

NOKIA

400GE拐点

400G时代的IP和光网络解决方案

白皮书

芯片技术的飞速发展推动了新一代可插拔 400G 光模块的发展，同时为重新思考 IP 和光网络的设计开辟了令人振奋的新途径。这份白皮书将仔细研究这些先进技术及其影响和应用。

目录

进入400G时代	3
400GE 收发器选项	4
过渡到 400GE	6
当前模式操作	6
当前模式向混合IP和光网络的演进	6
未来模式全相干400G IP和光网络	7
400GE IP和光应用	9
数据中心互连(单跨)	9
城域/区域汇聚环	9
城域/区域业务边缘和核心	11
引领400GE时代	13
资源	14
缩略语	14

进入400G时代

对以更低的每比特成本获得更大容量的不懈需求正迫使网络运营商不断升级和优化其 IP 和光网络设计。城域/区域接入，汇聚和多接入边缘云由用户带宽，超高清（UHD）视频流，基于云的 IT 应用程序和 5G 等驱动，正受到这种巨大增长需求的冲击。

幸运的是，芯片技术的飞速发展推动了新一代可插拔 400G 光模块的发展，可与传统灰光的客户侧光模块（图 1）缩小端口密度差距。

图1. 相干光模块演进中的400G拐点



400ZR是由光互联网络论坛（OIF）定义的一种开放标准，可满足短距离，单跨400GE应用需求，例如数据中心互连（DCI）。400ZR+ 是支持更长距离覆盖和多种线路速率的非标准实现。

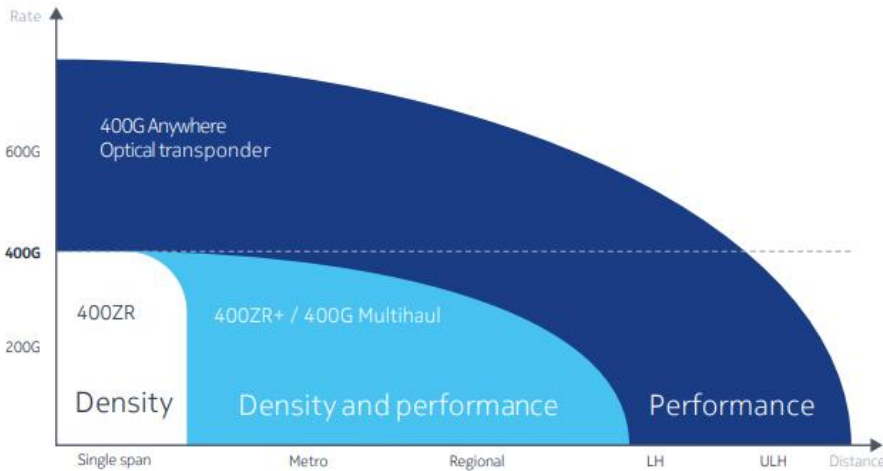
400ZR和400ZR+都是小型可插拔的相干DWDM光模块，旨在促进低成本的多供应商生态系统的发展。节省成本和空间的可插拔相干收发器将最终实现IP和光的物理集成。400G以太网将触发路由器投资周期，以及随之而来的对400G波长的需求。商用解决方案将于2021年中开始发货，大量现网设备将具备使用相干400GE技术的能力。多种创新、标准和技术的结合有望使 400GE 成为新的通用网络货币，从而开启了一个新的 IP 光网络时代。

本文研究了400GE相干光技术对IP接入，城域和区域汇聚，核心和长传的影响和适用性。

400GE收发器选项

每个网络都是不同的，要在广域网中最佳地解决各种链路目标，需要一系列具有不同性能的连接选项（图2）。

图2. 相干收发器选项



用于光传输系统的DWDM transponder旨在优化传输性能。它们通常在集成线卡上实现，并应用强大的激光器、复杂的调制方案和高增益前向纠错 (FEC) 方法，以最大限度地提高区域、长途、超长途和海底链路的吞吐量和覆盖范围。高性能 DWDM 光学器件可以覆盖所有速率和范围，但相干可插拔光模块（例如 400ZR）针对低功率和高密度进行了优化，可以为较短距离提供了更经济的替代方案。

