



未来网络技术发展系列白皮书（2025）

光电融合网络技术与产业应用白皮书

第九届未来网络发展大会组委会

2025年8月

版权声明

本白皮书版权属于紫金山实验室及其合作单位所有并受法律保护，任何个人或组织在转载、摘编或以其他方式引用本白皮书中的文字、数据、图片或者观点时，应注明“来源：紫金山实验室等”。否则将可能违反中国有关知识产权的相关法律法规，对此紫金山实验室有权追究侵权者的相关法律责任。

第九届未来网络发展大会白皮书

编写说明

编写单位（排序不分先后）：

江苏未来网络集团有限公司、紫金山实验室、江苏省未来网络创新研究院、中国联通设计院、中国电信股份有限公司研究院、中国移动通信有限公司研究院、新华三技术有限公司、武汉光迅科技股份有限公司、深圳瑞波光电子有限公司、南方科技大学

编写人员（排序不分先后）：

陶高峰、秦子健、李琳、尹睿、秦树鑫、任广臣、陈平平、黄韬、杨伟、刘刚、刘伯江、焦明涛、朱永庆、陈迅、胡泽华、杨冰、程伟强、阳进、姜文颖、王豪杰、田郁池、周鸣、赵红海、阮祖亮、刘建锋、喻杰奎、李恒、武毅博、郭鑫、李浩、胡海、汪漪，凌晨曦

前 言

当前，以 6G、云计算、人工智能、未来网络技术等为代表的新一代信息技术正加速与实体经济深度融合，推动各行业数字化转型向纵深发展。然而，传统分离的光传输与 IP 网络架构已难以满足数字经济时代对超高速率、超低时延、超高可靠性的严苛要求。光电融合网络技术作为新一代信息基础设施的核心支撑，通过 IP 层与光层的深度融合，构建起大带宽、低时延、高可靠的确定性网络能力，为智能制造、远程医疗、自动驾驶等新兴应用场景提供坚实的网络保障。

本白皮书系统阐述光电融合网络的技术特征与发展需求，深入分析长距离相干光传输技术、IP+光融合架构、光电协同的智能管控系统等关键技术，全面梳理国际国内标准进展与产业生态现状。通过剖析数据中心互联、算力网络等典型应用场景，展示了光电融合网络在降低 30%以上 TCO、提升 50%以上能效比等方面的显著优势。同时，本白皮书提出三阶段发展路径与产业协同建议，旨在推动构建开放、融合、智能的新一代光电网络体系。

我们期待通过本白皮书的发布，吸引更多研究机构、企业和产业人员共同参与光电融合网络的技术创新与应用实践，把握光电融合网络技术带来的产业变革机遇，助力我国数字经济高质量发展，为全球信息通信产业升级贡献中国智慧和方案。

目 录

前 言	4
目 录	5
一、 光电融合网络背景	7
1.1 光电融合网络概念和特征	7
1.2 光电融合网络需求和意义	8
1.3 光电融合网络发展目标	10
二、 光电融合网络技术	12
2.1 技术体系架构	12
2.2 ZRx 相干光技术	16
2.3 IP+光融合技术	27
三、 光电融合网络技术发展趋势	35
3.1 相干光技术演进方向	35
3.2 光电融合网络的解耦和融合趋势	44
3.3 光电协同的 SDN 控制与 AI 运维	49
四、 光电融合网络技术相关标准	55
4.1 相关国际标准及进展	55
4.2 相关国内标准及进展	60
五、 光电融合网络相关产品与解决方案	63
5.1 ZRx 相干光模块	63
5.2 光电融合网络设备	67
5.3 光电融合管控系统	73

六、	光电融合网络产业应用场景与案例	77
6.1	应用场景	77
6.2	应用案例	78
七、	光电融合网络行业发展建议	83
7.1	发展面临的挑战	83
7.2	发展阶段划分	84
7.3	发展对策建议	86
八、	光电融合网络未来展望	88
附录 A:	术语与缩略语	89
参考文献		94

一、 光电融合网络背景

1.1 光电融合网络概念和特征

当前网络容量需求以超过 35% 的年复合增长率（CAGR）持续增长，AI、边缘计算等应用推动相干技术向网络边缘延伸。当前网络架构普遍采用“电处理+光传输”的分层方式，这一架构正面临功耗高、转发复杂、跨层协同效率低等核心瓶颈。IP 流量主导的容量激增对新一代节能技术提出更高的要求。行业正推动 IP 业务层与光传输层融合，通过将 DWDM 相干光模块直接部署于路由器等分组设备，消除独立光转发设备，降低功耗与空间占用。

光电融合技术从最开始的 IP over WDM 方案，已有十余年历史，近年因开放解耦架构的普及和光模块技术进步（如微型化光电集成、相干容量提升）重获关注。消除独立光转发设备不仅降低 CAPEX，其扩展传输距离还可绕过汇聚节点，进一步节省成本。

光电融合网络技术是通过光层传输与 IP 层控制的深度协同，构建的统一网络架构体系。其核心是将传统分离的光传输系统（DWDM/OTN）与分组交换设备（路由器/交换机）在物理设备层、协议层和网络管理层实现三重融合，形成下一代确定性、可编程、广覆盖的智能承载网络。光电融合网络技术具备如下三大关键特征：

1. “IP+光”协同引擎

采用高速相干彩光模块（如 400G/800G ZR+、1.6T 模块）作为 IP 层直接口，实现无电中继的长距离传输，构建从路由器到光层的

透明链路。

2.确定性网络增强机制

基于 SRv6+ODU/OSU 灵活复用，实现业务粒度切片（vlan/roce 等）与路径稳定转发保障，支持微秒级时延控制，适应 AI/工业/金融等场景对稳定性、低抖动的极致要求。

3.广域光电融合调度能力

结合统一控制面（如 SDN 控制器）实现电信级路径动态调度，完成全网粒度识别、片段级路径编排与秒级快速发放，支持广域高效算力连接。

1.2 光电融合网络需求和意义

随着 5G、物联网、高清视频等技术的普及，数据流量呈爆发式增长。传统通信网络在传输容量和速度上逐渐难以满足需求，光电融合网络凭借光信号高带宽的优势，能够实现高速大容量数据传输，满足不断增长的数据传输需求。

算力资源的分布往往和需求不匹配，导致资源利用率不高，严重影响了数字经济高质量发展，“东数西算”工程目前还面临“算不了、算不起、算不好”的问题。要解决这些难题，需构建低成本的智算互联网，以此支撑我国人工智能、大模型的发展需求，要将数据在不同地区的算力中心间高效传输和调度。光电融合网络可实现长距离、低延迟、无损的数据传输，为算力资源的跨区域协同提供支撑。

人工智能大模型训练、工业控制、自动驾驶等新兴应用对网络延

迟要求极高。如 AI 大模型训练中，网络抖动与丢包会严重影响性能，光电融合网络能有效降低延迟和抖动，满足这些应用的严格要求。

数据中心等网络设施能耗巨大，传统电交换网络能耗较高。光电融合网络在光传输部分能耗较低，有助于降低网络整体能耗，符合绿色节能的发展趋势。

光电融合网络则打破这一壁垒，提升网络资源灵活调度能力、降低网络架构复杂度，实现面向智算场景的泛在连接能力，其意义主要体现在：

支撑数字经济：为 AI 训练、算网协同、大数据处理等业务提供高效、高可用底座；为智能制造、智慧城市、智慧能源等多个领域提供高性能网络支持，加速各行业数字化进程，提升生产效率和管理效能，促进产业升级。

突破传统网络瓶颈：突破传统网络架构中光电信号分离以及高成本、高能耗、低效率等瓶颈，实现长距离无电中继无损承载、高性能、跨层调度、业务驱动、自适应修复等高级运维能力，为网络技术发展开辟新路径。

降低部署与运营成本：统一架构减少设备种类和中继节点，显著降低 CAPEX 与 OPEX；

促进算力与数据融合：为算力的传输、交易、应用打造优质平台，构建庞大的算力资源池，实现算力资源的高效调度和共享，推动算力与数据要素的流通，支撑人工智能等新兴技术发展。

提升国家网络竞争力：光电融合网络相关技术是未来网络发展的

关键。全球首个光电融合确定性新型算网基础设施的开通，为中国新型网络基础设施领域实现从技术突破到产业引领，迈向全球领先地位奠定了基础。同时有助于促进 DSP、硅光、TFLN、控制器等关键器件与平台的自主研发与规模应用。

助力可持续发展：通过降低能耗，减少对环境的影响，有助于实现碳减排目标，促进人与自然的和谐共存，符合全球可持续发展的大趋势。

1.3 光电融合网络发展目标

光电融合网络的发展目标是通过光层传输与电层计算的深度协同，构建“光电一体、融合协同”的新型信息基础设施，以解决传统网络在带宽、时延、能耗方面的根本性瓶颈。

（1）带宽升级

网络带宽演进是一个不断发展提升的过程，从早期低速拨号上网，到如今的千兆、万兆光纤入户，以及数据中心的超高带宽网络，经历了多个阶段，以太网的速率也经历了从 10Mb/s，逐渐提升到 400Gb/s。未来光电融合网络需要支持 800Gb/s、1.6Tb/s，甚至 100Tb/s，从而支撑数据的速率增长。

（2）确定性低时延

在网络通信中，确定性时延是指数据传输的时延大小可精确预测、波动范围极小（甚至趋近于零）的特性，核心在于“可预期”而非单纯“低”。它对工业控制、自动驾驶等对时间敏感的场景至关重要。

与之对应的是“不确定性时延”：时延大小随机波动，无法预测（可能很低，也可能突然增大），例如普通互联网中，视频卡顿多是因时延抖动过大导致的。确定性低时延的实现需从网络架构、调度机制、资源分配等多维度设计，消除不确定性，提升转发效率，降低时延，这些都是光电融合网络要解决的问题。

（3）能效跃进

在“双碳”战略驱动下，构建绿色、高效的网络基础设施成为行业共识。传统“电+光”分层架构下，多级转发、重复 OEO（光电光）转换导致整体链路能效低下。光电融合网络的发展目标之一，正是通过将高能耗的 IP 处理前移至光层边缘，利用低功耗相干模块（如 400G/800G ZR+）实现 IP 业务直接出彩光进入波分系统，减少两级 OEO 过程，大幅减少中间设备和机房能耗。在架构层面，通过 CPO（共封装光学）、硅光集成、动态光层调度等新技术，推动网络走向“极简转发+按需编排”的绿色形态。最终目标是在保障高性能承载的同时，实现每比特传输能耗最小化，构建面向 AI 时代的低碳智联网络。

（4）切片保障

带宽切片保障是通过将网络带宽资源进行划分，为不同业务或用户提供独立、定制化的带宽服务，确保其性能不受其他业务影响的技术手段。利用网络切片技术将单一物理网络划分为多个虚拟网络，每个切片有独立的网络功能、配置参数等，切片间共享物理资源但业务相互隔离，避免干扰，从而保障每个切片的带宽稳定性和服务质量。目前较成熟的切片技术有光层的分光、波道、子载波、光通道数据单

元、光业务单元、光交叉最小颗粒度等技术，在数据层有信道化子接口、FlexE 等，在光电融合网络架构下，这些功能将协同发挥更加高效作用。

(5) 智能运维

光电融合网络需要改善传统的运维方式，从“人治”到“自愈”，实现自动驾驶，充分利用 AI，实现“人算”到“智算”。此外，光电融合网络需要根据用户的业务 SLA 需求做到动态智能选路，保障客户的业务情况。

二、 光电融合网络技术

2.1 技术体系架构

光电融合技术通过将 IP 路由和光网络功能集成在一个统一的架构中，减少了中间设备的数量和复杂性，减少了网络层级，使得网络管理更加简便，调度更加灵活，优化了资源利用率，提升了业务发放速度。

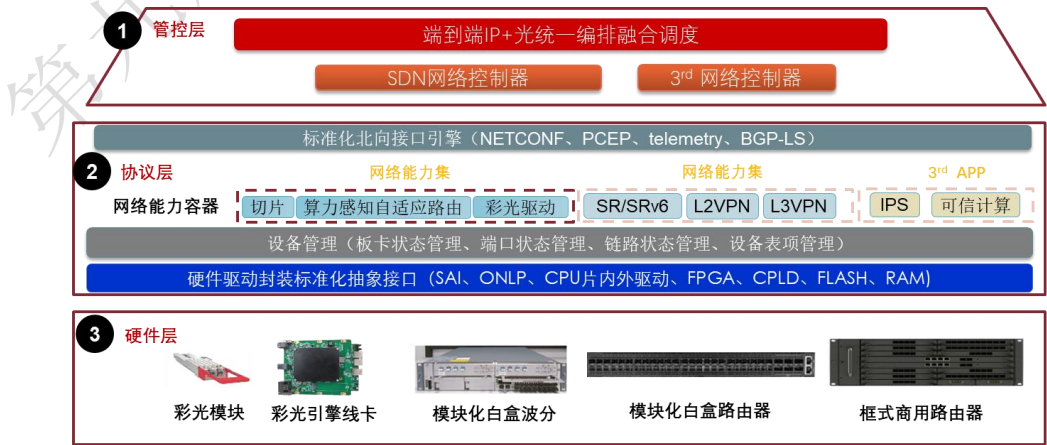


图 1. 光电融合网络系统架构图

光电融合网络采用分层解耦、融合重构的技术架构。其核心结构包括三层：

硬件层：由具体的光电融合硬件组成，包括彩光引擎线卡、彩光相干模块、模块化白盒波分设备、模块化白盒路由器、框式商用路由器等形态。该层直接承载业务转发与光信号调制解调，是支撑 IP 业务直接入光、光层传输、降低中继损耗、实现大带宽低功耗传输的物理基础。其形态灵活、接口丰富，可按需部署于算力集群边缘、骨干传输节点或广域边界侧。

协议层：该层为设备的操作系统与功能编排系统，负责统一管理设备板卡、端口、链路等资源，支撑算力感知、自适应路径、彩光驱动、SR/SRv6、VPN、安全防护等网络服务能力。同时，封装各类硬件驱动抽象接口（如 SAI、ONLP），统一软硬件之间的调用协议与状态同步机制，实现设备的“能力开放”和“功能可编排”，构成网络智能化的核心执行单元。

管控层（协同调度层）：融合了“传输网管 + SDN 网络控制器 + 数通网管”的统一编排调度系统，承担 IP 与光层资源的端到端联合调度。通过意图识别、路径计算、策略发放，构建确定性网络大脑，实现秒级响应的服务开通与跨层资源调度，是支持大模型训练、“东数西算”、超低时延业务的核心支撑平台。

光电融合网络架构通过构建“管控层—系统层—硬件层”三位一体的融合体系，打通 IP 与光的界面，集成算力感知、路径调度、光层管理等能力，实现网络架构的整体重构与能力集成。其架构呈现出

以下五大特点：

1.端到端融合编排

架构打破 IP 与光层的传统分层边界，实现从业务接入到光层调度的统一控制，具备从路径规划到资源发放的端到端编排能力，支持确定性网络构建与秒级调度响应。

2.软硬解耦、接口开放

引入 SAI、ONLP 等抽象接口，实现设备操作系统对多样硬件形态（芯片、线卡、模块）的封装与适配，促进产业生态开放，便于多供应商设备统一管控。

3.融合多能力栈

网络设备不仅具备传统路由转发能力，还融合了算力感知、自适应路径、彩光驱动等智能调度模块，构成了“计算—网络—光传输”融合的综合服务平台。

4.多样化形态适配多场景部署

支持彩光线卡、模块化白盒、框式路由器等多种硬件形态，可灵活部署于核心、汇聚、边缘等多种应用场景，满足智算中心互联、骨干网演进、数据中心互联等需求。

5.支持标准化协议与可编程能力

全面兼容 NETCONF、PCEP、Telemetry、BGP-LS 等南向接口协议，并支持 SR/SRv6、VPN、安全计算等网络能力开放，为构建自动化、可编程网络提供基础支撑。

光电融合技术体系依赖三个方面的发展：光模块与白盒设备的发

展、设备操作系统的发展、统一控制器的发展。

光模块与白盒设备的发展：随着网络带宽需求增长和成本控制需求，为了解决灰光模块在大容量远距离传输时的局限性，彩光技术应运而生。随着技术的日渐成熟，业界的彩光方案有多种模式，例如 DWDM 彩光方案将 OTU 模块集成到彩光光模块中，实现路由器直接出彩光进入合波设备传输，而光电一体方案则在 DWDM 基础上更进一步，路由器不仅集成 OTU 单元功能，还在发送 / 接收端集成分波 / 合波单元功能，两台路由器之间只需通过光纤连接即可。有了彩光模块，就需要数通设备支持彩光模块，与彩光模块灵活适配，在 IP 层和光层共同发展光电融合功能，但是传统的数通设备操作系统并不是灵活适配与更改的。将商用硬件与开源软件结合，打破传统厂商软硬件绑定模式的白盒设备发展至关重要。白盒核心在于通过软硬件解耦实现灵活性与成本优化，同时，白盒设备与 SDN/NFV、网络切片深度结合，实现“网络即服务”。光模块与白盒设备的互相结合，打造了光电融合网络的灵活底座。

设备操作系统的发展：白盒操作系统是白盒数通设备实现软硬件解耦的核心。全球超 70% 的白盒交换机采用 SONiC，亚马逊、阿里云、腾讯云均加入社区并贡献代码，支持 800G/1.6T 接口及 AI 训练所需的 RDMA 协议。白盒操作系统需要面向广域、算力、第三方应用等多场景，既可以满足广域业务的一键开通与承载，也可以响应算力的接入与调度，同时，面临用户界面的多场景应用也能灵活适配。随着多厂家加入白盒操作系统的研发，白盒操作系统在标准与成熟度

