

AI 时代的全光底座白皮书

中国联通研究院

2025 年 7 月

版权声明

本报告版权属于中国联合网络通信有限公司研究院，并受法律保护。转载、摘编或利用其他方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国联通研究院”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。



目录

前 言.....	1
一、 AI 时代业务的变化及挑战.....	3
二、 AI 时代全光底座的目标架构.....	6
(一) 立体联算全光骨干网.....	6
(二) 一跳入算全光城域网.....	8
(三) 光电融合数据中心内网络.....	12
(四) 智能管控与业务编排.....	15
三、 AI 时代全光底座的关键技术.....	18
(一) 光层.....	18
1. 超大带宽技术.....	18
2. 光交换技术.....	19
(二) 电层.....	21
1. fgOTN 技术.....	21
2. OTN P2MP 技术.....	22
(三) 网络保护.....	24
1. ASON/WSON 技术.....	24
2. OTN 无损保护技术.....	25
(四) RDMA 无损技术.....	26
(五) OTN 量子加密.....	27

(六) SDN 管控	29
1. 灵活调度技术.....	29
2. 运力地图	29
(七) 融 AI.....	31
1. 智能感知技术.....	31
2. 算网融合技术.....	32
(八) 全光底座技术演进.....	33
四、 AI 时代全光底座的新应用场景.....	35
五、 安全筑基全光底座.....	42
(一) 数据传输管道安全.....	42
(二) 设备内生安全.....	43
六、 绿色低碳全光底座.....	47
(一) 网络架构创新节能.....	47
(二) 网络设备创新节能.....	48
(三) 网络器件创新节能.....	48
(四) 网络智能运营节能.....	49
(五) 面向数据中心应用的光网络设备	50
七、 总结	51
附录：缩略语	52

前言

随着 DeepSeek、Chat-GPT、Robotaxi、具身智能等 AI 工具的不断涌现，AI 应用即将迎来全面爆发、全民普惠的时代。我国在 2024 年 12 月中央经济工作会议首次提出开展“人工智能+”行动，并在 2025 年《政府工作报告》中的“深入推进数字经济创新发展”部分明确要求“深化大数据、人工智能等研发应用，开展‘人工智能+’行动”，强调 AI 与各行各业的结合，以推动我国经济高质量发展的引擎，全面重塑算力、数据、模型及应用产业，将 AI 视为新质生产力的代表。AI 对国家的重要性已上升至国家安全与发展的战略核心，其影响深度渗透经济、社会及国际竞争的方方面面。

当前正处于 AI 产业发展的战略窗口期，中国联通洞悉 AI 时代的需求，践行数字基础设施国家队责任，聚焦打造业界领先的 AI 基础设施，目标成为全面拥抱人工智能的科技创新企业、人工智能全面领先的服务商。中国联通将优势联网通信作为 AI 基础设施的基石，在业界开创性提出了“全光底座”网络发展理念，旨在打造一张架构稳定、效率最优、体验最佳的全光网络。

2020 年，网络面向云化转型，中国联通发布了《云时代的全光底座白皮书》（称为“全光底座白皮书 1.0”），提出了光网络同时具备基础网络和业务网络两个属性，以云业务为主要需求构建组网架构，实施骨干+本地的统一组网，以全光品质业务网实现一跳直达、超低时延入云，打造云光一体的高品质网络，引起了较大反响。

2022 年，随着“东数西算”战略的具体实施，在产业互联、产业数字化的大背景下，中国联通结合算力网络的关键需求和关键特征，发布了《面向算力时代的全光底座白皮书》（称为“全光底座白皮书 2.0”），进一步提出了以算力为中心的三级网络架构（枢纽间/枢纽内/城域内），构建算力的高效流动通道。旨在以算网一体为突破，构建“5+4+31+X”算力网络，实现枢纽间 20ms、枢纽内 5ms、城市内 1ms 的时延圈，破解东西部算力调度瓶颈。

当前各行各业结合 AI 正在积极进行数智化转型，实际应用中仍存在 AI 算力资源紧缺、算力结构需优化、部分算力未能充分利用等现象，即“用不了、用不起、用不好”的问题。产业发展亟待解决算力获取、调度和使用等难题，这就对作为基础设施的全光底座提出了更高的要求。中国联通适时提出算力智联网（AINet），让算力互联更简单，让传数用算更安全，从而实现 AI 时代的高通量、高性能、高智能的适智化网络，而下一代全光底座将会为构建适智化网络打下坚实基础。

本白皮书对于 AI 时代的需求和挑战，提出中国联通新时代全光底座架构以及关键技术演进方向的思考，助力打造领先的 AI 基础设施，加速千行百业的数字化、智能化升级。

一、 AI 时代业务的变化及挑战

在全球数字化浪潮中，AI 正在成为推动各行业数字化、智能化变革的关键力量，全球主要经济体都将 AI 发展置于战略高地。算力作为人工智能发展的核心驱动力，在人工智能发展中扮演重要角色。我国率先出台了《算力基础设施高质量发展行动计划》等一系列推进算力基础设施高质量发展政策，推动中国算力规模未来达到更高水平，根据 IDC《2025 年中国人工智能算力发展评估报告》预测，2025 年底中国智能算力规模将达到 1,037 EFLOPS，并在 2028 年达到 2,782 EFLOPS。工业和信息化部在 2025 年 5 月印发的《算力互联互通行动计划》中提出加快构建算力互联互通体系，实现不同主体、不同架构的公共算力资源标准化互联，提高公共算力资源使用效率和服务水平，促进算力高质量发展。在国际上，美国开展 5000 亿美金的星际之门计划，持续大力投入 AI 发展捍卫其科技地位。欧盟也出台相应 AI 发展政策，宣布 2000 亿欧元投资智算基础设施和创新，欧洲各国电信公司也纷纷响应；中东、亚太等国家地区也相继推出其 AI 发展策略，旨在各自区域算力竞争中抢占先机，成为区域 AI 能力中心。

随着全球各区域算力发展，各种新兴联算用算场景涌现，对网络也提出新的诉求。将多个算力中心通过网络联接进行分布式协同训练，是高效用算的典型场景，训练时 1%丢包将导致有效计算时间减少到 5%，多家智算企业和运营商分别测试验证表明，通过高可靠，大带

宽的智能调度光网络，能让分布式协同训练效率达到 90%以上的超大单集群算效；企业加速 AI 部署，存算分离算力拉远的企业自有模型训练场景，能保证企业数据传输到远端智算中心训练但不落盘，打消了企业数据泄露顾虑，日本运营商 NTT 已在日本、美国、英国验证落地了基于光网络的无损低时延存算分离方案；算力中心分布式协同训练和企业的拉远用算，对网络也提出需要随时满足任务式大象流传输的新诉求，未来场景也会扩展到跨海超远距和天地一体的大数据传输；同时网络数据面临通过提升算力攻击加密网络，篡改传输数据或窃取数据的风险，因此新一代的加密技术例如量子加密技术，PQC 加密技术等逐步成为业界热点话题；万卡以上超大集群训练依旧是高性能 AI 模型的主流训练场景，更多的算力需要更多的能源供给，因此如何降低智算中心能耗、提升智算能效是关键问题，谷歌，英伟达等也在研究和部署数据中心内部光电混合网络，来大幅降低数据中心网络能耗，提升智算中心算力能耗效率。除了网络促进智算提升的场景，业界如全球电信人工智能联盟（GTAA）、中国联通、中国电信、中国移动等也在研发 AI 大模型用于网络的智能运营，提升网络的运维效率。

总的来看，AI 应用场景呈现出“流量流向、站点覆盖、服务时长”三大不确定性特点，要求 AI 时代的全光底座需要具备更大带宽，更低时延，更高可靠（网络无损），更高安全（抗量子攻击），更绿色节能，以及弹性敏捷调度和智能运营等特性，是贯通数据流通脉络，

铺就智能普惠道路的关键基础设施。只有持续突破创新，构建先进的全光底座，才能以网强、算以网赋智，满足不断增长的智算需求，从而推动人工智能广泛应用，为全产业数字化智能化注入澎湃动力。



二、 AI 时代全光底座的目标架构

AI 时代的全光底座，需要适配 AI 业务的发展需求，全光底座围绕智算中心，通过全光立体联算网络联结智算中心，实现算力成网；通过全光一跳直达城域和末端普惠泛在的接入网络，实现高效的联算和用户的灵活入算；通过光电融合技术打造高效绿色智算中心内网络，实现构建超大规模智算集群；并且通过 AI 技术赋能网络，实现网络的智能管理和运营；四个维度升级以智算为中心的全光底座目标架构如下图：



图 2-1 AI 时代全光底座架构

(一) 立体联算全光骨干网

当前我国智算资源布局存在区域分布不均问题，东部算力需求旺盛但能耗压力大，西部资源丰富但应用不足，智算枢纽和热点城市等是流量高地，但现有 400G/800G ROADM 平面和 100G ROADM 平面在覆盖能力存在差异，需要协同构建立体联算骨干网，实现算力资源的高效调度和算力资源的快速接入。

立体联算骨干网的关键特征有：

(1) 立体化覆盖

根据高速 DWDM 传输系统的组网特点，为提升光纤频谱的承

载效率，按速率组网提供上下业务的能力是技术经济合理的组网方式，可将网络分为高速互联层和基础覆盖层，其中高速互联层提供枢纽 DC 间 400G/800G 高速互联能力，基础覆盖层广泛覆盖所有 DC 和云中心，包括第三方 DC 以及用户。

(2) 算网一体协同

传统计算与网络资源分散，算力调度困难、成本高。通过算网协同实现多层次算力资源快速、安全、智能的调度，降低使用门槛和成本。算网协同包括三个层面的协同：

- **多层协同**：算和算之间的连接可能会经过多厂商网络，也可能存在主备路由在不同网络的情况，通过协同控制器，进行多网层的光缆网路路由、时延、性能等信息同步协同，统一进行连接的保护设计、最优路由选择。
- **光电协同**：单网络域内光层和电层的协同，将连接的调度、时延、光缆的 SRLG 等信息进行协同同步。同时支持光+电连接的协同建联。
- **算网协同**：将算力和网络进行融合管控，形成算力网络，一体化管控、一体化计算、一体化调度、一体化运维。将 CPU、GPU 等算力统一管理，集成云、网、边、端的一体化调度，资源统一编排，形成智能化的管控系统。

