

# 面向下一代骨干光传送的 400G 技术及应用研究

Research on Next Generation Backbone Optical Transport  
400G Technology and Its Application

闫飞(中国电信集团有限公司,北京 100032)  
Yan Fei(China Telecom Group Co.,Ltd.,Beijing 100032,China)

## 摘要:

未来,400G光传输系统将在100G的基础上进一步提升网络容量、降低每比特光传输成本和功耗,有效地缓解运营商面临的业务流量及网络带宽持续增长的压力。作为承载网络流量最大的管道,传送网需要提供更大的400G单波速率来满足业务的需求。400G QPSK预计将成为干线长距传输的主要码型,配合C+L光系统、C+L一体化光交叉,构筑超大容量、灵活智能的400G网络。

## 关键词:

400G;C+L;LCoS;OXC;AI  
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2023.12.014  
文章编号:1007-3043(2023)12-0067-06  
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 the future,400G optical transmission systems will further increase network capacity and reduce optical transmission costs and power consumption per bit on the basis of 100G optical transmission systems,and effectively solve the pressure of continuous growth of service traffic and network bandwidth.As the largest pipeline carrying network traffic,the transport network needs to provide a higher single-wavelength rate of 400G to meet service requirements.400G QPSK is expected to become the main modulation format for long-haul backbone transmission,which works with C+L optical systems and integrated C+L optical cross-connections to build a ultra-large capacity and flexible intelligence 400G network.

## Keywords:

400G;C+L;LCoS;OXC;AI

引用格式:闫飞.面向下一代骨干光传送的400G技术及应用研究[J].邮电设计技术,2023(12):67-72.

## 0 引言

近10年互联网快速发展,流量年均增长率在40%以上,随着数字新基建的启动,5G、数据中心等新型基础设施的建设以及数字化办公、远程医疗、远程教育的发展,网络容量的增长速度加快。业务流量增长推动了骨干网发展,预计骨干网络的容量、单节点的容量增长率均将保持在20%以上。

骨干网络需要满足线路超大带宽、节点大容量、

灵活调度等需求,同时提升网络性能,实现低时延、低抖动、低丢包、高可靠、高安全,以支撑数字经济时代千行百业上云、工业智造的发展需求。为实现这些业务目标,骨干网需要在技术和架构上持续创新,引入400 Gbit/s高速线路、OXC(Optical Cross-Connect)设备、光电协同、智能化管控等先进技术。

运营商希望在满足上述需求的同时,能够通过技术进步实现频谱和成本效率最大化,尽可能减少物理空间占用。本文对400G WDM传输系统的关键技术进行分析,探索400G WDM传输系统发展趋势,结合400G WDM在干线和城域的试点情况探讨400G应用

收稿日期:2023-11-16

情况。

## 1 400G 传输系统关键技术

400G WDM 传输完成 400 Gbit/s 数据的端到端传送,包括客户侧、400G OTN 封装映射和400G 线路侧光传输的关键技术。

### 1.1 400G 客户侧技术

在 IEEE 802.3 标准中规定了 400G 客户侧技术。400G 客户侧光模块在传输距离上主要包括 100 m、500 m、2 km、6 km 和 10 km 等规格。其中 10 km 传输距离是电信级运营商的主要应用,在技术方案上,目前主要有 8×50G PAM4 和 4×100G PAM4 2 种。8×50G PAM4 方案可以满足 10 km 传输要求,4×100G PAM4 可满足 6 km 传输要求。

### 1.2 400G OTN 封装映射技术

400G OTN 主要由服务层和传送层构成,如图 1 所示。服务层面向客户业务,根据业务种类和业务颗

粒,映射封装进对应的低阶 ODU (LO ODUk 和 LO ODUflex) 容器,满足任意业务承载需求。

### 1.3 400G WDM 线路侧传输关键技术

400G 光系统要实现 80 波干线传输,需要突破 400G 线路侧光模块、光放大器、光交叉、光系统等关键技术。

#### 1.3.1 400G 线路侧光模块:向 130G+ Bd 的 QPSK 性能演进

400G 线路侧光模块目前有 16QAM、PCS-16QAM 和 QPSK 3 种调制格式,16QAM 使用 60G Bd,适合点对点传输,PCS-16QAM 使用 90G Bd,传输性能较强,适合城域、省干、中短距省际干线使用,但对于长距省际干线传输应用,需要采用 QPSK 调制格式,光电芯片的波特率要提升至 130G Bd。

