

100G/400G

测试指南

未经EXFO事先书面许可，不得以任何形式或方式
复制本指南的任何部分。

加拿大印刷和装订

ISBN 978-1-55342-111-5

法定送存——加拿大国家图书馆2017

法定送存——魁北克国家图书馆2017

目录

1. 高速技术概述	2
1.1. 100G技术和市场驱动因素介绍	2
1.2. 40G/100G以太网 (IEEE 802.3ba)	3
1.3. 光传输网/ITU-T G.709	4
1.4. 40G/100G可插拔光模块	5
1.5. 新接收器规范	7
1.6. 400G以太网 (IEEE 802.3bs)	9
1.7. PAM4 (脉冲幅度调制)	12
1.8. 400G物理接口	13
1.9. 第二代400G接口	14
1.10. 灵活以太网 (FlexE)	16
1.11. OTUCn/FlexO	19
2. 40G/100G系统测试和实验室鉴定	23
线路侧	
2.1. 发射器一致性验证	23
2.2. 接收器性能验证	25
客户侧	
2.3. 物理层测试和收发器测试	27
2.4. OTU帧结构、开销和测试	41
2.5. 前向纠错 (FEC)	45
2.6. 正确响应测试以及OTN设备的一致性和互通性测试	46
2.7. ODU-MUX测试: SDH等恒定比特业务的映射复用测试方式	48
2.8. Packet/Ethernet over OTN测试: ODU0、GMP ODUflex与无损调整HAO (Hitless adjustment of ODUflex(GFP))	49
2.9. 40G/100G EoOTN服务测试	56
2.10. 40G/100G OTN服务中断时间测量	57
2.11. 时延测量	60
2.12. TCM和性能监测	61
2.13. 高级的穿通模式分析	62
2.14. OTN性能测试: 长期误码测试	63
2.15. 多通道OTN	65
2.16. 通用通信通道BERT测试	71
2.17. 实验室内的以太网测试: RFC 2544测试	72
2.18. POTN设备以太网服务汇聚和交换功能	74
2.19. Multilink	76
2.20. FlexE BERT	78
3. 40G/100G调试和开通	82
线路侧	
3.1. 链路鉴定和非线性效应验证	82
3.2. OSNR测量和偏振相关OSNR验证	91
3.3. 使用接收器提供的信息进行BER测试	100
客户侧	
3.4. 检测光纤和连接器	101
3.5. 故障分段和CFP性能验证	103
3.6. 收发器测试	105
3.7. 连续性测试	106
3.8. OTN长期误码率测试 (BERT)	106
3.9. 以太网服务测试方法ITU-T Y. 1564	107
3.10. 利用过滤和抓包进行40G/100GE故障诊断	117
3.11. 以太网服务OAM (SOAM)	120
3.12. POTN和MPLS-TP测试	127
3.13. POTN分组/以太网服务质量验证	129
3.14. 基于分组交换的POTN设备对ODUk/ODUflex客户端信号的时钟性能测试	130
3.15. OTN和POTN网中的多业务应用鉴定	132
3.16. 40GE/100GE接口Ping和路由跟踪	133
4. 缩略语——传输与数据通信	134

1. 高速技术概述

1.1. 100G技术和市场驱动因素介绍

向100G技术的迁移开始于几年前，当时光互联论坛（OIF）发布了一份框架文件，为行业发展提供指导方针。OIF这么做的目的之一是希望避免被称为“市场混乱”的情况——由于缺少标准，导致市场上出现多种不同技术，包括不归零（NRZ）、归零（RZ）、差分相移键控（DPSK）和差分正交相移键控（DQPSK）等。这些策略的开发和制定并没有带来多少回报，因为行业会出现很多分歧。OIF从一开始就深知100G技术会需要很大投资，因此认为需要将不同的100G传输元器件标准化。

OIF考虑到这些100G系统应能够和现有的10G和40G信号共享物理介质。此外，已有若干网络采用多个可重构光分插复用器（ROADM）和50 GHz通道间隔，因此100G信号需要兼容该架构。在多数情况下，这些链路的色散经过补偿，而该因素也被考虑在内。所有这些考虑因素导致出现了一种非常精确的调制技术。

所有其它调制方案都被迅速淘汰，而OIF建议行业使用双偏振或Pol-Mux QPSK，也被称为NRZ-DP-QPSK，DP-QPSK或PM-QPSK，将其作为100G传输的首选调制技术。因此，传输逐渐开始使用各种幅度和相位调制技术，导致在进行测试时需要考虑另一个新因素。

业内人士目前在100G线路侧测试方面面临的挑战之一是没有既定标准或建议来指导制造商和运营商如何测试线路卡、收发器和系统，或在安装此类系统前应如何鉴定链路。

接下来，我们将概述EXFO基于自2008年以来从与客户、供应商和运营商的交流所获得的经验，在测试这些系统或设备方面提出的建议。

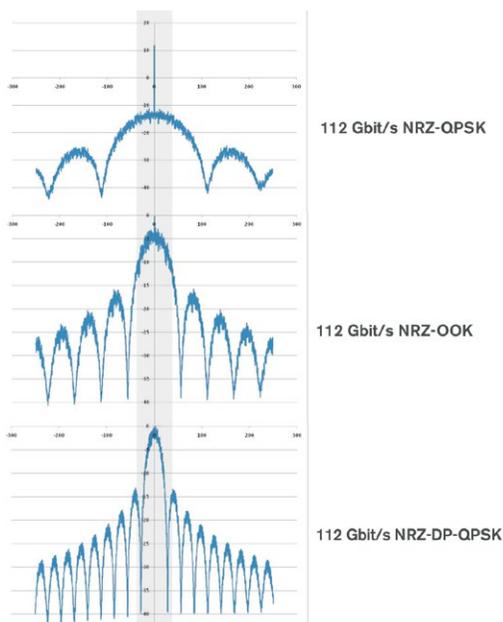


图1. 谱宽随调制格式的变化情况。
阴影部分代表50 GHz带宽。

1.2. 40G/100G以太网（IEEE 802.3ba）

IEEE 802.3ba标准定义了一种能够同时支持40G和100G以太网的架构，同时制定了用于跨背板、铜缆、多模光纤和单模光纤通信的物理层规格。40G/100G以太网架构基于虚拟通道或物理编码子层（PCS）通道概念，这些通道在单条光纤的4个或10个并行波长上进行复用和传输。例如，100GBASE-LR4在光纤上有四个25G的光波长，它们来自主机端的10个10 Gbit/s CAUI电信号。

在使用100GBASE-LR4 CFP传输40G/100G以太网信号（如图2所示）的过程中，以太网数据包被分成数据块，随后使用轮询分发将这些数据块映射到PCS通道中。为了确保在接收端，整个数据块能够完整重组和管理数据块之间的偏差，在每个逻辑通道上添加了标记块。此标记以210 μs的固定周期发送。然后使用位于CFP可插拔光接口中的物理介质接入子层（PMA）将20个PCS逻辑通道复用为10个10 Gbit/s通道（也称为CAUI通道）。PCS通道的独特特性是，无论它们怎样复用在一起，来自相同PCS通道的所有比特均沿着相同的物理通道传输。这使得接收器可以正确地重组组合通道。同时，唯一的通道标记保证在接收器内能够进行去偏差操作。

40G/100G以太网的实施在电层和光层带来了挑战。这些挑战是由于数据在多通道上的分布和偏差效应所致。这就造成了一个新需求：测试各个概念（如PCS通道、PCS偏差和对齐标记）以确保被测40G/100G以太网设备（DUT）支持正确的重定位功能，从而补偿链路的物理特性。通过在不同通道上插入多个单位间隔时间（UI），工程师可以发现接收器缓冲区问题，这在检验100G系统的偏差容限时至关重要。

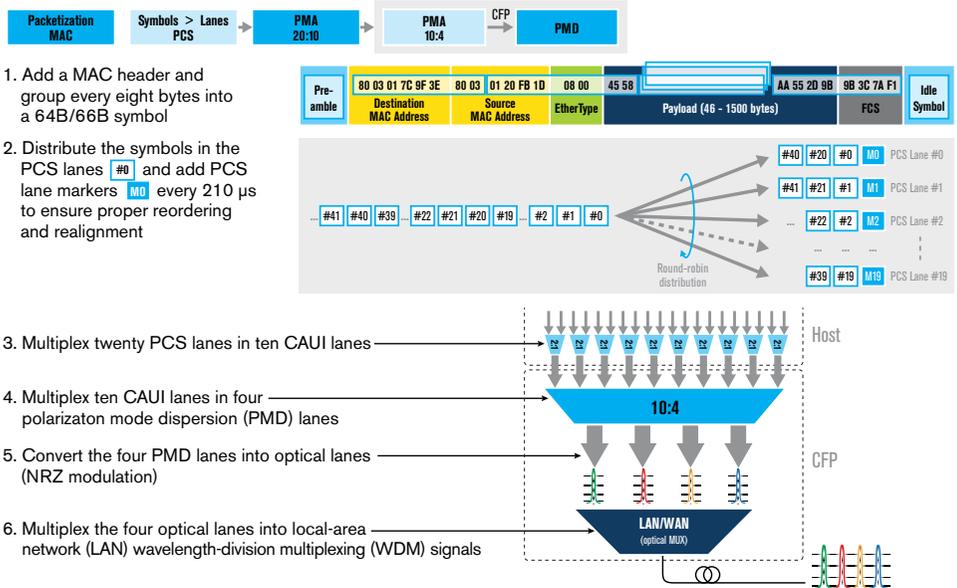


图2. 使用100GBASE-LR4 CFP进行100G以太网传输。

1.3. 光传输网/ITU-T G.709

由于许多部署的100G以太网最初主要是为了满足带宽需求，因此光传输网（OTN）建议标准在传输应用中得到了普遍采用。ITU-T G.709中规定的OTU4（112 Gbit/s）速率满足了在OTN上承载100G以太网服务的需求。总体而言，这在OTN的基本优势以外还带来了新的优势，如支持操作、管理和维护（OA&M）过程，以及提供标准化前向纠错（FEC）机制以提高网络性能和部署的经济效益。

与IEEE P802.3ba工作组定义了一些层一样，ITU-T SG15也在光通道传输单元（OTU）上定义了一层，称为光通道传输通道（OTL）协议层。OTL层被定义为：OTL x.y，其中“x”代表数据速率，“y”代表光通道数。例如，OTL 4.4表示OTU4信号在四个28G波长上运行。OTL引入了OTL通道、OTL偏差和OTL定位标记等元素，它们在概念上分别与IEEE P802.3ba标准中描述的PCS通道、PCS偏差和PCS定位标记相似。与以太网的情况一样，OTL层使用逻辑通道标记来重新定位所有已发送数据块，这种情况下的主要不同之处是标记被嵌入到OTN帧的帧定位信号（FAS）和复帧定位信号（MFAS）字节中。因此，在验证支持OTN功能的100G设备时，除了测试所有其它OTN层（包括OTU4、ODU4、OPU4和FEC）之外，还必须测试OTL层的偏差，以保证100G以太网客户端信号的正确映射和去映射以及故障管理报告，这一点至关重要。

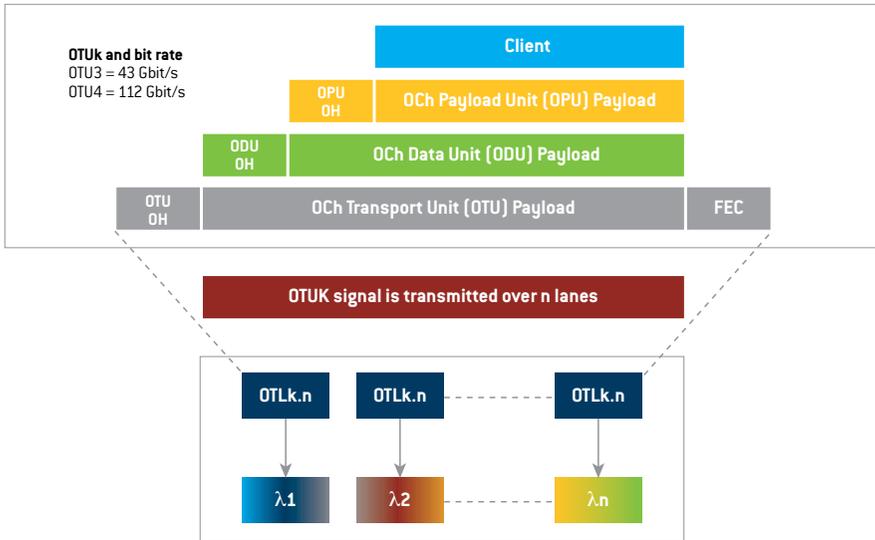


图3. 基本的OTN传输结构。

利用伪随机比特序列图案（PRBS）来测试信号的线路速率，从而鉴定OTN物理层的性能非常关键。在100G线路板卡开发阶段，这项测试对于设计师和系统工程师极为重要。其中的一个重要测试是将复杂的PRBS图案插入到每个物理通道上，然后在接收器端分析误码率（BER）。通过向每个通道插入不同图案，可以全面了解通道之间的串扰。此外，还可以配置最大密度的图案，从而验证接收器对非平衡比特密度的锁相环（PLL）响应。

EXFO的40G/100G解决方案提供了诸多测试功能，从具有设计用于鉴定CFP的信号调节接口的物理层，到以40G/100G线路速率进行IP测试以及将以太网映射到OTN容器等不一而足。对于网络设备制造商（NEM）而言，这些测试在开发、设计和验证阶段十分重要。并且当服务提供商在选择要部署的100G系统时也会影响其决定。100G设备的稳定性和可靠性对于获得商业成功并加速采用非常关键。解决办法在于严格测试100G以太网和OTU4，这样做可以简化、加快部署并增强运营信心。

1.4. 40G/100G可插拔光模块

100G CFP LR4使用称为“gearbox”的转换模块，将10个CAUI电通道变成4个25G光通道。然而，在40G CFP时，情况并非如此，此时4个XLAUI通道被直接变成4个10G光通道。为了正确验证CFP，需要测试gearbox、热稳定性、同步电路、主电通道、光通道激光发射/接收功率和支持的电压。这与在较低速率收发器上进行的测试大相径庭，后者在多数时候只需进行环回BER测试便足以满足要求。EXFO的40G/100G解决方案提供一系列集成的应用，构成CFP性能验证解决方案，支持上述测试并迅速为最终用户提供一目了然的测试结果。

随着技术的不断发展，功耗更低、端口密度更高而成本更低的100G收发器被开发出来，即CFP2、CFP4和QSFP28。不同于最早的收发器，CFP2、CFP4和QSFP28没有配备目前在主机设备（即网元设备或测试设备）上出现的gearbox模块。这些收发器在电接口内有4个CAUI-4通道，而每个CAUI-4通道都被直接转换为4个25G光通道。这些收发器只要光学特性相容，就可以实现互通：SMF和MMF、波长、波长数和功率灵敏度。值得一提的是，对于长距离应用，最常见的光接口是LC连接器，而对于短距离应用，最常用的接口是MPO（或MPT）连接器。

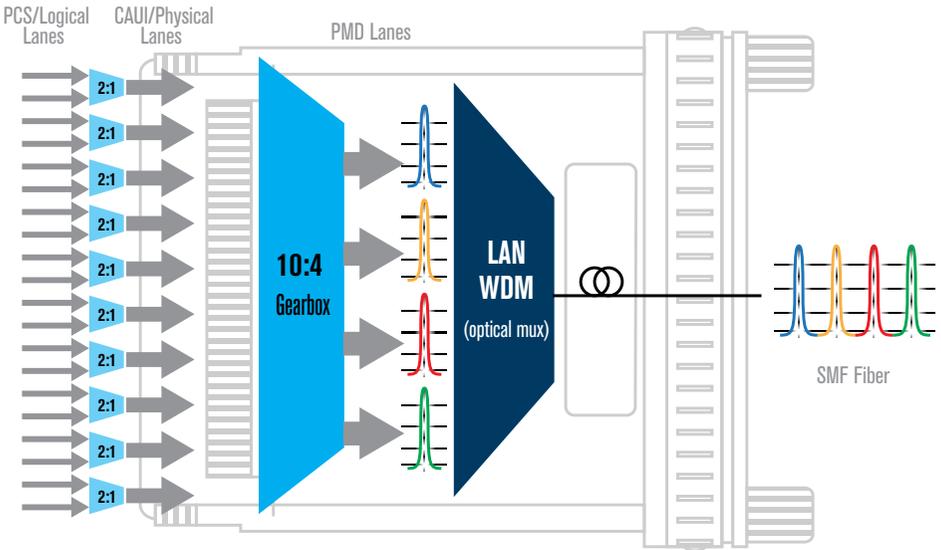


图4. CFP内部结构；100GBASE-LR4带LC连接器；SMF。

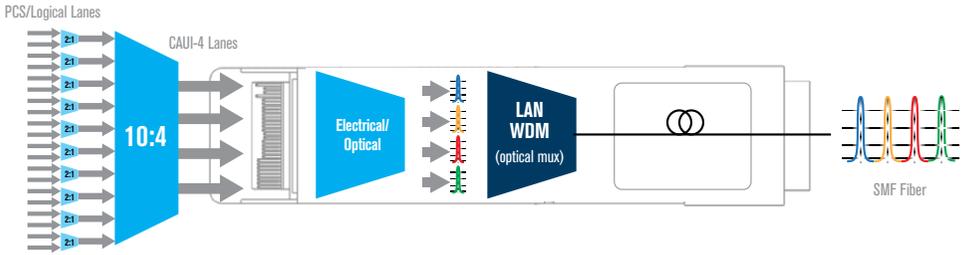


图5.CFP4内部结构；100GBASE-LR4带LC连接器；SMF。

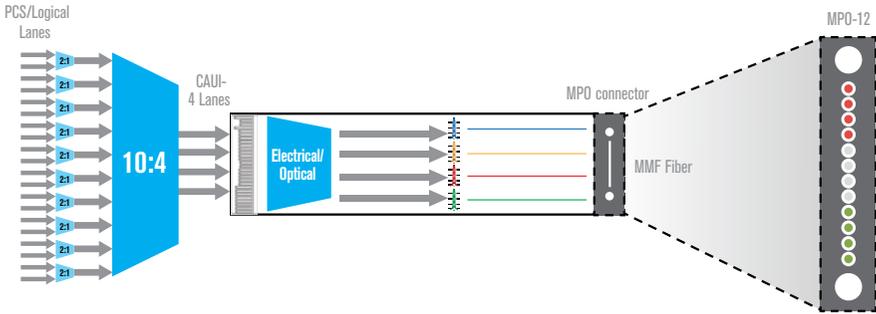


图6.QSFP28内部结构；100GBASE-SR4带MPO-12连接器；MMF。

MPO表示“Multifiber-Push-On”或“Multi-Fiber-Pull-off”，IEC-61754-7和TIA-604-5-D标准对其进行了定义。这些连接器的大小不一，其中最常见的是MPO-12和MPO-24。下面的图片显示的是这两种类型的连接器。传输光纤为红色，接收光纤为绿色，而白色光纤为暗光纤。



图7. 12光纤MTP-MPO。



图8. 24光纤MTP-MPO。

CFP性能验证应用也支持CFP2、CFP4和QSFP28收发器，在部署100G链路时这些收发器的鉴定和测试仍然是一项非常重要的任务。

1.5. 新接收器规范

数据中心市场的增长越来越要求将新网元部署在数据中心内并将它们互相连接起来。在未来的几年里，每个光纤对所生成、传输和处理的信息量需要将带宽最大化，而收发器对于满足该需求非常关键。

数据中心市场面临以下具体挑战：

- 降低能耗
- 降低拥有成本
- 采用外形较小的设备
- 获得2 km的覆盖距离
- 部署单模光纤
- 实现高端口密度

数据中心满足上述挑战所需的收发器数量巨大，促使业内制定出两个非常重要的收发器规格：CLR4和CWDM4。

CLR4

100G CLR4是一个用于100 Gbit/s (4 x 25.78 GBd) 的多厂商规范，主要关注提供解决方案以满足数据中心要求。它是一个低功率、经济高效的解决方案，使用双工的单模光纤，传输距离最高可达2 km。

CLR4收发器在有或没有前向纠错（FEC）的情况下都可以正常工作。和FEC协作可以确保与CWDM4 MSA的互通性。

该规范不受收发器的外形影响，但最初收发器外形是QSFP，它基于CWDM栅格，采用20 nm的间隔，以允许在温度较低的情况下工作（IEEE 802.3 CL87 40GBASE-LR4定义）。

粗波分复用（CWDM）

通道	中心波长	波长范围
L0	1271 nm	1264.5至1277.5 nm
L1	1291 nm	1284.5至1297.5 nm
L2	1311 nm	1304.5至1317.5 nm
L3	1331 nm	1324.5至1337.5 nm

CWDM4 (4 x 25.78 GBd) 是一个用于以太网应用的光接口规范，包括可以满足上述数据中心规范的100GE。包括在该规范里的最初外形有CFP4和QSFP28，FEC为必备功能，采用单模光纤，最大距离为2 km——波长范围和CLR4的波长范围相同。



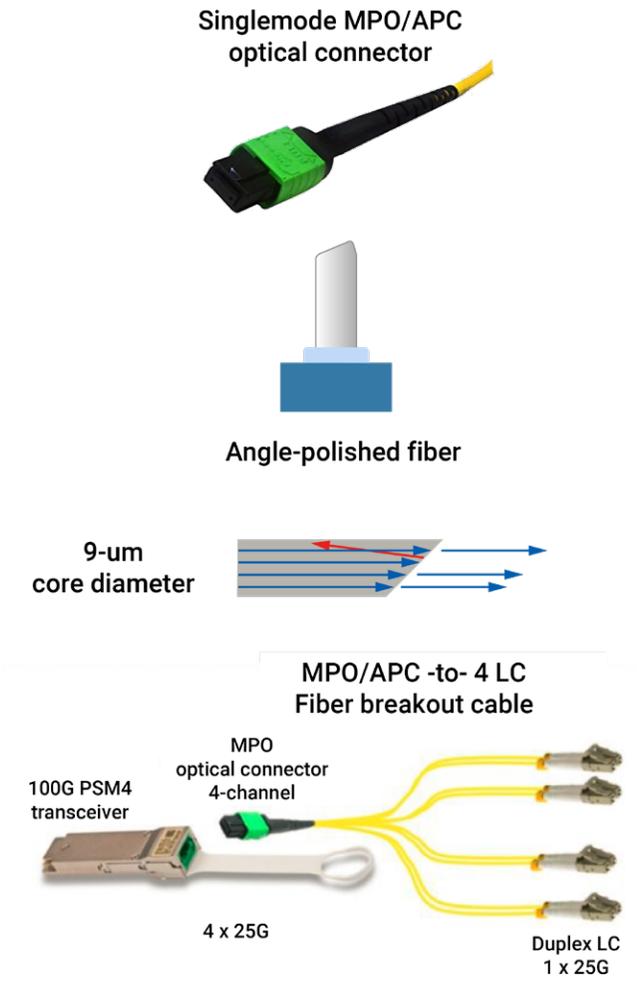
PSM4——并行单模4通道

这种收发器使用并行的光纤来实现 100 m至2 km的传输距离。长传输距离和低成本使它成为一种非常重要的单模解决方案，适用于数据中心，其工作波长为1310 nm和1550 nm。

PSM4使用并行的八纤芯MPO光连接器，四条光纤用于传输，另外四条光纤用于接收。MPO连接器促进了基础设施从多模光纤向单模光纤迁移——之所以会出现这种迁移，是因为多模光纤的纤芯更大，造成其成本非常高。

PSM4可传输100G以太网信号，或分解为两个50G以太网或四个25G以太网链路，用于多个应用。这种分解使用无源分光器线缆或被称为“尾纤”的收发器/AOC混合线缆。尾纤主要用于将柜顶（top-of-rack）交换机和25G或50G以太网服务器连接起来。

对于一般的MPO连接器，会将一些光线向激光器反射过去。如果使用纤芯小的单模光纤，这种反射会比较集中，因此对于这种光纤，最好使用APC连接器。



1.6. 400G以太网（IEEE 802.3bs）

简介

随着以太网速度持续增加，400G旨在满足不断增长的带宽需求。随着云服务、智能手机、社交媒体应用、HUD 4k/8k视频流变得越来越广泛，以及物联网的不断实施，数据和流量呈爆炸式增长，使得高速网络面临来自消费者的巨大压力。为此，网络级公司开始寻求更高的传输速率，使其能够以越来越高的效率提供内容。

业内开始建造越来越多的数据中心来支持大容量数据网。这些数据中心使用100 Gbit/s相互连接起来，但很快会升级到400 Gbit/s链路以增加容量。根据以太网联盟发布的高速路线图（图9），400G以太网（400GE）将成为以太网生态系统中的下一个客户速率，业内越来越多地采用该速率来满足超大规模数据中心、服务提供商和商业用户的海量需求。

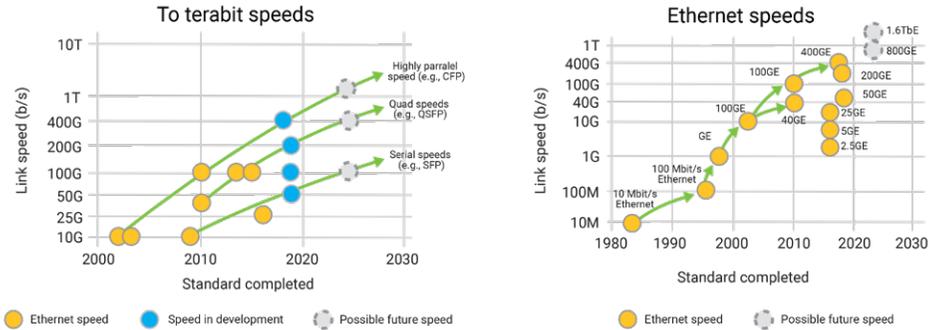


图9. 以太网联盟路线图。

IEEE为400GE制定了新标准（IEEE 802.3bs），为关键的汇聚和高带宽互连应用提供更高的功能，这些应用包括云规模数据中心、互联网交换中心、托管服务、无线基础设施、服务提供商和运营商网络以及视频发布基础设施。

本文将重点介绍400GE速率的主要目的以及它与100GE速率的不同之处。我们还将看看它支持的物理接口。

400G以太网（400GE）

和之前制定100GE标准的情况一样，400G工作组为400GE速率制定了一系列主要目标：支持和核心路由器相匹配的200 Gbit/s和400 Gbit/s MAC数据速率，用于传输应用；在MAC服务接口支持1013或更好的BER；定义用于200 Gbit/s和400 Gbit/s的新物理层规范（见下文）；引进强制性、经过改进的Reed-Solomon FEC算法。这是与100GE目标的主要区别，在100GE目标中FEC属于可选项。另一个不同之处是不同通道的对齐方式：M:N gearbox转换被去掉，PCS电和光通道被对齐，且彼此呈倍数关系。

下图显示的是TX/RX PCS通道结构。

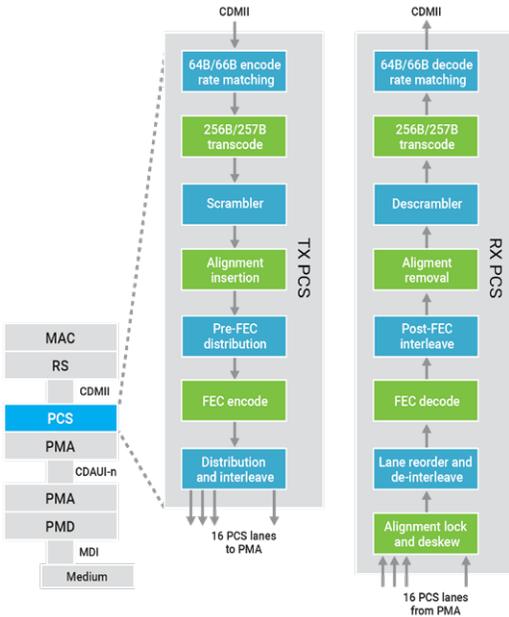


图 10. PCS层

MAC层流量被直接送到编码器/转码器，然后送到定位标记和FEC编码器。这些流量通过16个PCS通道传输到PMA，这些PCS通道都采用26.5 Gbit/s的标称速率。

CDAUI-n是电通道，它们将数据传输到光收发器，“n”可以是16或8。CDAUI-8可支持25G和28G的速率，从而支持以太网和OTN 400G传输。

图11显示的是IEEE 802.3bs 400G标准定义的支持介质，它们可连接CDAUI-n通道。

距离	PCS通道	速率/通道	介质	IEEE 802.3bs	调制
SR (100 m)	16	26.5625 Gbit/s	并行MMF	400GBASE-SR16	16 x 25G-λ NRZ
DR (500 m)	16	26.5625 Gbit/s	并行SMF	400GBASE-DR4	4 x 100G-λ PAM4
FR (2 km)	16	53.125 Gbit/s	双工SMF	400GBASE-FR8	8 x 50G-λ PAM4
LR (10 km)	16	53.125 Gbit/s	双工SMF	400GBASE-LR8	8 x 50G-λ PAM4

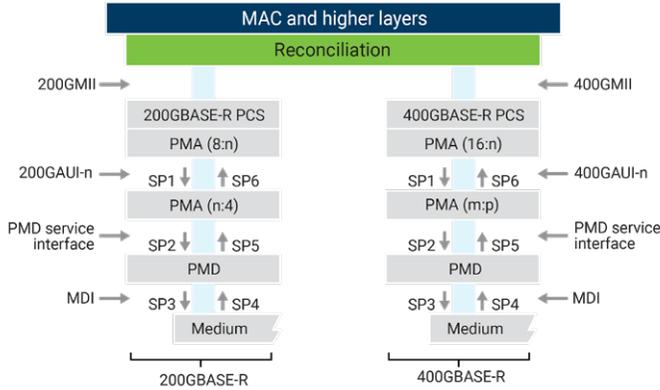
图 11. 客户端介质接口。

400G PCS通道偏差，用于测量最早PCS通道和最晚PCS通道时间差异，用于定位标记同步位过渡。

由于电、热或环境特征变化，可能会造成偏差出现变化。400G时的偏差点数量是100G时的4倍：参见图12，了解每个偏差点（SP）的最大偏差：

偏差点	最大偏差 (ns) ^a	200GBASE-R或400GBASE-R PCS通道的最大偏差 (UI)
SP1	29	≈ 770
SP2	43	≈ 1142
SP3	54	≈ 1434
SP4	134	≈ 3559
SP5	145	≈ 3852
SP6	160	≈ 4250
在PCS接收端	180	≈ 4780

图 12. PCS层



偏差点SP1、SP2和SP3规定了发射方向的物理实例化接口的最大偏差和偏差变化，而偏差点SP4、SP5和SP6规定了接收方向的最大偏差和偏差变化。200GE和400GE偏差监测要比100GE偏差监测更具挑战性。

前向纠错 (FEC)

除了偏差更严格外，400GE还包括更强大的FEC：RS (544、514) FEC是bj FEC解决方案的一部分，其增益约为8dB。主要的400G应用对延迟非常敏感，这是使用FEC机制时会出现的一个缺点——编码和解码会增加传输时延。不同于100GE，400GE使用强制性的FEC。这意味着链路不会零差错：预计会出现可纠正的FEC错误，由FEC为劣化的信号提供补偿并优化链路质量。可以设置一些FEC阈值（图13）来验证未经过前向纠错的链路，在某些情况下，可以改变用户流量传输路径，而不会丢弃流量。所用的信令类似于本地/远程故障信令，从而能够提高互通性以及显示链路在出现数据包错误前的状况的能力。如果超过了前向纠错前的阈值，会将其当做同步报头错误阈值，带本地劣化（LD）和远程劣化（RD）信令。验证FEC的实施将至关重要。

