

光信号调理实现 相干模块测试

目录

简介	1
信号调理：控制和产生损伤	2
基本环回测试	2
光信噪比仿真	4
频谱管理	7
偏振加扰与控制	9
光交换和转向制造	12
正确的解决方案：MAP-300	13

简介

相干光传输正在彻底改变光网络的设计和构建方式。

先进的 DSP 引擎满足了当今的网络带宽需求。日益增长的部署带宽是通过两个因素实现的；每个通道的纯波特率/数据速率增加，以及调和许多不同和变化的网络拓扑的适应性。为了实现当今网络所需的灵活性，这些 DSP 不仅实时适应各种网络损伤（即损耗、噪声、距离、色散），而且还报告它们正在补偿的值。这大大简化了网络规划和监控。

在设计和制造过程中，需要对各种物理层参数进行性能验证。这些测试是由一类称为可编程信号调理元件的测试仪器实现的。这些仪器单独或成组地以稳定、可重复和可适应的方式模拟光纤链路的物理参数。



图 1: MAP-300 和相关的 LightDirect 测试模块提供测试相干光接口所需的所有关键光学测试、信号仿真和自动化功能

随着 OIF 和 IEEE 发布公共标准（例如“*Implementation Agreement 400ZR (OIF-400ZR-01.0)*” www.oiforum.com），相干接口有望进入下一波增长，并将继续迁移到 CFP2 和 QSFP-DD 等可插拔格式。互操作性将是一种预期，并进一步提高在制造中执行的光学测试的关键性。VIAVI Solutions 白皮书《*测试可插拔相干光模块* ([Paul Brooks, VIAVI Solutions](#))》是寻找模块架构和相关关键测试问题广泛摘要的测试工程师的极佳资源。

作为后续内容，本文档将探讨光学测试要求的特定关键要素，尤其是物理层仿真。在最新的 OIF 400ZR 文档 (OIF-400ZR-01.0) 中，这些测试要求在第 13 条中有详细说明。子条款定义了链路规格范围和所需合规性测试的细节。VIAVI Solutions 的 MAP-300 是实施这些测试的理想工具。

信号调理；控制和产生损伤

基本的环回测试

光信号调理元件是一类独特的测试仪器。它们本身不能用于进行测量。它们的目的是以受控和可重复的方式修改或干扰测试信号。这使得其他仪器能够测量来自被测设备或单元的响应。例如，在相干接收器的情况下，误码率测试（举例来说，由 VIAVI ONT-800 执行）通常是用于了解受损的光信号是否已影响被测单元 (UUT) 的反馈。图 2 显示了一个简化的示例。

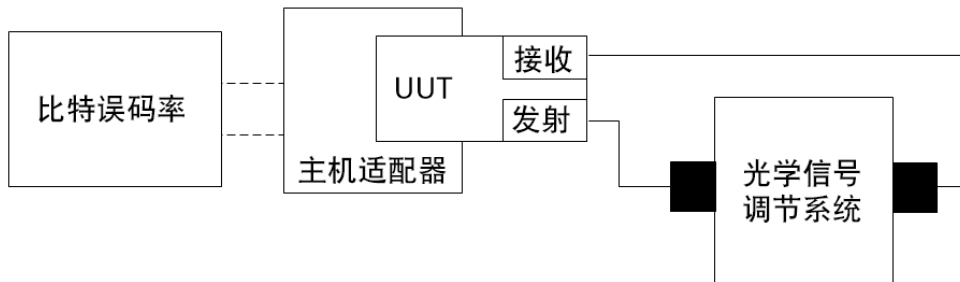


图 2: 在环回配置中测试 UUT 的通用设置。光信号调理元件用于改变发射信号的光学属性。接收机恢复数据的能力是由误码仪测量的

表 1 描述了需要仿真的主要光网络损伤。一般来说，有两种类型。第一种类型在单个校准模块或仪器中完成损伤功能。第二种类型使用协同工作的模块组合。这些复杂的仿真损伤通常需要一定数量的系统偏置、校准或来自其他光学测试设备（例如光谱分析仪或光功率计）的反馈。

损伤类型	功能	VIAVI MAP-300 LightDirect™ 参考
单工 (单一模块)	衰减	mVOA
	放大	mEDFA
	控制/加扰偏振	mPCX
	反射	mVBR
	光交换（光开关）	mOSW、mOSX
	整形或过滤光谱	mTFX
	多路复用	mUTL
复合 (多模块)	添加色散（CD、DGD）	mOSW + 光纤盘
	注入噪声 (OSNR)	mBBS + mVOA + mUTL
	注入相干干扰	mBBS + mPCX + mTLG + mUTL
	多径干扰 (MPI)	mVBR + mUTL + mVBR + 光纤盘