##### 1.3.1.1 高速光电器件及合封技术突破带宽限制

相干模块采用传统分离器件,分离模式阻抗不连续点多、阻抗不连续致整体带宽降低较多,无法支持

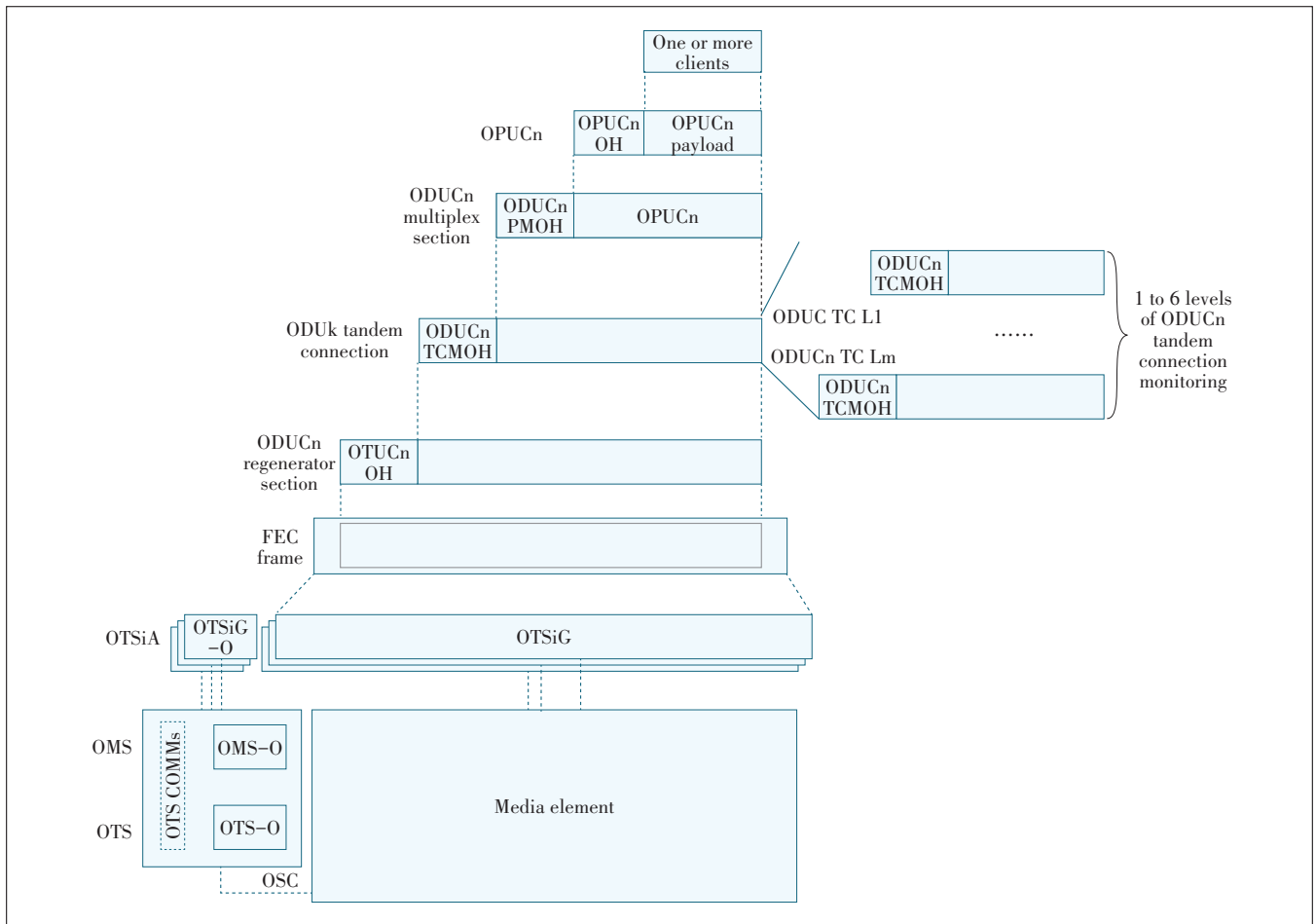


图1 NxB100G OTN 协议栈(ITU-T G.709)