上都有了质的提升。

统一控制器：随着光电融合网络的不断发展，对光网络与电网络进行统一管理和控制，从而实现光层与电层的流量调度、路径计算等功能，以此提升网络灵活性与可扩展性的设计方案陆续涌现。

2.2 ZRx 相干光技术

2.2.1 技术概述

光电融合网络技术的发展，得益于相干光通信技术的持续突破。近年来，基于高阶调制（如 QPSK、16QAM、64QAM）、高速 ADC/DAC 芯片、先进 DSP 算法与低功耗封装工艺的进步，使得相干光模块在速率、距离、集成度和能效方面大幅提升。从最初的 100G CFP 模块，到如今广泛商用的 400G ZR/ZR+，再到即将部署的 800G ZR+/1.6T 方案，相干光技术正实现从骨干长距传输向城域接入乃至数据中心直连的广泛渗透。这种高性能光通信能力的普及，使 IP 与光层在物理层面具备深度融合的可行性，为构建统一架构、弹性调度、低时延、绿色高效的新型网络形态提供了坚实基础。

最初的 ZR 相干光通信主要解决数据中心间光互连的问题，为数据中心之间的以太网业务信号在 80 公里到 120 公里这样的场景中提供了支持相干收发以及 DWDM 功能的光互连能力。为了实现数据中心在多供应商互联互通方面的需求，光互联论坛（OIF）经过 2016 年到 2020 年 4 年时间的研究与标准制定，发布了最初的 ZR 应用协议：400ZR 标准。随后，在此基础上 400GBASE-ZR1、ZR+、FlexO-xe

等不同的光接口方案在典型的 ZR 标准接口基础上被陆续提出，并在国际电联（ITU）和电气电子工程师学会（IEEE）等组织进行标准化，将 ZR 类型的相干光接口应用范围进一步扩展，覆盖短距到长距的不同场景，支持以太网业务信号直接使用相干光接口传输。图 2 展示了几个主要标准组织面向不同场景定义的相干光接口标准。

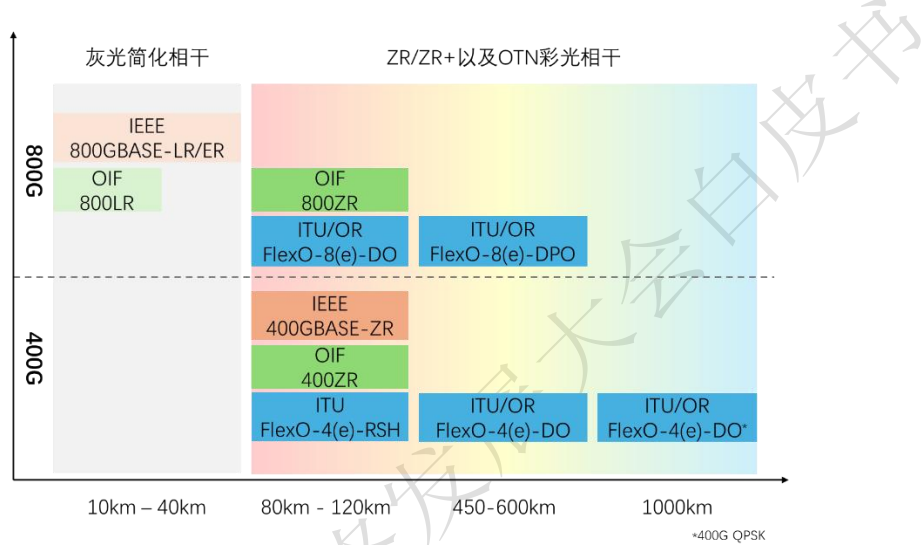


图 2. 不同标准组织所规范的 ZR/ZR+ 以及其他相干光信号接口

相干光技术的发展经历了几个阶段，每个阶段都在性能、效率和集成度方面有显著提高。每个阶段主要特点：

第 1 阶段相干技术：光纤容量、功率效率和每比特成本迅速提高，从 QPSK 调制过渡到 16QAM 调制，从摩尔定律中获益匪浅，数字处理消耗了更多的模块功率，引入业界首创的可插拔模块。

Class 1 Coherent Technology

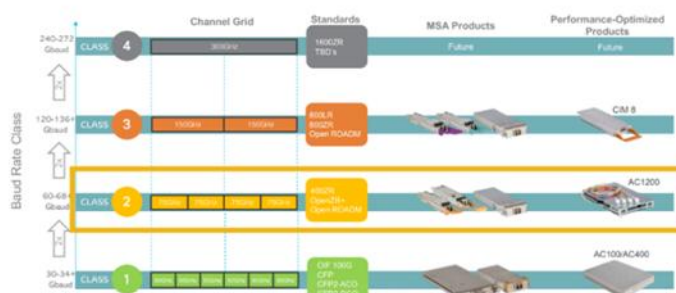
- Rapid improvements in fiber capacity, as well as power and cost per bit
 - QPSK → 16QAM
- Significant benefits from Moore's Law
 - Digital processing a higher portion of module power
- Industry first pluggable modules
- Limited adoption of interoperable interfaces



第 2 阶段相干技术：标准化接口，在客户端外形中引入 ZR/ZR+，实现基于路由器的应用，首次部署概率星座整形解决方案，自适应波特率，使发射频谱与信道紧密匹配，更广泛地部署可插拔模块，使用 75GHz 信道网格，以 60-68+ Gbaud 速率运行。主要标准：400ZR、OpenZR+、Open ROADM。

Class 2 Coherent Technology

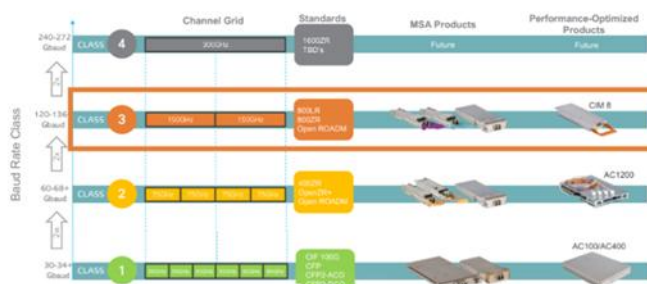
- Standardized interfaces
- ZR/ZR+ in client form factors enable router-based applications
- First deployments of constellation shaped solutions
- Adaptive baud rates
 - Transmit spectrum closely matched to channel
- Pluggable more widely deployed



第 3 阶段相干技术：频谱效率逐步提高（约 20%），MSA（多源协议）插件中可互操作的 PCS（物理编码子层），提高密度和每比特成本，在可插拔外形尺寸中引入性能优化设计，以 120-136+ Gbaud 速率和 150GHz 信道网格运行。主要标准 800LR、800ZR、Open ROADM。

Class 3 Coherent Technology

- Incremental (~20%) improvements in spectral efficiency
- Interoperable PCS in MSA pluggables
- Improvements in density and cost per bit
- Performance optimized designs introduced in pluggable form factors



第 4 阶段相干技术：OIF（光互联网论坛）上启动的 1600ZR 与 1600ZR+工作，1600ZR 优先选择单载波（~240Gbaud），1600ZR+优先选择数字双子载波（~250Gbaud），以实现功率、性能和成本目标，针对路由器部署的小型插拔式光缆，预计运行速率为 240-272 Gbaud，信道网格为 300GHz。拟议标准：1600ZR、1600ZR+。

Class 4 Coherent Technology

- 1600ZR effort recently kicked off in OIF
 - Single carrier (~240Gbaud) is preferred to achieve power and cost objectives
 - Targeting small form factor pluggables for router deployments



2.2.2 关键技术

1. 帧结构与编码

ZR/ZR+信号的帧格式参考了 ITU-T OTN 标准，使用了 FlexO 帧进行信号的封装。具体在不同速率，不同传输距离和应用场景上，ZR/ZR+和传统 OTN 的光接口在业务映射和开销使用上有具体的区别。

（1）400G ZR 技术

OIF 400 ZR 标准的提出首次在业界引入了 ZR 相干光接口与 ZR 光模块的概念以及相应的技术方案。其涉及到业务映射，帧结构封装，光信号编码调制等多个方面。

业务映射方面，400 ZR 以 400G 以太网为唯一的目标业务，沿用了 ITU-T 面向超 100G OTN 使用的灵活 OTN (FlexO) 接口的帧结构，同时大幅简化了业务映射到该帧载荷区域的方式。400ZR 将 400G 以太网信号直接通过 257b 码块，使用通用映射流程 (GMP) 映射将其直接映射到了 FlexO 帧的载荷区域。相比经典的 OTN 业务数据流程，减少了 ODU 与 ODUCn 等多个业务层次，也因此更加适合点对点的传输场景，缺少了复杂网络汇聚与交叉的运行和维护能力。简化的业务映射带来的另一个特点是接口信号的基准比特速率可以得到优化降低。

帧结构封装方面，400ZR 沿用了 OTN 标准的 FlexO 帧结构。FlexO 帧以 100G 帧实例为基础，随着业务速率的提升可以对多个 100G 帧实例进行交织形成信号帧。400ZR 的帧结构由 4 个 100G FlexO 帧实例经过 128 比特交织形成。400ZR 对于 FlexO 标准的开销进行了较多的简化，使用了利于相干信号的帧对齐编码和点对点场景下的告警信号开销。FlexO 加密、电再生等 ITU-T 中为原 FlexO 帧定义的开销，在 ZR 中则不进行支持。

光信号编码调制方面，400ZR 使用 14.8% 开销比例的 CFEC 进行编码。CFEC 是一种将阶梯码 (Staircase) 与汉明码级联形成的 FEC

编码方案。也因此得名级联 FEC (Concatenated FEC, CFEC)。该 FEC 的净编码增益大约 10.8dB, 低于骨干网络中常用的各种 20%以上开销比例的软判决 FEC 编码, 但是明显高于强度调制信号所使用的硬判决 FEC。400ZR 相干信号调制使用典型的 DP-16QAM (Dual-Polarization 16-Quadrature Amplitude Modulation) 编码。

OIF 标准本身并未限制 ZR 模块实现的具体封装形式, 仅要求使用可插拔光模块封装。根据市场的实际需求和发展, QSFP-DD 成为 400ZR 最常见的光模块封装形式。

(2) 400G ZR+技术

典型的 ZR 光模块应用于 80 公里到 120 公里的相对短距的以太网互联场景。对于更长距离的场景, 400G ZR+光模块和光接口也逐步进入了市场。

400G ZR+在业务映射和帧结构与开销方面与 400ZR 保持了一致。为了满足更强的传输性能, 扩展光接口和光模块的传输距离的需求, 400G ZR+会使用开销约 15.3%, 净编码增益 11.6dB 的开放 FEC (Open FEC, OFEC)。调制格式方面, 早期的 400G 信号使用 DP-16QAM 调制, 传输距离可达数百公里。近年来, 伴随着芯片与器件技术发展, 信号带宽与波特率进一步提升, 400G 信号已经可以支持 DP-QPSK (Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying, 双偏振正交相移键控) 调制, 传输距离超过一千公里。

(3) 800ZR 技术

800ZR 技术标准同样由 OIF (光互联论坛) 制定, 目标应用场景

仍为 80 公里 DCI（数据中心互联）。该标准在业务映射与帧结构封装层面沿用了 400ZR 的方案思路：使用 ITU-T 定义的 FlexO 帧结构，将以太网业务直接映射以承载用户数据，适配合适的 FEC 编码，最后进行相干光信号的相位调制。

在业务数据流程方面，以太网业务流经由 257 比特码块的 GMP 映射适配至 FlexO 帧的载荷区域。800ZR 所使用的 800G FlexO 帧由 8 个 100G FlexO 帧实例通过 128 比特交织方式构成。

在编码和调制方面，800ZR 信号采用 OFEC 编码以及 DP-16QAM 调制。

（4）800G ZR+技术

与 400G ZR+和 400ZR 的关系类似，在 800G 相干光信号传输的应用中，为了扩展应用范围，传输距离更远的 800G ZR+接口应运而生。

在 800ZR 的基础上，800G ZR+为了提升传输距离，使用了概率星座整形（PCS）技术，因此，800G ZR+的信号调制格式为 DP-PCS16QAM。800G ZR+使用的 PCS 基于查找表（LUT）实现，额外的开销为 11%。在结合了 PCS 与 OFEC 编码以后，800G ZR+的传输距离可以达到数百公里。

2.调制技术

ZR/ZR+相干光技术的光相位调制与相干接收技术与典型的相干光通信目前并无本质区别。针对 ZR 相对较短距离和大容量的需求，一般使用 DP-16QAM 的调制格式，以及开销比例和编码增益性能适

中的软判决前向纠错码（FEC）。而 ZR+或者更长距离的光接口，则根据需求会进一步使用 DP-QPSK 调制或者星座概率整形（PCS）。下面对几种主流的调制技术进行介绍。

(1)DP-QPSK

DP-QPSK（Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying，双偏振正交相移键控）是光通信领域中一种兼顾传输效率与抗干扰能力的调制技术，通过结合双偏振复用与四进制相位调制，在有限带宽内实现高速、稳定的数据传输，广泛应用于长距离骨干网和城域核心网。

QPSK（正交相移键控）是一种相位调制技术，通过对光载波的相位进行四进制编码来传递信息。在 QPSK 中，信号被映射为 4 个离散的相位状态（通常为 0° 、 90° 、 180° 、 270° ），每个相位状态对应 2 比特二进制数据（因 $2^2=4$ ），单个符号周期内可传输 2 比特信息，理论频谱效率为 2b/s/Hz。DP-QPSK 的“DP”核心在于引入光的偏振维度——利用光信号的两个正交偏振态（如水平偏振 H 和垂直偏振 V）作为独立传输通道。在发送端，输入数据被分为两路，每路分别经过 QPSK 调制生成独立的偏振态信号，第一路数据经 QPSK 调制后加载到水平偏振载波；第二路数据经 QPSK 调制后加载到垂直偏振载波，两路信号通过偏振合波器整合到同一根光纤中传输，实现“单光纤双信道”的并行传输。

这一设计使传输容量在 QPSK 基础上翻倍：单偏振 QPSK 在 100GHz 信道间隔下可传输 100Gbit/s，而 DP-QPSK 则能实现 200Gbit/s 传输，且无需额外占用频谱资源，大幅提升了光纤的带宽

利用率。目前，DP-QPSK 已成为 100G/400G 光传输系统的主流技术，是骨干网承载大容量数据业务（如云计算、高清视频）的重要支撑。

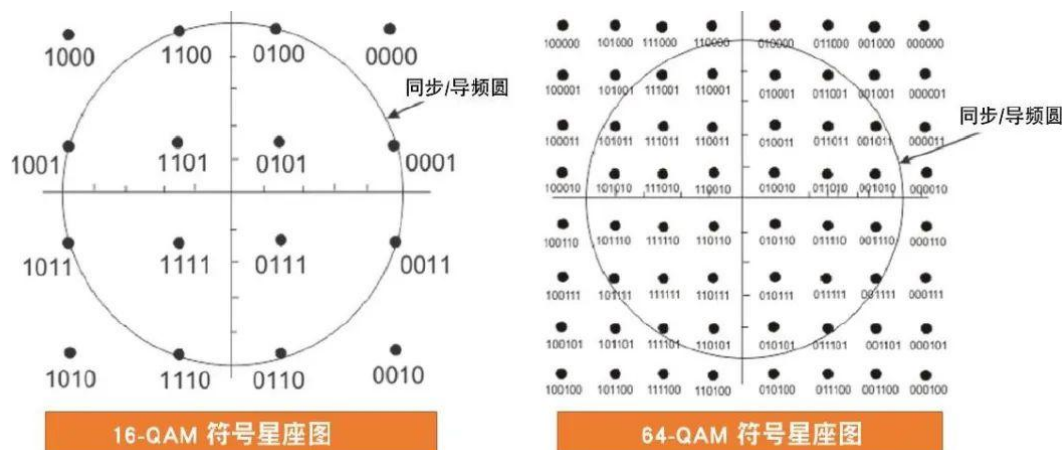
(2)DP-16QAM

DP-16QAM 是一种在光纤通信中实现单波长超高容量传输的调制技术，通过同时利用光的偏振态和相位/振幅维度，显著提升频谱效率。DP-16QAM 可以实现单波速率 400G，无中继传输距离 600KM。

DP-16QAM 相比 DP-QPSK，的核心机制的更新是在相位调制的基础上引入了幅度调制和更多的相位点。一个 16QAM 符号包含不同相位与幅度的 16 个星座点，可以编码 4 比特（因 $2^4=16$ ）二进制数据。在此基础上继续使用偏振复用技术将容量翻倍以后，DP-16QAM 的传输容量相比 DP-QPSK 可以增加一倍。例如 100GHz 通道间隔下，DP-QPSK 信号通常传输 200Gbit/s，DP-16QAM 则可以传输 400Gbit/s，对应了 400ZR 的标准速率。

(3)PCS-64QAM

64QAM 是 64 进制正交幅度调制的简称，作为 QAM 技术的高阶形式，它通过同时调制载波的幅度和相位，在一个符号周期内携带更多比特信息。在 64QAM 中，信号被映射到由 64 个离散“星座点”组成的二维坐标系统（I 路为同相分量，Q 路为正交分量），每个星座点对应 6 比特二进制数据（因 $2^6=64$ ）。PCS-64QAM 通过智能调整星座点出现概率，突破传统均匀调制的物理极限，实现更高频谱效率与更强的抗噪能力。



PCS-64QAM 的概率星座整形“PCS”核心在于不同的星座点编码数据的概率不同。对于内层低幅度的星座点编码概率更高，外层高幅度的星座点编码概率更低，理想的概率分布应符合麦克斯韦-玻尔兹曼分布以使调制符号的信息量逼近香浓极限。通过实际概率分布的进一步调节，PCS 技术可以实现每个符号承载二进制数据量的灵活调节，例如 PCS-64QAM 的每个符号承载数据可以为 2 到 6 比特。PCS-64QAM 相比等概率的 64QAM 通常具备更远的传输距离，以降低容量的代价克服高阶相位调制的传输性能瓶颈。PCS-64QAM 的出现为单波 1.6T 及未来光网络铺平道路。