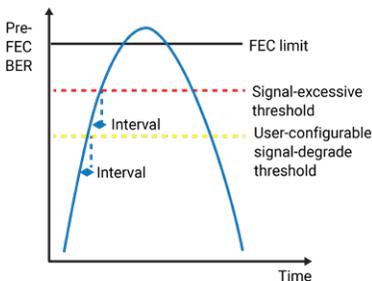
超过阈值

FEC超额阈值

- 如果前向纠错前的BER超过这个必选阈值的时间长于这个间隔，将生成链路故障信号。

FEC劣化阈值

- 如果前向纠错前的BER超过这个可选阈值的时间长于这个间隔，将生成链路劣化信号。



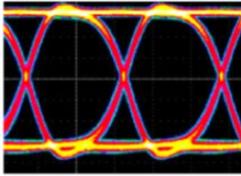
Link Down	—
L Fault Det	—
L Fault Rcd	—
Remote Fault	—
LOA	—
Hi-SER	—
L Deg SER Det	—
L Deg SER Rcd	—
R Deg SER	—

图13. IEEE P802.3bs 400GE工作组

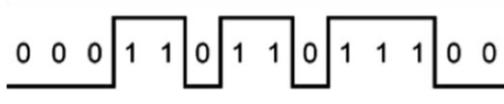
1.7.PAM4（脉冲幅度调制）

PAM4是一种调制技术，使用四个不同的脉冲幅度来传输信息。该技术在串行通道上，将更多的比特集成到同样的时间中。这种调制的效率是常规调制的两倍，但它要求信噪比（SNR）更高。它是用于以太网分片的首选调制技术，因为它的功耗较低且比较简单，但需要更复杂且更好的硬件。在之前的实施项目中，使用的是二进制非归零（NRZ）调制，但它无法达到PAM4所允许的传输水平。

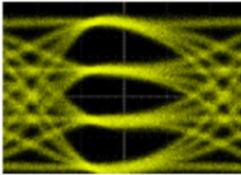
Eye Diagram



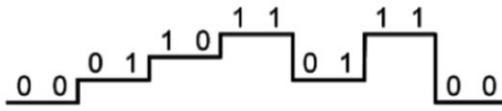
NRZ Modulation



Eye Diagram



PAM4 Modulation



1.8. 400G物理接口

物理接口

IEEE 802.3bs标准还列出了建议的400G接口。网络设备制造商（NEM）已经开始为接口卡提供CFP8支持功能。CFP8基于通道设计（8 x 50 Gbit/s），其覆盖距离至少为10 km。有两种类型的PMD：16 x 25 Gbit/s时的NRZ调制以及8 x 50 Gbit/s和4 x 100 Gbit/s时的PAM-4调制。CFP8支持的带宽密度分别是CFP和CFP2的八倍和四倍。

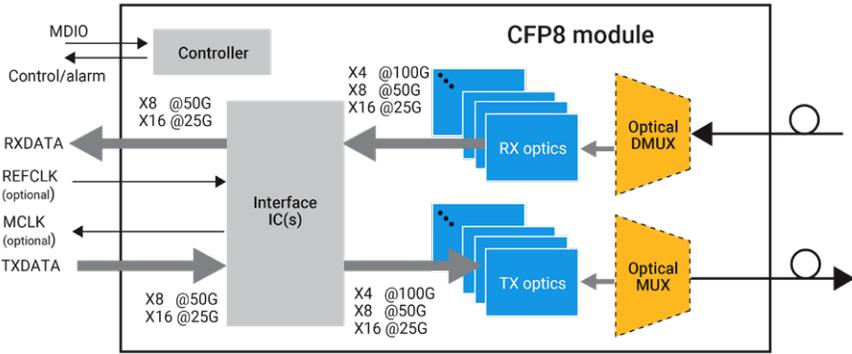


图 14. CFP8功能框图

考虑了下列400G光接口：

- **100 m MMF: 400GBASE-SR16:** 在16个通道上进行400 Gbit/s传输（共有32条光纤）
- **500 m SMF: 400GBASE-DR4:** 在4个通道上进行400 Gbit/s传输（共有8条光纤）
- **2 km SMF: 400GBASE-FR8:** 在8个波分复用（WDM）通道上进行400 Gbit/s传输（共有2条光纤）
- **10 km SMF: 400GBASE-LR8:** 在8个WDM通道上进行400 Gbit/s传输（共有2条光纤）

考虑了下列200G光接口：

- **500 m SMF: 200GBASE-DR4:** 在4个通道上进行200 Gbit/s传输（共有8条光纤）
- **2 km SMF: 200GBASE-FR4:** 在4个WDM通道上进行200 Gbit/s传输（共有2条光纤）
- **10 km SMF: 200GBASE-LR4:** 在4个WDM通道上进行200 Gbit/s传输（共有2条光纤）

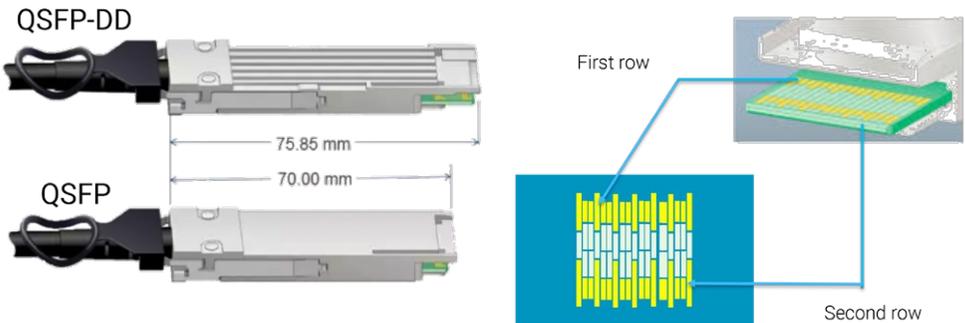


1.9. 第二代400G接口

在400G标准成为正式标准后，CFP8收发器立即成为首选的400G接口。然而，数据中心的特定要求，包括高密度和低功耗，迫使市场寻找尺寸更小的解决方案。因此，引入了第二代400G收发器。这些收发器结合PAM4调制，满足了数据中心和网络级市场的挑战。第二代接口主要有两种：QSFP-DD和OSFP。

QSFP-DD（双密度）

QSFP-DD模块是业内最小的400GE模块。这种接口提供的端口带宽密度最高，包括更多行的引脚，提供八个通道来传输数据，每个通道可支持的传输速率最高可达50G。这种模块的另一个重要特点是向后兼容性。这种收发器的尺寸和最常见的100G收发器相同，使其成为对全球各地日益增长的网络基础设施的最佳补充。



QSFP-DD的尺寸较小，这意味着它的各个部分被高度压缩，造成重大的技术挑战，包括每个通道的功耗和温度较高，以及在可插拔模块背面多个连接器之间可能会出现串扰。另一方面，每个机架设备可支持36个QSFP-DD端口，实现高端口密度，用于在数据中心内甚至在服务提供商拓扑上汇聚交换层。

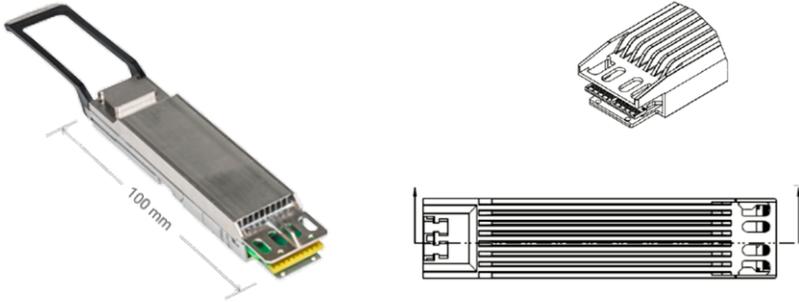
网络设备制造商和收发器供应商仍在努力制造第一批设备，因为市场渴望开始400G部署来满足指数式的带宽增长需求，并将其包括在即将开始的5G实施内。该技术未来的改进之处包括支持100G的4个通道。

模块类型	I/O通道数	I/O电通道	I/O波特率	模块BW
QSFP28	4	25 Gbit/s-NRZ	25G	100 Gbit/s
QSFP56	4	20 Gbit/s-PAM4	25G	200 Gbit/s
QSFP-DD	8	50 Gbit/s-PAM4	25G	400 Gbit/s

OSFP (Octal小型可插拔模块)

这种形状的收发器也是第二代400G接口的组成部分。这种接口的首次迭代考虑采用8个50G PAM4通道，以支持400G传输，但它也可能在未来支持4个100G PAM通道，甚至8个100G通道。OSFP比QSFP-DD略大，宽带和深度略高，使接入交换机每个机架单元最多只能容纳32个OSFP端口。

功耗低是其最重要的特点之一，但散热功能高就属于新颖的功能，与此同时为网络设备制造商带来挑战，且这种形状的内部空间可支持不同的规范，从而以相同的尺寸实现更长的覆盖距离。



由于尺寸原因，每个机架单元的密度较低，最多只能支持32个端口。

每种模块都有特定的特性，分别满足高速市场上的特定需求，且有不同的公司支持它们，但上市周期和可用性会成为部署最佳模块的指导因素，实现400G传输。

1.10. 灵活以太网 (FlexE)

FlexE是光互联网论坛 (OIF) 通过的一个实施方案。它在2016年制定出来, 描述了传输不同以太网MAC速率的机制, 这些速率可以不匹配到现有的任何以太网物理层 (PHY) 速率, 从而突破了仅限于传输特定接口容量的流量限制。

该实施方案的目的之一是改进并最大限度地提高网元 (路由器) 和传输设备之间的互连效率。另一个目的是帮助网元实现传输设备目前使用相干技术所能够处理的带宽。

接下来, 我们看看让这种灵活物理映射结构能够发挥作用的要素:

FlexE客户端信号: FlexE客户端信号 (client) 指的是与某个速率关联的以太网数据流, 该速率可以 (或不) 属于已有的以太网PHY速率 (见图15)。该方案定义的FlexE客户端信号包括已被标准化的以太网速率 (10G、40G、100G)、最新的速率 (如200G和400G) 以及25G的整数倍速率 ($n \times 25G$), 如125 Gbit/s。每个FlexE客户端信号都有一个单独的MAC地址。

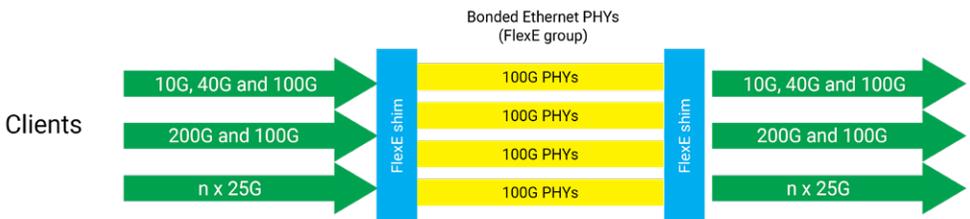


图15. FlexE客户端信号

FlexE组: OIF将FlexE组定义为在链路上“n”个以太网PHY绑定起来形成的一个组, 每组应有至少一个以太网PHY。第一版实施方案定义了100G PHY, 但未来的版本可能会包括其它基于未来标准速率的PHY。

属于FlexE组的PHY必须有一个在组内识别它们的编号, 还必须通过相同的两个FlexE shim层互连起来。

FlexE shim层: FlexE shim指MAC和PCS之间的层 (图16), 它负责将通过一个FlexE组传输的不同客户端信号关联起来。

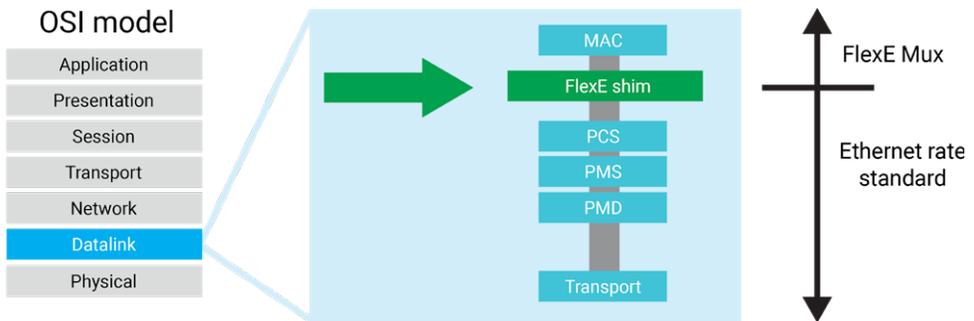
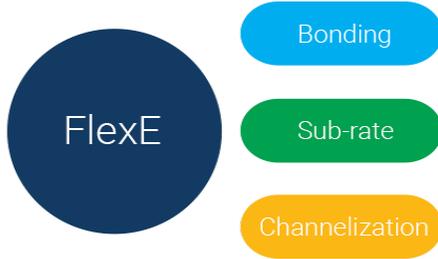


图16. FlexE shim层特点

该配置允许在MAC层进行复用，让其余的层能够按照特定速率标准的规定继续被使用。

在FlexE层内，客户端信号按照先后顺序被分配到日历模块中，然后被分配给每个物理PHY PCS通道，而每个PHY都独立地在网络上进行传输。FlexE shim层负责日历模块管理、同步和PHY映射。

下图显示了在FlexE中网元可以采取的行动：



绑定：绑定可通过分配多个以太网PHY来建立高容量的数据管道，以传输超过100G的MAC速率。（见图17）

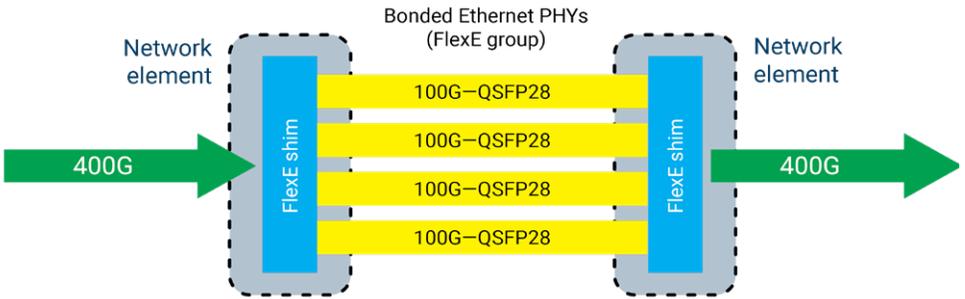


图 17. 400G绑定

子速率划分：使网元能够细分物理接口，以便在部分填满的以太网PHY上传输较低速率数据管道的过程。（见图18）

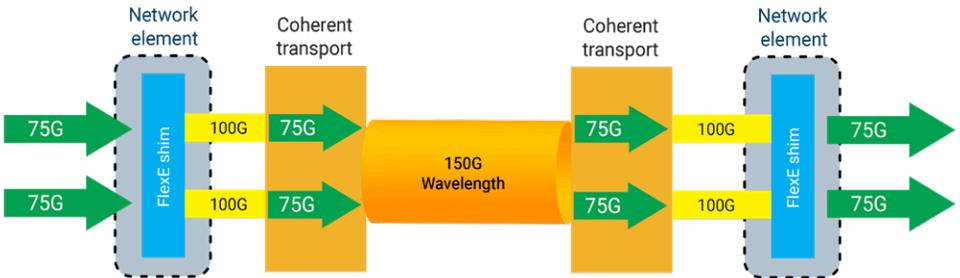


图 18. 子速率划分和相干技术

通道化：通过相关的以太网PHY，让网元能够创建特定的传输通道，在相同或不同方向上建立多个数据管道，这个过程被称为通道化。（见图19）

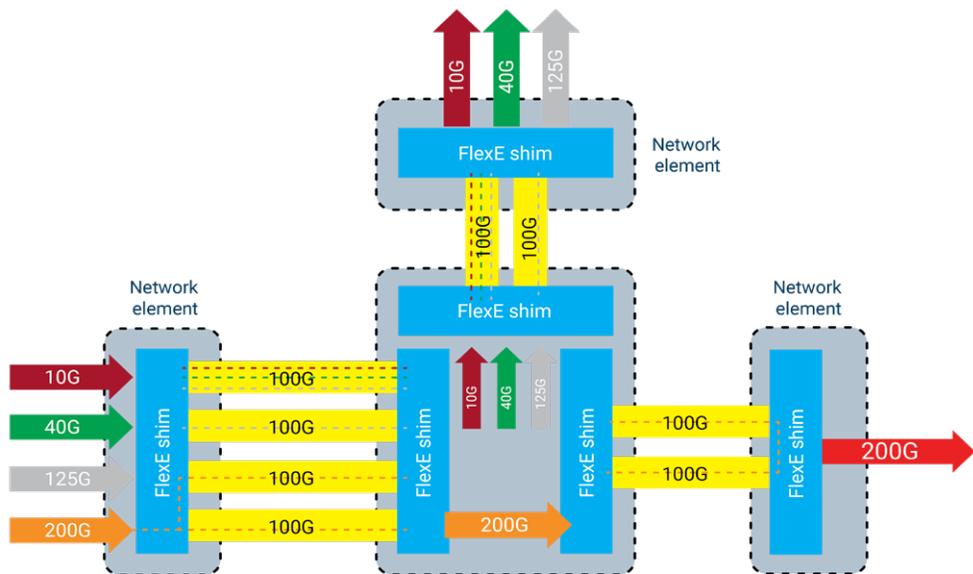


图 19. FlexE通道化示例

FlexE拓扑内的网元类型

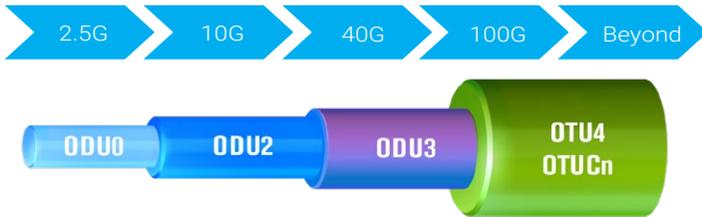
取决于实施的应用，在FlexE拓扑内有三种网元。

FlexE terminated	FlexE aware	FlexE unaware
具有FlexE shim层来终止数据管道。	没有FlexE shim层来终止数据管道，但可以将其与线路速率匹配起来。	没有FlexE shim层来终止数据管道，但能够传输流量。

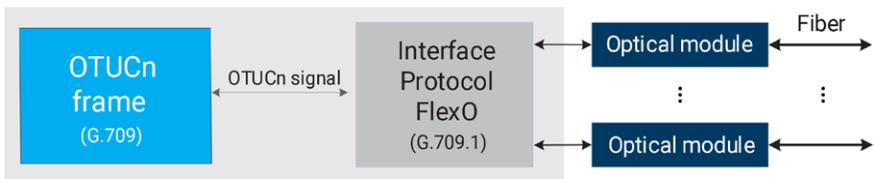
图 20. FlexE拓扑内的网元

1.11. OTUCn/FlexO

OTN不断发展，现在包括OTUCn新标准，后者于2016年成为ITU G.709规范的一部分。OTUCn（“C”对应罗马数字的100）使OTN变得更加灵活，并在未来的以太网标准和传输技术出现时能够更高效地发展。



该协议的更新被分成两部分：定义OTN帧以及定义被称为FlexO（灵活OTN）的接口协议。



OTUCn

OTUCn信号的组成与传统的OTN相同，但对其有所调整使之能够处理“切片交叉”，这是一种类似于SONET/SDH的概念，用于提升传输容量。

OTUCn的主要功能块包括：

- 在ODUk内映射客户端信号
- 在OPUCn净荷区域内映射ODUk容器
- 开销生成和提取

能够传输100 Gbit/s的基本帧结构被称定义为OTUC。净荷区域是一个由支路时隙组成的连续容器，它是OPUCn的一部分。OTUC切片以定义的方式进行交叉，使OPUCn支路时隙具有已知的顺序。

因为FEC类型和强度取决于PHY类型（如100G、200G… SR4、LR4等），所以它不属于OTUCn基本帧。接口特点和OTCn定义被分开，使得无论采用哪种接口，都可以传输OTN。

集成的净荷区仅包含支路时隙，没有客户端信号被映射到OPUCn，必须首先将它们映射到ODUk，然后再将ODUk映射到OPUCn。此外，一个OPUCn最多可承载10n个客户端信号。

每个OTUC切片最多有20个支路时隙，每个时隙的速率为5.24089 Gbit/s，颗粒为16字节。

OTUCn信号映射

ODUK帧中一组M个连续的16字节字被映射到一组M个连续的光通道数据支路Cn（ODTUCn），ODTUCn字节被映射到OPUCn支路时隙。请注意，图21中的M是用于给定ODUK速率的支路时隙数，使用GMP进行适配。

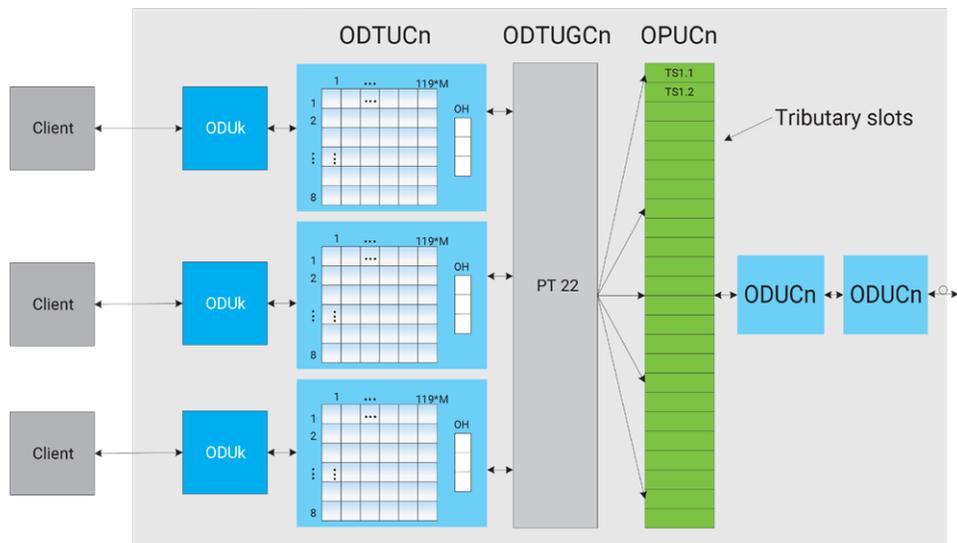
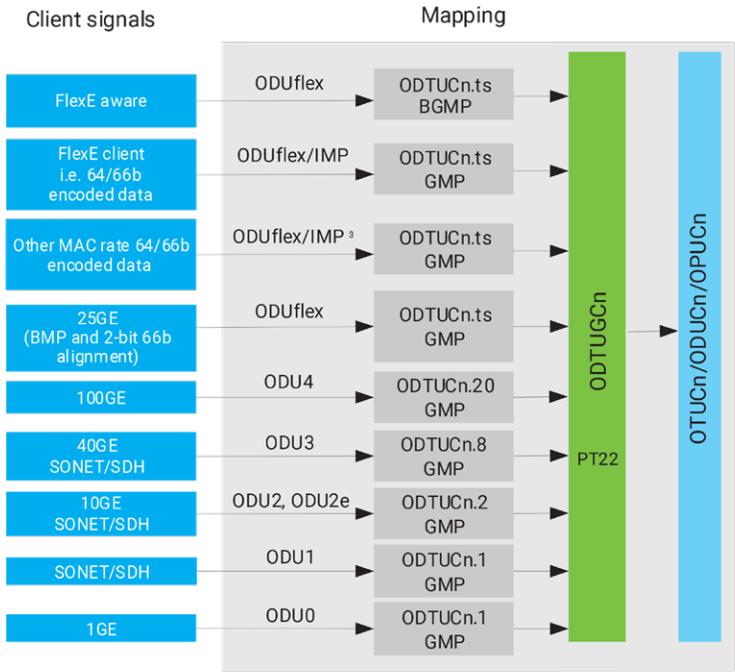


图21. OTUCn信号映射示意图

OTUCn客户端信号映射

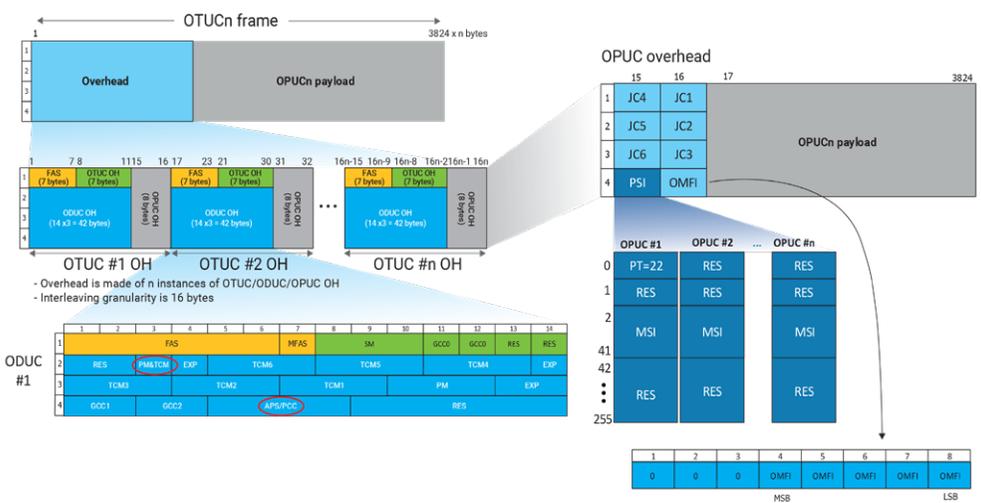
和之前版本的OTN一样，OTUCn中的不同以太网客户端信号进行了映射，以便通过光基础设施进行传输。以下是每种客户端信号需要考虑的因素：

- 分组客户端信号在OPUflex中进行映射，成为以太网MAC帧数据流，帧间间隙进行64b/66b编码，使用的是空闲映射规程（IMP）。
- 使用IMP，将FlexE客户端信号在OPUflex中进行映射。使用比特同步映射规程（BGMP），将FlexE-aware信号在OPUflex中进行映射。这种映射会丢弃一个或多个PHY中不可用的FlexE日历表时隙，以便组建速率较低的CBR客户端信号。
- 允许在一个OPUCn支路时隙中映射5G以下的信号（如ODU0），但其效率很低，因此这些信号通常会在较高速率的ODUK中进行映射/复用，以便更好地使用。
- 使用ODUK容器，对传统的客户端信号（如SONET/SDH）进行映射。



备注：上图主要关注的是以太网和SONET/SDH客户端信号。
其它客户端信号在G.709进行了说明。

OTUCn开销



灵活OTN (FlexO)

FlexO提供一个灵活、模块化的机制来支持超过100G的线路速率。FlexO将一组n个100 Gbit/s PHY绑定起来，传输OTUCn，每个100 Gbit/s PHY传输一个OTUC切片，提供帧定位、消除偏差、组管理和通信通道。

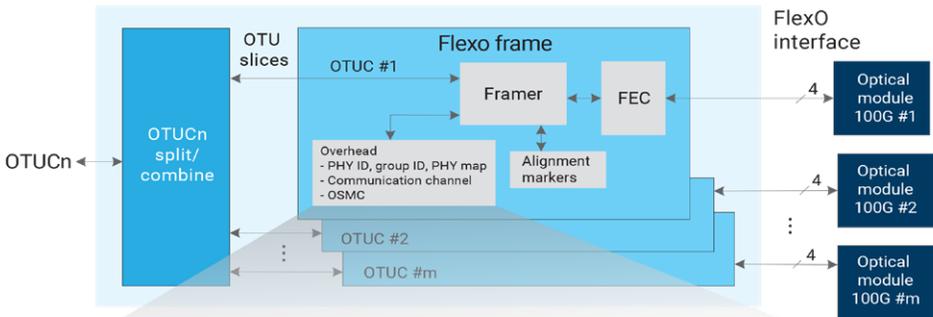
为了处理OTUCn信号，FlexO进行以下操作：

- 源端：将OTUCn帧分成n x OTUC切片
- 宿端：将n x OTUC实体组合为一个OTUCn

FlexO信号由以下部分组成：

- 基本帧（5140比特，128行）和复帧（由8个帧组成）
- 在G.709.1中，规定FEC RS（544，514）覆盖的距离较短（参加附录10，了解详情）
- 定位标志，用于物理通道排序
- 净荷区
- 分布在8个帧上的开销

FlexO functional block



FlexO overhead

OH bytes for FlexO interface #1

MFAS (678)	FlexO frame #	1	2	3	4	5	6	7	...	10	11	12	13	...	26	27	28	29	40
000	1	MFAS	STAT	STAT	GID	GID	RES	PID		MAP	CRC	FCC	OSMC						
001	2	MFAS	STAT	AVAIL						MAP	CRC	FCC	OSMC						
	3	MFAS	STAT							MAP	CRC	FCC	OSMC						
	4	MFAS	STAT							MAP	CRC	FCC	OSMC						
	5	MFAS	STAT			RES				MAP	CRC	FCC	OSMC						RES
	6	MFAS	STAT							MAP	CRC	FCC	OSMC						
	7	MFAS	STAT							MAP	CRC	FCC	OSMC						
111	8	MFAS	STAT							MAP	CRC	FCC	OSMC						

OH bytes for FlexO interface #2 to #m
m is the number of FlexO interfaces in a FlexO group

MFAS (678)	FlexO frame #	1	2	3	4	5	6	7	...	10	11	12	13	...	26	27	28	29	40
000	1	MFAS	STAT	STAT	GID	GID	RES	PID		MAP	CRC	FCC	RES						
001	2	MFAS	STAT	AVAIL						MAP	CRC	FCC	RES						
	3	MFAS	STAT							MAP	CRC	FCC	RES						
	4	MFAS	STAT							MAP	CRC	FCC	RES						
	5	MFAS	STAT			RES				MAP	CRC	FCC	RES						RES
	6	MFAS	STAT							MAP	CRC	FCC	RES						
	7	MFAS	STAT							MAP	CRC	FCC	RES						
111	8	MFAS	STAT							MAP	CRC	FCC	RES						

2. 40G/100G系统测试和实验室鉴定

线路侧

这一部分将探讨第一阶段测试，主要涉及研发和制造环节，并概述一旦数量开始增长时制造商如何测试发射器和接收器。

2.1. 发射器一致性验证

背景

如果我们仔细查看正交相移键控 (QPSK) 调制器，就不难发现它其实相对比较简单。然而，有几个因素需要进行考虑，因为它们会影响测试方法和要求。

QPSK调制器基于两个马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder) 调制器，如下一页图中间部分所示。这些调制器均使用相同的载波激光器，且其下半部分进行了90度的相移，从而生成“I”（同相）和“Q”（正交）部分。如果使用传统的示波器来查看发射器输出端的信号，理论上会呈现完美的1类直线（假设一切均以1为标准进行衡量）。但实际上，由于电子元器件响应时间的缘故，整个过程中只会看到小幅下降（如图22右上角所示）。

遗憾的是，这些信息还不足以满足需要。除了知道存在相移外，还需要了解在哪个相位出现过渡区域，才能解析QPSK数据。该信息如下图右侧所示。

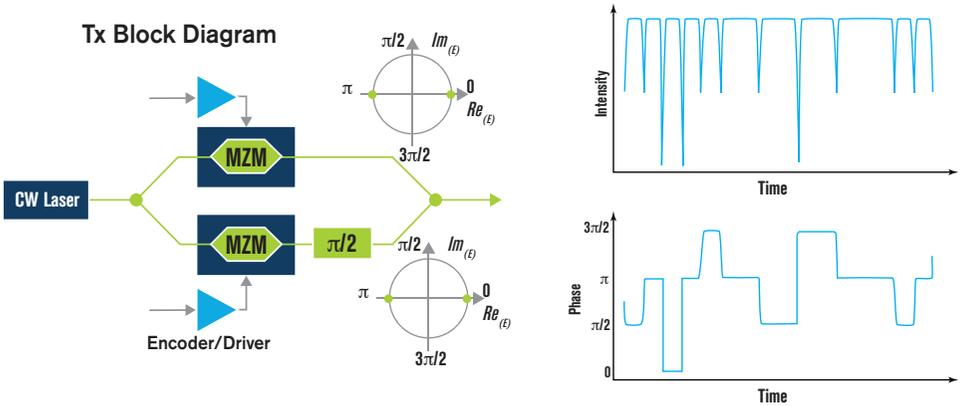


图22. DQPSK发射器方块图；DQPSK发射器强度和相位图。

因为现有的测试仪表和方法已不再适用于双偏振QPSK信号，所以需要重新评估所用的不同方法。

几年前，在制造测试中，国际电工委员会（IEC）建议的传统信号（如千兆以太网和10G SONET/SDH）测试方法使用眼图掩膜来测量信号的多个参数，将计时问题、调制质量、调整、偏移、噪声和不同电平考虑到发射器中可能出现的损伤内。因此，相干传输的挑战之一是找到能够考虑相同问题的测试方法。