表 1: 用于相干模块测试所需的信号调理元件。单个模块本身或组合在一起会产生 OIF 和 IEEE ZR 标准中提到的光学损伤

为了创建一个全面的测试套件，可以将这些模块进一步集成到一个模组化平台中，比如 MAP-300。相干模块测试序列可能涉及数百个跨越波长、OSNR、接收功率和跨度长度的矩阵的测试用例。产生的损伤级别中的错误对 UUT 内部的 DSP 训练假设、监测准确性和告警功能有直接影响。因此，仔细选择信号调理仪器是至关重要的。表 2 描述了有助于将不确定性降至最低并降低成本的关键参数。

关键选择标准	影响
单参数控制	损伤设备在不影响任何其他参数的情况下控制一个参数的能力。
超低损耗	低损耗元件通过避免额外放大将成本降至最低。 它们确保在给定峰值发射输入的情况下，可以测试完整的接收功率范围。
低噪声	如果需要放大，尽可能低的噪声指数可确保有限的额外 OSNR 损伤。
波长无关	在发射调谐范围内改变波长应该不会对性能造成影响。
长期稳定性	校准测试可能需要几分钟。验证测试可能需要数小时。必须将随时间和温度的漂移降至最低。
可重复性	返回到先前设定值的能力至关重要，因为许多测试点将在测试周期中多次返回。
调谐速度	需要几百个测试状态。单个元件的速度至关重要，然而并行状态改变是关键。稳定时间常常被忽视。
系统模块化	能够快速高效地将损伤元件添加、混合或组合到单个环回测试中。

表 2: 信号调理元件的关键选择参数

大多数环回测试在相对测试模式下运行，使用一个关键的系统参数来评估由次要参数引起的“代价”。例如，如果正在评估模块的多径干扰 (MPI) 容限，则在生成全范围 OSNR 的同时调整次要参数（在本例中为 MPI）达到目标范围。如表 1 所示，MPI 是一种复杂的损伤。它可以通过使用由一段光纤分隔的两个可变反射模拟器来生成。可以为给定的 MPI 生成 BER 轮廓线。可以推断出在相同的 MPI 级别下实现相同的 BER 所需的 OSNR 的差异。这通常被描述为必须返还多少 OSNR 才能克服损伤，换句话说，就是代价。

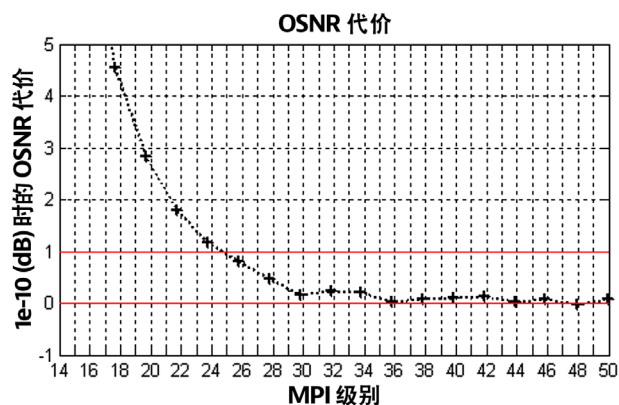
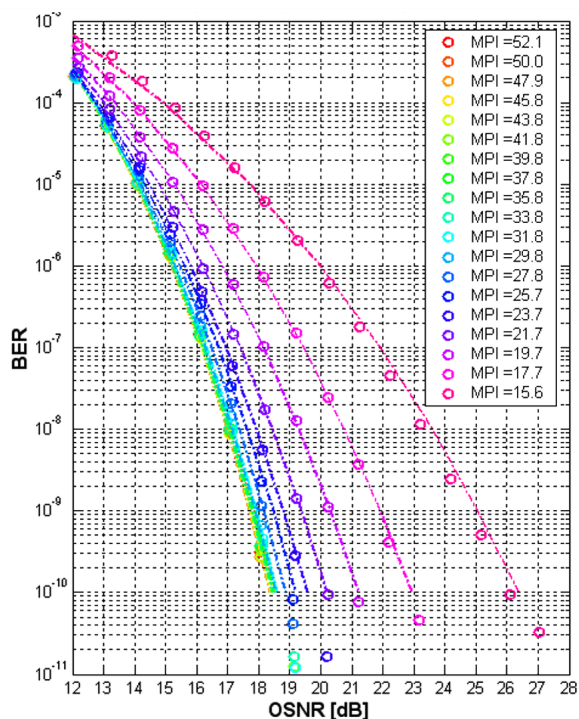


图 3: 不同 MPI 强度下的 BER 曲线 (左图)。选择特定的 BER 数值可以测量作为 MPI 函数的 OSNR 代价 (上图)

在放大系统中，OSNR 是一个关键的系统参数，将在许多测试实施中用作关键指标。下一节将回顾关键的实施细节。

光信噪比仿真

光信噪比 (OSNR) 是衡量相干接口性能的一个基本指标，因为它意味着信号在电再生之前的总传送距离。该值将用于评估其他损伤 (CD、DGD、PDL 等) 的影响。OSNR 的测量已经标准化，可以在 IEC 61280-2-9 中找到。OSNR 可以使用以下公式计算：

$$OSNR = 10 \cdot \log \left(\frac{S}{N} \right) \text{ [dB]}$$

其中，S 定义为总信号功率，N 是 0.1 纳米带宽内的噪声功率。IEC 61280-2-9 指导使用插值法进行噪声测量。

由于相干接口需要在多种条件（放大跨段数、不同光纤长度）下运行，因此测试工程师将被要求生成校准的 大量不同的 OSNR 。在制造测试系统中生成、控制和快速改变 OSNR 数值，对每个 UUT 将执行多次的操作。图 4 显示了使用 VIAVI MAP LightDirect™ 模块的两个简单、有效且可校准的实施方案。VOA 的位置可以根据所需的确切 OSNR 数值而改变。

