

ZTE中兴



800G C+L 系统

超大容量光传输技术白皮书

800G C+L 系统超大容量光传输技术白皮书

版本	日期	作者	备注
V1.0	2024/03/22	ZTE	第一版

© 2024 ZTE Corporation. All rights reserved.

2024 版权所有 中兴通讯股份有限公司 保留所有权利

版权声明:

本文档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 and 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。

目录

1. 发展趋势	1
1.1 800G 端口需求持续增加	1
1.2 骨干网与城域网容量需求增加	2
1.3 800G 产业链日趋成熟	3
2. 关键技术	4
2.1 800G 光模块实现高速传输	4
2.1.1 先进 DSP 芯片与算法	5
2.1.2 高速相干光器件	7
2.2 宽谱 C+L 传输系统	9
2.3 功率管理实现灵活性能优化	12
3. 技术进展与应用建议	16
3.1 相关标准与产业链进展	16
3.2 传输相关试点和验证	18
3.3 应用场景建议与分析	19
4. 展望	20
4.1 市场展望	20
4.2 技术演进展望	21
5. 缩略语	22

1. 发展趋势

1.1 800G 端口需求持续增加

为了应对业务流量的快速增长，波分系统骨干网业务侧 100G/200G/400G 端口速率不断升级：从 2012 年 100G 率先商用开始，到 2016 年 200G 波分开始规模部署，再到 2020 年 400G 波分的出现，业务流量的激增带动了传输速率的更新迭代。目前海外运营商市场陆续出现 800G 波分测试需求，如菲律宾 Globe、越南 Viettel 等。

1. 端口数量：

2025 年之前，400G 增速较快，100G&200G 相对稳定，2025 年以后 800G+ 增速提升较快，2022 年-2028 年复合增长率达 49.9%。目前，800G+ 端口已有一定发货量，预测 2027 年将超过 200G，成为主流的系统速率。

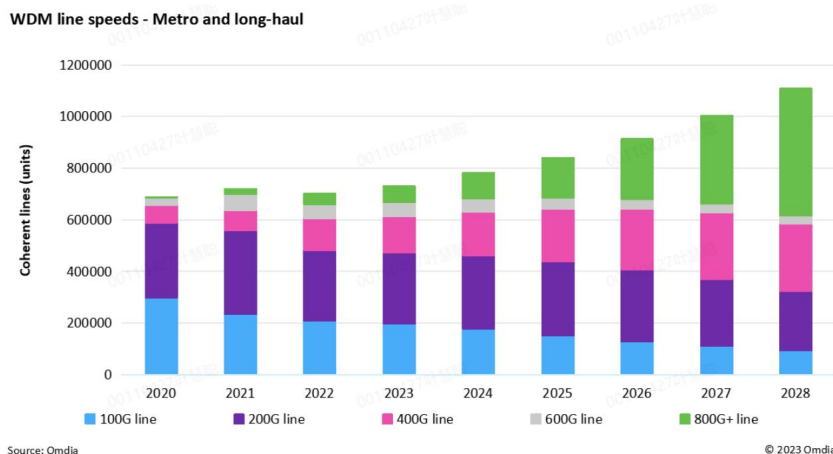


图 1.1 OTN 线路侧端口发货量预测 (2020~2028)

2. 市场空间：

2022 年 800G+ 空间占比 11.11%，2025 年占比将提升至 29.79%，2028 年升至 59.43%，2022 年-2028 年复合增长率达 38.41%。

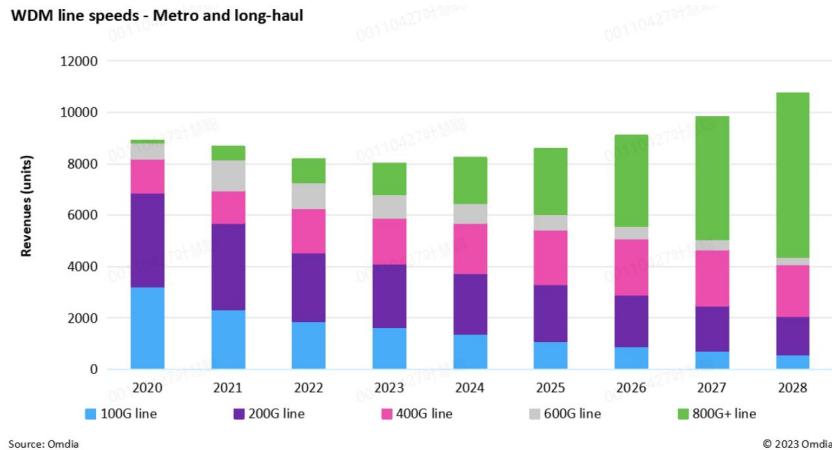


图 1.2 OTN 线路侧市场收入预测（2020~2028）

1.2 骨干网与城域网容量需求增加

随着云计算、大数据、大视频业务不断兴起，数据中心流量与日俱增。800G 方案的推出，可以帮助运营商降低每 Gbit 成本和功耗，从而打造更绿色的网络基础设施。

1. DCI 和短距城域：

从应用场景分析，数据中心的流量 70% 发生在区域内部，而区域内 DCI 和短距城域的传输距离普遍在 100km 以内，目前 800G 技术可以满足 DCI/短距城域需求。2023 年 DCI 场景 800G 端口发货占比为 16.6%，2025 占比达 37.4%，800G 将成为 DCI 场景主要应用速率。