(3) 任务式调度

单 DC 向 DC 协同演进，网络从固定联接演变到动态联接，此

时联接的灵活调度和动态拆建是匹配算网协同的关键能力，同时节点资源也会向池化组网方式演进，支持带宽分时共享能力，进一步降低联接成本，此时需要光和电协同路由计算、调度，带宽分时复用，波长精细化自动调优等能力。

(4) 高可靠

引入 RDMA 无损传输、1+1 OTN 无损保护等技术能力支持智算拉远、存算分离等新业务场景，提升算效，同时通过光电协同 ASON 保护，WSON+OMSP 保护协同等多种 50ms 保护恢复保护方案，提供差异化 SLA 解决方案方案，支撑网络高品质、低时延、抗多次断纤保护能力。

(5) 智能化

结合 AI 赋能光网路，设备侧提供内生算力，内置网络模型，提供网络故障自动定位、功率自动调优，波长自动选举、同沟同缆在线检测、光缆 GIS 信息自动还原等智能化能力，支撑业务 SLA 的同时提升网络运维效率和终端用户的差异化体验。

(二) 一跳入算全光城域网

当前我国积极规划算力布局，从国家级的八大枢纽/十大集群，到省级中心 DC，再到城市级 DC，算力布局呈现逐步下沉的趋势；传统城域网络分层分级，流量南北向逐层汇聚，业务固定静态网络；AI 时代则是东西向流量剧增，算力业务需做到灵活调度，网络向动

态演进，同时算力业务对网络品质提出更高的诉求；结合 ROADM/OXC 技术，实现城域全光组网，覆盖城市 DC，波分下沉全光锚点。实现 DC 间的 1ms 波长直达、用户入算的 1ms 波长/子波长直达。

一跳入算城域网整体架构如下：

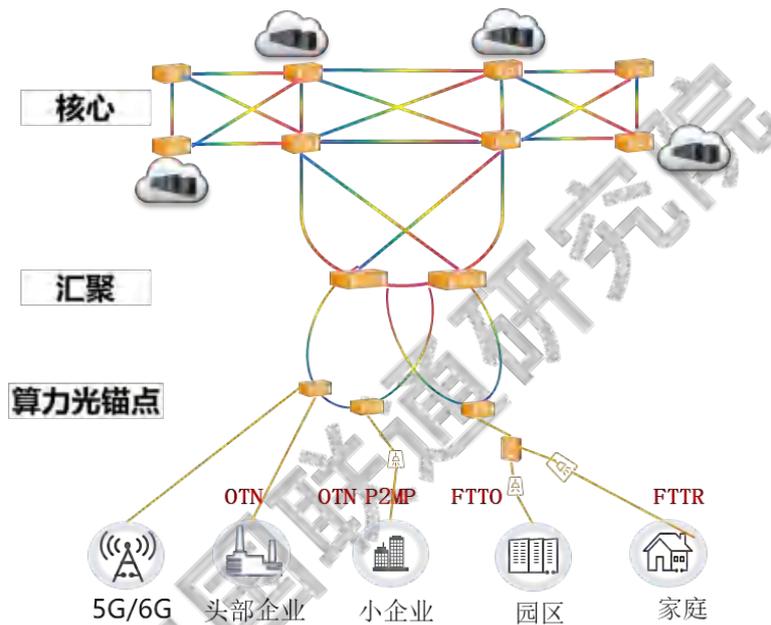


图 2-2 一跳入算城域网

南北向网络架构（DCA）：核心层 MESH 化演进，按需开通 WSON 提升可靠性；汇聚层按需增加多路由，汇聚层和接入层扁平化融合，跨网层光层打通，支持城域任意站点间的波长直达，减少电层中继和转接，减少网络时延和降低建网成本，接入层补齐光缆成环，按需升级算力光锚点，。

算力下沉城域，促进波分下沉，通过池化波分技术下沉全光接入锚点，将光锚点距离用户 500m-1km 内，支撑用户的快速、灵

活、高品质接入。结合 P2MP 技术实现中小企业的楼宇、园区的覆盖；针对家庭和其他入算业务可使用 OTN 与 OLT 对接实现家庭用户入算的差异化品质承载；针对高价值企业算力专线可使用 fgOTN 端到端承载；针对传统上网业务使用互联网平面承载，可综合考虑智能城域网；总之，通过 OTN 和智能城域网“一刚一柔”的两种方式支撑全业务承载；

东西向网络架构（DCI）：网随算动，围绕 DC 为中心建网，业务流向从南北向演进为东西向，为匹配东西向流量特征，OXC/ROADM 覆盖 DC 站点（通算 DC 和智算 DC，三方 DC 和自营 DC），与核心层融合 MESH 化。算力优先集中部署，再通过高品质网络做低时延，实现算力更广泛的高品质覆盖，以网促算，结合端算网协同为用户提供一体化服务。

综上，通过网络架构升级，构建东西向算力 1ms 高效流转，南北向原生数据 1ms 灵活入算的一跳联算入算城域网。

一跳入算城域网络关键特征有：

(1) 安全可靠

从 DCN 网络延伸考虑到 DCI 网络时，亦可将 DCN 内部 RDMA 功能协议延伸到 DCI，如果丢包 0.1%，影响计算吞吐量 30%；当前运营商网络普遍丢包率在 0.1%左右，这就需要无损 OTN 技术保证链路和 DCN 内部拥塞时的无损保护；同时通过引入 50ms WSON,保障多次断纤无损；使得 DCI 具备接近单集群的可靠性；

针对 AI 智能体、企业存算分离等场景也需防止数据被窃取，保障数据安全。

(2) 超高通量

提升 DCI 网络的光线路复用率，减少光纤租赁，同时提升单波长速率降低单 bit 成本；提升单纤容量，降低建网成本。

(3) 确定性低时延

3AZ 双活灾备要求 1.5ms RTT 时延，智算 PP，DP 训练要求通信时延稳定可控，而且 PP 需要确定性时延。面向强交互业务如云电竞、云渲染、智能体等需要 1ms 的低时延。

(4) 智能敏捷

面向 DCI 场景，智算协同训练，推理协同训练往往是比较临时，结合动态按需调度和跨域协同，提升网络资源效率。面向 DCA 场景，联接分钟级的建立，带宽按需从百兆到百 G 秒级调整，满足数据传输不同场景算力需求。

(5) 快速 TTM

大颗粒算力业务需求临时快速，需要算力专线快速开通，打造 DCI 和 DCA 高品质专线，支持算力快速服务用户。

(6) 差异化 SLA

感知业务类型等，映射不同管道，实现 SLA 保障，基于业务体验的价值增收；针对家庭高品质业务通过万兆光网 OLT 切片+OTN 管道相互映射实现端到端低时延；构建家庭、企业差异化算

力业务的高品质管道承载，将“网络升级”转化为“产品、服务能力升级”

总之，城域的联算入算业务对网络提出了更高要求，需要打造高通量（大带宽）、高性能（低时延、安全可靠）、高智能（算网协同、敏捷调度）、差异化（快速 TTM、差异化 SLA）的一跳联算入算城域网，通过以网强算，贯通数据流通之脉；构建高品质算力专网，给用户提供更差异化高品质服务。

(三) 光电融合数据中心内网络

面向大模型训练、训推一体等应用，需要预留智算集群扩展到更大规模的能力，考虑训推一体，智算卡可灵活组合、按需隔离，在规划数据中心内（DCN）网络时需要满足灵活扩展及支持算卡灵活组合需求。

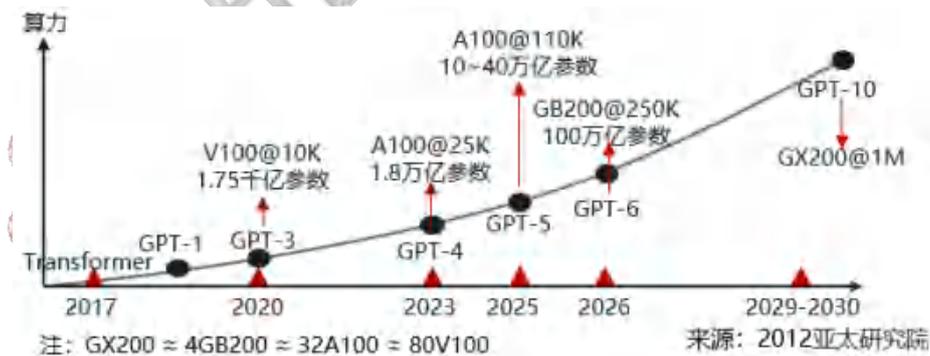


图 2-3 算力需求增长速度

结合智算中心走向大规模后传统网络面临的问题，通过光电融合、以光补电的技术解决方案 OCS（数据中心内光交叉调度）在核心层

构筑稳定光底座，实现长期复用，降低单次核心层一次性投资成本。数据中心建设颗粒度降解为 xPod，基于业务需求弹性可扩展，集群按需可灵活重构。

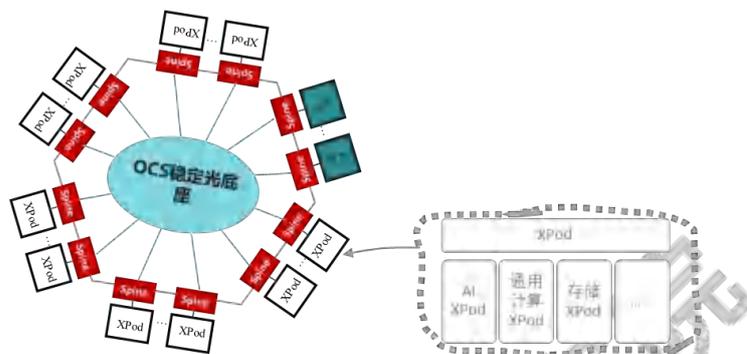
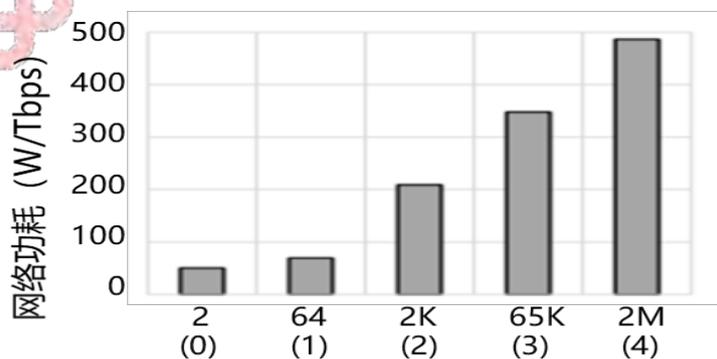