大多数城域、区域甚至长途光网络应用都需要仔细平衡性能和密度。功率、空间、成本和可插拔性很重要，但需要足够的性能来最大限度地实现可再生。无论其覆盖范围如何，可编程性、性能监控和故障检测等附加功能对于所有应用都至关重要。收发器类型的灵活性和选择对于优化给定（子）网络或链路的成本和性能至关重要，因为它们依赖于光纤的可用性、质量、范围、链路拓扑和服务要求。表1列出了 400GE 收发器选项及其主要特性。

表1. 400G 相干收发器概述400ZR

技术参数	400ZR	400ZR+	400G Multihaul	400G Anywhere
速率	400 Gb/s only	100–400 Gb/s	100–400 Gb/s	100–400+ Gb/s
距离	40–120 km (amp)	400–600 km (amp)	500–750 km (amp)	>1,000 km (amp)
调制	16QAM	QPSK, 8/16QAM	QPSK, 8/16QAM	QPSK, 8–64QAM
FEC	CFEC	CFEC+, oFEC	CFEC+, oFEC, NOK FEC	NOK FEC
Tx power	-7 to -10 dBm	-7 to -10 dBm	~0 dBm	>0 dBm
形状系数	QSFP-DD	QSFP-DD	CFP2	Integrated line card
接口	100GE, 400GE	100GE, 400GE	100GE/OTU4, 400GE	100GE/OTU4, 400GE
ROADM bypass	No	Limited	Multiple	Many
应用	城域 DCI	城域	城域/区域	城域/区域, 长途 /海底

400ZR是第一个可互操作的400G相干互通标准。2020年3月发布，400ZR针对高密度城域接入和点对点DCI应用进行了配置文件优化。参数规格确保性能和功耗限制适合较小的模块尺寸。400ZR使用16QAM调制和标准化前向纠错。从线路接口互操作性的角度来看，可以使用不同的模块类型，但QSFP-DD 预计将成为最受欢迎的选择，因为它价格低廉且占地面积小。

由于针对密度进行了优化，400ZR可以在单个裸光纤跨度上提供400 Gb/s的速度，在没有放大的情况下最长可达40 km。它在C波段可以支持多达64通道WDM，通过外部放大器最长可达120 km。

400ZR+

400ZR+具有更高的光学性能，并具有灵活的100G–400G线路速率。它通过利用多种调制类型（16QAM，8QAM和QPSK）和高增益前向误差校正（例如：CFEC +，oFEC）支持更长距离。

400G Multihaul

400G Multihaul 是一类模块化收发器，将相干光学器件封装在更大的外形 (CFP2) 中，可配备在路由器或 WDM transponder 系统中。由于其更大的功率和散热外壳，Multihaul DCO 实现了更好的光学性能，同时包含比 400ZR+ 模块更多的功能。400G Multihaul利用高性能前向纠错功能，更高的发射功率和高性能的光学前端组件，可实现更长的光学传送距离，从而能够以光学方式旁路多个ROADM。它们也可能在光传输系统中的包含使用中非常重要的功能，例如加密和OTN支持。