2. 骨干和长距城域：

骨干和长距离城域场景的传输需求，可能会达到几百公里以上，目前仍以 400G 及以下速率为主。2023 年，城域场景 800G 发货占比为 0.4%，骨干场景 800G 发货占比为 0.2%，当前应用较少，预计会在 2025 年开始逐步向 800G 演进。

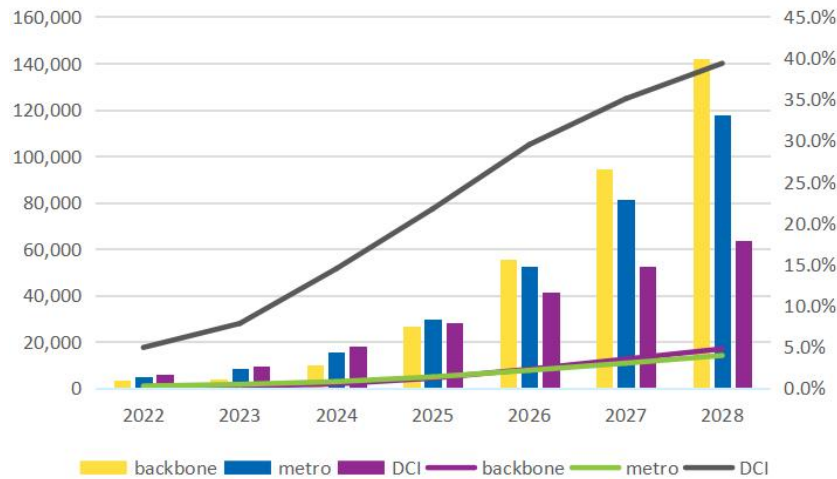


图 1.3 DCI 场景 800G 发货量增速显著(数据来源：2024 Dell'Oro)

1.3 800G 产业链日趋成熟

800G 技术的商用离不开产业链的创新，电层和光层产业链的成熟度对 800G 部署至关重要。

1. 电层产业链：

从 DSP 演进路线来看，第一代 800G(96G Baud 固定模块) DSP 在 2020 年开始商用，传输距离约在 100km；业界第二代为 1.2T(130G Baud 固定模块) DSP 约在 2023~2024 年推出，同年中兴通讯还推出 800G 可插拔模块，更具成本和功耗优势；2025 年以后随着 1.6T(192G Baud)及 2.4T 等 DSP 的陆续推出，800G 传输距离可以进一步提升，可逐步用于长距城域及干线场景。

2. 光层产业链：

目前 C+L 频段的方案已趋近成熟并逐步开始部署，可以满足 800G DCI 场景的应用。随着 2025 年以后城域/骨干向 800G 的演进，单波谱宽将达到 200GHz~300GHz，C+L 频段资源将无法满足场景需求，需要向新波段 S 波段甚至 U 波段扩展；目前各大主流厂家已开展 S+C+L 波段的研究测试，其中，S 波段的光放技术及 SRS 效应的抑制方案仍是当

前主要挑战，S+C+L 商用仍需时间。

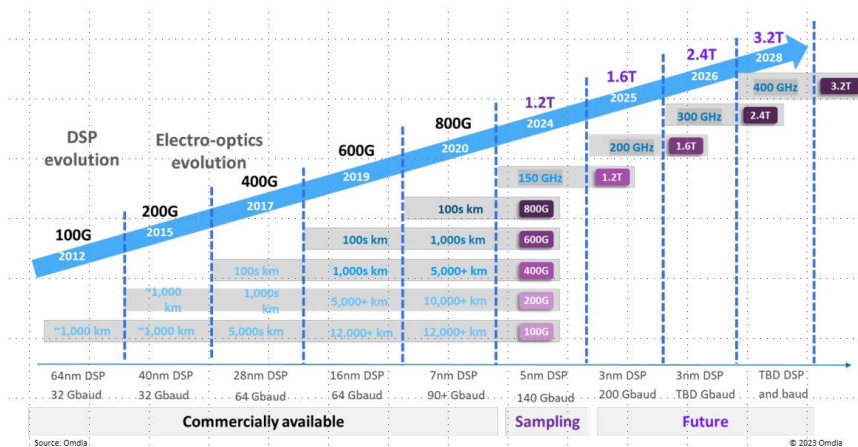


图 1.4 DSP 迅速演进助力 800G 方案不断成熟

结合以上分析，目前 800G 商用规模较小且仍以 DCI/城域短距传输场景为主；随着行业发展和产业链的逐步成熟，预计 2025 年将迎来 800G 爆发期，并逐步向城域/骨干覆盖。

2. 关键技术

2.1 800G 光模块实现高速传输

相干光模块的功能和特性决定了 OTN 系统的传输能力，为保障传输性能，800G 相干光模块需具备以下能力：

1. 最高波特率高达 130Gbd 以上，波特率支持多档甚至连续可调；
2. 多种线路速率和调制码型可调，支持 200G QPSK, 400G 16QAM, 400G PS-16QAM, 400G QPSK, 800G PS-16QAM, 800G 16QAM 等常用调制模式；
3. 模块出光满足至少 -9dBm 以上，工作波段覆盖扩展 C (C++) 和扩展 L (L++) 波段；
4. 800G PS-16QAM 码型的背靠背等效 OSNR 容限相比当前 400G 64GBd PM-16QAM 方案的 OSNR 容限至少提升 1dB。这些性能和特性主要由先进的 DSP