图 2-4 数据中心网络稳定光底座架构

光电融合数据中心网络的关键特征有：

(1) 低功耗

集群规模越大，集群网络层次越复杂，网络功耗占比越高，三层组网相比二层组网，网络功耗占比增加 1.5 倍。集群网络的高能耗进一步影响“双碳”（碳达峰，碳中和）的实现目标，低功耗的集群网络成为算力网络的重要考量。



网络规模（网络层次） 来源：微软

图 2-5 算卡规模与网络功耗关系

(2) 弹性可扩展

集群的建设当前基本都是分期建设为主，这也导致初期的建网成本压力会非常大，同时考虑算力扩展性问题。当光模块代际从 400G 向 800G，再向 1.6T 演进时，核心层网络需要跨代重新部署，无法跨代复用。导致集群要提前规划规模，且需要面临已部署的核心层在技术代际切换带来的演进升级问题。

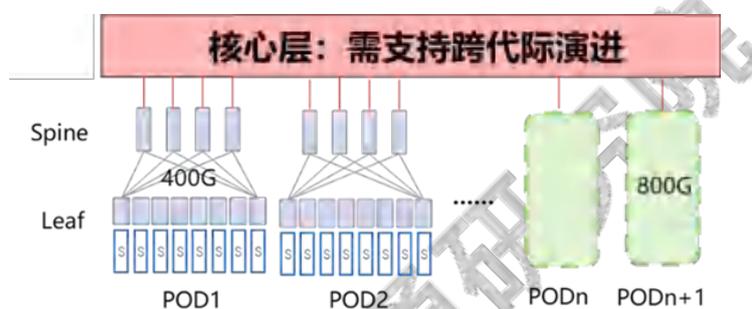


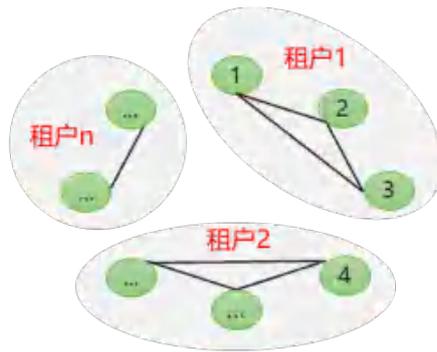
图 2-6 智算集群核心层网络长期复用

(3) 高可靠

叠加集群规模和集群网络层次的增加，将使得集群整体的失效率增加，集群网络中部件故障占比中，光模块故障占比 90%以上，因此，在大规模集群中减少光模块使用数量可有效增加集群网络的可靠性。

(4) 物理安全

在集群多租户场景下，集群的运营方必须将租户彼此隔离，租户间资源相互独立，以最大限度减少租户之间的相互影响。



多租场景拆分成多个物理隔离的小集群

图 2-7 多租户隔离

面向大模型训练、训推一体等应用，需要预留智算集群扩展到更大规模的能力，考虑训推一体，智算卡可灵活组合、按需隔离，在规划数据中心内（DCN）网络时需要满足灵活扩展及支持算卡灵活组合需求。

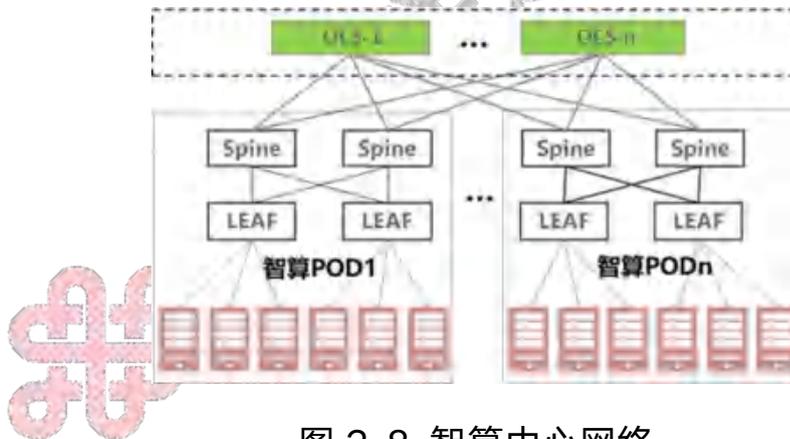


图 2-8 智算中心网络

(四) 智能管控与业务编排

针对 AI 算网业务的“不确定性”，运营系统需构建“AI 算力网络协同编排调度系统”，基于随时随地的算力需求提供敏捷任务式网络业务部署能力。将网络资源池化，利用 AI 推荐算路，多因子带宽/

时延/可用率/光缆分离等综合最优算路最优求解，给出最优波长推荐。并且可以基于性能仿真模型，求解最优上波组合。

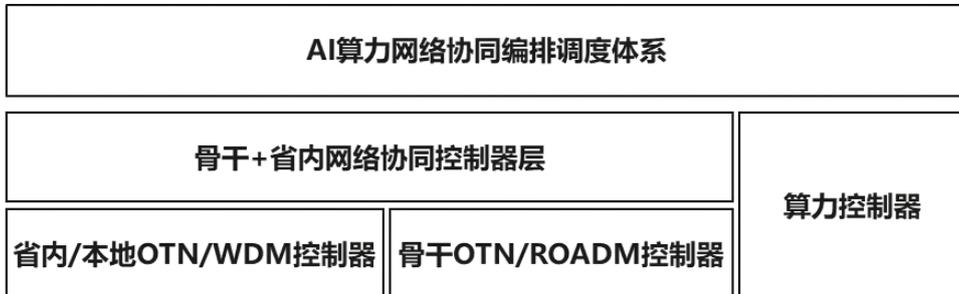


图 2-9 智能管控架构

AI 算力网络协同编排调度系统提供运力感知能力，对算力和网络一起可视，可管，可控。提供时延圈，时延矩阵统计能力。特别对于光网可以提供入算评估，按需调度两大能力，支撑算网一体销售，一体部署。入算评估，用户根据业务需求，筛选算力节点，并选择入算评估的约束条件（算力业务类型、算力节点类型、业务约束、承载技术、带宽和算路策略等），匹配最合适的算力节点，满足业务多样化需求。按需调度，做到任意方向的灵活调度，通过全光交叉 OXC 和 OTN 的配合，实现一跳直达算力节点（智算中心、云数据中心、超算中心等），让算力服务触手可及。广覆盖的算力调度节点将组成一张海量带宽、超高可靠、光电协同的算间网络，基于联通 AI 算力网络协同编排调度系统实现运力池的最优化，让算力能够在任意地点、任意时间进行灵活调配。

针对算网运维引入 AI 技术，利用 AI 强大的数据分析和信息提取能力，实现资源数字化、网络状态数字化、光缆数字化，以实现网

络运营智能化、自治化。光缆网实现同沟、同缆检测识别、GIS 路由还原。光网络性能的数字化，健康度精确评估及预测。基于以上网络数字化，提供网络状态自动检测和隐患预警的品质保障智能体，故障监测和精确定位的智能体。实现人工智能来替代人工（AI for Network），从而提升运维效率，降低运维难度。

AI 运维系统可以提供品质保障智能体和精准故障智能体，增加数字员工参与运维。品质保障智能体，可以自动采集全网纤缆层、光层、电层、业务层实时监控数据，基于数据分析和智能化算法技术实现单层风险分析、跨层关联分析、以及核心指标的归类分析。再通过四层三维的 OTN 网络质量评估模型，形成品质保障总览，全栈、立体地系统化呈现全网故障/隐患信息。精准故障智能体融合专家经验规则和机器学习算法，提供了告警降噪、告警聚合、根因分析、故障分类、故障诊断的全自动处理流程，解决了告警数量多、根因告警识别困难、处理效率低等痛点问题，有效提升了故障自动处理的能力并降低了运维成本。

三、 AI 时代全光底座的关键技术

全光底座依托一系列光电关键技术升级及软硬件能力升级来提供确定性的联接能力，通过超大带宽技术、运力池、fgOTN、OTN P2MP、池化波分（极简 WSS）、光交换 OCS 技术、升级 ASON 技术、无损 OTN 传输技术，RDMA 无损技术、灵活调度技术、运力地图、数字孪生、光缆数智化等多种技术对网络架构进行优化和技术升级，支撑提供一个好用、易用、想用的全光网。

（一）光层

1. 超大带宽技术

（1）400G QPSK 长距传输技术

当前 400G 已支撑全光底座干线部署，在东数西算，智算分布式协同等场景会产生海量数据，网络侧需要具备如 400G 超大带宽的高效数据搬运能力，同时为支持 80 波系统容量，需突破传统 C 波段限制，实现 C+L 的光层系统提供单纤 400G*80 波 32T 的超大容量组网能力，满足智算间的高效传输能力，中国联通算力智联网 AINet 即是基于 400G QPSK 超大带宽技术构建的一张国干大网。

（2）800G~1.2T 城域传输技术

由于 400G QPSK 产业链的成熟，基于同产业链可以实现 800G 及 1.2T 在城域的短距离传输，通过光电协同创新实现超大带宽和超低时延的性能。随着智算集群规模升级，分布式训练要求超低时延互联，传统 400G 带宽渐显不足，需更高吞吐量支撑实时参数同步，

800G/1.2T 将成为智算中心互联关键组件；同时城域网升级：800G/1.2T 是替换传统 10G/100G 设备，提升单纤容量，降低单位比特成本的有效技术手段。考虑到算力智联网 AINet 延伸到城域网场景，中国联通在算力智联网中将 800G/1.2T 纳入关键技术路径。

2. 光交换技术

(1) 池化波分技术

池化波分通过简化 WSS，极简相干线路模块、高灵敏度光层数字化技术，组建端到端 WSS 全光网络，任意站点间波长直达，提供速率、波长间隔随选特性，降低成本的基础上，降低光层复杂度，实现高集成、低功耗、灵活易用的大带宽接入，尤其在城域汇聚接入、国内县乡区域波分等场景部署。

