

测试可插拔相干光模块

用于 DWDM 传输的相干传输模块已经使用了一段时间，但这些通常是供应商特定的封闭式工程系统。最近，根据 MSA 和其他标准设计出了可插拔相干模块，相干可插拔光纤生态系统应运而生。IEEE 802.3¹ 采用密集波分复用技术，在 ZR PMD 上实现了 100G 和 400G 链路的 80 千米链路预算，这使得人们对可插拔相干光模块的开发和部署产生了更广泛的兴趣。

本 VIAVI 白皮书介绍了可插拔相干光模块，以及为 100G 及更高带宽成功开发、验证和部署可插拔相干光模块所需的测试以及验证挑战和方法。

目前的光接口

如今，可插拔接口的灵活性一直是以太网成功的一个主要因素，它允许用户以适当的成本扩展带宽和“按需”接入。如果我们看一下 400G 以太网的情况，最终用户具有广泛的接口类型来支持每个潜在的应用：

PMD	范围	应用	技术
DAC	2 到 3 米	机架内和服务器	无源铜缆、50G PAM-4 电口
SR8	100 米	企业	并行多模。50G/λ – PAM-4
DR4	500 米	数据中心和企业	并行单模，100G/λ – PAM-4，也可支持 4 x 100G 分支，因为每个 100G 有不同的光纤。
FR4	2 千米	大规模数据中心	单模，100G/λ，PAM-4
LR8	10 千米	电信覆盖	单模，50G/λ，PAM-4
ZR	80 千米	城域网和 DCI	单模/相干，PAM-4

表 1 – 标准化 400G 以太网接口的 PMD、表征和应用

1. <http://www.ieee802.org/3/>

传统上，可插拔光纤的大多数应用位于 10 千米以下，因此可以通过基于直连铜缆、基于多模 VCSEL 或单模直接探测光学技术来有效解决。随着数据速率的增加，信令速率稳步增加，采用 400G 时，向高阶调制 (NRZ=>PAM-4) 转变。然而，绝大多数应用都被传统的“直接检测”技术所覆盖。

更长的距离传统上是通过基于定制光电子和 ASIC 的高性能、特定于供应商的相干线路卡模块来解决的，但最近，Acacia 等供应商已经开发出与客户光纤插槽兼容的高性能可插拔模块（尽管对电源、冷却和管理的要求更为苛刻）。最初的重点是电信应用，但在数据中心互连 (DCI) 等领域出现了越来越大的市场。覆盖范围最好通过连贯的光子接口来实现，要达到市场潜力，必须满足高密度外形规格（包括电源和冷却）和激进的价格预期，以与市场预期保持一致。

目前的客户端光学器件

目前已经部署了多种外形规格，但客户端接口中最流行的两个来自两个系列之一。SFP 系列通常有一个与一个光通道相匹配的电通道，并且经常出现在服务器或手机基站等“终端设备”中，而 QSFP 系列使用并行的光和电通道（它传统上使用 4 个电通道，大多数情况下使用 4 个光子通道作为并行光纤或在 CWDM 光网络上具有信号的单根光纤）。我们将重点介绍 QSFP-DD²，深入研究客户端光纤，因为它通常出现在处理最大带宽的交换机、路由器和传输设备等网元中。

目前用于客户端接口的典型先进 400G 可插拔模块是 QSFP-DD 模块。这一工程奇迹融合了高速数字电子、宽带和低噪声模拟电子、DSP 固件、微控制器、集成光子学和机械集成，所有这些都向激进的价格和性能预期看齐。

需要解决几个关键领域的问题：

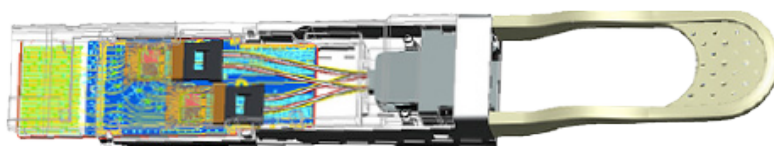


图 1 – 400G QSFP-DD 模块的内部视图

可插拔电接口（在 QSFP-DD 中是双面、双叠层连接器）使并行高速电主机能够连接到模块接口。在 400G 以太网中，这通常是使用 PAM-4 电气调制的 8 个并行差分通道（使用高性能数字 SERDES），并支持主机到模块接口的均衡。连接器还需要提供命令/控制接口，通常这些接口基于双线接口，如使用协议的 I²C。最新的 400G QSFP-DD 通常使用 CMIS 4.0，这是一种高级有状态协议，专为 400G 光学器件的需求和应用而设计。连接器上还有电源（通常为 3.3V，4A 以上）为模块中的电子和光子器件提供所需的电源。

2. <http://www.qsfp-dd.com/>

模块内部高度集成的集成电路包括 SERDES，现在通常基于 DSP，支持主机和模块之间的均衡，并提供从 28Gbd PAM-4 的 8 通道到光子接口（例如 DR4 和 LR4）上使用的 4 通道 100G/（56Gbd PAM-4）的复用器和解复用器。IC 需要复杂的固件，尤其是 DSP 代码，并且模块的管理和控制通过微控制器来协调，该微控制器将用于模块管理（即 CMIS4.0）、所有正常的内务和管理（如冷却和电源管理）、DSP 的固件加载和管理以及当然还有光学器件的所有要求的协议栈组合在一起。光电设备将由高度集成的激光器和接收器组成，它们都符合可靠而精确的标准，如 IEEE 802.3。发射器和接收器都需要表现出宽带宽、低噪声和良好的线性度，以满足功耗和散热要求。

这些组件安装在必须管理信号完整性问题的微型 PCB 上，然后全部集成到具有苛刻的外形规格和体积要求的 QSFP-DD 中！QSFP-DD 确实是一个多学科的工程奇迹！

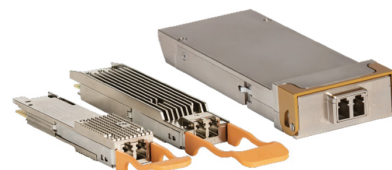
当今的相干光学器件

相干光学器件在现代长距离光纤光通信链路中起着重要的作用。它们通常专注于最高的性能，并在大型固定模块上使用自定义光电设备和 ASIC。



- 专注于 DWDM 传输
- 工程化链路

- 自定义 ASIC 和光学器件
- 单一供应商集成



- 开放式生态系统
- 商用 DSP 和光学器件

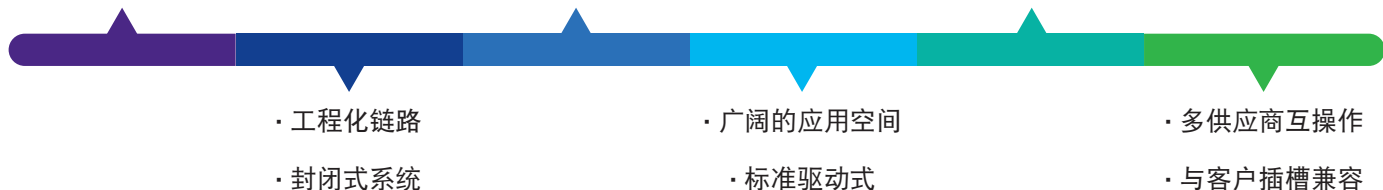


图 2 - 相干光学器件的发展 - 从线卡到可插拔模块

如上图所示，从工程化的高性能线卡到开放的可互操作生态系统的演变需要多个部分的配合，同时也给测试、验证和生产带来了多重挑战。虽然供应商为 100G 和 200G（CFP 和 CFP2外形规格）生产了可插拔的相干模块，但此生态系统的最佳位置出现在 400GE，应用于 DCI、城域网和两个不同市场的传统 DWDM。