算法、芯片及高速相干光器件来保障。



图 2.1 800GOTN 可插拔模块优势

2023 年，中兴通讯发布全球首个 800G OTN 可插拔方案。相比固定模块，可插拔模块具有明显的优势。

首先，可插拔模块尺寸更小，相比固定模块体积缩小 50%，减少空间占用，可使单板端口密度提升一倍。

其次，可插拔模块单 Gbit 功耗降低 68%，能够显著降低整个系统能耗。同时，可插拔的设计，方便维护人员进行故障维护。

2.1.1 先进 DSP 芯片与算法

相干 DSP 芯片主要由硬 IP 和软 IP 构成，具体如下：

1. 软 IP：主要包括前向纠错 FEC、相干调制解调、星座整形等算法，同时集成 Framers 功能；
2. 硬 IP：包括 DA/AD 和高速 SERDES。对于 130Gb/s 系统，DA/AD 的采样率高达 170GSa/s，需要采用多路复用或时间交织技术架构来提高带宽，并采用 5nm CMOS 工艺来降低功耗。而 SERDES 则最多需要 16 路，其中至少有 12 路支持 106/112G

PAM4。

显然相干 DSP 芯片技术是相干光模块乃至 OTN 系统的核心技术，为更有效实现应用聚焦，DSP 演变为高性能和低功耗两类：

1. 低功耗 DSP：集成标准 FEC 和简化均衡算法，实现线路侧互联互通，适用于对集成度、功耗敏感的网络层次，城域网为主要应用场景；
2. 高性能 DSP：可覆盖全部场景，但由于体积大、功耗大、成本高，主要应用于超长干线和大容量短距场景。

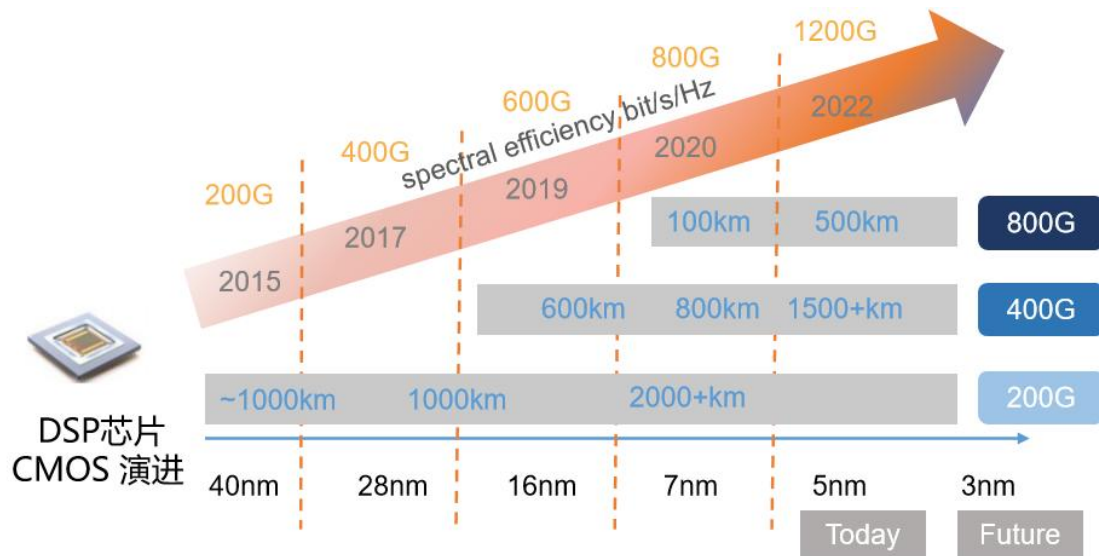


图 2.2 相干 DSP 芯片技术演进

如图 2.2 所示，随着 CMOS 技术的进步，每一代 DSP 芯片性能、功耗、体积都在持续改进，不仅提高了光模块的最高工作速率、延长 400G/800G 信号的传输距离，而且随着晶体管尺寸的降低，单位面积和功耗限制下可实现的逻辑门的数量可快速提升，从而新的 DSP 芯片可以允许一些创新型、较复杂的 DSP 算法快速落地应用。

两个典型的应用是混合调制(TDHM)与概率星座整形 (PCS)技术，已在 16nm/7nm 相干 DSP 中实现，可极大地提高光模块/光系统配置的灵活性，根据需要优化码型、波特率来满足不同场景下对背靠背容限、ROADM 穿通及传输距离的需求。对于 5nm 及 3nm DSP

芯片，一些更先进的算法，比如高性能私有 FEC（LDPC、TPC、MLC 等）、高维/编码调制、超 Nyquist 技术（FTN）、多电子载波（DSCM）、非线性补偿算法、神经网络算法等，可能会在高性能 DSP 芯片中有逐步落地应用的机会，以期进一步增加 800G 的传输性能。

中兴通讯凭借卓越的供应链管理和技术创新能力，充分发挥先进 DSP 芯片能力，从 28nm 到 16nm 再到 7nm 和 5nm，一路伴随产业上下游伙伴共同成长，不断深入践行提速降价、绿色双碳的行业发展理念，持续降低模块、板卡、设备功耗，让光传输更快速、更集约、更绿色。比如，全球首发 130Gb/s 800G 可插拔光传输模块，采用业界领先的 5nm 芯片工艺，相比于固定模块，体积降低 50%，功耗降低 68%。芯片自研能力也在不断加强，比如 400G/800G DSP、1.6T Framer 自研芯片等。展望未来，超强的 DSP 算法、3nm 工艺和自研芯片能力的应用，将为高速光系统带来更大提升和差异化竞争点，值得期待。

