

ZTE中兴



C+L 一体化光网络解决方案 技术白皮书

C+L 一体化光网络解决方案技术白皮书

版本	日期	作者	审核者	备注
V1.0	2025/04/23	吴妮珊、于文博		

© 2025 ZTE Corporation. All rights reserved.

2025 版权所有 中兴通讯股份有限公司 保留所有权利

版权声明:

本作品著作权由中兴通讯股份有限公司享有。文中涉及中兴通讯股份有限公司的专有信息，未经中兴通讯股份有限公司书面许可，任何单位和个人不得使用和泄漏该文档以及该文档包含的任何图片、表格、数据及其他信息。

本文档中的信息随着中兴通讯股份有限公司产品和技术的进步将不断更新，中兴通讯股份有限公司不再通知此类信息的更新。

中兴通讯版权所有未经许可不得扩散

目录

1. 发展趋势	1
1.1 智算业务推动网络容量升级	1
1.2 高速光模块需求爆发式增长	2
1.3 一体化器件产业链逐步成熟	3
2. 关键技术	5
2.1 C+L WSS 一体化	5
2.2 C+L OTU 一体化	7
2.3 多波段系统自动功率均衡	10
3. 技术进展与应用建议	15
3.1 相关标准与产业链进展	15
3.2 传输相关试点和验证	17
4. 展望	18
4.1 市场展望	18
4.2 技术演进展望	18
5. 缩略语	19

1. 发展趋势

1.1 智算业务推动网络容量升级

随着云计算、大数据、AI 等智算业务的不断兴起和快速发展，全球网络业务流量需求激增。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；其中 AI 增强型应用（如嵌入 AI 功能的现有服务）占全球网络流量的 43%（CAGR 31%），因功能升级引发流量“膨胀”；原生 AI 应用（如自动化决策、自主交互）虽初期占比不足 1%，但以 100% 超高增速成为未来核心变量。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，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。

作为承载算力的全光底座，算力网络的蓬勃发展给底层骨干传送光网络的容量和速率带来了新的挑战。骨干传送网在保障数十 T 级超大带宽的基础上，还需要具备低时延、超高可靠性、算网协同任务式调度等能力。C+L 一体化方案的推出，可以帮助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 波段的全波段无限调频，打造更敏捷更灵活的光网络设施。

同时，随着干线流量的快速增长，光模块能耗问题也日益凸显。目前主流技术方案包括采用共封装光学（CPO）和线性驱动可插拔光模块（LPO）等来降低光模块功耗。对比两种技术路线，预计短期内会出现 LPO 和 CPO 并存的情况，后续 LPO 将因其显著的成本优势在 400G/800G/1.6T 领域胜出；CPO 则主要应用于小众市场，聚焦特定的场景需求（如超低延迟场景）。因此从长期发展的角度看，具有高集成、低功耗、低成本特点的 C+L 一体化可插拔光模块将成为下一代绿色光网络的最佳选择。

1.2 高速光模块需求爆发式增长

随着社会经济的新引擎——AI 应用迅速步入千行百业，网络流量正以每 3-5 年增长 1 倍的速度增长。与之相对的，基础通信设施更新周期约为 30 年，因此 OTN 势必须向单纤大容量方向持续演进，以解决流量增长快速与基础设施更新缓慢之间的矛盾。Omdia 预测显示，B400G 光网络在未来 5 年投资及占有率均超过 50%，将成为大量运营商的首选，传输速率的全面迭代带来了高速光模块需求爆发式增长。以数通光模块为例：

1. 模块数量：

2023 年 400Gbps 以上的光收发模块全球出货量为 640 万个，2024 年约 2,040 万个，预估至 2025 年将超过 3,190 万个，年增长率达 56.5%。

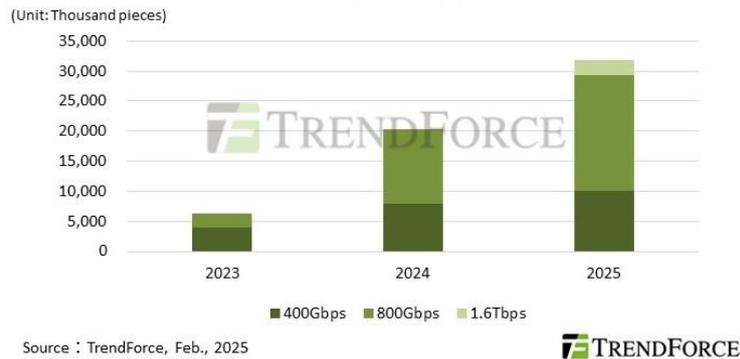


图 1.1 全球 400G 以上光模块出货量预测（2023~2025）

2. 市场空间：

预计自 2025 年起，全球相干波长出货量将以 9% 的复合增长率持续增长。未来五年，400Gbps 和 800Gbps 出货量将占据主导地位。1.6T 于 2024 年底开始发货。预计 2.4T 将于 2027 年进入市场。

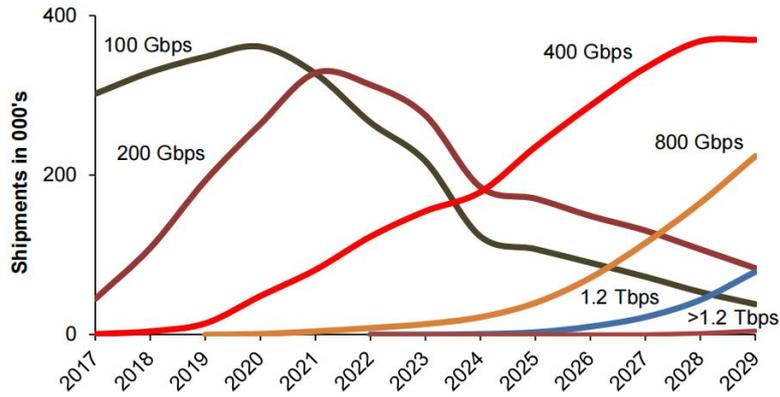


图 1.2 相干波长出货量预测 (2017~2029) (数据来源: 2025 Dell'Oro)