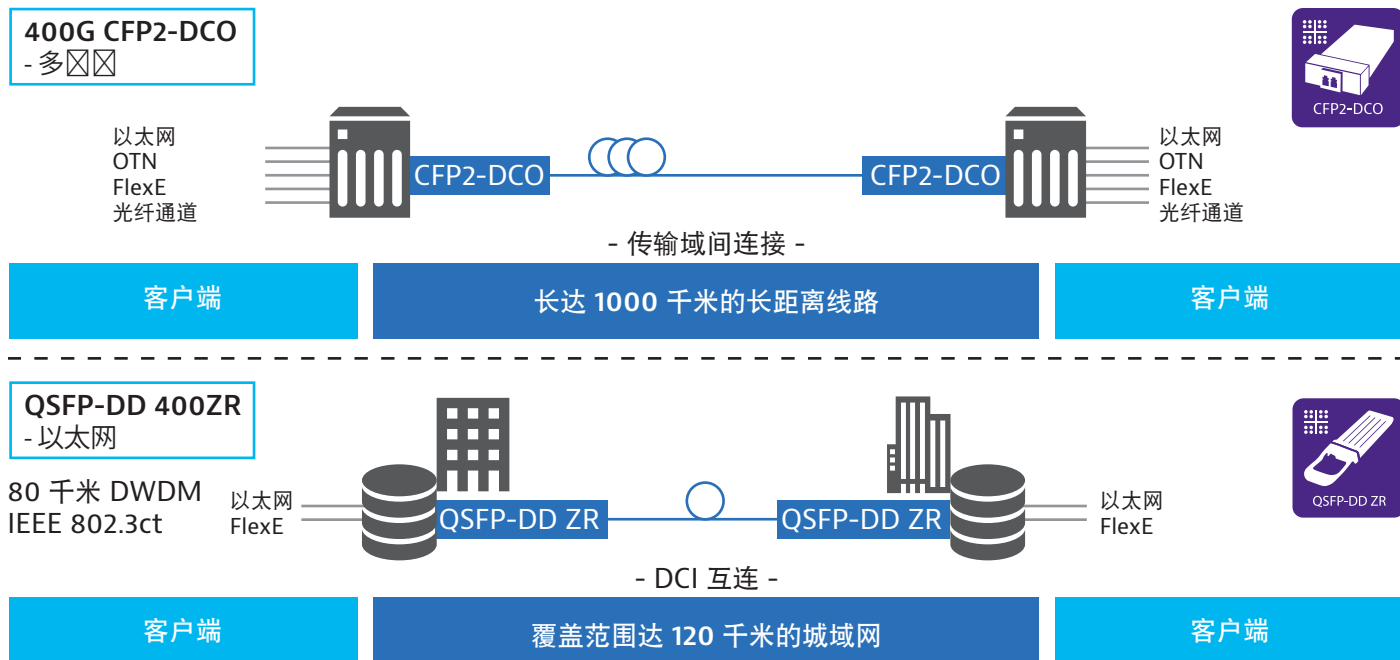


图 3 – 出现在400G 最佳位置的两个不同的 DCO 市场

ZR、ZR+ 和 OpenROADM³ 中的应用可能会进一步分割城域网/DCI 的空间，尽管从中期来看，这些应用（基于 QSFP-DD 和 OSFP 等更紧凑的外形规格）可能会通过一种模块来解决，该模块具有通过软件和固件实现的用户可选操作模式。

客户端光学器件通常使用简单的强度调制（传统上是 NRZ – 开/关键控 – OOK），但随着 400G 的出现，我们看到 PAM-4 调制现在在每条通道的 50G 及以上的所有速率中都很常见。相干调制利用光的相位和偏振来提供高得多的调制能力，并且因为接收器具有相位和偏振态灵敏度，所以色散补偿也可以通过电子方式进行。传统调制需要对 40 千米以上的链路色散进行补偿。传统客户光学系统中使用的简单强度调制直观而简单，激光（直接方式，通过直接调制激光器 (DML) 或通过外部设备（外部调制激光器，EML））的光强度调制与数据一致。这有时称为开关键控 (OOK)。目前这方面的实际上限约为 50GHz，因此 28 Gbd 和 56 Gbd (100G/通道) 对于商业化批量生产（因此成本合理）的设备来说是实用的，200Gb/100G/通道的更高带宽已得到证明，但这些仍然是新颖的。

利用相干调制，光、偏振和相位的高级特性可以被利用来提供高得多的数据速率，而代价是发射器和接收器更加复杂。

3. <http://openroadm.org/>

4 测试可插拔的相干光学器件

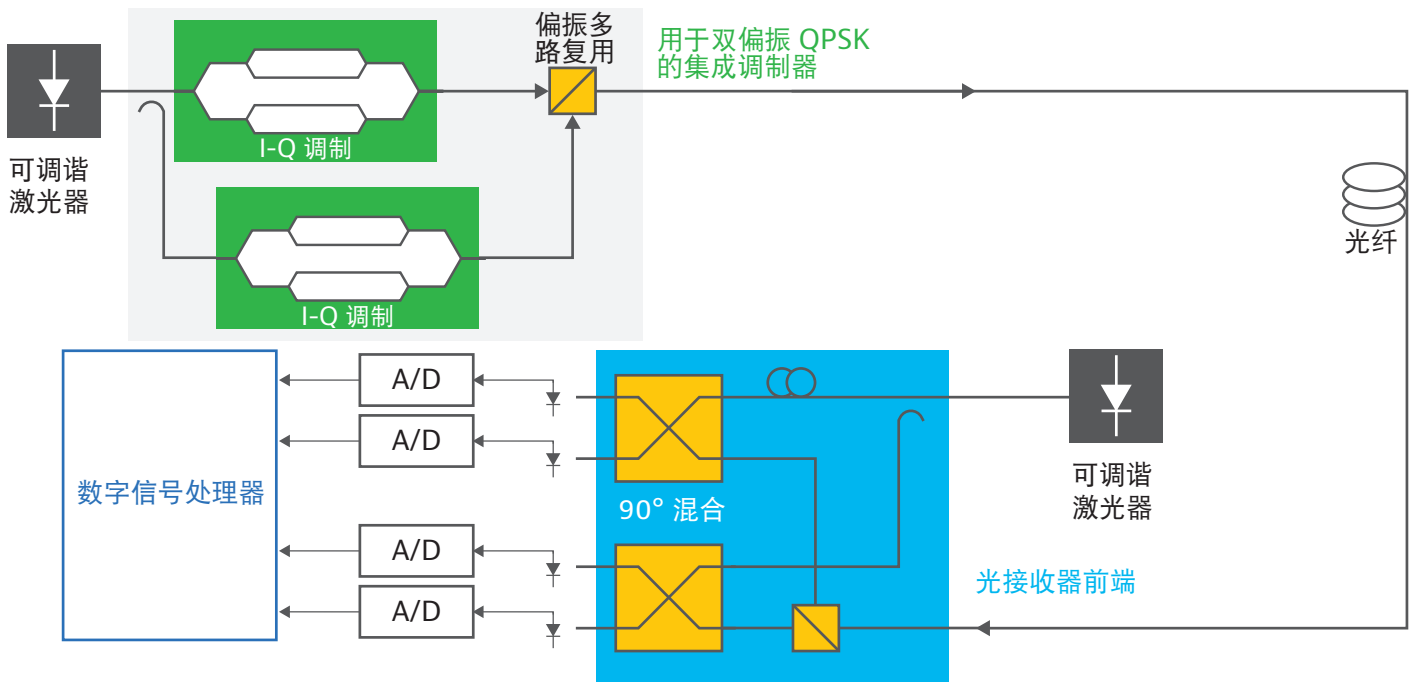


图 4 - 相干传输系统关键方面的图示

典型的相干和密集波分复用系统使用 1550 纳米波段，这是损耗最小的区域，是长距离传输的一个有用因素。来自发射器激光器（其通常是可调谐的并且是集成的可调谐激光器组件 - ITLA 的一部分）的光被分成两路，然后每路被相位调制（I-Q 调制），之后这两路又被重组为两个垂直的偏振态。这种光子组件通常是高度集成的，并且可以利用硅光电设备来满足可插拔光学外形规格的密度、性能和价格期望。在大多数情况下，四个 I/Q 调制器将由集成到 DSP 中的高性能 DAC 驱动。这将执行一系列编码功能，包括成帧器、FEC 和符号映射器，并且通常是 IC 的一部分，IC 还执行相干接收器功能。

光信号现在经过相位、偏振和幅度调制（与简单客户端接口上的简单仅幅度调制相反），如果受到衰减（损耗）、色散和偏振色散以及其他降低传输信噪比（光 SNR = OSNR）的影响，它将沿着 光纤链路传输。

