大容量、智能化光传输系统：机遇、挑战与应对策略

Towards Large-Capacity and Intelligent Optical Transmission Systems: Opportunities, Challenges, and Solutions

冯振华/FENG Zhenhua[1,2]，方瑜/FANG Yu[1,2]，施鹄/SHI Hu[1,2]
（1. 中兴通讯股份有限公司，中国 深圳 518057；
2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室，中国 深圳 518055）
(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;
2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China;)

DOI：10.12142/ZTETJ.202201013
网络出版地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220218.1930.005.html
网络出版日期：2022-02-21
收稿日期：2021-12-25

摘要：分析了长距大容量、智能化光传输系统的五大关键技术：单波超400 Gbit/s、波段扩展、空分复用（SDM）、光层操作维护管理（OAM）和备用路径性能检测技术，并从学术研究、业界标准化动态等方面介绍了这些技术的进展。针对光传输系统技术发展趋势，从硬件、软件两个层面讨论了光通信的发展机遇和面临的挑战。基于中兴通讯光网络智能化平台框架，并结合中兴通讯在大容量、高速相干光通信方面的研究与产品开发工作实际，介绍了4个典型案例：灵活调制与光域均衡相结合来有效减少滤波代价、C+L波段扩展助力单波400 Gbit/s长距传输、高频光标签实现在线光性能监测、光探针和全局功率分析算法（GPA）确保备用路径快速可靠恢复。基于这些技术的产品化，中兴通讯将持续为客户创造价值，为用户提供更好的网络服务体验。

关键词：大容量传输；扩展波段；光传输质量（QoT）；光域均衡；快速可靠恢复；光标签

Abstract: Five key technologies of long-distance, high-capacity, and intelligent optical transmission systems are analyzed including ultra-high-speed transmission beyond 400 Gbit/s per wave, waveband expansion, space division multiplexing (SDM), optical layer operation and maintenance management (OAM), and performance monitoring for idle paths. The progress of these technologies is also introduced from the aspects of academic research and industry standardization dynamics. According to the technology trends of the optical transmission systems, the development opportunities and challenges in terms of hardware and software are discussed. Based on the intelligent platform framework of ZTE Corporation and related research and development experience in the optical networks, four typical cases are presented including filtering penalty reduction enabled by flexible modulation and optical domain equalization, single wave 400 Gbit/s long-distance transmission together with C + L-band expansion, online optical performance monitoring realized by high-frequency optical label, fast and reliable optical restoration aided by the optical probe and global power analysis algorithm (GPA). With such kinds of novel techniques leading in, ZTE will continue to provide customers with improved value and better network experience.

Keywords: large-capacity transmission; waveband expansion; quality of optical transmission; optical domain equalization; fast and reliable optical restoration; optical label

5G商用能够提升网络带宽，改善用户体验，并促进新型带宽密集型业务和应用的发展。随着“6G”“元宇宙”等概念的提出，扩展现实（XR）、全息通信、智慧交互等沉浸式体验应用，将进一步提升网络对带宽、时延和可靠性的要求[1]。据预测，2030年人类将进入尧字节级别的数据量时代，网络通信需要处理2 000亿个连接，接入带宽需求高达太比特每秒，单纤容量突破100 Tbit/s[2]。毫无疑问，光通信网络基础设施将在带宽扩容和智能化运维方面面临巨大压力。

目前波分复用网络商用系统最高单波速率为800 Gbit/s。随着波特率提升到200 Gbd以上[3]，单波速率预计可以达到1.6 Tbit/s[4]。商用系统单纤最大容量为48 Tbit/s。波段扩展技术的引入可使相关容量成倍增加，如S+C+L系统最高容量可达150 Tbit/s[5]。大量研究证明，以多芯、少模光纤为代表的空分复用（SDM）技术将是实现下一代超大容量光传输的重要技术手段。目前采用38芯3模光纤最大单纤容量已高达10.66 Pbit/s[6]。波段扩展和SDM技术的扩容效率和潜力都十

基金项目：国家重点研发计划（2018YFB1800905）

分可观，但在实现商业化方面还需要应对一系列挑战，如新器件和新算法的设计与实现。

光传输系统灵活组网和智能化运维能力的提升也是业界近期关注的焦点。以数据中心为核心的云化网络将向全光化和Mesh化发展[7]。全光可重构光分插复用器（ROADM）骨干网络支持大颗粒业务波长级灵活调度，使光层一跳直达，无需电中继，有助于降低时延和成本。在工作路径和恢复路径上，业务性能和链路状态的高精度检测与实时化感知是光网智能化的基础。这对实现端到端大容量、低延时、高可靠传输而言具有的重要意义。如果要实现快速业务开通和故障定位的智能化运维，为在线业务提供低成本的单波功率和带内光信噪比（OSNR）检测功能就必不可少；而要实现低延时、高可靠的业务恢复，提前考虑链路光参预调和光损伤验证将至关重要。

本文将介绍大容量、智能化光传输系统的关键技术及其研究进展、产业现状，分析光网络升级转型时在单波速率提升、光纤扩容、恢复时延降低等方面面临的机遇与挑战，结合中兴通讯在大容量、智能化光传输相关的研发实践，展示针对挑战的应对举措及取得的成效，最后总结未来光网络技术的发展趋势。