关于相位调制信号，需要牢记的关键点是有一个矢量需要测量。如右图所示，其中，一个橙色点表示一种可能的相位状态，矢量指向该橙色点的中间。不同相位状态的标准幅度为1，因此需要测量每个数据点的相位状态。在时域中，它由同相（I）部分和正交（Q）部分表示。

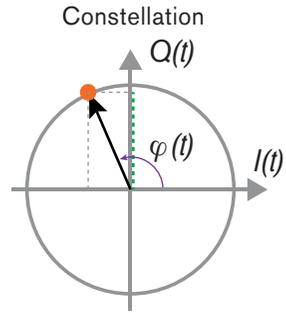


图23. 星图。

通过下图中显示的通用DP-QPSK发射器方块图，就能很容易看到有几个调整点需要正确校准：

- 四个射频（RF）驱动器（RF1至RF4）
- I和Q数据部分的两个时延（D1和D2）
- 四个马赫-曾德尔调制器偏移（B1至B4）
- 用于创建正交信号的移相器的两个偏移水平（B5和B6）

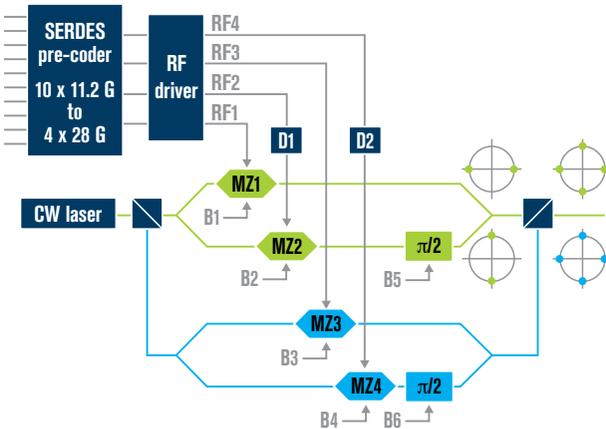


图24. DP-QPSK发射器方块图。

这意味着在相干发射器中通常有12个地方可能会出现问題。如果其中任何一个没有很好或适当地调整，都可能对发射器信号的质量造成相当严重的影响。

有一些常见的损伤由下列不正确的调整导致：

- 正交误差（偏振的I和Q部分之间的相位误差）
- 调制器偏移不佳（会影响眼图中的开口）
- I和Q增益不平衡（星图应为长方形，而不是正方形）
- 偏差（I和Q部分之间的时间差）
- 抖动相关问题（数据相关或随机时钟抖动）
- 啁啾

2.2. 接收器性能验证

接收器的制造也遵循常见的标准。基本上，每个制造商和测试仪表厂商都使用类似的方法，如下所示。

接收器内的第一个元器件是偏振分集光混合器，用作输入信号和本地振荡器之间的混合介质。得到的输出信号被传到平衡检波器和模数转换器（ADC），然后又被传到强大的数字信号处理器（DSP）。这符合相干传输的一个主要方面，即很大一部分接收器性能高度取决于模数转换器输出端处理信号的质量。

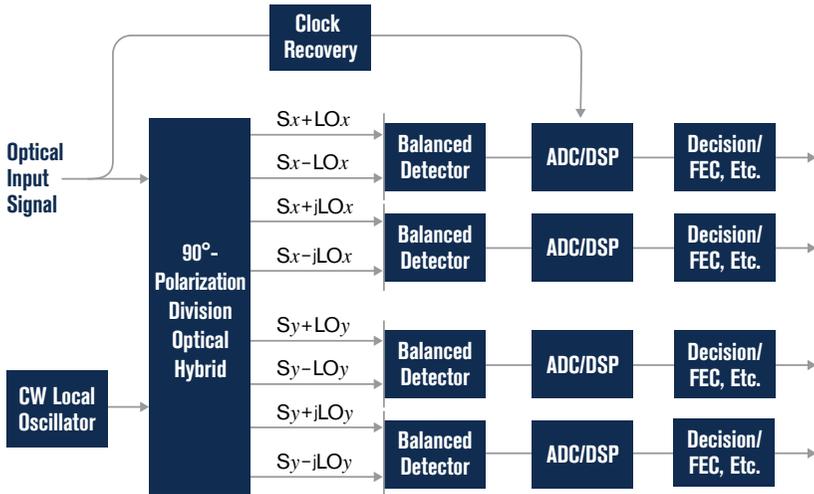


图25. 实时电取样光调制分析仪组件。

由此带来的挑战也迥然不同，因为大多数人都配备性能一样的类似硬件。因此，挑战包括确定如何评估接收器（不考虑软件）的性能，因为这是真正的性能所在（如判定算法、FEC色散补偿算法和偏振复用）。

很难区分发射器产生的损伤和接收器本身所产生的损伤。如上所述，这与软件和接收器有很大关系。相干接收器提供的数据仅显示恢复信号需要的有效比特数和带宽，但不足以很好地评估接收器本身的行为。

因此，有必要将标准设备作为参考点。相应地，强烈建议的方法是使用标准发射器来传输理想信号（经过很好地平衡、调整和对齐），从而能够增加一定数量的抖动、不平衡和偏差来测试极端状况。通过这种方法，除了能够全面测试极端状况外，还可以确定接收器对发射器或传输链路上产生的损伤的耐受程度。

可通过模拟链路上的损伤来评估DSP算法。例如，可使用模拟器来生成色度色散（CD）、偏振模色散（PMD）以及光信噪比（OSNR），并评估DSP算法。

然而，在制造环境中不需要进行DSP算法鉴定，因为只要通过首次鉴定，便会在所有其它情况下都通过。例如，除了确定如何补偿外，确定CD和PMD补偿能力非常重要，这是因为补偿的方式始终一样。因此，可能仅在最终系统验证前的研发阶段需要进行DSP算法鉴定。

因此，可以使用标准发射器来测试其完整性，然后比较平衡前后的BER或Q factor来全面鉴定接收器。

遗憾的是，许多其它仪表需要遵循类似的步骤。和标准发射器一样，模拟器（CD、PMD和OSNR）都是独立式设备；它们不存在于某个经过校准的实体内。

2.3. 物理层测试和收发器测试

40G/100G以太网接口

40GE/100GE系统架构：IEEE 802.3ba标准在同一个架构上包括两个以太网速率：40G和100G。40GE/100GE速率保留了802.3 MAC帧结构，仅支持全双工模式。系统架构如图26所示，包括一个PCS、PMA和物理介质相关层，以及FEC模块和连接接口总线。MAC和PHY之间的芯片总线分别是XLAUI（40G）和CAUI（100G），而片上总线分别为XLGMII（40G）和CGMII（100G）。

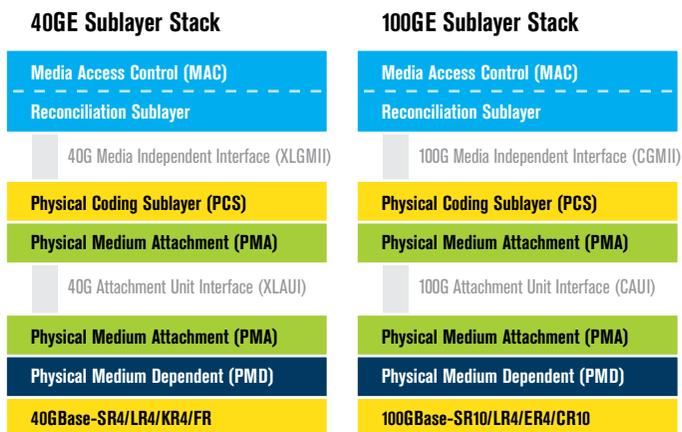


图26. 带CAUI的IEEE模型。

40GE/100GE接口：IEEE 802.3ba定义了多个物理介质接口规范，包括1 m背板连接40GBASE-KR4、7 m铜缆（40GBASE-CR4/100GBASE-CR10）、100 m（OM3）或150 m（OM4）并行多模光纤（40GBASE-SR4/100GBASE-SR10）和10 km基于WDM的单模光纤（40GBASE-LR4/100GBASE-LR4）；100GE定义了40 km基于WDM的单模光纤（100GBASE-ER4）和2 km串行单模光纤（40GBASE-FR）。物理接口如下所列：

	40G以太网	100G以太网
40 km单模光纤 (SMF)		100GBASE-ER4
10 km SMF	40GBASE-LR4	100GBASE-LR4
100 m OM3多模光纤 (MMF) 或 150 m OM4 MMF	40GBASE-SR4	100GBASE-SR10
7 m铜缆	40GBASE-CR4	100GBASE-CR10
2 km SMF	40GBASE-FR	
1 m背板	40GBASE-KR4	

40G/100G以太网架构基于虚拟通道或PCS概念，这些通道在单条光纤的4个并行波长上进行复用和传输。例如，100GBASE-LR4在光纤上有四个25G的光波长，它们来自主机端的10个10 Gbit/s CAUI电信号。40GBASE-LR4的接口波长规格如下：

通道	中心波长 (nm)	波长范围 (nm)
L0	1271	1264.5至1277.5
L1	1291	1284.5至1297.5
L2	1311	1304.5至1317.5
L3	1331	1324.5至1337.5

100GBASE-LR4/ER4的接口波长规格如下：

通道	中心波长 (nm)	波长范围 (nm)
L0	1295.56	1294.53至1296.59
L1	1300.05	1299.02至1301.09
L2	1304.58	1303.54至1305.63
L3	1309.14	1308.09至1310.19

100GBASE-SR10/LR4/ER4的主要接口规格如下：

描述	100GBASE-SR10	100GBASE-LR4	100GBASE-ER4
每通道信令速度及范围 (GBd)	10.3125 ± 100 ppm	25.78125 ± 100 ppm	25.78125 ± 100 ppm
通道数	10	4	4
工作距离 (km)	0.1 (OM3) 0.15 (OM4)	10	40
边模抑制比 (SMSR) (dB)	N. A.	30	30
总平均发射功率 (最大) (dBm)		10.5	8.9
每通道平均发射功率 (最大) (dBm)	2.4	4.5	2.9
每通道平均发射功率 (最小) (dBm)	-7.6	-4.3	-2.9
不同通道间最大功率差 (dB)	4	5 (OMA)	3.6 (OMA和平均)
接收器最大安全功率 (dBm)	12.4	5.5	5.5
每通道最大接收功率 (dBm)	2.4	-10.6	-20.9
不同通道间最大接收功率差 (dB)		5.5 (OMA)	4.5 (OMA和平均)
功率预算 (dB)	8.3	8.5	21.5
通道插损 (dB)	1.9	6.3	18
光回损 (dB)	12	20	20
环形通量	19 μm时 ≥ 86% 4.5 μm时 ≥ 30%	N/A	N/A
消光比 (最小) (dB)	3	4	8
波长 (nm)	850	见上表	见上表

除了IEEE 802.3ba中定义的CFP光接口外，还有另一种业内常用的MSA，即10X10 MSA，其中中心波长为1500 nm，共有10个通道。10x10 MSA的波长参数如下：

通道	最小波长 (nm)	额定波长 (nm)	最大波长 (nm)
L1	1520	1523	1526
L2	1528	1531	1534
L3	1536	1539	1542
L4	1544	1547	1550
L5	1552	1555	1558
L6	1560	1563	1566
L7	1568	1571	1574
L8	1576	1579	1582
L9	1584	1587	1590
L10	1592	1595	1598

IEEE P802.3bm下一代40GE和100GBASE-SR4：IEEE于2012年成立了P802.3bm工作组。其目标之一是定义100G PMA至PMA（PMA-to-PMA）的芯片至芯片（chip-to-chip）和芯片至模块（chip-to-module）4通道重定时的电接口。这意味着基于4X25G的CAUI-4会为CFP4的推出铺平道路。此外，该项目还将定义40GE 40 km单模光纤40GEBASE-ER4和100GE四通道100 m多模光纤100GBASE-SR4。

基于并行光传输技术，通过在同一对光纤上将多个波长（通常为4个或10个）组合起来实现40G/100G速率的传输。这与低于10G以太网的速率大相径庭。旁边的图片显示了用于100GBASE-LR10测试的EXFO FTB-5240S-P光谱仪。从光谱仪的界面中可以得到中心波长、每通道功率和功率不平坦度等指标。用户也可以从仪表的界面中选择相关标准。仪表可以根据波长和功率，生成自动的通过/未通过信息。

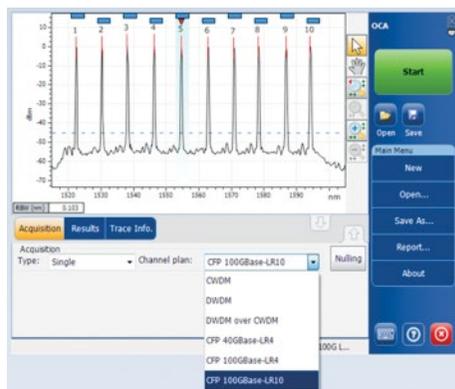


图27. 光谱分析仪视图。

使用100G分析仪进行接口测试：接口指标测试是保证相同设备或不同制造商设备之间互通最为重要的一环。主要的目标是验证被测40G/100G以太网设备的输入/输出参数满足标准要求，包括正确的波长、功率和以太网速率是否是在规定的 ± 100 ppm以内。与原有的2.5G和10G单波长收发器不同，需要对接口的并行通道进行功率和频率监测。某一波长的指标超出正常范围都会造成光模块的接收端受损或造成定时错误。光的波长和功率指标测试可以参考线路侧光谱测试的章节。值得一提的是EXFO的40G/100G解决方案集成了多种物理层诊断工具，包括每个通道的功率和频率信息，为每个CFP并行通道提供快速清晰的检测。下图显示了CFP所报告的接收信号功率和频率测量结果。这些界面提供了对于定位网络故障很重要的CFP状态信息。

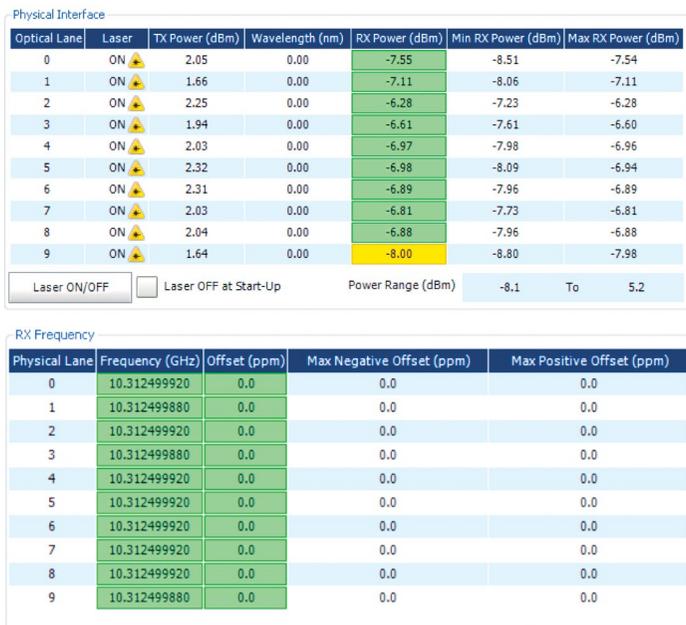


图28. EXFO的88000 Power Blazer系列产品集成了多种物理层诊断工具。
 第一幅图显示的是每个光通道的接收功率水平。
 第二副图显示的是每个物理通道的频率偏移。

CFP测试

1. CFP性能验证

随着100G链路部署的势头持续高涨，带宽需求不断增加。网络运营商也因此面临一些严峻的挑战。有一些挑战在过去被充分地记录下来，因此现在已被大多数人所熟知。然而，在讨论链路部署时，100G技术有个方面经常被忽视：CFP光接口。

光接口基于并行光传输技术，通过在同一对光纤上将多个波长（通常为4个或10个）复用在一起实现100G速率的传输。这种功能由CFP光模块在链路两端进行处理。该技术与10G传输截然不同，后者使用串行传输方式，通过单个波长实现全线路速率。目前，用于10G接口的可插拔SFP+和XFP光模块技术非常成熟稳定，从而实现极其可靠、价格低廉的产品。相比之下，100G CFP技术比SFP+/XFP技术更为复杂，仍处于发展阶段，且未能实现持续可靠的光接口。

从我们与全球多家运营商的合作经验来看，CFP很可能有故障或不可靠。如果运营商在开通链路时未能发现该问题，会导致进度被严重延迟乃至链路性能较差。此外，CFP接口的成本目前仍然很高，且可用性也有限。因此，运营商随时为100G链路保留很多CFP模块备件，并在怀疑其性能较差时进行替换，这样做既不现实，在经济上也不可行。

为了确保100G网络的正常部署和优秀的性能表现，采用正确的工具对每个所用CFP模块的可靠性和稳定性进行测试是非常必要的。接下来，我们将探讨EXFO的100G测试解决方案，及其专为CFP评估而设计的一套独特功能，从而成为100G现场部署的首选工具。除了详细说明此类测试的优点，我们还将重点讨论用于实验室验证的其它测试。在网络间歇性地出现某些错误，使得链路不稳定的情况下，CFP性能验证可以通过易用的图形用户界面和成套应用，迅速定位这些错误。除了上述的CFP激光、功率和频率测试外，CFP性能验证还包括以下流程。

a. CFP识别和MDIO界面

CFP信息页面通过CFP控制页面提供模块ID、厂商名称和支持的速率等详细信息，从而不再需要卸下CFP来读取模块详情。这些信息也会包括在测试报告中，简化了对CFP的追踪。此外，现场也需要这些信息，因为一天中要生成多个任务ID（Job ID），取决于应用，可能会使用不同类型的CFP。下图显示了FTBx-88200NGE上的一个CFP4 GUI。通过这些界面，用户能够验证并操作CFP4电气针脚，显示CFP4状态和任何可能出现的告警。同样，完整的MDIO（管理数据输入/输出）界面使用户能够在CFP4中，通过CFP MSA（多源协议）规定的注册读写访问来验证管理界面。

MDIO界面可用来读取CFP4温度、启用高级CFP4功能甚至将CFP4设置为故障诊断模式。

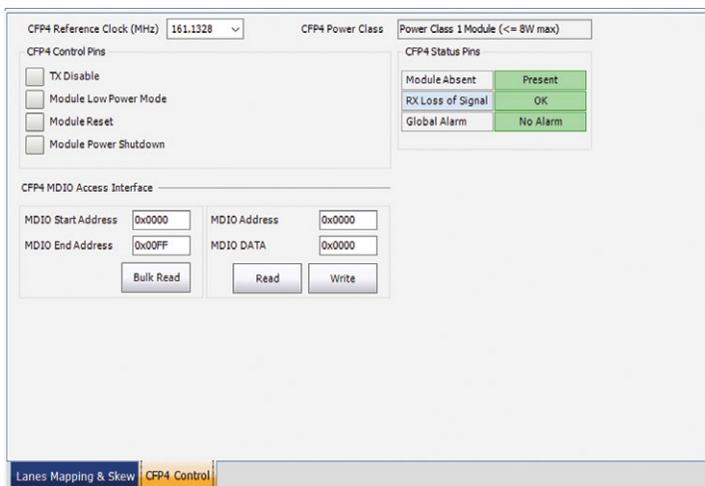


图 29. CFP4状态和MDIO读写界面。

b. CFP压力测试

所有EXFO的传输与数据通信40G/100G解决方案包括了100G压力测试应用，可以本地运行也可通过远程控制的方式运行。这一测试工具主要针对实验室的验证测试，用于在静态偏差测量、串扰、电子信号振幅和图案相关性等传输容限的测试。

接下来，我们将讨论可以利用CFP性能验证应用自动进行的一些测试——减少了人工干预并降低了错误机会。CFP性能验证应用菜单（如图30所示）支持预先设置，可对OTN和以太网测试进行配置。一次可选择一种或多种测试内容，从而优化测试流程并减少测试花费的时间。

在典型的100G网络中，所有时延必须降低到最低水平，因为包括CFP本身的每个网络元器件都可能会增加一定的偏差，偏差是并行通道（PCS或OTL）间的时延。在实验室验证阶段鉴定CFP自身的偏差非常重要。IEEE 802.3ba标准定义了40G和100G信号的偏差容限。由于各通道间的偏差必须限定在一定的范围内，这些阈值必须进行测试，以保证并行通道上传输的信息能够在接收端得到恢复。

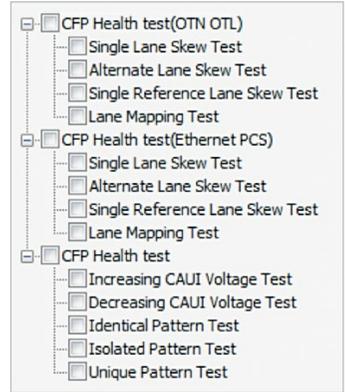
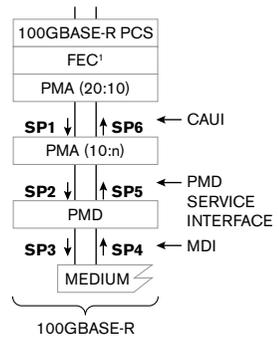
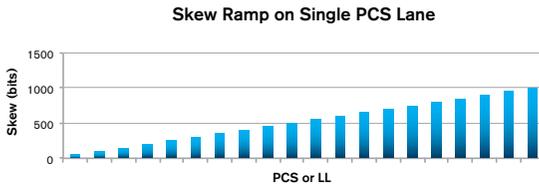


图30. CFP性能验证菜单界面。

c. 偏差测试

CFP压力测试故障诊断工具的偏差测试功能（如图31所示）用来在一个或多个通道中插入不同水平的偏差。在偏差阶梯测试功能中，可进行交替方式或逐一方式进行测试，而这些不同的测试方式可有助于基于802.3ba标准验证远端接收器的CFP缓存器对于偏差的容限。



偏差点	最大偏差 (ns)	40GBASE-R PCS通道 (UI) 的最大偏差	100GBASE-R PCS通道 (UI) 的最大偏差
SP1	29	≈ 299	≈ 150
SP2	43	≈ 443	≈ 222
SP3	54	≈ 557	≈ 278
SP4	134	≈ 1382	≈ 691
SP5	145	≈ 1495	≈ 748
SP6	160	≈ 1649	≈ 824
在PCS接收端	180	≈ 1856	≈ 928

图31. 偏差点测试。

d. 串扰测试和未成帧并行PRBS测试

CFP性能验证应用可采用特定的PRBS图案(PRBS 9至PRBS 31)进行串扰测试。这种测试能够验证任何在CFP中可能造成误码的信号完整性问题。可以通过在测试通道中检测特定的图案来发现这种问题。图32和33显示的是PRBS在每个通道的插入情况。

	测试迭代										
CAUI通道		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
PRBS图案	1	31	23	23	23	23	23	23	23	23	23
PRBS图案	2	23	31	23	23	23	23	23	23	23	23
PRBS图案	3	23	23	31	23	23	23	23	23	23	23
PRBS图案	4	23	23	23	31	23	23	23	23	23	23
PRBS图案	5	23	23	23	23	31	23	23	23	23	23
PRBS图案	6	23	23	23	23	23	31	23	23	23	23
PRBS图案	7	23	23	23	23	23	23	31	23	23	23
PRBS图案	8	23	23	23	23	23	23	23	31	23	23
PRBS图案	9	23	23	23	23	23	23	23	23	31	23
PRBS图案	10	23	23	23	23	23	23	23	23	23	31

图32. PRBS图案串扰测试表。

EXFO的传输与数据通信40G/100G解决方案提供的CFP性能验证功能用来测试整个网络，因此对100G链路部署非常有价值。模块化FTB-2 Pro/FTB-4 Pro平台也包括用于物理诊断的光测试工具，即可视故障定位仪和光纤端面检测器，从而在单个便携式解决方案中为现场工程师提供调试40G/100G网络所需的一切。

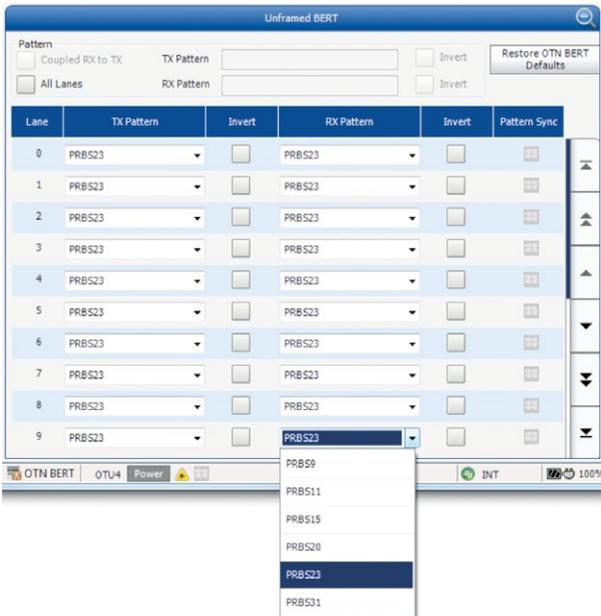


图33. Tx和Rx图案配置。

11. 支持多个收发器

CFP MSA定义的模块外形更多地强调灵活性，而导致CFP外形较大。首批100G收发器（CFP）的设计基于10个10 Gbit/s信号通道。技术进步使得收发器的设计不断改进，实现更好的功率性能和更高的端口密度。因此，CFP2和CFP4规范被定义出来，允许各种收发器（CFP、CFP2和CFP4）根据各自光学特性的兼容性实现互通。

CFP2收发器的尺寸仅为CFP收发器的一半，从而极大地节省了空间。在面板表面积相同的情况下，网络设备可以容纳更多的端口，从而通过更多流量。此外，这些收发器的功耗比CFP收发器要低许多。与CFP收发器不同的是，CFP2收发器不包括负责动态功率和温度控制的gearbox模块。这些任务由CFP2的主机设备负责。

但每次部署前仍需要进行快速的CFP/CFP2验证测试，以分析CFP/CFP2的主要状态并确保无误。在很多情况下，CFP/CFP2被认为是网络中最薄弱的环节；在这些情况下，在部署任何100G网络前确保CFP/CFP2功能完好非常关键。

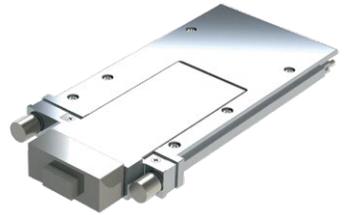


图34. EXFO的CFP到CFP2适配器。

EXFO的CFP到CFP2（CFP-to-CFP2）适配器可插到CFP接口内，使现场技术人员能够在部署前验证CFP2收发器，从而最大程度地降低风险。

EXFO的FTBx-88200NGE Power Blazer和FTB-890/890NGE NetBlazer解决方案支持CFP4和QSFP+/QSFP28可插拔接口。这些接口可提供更高的端口密度，功耗更低，从而更加经济高效。例如，CFP4收发器的大小只有CFP2收发器的一半，这是一项重大改进。QSFP接口更适合小于10 km的短距离应用，这使得他们对于单位比特成本比较重要的网络级数据中心非常有吸引力。FTBx-88200NGE Power Blazer也支持对CFP4和QSFP+/QSFP28模块进行CFP性能验证。EXFO的FTBx-88400NGE模块支持可插拔CFP8收发器，结合PAM4调制来提供400G速率。



图35. CFP4收发器。



图36. QSFP28收发器。



图37. CFP8收发器

III. 验证10至100G光模块

我们每天的生活正越来越多地受到接收、发送和消费信息的速度、数量和可靠性的影响。造成这种现象的因素有很多，包括人们相互沟通和互动的方式、日益变化的工作环境以及大家使用的众多协同工具。例如，多个行业提供的服务开始被传输到云上、娱乐业正在大刀阔斧地将介质非物质化、物联网（IoT）正成为现实、机器间（M2M）通信在全球范围内增长以及移动设备（如蜂窝手机、智能手机和平板电脑）呈爆炸式增长，这些都不断要求高精度和高性能的即时内容。

因此，全球各地的数据中心和服务提供商基础设施上的数据通信量开始暴增，而这些基础设施也不断发展以支持目前和未来的流量需求。行业固有的挑战自然改变了技术的演变过程。因此，网络设备的设计考虑到诸多重要方面，如设备大小、功耗和成本等。直接影响这三方面的一个因素是网络设备内所使用的收发器。这些收发器也称为可插拔模块，因各种传输和接收的数据速率而各不相同。光收发器从SFP演变到SFP+、XFP、CFP、CFP2、CFP4、CFP8、QSFP+和QSFP28。下表描述了每种收发器及各自的工作速率。

SFP	小型可插拔光模块	最高可达5 Gbit/s
SFP+	经过增强的小型可插拔光模块	最高可达16 Gbit/s
XFP	万兆小型可插拔模块	10 Gbit/s
CFP	C型可插拔光模块	40 Gbit/s和100 Gbit/s
CFP2	C型可插拔光模块	100 Gbit/s
CFP4	C型可插拔光模块	100 Gbit/s
CFP8	C型可插拔光模块	400 Gbit/s
QSFP+	四波长可插拔光模块	40 Gbit/s
QSFP28	28 Gbit/s QSFP+四波长可插拔光模块	100 Gbit/s

每种可插拔模块内使用的技术比较复杂，并随着新制造商的出现而不断发展。此外，每种类型收发器的成熟程度也有所不同。这些设备经常被认为是通信环节中最薄弱的部分，因此需要特别注意。有些设备，尤其是工作速率低于16 Gbit/s的设备，价格较低，因此服务提供商更愿意在某些设备运行没有达到预期时选择更换设备。这种方法的风险较大，因为某些设备可能勉强好，这意味着在部署和服务激活后，它们的性能可能降低到预期的阈值之下。

工作速率为40 Gbit/s和100 Gbit/s的设备的成本相对较高。网络级公司和服务提供商承受不起准备大量备用设备的成本，而当速率更高时链路故障的影响也无疑会更加重要。同样值得一提的是，在这些设备刚面市时（尤其是CFP4和QSFP28），其可靠性水平还未达到可接受的标准。由于这些原因，要在合理的时间内通过一次测试确保一次性完成网络部署和服务激活，获得并使用能够迅速、精确地评估这些可插拔收发器质量的工具就极其重要。这可以减少未来出现故障的风险以及进行成本高昂的故障诊断活动的需求。

EXFO在了解服务提供商、网络级公司和网络设备制造商需求方面又一次处于领先地位，推出了iOptics——智能可插拔光模块测试应用程序，它只需少量配置便可迅速验证现有光收发器的状态是否正常，从而成为最简单的方法。所测试的方面和功能针对被测可插拔收发器的类型和光连接器的类型进行调整。

iOptics的使用时间和地点

iOptics——智能可插拔光模块测试应用程序设计成为在现场和实验室环境中，评估网元内所安装的收发器的首选工具，还可以验证光设备的运行是否正常。应在在下列情况下进行iOptics测试：

- 在网元内安装可插拔光模块前
- 在使用可插拔模块进行测试前
- 在故障诊断期间（以确认可疑设备内的故障）

该测试使用物理光纤环回来验证设备信号连续性、完整性和超额偏差生成情况。应使用适当的信号衰减来模拟网络状况并保护光设备。

IV. 用户场景

服务提供商（FTTA）

全球各地的服务提供商在部署网络期间必须承担很大的开支，并有不同的团队来负责不同的网络基础设施设备。对于移动服务公司来说，射频拉远头（RRH）的安装经常是一个冗长麻烦的过程，需要非常专业且费用较高的安装团队才能完成。相应地，在部署RRH前确保RRH内安装的SFP或SFP+状态良好非常重要。派遣人员回到现场的成本很高，可以通过使用iOptics加以避免，该应用程序可进行必要的验证，以确保可插拔模块的运行符合预期要求。

