

中兴通讯技术

简讯

ZTE TECHNOLOGIES | 第29卷 第9期 · 2025年9月

视点

04 从概念到落地：C+L一体化技术发展现状与趋势前瞻



专题：全频OTN

08 下一代光通信架构：400G/800G全频OTN网络





1996年创办

第29卷 总第444期

2025年9月 第9期 (月度出版)

中兴通讯技术 (简讯)

ZHONGXING TONGXUN JISHU (JIANXUN)

《中兴通讯技术 (简讯)》顾问委员会

主任: 刘健

副主任: 方晖 孙方平 俞义方 张万春

顾问: 柏钢 董伟杰 胡俊劼 华新海

阚杰 李伟正 刘明明 陆平

唐雪 王全 郑鹏

《中兴通讯技术 (简讯)》编辑委员会

主任: 林晓东

副主任: 卢丹

编委: 邓志峰 代岩斌 黄新明 姜永湖

孔建华 卢丹 梁大鹏 刘爽

林晓东 马小松 施军 余方宏

杨兆江

《中兴通讯技术 (简讯)》编辑部

总编: 林晓东

常务副总编: 卢丹

编辑部主任: 刘杨

执行主编: 方丽

发行: 王萍萍

主管: 中兴通讯股份有限公司

主办: 中兴通讯技术杂志社

出版: 《中兴通讯技术 (简讯)》编辑部

编辑部地址: 深圳市科技南路55号中兴通讯研发大楼

发行部地址: 合肥市金寨路329号国轩凯旋大厦12楼

发行部电话: 0551-65533356

<https://www.zte.com.cn/china/about/magazine>

发行范围: 国内业务相关单位

印数: 5000本

设计: 深圳市奥尔美广告有限公司

印刷: 深圳市旺盈彩盒纸品有限公司

印刷日期: 2025年9月25日

未经中兴通讯股份有限公司书面授权, 禁止以转载、
摘编、复制等方式使用本资料的任何内容。



王强

中兴通讯承载网产品副总经理

全频OTN引领者，开启光网络新篇章

数字浪潮奔涌向前，随着AI、大数据及智能制造等数字技术的快速发展，网络流量爆发式增长，光网络这一数字文明的“隐形动脉”呈现四大发展趋势：智算互联、东数西算等超大带宽传输需求，推动光网络加速从400G迈向T比特级新时代；AI大模型技术与光网络深度融合，加速光网络向高阶智演进；为突破传统石英光纤的传输性能瓶颈，业界积极探索新型空芯光纤传输系统，以实现超大带宽、超长距离、超低时延传送；5G-A&6G天地一体组网需求推动卫星光通信快速发展，光网络将从地面全光网络向“地面+星际”立体全光网演进。

在这场技术变革中，最关键的是系统容量提升，为实现提速不减波，光网络工作频谱已扩展到C+L波段。当前C/L分立系统在波长调度、集成度及绿色低碳等方面尚存提升空间。面对这些挑战，中兴通讯不断创新，率先推出全频OTN方案。该方案集超大容量、全频调度与极简架构等诸多优势于一身，能够为客户提供更加卓越的价值体验。

超大容量方面，通过12THz一体化与灵活整形算法的结合，实现单纤百T，系统容量提升25%，为海量数据传输提供强大的带宽保障。

全频调度方面，采用2倍于业界的可调谱宽，C+L全波段无阻塞调度，资源利用率提升100%，真正做到波长“零”浪费，提升网络运维便捷性。

极简架构方面，全频集成架构使光板数量减少20%，备件种类压缩50%，节省空间并降低Capex，为运营商构建轻盈、绿色的运营模式。

近一年来，中兴通讯联合运营商进行了一系列C+L波段一体化全频OTN实验室及现网测试，创造了多个记录，为未来网络部署和优化提供了重要参考。

未来，中兴通讯将继续以“开放合作”为帆，以“持续创新”为桨，携手产业伙伴共推标准制定、场景创新，构建更高效、更灵活、更可靠的光网络生态，为全球数字经济的可持续发展筑牢“光之底座”。

目次

中兴通讯技术（简讯）2025年第9期



下一代光通信架构：400G/800G全频OTN网络

随着5G、云计算、大数据、人工智能等新一代信息技术的快速发展，数据流量呈现爆炸式增长，传统光网络在带宽、时延、运维效率等方面面临挑战。

08

视点

- 04 从概念到落地：C+L一体化技术发展现状与趋势前瞻
尚文东，吴妮珊

专题：全频OTN

- 08 下一代光通信架构：400G/800G全频OTN网络
陈勇
- 11 超高速光模块及核心器件发展现状与演进
沈百林
- 14 超高速光传输标准进展
武成宾，张源斌
- 18 量子加密行业标准进展及主流解决方案分析
钟凡繁
- 22 基于AI大模型的光网络智能运维应用方案
王振宇
- 25 T比特空芯光纤光传输系统应用展望
闫宝罗

- 28 算力光网场景及趋势发展
谢大

- 32 卫星光通信技术进展与应用场景
熊琪

成功故事

- 34 中国电信与中兴通讯携手完成全球首个C+L一体化80×800G WDM现网试点
张雨
- 36 Türk Telekom联合中兴通讯完成全球首个12THz 1.6T DWDM现网试点
李崧博

网络规划

- 38 基于场景引导的无线网络自智规划平台
朱永军，王戈，马军华
- 40 无线网络综合话务预测
朱永军，马肖肖，谭耀斌

- 02 新闻资讯

2025 Accelerate Asia 盛大启幕，共建行业 标准生态

8月18日，由TM Forum（电信管理论坛）与中兴通讯联合主办的“Accelerate Asia 2025”会议于海南海口盛大开幕。这场为期四天的盛会汇聚了全球最具影响力的运营商、通信厂商及行业专家，共议通信行业数字化转型的关键路径与技术突破方向。

大会聚焦“可组合IT与生态系统”“自智网络”“AI与数据创新”三大技术方向，围绕加速制定标准与工具包以提效降本、推动ODA标准化与开放互通、研究符合三大使命的行业资产和推进催化剂项目成果创新四大核心议题展开。

中兴通讯智算超节点斩获2025中国算力 大会“年度重大突破成果奖”

8月22日，2025中国算力大会在山西大同盛大举行。会议期间，中兴通讯“基于GPU卡间高速互联开放架构和自研‘凌云’AI交换芯片的智算超节点系统”从百余项参评成果中脱颖而出，荣获“年度重大突破成果奖”。

中兴通讯以自研AI大容量交换芯片“凌云”为基石，提出面向AI加速器的高速互联开放架构，实现国产化GPU卡大规模高速互联，构建Nebula星云智算超节点，打造软硬协同、以网强算、开放解耦、高效高稳的万卡、十万卡超大规模智算集群，有效支持了万亿参数以上主权大模型的训练，显著提升了AI计算的性能和效率。

同时，Nebula星云智算超节点也

凭借高性价比的推理能力，推动了AI技术的普惠化发展，加速了AI技术融入生产和生活的进程。更多企业和开发者能够利用AI技术提升业务能力和创新能力，推动了AI技术在千行百业的广泛落地和深度应用。

本项目基于国产化自研“凌云”AI交换芯片及AI加速器开放高速互联协议，构建起GPU开放互联生态，并与信通院、人工智能软硬件协同创新与适配验证中心（北京经济技术开发区信创园）、运营商等机构的深度合作且初见成效，初步建成国产化智算产业开放生态系统，为我国人工智能产业的技术自主可控和生态体系建设奠定了坚实基础。

中兴通讯与中国国新签署战略合作 协议

8月25日，中兴通讯股份有限公司和中国国新控股有限责任公司在北京举行战略合作签约仪式。中兴通讯董事长方榕，央企投资协会会长、中兴通讯首席顾问谢军；中国国新党委书记、董事长徐思伟，党委委员、副总经理房小兵出席签约仪式。中兴通讯高级副总裁、首席战略官王翔，中国国新党委委员、副总经理王豹代表双方签署战略合作协议。

中兴通讯联合产业伙伴发布 《低空安防融合感知技术应用 蓝皮书》

8月11日，中兴通讯在其总部举办低空经济产业融合方案研讨会，邀请多家低空产业生态平台的伙伴企业参与研讨，并正式对外发布《低空安防融合感知技术应用蓝皮书》（以下简称“蓝皮书”）。该蓝皮书由中兴通讯与中国信息通信研究院联合牵头，浙江凡双科技、上海特金、历正科技、理工全盛、君立华域等5家产业生态伙伴企业参与编写。

中兴通讯携手CTY完成日本 首个三合一50G-PON时分 方案演示

2025年7月31日，中兴通讯与日本知名有线电视及宽带服务提供商CTY株式会社联合完成了日本首个对称三合一50G-PON Combo时分方案的测试。此次测试的顺利完成，标志着日本下一代光接入网络向商用演进迈出了坚实的一步，为未来超高速宽带接入和多样化应用场景奠定了坚实基础。

中兴通讯：AI驱动上半年营收同比增长14.5%， “连接+算力”战略升级持续兑现

8月28日，中兴通讯发布2025年半年度报告。

报告显示，2025年1—6月，公司实现营收715.5亿元，同比增长14.5%；归母净利润50.6亿元；扣非归母净利润41.0亿元。其中，二季度单季营收、归母净利润环比一季度均实现增长。

公司全面拥抱AI浪潮带来的市场机遇，以算力、终端产品为代表的第二曲线营收同比增长近100%，占比超35%。其中，公司服务器及存储营收同比增长超200%，AI服务器营收占比55%。政企和消费者业务营收合计占比超50%。公司近年坚定推进的“连接+算力”战略升级持续见效。

全面投入AI，加速AI与ICT融合创新

2025年上半年，面对AI技术变革带来的万亿级市场空间，中兴通讯以“All in AI，AI for All”的战略主张，加速AI与ICT融合创新。公司把握AI在网络基础设施、算力基础设施、行业应用、端侧带来的发展机遇，在巩固国内运营商基本盘、提升海外运营商市占率的同时，深化算力需求的拓展，加快AI端侧产品升级，有效推动公司营收增长提速。

报告期内，公司研发费用126.6亿元，占营收比例约18%，拥有约9.4万件全球专利申请，累计超5万件全球授权专利。其中在AI领域，拥有近5500件专利申请，有近一半已获授权；在芯片领域，拥有约5700件专利

申请，累计超3700件授权专利。

政企、消费者业务营收占比超50%，全系列AI服务器实现规模突破

上半年，中兴通讯国内、国际市场分别实现营收506.2亿元、209.3亿元，占比70.7%、29.3%，同比增长17.5%、7.8%；运营商网络、政企、消费者业务分别实现营收350.6亿元、192.5亿元、172.4亿元。

在AI基础设施建设加速落地的背景下，公司全面投入AI，推动算力业务规模上量。公司收入结构发生变化，政企和消费者业务的增长也带来毛利率阶段性承压。

具体来看，在运营商网络，中兴通讯积极应对国内5G投资下降挑战，持续深耕基本盘，核心产品市场份额保持稳中有升，同时拓展智算项目，深入布局5G-A、万兆接入等未来技术方向，上半年公司运营商网络营收降幅有所收窄。

在政企业务，中兴通讯抓住智算投资增长机会，实现政企业务跨越式增长，营收同比增长109.9%，成为公司整体营收增长的核心引擎。公司一方面充分把握国内头部互联网、行业公司等加大智算投资的机遇，扩大合作规模；另一方面紧跟海外大国加快数据中心、服务器等算力基础设施建设新机会，深化中资企业出海及海外本地客户合作。

在消费者业务，中兴通讯通过全

品类AI终端的前瞻布局，加速构建全景智慧生态。上半年，家庭终端、智能手机、云电脑及移动互联产品协同发力，拉动消费者业务营收同比增长7.6%。其中，公司依托“中兴+努比亚”双品牌策略，重点拓展东南亚、拉美、中东、非洲和欧洲等地区智能手机公开渠道市场，电竞终端品牌“红魔”在深耕国内市场的同时，发力海外线上电商渠道，手机国际市场营销同比增长超30%；云电脑保持高速增长态势。

“连接+算力”战略升级，助力AI普惠

在连接领域，公司持续巩固无线、有线产品核心竞争力。机构最新报告显示，公司5G基站、5G核心网发货量全球第二，RAN、5G核心网、光接入和光传输产品获行业领导者评级。其中，无线领域，公司通过5G-A开启低空经济、万兆体验与确定性服务等新业态，并持续推动6G技术演进；有线领域，公司通过全光网络提供超大带宽、低时延与高可靠特性等网络关键能力支撑，为各行各业的智能化升级夯实“连接根基”。

在算力基础设施领域，面向AI大模型带来的新机遇，公司强化智算产品的研发及产业生态合作，通过自研芯片、智算服务器、超大规模集群、智算一体机等全栈国产化智算产品，及资源管理平台、训推平台、星云大模型、智能体工厂等软件方案，软硬件协同打造开放普惠的智算基座，提供端到端、全栈全场景智算解决方案，满足多样化AI场景需求。



尚文东

中兴通讯光系统规划工程师



吴妮珊

中兴通讯光系统技术预研高级工程师

从概念到落地： C+L一体化技术发展现状与趋势前瞻

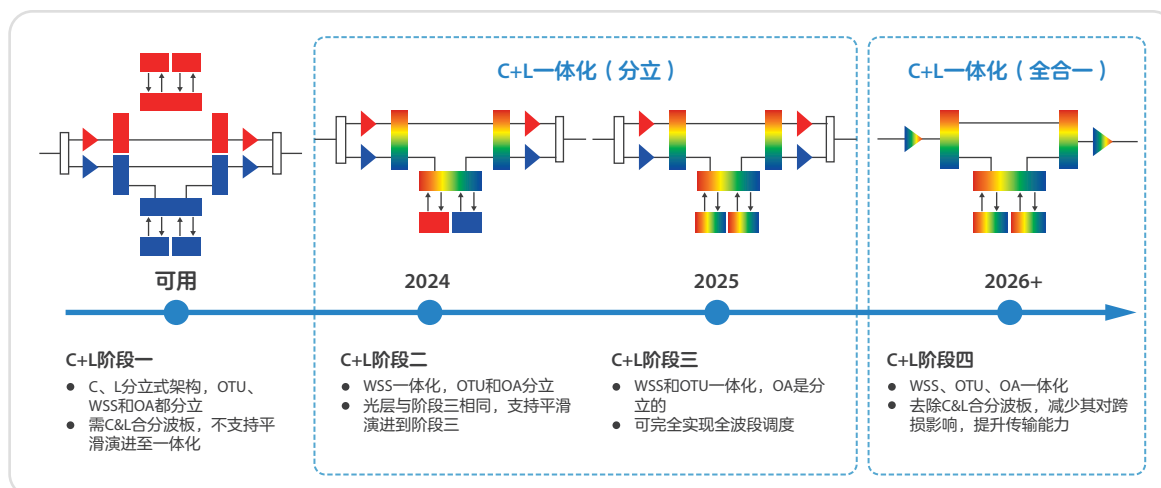
2025年，全球AI增强与原生应用相关的网络流量呈现出爆发式增长；预计至2030年，AI相关流量（增强+原生）将颠覆现有格局，尤其是视频/图像等富媒体AI交互业务的发展，将驱动全球网络基础设施向高带宽、低时延转型，迫使全球运营商加速智能流量调度能力建设。算力网络的蓬勃发展给底层骨干传送光网络的容量带来了新的挑战，数据中心互联、城域网建设等大容量、灵活接入需求场景，也推动光传输网向大容量、高速率、低成本、低时延和支持灵活调度等方向主动演进。

当前光传送网络主要有2个途径提升单纤传输容量，一是提升单波速率，二是频谱扩展，增加单纤传输信道数量。提升单波速率的技术手段

主要依靠先进的光数字信号处理（oDSP）和纠错编码（FEC）算法来改善高阶调制格式的接收性能；C+L波段扩展应用可以在原有C波段基础上实现波道数扩展一倍，从而系统容量翻倍。因此单波400G/800G/1.6T C+L系统在算力网场景逐渐大规模商用。

C+L一体化发展现状

算力网在保障T比特级超大带宽的基础上，还需要具备灵活调度、超高可靠性等能力。C+L一体化方案的推出，可以助力运营商在保证高速率、大容量的前提下，高效应对数据洪流，实现扩展C+L波段的全波段无阻塞调度，光支路侧可



▲ 图1 C+L一体化系统演进路线

支持全波段波长无关，打造更敏捷更灵活的光网络设施。C+L一体化光网络解决方案中，OTU（光转换单元）和WSS（波长选择开关）支持12THz C+L全波段任意调谐、调度能力，可以简化C+L系统的组网结构，最大程度上发挥ROADM（可重构光分插复用器）全光交换能力。此外在WASON下中继业务恢复场景，C+L一体化方案可以将网络中恢复资源池里的中继板卡供全网统一调配使用，增强网络抗多次故障能力。

C+L一体化系统的商用与产业链的技术创新密切相关。400G C+L系统的演进路线如图1所示，从C/L波段分立架构出发，一体化系统演进将经历WSS/OTU/EDFA（掺铒光纤放大器）全部分立器件、WSS一体化、WSS/OTU一体化、WSS/OTU/EDFA均一体化四个不同阶段。其最终形态从结构上接近现有C波段系统，器件成本相比分立架构C+L阶段预计降低30%，板卡集成度提升一倍，降低设备占用空间。在C和L波段EDFA一体化后，C和L波段之间不用保留原有的保护间隔，实现C+L全频可用，OTU和WSS可以演进为C+L波段全频切换，进一步提升C+L波段的频谱利用率；C和L波段之间可通过一个EDFA/WSS统一调节实现功率均衡，系统性能调优和运维更加便利；此外一体化C+L系统无需配置C和L波段合分波器件，降低系统跨段损耗，进一步提高系统