1 大容量、智能化光传输关键技术

1.1 单波超400 Gbit/s技术

在保证传输距离几乎不变、单比特成本有所下降的前提下，提升单波速率是运营商不变的诉求。表1总结了不同单波速率商用系统的特征和传输能力。当前100、200 Gbit/s系统具备长距骨干网应用的传输能力。而现有400 Gbit/s技术由于传输性能不足，无法满足1 000 km以上长距传输的应用需求。128+Gbd四相相移键控（QPSK）被认为是骨干网升级扩容的最佳方案。受限于当前高波特率相干光DSP（oDSP）芯片、大带宽光器件的商用进展，目前尚无相关成熟产品。5 nm工艺制程的高性能oDSP芯片的采用和3D封装的高集成度光器件的成熟，将加快400 Gbit/s QPSK长距传输解决方案的商用进程（预计在2022～2023年）。

在标准进展方面[8]，光互联网论坛（OIF）已发布400ZR实施协议（IA），采用DP-16QAM+C-FEC（一种调制编码方式），实现了异厂家模块和设备的互操作测试，近期还启动了相干800 Gbit/s LR/ZR/ZR+（指10 km、80 km及80～450 km的光互连）和共封装光学（CPO）标准化研究工作。在400ZR标准框架下，电气与电子工程师协会（IEEE）立项了802.3 ct/cw，分别讨论面向80 km密集波分复用（DWDM）100 GE/400 GE标准化工作。相关标准将在未来1～2年内发布。目前来看，800 GE/1.6 TE很有可能成为下一代以太网的标准速率。国际电信联盟第15研究组（ITU-T SG15）开展了200 Gbit/s/400 Gbit/s接口的物理层规范研究，将DP-16QAM作为400 Gbit/s城域应用的标准码型，推动了开放前向纠错编码（oFEC）的标准化进程。此外，多个多源协议组织（MSA）相继发布了超100 Gbit/s的技术标准。例如，OpenROADM/OpenZR+发布的100～400 Gbit/s相干光模块规范支持CFP2-DCO和QSFP-DD/OSFP封装，在400ZR帧结构的基础上增加100/200 Gbit/s QPSK、300 Gbit/s 8QAM等调制模式，并采用oFEC替代级联FEC（cFEC）的方式来支持450 km级的400 Gbit/s传输。目前，异厂家已宣布实现模块互通测试。中国通信标准化协会（CCSA）的相关标准制订工作包括：100 Gbit/s及以下速率的光传输和模块标准制订已完成，200 Gbit/s报批稿主要选择200 Gbit/s QPSK、8QAM、16QAM码型，400 Gbit/s城域标准实质上采

▼表1 不同单波速率系统特征与能力

单波速率（Gbit·s^{-1}）/间隔（GHz）	调制格式	波段与波道数	传输距离（km）/场景	备注
100/50	DP-QPSK	C/CE/C++（80/96/120）	高于2 000/干线	已规模商用
200/50	DP-16QAM		高于600/城域	
	DP-8QAM/PS-16QAM		800～1 000/城域	
200/75	DP-QPSK	C++（80）	高于2 000/干线	
400/75	DP-16QAM	C/CE/C++（53/64/80）	约400/城域或DCI	
400/100	PS-16QAM	CE/C++（48/60）	约800/城域核心	已有小规模商用
800/112.5	PS-64QAM	CE/C++（40/53）	约200/城域或DCI	
400/150	DP-QPSK	C+L（80）	高于1 500/干线	预计2年内实现商用
800/150	DP-16QAM	C+L（80）	约300/城域	

CE：扩展的常规波段　DCI：数据中心互连　DP：双偏振　PS：概率整形　QAM：正交振幅调制　QPSK：四相相移键控

用的是单波200 Gbit/s双载波方案。《$N\times$400 Gbit/s长距离增强型光波分复用（WDM）系统技术要求研究》等面向更高速率应用的标准课题研究正在开展。

1.2 波段扩展技术

自DWDM技术商用以来，长距系统不断扩展光纤传输频带：从早期C波段（C4T）扩展到CE波段（C4.8T），再到C++波段（C6T）。80波75 GHz间隔的200 Gbit/s QPSK或120波50 GHz间隔200 Gbit/s 8QAM/PS16QAM方案的商用落地将单纤容量提升50%。实际上，单模光纤的低损耗窗口不仅包含C波段，还包括O、E、S、L、U等波段。其中，L波段在日本运营商中有少量部署。L波段的部署可避免G653色散位移光纤四波混频的影响。近年来，美国也有少量运营商和互联网厂商在DCI和海缆传输中部署了C+L系统，可将光纤容量提升一倍。随着单模光纤在容量上逼近100 Tbit/s香农极限，波段扩展技术成为学术和行业研究热点。例如，武汉邮电科学研究院在2014年基于3U超大容量、超高速率、超长距离光传输平台，实现了单模光纤C+L波段共375波的100 Tbit/s 80 km大容量传输[9]。早在2016年，Acacia公司就展示了370 nm宽带全波段（O、E、S、C、L）的可调光收发硅光器件[10]。2018年欧洲科学家系统性地提出了多波段传输的概念和相关组网架构[11]。Nokia Bell Labs和NTT分别实验了在S+C+L波段,距离为100 km、容量为115 Tbit/s以及距离为40 km、容量为150 Tbit/s的光传输系统，该波段支持的单波速率高达400 Gbit/s[5-12]。这些研究表明，波段扩展对提升单纤容量具有重要意义。

在波段扩展技术商用方面，中国运营商和设备商正在积极推动C6T向C6T&L6T方向升级，使网络能够提供单纤80波400 Gbit/s QPSK长距传输能力。目前C+L相关产业链的发展情况如表2所示[8]。可以看出，供应链的发展进度符合预期。随着单波400 Gbit/s长距光模块技术日趋成熟，扩展的C+L波段光系统有望在未来2～3年内实现商用。