在接收器处，输入光信号被分离成若干垂直偏振态，然后被分成同相和正交（I & Q）分量，在那里它被另一个（可调谐的）激光器外差，以产生照射在光电探测器上的基带信号。产生的信号然后被数字化，并由 DSP 的接收器部分处理，这将在下面详细描述。

可插拔相干光学器件

大量网络设备都部署了可插拔模块插槽 – CFP2 系列广泛部署在电信应用中，其中 QSFP 系列在企业中占主导地位。由于对 QSFP-DD 的改进，OSFP 在某些方面也获得了支持。



图 5 - DCO QSFP-DD、OSFP、CFP2 的可插拔外形规格 – 由 Acacia⁴ 提供

用于线路侧传输的相干可插拔模块比典型的可插拔客户端模块灵活得多。在可插拔客户端模块（例如 QSFP-DD）中，我们通常在模块的入口端和出口端看到相同的信号结构。成帧和编码在电口（主机）和光口（客户端）上是一致的。相反，相干转发器可以在主机端支持那些相同的结构，但是将存在非常不同的输出信号结构（例如，在 ZR 接口上使用 C-FEC（级联 FEC）的单载波相干 DP-16QAM 调制信号）。

客户端和线路端编码之间的这种显著差异会影响测试覆盖率。在相干 CFP2-DCO 转发器中，复杂度可能更高。在电信应用中，CFP2-DCO 模块可以同时支持基于以太网和多业务的客户端。400GE、4x100GE 在以太网应用中具有广泛的吸引力，而 OTN 和 FlexO 提供了强大的能力来满足多业务需求，这是电信行业的重要应用。

带宽还可以根据客户端的动态带宽需求进行扩展，例如 n x100G 以太网的可扩展性，可以从 1 个扩展到 4 个客户端来填充 400G。对于 OTN 主机信号，有许多选择：带 NRZ 的 1 或 2 * OTL4.4，或 PAM 4 编码的 4 * OTL4.2 / 4 * OTLC 2，400G，具有不同的服务能力。上述接口反映了从旧结构或早期 400G 结构的迁移路径。

4. <https://acacia-inc.com/products/>

未来的 OTN 接口可以基于 FOIC (FlexO 接口) 技术, 采用 100G、200G 或 400G 变体。主机 FOIC 接口受 KP4FEC 保护

FOC 标准	描述
FOIC 1.4	由 4 条 25G NRZ 电气通道承载 100G OTN
FOIC 1.2	由 2 条 28 Gbd PAM-4 电气通道承载 100G OTN
FOIC 2.4	由 4 条 28 Gbd PAM-4 电气通道承载 200 G OTN
FOIC 4.8	由 8 条 28 Gbd PAM-4 电气通道承载 400G OTN

线路端结构基于 100G、200G 和 400G 实体, 但不再存在主机端看到的混合结构。根据链路参数 (例如损耗、光信噪比和色散), 可以使用不同的 FEC 来匹配所需的编码增益、性能等。示例包括 CFEC (串接 FEC)、OFEC (开放式 FEC) 以及专有 FEC。

可插拔数字相干光模块 (DCO) 需要将大型相干线卡的大部分功能集成到紧凑的可插拔模块中。它包括一个使用可调谐激光器的高度集成的光学相干接收器和发射器, 其中许多元件通常需要像硅光电设备这样的先进技术。相干光学器件还需要高度集成的 DSP 来提供数字相干接收器的所有功能。接收部分的框图如下所示。

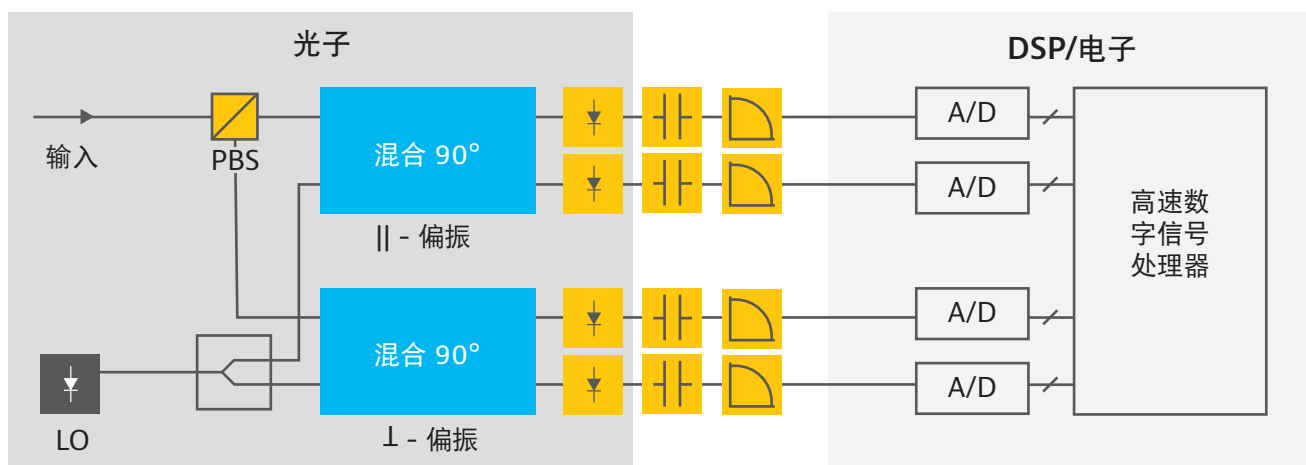


图 6 - DCO 接收部分的框图

模拟到数字转换

来自接收器的输入必须以奈奎斯特频率或高于奈奎斯特频率进行数字化, 由于典型的相干系统使用相位和偏振分集, 因此您至少需要 4 个非常快的 ADC。它们需要具有合适的分辨率和线性度, 虽然它们将由光电二极管和跨阻放大器 (TIA) 进行处理, 但它们可能需要较宽的范围。

DSP 功能块

DSP 相干接收器需要功能块，其中包括：

功能	描述
时钟恢复	用接收的波特率跟踪的数字 CDR
色度色散	补偿光纤色度色散，快速缓冲深度与预期链路长度成正比
偏振分集	跟踪快速变化的偏振变化（多 krad/秒）
载波相位跟踪	跟踪输入码元的相位并生成误差矢量幅度 (EVM)
码元恢复	恢复原始码元
FEC	可以使用多种类型的 FEC 来纠正错误码元
成帧器和解映射器	该模块可以处理成帧信号，如 OTN、FlexO、FlexE 以及以太网
SERDES	SERDES 通过高速可插拔接口连接到主机。还需要执行电气链路均衡

表 2 - 接收器端所需的数字相干模块 DSP 功能

当然，所有的功能都必须被控制和协调，并被实时跟踪，因此 DSP 具有一个庞大而复杂的控制结构，通常与复杂的 DSP 固件交织在一起。DSP 可能必须支持许多不同的工作模式和速率，可以是 ZR 或 ZR+ 等标准和特殊供应商专有模式的混合。与必须偶尔报告几个简单链路参数（如信号丢失 (LOS) 或光功率）的简单客户端模块不同，DCO 中的 DSP 必须实时报告多个复杂参数，以便主机可以管理和跟踪链路运行状况和状态。少量参数包括：

参数	描述
信号丢失 (LOS)	由于该模块可能工作在多载波 DWDM 系统中，简单的光功率检测器不能用于 LOS，因此需要解析和检查所选择的载波波长。
光功率	在 DWDM 系统中，必须解析并测量所选择的载波波长。
工作波长	DWDM 系统可在可调的发射/接收模式下工作
色度色散	色度色散测量 - 通常与链路长度成正比
偏振跟踪	由于机械效应，偏振态可能会迅速改变 (krad/秒)
光信噪比 (OSNR)	链路运行状况品质因数
误差矢量幅度 (EVM)	IEEE 和 OIF 使用误差矢量幅度作为品质因数
FEC 前误码率	跟踪 FEC 之前的误码率 - 可用于触发链路降级警报
SERDES 状态	监控 SERDES 状态，包括均衡器、锁定状态（甚至可以进行眼部跟踪）

表 3 - DSP 可报告的模块参数选择

其他一般参数可以包括模块状态、工作温度、激光器参数。管理、控制和报告这些参数（其中许多参数在制造过程中需要对波长和温度进行校准）需要 DSP、模块微控制器和固件与主机接口之间的紧密耦合。