3.硬件的封装与集成

(1) CFP 系列：100G/200G 时代的过渡方案

2010 年前后，CFP（Centum Form-factor Pluggable）系列模块开始商用，主要用于 100G/200G 长距离传输，如骨干网和城域网。最早的 CFP 模块尺寸较大（82×144×13.6 mm），功耗高达约 24W，采用模拟相干技术和外置 DSP 芯片。CFP 集成 DSP 成为数字相干模块

以后，功耗进一步提升至 30W 以上。CFP 模块典型电接口为 10×10G（CAUI-10），对应 100G 速率。随后推出的 CFP2 将体积缩小 50%，广泛支持数字相干（CFP2-DCO），电接口升级至 4×25G（CAUI-4）或 8×25G（200GAUI-8），功耗降至 15W 左右，同时兼容 100G DP-QPSK 和 200G 16-QAM 调制。后续 400G DP-16QAM 调制格式以及 8×50G（400GAUI-8）电接口也可以通过 CFP2 模块实现。而后续的 CFP4 封装模块虽然进一步减小了尺寸，但由于市场更倾向于高性能的 CFP2 和小体积的 QSFP-DD 标准，最终未能广泛普及。

（2）QSFP-DD/OSFP：400G 及更高速率的新一代标准

2018 年后，数据中心互连（DCI）对高密度、低功耗的需求催生了新一代光模块——QSFP-DD（双密度四通道小型可插拔）和 OSFP（八通道小型可插拔）。其中，QSFP-DD 沿用 QSFP28 的外形（18.35×89.4×8.5 mm），支持 8×50G 电通道（400G），功耗优化至 12~14W，并能向后兼容现有交换机端口。但其散热能力有限，尤其在 64-QAM 等高阶调制下需要额外的冷却措施。此外，400G-ZR 标准虽采用 QSFP-DD 封装，但传输距离通常仅 80 公里左右。OSFP 专为 800G/1.6T 设计，尺寸稍大（22.58×100.4×13 mm），提供更高的功率预算和更好的散热结构，适用于 AI 集群互联等高性能场景，已被谷歌、Meta 等超大规模数据中心采用。

封装技术对比如下：

参数	CFP2	QSFP-DD	OSFP
尺寸（mm）	41.5×107.5×	18.35×89.4×	22.58×100.4×

参数	CFP2	QSFP-DD	OSFP
	12.4	8.5	13
典型功耗(W)	~15W (100G)	12~14W (400G)	≤16W (800G)
电接口	4×25G NRZ	8×50G PAM4	8×112G PAM4
典型速率	100G/200G	400G	800G/1.6T
主要用途	电信骨干网	数据中心互连	超算/AI 集群

2.3 IP+光融合技术

IP+光融合将 IP（互联网协议）层与光传输技术深度融合，实现高效、灵活、大容量的数据传输，并使用标准化的 400G ZR/ZR+ 可插拔光模块直接从路由器端口传输相干波长。使用相干热插拔光模块可以直接从路由器端口提供密集波分复用 (DWDM) 功能，这有助于简化网络传输，节省资本支出，减少对网络中的转发器和光传输设备的需求，有助于简化并加速网络规划、运维和故障排除，同时 IP+光融合技术通过使用相干热插拔光模块不仅能将网络容量扩展到 800G，还能将 400G 网络的传输距离扩展到数千公里。

2.3.1 技术概述

IP+光通过深度融合 IP 层与光层，可减少网络转接层级、显著降低建维成本并提升承载效率；经济灵活的 IP 网络与高效安全的光网络融合将驱动承载技术、设备形态和应用方案的多维度融合创新；当

前集成电路的能力提升、硅光及光电合封等关键技术的日趋成熟、设备 SDN 南向接口的融合统一，为网络融合和大规模部署提供了坚实支撑，成为面向未来高效承载网络的重要演进方向。

IP+光的融合包括管控融合、协议融合、硬件融合三个维度。在管控融合维度，通过 SDN 统一控制器实现 IP 层与光层的联合资源调度和智能运维，打破传统分离式管理模式；在协议融合层面，通过 Netconf 等技术实现协议栈的语义互通，解决 IP 与光协议间的"语义鸿沟"；在硬件融合层面，通过可插拔相干光模块、共封装光学（CPO）等技术创新，实现设备层面的深度集成，降低传输时延和功耗。

2.3.2 关键技术

1. 管控融合

将光网络和电网络进行统一管理与控制，实现对光层和电层的流量调度、路径计算等功能，提升网络的灵活性与可扩展性的设计方案陆续产生。

管控融合的技术路线呈现从协议互通到智能融合的演进脉络，核心技术包括协议协同、分层控制、统一模型与 AI 赋能。未来，随着 800G/1.6T 光模块、量子通信与 AI 技术的成熟，管控融合将进一步向自优化、自治化方向发展，成为支撑算力网络、元宇宙等新兴业务的关键基础设施。企业与运营商需根据自身需求选择技术路线：基础互联阶段适合业务稳定的场景；动态协同阶段适用于广域骨干网；智能融合阶段则需提前布局 AI 与量子技术储备。Juniper Tungsten

Fabric 属于动态协同阶段，重点解决边缘计算场景的分布式控制与安全需求。OpenDaylight 属于协议驱动的跨层协同阶段，强调多协议兼容性与分布式控制。华为等 SDN 控制器属于智能融合阶段，探索量子通信与 SDN 的深度集成。

在当前网络管控融合的实践中，业界主流采用两种方式：

第一种是光电融合路由器的双 SBI 管理方式，其主要特点是将光电融合路由器的管理权限在 IP SDN 控制器和光 SDN 控制器之间进行共享。这种方式要求明确划分两种控制器的权限边界及互通规则，以避免出现数据库不一致等问题。

第二种是光电融合路由器的单 SBI 管理方式，该方式假定 IP SDN 控制器是唯一直接与光电融合路由器对接的接口，并由其全权负责所有管理功能的实现。

此外，在 IPv6 环境的应用场景下，统一控制器还需要提供切片、确定性等功能的分配服务。

2.协议融合

在“IP+光”融合架构中，协议驱动的跨层协同是实现光层与 IP 层动态联动的核心机制。通过标准化的协议体系，IP 层不仅能够实时感知光网络状态，还可直接调动底层光资源，构建灵活、智能、自动化的网络控制平面。

GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) 是在 MPLS 的基础上扩展而来，最初设计目的是将 MPLS 的标签机制从电层延伸至光层，标记包括 TDM 时隙、波长、波长组、光纤端口等资源，

从而实现业务在多种传输介质之间的统一调度与快速故障恢复。

理论上具备跨域、跨层调度能力，是一种典型的光电协同协议。它支持 LMP、RSVP-TE 等多种信令机制，可实现链路资源发现、光层路径计算、保护倒换等功能，曾在早期 IPoDWDM 架构中被多家厂商作为标准方案采用。

然而，随着网络规模扩大与业务多样化，GMPLS 逐渐暴露出一系列现实问题：

- 1.协议复杂，配置维护成本高；
- 2.占用大量控制带宽，效率低；
- 3.控制与转发紧耦合，灵活性弱；
- 4.不适配现代 SDN 解耦架构，扩展性差。

因此，尽管 GMPLS 在技术设计上具有一定前瞻性，但其实际部署效果未达预期，网络可操作性和运维效率难以满足当前需求，在商用化路径上逐渐式微。

其他的典型协议还包括：

BGP-LS + PCEP：IP 控制器通过 BGP-LS 发布链路状态信息，光控制器响应 PCEP 路由计算请求，实现路径规划与资源动态调度。例如，当 IP 层检测到链路拥塞，可触发 PCEP 请求新增波长以实现流量分担。

OpenFlow：Openflow 由原来交换机延伸到光设备，用于部分光设备的精细控制，扩展光转发逻辑能力，具备一定可编程性，但适用范围有限。

NETCONF + YANG：成为现代网络自动化的主流组合。YANG 定义数据模型、NETCONF 实现配置交互，两者结合可支持跨厂商设备的统一配置和状态同步，替代传统 CLI/SNMP，实现从“人工脚本”向“结构化交互”的转型。

如今，业界更多转向以 PCEP + BGP-LS、NETCONF + YANG 等更轻量、模块化、可编程的协议体系，来实现 IP 与光层的有效联动与自动化编排。

3.硬件层融合

在底层网络中，报文转发方式历经多个阶段性技术迭代，体现出从光电分离走向光电融合的演进趋势，尤其在硬件层面上，体现为模块形态、接口模式、能效设计与可运维性的持续优化。以下是从硬件层融合角度出发的五个主要发展阶段：

（1）IP over WDM（1999—2009 年）

该阶段以 10G 彩光模块+DWDM 盒子为主要技术形态，IP 设备通过标准 300PIN 接口插入 DWDM 彩光模块，实现点对点的 WDM 传输，是最早的“IPoDWDM”实践雏形。然而，随着业务流量爆发性增长，该方案逐渐暴露出光层管理能力薄弱、扩展性差等问题，加之 100G OTN 商用后成本优势显现，该方案被逐步淘汰。

（2）IP over OTN（2010—2015 年）

即 OTN 设备用作 DCI；具体网络结构是 IP 骨干网+波分 OTN。特点如下：

1) 丰富的业务开发能力，要求运维人员更专业化，依赖厂商技

术支持，技术封闭。

2) 强大的 OAM 能力，标准不统一，跨网络对接困难更加独立，无用的功能也对 DCI 网络带来了更多的传输运营成本。

3) 不同颗粒的调度能力，使得业务封装帧结构更为复杂，嵌套字节更多。

4) 长距离的线路容错能力，使得 FEC 的算法复杂，消耗的开销更大和处理时间更长

5) OTN 设备 48V-DC 的供电模式，和大部分数据中心所使用的标准 19 英寸 220V-AD（或者 240V-DC）机柜不同，安装复杂且需要机房电力改造；

6) 传统 OTN 设备机框大，不适合标准机柜安装，且容量密度不高，后期扩展麻烦且要机柜腾挪或改造新加。

7) OTN 扩容周期落后于 ICP 的需求；

(3) IP over Disaggregated OTN（2015—生命周期不确定）

即开放解耦的盒式 OTN 设备用作 DCI。开放解耦 OTN 将传统 OTN 设备的光层和电层设备解耦，实现光层平台和光模块的直采，电层平台实现多厂商兼容。设备形态上为 1U-2U 的盒式设备，供电方式更灵活，设备可堆叠，模块化设计，风道符合数据中心的前进风后出风规范。主要针对围绕不需要电交叉的大颗粒传输场景。网络模型由 Yang 模型统一管理，由于仍然有 OTN 技术的保留，管理还是会相对复杂。

(4) IP over Disaggregated DWDM（北美 2021）

全解耦的 DCI/彩光+SDN，以 IPoDWDM 作为主要载体。DCI 传输网络光层可以是配合 ROADM+南北向接口构成的 SDN 技术，对波道进行任意开通、调度和回收，系统里面多家厂商的电层器件混合使用，甚至 IPoDWDM 光接口和 OTN 光接口混合在同一套光系统上使用，甚至 IPoDWDM 光接口和 OTN 光接口混合在同一套光系统上使用，都将成为可能，届时系统扩容、变更等方面的工作效率将大大提升，光电层面也将更方便进行区分，网络逻辑管理更清晰，成本将大大降低。

IPoDWDM 技术结合了 IP 网络的灵活性和 DWDM 的高带宽能力，使得单个光纤能够同时传输多个波长（相干彩光）的光信号，每个波长可以承载不同的数据流。即 IP 设备直插彩光模块形成 DWDM 组网应用，按产品分为交换机插彩光和路由器插彩光两种。

彩光光模块直插 IP 设备，加上系统光盒子构成彩光光系统。

优点：

- 1) 省了一对灰光模块。降低少量成本和两次光电转换的延时。
- 2) 彩光模块直插 IP 设备，节省了波分设备的空间和功耗；降低整体功耗和占地面积。
- 3) 解耦后的光层面，在建设初期单独投资，不受未来多厂商共用一套光层系统的限制，并且结合光层的北向接口，配合 SDN 技术，进行光层面的波道资源进行方向调度；提升业务灵活性。
- 4) 网络设备直接通过数据结构，与 ICP/CSP 自有的网管平台对接，节省管理平台开发投入，同时免去厂商提供的 NMS 软件，提升数据采集效率和网络管理效率。

缺点：

- 1) 需要路由器/交换机自己构建光系统，设计 OA/合分波等；
- 2) 需要很强大的 IP+光协同能力；
- 3) 如需小颗粒业务承载或多业务承载则需要开发切片或比特透明传输策略；

(5) 光电融合确定性（2024 年一）

随着确定性网络技术的发展，融合以太网的低成本与光层的高性能，光电融合正在进入一个以时延可控、抖动可预测、路径可编排为目标的新时代。在该架构下：

- 1) 彩光模块直接插入白盒路由器；
- 2) 光与电的功能协同于一个设备中实现；
- 3) 支持带宽切片、路径按需调度；
- 4) 丢包率低于 10^{-5} 、微秒级抖动控制，传输效率超 90%；

在硬件层面，实现了更进一步的光电统一平台。系统具备开源操作系统、SDN 北向控制接口及确定性编排能力，支持国产化、白盒化，适配于未来工业互联网、低时延 AI 集群等场景，代表光电融合从“功能叠加”走向“性能协同”的质变阶段。

确定性技术是在以太网的基础上为多种业务提供端到端确定性服务与质量保障的一种新的网络技术，它可以实现路径确定性、资源确定性、时间确定性，尤其在时间确定性技术上，可以实现微秒级别的抖动。

光电融合确定性技术融合了光电融合技术与确定性技术的性能

优势，在路由器上插入彩光模块，突破传统网络架构中的光电信号分离，高成本、高能耗、低效率等瓶颈，实现丢包率小于十万分之一、微秒级抖动，传输效率大于 90% 的高质量网络传输能力，同时可以支持带宽分片保障、路径按需调度等功能。光电融合确定性技术由江苏未来网络集团联合紫金山实验室等单位提出，基于白盒设备形态实现操作系统集成，通过统一控制器实现业务统一承载，已在全国多个城市的网络中得到了试验与验证。

三、 光电融合网络技术发展趋势

随着数字经济的蓬勃发展，数据流量呈现指数级增长，对网络带宽、传输效率、智能化管理等方面提出了更高要求。光电融合网络作为支撑未来信息基础设施的核心技术，正朝着高速化、协同化、智能化的方向加速演进。本章将从相干光技术的演进、IP 与光的解耦及融合趋势，以及光电协同的 SDN 控制与 AI 运维三个维度，深入剖析光电融合网络技术的发展脉络与未来走向。

3.1 相干光技术演进方向

3.1.1 速率演进

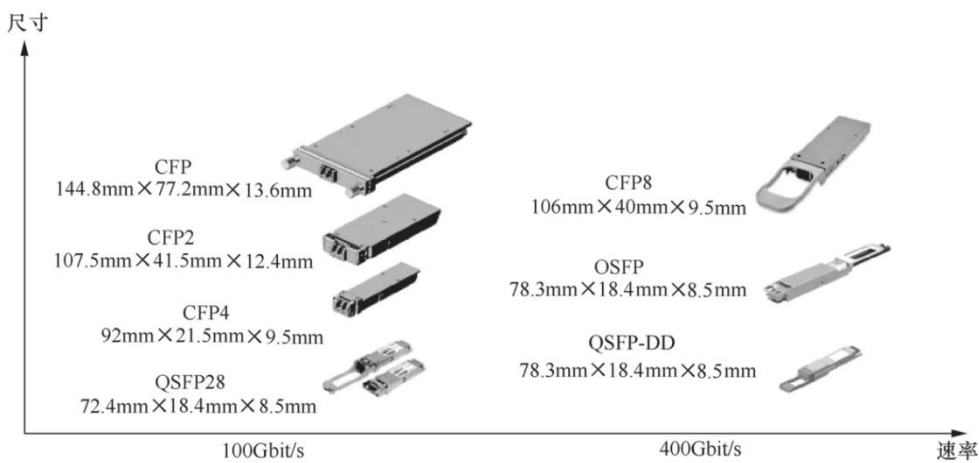
相干光技术作为长距离、大容量光传输的核心支撑技术，其演进直接决定了光电融合网络的传输能力上限。在 21 世纪初期，波分复用（WDM）技术和掺铒光纤放大器（EDFA）的广泛应用推动了光通信速率的显著提升，10Gbps 成为主流速率。然而，传统的强度调制/

直接检测（IM/DD）技术在长距离传输中面临色散和非线性效应的严重制约，亟须新的解决方案。2010 年前后，随着数字相干技术的引入彻底改变了光通信的面貌。通过偏振复用（PDM）和正交相移键控（QPSK）调制，结合先进的数字信号处理（DSP）算法，实现了 100Gbps 的商业化部署，通过 DSP 技术能够有效补偿信道损伤，如色散和偏振模色散，大幅提升了系统的可靠性与传输距离。而目前成熟的商用技术处在 400G 代际，这一代际的技术突破集中体现在调制格式的升级与频谱效率的跃升上。为了在有限的光纤带宽内承载更高速率，400G 系统普遍采用 16 阶正交幅度调制（16QAM），同时激光器的集成化演进成为核心发展方向，例如通过将多个可调谐激光器集成在单一芯片上，实现 C 波段 6 THz 谱宽（C6T）与 L 波段 6THz 谱宽（L6T）的连续波长可调，使得单纤传输容量突破 50Tbps，完美适配骨干网和城域网的大容量传输需求。而随着 AI、数据中心的高速发展，数据中心内的互联速率也快速倍增。随着 AI、数据中心的高速发展，数据中心内的互联速率快速倍增，800G 已实现商用，1.6T 也即将投入使用，二者在技术演进上呈现出紧密的承接性，共同推动光通信向更高速率、更宽场景延伸。800G 作为当前数据中心互联的主力，其技术突破聚焦于能耗比与密度提升，采用双偏振正交幅度调制（PDM-64QAM）。未来 1 到 3 年内，相干光信号的波特率将从当前的 120GBaud 左右提高到 200GBaud 甚至 240Gbaud 左右，以支持下一代 1.6Tbit/s 和更高速率的光信号传输。在 1 到 2 年的时间内，200GBaud 技术的相干光会在部分场景应用，满足早期 800G 长