1.3 SDM技术

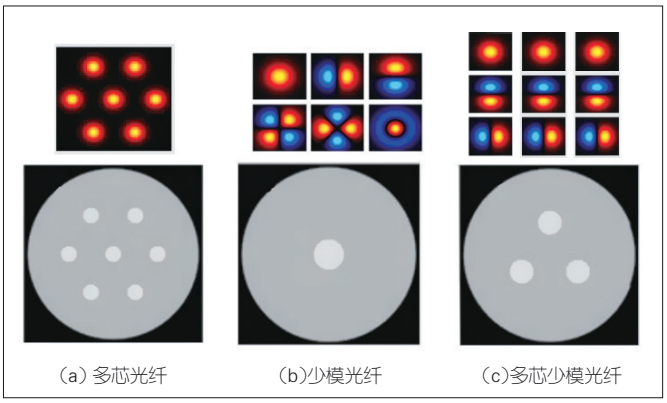
SDM需要基于新型空分复用光纤，主要包括多芯光纤、少模光纤,以及两者相结合的多芯少模光纤，相关原理如图1所示。业界报道了大量基于SDM技术的大容量传输实验，如基于19芯或22芯光纤的1+ Pbit/s传输[13]、基于15模的0.61 Pbit/s传输[14]，以及基于38芯3模的10.66 Pbit/s传输[9]。相比于普通单模光纤，SDM技术将容量提升2个数量级。中国运营商对SDM技术开展了一些研究。中国联通联合长飞光纤光缆股份有限公司、北京大学采用200 Gbit/s商用光传送网（OTN）设备在100 km弱耦合2模光纤上成功完成单纤C波段16 Tbit/s容量的实时演示[15]，充分展示了弱耦合光纤在短距传输方面的扩容优势。中国移动牵头基于弱耦合少模光纤传输技术攻关，实现了总长度为300 km的3模式×4波长×200 Gbit/s的实时模分复用传输实验验证[16]。此外，中国移动最近还联合中兴通讯验证了单波400 Gbit/s×2个模式的200 km传输可行性，为面向未来的多维复用光传输技术发展提供了重要参考。中国电信参与建设了粤港澳大湾区的“超级光网络”,开展了多芯光纤传输示范网试点验证工作，为SDM技术落地进一步奠定基础。

值得注意的是，近期关于SDM的技术研究不再一味追求超大容量，反而更加关注实用性。首先，考虑到光纤弯曲损耗、机械强度，将SDM光纤包层尺寸限制在125 um，有助于兼容现 有标准单模光纤的制备和成缆工艺。其次，考

▼表2 C6T&L6T系统关键组件产业链进展

组件	C6T	L6T	技术难点
ITLA	已商用	样品正在研发中	重新设计增益区和选频光腔
光调制接收器件	与C4T基本相同	与C6T基本相同	关注偏置点和响应度波长相关性
oDSP	与C4T相同	与C6T几乎相同	L波段色散略大,不同波段器件差异补偿
EDFA	已商用	当前铒纤可放大至L5T,优化后可到L6T	优化铒纤掺杂配比改善增益带宽;改善饱和功率和噪声系数;控制EDFA模块尺寸和功耗
DRA	已商用	增加了长波泵浦激光器	需要解决与1 502 nm OTDR的波长冲突问题
WSS	已商用	样品正在研发中，C+L10T已实现产品化	更换衍射光栅和空间光路设计
AWG	已商用	技术准备就绪	/
OPM	已商用	技术准备就绪	/
OTDR/OSC	与C4T相同	技术准备就绪,待确定波长	/

AWG：阵列波导光栅　C6T：C++波段　L5T：L+波段　oDSP：相干光DSP芯片　OSC：光监控信道
DRA：分布式拉曼放大器　EDFA：掺铒光纤光放大器　L6T：L++波段　OPM：光功率监测　OTDR：光时域反射仪
C4T：C波段　ITLA：集成可调激光器　L10T：同时支持C、L波段　WSS：波长选择开关　WSS：波长选择开关



▲图1 空分复用的主要形式

虑到长距传输系统中空间模式间的串扰，以及模式相关损耗对相干解调算法的影响，耦合芯3芯光纤或弱耦合4芯光纤结合多波段WDM传输成为近年来OFC热点。例如，NICT利用（S+C+L）光频梳在4芯光纤中实现了552波道3 001 km的传输，使单纤容量达到319 Tbit/s[17]。再者，在系统可靠性验证方面，2019年日本住友电工与拉奎拉大学合作，在意大利拉奎拉市地下隧道首次铺设了6.29 km含18根多芯光纤的光缆。现场测试表明，多芯光纤成缆及部署后仍然具有较低的损耗和模式色散。这证明了SDM传输应用初步具备从实验室理想环境走向复杂现场环境的条件[8]。最后，在标准化进展方面，ITU-T于2020年已经开始SDM光纤光缆的标准化研究工作，并重点关注光纤分类、光纤熔接和连接器等技术。目前，日本已发布SDM相关技术研究报告，着力推动SDM技术的商用。此外，中国CCSA已立项P比特超大容量光传输相关的研究课题。