模块管理和控制

DCO 模块是集成到可插拔光纤外形规格中的完整 DWDM 线卡。任何功能的一个关键方面都是管理界面。多年来，使用基于简单内存映射协议（SFF 8636⁵ 广泛用于像 QSFP28 这样的 4 通道模块）的双线接口（如 I²C）的客户端光纤不断发展，但随着 400G 类客户端模块的出现，旧式解决方案显然无法满足现代应用的要求。整个行业通力合作，促成了 CMIS 4.0⁶ 的诞生，它可以作为 400G 客户端光学器件（例如 QSFP-DD）的管理界面。DCO 的管理比客户端光学器件复杂得多，业界正在寻找不同的途径来实现相干模块管理。OIF⁷ C-CMIS 采取的一种方法是在 CMIS 4.0 框架上构建，并为相干应用添加扩展，这是 QSFP-DD 和 OSFP 模块的可能路径。它们很可能在需要支持 CMIS 4.0 堆栈的主机中使用，因为这是 QSFP-DD 和 OSFP 客户端将使用的。另一种方法基于 CFP MDIO 概念，但针对 DCO⁸ 得到了显著增强，该方法基于用于 100G 和 200G 应用的第一代和第二代 CFP 和 CFP2 DCO 模块。

产品生命周期中的测试需求

在任何产品生命周期中，都有一系列的测试和测量需求，这些需求在广度、深度和复杂性上可能会有所不同。VIAVI ONT 产品线旨在根据产品开发、验证、生产和部署生命周期的每个阶段的需求进行扩展。

模块生命周期阶段	应用和示例
技术与组件评估	DSP、ROSA、TOSA 的评估
模块硬件开发	集成硬件、信号完整性、数据路径连接
固件和软件开发	模块固件和软件集成、DSP 功能验证、模块命令接口
标准验证	验证主机、光电设备和命令接口、标准以及 MSA 合规性
生产	功能测试和校准以及吞吐量和测试台密度要求
模块和供应商选择	NEMS 根据标准和询价评估和测试供应商选择模块
模块集成	模块硬件和固件与主机集成，包括评论接口等

表 4 - 模块生命周期测试需求汇总

5. <https://www.snia.org/technology-communities/sff/specifications>

6. <http://www.qsfp-dd.com/wp-content/uploads/2019/05/QSFP-DD-CMIS-rev4p0.pdf>

7. <https://www.oiforum.com/technical-work/hot-topics-coherent-common-management-interface-specification-c-cmis/>

8. <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/2019/01/OIF-CFP2-DCO-01.0.pdf>

组件和 DSP 评估

开发强大可靠的产品并加速其上市的一个关键方面是仔细选择组件。即使在模块 PCB 布局开始之前，评估 DSP 功能的重要工作也可以通过 DSP 评估板和与适当的电气适配器相连的 ONT 测试装置的组合来完成。这样的设置可以充分利用 DSP 功能和流量吞吐量、成帧器，以及要与 PCB 设计和模块的机械布局并行开发和调试的 SERDES 硬件和固件。这种方法可以节省几个月的开发周期，并允许更全面的设计和 DSP 评估，这是无法通过模拟实现的。还可以对光电设备和 DSP 的兼容性进行评估，并对测试光纤进行实际测量，以确定 OSNR 和误差矢量幅度等系统性能参数的基准。

研发

在这个阶段，已经选择了组件，并对设计概念进行了审查。从信号完整性和散热角度来看，布局验证都至关重要。模块固件需要打开才能启动 DSP，并设置模式和信号路径。研发阶段的 ONT 方法是独特和全面的。它允许测试、强调和验证高速“物理层”，包括低层“协议”，如电均衡。ONT 支持全方位的流量需求 – 从帮助检查信号完整性和 SERDES 的未成帧信号到允许全信号路径验证的全成帧以太网和 OTN 信号。所有这些都放在一个满足电源和冷却要求的“测试槽”中。此外，它还通过模块命令界面提供全面的测试和验证功能，并通过管理界面实现物理层和协议事件以及命令和响应之间的紧密同步和跟踪。

在研发阶段，需要开发、调试和验证四个主要主题：

主题	测试活动
主机接口 – 物理层	SERDES 和均衡器的验证和功能、信号完整性、动态和时钟、偏差容差。能够支持具有不同时钟域的高级 PHY 模式，例如 4x100G。主机接口抑制和恢复。ONT 应用包括高级错误分析（PAM-4 级别转换和突发分析）、动态偏差插入、比特滑动分析和时钟变化。
主机接口 – 协议	数据路径完整性、成帧器的正确功能、FEC 等。纠正警报和错误行为。与以太网和多业务（OTN、FlexO 等）兼容。ONT 应用包括对准标记和 FEC 分析，以及全面的以太网、OTN 和 FlexO 测试。
命令接口	模块管理界面功能正确，DSP 操作和流量模式设置正确（与协议一起验证）。能够读出关键性能和光子指标。正确、及时地指示故障和警报条件（LOS、频率范围、FEC 等）。ONT 提供革命性的模块调试工具，如转发器控制环境。
光子性能	链路在诸如 OSNR、光带宽整形、LOS、偏振态等损伤下的行为。线性度、频率跟踪、激光调谐范围、接收器 AGC。VIAMI MAP-300 为这一领域提供了一套全面的光子工具。

参考下面的 DCO 功能框图很有用。在研发中需要测试的关键要素显而易见。为确保完全端到端测试，必须使用成帧流量。基本的未成帧测试仪只能真正验证 SERDES 的基本连通性。它无法查看 DSP 内部并验证包括 FEC、成帧器和缓冲器在内的复杂功能。必须使用成帧信号（如适用，包括 OTN 和 FlexO）完成数据路径覆盖。

SERDES 块是一个元件，在这个元件中，应力高于频率、相位和偏差的正常值是很重要的。像 SERDES 这样的模块功能元件必须从信号和数据频率跳跃和瞬变（由时钟源切换引起）和偏差（由时间和温度引起）等破坏性事件中恢复。当超出标准限制时，重要的是硬件和相关的软件正确地报告物理情况（频率或偏差超出范围），而不仅仅是故障。同样重要的是，当时钟频率恢复到正确范围时，模块可以“自我恢复”，并通过命令接口发出信号。

当功能块发生故障时，还可以使用诸如频率倾斜和动态偏差之类的应力来确定误差分布。这方面的一个很好的例子是在 SERDES 块中导致比特滑动的过度动态偏差。拥有能够区分错误突发和比特滑动的测试集可以帮助深入了解应力条件下的准确故障模式。

