入层设备可以在同一个硬件平台上同时承载政企专线、家庭宽带和 5G 回传等业务,从而达到多业务融合接入和精细化运营的目的。

3.3 光传输网络在数据中心互联中的应用

数据中心互联属于光传输网络增长最快的领域之一。由于分布式存储、异地灾备以及多活数据中心的出现,数据中心之间要形成高带宽、低时延的物理链路。面向智算互联、云网融合、高价值专线业务,对于高可靠、低中断确定性承载的需求越来越迫切。在数据中心互联场景下,

光传输网络所提供的硬管道隔离功能使得不同的租户业务流可以在物理上得到隔离,从而防止出现由于统计复用而造成的拥塞问题。中兴通讯已经发布了世界上第一个 800G C+L 一体化可插拔模块和 1.6T C+L 一体化固定模块,使用先进的光电封装和高性能的 DSP 补偿算法,可以达到超长距离、超大容量的传输。由于单波速率和模块集成度的提高,光传输设备正逐渐向数据中心内部移动,在机架间互连、集群内通信等方面起着越来越重要的作用。

3.4 光传输网络在 5G 及新型通信业务中的应用

5G 通信业务对承载网络有前传、中传、回传三重层次的要求。前传场景要保证大带宽、低时延来支持基站同集中单元间的高速数据交换,回传场景要具备灵活汇聚、差异承载的能力,满足各个切片业务带宽、时延的需求。光传送网是重要的信息基础设施,它面临着物理窃听、设备入侵、管控劫持等种种威胁,以内生安全为理念的防护体系包含物理层、设备层、管理层等各个方面^[3]。5G 承载中 OTN 硬管道给高价值企业专线、关键任务型业务提供确定性时延、带宽保证,与统计复用分组传送网络相补充。另外,卫星互联网和天地一体化网络的发展促使光传送网向空间延伸,空间光传送网作为空-天-地-海一体化网络的光层传输基础,也成为了研究的热点。面向算力网络和 ION-2030 的发展,光网络传输基础能力会持续提高,T 比特高速传输、反谐振空芯光纤以及系统是重要的发展方向。

4 光传输网络的发展趋势与优化策略

4.1 向高速率与大容量方向发展

提高单纤传输容量是光传输网络技术的发展方向。单通道速率提高上,相干光通信技术用高阶调制方式和先进的数字信号处理算法把单波速从 100G 提到了 400G、800G 甚至 1.6T。提高单通道速率一直被看作是提高骨干容量的主要途径,从相干 100Gbps 到 400Gbps,频谱效率提高了 33%,容量也提高了 33%。在多通道扩展上,拓宽可用频谱范围来增加波长通道的数量属于一种重要的方向。C 波段和 L 波段的组合方案已经在现网中得到了规模部署,使可用的频谱由原来的 4THz 扩展到现在的 8THz 以上,系统的容量得到了倍增。空芯光纤因为具有超低时延、高非线性容忍度等特点,所以具有在中短距上的较大应用前景。这些技术发展一起使得光传输网络达到了 Pbit/s 级系统容量。

4.2 向智能化与网络协同方向发展

网络智能化属于光传输网络对付运维复杂性以及业务动态性的关键手段。从控制层面来说,软件定义网络架构的加入使得光传输网络的控制平面和转发平面更加分开,上层应用可以利用标准化接口来调用网络资源,从而达到业务按需发放、带宽动态调整的目的。根据 OSU 技术的灵活入多云方案可以实现一条专线灵活入云,企业新增分支入云可以在几分钟内完成开通,专线可以根据业务流量的大小自动调节带宽。运维方面用人工智能技术对光性能劣化进行预测,对故障原因进行定位,给网络优化提供决策支持,从而减少人工的运维工作。数字孪生技术给网络仿真以及现网验证赋予了低风险的试错环境,缩减了变更操作所引发的危险。