1.4 光层OAM技术

大容量、低时延、绿色低碳的需求驱使以传统电交叉为主的OTN网络向以光交叉为主、电交叉为辅的光电联动全光网转型，其核心是光电深度融合和协同管控，以充分发挥光电两层技术的优势,实现网络资源和运维效率的优化。然而，当前OTN网络在光层缺乏成熟的OAM技术，导致骨干网面临升级扩容后运维难度不断增加的局面，使得光层通道性能监测、故障定位以及业务调度常需繁琐的人工性能采集和复杂的定位分析，难以适应智能化的发展趋势。基于低频调顶的随路监控光标签概念最早在1993年被提出，以用于信号识别、功率和故障管理[18]。该技术后来被朗讯公司用于实现端到端信号追踪和在线性能监测，以及故障定位、重路由和波长转换[19]。直到2006年，Tropic Networks公司提出快速傅里叶变换，用于识别不同调顶载频，为WDM网络中多载波调顶奠定基础[20]。近年来，基于调顶的光标签技术已经在动态WDM网络性能检测中得到广泛研究，如光功率、色散、偏振模色散、OSNR监测、非线性噪声监测等。与此同时，该技术也暴露出一些问题，如低载频光标签受到受激拉曼散射（SRS）串扰影响，高载频光标签受到色散衰落的影响。中国运营商将进一步关注基于光标签的OAM技术的商用落地。例如，中国移动已经着手光层OAM技术的标准化工作，并从功能、速率、开销、成帧、编码等方面进行技术规范。总体来看，基于光层OAM的业务路径追踪、连接关系识别、连接性能检测以及故障定位等功能有助于实现更高效的光电协同管控。这将在智能化光网络中发挥越来越重要的作用。

1.5 备用路径性能检测技术

专网应用对OTN网络可靠性、稳定性要求越来越高。基于波长/自动交换光网络（WASON）的网络保护恢复可以实现业务的动态重路由，可应对多次断纤故障。现有ROADM网络的动态重路由采用分布式算路策略（源节点算路）。这种机制可能存在波长冲突导致的路由回退问题，无法保证恢复时间。采用集中算路和分布式控制结合方式有望解决波长资源冲突问题。提升算路单元计算能力和算法效率、优化光转发单元（OTU）波长调谐时间和波长选择开关（WSS）切换时间，可以减少重路由业务恢复时间。另外，由工作路径倒换到恢复路径后的业务性能也是未知的。重路由后能否实现快速业务开通也是影响恢复时间的重要因素。目前通常的做法是，计算路由时考虑路径的OSNR性能和光损伤代价，然后选择OSNR满足阈值条件的路由以用于业务恢复。由于恢复路径上的器件插损、波长相关性、光交叉连接（OA）增减波增益变化的影响会导致真正业务倒换后业务不通，因此系统需要进行端到端功率优化后才能开通业务。这严重影响恢复时间，无法满足运营商普遍要求的确定性低时延需求[21]。由此可见，快速、准确地检测备用路径性能以及精细化的光参预调节对保证快速、可靠恢复至关重要。

2 大容量、智能化光传输机遇与挑战

面对更大容量、更低时延、更高可靠性和高度智能化的演进需求，光传输系统的机遇主要包含两个方面：

（1）在硬件层面上，采用更先进的芯片、器件可兼顾高集成度、高性能和绿色低碳。例如，5、3 nm超强oDSP可实现单波提速和功耗降低，高维度、多端口、多分区的WSS可实现更简洁的光交叉连接（OXC），更高自由度、更大带

宽的可编程部件能够构建灵活、超宽、极简的光传输系统，基于一体化超宽WSS可简化C+L系统光层组网。特定的应用场景需要差异化的解决方案。例如，某些中短距传输场景可采用简化的相干模块或单纤双向传输，以控制功耗和成本。新型宽带放大器、差异化光纤信道的使用拓展了大带宽、长距离、大容量传输的更多维度。宽谱半导体光放大器（SOA）、多波段拉曼放大、低噪声参量放大、大有效面积G654E、多芯少模和空芯光纤都可能是下一代光传输系统的关键技术。优化核心器件的响时间有助于缩短业务恢复时间。例如，从结构、机理上优化OTU可调谐激光器的波长切换时间，通过新材料、新设计改善硅基液晶（LCoS）芯片的响应时间，可实现WSS 10 ms级的快速切换。新材料、新工艺的使用能够持续提升系统带宽和单波速率。例如，薄膜铌酸锂、石墨烯、有机聚合物以及表面等离子材料突破了传统硅光/InP器件的限制，将器件带宽扩展到100 GHz以上[22-23]。另外，关键技术自主化与国产化也给学术研究和供应链产业带来新的机遇。例如，L6T光器件关键技术的突破与国产化，以及用于波段扩展或空分复用系统的新型器件的自主研制等。当然，通信与光层多参数感知一体化的新需求，也会促进基于通信光纤光缆资源进行环境温度应力监测、光缆风险预测、同路由识别、传感对业务影响等课题的研究，甚至会催生分布式光纤传输的广泛应用。更重要的是，产业生态的良性发展，离不开产业链的协同和标准规范的约束。各厂家应当积极迎接开放解耦趋势的机会和挑战，包括扩展波段波长标准化以实现产业聚焦，开放光线路系统以实现光电板卡解耦，实现CFP/CFP2相干模块接口标准化并与多厂家互通等。

（2）在软件层面上，光层数字化是实现光网智能化的前提，模拟光链路的精确建模在支撑光参数快速检测、光性能准确评估和业务性能在线优化方面的重要性进一步突显。长期来看，结合数字孪生技术与人工智能/机器学习算法将在性能评估与优化、软故障预测、根因分析诊断等领域发挥巨大作用。在网络管控方面，集中算路与分布式控制新架构配合更高效的选路算法、波长调度策略，可支撑更大规模的光网组建能力，如100～200 ROADM节点的区域干线网络、200～500 ROADM节点的国干全光网络以及500～1 000 ROADM节点的一二干融合大网。在底层技术上，随着波段扩展、空分复用技术的引入，光系统需要借助快速光功率调测算法去解决重路由时快速增减波功率调测问题。随着网络规模的扩大和串行链路的增加，光系统需要具备在线的全网光功率优化能力，以确保全网光功率、OSNR性能稳定。在应用上，光网络资源可视、业务性能可管、网络故障可预测等功能将会给智能化运维带来更高效的体验。当然，光层与电层、软件与硬件之间的协同，也会给整个光网络软件架构带来新的发展机会。