像 FEC 和成帧器这样的大型 IP 块依赖于流量的成帧。操纵和错误处理成帧流量的能力对于验证这些 IP 块非常重要。

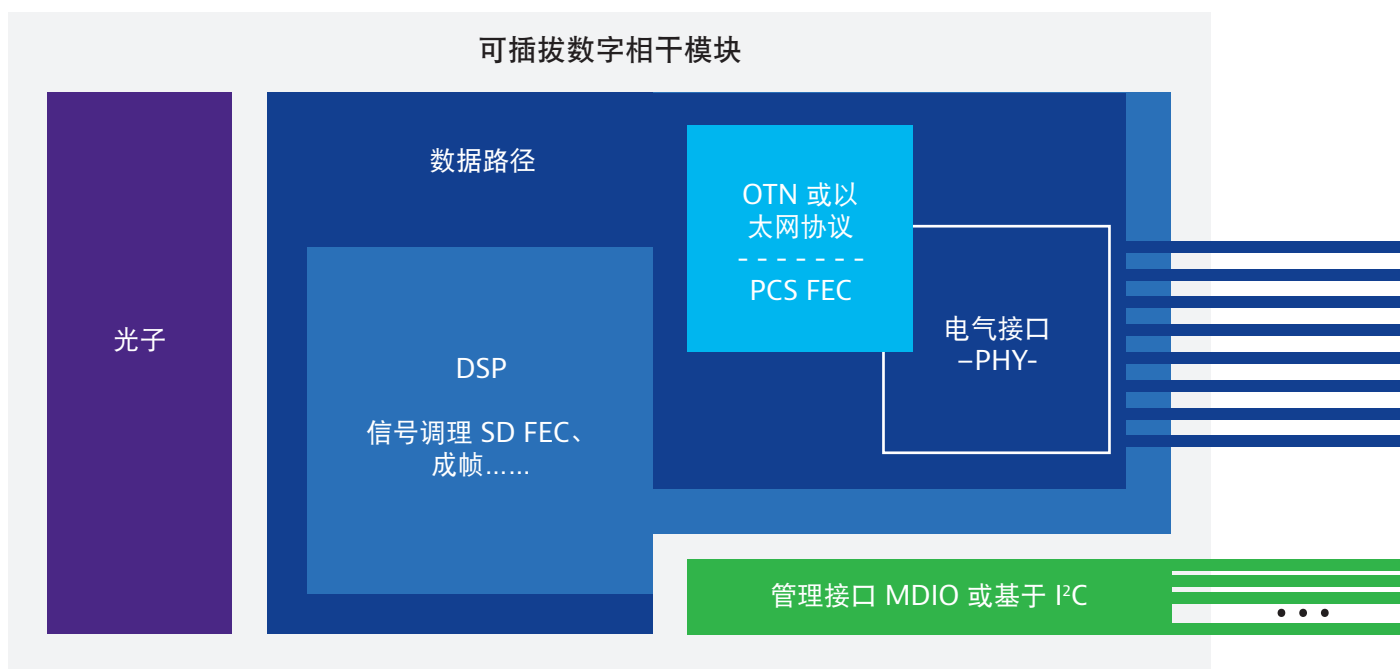


图 7 – DCO 功能块

物理层和 SERDES 测试示例

SERDES 是任何 DCO 模块的关键部件。没有可靠、符合标准的高速数据接口，什么都不能运行。我们将检查在任何 DCO 主机接口上运行的几个示例测试，以验证 SERDES。

动态偏差

模块数据接口依赖于使用 PAM-4 电气调制在 28 Gbps 处运行的并行高速接口（8 个接收和发射通道）。与任何并行接口一样，我们可能会在通道之间出现偏差，这种偏差可能会随着时间的推移而变化。IEEE 列出了此接口的偏差容差，因此偏差变化适用于此标准验证。它还可用于验证信号完整性。改变通道间偏差将改变电平之间的串扰，因此错误率随偏差的任何变化可能指示串扰裕度问题。动态偏差的另一个关键用途是在偏差过大时确定 SERDES 的故障模式。

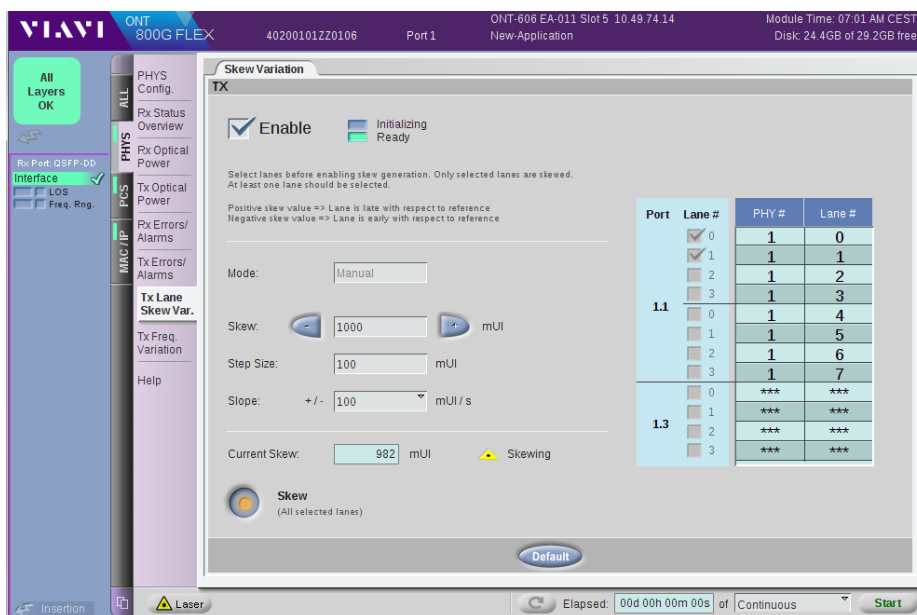


图 8 – 在 ONT GUI 上设置动态偏差

过度偏差可能导致的一个问题是 SERDES 缓冲区中的比特滑动，如果没有正确的应用程序，该问题极难排除。对于大多数测试集来说，它被报告为错误突发，因为它们不能识别滑动。ONT 可以通过对成帧流量运行动态偏差测试来强调这一点，然后跟踪 SERDES 输出上看到的错误配置文件。ONT 可以检测实时以太网流量的比特滑动。当超过 SERDES（模块输入）入口处的偏差限制时，可以观察到故障模式。

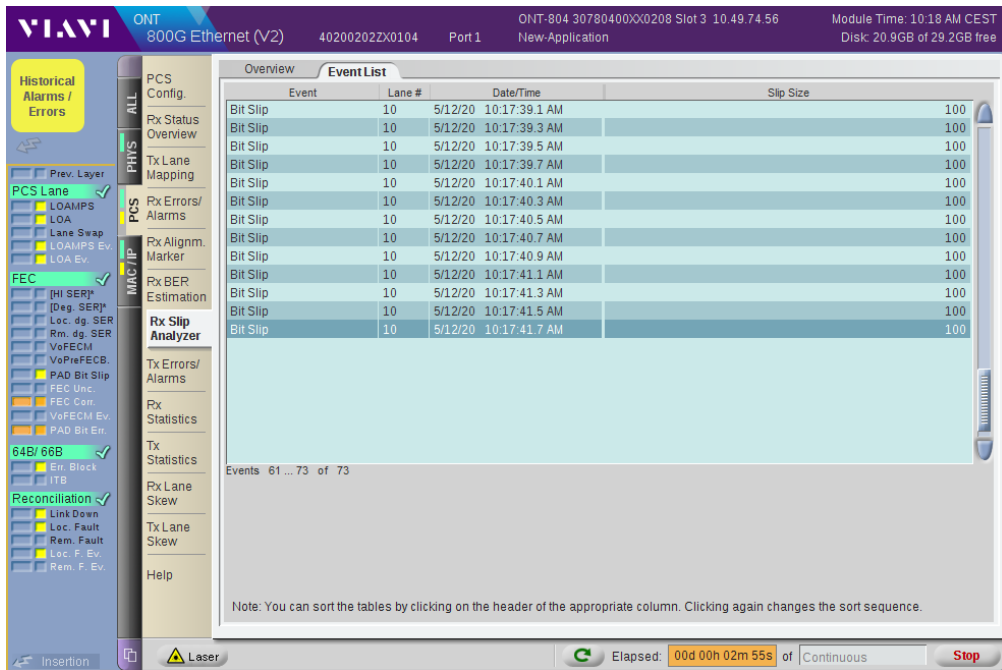


图 9 – ONT 比特滑动检测应用

除了跟踪比特滑动等大的破坏性错误外，ONT 还可以跟踪对 PCS 层的影响，其中包括通道对齐标记和 FEC 等关键元素。在故障条件下，正确一致地跟踪以太网警报和错误至关重要。