4.3 向绿色低碳与高效运维方向发展

能耗控制成了光传输网络发展的主要制约因素。由于单纤容量、节点数量的增大,OTN 设备的功耗所占比例也越来越大,在通信网络中。从设备上来说,使用更先进的数字信号处理芯片以及改进的光电封装技术可以减少每比特传输功耗。从系统角度来讲,利用智能识别算法、OTDR、GIS 地图、智能分析以及 AI 学习这些技术,可以使使得光缆哑资源盲区变得可见,故障得以快速找到,并且风险也能被提前避免,从而保证网络的高可靠性能。从网络结构上看,采用光层直通可以降低光电光转换的次数,从而减小时延,并且还可以减少不必要的功耗。另外,动态休眠、负载均衡策略使得网络能耗可以依据实际的业务流量来调整,不会出现由于静态配置而造成能源浪费的情况。

4.4 加强网络安全与可靠性保障

网络安全属于光传输网络所面对的主要问题。物理层的安全,光纤链路很容易被窃听、干扰攻击,所以要采用在传输层上使用加密和监测的方法。加密技术是保障网络信息安全和个体隐私的重要手段,在光传送网中被越来越多地使用起来,利用标准帧结构中的开销字节来发送密钥报文是一种可行的技术途径。网络层安全方面,OTN 控制平面的协议交互要防止单个非法接入或者信令攻击,设备级的安全加固以及身份认证机制是必须的。中国电信同华为一起研发的高可靠 WSON 光网络系统,是业界最早完成多节点 MESH 组网 50ms 确定性恢复验证的公司,实现了保护恢复方式的新跨越。网络恢复能力的提高对保证关键业务连续性有着十分重要的作用。

表 1 光传输网络典型应用场景及关键性能指标对比

应用场景	典型容量需求	时延要求	可靠性指标	核心使能技术
骨干通信网	单纤 $\geq 16\text{Tbit/s}$	端到端 $< 50\text{ms}$	99.999%	400G/800G 相干、可重构光分插复用器、C 波段+L 波段
城域通信网	单纤 $\geq 4\text{Tbit/s}$	节点间 $< 10\text{ms}$	99.99%	光业务单元、灵活光通道数据单元、汇聚型光传送网
数据中心互联	单纤 $\geq 25\text{Tbit/s}$	单链路 $< 5\text{ms}$	99.999%	800G/1.6T 模块、开放光线路系统
第五代移动通信技术承载	单纤 $\geq 1\text{Tbit/s}$	前传 $< 1\text{ms}$	99.99%	前传密集波分复用、光传送网硬切片、切片分组网融合

如表 1 所示,不同的应用场景对于光传输网络的性能要求也大相径庭。骨干通信网主要解决超大容量和跨区域长距传输的可靠性问题,城域通信网在容量的基础上对灵活上下路和多业务汇聚能力有较高要求,数据中心互联把低时延、高密度互联当作首要优化目标,5G 承载场景在前传、中传、回传不同的分段里表现出不一样的需求特点。由于场景的不同,所以光传输网络在部署不同业务的时候要采取不同的技术组合以及设备选择方案。

5 结语

光传输网络属于数据通信的物理层基础设施,在骨干长途传输、城域灵活调度、数据中心互联以及 5G/6G 承载等场景当中,起着无法取代的作用。目前,光传输网络正处在由容量驱动向多维能力驱动转变的过程之中,智能化、开放化以及绿色化成了技术发展的主要趋向。随着 AI 时代和算力网络新需求的出现,光传输网络在传输容

量、调度灵活度、运维智能化程度、安全保障能力等各方面要不断取得进步。OSU 技术大范围应用、AI 驱动自智网络架构产生之后,将会成为促使大数据通信业务不断革新、持续扩大的主要动力。

[参考文献]

- [1]谭艳霞,段致岩,满祥银,等.基于 OSU 的 OTN 智能管控技术研究[J].电信科学,2023,39(10):147-155.
- [2]曾杰,刘志强.OTN 技术在 5G 传送网中的运用分析[J].中国新通信,2023,25(23):67-69.
- [3]曹丽,蒋东君,张春玲.基于 OSU 技术的政企 OTN 网络演进策略研究[J].通信与信息技术,2026(1):101-105.

作者简介:常婧(1995—),女,山西省长治市人,工程师,大连海事大学信息与通信工程专业毕业,现就职于国网长治供电公司,从事电力通信工作。