400G Anywhere

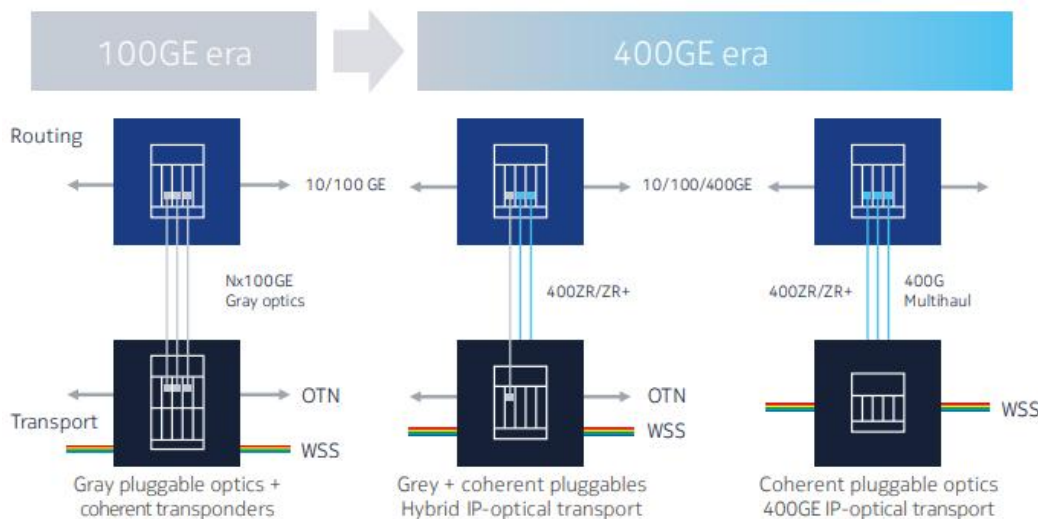
400G Anywhere是指经过性能优化以实现最大波长容量和范围的transponder。它们采用位于WDM光传输系统中的集成线路卡的形式。在超过90 gigabaud的高波特率下运行，使这些接口可以在超长途和海底距离传送400G，甚至在短距离时提供更高的速率。400G Anywhere转发器与ROADM结合部署还可以用于在区域和长途网络中维持400G比特率。在这些网络中，光纤是稀缺，昂贵的，通常会通过提供多种服务的托管波长获利。

这些相干的收发器选项相结合，助力将400G建立为新的网络通行证。应用范围从IP接入到城域，区域和长途

过渡到400GE

400GE时代提供了一个重新思考和重新优化IP光网络的机会。选择是发展和优化现有部署，还是重新开始使用下一代解决方案针对400GE的优化将在很大程度上取决于已安装网络基础的硬件就绪性。图3显示了向400GE时代的过渡以及各种IP和光的互通选项。

图3. 过渡到 400G 时代



当前模式操作

对于大多数（如果不是全部）网络运营商来说，100GE操作的当前模式是使用灰光路由器光纤结合



transponder，如图3左侧所示。大约十年前100GE时代开始，随着IP骨干网链路向100GE的过渡，触发了核心路由平台的重大升级周期。如今，100GE已成为网络各部分中普遍存在的接口，具有1、2和4个100GE接口端口是具备扇出能力的QSFP DD接口。

当前模式在IP路由和光传输之间保持清晰的分界。光传输层提供OTN疏导和波长管理业务。当前的光传输网络通常为多个内部客户部门提供OTN和波长业务，以及为外部客户提供的托管专线服务。

当前模式向混合IP和光网络的演进

当前模式演进对于确保运营连续性和保护现有网络投资和收入流来说很有吸引力，甚至是必要的。在可预见的将来，任何将其100GE网络升级到400GE的运营商都可以以混合模式运行。该模式使运营商可以充分利用当前光网络的投资，同时通过使用较低的可插拔相干400GE收发器成本来节约增量成本。结合了100GE和400GE接口或超过可插拔相干收发器距离的链路要求，混合IP光网络解决方案将最佳地满足不同容量和传输距离的要求，这些需求里会涵盖100GE、400GE的混合使用以及超过插拔式相干收发器可达距离的链路需求。

基于路由器的相干400G收发器无需使用muxponder或transponder—节省成本，空间和电源。路由器有效地变成了一个以太网muxponder，但较小尺寸的可插拔相干400GE收发器的较低传输功率确实对线路系统架构产生了影响。大多数WDM系统需要大约-2到+2 dBm的输入功率才能正常运行。相干QSFP-DD模块的较低输出功率将需要增加，方法是在WDM节点之前使用外部放大，或者通过WDM节点分插级内的附加放大器。

如果具有外部放大器的高密度400ZR和400ZR+ QSFP-DD可插拔设备无法提供足够的覆盖范围，则使用较大CFP2外形尺寸的高性能400G Multihaul DCO替代方案。在长距离光纤路径上仍然需要性能优化的transponder以及在网状网络和环形网络中遍历多个ROADM节点，并提供高容量和低延迟专线服务。