的传输能力。

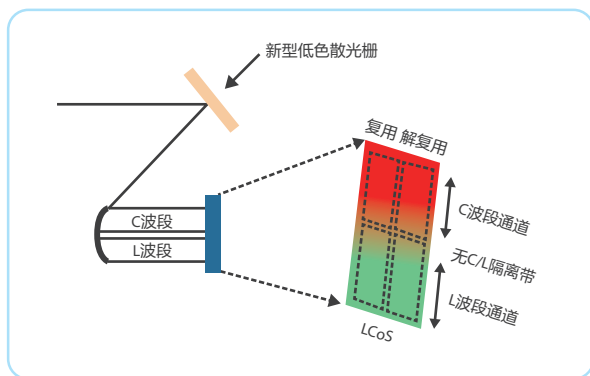
C+L二阶段依赖一体化WSS器件，OTU和EDFA仍然为分立形态。2024年下半年起，WSS一体化的C+L系统开始规模商用，对应ROADM站点具备C+L波段一体化调度的能力。

C+L三阶段在已具备一体化WSS的基础上，引入一体化OTU器件，仅有EDFA仍处于分立状态。从光层来看，C+L三阶段与二阶段的组网结构基本一致，但OTU的一体化可以使光网络实现完全的C+L全波段自由波长调配。

C+L四阶段为C+L一体化的最终形态，通过一体化WSS、一体化OTU和一体化EDFA器件的全面应用，去除C/L波段合分波器件，简化光层组网结构。但目前一体化EDFA技术与量产尚存在诸多不确定性，相关一体化铒纤仍处于研究阶段，要视技术发展情况再做具体策略决定。

C+L一体化关键技术和产品

C+L一体化LCoS（硅基液晶）、ITLA（集成可调谐激光器组件）和铒纤是C+L一体化演进的核心技术，随着一体化LCoS和ITLA实现技术突破，一体化WSS和OTU逐渐大规模商用，C+L一体化向三阶段演进。而一体化铒纤技术尚存在诸多挑战，目前产业界仍在持续研究，一体化EDFA



▲ 图2 C+L一体化WSS结构示意图

暂时无法满足商用需求。

C+L一体化WSS

如图2所示，一体化WSS中LCoS扩展到C+L波段，相较于分立式WSS，一体化WSS的单通道间隔的像素尺寸会被压缩，存在WSS通道带宽窄化问题。该问题可以从光路和算法两方面解决，光路方面，增加棱栅线数提升色散/分光能力，配合光路透镜调整，如位置/焦距调整，甚至增加辅助透镜，能够实现12THz光发散角压缩和LCoS面光斑的压缩；算法方面，LCoS整形算法优化结合LCoS分辨率提升（2.4k/2.9k/3.3k），可以

进一步改进带宽。

目前C+L一体12THz WSS已在业内逐步推出，同时以WSS为核心的OXC设备也进一步向C+L一体化方向发展。

OXC作为智能化全光网络的基础单元，结合管控协同调度、全局智能化功率管理、光标签等技术的应用，将实现一站式智能开局运维、简化功率调节、业务追踪、错连检测、自动调度等功能，推动算力光网络向更智能化的方向演进。

C+L一体化OTU

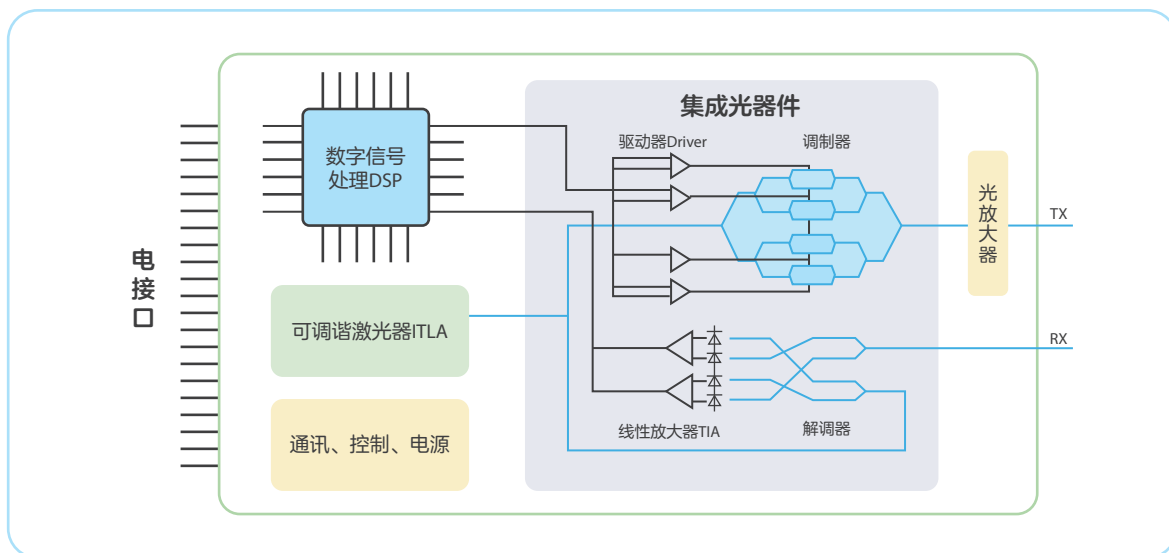
C+L一体化OTU主要由DSP、ITLA、调制/解调器和光放大器等组成，其内部结构如图3所示。

● 电模拟芯片和DSP芯片

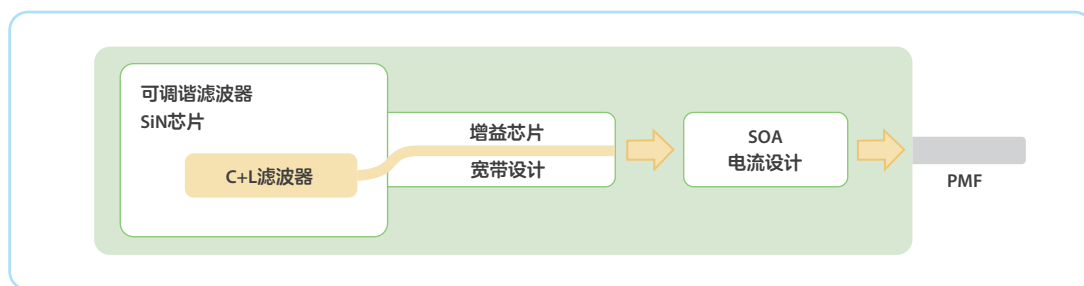
一体化OTU涉及的关键技术与C波段OTU基本一致，仅在DSP芯片方面需要少量补偿，目前400G/800G调制、解调功能和DSP数据恢复算法均已成熟。

● 一体化ITLA

一体化ITLA采用双芯片集成（C/L双芯片+低损耗光开关）方案或单片外腔（基于优化量子阱结构的单增益芯片+基于SiN波导微环的多环谐振腔）方案，其中成熟商用的一体化ITLA单片外腔



▲ 图3 相干光模块内部结构示意图



◀ 图4 一体化ITLA单片外腔方案示意图

方案如图4所示。

中兴通讯采用微环谐振滤波器和独家外延结构，已经实现了业界领先的30kHz窄线宽、C+L一体化240波可调谐激光器，支持现阶段400G/800G相干光模块及未来1.6T相干传输系统需求，满足运营商向CL240演进的需求。

● 一体化调制器和探测器

一体化调制器和探测器主流的技术路线包括硅基路线和InP路线两种。硅基路线采用硅光/薄膜铌酸锂调制，可支持波长范围大，波长相关性较小，性能与单独C/L波段ICRM（集成相干光收发器）相当；Si/GePD可宽带响应，SiP实测可行。InP路线，波长相关损耗/响应度有差异，一体化预计代价较大，需从器件材料、结构优化和算法补偿方面进行优化。

C+L一体化放大器

相比于一体化WSS和一体化OTU，一体化EDFA技术路线和产品尚未成熟，作为C+L一体化系统最终形态的关键器件，C+L一体化EDFA是下一步重点关注的技术。一体化铒纤的设计、制备及放大器整机设计等都有巨大的挑战，需要产业链上下游加大对C+L一体化铒纤和放大器整机技术研究，推动一体化EDFA不断发展和商用。

C+L一体化应用

2025年，中兴通讯在C+L一体化光网络技术上持续深耕，独家推出全频OTN方案，首发一体化400G/800G/1.6T C+L光模块，系统容量提升

25%且备件种类减半，并联合国际国内运营商完成多个现网验证。

2025年3月，中兴通讯联合中国电信完成行业首个C+L一体化80波800G现网试验。此次现网试点依托于中国电信在建ROADM全光交换骨干网络，基于扩展C+L一体化光层平台，全面验证了800G扩展C+L一体化OTU模块的业务传输能力、12THz超宽谱光电调度能力以及WSON的波长恢复能力。

C+L一体化趋势展望

一体化单波400G技术已经趋于成熟，一体化单波800G技术在测试转商用，400G和800G整体需求在逐渐增大。对于波分骨干网场景，短期仍将仍以成熟的400G方案为主，但部分高速率要求的场景仍然存在800G方案的机会；对于城域网/DCI核心大流量场景，出现升级或新建800G网络的需求，目前单波800G商用规模较小，预计在2025年会迎来爆发期。

可插拔C+L一体化OTU相比固定OTU体积减少60%，功耗下降约68%，其高集成度和低功耗等优势，可有效节省机房空间，显著降低系统功耗，降低运营商Opex，未来可插拔C+L一体化OTU将成为主流发展方向。

当前业界各大运营商和设备商从标准、产品和试点网络应用等多方面推动C+L一体化光网络稳步演进，高速相干光模块和新型宽谱光放大器将持续推动一体化光网络不断发展，为算力光网络演进增加新动能。ZTE中兴

下一代光通信架构： 400G/800G全频OTN网络

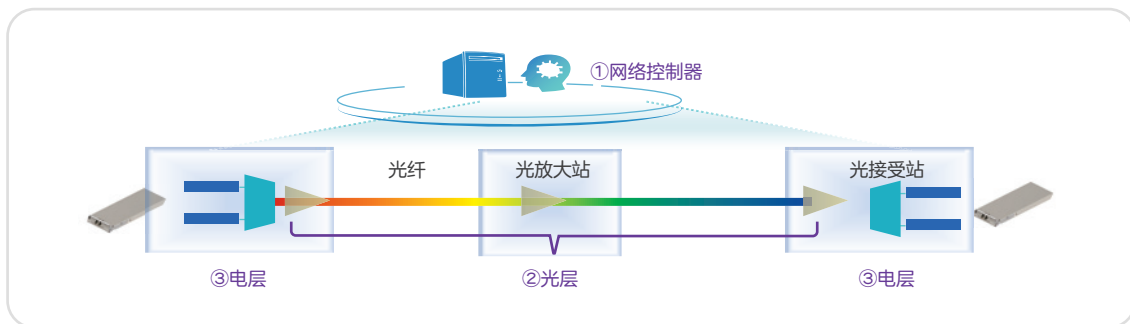


陈勇
中兴通讯OTN产品规划
总工

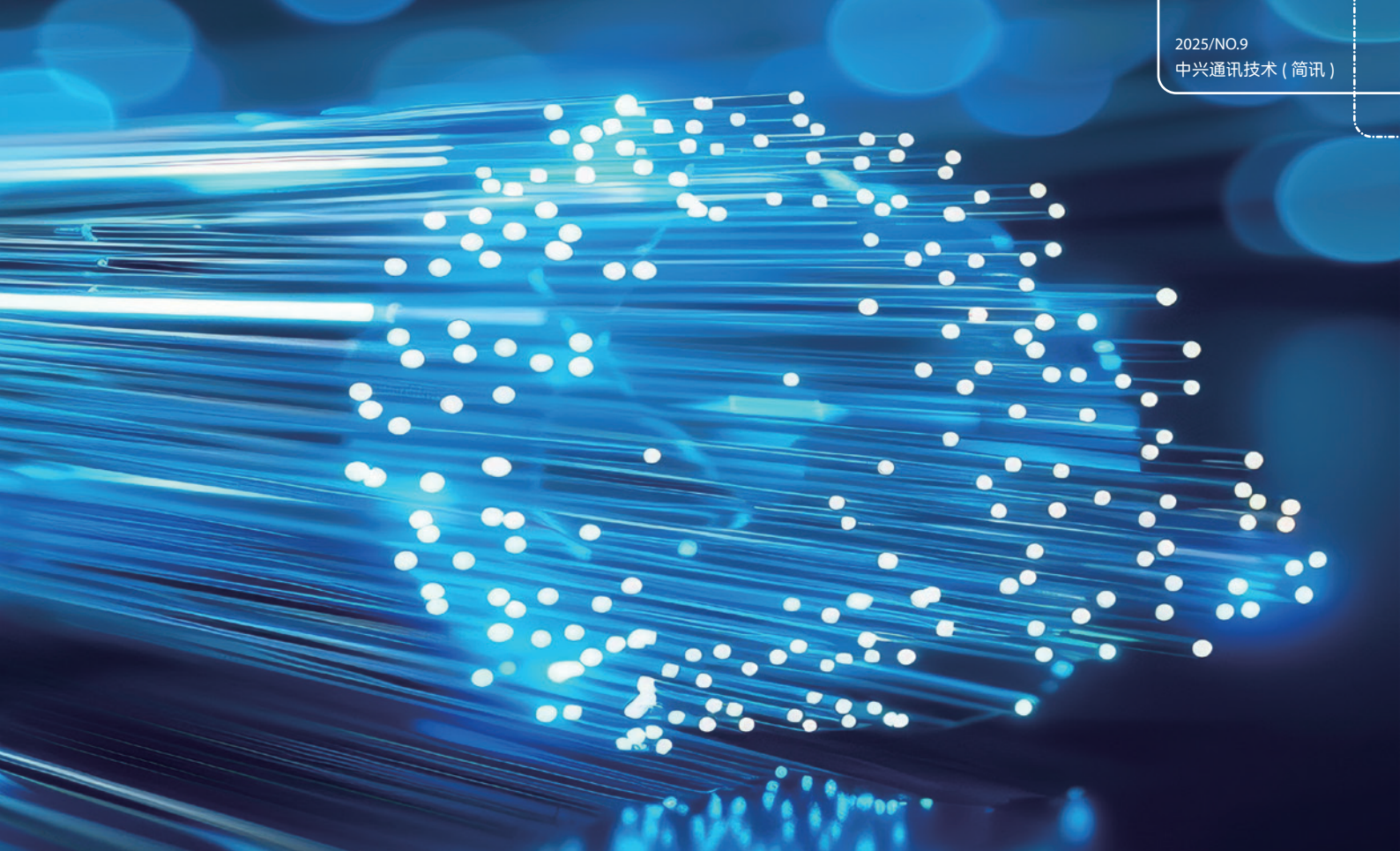
随着5G、云计算、大数据、人工智能等新一代信息技术的快速发展，数据流量呈现爆炸式增长，传统光网络在带宽、时延、运维效率等方面面临挑战。为满足未来超大容量、高效率、智能化的传输需求，全频OTN（C+L波段一体化）与超高速400G/800G相结合的全光网络架构成为下一代光通信网络演进的重要方向。

400G/800G全频OTN方案

中兴通讯400G/800G全频OTN网络解决方案采用“全频OTN+高速光模块+智能调度控制”的三层架构，构建面向未来的全光网络平台。如图1所示，全频OTN可分为网路控制层、电层、光层几个层级，其中网路控制层，由SDN控制器、智能调度系统组成，实现波长级业务调度、资源优



▲ 图1 全频OTN网络架构



化与自动运维；电层主要包括全频OTN设备、400G/800G光模块，实现高速、高可靠性数据传输与封装；光层主要特性是放大器、OXC系统器件需要支持C+L波段一体，提供12THz带宽资源，支持超大容量传输。

全频OTN光层，基于波分复用（WDM）、波长选择开关（WSS）及相干光模块等核心组件，构建全频谱范围（12THz）的波长级业务的智能调度与高效传输机制。采用通道间隔为150GHz的密集波分复用技术，支持80波（C波段、L波段各支持40个波长通道）150GHz的容量的传输；借助波长选择开关（WSS）实现波长级业务的动态配置与灵活调度，提升网络智能化与可扩展性；选用支持C波段/L波段的掺铒光纤放大器（EDFA）或拉曼放大技术，以补偿光信号在光纤传输中的衰减，支持高速信号的长距离稳定传输。全频OTN依托其大容量、高性能与灵活调度能力，为

下一代高速光通信网络建设奠定坚实基础。

全频OTN电层设备，支持ODUflex和OTUCn（OTU Client）等灵活容器，高效适配400G/800G高速业务需求，具备波长级与子波长级的多粒度业务调度能力，实现精细化的带宽按需分配；支持多业务统一承载，满足IP、以太网、存储等多种业务的高效接入与传输需求；支持FlexO（灵活光互联）接口，可适配不同速率等级的光模块，提升组网灵活性与传输效率。400G/800G高速光模块，采用相干调制技术，可显著提升频谱效率与传输性能，满足高带宽业务发展需求；支持多种传输距离规格，涵盖短距离数据中心互联（DCI）、中距离城域传输及长距离骨干网络应用，满足多场景业务部署需求；支持C+L全波段，可提升模块化集成度，便于灵活部署与运维管理，助力运营商构建高性能、可扩展的下一代光通信网络。

智能调度与控制，采用SDN（软件定义网络）架构实现网络虚拟化与业务的自动化部署，提升网络资源的灵活配置与管理效率；通过引入AI算法，可实现链路质量智能预测、故障快速定位与自愈，以及网络资源的动态优化，显著增强网络的可靠性与运行效率；支持与BSS（业务支撑系统）和OSS（运营支撑系统）的无缝对接，实现端到端业务的统一管控与服务编排，全面提升网络智能化水平与运维自动化能力，助力构建高效、弹性、自适应的新型通信网络。