130G Bd 波特率。如图2所示,采用光电合封,将oDSP、调制器、驱动器、接收机等共基板合封,可消除关键阻抗不连续点,降低反射,提升带宽。使用合封技术,带宽可提升10 GHz以上,达到70 GHz,满足130G Bd的带宽需求。

### 1.3.1.2 高性能光算法补偿系统损伤,逼近香农极限

光电器件指标离散性影响性能,端到端传输也存在一些损伤,使用常规方案实现的模块性能一般与香农极限存在约2 dB的性能差距。通过DSP算法对损伤进行补偿,实现端到端性能最优。DSP算法通过星座整形调制、器件损伤标定、非线性抑制技术来补偿器件一致性指标缺陷、串扰、非线性等问题。通过器件损伤补偿、非线性抑制补偿等算法,性能可提升0.5 dB以上。

### 1.3.2 光放大器:突破材料与工艺,降低噪声

采用130G Bd波特率的400G QPSK传输波道间隔需要150 GHz,长距传输容量需要达到80波,光纤的工作频谱要扩展到C6T+L6T波段(C波段6 THz+L波段6 THz共12 THz频谱宽度)。业界已商用的掺铒光纤在波长超过1 610 nm后放大性能急剧劣化,需要进一步提升光放1 610 nm波段性能,将增益做到15~30 dB,优化噪声系数,提升性能。为了在1 610 nm更长波段获得更高的增益,掺铒光纤材料也要突破。采用碲+铒、铋+铒等配方,L波段放大范围可扩展到6 THz,有效提升L波段长波长放大能力和优化噪声系数,如图3所示。