机遇的背后意味着挑战。当芯片和算法进入“后摩尔/香农时代”时，光模块背靠背OSNR容限潜力的挖掘举步维艰，通道间的光纤非线性效应仍缺少高效的补偿方案。受限于当前（数模转换）DA/模数转换（AD）芯片技术信号波特率难以突破200 Gbd，单通道速率向单波1 Tbit/s以上演进路线暂不明确。光电合封的共封装技术（CPO）被认为是高速光模块的终极解决方案。然而，如何提高InP基平台的集成规模并降低成本，如何有效可靠地集成SiP基平台光源，都是业界急需解决的问题。在光模块性能出现瓶颈的条件下，如果要保证超400 Gbit/s系统的传输距离就需要降低系统余量。性能和风险取决于光系统滤波、串扰及非线性等损伤代价的精准程度。频谱扩展引入更大的SRS导致更大的OSNR不平坦，这给系统性能评估和通道级光功率分配带来挑战。宽谱放大的问题也是当前急需攻克的难点。宽带SOA、低噪声相敏放大仍不能满足光线路系统的商用条件。目前，L波段铒纤的放大效率和带宽还不够理想，L6 THz的实现仍需要掺杂工艺和光路设计的优化。更大规模的光层组网要求更多级数的WSS穿通和更高维度的交叉。宽带WSS在频谱分辨率、通道谱宽、隔离度和端口数量扩展上的制约将会带来更大的串扰和滤波代价。大规模ROADM网络的路由规划、恢复路径计算对算法效率和控制时效性提出更高要求。此外，工作路径和备用路径上光层性能的有效监测技术还比较缺乏。光层OAM在进行高波特率、长距离传输时会面临SRS串扰和色散衰落等问题。基于光纤传感的同路由检测和光纤故障风险识别等应用需要考虑在线传感应用与业务信号共存的场景。传感对业务信号的影响仍需要验证，并且非通信波段的窄线宽激光器也是实现板卡式光纤传感的难点之一。

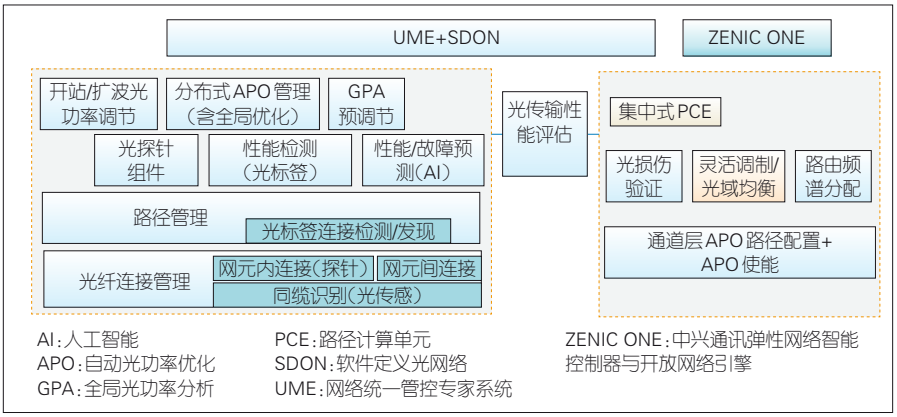
3 大容量、智能化光传输实践

针对上述挑战，我们开发了如图2所示的大容量、智能化光传输管控平台。该平台主要包括依托于网管与设备侧的全局功率和连接管理算法，以及基于WASON的业务级损伤验证、功率优化和路由频谱分配算法。下面我们将结合几个案例，来展示我们在大容量、智能化光传输方面的实践。

