

加速全球海底网络互联

为端到端海底-陆地网络提供全面且差异化的解决方案



NOKIA

海底网络是全球互联互通的生命线

光纤网络为现代社会提供了无处不在的连通性，是支持全球金融交易、关键商业流量、国防、娱乐和个人互动所需数据流动的基石。光纤网络延伸至城域网中的家庭、企业和5G基站，连接国家内部的城市以及各大洲内部的国家。跨越海洋和各大洋的海底光缆则将这种连通性扩展至各大洲之间。

光纤巨大的数据传输容量推动了海底光缆的广泛部署。如今，超过570条在役海底光缆承载着超过99%的国际流量，连接着全球的数据中心，以提供基于云的服务和新兴的人工智能服务。

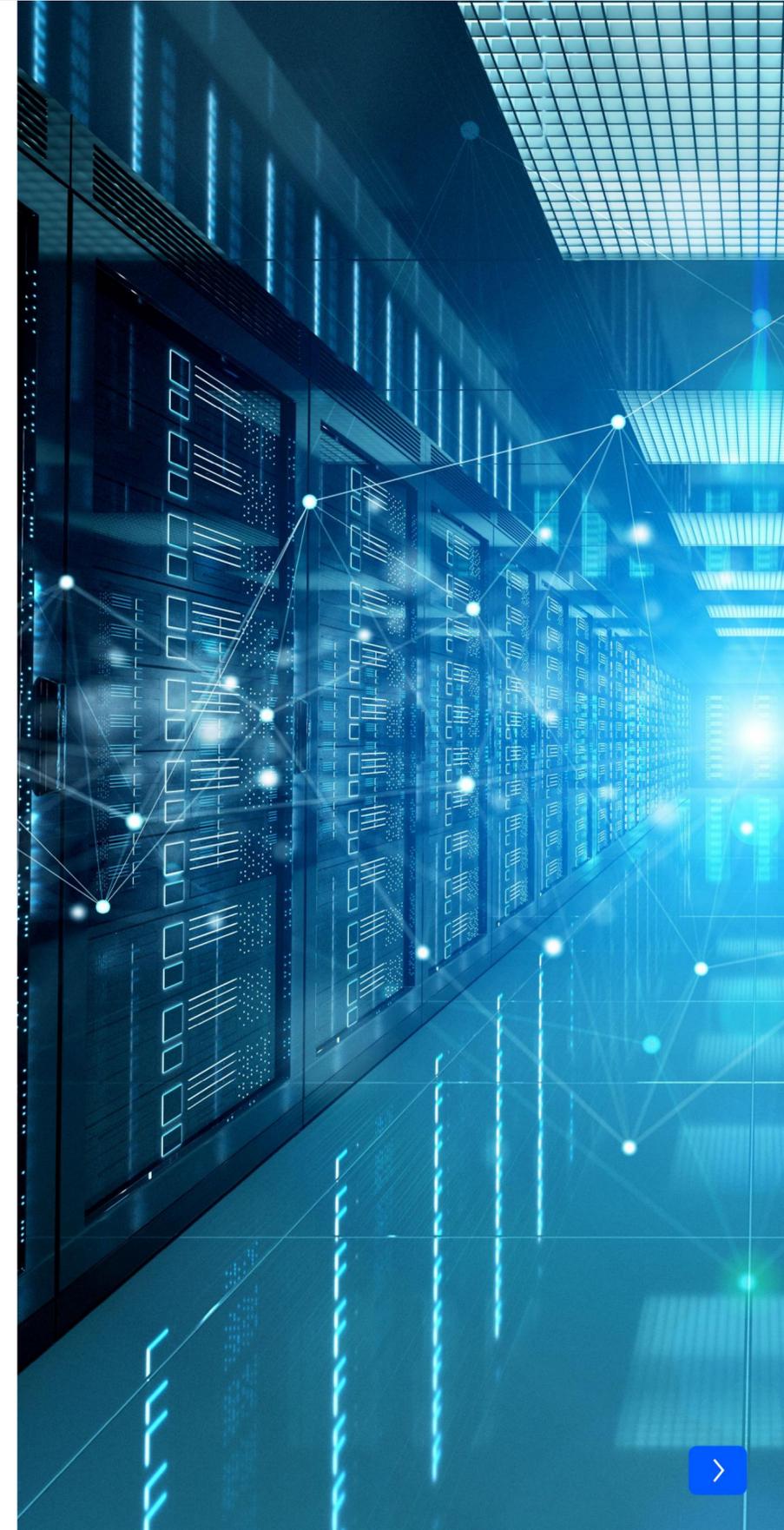
当前，由人工智能训练和推理的计算需求驱动，一场大规模的全球数据中心建设浪潮正在进行中。这些建设由一系列人工智能和云提供商引领，包括超大规模云商、新型云和人工智能公司，它们都致力于开发具有市场领先地位的人工智能模型以及基于人工智能的智能体和应用程序，这些技术有望变革工作和社会。