从以上数据可以看到，数通模块的需求在未来 5 年内将以较快速度持续增长；这意味着整体干线和城域流量需求也在同步快速增加，对相干长距传输系统的架构、容量、能效等都提出了更高要求。

在 C+L 波段的信号谱宽扩展已成为行业主流技术方向的背景下，干线流量需求的快速增长，使得相干长距传输场景下的相干光模块出货量持续增加，这将导致光层系统的复杂度问题进一步加剧。具有 12THz C+L 全波段任意调谐、调度能力的 C+L 一体化光网络解决方案可以简化 C+L 系统的组网结构，最大程度上发挥 ROADM 全光交换能力。

1.3 一体化器件产业链逐步成熟

C+L 一体化系统的商用与产业链的技术创新密切相关。根据一体化系统关键器件的实现难度和发展现状，400G C+L 系统的演进路线如下图 1.3 所示。从 C/L 波段分立架构出发，一体化系统演进将经历 WSS 一体化、WSS/OTU 一体化、WSS/OTU/EDFA 均一体化三个不同阶段，其最终形态从结构上接近现有 C 波段系统，器件成本预计降低 30%，板卡集成度提升一倍，系统运维更加便利。

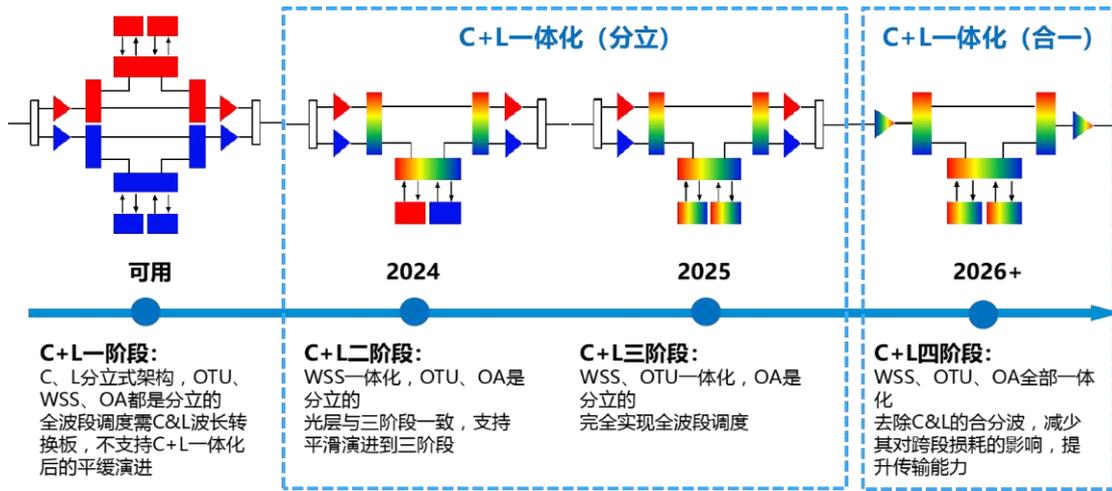


图 1.3 400G C+L 系统演进路线

1. C+L 二阶段:

C+L 二阶段依赖一体化 WSS 器件，OTU 和 EDFA 仍然为分立形态。目前 C+L 一体化 WSS 技术已成熟，一体化 WSS 器件已可提供。从目前市场需求角度看，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。对于下一阶段的 OTU 一体化系统，可支持现网平滑扩容和升级。

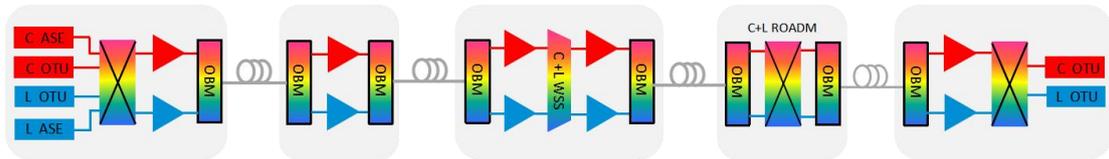


图 1.4 C+L 二阶段系统组网示意图

2. C+L 三阶段:

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。

目前一体化 OTU 所关联的相干光收发器件 CDM 和 ICR C+L 宽谱技术、C+L 一体化宽谱可调谐 ITLA 以及 SOA 等技术均已突破；预计 2025 年~2026 年可实现光模块 C+L 一体化的最终优化和全面商用，届时 OTU C+L 全波可调，400G/800G OTU 单端口造价

将进入合理区间，光系统整体成本进一步降低。

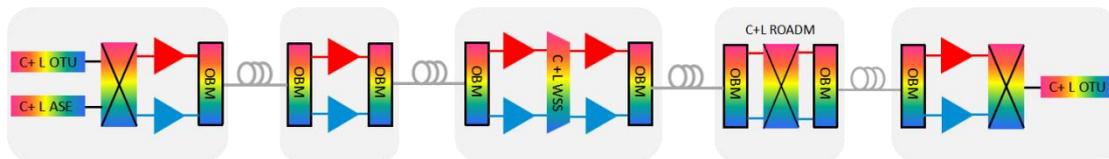


图 1.5 C+L 三阶段系统组网示意图

3. C+L 四阶段：

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，减少合分波器件对跨段损耗等的影响，进一步提升光系统的传输能力。但目前一体化 EDFA 技术与量产尚存在诸多不确定性，相关一体化光纤仍处于研究阶段，要视技术发展情况再做具体策略决定。