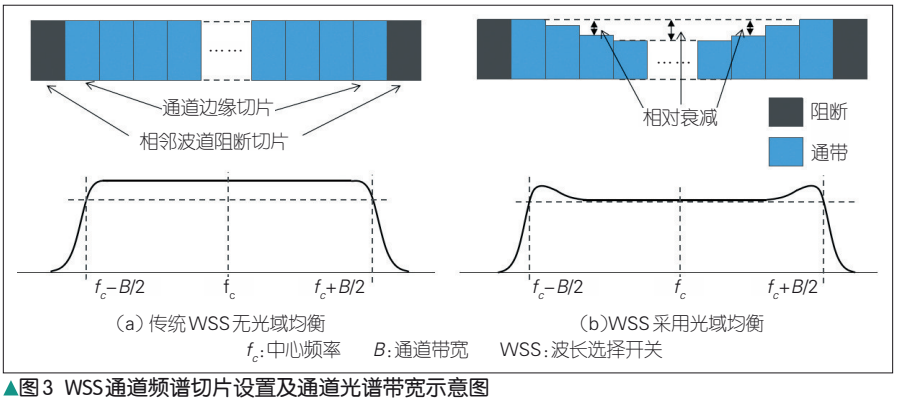
3.1 光域均衡显著提升ROADM穿通能力

如图3所示，基于商用WSS的物理特性，我们提出基于分片整形的光域均衡专利技术。该技术通过对通道内不同频

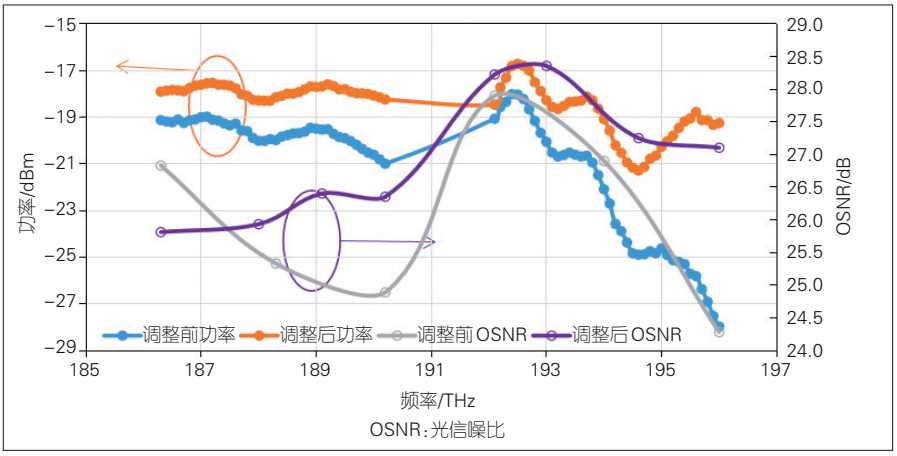
谱切片施加相对衰减使WSS的通道带宽提高了3 dB，从而减小信号的滤波代价，增加ROADM的组网能力。该方案无需硬件升级，分布式整形能力强。纯软件控制层面在线调整WSS通道内的每个频率分片的衰减并不影响业务，也不会增加额外的成本。当采用光域均衡时，200 Gbit/s QPSK信号在75 GHz通道间隔的穿通能力可提升100%[24]，200 Gbit/s PS16QAM/8QAM信号在50 GHz下的穿通能力可提升60%以上[25]。此外，基于灵活调制和光域均衡的Flex Shaping技术已经在多个运营商现网中商用。200 Gbit/s信号在37.5 GHz间隔下拥有大于10级的穿通能力和传输距离，能够有效减小不必要的电中继，节省成本，降低网络时延。



▲图2 中兴通讯智能化管控平台架构总体框架示意图



▲图3 WSS通道频谱切片设置及通道光谱带宽示意图



▲图4 5跨段G652光纤传输单波功率和OSNR在光功率优化调整前后的对比

3.2 C+L扩展波段助力单波400 Gbit/s长距离传输

受限于目前OTU的波长可调谐范围，我们在C6T+L5T光系统上传输80波400 Gbit/s信号。其中，C波段和L波段各有40波，并且波道间隔为100 GHz。由于基于128 Gbd QPSK的长距400 Gbit/s实时相干光模块目前仍处于研发阶段，本实验的长距400 Gbit/s方案为91.6 Gbd PS16QAM，并适配100 GHz波道间隔。光纤链路中有5个G652光纤跨段，每段光纤长度为75 km，损耗约22 dB。C和L波段分别采用一个EDFA来补偿跨段损耗，并在放大前后均有一个WDM合分波器。如图4所示，在没有进行功率调整前，由于C+L系统中存在强烈的SRS功率转移，5跨段末端单波功率平坦度劣化严重，无法满足系统应用需求。采用C+L功率预均衡策略对EDFA的增益和增益斜率进行调整后，系统的功率平坦度优于4.5 dB，OSNR平坦度优于2.5 dB，最小OSNR高于25 dB，满足预期的功率均衡目标。C+L波段400 Gbit/s PS16QAM的传输代价在5 dBm入纤时小于1 dB。该方案使中兴通讯成功完成业界首个单波400 Gbit/s C+L系统现网测试，G654E光纤传输距离达到1 300 km，G652光纤传输距离大于1 000 km。良好的方案结果进一步推进了单波400 Gbit/s与C+L系统的商用进程。

3.3 高频光标签实现在线光性能监测

为了避免长距离传输后SRS串扰对低载频标签信号检测性能的劣化影响，同时解决高波特率信号上加载高频标签时色散导致的功率衰落问题，我们提出将光标签的载频“搬移”到大于10 MHz的相对高频位置，并在OTU单板、OA单板、WSS单板进行逻辑电路的标签加载和检测，如图5所

示。利用在线板卡，我们开展了光标签在波长追踪、通道插损检测、单波光功率检测和单波OSNR检测的实验。在20跨段的单波100、200 Gbit/s传输系统中的实验结果表明：目前光标签接收灵敏度优于–38 dBm，功率检测精度达到1 dB；结合光放噪声系数的定标，OSNR检测精度可以做到1.5 dB，并且光标签对业务OSNR容限劣化小于0.1 dB。光性能检测的精度、速率，以及板卡集成度和成本都比传统的OPM有优势。可以预见，光标签在通道信号丢失（LOS）检测、远程功率控制等光层OAM应用方面也能发挥作用。光标签技术的商用将进一步提升光传输设备的智能化运维水平，也将为光电融合组网奠定基础。