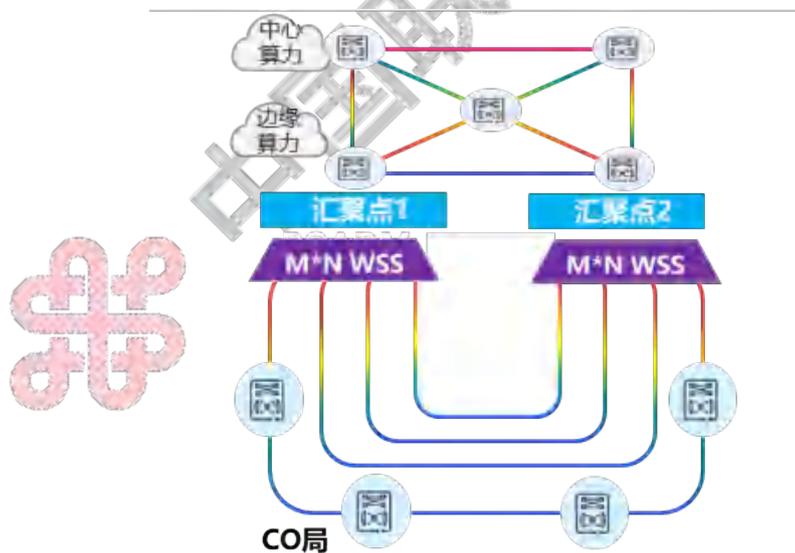


图 3-1 池化波分技术架构

(2) 数据中心光交换技术

OCS 是一种端口级的光交换设备，其原理主要有 MEMS（微机

电)、DLC(数字液晶)、AWGR(阵列波导光栅路由器)等技术作为交换引擎,再结合透镜等光组件进行光束整形和端口切换。其中 MEMS 技术利用 MEMS 驱动微镜转动,两极微镜反射改变光路完成端口切换;DLC 技术利用多层液晶折射改变光路方向,进而完成端口切换;基于 AWGR(阵列波导光栅路由器)的快速光交换,业内也开展研究中。

上述技术不仅可以在大型数据中心中应用,通过 OCS+传统 IP 交换机构成光电融合网络进行集群调度,在功耗、演进、时延有显著优势。同时也可以考虑作为自动配纤架,用在电信领域,比如海缆登陆站、干线、城域核心等场景。AWGR 是未来更细颗粒度光交换的关键技术,可应用于 scale-up 网络全互连等场景。

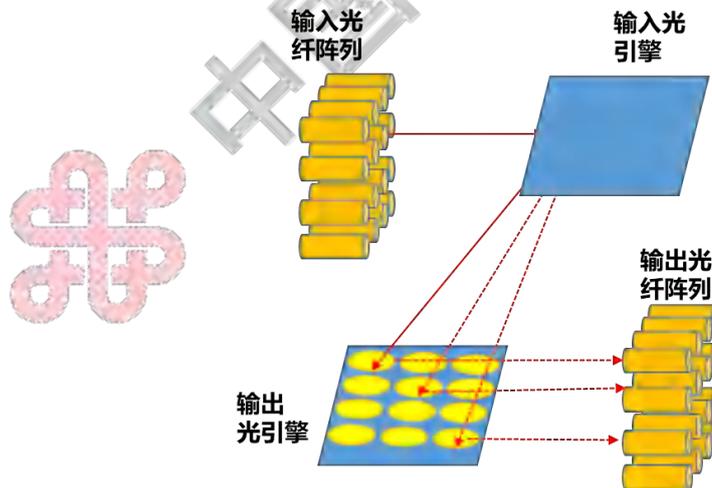
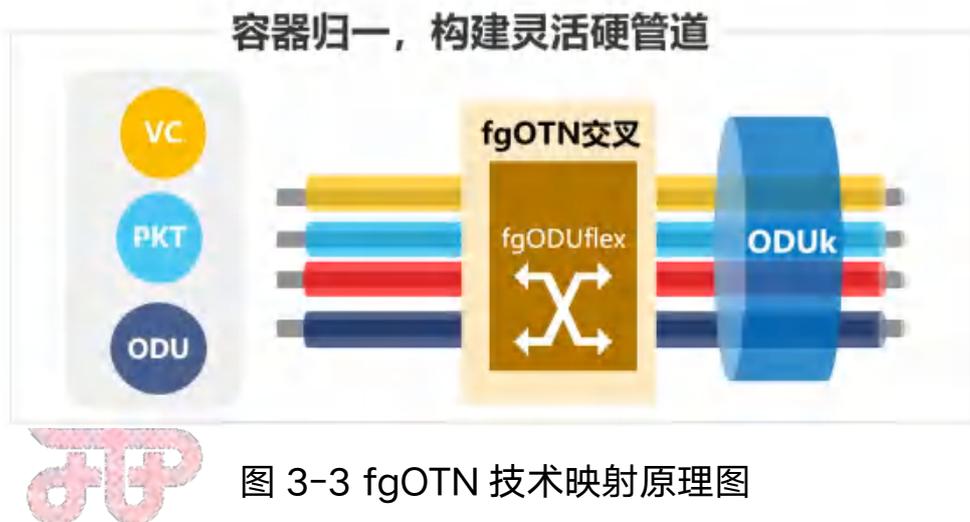


图 3-2 全光交换 OCS 原理

(二) 电层

1.fgOTN 技术

党政军金融、大企业客户对于高安全、高品质、低时延网络诉求强烈，随着 AI 应用赋能千行百业，对于网络的灵活性、智能性提出更高要求。SDH 技术进入生命周期末期面临退网和长期演进问题，OTN 技术最小管道为 ODU0（1.25Gbit/s）颗粒度大，政企业务存在大量 100M 以内大颗粒业务，如果采用 ODU0 承载会存在资源浪费问题。因此，基于细粒度光传送网 fgOTN（fine grain Optical Transport Network）新一代小颗粒技术应运而生。



fgOTN 在 TDM 技术上继承 OTN 和 SDH 优势，采用以 10M 带宽为单位的固定时隙分配设计，同时在调度容量、联接数、无损带宽调整和感知协议等方面进行了升级，可广泛应用于政企网络，满足政务、金融、教育、医疗、电力等行业 AI 新业务高品质灵活入算要求。

(1) 大容量

fgOTN 技术体系支持多芯片无阻塞互联，可实现最大 T 级调度容量，相比 SDH 80G 低阶交叉容量，可实现 10 倍以上提升。

(2) 海量联接

fgOTN 技术最小 10M 颗粒度联接交换，相比 ODU0 管道 100G 线路最大承载 80 个管道，联接数千级，提升 10 倍以上。

(3) 无损调速

fgOTN 技术支持以 10M 步长的无损带宽调整，满足政企行业客户带宽即用即取，灵活调整业务 0 中断，带宽利用率 100%。

(4) 业务感知

fgOTN 技术支持客户业务识别与映射能力，引入业务控制协议完成客户侧业务地址等信息到 fgOTN 管道的自动映射，OTN 网络可实现动态适配客户侧业务流量流向需求，按需提供 fgOTN 网络联接和带宽资源，以提供算网资源协同调度实时响应的任务式服务。

2. OTN P2MP 技术

基于 ODN 点到多点星型组网架构有利于节省光缆资源，其无源分光器无需配电设施部署快速便捷，已成为运营商覆盖最广的接入网络。光传送网采用时分复用或波分复用的硬管道技术，可提供 2Mbps~100Gbps+ 的全颗粒、高安全、大带宽的专线承载能力，适用于有高品质要求的专线用户，但末端网络覆盖不足。OTN P2MP（光传送网点到多点）专线解决方案融合光传送 OTN 高品质和光接

入 ODN 点到多点星型组网架构优势，实现企业客户的快速接入。

OTN P2MP 技术在接入侧创新性的引入了基于星型组网的 OTN 泛在接入技术，其核心基于 OTN 的 P2MP 接入技术创新，以 ODN 光缆作为接入物理介质，通过多点到点树形组网方式快速接入用户业务，同时实现端到端的固定时隙切片，双波长低时延。



图 3-4 OTN P2MP 组网场景

OTN P2MP 的架构创新，在原 OTN 的基础上，通过引入 ODN 的分光技术，通过固定时隙切片技术，实现类 SDH 的带宽分配，让业务走独享带宽，而不再是统计复用的软管道；同时在 OTN 设备上实现让业务直接走 OTN 独享通道上连到 OTN 大网，形成端到端(E2E)的硬管道。

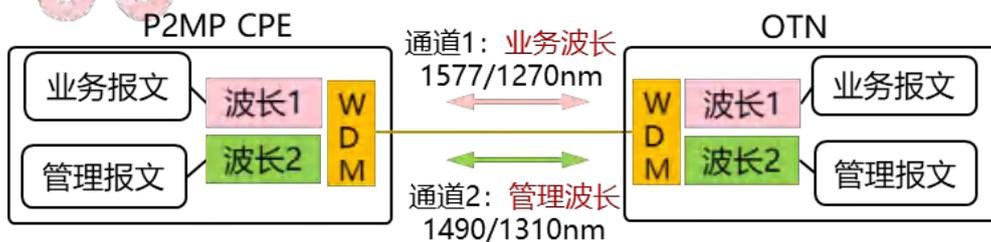


图 3-5 OTN P2MP 技术原理图

为了保障接入段的低时延，采用了双通道的技术。其中业务通道

采用 1577 和 1270nm 波长收发业务报文，管理通道采用 1490 和 1310 波长收发管理信息，业务波道专职负责数据的传输，而管理波长则负责相关管理信号独立探测 CPE 的上线情况，避免管理报文打断业务报文的正常传输、进而影响到业务的时延。这可保障接入段上行时延抖动 $<150\mu\text{s}$ ，时延抖动缩短大于 62%，为专线提供确定性的低时延保障。

(三) 网络保护

1. ASON/WSON 技术

(1) 面向干线场景

ASON 可提供抗多次光缆故障能力。针对高品质金融政企专线业务优先部署电层 ASON 技术，通过电层动态切换技术实现确定性的抗多次断纤保护+恢复能力。针对 DC 间流量可以采用光电协同 ASON 能力，通过光+电协同保护、恢复的方式，提供低成本、高可靠的业务动态恢复能力。

结合集中+分布式架构优势，提供在线的路由动态计算、可视化和生存性分析能力，提高运维效率和可视化能力。为进一步提升网络可靠性可通过在线的 ASON 可用率 APP 等技术，提供 ASON 运行分析和可用率分析能力，支撑网络可靠性提升。