图 1.6 C+L 四阶段系统组网示意图

结合以上分析，目前 C+L 系统正处于第二阶段，一体化 WSS 的规模商用和部署，使光系统在波长调度方面，单端可调度波长数提升 1 倍，资源利用率显著提升；随着一体化 OTU 技术和产业链的逐步成熟，预计 2026 年将全面迎来 C+L 系统的第三阶段；预计一体化 EDFA 的商用不会早于 2027 年，其成本和技术优势有待后续衡量决策。

2. 关键技术

2.1 C+L WSS 一体化

随着 C+L 系统演进，WSS 从 C++波段扩展到 L++波段，C6T+L6T 一体化 WSS 已在业内逐步推出，支撑 OXC 向 C+L 一体化方向发展。基于 LCOS（硅基液晶）的光波长

选择开关 (WSS) 是 OXC 各厂家的通用选择, 可将输入端口的任意波长信号灵活调度到任意一个线路端口输出, 是 OXC 实现光交叉功能的核心部件, 实现波长级的光层调度功能。

相较于分立式 WSS, 一体化 WSS 由于单通道间隔的像素尺寸压缩, 或存在 WSS 通道带宽窄化问题。该问题可以从光路和算法两方面得到有效解决。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 (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。通过光带宽元件/算法多层次优化, 使能一体化 OXC 组网商用。

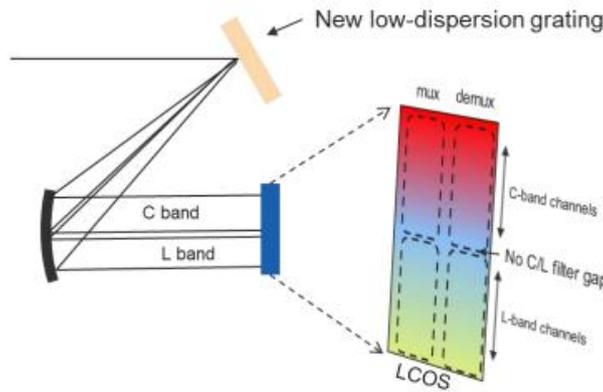


图 2.1 C+L 一体化 WSS 结构示意图

对于 C+L 一体化的不同阶段, 一体化 OXC 架构也呈现出不同的形态。如图 2.2 所示, 在 WSS 实现 C+L 一体化, OA 分立的阶段, OXC 系统通过进一步将 C++和 L++的 OA 物理上高度集成, 实现 C+L 板卡一体化。

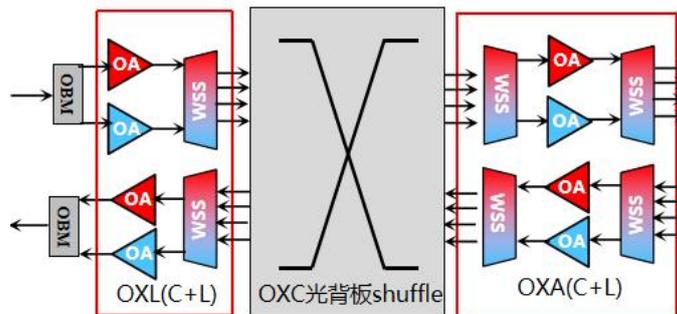


图 2.2 C+L WSS 一体化 OXC 架构

当 OA 进一步实现宽谱一体化集成, C+L 系统 OXC 可以实现完全一体化的极简架构。

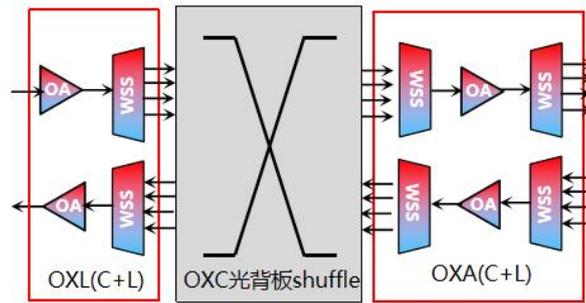


图 2.3 C+L 完全一体化 OXC 架构

随着网络发展带来核心节点光层调度维数的增加，高维度的 OXC 需求会进一步增长，C+L 系统上下路 40 维, 以及后续更高维度 48/64 维 OXC 产品也会很快到来。技术上 CDC 上下路的 C+L 一体化 $M*N$ WSS 或 MCS 方案将是 OXC 系统必须要解决的问题。此外，随着 400G 传输速率进一步向 800G 演进，支持 S 波段的相关器件也在快速迭代中。

从整个系统架构看，光电一体协同调度将促使光电交叉设备向一体化方向发展，并且随着国产自主可控的核心器件、芯片技术日益成熟以及集成度的进一步提高，将支撑整个系统更加绿色、节能、低碳。

OXC 作为智能化全光网络的基础底座，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、C+L 系统中功率调节化繁为简、业务追踪、错连检测、自动调度等功能，未来将进一步向更智能化方向演进。

2.2 C+L OTU 一体化

随着长距传输系统由单波 200G 向单波 400G 乃至单波 800G 发展，信号占用的谱宽不断提升，仅能承载 40 波业务的传统 C++ 波段已无法满足单纤容量提升的需求，频谱资源进一步扩展到 C+L 波段 (C6T+L6T)。同时，对于部署低功耗、高性能、便捷运维的大容量 OTN 网络的需求不断增加，构建灵活、绿色、高效的 OTN 网络，C+L 一体化 OTU