距和 1.6T 信号的传输需求。

3.1.2 封装技术演进

相干光模块的封装技术演进是推动其广泛应用与性能提升的关键因素，这一演进过程紧密围绕小型化、低功耗以及适应不同应用场景需求展开。



如今，光模块正朝着更高密度、更低功耗的方向发展，以满足云计算、AI 和大规模数据中心的爆发式需求，同时也面临着散热管理和信号完整性的新挑战。QSFP-DD 相较于 OSFP 有着更紧凑的封装尺寸，但同尺寸下设备可承载更高密度的端口，QSFP-DD 还有利于向下兼容，满足客户平滑升级的需求。但与此同时高密度带来的散热压力和内部芯片封装难度还需全产业链共同努力。

随着数据传输速率的不断提高，特别是 400G 及以上高速光通信的需求激增，CPO（Co-Packaged Optics）封装技术逐渐被重视。它通过将光学器件与电子芯片集成在同一封装体内，显著缩短了信号传输的路径，降低了信号损失并提高了带宽，能够满足超高速、高容量网

络的需求。此外，CPO 封装还能有效减少功耗，提升系统稳定性，适应数据中心和下一代通信网络对高性能和高密度设备的要求。然而，这种技术也面临着散热管理、制造成本高以及与现有系统兼容等挑战。

3.1.3 调制器材料技术演进

在相干光模块的技术体系中，光调制器作为核心器件，其材料特性与性能表现直接决定了系统的传输能力与成本结构。当前主流的调制器材料体系在带宽潜力、线性度、功耗及集成化水平上呈现显著分化：磷化铟（InP）凭借优异的高频响应成为长距传输的传统选择，硅基光子依托 CMOS 兼容工艺在低成本集成场景占据优势，而薄膜铌酸锂（TFLN）则通过材料革新实现了高性能与集成化的平衡。这些差异直接映射到相干系统的传输距离（如长距干线与数据中心互联的场景分化）、频谱效率（高阶调制下的线性度需求）及商业化成本（大规模集成带来的单位带宽成本下降），构成了技术路线选择的核心考量维度。

在相干光技术的演进脉络中，提升信号波特率与单波传输速率是贯穿始终的核心目标，而调制器的带宽极限正是这一进程的关键约束。当前商用系统的波特率已稳定在 120GBaud 级别，支撑起 800Gbit/s 相干信号的传输；行业预测，未来 1-3 年内，波特率将向 200GBaud 乃至 240GBaud 突破，为 1.6Tbit/s 及更高速率信号提供底层支撑。从应用节奏看，200GBaud 技术将在 1-2 年内率先在特定场景落地，满足长距 800G 升级与 1.6T 预研的需求，但受限于标准化进程 —

— 各标准组织（如 OIF、IEEE）普遍选择跳过 200GBaud 等级，直接推进 240GBaud 的接口规范制定 —— 其供应链成熟度与跨厂商互通性将受到制约，更多作为过渡性技术存在。

目前三条主流技术路线的性能边界已逐渐清晰：

磷化铟（InP）：凭借直接带隙材料的高频特性，其调制带宽可支持至 260GBaud，但受限于材料本身的光学特性，仅能在 C/L 波段工作，难以满足未来多波段复用的需求；

硅基光子：依托微环谐振或马赫 - 曾德尔结构实现调制，但其载流子迁移率限制导致带宽难以突破 200GBaud，且在高阶调制下的线性度不足，更适用于中短距场景；

薄膜铌酸锂（TFLN）：通过离子切片技术将铌酸锂薄膜与硅基衬底异质集成，既保留了传统铌酸锂的高线性度（支持 DP-64QAM 等高阶调制），又将带宽潜力提升至 300GBaud 以上，且覆盖 E~L 多波段，成为支撑长距 800G/1.6T 演进的核心技术选项（如图 3 所示的波段可用性与波特率对比）。

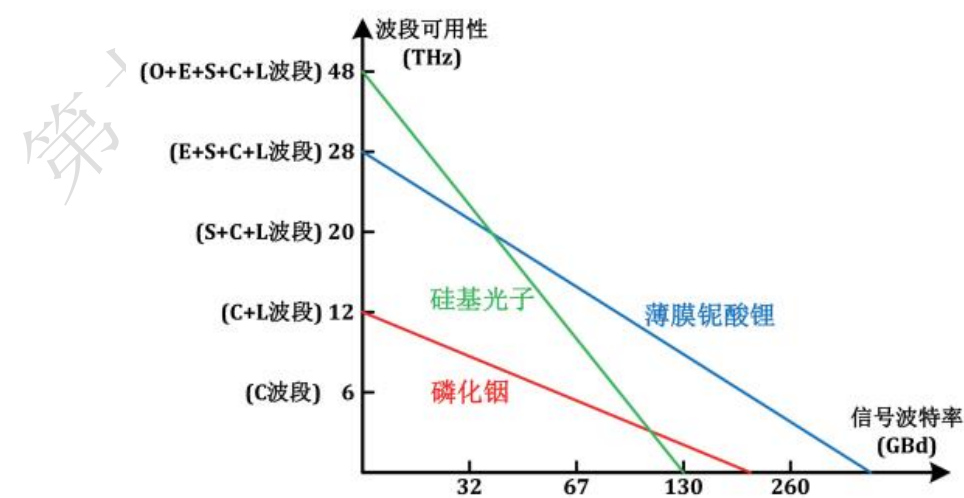


图 3. 三种材料的光波段频谱可用性与信号波特率对比

3.1.4 调制技术演进

在现代光通信系统中，调制技术决定了信号的传输效率和质量。随着数据传输速率从 100G 向 400G、800G 乃至 1.6T 演进，各种先进调制格式不断涌现，在频谱效率、抗噪性能和适应性之间寻求最优平衡。

QPSK 作为数字相干时代的基石，通过利用四个相位状态（ 0° 、 90° 、 180° 、 270° ）在每个符号周期携带 2 比特信息，实现了频谱效率与抗噪声能力的良好折中，因此成为 100G/200G 以及当下长距离 400G 系统的首选调制方式。其核心原理是通过对光载波的相位进行精确控制，配合偏振复用技术使单波长容量翻倍。

当需要进一步提升速率时，高阶 QAM 开始发挥关键作用。例如，16-QAM 通过在幅度和相位上组合出 16 个状态（每符号 4 比特），可将频谱效率提高至 QPSK 的两倍，但代价是对光信噪比的要求显著增加。更激进的 64-QAM 则被用于 800G/1.2T 系统，但其对链路线性的苛刻限制使其目前仅适用于短距离场景。

为了克服高阶调制的固有缺陷，概率整形（Probabilistic Shaping, PCS）技术应运而生。它通过动态调整不同符号的出现概率，使信号分布更贴合信道特性，从而在相同 OSNR 下提升传输距离或容量。这种“智能压缩”策略尤其适用于跨洋光缆等复杂环境。另一项重要进展是 OFDM（正交频分复用）及其衍生技术（如 FlexGrid）。与传统固定栅格系统不同，OFDM 将信号分割为多个正交子载波，允许灵活分配频谱资源以适应异构业务需求。例如，在城域网中，运营商可

通过动态关闭闲置子载波降低功耗；而在骨干网中，则可集中带宽优先保障高优先级流量。

伴随着信号速率和带宽的不断扩展，信号调制从单载波向多载波的演进成为 1.6Tbit/s 及以上速率信号着重考虑的方向。目前比较热门的多载波实现方案是通过数字信号处理的方式实现数字子载波（DSC）调制。DSC 技术可以沿用单载波的器件架构，虽然对于器件带宽的要求没有变化，但是可以使用一套收发器件实现多个子载波的调制与解调。数字子载波调制的信号在高速与高带宽场景下，相比单载波在减少均衡增强相位噪声（EPPN）方面有明显优势，可以避免随着波特率提高持续提升对激光器线宽性能的要求。

在信号调制中，PCS 技术也将持续应用于未来的相干光通信中。不同的技术方案包括 800G ZR+使用的简单查找表，预计将在 1600ZR+中使用的判决树结合查找表，以及私有算法中可能使用的更加复杂、性能更加强大的分布匹配器实现 PCS。PCS 技术在业界已经应用多年，但是直到 800G ZR+开始才逐步定义标准化的 PCS 方案。考虑到互通性的要求，目前纳入标准的 PCS 方案是实现比较简单，性能较低的方案。高性能高灵活度的 PCS 技术仍属于部分芯片厂商的关键技术，作为互通标准公开的可能性较低。

3.1.5 纠错编码技术演进

在纠错编码方面，早期的光通信系统主要采用 Reed-Solomon (RS) 码，RS 码在 10G/40G 时代发挥了重要作用。RS 码通过在数据块中

添加校验字节（通常约 7% 的开销）来实现错误纠正，但其纠错能力相对有限，只能达到 10^{-12} 量级的纠后误码率（400ZR 标准中要求 10^{-15} 量级的纠后误码）。随着 100G DP-QPSK 的出现，硬判决 FEC（HD-FEC）以及阶梯码 staircase 成为新的标准（如 ITU-TG.709、G.709.2）。HD-FEC 通过对接收到的二进制信号进行“非黑即白”的判断来纠正错误，虽然提高了纠错能力，但在面对高阶调制带来的复杂噪声环境时仍显不足。

真正的转折点出现在软判决 FEC（SD-FEC）技术的应用上。这类算法包括低密度奇偶校验码（LDPC）和 Turbo 码等，它们最大的特点是利用了接收信号的“置信度”信息（即不仅判断 0 或 1，还考虑其可信程度）。通过这种方式，SD-FEC 可以实现超过 11dB 的净编码增益，这相当于将传输距离延长数倍。特别是迭代解码技术的运用，让解码器能够通过多次反馈循环逐步逼近香农理论极限。例如，在 400G 系统中，SD-FEC 使得 16QAM 等高阶调制得以实用化，尽管这会带来 15%~20% 的开销，但相比其带来的性能提升而言是值得的代价。

随着光通信速率向 800G/1.6T 迈进，开放前向纠错（OFEC）技术逐渐成为研究热点。它的重点在于灵活性和开放性，允许多种不同的纠错算法和结构来适应不同的应用场景。SD-FEC 一般采用软判决技术以提升纠错性能，而 OFEC 的重点则在于提供开放标准，使得不同供应商和设备可以更容易地互操作，并且通过开放的标准和协议优化系统性能。

如今 FEC 技术正朝着更加智能化和专业化的方向发展。AI 驱动的自适应 FEC 系统可以实时监测链路质量，动态调整编码策略和开销比例，在保证可靠性的同时最大化有效吞吐量。更具颠覆性的是量子 FEC 的研究，这类算法专门针对量子通信中的特殊噪声特征设计，可能采用全新的拓扑量子码等方案。不过，这些新技术也带来了新的挑战：SD-FEC 的解码复杂度呈指数级增长，需要专用 ASIC 来处理；而自适应 FEC 的系统设计和测试方法也需要重新定义。

在纠错编码技术不断演进的同时，反向信道技术作为一种辅助增强手段也日益受到关注。在 ZR+ 等相干接口的方案中，信号映射的 DSP 帧结构会插入预留的符号。目前业界正在讨论利用这些预留符号建立一个信道，将相干光模块接收端的一些关键损伤数据，例如 IQ skew，反向传输至发射端，以供发射端进行预补偿等功能。利用 DSP 帧传输的信息不受 FEC 保护，因此需要进行多次发送并检验一致性。这个技术暂时被称为反向信道，如果未来进一步扩展预留符号建立信道的功能，很有可能为该信道取一个更加准确严谨的名称。反向信道技术与 FEC 技术形成互补，通过将接收端的实时损伤信息反馈给发射端，使发射端能够提前进行针对性的预补偿，从而减少信号在传输过程中产生的错误，降低了对 FEC 纠错能力的依赖，二者协同作用进一步提升了相干光通信系统的传输性能和可靠性。如何在性能、复杂度和成本之间找到平衡点，将是下一代 FEC 技术发展的关键课题。

3.2 光电融合网络的解耦和融合趋势

光电融合网络的核心目标在于打破传统 IP 层与光层之间的“竖井”壁垒，实现资源的高效协同与灵活调度。在这一进程中，“解耦”与“融合”看似矛盾，实则相辅相成：解耦是实现深度融合的基础和前提。解耦的核心在于打破传统封闭、一体化的设备形态和管控体系，为不同层面的技术创新、灵活组网和统一管控创造条件。融合则是在解耦的基础上，通过统一的控制平面（如 SDN）、开放的接口和智能的协同机制，实现 IP 与光资源的全局最优调度和业务端到端敏捷发放。

3.2.1 解耦趋势

1.波分复用层解耦：传统模式下，WDM 系统通常是“黑盒”式的一体化设备，包含光线路终端、光放大器、色散补偿、ROADM（可重构光分插复用器）、光监控信道等所有功能，由单一厂商提供封闭的软硬件解决方案。波长资源分配、路由和性能监控高度依赖厂商私有系统，这在一定程度上限制了网络的发展。开放光网络技术和模块化技术的发展正深刻改变着这一局面。开放解耦在网络系统和设备硬件方面，呈现出白盒化与模块化的特点，基于模块化能力推动封闭的线路系统开放化，将 WDM 平台分解为标准的、可互操作的“白盒”硬件模块。开放式 ROADM 支持多厂商波长选择开关、光放大器、合分波器等光器件通过标准接口（如 OpenROADM MSA 定义的接口）互联，允许运营商混合搭配不同厂商的最佳光组件。可插拔相干

光模块是一项推动波分复用系统解耦的革命性技术，它将传统固定在 WDM 板卡上的相干 DSP 和光收发器封装为标准化的可插拔模块（如 400G ZR, ZR+, OpenZR+），这些模块可以插入路由器、交换机或开放式的 WDM 终端设备中，模糊了 IP 设备与光设备在电层处理上的界限。此外，开放光放大器、监控单元提供标准化的管理和控制接口，便于集成到第三方网管或控制器。

在控制与管理解耦方面，通过 SDN 控制器和开放 API（如 OpenConfig, T-API, OpenROADM Yang Models）实现对开放式线路系统的统一管控。控制器负责波长的路径计算、资源分配、性能监控和故障管理，不再依赖单一厂商的网管系统。

这种解耦模式带来了诸多价值，不仅打破了厂商锁定，降低了采购成本，增加了运营商的议价能力；还能实现最佳组件组合，让运营商在不同功能模块上选择性能最优或成本最优的供应商；同时加速了技术创新，模块化开放架构便于新功能、新技术（如新波段、新调制格式）快速引入；简化了运维工作，通过统一 SDN 控制器管理多厂商环境，也为跨地域、跨厂商的光波长资源池化和灵活调度奠定了基础。

2.客户侧接入层（OTN 设备）解耦：传统的 OTN 设备通常是软硬件紧耦合的封闭系统，提供从客户业务接入（如 Ethernet, SDH, FC）、业务汇聚、ODUk/OTN 电层交叉、到线路侧 WDM 接口的全套功能，设备形态和功能由单一厂商定义。

如今，解耦趋势在客户侧接入层（OTN 设备）愈发明显。在硬

件形态解耦上，出现了基于通用硬件（如 x86/ARM CPU、NPU、可编程交换芯片）的“白盒”平台，运行独立的网络操作系统软件（NOS），且支持安装不同厂商的 NOS。同时，分解式设备架构将传统 OTN 设备的接入、汇聚功能与核心电交叉功能分离，边缘接入设备部署在靠近用户侧（如基站、企业接入点、数据中心入口），专注于低速率、多类型业务的接入、适配和简单的本地交换、汇聚，形态更小巧、低功耗；核心电交叉设备部署在核心、汇聚节点，专注于大容量的 ODUk/OTUCn 电层交叉连接，实现核心交叉资源的集中化和池化；也有部分方案弱化或取消了传统的 OTN 电交叉硬件。

软件解耦方面，OTN NOS 与硬件解耦，使得 OTN 控制和管理软件可在不同厂商的“白盒”硬件上运行。并且通过 SDN 控制器和开放 API 实现 OTN 业务的端到端配置、带宽调整、保护倒换等，替代或补充传统的网元管理系统，同时采用标准化的数据模型进行配置和状态管理。

客户侧接入层解耦的价值显著，实现了灵活部署，边缘接入设备轻量化、低功耗，适合广泛分布式部署，核心交叉设备集中化，提高了资源利用率；降低了成本，边缘设备成本显著降低，“白盒”模式也降低了硬件成本；提升了业务敏捷性，SDN 控制实现 OTN 专线（如 OSU 灵活管道）业务的快速开通和调整；还促进了开放生态的形成，推动多厂商 OTN NOS 和硬件供应商的竞争与合作。