这些数据中心将容纳规模日益庞大的互联 XPU 集群，这些集群是机器学习和人工智能训练的引擎。现代人工智能训练和大语言模型需要一种"纵向扩展"的设计，成千上万个 XPU 作为一个单一的逻辑单元运行，而这些 XPU 集群之间所需的互联带宽很快将超过每秒 1 拍比特；这比传统数据中心基于服务器的互联网流量高出数个数量级。数据中心内部所需的互联带宽将呈爆炸式增长，包括连接机架或机柜内 XPU 的"纵向扩展"带宽，以及连接数据中心内众多 XPU 机架之间的"横向扩展"带宽。与此同时，对城域、区域和长途数据中心互联带宽的需求也将增加，因为单个数据中心的最大规模限制以及训练协议的改进，要求和推动着人工智能训练的连接能够通过"横向扩展"架构分布在多个数据中心之间。

除了陆地数据中心互联链路之外，从数据中心向全球终端用户提供的人工智能应用和云服务的部署，也将推动对更多全球海底光缆容量和连通性的需求。

如今，光纤网络连接着全球超过 11,000 个数据中心，其中超大规模数据中心超过一千个。这些数据中心每天产生超过一千拍字节的广域网流量。诺基亚贝尔实验室预测，到 2033 年，全球人工智能广域网流量将在持续增长的云服务基础上，额外增加超过 1,088 艾字节/月的容量，年复合增长率达到 24%。就年度带宽增长而言，这延续了近期行业趋势，即海底光缆传输的带宽每年增长约 30%。

海底网络将在全球范围内推广人工智能和云服务效益与能力、为世界各地的经济体和人民实现数字平等方面发挥越来越重要的作用。随着新光缆的规划部署和现有光缆的容量升级，海底网络将提供连接区域内及全球数据中心的关键基础设施。



海底光纤网络是如何建成的？

所有海底光纤网络的根本特征在于其沿着海床进行部署，这带来了所有随之而来的限制。海底光缆可以跨越数十或数百公里，连接岛屿之间、沿海岸线、穿过海峡，或连接至用于石油勘探或风电场的海上平台等。它们也能跨越数千公里，连接各大洲和横跨海洋的广阔区域。

根据传输距离的不同，会采用沿海底光缆的光放大技术来增强传输的信号。无中继光缆（通常不超过 500 公里）可以在没有任何有源供电海底放大器的情况下跨越海底链路，而有中继光缆则用于跨越更长的距离，在某些情况下超过一万公里。

有中继光缆采用特殊设计的掺铒光纤放大器，能够在海床运行，并通过海底光缆内部同轴包装的铜导体进行远程供电。在某些情况下，光缆可能包含水下分支单元，用于将业务流量分离到不同方向，或分出一部分用于本地与陆地的连接。所有这些海底部件的总和通常被恰当地称为“湿端设备”。