数据中心

网络级公司在其数据中心有无数的端口，并开始逐渐部署一些硬件，这些硬件都配备工作速率高达100G的QSFP28端口。这些设备的质量和成熟程度与其发展水平有关，经常会出现与关闭通道、功率水平和控制输入/输出（I/O）接口有关的问题。

智能的iOptics测试应用程序使数据中心可以迅速验证可插拔光收发器并满足雄心勃勃的部署计划，而此类计划目前是商业环境的一部分。

NEM

NEM正不断在其设计中推出新硬件和软件功能。因此，在设计验证阶段他们的工程师必须确保所有的光模块都非常可靠。NEM承受不起因为使用有故障或不可靠收发器而危及其设计验证的风险，因此所有可插拔收发器能正常运行非常关键，且必须进行验证。

iOptics可验证什么？

iOptics可进行一系列根据所选端口和被测收发器进行调整的测试。

在开始进行这些测试前，iOptics可进行基本的模块验证，收集关键设备信息，如厂商、模块类型、模块ID、部件号码和速度（如下图所示）。这使得用户可以直观确认目标设备位于所选端口内。这种基本的模块验证还可以评估被测光设备可以支持哪种测试。



图 38. QSF 详情对话框。

这一系测试如下，测试应用程序执行两个任务：监测并执行每个子测试。

1) 功耗监测

功耗监测测试可测量所选光设备所用的电流和功率。在整个测试期间都进行这种监测，如果在整个测试期间，最大功率等于或小于功率阈值，就会得到通过的判定结果。

2) 光设备 I/O 接口快速检查

光设备 I/O 接口快速检查可使用适用于所需光设备的常见命令和控件，验证 MDIO/12C 和硬件引脚运行是否正常。因此，该测试提供的判定结果包括 MDIO/12C 接口测试和控制/状态引脚检查结果。

3) 温度监测

温度监测测试可确定光设备的内部温度（以摄氏度为单位），直至测试结束。如果在整个测试期间，最大温度等于或小于温度阈值，就会得到通过的判定结果。

4) 光发射功率范围测试

该测试可抽样检查发射功率，将它与设备的发射功率范围进行对比，然后提供判定结果。对于有多个运行通道的设备来说，每个通道都被抽样检查，然后与设备的发射功率范围进行对比。此外，该测试会报告在子测试期间收集的最小和最大发射功率（dBm）。如果所测量的发射功率在设备制造商定义的发射功率范围内，就会得出通过的判定结果。

如果可插拔光模块的工作功率不在制造商规定的范围内，就会得出未通过的判定结果。

5) 光接收信号状态和功率范围测试

该测试需要物理环回，验证接收信号的状态并对光接收功率水平进行抽样检查。该测试可将获得的接收功率水平与设备的接收水平范围进行对比，然后提供判定结果。对于有多个运行通道的设备来说，每个通道都被抽样检查，然后与设备的接收功率范围进行对比。该测试会报告最小和最大接收功率（dBm）。如果所测量的接收功率在设备制造商定义的接收功率范围内，就会得出通过的判定结果。

6) 误码率测试（BERT）

该测试需要物理环回，验证光模块的误码性能。以光设备支持的最高速率/协议进行验证。此外，分别在各个协议边界处，生成和未生成频率偏移的情况下进行验证。

用户可以配置测试的持续时间，如果满足以下条件，会给测试分配通过的判定结果：

- 无信号丢失（LOS）
- 无图案丢失
- 误码数 \leq 误码率阈值

对于有多个运行通道的设备来说，如果通道显示问题，会导致未通过的判定结果。

7) 超额偏差测试

该测试只用来验证CFP、CFP2、CFP4、CFP8、QSFP+和QSFP28光设备。该测试需要物理环回，测量与每个物理编码子层（PCS）通道相关的偏差。智能的iOptics测试应用程序会自动根据设备支持的最高速率设置OTN BERT或EtherBERT测试。

iOptics测试应用程序也会自动根据所用的速率/协议配置偏差阈值。如果测量的偏差等于或小于偏差阈值，会得出通过的判定结果。

如果在执行任何子测试期间得到未通过的判定结果，会中止测试，报告故障以表示不应使用有故障的收发器。

V. iOptics简介

iOptics只需要配置几个参数；大多数参数的配置由程序为用户完成。下图显示的是配置页面示例。

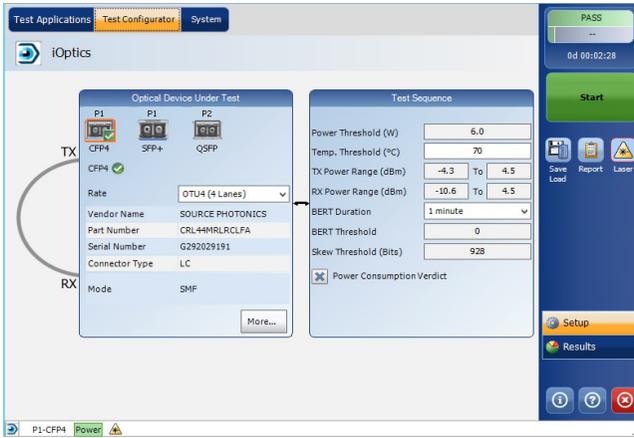


图39. iOptics测试配置页面。

在完成配置后，用户可以开始测试，接下来会出现包括主要结果和测试各阶段相关判定结果，以及各阶段相关监测任务的“摘要”页面。还提供每个测试的进度状态。值得注意的是，可以迅速执行多个测试。

“摘要”页面包括下列部分：

- 测试的开始时间
- 子测试序列
 - 概况（每个子测试）
 - 综合判定结果
 - 进度指示
 - I/O接口快速检查
 - MDIO或I2C通过/未通过
 - 控制/状态引脚通过/未通过
 - 光发射功率范围测试
 - 最小/最大功率值，带彩色状态（绿色或红色），显示值是否在范围内
 - 光接收功率范围测试
 - 最小/最大功率值，带彩色状态（绿色或红色），显示值是否在范围内
 - 误码测试
 - 误码数、LOS或图案丢失指示
 - 如果误码数等于或小于误码阈值，会显示绿色状态指示
 - 如果误码数大于误码阈值，会显示红色状态指示

- 超额偏差测试
 - › 最大偏差（任何通道）或LOS指示
 - › 如果最大偏差等于或小于阈值，会显示绿色状态指示
 - › 如果最大偏差大于阈值，会显示红色状态指示
- 监测
 - 功率（W）
 - › 瓦特表，带通过/未通过判定区域指示（绿色和红色区域）
 - › 功率（当前/最大）
 - › 电流（当前/最大）
 - › 通过/未通过判定图标（仅支持功率）
 - 温度（°C）
 - › 温度计，带通过/未通过判定区域指示（绿色和红色区域）
 - › 温度（当前/最大）
 - › 通过/未通过判定图标

总之，验证100M至100G光模块非常重要，无论它们的使用场景如何。业内的所有参与者都在寻求能够确保采购可预测性的能力。高速光模块的价格依然较高，而各家公司无法承受服务中断以及前往故障设备现场所造成的时间与资源浪费。iOptics给NEM、服务提供商和网络级公司带来很多好处，包括：

- 快速检查下一代100G网络可插拔模块的状况
- 迅速分析光接口，并很快提供通过/未通过判定结果
- 支持高速光模块（CFP/CFP2/CFP4/CFP8和QSFP+/QSFP28），以及工作速率较低的可插拔模块（SFP和SFP+）
- 支持CLR4/CWDM4 100G规范，用于数据中心市场

2.4. OTU帧结构、开销和测试

光通道传输单元（OTU）帧主要有三部分组成：

- 成帧：帧定位信号（FAS）和复帧定位信号（MFAS）
- OTU、光通道数据单元（ODU）、光通道净荷单元（OPU）开销
- OTU FEC

成帧

在光传输系统中传输连续的数据块时，接收设备能够识别数据块边界非常重要。在OTN中，通过使用成帧字节来识别起点，每个帧都携带成帧字节。OTU成帧结构主要包括两个部分：FAS和MFAS。

FAS使用第一行的前6个字节以及1-6列。G.709采用FAS为整个信号提供成帧格式，并将此字节作为判定帧失步（OOF）和丢帧（LOF）的条件。

MFAS：G.709支持复帧结构，其中有些OTUk和ODUk开销信号会跨越多个OTU帧。比如路径跟踪标识（TTI）和串联连接监测激活（TCM-ACT）开销信号。MFAS字节用于在多个帧上扩展命令和管理功能。MFAS字节使用G.709帧的第1行第7列，随每个OTUk/ODUk帧递增，从而可提供一个256复帧结构。

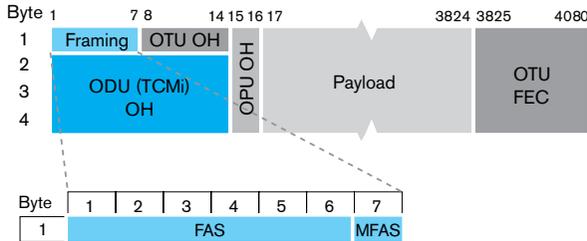


图40. G.709帧定位。

OTU开销

OTU开销由段监测（SM）、通用通信通道（GCC0）和RES保留字节组成，如下一页图所示。

- SM字节：这些字节由路径跟踪标识（TTI）、比特交织奇偶校验字节（BIP-8）、后向错误指示（BEI）、后向输入定位错误（BIAE）、后向故障指示（BDI）和输入定位错误（IAE）组成。
 - SM-TTI：它是一个字节的开销字段，用来支持64字节跟踪信号。TTI用于标识网络内从源到目标的信号。TTI包括所谓的接入点标识（API）字段，该字段用来指定源接入点标识（SAPI）和目标接入点标识（DAPI）。API包括有关来源国、网络运营商和管理详情的信息。
 - SM误码BIP-8：它是一个占用一个字节错误检测代码信号。OTUk BIP-8在特定帧的OPUk区域内计算，然后插入到两个帧之后的OTUk BIP-8开销中。
 - SM-BDI：它是占用一个比特指示的信号，用于将检测到的信号失效状态回传给上游。
 - SM-BEI和SM-BIAE：它是一个4比特的信号，用于向上游回传段监测BIP-8代码检测到的有误码块的数量。该信号也用于向上游回传在段监测IAE开销中检测到的输入定位错误（IAE）状况。
- GCC0字段与SONET/SDH中的数据通信通道（DCC）开销很像，目前还没有定义。然而，它将来可能会用于实现网络管理或控制面信号传输等功能，比如传输类似通用多协议标签交换（G-MPLS）协议信号。
- 保留（RES）字节，存在于整个开销中，留作将来使用。

光通道数据单元开销

光通道数据单元（ODU）开销如下图所示。

ODU开销支持两类ODUk维护信号，使用通道监测开销（PMOH）状态（STAT）和串联连接监测（TCM）的状态（STAT）比特来上报。通过PMOH或TCM状态比特，可报告以下ODU状况：告警指示信号（ODUk-AIS）、开放连接指示（ODU-OCI）、锁定（ODUk-LCK）和通用AIS。此外，ODUk开销还支持自动保护倒换（APS）功能。ODUk开销由以下几个字段组成：RES、PM、TCM_i、TCM ACT、FTFL、EXP、GCC1/GCC2和APS/PCC。

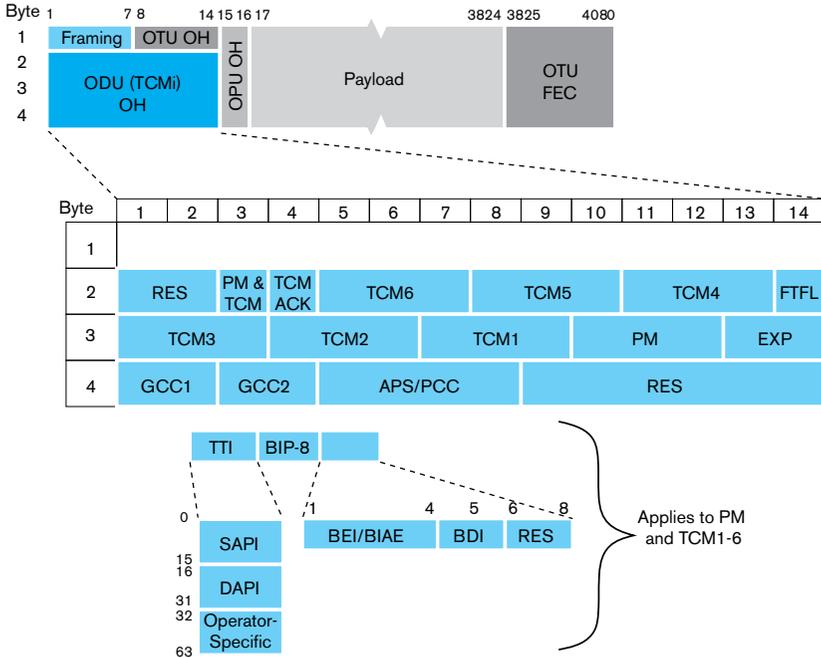


图41. ODU开销和结构。

- RES字节未定义，留作将来使用。
- 通道监测（PM）可监测网络内部某一段的差错和故障位置。PM字节位于第3行的10-12列，与SM相似PM，其中包括如下几个子字段：TTI、BIP-8、BEI、BDI和STAT。
- 串联连接监测（TCM_i）字段定义了6个ODU TCM子层。每个TCM子层都包含一个TTI、BIP-8、BEI/BIAE、BDI和STAT子字段，与一个TCM_i级别相对应。
- 串联连接监测激活/禁用（TCM ACT）是一个字节的字段，位于第2行第4列。TCM-ACT目前未在标准中进行定义。

- 故障类型和故障位置（FTFL）是一个字节的开销，位于第2行第14列，用于传输故障类型和故障位置消息，消息分布在256个字节的复帧中，用于前向和后向传递路径层的故障和位置信息。前向字段被分配到FTFL消息的0至127字节。后向字段被分配到FTFL消息的128至255字节。
- 试验（EXP）是两个字节长的字段，位于ODU开销第3行第13-14列。该字段没有标准定义，主要用于运营商的特殊应用。
- 通用通信通道1和2（GCC1/GCC2）：它们与GCC0字段类似；GCC1位于ODU开销的第4行第1列和第2列，而GCC2位于第4行第3列和第4列。
- 自动保护倒换和保护通信通道（APS/PCC）是一个四字节的信号，位于ODU开销的第4行第5-8列。
APS/PCC字段最多支持8级嵌套的APS/PCC信号。

光通道净荷单元（OPU）净荷

OPU开销和结构如下图所示。

OPU开销位于1至4行的第15和16列，OPU包括如下字段：

- 净荷结构标识（PSI）是一个字节长的字段，分配在OPU开销中，用于传输256字节的PSI信号。PSI字节位于OPU开销第4行第15列。
- 净荷类型（PT）是一个字节的字段，位于PSI[0]字节，包含净荷类型标识，用于向接收设备传递OPU中净荷的类型。
- 复用结构标识（MSI）字段用于标识OPU里面的ODU复用结构。MSI位于PSI信号中与映射相关的区域，指示OPU里面的每一个支路时隙（TS）的内容。
- 调整控制（JC）开销包括ODU复用过程中使用的调整控制（JC）、负码速调整机会（NJO）和正码速调整机会（PJO）信号。

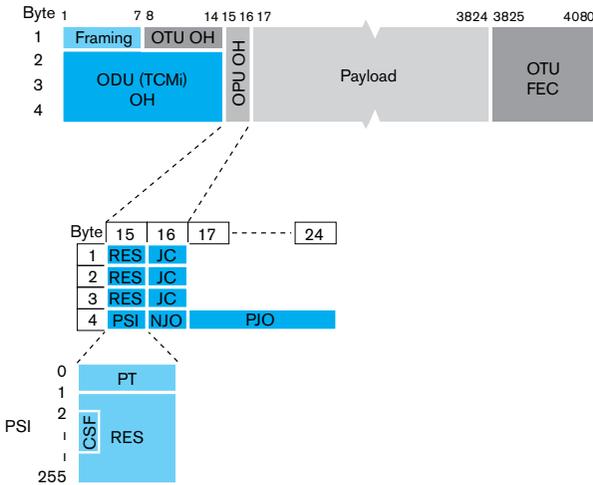


图42. OPU开销和结构。

OTN开销 (OH) 测试

验证OTN开销的最简单方式是将OTN分析仪与被测网元直接相连。下面是EXFO FTBx-88200NGE OTN分析仪生成的典型开销分析界面：

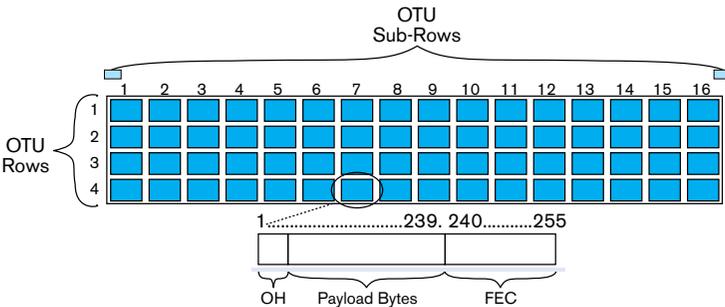


图43. OTN开销配置。

2.5. 前向纠错 (FEC)

FEC是OTN最为重要的特征，它采用Reed-Solomon RS (255、239)算法编码，将产生的冗余信息与传输的信号关联，然后在接收接口处根据冗余信息识别并纠正错误。实践证明，FEC算法可以有效地解决系统OSNR受限的问题。

下图显示了FEC协议将一个开销字节和238个字节的数据交织起来，以计算16个奇偶校验字节，从而形成一个255字节数据块的过程；即RS (255/239) 算法。将信息交织起来的主要优点是相对于链路传输速率，降低每个数据流的编码速率，并降低对误码突发的敏感度。这种交织的方法，配合RS (255、239) 算法，可以纠正128个字节的连续误码。



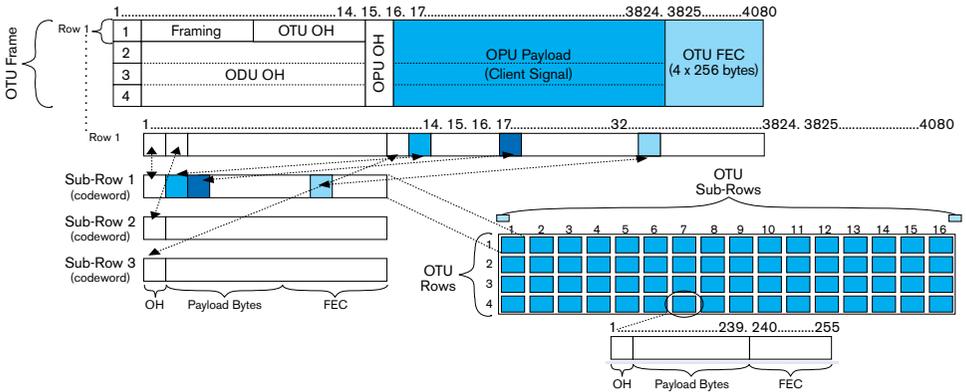


图44. OTN行和子行； OTN内的FEC交织。

为了判断FEC算法是否工作正常，可以使用仪表产生可纠正的FEC错误，确认设备是否能够检测到差错，并纠正误码。在测试仪表所收到的信号应无误码。同时也可以采用仪表产生不可纠正的错误，被测系统应能够向网络管理员正确上报告警。

最后使用仪表进行FEC压力测试，方法是通过仪表在OTU帧里产生随机误码。被测设备应能够正确识别所有误码，并返回无误码OTN信号。

测试连接和方法

下图是利用EXFO公司的FTB-2 Pro主机进行OTN FEC测试的连接图：

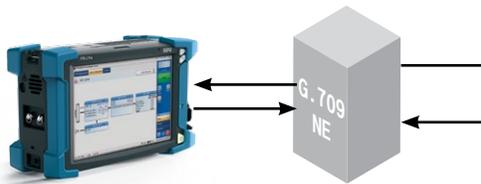


图45. OTN FEC测试配置。

2.6. 正确响应测试以及OTN设备的一致性和互通性测试

验证正确的告警和错误响应是校验OTN网元设备性能的一个重要方面。这个测试的方法是采用测试仪表产生不同的告警和错误，确认被测设备的响应是否正确。一个单独的OTN激励信号能够同时触发被测设备产生多个上游和下游方向的响应。比如采用仪表产生一个AIS-P告警，被测设备应向上游发送OTU-BDI告警和向下游发送OTU-AIS告警。

设备连接图：

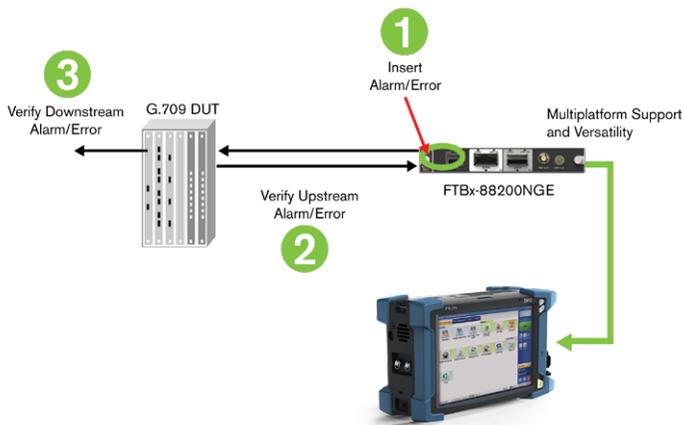


图46. 使用EXFO的FTB-2 Pro进行响应测试的连接图。

下图显示的是常见的激励信号以及对应的被测设备在上下游的响应：

激励信号	上行告警/错误	下行告警/错误
LOS-P、LOF、AIS-P、LOM	OTU BDI	ODU AIS
OTU BIP-8	OTU BEI	
OTU TIM	OTU BDI	ODU AIS
OTU IAE	OTU BIAE	
ODU AIS	OTU BDI	ODU AIS
ODU BIP-8	OTU BEI	
ODU TIM	OTU BDI	
ODU OCI	OTU BDI	ODU AIS
ODU PLM		ODU AIS

图47. 被测设备在上下游的响应。

一致性和互通性测试

与响应测试不同的是在一致性测试中，仪表需要产生一系列的激励信号，需要被测设备在标准规定的条件下检测到不同的事件。标准一般规定了告警产生和消除的条件，比如多少帧或多少毫秒。所以在一致性测试中，需要激励信号产生不同的数量的帧，确认被测设备满足标准要求。

2.7. ODU-MUX测试：SDH等恒定比特业务的映射复用测试方式

在OTN标准中定义了不同的同步和异步净荷的承载方式。客户端信号包括SDH服务、OTUk服务、以太网服务、FC服务、CPRI服务、GPON服务等。服务类型主要分为恒定比特（CBR）信号和分组信号。其中分组服务至ODUK服务的适配是支持数据服务POTN的测试关键，主要包括以太网/MPLS-TP信号至ODUK通道的适配和映射。

ODU复用功能测试也是一个关键参数，需要依据G.709进行验证。为了判断被测网元的复用功能是否正确无误，测试设备应处于OTN解耦模式，从而在传输侧生成低速率信号。接下来，在G.709网元上将传输信号复用到ODU信号，具备适当的开销和FEC带宽，以组成最终的OTU信号。最后，在测试设备检查接收到的OTU信号，以验证是否采用合适的频率调整和同步进行了正确的复用（如图48所示）。

ODU复用结构通过OPU复用结构标识（MSI）字节来识别。

复用结构标识失配（MSIM）告警用于识别接收和预期MSI之间出现失配的情况。

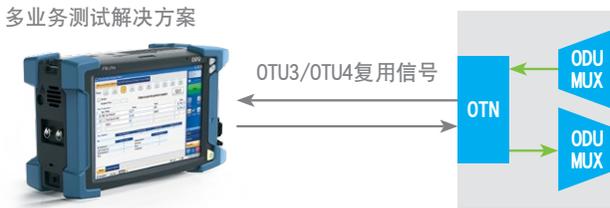


图48. ODU复用测试配置。

OTN标准中设计了用于传输同步或异步净荷的方法。仪表可以工作在去耦合方式用来验证OTN设备是否正确映射/去映射所承载的CBR服务信号到OPU中，其中SDH/Sonet信号与OPU速率的差异则通过调整字节（justification byte）来调整。仪表典型连接如图49所示：

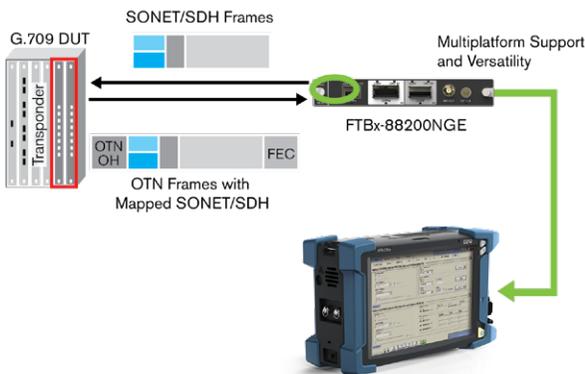


图49. 客户端信号的映射测试连接：发送和接收端口需要去耦合工作模式。

在前图中，仪表发送SDH/SONET信号，而接收信号为包括了SDH/SONET净荷的OTN信号。当然我们也可以反方向测试，即发送OTN信号并接收SDH/SONET信号，从而验证OTN设备的映射行为是否正确。

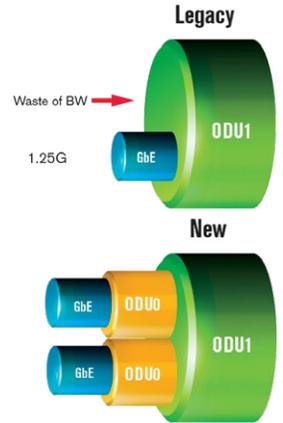
2.8. Packet/Ethernet over OTN测试：ODU0、GMP ODUflex与无损调整HAO (Hitless adjustment of ODUflex(GFP))

从最早部署OTN设备用于SDH和SONET信号的传输开始，以太网不断突破企业网领域的应用界限，向公共网络领域延伸。相应地，国际电信联盟（ITU）已为此做了很多工作，定义和标准化了通过OTN网络传输多种速率的以太网信号，包括1G以太网、10G以太网、40G以太网和100G以太网等。

ODU0

实现以太网支持的其中一个重要概念是针对千兆以太网定义一个合适尺寸的传输容器。在OTN的最初定义中，光通道数据单元ODU1是最小的传输容器，专门用于传输单个STM-16信号，净荷容量为2,488,320kbit/s。这也意味着仅仅传输单个千兆以太网信号的ODU1会浪费大量带宽。为此，ITU将ODU0定义为光通道净荷单元OPU1净荷比特率的一半，即1,238,954.310 kbit/s。

千兆以太网物理编码子层（PCS）采用8B/10B线路编码方式，产生的比特率比1 Gbit/s的信息速率高25%。为了能够实现千兆以太网的比特透传和时钟透传，PCS层信号必须保留并传输。然而，OPU0净荷比特率不足以承载速率为1.25 Gbit/s的PCS信号。因此，需要在OTN网络入口处对PCS信号进行定时透明转码（TTT）处理，从而减少所传输信号的比特率，同时保存在OTN网络出口处恢复PCS信号所需的信息。TTT处理采用了ITU G. 7041规范中针对通用成帧规程（GFP-T）定义的8B/10B净荷编码的透明映射机制。加入GFP帧头的速率调整或GFP净荷帧校验序列（FCS）。EXFO公司的OTN分析仪设计用于测试ODU0和GFP-T；其测试界面如下。



OH: GMP Client Offset 40/100G Advanced												
TX						RX						
Frames	Client Data		Client Management		Reserved PTI	Client Data		Client Management		Reserved PTI		
Core Header	PLI		PLI		PLI	PLI		PLI		PLI		
	eHEC		eHEC		eHEC	eHEC		eHEC		eHEC		
Type Header	PTI 000	PF1 010	EXI 000	Null	PTI 100	PF1 010	EXI 000	Null	PTI 100	PF1 010	EXI 000	
	UPI 0000 0110		UPI 0000 0001		UPI	UPI		UPI		UPI		
	tHEC		tHEC		tHEC	tHEC		tHEC		tHEC		
Extension Header			CID		CID		CID					
			Spare		Spare		Spare					
			eHEC		eHEC		eHEC					
Client Payload	Default All OH											
	OH Details											
	Payload Length Indicator (PLI) Bits 0-15											

GFP-T										
Frames	Client Data (CDF)						Client Management (CMF)			
Core Header	PLI						PLI			
	eHEC						eHEC			
Type Header	PTI 000	PF1 pFCS Disabled	EXI Null	PTI 100	PF1 pFCS Disabled	EXI Null	UPI			
	Transparent Gb Ethernet						UPI			
	tHEC						tHEC			
Client Payload	Gb Ethernet									
	Delta: 1									

图50. EXFO公司FTBx-88200GE OTN分析仪的GFP-T开销字节分析界面。

ODUflex

随着如ETH、FC、CPRI、GPON等多服务接口的应用，现有的OTN容器以及传统的映射方式，如异步映射规程（AMP）和比特同步映射规程（BMP），已经不能满足OTN全服务承载需求。ODUflex提供灵活可变的速率适应机制，使得OTN能够高效地承载包括IP在内的全服务，并最大限度提高线路带宽利用率。目前ITU-T定义了两种形式的ODUflex，一种是基于CBR服务的ODUflex，速率可以是任意的，CBR服务通过同步映射封装到这种ODUflex；另一种是基于分组服务的ODUflex，这种ODUflex的速率为HOODU时隙的N倍，分组服务通过GFP封装到ODUflex。ODUflex的提出使得OTN具备了将来承载不同服务的能力，特别是提高了对分组服务的支持效率。

ODUflex可以为不同速率的客户端信号提供灵活大小的容器，其原理与MSTP技术中的虚级联VCAT相似。ODUflex提供了一种高效而简单的方式用于将速率可变的分组服务或类似光纤通道固定速率服务映射到ODU中。ODUflex采用1.25G支路时隙（ODUtk）来组成可变容器，从而确保客户端信号被映射进入该容器中，并通过ODUk信号被传输。对于非固定比特速率服务信号，ODUflex采用通用成帧（GFP-F）方式来映射信号。ODUflex最大的好处是可以再利用未占用的时隙，并提供类似带宽可变的BOD服务。

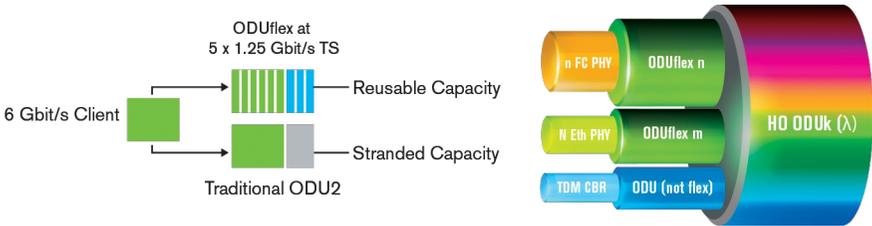


图51. 通过ODUflex获得的可重用容量。

无损调整（HAO）是一种基于G.709建议，在OTN网中无损调整ODUflex带宽的机制。通过HAO协议，系统可以从端到端整个路径增加或减少ODUflex（GFP）所承载的客户端信号数据速率。其过程很像MSTP系统中调整VCAT的动态链路控制机制（LCAS）。然而，需要注意的是HAO需要整个路径上的所有节点参与，而不像VCAT只是在两端；VCAT只是一种逻辑上的级联。原则上每一个VCAT支路可以有不同的路径，在接收端通过缓存来抵偿不同的时延差。而HAO则要求所有的ODUflex支路都必须走同一个路径，从而克服了过去LCAS中需要大量缓存的问题。