2.1.2 高速相干光器件

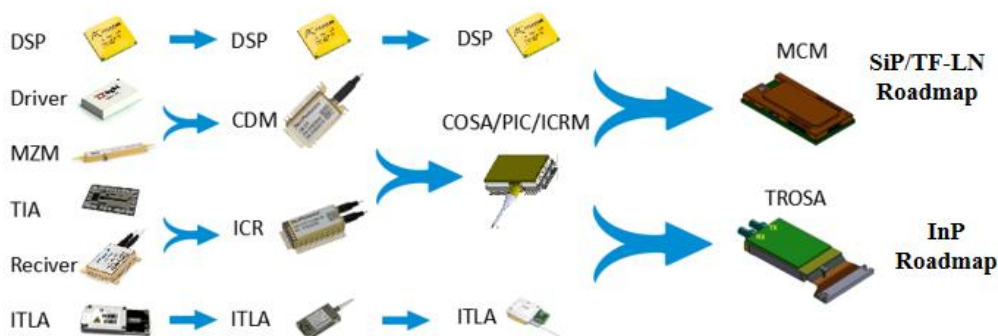


图 2.3 相干光器件技术演进

相干光模块向小型化、低功耗发展的同时，相干光器件也要求更加集成化。如图 2.3 所示，目前有两个技术路线来持续助力器件小型化、集成化。

1. SiP 技术路线

可将调制、接收、驱动放大封装成 ICRM 器件，甚至还能把 DSP die 共封装进去成为 MCM，这样只用外部注入光源，再加上放大后基本就可构成光收发模块。这种 MCM 集成

封装不仅可以让器件小型化，而且缩短了高速信号走线，器件带宽提升 10% 以上，很大程度上弥补了 SiP 技术带宽上限的不足，同时也能一定程度上降低封装成本。64Gbd 硅光 MCM 已经广泛商用，130Gbd MCM 技术即将商用。当波特率持续提升到 192Gbd 甚至 256Gbd 时，SiP 调制带宽不足的问题预计将会暴露，发端需要借助 TF-LN 技术，目前已经有一些基于 TF-LN 的调制芯片或 CDM 器件样品，带宽高达 110GHz，展现了巨大的应用潜力。TF-LN 的材料特性还表明，使用 TF-LN 不仅可以部分兼容 SiP 工艺，还有望继续保持非气密性封装，这进一步增加了其商用机会。

2. InP 技术路线

采用 III-V 族化合物材料制作调制和接收器件，可发挥片上集成有源的优势，光源及 SOA 放大实现起来比 SiP 更容易，因此最终可实现 ITLA+调制接收一体的 TROSA，外部配合 DSP 芯片来完成相干收发功能。理论上 InP 调制器的带宽要比 SiP 更高，模块出光功率也更大，传输能力更强，但实际上到 400G 时代，特别是 130Gbd 时，模块的性能不仅取决于器件带宽，而且还高度依赖于 DSP 芯片算法的补偿和配合，光器件与电芯片的协同设计和优化也十分重要，这加速了光芯片、光器件、DSP 芯片与其他电芯片等产业链的垂直整合。

中兴通讯于 2021 年发布了基于 MCM 器件以及 TROSA 器件的 400G 可插拔相干光模块，实现了紧凑的 CFP2 封装形式。针对 130G 波特率的相干光模块，也将继续探索 SiP MCM 和 InP 两种主流技术路线，并持续优化性能、功耗和成本。新的 TF-LN 材料体系、加工平台及先进封装技术的应用可以提升器件带宽，减少器件体积和成本，在长距 B400G 与城域 800G 光传输系统中应用前景广阔，中兴通讯连同行业伙伴正在积极布局共同推进研发中。

2.2 宽谱 C+L 传输系统

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，需要进一步将频谱资源扩展到 C+L 波段（C6T+L6T）。

C+L 系统演进路线如下图 2.4 所示。C+L 系统分立架构一阶段在 23 年已经具备规模商用落地的能力，考虑到系统业务调度能力、集成度与成本等因素，C+L 系统将逐渐向一体化系统发展，预计在 24 年初步实现商用。一体化演进将经历 WSS 一体化、WSS/ OTU 一体化、WSS/OTU/OA 均一体化三个不同阶段。

C+L 一体化的分阶段演进具有合理性，目前 C+L 一体化 WSS 技术已然成熟，单波 800G 将配合一体化 WSS 实现高速大容量传输。从目前市场需求角度看，预计 24 年将规模商用 WSS 一体化的 C+L 系统，对应的 ROADM 站点将配套具备 C+L 波道一体化调度的能力。后续的 OTU 一体化，可支持现网平滑扩容，OTU 一体化关联的宽谱可调谐 ITLA 以及 SOA 等技术也有相应的路标。但最终一体化 OA 技术与量产尚存在不确定性，相关一体化铟纤仍处于研究阶段，要视技术发展情况决定具体策略。