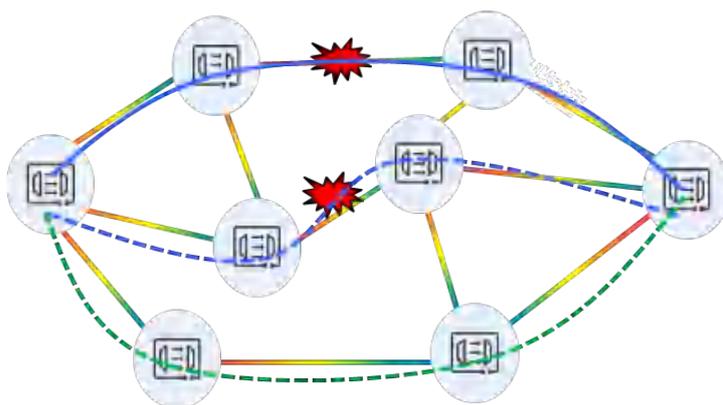


图 3-6 ASON 抗断纤网络示意图

(2) 面向城域场景

特别是算力业务的高可靠需求，引入 50ms WSON 技术；通过 WSS 快速切换技术、光放快速响应技术、线路模块快速收敛技术、协议并行硬化技术等关键突破，在城域网络把 WSON 的波长重路由恢复时间从秒级提升到 50ms 以内，结合 MESH 化 ROADM/OXC 组网架构，无需额外电层资源，提升波长级业务可靠性，可提供高性价比、高可用率、网络极简的城域 OTN 算力网络。

2. OTN 无损保护技术

AI 时代是强交付时代，网络的光纤闪断、中断带来的业务丢包，都会导致训练、推理重传，影响 AI 大模型训练效率，故无损保护成为必备功能。

网络采用主备路由报文双发组网方式，设备结合 OTN RAID 使用数据镜像 (mirroring) 将数据完全复制到两个或多个磁盘驱动器上。如果其中一个驱动器发生故障，系统可以继续从剩余的驱动器中读取数据，确保数据 0 丢失。

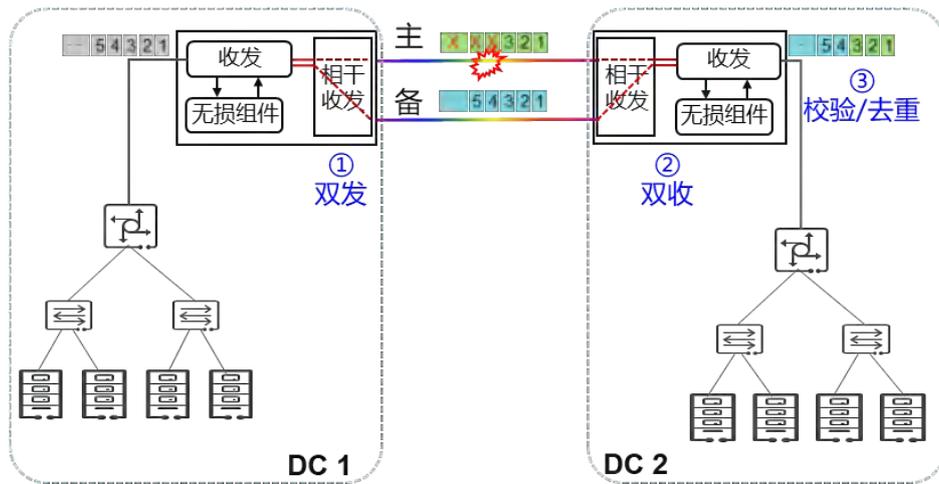


图 3-7 OTN 无损保护技术

(四) RDMA 无损技术

在智算拉远、存算分离等场景,对网络高吞吐量提出了更高要求,基于 RDMA 协议打造确定性网络成趋势。

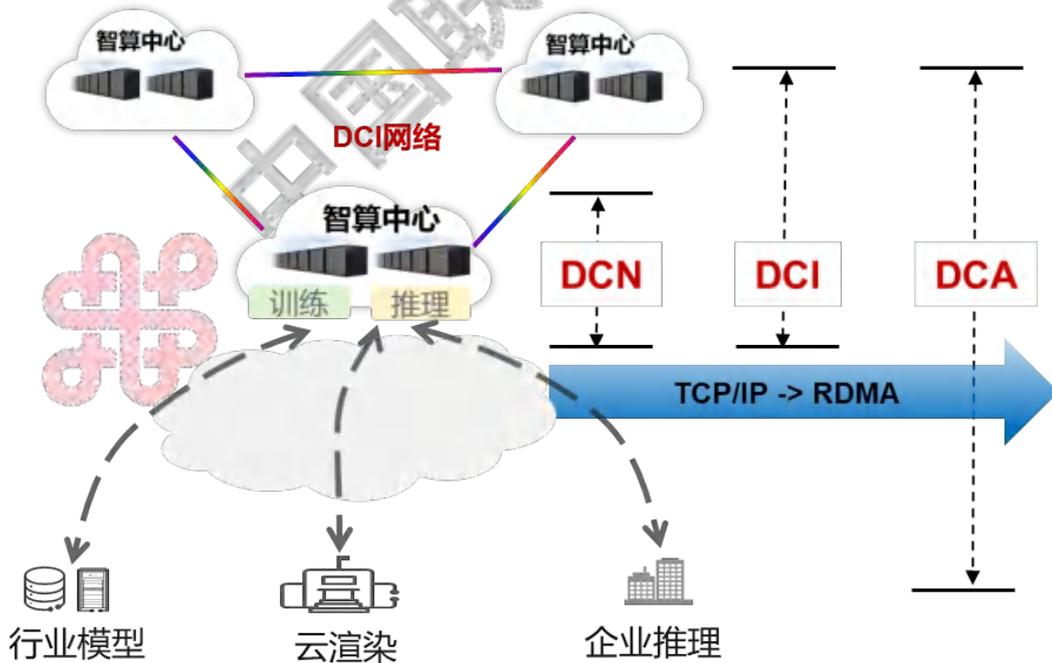


图 3-8 RDMA 协议场景演进

RDMA 的协议特征为：

- (1) **Go-Back-N 机制**：丢包重传，要求低误码率实现高吞吐。
- (2) **端口/流级流控反压**：流/端口级反压防拥塞扩散。
- (3) **低时延**：CPU 卸载/内核旁路，源宿直达。
- (4) **高吞吐**：大尺寸数据传输，高带宽访问。

由此，基于 RDMA 具备低时延等高品质特征，通过 RDMA 无损技术，实现拉远之后，DCN 拥塞 0 丢包，保证吞吐率。

(五) OTN 量子加密

与 OTN 技术相结合的量子密钥分发 (QKD) 技术方向主要有两个：

(1) CV-QKD

连续变量量子密钥分发，采用光场连续变量作为编码载体，有高速率、低成本、易集成三大优势，但安全传送距离短，已成为当前量子加密城域传送网的首选方案。

(2) DV-QKD

离散变量量子密钥分发，单光子离散态作为编码载体，安全传送距离长，但成本较高、大规模组网依赖可信中继节点。

随着量子存储和芯片技术的发展和共纤传输技术的成熟，量子加密形成“短距 CV+长距 DV”的互补格局，其有望在 5 年内实现运营商级规模部署。

OTN 与 QKD 技术相结合，配合“一次一密”的加密方式，能够保证秘钥在分配传递时不会被第三方无感知地截获信息，有效抵御各种网络攻击，提高通信网络的安全性和可靠性，并不断通过技术创新、场景创新、应用创新推动量子从实验室走向规模化商用。

(1) 技术创新

CV-QKD 基于 WDM 技术，通过增加滤波模块解决了与传统业务混传难点；通过核心器件关键技术突破，实现 QKD 小型化，完成 OTN 网络和量子加密网络二合一，有效降低建网成本。

(2) 场景创新

OTN 融合量子加密，助力 OTN 安全升级，保持 OTN 专线优势同时，叠加抗量子攻击的安全通信能力。

(3) 应用创新

云计算、算力、大数据搬运等高可靠性传输，量子加密专线提供了高安全加密传输。



图 3-9 连续变量 CV-QKD

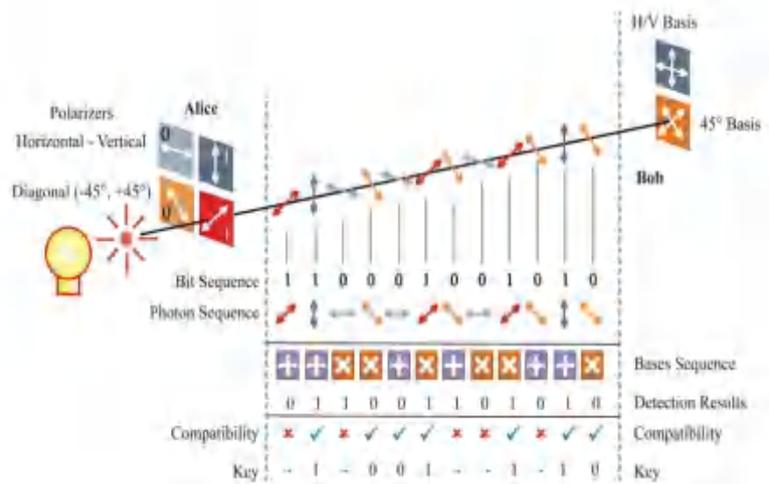


图 3-10 离散变量 DV-QKD

(六) SDN 管控

1. 灵活调度技术

突破传统静态资源分配模式，实现分钟级、小时级的敏捷调整能力，支持动态波长调度和弹性带宽分配，满足业务快速开通与灵活扩容需求，提升资源利用率。

2. 运力地图

结合设备的在线时延、带宽、中断时长等实时检测能力，同时匹配网络 GIS 信息，提供全光运力可视、可销售、可运维的“算+网”协同调配能力。

(1) 运力可视

算+网统一拓扑、网络时延、入算业务、GIS 位置一屏可视；算到网、网到算覆盖情况一键评估，支撑云池和网络布局分析；算力节点间的时延，可用带宽全局可视。

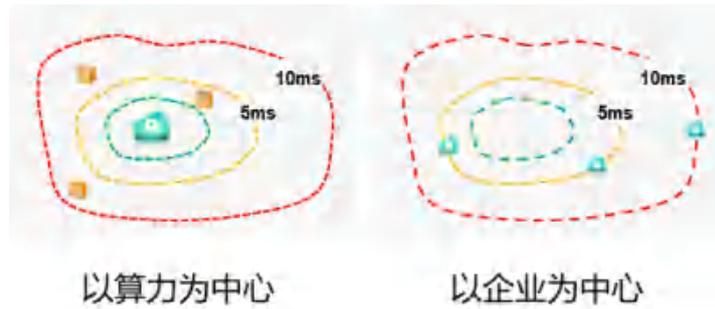


图 3-11 运力地图

(2) 入算评估

基于企业入算诉求，多因子算路，呈现用户到全网各个云池的时延、带宽，支撑算网最优选择云池；通过运力日历提供多业务分时段复用关键运力资源。

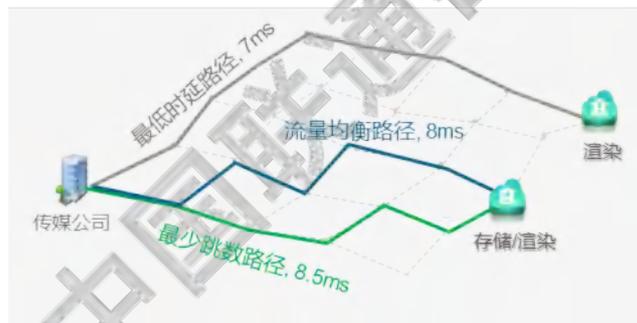


图 3-12 多因子算路示意图

(3) 算网协同

基于 AI 算力网络协同编排调度体系，实现协同资源供给，协同业务调度，协同网络运维。

同时结合网络架构和业务的基础配置，以及网络光缆、OCH、站点等可用率的统计，结合运力地图进行算间和入算的联接的 SLA 评估和预测，提供 SLA 预测和优化建议，让网络 SLA 可视、可变现。