HAO的开销主要是通过大小调整控制开销（RCOH）来实现的。RCOH位于HO OPUk支路时隙开销（TSOH）和OPUflex的开销中。RCOH主要包括两个部分：分别用于链路连接大小调整（LCR）控制协议和带宽大小调整（BWR）控制协议。

测试举例：EXFO公司FTBx-88200NGE测试仪Pattern-ODUflex-ODU4的映射路径。



图52. Pattern-ODUflex-ODU4的映射路径。

ODUflex相关开销分析界面如下：



图53. EXFO公司OTN分析仪的ODUflex开销字节分析界面。

在OTN网络中，分组以太网信号将成为主要的服务形式。以太网信号GE/10GE/40GE/100GE可以采用GFP-F方式映射到OPU0/1/2/3/4/flex和OPU1/2/3-X；40GE以太网信号也可以通过通用映射规程（GMP）方式映射到OPU0/3。10GE信号也可以通过BMP方式映射到OPU2e。100GE信号通过GMP方式恢复为64B/66B码字，映射到OPU4。

GMP

OPU净荷速率（最初针对OTN定义）和STM-n（n=16、64、256）客户端信号速率非常匹配。可以通过简单的AMP方法，将STM-n信号映射到OPU，然后将低阶ODU复用到高阶OPU的支路时隙。在OPU4被定义出来用于100G以太网后，很多情况下AMP映射的调整范围无法覆盖客户端信号和服务器信号之间的速率差异（需要指出的是可将低阶ODU视为高阶OPU服务层的客户端信号）。

一种更加灵活或更通用的方法由此形成，即GMP。在所有情况下（如客户端信号的最大ppm频偏和服务器信号的最小ppm频偏），只要服务器信号速率确定高于客户端信号速率，该方法即可将任何的客户端信号速率映射到相应的净荷容器中。

把40G/100G以太网客户端信号映射到OTU3/OTU4，服务帧（或复帧）可以包含数据或填充信息，在这个映射过程中，通过Sigma-Delta数据/填充算法，尽量将数据均匀分布在服务帧中。在这个过程中，若要保证在去映射时，客户端信号完整无误恢复，接收端必须知道在发射端每一帧/复帧中所填的数据方式。

在GMP中，OPU_k开销包含净荷标识（PSI）、净荷类型（PT）以及6个调整字节（JC1、JC2、JC3、J4、J5、J6），作为GMP的调整控制字节，如下图所示。JC1、JC2和JC3字节中包含14比特的C_m符（C1、C2、...、C14），一个递增指示比特（I1），一个递减指示比特（D1），以及一个8比特错误校验CRC8，它用于对JC1、JC2和JC3字节进行差错校验。

GMP使用这些调整控制字节来通知接收端OPU_k净荷内的字节数量，这个过程在每一帧都要进行。净荷字节的大小用C_m值来表示，而在每一个OPU帧中字节数的变化则用两个专用的指示比特“递增指示（I1）”和“递减指示（D1）”来表示。JC4、JC5和JC6字节包含10比特的C_{nD}比特（D1、D2、...、D10），比特4至8是5个比特的差错校验CRC5，比特9预留将来使用（RES）。在GMP中使用C_{nD}参数，提供了一种机制用于承载一些对抖动要求较为严格的客户端信号，比如SONET/SDH信号。

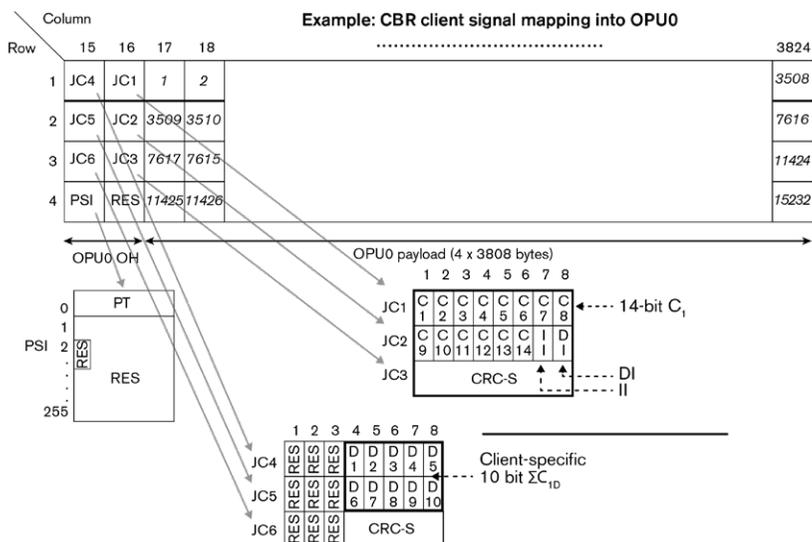


图 54. GMP调整控制字节。

GMP解决了客户端信号到LOODU及LOODU到HOODU的映射，如STM1/STM4、GE等信号通过GMP映射到LOODU0，以及ODUflex映射到HOODUk (k=2、3、4)等。40G/100G以太网在OTN网络中传输就是先通过GMP映射，再进行相应的转码来实现的。

以太网信号映射和复用测试

在POTN网络中，分组的以太网信号将成为主要的服务形式。以太网信号GE/10GE/40GE/100GE可以采用GFP-F方式映射到OPU0/1/2/3/4/flex和OPU1/2/3-X。40GE以太网信号也可以通过GMP方式映射到OPU0/3。10GE信号也可以通过BMP方式到OPU2e。100GE通过GMP方式恢复为64B/66B码字，映射到OPU4。

千兆以太网服务的映射和复用

千兆以太网服务的映射方法主要有两种。该信号可以通过GMP映射到OPU0，再通过AMP映射到ODTU01，复用至ODU1和OTU1；也可以通过GMP映射到OPU0后，再通过GMP映射到ODTU2.1、ODTU3.1、ODTU4.1，然后再复用道ODU2/3/4至OTU2/3/4。所以可以通过多种途径将千兆以太网服务复用到100G OTN。

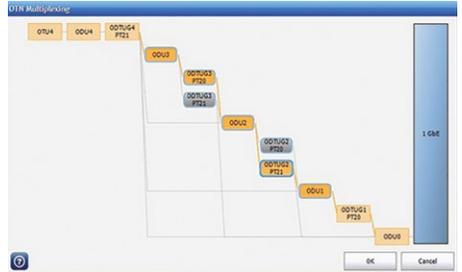


图55. GE-ODU0-ODU1-ODU2-ODU3-ODU4信号结构界面。

下图是EXFO公司100G分析仪验证千兆以太网信号复用到100G OTN的典型两种路径：



图56. GE-ODU0-ODU1-ODU4信号结构界面。

10GE信号映射测试

10GE信号可以分为WAN和LAN两种，其中WAN信号可以直接通过AMP或BMP方式映射到OPU2，与10G SDH信号一样；而10GE LAN信号则可以通过GFP-F映射到OPU2，或者通过GFP-F映射到ODUflex；而另外一种方式是采用OTN超频的方式来承载信号，即采用11.0491 Gbit/s (OTU1e) 和11.0957 Gbit/s (OTU2e) 线路速率在OTN上传输万兆以太网LAN服务。

由于10 GigE速率高于OPU2净荷的速率，所以超频OTN通过提高OTU2标准的10.709Gbit/s数据速率，从而达到承载10 GbE LAN客户端信号的目的。由于OTN的线路速率发生改变，所以存在超频方式与标准OTN速率兼容互连的问题。另一个问题是超频后OTU2的速率无法复用至OTU3。因此，ODU3e被定义出来，用于超频信号的复用。

它将OTU2数据速率从标准的10.709 Gbit/s提升上来，补偿10 GigE LAN和OPU2净荷之间的速率差，以满足10 GigE LAN客户端信号的需求。显而易见，这样改变标准OTN线路速率，会带来互通性问题，而且也会失去将OTU2信号汇聚到OTU3的可能，但ODU3e可实现复用。从积极的方面来看，超频OTN可实现真正的10 GigE LAN信号透明传输，这是大规模部署10G服务的必要条件。

超频OTN支持OTU1e、OTU2e、OTU3e1和OTU3e2光线路速率来映射10 GigE LAN信号。此外，OTU1f和OTU2f两种线路速率用于光纤通道信号。下图显示的是超频OTN应用场景。

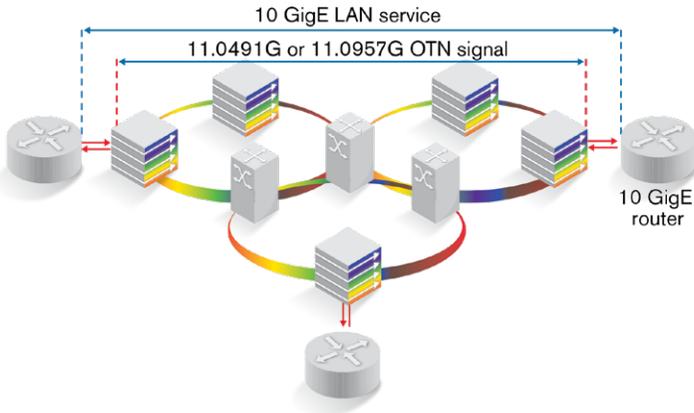


图57. 超频OTN应用场景。

透明传输10GE LAN信号意味着全线速的10.3125Gbit/s的10G以太网信号将通过OTN承载，这里包括PCS 64B/66B编码信息、帧间填充 (IPG)、MAC FCS、先导字节 (Preamble) 和SFD字节等。OTN在在超频工作模式下的时钟来自以太网客户端信号 ($\pm 100\text{ppm}$)，而不是标准的OTU2的信号 ($\pm 20\text{ppm}$)。因此，超频的OTN主要用于点到点数据传输。

OTN超频接口速率和相应的客户端速率如下表所示：

G. 709接口	OTN线路速率	相应的客户端速率
OTU-1e	11.0491 Gbit/s (无填充比特)	10 GigE LAN (直接在OTN上映射)
OTU-2e	11.0957 Gbit/s (有填充比特)	10 GigE LAN (直接在OTN上映射)
OTU-1f	11.27 Gbit/s	万兆光纤通道
OTU-2f	11.3 Gbit/s	万兆光纤通道
OTU-3e1	44.57 Gbit/s	4 x ODU2e (使用2.5G TS; 总共达到16)
OTU-3e2	44.58 Gbit/s	4 x ODU2e (使用1.25G (ODU0) TS; 总共达到32)

图58. OTN超频接口速率和相应的客户端速率。

10GBASE-R信号映射到OPU2e/OPU1e

OTU2e是一种映射机制，它采用G.709标准第17.1.2节定义的映射方案，将CBR 10G信号映射到OPU2。具有固定填充字节的10GBASE-R客户端信号被适配装入OPU类似结构的信号，再进一步适配装入ODU类似结构的信号，最后装入OTU类似结构的信号。这些信号分别表示为OPU2e、ODU2e和OTU2e。

信号速率与之前定义的OTU2不同，在OTN帧中的净荷类型（PT）值为“0x80”。OTU1e类似于OTU2e。唯一的区别是它不包括任何固定的填充字节，因此速率稍低。示意图如下：

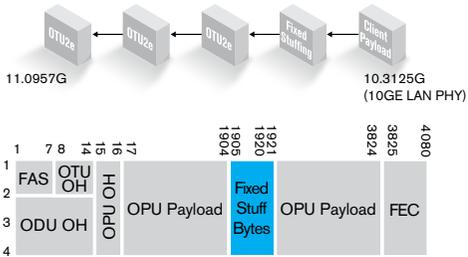


图59. OTU2e有固定填充字节。

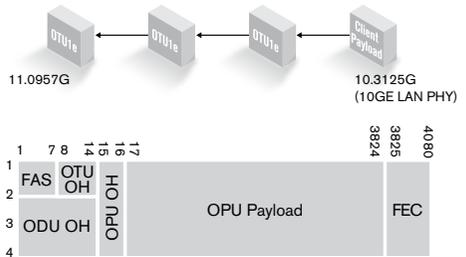


图60. OTU1e没有固定填充字节。

ODU2信号映射到ODU3e

OTU3e是一种允许10GE LAN信号在40G OTN网络上承载的机制。将ODU2e复用进OTU3e中可以提高40G电路的利用率，从而优化净荷并简化网络部署和维护。OTU3e2、ODU3e2和OPU3e2的帧结构与标准ITU-T G.709中的OTUk、ODUk和OPUk结构完全相同。OPU3e2可以承载一个或多个ODUj（j=2e）信号。

GFP-F的10GE信号映射

通用成帧规程（GFP）是另一种在OTN上传输10 GigE LAN或WAN客户端信号的机制。GFP-F首先将10 GigE帧封装到GFP-F帧内，然后将其封装到OTU2内。GFP-F映射以太网MAC层的信息，去掉了64B/66B PCS子层。此外，在GFP-F帧映射到OPU2时，使用了全部的OPU2的净荷区域，这意味着不存在CBR 10G映射的固定填充字节。最终，在OTN上使用GFP-F的主要优势是能够在相同网络上支持各种数据分组服务。

EXFO解决方案

使用EXFO的FTBx-8880/8870 Power Blazer，用户可以支持不同的10G以太网映射和承载方式，包括GFP和超频方式。仪表可以生成带有映射万兆以太网LAN客户端信号的超频OTN信号，该客户端信号包含完整的以太网帧（包括帧尺寸、传输速率、源/目标MAC地址和VLAN ID）。这项测试使网络运营商可以充分了解OTN传输层及其告警、错误、跟踪消息和开销字节。此外，这项测试还提供完整的万兆以太网信息流统计信息、吞吐量（带宽）和线路速率利用率。完成传输层测试后，用户便可执行RFC 2544测试，提供可用带宽、传输时延、链路突发量和服务完整性测量结果。利用RFC 2544测试结果，运营商便可以确保所提供的万兆以太网LAN服务的工作参数符合其服务等级协议（SLA）。

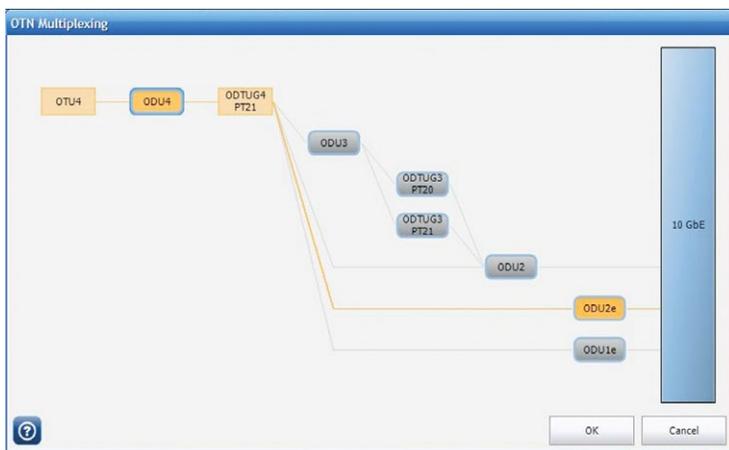


图61. 将10GE映射到ODU2e，然后映射到OTU4。

2.9.40G/100G EoOTN服务测试

100G以太网客户端信号速率为103.125Gbps，它可以采用GMP方式直接映射到OPU4（104.35 Gbit/s）。然而，将40G以太网客户端信号映射到OPU3则要复杂的多，主要原因是40GE信号的速率大于OPU3的速率，需要首先通过64B/66B编码恢复，然后再通过1024B/1027B编码转换速率为40.117Gbps，将速率降低后再通过GMP映射到OPU3。40G/100G以太网的映射方式如下图所示：

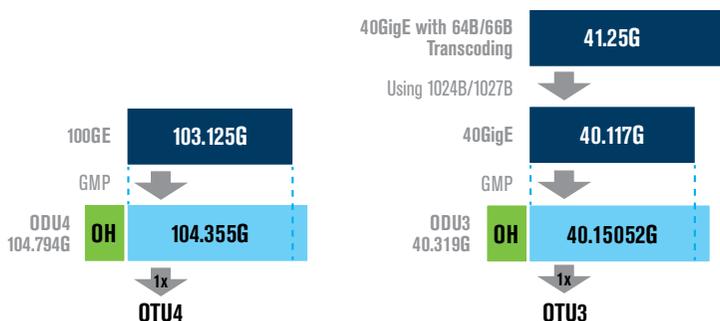


图62. 40G/100G以太网映射到OPU3/OPU4。

EXFO的40G/100G便携式解决方案包括便携的FTB-2/FTB-4平台和FTBx-88200NGE Power Blazer多业务测试模块，可为在运营商实验室内验证40G和100G转发器提供一整套测试功能。

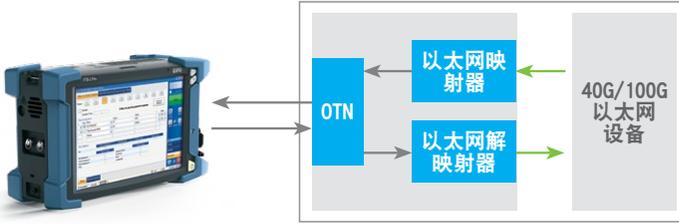


图63. EXFO的40G/100G便携式解决方案。

通过EXFO的FTBx-88200NGE Power Blazer，服务提供商可以在OTN上映射具有不同流量特性的40G/100G以太网服务，在整个OTN中进行端到端BER测试并测量误码与发送码的比。在该测试配置中，FTBx-88200NGE Power Blazer模块提供完整分析OTU3/OTU4（包括OPU、ODU、OTU和OTL层）、相关报警、错误和偏差测量等功能。40G/100G模块也提供与GMP相关的测量结果，包括Cm和CnD统计，以确保在接收端正确恢复客户端信号。在对承载40G/100G以太网客户端服务的OTN网络进行端到端验证后，服务提供商可以进一步验证服务，鉴定从客户端到客户端的40G/100G以太网服务。这个过程包括以100%的吞吐量验证40G/100G以太网IP流量传输，并确保延迟测量不会影响客户的SLA。

2.10. 40G/100G OTN服务中断时间测量

服务中断时间（SDT）测试通常用于验证系统的自动保护倒换（APS）功能，测量在传输层收到的信号的中断时间，以确保工作电路能够在ITU G.841标准所规定的50 ms窗口内切换到保护电路。通常的方法是将检测层设置为误码图案，将故障选择模式设置为误码进行SDT测量，以确保被传输净荷（即客户端信息流）的完整性。单纯地运用图案误码测试的方式，并不能够分析造成服务中断时间长的原因。在POTN系统设备测试中，另外一种常用的方法是在不同的OTN层设置故障触发方式，即将不同的故障类型，如OOF、LOF、AIS等故障作为计算中断时间的触发条件，从而对保护倒换过程进行详细分析。下图是常见的在OTN保护倒换测试中的测试仪表在不同层可以设置的故障触发类型。

层	故障
OTL	LOF、OOF、LOL、LOR、OOR、无效标记、FAS
FEC	FEC-CORR、FEC-UNCORR
(OTU)	AIS、LOF、OOF、LOM、OOM、BD1、IAE、BIAE、BIP-8、BE1、FAS、MFAS
ODU	AIS、OCI、LCK、BD1、BIP-8、BE1、FSF、BSF、FSD、BSD
(OTU)	AIS、CSF
图案	图案丢失、BER

图64. 常见的缺陷触发条件。

该功能可监测OTN层上出现的特定故障，以确保控制面管理的网络生存机制能够在业内标准规定的50 ms时间内恢复受影响的光通道及其流量。在启用SDT故障触发方式后，测试仪表会扫描故障。然后，在检测到第一个故障时会触发测量（如下图所示）。此时，测试周期开始，且SDT开始测量中断的持续时间在测试周期窗口内所花费的时间。当未出现故障的持续时间超过用户配置的“无故障时间”时，SDT测量会结束。然后可以计算SDT测量持续时间，即从检测到第一个故障至最后一个故障结束的时间。

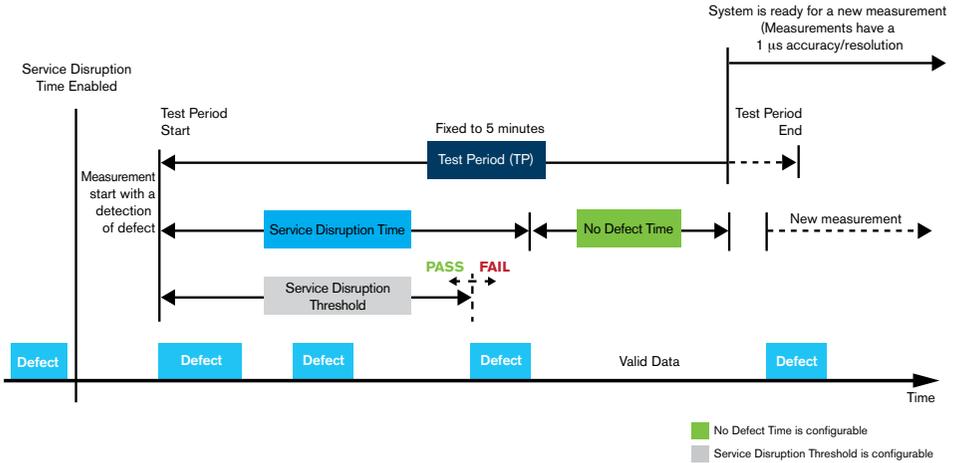


图65. SDT测量。

基于ROADM的网络SDT测量

POTN服务的灵活性在光层体现为ROADM的应用。当网络运营商开始积极主动地部署ROADM时，在维护网络性能方面面临严峻的挑战。遗憾的是，客户的SLA会受到影响。因为ROADM可以灵活地在任何端口分插任何波长，所以这个技术趋势要求测试仪表可配置为OTN穿通模式（如下图所示），从而透明地监测任何所选光通道。在这一过程中，光通道被分路后，测试仪就会先检查信号的OTU、ODU和OPU告警与错误，然后将该通道作为插入通道重新发送出去。例如，通过监测OTU、ODU和TCM开销字节中的比特交织奇偶校验（BIP-8）错误检测代码信息，可以发现FEC后光链路上存在的不可更正错误，并且有助于根据规定的阈值评估网络性能。这些测试模块利用所支持的可插入穿通模式测试功能（用户通过这项测试功能，可以在正常传输的OTN信号中插入OTN告警和错误）。可插入的穿通模式通常用于检验OTN网元的故障检测、生成报告，以便部署正确的响应措施，并检验网元的自动保护倒换（APS）功能。另外，可插入的穿通模式可在现场试运行和开通期间使用，以验证OTN网元的互通性。

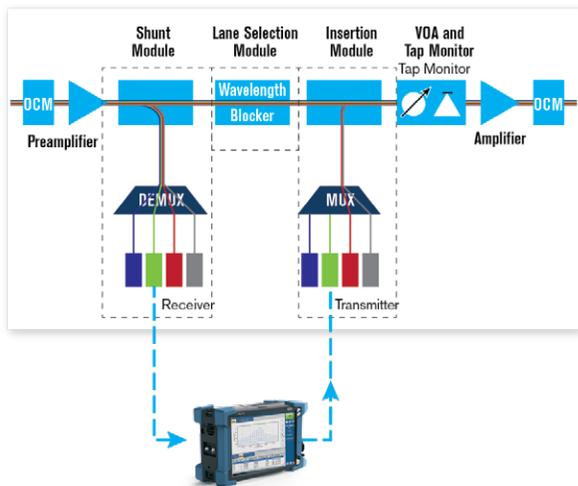


图66. 基于ROADMs的网络SDT测量。

POTN网络中多通道服务中断测试

POTN网络中网状（MESH）拓扑结构将被大量采用。在核心网中OTN的交叉连接设备将带来时延，导致每一个通道的倒换时间并不相同。因此，与过去点到点网络不同的是，在POTN网络保护倒换测试中，有必要同时对每一个通道进行监测，也就是说需要测试仪表支持多通道服务中断测试的能力，能够同时测试所有通道。

EXFO测试仪测量SDT的特点

EXFO的SDT功能的主要优点是非常准确，能够在网络上发现多次中断，即使这些中断发生在很短的时间范围内。如下图所示，可通过用户配置的无故障时间参数来进行控制，该参数被自动设为300 ms，用户能够在5 μs和2 s的范围内设定。无故障时间参数规定了用于确定可报告不存在任何故障的时间阈值。在被适当配置后，它使FTBx-88200NGE Power Blazer能够正确地终止测试阶段窗口，并准备测量下一个故障。如果多个故障之间的时间间隔小于无故障时间，则只报告第一次中断事件。

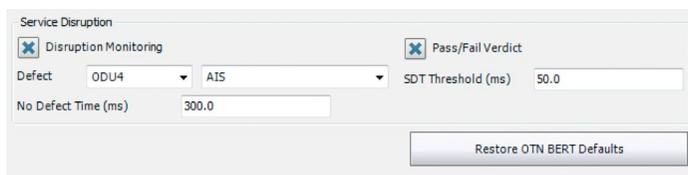


图67. SDT触发器（故障）和无故障时间配置。

EXFO的OTN测试仪的SDT功能还支持在某层或更高层上检测到其它特定的故障时，触发SDT测量——用户从而不需要在相应层上人工选择不同的故障。如下图所示，SDT功能支持多种统计。这些统计包括最短中断时间、最长中断时间、上一次中断时间、平均中断时间和总中断时间。能够以1 μs的分辨率，为支持的所有OTN层提供SDT测量结果。

服务中断						判定阈值	50.0
最长中断时间 (ms)	最短中断时间 (ms)	上一次中断时间 (ms)	平均中断时间 (ms)	总中断时间 (ms)	次数	判定结果	
15.462	0.419	1.219	4.432	17.730	4	通过	

图68. SDT统计。

为了满足网状网测试的需要，EXFO的OTN测试仪可以对所有通道进行服务中断测试，颗粒可以小至ODU0。

2.11. 时延测量

时延是网络性能的重要指标，特别是对于100G OTN系统，由于采用相干技术，不需要色散补偿光纤，从而大大提高了时延性能。时延的验证可以通过SONET/SDH接口，也可以通过OTN接口进行。典型的连接图如下：



图69. 时延测量配置。

测试界面和结果如下：



图70. 往返时延测试配置和结果。

2.12. TCM和性能监测

OTN支持多种跟踪消息，包括光通道数据单元（ODU）、通道监测（PM）、路径跟踪标识（TTI）、光通道传输单元（OTU）、段监测（SM）TTI以及六个串联连接监测（TCMi）TTI跟踪消息。调试新OTN链路时，跟踪消息通常用于监测连接建立过程中终端之间连接路由的完整性。此外，当连接处于激活状态时，需要TTI消息来确保维持连接。OTN的TTI消息包含与网络有关的信息，采用源接入点标识（SAPI）和目标接入点标识（DAPI）的形式。通常，当发现TTI中的接收SAPI和/或DAPI值与预先提供的预期值不匹配时，会生成跟踪标识失配（TIM）告警。利用测试模块的TTI测试功能，用户便可以在SM、PM或TCM TTI中提供SAPI、DAPI和特定于运营商的信息字段，并验证这些字段在整个网络中是否正确发送。这些模块还可用于监测通过网络管理系统提供的TTI消息。

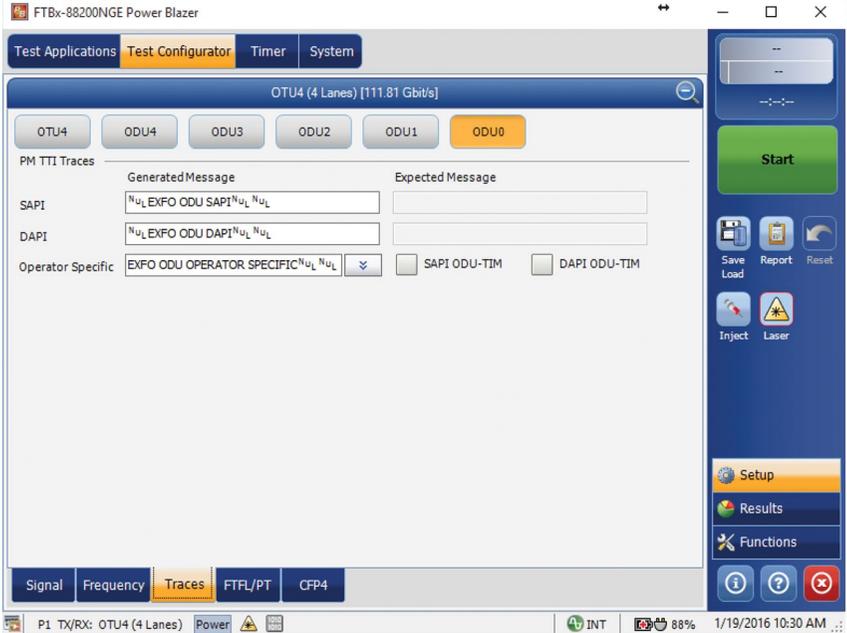


图 71. 使用 FTBx-88200NGE Power Blazer 测试 TTI SAPI/DAPI/运营商信息。

TCM功能实际上在SONET/SDH网络中已经开始采用，而在OTN网络中则得到强化。TCM的主要概念是将通道路径分割为一系列的串联连接的通道区间，每一区间由不同的网络运营商来管理。当差错或故障发生时，运营商通过串联连接监测（TCM）可以非常方便并快速地定位故障发生的区间。OTN的OTU层支持六个串联连接监测（TCM）的故障监测等级。运营商可以通过TCM来监测信息流在网络不同部分之间传输时的质量，并跟踪到特定部分的路径上的错误和故障。当光信号的路径穿过一家或不同运营商的多个网络时，这一功能尤为重要。图70显示了客户利用TCM1监测连接的端到端路径的情形，其中网络运营商A、B和C各自利用TCM2来监测通过其子网的连接。FTBx-8820NGE Power Blazer的TCM监测功能包括：TCM-比特交织奇偶校验8（TCM-PIB-8）和TCM-后向错误指示（TCM-BEI）错误监测，以及TCM-告警指示信号（TCM-AIS）、TCM-串联连接丢失（TCM-LTC）、TCM-打开连接指示（TCM-OCI）、TCM-锁定（TCM-LCK）、TCM-跟踪标识失配（TCM-TIM）、TCM-后向故障指示（TCM-BDI）、TCM-引入告警错误（TCM-IAE）和TCM-后向引入定位错误（TCM-BIAE）告警。使用TCM错误和告警，运营商就能够从各个不同区间或者从整体监测其网络性能。

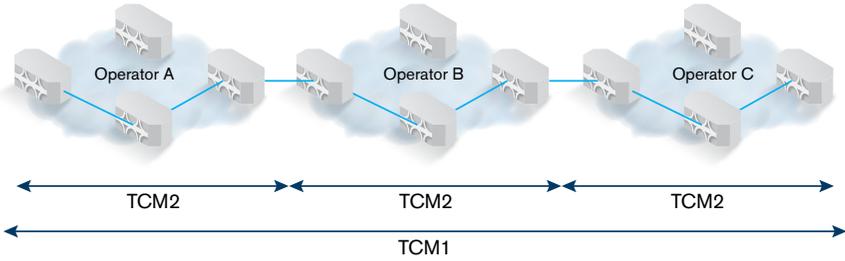


图 72. TCM分配。

2.13. 高级的穿通模式分析

OTN和以太网穿通模式以及OTN穿通模式使最终用户能够监测网络，并验证网络问题，引入压力错误和告警，帮助验证在上行和下行方向的影响。

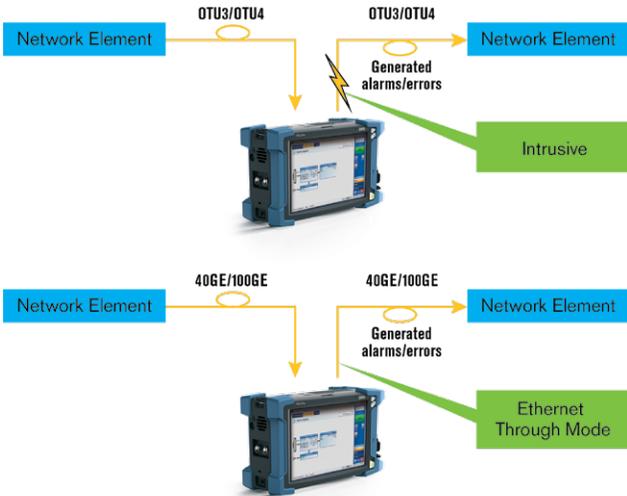
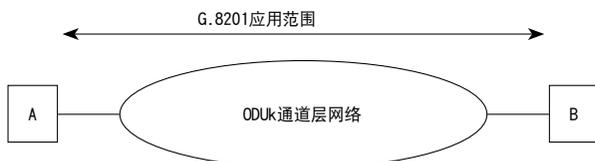