技术，尤其是具有更小尺寸、更低功耗和更高灵活度的一体化可插拔光模块技术，变得尤为重要。

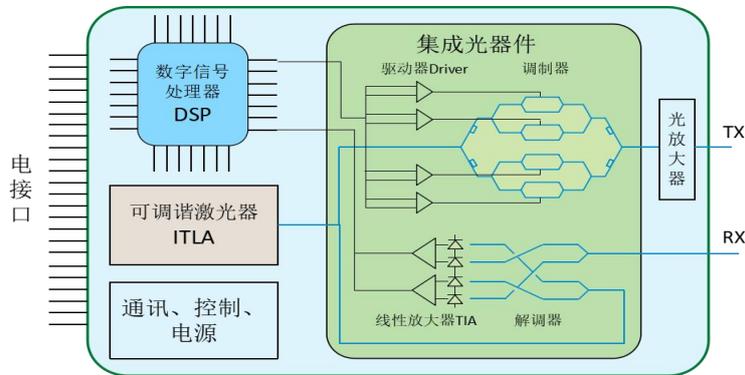


图 2.4 相干光模块内部结构示意图

相干光模块包含多个关键组件，其典型的内部结构示意图如图 2.4 所示，包括电模拟芯片、DSP 芯片、ITLA、调制器、接收机等部分。从 C+L 一体化 OTU 关键组件的主要技术路线及相关产业链发展现状来看：

1. 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，其 400G 技术已成熟。
2. 一体化 ITLA：可采用双芯片集成（C/L 双芯片+低损光开关）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，其中一体化 ITLA 单片外腔方案示意图如图 2.5 所示。

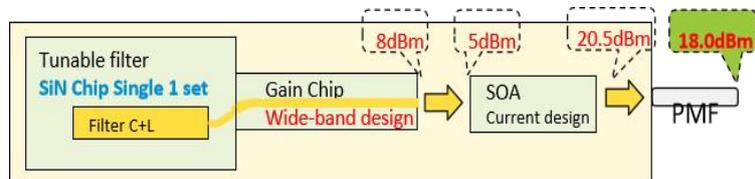


图 2.5 一体化 ITLA 单片外腔方案示意图

对于一体化 ITLA，需要解决两个主要问题和技术难点。其一是超宽带滤波芯片/增益芯片与高功率、小尺寸芯片存在矛盾，当 InP/Si 器件从独立的 C/L 波段扩展到 C+L 波段后，其增益会下降，导致出光功率降低；其二是超窄线宽方案与材料特性之间存在矛盾，传

统的 InP 路线使用 DBR 方案，难以实现超窄线宽所需要的超长谐振腔结构。

针对上述问题，中兴通讯采用宽波段滤波器方案和多微环外腔结构，在实现低非线性效应、支持高出光功率的基础上，通过结构优化拉长等效波导长度，利用成熟的高精度加工工艺实现各元件片上集成，同时满足了宽波段、高功率、窄线宽、小尺寸的性能要求，实现了业界领先的 100kHz 窄线宽、C+L 一体化 240 波可调谐，较目前业界主流的 L120/C120 调谐范围翻倍，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 C120+L120 应用及向 CL240 演进的需求。

3. 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 相当；Si/Ge PD 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。

2025 年 2 月，中兴通讯的“最强 C+L 波段一体化可插拔 800G 光模块”等光传输技术斩获四项 Lightwave+BTR 光通信年度创新大奖（Lightwave + BTR Innovation Reviews）。与普通的固定光模块相比，中兴通讯 C+L 一体化可插拔 800G 光模块采用紧凑的 DCFP2 封装，尺寸减少 60%，功耗减少 68%；130Gbd@5nm 数字信号处理芯片（DSP）、内部集成相干接收器和调制器（ICRM）以及内部 C+L 一体化可调谐激光器组合（ITLA）均集成到一个可插拔光模块中；在实现高集成度和低能耗的同时，基于 130GBd，采用前向纠错（FEC）、星座整形算法和专利技术，提高传输能力并支持 ULH 传输，有助于有效减少电中继数量和网络建设成本。

具体来说，中兴通讯 C+L 一体化可插拔 800G 光模块采用了如下新技术：

1. 先进的 5nm 芯片工艺，将 DSP 尺寸减小 60%，单位 Gbit/s 功耗减小 75%；
2. 先进的光学元件封装工艺，将调制器和接收机集成在一个单元中，使集成水平提高

100%，尺寸减小 30%；

3. 先进的光波导封装工艺使得激光的封装模式从 Micro-ITLA 模型发展到了当前的 nano-ITLA 模型，尺寸减小了 47%，节省了空间；
4. 业界首家将薄膜铌锂（TF-LN）技术应用于 800G 相干可插拔模块的供应商，具有插入损耗小、非线性效应对光学系统高波特率的影响小等优点；
5. 采用新型掺杂技术，通过改变掺杂中铟、镓、砷和磷元素的浓度和叠层厚度，实现光谱资源的扩展和 C+L 频带的整合；与 C4.8T+L4.8T 频段相比，频谱宽度增加了 25%，提供了足够的带宽资源。

综上，中兴通讯 C+L 一体化可插拔 800G 光模块同时支持 C6T 波段和 L6T 波段的一体化波长灵活调度，电路板端口密度提高 100%，功耗降低 68%，在光纤网络的快速部署、实现灵活操作和维护方面具有显著优势。