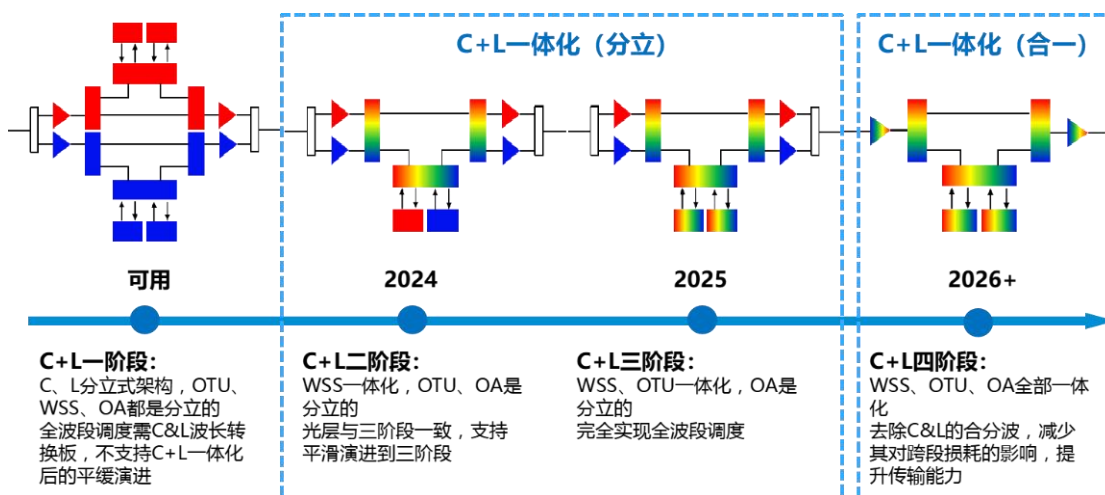


图 2.4 400G C+L 系统演进路线

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。

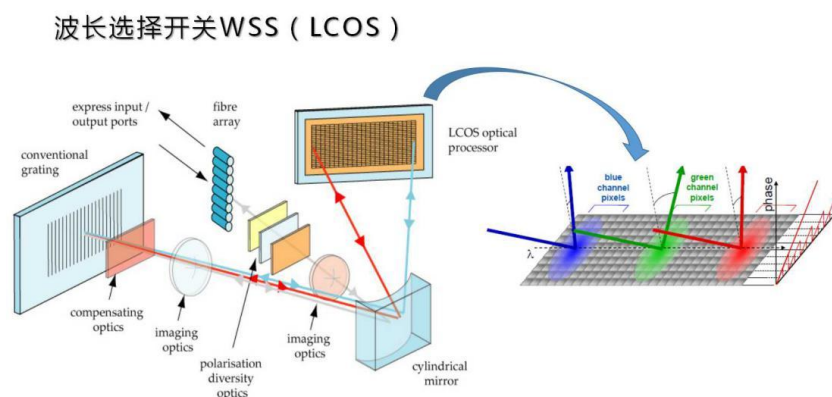


图 2.5 波长选择开关 WSS (LCOS) 结构原理

1. C、L 分立

C++和 L++波段 WSS 及 OA 均采用分立架构，通过 C\L 合分波器件合波。OXC 系统中 C++和 L++波段板卡相互独立。

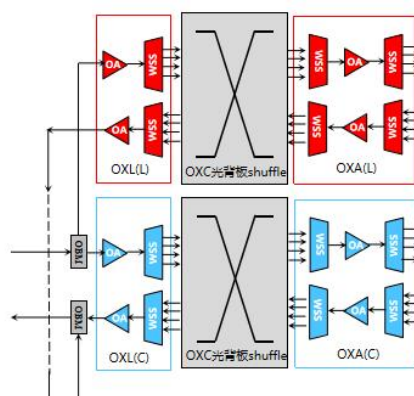


图 2.6 C+L 分立式 OXC 架构

2. WSS 一体化、OA 分立

WSS 实现 C+L 一体化，OA 分立。在 OXC 系统中，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。

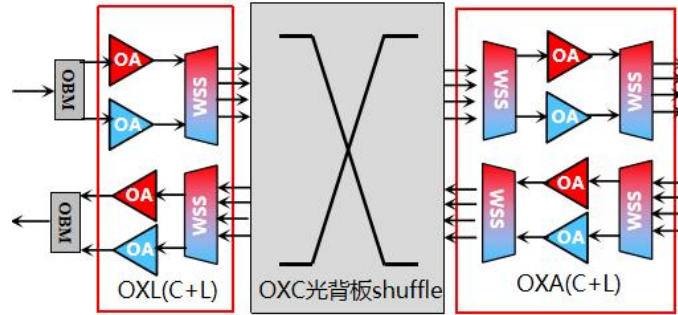


图 2.7 C+L WSS 一体化 OXC 架构

3. 一体化 WSS 及 OA

OA 进一步实现宽谱一体化集成，OXC 实现完全一体化极简架构。

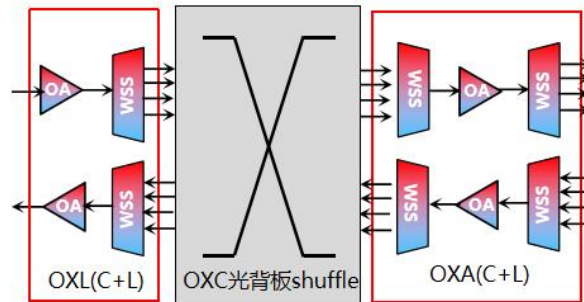


图 2.8 C+L 完全一体化 OXC 架构

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 $M \times N$ 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。

2.3 功率管理实现灵活性能优化

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(Automatic Power Optimization, 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。

从 APO 的调节层次上来说，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。

1. 复用段 APO

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 2.9 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。