图 73. 穿通模式测试配置。

2.14. OTN性能测试：长期误码测试

OTN的长期BER测试也已成为传输网测试最基本的因素。方法是将伪随机序列（PRBS）置于OTN帧中，检测经过网络后错误的比特数与总发送比特数的比例。在OTN系统出现之前，几个常见的测试标准包括：

- **G. 821**：主要是对基于N x 64 kbit/s的数字电路交换系统的差错评估，其中详细介绍了测试的参数、目标和方法。
- **G. 826**：主要是对2M及以上的国际数字路径端到端的误码性能评估，其中详细介绍了测试的参数、目标和方法。与G. 821不同的是采用了基于块的测试方法，对于2M以上的服务，这个方法可以在线测试。该方法主要是用于PDH链路进行测试。
- **G. 828**：主要是关于SDH国际数字通道的指标，但是这个分配原则也能够适用于国内或专用同步数字通道差错性能的设计。利用SDH系统被测通道内部固有的差错监测码进行的基于块的测量；块的重复率符合SDH技术。这种方法简化了不中断服务测量。对事件、参数和指标相应地作出了规定。另外，还包括了通道性能估算串联连接监测等内容。
- **G. 829**：虽然G. 828定义了误码的性能，但主要是基于国际数字通道的假设参考通道（HRP），长度为27500 km。G. 828没有包括复用段和再生段的指标要求。G. 829标准是对G. 828的补充，确保分配到复用段和再生段的性能与之前的G. 828的目标一致。
- **G. 8201**：主要定义了OTN网络中国际ODUk通道的误码性能。虽然G. 8201是关于国际ODUk通道的指标，但其分配原则同样适用国内或专网的ODUk通道。与G. 828/829相似，采用OTN系统被测通道内固有的检测码，进行基于块的测量。与G. 828/829相似，G. 8201对事件、参数和指标做了相应的规定，并强化了串联连接监测等内容，可以进行不中断服务的测量。误码性能的假设参考通道距离为27500 km，适用的范围为通道的起始点和结束点，如下面的示意图。



OTN系统误码率测试基本概念：

- **误码块（EB）**：其中有一个或多个误码的块。
- **严重误块秒（SES）**：在一秒内含有 15%的误块或至少存在一个故障。在G.8201中详细描述了故障所指的内容。通道层的AIS、TIM、OCI告警等，都将作为故障处理。
- **背景误块（BBE）**：不属于SES部分的误块。
- **背景误块比（BBER）**：在固定测量时间间隔内，可用时间内BBE与可用时间内总块数之比。计算总块数要扣除SES中所有的块。

对于不同的ODUk，一秒内的严重误块数的阈值不同。主要的阈值列表如下：

比特率 (kbit/s)	通道类型	用于确定SES的误块数阈值 (1秒内的误块数)
1 244 160	ODU0	1 526
2 498 775	ODU1	3 064
10 037 273	ODU2	12 304
10 399 525	ODU2e	12 748
40 319 218	ODU3	49 424
104 794 445	ODU4	128 459
可变速率X ≥ 1 244 160	ODUflex	最大 ($\lceil 150 \times X \rceil / 122\ 368$)

图74. 用于确定SES的误块数阈值 (1秒内的误块数)。

G.8201误码测试内容

G.8201的误码测试可以分为在线测试和服务中断两种测试方式。原则上，通过比特交织奇偶校验 (BIP) 来实现测试。

在线监测

服务中监测用来通过内在的比特交织奇偶校验BIP-8错误检测码 (EDC) 对每个块进行测试。EDC的各比特在物理上与它所监测的块是分离的。通常不可能确定是块还是其控制EDC比特有差错。如果EDC和其被控制块之间不一致，则总是认为被控制块有差错。通过设备或OTN测试仪，运营商可以监测通道的性能及状态。

服务中断测量

基于块的误码测试也可以是服务中断进行，这也是使用OTN测试仪进行误码测试的基础。服务中断误码测试能力要比服务中测试强，这是工程测试的基本要求。

在EXFO的测试仪中，用户也可以设置10种用户自定义的图案。除了PRBS之外，还可以将不同种类的用户信号（如GE、10GE、FC或SDH信号等）映射到OUT中进行测试。误码率测试一般需要长时间无误码验证，比如24小时或72小时无误码测试。

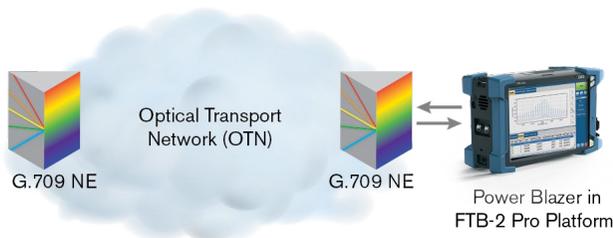


图75. 长期OTN BER测试。

2.15. 多通道OTN

OTN测试

如先前所述，OTN具备一些特质，使其成为一种极具弹性的技术。用户面临的下一个挑战是在开发、安装和故障诊断期间，在网元上验证电路的逻辑配置。为此，EXFO的全球网络测试和数据专家推出了FTBx-88200NGE Power Blazer以及具备混合映射功能的多通道OTN测试应用。这是一种广泛测试客户OTN实施的智能、简单方法。



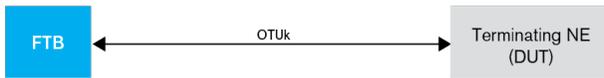
Multi-Channel OTN

我们看看一些在测试OTN时需要牢记在心的要点，以及具备混合映射功能的多通道OTN解决的问题。

连接验证

有多种不同的方法可以用来验证连接。从物理角度来看，其目的是向被测设备（DUT）生成一个测试信号，然后分析响应：

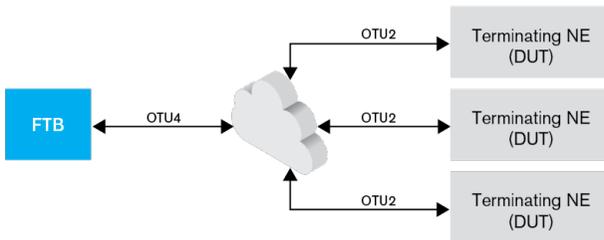
场景1： FTBx-88200NGE（测试设备）直接连接到端接网元（DUT）上。



场景2： FTBx-88200NGE和DUT都连接到网络上。



场景3： 多个DUT连接到网络上，由一个测试设备产生刺激信号。在以下的例子中，FTBx-88200NGE通过OTU4链路连接到网络上。通过OTU2链路完成多个DUT的互通性监测。



复用

复用是一个非常重要的OTN功能，使不等的数据容器（ODU）能够被复用到更高速率的容器。多通道OTN测试应用支持单级复用，将低速率容器复用到ODU4容器。

下表显示的是传输OTU4信号所需的最大通道数量。

复用	通道数
OTU4/ODU4/ODU0	80
OTU4/ODU4/ODU1	40
OTU4/ODU4/ODU2	10
OTU4/ODU4/ODU3	2

OTN的复用功能使其能够在ODU4容器内承载更多的数据容器。希望更详尽地测试网元复用功能的用户可以使用配备混合映射的多通道OTN来测试基本的场景，使用相同类型的数据单元让管道饱和。这相当于用相同大小的汽车来测试高速公路的运输能力（图76所示的测试场景1）。有个这种测试的示例，就是在ODU4上配置80个ODU0通道，然后在OTU4上传输（如图77所示）。

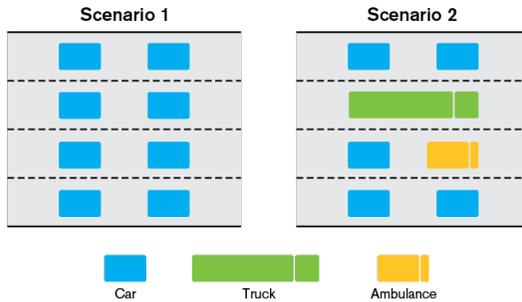


图76. 配备基本混合映射的多通道OTN测试场景

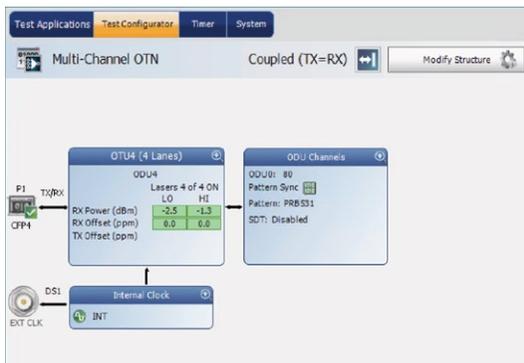


图77. 在ODU4上配置80个ODU0通道

混合映射还使用户能够选择不同类型的数据单元，插入到ODU4容器内。回顾图76所示场景2的高速公路测试示例，我们可以使用不同大小和类型的车辆来测试高速公路的运输能力。如果我们将这个类比应用到数据单元上，可以将汽车作为ODU0速率容器，救护车作为ODU2速率容器，卡车作为ODU3速率容器，它们都在相当于OTU4传输容器的高速公路上行驶。这种不同类型的混合更接近用户要在真正的OTN链路上传输的情况，使NEM能够测试其网元的响应，并使服务提供商能够在开通期间验证其链路的运行是否正常。图78显示了一个使用该测试应用的配置示例，我们可以看到ODU通道包括不同数量的容器。

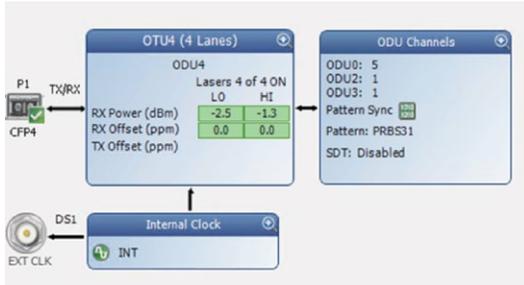


图78. 测试配置示例

可配置的通道/支路时隙

配备混合映射的多通道OTN测试应用的另一个重要功能是可以将Tx支路时隙/通道划分和Rx支路时隙/通道划分耦合起来并解除它们之间的耦合。这让用户能够灵活地选择一个不同的通道配置或一个支路时隙进行验证，包括能够选择不同的数据单元容器（ODU0、ODU1、ODU2或ODU3）。可以手动选择或由应用进行选择，可以指令应用自动识别所有的可用支路时隙，并将它们划分给一个通道。一旦完成通道配置，就可以使用图79所示图形界面上的元素轻松地编辑或删除配置。

TX = RX		TX = RX		Rx Structure Match											
1	2	3	4	5	6	7	8								
9	9	10	9	11	9	12	9	13	9	14	9	15	9	16	9
17	9	18	9	19	9	20	9	21	9	22	9	23	9	24	9
25	9	26	9	27	9	28	9	29	9	30	9	31	9	32	9
33	B	34	9	35	9	36	9	37	9	38	9	39	9	40	9
41	10	42	11	43	B	44	B	45	B	46	B	47	B	48	B
49	15	50	15	51	15	52	15	53	15	54	15	55	15	56	15
57	B	58	B	59	B	60	B	61	B	62	B	63	B	64	B
65	B	66	B	67	B	68	B	69	B	70	B	71	B	72	B
73	B	74	B	75	B	76	B	77	B	78	B	79	B	80	B

图79. 可配置的通道/支路时隙

在测试期间，用户可以选择使用图形界面手动划分通道来配置流量，使配置的流量能够尽可能接近将要传输的流量。测试应用可帮助用户节省时间，根据接收的帧来手动识别并配置用于测试的帧。这样做可以简化用户配置流程并降低详细配置的复杂程度（图80）。

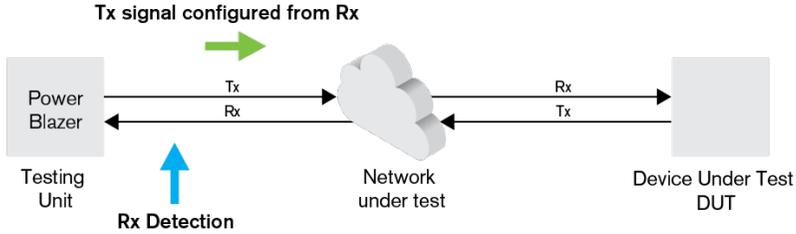


图80. 自动识别并配置测试帧

在完成通道配置后，测试页面就会显示所配置的ODU容器类型汇总，以及所用的通道数量和任何未用的容量，从而帮助用户通过图形确认要被测试的结构（图81）。

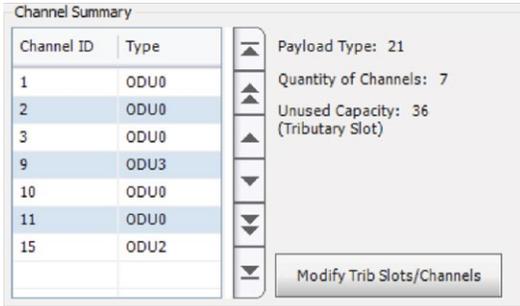


图81. ODU容器类型汇总

并发的BER分析

在DUT和测试设备（FTBx-88200NGE）之间的通道配置完成后，下一个要配置的测试是误码率（BER）测试。这使用户能够验证整个链路是否在特定的时段内满足OTN标准规定的性能规范。测试应用提供必要的工具来支持并发的BER测试。用户可以定义要使用的图案和要考虑的误码率（图82），然后在要求的时段内评估BER。会提供一个易于配置的界面，以及一个最佳的测试通过/未通过状态图。该应用会不断监测流量，并在出现错误时，将结果与阈值进行比较。在测试期间，会评估组成测试配置的所有通道的性能。



图82. BER测试

服务中断时间

如上所述，OTN的最大优势之一是在出现故障时能够迅速、无缝地恢复过来。除了BER测试外，配备混合映射功能的多通道OTN测试应用包括一些特别功能，让用户可以测量服务中断时间（SDT）并验证网元能够多快地切换到保护通路上。

为了计算中断时间，应用会考虑特定故障、300 ms的无故障时间以及用户提供的SDT阈值（图83）。可以计算SDT测量持续时间，即从检测到第一个故障至最后一个故障结束的时间，不包括无故障时间。



图83. 用户提供的SDT阈值

我们假设故障类型被设定为AIS，而无故障时间被配置为300 ms。第一个AIS事件持续了20 ms，接下来出现了150 ms的无告警时间，然后又出现了一个持续45 ms的AIS故障。没有出现其它故障。由于无故障时间被设定为300 ms，所以150 ms的间隔不足让系统清除服务中断。因此，总SDT为215 ms（20 + 150 + 45 ms），出现了一次中断事件（图84）。

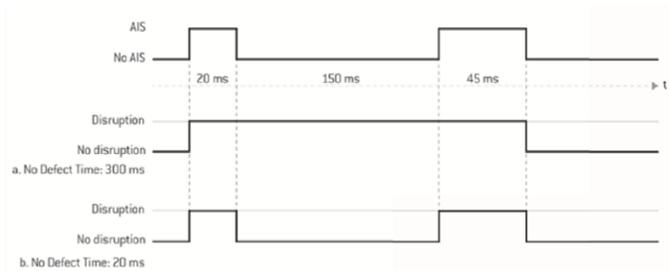


图84. SDT计算示例

如果用户要为SDT测量选择通过/未通过判定并将SDT阈值设置为50 ms，那么第一个场景会获得未通过判定，测得的SDT时间为215 ms。

通过采用这个测试应用来测试并验证各个通道，就可以在每个通道上轻松测量SDT，从而在开通或高级故障诊断期间检测有故障的通道。可以缩短整体测试时间，这是因为分别测试每个通道并提供个通道的统计数据。

监测、告警和错误

一旦配置完所有参数并启动测试后，人性化的多通道OTN应用图形界面使用户能够在经过优化的汇总页面上浏览OTN告警和错误。该功能会在一个页面上提供所有通道和层的情况，并显示DUT的响应（图85）。用户可以轻松验证DUT和测试设备之间的连接。

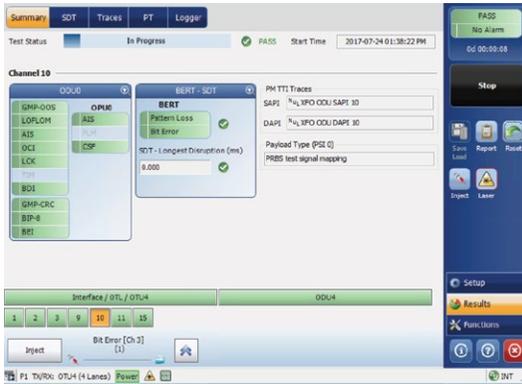


图85. OTN汇总页面

该界面提供一个简单、独特的监测系统，实时检测通道告警和错误，通过具体的颜色编码来显示测试配置中每个通道的状态（图86）。绿色表示没有通道错误，橙色表示通道被选中，黄色表示在测试开始后记录到一些告警或错误，红色信号表示在那个特定通道上目前有一个处于活跃状态的错误或告警。

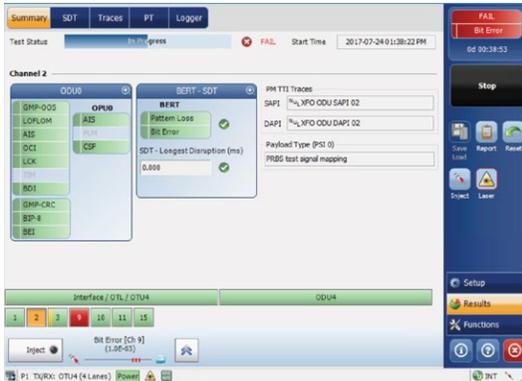
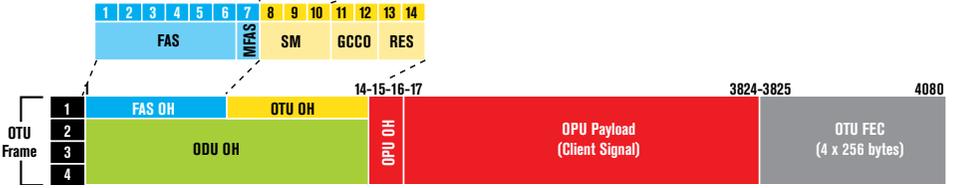


图86. 测试配置中每个通道的状态都采用颜色编码

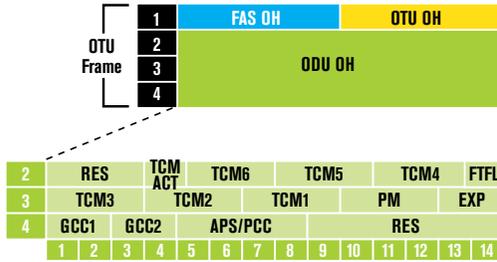
最后，要绝对确保DUT正确检测到被插入的告警和错误并作出正确的反应（如BIP-8、AIS），用户可以通过非常直观的方式插入这些告警和错误——在配置包括的一个特定通道或所有通道上只点击一个按钮。

2.16. 通用通信通道BERT测试

根据G.709协议的定义，通用通信通道0（GCC 0）是个两字节长的字段，它是OTU开销的组成部分，类似于SONET/SDH中的数据通信通道（DCC），目前还没有定义。然而，它将来可能会用于网络管理和控制面信号传输，比如传输G-MPLS协议信号。

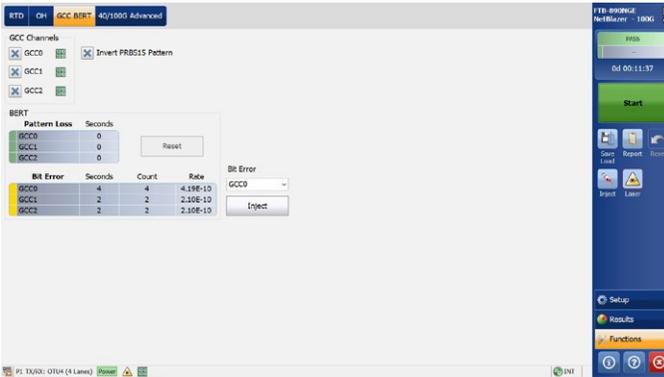


通用通信通道1和2（GCC1和GCC2）是ODUK开销里的两字节长的字段，它们与GCC0字段类似；GCC1位于ODU开销的第4行第1列和第2列，而GCC2位于第4行第3列和第4列。它们用于传输端到端客户端信息。



最近，GCC通道被用于不同的目的，包括同步和加密，因此它们的完整性是测试的首选。

GCC BERT测试提供了一种在这些字段上测量误码率的手段，提供包括等每个GCC通道上被检测出来的误码数和图案丢失在内的统计数据。



2.17. 实验室内的以太网测试：RFC 2544测试

全球各地的服务提供商都在竭力开通基于运营商以太网技术的新服务，藉此吸引高端用户的青睐。对高质量服务的诉求变得前所未有的重要，这使得在开通服务时立即展开全面的以太网测试，从而确保服务质量并提高客户满意度显得尤为关键。

客户服务等级协议（SLA）规定某些性能标准必须满足，而大多数记录网络可用性和平均修复时间等值都易于验证。然而，以太网性能标准更加难以证明，仅凭一个PING命令恐难准确地完成对性能可用性、传输时延、链路突发性和服务完整性的评判工作。

借助便携式RFC 2544测试设备，现场技术人员、安装人员和承包商将能够迅速抓取测试结果，证明以太网服务满足客户SLA要求。这些测试也可作为性能基准供将来参考之用。

什么是RFC 2544？

由互联网工程工作小组（IETF）标准机构制定的RFC 2544标准是一套实际存在的测试方法，大体上概括了测量和验证运营商以太网性能标准所需进行的测试。它提供了一种中断业务基准测试技术，通过测试吞吐量、背对背、丢帧和时延来评估网络设备的性能，每种测试会验证SLA的特定部分。此方法定义了帧尺寸、测试持续时间和测试迭代数量。一旦完成这些测试，就可提供被测以太网的性能状况。

RFC 2544测试

为确保以太网网络能够支持各种服务（例如VoIP、视频等），RFC 2544测试套装支持七种预定义的帧尺寸（64、128、256、512、1024、1280和1518字节）以模拟各种流量状况。小尺寸帧会增加传输帧的数量，这样就加大了网络设备的工作强度，因为它必须传输更多的帧。

吞吐量测试

吞吐量测试定义了每秒无错传输帧的最大数量。该测试用于测量运营商以太网服务中出现的以太网交换机的速率限制能力。此方法首先在最大帧速率时开始测试，然后比较发送和接收帧的数量。如果发生丢帧，则传输速率降低一倍，然后重新启动测试。如果此次测试过程中未发现丢帧，则传输速率增加与前次测试差值的一半。此方法称为二分/倍增法。这种测试错误的方法反复进行，直到找出无丢帧的速率。

每个帧尺寸都必须进行吞吐量测试。虽然期间传输帧的测试时间可以很短，但最终的验证时间必须至少为60秒。必须将每次吞吐量测试的结果都记录在报告中，以每秒帧数（f/s或fps）或每秒比特数（bit/s或bps）为测量单位。

背对背测试

背对背测试（也称为突发性或突发测试）用于评估交换机的缓冲能力，并测量在不出现丢帧的情况下能够以全线速接收到的最大帧数。在运营商以太网中，该测量非常有用，因为它会验证许多SLA中定义的超额信息速率（EIR）。突发背对背帧以最小帧间间隙在网络中传输。如果帧丢失，则突发长度缩短。如果接收到没有任何错误的帧，则突发长度将增加。测试时间必须至少为两秒，测试应当重复至少50次，对每个帧尺寸都应报告其平均记录值。在报告中应记录平均测量值。

丢帧测试

丢帧测试用于测量网络在过载条件下的反应——网络支持实时应用能力的指标，在实时应用中，大量丢帧会迅速降低服务质量。因为在实时应用中没有重发，如果不对丢帧加以控制，则这些服务很快就会变得无法使用。

此测试仪表以最大线速发送流量，然后测量网络是否丢帧。如果丢帧，则该值会被记录下来，并以较低速率重新启动测试（尽管推荐较小的百分比，但速率允许以10%的较大幅度降低）。该测试会一直重复进行，直到连续三个迭代都没有发生丢帧，此时将创建用于报告的结果图。结果以丢帧的百分比来表示；例如百分比表示提供负载（传输的帧数）和实际负载（接收的帧数）间的差异。同样，必须对所有的帧尺寸执行该测试。

延迟测试

延迟测试用于测量帧从起始设备通过网络传到目标设备所需的时间（也称作端到端测试）。该测试也可配置用于测量往返时间，即帧从起始设备传到目标设备，再回到起始设备所需的时间。

当不同帧的延迟时间存在差异时，会导致实时服务发生问题。例如，VoIP应用中的延迟差异会降低语音质量，在线路上会产生爆裂声/嘶啦声。长的延迟也会降低以太网的服务质量。在客户端——服务器应用中，可能会出现服务器超时或应用性能低下的情况。对VoIP来说，这会使通话产生长时延，导致“卫星电话般的感觉”。

该测试过程首先对每个帧尺寸进行测量并建立吞吐量基准，以确保帧在传输过程中不会被丢弃（也就是吞吐量测试）。这将填充所有设备的缓冲区，从而可测量最坏情况下的延迟。第二步是向测试仪表发送流量120秒。在传输的中点，必须使用时间戳对帧进行标记，当在测试仪表上收到该帧返回时，即可测量延迟。然后传输应继续到最终时间。必须对每个帧尺寸进行20次该测试，而且应当以平均值作为结果。

补充测试

尽管数据包抖动测试在RFC 2544标准中未定义，但它是另一个关键的以太网测试。之所以关键是因为过多的抖动会导致VoIP或流视频等实时应用出现重大故障。在VoIP应用中，过多抖动会导致中断。在视频应用中，会造成图像粗糙和马赛克。

如上面延迟测试中所述，帧延迟会随时间而变化。数据包到达时间的这种差异便称为数据包抖动。在传输开始时，所有帧的帧间间隙都是相同的。随着帧在网络中传播，经不同网络设备缓存或路由，帧间间隙开始发生变化。应在最大帧速率下测量数据包抖动，因为这时会出现变化。

实施RFC 2544测试：重点考虑

尽管RFC 2544对于评估互联网络设备的性能非常有效，但它最初是为建立单个网元的性能基准而开发的，当时没有考虑到时间敏感型测试场景。例如，对7种不同帧尺寸中的每一个重复执行20次延迟测试，则总共需执行140次测试，每次测试持续2分钟，则完成整个测试需要4.6小时！由于人工完成一系列的RFC 2544测试相当耗时，因此当今的测试解决方案需要具有一定程度的自动化，以便能够尽快有效地完成测试和开通以太网服务。

服务提供商通常在实验室中对网络和网元执行基准测试，然后根据这些信息来定制其现场开通和安装的RFC 2544测试进程。由于要测试的不同尺寸的帧的数量太大，因此他们中的一些会简化开通测试，仅测试极限情况；即64和1518字节帧（如果使用VLAN可能会更长）。有些可能会保留所有尺寸的帧，但决定只进行两个测试，如吞吐量 and 延迟测试。而其他的提供商会决定对测试次数和帧尺寸进行限制。无论如何，关键的是服务提供商需在将电路交付给客户之前进行全面的测试，因为这是他们最后一次能够完全评测电路而不影响用户服务的机会。

2.18. POTN设备以太网服务汇聚和交换功能

在POTN提供的服务中，其中很重要的一部分包括汇聚型以太网服务，比如集团客户专线、移动回传服务，或PON网络中的OLT上联承载。从测试接口上讲，包括GE/10GE至40GE/100GE汇聚测试功能，为了与现有PTN设备兼容，PONT应具备以太网和MPLS-TP交换功能。

集中交换式POTN设备由于分组交换的统计特性，需要对分组服务进行QoS分级。换言之，对需求高的服务被划分为保证服务流量（GST），以保证此类服务没有丢包。分组时延和分组时延变化（PDV）应具有电路交换特性，可以用于传输诸如同步信号、实时服务、大客户专线、移动回传等高优先级服务；将低优先级服务划分为统计复用（SM）类，采用尽力而为的策略。

下图为基于统计复用设备的结构示意图。左侧GST为保证信号（5个GE信号）。右下为SM统计复用类信号（1个10G信号），右上为增加了SM信号后的10G输出。

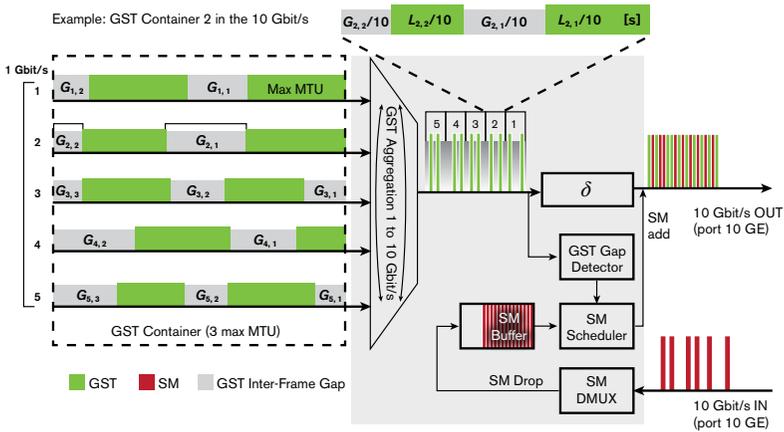


图87. 基于统计复用的原理图，左侧GST为保证信号。

实验验证（仪表）：EXFO提供的FTBx-88200NGE 100G Power Blazer多业务模块和LTB-8平台。

验证连接图：由4个100GE信号组成的400G线路的连接图。

测试方法：EXFO FTBx-88200NGE用来模拟多通道100G信号。该实例显示的是4个100GE信号连接到POTN NE1，由POTN NE1将这几个信号汇聚起来形成一个400G线路信号。然后，该400G信号会被POTN NE2解复用，实现端到端测试。可使用4个FTBx-88200NGE模块完成该验证，这些模块可支持CFP4或QSFP28 100G接口。还可以实现40G验证。用户可以使用带SFP+端口的FTBx-88200NGE模块来配置4个10GE信号，然后测试40G复用。

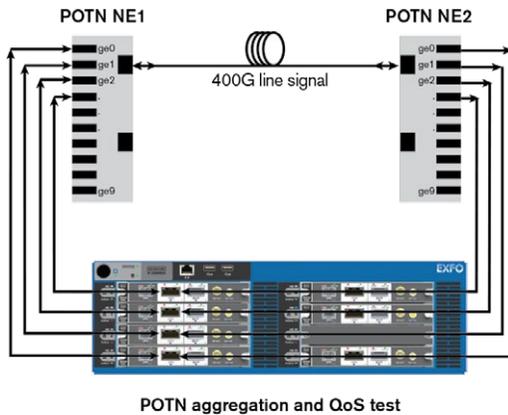


图88. 使用EXFO LTB-8和FTBx-88200NGE进行POTN汇聚和QoS测试。

2.19. Multilink

EXFO是通信业网络测试、数据和分析专家。在过去的30多年里，我们与客户通力协作，开发出多款创新的解决方案。Multilink是可以帮助客户应对下列实验室和测试环境相关挑战的工具。

环境噪声较大

使用多个实验室设备只会生成越来越多的热量。例如，高速光收发器，如CFP、CFP2和CFP4，需要温度非常稳定才能正常运行，且需要功率更大的风扇来降低实验室温度。这同样适用于很多其它网元。不幸的是，目前使用的制冷风扇容易产生噪声，干扰在同一区域的用户，从而人们难以在这种环境中工作。

空间

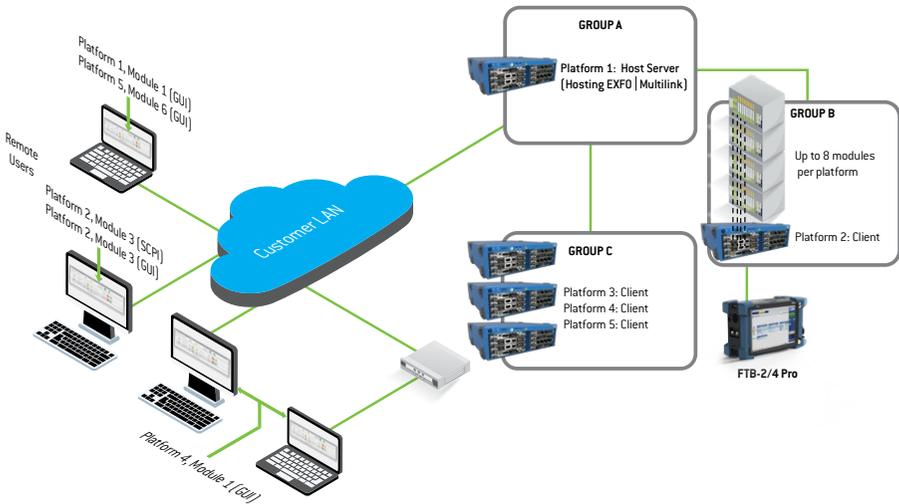
在实验室环境中提供充足的空间是一个重大挑战，因为必须在同一个地方测试不同的技术和设备。因此，没有多少余地能让用户移动或舒服地工作。

地方偏远

上市时间比以往更加重要，而网络设备制造商需要在不同的偏远地方有不同的团队从事同一个项目。快速的开发策略应该不影响到安全性，而来自全球不同地方的团队应该能够安全、高效地访问相同的测试环境。在从不同的偏远地方访问设备时，共享专有和机密信息不应造成任何风险。

缺少灵活性

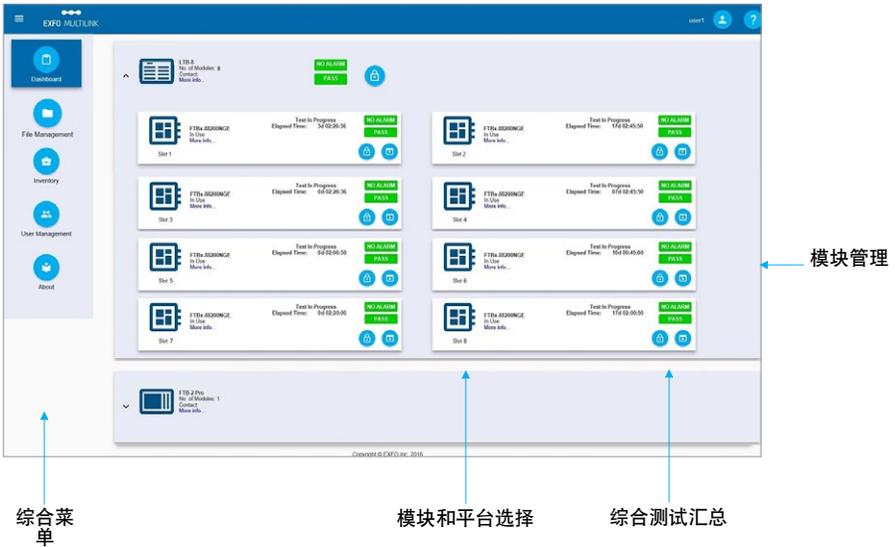
在很长一段时间里，必须在实验室环境中广泛地测试硬件设备。此外，很多用户和测试仪必须能够同时访问不同的平台和模块。确保能够安全地使用特定的板卡或测试设备成为一项复杂但又根本的管理任务。



什么是EXFO Multilink?