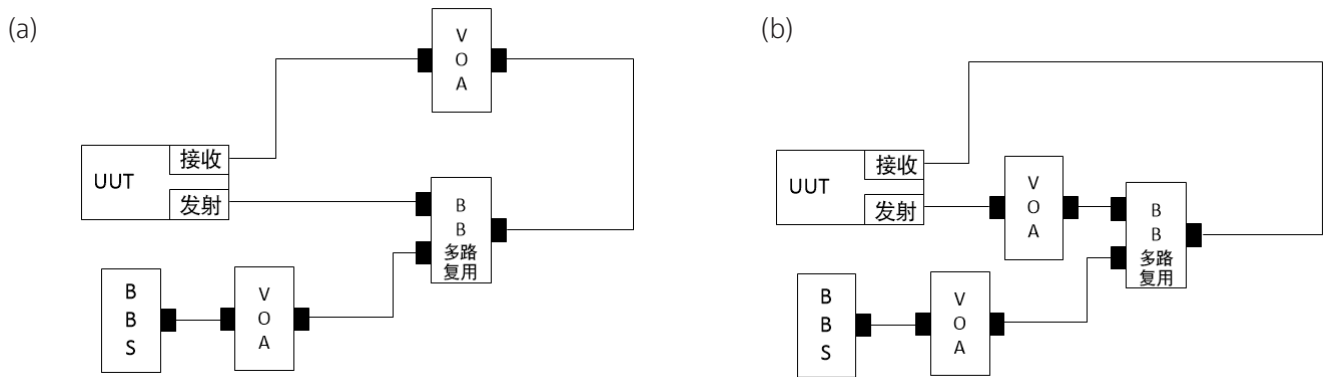


图 4: 使用 VIAVI MAP LightDirect 模块，可以创建以下框图。宽带源 (BBS) 的噪声功率由可变衰减器 (VOA) 精确控制，然后通过宽带复用器 (BBMux) 与发射信号合并。在版本 (a) 中，VOA 放在接收器之前，允许在不影响 OSNR 的情况下调整载波功率。在版本 (b) 中，VOA 被移动到紧跟在发射器之后。为了在改变载波功率的同时保持 OSNR 恒定，必须控制两个 VOA。虽然稍微复杂一些，但它的优点是能够模拟非常低的 OSNR 值

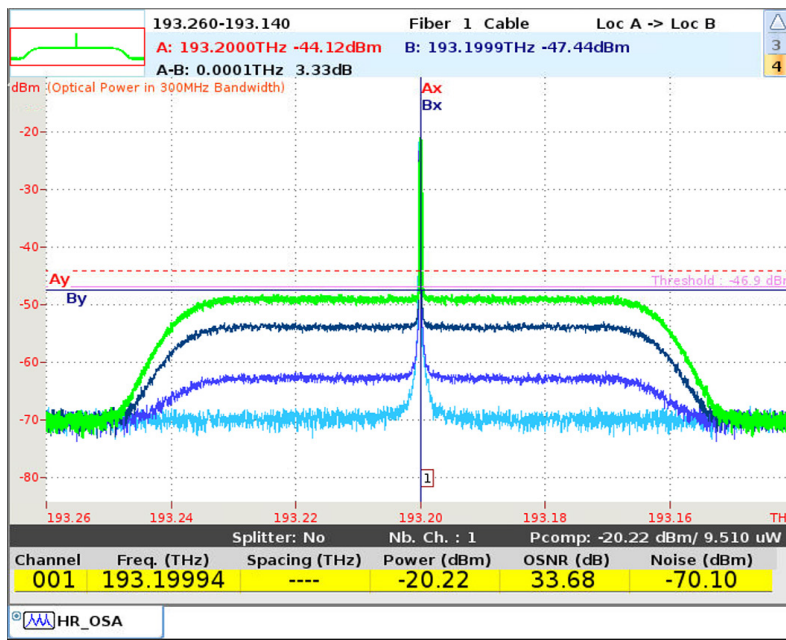


图 5: 噪声量不断增加的未调制载波的频谱示例，使用 VIAVI mHROSA 测量频谱。噪声的形状由接收器之前的可调滤波器控制

BBS 提供的自发辐射可以被整形和展平，并被设计成与放大线路系统中的噪声的光学特性相匹配。它将被去极化，并且在信道带宽上应该具有平坦的频谱。应避免频谱波动，因为这可能会在对噪声值进行内插时导致误差。使用图 4 中的框图，可以创建一个精确校准的 OSNR 生成系统。