方案演进

400G/800G全频OTN光网络演进方案分为三个主要阶段：

- 初期阶段（2024—2026年），聚焦400G模块与C+L一体光路调度，通过骨干网应用验证C+L波段传输技术的可行性，为全面实现全频OTN方案落地奠定技术基础。
- 中期阶段（2027—2029年），全面部署400G全频OTN（光模块、光路调度和放大器均支持C+L全频一体化），实现C+L波段统一调度与协同，大幅提升网络带宽与调度灵活性。
- 成熟阶段（2030年以后），800G模块将逐步普及，AI驱动的智能调度技术趋于成熟，网络向全智能化演进，实现多业务的融合承载与高效调度。该阶段目标是打造一个高带宽、低时延、自适应的下一代光网络，全面支撑未来数字经济与新兴业务的发展。

全频OTN光网络在多个方面展现出显著优势：在带容量方面，单链路容量可达12THz，支持80波400G/800G传输，通过合理的波长规划与信道间干扰控制，未来可演进至80波T比特级，大幅提升光网络的传输容量；在灵活性上，依托高效的控制与管理机制，智能调度系统可实现对网络波长级与子波长级的精细化调度，提升资源利用率与业务调度灵活性；在成本效率方面，模块化部署方式有效降低网络升级和扩容成

本，随着产业链成熟和规模效应显现，全频高速光模块与波段扩展技术的单位成本将得到持续优化；智能运维能力方面，网络支持SDN与AI驱动的智能调度与运维，大幅提升自动化水平，并通过可平滑演进的运维体系架构设计，确保现有网络向全频OTN的无缝过渡。

部署策略

对于未来400G/800G全频OTN网络解决方案部署策略，中兴通讯建议如下：

- 分阶段部署：优先在骨干网络中部署400G高速光模块，并结合C波段进行波道扩容，提升传输能力；随着业务需求增长，逐步引入L波段实现全频C+L一体，实现频谱资源的高效利用，降低初期投资压力。
- 模块化升级：采用插拔式光模块（如长距骨干城域的CFP2封装，短距DCI互联的QSFP-DD、OSFP封装）和可扩展的OTN设备，支持按需扩容，显著降低升级成本和周期，提升网络灵活性与可持续发展能力。
- 智能运维先行：率先部署SDN（软件定义网络）控制器和AI驱动的智能运维平台，实现网络状态实时感知、故障自动修复和流量智能调度，提升网络自动化与智能化运维水平。
- 多业务统一承载：构建统一的传输平台，支持IP、以太网、OTN、SDH等多种业务类型在同一网络中灵活调度与承载，提升资源利用率，降低网络复杂度和运营成本。

全频OTN（C+L波段一体化）与400G/800G/1T+高速光模块的结合，是构建下一代全光网络的关键路径。该方案具备高带宽、高灵活性、高智能化等优势，适用于大容量骨干、城域、数据中心互联、企业专线等多种场景。未来，随着相干光模块成本下降、AI调度算法成熟以及标准协议的完善，全频OTN将加速在各行业的落地应用，为数字经济未来飞速发展筑基赋能。ZTE中兴

超高速光模块及核心器件

发展现状与演进

超

高速相干光模块作为全频OTN网络的核心部件，其速率、传输距离、功耗、成本直接影响光传输网络基础设施的演进。目前长途400G和城域800G已进入商用阶段，长途800G和城域1.6T处于技术开发阶段。当单波速率提升时，为支持单纤传输容量升级，需要扩展工作波段，例如400G长途相干光模块工作波段从C波段向C+L波段扩展，未来T比特长途相干光模块还将向S+C+L多波段演进。随着相干光模块的技术发展，核心器件面临带宽、集成度、功耗和成本的挑战，推动新材料、新架构、新封装工艺的创新和突破。

发展现状

电信领域长途和城域传输相干光模块以CFP2为主；数据中心间互联的相干光模块有QSFP-DD和OSFP两种。标准化、小型化、可插拔、易维护是光模块的传统需求。中兴通讯采用CFP2相干光模块。下面分别介绍光模块内相干光源和光收发器件的技术现状。

相干光源方面，包括集成激光器和外腔激光器两条技术路线。单片磷化铟集成激光器不能实

现C+L一体化。外腔激光器包括空间光学滤波器和硅光滤波器两种方案，其中空间光学滤波器方案中标准具高反膜的波长相关性，难以实现C+L一体化。中兴通讯的相干光源方案为小型化的Nano封装外腔激光器，采用硅光滤波器方案，通过创新的双微环和马曾干涉仪结构，调控谐振谷底，抑制竞争模谐振峰，可拓展激光器频率调谐范围至C+L一体化12THz共240波，较当前业界主流的C120/L120调谐范围翻倍；激光器线宽指标30kHz，满足长距离传输系统需求。

光收发器件方面，相干光收发器件主要材料是硅光、磷化铟和薄膜铌酸锂三种。硅光器件成本优势明显，硅光器件采用绝热耦合器等波长无关的设计，支持C+L一体化，但调制带宽有限，未来硅光技术发展方向是集成薄膜铌酸锂材料，支持大带宽调制。磷化铟器件带宽大、成本高，突出优势是可集成半导体光放大器(SOA)实现高功率输出，并且调制器中多模干涉仪引入的波长相关损耗也可以通过SOA进行补偿，但磷化铟芯片中多模干涉仪混频器和SOA都难以支持100nm以上工作波长范围，现阶段尚未有C+L一体化的磷化铟器件产品。薄膜铌酸锂从体材料铌酸锂发展而来，通过设计波长相关性较小的多模



沈百林
中兴光电子技术有限公司
系统架构师

干涉仪支持C+L一体化。中兴通讯采用硅光接收/薄膜铌酸锂调制的技术平台，以封装集成的方式实现CL一体化128GBd光收发器件。

演进

为支持光模块向超高速演进，光模块电接口形态、光收发器件、器件封装需要技术创新。

光模块方面，2030年以前，可插拔光模块是主流，随着单板上单路电信号速率提升至448Gbps及以上，光模块形态演进可能有两个方向：引入飞线（flyover）电缆提高电信号传输质量，继续支持面板可插拔模块；单板内采用嵌入式光模块，即相干光模块与单板信号处理芯片尽量靠近，如图1所示。相干光模块功耗增长呈螺旋式上升趋势，冷板式液冷技术等先进散热技术将逐步引入。光模块速率演进的驱动力是提升波特率和减少光电通道数来降低比特传输成本。当光域波特率达到400GBd以上时，考虑到性价比，有可能采用双波长并行架构实

现更高速率传输需求。

光收发器件方面，随着光芯片大带宽需求推动，各种新材料器件研究也成为热门，如高电光系数的钽酸锂、钛酸钡、锆钛酸铅、有机聚合物、石墨烯等。光器件新材料的应用需要有成本或性能优势，以硅光技术为平台，集成其他新材料实现取长补短是重要的技术发展方向。光收发器件材料特性如表1所示，其中硅光+薄膜铌酸锂的异质集成可能是未来相干光器件的主流技术路线，其支持实现S+C+L一体化，支持2030年左右所需的400GBd+波特率：发送端硅光无源元件支持多波段工作，薄膜铌酸锂波导仅为调制部分，带宽可达200GHz以上；接收端采用热调相位实现多波段90°相位差的精确混频，锗探测器通过降低光生载流子渡越时间和优化串行电阻支持200GHz以上带宽。

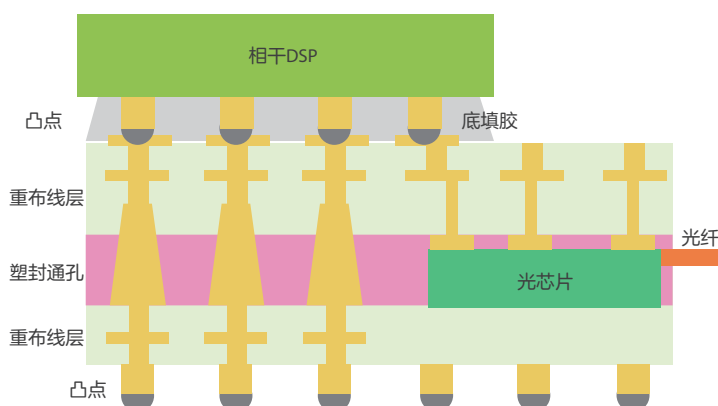
器件封装方面，光芯片、电芯片和DSP芯片之间高速信号互联优化是光器件封装演进的驱动力，光电子器件将借鉴集成电路行业封装技术，如铜凸点、铜铜键合、芯片通孔、集成电容、有



▲ 图1 相干光模块形态

项目	硅光	磷化铟	薄膜铌酸锂	硅光+薄膜铌酸锂
调制带宽	~60GHz	~110GHz	>200GHz	>200GHz
探测带宽	>200GHz	>200GHz	无	>200GHz
工作波段	S+C+L一体化	S或C或L	S或C+L	S+C+L一体化
集成度	高	高	中	高
成本	低	中	中	中

▲ 表1 光收发器件材料比较



▲ 图2 相干光器件可能形态

机基板、类载板、玻璃基板等技术，光电子器件与集成电路封装的主要区别在于光芯片需要光耦合，以及在封装工艺过程中需做好光芯片耦合面的防护。近中期光电子器件封装架构有可能是光芯片作为中介板，调制驱动和探测跨阻放大芯片倒装在光芯片之上，接口高速信号通过光芯片的通孔与电芯片互联，光芯片和电芯片采用铜铜键合或凸点焊接的方式以实现较短的传输路径和较小的寄生效应，DSP芯片和光电芯片共基板进行封装。图2给出了中长期相干光器件一种可能的极简形态：采用扇出晶圆级封装工艺，相干DSP

芯片集成控制管理、调制驱动/跨阻放大、电容功能，相干DSP倒装，和光芯片通过重布线层互联，相干DSP在上利于散热。

相干光模块正朝着高带宽、高集成度、高可靠、低功耗、低成本的方向发展，推动核心器件在芯片材料、架构方案、封装工艺上不断创新。目前中兴通讯已实现C+L一体化相干光模块。展望未来，T比特级光器件有望采用硅光+薄膜铌酸锂的异质集成技术实现S+C+L一体化，支持256GBd/400GBd+高波特率。ZTE中兴

超高速光传输标准进展



武成宾
中兴通讯标准预研总工

在 AI算力革命和数据中心的双重驱动下，超高速光传输持续向更高速率更大带宽发展。2024年，随着单400G波分系统在运营商骨干网络中得到规模部署，标志着400G光传输正式进入商用元年。同时，随着400G/800G光传输标准在国内外准组织基本成熟，超1T（B1T）光传输及新型技术成为各标准组织的热点课题。

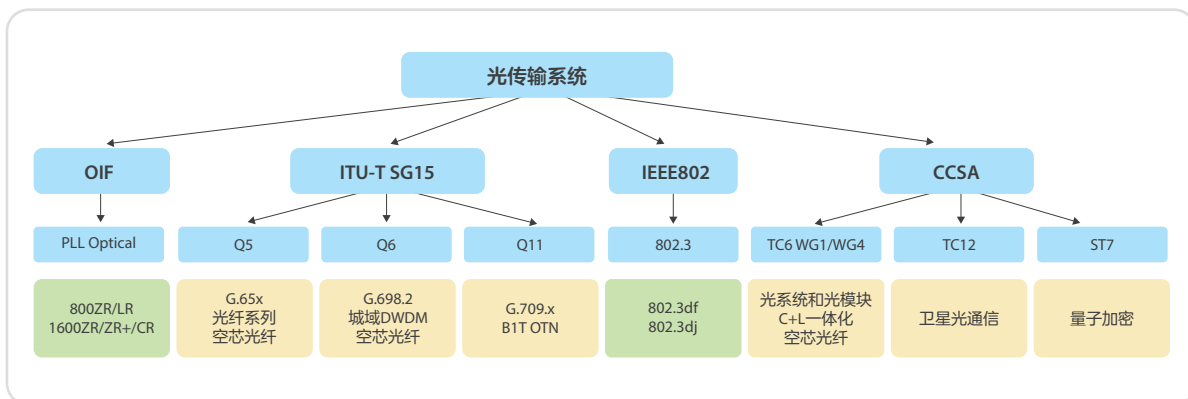
高速光传输标准组织总览

高速光传输技术涉及的标准组织包括ITU-T SG15、OIF、IEEE802.3以及国内CCSA，各标准组织和重点标准技术如图1所示。

高速光传输标准主要包括光系统、光模块、B1T OTN和以太网接口等技术，ITU-T SG15规

范高速光传输的光系统和B1T OTN标准，其中ITU-T SG15 Q5涉及新型光纤（如G.654.E、空分复用光纤等），Q6涉及800G城域光波分系统和光器件，而Q11规范B1T OTN的帧结构、复用映射等技术；IEEE802.3规范800GE/1.6TE的高速以太网接口，用于高速光传输的客户侧接口；而OIF规范基于相干调制技术的800G/1.6T ZR/ZR+光系统和光模块标准、用于高速光传输的线路侧接口，以及数据中心互联应用。

高速光传输的国内标准组织包括CCSA TC6/TC12/ST7。其中TC6 WG1工作组规范的波分复用设备行标具有极高的权威性，体现了国内三大运营商的需求和设备商的能力，同时还进行C+L一体化、空芯光纤等新型光传输技术的标准化，而WG4以速率和距离为维度来规范不同规格的光模块标准。



▲ 图1 高速光传输技术的标准组织和重点标准技术

800G及以上速率光层标准进展

ITU-T SG15 Q6工作组正在进行800G城域DWDM的标准化工作,预计2026年完成。致力于规范多厂家兼容的DWDM系统,ITU-T持续寻找一种判定发射机质量的参数,这对于相干调制的DWDM系统,比较困难,目前已决定采用ETCC参数,并持续与OIF和IEEE802.3进行合作研究。2025年6月,在Q6的巴黎会议上,中兴通讯建议启动1.6T的标准化,得到会议各方的广泛认可。同时中国移动建议Q6与Q5联合进行空芯光纤的研究,初步得到认可。Q6高度重视规范能够体现其独特价值的标准,预计未来C+L扩展波段甚至S波段扩展,以及空芯光纤和空间光通信等技术将会得到体现,Q6在高速光传输的标准化中的作为值得期待。

OIF近年来持续进行相干光系统和光模块的标准化,进度处于各标准组织的前列,影响力持续提升。2024年10月,OIF发布了800G ZR标准规范,并在2025年4月发布了800G LR标准规范,标志着OIF完成了800G相干光模块的标准化,并在2025年的OFC上进行了800ZR技术的互通展示。2024年以来,OIF相继立项了1.6T ZR/ZR+/CR三个项目,标志着OIF正式进入了1.6T的标准化时代。1.6T ZR项目明确采用单波长1.6T,调制格式为PM-16QAM,传输距离为80~120km,波段为C波段,该项目预计2026年Q3完成。而1.6T ZR+项目已经决定采用双数字子载波的调制格式,目标传输距离为2000km(1.2T)和1000km(1.6T),波段选择C+L,预计2026年底完成。同时OIF启动1.6T轻相干(CR)项目,旨在规范简化相干技术,持续扩大相干技术的应用范围。值得一提的是,1.6T ZR+项目也是OIF首次规范多跨段的标准,势必会持续提升OIF的影响力并对ITU-T和IEEE802.3的1.6T标准化的技术动向有着重要影响。

IEEE802.3在以太网接口的规范方面有着绝对

的权威性。IEEE802.3正在规范800G/1.6T以太网接口,单通道100G的802.3df已经在2024年发布。目前规范基于单通道200G的802.3dj项目,不同距离的方案已经确定,并输出了该标准的D2.0版本,根据该项目的计划,预计2026年9月发布。同时IEEE802.3启动了单通道400G的研究,随着该技术的成熟,IEEE802.3将会加速规范1.6T以太网接口的标准。

CCSA TC6 WG1在2024年完成了《超长N×400G光波分复用(WDM)技术要求》,该标准规范基于120GBd以上的QPSK调制格式的DWDM光系统,从而很好地满足了国内三大运营商对400G超长距的标准需求,推动了400G DWDM的商用规模部署进程。2025年启动规范《城域N×800Gbit/s光波分复用(WDM)系统技术要求》,并立项了《长距800G光传输系统技术研究》《S+C+L波段的光波分复用(WDM)传输技术研究》《1.6Tb/s光波分复用系统技术研究》等研究课题,启动了800G长距、波段扩展和1.6T光传输的研究,使得国内在长距离和高速DWDM标准化方面走在了前列。

同时,CCSA TC6 WG4近两年来基本完成了800G强度调制和相位调制两种技术的多项系列标准,并启动了1.6T光模块以及C+L一体化关键光器件的研究和标准化,从而更好地支撑光系统标准的应用需求。

CCSA TC12 WG3,正在制定行标《卫星互联网星间100Gbps光通信系统技术要求》,并在2025年立项了行标《卫星互联网星间100Gbps光通信系统测试方法》,同时在WG4立项了行标《面向卫星中继的星间激光通信系统测试规范》,标志着高速光通信正在从地面走向空间。

量子通信作为未来信息通信行业的一个新兴战略性制高点,由CCSA ST7负责其标准化工作。当前,ST7正在讨论行标《基于OTNSec协议的量子保密通信应用设备技术规范》,旨在制定面向量子加密应用的OTN设备规范。