海底光缆在多个方面有别于陆地网络中的对应物。

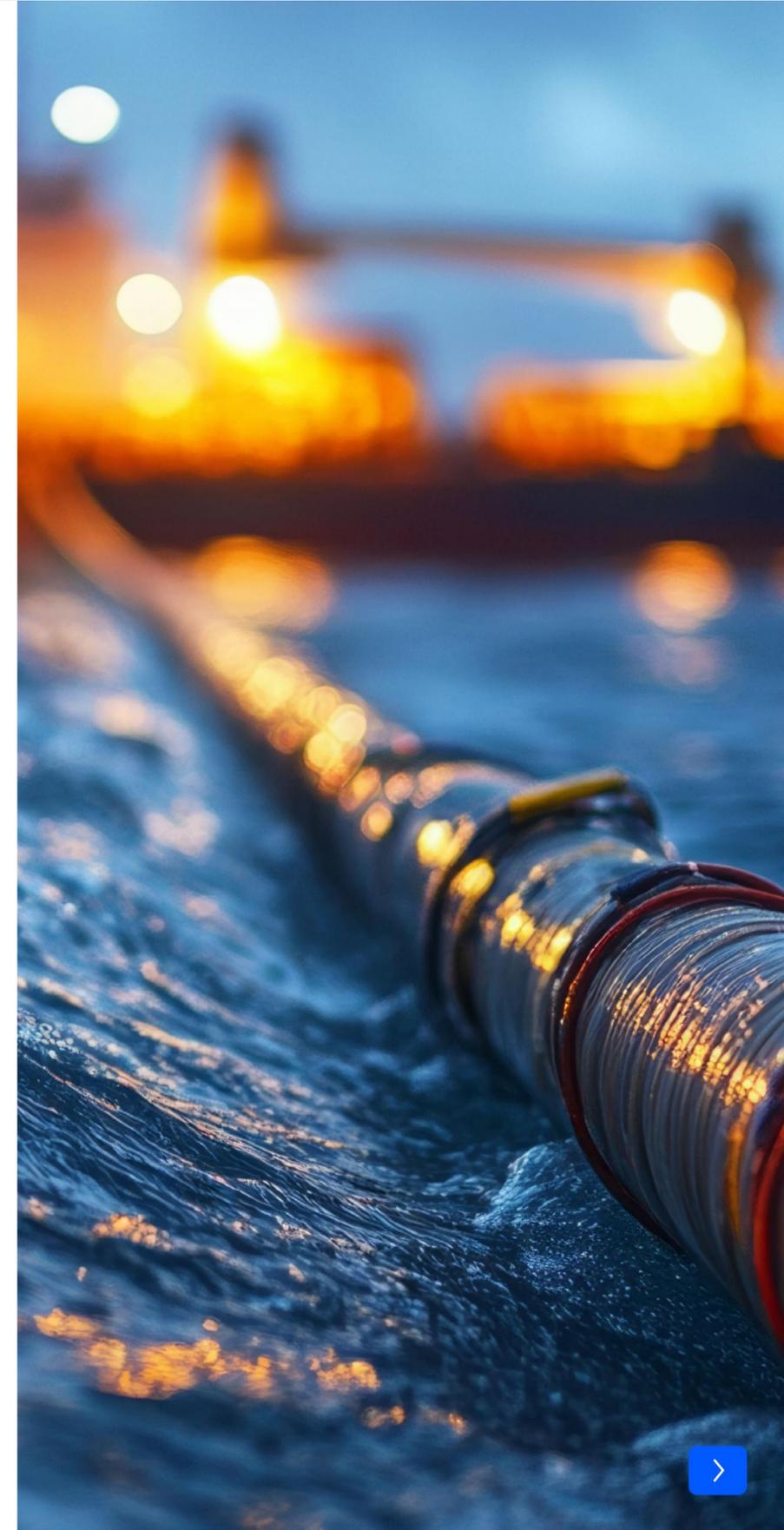
首先，海底光缆需要更强的机械保护，包括铠装金属护套，以承受埋设在海底所承受的压力，并防止船锚或渔网可能造成的损坏。由于这种坚固设计的限制，海底光缆通常包含 4 到 12 对光纤，而陆地网络则可容纳数百对光纤。最近，正在部署更高纤芯数的光缆，支持 16 到 24 对甚至更多光纤，这些通常被称为空分复用光缆。

最后，为了在数千公里的传输距离上最大化传输性能并优化光信噪比，海底光放大器以恒定功率输出模式运行，该模式假定所有波长均处于激活状态，并且它们沿海底光缆均匀分布，在现代光缆中典型间距为 60-80 公里。这与陆地网络形成对比，在陆地网络中，线内放大器的间距变化很大，从 40 到 120 公里不等，这受到站点条件以及容纳线内放大器机房电力可用性的影响，并且陆地线内放大器通常利用动态增益来根据在用的激活波长数量调整输出功率。