2.3 多波段系统自动功率均衡

WDM/OTN 系统运行时，主光功率必须保持系统设计时的功率预算，以保证接收端正常工作。如果在网络开通中光纤参数跟预算设计不一致或网络运维中光纤老化衰减出现变化，将会导致业务光信号的功率发生变化，严重时会导致业务中断。另外，WDM/OTN 系统在运行过程中，各个波长通道的光功率可能会因光纤接头插损等原因出现变化，即光功率点偏移最佳工作点，也可能导致光传输链路的信噪比劣化，通信质量下降甚至中断。传统的人工调节方式，工作量大且调节不及时。为此，在光网络中引入自动功率优化（APO）功能十分必要，中兴通讯近年来也推出了 APO 功能，助力光网络更快调测，更稳定运行。

1. C+L 一体化（EDFA 分立）系统的 APO

根据 C+L 系统的演进路线，可以将 C+L 一体化系统分为 EDFA 分立和 EDFA 合一这

两个不同的阶段。其中在 EDFA 分立的 C+L 一体化系统中，包含仅 WSS 一体化、OTU 和 EDFA 均分立，以及 WSS 和 OTU 一体化、仅 EDFA 分立，两种组网结构。

从 APO 的调节策略和性能来看，C+L 分立系统中的 APO 功能和效果，在 C+L 一体化（EDFA 分立）系统中依然适用。

按照波分网络网络组成结构，可以把网络分为复用段和业务通道两个层次。

复用段是共信号经过合波之后起始，进入光纤传输，到信号分波前为终结。如图 2.6 所示，复用段功率调节的主要目的是使用光放大器克服光缆的损耗，满足系统整体的 OSNR 预算要求；对于复用段层，APO 功能可以保证当网络开通中光纤参数与功率预算设计不一致或网络运维中光纤线路衰减发生变化时系统功率预算的稳定，减少对业务的影响。同时，启用复用段层 APO 功能后，可减少手工执行功率预算调整带来的测量和补偿设置的工作量，避免出现手工测量和设置错误，减少维护人力。

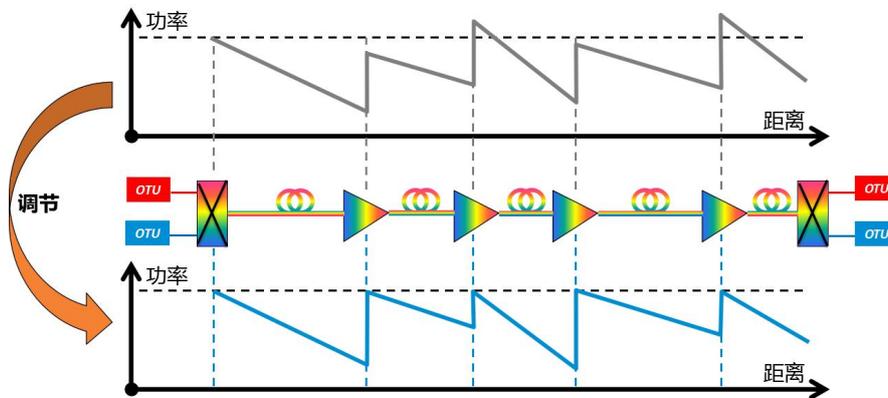


图 2.6 复用段功率管理效果

业务通道层是以线路侧业务光合波前为起始，到业务接收机接收口之前为终结；业务通道功率调节的目的是使业务通道功率满足系统功率预算的入纤功率要求，同时通过精细调节每一波功率，减小收端各个波道的 OSNR 和接收误码率差异，达到系统预算时规划的性能。对于通道层，APO 功能可以自动将功率出现异常的波长通道调回最佳工作点，调节及时且减少人工维护的复杂性。下图 2.7 用功率性能示意了通道 APO 功率优化前后的情况，实际

过程是优化后功率也存在一定的不平坦度，但这种不平坦就是为了传输性能（如 OSNR）均衡而有目的的调节的结果。

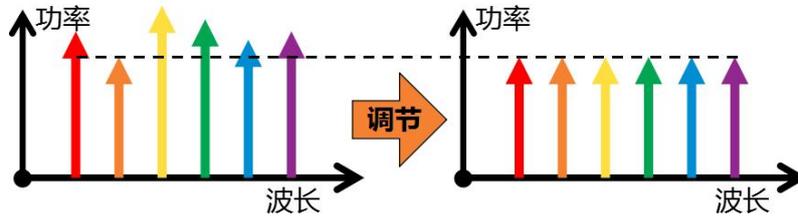


图 2.7 通道层功率管理效果

当前 APO 功能几乎已经成为中兴通讯超 100G 光传输工程标配特性，支撑了大量现网工程的新建、扩容的高效便捷调测和开通，最大化光链路 OSNR 余量和波道平坦度。

当具体到宽谱 C+L 系统（12THz）时，为保证系统动态增减波时的传输性能稳定，系统需要依靠填充波技术保证波道始终为满配状态。该波道满配的系统存在着强烈的 SRS 效应，光功率从短波长向长波长转移非常显著。

1) 从性能角度来说，SRS 转移具有累积效应，经历多个跨段的传输后，接收端短波长功率明显低于长波，OSNR 平坦度显著劣化。

2) 从运维角度来说，由于拉曼效应会随着入纤功率的变化而变化，C+L 系统的功率均衡需要不断迭代才能达到设计的目标值。

因此为了保证业务性能始终满足设计要求，开局、扩容与运维时，系统都需要自动功率均衡来维持系统性能。总体来讲，与 C 波段系统相比，C+L 系统对于自动功率均衡功能的性能与效率的要求更高。