### 1.3.3 光交叉:控制算法突破使能大带宽低损耗WSS 波长选择开关(Wavelength Selective Switches,

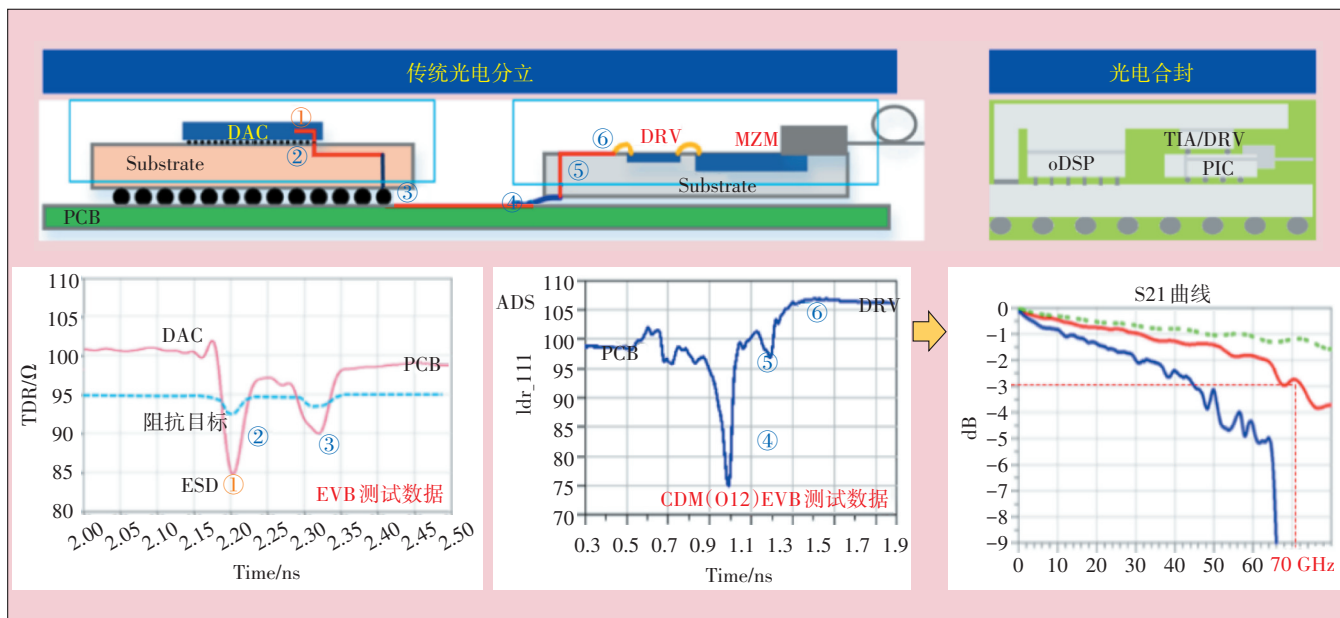


图2 光电合封减少连线阻抗,提升带宽

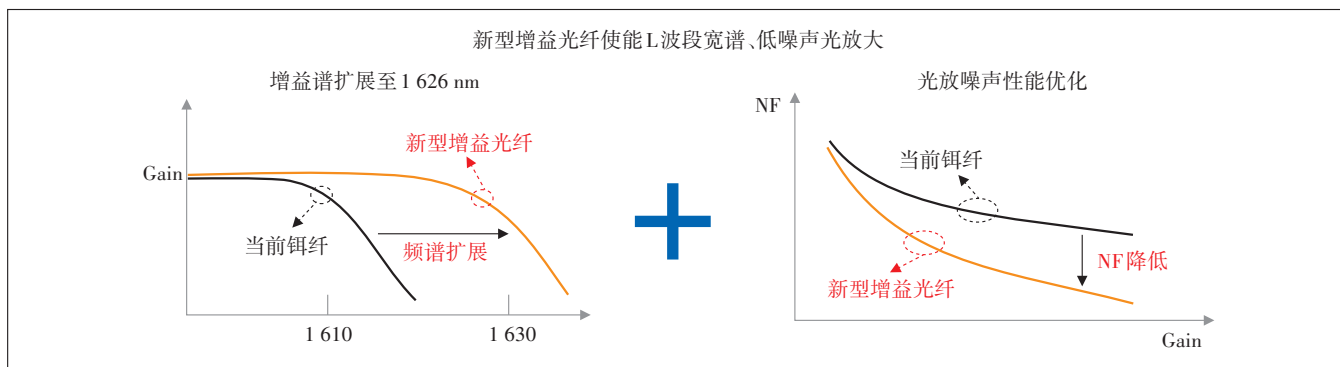


图3 掺铒光纤新元素掺杂及工艺突破提升L波段性能

WSS)模块是实现光信号灵活交叉调度的核心器件,目前业界普遍采用基于硅基液晶(liquid crystal on silicon, LCoS)技术实现WSS。

C6T+L6T波段意味着WSS需要在更宽的光频谱范围内实现更多波长的角度偏转,这些需要WSS控制算法实现。配合更多像素点的LCoS芯片,需要多维度的创新性控制算法,使能多维度的调节,保障当LCoS芯片承载更多波长的时候,插入损耗、端口串扰和滤波损伤等性能不会有太大的劣化。

WSS的滤波带宽由LCoS横向分配给单位波长间隔的像素点数量决定,C6T+L6T波段需要LCoS的像素点达到2.4K以上。如图4所示,C6T+L6T波段的WSS有分离和一体化2种架构。分离架构的L波段WSS可分批部署,减少初期成本,但C波段和L波段实际上是分成2个平面进行交换,调度灵活性受限;一体化架构连纤更简洁,运维更简单,支持统一C+L光平面调度。

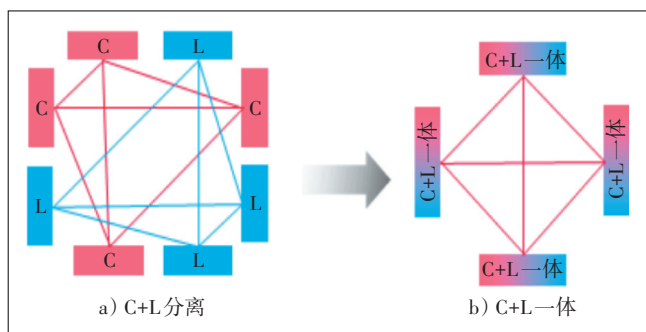


图4 C6T/L6T WSS分离及一体架构差异

C+L一体化光交叉的优势为:C6T+L6T一体化光交叉比C6T WSS+ L6T分离式集成度提升一倍,可支持C6T+L6T全波段无阻塞调度,光支路侧可支持全波段波长无关,安装部署简单。预计1~2年后可有一体化调度WSS的商用。

### 1.3.4 光系统:抑制受激拉曼散射影响,性能最优化

受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)会引起短波能量向长波转移,SRS效应大小和波长数量、波长位置、功率强相关。在C6T+L6T系统中,400G波长数量增加1倍,SRS影响变为4倍,SRS效应导致的功率、OSNR、非线性变化更明显。业界普遍采用填充光应对SRS效应对信号光的影响,该方案的优点如下。