800G短距和城域光传输标准在国际标准组织基本完成，而800G的DWDM长距应用、波段扩展是国内标准的研究重点；而B1T以上速率，重点为1.6T高速光传输成为ITU-T、OIF、IEEE802.3和CCSA等国内外标准组织的研究热点，调制格式、接口技术、波段扩展、C+L一体化、空芯光纤和卫星光通信等技术将成为未来标准化的焦点。

B1T OTN标准进展

ITU-T SG15 Q11工作组正在进行B1T OTN的标准化工作，B1T OTN是主要面向以太网业务优化承载的大带宽OTN接口技术。B1T OTN标准技术在制定过程中秉承了极简架构和产业共用的设计理念。

极简架构

基于OTUk的100G及以下OTN接口技术定义了1.25G和2.5G的时隙粒度，用来进行客户业务的高效承载。对于OTUk接口，速率每演进一代，映射复用层级就增加一级，而且速率的演进也并非保持整数倍提升，例如OTU4的速率是OTU2速率的10倍多而非严格的10倍，从而导致100G及以下的OTN接口映射复用层级多、接口演进速率不断提高的问题。基于FlexO的B100G OTN创新地提出了OTUCn和FlexO的技术，OTUCn中支持5G时隙用来时隙客户业务的承载，FlexO作为接口技术引入了性能更好的RS(544, 514) FEC。FlexO也引入了100G实例的概念，不同速率接口对应的FlexO均为100G实例的整数倍，从而解决了接口演进速率不断提升的问题，但并未解决之前OTN面临的层层复用的问题。

B1T OTN接口技术基于FlexO接口进行了扩

展，创新性地引入基于100G时隙粒度的FlexO的路径层，为了降低映射复用的层级数量，在设计之初就设定了不超过3级的路径层，即不管速率演进到多高，B1T OTN最多只有3层路径，继承了FlexO接口演进速率不提升的优势外，还解决了传统OTN层层复用的问题，极大简化了OTN的层次架构。此外，在OAM的监控方面，也进行了一个简化调整，将传统OTN的6层TCM(tandem connection monitoring)架构降低为最多4层TCM架构。

产业共用

OIF定义的ZR是一个借鉴了ITU-T定义的FlexO帧结构的点到点接口技术，ZR的客户业务是以太网。B1T OTN是一个面向端到端的网络技术，其中90%左右的客户业务是以太网，为了能够保持共用产业链优势，标准讨论中一个很大的技术倾向就是保持ZR中的以太网业务到FlexO帧的映射机制和B1T OTN中的以太网业务到新的FlexO路径层的映射机制相同，即以太网客户业务先按照257b为单位进行分流，然后按照GMP(generic mapping procedure)的机制映射到服务层的净荷区域中，B1T OTN新的FlexO路径层保持和ZR中FlexO帧相同的净荷区域和速率，新的FlexO路径层的开销区域则根据网络技术需要针

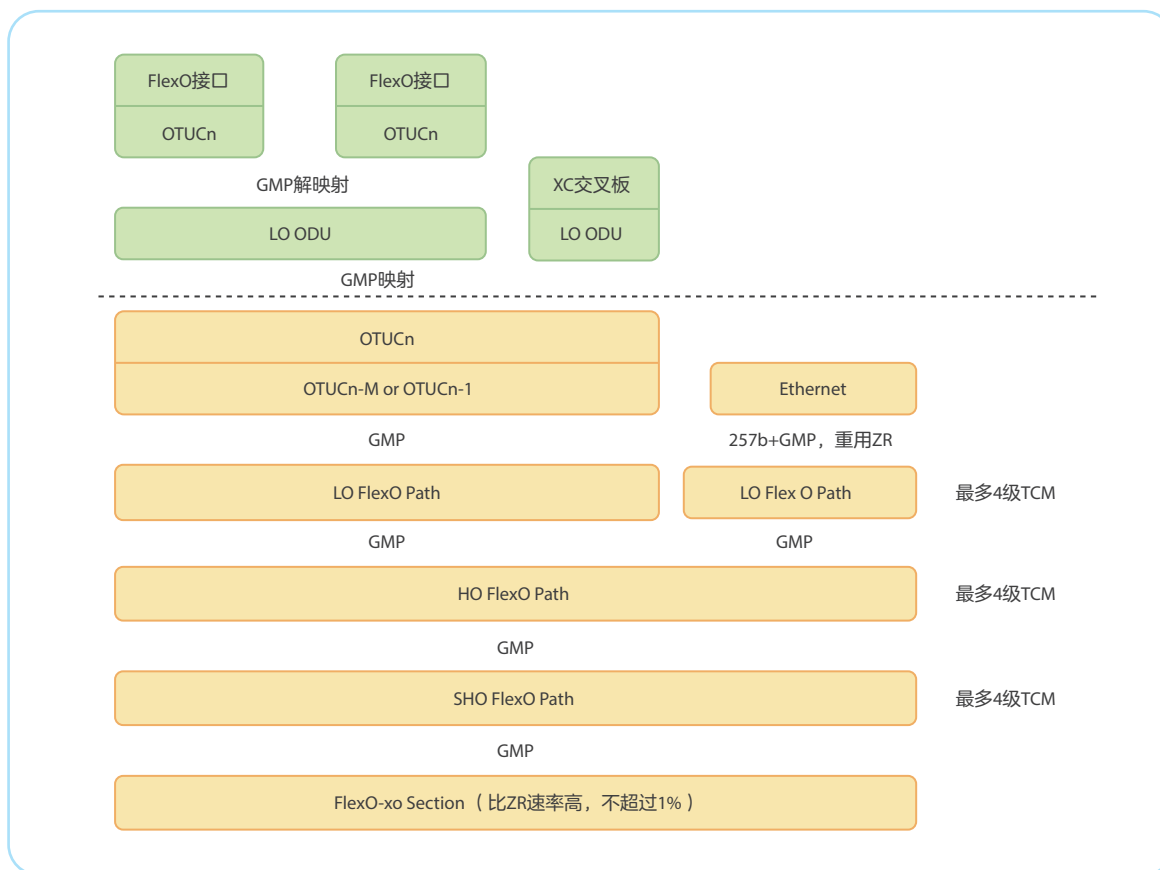


图2 B1T OTN功能层次

对性地扩展支持PM（path monitoring）和TCM监控能力。另一个重要的变化是接口速率的下降，通过降低映射复用层级数量以及降低不同层次之间的速率差异，B1T OTN的接口中的100G实例速率可以相比ZR接口的100G实例速率增长不超过1%，以期实现相关器件的重用。

除了承载以太网，B1T OTN还保持了后向兼容性，能够支持传统的OTN接口中的ODU业务在B1T OTN网络的承载。为了实现高效业务承载以及保持B1T OTN 100G时隙粒度的大颗粒调度，可以基于OTUCn作为多个低速ODU业务汇聚的实体，通过一些降速技术实现到新的FlexO路径层的映射。整个B1T OTN网络的功能架构如图2所示。

B1T OTN的标准在2025年3月的ITU-T SG15全会中取得了突破性进展，已经在该会议正式立项

G.709.1增补1用来规范B1T OTN技术，其内容的核心在于新的FlexO路径层的帧结构设计以及不同层次之间的复用关系，该标准计划与2026年7月发布，届时也会启动B1T OTN的设备等其他相关标准的制定。

总结

800G短距和城域光传输标准在国际标准组织基本完成，而800G的DWDM长距应用、波段扩展是国内标准的研究重点；而B1T以上速率，重点为1.6T高速光传输成为ITU-T、OIF、IEEE802.3和CCSA等国内外标准组织的研究热点，调制格式、接口技术、波段扩展、C+L一体化、空芯光纤和卫星光通信等技术将成为未来标准化的焦点。ZTE中兴

量子加密行业标准进展 及主流解决方案分析



钟凡繁
中兴通讯OTN产品规划
工程师



量子加密技术主要用于应对量子计算机等对现有加密体系的威胁，对信息安全提供保护。目前业界主流的路线主要是QKD（Quantum Key Distribution，量子密钥分发）和PQC（Post-Quantum Cryptography，后量子加密）技术。

量子加密标准进展

新产品和新技术的正常演进，首先需要制定标准，这样才可以吸纳更多的厂家参与研发与产品化，保证不同厂家的设备解耦运行，提高供应链安全。目前关于量子加密的标准，主要聚焦在QKD、PQC和新兴的QKD+PQC的融合三大方面。

QKD标准进展较快，尚需进一步完善

ITU-T（国际电信联盟）在2024年1月批准通过了Q.4160-Q.4164系列标准，涵盖QKD网络协议框架、Ak接口协议、Kq-1接口协议、Kx接口协议和Ck接口协议，实现了QKD网络国际标准“零”的突破。2024年7月，ITU-T第17研究组批准了《量子密钥分发节点保护的安全要求》标准，这是首个系统性规范可信中继节点安全实施部署的国际标准。

ETSI（欧洲电信标准化协会）发布的一系列《Quantum Key Distribution（QKD）》标准，

详细定义了QKD内外部的接口以及保护轮廓。ISO（国际标准化组织）/IEC（国际电工委员会）聚焦在量子安全评估标准，于2023年10月发布了首个QKD安全标准ISO/IEC 23837-1《量子密钥分发的安全要求、测试和评估方法》。ISO/IEC JTC1/SC27/WG3工作组正在推进ISO/IEC 23837-2《量子密钥分发的安全要求、测试和评估方法第二部分：测试和评估方法》的制定，进一步完善QKD安全评估体系。

CCSA（中国通信标准化协会）ST17在多个设备厂商的支撑下，发布了《量子密钥分发（QKD）网络安全技术要求》等行标。目前关于量子随机数、QKD接口、管理接口、可信中继、BB84/GG02协议等方面多项标准都已进入行标制定阶段，以规范整个QKD网络的部署。

在QKD标准方面，中国信通院、国盾量子等单位深度参与ITU、ISO/IEC标准制定，使中国在QKD标准化领域保持国际领先优势。

NIST占据PQC标准主导地位

NIST（美国国家标准与技术研究院）在后量子密码（PQC）算法标准化方面处于全球领先地位。2024年8月，NIST正式发布三项后量子算法标准：ML-KEM（原CRYSTALS-Kyber）作为密钥封装机制，ML-DSA（原CRYSTALS-Dilithium）和SLH-DSA（原SPHINCS+）作为数字签名算法。此

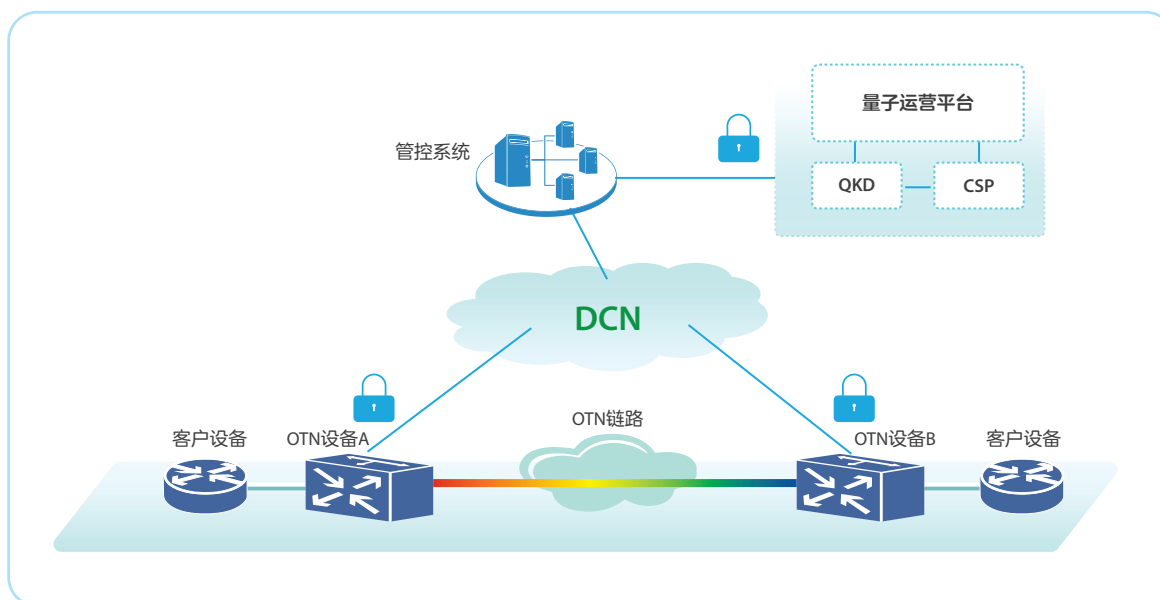


图1 密钥集中分发

外，NIST还在评估Falcon和HQC等算法，预计将在2025年底完成第四轮评估。

IETF（互联网工程任务组）的PQUIP工作组已发布《Post-Quantum Cryptography for Engineers》和《Terminology for Post-Quantum Traditional Hybrid Schemes》等文件，为工程师在系统中集成后量子算法提供指导。IETF通过RFC 8784等文档将NIST的PQC算法集成到IKEv2和TLS协议中，IETF的标准制定采用“分离思路”，将密钥协商和认证算法从密码包中分离，使协议更灵活地支持量子安全算法。

我国在PQC标准方面起步较晚，目前主要通过CCSA启动PQC相关提案和立项。

PQC和QKD融合是后续发展方向

QKD与PQC融合标准的协同处于探索阶段。在国际标准层面，QKD与PQC的融合标准尚未形成统一框架。未来，ITU和NIST可能合作制定QKD与PQC融合的端到端标准，包括密钥组合流程、身份认证机制和网络架构设计。

建议国内企业积极参与国际标准制定，推动QKD与PQC融合标准的制定，以实现提前布局，保持整个量子加密行业的领先。

量子加密主流解决方案

由于PQC标准和产业的不成熟，以及国内的政策驱动，当前量子加密的实际应用基本聚焦在OTN+QKD的应用上。当前主流的OTN量子加密方案，主要分为密钥集中分发、通密协同/直连、通密一体化方案三种。

密钥集中分发方案

密钥集中分发方案主要通过在管控系统上层新增量子运营平台，通过量子运营平台将密钥下发至各设备厂商管控系统，然后通过DCN网络下发至加密业务的起点和终点（见图1）。该方案与后续PQC整体加密系统高度兼容，只需要在设备侧升级或更换支持PQC加密的业务板卡即可。

- 方案优势：统一部署QKD系统，且可按需扩容QKD规模，初期成本低；QKD直接和运营平台交互，现网设备无需改动，部署方案更简单，适合规模部署。
- 方案劣势：未用到量子密钥分发机制，密钥分发经过DCN，增加了泄露可能性；QKD集中部署，随着加密业务量增多，会对QKD规格提出更高的要求；从边缘节点到网管中心

一般距离较远，密钥获取时间长。

通密协同/直连方案

通密协同/直连方案，密钥传输和信号传输通过独立的两张网络分别进行，在每个节点进行密钥的交互，完成业务的加密和解密（见图2）。这套方案不仅适用于OTN网络，也适用于IP等其他网络，是目前比较通用的方案。

- 方案优势：量子密钥独立网络传输和分发，密保程度最高；QKD独立建网，可以向除了OTN设备外的其他通信设备提供密钥。
- 方案劣势：需要部署独立的QKD网络，成本高；QKD的远距离传输，会涉及到量子中继，暴露风险增加；除了需要完成QKD间的协同外，还需要完成与OTN设备的协同，工程开通难度大。

通密一体化方案

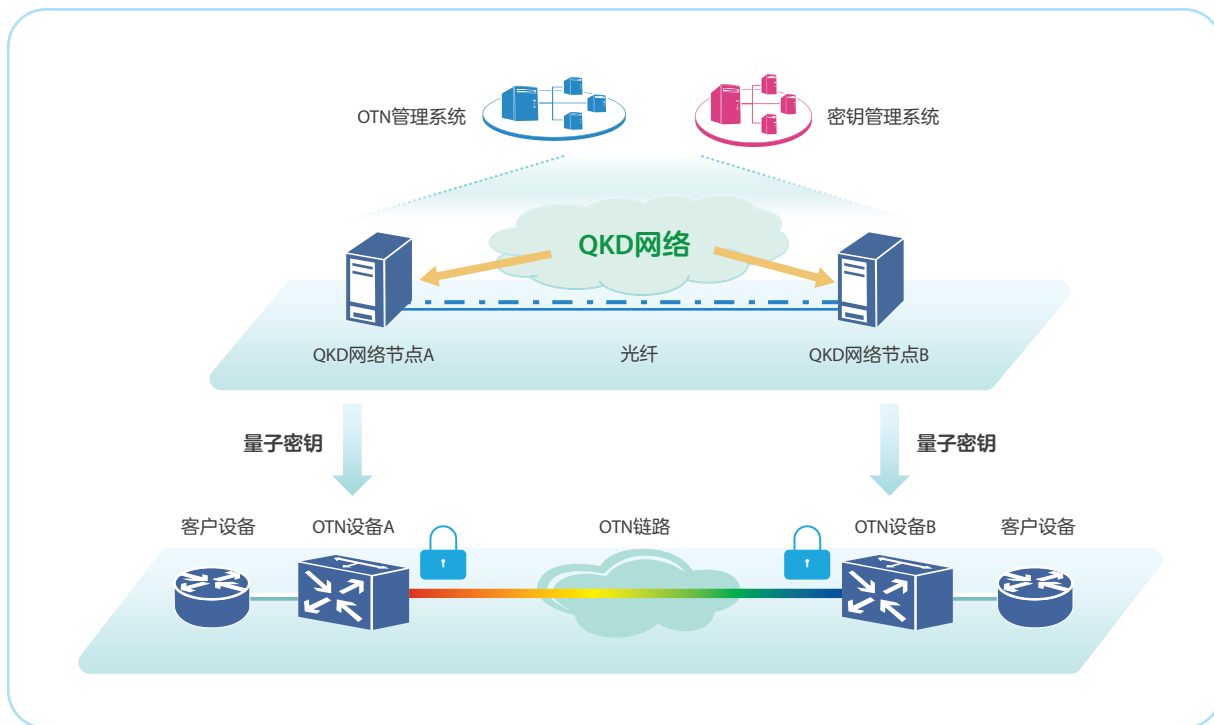
通密一体化方案是通密协同方案的进阶方

案，将QKD网络和OTN网络融合（见图3）。QKD设备做成板卡，集成到OTN设备中，借用OTN的光层网络完成密钥的传输；同时将QKD密钥管理功能集成到OTN的管控系统中，由OTN设备统一完成密钥的生成、传输、分发、业务加解密的全流程工作。