3.线路侧传输层 (Line - Side Transmission) 解耦：传统模式下，线路侧传输（主要指长距离、大容量的光纤传输）通常与 WDM 系

统紧密绑定，传输性能（如 OSNR、非线性容限、传输距离）高度依赖于 WDM 设备厂商专有的光器件、FEC 算法和系统设计，不同厂商设备之间的线路侧互操作性差。

目前，线路侧传输层解耦趋势主要体现在开放光接口标准和光层参数开放与协同上。在开放光接口标准方面，400G/800G ZR, ZR+, OpenZR+ 等可插拔相干模块标准定义了模块的尺寸、功耗、光接口参数（如发射功率、接收灵敏度）、调制格式、FEC 等，使得符合标准的模块可以插入不同厂商的路由器、交换机或开放式 WDM 终端设备中，并在标准的光纤链路（可能包含第三方的 EDFA、DCM 等）上进行互操作，这是线路侧解耦最核心的体现。同时，推动使用标准化的 FEC 算法（如 OpenZR+ 采用的 OFEC），实现不同厂商设备互联，并降低互通的性能损失。

在光层参数开放与协同方面，通过 SDN 控制器和开放 API，获取并协调不同厂商设备的光层性能参数（如 OSNR、光功率、Q 因子），实现端到端光路径的优化和保障，同时推动光性能监测信息的标准化和开放，便于跨域、跨厂商的性能分析和故障定位。

线路侧传输层解耦的价值重大，实现了真正的多厂商互操作，路由器可直接通过标准光模块连接到开放光线路系统，实现 “IP over Open Line”，极大简化网络架构；降低了长距传输成本，利用标准化的低成本、低功耗可插拔模块替代传统昂贵的专用长距板卡和专用 WDM 终端；提升了组网灵活性，在网络边缘或城域范围内，无需部署专用 WDM 设备即可实现中短距离的波长级互联（DCI 是典型应

用)；也推动了技术创新，模块厂商专注于提升模块性能和降低成本，光系统厂商专注于优化线路设计和光层管理。

3.2.2 融合趋势

在网络发展历程中，IP 层负责数据的寻址与转发，光层则承担大容量、长距离的传输任务。早期，IP 设备与光设备相互独立，各自为政，网络部署与运维极为复杂。随着数据流量的迅猛增长，传统模式弊端尽显，IP 与光的融合需求愈发迫切。与此同时，技术的进步也为二者的深度融合创造了条件。从融合的意义来看，一方面，减少网络转接层级效果显著。以往，IP 数据在光网络中传输，需多次经过光电转换与协议适配，这不仅耗费时间，还降低了传输效率。实现融合后，转接次数大幅减少，数据传输更为顺畅。例如，在大型数据中心互联场景中，传统方式可能涉及 3 - 5 次转接，融合后可减少至 1 - 2 次。另一方面，建维成本大幅降低。融合使得设备数量减少，空间占用和能源消耗随之降低。据相关统计，采用融合架构后，网络建设成本可降低 20% - 30%，运维成本降低 15% - 25%。再者，承载效率得以提升，网络资源能够得到更合理地调配与利用，有效避免了资源闲置或过度紧张的情况。

集成电路能力的提升是关键支撑。如今，芯片制程不断缩小，从早期的微米级发展到如今的纳米级，这使得芯片的处理能力和集成度大幅提高，能够更好地满足 IP 与光融合设备对高性能计算的需求。硅光及光电合封技术也已走向成熟。硅光技术将光器件与硅基芯片集

成，降低了成本，提高了集成度。光电合封技术则将光模块与电芯片封装在一起，缩短了信号传输距离，减少了信号损耗。

从管控层面架构上看，过去，IP 设备由一套管控系统管理，光层设备又由另一套系统管理，两者之间缺乏有效的沟通与协调。当网络出现故障时，定位和解决问题往往耗时费力。如今，通过统一管控平台，能够实时掌握 IP 层与光层设备的运行状态。例如，当光层链路出现异常时，管控平台可立即通知 IP 层设备调整路由，实现业务的快速恢复，确保业务连续性。在网络层面融合上，业务接口参数标准化，使得不同设备之间的对接更加顺畅。以往，不同厂家的 IP 设备与光设备接口参数各异，对接时需要大量的适配工作。如今，统一的接口参数标准出台，大大提高了设备的兼容性。标准化互通光模块及光调度器件的采用，使得网络中的光信号传输更加稳定、高效，提升了网络的整体性能。

3.3 光电协同的 SDN 控制与 AI 运维

在传统传输网络中，IP 层与传输设备的运维分离及资源、控制平面不协同的问题突出，为此，光电协同的 SDN 控制器通过“完全集中管控”和“集中式管控 + 分层代理”两种架构实现跨层资源统筹调度，且这两种方式已在海内外得到广泛试点与应用；同时，面对 5G、云计算带来的网络业务激增及光电融合运维的复杂性，AI 技术推动光电协同运维向智能自治升级，形成了包括智能知识引擎、业务智能下发、智能运维及数据侦察在内的四大发展方向。

3.3.1 光电协同的 SDN 控制

在传统的传输网络架构中,IP 层运维和传输设备运维通常由两个团队使用两套运维系统独立运维。并且在大型复杂 MESH 组网中,由于 IP 层路由资源和传输路由资源互不拉通,并且传统 IP 与光网络的控制平面相互独立,两者难以实现协同决策。通过光电协同的 SDN 控制器更智能的协同机制实现整体效能最大化,解决跨层资源的统筹调度问题。

光电协同的 SDN 控制器架构如图 4 所示:

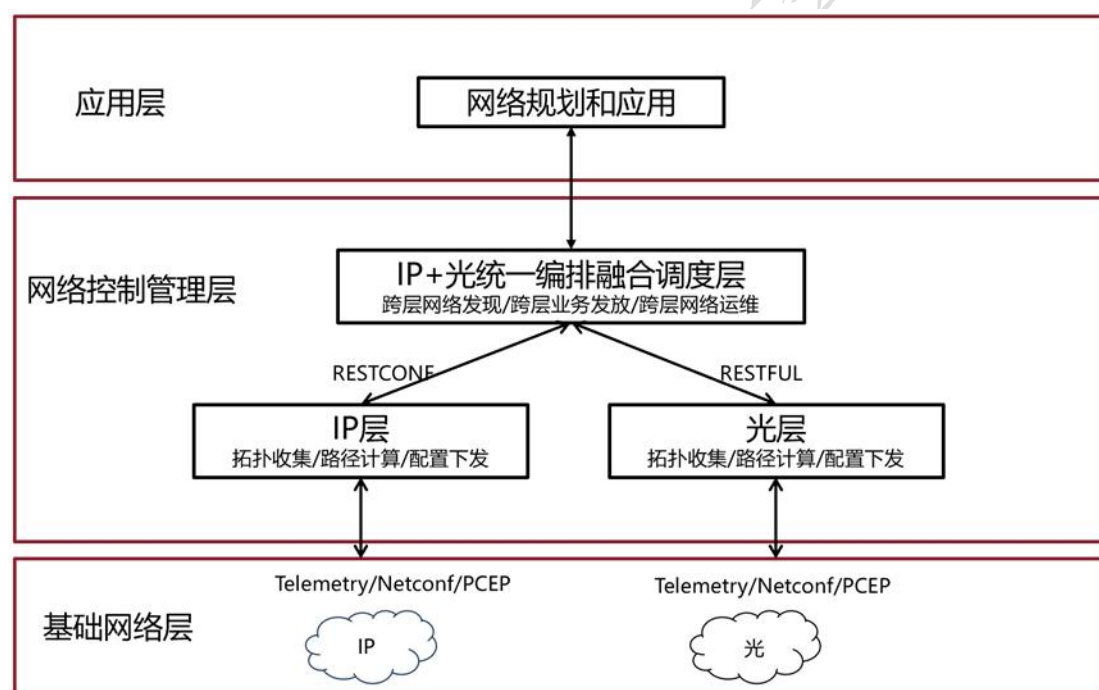


图 4. 光电协同的 SDN 控制器架构

(1) 应用层：应用层主要包括第三方应用、运营商自身的 BSS/OSS 系统，以及网络与业务规划工具。

(2) 网络控制管理层：网络控制管理层主要由超级控制器 IP+光统一编排融合调度层，IP 层域控制器和光层控制器三个组件组成，

支持跨层网络发现、拓扑收集、业务发放、网络运维和策略管理等功能。

网络控制管理层北向通过 API 接口对接应用层。IMT-2020 推进组在《5G 承载网络架构和技术方案》中推荐采用基于 YANG 的数据模型，定义统一开放的基于 Restful 协议的承载网北向接口，实现网络的开放和可编程能力。

网络控制管理层南向支持感知网络拓扑的实时变化，基于网络实时拓扑计算业务转发路径，实现对 IP 网络和传送网络的实时智能控制。NOXOnix、Floodlight 等都是基于 OpenFlow 控制协议的开源控制器。作为一个开放的协议，OpenFlow 突破了传统网络设备厂商各自为政形成的设备能力接口壁垒。

(3) 网络层：网络层具体可以分为两个子网络：IP 子网络和光传送子网络。IP 子网络主要由路由器组成，承担当前业务的承载功能。光传送子网络主要由 OA、ROADM、基础光传输组成，具备基本的传输能力 OTN 设备等组成，网络设备与网络管理系统通过 Netconf/Telemetry/PCEP/BGP-LS 等交互。

3.3.2 AI 运维

5G、云计算等技术推动网络业务激增，光层（大容量传输）与电层（灵活调度）融合成主流架构，但跨层协同复杂、故障隐蔽，传统分域运维难以应对。面对光电混合场景海量数据，存在响应慢、定位不准、调度低效等问题，难以满足业务实时性需求。同时，AI 技

术的成熟为突破这些瓶颈提供了可能。大模型的自然语言理解、跨域知识关联能力，以及机器学习的异常检测、自主决策能力，与光电融合网络的运维需求高度契合，推动运维模式从被动响应向主动预防、从人工操作向智能自治升级，最终催生了光电协同 AI 运维的发展。具体体现为以下四大方向：

1. 光电协同智能知识引擎：在光电协同的复杂运维场景中，网络架构融合了光传输与电信号处理的双重特性，运维难度显著提升。智能知识引擎作为光电协同运维体系的核心支撑，如同一位深耕光电领域的资深专家，能够提供精准适配光电混合环境的秒级响应咨询服务，全方位助力运维效率提升。其核心优势体现在以下方面：

（1）光电场景的快速智能交互：支持自然语言多轮对话，更能精准捕捉光电运维中的专业术语与场景化需求。针对光电协同运维中“光层故障可能引发电层连锁反应”的紧急性，引擎优化了解析逻辑，目前可在毫秒级内完成“光衰减参数→电信号误码率→关联设备告警”的跨层知识检索，结合实时运维数据生成解决方案，实现从问题提交到答案输出的秒级响应，为快速恢复光电链路通畅争取宝贵时间。

（2）覆盖光电全链路的专业知识库：依托横跨光电领域的多源权威数据构建核心能力：涵盖光传输设备（如 OTN、EDFA）与网络设备（路由器、交换机）的厂商技术手册、光电协同协议标准；整合运维专家针对光电接口兼容性、光信号劣化对电性能影响等特殊场景的经验总结；纳入企业内部光电混合组网的历史故障案例、跨层联动

运维工单等独家数据；通过实时同步行业最新光电协同技术白皮书、权威论坛的疑难问题解决方案，经严格清洗标注后动态更新，确保解答既专业全面，又贴合实际运维场景。

2. 光电协同业务智能下发：在光电融合网络中，业务智能下发功能以 AI 算法为核心，构建从业务意图解析到跨层资源调度的全自动化流程，实现光层与电层业务的无缝协同部署。面对多样化的业务需求，系统首先通过自然语言处理技术解析用户意图，将“低时延传输”“高可靠带宽”等抽象需求转化为光层波长资源、电层路由协议等具体技术参数。在路径规划环节，智能算法会同步分析光传输链路的衰减特性与电层网络的拓扑结构，生成跨光电层的最优转发路径。通过融合光模块性能数据与交换机端口状态，系统能精准避开光衰超标路段与电层拥塞节点。借助“大模型 + 智能体”的技术架构，业务智能发放功能打破了光层与电层的技术壁垒，实现了跨厂商设备的协同调度与资源的精准预留、动态调整，将原本需要人工耗时数天的复杂业务部署流程缩短至分钟级，大幅提升了光电协同网络的运维效率与业务可靠性。

3. 光电协同智能运维：光电协同的 AI 智能运维中，智能业务检查通过同步采集光层与电层全链路数据，借助 AI 模型实现跨域异常检测、趋势预测与根因分析，取代传统人工决策模式；智能资源调度则基于光层与电层实时资源状态，由 AI 模型动态优化分配策略，通过双向协同调度机制提升整体网络资源利用率。

（1）智能业务检查：通过同步收集光层（光功率、波长衰减、

色散值等）与电层（带宽利用率、数据包转发效率、协议状态等）的全链路数据（日志、指标、traces 等），利用 AI 模型进行跨域异常检测、趋势预测与根因分析，替代传统依赖人工经验的决策模式。

（2）智能资源调度：基于光层与电层的实时资源状态（如光层空闲波长资源、电层服务器算力），AI 模型可动态优化资源分配策略。例如，当电层某区域带宽需求激增时，系统自动调度空闲光波长建立高速通道，实现电层业务向光层的负载分流；反之，当光层某段链路负载过高时，通过电层的多路径路由技术均衡流量，避免光层单点压力过大。这种双向协同调度机制，能充分发挥光层大容量、低时延与电层灵活调度的优势，提升整体网络资源利用率。

4. 光电协同数据侦察：在复杂的光电协同网络运维场景中，数据侦察能力是保障网络稳定运行的核心驱动力，通过打通光层与电层的数据壁垒，实现对网络全域的精准洞察与智能把控。

（1）网络数据洞察：运维人员只需用自然语言描述对网络数据的查询需求，大模型就能自动将其转化为精准的 SQL 语句，快速从海量的光层与电层融合数据中提取关键信息——既包括光传输设备的波长占用率、光放大器增益、光纤损耗等光层运行数据，也涵盖路由器路由表、交换机端口流量、服务器 CPU 利用率等电层设备日志与性能指标。这种全域数据查询能力，无需运维人员手动区分光 / 电数据来源，大幅降低跨域数据洞察的门槛。

（2）业务数据关联侦察：基于 Text2SQL 功能深化网络与业务的联动，尤其聚焦光电协同对业务的支撑逻辑。例如，当查询“某

视频业务卡顿是否与光层相关” 时，系统会自动关联业务服务器的电层响应时延数据、承载业务的光链路信噪比数据及历史业务流量与光波长带宽的匹配记录，通过多维度数据交叉分析，定位卡顿根源是光层信号劣化还是电层服务器处理瓶颈。此外，还能实时挖掘业务高峰期的光 / 电资源消耗特征（如高清视频业务对特定波长带宽的占用规律），为资源调度提供数据依据。

（3）异常数据溯源侦察：针对光电协同场景中跨域异常的隐蔽性，系统具备全链路数据溯源能力。当发现电层业务丢包时，会自动触发光层数据回溯，检查对应时间段内的光信号误码率、光路切换记录等；若光层某段光纤损耗突增，则同步关联电层该链路承载的业务类型与受影响范围。通过构建“光层物理特性 - 电层协议交互 - 业务表现” 的溯源链条，实现异常数据的精准定位。

四、 光电融合网络技术相关标准

4.1 相关国际标准及进展

4.1.1 相关国际标准及现状

光电融合网络作为下一代通信基础设施的核心架构，其标准化体系呈现出高度复杂的多层级结构，涵盖光层传输、业务接口适配、控制面调度、设备模块集成等多个技术维度。这一体系不仅需要解决光信号（如波分复用 WDM、光子集成电路 PIC）与电信号（如以太网、无线协议）的异构兼容问题，还需协调不同技术层级间的协同优化，

以实现带宽、时延、能耗等关键性能指标的全局最优。在此背景下，国际与国内标准组织基于各自的职责分工和技术优势，形成了互补性与协同性并存的标准制定格局。

标准组织	主要职责	标准特点	标准层级	参与主体	示例标准	与其他标准协同关系
IETF	定义互联网协议及网络控制体系，如 IP、MPLS、ACTN、GMPLS 等	控制面、路由、抽象网络层、TE 机制	软件/协议层	网络工程师、厂商	RFC 8453、RFC 4206	与 ONF TAPI 接口模型深度配合；ACTN 为 ITU-T、OpenROADM 提供路径抽象基础
ONF	推进 SDN、开源网络控制架构，如 TAPI、OpenFlow	控制接口建模（YANG）、开放 API	软件接口层	云厂商、电信运营商、控制器厂商	TAPI v2.4、OpenFlow	TAPI 可作为 IETF ACTN 的南向接口；适配 OpenROADM/YANG 控制模型
OIF	制定相干光模块和接口标准（ZR/ZR+/CEI）	硬件接口、电口/光口、模块封装规范	硬件/模块层	芯片厂、模块商、设备商	400ZR, 800ZR, CEI-112G	OIF 接口标准被 IEEE 和 ITU-T（如 FlexO）采纳；OpenZR+ 直接继承 OIF 接口规范
IEEE	标准化以太网等广义通信物理层/链路层协议	LAN/WAN 接口、电气层/物理层规范	接口/传输协议层	学术界、芯片商、设备商	802.3 系列（如 802.3dj）	参考 OIF 接口标准（如 400ZR）封装为以太网接口；与 FlexO 协同实现兼容
ITU-T	国际电信标准制定机构，统筹光网系统、OTN、DWDM 等	通信系统结构、光层协议、互通格式	网络系统层	国家成员、电信运营商	G.709(OTN) G.698.2(DWDM)	吸收 OIF 接口规范与调制/FEC；G.709 FlexO 与 IEEE 接口标准衔接；ACTN 提供协同机制
OpenROADM	ROADM 设备标准接口、OFEC 编码	SDN+ROADM 网络接口标准化	光层设备接口层	美国电信运营商（如	OpenROADM MSA 6.0、	控制接口与 ONF TAPI、IETF ACTN 架构兼容；光口参数参