- a) 系统性能稳定。填充后系统工作在满波,功率基本不变,性能稳定,网络更安全。
- b) 运维效率高。填充后,提前打通链路,全场景

可预测,扩容或波长调度只是简单的真假波替换过程,不需要耗时的反馈调测,效率高。

c) L波段性能提升,实现端到端性能和C波段相当。填充后,C和L波段都处于满波状态,L波段通过SRS效应可从C波段持续抽取能量,等效功率提升约2 dB,这个性能收益可以弥补L波段光放噪声系数劣势。

## 2 400G传输系统发展趋势

### 2.1 扩展可利用的新频谱空间

传输技术的发展使得光传输系统的能力越来越接近于理论极限,新型高频器件制造工艺的难度也越来越大,单波提速技术面临巨大挑战,开拓光纤传输系统新的可用频谱,成为光网络行业实现传输容量扩展的创新方向。拓展新波段光纤通信系统最关键的技术基础在于开发能够满足新光谱应用的光纤放大器。目前,已有支持基于C6T+L6T波段的光纤放大器。

### 2.2 突破非线性影响

在WDM传输系统中,受限于光纤的有效面积,即使较小的入射光信号功率也会在光纤中产生光信号与物理信道以及不同信号通道之间的失真等非线性效应。

随着传输速率及器件带宽的提升,信号对非线性失真更加敏感;另一方面,光系统正在占用更宽的频谱(如C+L),意味着其入纤总光功率相较于仅采用C波段的光系统更大,由此带来的信号非线性失真效应也将更强。因此,信道的非线性补偿算法,将是影响下一代光传输系统容量进一步提升的关键因素。克服光信道非线性信号失真的主要研究方向包括接近实际信道的非线性理论模型及准确且简洁的非线性补偿算法,这也是未来进一步提升光纤容量需重点研究的技术方向。

### 2.3 网络灵活调度技术

未来,面向数据中心间的协同计算,需要考虑T级别大带宽动态调度需求,东西部间传输距离远,除了光交叉的波长级调度外,还需从多个维度提升网络灵活调度能力。

在全光交叉的基础上,引入OTN电调度技术,让节点具备两层调度能力,实现调度、中继、汇聚多种功能。波长资源、OTU线路端口池化部署,管控系统可根据业务需求,按需调度光电资源。

光电跨层调度开通如图5所示。当光和电跨层打通业务时,需从算路、交叉创建、调测等维度考虑,实现业务一键式快速开通。

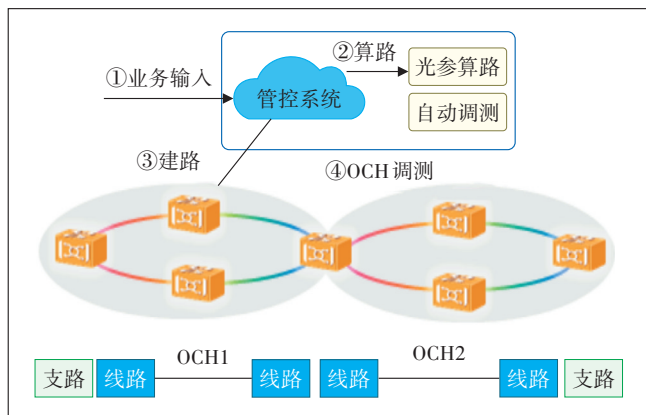


图5 光电跨层调度开通

a) 光电两层算路。综合考虑已有的OCH资源、空闲OTU端口资源、业务SLA属性等,使用光电层路由协同算法,计算出业务路由、资源需求和需要创建的OCH。

b) 自动选择中继。在光层算路时,需同步考虑传输性能和中继选择,通过对光层光参的数字化建模、精确评估系统收端OSNR、传输代价,自动选择最佳中继站点,确定中继端口和波长分配。

c) 交叉创建。完成光电联动算路后,把需要创建的光电交叉配置下发到设备,使设备完成光电交叉创建。

d) 自动调测。完成光交叉创建后,自动完成OCH波长的光功率调测,实现业务自动打通。

## 2.4 数字孪生和AI使能网络运维智能化和自动化

400G WDM高速光系统更加复杂,运维体系也需要创新,实现运维智能化和自动化,同时变被动运维为主动防护,使光网络的可靠性进一步提升。光网络的智能运维系统在400G系统上已经具备一定的智能化和自动化,整体可采用如图6所示的架构,并逐步演进完善。