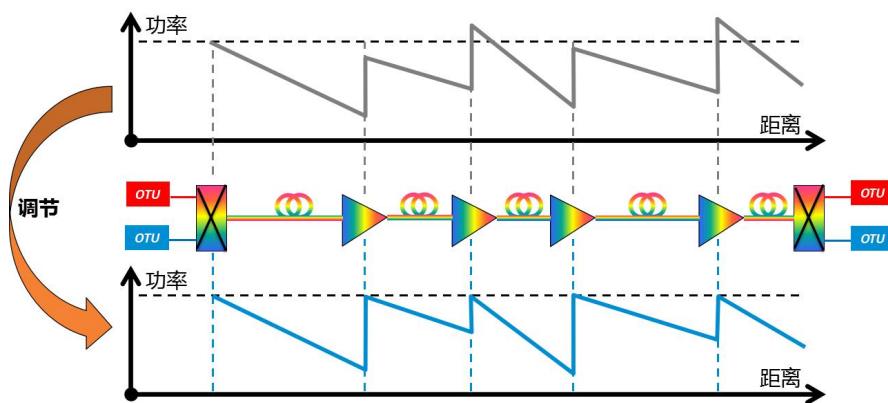


图 2.9 复用段功率管理效果

2. 通道层 APO

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 2.10 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。

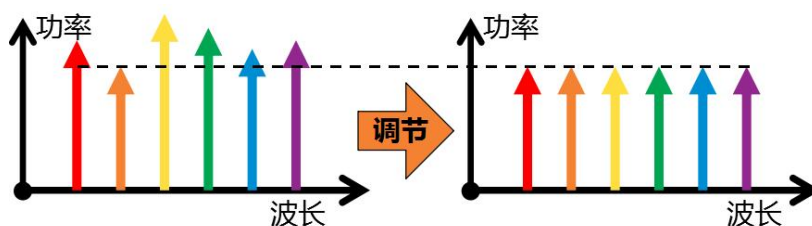


图 2.10 通道层功率管理效果

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。

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OA斜率；

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。

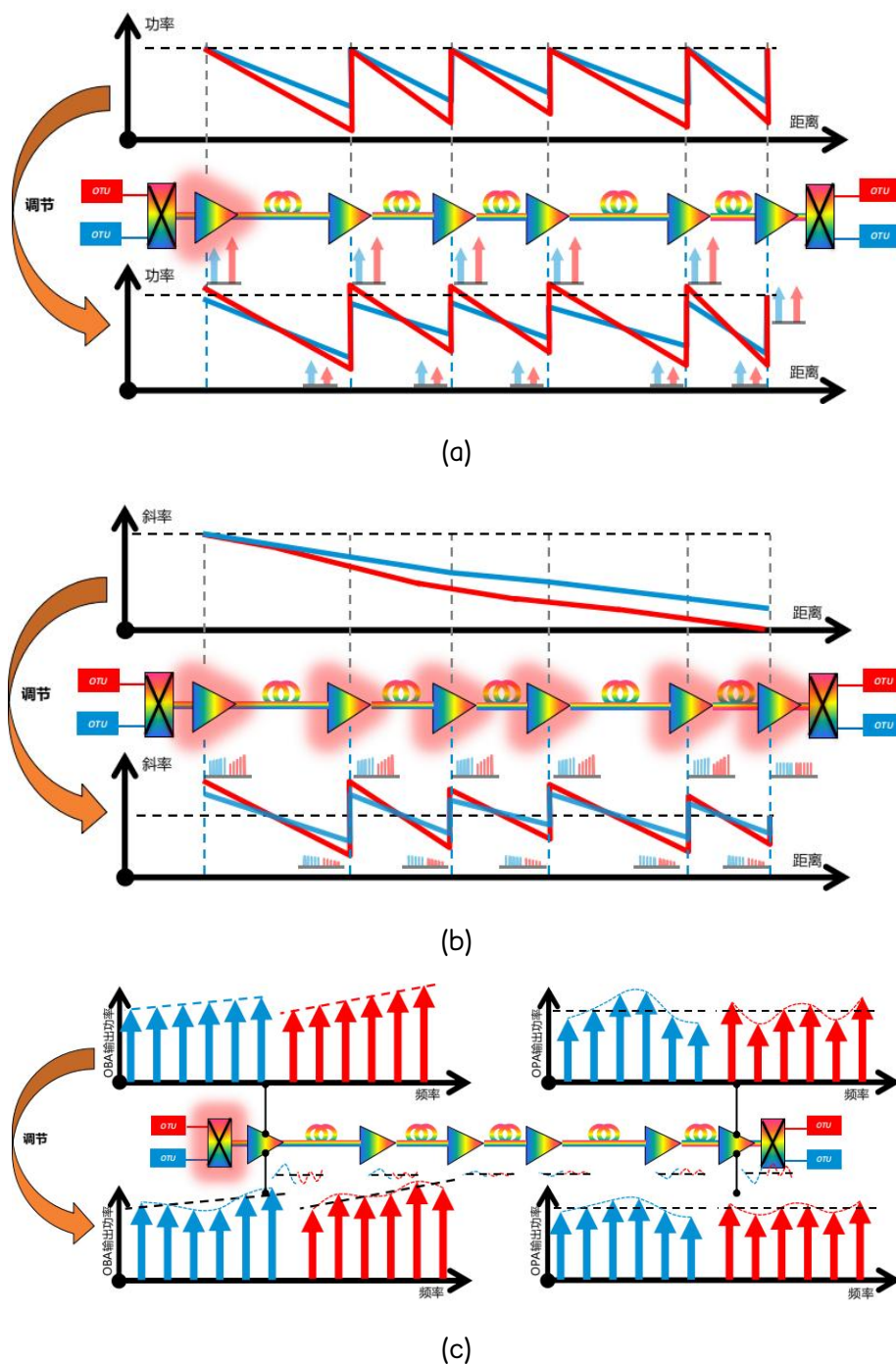


图 2.11 C+L 系统功率均衡效果示意

经过APO算法调节后，OMS段输出功率如图2.12红色曲线所示，经过APO算法对系统功率进行有效管理后，功率平坦度显著提升，C波段功率不平坦度约1.5dB，L波段功率不平坦度约0.5dB。