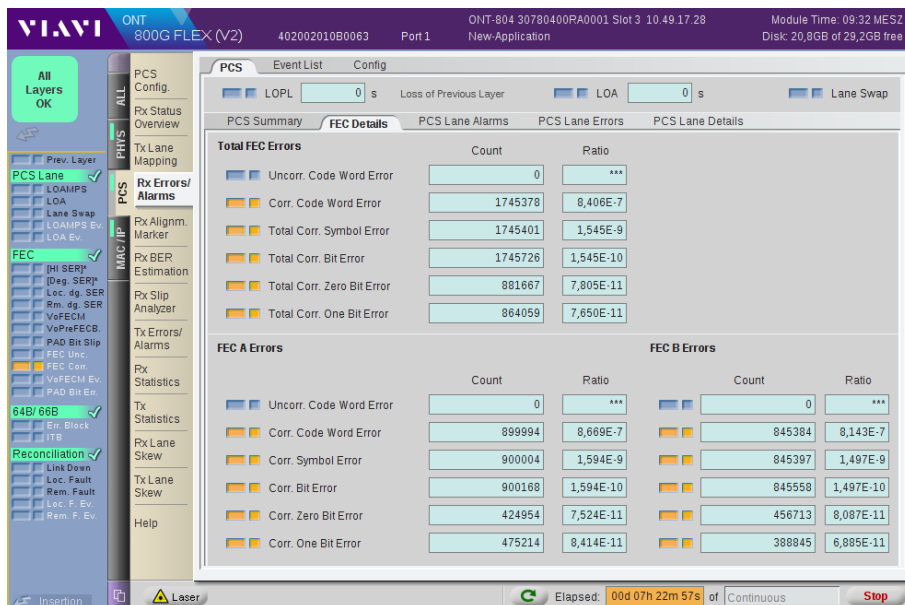


图 10 – 全面的 FEC 概览对于了解链路错误行为至关重要。

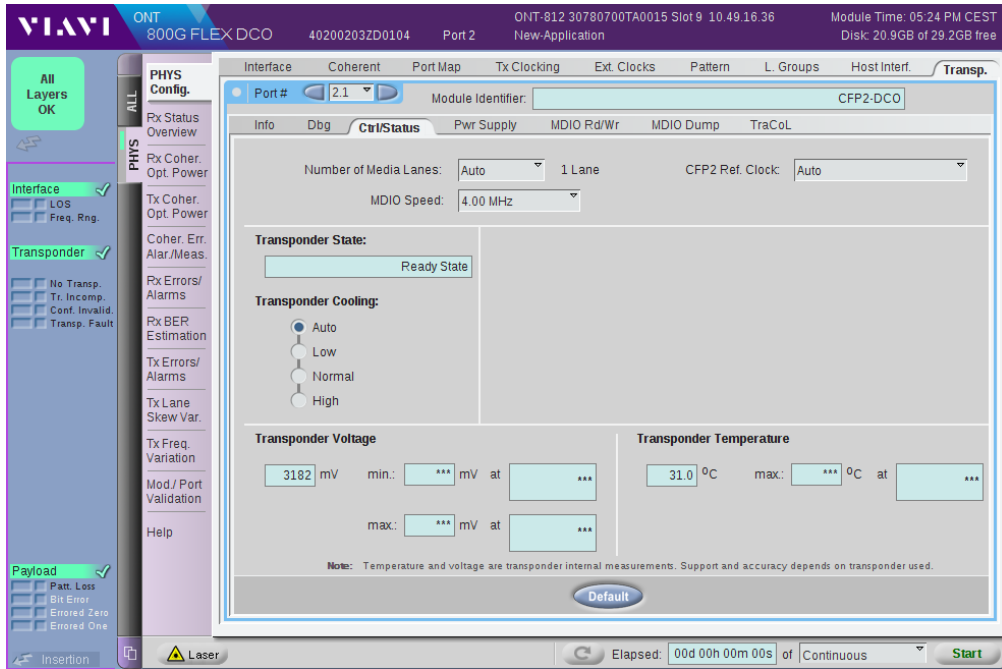


图 11 – ONT 转发器状态概览页面

相干可插拔模块的管理极其复杂。对管理界面的全面洞察和控制对于调试、验证和运行整个系统（包括主机模块）至关重要。在研究模块接口时，必须考虑几个要素，并且所有要素都需要与其他接口、主机电口和光口紧密耦合。

领域	示例	推动因素
标准内务管理	正确模块初始化、报告供应商和型号 ID、标准参数测量。	“使用”模块并通过主机正确初始化模块以使主机正确识别模块及其功能的标准要求。
测量、警报和错误	对 LOS、OSNR 变化（和 FEC 之前的误码率）、CD、PD、主机接口问题等事件的响应。	光子事件可以驱动警报和错误，应通过命令界面快速而明确地报告这些警报和错误。像光功率这样的参数必须是可信和一致的。
接口速度、吞吐量和稳定性	能够在双线接口 (TWI) 上以不同速度运行，模块固件稳定，可重复快速读/写访问。	模块中的微控制器应该是稳定的，不会因为 TWI 上的“繁忙”流量负载而出现故障。此外，在繁重的管理接口负载下，其他内务管理任务仍必须以稳定的方式继续执行。
与事件相关的接口时间	确认关于警报和主机电气接口状态的正确 LOS 响应。从 LOS 事件中恢复 – 恢复时间、稳定性、是否自动恢复或需要主机干预。	服务中断和自主恢复能力仍然是线路端和客户端模块面临的重大挑战。根据光子和主机电口状态来描述接口消息和时序也很重要。

一个非常简单的应用是 ONT 重复读/写访问，它被广泛用作模块稳定性的一阶测试。它根据用户定义的读/写事件加载命令界面，然后可以运行其他测试，如正常流量或压力测试（如偏差），以查看命令总线和模块微控制器上的重复和重型加载是否影响模块的运行和稳定性。

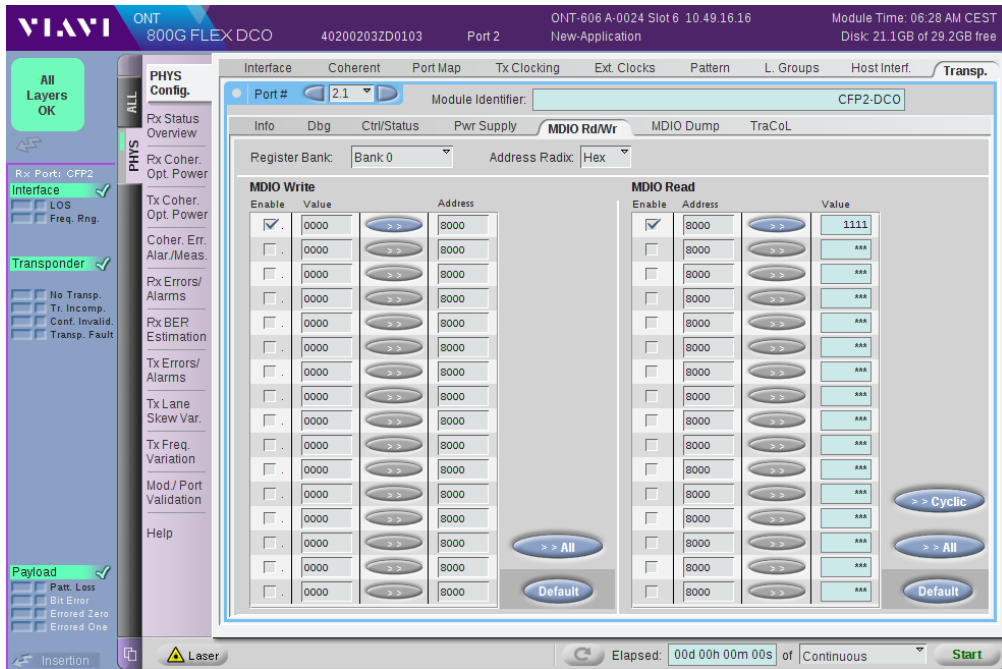


图 12 – CFP2 DCO 模块上使用的 MDIO 命令接口的 ONT 模块读/写加载。

ONT 本机支持相干模块（QSFP-DD 和全功能 DWDM CFP2）的扩展管理要求，并以清晰一致的方式在 GUI 上显示关键参数和状态。工作波长等关键参数可以直接在 GUI 中轻松设置和跟踪，也可以通过自动化脚本实现深度 SVT 测试要求。