海底光缆所承载的流量会经过一个电缆登陆站，海底光缆在此处起始和终结。这些电缆登陆站配备了发起和终结海底流量所需的光学和电子设备，称为海底线路终端设备。

在许多情况下，海底光缆并非孤立存在；其承载的流量必须通过一个陆地光纤网络（通常称为“回传”网络）到达陆地上的最终目的地。

这些陆上回传网络将流经电缆登陆站的海底流量连接至数据中心、接入点、对等点、互联网交换中心，或者在国际流量需跨越中间陆地路段时，连接回另一个电缆登陆站。



海底线路终端设备由哪些部分组成？

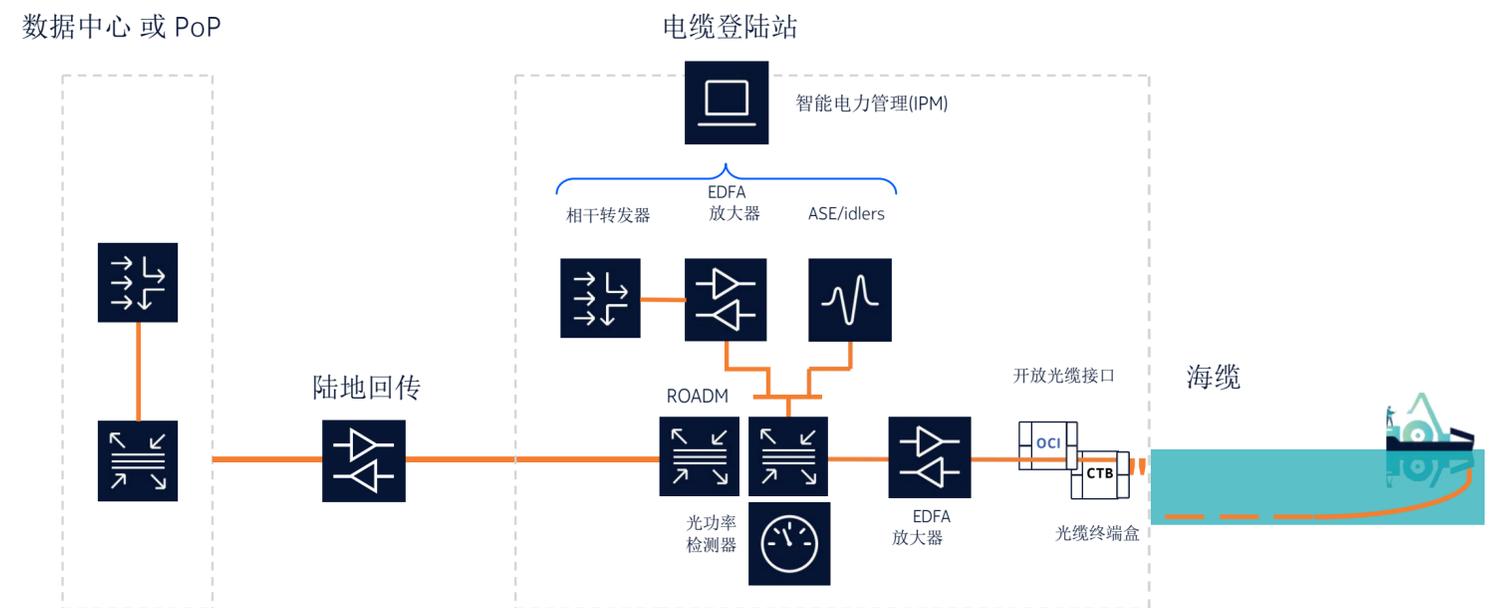
海底光缆信号的传输与检测始于陆地。转发器中的高性能相干光技术负责汇聚数据流量，多个转发器并行地在海底光纤的光谱（通常在C波段）内，通过不同的波长发送数据。转发器可以部署在海底光缆的起始/终止点——即电缆登陆站，也可以部署在流量需求的端点，如数据中心、接入点或互联网交换中心。

当海底流量在电缆登陆站终结时，会采用背对背连接，将海底流量从SLTE的转发器交接给额外的转发器，后者随后通过陆上回传网络重新传输数据。相反，当转发器部署在海底流量的起始/终止点（通常是数据中心或接入点）时，波长会透明地通过电缆登陆站的SLTE，直接进入海底光缆。

无论哪种情况，电缆登陆站的SLTE都包含一个波长交换元件，例如可重构光分插复用器（ROADM）。电缆登陆站的ROADM以及SLTE中的其他特定功能，在实现海底光纤运营所需的关键功能方面起着至关重要的作用。这些功能包括：

- 波长的上/下路：从海底光缆添加或移除波长至其对应的转发器，有时辅以通道复用/解复用元件。
- 管理海底光纤的频谱分配与使用：当两个或更多用户在同一个海底光纤对上，各自占用部分频谱来运行波长时，频谱分配是频谱共享的一个重要方面。
- 确保海底频谱保护：当某个通道或频谱块发生故障时提供保护。在许多情况下，这依赖于ROADM板卡具有向海底光纤频谱的部分频段注入放大自发辐射的能力，以替代缺失或故障的业务波长。
- 集成式光通道监视器，通常与可重构光分插复用器集成，为海底频谱提供高分辨率的测量与监控，这有助于系统优化、业务开通和频谱保护。