1) 开局场景，APO 可以自动调节业务功率满足性能要求；

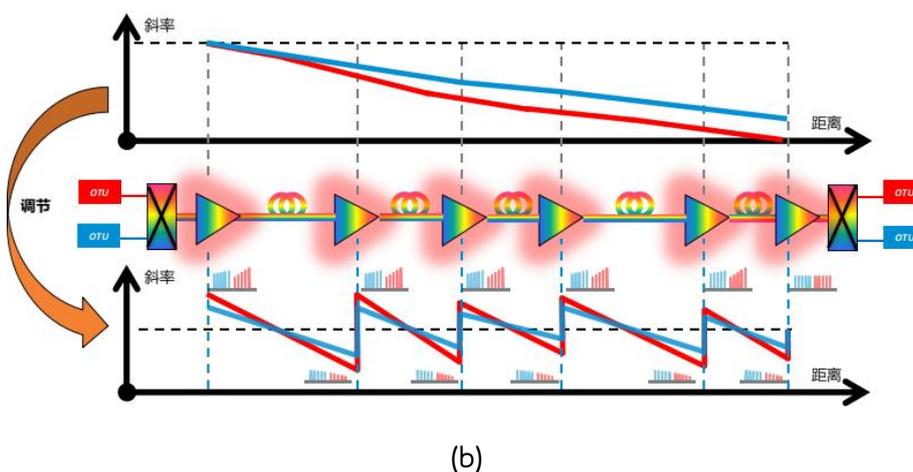
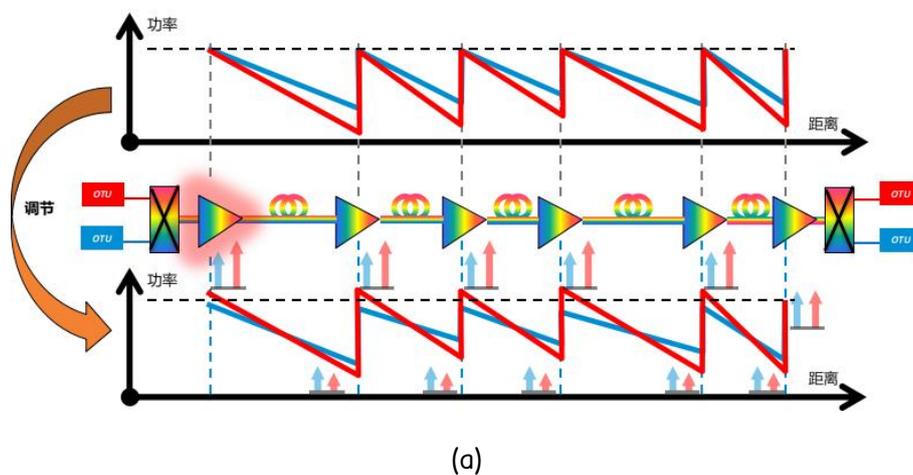
2) 扩容场景，APO 可以高效完成端到端的业务自动开通；

3) 运维场景，APO 可以在链路劣化时自动运维，保障系统性能。

基于C+L系统中填充波配置和“真假波替换”原则，我们设计了自动功率优化（APO）算法来保障C+L系统开局调测快人一步、稳态性能优人一等的目标，APO算法也依然分为复用段与通道级两个层次的调节。

1) 对于复用段级功率调节来说，APO需要补偿波段间的功率不平坦，迭代调节C波段与L波段OA增益；并且补偿波段内的功率不平坦，迭代调节C波段与L波段EDFA斜率；

2) 对于通道级功率调节来说，APO需要补偿残余的功率不平坦，调节C波段与L波段WSS通道衰减。



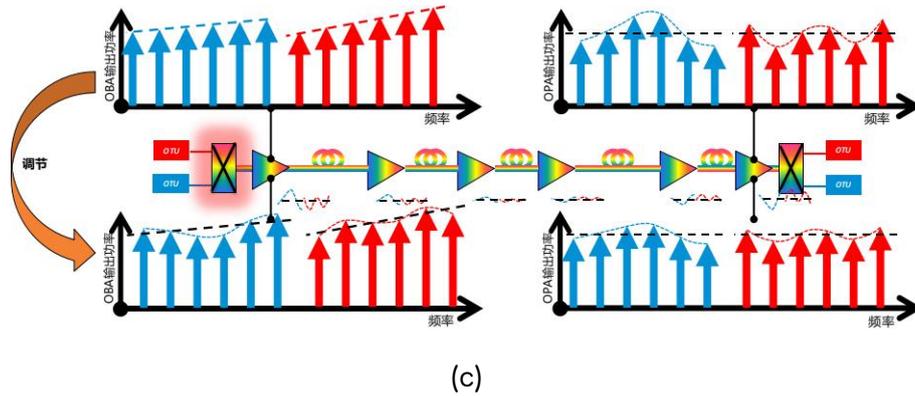


图 2.8 C+L 系统功率均衡效果示意

2. C+L 一体化 (EDFA 合一) 系统的 APO

对于 C+L 一体化系统的最终阶段,由于一体化 EDFA 中 C 与 L 波段在同一段光纤中进行放大,无法独立控制各个波段的功率与斜率,C 波段与 L 波段需一起同步进行控制与调节,因此对应系统的 APO 策略需要结合现有算法进行更新。

与之前 EDFA 分立系统的 APO 相比,EDFA 合一的 C+L 一体化系统的 APO 丧失了两个波段独立调节功率与斜率的自由度;但 APO 的调节目标不变,依然需要补偿 SRS 效应功率转移造成的 C 与 L 的功率转移以及通道功率倾斜,最终做到 OSNR 或功率均衡。如下图所示,对 EDFA 合一的 C+L 系统来说,APO 监测点没有变化,依然为各个 EDFA 输入与输出功率以及首尾 OPM 上的通道功率;APO 可调节节点变为合一 EDFA 的整体增益、斜率以及上路 WSS 通道衰减。综合以上分析可以看到,尽管 EDFA 合一的 C+L 系统在光网络架构上更加简洁灵活,但系统的 APO 调节策略和性能效果或将受到一定程度的挑战。