(七) 融 AI

1. 智能感知技术

为满足多样化应用的性能需求，构建业务层、光缆层、网络层的立体化感知体系。通过网络设备融合 AI，多维度智能识别业务特征，动态匹配最优光缆资源与光层传输能力，实现精准化的业务保障。如 DPI/DFI 和流特征识别出不同的应用，针对不同应用的时延、带宽、可用率、安全性等差异化诉求，提供满足 SLA 需求的差异化承载管道，实现基于业务体验的价值增收。例如，通过如 PON OLT 识别业务后上行分流，高品质算力业务一跳直达入云和传统上网业务走互联网通道。为家庭入算提供加速业务包，打造差异化高品质入算体验。

对于光缆层和网络层，在设备侧部署多级 Sensor 采集网络各个层级参数采集，结合 AI 在线推理和分析技术，实现实时光缆网和网络资源状态识别、环境感知、故障快速定位，故障预警等能力。将光缆网、物理网融合计算，对光缆、路由等资源按照时延、SLA、带宽等多维度多层次的分级分等，匹配不同 SLA 需求，提供确定性、差异化的用户体验和品质保障，创新商用模式增加联接附加值。

其核心的能力为：

(1) 光纤闪断检测

将光缆故障检测有传统的光缆中断，提升到百 ms 的闪断检测，进一步提升对光缆故障导致的业务误码等故障检测能力。同时提供快速定位和故障溯源能力。

(2) 同沟同缆检测

在线进行同沟同缆检测，免人工敲击，支撑网络高效割接和业务主备路由分离。

(3) 主动安全防护

通过光纤的环境感知能力，预先发现异常施工和提供主动保护安全等能力，大幅降低网络故障概率和业务长时间中断概率。

(4) 性能精准评估

网络任意路由的性能精准评估，为波长任意调度提供路由检测和性能预测基础能力，确保波长算的通，开的通。

2. 算网融合技术

基于中国联通 AI 算力网络协同编排调度体系通过管控层实现光网络与算力的深度协同。基于该体系，结合多维度业务需求（如时延、带宽、算力位置等）智能推荐最优算力路径，统一将算力和网络一起调度，一起为用户提供服务。从而提升计算效率与业务可靠性。同时基于该体系提供基于 AI 赋能的运维能力：包括网络时延优化，智能故障定位，网络隐患分析等能力。

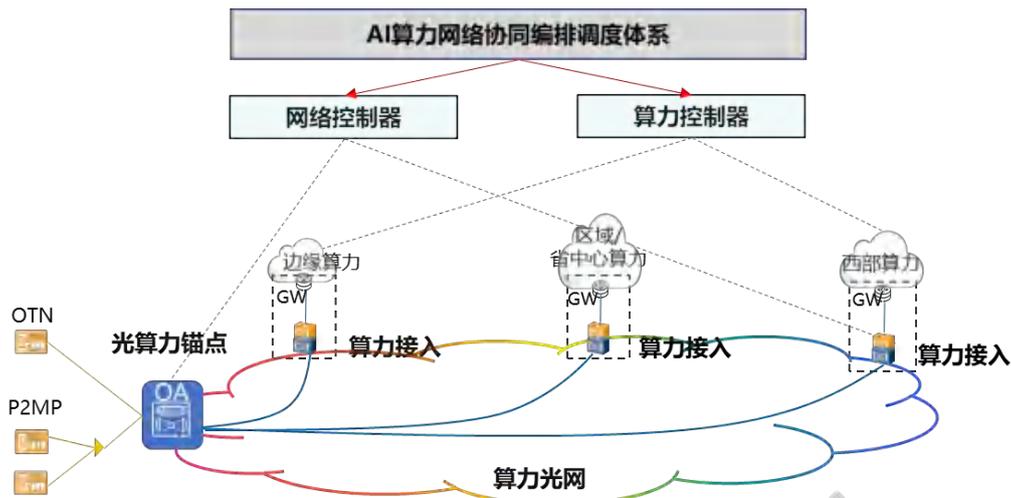


图 3-13 算网融合技术架构示意图

(八) 全光底座技术演进

展望未来，全光底座的关键技术也可应用于未来的空天地海一体化网络，空天地一体化网络是融合卫星通信（天基）、高空平台/无人机（空基）、地面移动网络（地基）及海洋通信系统（海基）的多维协同网络架构，旨在构建全域覆盖、智能互联的新型信息基础设施。空天地海一体化网络是我国新基建的”核心方向，是提升我国在全球通信主导权的关键基础设施。

超大带宽的 400G 已应用于骨干网，短距高速 800G~1.6T 也趋于成熟可在短距 DCI 和城域应用，随着行业进一步发展和产业链的逐步成熟，从单波容量发展看，基于 360GBd PCS-16QAM 甚至 512GBd QPSK 的单波 1.6T 是下一代高速传输的演进方向，技术上会面临高速器件和非线性效应的挑战。为支撑单波 1.6T 技术的进一步发展，从系统集成度与成本改进的角度来看，C6T+L6T 将无法

满足单纤 80 波诉求，此时向 C 与 L 波段外相邻的 S 波段（1460nm~1520nm）和 U 波段（1630nm~1675nm），将成为光层未来技术研究方向，此演进也会带来光层器件的新一波技术升级，但目前辑纤的设计、控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，需引入空芯光纤等，该技术预计将在 2030 年成熟并满足干线商用。

总的来说，面向未来的全光底座技术需要进一步突破光、电、基础介质及融 AI 等关键技术，向“更大谱宽、更大带宽、更远距离、更智能管控”持续演进。



中国联通研究院

四、 AI 时代全光底座的新应用场景

(一) 全光骨干网

当前骨干网主要承载的是 IP 169、云基地互联、大客户专线以及金融、政企专线业务。而 AI 模型的出现推动了千行百业进行智能化升级，尤其是像 DeepSeek 出现，使得大模型的部署难度大大的降低，而且训练和推理需求的增加也促进了算力需求的增加，同时也带来了新业务联结场景和网络需求的增加。

(1) 协同训练

受单节点算力规模、供电、建设模式等多因素影响，单节点算力无法满足超大训练任务需求，业界积极探索跨智算中心协同训练的技术和实施可行性。

(2) 存算分离

受数据安全影响，用户通过合理的切分模型，实现本地 DC 进行样本读写，通过无损光传输网络实现远程与本地的算效保障。

(3) 分布式推理

多模态和长序列将持续发展，通过跨智算集群协同实现高效推理服务，处理视频、图片、文本等内容。

以上的业务变化，将智算中心内流量延伸到智算中心间，因此带来了百 T 级别的流量，需要算力与网络的高效协同调度，网络需要实现更加智能灵活敏捷的互联。

（二）全光城域网

传统城域网主要承载家宽、专线、无线等业务，AI 的需求促使未来的城域网也将同时承载算力业务，主要场景包含两类：数据中心间的联算场景（DCI）以及终端访问数据中心入算场景（DCA）。

其中，城域的联算场景分为智算和通算互联。智算的协同训练、存算分离、分布式推理等场景应用参考如前所述，通算 3AZ（Availability Zone）互联应用有：

- **对象存储：**对数据可靠性要求极高的企业和单位，需要确保客户的数据的绝对安全和业务的不间断运营，基于 3AZ 通算网络的对象存储，可以为其核心业务提供存储保障。
- **双活灾备：**同样对业务连续性和数据的安全性要求极高的企业和单位，需要 3AZ 通算的双活灾备提供强大的灾备能力；通常两个数据中心共同分担业务流量，主备数据中心之间的数据是<1ms 的实时同步的。

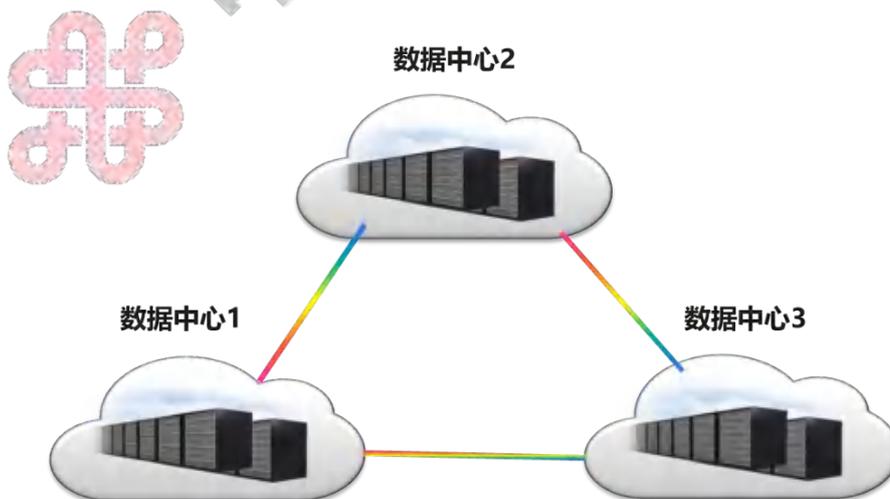


图 4-1 数据中心互联

城域入算则主要面向企业（To B）、家庭（To H）、个人终端（To C）等应用需求，如：云电竞、云渲染、云代驾、端云协同推理、云机器人、车路云、云手机、云电脑、云 PAD 等潜在入算应用。