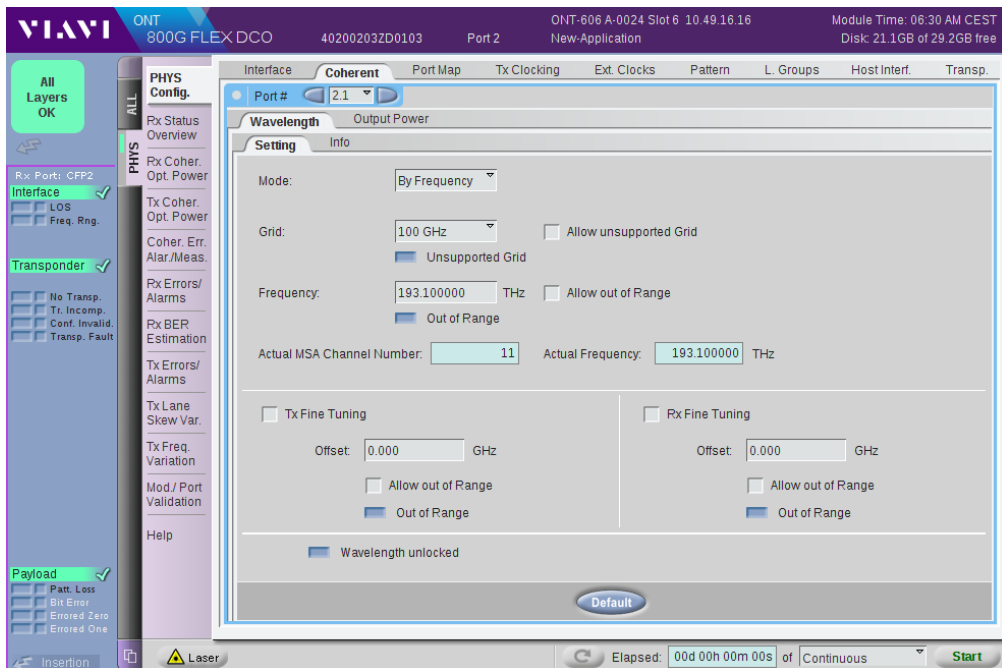


图 13 – 用于设置关键相干模块参数的 ONT GUI

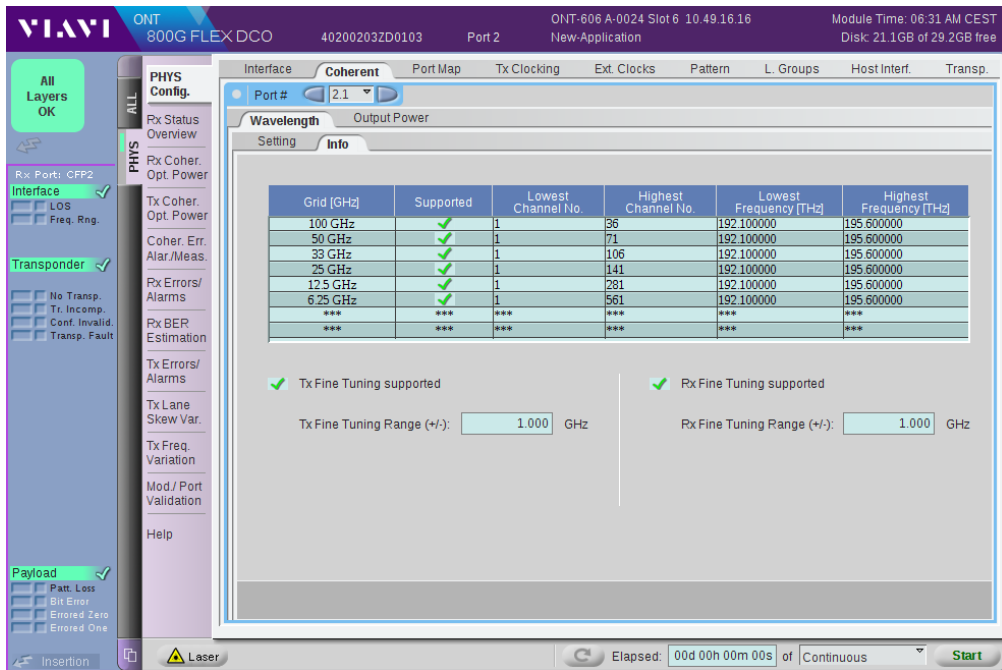


图 14 – 报告相干转发器功能的 ONT GUI。

命令界面和相关模块固件必须正确报告光学参数，这远比客户端模块中的简单功率测量复杂。必须正确报告和跟踪一系列动态参数，包括 OSNR、CD、误差矢量幅度、PD 和 DGD（可能还有一系列用户可编程限值）。ONT 可以与 VIAMI MAP-300 产品系列一起使用，以允许产生和操纵光学参数，而这些参数又可以在 ONT 中测试的光学模块中进行跟踪和验证。这也可用于支持 DSP 固件的开发和验证。