（海底线路终端设备）中的转发器、可重构光分插复用器以及其他关键光学功能共同作用，实现了海底网络所需的独特特性，并提供了最高级别的性能，从而最大化具有挑战性的跨洋海底光纤光缆的传输容量。



端到端海底-陆地网络的优化解决方案

诺基亚的海底解决方案为网络运营商提供了一套完整的功能集，针对所有海底网络应用和使用场景进行了优化。

1830 全球快递紧凑型模块化 DCI 优化平台，为所有海底/海底线路终端设备及陆地回传网络应用提供了完整的解决方案，使网络运营商能够部署端到端的统一网络。

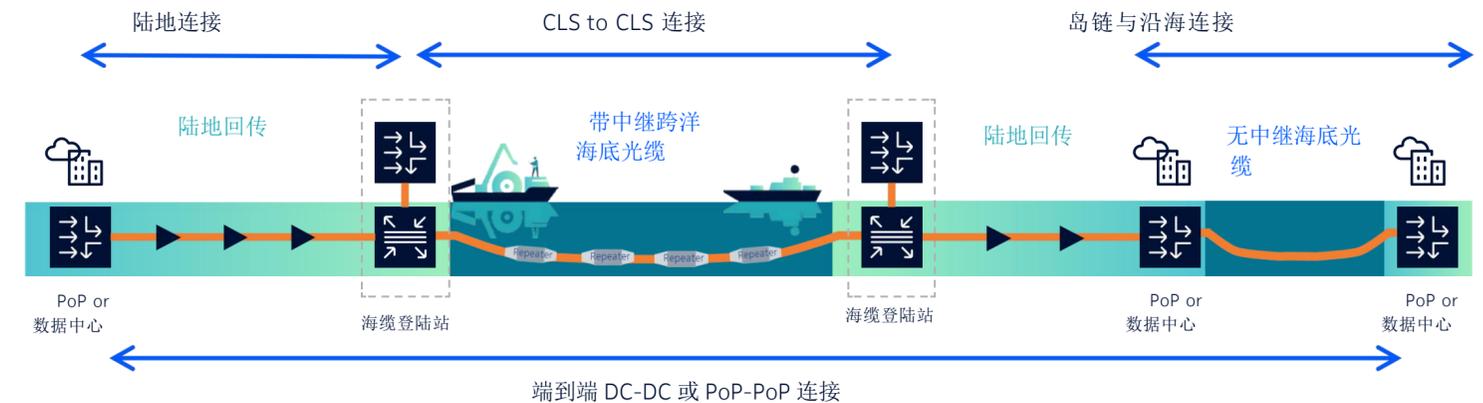
在转发器应用方面，1830 GX 支持高性能相干光技术，运行波特率高达 140+ GBaud，单波长速率高达 1.2 Tb/s，从而实现单波长 800Gb/s 至 1Tb/s 的跨洋传输容量。支持高达 64QAM 的概率星座整形、奈奎斯特滤波和连续波特率调节等重要特性，使网络运营商能够将光纤容量最大化至香农极限。

1830 GX 光线路系统支持所有必需的 SLTE 功能，包括基于可重构光分插复用器的波长交换和频谱管理、插入 ASE 频谱或连续波空闲信道、光通道监测和光时域反射仪。对于陆地回传网络，1830 GX 光线路系统支持 C+L 波段操作，以最大化每根光纤的容量，并降低租赁回传光纤容量的成本。

其他选项，例如恒定功率模式线内放大器，支持跨越统一海底-陆地网络的端到端数据中心间连接。而可选的光时域反射仪和 1+1 光保护功能，则满足运营商对光纤监控和故障定位，以及在光纤中断或设备故障时实现业务保护的需求。

诺基亚为海底-陆地网络提供的统一端到端解决方案的优势，还得到了开放波长管理器工具的补充。该工具支持通过 1830 GX SLTE 终端部署和运行第三方的相干光模块。

1830 链路扩展器提供超高功率掺铒光纤放大器和拉曼光放大选项，以支持长达 500 公里的无中继光纤跨段。1830 LX 可与 1830 GX 和 1830 光子服务交换机平台结合使用，以跨越海峡、连接岛屿间网络、沿海链路，并连接海上油气平台和风电场，从而扩展陆地网络连接。