在初始测试系统设计时，必须注意几个方面。当期望的 OSNR 接近来自未放大发射器的初始幅度时，OSNR 的变化将作为衰减的函数变成非线性的。如果您需要访问该区域的值，则需要在每次测试前进行 OSA 测量。然而，如果所需的 OSNR 仍然远离该区域（通常大于 10dB），则 OSNR 将与 BBS VOA 的值成正比，从而大大降低 OSA 测量的必要性。如果将这个 VOA 改变 1dB，则会改变 OSNR 1dB。减少 OSA 的使用可以缩短测试周期并降低成本。

初始测试系统设计在开发 OSNR 测试范围和可达到的载波功率时必须考虑以下因素，如表 3 所示。

考虑因素	要求/影响
所需的接收器功率范围	测试接收器的目标功率范围。可能想要添加保护频带，以使将来的损伤能够在以后添加。
所需的接收器 OSNR 范围	将测试接收器的目标 OSNR 范围。
初始发射功率	设置系统中可用功率的起始点。对于理解环回路径中可以容纳哪些损耗至关重要。
初始发射 OSNR	表示可以达到的最大 OSNR 数值。
环回路径损耗（需要时增加）	由产生额外损伤所需的仪器确定。光学连接器是一个重要因素。连接器的检查是关键。
通过宽带耦合器注入噪声功率	可用功率设置可以达到的最低 OSNR 水平。BBS 功率越高，环回路径损耗就可以更低。
从放大器注入的额外噪声（如果需要）	如果需要放大器来达到接收功率，则必须在 OSNR 规划预算中考虑其噪声系数（降低最大 OSNR）。

表 3：优化 OSNR 损伤发生器时的测试系统设计考虑因素

示例结果如图 6 所示。显示了线性和非线性区域。如果所需的 OSNR 范围出现在非线性区域，则需要 OSA，因为准确的 OSNR 将强烈依赖于初始发射噪声电平 - 这将因设备而异。

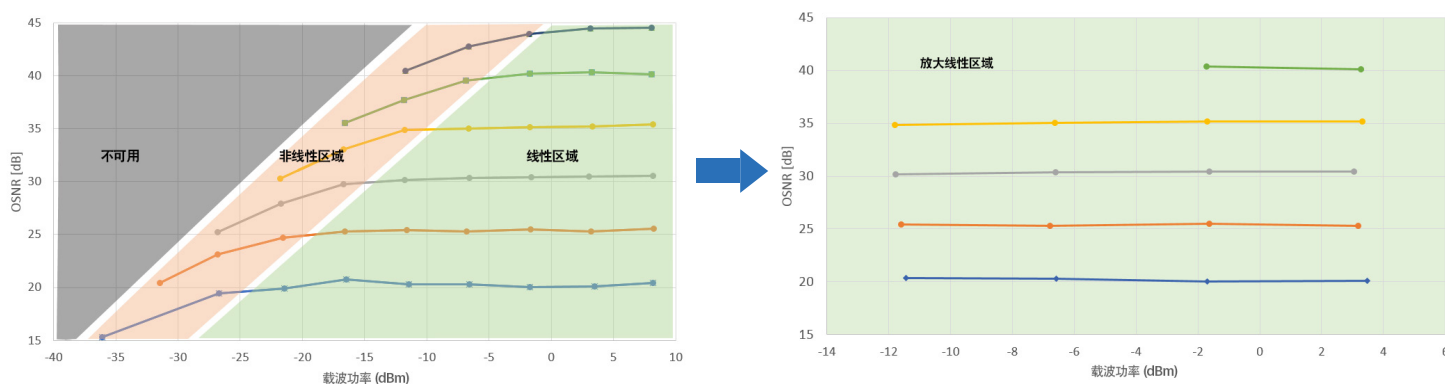


图 6：左图显示了两个独立的 VOA 可以达到的全部功率和 OSNR。出现了三个截然不同的区域。不可用、非线性和线性。对于特定的测试设置，必须考虑总发射功率、初始 OSNR 和测试系统损耗

在具备产生 OSNR 和独立控制接收器功率的基本能力的基础上，以下各节将详细介绍相干模块测试所需的两个最常见附加元件的要求和影响。

频谱管理

可调滤波器在设计用于放大链路的相干模块的测试系统中起着关键作用。在这种情况下，接收器前的最后一个元件必须是可调滤波器（如下面的 TBF 所示）。这些设备模拟网络中出现的 DWDM 滤波器，并确保只有带内 OSNR 到达接收器。当引入滤波器时，会引入额外的环回插入损耗。根据总体损耗预算，可能需要额外放大。应选择低噪声放大器。额外增加的放大器噪声会降低可实现的最大 OSNR。