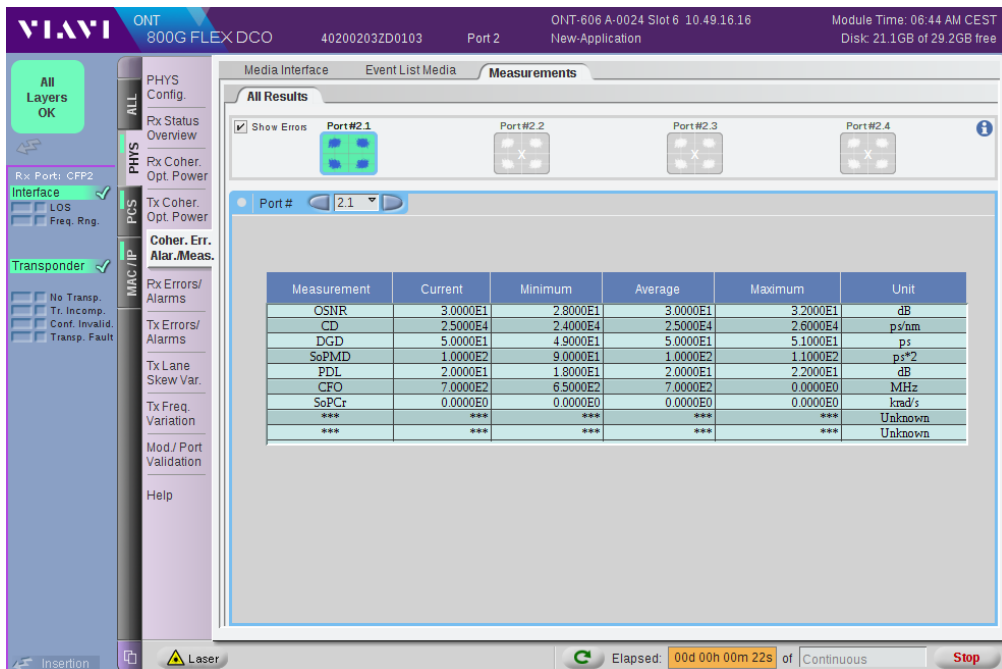


图 15 – 显示模块报告的相干模块光学参数的 ONT GUI。

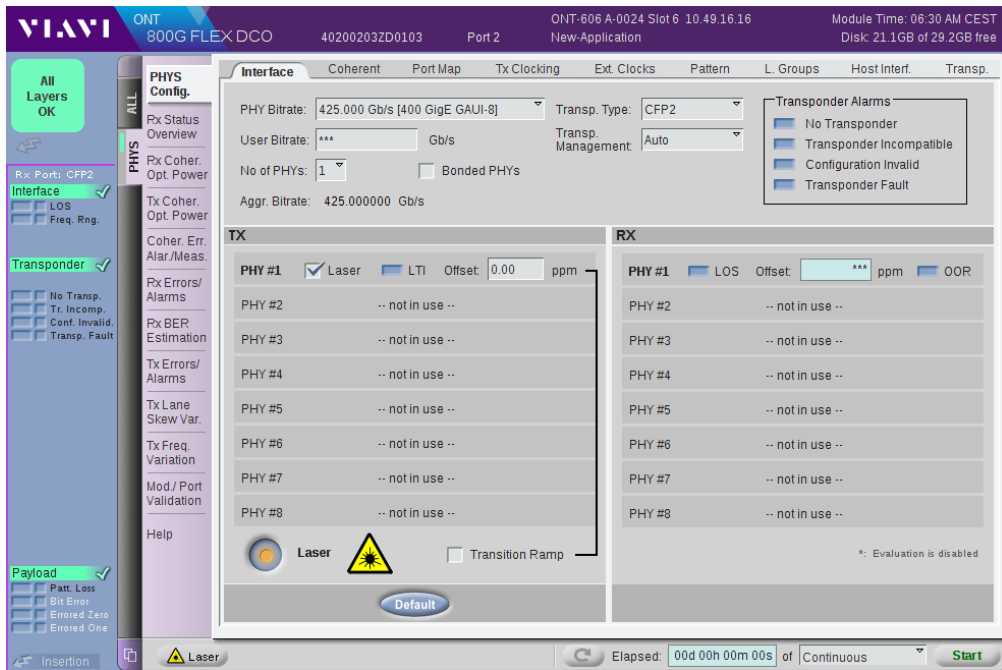
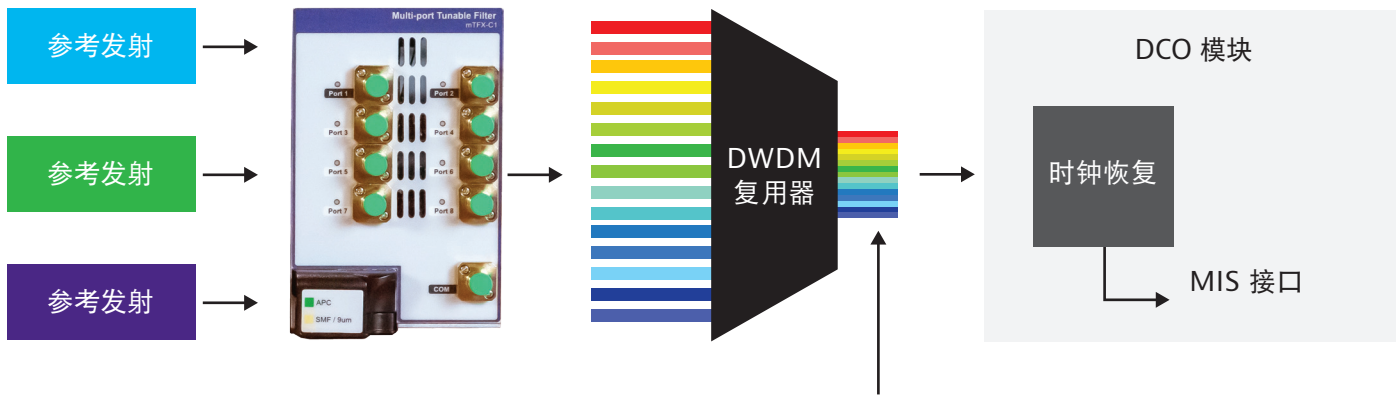


图 16 – ONT GUI 相干模块物理层接口状态概览

系统验证

系统验证涉及到模块的广度和深度测试，物理硬件和模块固件都需要测试。测试通常是多领域和自动化的，当模块和网络集成在一起时也是一个关键阶段，因为模块和主机之间的交互是一个关键的系统级特性。这一阶段建立在模块开发阶段使用的许多应用程序的基础上，但重点是软件和性能方面。关键且及时地报告报警和错误起着核心作用，这种报告是通过堆叠和协调光电设备的状态以及模块 MIS 向主机报告的内容来完成的。将设置链路参数（例如 OSNR 或 FEC 前误码率），然后参考/测试光链路可以降级（使用 VIAVI MAP-300 产品系列）。当链路通过降级级别时，模块和主机组合必须发出正确的警报并采取适当的措施（可能包括切换到另一个链路和引发系统级警报）。然后，当链路恢复时，系统应遵循正确的恢复过程。

我们在这个阶段看到的最苛刻的测试之一是服务中断测试。它基本上是测试系统对光信号完全中断后恢复的响应。恢复过程和时机尤其令人感兴趣。在客户端系统上，这是一个相对简单的测试，其中单个光信号由快门中断，并监控模块响应（包括模块 MIS 消息传递）。然后重新连接光信号，并再次响应，包括恢复时间和记录的 MIS 消息。即使使用简单的直接检测模块，我们也会看到模块锁定或通过 MIS 发送误导性消息的问题。在最糟糕的情况下，模块不能正确自我恢复，需要通过主机进行手动干预。相干模块的测试负载变得更糟，因为现在该模块潜在地在多光载波 DWDM 系统中工作，因此中断事件可能仅与多个光波长中的一个光波长相关联。



8 端口可编程光复用器与可调谐滤波器相结合，并在一条信号路径和/或完全阻塞中提供衰减控制。变化不会干扰任何其他信号的状态。

请记住：
DCO 的输入端仍然可以有光功率，
因为其他波长可能仍然有效

图 17 – 使用 MAP-300 可调谐过滤器 (mTFX) 的 DWDM 环境中的服务中断

系统依赖于该模块正确地跟踪所选择的一个载波并监控其光功率电平，以便当服务中断、达到信号丢失 (LOS) 水平时，该模块通过 MIS 接口正确地指示这一点。在此测试期间，模块可能还需要抵制主机接口，并通过 MIS 发出信号表示此情况。恢复过程是一项要求很高的测试，因为模块必须正确地重新获取重新声明的光载波，并启动相干接收信号链，向主机发出链路正在恢复的信号，并且正确地设置主机到模块的电口。这些事件的顺序和时间是至关重要的，这一过程的稳定性也是如此。VIAVI ONT 为验证和调试此测试的 DCO 模块方面提供了一个理想的测试环境。

系统验证还需要对通过链路和模块传输的实时流量进行深入测试。在许多情况下，这将是多业务流量，例如 OTN 以及以太网。OTN 的功能为最终用户提供了极大的灵活性，但它确实提出了更高的测试要求。VIAVI ONT 支持全功能 OTN，包括对 400G 级 OTN 服务至关重要的 Flexo、FOIC 1.2、FOIC 2.4 和 FOIC 4.8。

VIAVI ONT 800G

行业参考 ONT 系列的最新成员针对相干模块生态系统的需求进行了优化。支持 QSFP-DD 和 CFP2 DCO400G 外形规格与冷却和电源需求相匹配，并配合一系列应用程序，这些应用程序可在整个模块生命周期内提供完整的测试和测量覆盖范围。从研发的深层需求到 SVT 和集成的广度和深度，ONT DCO 帮助加速开发和调试的方方面面。

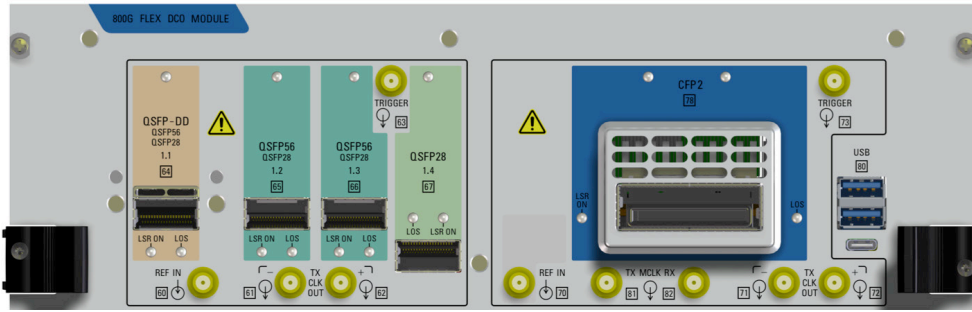


图 18 – ONT 800G DCO 模块

VIAVI MAP-300

总结

可插拔相干光学器件有望将可插拔客户端光学器件的优势带到包括城域网、DCI 和 DWDM/传输在内的一系列全新应用中。相干模块的更大复杂性对测试和验证的所有阶段都提出了很高的要求，从早期的组件验证到模块开发、软件和固件开发、模块验证、系统集成和生产。所有这些都必须在积极的价格预期和上市时间的背景下实现。模块命令和管理界面的复杂性也提高，进一步加剧了这一点。

VIAVI 在支持相干系统的开发和验证方面拥有多年经验，从最高性能 DWDM 中使用的全功能线卡，到目前在 100G 和 200G 上使用的新兴 DCO 模块，不一而足。为了应对 400G 级 DCO 与 PAM-4 电气主机信令、新的更高级的模块管理协议和新的 OTN 服务相结合所带来的挑战，需要全面和集成的测试和验证方法。模块 DSP、主机接口、光域和管理接口之间的紧密协调需要在这方面完全集成的应用程序和测试工具，并且可以跟踪每个域中的事件。

ONT DCO 针对整个产品生命周期的测试和验证需求进行了优化，并支持相干模块与各种应用程序混合的苛刻环境和冷却要求，这些应用程序使用支持模块管理和命令界面交互的独特工具，满足从堆栈直到多业务以太网和 OTN 的物理层 (PAM-4) 的需求。

作者：Paul Brooks, VIAVI Solutions