未来模式全相干400G IP光网络

建立全相干的400G IP和光网络需要重新考虑运营，但提供了一个机会使用针对400G成本优化的下一代网络技术时代。这需要较高的前期投资，且可能受到某些（初始）限制。

由于400G相干路由器光学器件的功耗和散热明显高于传统灰光短距离光学器件的功耗和散热，对于针对速度和维护成本优化的高密度路由器，电源和线卡框的冷却能力已经成为一个问题。路由器硬件设计的不足，导致设备可能无法为全速运行400ZR+相干QSFP-DD光模块提供所需的17-20瓦功率和冷却功率，这会导致端口容量或密度受限。能够支持基于CFP2物理规格，且需要20-26瓦更高功耗的400G Multihaul DCO和高性价比实现性能目标一样重要。

光线路系统是经济高效地管理相干外来波长和光纤容量并获得收益的解决方案的重要组成部分。ROADM在环形和网状网络拓扑中起着至关重要的作用，它增加了灵活的光子层，可将逻辑（IP/MPLS）和物理（光纤）网络拓扑解耦，并且实现动态路由，保护和恢复选定的波长。ROADM也允许配置互联网和数据中心流量的低延迟快速路由，从而减少网络中中间路由器节点的转发流量。其他还可以用来在做网络维护时，临时迁移受影响路由器节点承载的数据包流量。

目前，大多数光传输网络在线路系统采用50 GHz间隔的固定格栅承载100或200 Gb/s波长。400G接口使用更高的波特率，需要75-100 GHz信道，需要光线路系统具备更灵活格栅间距（FlexGrid）的ROADM。

统一的400G IP和光网络运营，是对传统的IP路由和光传输之间的管理权分离的突破，但这可能有助于运营商建立一个更灵活的组织。400G IP和光城域/区域网络必须支持针对密度和性能加以优化的收发器，

以及不同外形尺寸的可插拔收发器组合，从而最佳的满足所有连接要求。除了扩大覆盖范围，有效地梳理波长并实现1+1光纤保护之外，还可以部署光线路系统和串联放大器。

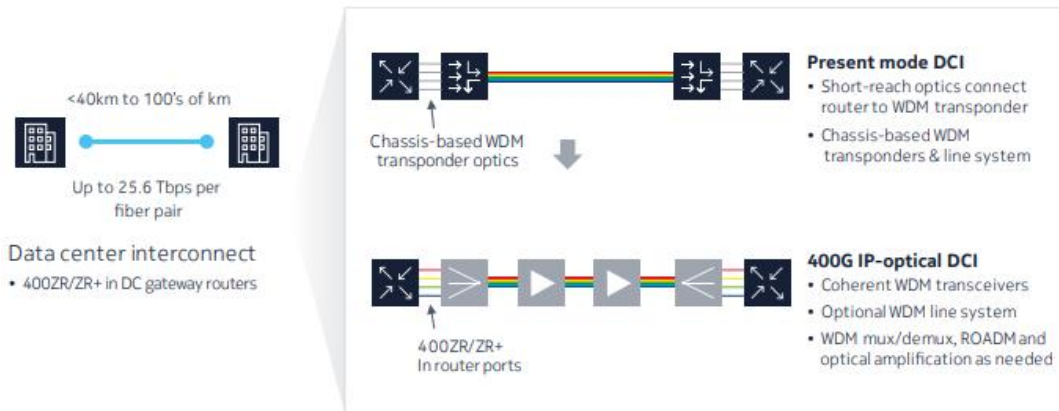
400GE IP和光网络应用

运营商网络有几种400GE部署方案。以下部分提供单跨DCI、城域/区域汇聚和城域/区域的边缘和核心网络详细场景。

数据中心互连(单跨)

400ZR互通规范针对低成本，高密度DCI应用进行了优化。随着互联网运营商和通信运营商构建边缘云，很多数据中心需要在40到120公里范围的中间距离间互连。典型应用是分布式数据中心之间的备份和同步，从而实现异地冗余和负载均衡（图4）。