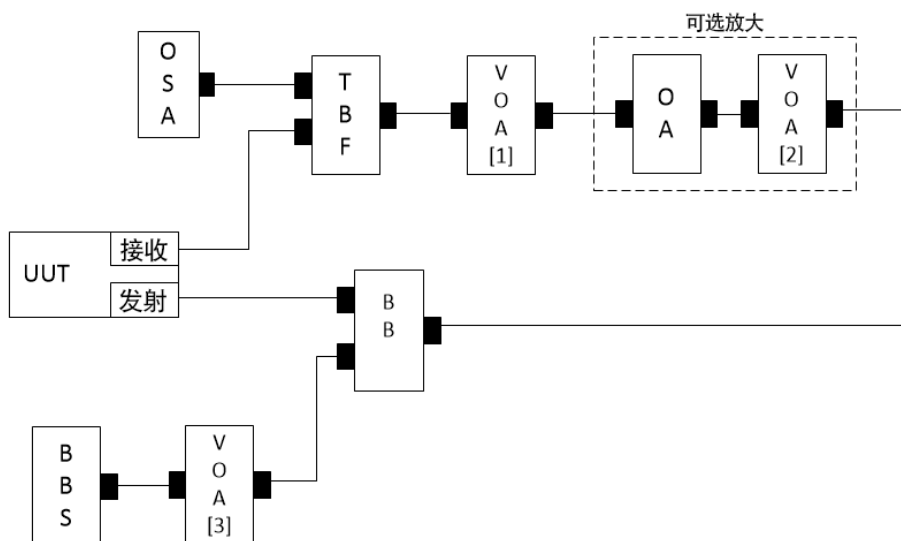


图 7：在图 4 的基础上，在接收器之前添加了一个可调滤波器。随着损耗的增加，可能需要增加额外的增益/损耗管理，以确保能够达到接收器所需的信号功率。下一代可调滤波器是强大的混合器件，可集成衰减功能

考虑到当今光网络的波长灵活性，对仪器可调谐滤光器的要求变得越来越具有挑战性。它必须模拟许多网络环境，包括 DWDM 滤波器形状、通过的 ROADM 节点和信道错位的影响。这些会影响滤波器形状、带宽和损耗。考虑到有限的容差和有限的保护频带，滤波器的微小变化都会影响通过的频谱内容。表 4 描述了关键属性。



图 8：VIAMI mTFX 是一个集成了频谱管理器、光开关、衰减器和功率计的功能强大的集成模块。它们结合在一起，创建了一个强大的频谱和信号管理工具，用于测试 DWDM 制造应用中的 OSNR

可调滤波器技术的进步带来了新的功能，可以极大地简化测试系统集成。VIAMI mTFX 可调滤波器是一款强大的混合器件，集成了光开关、衰减和功率计功能。

属性	要求	要模拟的网络属性
中心波长	亚 GHz 调谐	灵活频谱的实现不太可能遵循传统的 50GHz 网格。
带宽	亚 GHz 调谐	带宽将根据频谱宽度进行调整，以最大限度地提高频谱效率。ROADM 网络中使用的模块将具有较小的有效带宽，具体取决于通过的节点数量。
通带形状	方形或高斯形	在网络中可以找到一系列滤波器形状。ROADM 网络中使用的模块在经过几个节点后会趋向于高斯形状。
调谐	选择性修改频谱的能力	在多波长场景中，可能需要在不影响另一部分的情况下调谐频谱的一部分。

表 4：相干模块测试所需的可调滤波器的关键属性

为了提高频谱效率，DWDM 滤波器信道内部几乎没有空间单独测量噪声。调制后的载波完全填满了信道，并屏蔽了频谱分析仪的噪声水平。出现了几个挑战，但从根本上说，它们都归结为寻找和测量噪声水平。

在全密集波分复用 (DWDM) 系统中，VIAMI 率先推出了非侵入式频谱相关方法 (SCorM)，这是一种使用频谱相关分析和超高精度相干 OSA 的创新测量方法。这种方法不需要干预或操纵信号，因此非常适合有实时流量的网络测试。

对于制造应用，可以利用可调带宽功能暂时改变滤波器。在这种情况下，只需远离载波就可以找到本底噪声（在更宽的信道中）。这使得更传统的 OSNR 测量成为可能。一旦 OSNR 验证完成，滤波器就可以恢复为指定的形状，并且可以继续合规性测试。