EXFO MultiLink是一个独特的实验室测试管理系统，它采用多用户界面，使用户能够从多个地方远程访问多个模块和多个平台（LTB-8/FTB-2 Pro/FTB-4 Pro）。它是唯一真正基于网络的接口，可实现安全的远程控制、自动化和平台管理。

- EXFO MultiLink可简化测试并提供非常重要的功能，从而成为非常强大的工具。
- 多用户/平台/模块：同一机构内的多个用户可使用相同的工具，安全、轻松地访问多个安装许多模块的平台，甚至从遥远的地方也是如此。
- 基于网络的安全界面：用户只需要访问网页，而不需要安装其它任何软件来使用EXFO MultiLink管理的所有平台和模块。
- 设备/模块管理：用户可以直接从同一个网页，访问EXFO MultiLink同时管理的所有硬件清单，包括关于此类硬件的详细信息。
- 文件管理：在不同用户可接触测试元素的实验室环境或大型网络中，报告和配置管理始终是一项重大挑战。该选项可提供一种集中的存储工具，用于上传和下载目前用户需要的各种报告和配置。
- 安全性：新的协作开发环境以及虚拟专网为远程控制应用带来了重大的安全性挑战。EXFO MultiLink包括对用户以及元素之间传输的信息进行加密的安全功能。
- 自动化：目前，在实验室、制造和开发环境中，速度和可重复性是非常关键的因素。EXFO MultiLink提供一个安全、高效、集中的接入点，用于向网络上的各个测试设备/模块发送自动化命令。



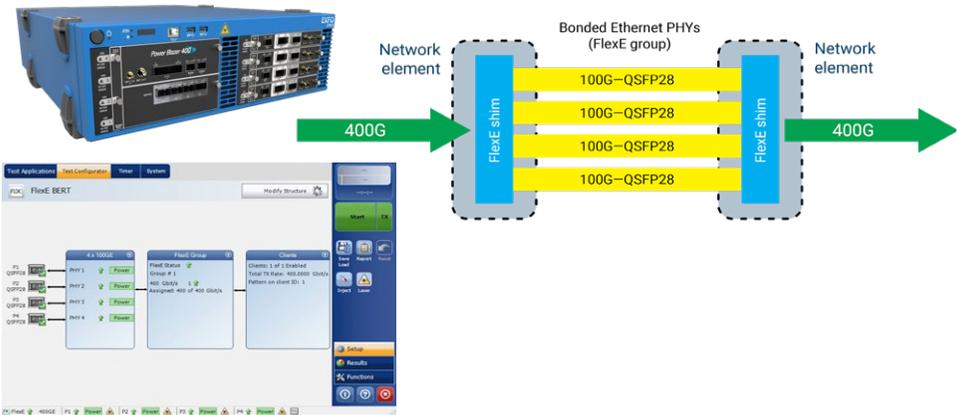
2.20. FlexE BERT

灵活以太网 (FlexE) 是400G生态系统的一个重要部分，不仅可以传输目前的速率，还可以符合未来的传输速率标准，使网络设备制造商、数据中心和服务提供商不管在何种接口可用的情况下，都能够传输流量。EXFO的FTBx-88400NGE Power Blazer 400G多业务测试仪结合我们的FlexE BERT应用，可生成各种FlexE客户端速率，从而真正测试这种技术的不同模式（绑定、子速率和通道化），使用高效、直观的GUI对它们进行配置。



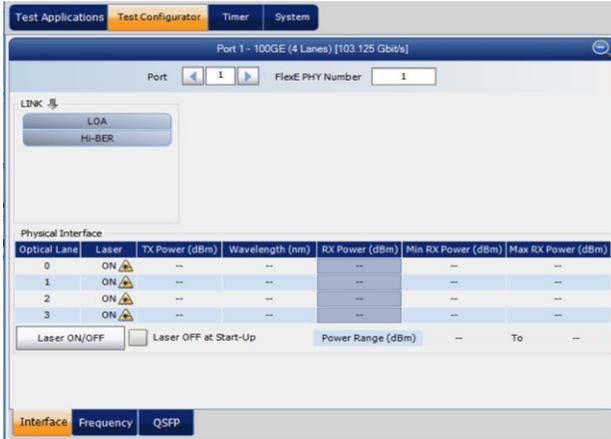
FlexE验证

为了正确地实施FlexE技术，用户必须验证网元处理和传输不同速率客户端信号的能力，包括流量统计、告警监测和错误插入功能。下图显示的是FTBx-88400NGE（测试设备）直接连接到FlexE网元（DUT）的测试场景。

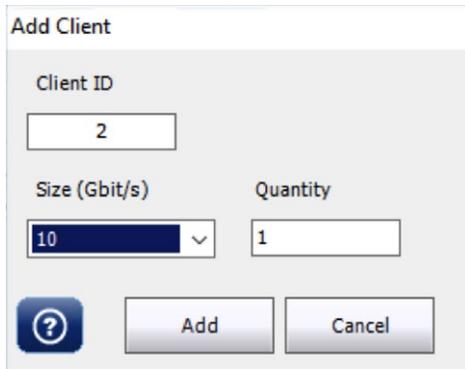


FlexE配置

FlexE实施协议包括使用不同的100G PHY来传输以太网信号。EXFO的FlexE BERT应用支持各种规格的100G PHY，这些PHY组成FlexE组，提供可插拔模块详情、FEC配置和各个通道的信息。这种FlexE技术的一大亮点是用户可以为组中的每个PHY配置一个特定的值。



客户端信号ID和组ID是FlexE配置中的重要元素。FlexE BERT应用的另一个重要特点是可以很容易地配置这些参数，从而为用户提供默认的值，还使用户能够指定一个值。



FlexE配置的另一个关键要素是日历表。它和FlexE Shim层相结合，为通过不同的物理接口传输以太网帧奠定基础。按照OIF协议，日历表包括20个5G时隙，以操作和配置被传输的流量。EXFO的FlexE BERT应用包括一个非常直观的GUI，通过它可以轻松地编辑、分配和取消时隙，从而对客户端信号进行个性化配置。这种配置的可扩展性非常高，可支持多种场景，包括混合搭配客户端信号速率、单个400G客户端信号、乃至40x10G客户端信号，从而支持所有的FlexE模式，如绑定、子速率和通道化。每个客户端信号都配有一个默认的MAC地址，但如果需要，用户可以分配特定的值。

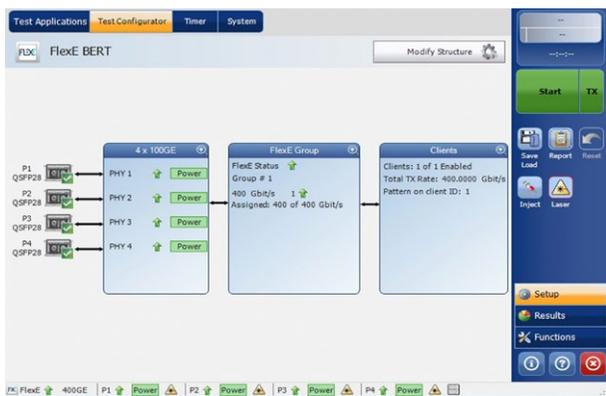
PHY 1 (Port 1)									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	4	U	U	U	U	U	U	U
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
U	U	U	2	2	2	2	2	2	2

PHY 2 (Port 2)									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2	2	2	U	3	3	3	3	3	3

PHY 3 (Port 3)									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

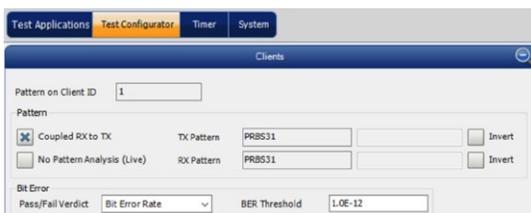
PHY 4 (Port 4)									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	3	3	3	U	U	U	U	U	U
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
U	U	U	U	U	U	4	4	4	4

配置完客户端信号后，FlexE BERT应用会显示每个客户端信号的状态，包括已用和未用的容量详情。



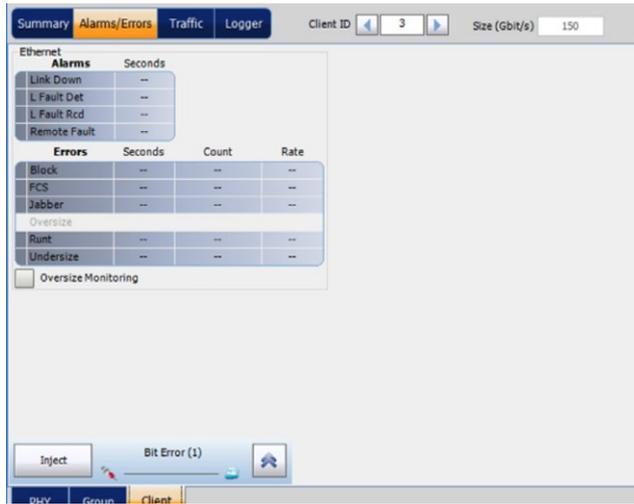
BER分析

在配置完网元和FTBx-88400NGE之间的客户端信号后，下一步就是通过误码率（BER）测试来验证链路。该测试使用户能够在特定的一段时间内，使用通过被测网元的特定比特图案，验证客户端信号的性能，然后在易于配置的界面内提供通过/未通过判定结果。



监测、告警和错误

在传输客户端信号流量后，接下来就是确认是否存在与该流量有关的告警。FlexE BERT应用包括一个窗口，通过非常人性化的图形界面显示每个客户端信号、组和PHY的详细信息，使用户能够高效地识别特定的告警和错误。在测试网元（DUT）时，需要考虑一个非常重要的因素，即它对特定脉冲的响应情况。FlexE BERT应用提供一种非常直观的方式，在包括物理接口、组和客户端信号的不同层次插入错误和告警，从而能够真正测试DUT的FlexE功能。



统计

还可以为每个客户端信号提供流量统计分析，包括利用率百分比、帧大小和类型相关信息。

The screenshot shows the 'Traffic' tab in the FlexE BERT application. It features a 'Client ID' field set to 1 and a 'Size (Gbit/s)' field set to 10. The main content is a table with the following data:

	Line Utilization (%)	Ethernet BW (Mbit/s)	Frame Rate (frame/s)	Frame Count
Total TX	--	--	--	--
Total RX	--	--	--	--

Frame Type	TX Count	RX Count	Frame Size	RX Count	%
Multicast	--	--	< 64	--	--
Broadcast	--	--	64	--	--
Unicast	--	--	65 - 127	--	--
Non-Unicast	--	--	128 - 255	--	--
Total	--	--	256 - 511	--	--
			512 - 1023	--	--
			1024 - 1518	--	--
			> 1518	--	--
Total	--	--	--	--	

3. 40G/100G调试和开通

线路侧

下文将详述不同的部署策略。在这个阶段，需要准备好板卡和系统，并在制造过程中全面测试。下一步是部署，其主要目的是确保所有部分都正常运行。

系统本身包括三个主要部分：发射器、链路和接收器。



图89. 网络的主要组成部分。

系统的性能高度依赖于DSP。每个供应商都会有自己特有的测试方法，因此确定实际需要的参数，以及在部署前或部署后是否应进行测试非常重要。这同样适用于发现并排除潜在问题。

3.1. 链路鉴定和非线性效应验证

除了标准的链路鉴定外，本文将不讨论双向光时域反射（OTDR）、光回损（ORL）、损耗和连接器检测等测试，因为它们与传输速度和调制格式无关。然而，以下两个测试对于准确地部署100G链路极为重要：CD和PMD。

色度色散（CD）

高质量的数字信号处理可以补偿大量的CD。因此，OIF建议（根据具体应用和距离）目标CD容限值为2000 ps/nm（短链路）到超过40000 ps/nm（超长链路）。

因此取决于DSP、光模块、本地振荡器的质量和其它变量，该标准的范围也非常广。虽然OIF为每个应用建议一定数量的补偿，如果能够凑合使用廉价设备，许多运营商就不会愿意部署成本最高的DSP。

因此，虽然理论上可补偿不限量的CD，但在很多情况下通过简单的CD测试便可以确定链路上剩余的CD量，从而优化补偿电子设备的采购。

测试条件

a. 绿地

在需要部署全新光纤的绿地部署中，通常只承载100 Gbit/s的相干信号。因此，可以知道CD，虽然精度不是很高。然而，知道光纤类型和长度可以进行准确的评估，从而非常容易了解各段的总CD，并选择合适的DSP技术。相应地，在大多数绿地应用中也不要要求进行CD测试。

b. 棕地

棕地安装包括在光纤上部署100G相干信号，这种光纤已部署但多半会承载非相干流量。这种非相干流量（多半为10G关键控-OOK）的传输距离通常为80 km至100 km，要求部署色散补偿模块（DCM）。虽然要求用于传统的OOK，但剩余的低CD可能在部署100G时成为导致交叉相位调制（XPM）的原因。

XPM是一种非线性效应（NLE），其中载波（波长）会对相邻波长造成不利影响。在OOK中，只对发射器的幅度进行了调制。



图90. OOK内的幅度调制。

由于功率密度的原因，随着功率进行传播（“1”被传输），介质（玻璃）会局部受热。虽然这种局部受热非常微小，但它仍会改变光纤的局部折射率（IOR）并沿着光纤传播，使得介质的IOR被调制。

因为OOK仅使用幅度信息来检测信号，该介质调制不会造成真正影响。但IOR直接影响传播的速度，进而影响被调制信号的相位（目前大多数高端CD分析仪使用相移检测来测量群时延差）。

在基于相干的传输中，即双偏振态相位调制（DP-QPSK），相位而不是幅度进行调制、编码，并用来获取信息（及其它变量，如偏振）：

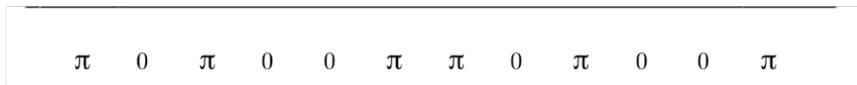


图91. QPSK内的相位调制。

相应地，OOK导致相位调整的影响仅局限在局部范围内，而相邻的传输进行相位编码。因此，这种相位调制会对相位编码产生影响，包括称为XPM的相位噪声。

如果存在较大的CD，这不会有任何问题，因为每个波长都以不同的速度进行传播，而OOK造成的介质调制不会与DP-QPSK进行时间同步（同相位），从而不会造成任何XPM。但如上所述，大多数棕地应用都进行了优化，造成的剩余CD非常低，从而使得这些系统非常容易受XPM影响。

此外，光纤越长，这种相互作用的持续时间越久，导致XPM更加明显。

有一种比较实用的方法可以绕过这个问题，即使用防护频带，如使OOK和DP-QPSK之间的几个通道空闲下来。

因此，在下面显示的传输方案中，增加一个采用不同调制的通道（由深蓝色通道表示）...

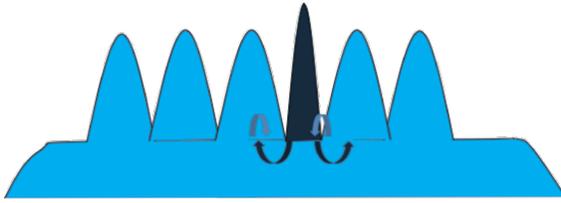


图92. 增加一个采用不同调制的通道可能会导致NLE。

...会要求去掉几个相邻通道，如下图所示：

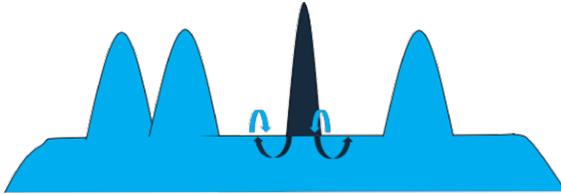


图93. 新通道任何一侧的防护频带。

虽然这样会起作用，但不是特别有效。例如，要增加一个100 Gbit/s通道，则需要去掉两个10 Gbit/s通道，这会导致只能将带宽增加80 Gbit/s。

XPM造成的噪声不是放大自发辐射（ASE）噪声，因此无法通过标准的光谱分析仪（OSA）进行检测。即使在存在BER时，OSA测试也可能会显示足够的OSNR。检测是否存在XPM的唯一方法是使用EXFO的WDM检测器，它会显示非线性解偏振线路上存在的任何XPM，如下图所示：



图94. WDM检测器内的非线性解偏振示例。

这个问题也在其它文献和实验室试验中进行了论述。事实上，ClariPhy就该问题曾发表过一篇文章，论述在不同通道间隔和FEC的情况下，OSNR和发射功率之间的关系。

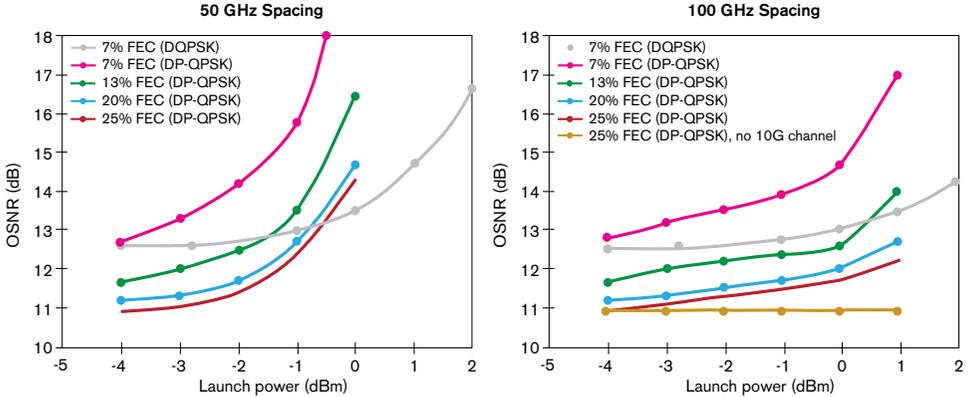


图95. OSNR和发射功率之间的关系。

随着功率增加和通道间隔减少，OSNR的要求也会增加。这是导致XPM的直接原因。

如先前所述，造成XPM的原因是传输介质出现局部升温。因此，功率越高，造成的XPM也自然越高，如上图所示。

然而，功率并非真正的限制因素。真正的问题是功率密度：相同的功率在较小的纤芯上造成的XPM会比在较大的纤芯上造成的XPM高。在商用光纤内，G.652色散位移光纤的纤芯较大，因此不容易受高功率密度的影响，但补偿的频率也更高。因此，基于G.652的网络的剩余CD通常较低。非零色散位移光纤（ITU-T G.655规定）的纤芯较小，但因为它的CD较低，因此没有经常被补偿。因此，剩余的CD可能略高，通过更高的功率密度来抵销。某些G.655光纤的有效面积积高于其它G.655光纤，因此，可能不太容易受到这个问题的影响。

相应地，在制定通道分配方案前，必须考虑光纤类型。在绿地应用中，这不会成为问题。在棕地环境中，经常不知道光纤类型。

了解未知光纤类型的最佳方法之一是测试CD，因为每种光纤都有自己的CD、CD系数和CD斜率特征。

光纤类型	缩写	λ_0	1550 ps/(nm*km)时的色散	1550 nm (ps/(nm*nm)*km)时的斜率
标准单模	SM	1300-1324	16至18 (典型值17)	≈ 0.056
LS	LS	≈ 1570	-3.5至0.1 (典型值-1.4)	≈ 0.07
色散位移	DS	≈ 1550	≈ 0	≈ 0.07
True-Wave Classic	TW C	≈ 1500	0.8至4.6 (典型值2)	≈ 0.06
True-Wave Plus	TW Plus	≈ 1530	1.3至5.8	
True-Wave Reduced Slope	TW RS	≈ 1460	2.6至6 (典型值4)	< 0.05 (典型值0.045)
E-LEAF	E-LEAF	≈ 1500	2至6 (典型值4)	≈ 0.08
Teralight	Teralight	≈ 1440	5.5至9.5 (典型值8)	≈ 0.058
True-Wave Reach	TW Reach	≈ 1405	5.5至8.9 (典型值7-8)	< 0.045

图96. 各种商用光纤的色度色散特征。

EXFO的FTB-5700等工具不仅可以测量长度和系数，还可以显示CD。因此，它们是在棕地应用中分配波长前进行光纤类型识别的理想工具。

一旦完成波长分配，WDM检测器（上图所示，是EXFO FTB-5240S-P OSA的可选功能）会显示任何剩余的XPM。

c. 网状网络

包括ROADM的城域网状网络增加了灵活性，优化了带宽，可更快地从灾难中恢复过来，并将来自不同发射器和系统的波长按照不同的路线传输。

在部署这些网络时（考虑到OOK），ROADM的每个插入端口都插入一个得到很好补偿的波长非常重要。在网络设计阶段，每个ROADM节点都配备了内部DCM，每个DCM都根据它们自己与前一个ROADM之间的光纤长度和类型进行了足够的补偿。

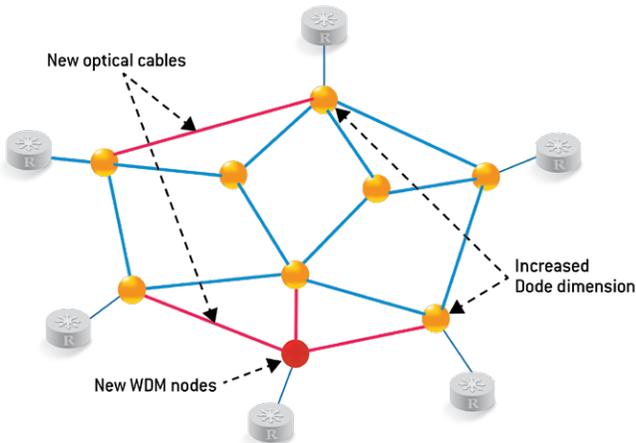


图97. 网状网络、各个短光纤段和长传输距离。

上文已经提到，距离越长，导致通道越长，在这些通道上OOK和DP-QPSK会相互作用，且距离越长会导致出现XMP的可能性越大。因此，很容易得出一个结论，即在如上所示的城域网环境中，各个链路段几乎不可能造成XPM，因为它们都比较短且得到全面补偿。从段至段的角度的角度来看的确如此；然而，数据从发射器经过很多段传输到接收器，从而延长了链路长度。

因此，逐段鉴定剩余色散和光纤类型是FTB-5700等设备可从这种网络获取的两类关键信息。

d. 拉曼网络

鉴于DP-QPSK和相干检测的主要不足之处是OSNR，需要通过在现有放大器上的低放大噪声来得出距离和放大幅度。这也需要分布增益来降低NLE风险。因此，在大多数相干系统（无论是绿地还是棕地）中，拉曼放大都很普遍。

虽然掺铒光纤放大器（EDFA）使用特制的掺铒光纤作为放大介质，但拉曼增益分布在整个传输光纤上。由于需要增益的地方大多是信号变弱之处（即不是直接位于EDFA之后），所以在后向启动拉曼泵浦，其光线在相反方向传播。拉曼泵浦处的增益较强，而拉曼泵浦的光线在接近EDFA时会变弱，几乎不会放大。

当然，和所有放大器一样，拉曼泵浦的功率也可以调整。在像图87中突出显示的反向传输方案中，假如没有饱和，增益（单位为dB）与拉曼泵浦的功率成比例。

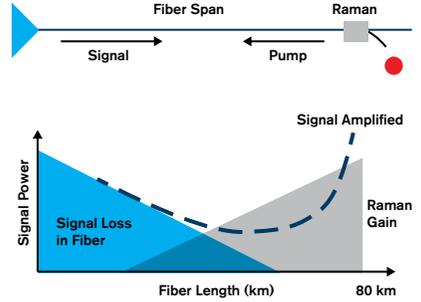


图98. 反向传输的拉曼放大。

但增益也与光纤的有效面积有关。所以，较小的纤芯会导致较高的功率密度，从而造成增益较高。

因此，在安装拉曼泵浦时识别光纤类型，确定其有效面积并相应调整是常见做法，如旁边的图所示。

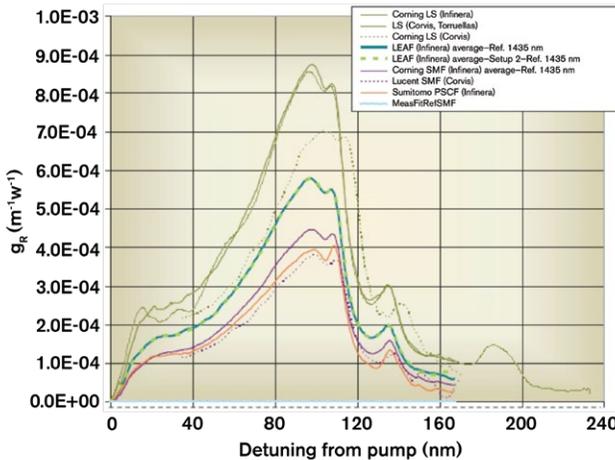


图99. 各种商用光纤的拉曼增益分布。

如上所示，正确调整拉曼增益以及合适增益的关键主要在于光纤类型，这是设计环节的要求（拉曼增益）。如上所述，这在绿地部署中通常不会成为问题，因为技术人员知道自己安装的光纤类型。然而，棕地系统包含多种旧光纤，它们由于各种并购多次转手，重新布线但没有正确记录，记录丢失或遗失。

现有的步骤可能包括在现场调整拉曼增益，并在接收端监测增益；然而，这需要花费时间、精力以及涉及多人的团队同步协作。通常情况下，拉曼脚本基于预计或假设的光纤类型。如果出现任何意外，如损耗高于预期或光纤类型识别有误，整个开通过程会关闭或重新配置。拉曼放大适用于长距离、多段系统。技术人员从第一段开始，然后进行下一段，直至最后一段，在这里发起返回信号。如果在拉曼增益调整（或假设光纤类型）时任何一段有误，这个链路都会出现故障。找出有问题的链路段可能是个重大挑战，可能会使得链路安装和调试耽误几天，并需要多次重返现场以便隔离问题。

如先前所述，CD测试可帮助我们很好地了解光纤类型。相应地，也推荐对100 Gbit/s相干传输进行CD测试。

可在100 Gbit/s系统内测试CD问题的工具包括：

- FTB-5800 CD分析仪，用于超长距离测试
- FTB-5700 CD分析仪，用于城域网链路、拉曼放大和光纤类别识别
- 带WDM检测器的FTB-5240S-P OSA，用于XPM和防护频带优化

偏振模色散 (PMD)

PMD值通常远远小于CD值。这就导致人们认为通过为很多CD提供强大的DSP补偿可以解决PMD问题，而在多数情况下也的确如此。

然而，“多数”情况并非意味着“始终”如此，这是由于PMD的本质原因：一般情况下比较稳定，但瞬时可能达到最大值。

因此，虽然大多数相干DSP会对平均PMD提供大量补偿（至于CD，容限值因DSP和光模块的质量有所不同），但较高的值会导致网络故障。

PMD是差分组时延 (DGD) 的平均值（或RMS）。这种随着时间发生的变化（波长）通常与麦克斯韦分布相对应，这意味着始终可能在每个给定的时间和波长，出现极高的瞬时DGD，或DGD会陡然变化。

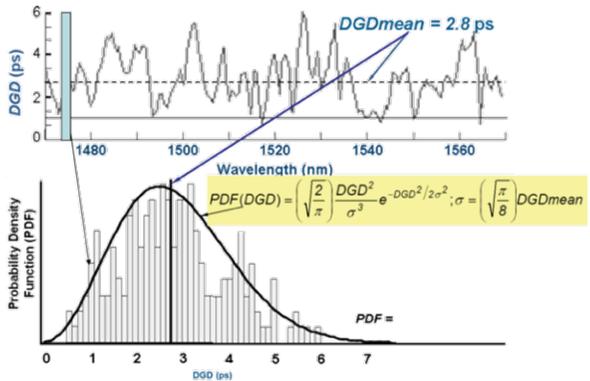


图 100. PMD和瞬时DGD之间的关系。

因为过度补偿可能会导致时延，和没有进行补偿时一样，所以会在接收器侧监测DGD对各个波长的影响，并进行补偿。这表示跟踪范围和传输/反应速度有一些局限性。

这基本意味着DGD上极高或迅速的局部变化可能导致DSP不能进行跟踪或补偿。系统（DSP算法）会试着查找并获得DGD信息，以便继续补偿，但在搜索时不会进行补偿，即使当瞬时DGD回落到补偿范围时也是如此。