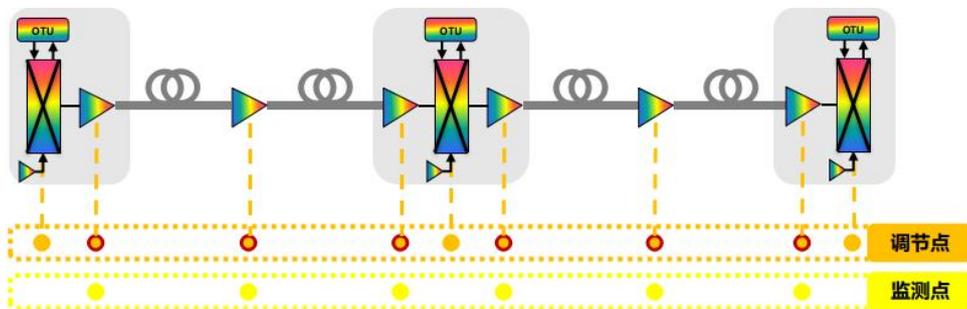


图2.9 EDFA合一的C+L一体化系统APO调节示意图

3. 技术进展与应用建议

3.1 相关标准与产业链进展

1. 标准进展

国际标准方面，400G/800G及以上相干光模块、传输系统等相关标准主要由国际电信联盟电信标准化部（ITU-T）、IEEE 802.3、OIF等标准组织，以及800G Pluggable MSA、IPEC、OpenROADM、Open ZR+等厂商发起的多源协议（MSA）组织共同制定。

在短距应用方面，光互联论坛（OIF）于2022年制定了400ZR标准规范，为400G相干光模块的短距应用提供了明确的技术指导，定义了单波长无光放大点到点功率预算受限系统（传输距离小于40km）和DWDM有光放大点到点OSNR受限系统（传输距离小于120km）两大应用场景。目前OIF正在制定800G LR和ZR的规范，包括光系统参数、FEC、DSP、OTN映射等技术方面。OpenROADM/OpenZR+也发布了400G相干光模块相关规范，包括支持CFP2-DCO和QSFP-DD/OSFP封装，在400ZR帧结构的基础上增加了100/200G QPSK、300G 8QAM等调制模式，并采用oFEC替代级联FEC（cFEC）的方式来支持450km级的400G传输。

ITU-T SG15 Q6工作组在2023年2月会议决定重启400G标准化，并对800G标准化采取开放态度。目前，ITU-T致力于规范多厂家兼容的DWDM系统，寻找一种判定发射机质量的参数，规范基于128GBd以上QPSK调制的DWDM长距离应用。同时，Q6未来对C+L扩展频段的需求在800G DWDM的应用中得到了认可，Q6在800G标准化方面的表现值得期待。

在400G以太网接口规范方面，IEEE 802.3在2023年定义了400G以太网的物理层规范，包括客户侧的400G接口，规定了400G客户侧光模块的传输距离；800G/1.6T以太网接口标准化正在进行中，包括单通道100G和200G两路不同传输距离的接口标准制定。

国内标准方面，高速光传输模块及系统的标准化工作主要由中国通信标准化协会（CCSA）传送网与接入网工作委员会（TC6）完成。大部分行业标准以国外先进标准为基础，结合国内应用需求制定而成，整体发展速度与国际标准基本同步。

CCSA TC6 WG1先后完成了Nx400G光波分复用系统的一系列行业标准，包括《Nx400G光波分复用（WDM）系统技术要求》、《城域Nx400G光波分复用（WDM）技术要求》和《扩展C波段光波分复用（WDM）系统的技术要求》。这些标准涵盖了400G骨干、城域和扩展C频段的应用，调制格式主要指定2x200Gbit/s PM-16QAM/PM-QPSK和400Gbit/s PM-16QAM。

随着DSP和高性能FEC技术的发展以及运营商的建网需求，2023年CCSA TC6 WG1立项了《N×400Gbit/s超长距离光波分复用(WDM)系统技术要求》和《城域N×800Gbit/s光波分复用(WDM)系统技术要求》两项行标，将规范基于120Gbd以上的QPSK调制格式的WDM光系统，并积极推动800G相关标准和技术的研究。2023年12月份会议审查通过了“800Gb/s相位调制光收发合一模块 第1部分：1×800Gb/s”行标送审稿，讨论通过了“800Gb/s强度调制可插拔光收发合一模块 第1部分：8×100Gb/s”行标征求意见稿。同时围绕1.6T强度调制光模块、1.2T相干模块等重点领域以及C+L一体化光器件等方面展开了讨论。

2. 产业进展

一体化WSS方面，目前主要设备厂家已具备C+L一体12THz的WSS技术，并已在24年逐步商用，一体化OXC架构帮助400G C+L现网实现集成度提升。

一体化OTU方面，中兴通讯2025年2月推出800G C+L一体化可插拔光模块，支持12THz波段全频谱任意调整，减少50%备件种类，同时可提升WASON恢复路由可用频谱资源，减少中继变波长板卡数量，降低运营商Capex；此外，相比固定光模块体积减少60%，功耗下降约68%，可有效节省机房空间，显著降低系统功耗，降低运营商Opex。

一体化EDFA实现路径尚不明确，具有较大技术不确定性，目前主流的两种一体化放大方案均不成熟。

这些产业现状和标准进展标志着C+L一体化光网络稳步演进中，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传输能力提升和产业进步。