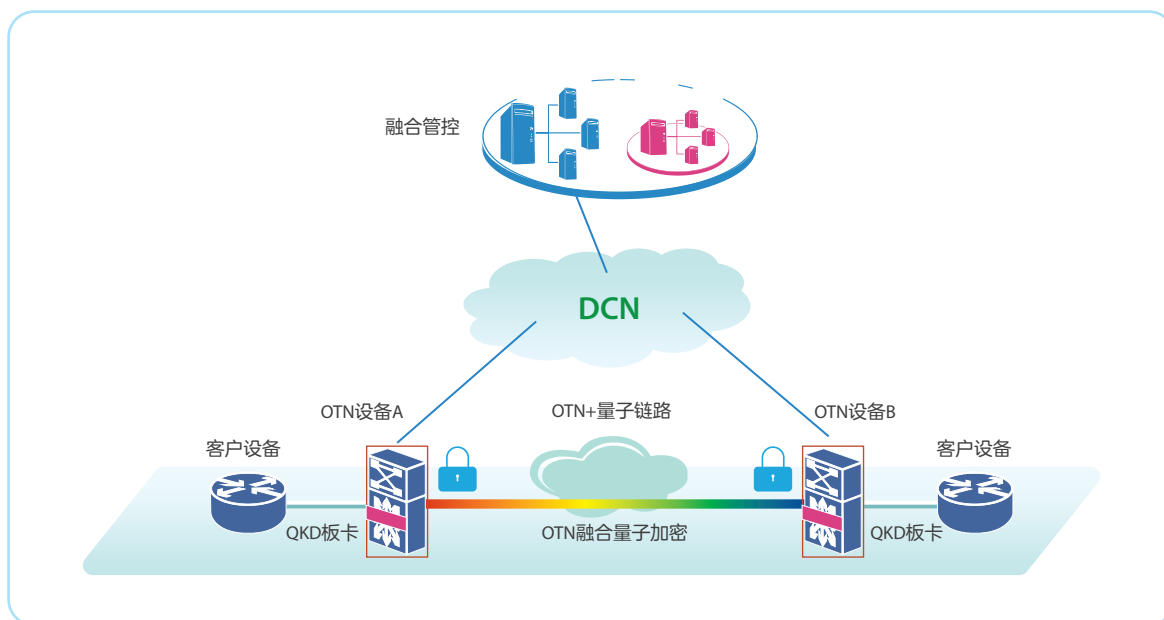
- 方案优势：密钥的生成和分发均是基于量子理论，密钥密保程度高；一体化部署，一体化管控，减少对运维人员的依赖；共纤传输，减少对光纤资源的消耗。
- 方案劣势：每个节点都需要QKD设备，成本高；共纤传输需要额外增加合分波，引入插损，导致融合后QKD和OTN的实际传输性能均会下降，需额外增加中继；现网改造需要光层变动，导致业务中断。

国际趋势和路径选择

量子加密是一个涉及到信息安全甚至国家安



▲ 图2 通密协同方案



◀ 图3 通密一体化方案

全的技术，技术演进路线的选择首要依赖国家的政策导向。这个导向的制定，会综合评估安全性、建设成本、标准/专利占有率、供应链水平等因素，基于国家维度，选择倾向性会有不同。

欧美的量子加密趋势和路径选择

美国已明确将后量子密码（PQC）作为核心技术路线，不建议将QKD用于国家安全系统。除了NIST在标准上的绝对地位外，白宫要求自2024年7月起，政府承包商强制采用NIST批准的PQC算法，建立全球最严保密体系，依托《量子就绪：向后量子密码迁移》，制定了迁移路线图。

欧洲在量子加密领域采取“量子密钥分发（QKD）与后量子密码（PQC）协同并行”的双轨战略，目标是2030年建成全球首个量子互联网经济体。欧洲将QKD定位为量子通信的核心技术，ETSI在QKD等标准上持续发力。同步推进PQC标准化，纳入欧盟《量子技术战略产业路线图》，要求金融机构、政府系统优先迁移至抗量子算法体系。

中国的量子加密趋势和路径选择

中国在量子加密领域采取“QKD（量子密钥

分发)与PQC(后量子密码)融合”的技术路线。目前实际落地聚焦在QKD基础设施建设上,陆续完成京沪干线、京港澳干线、武合干线、沪杭干线等跨省干线QKD传输网络,并向下延伸建成和规划了合肥、上海、武汉、北京等城域QKD网络。2025年开始在PQC等标准上加大投入,推动“QKD+PQC”架构成为ISO/IEC国际标准,并主导抗量子算法优化方案。

国内三大运营商主导推动OTN融合量子加密的应用，以提高政企专线客户的业务保密等级。目前中国电信主推为密钥集中分发方案，已经完成初步企标制定和现网试点，预计在2025年完成首批落地；中国移动和中国联通倾向于通密一体化方案，由通信设备厂商统筹解决密钥的分发和业务的加解密，目前还未确定技术路线的选择。

受限于QKD网络的高建设成本，全球市场基本都在寻找PQC的替代方案，以实现低成本建设抗量子计算加密系统。目前的PQC标准仍旧不完善，且以个别国家把持为主，短期内还不具备商用能力，未来中兴通讯将加大在PQC的标准和研究投入。

基于AI大模型的光网络智能运维应用方案



王振宇
中兴通讯光网络智能化
方案总工

随着互联网+、4G/5G、VR、算力等新业务和新技术的蓬勃发展，OTN光网络规模快速增长，组网形式日趋复杂。新兴的动态随选、多样化KPI的各类网络服务对光网络运维提出更高要求，迫切需要通过智能化技术，解决网络运维中面临的预测预防类、复杂类、重复性等操作带来的成本和效率问题，实现运维提质增效，牵引网络技术变革。为适应光网络运维数智化转型升级需求，引入AI大模型技术，构建“规、建、维、优、营”全生命周期的智能化能力，已成为加速光网络高阶自智演进的业界共识。

针对AI大模型赋能光网络的智能运维新范式，本文重点介绍中兴通讯基于AI大模型的网络故障诊断和流量分析预测两个典型应用方案。

网络智能故障诊断

光网络组网越来越复杂，故障现象繁杂，告警量大，难以快速定位故障根因；对于设备、线路故障定界定位困难，光纤线路故障需要额外设备定位故障点。依靠传统人工分析方式步骤多、耗时长，且定位准确度低。

针对上述网络运维问题，中兴通讯推出基于AI大模型的网络故障诊断系统方案（见图1），实现基于AI的网络告警根因分析、基于大模型的故障诊断流程自动化，并引入知识图谱技术增强故障诊断精准度，基于自然语言交互，提升网管操作效率。

基于AI的网络告警根因分析

对于OTN光网络，系统能够全面针对设备单

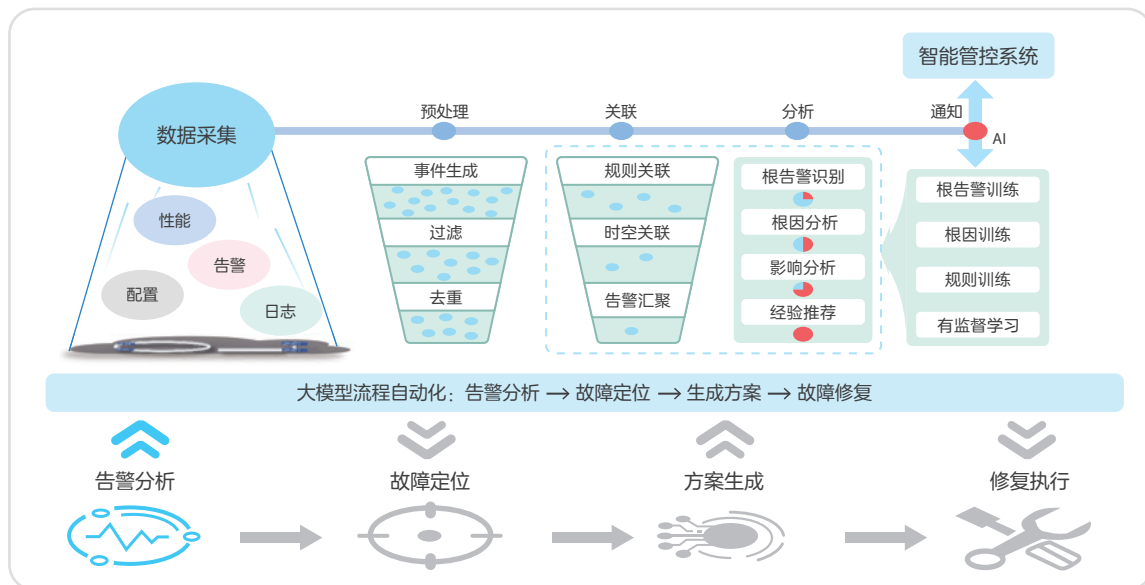


图1 中兴通讯基于AI大模型的网络故障诊断系统方案

板、光模块等硬件故障，以及网络光纤的中断/劣化/同缆同路由等故障隐患进行根因分析。相比传统的人工专家分析方式，新一代智能化系统对海量告警进行预处理，利用小模型AI算法快速准确地实现告警根因分析。主要实现步骤为：系统首先针对原始告警进行高频及专家过滤规则处理，再基于时空关联聚类算法，实现海量告警的专业级自动聚合，最后通过故障传播图及图神经网络算法分析关联告警，识别出根告警。引入AI分析的智能化系统可实现根告警识别准确率达到90%以上，显著提升用户派单准确率，实现降低工单量的提效目标。

基于大模型的故障诊断流程自动化

传统的故障诊断主要通过人工借助工具完成，单个故障诊断耗时较长，复杂故障场景更是高度依赖运维人员的经验，故障修复及时率难以保障。利用大模型技术智能生成诊断方案并自动调度，故障诊断不再依赖运维人员的经验，大幅提升运维效率。

基于中兴通讯星云通信大模型强大的自然语言处理和知识推理能力，系统能够精准识别自然语言输入或故障工单描述的故障现象，并生成针对性的诊断方案；利用大模型的编排调度能力，系统根据生成的诊断方案通过内部API调用完成告警分析、故障定位、方案生成、修复执行的流程自动化。这种能力使得故障诊断平均时间从小时级降低到5分钟以内。同时基于大模型的持续学习能力，方案能够更好地适应不同的网络环境和故障场景，进一步提升故障诊断的效率和准确性。

引入知识图谱技术增强故障诊断精准度

在故障诊断系统中引入知识图谱技术，主要是将故障运维相关的信息和知识（包括资源信息和故障排查相关知识）构建成对应的知识图谱，如资源信息构建成资源知识图谱、故障排查相关知识构建成故障知识图谱，然后依据所构建的资源知识图谱，结合故障知识图谱所提供的故障排查相关知识，结合原有的规则库进行推理，得到

故障诊断结果。

大模型和知识图谱都是用来知识表示和推理的手段，二者之间存在较强的技术互补性。大模型补足了理解语言的能力，而知识图谱则丰富了表示知识的方式。目前大模型与知识图谱的结合已成为业界共识，可以实现技术互补，提升推理能力，进一步提升故障诊断的精准度。

基于自然语言交互，提升网管操作效率

大模型技术使网管操作方式从图形用户界面（GUI）向人工智能用户界面（AUI）演进。在日常运维过程中，用户只需通过自然语言输入的方式，快速实现网络信息及配置的增、删、改、查操作，无需学习和记忆网管的具体使用方法与功能入口，从而将网管操作效率提升90%以上。

网络流量分析预测

光网络各个光通道承载的业务流量会随时间变化，用户在网络运维过程中难以及时准确识别流量瓶颈等异常情况；用户在网络运维过程中，不能对网络未来阶段的各个通道流量的趋势进行分析预测，无法预先规划带宽资源。

针对上述网络运维问题，中兴通讯推出网络流量分析预测系统（见图2），实现精细化网络运维保障和智能化业务运营指导，并支持数字地图可视化呈现。

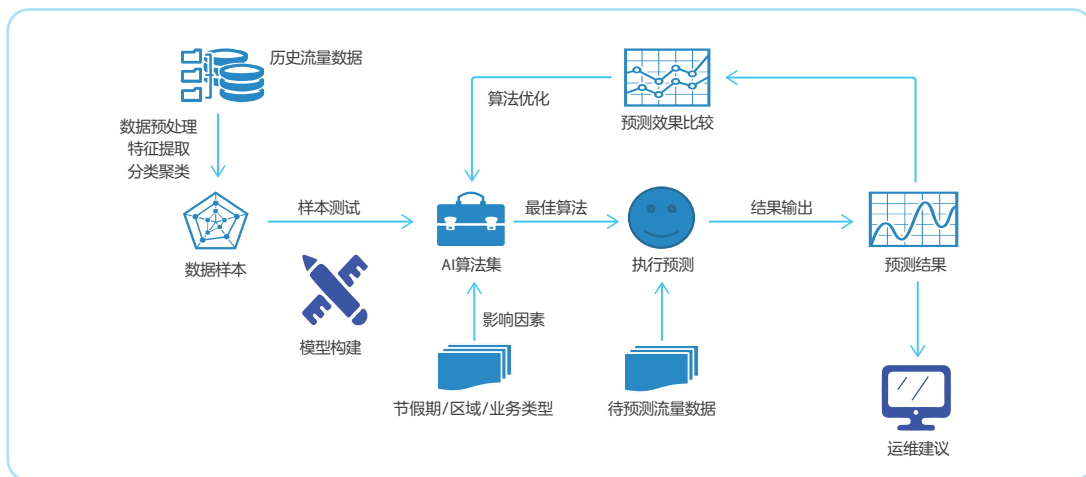
精细化网络运维保障

方案基于网络流量AI建模和预测算法，突破传统OTN网络流量感知盲区，结合传统运维和流量管理优势，为网络扩容提供参考，避免扩容不及时带来的用户体验下降或盲目扩容带来的投资浪费。相较于传统OTN网络，实现流量管理从“无”到“有”，从“0”到“1”的创新发展，改变了OTN硬管道运维的思想，通过识别端口流量相关指标，实现硬通道软分析，从而完成网络运维的精细化管理和预测分析功能。

● 实时流量分析

方案提供多维度流量分析能力，达到一定门

图2 中兴通讯网络流量分析
预测系统



限时，触发越限预警，指导业务分流，避免业务受损；提供分钟/小时/天/月粒度端口流量分析，当带宽利用率峰值达到90%触发预警，实现业务流量越限预警，指导维护人员及时分流业务，避免用户质量下降；同时基于对当前流量的分析发现网络瓶颈，扩容有的放矢。

● 智能流量预测

利用线性回归、时间序列等AI算法，结合长时间大数据分析预测，实现流量预测曲线评估，发现未来一段时间的网络瓶颈及业务超限可能，提前发现带宽需求，指导网络全局流量优化和扩容规划。

智能业务运营指导

基于OTN网络业务流量数据，实现网络业务的使用习惯建模，通过“零”流量、流量下降、流量上升、流量波动等行为分析，结合传统OTN端口、用户状态分析，实现业务的智能运维能力。

● 业务故障管理

通过分时段流量分析，建立用户业务使用习惯数据模型，结合传统OTN性能分析（端口状态、光功率、误码）等信息，分析业务安全性；零流量用户故障快速识别，快速响应中断，降低业务影响面。

● 业务异常预警

结合用户业务使用习惯，分析一定时期内流量变化，预警客户转网风险；长期“零”流量用户

行为预警，防止客户流失和网络资源无效占用。

● 套餐变更提醒

超套餐业务质量下降分析，及时为客户提供动态带宽调整，避免影响业务质量；及时发现客户业务增长变化曲线，为前端提供客户套餐扩容提醒。

数字地图可视化呈现

通过网络数字地图可视化呈现网络端口、业务的流量实时监测信息，实现可视可控：

- 多维分析：基于端口、用户的流速、带宽利用率、峰/谷值、均值、TOPN等多维度统计分析；
- 流量地图：实时展示全网流量数据，包括流量/利用率排名、染色、地图下钻、不同业务占比等；
- 趋势分析：根据历史流量统计分析，针对端口和业务的流速、流量、带宽利用率，展示未来一段时间的峰值、均值趋势变化趋势。

中兴通讯OTN网络故障智能诊断和流量分析预测系统已在国内运营商网络试点应用，网络故障智能诊断系统可实现分钟级诊断效率，准确率达到90%以上；网络流量分析预测系统基于流量实时分析对流量瓶颈及时预警，运维效率提升30%以上，基于AI大数据分析预测未来流量趋势，助力运维方式由“被动式维护”向“主动式预防”转型升级。ZTE中兴

T比特空芯光纤光传输系统应用展望

近 两年生成式AI大模型驱动算力需求倍增，光网作为算力设施基石，继续向低时延、大带宽、超长距演进。过去的50年，基于全内反射原理的实芯单模光纤的光纤通信系统受光纤折射率、损耗、非线性效应限制，通信时延、单纤容量、传输距离均已触及技术发展的天花板，亟需全新光纤体系破局。