物理光网的数据底座和AI算法是实现运维智能化和自动化的关键。基于对网络的感知,将物理光网数字化,建立数字孪生系统和各种物理模型,通过模拟仿真、实时预测,并结合大数据分析和AI算法,跟踪过去,预测未来。

数字孪生主要的关键技术如下。

a) 光感知打造数据底座。通过链路、信道、光部件、业务4层光感知体系打造数字孪生数据底座。为了更快、更全面地进行故障预测、快速调测、同缆检测等,除了采集传统的功率、光信噪比、误码率、插损信息外,还需要光系统信息,如链路偏振态、偏振相关插损、滤波代价、非线性、时延、资源状态、业务质量等。

b) 模拟仿真,实时同步。在网络的运行阶段,其状态会随着外界环境参数如光纤插损、SOP、业务调度、频偏等实时变化,而数字孪生模型需要将这些变化实时地在数字空间内进行同步模拟仿真和计算。

c) 数据分析,智能预测。光物理网络中会实时产生大量的数据,通过机器学习、AI等对这些数据进行分析,并结合经验知识实现主动异常检测、预测性维护,实现网络运维的智能化和自动化。

在光网络中应根据不同的场景选取合适的AI算

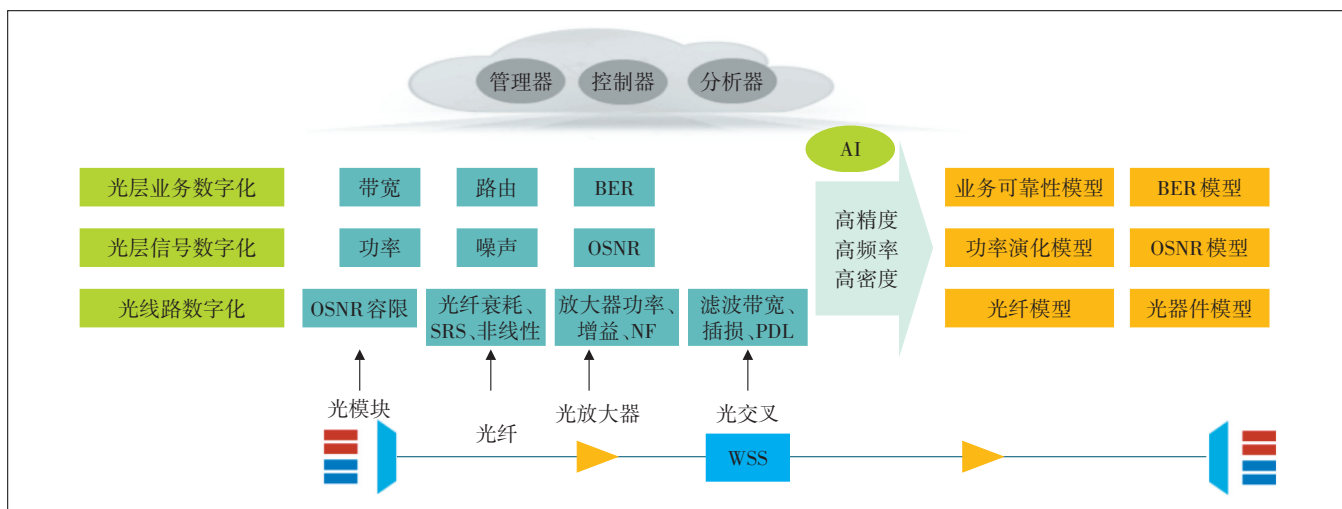


图6 智能运维系统架构

法,并针对性地进行改进和适配,典型的AI算法包括神经网络算法、时间序列预测算法、聚类算法和逻辑回归算法等。

### 3 试点应用

笔者参与了同省跨地(市)、跨省的400G WDM试验网络的验证,结果表明400G WDM技术已经逐步成熟,试点验证了400GE业务接入、400G OTN封装能力均可以满足业务需求,400G线路PCS-16QAM传输性能可满足城域、省干、中短距省际干线应用要求,QPSK传输性能可满足长距省际干线传输应用要求,光层系统的光放、WSS器件在C6T+L6T的能力还需要进一步的提升。