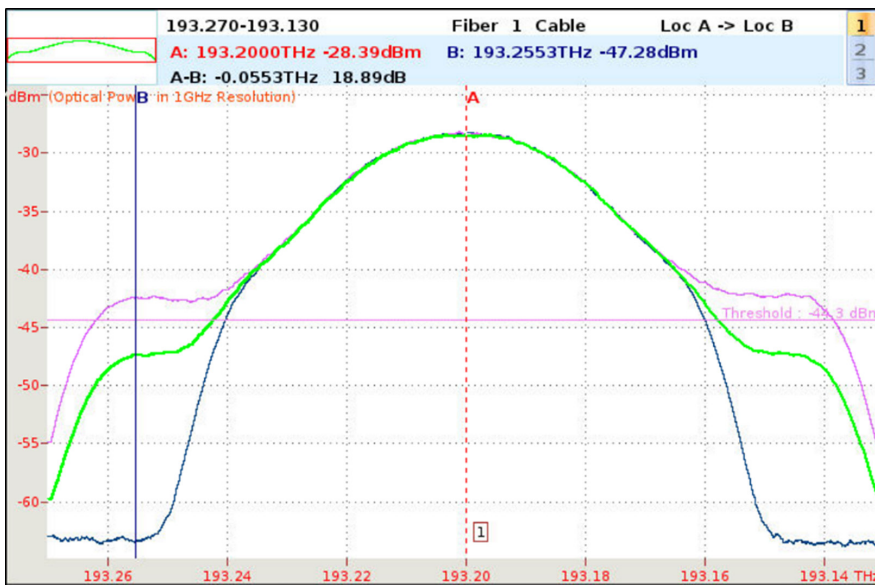


图 9：深蓝色曲线显示的频谱完全填满了 100 GHz 信道，使得 OSNR 外推变得不可能。绿色和粉色曲线显示了滤波器打开到 150GHz 时的频谱。使用更宽的滤波器，“肩部”特征清晰可见，并且可以测量左右噪声值。一旦测量到 OSNR，滤波器就可以恢复到原来的 100GHz 带宽

有了对 OSNR 进行编程和频谱管理的能力，核心环回测试系统就到位了。

偏振加扰与控制

作为一种将数据速率加倍的方法，相干发射器以正交偏振态复用相同波长的两个信号。在接收器能够应用数字补偿算法之前，它必须对信号进行解复用。然而，由于单模光纤中存在少量残余双折射¹，偏振态将不断变化。链路中光纤的双折射会发生变化。随着它的变化，接收器的偏振态 (SOP) 也随之变化。相干接收器必须能够实时处理这种情况。

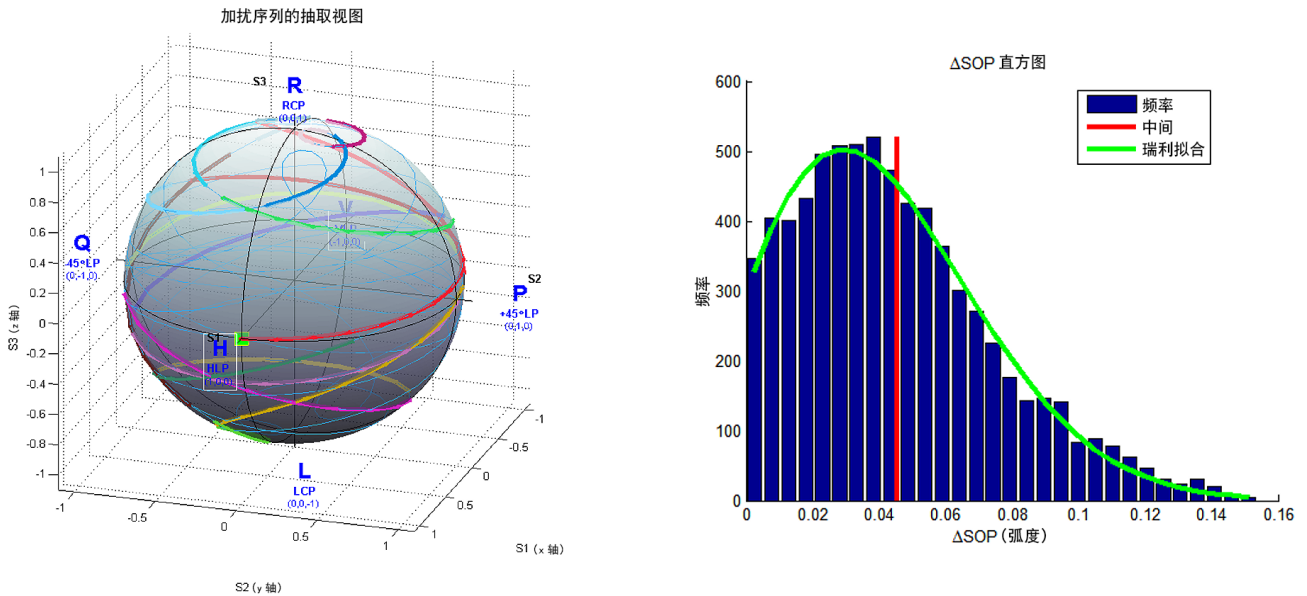


图 10: 具有瑞利分布的偏振加扰。对于已定义的观测窗口，在邦加球体上的曲线圆弧将遵循左侧所示的分布。在一段时间内，整个球体将被覆盖

偏振加扰是一种独特的损伤过程。与大多数其他工具不同的是，该工具必须模拟一个依赖于时间的过程及其统计性质。理解驱动仪器试图模拟的行为的物理过程至关重要。双折射有多种变化方式。根据它们的变化率，可以把它们分成几类。有一些缓慢的变化，比如温度，会导致膨胀和收缩。这些变化会在分秒之间发生。由于微小的振动，也可能会有更快的变化。这些振动会导致光纤上的应力和应变发生变化（例如，架空电缆在风中摇摆或卡车经过时的振动）。这些情况可能发生在 Hz 或 kHz 的频率上。最后，由于非线性电光事件，如雷击，会出现罕见但非常快速的变化，这些干扰可能发生得非常快（在 MHz 范围内）。