反谐振空芯光纤因其超低时延、超低损耗、超低非线性三大颠覆特性，被业内誉为“新一代传输介质”，近1年来发展迅速。该技术自2007年巴斯大学提出以来，经历了多轮结构演变，2022年，英国南安普顿大学ORC中心的空芯光纤小组优化得到最低损耗达0.174dB/km的5单元双层嵌套管空芯光纤(DNANF-5)，并于2024年和微软公司进一步实现了损耗系数达 0.08 ± 0.03 dB/km的DNANF-5；同年国内长飞光纤、领纤科技也相继报道了损耗0.1dB/km级并具备单次拉丝长度10km级的成果。至此，反谐振空芯光纤在损耗上超越了实芯单模光纤，空芯光纤降损突破已基本完成。

空芯光纤特性与应用解析

空芯光纤凭借超低时延、超低损耗、超低非线性三大颠覆特性，在光传输诸多应用场景有望带来低时延、可靠性、降低组网成本等应用价值，预计在低时延智算间互连、低时延金融高频交易、电力低时延继保业务、超长距组网以及下

一代T比特超高速长距光传输系统中有广泛应用，在多个性能指标中相比单模光纤改进显著。

超低时延特性与应用

在空芯光纤中光传输介质由玻璃转为空气，传输速度由 2×10^8 提升至光速，相比单模光纤时延降低30%，即每公里带来1.5 μ s的时延收益。在智算互连场景中，在开展跨智算集群分布式协同训练数据并行DP、流水线并行PP时，参考业界的智算拉远测试验证，通信时延并不能通过优化算法完全掩盖，导致算效劣化，而空芯光纤带来的时延节省，可缓解因时延导致的算力资源浪费，为大规模智算集群的高效协同提供物理层的关键支撑。在金融高频交易场景中，为最大程度降低通信时延，券商们尽可能将服务器安置在交易所内，但仍有大量服务器无法就近部署，空芯光纤及配套设备无疑将引发新一代金融专线升级。自2020年以来，国外已铺设至少两条反谐振空芯光缆用于建设金融专线，2024年底，微软宣称将在未来24个月部署15000km空芯光纤用于其数据中心互连以及AI大模型训练。在电力行业，高压输电需要在继电保护装置间同步差动保护信息，行业一般约束单向传输时延 ≤ 10 ms，以满足继电保护速动性要求，空芯光纤有效降低链路时延，保证超长距输电继电保护故障处置响应时间。

超低损耗特性与应用

实芯单模光纤受瑞利散射限制，损耗难以突破0.14dB/km，而反谐振空芯光纤国内外均已实



闫宝罗
中兴通讯波分技术规划
总工

现0.1dB/km级别超低损耗系数，并在国内多地成缆后C波段4THz内平均损耗可保证0.15dB/km水平。在中长距骨干城域传输场景，相比G.652D光纤，空芯光纤的损耗系数优化0.05dB/km，按标准等跨80km模型，将带来4dB信噪比优化，可颠覆性提升传输距离/余量，减少中继数，带来组网成本和转发时延降低。在电力超长距传输场景，同样300km单跨传输，空芯光纤可带来近15dB收益，从而降低电力超长距骨干组网成本。

超低非线性特性与应用

空芯光纤非线性系数相比实芯普通单模光纤可降低3~4个数量级，消除了光纤通信系统与香农限间的非线性瓶颈，由此可使用大功率传输高阶QAM信号，用功率换取接收端的信噪比提升。另一方面，单模光纤波段扩展导致的拉曼功率转移问题在空芯光纤中也将不再是约束，理论上空芯光纤可支持超宽带密集波分复用。经评估在长距传输场景，空芯光纤相比单模光纤可提升传输容量2~3倍。在中长距骨干城域场景，单模G.652光纤长距干线传输需要400G QPSK 130+GBd配置在GHz频谱间隔，而空芯光纤中可使用3倍谱效的1.2T 64QAM再结合大功率放大器配置，依然可实现长距传输，由此实现光层简化、降低组网成本。面向下一代Gen200+光传输，利用空芯光纤超低非线性特性，使用大功率光放可使1.6T PS-64QAM具备长距传输能力，其传输距离相比单模光纤提升近10倍。

中兴通讯空芯光纤光传输系统应用探索

2023年，中兴通讯联合中国移动研究院提出了一种基于高阶QAM传输产生非线性相移的非线性系数测量方案，并使用大功率光放大器放大400G 64QAM信号在1km空芯光纤中传输成功验

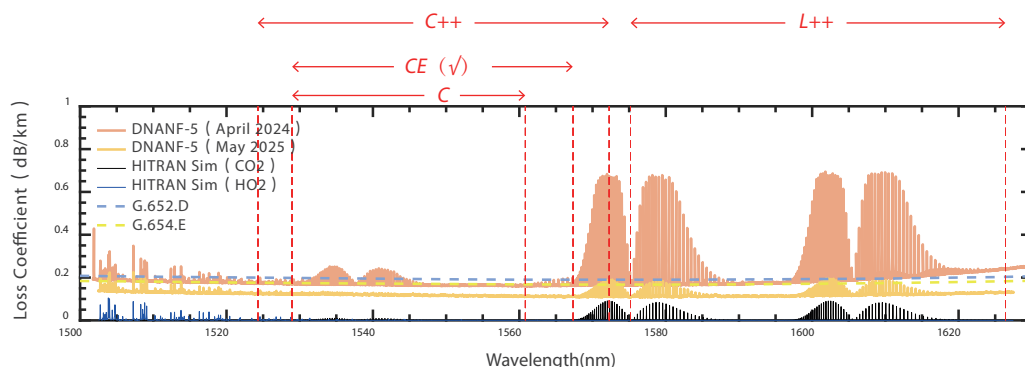
证空芯光纤Kerr非线性系数小于单模光纤3个数量级。

2024年，随着空芯光纤损耗、单次拉丝长度显著提升，中兴通讯联合长飞公司首次演示了单波入纤功率达到3W的1.2T PS-64QAM在20km反谐振空芯光纤中无代价传输，同时也证明了空芯光纤中极低的拉曼功率转移，为超高速、超宽带大容量传输系统应用奠定基础。

自2024年5月，中国移动、中国电信先后在国内铺设空芯光缆，中兴通讯联合中国电信在其杭州智算中心和杭州分公司义桥IDC数据中心间铺设了10.4km²芯空芯光纤，通过光纤环回，演示了首个C+L波段单波1.2T与800G混合速率，单纤容量超100Tbps的超低时延数据中心互连。

同年9月，中兴通讯联合中国移动在其无锡梨园和苏南数据中心间，演示了国内首个超低损耗（最低损耗达0.13dB/km）空芯光缆C+L波段800G传输性能，并在现网发现CO₂气体吸收工程问题，该问题目前也成为业内公认空芯光纤应用亟待解决的关键问题之一。

为进一步探索空芯光纤在大容量、长距传输方面的潜力，中兴通讯先后在实验室开展了空芯光纤S+C+L波段100km单纤双向377.6T超大容量传输，将当前单纤容量纪录提升了超过1.5倍。具体而言，利用自研硅光外腔nano封装的大功率S波段可调谐激光器极大改善S波段发射端光信噪比以及接收机灵敏度，采用Flex Shaping算法针对信道特性选择波特率、传输码型和信道间隔，在C波段配置85GBd PS-144QAM放在87.5GHz栅格，L波段配置98GBd PS-144QAM放在100GHz栅格并在S波段配置49GBd PS-144QAM放在50GHz栅格内。进一步为改进滤波以及器件带宽问题，使用光域均衡光谱整形算法进行补偿，最终达成了指标。在长距传输能力方面，在实验室演示了单波>1Tbps传输距离超10000km空芯光纤长距传输世界纪录，相比同速率下单模光纤传输距离提



▲ 图1 单模光纤与空芯光纤损耗谱以及空芯光纤气体吸收附加损耗谱

升至少10倍。这里正是利用空芯光纤超低非线性特性，采用大入纤功率提升传输后信噪比的结果，在超长距传输过程中的模间干扰效应、带内不平坦效应以及滤波效应也将突显，针对这些问题中兴通讯也分别做了空芯光纤指标择优和算法择优工作。由此可见，高阶QAM调制、大功率光放大器以及信道损伤补偿算法在释放空芯光纤系统传输能力方面尤为重要，中兴通讯正在积极开展上述器件与算法的研究，重点评估工程应用所需指标的可行性与必要性。

空芯光纤应用挑战与展望

尽管空芯光纤几乎在关键参数上全面优于实芯单模光纤，但距离商用仍有大量的问题有待解决。空芯光纤内气体例如CO₂和水汽均会在特定频点产生宽度、分布不均的气体吸收特征峰，当业务光传输时频谱会产生“凹坑”，对信号调制解调以及时钟稳定性产生极大影响，限制了波分复用频谱可使用范围（见图1）。通过Hitran数据库结合空芯光纤环境中气压、温度以及分子密度

可半定量分析出气体吸收特性。目前亟需光纤厂家光纤拉制工艺方面的改进以及设备厂家开展气体吸收算法补偿相关研究。另一方面，反谐振空芯光纤在导光机理上不支持完全消除高阶模式，且光纤的连接点、弯曲盘绕等各种机械因素都可能导致激发高阶模，造成模间干涉（IMI）效应，该效应在超长距传输时影响逐步突显，需重点优化。

在运维方面，空芯光纤由于背向散射系数比单模光纤低30dB，原光时域检测仪可测量动态范围将显著劣化14dB~15dB，另外熔接点处压差将使得外界气体吸入空芯光纤，产生气体密度的差异，由此在熔接点处的反射峰会产生“鼓包”，导致策略盲区增大，以上需要光检测器件与算法同时优化补偿差距。

最后，当前阶段空芯光纤结构还未标准化，同时受工艺、产能等诸多原因限制，其当前售价高于单模光纤2000倍，限制了其大规模应用。未来，中兴通讯愿继续携手产业上下游合作伙伴，推动空芯光纤系统由技术验证迈向商用部署。ZTE中兴

算力光网场景及趋势发展



谢大
中兴通讯光网络首席专家

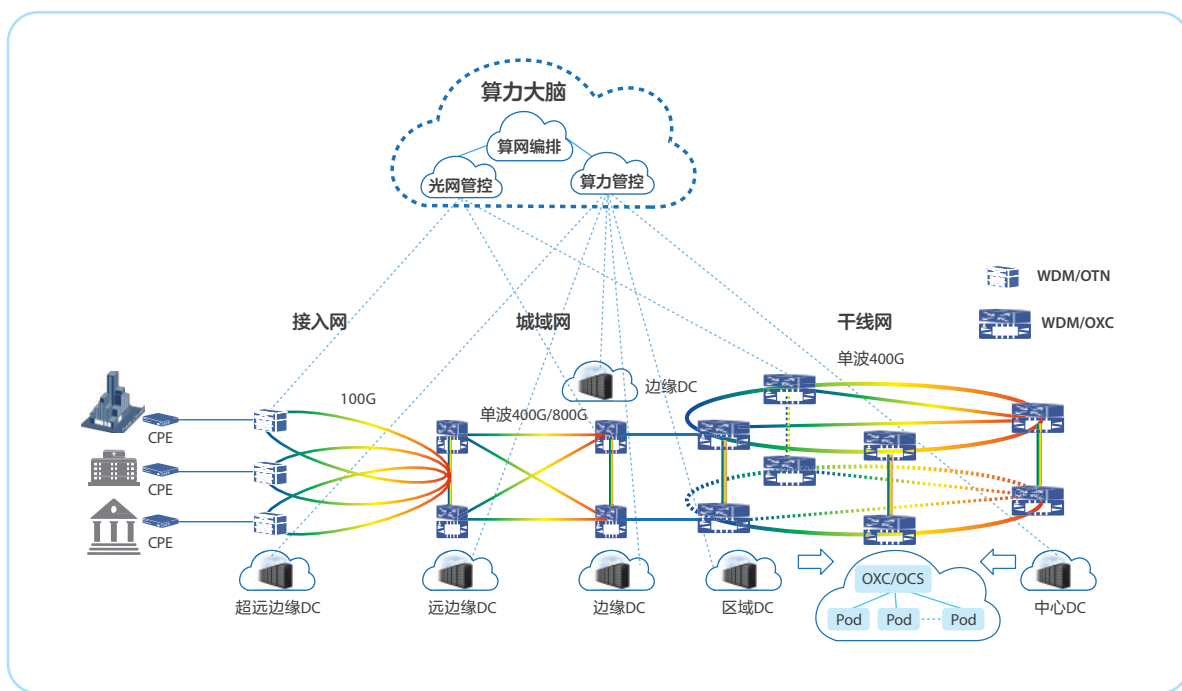
随

着人工智能、大数据、物联网等新兴技术的快速发展，算力已成为推动数字经济发展的核心驱动力之一。作为支撑算力资源高效传输与调度的关键基础设施，算力光网的重要性日益凸显。算力光网是为智算中心内部、智算中心之间，以及智算中心接入提供光网络连接，尤其是在智算中心之间的高速直接连接提供Mesh互联的关键技术。本文将探讨算力光网的主要应用场景以及未来发展趋势，以期对相关领域的研究和实践提供参考。

算力光网的主要应用场景

在智算的牵引下，算力光网发展和部署将进入快车道。在智算中心的各种部署情况下，都有光网的踪影，图1为算力光网的总体架构图。

如图1所示，从干线网络到城域网，部署中心DC、区域DC、边缘DC、远边缘DC等设备，这些DC之间通过光网的WDM/OXC网元实现智算网络的连接，根据业务需求实现各个DC的不同带宽的光网络直接连接；区域DC和中心DC的规模较大，要实现智算中心的Scale Up扩展，多个Pod



▲ 图1 算力光网总体架构图

可以通过OXC或OCS (optical circuit switch) 实现互联, 建设超万卡GPU池; 接入网络部署了WDM/OTN设备和超远边缘DC, 实现企业入算相关业务, 比如联合训练、企业训练数据不落盘、推理和训练结合的业务等。

算力光网的智能化管控是实现高效算力调度的关键。通过算网统一编排系统和全光网管控系统, 结合算力管控平台 (算网大脑), 能够实现端到端算网融合业务的资源高效调度和算力服务开通。

智算网络中的高吞吐率还要求端网协同, 网络的时延变化、亚健康状态导致的丢包都需要及时同步到GPU网卡的驱动程序的参数配置, 根据网络时延及时调整RDMA网卡的参数, 并对RoCE网络的缓存进行调整, 适配RTT (round trip time) 参数的变化, 实现智算网络的无损传输, 高效利用算力资源。

总体而言, 智算中心在硬件加速和技术创新的双轮驱动下, 快速发展, 会逐步演进为像通算服务一样, 将分散到多地的智算中心的多样化GPU卡虚拟为一个超级智算中心, 这个超级智算中心用来进行超大规模的联合训练、推理等服务, 并可以虚拟为很多的智算业务出租给企业, 甚至是个人用户, 让人人都用得起来智算服务, 智算服务像自来水一样随开随用。

目前阶段, 算力光网主要包括智算中心互联 (DCI)、智算中心内网络 (DCN)、算力接入网 (DCA) 等应用场景。

智算中心互联 (DCI)

智算中心作为算力的核心承载节点, 其高效互联对于实现算力资源的协同调度至关重要。算力光网通过全光数据中心互联技术 (WDM/OXC), 实现单纤百Tbps容量的数据中心间全光连接。这种高速互联不仅能够协同调度所有在网算力, 应对

更高算力诉求, 还能有效缓解单一数据中心算力发展的压力, 支持客户就近入算。

具体来说, 核心智算中心和区域智算中心, 一般为东数西算的4+4区域, 建设超大的智算中心或智算中心集群, 实现万卡以上的智算中心的互联, 带宽需求在4:1收敛比的情况下, 需要千Tbps的容量需求; 与核心智算中心、区域智算中心互联的边缘智算中心, 位于地市核心机楼和发达区县的重要机楼, 甚至是业务量大的综合业务区, 部署1000+GPU卡、100+GPU卡, 甚至更少的GPU卡到客户边缘, 实现1ms入算。

智算中心内网络 (DCN)

在智算中心内部, 组网按照1:1收敛组网, 网络性能直接影响算力资源的利用效率。算力光网通过引入全光交叉调度技术 (WDM/OCS), 优化光电融合组网性能和可靠性。该技术能够提升数据中心的算力使用效率, 支持大规模并行计算任务的高效执行, 降低比特功耗, 对端口速率不敏感, 网络演进周期变长, 应对智算中心内部网络面临的零丢包、低时延、高突发等挑战。

具体来说, 就是在智算中心内部各个Pod建网采用OCS和WDM技术, 实现单端口百Tbps的容量传输, 万卡池互联的4000T的容量需要40对光纤即可实现互联, 极大降低了网络的Opex和Capex。智算中心内部网络的GPU网卡的速率每隔2~3年演进一代, 而OCS对于速率不敏感, 可以支持智算中心网络从200GE、400GE、800GE到1.6TE的平滑演进和混合组网。

当前MEMS-OCS还存在一些技术难度需要克服, 比如固定引入3dB~5dB的插损, 需要额外放大或者更高功率光模块补偿, 插损随通道数线性叠加, 使得800G/1.6T模块难以在OCS级联场景下保持光信噪比, 限制未来带宽升级, 以及目前基于端口的切换时间为10ms级别, 达不到光路由的

纳秒级别的要求，都是OCS规模应用需要解决的技术难点问题。

算力接入网络（DCA）

算力接入网络是用户接入算力资源的“第一跳”，其性能直接影响用户体验。算力光网通过政企专线的接入技术，支持园区、企业、政府等客户10Mbps~100Gbps速率的高品质灵活入算，实现1ms入边缘智算中心、5ms入区域智算中心、20ms入核心智算中心。