图4. 数据中心互连



传统的DCI解决方案使用短距离灰光模块将数据中心网关路由器连接到框式光线路系统，并通过DWDM transponder将这些400G波长复用到可用的光纤上。

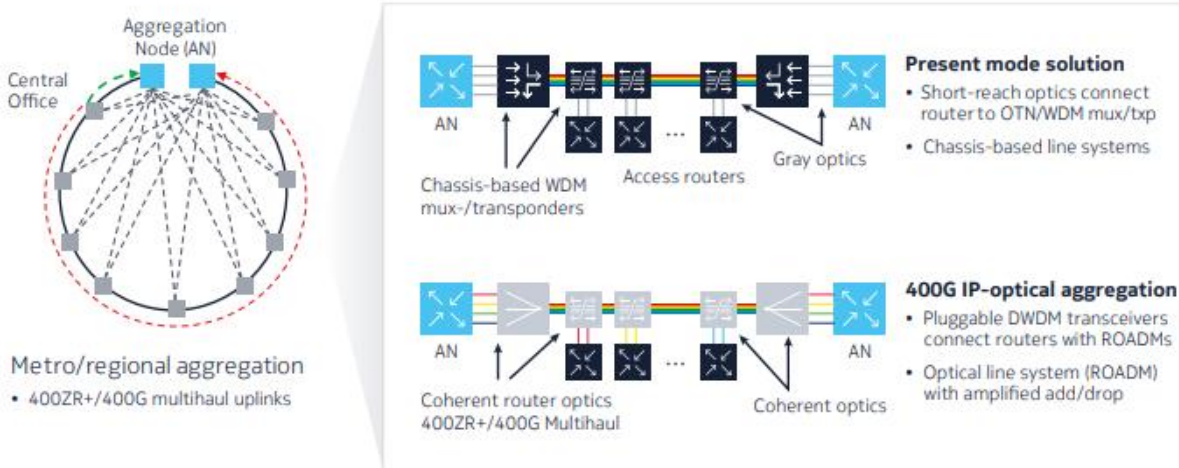
新的400GE DCI方案支持数据中心网关路由器采用400ZR可插拔光模块，直接通过裸光纤，实现40公里范围内的数据中心互连。如果采用带外部放大功能的光线路系统，则可以实现120公里范围内连接，并在单根光纤上扩展到64个波长25.6 TB / s的性能。

城域/区域 汇聚环

在许多城域/区域承载网络中使用环形拓扑汇聚来自不同地理位置的业务点的IP流量。每个环的容量和范围可能会有所不同，具体取决于用户密度和提供的服务。范围广、低容量的环网通常是农村地区为农村地区和郊区提供服务。这种环网可能会覆盖数百公里的范围，站点之间的距离最大为40 km。大城市和城市的汇聚环覆盖范围会变小，因为要连接的大型中央办公节点间的距离会近的多。

汇聚环可以混合承载具有不同服务级别要求（SLA）的公众宽带，移动回程，企业专线/专网的多种数据包流量。汇聚环通常采用物理上不同的光纤对和短距离灰光模块连接IP路由器和基于机架的光线路系统，光线路系统可以梳理OTN电路，并复用波长以保护流量免受光纤切割的影响。OTN/DWDM传输层还允许解耦逻辑（第3层）和物理（第0层）网络拓扑。汇聚路由器在Hub-Spoke拓扑中可以双归连接到环网的偷头端路由器。对于环网中间节点路由器可以旁路中转流量（见图5）。

图5. 城域/区域 汇聚环



基于可插拔相干光模块的方案将需要平衡密度和性能，因为路径长度较长且相干波长需要通过路径上多个ROADM。400ZR+收发器优化了端口密度，但性能可能会受限，需要运营商在400GE端口上降低速率使用。对于低容量的汇聚网，这种折衷可能是可以接受的，但将来会占用更多端口和波长以扩大容量。400G Multihaul收发器可提供更好的性能，并允许运营商以更高的速度运行400GE路由器端口速率。它们最终可能会提供相同的容量，同时消耗更少的端口和波长。