(1) To B 场景

- **电竞行业：**如电竞酒店、网吧等随着黑神话悟空打开云电竞新业务形态，需要确定性时延；渲染行业如影视制作、广告制作、游戏制作等有上云趋势，其中渲染类是白天用算力居多，电竞应用等是晚上用算力，为此云渲染可跟云电竞算力共享，提高算力和网络利用率；可通过波长直达算力云池，满足 1ms 入算极致体验，弹性带宽，提升大网资源利用率。
- **云代驾：**萝卜快跑为例，将车辆的位置、速度、状态等数据和视频实时传输到云端，云端进行路径规划、交通状况分析等，并远程驾驶车辆；需城域网络传输时延为 1ms 的确定性低时延。
- **AI 视频推理：**银行 AI 视频推理、考试视频监考、银行数字人员工等场景，需要将视频实时传上云进行视频推理进行票据识别和防止作弊等，带来了传输带宽、安全保密和时延的需求。
- **医疗云机器人：**在远程手术中，专家医生可通过云平台操控手术机器人，为偏远地区的患者进行手术，降低医疗成本，提高医疗资源的可及性；需要稳定、高速且低延迟的网络连接，以确保实时数据传输的可靠性和准确性。

(2) To H 场景：

家庭 XR/VR、云教育、AI 智能体、云电竞等入算业务，需要实时交互低延迟，同时需要传输的数据量每秒可能达到几十 M 甚至上百 M，且要求画面不能模糊和声音不能卡顿的高品质体验，家庭智能体等需要考虑数据安全。

中国联通考虑宽带核心网新架构（BNC），家庭 OLT 联接 BRAS 可以采用多种承载方案，面向传统互联网业务可以采用智能城域网承载，家庭云电竞、XR/VR、云教育、AI 智能体等高价值、时延敏感型业务可以考虑走 OLT+OTN 端到端切片高品质管道，提供应用级的差异化体验，将“网络升级”转化为“产品、服务能力升级”。

(3) To C 场景：

AI 终端：云手机等端侧 AI 加速落地，端云协同激发流量；行业预测 AI 手机 2028 年市场份额将超过 50%，AI 机器人加速从自动化走向自主化；以 AI 手机端为例，手机算力有限，比如助手类、创作类等大算力需求，需要上云侧大模型，端侧小模型和云端大模型协同，数据不存储云侧，带动对称性流量，带来上行流量的快速增长和时延的品质要求。

对 DCA 入算光网络的需求：除了 DCI 联算需求之外，新增应用级的差异化感知和管道承载（可用率分级、安全分级、TTM 分级、时延分级等），根据不同应用提供差异化的网络服务。

一跳入算联算城域网能力升级如下：

(1) 品质升级

- **确定性低时延**：支持强交互入算业务类本地体验，3AZ 场景实时容灾备份，需要 1ms 低时延。
- **高可靠**：智算协同无损 0 丢包，保证高算效，50ms WSON 断纤不降流。
- **高安全**：企业存算分离和 AI 智能体上云等需数据绝对安全，可量子加密等技术加持。

(2) 服务升级

感知应用级入算业务，通过差异化管道承载，增加多种差异化服务，KPI 如：丢包率、安全等级、时延、带宽、TTM 等差异化分级，将“网络升级”转化为“产品、服务能力升级”。

(3) 智能升级

fgOTN 支持小颗粒多联接和无损带宽调整，针对用户的不同需求进行灵活调整带宽和调度；城域全光成网之后，支持波长级大颗粒算力业务灵活调度，快速 TTM；在业缆网层面引入智能化，结合 AI 大模型和高灵敏传感器，提供业务感知差异化 SLA、光系统性能精准评估，光缆网同路由和故障预警等检测能力；使能网络智能化升级（AI for Network）。

一跳入算城域网通过三大升级，为用户提供高品质的、差异化、一体化的算力服务。面向政企业务承载，可提质增收；面向传统互

联网业务承载，可降本增效。

（三）光电融合数据中心内网络

聚焦大规模算力中心的应用，主要是大模型的训练、推理应用等，光电融合方案的主要关键能力需具备：

（1）超大规模、低功耗、高可靠

在数据中心网络的顶层部署光交换调度 OCS，具备初期投资门槛低、超大规模的明显优势，POD 内全盒式、POD 间 OCS 调度的光电协同集群组网规模支持百万卡。在集群建设过程中，光交换设备根据业务按需打通路径，原有业务完全无损。OCS 设备百瓦级功耗，有效降低集群网络功耗，降低机房部署功率限制。OCS 无需插放光模块，有效降低光模块数量，增加集群网络可靠性。

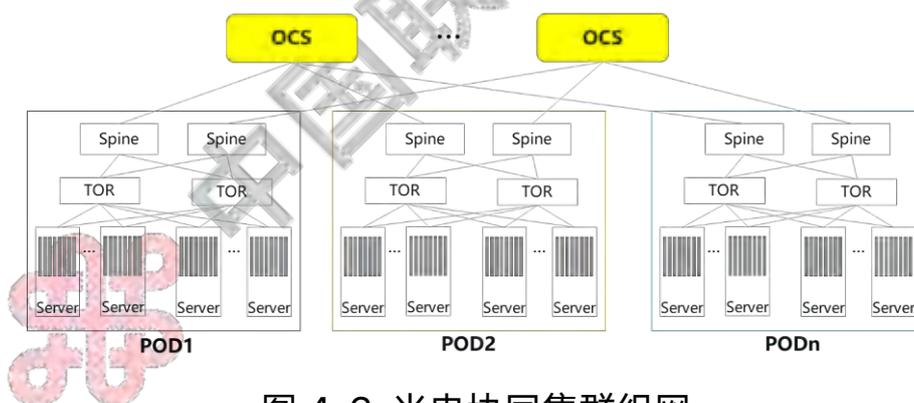


图 4-2 光电协同集群组网

（2）可定义拓扑，集群资源按需重构，租户资源灵活分配

算网协同网管，可定义拓扑网络，按 Pod/Rack 任意调度，租户/任务灵活调整算力资源组合，实现在线拓扑动态重构，租户业务规模弹性可扩展。单租户/单任务独立组网，构建物理安全隔离的租户

资源网络，提高租户资源的安全性，不同租户间的故障互不影响。

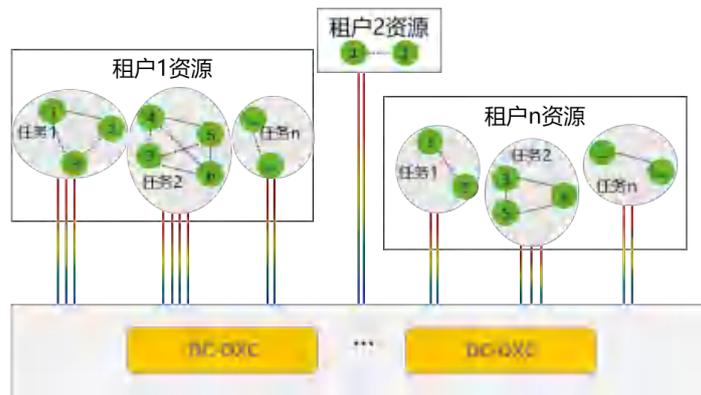


图 4-3 租户资源灵活分配



中国联通研究院

五、安全筑基全光底座

全光底座作为智算互联的核心基础设施，不仅承载着 AI 时代的关键运力需求，更是现代通信网络体系的基石，因此，全光底座的安全防护能力建设，已成为数字基础设施安全体系中不可或缺的重要组成部分。

2022 年 12 月，中国联通发布了《全光底座安全白皮书》，以全光网络的安全挑战、全光底座应具备的安全特征、安全架构和关键技术为主线，提出了联通关于全光网络安全建设的思考，当下 AI 时代面临智算新场景的安全新需求和挑战，如用户的生产数据不出园区开展训练，海量数据东数西算的高效安全传输，量子新技术的攻击等，我们认为作为运营商网络中核心基础设施的全光底座在数据传输管道和设备的内生安全防护，防量子攻击等方面进一步增强安全能力，以保障 AI 高质量发展。

(一) 数据传输管道安全

数据传输管道是 AI 算力网络的“大动脉”，其安全性直接影响数据的机密性和可用性。针对光纤通信易受物理窃听威胁的特点，需采用主动检测与加密技术结合的方式，确保数据在传输过程中不被泄露或破坏。

(1) 光纤入侵检测

作为物理层安全防护的核心技术，光纤入侵检测系统通过实时监测光纤信号的光强、偏振等参数变化，识别物理窃听或破坏行为，确

保传输介质的安全。当检测到光纤异常弯折等物理入侵行为时，系统可在毫秒级触发告警并定位入侵点，可有效抵御"光缆窃听"等高级持续性威胁（APT），保障国家级算力枢纽间的骨干网安全。

(2) 光层数据加密传输

光层加密传输技术通过在物理层实施信号加密，为数据传输链路提供卓越的机密性保护能力。该技术采用光量子噪声流加密等先进方法，将加密过程直接集成到光层调制解调环节，在确保高安全性的同时，完全保留了光纤通信系统的高带宽特性。系统应采用国密 SM4、SM9 等高强度加密算法，或符合国际标准的 AES-256 等密码算法，通过硬件加速实现线速加密处理，确保传输数据在全生命周期内的安全性。这种基于物理层的加密方案不仅能有效防御传统网络攻击，更能抵御针对光电转换设备的旁路攻击，为 AI 算力网络构建了坚实的底层安全屏障。



图 5-1 支持窃听检测的 OTN 加密网络

(二) 设备内生安全

在 AI 算力网络中，光传输设备的内生安全至关重要，直接影响模型参数和训练数据的机密性、完整性以及整个系统的稳定性。这些

设备（如光传送设备）一旦被攻破，可能导致核心数据泄露、训练数据污染或网络瘫痪。根据中国联通《全光底座安全白皮书》与 CCSA 行业标准《传送网设备安全技术要求 第 5 部分：OTN 设备》对光传输设备提出的内生安全能力要求，AI 时代的光传输设备应满足以下内生安全架构。



图 5-2 光传送设备内生安全架构

(1) 硬件安全

在下一代全光底座中，光传输设备需构建基于硬件可信根的全方位信任链体系，实现安全启动、逐级度量和远程证明能力，确保光传送设备加载软件、使用的配置来源可信的、未被篡改的。同时，需支持硬件级加解密引擎，在保障数据加密传输的同时确保数据传输的性能不受影响。