虽然 SOP 的变化通常被描述为简单的速率（krad/秒或 mrad/秒），但这并不能完全描述情况，因为光纤中的这些微小的物理变化累积在数百甚至数千米的范围内。用统计的方法来考虑信号 SOP 的演化更有帮助。这种复杂性可以用两种方式中的一种来描述：一种是纯随机分布，其中瞬时 SOP 能够以相等的概率改变为任何其他 SOP；另一种是最好地用瑞利概率密度函数来描述的分布。对于瑞利分布，SOP 变化较小的可能性较高，然后更偶尔地会出现较大的状态变化。在这两种情况下，如果观察足够长的时间，所有状态最终都会被覆盖。允许设计者在这两种情况下验证性能的测试系统至关重要。

¹双折射是由于光传播通过的材料偏振状态和取向而导致的折射率差异。

无论选择何种统计数据，DSP 模块都必须处理动态环境。首先，对这些快速变化的偏振信号进行解复用，然后对多种类型的色散进行补偿。

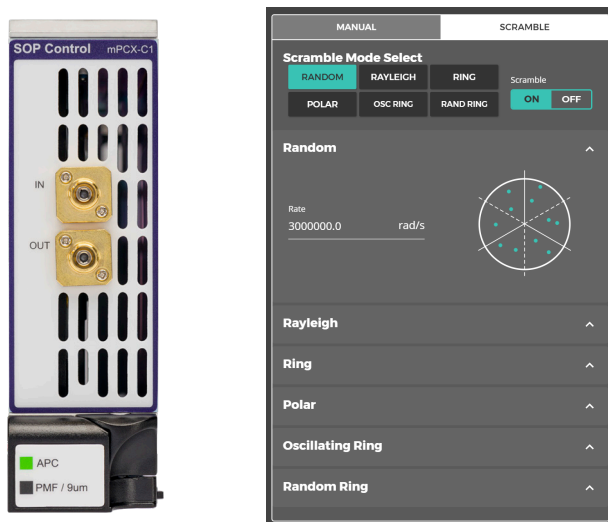


图 11: MAP-300 mPCX-C1 模块用于模拟光纤中 SOP 变化的变化。简单的用户界面允许工程师快速、简单地修改偏振变化的统计性质，不仅包括峰值速度，还包括统计分布和状态覆盖

除了纯加扰，具体的压力测试也是可以想象的。一个例子是将偏振态操纵成“侵略性”状态，这可能意味着一组光电探测器的光功率很高，而另一组的光功率非常低。这将测试模块的动态范围，包括光子学、AGC 和 DSP 控制回路。

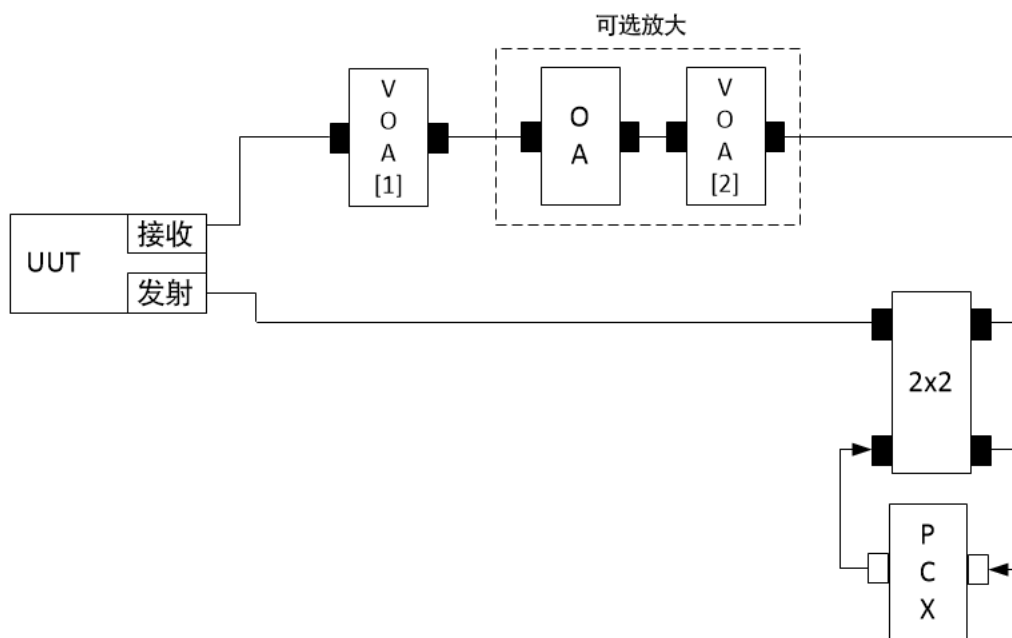


图 12: 图 4 的基本回环图经过修改，通过使用 2x2 光开关，在路径中包括了一个可选的偏振加扰器 (PCX)