可插拔的相干光模块产生的（外来）波长可以通过ROADM上到环中：并在环头端下到目的路由器的相干的400GE光模块终结。环上的汇聚路由器可以使用简单的两级ROADM进行梳理并承载东西两个方向上的波长。

环上的波长数可能会快速增长，因为环网上每一个接入路由器至少需要四个上行链路（和波长），以防止单光纤或端口故障。随着覆盖的扩大和复杂，协同管理和监控路由器和线路系统上的光学信道，调制类型，功率电平，波特率，数据速率，光信噪比（ONSR）等光学参数将有助于互通和组网的实现。

城域/区域 业务边缘和核心

城域/区域边缘和核心网络提供互连的分组基础结构，将边缘云中的分布式服务节点与区域数据中心以及对等点互连。

图6. 城域/区域边缘和核心

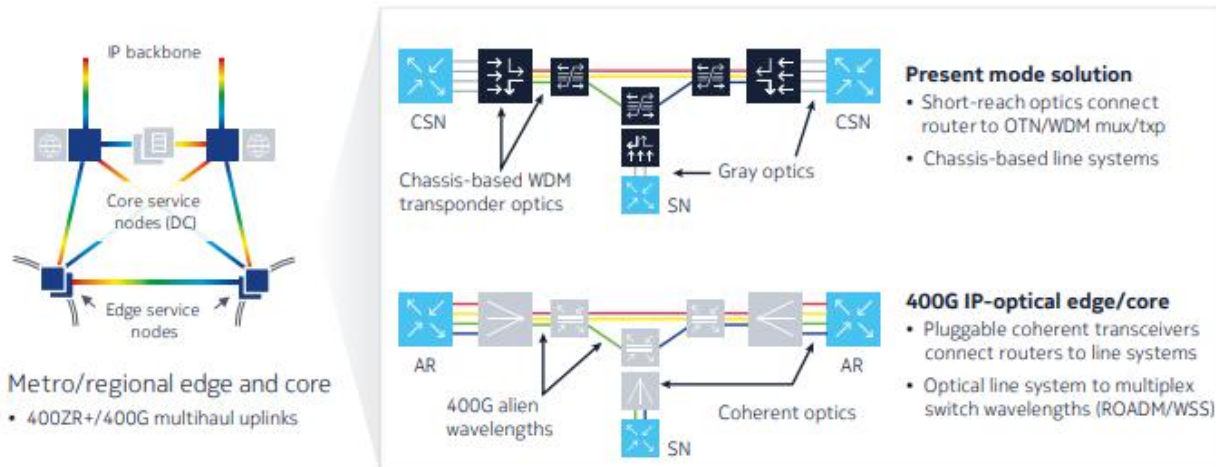
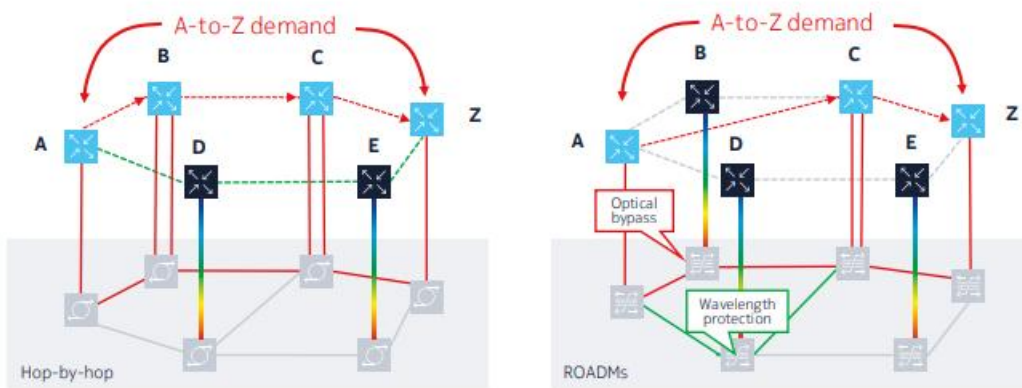