海底网络自动化

诺基亚的网络自动化与管理应用使海底网络运营商能够快速部署新的海底容量、优化网络、增强网络生存能力，并简化和自动化广泛的网络运维，从而减少所需的人工时间和精力。这些优势通过先进的方法和安全的策略得以实现，并辅以对开放网络实践和标准的支持，利用开放 API 和数据模型。

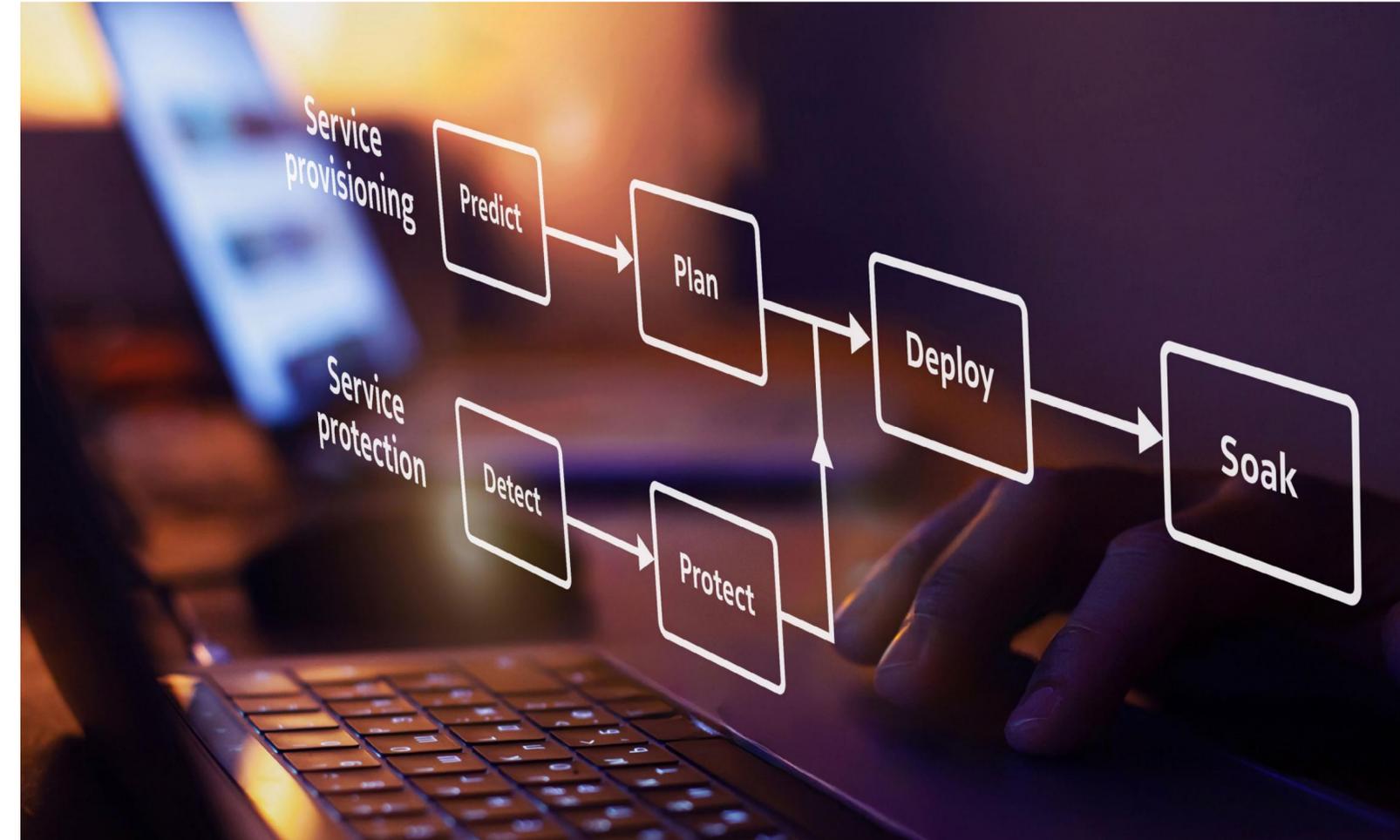
网络自动化可缩短新海底容量的开通、配置和部署时间。通过零接触部署工具，可自动化海底信道优化和服务配置，减少所需的人工时间和精力，并确保最佳的性能和资源利用率。基于意图的 0 层和 1 层连接服务请求的实时规划和开通，有助于在确保光损伤验证和冲突解决的同时搜索新路由，执行光性能验证，并自动化服务开通和业务启用。