				AT&T)、设备商	OpenROADM YANG models	考 ITU-T 与 OIF 标准
Open ZR+ MSA	综合 OIF 和 OpenROADM 的 ZR+ 规范	光模块互操作标准	光模块 / 接口协同层	相干模块厂商、系统商、电信运营商	OpenZR + MSA v3.0	与 OIF 完全接口兼容，光参数继承 OpenROADM，业务映射参考 ITU-T FlexO

以下表格梳理了光电融合领域具有代表性的接口标准、控制架构标准与模块互通标准，涵盖了当前主流组织发布的现行标准与正在制定的重要规范，便于全面掌握光电融合网络标准体系的现状与发展路径。

标准名称	发布组织	主要内容	当前状态
G.709 / G.709.x 系列	ITU-T	FlexO 帧结构、OTN 帧格式与业务映射	现行中，G.709.b1t 修订中（支持超 1T）
G.698.2	ITU-T	相干 DWDM 系统接口，支持 C+L 波段、多跨段应用	重启修订，预计 2026 年前完成
IEEE 802.3cw / 802.3dj	IEEE	400ZR / 800G / 1.6T 以太网接口标准	dj 进入 D2.0 草案，预计 2026 年发布
400ZR / 800ZR / 1.6T ZR	OIF	标准化相干光模块与接口（80 - 120km DCI 场景）	400ZR 已定稿，800ZR 已完成，1.6T 制定中
TAPI v2.4	ONF	光网络拓扑、连接、路径计算 API 接口，YANG 建模	最新稳定版，广泛用于 SDN 控制器
RFC 8453	IETF	抽象网络控制架构，实现	正式标准，广泛与

(ACTN)		多域 TE 网络的路径编排与协调	TAPI/SDN 控制器协同使用
OpenROADM MSA v6.0	多供应商联盟	ROADM 设备开放接口标准、OFEC/FlexO 光信号参数定义	现行版本, 计划支持 C+L 波段扩展
OpenZR+ MSA v3.0	MSA 联盟	相干光模块互通标准, 兼容 OIF 电接口、OpenROADM 光参数	多厂商支持, 完成 400G 互操作性测试

在光电融合网络标准体系的构建过程中, 国内厂商正日益成为国际与国内标准制定的重要参与者和推动力量。光迅科技作为 OpenZR+ MSA 的创始成员之一, 积极参与了 400G 相干模块互通性标准的制定与测试, 并在 OIF 中深度参与相干光模块关键器件 (如 COSA、ICR、CDM) 规范的讨论, 同时也是国内 CCSA 模块接口标准的重要起草单位, 致力于推动模块国产化与系统解耦标准的落地。华为则长期主导 ITU-T G.709 系列和 G.698.2 的修订工作, 在 OIF 的 1.6T ZR/ZR+ 标准项目中提出关键技术路线建议, 并在 OpenROADM 标准体系中推动 FlexO 和 C+L 波段等能力的引入, 其标准立场强调系统、模块与控制器的深度协同和性能优化。烽火通信在 ITU-T 最近的超 1T OTN 标准讨论中积极发挥作用, 为下一代 OTN 协议框架制定打下基础, 同时也聚焦于超长距 WDM 系统标准的制定与应用验证, 在 OIF 和国内标准中积极推动 ZR 接口在接入与城域网络中的轻量化部署, 强调模块与系统间的配置灵活性与 FEC 适配能力。800G 以太网中长距标准主要由 IEEE 802.3 和 OIF 制定。面向 20km~40km 城域内智算互联场景, IEEE802.3dj 制定了 800GE ER1-20(20km) 和 800GE ER1

(40km) 标准。其中 800G 以太网 20km 标准立项由中国移动专家在 IEEE 802.3 工作组牵头完成，是中国公司主导在 IEEE 的首个以太网基础标准立项；同时主导 20km 和 40km 标准技术框架被工作组采纳。OIF 面向 40km~120km 区域城市群互联场景，制定了 800ZR 标准并已于 2024 年底完成发布。IEEE802.3 800GE ER1-20、ER1 标准与 OIF 800ZR 标准采用相同技术路线，实现了 800G 以太网 20~120km 技术标准路线统一。

4.1.2 相关国际标准体系的未来演进

当前，面向光电融合网络演进的新一代标准体系正在国际范围内持续完善与前瞻布局，覆盖从超高速接口、频谱拓展，到智能控制与新型光纤等多个关键方向。

超 1T 接口方面，ITU-T 正在修订 G.709.b1t 标准，拟支持 FlexO 结构下的 1.6T 接口，而 OIF 推进中的 1.6T ZR/ZR+/CR 系列则面向骨干与 DCI 传输中的轻量化相干需求，并支持 C+L 波段扩展；IEEE 则通过 802.3dj 同步推动基于 IMDD 与相干的 800G/1.6T 以太网接口标准。与此同时，频谱层面也在积极扩展，ITU-T G.698.2 正引入 C+L 各 4.8THz 频段甚至 C+L 各 6THz 频段适配相干 DWDM 系统，OpenROADM 也计划在新版本中支持更广频谱与 AI 链路评估模块，CCSA 则在同步研究 S+C+L 三波段方案以支撑 1.6T 及以上的容量演进。

器件层面，光电合封（CPO）相关标准也加速推进，CCSA WG4

正在制定外置激光器模块标准，IPEC 则组织多厂商联合制定器件级可靠性测试规范，而 OIF 与 COBO 在国际上牵头的 CPO 接口规范也为电光共封装的未来演进奠定基础。在智能控制方面，ITU-T 的 FG-AI4NDN 与 ETSI 的 ENI 提出了面向未来网络的 AI 控制模型，有望影响光层 FEC 优化、自愈调度等标准设计；CCSA 也已启动 AI 增强型 FEC 算法研究课题，探索 AI 与传输物理层的融合路径。同时，统一调度与开放控制接口标准也在加强互通与兼容性，如 IETF TEAS 工作组扩展了 ACTN 与 Segment Routing/切片模型的集成机制，ONF 的 TAPI 与 OpenConfig 的 YANG 建模也正在向光网络多厂商可编排管控能力演进。

围绕未来基础设施的标准创新也同步展开，ITU-T 与 CCSA 相继启动空芯光纤标准预研，并关注空分复用（SDM）技术在多芯、多模光纤方向的接口定义，未来将重构当前 WDM 系统的容量极限与拓扑弹性。整体来看，光电融合相关国际标准正在迈入“接口高速化、频谱多维化、控制智能化、架构异构化”的新阶段。

4.2 相关国内标准及进展

国内光电融合网络标准体系正逐步完善，重点围绕高速 DWDM 系统、相干光模块、光电合封器件以及基于 SDN 的控制接口等核心领域开展标准化工作。中国通信标准化协会 TC6 下属的 WG1 和 WG4 工作组相继发布《YD/T 4298-2023》《YD/T 4299-2023》等关键标准，推动 WDM 系统的开放解耦与控制器层间接口统一，同时在 800G 及

以上高速系统、TAP-PD 等关键器件、CPO 外置光源模块等方向加快标准制定进程。这些标准为构建可编程、可演进、国产化可控的光电融合网络奠定了统一规范基础。

在硬件接口层面，CCSA WG4 聚焦高性能相干光模块及 CPO（Co-Packaged Optics）器件接口标准，推动国内光模块国产化和模组解耦。当前，CCSA 已发布多项模块接口规范，涵盖 400G 及以上速率，支持多波段、多跨段应用，并同步制定外置激光器及高速互连接口的可靠性测试标准。

网络控制与管理层面，CCSA 积极对接国际 SDN 与网络控制标准（如 IETF ACTN、ONF TAPI），推动基于 YANG 模型的统一调度接口标准化，支持多域多层次的光电融合网络资源协调与智能调度。同时，面向 AI 驱动的网络运维，CCSA 启动 AI 增强型 FEC 算法及自愈机制标准的预研，促进智能控制能力在国产设备中的应用。

当前的主要标准和状态如下表：

标准名称	发布组织	主要内容	当前状态
YD/T 4298-2023 《开放与解耦的波分复用（WDM）系统技术要求》	中国通信标准化协会（CCSA）TC6 WG4	明确 WDM 系统中各层级接口（如模块、子架、系统）间的解耦要求，支持多厂商设备互操作	已发布，面向运营商部署实践广泛采纳
YD/T 4299-2023 《基于流量工程网络抽象与控制（ACTN）的软件定义光传送网（SDOTN）控制器层间接口要求》	中国通信标准化协会（CCSA）TC6 WG4	基于 IETF ACTN 架构，定义 SD-OTN 控制器之间的标准化南北向接口，支持跨域协同调度	已发布，部分系统厂商已开始对接实施
《N×400G 光波分复用系统技术	中国通信标准化协会（CCSA）TC6	针对超 400G DWDM 系统设计	草案完成

要求》	WG1	规范、传输性能指标与信号质量要求	
《城域 N × 800Gbit/s WDM 系统技术要求》	中国通信标准化协会 (CCSA) TC6 WG1	面向 800G 及以上容量城域 WDM 系统的结构设计、接口协议及调制格式适配规范	起草阶段，重点支持 C+L 波段应用场景
《WDM/TAP-PD 光电混合光组件技术规范》	中国通信标准化协会 (CCSA) TC6 WG4	规定 WDM 系统中用于相干检测的 TAP-PD 器件的结构、参数及测试要求	标准草案，计划纳入相干模块关键器件规范系列
《光电合封用外置光源模块技术要求》	中国通信标准化协会 (CCSA) TC6 WG4	面向 CPO 架构中的外置激光器模块 (ELS)，规范其接口、尺寸、电光特性与可靠性测试	已完成行业征求意见稿
《路由器用超长距 (ZR/ZR+) 彩光接口直连场景的管控技术要求》	中国通信标准化协会 (CCSA) TC3 WG2	规定了路由器利用 ZR、ZR+ 彩光接口进行长距离直连场景下对彩光接口进行配置与管理及其 YANG 模型技术要求，包括 ZR、ZR+ 彩光接口配置模型和 ZR、ZR+ 彩光接口查询模型。	已完成行业征求意见稿

我国光电融合网络标准正从系统化布局走向技术深耕，展现出鲜明的差异化优势与前瞻引领能力。在 128GBd 以上 QPSK 长距相干传输标准方面率先突破，建立了国际先发优势；800G/1.6T 高速光通信则成为我国与 ITU-T、OIF 等国际组织竞争与合作的前沿焦点。CCSA TC6 WG4 近两年密集推进 800G 强度调制与相位调制两大技术路径标准制定，基本完成系列标准体系建设，并同步启动 1.6T 光模块、

C+L 波段一体化器件等关键方向的标准预研。新型调制格式、OTN 映射优化、频谱拓展、AI 增强型 FEC 等关键技术群，正构成我国光电融合网络标准演进的核心攻关领域，为构建高带宽、自主可控、智能协同的新型通信基础设施提供坚实支撑。

五、 光电融合网络相关产品与解决方案

5.1 ZRx 相干光模块

相干光模块（Coherent Optical Module）通常用于 100G 及以上远距离（DCI/长距/城域/骨干）通信场景，其核心构成包括：

模块组成部分	主要功能说明
相干 DSP 芯片	执行高速调制/解调、前向纠错（FEC）、功率均衡、PM-QPSK/16QAM 等算法。
相干光收发器件	包括 ICR（集成相干接收器）与 CDM（相干驱动调制器），以及集成相干光收发器（COSA/TROSA），完成光信号收发。
ICR	集成偏振分束、光电探测、偏振控制等组件。可以实现双偏振相干光信号的内差探测。
CDM	集成驱动放大器，MZM 相位调制器，SOA 光放大器等组件。可以实现高速信号的相位调制。
ITLA（可调谐激光器组件）	基于外腔激光器（ECL）或者分布布拉格反馈（DBR）结构的窄线宽可调谐激光器，可以覆盖 C 波段 6THz 和 L 波段 6THz 的调谐范围。
光引擎封装结构	模块化封装、热管理、低功耗设计等（如 CFP2-DCO、QSFP-DD、OSFP）。
控制与接口电路	包括 I2C、SPI、MDIO 接口，实现与系统主控交互。

自从 2011 年首个 MSA (Multi-Source Agreement) 标准接口 100G 光模块发布，相干模块至今已发展了四代，具体如下：

代际	最大速率	调制方式	波特率	速率	适用场景
第一代	100G	100G QPSK	34GBd	不可调	调制模式只有 100G QPSK 一种，适用于各种距离传输，如长途干线、城域网等场景。
第二代	200G	200G PM-16QAM/100G QPSK	45GBd	可调	调制模式主要为 200G PM-16QAM，适用于短距离传输，如数据中心互联、城域网等场景。
第三代	400G/600G	200G QPSK/400G PM-16QAM	64GBd	可调	调制模式主要为 200G QPSK，适用于长距离传输，如长途干线、海底光缆等场景。
第四代	800G/1.2T	400G QPSK/400G PS-16QAM/800G PM-16QAM	96GBd/130GBd	可调	调制模式主要为 400G QPSK，适用于长距离、大容量传输场景，如长途干线；此外，800G 速率主要用于超大型数据中心互联以及有高带宽需求的场景。

当前全球主要光模块厂商在 ZR/ZR+ 及相干模块领域布局广泛，封装类型与 DSP 选型呈现多样化趋势，体现出不同厂商在技术能力、市场定位与演进策略上的差异。从封装角度来看，QSFP-DD 和 OSFP 成为主流趋势，其中 QSFP-DD 在端口密度和兼容性方面有优势，而 OSFP 则在散热性能方面具备优势。美国厂商如 Acacia (Cisco)、Ciena、Infinera 多采用自研或高性能商用 DSP (如 Jannu、WL5/WL6 系列)，主攻 800G 及更高性能场景；而中国厂商如华为海思、光迅科技、新易盛则在自研 DSP 与模块封装上形成多点突破。整体来看，美系厂商聚焦高性能高可靠应用场景，自研 DSP 领先；中系厂商则在封装

灵活性与速率覆盖广度方面持续发力，正加速向核心技术自研与高速率领域迈进，全球相干模块市场格局正在逐步多元化与本地化。

主流相干光模块厂家对比

厂商	国家/地区	封装类型	DSP 类型	典型速率
Acacia (Cisco)	美国	CFP2-DCO, QSFP-DD	Jannu, Denali	100G/400G/800G
Infinera	美国	Custom module	自研 DSP	800G
Ciena	美国	QSFP-DD, CFP2-DCO	WL5 Nano/Extreme	800G
烽火	中国	CFP2-DCO/QSFP-DD/OSFP	自研	400G/800G
光迅科技	中国	CFP2-DCO/OSFP/QSFP-DD	Marvell/自研	400G/800G
新易盛	中国	QSFP-DD, OSFP	Marvell	400G
思特威	美国/中国	CFP2/OSFP	第三方	100G/400G
Lumentum	美国	CFP2-DCO, QSFP-DD	与 Acacia 合作	100G/400G

目前，相干光模块的研发正处于 800G/1.2T 技术演进期，这一阶段标志着高速率、低功耗、集成化成为研发主旋律。800G 相干模块已逐步商用化，适用于数据中心互联（DCI）、骨干传输与算力网络等场景；1.2T 模块则作为下一代高阶产品，正在进行技术验证与初步部署，主要依赖更高符号率（如 140GBd 以上）、更复杂的调制技术（如 64QAM）和先进的 DSP 能力以提升频谱效率。向下一步发展，1.6T 相干光模块被视为未来核心目标，将采用更高速 DAC/ADC 器件、更高性能的硅光平台、更低功耗的 7nm 及以下 DSP 工艺，并有望实现 C+L 波段覆盖、AI 增强 FEC 等关键技术集成。与此同时，封装形态也将进一步演进，以支撑 1.6T 在超长距传输和超大带宽集群互联

中的广泛应用。QSFP-DD 和 OSFP 作为面向未来演进的两种主流封装，在结构设计、功能支持及部署场景方面均展现出各自的优势与局限。

QSFP-DD (Quad Small Form Factor Pluggable - Double Density) 封装是一种高密度光模块设计，其主要优势在于能在传统 QSFP+ 和 QSFP28 的面板尺寸基础上增加更多电气通道，从而支持 400G 及更高速率的传输。这种紧凑设计不仅提供了较高的端口密度，非常适合数据中心对空间高效利用的需求，还确保了较强的向下兼容性，便于企业在进行网络升级时无需大规模更换现有硬件。随着散热技术的完善，QSFP-DD 封装能够支持 400G ZR 模块的稳定运行，已成为数据中心等场景的主流选择。尽管如此，QSFP-DD 的封装体积较小，导致其在 800G 及以上速率的模块中散热能力受限，需要更好的散热设计或其他辅助散热方案。此外，较为紧凑的内部空间也限制了高级功能模块（如复杂 DSP 和 FEC）的集成，未来在更高速率的演进中需要集成度更高的方案。

OSFP (Octal Small Form Factor Pluggable) 封装相比 QSFP-DD 体积更大，专为支持 800G 及以上速率的模块开发，注重高带宽、高功耗环境下的热管理与功能集成能力。OSFP 设计的优势在于其优秀的散热性能，由于提供了更大的物理空间，能够容纳更大面积的散热片或采用更复杂的热管理结构，从而有效降低模块的温度，保障其在高负载下的长期稳定运行。此外，OSFP 还具备很强的功能扩展潜力，较大的内部空间能够支持更复杂的 DSP 芯片、CDM 结构以及 FEC

模块，为未来更高速率模块的升级提供硬件基础。然而，OSFP 也有一些劣势，主要体现在其较低的端口密度，因封装尺寸较大，每个面板支持的模块数量较少，降低了设备的端口总容量。此外，更大的封装尺寸也意味着其材料和生产成本较高，可能导致在大规模部署时面临更高的成本压力。