3.4 光探针和GPA双管齐下以确保备用路径快速可靠恢复

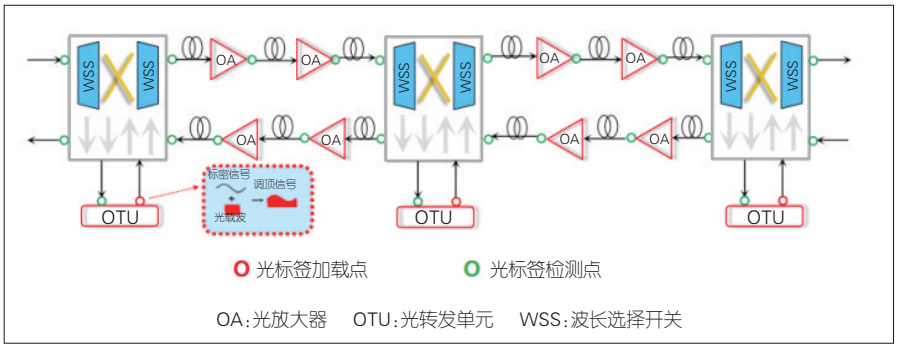
针对业务恢复的预置路径性能监测和ROADM站内插损检测等应用，我们提出光探针的概念。如图6所示，系统通过级联光放和WSS产生可编程的假波源，然后接入待测通道，利用网络中配置的OPM，来获取待测光通道的通道光功率并计算OSNR等光性能指标。目前我们已开发出基于光探针应用的完整解决方案。该技术可以有效解决空闲光通道的性能检测问题，使预置路径上的功率检测精度优于1 dB，OSNR检测精度优于1.5 dB。

对于非预置的动态重路由的恢复路径，我们提出GPA技术。该技术的总体思路是：对底层光器件建立通道级功率演进模型，以配合必要的出厂/开局定标工作；当发生业务路径倒换时，各个光层模型级联将对线路中各通道的光功率进行准确估算，以指导站点预设通道衰减值，并确保业务在倒换后的快速开通。GPA最核心的技术是光链路上的OA模型、光纤模型、站内插损的功率估算模型，如图7所示。其中，OA模型需要实现任意少波、任意输入功率、不同增益设定下的高精度功率计算；光纤模型包含波长相关损耗及SRS建模；通过在开始阶段复用段首尾OPM对模型的校准，通道功率计算模型已验证10跨段误差小于1.5 dB。

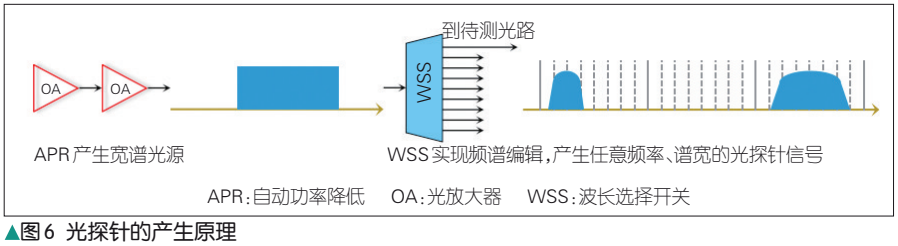
当网络发生故障时，基于光探针和GPA技术，SDON/WASON等控制模块将业务倒换到备用路径。借助已经调整好的光路参数和光传输质量（QoT）评估可验证备用路径的光性能损伤，有助于实现业务的快速、可靠恢复，提升网络的生存性和一次性恢复的成功率。

4 总结与展望

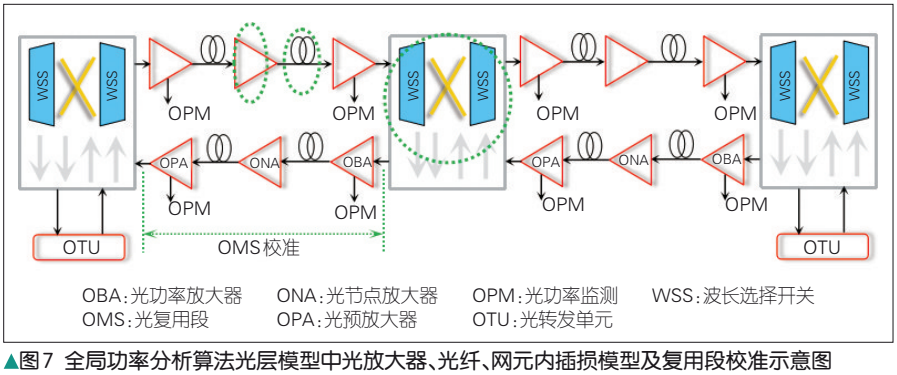
以用户体验为中心，构建无处不在与无处不及的全光连接，提供超大带宽、架构极简的超强“运力”，引入智能化“算力”，将助力全光网的高效运营，保障网络自动优化和可靠运行，有助于最终实现网络自治。大容量光网络在单波提速、波段扩展、SDM、光层OAM、备用路径性能检测和智能化管控等方面充满机遇和挑战，需要学术界和业界共同加强产学研用的协同发展，以推动技术创新和快速商用。以灵活调制和光域均衡为核心的Flex-Shaping技术可扩大200、400 Gbit/s OTN的传输距离并增强相应ROADM的组网能力，在扩展波段的基础上持续提升业务单波速率和单纤容量，加



▲图5 基于光标签的光传输系统



▲图6 光探针的产生原理



▲图7 全局功率分析算法光层模型中光放大器、光纤、网元内插损模型及复用段校准示意图

速基于光标签的光层OAM技术在连接管理、性能管理方面的应用，推动光探针、GPA、QoT等组件与人工智能（AI）、机器学习等智能化算法在现网中的快速融合应用，增强网络恢复可靠性、保障确定性低时延是我们目前重要的研究方向。

未来商用OTN将继续围绕“宽”“简”“智”发展。中兴通讯将在“大容量”“智能化”两大阵地上持续攻坚，协同推动“新速率、新波段、新站点、新算法、新运维”快速商用落地，为5G新基建甚至6G场景应用探索最合适的技术路线，持续改善网络服务体验，为用户创造价值。