在网络发生故障时，网络自动化还能通过监控告警和系统/连接性能、执行故障隔离和受影响业务分析，并在执行光损伤验证、冲突解决和验证资源可用性检查以在整个网络重新开通受影响业务的同时自动搜索新路由，来协调和管理基于软件的光层恢复。

利用网络关键绩效指标洞察，诺基亚的网络管理和自动化应用可实现包括性能和功耗在内的实时网络优化，使运营商能够主动规划和安排维护活动，并快速适应不断变化的网络需求和事件，以确保最大的服务可用性。

诺基亚的网络自动化解决方案还辅以智能电源管理器应用套件，旨在简化海底网络的日常节点和链路运维。IPM与转发器和可重构光分插复用器硬件协同工作，简化和自动化关键的运营功能，例如预测光纤频谱性能、频谱规划以及转发器部署和老化测试。

在业务保护场景中，IPM与海底线路终端设备硬件配合，检测光功率故障、使用放大自发辐射保护频谱、协助修复后重新部署频谱和容量、在业务移交前自动执行老化测试，并以可编辑格式自动记录整个流程，以便进行持续的频谱维护。



光纤传感

全球的光纤网络运营商需要确保其网络物理安全，防止断裂。尽管海底光缆经过特殊工程设计和铠装，以抵御安装在海床上的严酷考验，但它们仍然容易受到船舶锚、拖网以及其他日益增加的破坏威胁，如来自潜艇或水下无人机的破坏。这些脆弱性并非海底光缆独有，同样也存在于陆地网络中，后者常常受到施工、自然灾害和大气事件等多种因素的破坏或干扰。

所幸，光纤本身也是极佳的传感器，其巨大的覆盖范围使得跨越整个海洋的传感成为可能。利用海底光缆的传感能力，为光纤网络运营商带来多方面的增值，例如：对潜在威胁或问题的预警、错误/故障检测与定位、主动光纤保护，甚至能使运营商提供社会公益，例如早期地震和海啸的探测与定位。

诺基亚一直处于创新传感能力演示的前沿，这些能力源自其市场领先的高性能相干数字信号处理器专用集成电路以及诺基亚贝尔实验室的研究。诺基亚贝尔实验室的开创性工作将机器学习应用于相干数字信号处理器测量的偏振态数据的模式检测，从而将被感知的信号转换为可识别的事件特征。

目前，多家网络运营商正利用诺基亚 WaveSuite 自动化套件中的传感应用，训练其网络识别和分类可能的网络中断。诺基亚与海底网络运营商在传感领域的另一项合作，在于展示光纤网络作为地震监测器的能力。诺基亚的海底传感单元利用现有的海底光缆基础设施，通过比较相干光通道和第三方海底中继器的直射与反射脉冲，来感测和定位地震与潮汐事件，并进行实时分析以展示测量到的事件。

诺基亚贝尔实验室正通过开发相干光频域反射计，进一步推进光纤传感创新与研究的边界。C-OFDR 利用一种相干的、基于相位的、频率调制的信号产生探测光，该探测光沿着海底光纤的整个长度传输。由地震、涌浪、锚、船舶等多种效应引起的光纤周围物理变化，会导致光纤自身产生变化，进而改变后向散射信号，该信号随后在源头被处理。该技术提供了精确的定位能力，并能实现长期的光缆监控，已在与多家陆地及海底网络运营商进行的多次现场试验中得到了验证。

网络安全

用量子安全网络保护万物

网络交付服务在个人互动、商业应用、金融交易等各个方面的日益普及，要求有强大的网络安全解决方案，以保护传输中的数据免受物理入侵和未来基于量子的威胁。随着企业转向云端服务并部署从数据中心提供的人工智能应用，光传输网络中将出现更多潜在的漏洞。

加密所面临的威胁，例如具有密码相关性的量子计算机和窃听，可能会危及网络完整性。一种将光传输与强大加密标准（如256位高级加密标准）相结合的方法，配合使用具有高熵值的强密钥，并利用基于经典物理学或量子论的密钥源，将确保光网络数据免受恶意行为者的威胁。诺基亚量子安全网络通过结合纵深防御解决方案、先进的对称密码学以及抗量子高熵随机密钥源，来降低这些风险，从而构建具备加密弹性的光传输网络。这些特性依托于诺基亚贝尔实验室的研究和诺基亚量子合作伙伴，可保护数据免受经典和量子攻击，并确保长期安全性，抵御未来的“先窃取，后解密”企图。