行业普遍认为，QSFP-DD 与 OSFP 将在未来 3~5 年内长期共存，两种封装将作为互补技术路线并行发展，共同支撑光电融合网络的持续升级与演进。

5.2 光电融合网络设备

光电融合网络设备是指将 IP（Internet Protocol）层和光层（通常是 DWDM，即密集波分复用技术）深度集成或协同工作的设备。这类设备通过融合 IP 和光层的功能，优化了网络架构，使得网络传输更加高效、灵活，并能够支持大容量的数据流动。传统的通信网络通常将 IP 和光层分开，各自负责不同的传输任务，而光电融合设备则实现了两者的深度耦合，能够提供高带宽、低延迟、低成本的传输解决方案。

光电融合设备的核心在于其能够通过相干光模块，如 ZR/ZR+ 模块，将数据直接从 IP 路由器端口进行传输，这有助于简化网络传输，节省资本支出，减少对网络中的转发器和光传输设备的需求，从而实现简化网络架构、降低资本支出、提升网络灵活性和可扩展性。

在光电融合网络设备的初期阶段，光电解耦式部署是主要的技术

架构。在这种方案中，IP 层和光层的功能被独立部署，即路由器仅负责处理传统的 IP 层数据转发功能，通过路由器支持可插拔彩光模块来进行光信号传输，而光层的功能则通过独立的光层平台实现，通常使用 DWDM 等光层技术来进行波分复用和光信号放大。路由器和光层平台之间通过标准化协议接口（如 NETCONF、RESTCONF 等）进行协同工作。这种部署方式的优势在于可以根据需要灵活扩展每一层，IP 层和光层可以独立演进，且能支持复杂的网络架构需求。这种架构虽然在一定程度上降低了初期的复杂性，但是从光电协同及两套设备的运维上，仍然复杂度较高。

随着技术的不断发展，光电融合设备正在向一体化集成设备演进，这一阶段的设备开始将 IP 层与光层功能深度集成。这种集成化设备不仅支持常规的 ZR/ZR+ 相干光模块，还能将光层调度功能（如 ROADM）和光放大功能（如 EDFA）集成到同一个设备中。通过集成 EDFA 和 ROADM，设备不仅能够提升光层传输的稳定性和灵活性，还能增强网络中的带宽管理和调度能力。相较于光电解耦式部署，这种集成化设备能有效减少网络中的设备数量和复杂度，提升网络的可靠性和操作简便性。设备通过将光电功能和 IP 路由功能结合，适应了需要高带宽、低延迟的数据中心互联（DCI）、骨干网以及城域网等场景的需求。

随着网络向更智能和灵活的方向发展，光电融合设备不仅仅从硬件形态上逐渐完成融合，未来也将逐步进入全可编程白盒设备阶段，这标志着设备架构的重大变革。全可编程白盒设备不仅支持 IP 层和

光层的统一调度，还提供了极高的灵活性和可编程性。通过 SDN（软件定义网络）控制协议和开放接口，这些设备可以动态调整 IP 和光层资源的配置，使网络更具弹性，能够快速响应变化的需求。全可编程白盒设备能够支持复杂的网络自动化运维，并且非常适合用于下一代的智能化网络，例如面向边缘计算、AI 驱动的自动化运维以及云计算的网络架构。通过支持网络切片、虚拟化等技术，这些设备可以提供更高效的资源利用，并能够通过高度集成的管理和编程接口，满足大规模、高效且智能化的网络部署要求。这种设备形态的核心在于开放性和可定制化，支持运营商和企业根据不同业务需求进行精细化的网络资源配置，推动了开放网络架构的逐步普及。

2024 年由紫金山实验室和江苏未来网络集团牵头，联合业界多家厂商，基于 CENI 现网环境，开创性地将“IP+光”光路由技术与确定性网络技术、支持 ZR++ 的路由器技术整合，探索出一个自主可控的、确定性增强的、光数合一的未来网络光电融合广域确定性网络方案。该方案在 CENI 生产网中对光电融合确定性路由器做了严格测试验证，通过中国信息通信研究院的权威测试，实现了超 2000 公里的无电中继无损传输和 400G 速率 5 微秒抖动的确定性传输两项重大突破。未来网络试验设施（CENI）是全球首个实现 2000 公里以上“IP+光”广域无损承载和“400G 速率+5 微秒抖动”确定性承载的光电融合广域确定性网络，具有高效率、高可靠、低成本、低能耗等特点，处于国际领先地位，为“东数西算”算力网、城市区域算力网、数据要素高速承载网、运营商新型承载网等新型广域网建设提供了一个全

新的技术路线，大幅降本增效提质。

新华三（H3C）在光电融合领域提供了强大的解决方案，特别是 CR19000-X、CR16000-F、CR16000-M 系列路由器。这些设备具有高密度接口（包括 FE/GE、10GE、25GE、40GE、50GE、100GE、400GE 接口），并且在单槽位性能上支持灵活扩展，未来也可升级到 800GE 和 1.6TGE 接口，具备广泛的光电融合应用场景。

CR19000-X 系列：主要面向核心层设备，支持最高 400GE 接口，能够满足大规模网络运营商对高性能核心设备的需求，且具备未来的技术演进能力。



图 6. CR19000-X 系列路由器

CR16000-F 系列：具备多种应用场景，涵盖核心、汇聚、接入等多层次的部署需求，支持 400GE、100GE、10GE 接口，并提供 IP+光融合功能，适用于多种不同规模的网络架构。



图 7. CR16000-F 系列路由器

CR16000-M 系列：适用于接入和汇聚层的设备，支持 100GE、10GE 接口，并同样具备 IP+光融合的能力，可以灵活应对不同层级的网络组网需求。



图 8. CR16000-M 系列路由器

H3C 的 OPN DW500E 光层平台为 IP+光融合方案提供了全面的光层支持。它采用模块化设计，提供多个业务槽位，可根据需求灵活配置，支持包括合分波器、光放大器、光保护、光交叉（WSS）等功能，为数据中心互联（DCI）、城域网、骨干网等多种场景提供强大的光电融合能力。DW500E 光层平台与 H3C 的路由器系列无缝对接，具备支持 100G、400G、800G 等 ZR/ZR+彩光模块的对接能力，并通过 SDN（NETCONF/RESTCONF）接口，支持灵活开放的管理方式，进一步增强了网络的可编程性和自动化运维能力。

5.3 光电融合管控系统

光电融合网络的核心在于实现 IP 层与光层的深度协同，统一控制器作为这一体系的“大脑”，其智能化、开放性和跨层能力成为推动网络自动化、智能化演进的关键。以下将从架构、控制能力、运维能力、开放性、业务能力五大维度，系统分析各类光电融合网络管控系统。

1. 架构维度

在架构设计中，灵活性和扩展性至关重要，因此统一控制器通常采用集中式与分布式架构相结合的方式，以适应不同网络规划和不同网络域资源协调和业务编排的需求。控制层不仅承载传统 IP 网络与光传送网络的控制功能，还需支持。为了增强系统的开放性和互操作性，统一控制器还必须具备强大的开放 API 能力，可以与 OSS/BSS 系统对接，并支持与第三方设备、厂商的系统进行无缝对接。这些技术能力确保了网络运营商可以在不断变化的市场需求下，快速应对不同的业务挑战。随着 AI 技术的发展，AI 能力开始被应用于故障诊断、路径优化和容量预测等领域，帮助网络运营商实现高效、智能的网络管理。

典型的方案包括：

- 华为的方案是通过超级控制器或者协同器将 IP 层和光层的独立控制器进行融合控制与调度。
- 思科与 Juniper：利用标准化接口和高效的网络数据建模能力，实现了智能化的网络控制和业务调度。

- 未来网络团队：通过统一融合的大网操作系统实现 IP 层和光层的统一管控，结合 AI 的能力，实现光电业务协同的能力。

2.控制能力维度：IP 层+光层+跨层控制能力

光电融合网络中的控制能力要求 IP 层、光层以及跨层控制之间的深度协同。IP 层控制能力包括 SR/MPLS、FlexAlgo、SR Policy、VPN、L2/L3 组播等，主要解决数据包的路由、流量优化和网络管理问题。光层控制能力则涵盖了波分复用的合分波调度、光信号放大的均衡等。跨层控制能力则涉及到更为复杂的跨层协调，例如光层与 IP 层的互联和协同，确保两者之间的资源能够高效利用，从而实现更为灵活的网络资源调度。例如，跨层链路发现、光层路径与 IP 层路径之间的约束协同控制等。

差异化对比方面，部分厂商通常更倾向于将 IP 与光层深度联动，通过 SR Policy 等技术实现自动化的路径关联与资源优化；而一些厂商则更强调光层自治，通过标准化接口进行光层与 IP 层的协同，达到较高的灵活性和可扩展性。未来，随着光电融合的深度发展，跨层协同能力将成为关键的竞争优势。

3.运维能力维度：智能化运维与知识图谱应用

光电融合网络的运维能力是确保网络长期稳定运行的关键。智能化运维主要体现在全程监控、故障预测与根因分析等方面。在全程监控能力方面，统一控制器需要实时监测从物理端口到业务通道的每一层状态，确保每个环节都在可控范围内。根因分析则通过构建知识图谱，关联链路、设备、业务与告警，实现故障源的快速定位与处理。

此外，AI 辅助运维则进一步提高了故障诊断的准确性与响应速度，通过大数据分析和机器学习模型，提前预测潜在的网络问题，并提出合理的优化建议。

例如，中国电信通过融合图谱平台与大模型，实施跨域故障分析，不仅提高了故障定位的速度，还降低了人为干预的需求；AT&T 则通过推出网络数字孪生技术，模拟网络行为和故障，提前进行运维仿真，进一步降低了网络故障的风险。未来网络团队则通过将图谱系统与大模型结合，推动了跨层的知识问答，增强了运维人员对网络故障的诊断与处理能力，往高阶网络自动化持续演进。

4. 开放性与兼容性维度：生态适配能力

在光电融合网络中，统一控制器的开放性与兼容性是决定其市场适应能力的关键因素。随着不同厂商和技术的不断涌现，统一控制器必须具备支持多厂商设备、多技术路径、开放平台的适配能力。为了实现这一目标，控制器需要具备灵活的南向接口适配能力，包括对 NetConf、BGP-LS、PCEP、CLI 等协议的支持，确保能够与不同厂商的设备进行无缝对接。在模型开放性方面，统一控制器需要支持 OpenConfig、ONF-TAPI 等主流建模协议，这样可以促进行业标准的形成，并确保与各种设备和系统的兼容性。

在白盒设备方面，控制器是否支持开放可编程平台也成为一个重要考量点。Juniper 与思科等厂商通过支持基于 OpenConfig 和 YANG 模型的开放性，推动了行业的标准化进程；烽火在逐步开放其控制平台，推动第三方模块和 OTN 设备的接入，提升了系统的可扩展性与

适应性。未来网络团队通过基于大网控制器以及以 P4、SONIC 为基础的白盒设备，不断提升可编程能力，实现了异构环境的业务协同和运维管理。

5.业务能力维度：业务部署与服务编排能力

光电融合网络中的业务能力不仅体现在多业务建模上，还包括业务的全生命周期管理、服务自动化与端到端 SLA 保障。在多业务建模方面，统一控制器必须能够支持 L2/L3VPN、EVPN、MPLS-TE 等多种业务类型，确保网络资源的高效分配与业务的稳定运行。跨层路径计算与部署则是光电融合网络的亮点之一，它能够实现 IP 段与光路径的一体化部署，从而提高网络的资源利用率和运营效率。

在服务自动化方面，统一控制器通过对开通、变更、下线等操作的全生命周期管理，能够实现服务的自动化与智能化。随着运营商对网络自动化的需求不断提升，意图驱动的网络配置成为未来的主流，运营商通过高层的业务策略来自动生成网络配置，极大地减少了人工干预，提升了部署的效率与准确性。国内主流厂商在这方面已实现了从业务开通到光波长调度的全流程自动化，能够有效降低运营成本，并提升业务响应速度。

在光电融合网络的业界趋势中，统一平台的主导权问题成为一个焦点。部分观点倾向于构建自有的统一平台，避免被单一厂商锁定，并加强自主创新与控制权；而另一部分观点则更倾向于采用多控制器联邦式架构，通过模块化部署实现灵活性和可扩展性。在这一背景下，跨厂商、跨设备的互操作性成为未来网络演进的关键要求。

AI 与图谱技术在提升运维效率方面的价值依然存在分歧。部分运营商认为，AI 与图谱技术是提升运维效率的关键工具，通过深度学习与智能分析，能够有效减少故障发生率，提升网络的可用性；然而，也有运营商认为，过度依赖建模带来的成本过高，且维护复杂，投资回报率并不显著。

此外，白盒与软硬解耦的趋势愈加明显，运营商对电信级白盒的依赖逐步增强，要求控制器具备更强的开放能力，并支持更多种类的开放可编程平台，推动了 OIF 与 ONF 等组织推动的标准化接口，促进了融合控制的可移植性和兼容性。

六、 光电融合网络产业应用场景与案例

6.1 应用场景

光电融合网络作为新一代基础设施形态，其在带宽、能效、灵活性与智能管控方面具备显著优势，已逐步在多种关键场景中展开部署与验证。典型应用主要聚焦于数据流密集、时延敏感或架构解耦诉求突出的领域。

首先，在算力网络互联方面，光电融合方案可实现大型数据中心、AI 集群之间的高密度、高可靠、低功耗互连，支撑智算调度、模型训练与推理等对带宽与延迟敏感的算力业务。其采用相干光模块直插路由器/交换机，简化中间层设备，实现低成本、可编程的传输链路。如“东数西算”工程推动东西部算力枢纽的广域互联，要求网络具备

超大带宽、低功耗、强弹性等能力。光电融合网络以相干光模块直插+分层管控+波道智能调度为核心特征，实现大颗粒数据流（如 AI 模型、训练数据）的高效搬运。通过 IP 与光的深度协同，支持算力在东西部之间的敏捷调度和数据快速回传，是智算枢纽间互联的理想架构。

其次，在运营商骨干与城域网络中，光电融合能够通过 IP 与光层的协同调度，提升光层资源利用率、降低业务开通时延，增强网络扩展能力与多业务承载效率，适配 5G/5G-A 回传、企业专线与 DCI 等需求。

同时，在工业互联网、车联网、智慧城市等确定性场景中，融合确定性技术的光电网络具备路径可控、微秒级抖动保障的能力，满足高清视频、智能制造、自动驾驶等超低延迟、高可靠业务需求。

此外，面向未来的 AI 原生业务与元宇宙场景将催生大带宽、低延迟、高并发、多路径协同的网络需求。光电融合网络基于统一架构、分层解耦、智能管控的设计原则，可为大规模并行计算、多终端内容分发、三维互动体验等提供高质量承载平台。配合确定性切片与 AI 辅助调度能力，有望成为“智能业务即网络”的技术底座。

6.2 应用案例

1. 基于 CENI 现网的光电融合网络超长距验证

紫金山实验室和江苏未来网络集团联合攻关，融合“光电融合 ZR+技术”“400G 确定性网络技术”“光电融合一体调度技术”三大

关键技术，在 CENI 现网上实测验证实现长三角超 2000 公里远距传输、400G 零丢包无损传输、时延和带宽全颗粒切片按需传输。三大关键技术在 CENI 现网实现的高速、高效、灵活、低成本确定性传输能力极大优化 AI 算力网络的建设和运营成本及效率，建设成本降低至少 50%以上。

通过 CENI 现网资源，南京—上海 2000KM+现网测试（400G ZR++ QPSK）

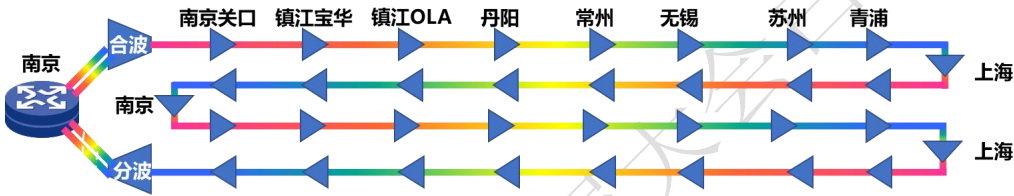


图 9. 测试组网图

（1）引入新的设备散热和供电技术，以及系统软件优化，率先支持 400G ZR++（QPSK 模式），内部完成方案可靠性、风险点释放等全面验证；

（2）完成 400G ZR++（QPSK 模式）下光路由 2000KM 现网单光纤、无电中继的超远传输距离验证，验证 400G、800G 带宽下的高性能转发以及长时间可靠性测试。

（3）基于大网控制器，利用彩光通道+SRv6 切片+信道化子接口三级调度架构，实现：

- 1) 业务级硬切片隔离，时延保障精度达 $\pm 50\text{ns}$ ；
- 2) 基于 SRv6+信道化子接口的跨域通道快速重构，业务开通时间缩短分钟级；
- 3) 构建端到端智能运维体系，集成 Telemetry 实时监测与数字孪

生仿真系统。

2.中国电信光电融合测试（400G ZR）

针对三个厂商（诺基亚、思科、国内某厂商）支持 400ZR 接口的设备进行测试：

- （1）均支持彩光/白光、400G/100G 接口自适应；
- （2）均支持 50km 光纤传输，且配合光放传输距离可达 100km；
- （3）均支持 L2VPN/L3VPN 业务承载，以及 OAM 功能。