致谢

本研究得到中兴通讯股份有限公司邹红兵部长、陈勇总工、贾殷秋博士、吴琼博士、高继韬博士的帮助，谨致谢意！

参考文献

[1] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术 [R]. 2021
[2] 华为. 通信网络2030 [R]. 2021
[3] PITTALÀ F, SCHAEDLER M, KHANNA G, et al. 220 GBaud signal generation enabled by a two-channel 256 GSa/s arbitrary waveform generator and advanced DSP [C]//2020 European Conference on Optical Communications (ECOC). IEEE, 2020: 1-4. DOI: 10.1109/ECOC48923.2020.9333130
[4] PITTALÀ F, BRAUN R P, BÖCHERER G, et al. 1.71 Tbit/s single-channel and 56.51 Tbit/s DWDM transmission over 96.5 km field-deployed SSMF [J]. IEEE photonics technology letters, 2022, 34(3): 157-160. DOI: 10.1109/LPT.2022.3142538
[5] HAMAOKA F, MINOGUCHI K, SASAI T, et al. 150.3-Tb/s ultra-wideband (S, C, and L bands) single-mode fibre transmission over 40-km using > 519Gb/s/A PDM-128QAM signals [C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ecoc.2018.8535140
[6] RADEMACHER G, PUTTNAM B J, LUÍS R S, et al. Highly spectral efficient C L-band transmission over a 38-core-3-mode fiber [J]. Journal of lightwave technology, 2021, 39(4): 1048-1055. DOI: 10.1109/JLT.2020.3018128
[7] 中国电信. 全光网2.0技术白皮书 [R]. 2021
[8] 冯振华, 尚文东, 陆源, 等,大容量光传输技术进展与400 G C+L系统研究 [J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(12): 48-61
[9] 余少华, 何炜. 光纤通信技术发展综述 [J]. 中国科学(信息科学), 2020, 50(9): 87-102
[10] DOERR C, CHEN L, NIELSEN T, et al. O, E, S, C, and L band silicon photonics coherent modulator/receiver [C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2016: 1-3
[11] NAPOLI A, COSTA N, FISCHER J K, et al. Towards multiband optical systems [C]//Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF). OSA, 2018. DOI: 10.1364/networks. 2018. netu3e.1
[12] RENAUDIER J, ARNOULD A, GHAZISAEIDI A, et al. Recent advances in 100 nm ultra-wideband fiber-optic transmission systems using semiconductor optical amplifiers [J]. Journal of lightwave technology, 2020, 38(5): 1071-1079. DOI: 10.1109/JLT.2020.2966491
[13] MORIOKA T. High-capacity transmission using high-density multicore fiber [C]//Optical Fiber Communication Conference. OSA, 2017: 1-45. DOI: 10.1364/ofc.2017.th1c.3
[14] RADEMACHER G, PUTTNAM B J, LUÍS R S, et al. Peta-bit-per-second optical communications system using a standard cladding diameter 15-mode fiber [J]. Nature communications, 2021, 12: 4238. DOI: 10.1038/s41467-021-24409-w
[15] SHEN L, GE D W, SHEN S K, et al. 16-Tb/s real-time demonstration of 100-km MDM transmission using commercial 200G OTN system [C]// Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021. OSA, 2021. DOI: 10.1364/ofc.2021.w1i.2
[16] GE D W, ZUO M Q, ZHU J L, et al. Analysis and measurement of intra-LP-mode dispersion for weakly-coupled FMF [J]. Journal of lightwave technology, 2021, 39(22): 7238-7245. DOI: 10.1109/JLT.2021.3110821
[17] PUTTNAM B J, LUÍS R S, RADEMACHER G, et al. 319 Tb/s Transmission over 3001 km with S, C and L band signals over >120nm bandwidth in 125 μm wide 4-core fiber [C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2021: 1-3
[18] HILL G R, CHIDGEY P J, KAUFHOLD F, et al. A transport network layer based on optical network elements [J]. Journal of lightwave technology, 1993, 11(5/6): 667-679. DOI: 10.1109/50.233232
[19] HEISMANN F, FATEHI M T, KOROTKY S K, et al. Signal tracking and performance monitoring in multi-wavelength optical networks [C]// European Conference on Optical Communication. IEEE, 1996
[20] WAN P W , REMEDIOS D , JIN D , et al. Channel identification in communications networks: US7054556 B2 [P]. 2006
[21] NGOF/CCSA TC618工作组. 波长交换光网络(WSON)2.0技术白皮书 [R]. 2021
[22] LI H. Vision and trend analysis for transport networks in 5G era [C]//Asia Communications and Photonics Conference (ACP). OSA, 2020
[23] WANG Y, LI X, JIANG Z, et al. Ultrahigh-speed graphene-based optical coherent receiver [J]. Nature communications, 2021, 12: 5076. DOI: 10.1038/s41467-021-25374-0
[24] SHI H, SHANG W D, CHEN H, et al. Optical filtering tolerant and spectrally efficient 200 Gbps real-time transmission using flex-shaping algorithms [C]//2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN). IEEE, 2021: 1-3. DOI: 10.1109/ICOCN53177.2021.9563737
[25] FENG Z H, CHEN H, SHI F, et al. ROADM traversal improvement enabled by optical domain equalization [C]//2021 IEEE 6th Optoelectronics Global Conference. IEEE, 2021: 68-72. DOI: 10.1109/OGC52961.2021.9654343

作 者 简 介

冯振华，中兴通讯股份有限公司资深预研工程师；主要从事相干光系统算法设计和验证工作。

方瑜，中兴通讯股份有限公司波分产品研发总工；主要从事光系统产品架构的设计和技术总体规划工作。

施鹄，中兴通讯股份有限公司光系统总工、预研项目经理；主要从事光系统设计、新技术预研规划相关工作。