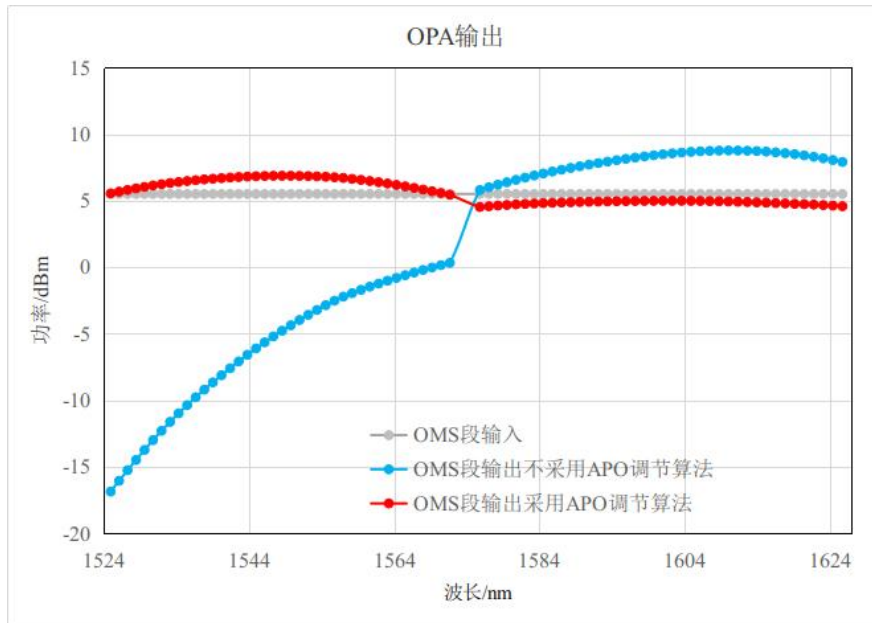


图 2.12 C+L 系统传输一个 OMS 段不经过与经过功率调节后功率分布

3. 技术进展与应用建议

3.1 相关标准与产业链进展

1. 国际标准进展

800G及以上相干光模块、传输系统相关标准主要由国际电信联盟电信标准化部门（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，目前单波800G光模块是业界研发应用和标准化研究热点。

在800G短距应用方面，光互联论坛（OIF）目前正在制定800G LR和ZR的规范，包括光系统参数、FEC、DSP、OTN映射等技术方面，预计将于2024年底完成。OIF的标准进展对ITU-T和IEEE 802.3的800G标准化的技术趋势具有重要影响。

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。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。

IEEE802.3在以太网接口规范方面具有绝对的权威。IEEE802.3正在标准化800G/1.6T以太网接口，包括单通道100G和200G两路不同传输距离的接口。2023年，IEEE802.3dj项目中就800G 10km应用是采用IMDD还是相干技术进行了激烈的讨论。最终，802.3dj决定为800G 10km设定两个项目目标，采用不同的技术解决方案。IEEE 802.3dj正在进行的800GBASE-ER1和800GBASE-LR1标准制定。可以看到，随着单通道速率的提升，相干技术正在不断下沉和拓展其应用场景。

2. 国内标准进展

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城域标准实质上采用的是单波200 Gbit/s双载波方案。

CCSA TC6 WG1先后完成了Nx400G光波分复用（WDM）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。

对于800G相关标准,CCSA也在积极推动,在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: $1 \times 800\text{Gb/s}$ ”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: $8 \times 100\text{Gb/s}$ ”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。

3. 产业进展

目前主要设备厂家都具备130Gbd+的800G PS-16QAM的传输能力,CE及C++波段可商用,L波段具备样品。130Gbd的相干DSP芯片配合C++、L++波段的ITLA、ICRM等光器件,在24年具备800G PS-16QAM商用能力,并且可支持向下兼容400G QPSK等码型。作为光系统核心器件,光放大器和波长选择开关最为关键,目前支持C++与L++波段的EDFA和WSS均已规模商用,带宽支持6THz。支持C+L一体10THz的WSS已经具备商用能力,C+L一体12THz技术也预计将在24年逐步商用。

这些产业现状和标准进展标志着800G光传输时代加速到来,高速相干光模块和新型宽谱光器件将持续推动800G及以上速率传输能力提升和产业进步。

3.2 传输相关试点和验证

中兴通讯 2021 最早推出 1.2T MSA 原型机,2022 年最早完成 1.2T MSA@400G QPSK 实验室测试,以及 2023 年最早完成 400G QPSK 现网测试,2023 年 Q4 首家推出 800G DCFP2 方案。

2024 年中兴通讯将在 800G 技术上持续深耕,800G OTN 可插拔方案主要有以下三个方面的突破:

1. 高性能:相比 800G MSA 方案,单板密度提升 1 倍,Gbit 功耗下降 68%;并可实现与 1.2T MSA 相当的传输距离。

2. 全场景：全系列 OTN 产品可支持 800G+ OTN 方案，覆盖 DCI/城域/区域干线全场景需求。

3. 大容量：业界最大容量 OTN 平台，单槽位 1.6T (2x800G)，单子架 100T+电交叉容量。

主要试点和验证如下：

1. 2020 年，山东联通携手中兴通讯共同测试了 800G OTN 方案。在容量提升方面，采用 C++波段，相比 C 波段光谱资源提升 1.5 倍，同时 800G 方案仅占用 100GHz 波道间隔，相比 100G 占用 50GHz 的传统方案，频谱效率提升 4 倍，通过光谱资源的扩展及频谱效率的提升实现单纤传输容量 48T。
2. 2021 年，中国移动与中兴通讯合作实现基于 G.654.E 光纤的 800G 2,000km 长距离传输纪录。中兴通讯采用单波 800G 板卡，凭借灵活整形技术及低噪声光放大技术，并依托 G.654E 光纤，极大地提高了 800G 系统的极限传输距离。
3. 2022 年，中国电信联合中兴通讯完成“业界首个 130GBd 800G 16QAM 实验室”创新测试，该方案基于 G.652 光纤及普通 EDFA 放大器，实现 1,050km 长距离传输。
4. 2023.9，联合土耳其移动演示了中兴通讯 800G 16QAM 能力；2024 年初在与土耳其移动的验证中，实现 800G OTN 陆地系统最远 2,000km 的传输距离。

未来，中兴通讯将在超高速 OTN 领域继续探索，积极推进海内外运营商 800G 技术的商用突破。

3.3 应用场景建议与分析



波特率	调制格式	单波速率	波道间隔	应用场景
64 Gbd	16QAM	400G	75 GHz	城域及DCI
90 Gbd	PS16QAM		100 GHz	城域
130 Gbd	QPSK		150 GHz	长距
90 Gbd	PS64QAM	800G	100 GHz	短距DCI
130Gbd	PS/16QAM		150 GHz	城域
130Gbd	PS64QAM	1.2T	150 GHz	短距DCI

图 3.1 800 及以上高速光传输调制格式及其应用场景

基于前面的分析和判断，对于 800G 不同调制技术的传输能力和应用场景可总结如下：

1. 800G 短距 DCI 场景：可用 130Gbd 16QAM 或降速至 90Gbd PS-64QAM 使用；
2. 800G 城域场景：小于 600km 传输场景，130Gbd PS-16QAM 是合适方案，配置 C+L 12THz 实现 80 波满配，600~1000km 传输场景，130Gbd PS-16QAM 还需要配合 G.654E 新型光纤和低噪声拉曼放大器等技术；
3. 800G 干线场景：建议铺设新型 G.654E 光纤，并缩小站点间距控制跨段损耗至 20dB 以内，采用 130Gbd 技术升级 800G，后期也可采用 180Gbd 甚至 256Gbd 相干光模块来摆脱对新型光纤和放大器的强烈依赖。
4. 单波 1.2T 场景：目前 130Gbd 技术仅能支持 100km 级单跨传输，满足 DCI 短距互连应用，但 1~2 年内可实现可插拔模块，预计功耗方面仍有挑战。

4. 展望

4.1 市场展望

基于 C+L 系统的单波 800G 技术已经趋于成熟，整体需求在逐渐增大。目前 800G 商用规模较小且仍以 DCI/城域短距传输场景为主；随着行业发展和产业链的逐步成熟，预计在 2025 年会迎来 800G 的爆发期，并逐步向城域/骨干覆盖。

1) 对于追求技术或速率先进性的城域与 DCI 场景, 预测将最早开始部署 800G 产品。

在 IP 网络 400GE 端口成熟商用或接入网络流量进一步增长时, 城域网/DCI 核心大流量场景将出现升级或新建 800G 网络的需求。

2) 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 800G 网络部署建议如下:

1) 对于存量网络, 可部分引入 800G 和现网波道混传, 如现网为灵活栅格的 ROADM 系统, 则无需改造现网光层可直接升级;

2) 对于新建网络, 可全面建设 800G 网络提升系统容量, 单波速率后续可演进到 1.2T 及以上。频谱方面短期可采用 C++ 方案, 后续设备形态可支持平滑演进到 C+L 甚至 C+L+S。

4.2 技术演进展望

为支撑基于 C+L 系统的单波 800G 技术的进一步发展, 从系统集成度与成本改进的角度来看, C+L OA 合一是下一步重点关注的技术之一。OA 一体化之后的 C+L 系统从结构上更加接近现有的 C 波段的系统, 器件成本与系统运维都更加容易, 但目前一体化铟纤的设计、拉制以及最终性能与功耗指标等都面临不小的挑战。

从传输距离提升的角度来看, 需引入 G.654E 光纤, 并配合分布式拉曼放大器。

从单波容量发展看, 基于 192GBd PS-16QAM 甚至 256GBd QPSK 的单波 800G 是下一代高速模块的演进方向。192GBd PS-16QAM 配合 G.652 光纤可用于短距 DCI 场景, 配合 G.654 光纤可用于城域网, 配合高性能 FEC 技术与 G.654 光纤中的拉曼放大甚至可用于干线传输。而 256GBd QPSK 将无可争议地用于长距传输场景, 但其光电器件存在非常大的挑战。

另外，为保障单纤容量不变，谱宽也将进一步向 S 波段扩展。对于 S+C+L 的系统来说，S 波段放大器的性能、光纤的损耗以及 SRS 效应以及多波段的功率均衡都将是不小的挑战。

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
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
OTDR	Optical time domain reflectometer	光时域分析仪