算力光网发展趋势

算力光网的发展还有很多的技术难点和需求需要解决，超高速率传输、全光交换、光网络感知算力业务、AI智能化、低碳和安全可控，以及新型光纤等技术是算力光网未来十年的发展趋势。

超高速光传输技术持续突破

随着流量的持续增长，光网络正不断向更高的速率演进。目前，400G已成为骨干网建设的主流，而800G、1.2T乃至1.6T的T比特时代也正加速到来。目前DSP芯片已经演进到3nm，带宽在1.6Tbps需要Serdes提升到接近450GBd，随着单波速率的提升，频谱带宽也在增加，而单纤的容量并没有得到线性增加，所以发展额外的波段，实现C+L、S+C+L来提升单纤容量，满足智算中心互联的超大带宽需求将是未来需要突破的关键技术之一；调制方式方面，单波速率、子载波或多LANE三者齐头并进，并通过光电集成，如CPO（copackaged optics）方式来提升效率、降低功耗。

全光网络全面普及，感知和端网协同

中长期来看，全光网络将成为算力时代的核

心基础设施。通过优化DCA（用户入算网）、DCI（智算中心互联）和DCN（智算中心网络），全光网络将实现更高效的资源调度。全光网是支撑智算中心1ms接入、5ms~20ms智算中心互联，以及微秒级智算中心网络内部各Pod互联的关键场景和技术。

全光网的关键技术是全光交换和相干调谐光模块的技术演进和效率提升、光层全面数字化，以及控制面技术的提升。通过这三大关键技术，智算中心路由向ROADM/OXC/OCS交换同步和更新，实现全光路由、全光业务一次性开通；光纤和光器件全面数字化，实现模拟信号数字化和非线性数据的实时仿真；控制面技术提升，光层业务达到和电层/IP层一样的开通效率，光层的恢复达到和保护倒换一样的指标，业务中断时间小于50ms。

全光网的业务以太网接口，需要支持业务感知，感知客户业务类型、光纤网络的变化和时延等，并根据业务类型来实现业务SLA，进行最优算路选择，根据光纤的变化来实现路径的时延，通知算力管控，并通过算力管控通知RoCE交换机，根据RTT来调整接口的缓存，对于支持缓存和PFC的业务接口，可以自动完成参数调整和缓存大小的匹配，实现100%的吞吐率。

全光网可以实现一跳入算，在接入/汇聚层部署AI算力板卡，实现客户业务就近接入智算中心，实现1ms入智算，赋能OTN专线的客户一跳入智算、安全隔离、高可靠性。

智能化演进

AI技术与光网络的深度融合将成为未来的发展趋势。光网络本身具备良好的管控系统基础，AI化优势明显，AI与光网络的双向赋能是实现网络智能化的关键。

通过AI技术，可以实现光网络实时仿真和实

作为支撑算力时代的关键基础设施，从智算中心互联到用户接入，从智能化管控到绿色低碳发展，算力光网正不断推动算力资源的高效利用和数字经济的高质量发展。未来，随着超高速光传输技术的突破、全光网络的全面普及以及智能化演进的加速，算力光网将在算力时代发挥更加重要的作用。

时规划，赋能网络的智能化运维。通过在设备一侧集成GPU，采集光层器件、光纤的在线参数，进行大数据收集，并做专有模型的学习、训练，从而达到光层网络的一次性开通，优化控制面的效率之后，WSOON恢复的光层业务可以做到和保护倒换一样的性能指标。

通过AI的运维和优化，可以实现网络运维效率的提升，以及网络资源的合理化应用，提升网络能效，整体降低网络的Capex和Opex。

绿色低碳发展和安全可控

在政策和市场对可持续发展的关注下，绿色低碳将成为算力产业的核心竞争力之一。未来，企业需要通过技术创新（如东数西训）和管理优化来实现节能降碳目标，并推动算力发展从“规模速度型”向“质量效率型”转变。

基于智算光网的大带宽、低时延，以及东西部的电力价差，通过算法来找到一个平衡点，实现西部电力和东部电力、光网络带宽和算力能效的平衡，实现绿色低碳发展。

从安全角度，西部的智算中心作为东部的备份、容灾中心，实现智算中心的安全可控，需要

光网络实现智算中心之间的大带宽互通。

新型光纤技术的探索

新型光纤技术（如多芯光纤和空芯光纤）正处于试点建设和传输验证阶段。这些技术有望进一步提升光网络的传输容量和性能，但目前仍需解决批量化制造难题以及现网适应性测试。

空芯光纤可以有较好的频谱效率，将频谱演进到S波分，实现S+C+L的单纤频谱容量，同时可以实现35%光纤时延的降低，是智算中心未来发展的一项关键技术，可以大大提升带宽，降低时延。

作为支撑算力时代的关键基础设施，从智算中心互联到用户接入，从智能化管控到绿色低碳发展，算力光网正不断推动算力资源的高效利用和数字经济的高质量发展。未来，随着超高速光传输技术的突破、全光网络的全面普及以及智能化演进的加速，算力光网将在算力时代发挥更加重要的作用。同时，绿色低碳和新型光纤技术的发展也将为算力光网的可持续发展提供有力支持。ZTE中兴

卫星光通信技术进展与应用场景



熊琪
中兴通讯卫星光通信产品
规划经理

在全球数字化浪潮与地缘政治格局重塑的双重驱动下，卫星通信正经历从“未来产业”到“战略性新兴产业”的定位跃迁。2025年全球3.4亿无网络覆盖人口需要通过卫星通信作为唯一接入网络手段，与此同时47.2亿已连接用户也需要卫星通信作为备用网络，再叠加“空天地一体化”网络成为6G演进共识，将推动卫星光通信技术进入高速创新周期。

卫星通信发展的驱动因素

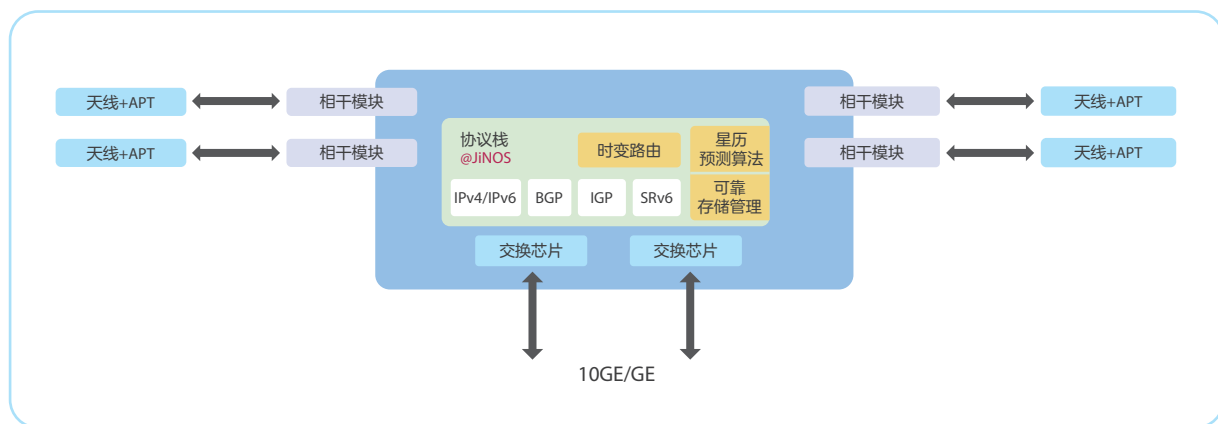
卫星通信的快速发展得益于多维度驱动因素的共同作用，包括政策红利释放、成本拐点临近、技术协同推进及全球覆盖需求凸显四个方面。政策红利持续释放，据摩根士丹利预测数据，2025年全球商业航天投资额预计达520亿美元；成本拐点临近，单星通信成本降至200万美元，用户终端价格跌破500美元，手机直连卫星

技术无需购买新终端，大大降低了用户使用卫星通信的成本；技术协同效应，实现5G-A与卫星网络多连接聚合，中兴通讯2024年完成全球首个5G-A与卫星网络融合测试；全球覆盖，当前陆地网络仅覆盖5.8%地球面积，全球还存在大量的通信死角，卫星网络与地面网络协同可实现100%全球网络覆盖。

卫星光通信当前技术进展

大规模的星座组网需要卫星之间有远距离、大带宽、高稳定性的激光通信技术满足组网连接需求，以及大规模业务需求，随着卫星通信用户的增加，星间激光通信还需要具备超宽连接的升级能力。要满足这些组网技术需求、实现高效稳定的星间通信与业务调度，需依托卫星光通信领域的核心技术，这些关键技术包括光学天线、APT跟瞄、相干模块和路由交换等（见图1）。

作为有多年地面通信网络建设经验的设备制



▲ 图1 卫星光通信产品核心技术架构

造商，中兴通讯在卫星光通信领域提供四大关键技术，支撑卫星通信大规模建设和组网。

- 全新研发高精度跟瞄技术和高增益的光学天线

具备5 μ rad跟踪精度的ATP（捕获-跟踪-定位）系统，配合高增益接收能力及可变束散角光学天线，在500km轨道高度实现超长距离光信号传输的精准对齐和稳定链接，匹配大规模星座远距离组网的需求。

- 复用地面成熟商用的高速DSP及光器件

高制程、高波特率相干数字处理芯片配合高集成度光器件可支撑模块CFP2封装，在较低功耗情况下可实现100G/200G信号传输；星间链路采用双光源设计，有效解决了星上A/B机问题，抗多普勒频移能力达 ± 10 GHz；具备后续向400G/800G演进能力，为构建万颗级星座提供硬件基础。

- 复用地面的大规模路由组网经验和软硬件平台

搭建星载智能交换平台及星间星地动态组网技术，满足星座大规模组网和大规模业务传输场景。自研转发芯片集成1T交换容量，采用中兴通讯自研JiNOS云化协议栈，可在轨升级SRv6、BGP等协议，路由收敛时间缩短至50ms，满足视频会议、远程控制等实时需求；依托星历预测算法，提前180秒预测卫星位置、星间链路状态及星地覆盖区域，提前进行路由预测，保障极地航线、跨境商旅等场景业务的稳定性和路由切换无感知，提升网络稳定性和客户使用质量。

- 复用地面设备的制造工艺流程，规模化制造降低卫星建设成本

通过80%复用地面设备的成熟设计，有效降低星上载荷成本，采用硅光集成技术等大大提高设备集成度，使得单星通信载荷重量控制在15kg以内。

目前中兴通讯正在卫星光通信上加大投入，并将持续深耕预研星地激光通信、小颗粒业务动态调度、星上波长调度等未来卫星光通信技术。

卫星通信的应用场景

卫星互联网作为6G空天一体化的补充技术，具备广域覆盖能力，能规避地面灾害等风险提供全天候服务，应用场景包括基础连接类、行业数字化、新兴消费场景三种。

基础连接类场景包括：

- 无网络覆盖区域宽带接入：为全球偏远无网络覆盖地区提供百兆级宽带服务，相比同类方案进一步降低单位覆盖成本。

- 应急保障网络：在野外探险、应急救援等场景中，依托低轨卫星技术，为有需求的潜在用户群体提供应急带宽支撑。

卫星通信还将助力行业数字化覆盖更多场景：

- 海洋经济领域：在渔业相关区域部署传感器设备，通过星载NB-IoT技术实现终端数据回传，为渔业产值提升提供支撑。

- 边境安防领域：在边境沿线部署红外传感器，借助星地链路技术，在一定传感器密度条件下，保障数据100%回传。

- 跨境专线服务：为企业海外机构提供硬隔离链路，满足高带宽接入需求，同时针对时延敏感型业务，实现低抖动传输控制。

此外，随着卫星通信的普及发展，还将扩展到新兴消费场景，如针对跨境航线交通工具、跨境商旅等跨境移动场景，需满足高带宽覆盖需求，同时适配单用户的跨境商旅应用带宽使用需求。卫星通信作为地面网络的补充会带来更多的场景应用，随着星座数量的增多可以带动更多的用户接入，并为运营商带来持续的收入。

下一代卫星通信正在书写通信史新篇章，其技术突破不仅带来带宽的量级提升，更将催生“空间即服务”的新型商业模式。随着星载AI、量子安全等技术的融合创新，预计到2030年全球90%地区将实现毫秒级时延、T比特级带宽的无缝连接，真正构建起覆盖空、天、地、海的立体化信息网络，为人类数字文明发展提供永不落幕的基础设施。ZTE中兴

Joint Release of World's First C+L Band Integrated 80×800G WDM Trial Results on Live Network



中国电信与中兴通讯携手完成 全球首个C+L一体化80×800G WDM现网试点



张雨
中兴通讯产品规划总工
(有线)

在全球数字化转型加速的浪潮中，光通信技术正以前所未有的速度推动着信息社会的演进。作为承载海量数据传输的核心基础设施，光网络的升级迭代始终是行业关注的焦点。2025年，中国电信与中兴通讯在华北ROADM骨干网完成全球首个800G C+L一体化OTU（光传送单元）现网试点，标志着中国在超高速光通信领域迈出了关键一步。这一突破不仅验证了全频800G方案的商用能力，更为中国电信构建未来400G/800G全光ROADM网络、推动行业标准制定及产业链协同发展奠定了坚实基础，成为全球光通信技术发展的里程碑。

行业趋势驱动：从单波200G/400G到800G的跨越

近年来，随着大数据、人工智能、智能制造

等数字技术的爆发式增长，全球网络流量呈现指数级攀升。据国际电信联盟（ITU）预测，到2025年，全球光纤网络承载的流量将突破100ZB（泽字节），传统单波200G/400G光传输系统已难以满足超大带宽、超长距离的业务需求。光网络技术正加速从单波200G/400G向800G演进，同时信号占用的谱宽也从传统C波段（1530~1565nm）扩展至C+L波段（1524~1626nm），以实现更高效的频谱资源利用。

在此背景下，C+L一体化系统成为行业共识，扩展C波段覆盖1524~1572nm，扩展L波段覆盖1575~1626nm，两者的结合将频谱带宽从扩展C波段6THz提升至12THz，大幅提升传输容量。然而，C+L波段的扩展对光模块、光器件及网络架构提出了更高要求，如何实现C+L波段的无缝调度、降低设备复杂度、提升系统集成度并

控制成本，成为行业亟待解决的难题。中国电信与中兴通讯的此次合作，正是对这一技术挑战的主动回应。

技术攻坚：C+L一体化OTU模块的突破性创新

中国电信早在2023年便明确提出，全光ROADM网络建设需通过扩展C+L波段实现12THz谱宽，并强调关键板卡/器件的一体化要求。为实现这一目标，双方在技术研发上进行了长期积累与深度探索。2024年，中国电信与中兴通讯率先完成400Gbps超长距扩展C+L波段一体化光模块的实验室验证测试，并于2025年初在ROADM骨干网启动全球首个800G C+L一体化OTU现网试点。

此次试点的核心在于C+L一体化OTU的创新设计。传统光模块需分别支持C波段和L波段，导致设备复杂度高、成本高昂。而此次试点采用的C+L一体化OTU模块，通过集成化设计实现C+L波段的统一调度，显著提升了系统灵活性与资源利用率。测试中，团队结合C+L一体化WSS（波长选择开关）光器件，构建了真正意义上的C+L一体化架构，全面验证了以下关键技术能力：

- 80×800G系统传输能力：模块在复杂现网环境下运行稳定，支持80×800Gbps高速数据传输，满足超大带宽业务需求。
- C+L全波段光电无阻调度：模块可同时支持C+L波段，并实现全频谱任意倒换，大幅提升频谱资源利用率。
- WASON保护恢复能力：通过智能光网络（WASON）技术，系统具备快速故障恢复能力，保障网络可靠性。

测试结果表明，C+L一体化OTU模块在降低备件种类（减少50%）、提升频谱可切换能力（提升2倍）等方面表现卓越，有效降低运营商Capex（资本支出）和Opex（运营支出）。此外，模块采用可插拔设计，相比传统固定模块，体积缩小60%，单Gbit功耗降低68%，不仅节省机房空间，还显著降低系统整体能耗，为绿色低碳网络建设提供了全新方案。

现网验证：技术成果落地的里程碑

此次试点的成功，不仅验证了C+L一体化技术的可行性，更揭示了其在实际网络中的巨大潜力。华北400G ROADM作为中国电信的重要骨干网络节点，其现网环境复杂、业务需求多样，对技术方案的稳定性和扩展性提出了极高要求。在试点过程中，团队通过多维度测试，全面评估了C+L一体化OTU模块在长距传输、多业务承载、动态频谱分配等场景下的应用情况。

这一成果为未来400G/800G全光ROADM网络的部署提供了重要参考。C+L一体化技术将成为其构建“智能、高效、绿色”光网络的核心支撑，助力实现从“单波扩容”向“全频段协同”的跨越式发展。

行业影响：推动标准制定与产业链协同

中国电信与中兴通讯的此次合作，不仅是一次技术突破，更在行业标准制定和产业链协同方面具有深远意义。C+L一体化技术的成熟应用，将加速相关行业标准的出台，为全球光通信设备厂商提供统一的技术规范。同时，这一成果也推动了产学研成果转化，为高校、科研机构与企业间的深度合作提供了实践范本。

在标准建设方面，双方联合产业链伙伴，重点验证了C+L全谱光电调度能力，并推动企业标准（企标）和行业标准（行标）的制定，为未来大规模商用奠定基础。此外，中兴通讯通过DSP、ITLA、ICRM等核心技术的突破，实现了130GBd高速并行ADC、新型掺杂技术、光组件合封工艺等关键创新，进一步提升了器件性能与可靠性。