然后，可以将 MAP 系统设置为在“压力状态”之间快速跳转，并在不同的统计分布下验证相干模块的稳定性。仪器偏振控制器必须能够简单、快速地在这些模式之间切换。最后一个使用案例涉及引入对 SOP 矢量对齐具有偏振敏感性的系统损伤。DGD 和 PDL 就是这种损伤的例子。几乎在所有情况下，偏振加扰器都将与各种元件结合使用，以确保它们存在的影响也会随着时间的变化和由偏振控制器控制的统计权重而受到影响。

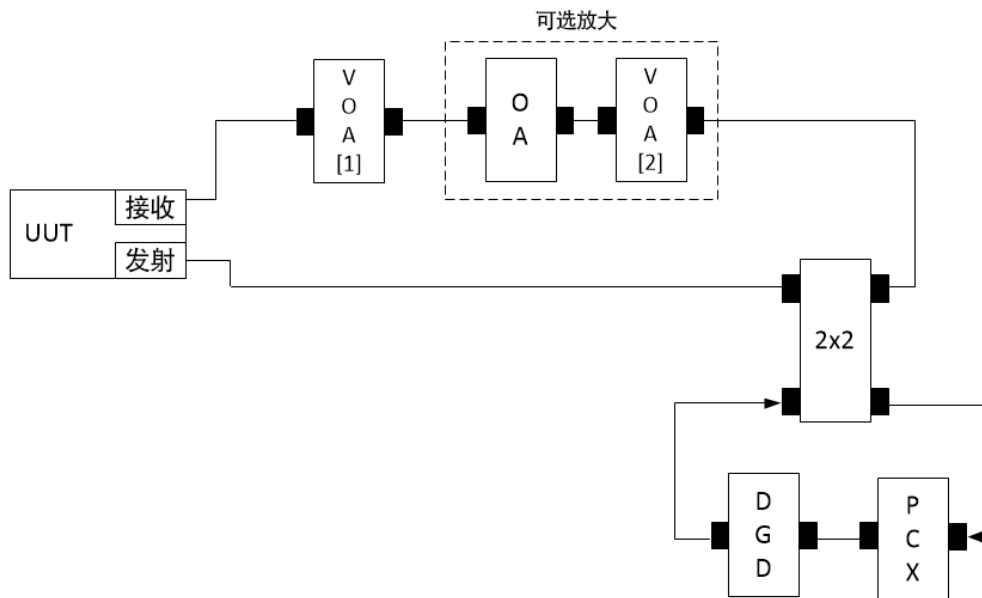


图 13: PCX 与 DGD 元件配合使用。由 DGD 元件引起的延迟将根据其输入端的 SOP 而变化。PCX 将确保正确模拟这些类型的延迟的时变特性

测试工程师能够控制 OSNR、整形频谱并在统计上改变偏振状态，因此拥有执行 OIF 和 IEEE 标准定义的验证测试所需的核心要素。还有其他涉及 CD、DGD 和 PDL 仿真的测试用例，但是这些用例都将使用这三个关键构建块。最后一个考虑事项是准备好这些类型的测试系统，以便在制造中部署。

本例中使用的开关具有几个关键特征，使其非常适合此应用。它本身是一个双工开关。通过一个开关，发射和接收端口可以一起移动。此开关易于自动化，仅占用 MAP-300 中的一个额外插槽。它的损耗也非常低 (<0.8 dB)。该应用中的低损耗确保环回插入损耗不会显著增加，因此对接收功率范围的影响最小。如果在测试系统的初始设计过程中仔细考虑到对光开关的长期需求，那么额外的光功率可能已经被计划好了。

无需完全重新设计即可将测试系统无缝引入制造领域，这将大大缩短开发时间并降低工程成本。

正确的解决方案：MAP-300

最新的 OIF 400ZR 规范的第 13 条有 21 个子条款，定义了保证供应商之间的互操作性和在指定物理层上生成无差错业务所需的光学测试要求。MAP-300 及其 LightDirect 模块系列（表 1）可以在单一、紧凑、符合标准且易于自动化的平台上执行这些测试。在大多数情况下，MAP 部署比混合系统竞争解决方案紧凑 35% 到 40%。VIAVI MAP LightDirect™ 模块系列拥有 30 年的光纤测试设计传统和针对测试和测量应用优化的内部设计光学器件，是相干模块测试的关键推动者。

凭借世界上最大的光开关产品组合，MAP 可以无缝地从研发转向制造。通过做好制造准备，MAP-300 节省了重新开发测试站所需的时间和资源。



图 16: MAP-300 是 VIAVI Solutions 的第三代光学测试平台。全世界所有领先的光学制造商都依赖它

作者：VIAVI Solutions 高级产品经理 Matthew Adams

Maryam Alshehab 和 Paul Avison（均为 VIAVI Solutions 的成员）为本论文做出了重要贡献。