这种全面的方法使海底网络运营商能够在整个端到端光网络（包括海底链路和陆地回传网络）上构建弹性的纵深防御框架。随着应用层未来将向后量子密码算法迁移，QSN 在光传输层提供的补充保护，使运营商能够在现在和未来保护其关键基础设施免受量子威胁，从而安全地启用新应用和实现数字化转型。



海底网络的未来趋势

海底网络在连接各大洲方面所起的关键作用，正随着基于云和人工智能服务在全球的扩张而日益增强。从数据中心向全球最终用户提供的人工智能应用的部署，将持续推动海底光缆带宽以每年约30%的速度增长。考虑到新海底光缆的部署资本高度密集，且从光缆设计到投入使用可能需要数年时间，再加上每条光缆对更大容量的需求日益增长，这意味着供应商和运营商正在不断探索新方法，以从其海底网络中获取更多容量。

运营商也越来越关注诸如机架空间、占地面积以及海缆登陆站或数据中心所需的SLTE设备的功耗等问题，这些都会推高运营成本。这些行业动态和运营商面临成本压力，正推动着海底网络领域令人兴奋的新技术发展。

其中一种方法侧重于增加跨洋海底光缆中包含的物理路径数量。这项技术被称为空分复用，是波分复用在空间维度上的对等物，波分复用通过在同一根光纤上并行传输多个数据通道（每个通道使用不同波长）来增加光纤容量。应用空分复用来增加海底光缆容量正沿着两条不同且互补的路径发展。第一种涉及增加单根光缆中捆绑在一起的光纤数量，通过结合使用更小的外径光纤和更先进的光缆设计来实现。这使得每条光缆的光纤数量从传统的8-12芯增加到如今的24芯，未来甚至可达48芯。第二种方法使用多芯光纤，其中每根光纤具有不止一个纤芯，可以承载独立的数据流，目前2芯光纤已开始部署。这些方法相结合，将使每条光缆的容量增加四倍或更多，并降低新建海底光缆的每比特成本。

海底光缆的另一个研究领域是增加每根光纤的可用WDM（波分复用）频谱，以便在单根光纤中传输更多波长。这种方法已在陆地网络中广泛使用，即在光纤的L波段扩展WDM操作，从而使每根光纤的容量翻倍，甚至在使用Super-L波段时实现2.5倍的提升。由于L波段操作也使用掺铒光纤放大器进行线内放大，因此在未来有中继海底光缆中使用L波段频谱，能够很好地采用从陆地网络成熟的技术，以实现可靠的海底应用。





如今，跨洋光纤光缆的每个波长可以在24芯光纤上以800Gb/s的速率运行，从而提供每条光缆500Tb/s或更高的巨大带宽。随着空分复用和L波段技术的进步，有望实现十倍或更大幅度的容量提升，海底网络运营商将日益面临支持所有这些海底流量终结所需机架空间和电力的挑战，尤其是在这两者通常都受限的海缆登陆站。

幸运的是，使用可插拔相干光模块可以显著减少机架空间和功耗，因为其本质设计就比嵌入式光模块具有更低的每比特功耗。硅集成电路工艺节点的持续进步，使得用于可插拔光模块的相干数字信号处理器能够集成更多的功能和性能，从而增加可插拔相干光模块的容量-距离积，同时所需的体积和功耗更小。因此，运营商开始需要在需要中继的海底光缆应用中利用可插拔相干光模块。例如，诺基亚的ICE-X 800G ZR+可插拔相干光模块正被用于连接跨越数千公里的区域海底光缆，未来技术发展预计将支持其用于跨大西洋的海底光缆。

在诺基亚，我们正在推动光网络向新的前沿演进，以帮助您构建能够满足未来带宽需求的网络。凭借在部署全球最长海底光缆网络方面的丰富经验，以及在光传输技术领域持续创新的历史，诺基亚将继续为海底光纤网络的演进提供所需的规模、性能和效率。

如需了解更多关于诺基亚如何通过业界领先且久经考验的、专为海底优化的光网络解决方案组合来帮助您演进海底网络的信息，请联系我们的销售团队或访问我们的网站。

Nokia OYJ
Karakaari 7
02610 Espoo
Finland

Tel. +358 (0) 10 44 88 000

CID: 215251 (December)

nokia.com

NOKIA

关于诺基亚

诺基亚是AI时代连接领域的全球领导者。凭借在固定网络、移动网络和传送网络的专业知识，我们正在推动连接技术的进步，以创造一个更美好的世界。

诺基亚是诺基亚公司的注册商标。本文提及的其他产品和公司名称可能是其各自所有者的商标或商品名称。

© 2025 诺基亚