#### 3.1 打造区域首张400G全光运力网络

2022年打造某区域首张400G全光运力网络,部署分离式全光交叉OXC,采用400G PCS-16QAM和400G QPSK 2种调制格式,开启自动交换光网络(ASON),接入100GE、400GE等多种业务,实现超低时延、超大带宽、超高可靠、超强智慧、绿色低碳的高品质运力,助力东数西算枢纽节点的超强算力辐射该区域,实现“以算兴业”,支撑该区域数字经济高质量发展。

#### 3.2 骨干网400G系统试商用

2021年,某运营商采用130  $\mu\text{m}^2$ 大有效面积光纤的G.654.E光纤骨干光缆工程竣工。2022年,该光缆上建设了400G WDM系统,在互联网骨干网核心节点间开通了400GE IP电路,路由器与WDM间使用10 km(LR8)客户侧模块互联,线路侧使用PCS-16QAM调制格式,充分验证了400GE IP+光的部署可行性和多厂家协同能力,为后续广域网大规模部署400GE提供了经验。400GE高速端口引入后,光纤资源节省75%,减少路由间互联电路的绕转,可显著改善骨干互联网时延性能。试商用网络中,骨干互联网节点间的距离超过2 000 km,为400G WDM商用部署和路由器400GE接口的应用积累了丰富的经验。

### 4 结束语

随着云网融合、东数西算战略的推进,千行百业上云带来的流量快速增长促进了400G WDM技术在QPSK线路侧、C+L光系统、一体化WSS光交叉、智能化运维等领域持续突破和提升性能,随着400G WDM产品的逐渐成熟,骨干传输网络将开始采用400G

WDM传输演进和升级。

#### 参考文献:

- [1] 中国电信集团有限公司. 中国电信全光网2.0技术白皮书[EB/OL]. [2023-09-11]. <https://www.guifanku.com/qitaziliao/765827.html>.
- [2] 李正茂,雷波,孙震强,等. 云网融合:算力时代的数字信息基础设施[M]. 北京:中信出版集团股份有限公司,2022.
- [3] 刘丹阳. 400G光传送系统的演进目标与技术发展方向[J]. 电信快报,2022(12):10-11.
- [4] 王郁. 光传送网管理技术演进的思考[J]. 信息通信技术与政策,2020(12):70-74.
- [5] 杨军,张丽萍. 新基建背景下运营商云光协同OTN入云关键技术研究[J]. 通信与信息技术,2022(3):42-43,13.
- [6] 赵文玉. 高速光传输技术及标准化进展[J]. 信息通信技术与政策,2020(8):5-11.
- [7] 李俊杰,杨玉森. 400Gbit/s WDM传输技术及标准化进程[J]. 邮电设计技术,2018(6):57-61.
- [8] 张彬,张义军,宋海燕,等. 用于陆地400 Gbit/s高速传输系统的光缆生产及检测[J]. 现代传输,2016(5):23-25.
- [9] 赖俊森,汤瑞,吴冰冰,等. 光纤通信空分复用技术研究进展分析[J]. 电信科学,2017,33(9):118-135.
- [10] 沈世奎,郑波,王硕,等. 400G技术发展及应用部署考虑[J]. 邮电设计技术,2018(4):30-32.
- [11] 姚兰. 400G传输技术介绍及技术研究[J]. 数字技术与应用,2017(4):31,35.
- [12] 王光全,金飙,李铮,等. 陆地G.654.E光纤400G传输性能验证与应用建议[J]. 邮电设计技术,2018(6):1-4.
- [13] SAKAMOTO T, NAKAJIMA K, ARAKI N. Recent standardization activities in ITU-T on single-mode optical fiber and space division multiplexing technologies[J]. NTT Technical Review, 2021, 19(3): 63-67.
- [14] NIELSEN T N, DOERR C, CHEN L, et al. Engineering silicon photonics solutions for Metro DWDM [C]//OFC 2014. San Francisco: IEEE, 2014: 1-3.
- [15] KONG M, YU J J, CHIEN H C, et al. WDM transmission of 600G carriers over 5, 600 km with probabilistically shaped 16QAM at 106 gbaud [C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego: IEEE, 2019: 1-3.

#### 作者简介:

闫飞,硕士,主要从事光传输、IP承载网、移动网络的规划建设工