3.2 传输相关试点和验证

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2倍业界的全频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。

相关试点和验证包括：

1. 助力 Turk Telekom 重构 OTN 网络，实现机房与光纤资源节省 80%、跨欧亚大陆现网验证全球最宽的 1.6T 方案。
2. 联合中国电信完成行业首个 C+L 一体化的 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 800Gbps 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（波长交换光网络）的波长恢复能力。在现网环境下，试点完成业务的两次重路由倒换，倒换过程中支持扩展 C+L 超宽谱内任意波长的灵活切换，波长切换时间为 30s 左右，为实现扩展 C+L 一体化全光交换系统的商用迈出关键一步。

未来，中兴通讯将持续扩展 C+L 一体化 WDM 技术的研究，探索高速率、多波段技术的发展与应用，助力更高效、更灵活、更可靠的光网络基础设施构建。

4. 展望

4.1 市场展望

基于 C+L 系统的单波 400G 技术已经趋于成熟，整体需求在逐渐增大；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；对于波分骨干网场景，预计短期将仍以成熟的 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。

结合以上分析，运营商 C+L 一体化光网络部署建议如下：

1) 对于存量网络，可先引入 C+L 一体化 OXC 架构及一体化光模块，使 ROADM 站点具备 C+L 波段一体化调度的能力；下一阶段可视需求引入一体化 OTU，C+L 一体化 OXC 架构支持光网络的平滑扩容和升级，实现 C+L 全波段自由波长调配。

2) 对于新建网络，可全面建设 C+L 一体化网络提升系统容量，降低光系统整体成本；后续单波速率升级可平滑演进到 800G/1.6T 及以上。

4.2 技术演进展望

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。EDFA 一体化的实现，对一体化铒纤的设计、制备及放大器整机设计等都带来了不小挑战。

具体来说，C+L 一体化 EDFA 目前主流的技术路线包括基质掺杂方案和铒铽共掺方案。

1. 基质掺杂方案：

基质掺杂方案现存问题包括：带宽不足，NF 差，放大带宽只能兼顾单一波段；氟碲酸盐基质与硅基方案兼容性差，熔接损耗大且不稳定；量产难度大，国内无成熟掺铒氟碲酸盐光纤的产业链。考虑到 Er^{3+} 特性相对比较稳定，进一步调整基质和组分发射谱无法达到预期的拓宽，该方案的可行性较低。

2. 铒铋共掺方案：

铒铋共掺方案现存问题包括：C 短波增益带宽不足，NF 差；铋损伤导致背景损耗过大，且光纤使用长度过长，导致长波增益小，饱和输出功率低；铋稳定性差，温控性能差。通过调整掺杂组分，优化制备工艺，有望拓宽 Er^{3+} 在 C 波段带宽，减少背景损耗影响，因此该方案具有一定可行性，其放大性能提升依赖铒铋共掺光纤的技术突破。

基于当前的 400 G 场景需求，预计 C+L 一体化 EDFA 在 2027 年后才可能商用。从现有技术角度来看，综合考虑现网替换的设备成本、运维成本、传输性能变化导致的中继成本，和新建网络时 C+L 分立 EDFA 和 C+L 一体化 EDFA 带来的建网成本，目前 C+L 一体化 EDFA 对 400G 已建现网和新建网络暂无显著成本优势，其后续技术发展及应用需求须持续关注。

5. 缩略语

缩略语	术语	描述
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	正交相移键控，是一种四相位调制方式，具有良好的抗噪特性和频带利用率，可以应用在相干光通信系统中。
M-QAM	M-Quadrature Amplitude Modulation	M 阶正交幅度调制，也是相干光通信系统中常用的调制方式

WDM	Wavelength Division Multiplexing	是将两种或多种不同波长的光载波信号（携带各种信息）在发送端经复用器汇合在一起，并耦合到光线路的同一根光纤中进行传输的技术
OTN	Optical transport network	网络的一种类型，是指在光域内实现业务信号的传送、复用、路由选择、监控，并且保证其性能指标和生存性的传送网络
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer	可重构光分插复用器，是一种使用在密集波分复用（DWDM）系统中的器件或设备，其作用是通过远程的重新配置，可以动态上路或下路业务波长
WSS	Wavelength selective switch	波长选择开关，是一种 ROADM 子技术
OXC	Optical Cross Connect	光交叉连接器，是一种用于在光层面上进行路由、连接和交换的设备，常用于构建灵活的波分复用网络
CDC	Colorless, Directionless, Contentious	无色、无方向、争议接入，描述了光网络中的一种高级特性。在 CDC 架构中，信号可以不受颜色（波长）和方向限制地进入或离开网络，并且可以在任何端口上进行争议接入
OTU	Optical Transport Unit	光传输单元，是 OTN 中的一个关键组成部分。OTU 负责将客户信号适配到 OTN 帧结构中，并进行相应的开销处理和线路编码
ITLA	Integrated Tunable Laser Assembly	集成可调谐激光器组件，是一种能够在一个宽范围内调整其发射波长的光源设备，常用于 DWDM 系统中以提供灵活的波长配置
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	半导体光放大器
DSP	Digital Signal Processing	数字信号处理，指对采集到的信号进行分析、变换、滤波等操作的一系列算法和技术
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	掺铒光纤放大器，是一种利用掺杂铒离子的光纤来实现对光信号放大的设备
APO	Automatic Power Optimization	自动功率优化技术
PS	Probabilistic constellation shaping	概率星座整形，通过改变各星座点的概率分布获得整形增益的技术
OSNR	Optical signal noise ratio	光信噪比，表征光信号质量的参数

Capex	Capital Expenditure	资本性支出
Opex	Operating Expense	运营支出