此次试点的成功，标志着中国在超高速光通信领域迈出了关键一步，不仅解决了光网络演进中的核心难题，更以创新技术为全球通信行业注入新动能。从实验室到现网，从技术验证到标准引领，这一里程碑式成果将推动中国在全球光通信领域的竞争力持续提升。 ZTE中兴

World's First 1.6T with 12THz Bandwidth DWDM Trial on Live Network

Türk Telekom联合中兴通讯完成 全球首个12THz 1.6T DWDM 现网试点



李崧博
中兴通讯光网络产品规划
经理

作 为土耳其规模最大、业务最全的综合电信运营商，土耳其电信（Türk Telekom）凭借其覆盖移动通信、固定网络、数据通信等多领域的服务体系，为千万家庭和企业用户提供服务。随着全球数字经济的蓬勃发展及土耳其5G网络建设的推进，构筑超宽、超高速光网络基础设施成为土耳其运营商共同的目标。在这样的大环境下，如何持续引领并打造更先进的光网络，并借助光通信网络充分激活土耳其作为欧亚大陆的枢纽作用，成为土耳其电信关注的核心问题。

2025年3月，中兴通讯携手土耳其电信在土耳其第一大城市伊斯坦布尔完成12THz 1.6Tbps OTN现网测试，并实现对400GE/800GE业务超高速传输。此次成功测试，不仅验证了中兴通讯12THz Tbit OTN方案是单纤百T系统的最佳选择，也为土耳其未来5G网络规模部署、产业数字化转

型、欧亚两地经济发展奠定坚实基础。

高速OTN，开启互联新时代

全球数字化进程正在推动国际流量呈指数级增长，随着AI大模型训练、跨国智能制造、云端协同研发等场景的普及，全球数据跨境流动规模呈现结构性跃升：千亿参数大模型单次跨境传输超500TB，全球AI训练数据跨境传输3年增30倍，2028年将破10EB/年；智能制造全球化推高工业流量，头部企业月均传输2.5PB，较2020年增长8倍。

全球流量的超高速增长推动着光网络向单波400G、800G演进，信号占用谱宽持续提升，仅能承载40波业务的传统C++波段已难以满足单纤容量增长需求，将频谱资源扩展至C+L波段（C6T+L6T-12THz）成为全球通信行业的必然选择。

“ 本次测试基于中兴通讯光传输旗舰产品 ZXONE 9700，该产品搭配中兴通讯全自研1.6Tbps光模块，单纤容量最高达96T，频谱带宽提升至传统方案的2倍。

协同创新，划定行业新边界

土耳其电信与中兴通讯在超高速光网络方面长期保持深度合作，继共同构建100G&B100G混合城域光网络项目，并以此为支撑案例之一获得2022年5G MENA Awards“最佳5G传输网解决方案”大奖后，双方于2025年3月，横跨欧亚大陆，在伊斯坦布尔完成国际首例12THz 1.6Tbps OTN现网测试。

本次测试基于中兴通讯光传输旗舰产品 ZXONE 9700，该产品搭配中兴通讯全自研1.6Tbps光模块，单纤容量最高达96T，频谱带宽提升至传统方案的2倍。其中，关键光层器件WSS（波长选择开关）已实现C+L一体化，进一步节省成本及功耗的同时，可实现C+L波段内频谱的任意倒换，显著提升了传输系统的灵活性。同时，本次测试所使用的1.6Tbps光模块，相较上一代1.2Tbps光模块，每吉比特功耗实现25%的功耗优化，可有效节省土耳其电信运营成本，符合其发展绿色、低碳光网络的战略目标。

为了验证1.6T方案在商用网络后续应用的可行性，中兴通讯技术团队与土耳其电信团队经现场深入研讨，针对性遍历了计划商用的多个现网场景，对中兴通讯1.6T方案在C6THz+L6THz超宽频谱范围内开展专项验证。测试内容涵盖400GE/800GE单独业务接入、混合业务接入、传输稳定性、多跨传输及外来波长等场景。最终测

试结果显示，1.6T方案在各测试场景中均表现稳定，为后续规模化部署奠定了坚实基础。

合作共赢，助力土耳其电信网络升级

网络建设，承载先行。土耳其电信作为土耳其通信行业的头部企业，依托深厚的技术积淀与持续创新的发展理念，始终致力于为区域内用户提供优质、流畅的通信服务。本次基于C+L波段系统1.6T方案的成功验证，不仅将进一步巩固其在本土市场的标杆地位，更会强化其在国际领域的技术先驱形象。同时，随着1.6T方案的日趋成熟，其能够充分满足土耳其电信在未来5G业务拓展过程中对光网络带宽的激增需求，有效支撑欧亚两地间的业务传输，显著提升土耳其电信在跨国通信服务领域的核心竞争力。

作为国际传输网络领域的先驱供应商，同时也是土耳其电信长期以来的战略合作伙伴，中兴通讯将与土耳其电信携手，以本次现网测试为基石，持续探索现有网络的演进路径，助力土耳其电信打造新一代“智能、高效、绿色”的光传输网络，加速其未来5G网络的发展进程。未来，双方将在现网验证的基础上，进一步推动1.6T方案实现现网规模化商用，为全球光通信行业的发展贡献实践经验，加速行业整体的技术迭代与升级，应对未来通信业务增长带来的挑战。ZTE 中兴

基于场景引导的无线网络 自智规划平台



朱永军
中兴通讯网规技术总工



王戈
中兴通讯网规技术总工



马军华
中兴通讯网络技术架构总工

在当前的自智网络架构下，无线网络规划领域聚焦于话务预测、站点规划等几个典型场景。面对既定的输入输出关系和标准化流程，其核心目标在于构建全流程自动闭环能力，并依托智能算法不断提升规划结果的精准度。这种方式不仅难以涵盖用户需要处理的所有工作场景，也难以应对不同用户群体的差异化诉求。随着工作场景的增多，以上述方式构建的工具平台将面临日益复杂的开发维护压力，影响整体运营效率与迭代能力。

因此，无线网络规划的自智能力建设应从聚焦技术方案本身，转向对实际工作场景的全面适配。自智能力的评估标准需覆盖无线网络规划所涉及的各类工作场景及不同用户群体的核心诉求，真正实现以场景驱动、以用户为中心的智能进化演进。为实现这一目标，自智平台需要具备以下能力：

- 支持多变的输入、输出和工作流程，以适应不同工作场景的需求；
- 面对不断涌现的新工作场景，低成本、高效率地完成开发和部署。

中兴通讯CNOP平台基于数字星云架构，采用组装式开发思想，从工作场景的逻辑关系出发设计业务模块，并将场景划分为原子场景和编排场景，根据实际工作场景的需求选择最佳的开发

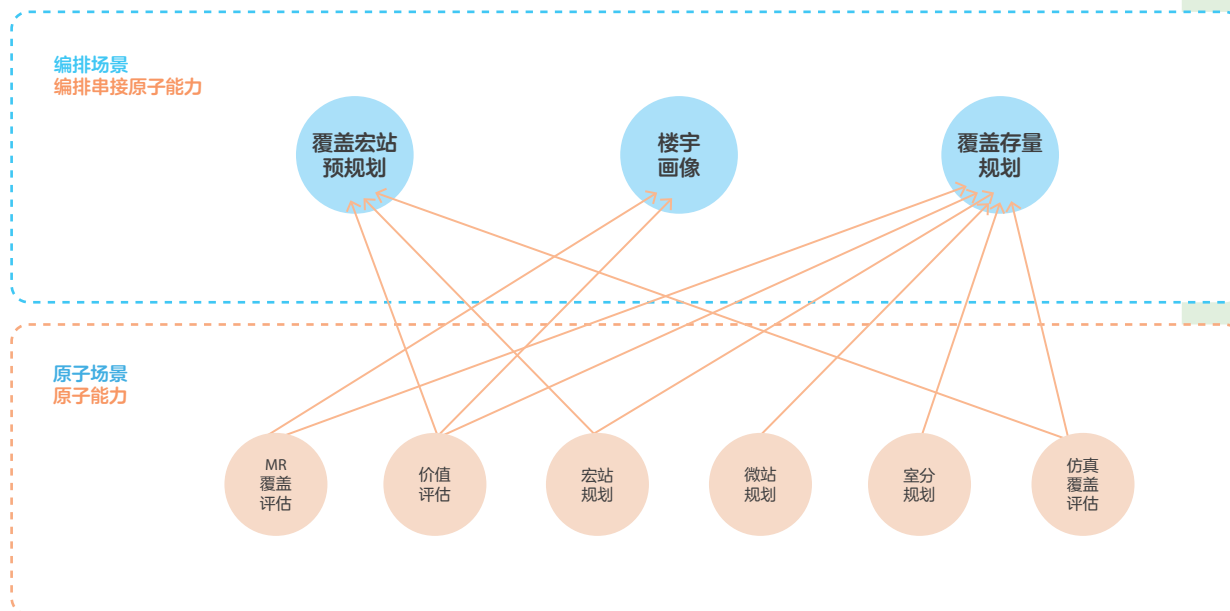
方式，以适应不同工作场景的需求，实现高效的开发和部署。

原子场景和编排场景架构

中兴通讯CNOP平台无线网络自智规划功能的架构设计如图1所示。首先对实际工作场景进行梳理，将其分为原子场景和编排场景两个类别。其中，原子场景具备“高内聚、松耦合”的特征，并且不可再分；编排场景则由原子场景编排组合得到，支持复杂场景的灵活构建。然后将原子场景映射为工具的原子能力，并通过对原子能力的编排组合实现编排场景的应用。

基于上述设计思路，原子场景用于支撑基础业务逻辑，编排场景则通过灵活组合原子场景，实现对复杂和新兴场景的快速响应。这种方式既全面覆盖了现有工作场景，也能够高效应对未来可能出现的新场景需求，提升了平台的适应性。

此外，架构设计贯彻“以用户为中心”的设计理念，从用户实际操作出发，优化交互体验，大幅提升工具的易用性与用户满意度；以实际工作场景和用户工作岗位职责为基础进行架构设计，有助于构建贴近业务实际的管理平台，实现流程标准化与能力模块化，从而进一步提升业务协同效率与管理效能。



▲ 图1 原子场景和编排场景架构示例图

实际应用

CNOP平台已部署多个无线网络规划的原子场景和编排场景应用，涵盖售前预规划、工程规划、存量经营、网络重构等多种工作场景。下面仅列举CNOP平台当前部署的部分功能：

- 存量网络覆盖规划场景：由现网覆盖评估、场景和楼宇画像、宏站规划、微站规划、室分规划等多个原子场景组成。
- 存量网络容量规划场景：由话务预测、流量压抑、感知分析、站点规划等多个原子场景组成。
- 高铁规划场景：由高铁画像、链路预算、容量评估、站点自动规划、天线横滚和方位角下倾角自动规划等原子场景组成。
- 售前预规划场景：由链路预算、站点规划、容量规划、覆盖仿真评估等原子场景组成。

- 5G-A通感规划场景：由通感链路预算、指标仿真评估、天馈规划、高频感知干扰ID规划等原子场景组成。

- 无线参数规划场景：由无线参数看板、核查、重规划等原子场景组成。

平台根据不同制式和区域的需求特点，进一步分化为更多具体的场景功能。目前，平台已能够支持国内外所有无线网络规划项目，并且随着原子场景的不断完善，平台对新工作场景的响应效率也在持续提升。

CNOP平台的架构将自智能力的评价标准从单一的技术方案提升至工作场景，体现了对自智网络认知的跃迁。这一转变有助于在未来更好地引导自智网络的演进，推动其尽快达到高阶自智标准。ZTE中兴

无线网络综合话务预测



朱永军
中兴通讯网规技术总工



马肖尚
中兴通讯大数据算法总工



谭耀斌
中兴通讯系统产品软件设计专家

在当前与无线网络容量相关的工作中，话务预测的内涵已不再局限于对用户数和业务流量的预测，而是逐步扩展为对各类话务相关指标的综合预测，即那些随着用户数和业务流量变化而相应波动的性能指标。

当前，话务预测主要应用于短期容量监控和中长期容量扩容两类场景。无线话务预测算法在应用中存在以下挑战：

- 无线网络话务相关指标在不同区域、场景以及网络发展阶段中表现出显著差异，难以通过单一模型实现通用适配。
- 对话务预测算法的评估需综合考虑多个维度，如预测准确度、计算效率、场景适应性及算法稳健性等。传统的单一算法往往在某些方面表现突出，但在其他方面存在短板，难以在所有指标上实现领先。

上述挑战导致业界在不同细分场景下发展出众多算法，给用户的选择和应用带来一定困难。为应对这些挑战，中兴通讯精准规划NGI-RSH平台的话务预测功能打造了一套综合性无线话务预测解决方案，集成多种具有不同优势的算法，既可以组合使用，也可独立部署，提供具备高度场景适应性的无线话务预测能力。

数据特征分析

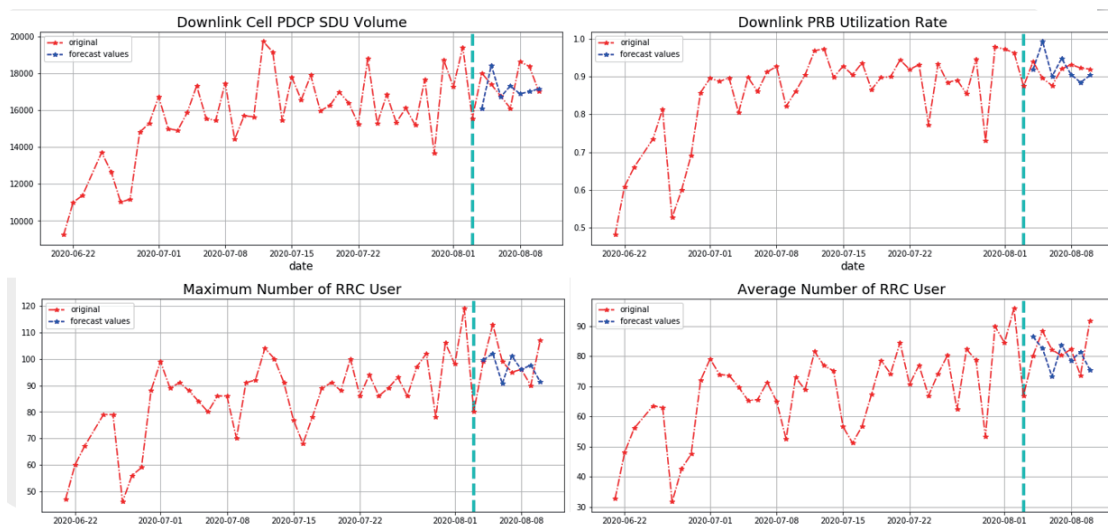
话务相关指标的历史数据通常属于非平稳时间序列，其变化规律具有趋势性、季节性、周期

性和随机性四个构成要素。在实际无线网络数据中，上述构成要素表现出以下特点：

- 强烈的季节性特征：主要体现在节假日周期，尤其是中国传统节日（如春节、中秋等）。由于这些节日为农历节日，在公历年份中的时间点不固定，因此对应的话务波动也呈现出非固定周期的季节性特征。
- 显著的周期性波动：主要表现为一年内不同月份、一周内工作日与周末之间的差异，具有较强的重复性。
- 独特的场景特点：如学校寒暑假、景区节假日、医院工作日与周末等场景，受场景用户行为的影响，话务特征具有与其他场景迥异的特点。
- 网络发展阶段的差异性：在网络建设初期，网络结构和用户规模变化较大，话务波动频繁；在网络成熟期，虽然网络和用户趋于稳定，但受资费政策、运营策略等因素影响，话务模式仍可能发生显著变化。

应用算法

基于无线网络话务数据的特征，对预测算法的评估应从准确度、效率、场景适应性、稳健性（鲁棒性）等因素综合考虑。在业界常用的算法中，回归、平滑移动等传统算法虽然效率较高，但是对数据特征有较高要求，如线性、平稳性等，在复杂场景中应用受限，稳健性较差。而XGBoost、LSTM等机器学习和深度学习算法虽然提升了预测准确度和稳健性，降低了对数据特征



▲ 图1 话务预测功能应用示例

的依赖，但计算效率较低，且在长周期预测或特征突变时表现不稳定，场景泛化能力有限。

针对无线网络话务数据的特点，NGI-RSH平台采用多算法组合的方式，首先对数据进行分解，分离出季节项和周期项。这一处理方式更符合无线网络话务的实际规律。对去除季节与周期影响后的残差数据，进行趋势建模。采用集成学习框架，综合运用多种机器学习和统计学习算法进行协同分析，并通过加权融合策略对预测结果进行优化整合。该多模型集成方法融合不同算法的优势特征，兼顾不同场景的数据特性，提升了算法的整体适用性和预测鲁棒性。

此外，功能支持按全网、场景、站点级等不同粒度。当网络中存在特征差异明显的场景时，采用分场景建模的方法已成为行业通用做法。

应用实例

当前，平台的功能已在国内外4G和5G网络

中广泛应用，图1展示了一个小区的流量、PRB利用率、最大RRC连接数和平均RRC连接数的预测结果。话务预测功能的场景适应能力体现在以下几个方面：

- 支持多种关键指标预测，如PDCP层上下行用户面流量、RRC连接用户数、上下行PRB利用率等；
- 支持小区、站点、场景等粒度；
- 提供灵活的模型选择，用户可选用适应性广的多算法组合模型，也可根据需求选择专为特定场景优化的单一模型。

随着未来数字孪生平台的发展，话务相关指标的预测将逐步向网络状态预测演进，对预测算法的包容性和可扩展性提出更高要求。算法的智能化水平不仅体现在预测精度上，更需体现在对不同场景的适应能力上，以满足日益复杂和多变的网络环境需求。 ZTE中兴

ZTE中兴

成为网络连接和智能算力的领导者
让沟通与信任无处不在