		诺基亚	思科	国内某厂商
接口自适应	彩光/白光自适应	支持	支持	支持
	400G/100G 自适应	支持	支持	支持
波长配置		可按频率/索引值/波长配置，配置范围 191.3THz-196.1THz，颗粒度 100MHz	按频率/通道配置，配置范围 191.7THz-196.1THz，颗粒度 1MHz	可按频率配置，配置范围 191.3THz-196.1THz，颗粒度 100MHz
默认波长		1552.524 nm	1552.524nm	1547.72 nm
25km 场景		支持	支持	支持
50km 场景		支持	支持	支持
75km+光放场景		支持	支持	支持
100km+光放场景		支持	支持	支持
VPN 业务承载（L2VPN/L3VPN）		支持	支持	支持
OAM		支持 802.1ag 和 802.3ah 功能	支持 802.1ag 和 802.3ah 功能	支持 802.1ag 和 802.3ah 功能

3. 未来网络团队基于光电融合网络的存算拉远测试

在 AI 大模型训练与推理加速的需求驱动下，传统"存算一体"模

式因算力中心与存储中心物理分离导致的带宽瓶颈、延迟抖动等问题日益凸显。光电融合网络通过 彩光直连+智能调度 的创新架构，为 AI 存算拉远场景提供了高性能、低时延、高可靠的解决方案（如图 10 所示）。

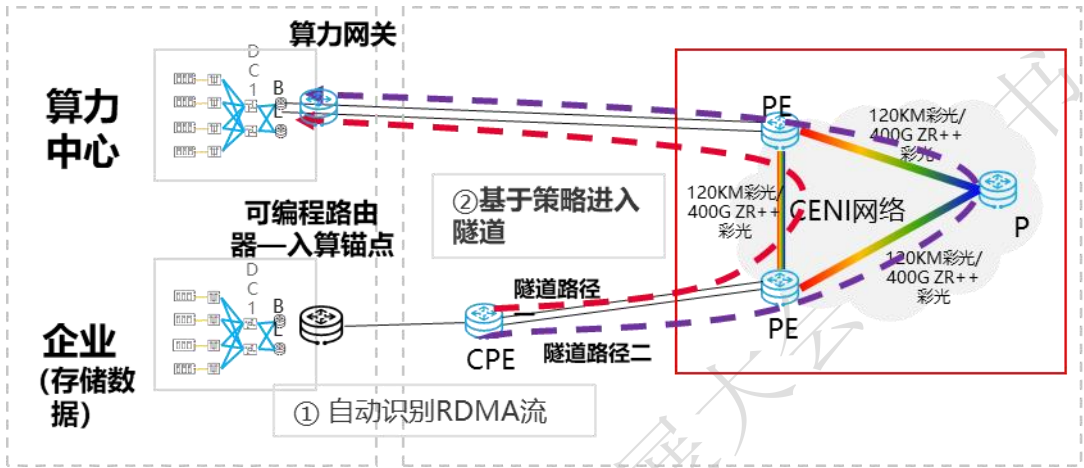


图 10. 测试组网图

算力中心与企业侧：部署可编程路由器作为"入算锚点"，支持 RDMA 流自动识别，实现不同业务流的精准分流。

CENI 网络骨干层：采用 120KM 彩光+400G ZR++彩光模块构建超长距传输链路，通过光层智能调度，实现多租户业务的资源隔离与优化。

智能管控体系：基于 SDN 控制器的全局流量感知能力，动态调整网络资源，支持算力网关、CPE 等设备按需接入，保障训练任务的高效执行。

为验证光电融合网络在 AI 存算拉远场景的实际价值，未来网络团队开展了对比测试，结果显示：

（1）模型训练时间显著缩短

传统训练方式：受限于本地存储与算力的物理绑定，训练需频繁跨节点调用数据，耗时 7.8 天；

拉远训练方式：通过光电融合网络的广域流量负载分担调度算法，结合国产软硬件平台的可编程特性，实现算力中心与存储中心的"内存直连"，训练时间降至 4.1 天，效率提升 47%。

（2）带宽资源利用率翻倍

传统训练方式：因网络调度粗放，线路带宽仅利用 51%；

拉远训练方式：依托智能全局流量感知与动态负载分担技术，100%释放线路带宽潜力，带宽利用率提升至 98%，资源浪费降低 48%。

光电融合网络在 AI 存算拉远场景中的应用，通过彩光直连降低传输时延、智能调度提升资源效率、可编程架构适配多元需求三大核心能力，解决了传统存算一体模式的痛点：

算力释放：内存直连存储中心样本数据，避免跨节点数据拷贝，充分发挥硬件算力；

成本优化：带宽利用率提升近一倍，降低网络扩容与运维成本；

扩展性增强：基于 SDN 的全局管控能力，支持多企业模型的灵活接入与动态调整。

该方案已通过实际测试验证，为 AI 大模型训练、自动驾驶仿真等高性能计算场景提供了可复制的光电融合网络范式，推动算力网络向"泛在、智能、绿色"方向演进。

4. 中国移动基于光电融合网络的智网协同训练试验

2025年7月中国移动完成业界首次800G以太网智算协同训练的现网技术试验。本次试验采用IP与光融合GSE-DCI方案，实现支持多个800G波长通道的彩光以太组网（Nx800G）。相较传统“网络设备+传输设备”方案，新技术降低40%单比特成本、35%功耗及20%节点时延。在跨智算中心700亿参数大模型训练中，采用流水线并行（PP）方式，实现高达98%以上的等效算力效率，是探索跨智算中心互联的新架构和新技术的重要突破。

七、 光电融合网络行业发展建议

7.1 发展面临的挑战

尽管光电融合网络技术已在多个领域实现初步部署，但在规模化推广与深入应用过程中，仍面临诸多挑战：

技术集成复杂性高：光电协同涉及多层协议堆叠、多维资源抽象与统一调度，现有网络架构中难以快速对接，特别是在跨域、跨厂家设备管理方面缺乏标准化适配能力。

国产化基础仍不牢固：关键元器件（如DSP芯片、相干激光器）仍依赖进口，自主研发进展虽快但生态尚未成熟，严重制约光电融合装备的“可控可用”。

运营成本控制难度大：在多厂商设备混合组网下，管控割裂、接口不统一、网络状态不可视，运维人员负担重，整体网络效能无法最

大化释放。

标准规范缺失或不统一：光电融合的开放接口、建模语言（如 YANG）、资源表达与切片等核心规范尚处于探索阶段，生态协同缺乏“公约数”。

商业市场仍待培育：光电融合的价值需与 AI 原生、确定性网络、算力调度等场景强绑定，但市场仍在验证阶段，商业闭环尚未成熟。

7.2 发展阶段划分

光电融合网络的发展历程呈现出从设备解耦到协同控制、再到智能融合的技术演进路径。根据网络功能集成度、设备协同深度与管控智能化水平，可将其划分为以下三个阶段：初始互联、协同演进、智能融合。从当前行业发展现状来看，光电融合网络正处于从第二阶段（协同演进）向第三阶段（智能融合）加速演进的关键转折期——控制协同已相对成熟（如多厂商设备的开放接口互通、跨层联合调度算法验证），而设备一体化的硬件集成（如光电融合路由器的商用落地）与 AI 智能调度的深度应用（如基于大模型的网络自治）正成为突破重点，推动网络向更高阶的“自主感知-智能决策-精准执行”全闭环智能化方向发展。

（1）初始互联阶段：光电分层，接口有限

该阶段以“光为管道、电为核心”为主导，光层与 IP 层物理解耦，分别部署。以灰光模块连接 IP 设备与传统波分系统为主，通常借助光传输设备进行封装、调度与 OAM 管理。IP 设备通过静态配置

或有线接口与光网联动，运维依赖人工干预。

关键特征：

- 光电功能物理独立，缺乏实时联动；
- 网络自动化程度低，设备封闭、配置复杂；
- 控制面未实现互通，需依赖网管平台人工协调。

典型应用场景：中小数据中心互联、城域业务承载。

(2) 协同演进阶段：控制协同，接口开放

随着相干光模块的发展和 SDN 理念的落地，光电融合逐步进入控制协同阶段。IP 设备可直接插入彩光模块，实现光电融合组网。同时，光层控制器支持 PCEP、BGP-LS 等接口，与 IP 控制器实现路径协商与资源共享，逐步建立起多层联动机制。光网设备也由传统封闭转向 YANG 建模、NETCONF 配置等开放体系。

关键特征：

- 相干彩光模块广泛应用，支持多厂商互联；
- 控制面打通，实现光电路径协同调度；
- 网络模型逐步标准化，支持编排器/控制器南北向对接；
- DCI 与“东数西算”等场景逐渐落地。

典型应用场景：大型数据中心 DCI 互联、“东数西算”枢纽间互联。

(3) 智能融合阶段：设备一体、AI 自调度

该阶段以“光电一体设备+智能控制”为核心，具备真正意义上的融合架构。典型形态如白盒路由器集成彩光模块、其他微光学模块

（如 WDM、EDFA 等），控制平面集成 AI 预测、路径智能选择与业务意图识别能力，支持切片、确定性调度、服务质量动态保障等高级特性。设备管理接口统一，光电网络实现“即插即用、即调即通”。

关键特征：

- 光电同构设备普及，资源池化与服务化；
- 控制器具备 AI 能力，具备路径预测与业务编排；
- 网络具备确定性（低抖动、微秒级延迟）保障能力；
- 强适配信创环境，支持国产操作系统与硬件平台；
- 网络配置自动化、运维“零接触”。

典型应用场景：金融专网、工业互联网、智算中心互联、边缘云网络、确定性业务承载等。

7.3 发展对策建议

7.3.1 技术层面：强化自主与开放能力

面对算力泛在化、连接确定性的新时代需求，光电融合网络在技术层面，需在 芯片自主、架构解耦、协议开放、智能协同 四大维度实现系统性突破。

核心芯片自主突破：加大对 DSP、相干光引擎、低功耗 ADC/DAC 等核心芯片研发投入，构建稳定可靠的本土技术体系。

设备解耦与模块化设计：推动光层与电层的物理分离与接口标准化，支持多厂商模块级集成，降低网络建设与演进门槛。

统一建模语言与开放协议：基于 YANG+NETCONF 构建设备建模与配置标准，兼容多种北向 API，提升编排与自动化能力。

确定性与 AI 协同创新：将确定性、路径预测、业务感知等能力与光电融合架构结合，推动低时延、高可靠新型服务保障能力落地。

7.3.2 产业层面：打造生态与标准共识

光电融合网络的规模化发展亟须打破产业壁垒，以 **标准为牵引、测试为基石、协同为引擎**，构建多主体深度参与的开放生态。通过凝聚设备商、运营商、芯片商及科研机构合力，打通“技术研发—标准制定—商用落地”全链条，为产业高质量发展注入持续动能。以下核心举措将加速生态成熟：

构建行业标准体系：鼓励产业联盟（如 ODCC、AIIA、TIP、ONF）联合设备商、运营商和科研机构制定涵盖接口、控制、测量、安全等方向的标准。

推动开放测试验证平台建设：依托国家/行业测试中心，建立典型光电融合场景测试床，支撑设备互通、协议兼容与新技术验证。

加强产业链协同合作：打通芯片、模块、设备、系统、软件、运营多个环节，加快形成“光电融合+算力互联”融合生态。

7.3.3 政策层面：强化引导与示范推广

光电融合网络的规模化部署与产业升级，亟须发挥政策 **引导、支撑、规范** 三位一体的杠杆作用。通过重大工程牵引、创新生态

培育、标准体系完善三大抓手，打通从技术研发到商业落地的关键路径，为产业高质量发展注入制度动能。以下核心举措将强化政策协同效能：

推动重大工程与试点落地：结合 CENI、“东数西算”等国家工程，在骨干网、专网等重点领域先行示范。

支持关键技术研发与产业孵化：鼓励地方政府设立专项资金，支持光电融合技术创新企业、实验室和孵化平台。

完善标准与监管机制：加快国内标准体系建设进度，增强企业参与国际标准制定能力，同时制定光电融合网络安全与质量评估指标体系。

八、 光电融合网络未来展望

未来，光电融合网络将成为支撑新型信息基础设施的关键底座，逐步从技术集成走向智能自治，实现从“能连”到“优连”、再到“慧连”的演进。随着 800G/1.6T 相干模块、AI 原生调度、确定性网络与量子通信等技术的加速成熟，光电融合网络将具备更强的服务感知能力、自主优化能力和跨域协同能力，广泛支撑智算中心互联、工业控制、车路协同、泛在算力调度等未来业务场景，推动网络架构从通用性向多样性转型，构建面向“智联万物、绿色低碳、安全可控”的新一代网络体系。

附录 A：术语与缩略语

中文名称	英文缩写	英文全称
人工智能	AI	Artificial Intelligence
人工智能物联网	AIoT	Artificial Intelligence of Things
自动化流量工程 网络抽象与控制	ACT N	Abstraction and Control of TE Networks
未来网络试验设施	CENI	China Environment for Network Innovations
光模块标准化联盟	COB O	Cloud and Carrier Optical Module Owners
光电共封装技术	CPO	Co-Packaged Optics
数据中心互联	DCI	Data Center Interconnect
双偏振技术	DP	Dual Polarization
数字信号处理	DSP	Digital Signal Processing
掺铒光纤放大器	EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
灵活栅格技术	FlexG rid	Flexible Grid

中文名称	英文缩写	英文全称
灵活光接口	FlexO	Flexible Optical
前向纠错编码	FEC	Forward Error Correction
广义多协议标签交换	GMP LS	Generalized Multi-Protocol Label Switching
互联网工程任务组	IETF	Internet Engineering Task Force
电气与电子工程师协会	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
磷化铟	InP	Indium Phosphide
国际电信联盟电信标准部门	ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
第二层/第三层虚拟私有网络	L2VP N/L3 VPN	Layer 2/3 Virtual Private Network
多源协议	MSA	Multi-Source Agreement

中文名称	英文缩写	英文全称
网络处理单元	NPU	Network Processing Unit
光通道数据单元	ODU	Optical Channel Data Unit
开放前向纠错编码	OFEC	Open FEC
光互联网论坛	OIF	Optical Internationale Federation
开放网络基金会	ONF	Open Networking Foundation
开放 ROADM 多源协议	Open ROADM	Open ROADM Multi-Source Agreement
八通道小型可插拔模块	OSFP	Octal Small Form Factor Pluggable
光传送网	OTN	Optical Transport Network
操作、管理和维护功能	OAM	Operations, Administration, and Maintenance
概率星座整形	PCS	Probabilistic Constellation Shaping
可编程协议无关	P4	Programming Protocol-Independent

中文名称	英文缩写	英文全称
的数据平面语言		Packet Processors
路径计算元素通信协议	PCEP	Path Computation Element Communication Protocol
正交相移键控	QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
四通道小型可插拔双密度模块	QSFP- DD	Quad Small Form Factor Pluggable Double Density
可重构光分插复用器	ROA DM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
远程直接内存访问	RDM A	Remote Direct Memory Access
交换抽象接口	SAI	Switch Abstraction Interface
软件定义网络	SDN	Software-Defined Networking
白盒交换机开源操作系统	SONI C	Switch Operating System for Open Networking
分段路由	SR	Segment Routing
基于 IPv6 的分段	SRv6	Segment Routing over IPv6

中文名称	英文缩写	英文全称
路由		
电信基础设施项目 API	TAPI	Telecom Infra Project API
流量工程	TE	Traffic Engineering
波分复用技术	WDM	Wavelength Division Multiplexing
远距离光模块接口标准	ZR	ZeRo Dispersion Reach
开放式相干光模块标准	Open ZR+	Open ZeRo Dispersion Reach plus

参考文献

- [1] Steven J.Hand, et al. (2023). A new operational paradigm for IPoDWDM networks.
- [2] Paul Silverstein(2023).COMMUNICATIONS MARKET OVERVIEW.
- [3] Samuel Liu(2023).Orion: A Tipping Point for Optical Networks
- [4] Simon Sherrington(2023).Scaling to 800G in operator metro core, backbone and DCI networks.
- [5] 苏林, CFA (2024) .聚焦光模块; AI 持续赋能行业增长.
- [6] Alexander Bakharevskiy(2013).Innovation for Converged IP and Transport. <https://www.osi.com>.
- [7] OpenROADM(2023). Multi-Source Agreement for OpenROADM. <https://www.openroadm.org>.
- [8] ITU-T G.709(2023).Optical transport networks (OTN) – Architecture and general aspects. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.709>.
- [9] IEEE 802.3dj(2024).IEEE Standard for Ethernet Amendment: 400 Gb/s and 800 Gb/s Physical Layer Specifications. <https://standards.ieee.org>.
- [10] ITU-T. "G.709/Y.1331: Optical Transport Network (OTN)," International Telecommunication Union (ITU), [Online]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.709>.
- [11] ITU-T."G.698.2: Optical interfaces for interworking between SDH and DWDM systems," International Telecommunication Union (ITU). <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.698.2>.
- [12] IEEE(2021).IEEE 802.3cw: IEEE Standard for Ethernet - 400 GBASE-LR8, 400GBASE-DR4, and 400GBASE-SR8.
- [13] IEEE(2022).IEEE 802.3dj: IEEE Standard for Ethernet - 800 GBASE-LR16, 800GBASE-DR8, and 800GBASE-SR16.

- [14] OIF. OIF-400ZR Implementation Agreement. <https://www.oiforum.com>.
- [15] OIF. OIF-800ZR Implementation Agreement. <https://www.oiforum.com>.
- [16] OIF. OIF-1.6T ZR Implementation Agreement. <https://www.oiforum.com>.
- [17] Open Networking Foundation. TAPI v2.4 - Transport API Specification. <https://www.opennetworking.org>.
- [18] P. H. Chia, et al(2018). RFC 8453: Architecture for Control and Management of Transport Networks (ACTN). <https://tools.ietf.org/html/rfc8453>.
- [19] OpenZR+ MSA. OpenZR+ MSA v3.0 - OpenZR+ Multi-Source Agreement. <https://www.openzr.org>.