(2) 系统安全

AI 算网中的光传输设备应使用固件加密、系统加固技术，确保设备固件不泄露、不被恶意逆向分析；通过 OS 内核、开源软件安全选型、漏洞修复能力，保障设备运行的关键组件无可被利用的高风险漏洞；通过安全编码、权限最小化能力，从源码开发、安全设计角度提升设备被攻击者非法利用的难度。同时，光传输设备应具备系统入侵检测和响应能力，实时感知系统的安全状态，避免系统长时间被黑客利用而无法感知，保持光网络设备的持久安全。

(3) 网络安全

安全加密是保障数据安全传输的重要能力，数据安全加密可以有效保护传输数据的机密性，数据安全加密的强度取决于加密算法抗攻击能力。随着量子计算的快速发展，新一代 AI 算力网络中的光传输设备须构建量子安全防护体系，一方面通过支持标准化的 PQC（后量子密码）算法，以应对 Shor 算法对现有公钥体系的威胁；另一方面需集成 QKD（量子密钥分发）技术，为分布式 AI 训练节点间的敏感数据交换提供信息论安全的密钥保障。这种融合经典密码学与量子安全技术的多层次防护架构，能够有效满足 AI 算力网络对高性能、高安全性数据传输的严苛要求，为大规模模型训练和推理任务构建面向未来的安全传输通道。



图 5-3 抗量子 OTN 加密网络

(4) 数据安全

AI 算网中的光传输设备应支持管理面数据、系统敏感数据（如日志、密钥、证书等）的加密，同时加密密钥应支持集中分层管理，确保设备中存储和传输中的关键数据不被恶意截获与篡改。

六、绿色低碳全光底座

根据《数据中心综合能耗及其灵活性预测报告》指出，到 2025 年底我国数据中心电耗将占到全国电耗的 2.4%，一些节点城市和区域占比超过 20%，到 2030 年数据中心用电量将占到全社会总用电量的 4.8%。在能耗增加的压力下，通过网络提升智算能效成为 AI 绿色发展的关键措施，而全光底座作为 ICT 节能技术的代表，也将在 AI 可持续发展中发挥重要作用。

(一) 网络架构创新节能

通过三层网络架构优化设计，实现业务端到端的灵活直达，提升数据传输效率。

(1) 网层优化设计

通过简化网层，端到端实现光联接，使能业务从客户侧一跳入云，直达智算中心，减少跳转损耗；同时实现高性能传输，可将数据远距离传递至绿色低碳数据中心处理，节能减排。

(2) 链路优化设计

端到端采用多维度 ROADM 光交换技术，通过光路灵活调度，实现业务全光传输任意可达，减少电-光-电交换路由次数并节能降耗。

(3) 传输优化设计

采用无损传送技术，端到端采用确定性大带宽极简设计（统一相干传输），确保传输数据无竞争无丢包，减少数据重传能耗。

(二) 网络设备创新节能

提升设备能效的低碳设计是面向 AI 时代网络设备设计方向：

(1) 高集成高能效

单端口可支持>1.6T 的速率,单台设备可支持>50T 的交换容量,集成支持 HVDC, 供电池化、前后风道等高能效特性。

(2) 低碳化设计

采用低碳, 可再生的材料, 例如可再生铝、再生塑料等; 减少高功耗加工技术, 例如高功率波峰焊等。使能设备制造减碳。

(3) 数据中心高效光互联

单台光交换机支持近千个光端口, 减少机架数量与冷却需求。无模块联接, 光交换机不用配置光模块, 比传统路由器放在在核心层节省一半的光模块功耗, 同时也电信号在设备内部的多次光电转换, 提升 AI 训练数据传输效率。

(4) 内生智能化设计

设备内生算力支持, 满足设备智能化控制降耗诉求。

(三) 网络器件创新节能

(1) 芯片节能

芯片具备管道开关和工作频率可调特性, 在不同负载下, 可以通过关闭未用通道, 或降低芯片工作频率来节能芯片工作功耗。

(2) 光模块节能

通过引入线性驱动（LPO）、光电合封（CPO）等新型光模块和互联技术，提升信号传输效率，降低单位带宽功耗。

(3) 传输介质提效减排

引入空芯光纤，相对传统光纤减少 1/3 的时延，提升单位功耗可传输数据距离，减少中继能耗，也可提升数据中心 AI 训练效率。多芯光纤的部署，以 4 芯光纤为例，可实现一次性光纤部署可支撑传送容量达到传统光纤的 4 倍，减少多次光纤部署的整体网络碳排。

(四) 网络智能运营节能

结合 AI 算法和网络运营 Agent，光网络可构建能耗“感知-预测-优化”闭环系统：

(1) 流量预测

通过历史业务模式训练网络大模型，构建 Agent，可智能关闭非高峰时段的冗余光通道（如夜间关闭无算力访问的链路带宽需求）。

(2) 拓扑优化

基于实时能耗数据，智能选择最短光路径或低损耗波段，以及根据链路外部信息智能选择有绿电供电的设备链路，避免绕行导致的额外功耗。

(3) 设备休眠

当光模块处于空闲状态时，可通过智能切换至低功耗模式，动态

调节数据流经设备芯片的工作频率等来进行网络降耗。

(五) 面向数据中心应用的光网络设备

当前,枢纽及核心机房在从传统的低功耗、低效率机房向兼容 CT、IT 高功耗设备的绿色数据中心机房演进,现网大容量 OTN 设备可以通过迭代,配合机房热改造,助力实现机房绿色低碳目标。面向数据中心机房的 OTN 设备是传送网在节能降碳领域的关键研究对象,通过对其进行技术研究,基于统一标准的设备,便于运营商机房的统一规划,有利于绿色低碳机房的整体目标达成。面向数据中心机房的 OTN 设备风道应为前进后出,机房热管理采用冷热隔离,与前进后出风道匹配,匹配设备温度规格要求;风冷情况下,设备功耗应优选不超过 15kW,最大不超过 25kW;设备尺寸优选 19 英寸,可选 21 英寸。



七、总结

中国联通洞察时代变化，在行业中创新性提出了全光底座的理念，从云时代的业务传输管道（全光底座 1.0）、算力时代的算力调度枢纽（全光底座 2.0），演进为 AI 时代的“智能联接中枢”，即 AI 时代的全光底座。AI 时代的全光底座是不仅是支撑中国联通打造面向智能时代的“适智化”网络（算力智联网 AINet）最有力的理论武器，也是为行业提出了“联通思考”。AI 时代的全光底座的核心使命不再局限于数据传输，而是深度融合算力与智能，成为支撑万亿级大模型训练、百万边缘节点协同、千行万业的数字化转型的智慧化基础设施。



附录：缩略语

缩略语	英文全称	中文名称
3AZ	Three Availability Zones	三个可用区
AES	Advanced Encryption Standard	先进加密标准
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AIDC	Artificial Intelligence Data Center	智算数据中心
APT	Advanced Persistent Threat	高级持续性威胁
ARPU	Average Revenue Per User	平均每用户收入
ASON	Automatically Switched Optical Network	自动交换光网络
AWGR	Arrayed Waveguide Grating Router	阵列波导光栅路由器
BNC	Broadband Network Core	宽带网络业务核心
CNN	Convolutional Neural Network	卷积神经网络
CV-QKD	Continuous-Variable Quantum Key Distribution	连续变量量子密钥分发
DFI	Deep Flow Inspection	深度流检测
DLC	Digital Liquid Crystal	数字液晶
DP	Data Parallelism	数据并行
DPI	Deep Packet Inspection	深度报文检测
DV-QKD	Discrete-Variable Quantum Key Distribution	离散变量量子密钥分配

EFLOPS	one quintillion 10^{18} Floating Point Operations Per Second	每秒一百京/一百亿亿次的浮点运算
fgOTN	fine grain Optical Transport Network	小颗粒光传输网络
FTTO	Fiber To The Office	光纤到园区
FTTR	Fibre To The Room	光纤到户
GIS	Geographic Information System	地理信息系统
GTAA	Global Telco AI Alliance	全球电信人工智能联盟
IDC	Internet Data Center	互联网数据中心
LPO	Linear Pluggable Optics	线性可插拔光模块
MEMS	micro-electro-mechanical systems	微机电系统
OCS	Optical Circuit Switch	全光交换机
ODN	Optical Distribution Network	光配线网络
OLT	Optical Line Terminal	光线路终端
OTN	Optical Transport Network	光传送网
OXC	Optical cross-connect	全光交叉连接
P2P	Point-to-Point	点到点
P2MP	Point-to-Multipoint	点到多点
POD	Performance-Optimized Datacenter	高性能数据中心
PP	Pipeline Parallelism	流水线并行

PQC	Post-quantum cryptography	后量子密码技术
QKD	Quantum key distribution	量子密钥分发
RDMA	Remote Direct Memory Access	远程直接内存访问
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer	可重构光分插复用器
SLA	Service Level Agreement	服务等级协议
SM4	SM4 algorithm	SM4 算法
SM9	SM9 algorithm	SM9 算法
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波分复用



中国联通研究院

中国联通研究院根植于联通集团（中国联通直属二级机构），作为中国联通科技创新专业子公司，自2022年起，挂牌成立中国网络安全研究院、下一代互联网宽带业务应用国家工程研究中心及首个国家级网络安全产业知识产权运营中心，形成“两院两中心”发展格局，开创了研究院高质量发展的新局面。

中国联通研究院作为服务于国家战略、行业发展、企业生产的战略决策参谋者、技术发展的引领者、产业发展的助推者，坚持以高水平科技自立自强为使命担当，聚焦网络强国、数字中国主责，拓展联网通信、算网数智业务，形成“态度、速度、气度、有情怀、有格局、有担当”的企业文化，以下一代互联网、光网络、5G-A/6G、网络安全、数智网优、低空智能网联和新型智库研究七个领域为主攻方向，坚持“四个聚焦”，开展关键核心技术攻关、科创力量建设、专业技术人才队伍建设、创新成果转化等工作，着力实现价值创造提升、战略科技力量提升、专精特新能力成色提升，争做通信行业科技创新主力军，努力建设成为“国家信赖、行业领先、集团倚重、员工自豪”现代化一流研究院。

战略决策的参谋者 技术发展的引领者 产业发展的助推者

态度、速度、气度

有情怀、有格局、有担当

中国联合网络通信有限公司研究院

地址：北京市亦庄经济技术开发区北环东路1号

电话：010-87926100

邮编：100176



中国联通研究院



中国联通网络技术