图6显示了简化的城域/区域边缘和核心拓扑。这些可能会是大型，种类繁多且高度网状网络。路由器之间的光纤连接可以跨越数百公里，并且包含多个光纤补偿。他们通常会部署CDC-F ROADMs，以通过以下方式实现光纤的有效共享。物理拓扑涵盖从简单的线性连接到环间互联以及全网互联各种结构。为了有效覆盖所有容量并达到要求，网络运营商需要不同外形尺寸，兼顾密度和性能优化的400GE收发器选项。

针对简单的线性链路拓扑和以分组业务为中心的小型服务区域间的路由器互联，使用400GE相干光模块和简单的点对点线路系统是很有吸引力的。此部署模型折叠了合并了逻辑（IP）和物理网络拓扑，使A到Z流量的逐跳转发。因为每个路由器都做为再生器，对相干光模块的性能要求会降低。但需要更多的光模块，因为流量需要逐跳OEO的传递，如图6左侧所示。

图7. 逐跳与选择性路由器旁路



因此，更大和更复杂的城域/区域分组网络将通过基于ROADMs维护一个灵活的光子服务层来更加经济高效地扩展规模，如图7右侧所示。该方法允许网络运营商独立于物理网络拓扑和IP拓扑进行解耦和优化，并通过有选择地绕过光子层的中间路由器来最大程度地减少汇聚中转流量的OEO转换。基于ROADMs的灵活的光子服务层也更容易管理相干波长和专用波长业务。

引领 400GE 时代

可插拔的相干400G光模块的出现改变了IP和光网络中400G的游戏规则。有多厂商承诺互联，并采用最先进的硅光技术，使用这种基于紧凑型模块化的400GE光模块方案相比通过路由器灰光模块连接带有WDM transponder的线路系统的传统解决方案，能够提供更低成本和更高的密度。

诺基亚是400G路由和光学技术的引领者，并取得了多项行业首创，包括：

- 2011年7月推出首款支持400 Gb/s的路由芯片FP3。
- 2015年2月演示首个400Gb/s IP路由接口
- 于2018年7月交付业界首个商用的400GE线卡
- 在2019年3月提供了400GE路由器接口的第一个商业部署

诺基亚IP路由和光网络产品组合为运营商提供了进入400G时代所需要的范围、深度、平台和工具。诺基亚QSFP56-DD和CFP2线卡的创新电源和散热设计预示高性能光模块的成功应用。这种设计优势使网络运营商可以在现有的诺基亚路由器和线卡中轻松部署400GE相干可插拔收发器。

诺基亚还是相干光模块和线路系统的领先者。结合诺基亚收购的Elenion Technologies最先进的硅光



技术。诺基亚第五代产品PSE-V数字信号处理器将具有传输性能，成本效益和接口密度提升到了一个新的水平。2020年5月推出的诺基亚WaveFabric Elements光学产品组合用新的组件和子系统扩展了400G的生态系统，能够更好的满足来自5G和云业务的迅猛需求。

随着400GE时代的到来，T比特时代的准备工作正在顺利进行：

- 诺基亚于2017年7月推出了FP4，这是世界上第一个支持T比特级的路由芯片。
- 诺基亚和Etisalat于2019年9月完成了世界上第一个利用单波长100G性能的T比特级光学现场试验，
- Elisa于2020年12月完成在诺基亚7950 XRS核心路由器平台上首个T比特级以太网路由器互连现场试验。

缩略语

CDC-F	colorless, directionless, contentionless with flexible grid spacing
CFP2	C form-factor pluggable 2 specification
CSP	communications service provider
DCI	data center interconnect
DCO	digital coherent optics
DWDM	dense wavelength division multiplexing
FEC	forward error correction
GE	Gigabit Ethernet
HG-FEC	high-gain forward error correction
IP	Internet Protocol
MPLS	Multiprotocol Label Switching
OEO	optical–electrical–optical
OSNR	optical signal-to-noise ratio
OTN	optical transport network
QAM	quadrature amplitude modulation
QPSK	quadrature phase-shift keying
QSFP-DD	quad small form-factor pluggable – double density
ROADM	reconfigurable optical add-drop multiplexer
SDN	software defined network
SLA	service-level agreement
UHD	ultra-high definition
WDM	wavelength division multiplexing