相干系统内的PMD补偿也可以由于和偏振状态有关的原因失败。偏振是光线的一种特性，被定义为振动方向对于传播方向的不对称性。如果光线有一个经过定义、可重复的曲线来代表其偏振态（SOP），则100%地经过了偏振。偏振光可分成以下一种类型：线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光。庞加莱球用来描述传输波的偏振及其偏振变化。如图102所示，任何给定的偏振态都与庞加莱球上的一点相对应。和DGD一样，SOP在链路上也可能迅速改变，这意味着必须迅速、实时地跟踪SOP。

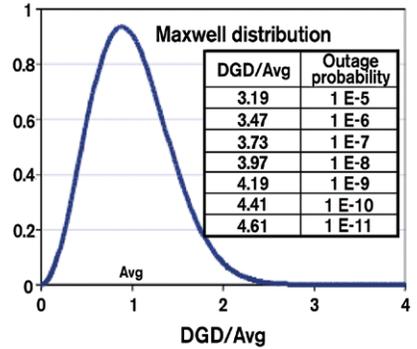


图 101. DGD和PMD麦克斯韦分布对比。

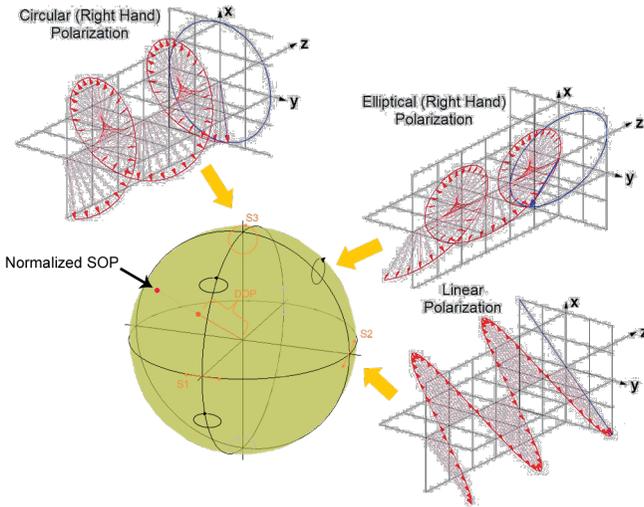


图 102. 显示不同SOP的庞加莱球。

总之，PMD补偿可能会由于下列原因而失败：

- SOP变化很快
- SOP骤升
- SOP正交性丢失
- PMD变化很快
- PMD骤升
- PMD值较大
- 存在PDL

任何原因都可能会造成以下影响：

- 误码突发，从而增加BER
- 跟踪丢失或恢复时间较长（最多持续30秒）

降低这些问题发生几率的最佳方法是使用PMD较低的光纤。因此，PMD测试对于100G系统的成功运行至关重要。

异常情况

当某段光纤出现高偏振扰频时，在PMD稍高的那一段光纤前会出现异常情况。下列原因可能会导致出现高偏振扰频：

- 架空光纤
- 桥下光纤
- 高速公路和铁路等沿线的地下光纤
- 任何可能导致光纤出现振动的情况

发生这种情况时，振动光纤导致的扰频会极大地影响进入高PMD光纤段的偏振状态。这可能会造成PMD陡然变化，在随机时间和波长上出现的DGD Max的值和频率高于预期。在这些情况下，上述的麦克斯韦分布不成立。应使用PMD分布分析仪等设备，在靠近振动的链路段仔细检测任何显示较高PMD（即使该PMD低于规定的100 Gbit/s容限）并包含振动段的链路。

因此，尽管供应商声称自己的产品能够具备极高的PMD容限，但测试PMD仍然是100 Gbit/s测试的必备部分。出于非常明显的原因，首选的是业内认可、适用于地下和架空光纤且可追溯到标准的方法。

此外，以下两种工具也可能有用。

1——EXFO的FTB-5600：如果检测到很高的PMD，且瞬时PMD可能太高，以至于影响QoS和SLA，EXFO独有的偏振OTDR——FTB-5600，用来在给定的链路上查找并替换PMD最高的链路段。这是最简单、最经济的PMD问题缓解方法。

2——EXFO的WDM检测器：如果同时测试了PMD、OSNR和CD，且PMD在认可的容限范围内，但某个或多个通道上不时出现较高的BER，DGD的局部突然增加可能是“罪魁祸首”。WDM检测器可作为EXFO OSA的选件，能够跟踪这个问题，从而成为不可或缺或100 Gbit/s故障诊断工具。显示各个通道的PMD脉冲展宽的结果，如下表所示。



图 103. WDM检测器内显示的PMD脉冲展宽示例。

可在100 Gbit/s系统内测试PMD问题的工具包括：

- FTB-5500B PMD分析仪，用于超长距离测试
- FTB-5700 PMD分析仪，用于城域网链路
- FTB-5600 P-OTDR，用于降低PMD
- 带WDM检测器的FTB-5240S-P OSA，用于故障诊断

3.2. OSNR测量和偏振相关OSNR验证

信噪比（SNR）是信号（有用信息）和背景噪声之间的比。OSNR可提供有关BER的间接信息，成为现有最有用的被测频谱参数，因此它在ITU-T G.692和G.959.1建议书中被列为接口参数。

OSNR的重要性已广为人知。OSNR可评估信号质量，同时显示所有波长的信号质量（而BER每次仅评估一个波长的信号质量）。在多数情况下，通过OSNR可以预测BER是否会通过或不通过测试，因此在调试期间进行OSNR测试对于正确开通、优化系统并节省时间极为重要。在故障诊断情况下，它是一种判断是否存在高噪声源及其原因的完美工具。

简而言之，OSNR更好会导致BER更低，进而导致服务质量（QoS）更高。因此，在最糟糕的情况下，低OSNR会成为传输失败的根源，但更多会导致传输出现差错、故障停机时间延长、重返现场次数增加、QoS降低以及SLA代价。

如上所述，现在的100G相干系统能够更好地承受物理损伤。如果发射器和接收器同步，传输应该不会出现任何差错。然而，公认的事实是导致发射器和接收器失去同步的“罪魁祸首”是OSNR，因此应该在部署任何相干系统前，进行OSNR测试。

除了上述几点外，OSNR和BER之间还存在着直接关系。然而，BER测试的时间（几小时甚至几天）要长于OSA测试（通常只需要几分钟）。

以下两个图表来自Fabio Moliner García发表的“光纤链路OSNR分析”（马德里自治大学，*Universidad Autónoma de Madrid*, 2009），清楚地显示了OSNR和BER之间的关系（每个曲线都特定于某个系统，取决于色散、调制格式、速率、通道数等；然而，在所有其它条件都相等的情况下，OSNR和BER之间的关系非常明显）。

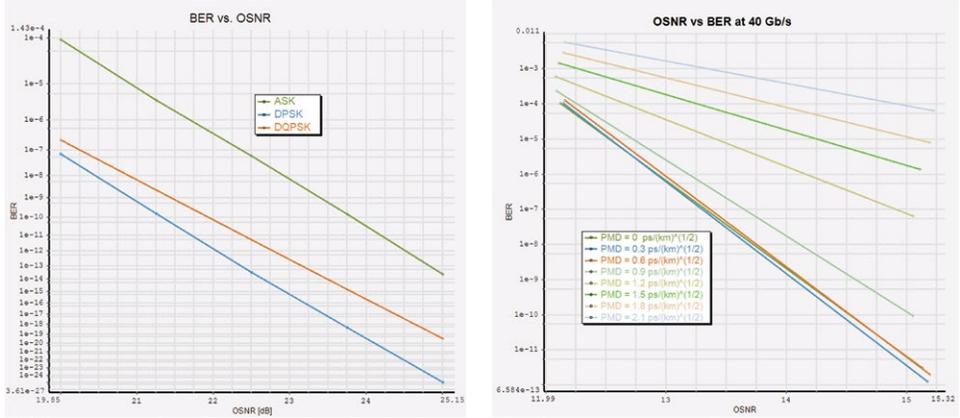


图 104. OSNR和BER之间的关系：OSNR更高意味着BER更低。

相干系统的规划用途不是城域或长距离应用，而是超过数百公里乃至数千公里的超长距离应用，这一点进一步凸显了OSNR在这些系统中的重要性。每个放大器，无论是EDFA还是拉曼放大器，都会增加噪声。此外，类似的发射功率会被分成两个相位和两个偏振，因此每个符号的功率为总功率的四分之一，或比非DP-QPSK系统低6 dB，这意味着对OSNR的要求使得它成为网络故障首要原因。

传统的OSNR定义

被称为插值法的传统OSNR测量方法要求在两个峰值之间中点处测量噪声水平，并进行线性插值。然后估算峰值下的噪声，并计算OSNR。

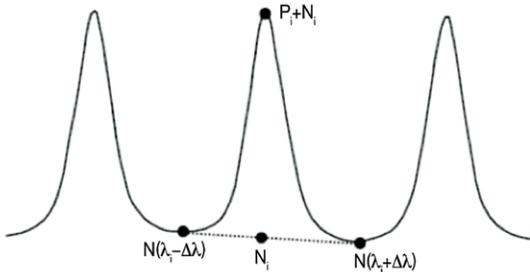


图 105. IEC 61280-2-9建议的OSNR测量方法。

对于所有通道，在第一个复用器的输出端（传输侧）测得的值应大于40 dB。链路上的光放大器会对这个值造成显著影响，取决于链路长度、级联EDFA数量和比特率，该值会在链路末端（接收器一侧）降低到15 dB至20 dB。

在非相干系统内，在没有ROADM时，目前使用插值法，且这种方法也被普遍认可。

上述的IEC方法假设噪声在通道间可见，且在整个频谱内非常平坦。这两种假设在大多数传统网络内都成立，但在下一代网络内则不成立。

在第一种情况下，如果在光通道内有ROADM等滤波器，它们不仅会过滤信号，也会过滤一些噪声。如右图第三个通道所示，峰值两侧的峰肩代表经过过滤的噪声。IEC OSNR方法会在红色箭头的位置测量噪声，而事实上在绿色箭头处发现了噪声。

相应地，在这种情况下，IEC方法会低估噪声，导致用户认为其OSNR比实际水平要好，从而造成非常危险的安全错觉。

在出现40G/100G时，会出现第二种情形。这些波长的谱形远大于10G波长的谱形（宽度通常是后者的2.5-4倍）。这使得光谱分析仪无法看到两个信号间的噪声水平。同样，在下面的例子中，红色箭头代表IEC方法会测量噪声的位置，而绿色箭头代表更可能的噪声水平。

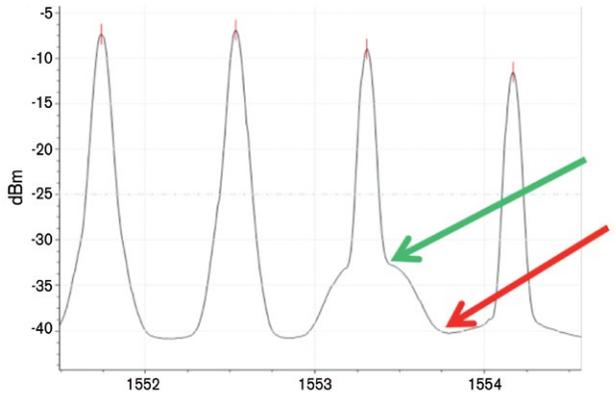


图 106. 带滤波器的通道的噪声水平。红色箭头：采用IEC方法测得的噪声水平。绿色箭头：真正的噪声水平。

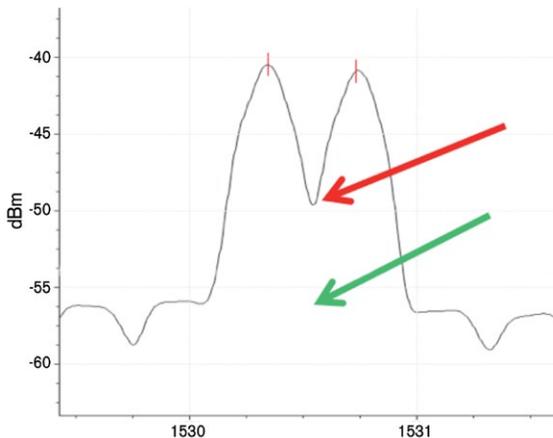


图 107. 40G通道的噪声水平。红色箭头：采用IEC方法测得的噪声水平。绿色箭头：真正的噪声水平。

与先前带滤波器的情况相比，在这个示例中，IEC方法高估了噪声，导致用户认为OSNR比实际情况更严重，从而造成代价不菲的错误问题。

下图显示的是真正的传输线路，它分为三个部分，突出显示先前讨论过的详情。

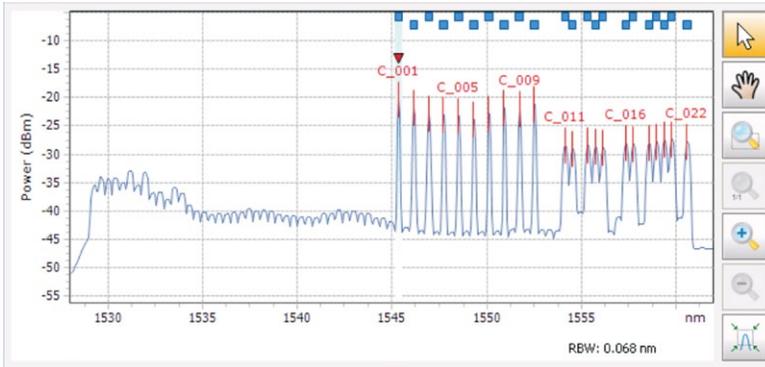


图 108. 带ROADM的10G通道和40G通道频谱。

在上图左侧的第一部分（即从1527 nm到1545 nm）代表ASE噪声。通常情况下，ASE噪声比较平坦、一致。图中的示例经过了一定数量的ROADM，因此可以观察到不同剩余滤波器的形状。这证明在此类系统中，IEC OSNR测量方法的一个假设——噪声非常平坦且一致——是错误的。

第二部分（即从1545 nm到1553 nm）显示了ROADM网状网络中比较窄的10G传输，会导致一种不真实的安全感。该示例清楚显示出IEC方法可测量出来的噪声水平，以及通道上出现的真实噪声。在这个案例中，误差约为3 dB，这在很多情况下会造成系统验收通过或失败的天壤之别。虽然所有的参数看起来似乎都没有问题，但该系统还是可能会出现BER。

最后，根据第三部分（即从1553 nm到1562 nm）中显示的信息，用户如果使用基于IEC的传统OSA，发现的问题可能不精确，如突出显示的不同噪声水平所示。网络管理人员可能会花费数小时，试图从网络的角度来了解为什么OSNR如此低，而事实上可以刚刚好。因此，测试方法可能导致单个链路包含的波长被高估或低估。

值得一提的是，大多数供应商管理系统（VMS）都使用该OSNR定义来计算OSNR、平衡并努力优化系统，而这可能会造成代价很高的重大错误。

下一代OSNR定义

在上述的那些案例中，必须开发新的测试方法，并确定新的定义标准。IEC/TR 61282-12是一份技术报告，题为“光纤通信系统设计指南——第12部分：带内光信噪比（OSNR）”，对带内噪声的定义进行了探讨。

该文件旨在定义下一代网络中的OSNR。该标准建议按照以下所述，对特定带宽上的本地OSNR进行积分计算：

$$\text{OSNR} = 10 \log(R) \quad R = \frac{1}{B_r} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{s(\lambda)}{\rho(\lambda)} d\lambda$$

- $s(\lambda)$ ：信号的时间平均功率谱密度，不包括ASE，其单位为W/nm
- $\rho(\lambda)$ ：ASE的功率谱密度，不受偏振影响，其单位为W/nm
- B_r ：参考带宽，其单位为nm（通常为0.1 nm）
- λ_1 to λ_2 ：信号频谱范围

图98显示的是如何进行计算。

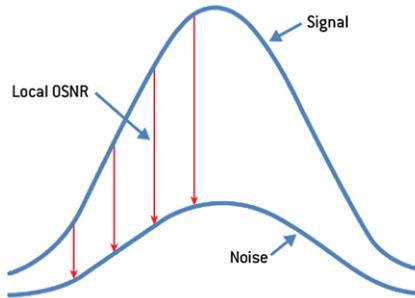


图109. IEC 61282-12标准的OSNR定义。

如上所述，OSNR过去一直都仅基于来自ASE的噪声。但这样只测量OSNR会导致严重的误差。例如，提高功率来增加基于ASE的OSNR可能会导致BER更糟。

下图显示的是，一旦OSNR到达一定水平（本例中为21 dB至22 dB），频谱效率会再次开始下降，从而造成更多的BER。

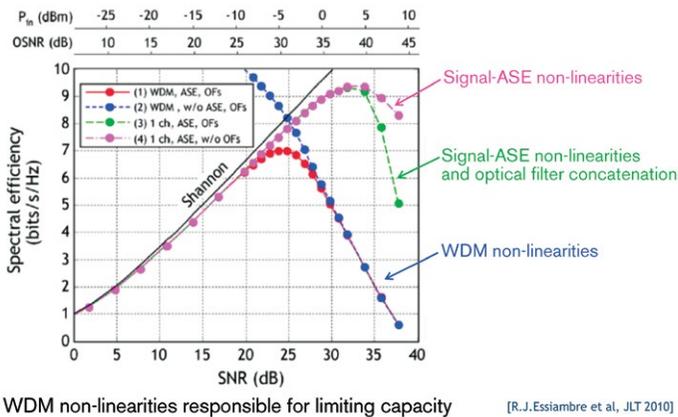


图110. 随着功率的变化，非线性效应对频谱效率的影响。

图110（上图）中的粉线代表纯ASE非线性曲线。蓝线代表WDM非线性，而绿线代表单个ASE加上光过滤。红线代表结合ASE噪声和非线性损伤不同后果的曲线。

如图所示，在这一点，传输质量可能受非线性的限制。因此，如果BER不够，就很难判断导致损伤的原因是ASE噪声还是非线性。大多数光谱分析仪都仅仅根据ASE噪声来测量OSNR，这也是实际定义的一部分，但没有考虑到非线性噪声和OSNR。

如色度色散一节所述，现在可使用WDM检测器仪表盘来监测NLE，而OSA测试可直接测量ASE噪声，不受其它噪声源的影响。此外，噪声被定义以下两个方面（在可以辨别出来并独立测量时）：ASE噪声和扩展噪声（考虑到ASE和非线性噪声）。应根据扩展噪声和扩展OSNR来估计BER。

这就是说，我们始终建议采用最后的接收器BER测试。



图 111. WDM检测器读数显示非线性解偏振导致更多噪声 (OSNR_e)。

Pol-Mux OSNR定义

对于一些40G系统和大多数100G系统，使用偏振复用。接下来，看看IEC方法或带内方法是否适用于这两种Pol-Mux信号。如图100和图101所示，IEC方法不适用于Pol-Mux信号，因为它不考虑ROADM的影响（即噪声被过滤），且因为Pol-Mux信号谱宽较大，使得无法在它们中间测量噪声水平。

接下来，看看带内OSNR方法是否适用于Pol-Mux信号。如图112所示，带内OSA测量的基本设置包括使用偏振射束分裂器和它前面的偏振控制器。如果是非Pol-Mux信号，由于信号被偏振而噪声未偏振，调整偏振控制器会改变分配给两个支路，即SOP1和SOP2的信号比。可根据1个或2个支路内的OSA曲线，采用复杂的算法计算出带内OSNR。

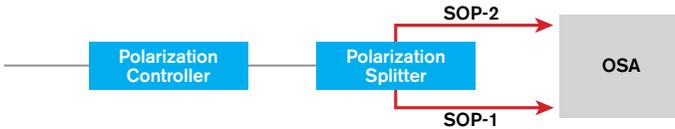


图 112. 带内OSNR设置。

对于Pol-Mux信号，偏振归零等带内方法或EXFO的WDM感知技术不再适用，原因是由于信号包括两个正交偏振，所以看起来未被偏振，这一点也得到了ITU-T G.697建议书的确认。因此，IEC和带内方法都不适用于测量40G/100G Pol-Mux信号的OSNR，所以需要另一种方法，这种方法称为Pol-Mux OSNR。

目前有两个标准适用于Pol-Mux OSNR测量：前面提到的IEC-61282-12标准和中国通信标准化协会（CCSA）的YD/T 2147-2010标准。

CCSA YD/T 2147-2010标准建议采用以下公式计算偏振OSNR：

$$Pol\ Mux\ OSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P-N}{n/2} \right)$$

其中，对于50 GHz通道：

P = 0.4 nm通道带宽上的综合功率（信号 + 噪声）

N = 0.4 nm带宽上的综合功率（噪声）

n = 0.2 nm通道带宽内的综合功率（噪声），然后归一化到0.1 nm

简单地说，这两种标准都采用关闭通道的方法，即首先测量通道打开时的信号与噪声功率之和，然后再测量通道关闭时的噪声功率。

EXFO的Pol-Mux OSNR测量工具被称为调试助手，是一个可安装在FTBx-5245/5255 OSA上的软件选件，符合IEC 61282-12标准和CCSA标准。

要使用调试助手，用户必须首先打开所有通道在接收器进行测量（如图113所示），然后每次关闭一个通道进行测量并获取一系列曲线（如图114所示）。因此，调试助手总共需要m+1条曲线，其中m代表通道数。接下来，调试助手通过易用的向导进行Pol-Mux OSNR计算。

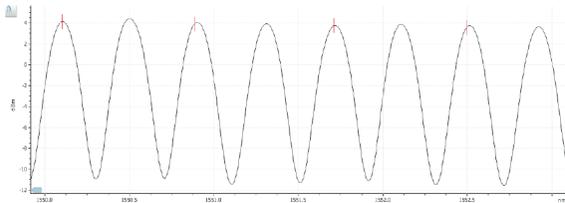


图 113. 所有通道打开时的曲线，可用于通过调试助手来计算Pol-Mux OSNR。

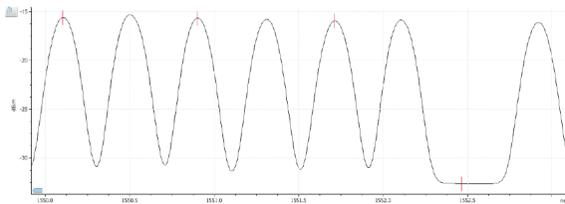


图 114. 第7个通道关闭时的曲线，可用于通过调试助手来计算Pol-Mux OSNR。

虽然理论上，在获得所有 $m+1$ 条曲线后，用户可以通过OSA标识进行人工测量，然后计算Pol-Mux OSNR值，但这会是个冗长的过程。事实上，调试助手可以节约时间并减少因人工计算导致的人为失误。

服务中Pol-Mux OSNR

虽然调试助手特别适用于在开通阶段测量40G/100G+信号的OSNR，但它不适用于在线网络测量，因为它需要关闭通道。因此，需要服务中Pol-Mux OSNR。EXFO开发出了一种非介入式、基于参考的方法，它详细比较参考测量结果曲线和主动测量结果曲线（关注信号）的频谱。参考测量结果曲线可能是不久前和/或在另一个地点通过传输系统里的可用监测端口获得。参考包括两个元素：频谱和要分析的通道的Pol-Mux OSNR值。这些Pol-Mux OSNR值可能包括在OSA文件（如通过调试助手获得）中，也可能来自另一个地方并手动输入到OSA文件中。

图115-117显示的是最常见的参考和主动测量结果曲线组合。图115显示了在时间 t_0 （通常在开通阶段）获取的参考曲线，以及在晚些时候（ t ），比如6个月后获取的主动测量结果曲线。而图116显示的是大致在相同的时间（ t ）获取的参考和主动测量结果曲线，其中参考Pol-Mux OSNR值为已知。图117显示的情况在不知道网络初始信息时非常有用。在这种情况下，可以假设在发射器发射端口处获得的参考值没有噪声，因为几乎所有的噪声都来自信号还没有经过的光学放大器。此时，可手动输入OSNR值，在参考曲线中有35或40 dB。

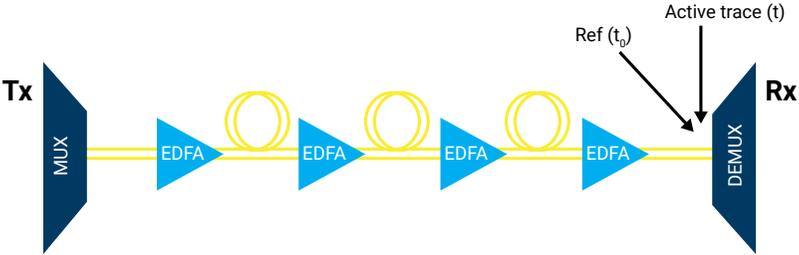


图 115.

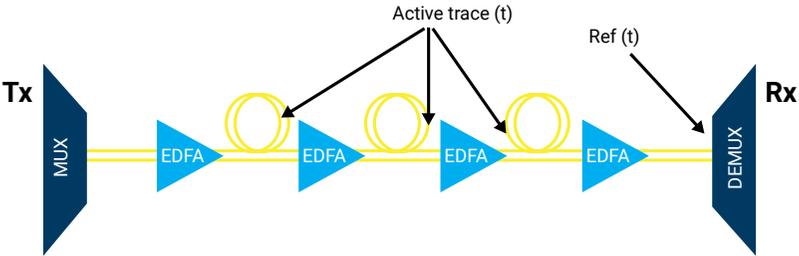


图 116.

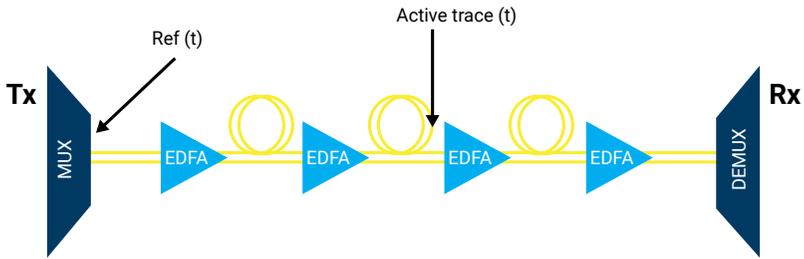


图 117.

基本的测量原理是将包括信号和噪声的主动测量结果曲线减去无噪声参考值，以便获得噪声水平（图 118）。

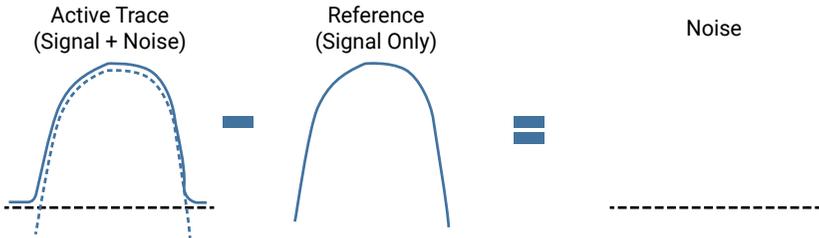


图 118. 基于参考的噪声测量

总体而言，当主动测量和参考曲线的功率不同时，需要将它们标准化。

无噪声的参考值只能在发射器处获得。然而，我们可以在任何地方计算出无噪声的参考值，只要我们知道这个地方的OSNR或噪声水平。为此：

- 第一步包括根据OSNR值计算参考噪声值。
- 第二步包括将参考频谱减去参考噪声值。
- 然后获得无噪声的参考值（图 119）

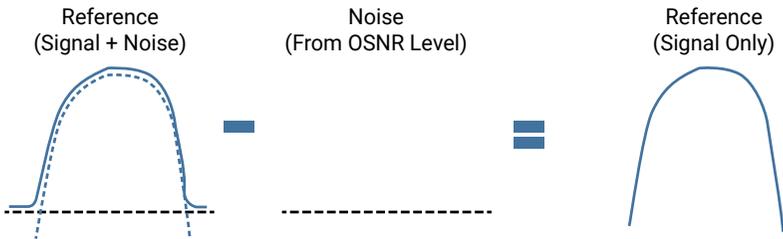


图 119. 计算无噪声的参考值

所有这些步骤都采用EXFO OSA里的人性化向导——服务中Pol-Mux助手——进行。

3.3. 使用接收器提供的信息进行BER测试

在接收点测量 EVM_{rms} 与在传统系统上测量Q非常类似。然后，可以在接收器处将 EVM_{rms} 同FEC前的BER直接联系起来。如欲了解 EVM_{rms} 和接收器验证详情，敬请阅读第2.1.3节和第2.2节。

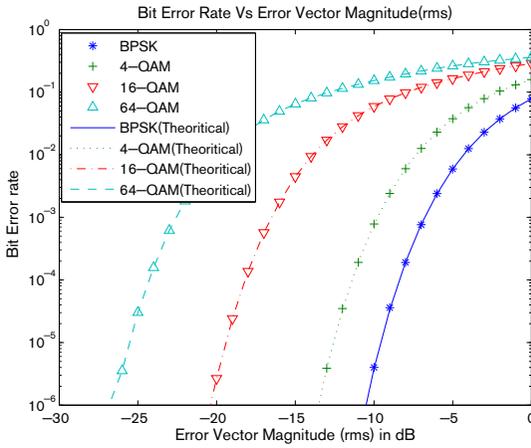


图 120. 不同调制格式下的BER和EVM对比。

3.4. 检测光纤和连接器

检测和清洁光纤连接器端面。

NTT的一项调查结果显示，光网络70%以上的故障由光纤端面检测引起。光纤连接器端面不清洁或者损坏，将造成插损增大、回损增大，极端情况下甚至会烧毁连接器。

高插损（IL）的影响

与1G/10G以太网相比，40G/100G以太网总通道插损被降低到1.9 dB（100 m OM3）（50/125 μm多模光纤），或1.5 dB（150 m OM4）（40GBASE-SR4或100GBASE-SR10）。因而，150米长、包括多个连接器接口和高带宽OM4光纤的通道的最大连接器损耗不得超过1.0 dB。所以，在数据中心中，可能无法升级至更高速率（如40G/100G），因为IL容限更加严格。

	IEEE	名称	Mbit/s	光纤类型	光纤数量	最大链路长度 (m)	最大通道插损 (dB)
10G以太网	802.3ae	10GBASE-SR4	10 000	OM3	2	300	2.6
40G以太网	P802.3ba	40GBASE-SR4	40 000	OM3	8	100	1.9
				OM4		150	1.5
100G以太网	P802.3ba	100GBASE-SR10	10 000	OM3	20	100	1.9
				OM4		150	1.5

高ORL的影响

每个系统都有自己的最大ORL，而清洁的连接器对此至关重要。ORL极其有害的地方包括高速相干传输（40G和100G传输系统）。在大多数此类部署中，无论是绿地还是棕地，需要低损耗放大来优化传输距离。这意味着要部署不同的掺铒光纤放大器（EDFA）以及近来出现的拉曼放大器。拉曼放大是一种低噪声放大，它将光纤作为放大介质。拉曼放大器可以轻松添加到任何已有的基础设施中，基本上不需要多少工程，但由于光纤本身就是放大器，因此在光纤中传输的每条光纤都被放大（即信号和不需要的反射）。所以，必须在每个采用拉曼放大的系统中，将反射率控制到最低水平。

所有这些最终体现在网络质量上，就是误码增加甚至服务中断。因此光纤端面的检测与清洁对于光网络至关重要。常见的光纤端面检测设备包括光纤显微镜和光纤端面检测器。然而，光纤显微镜由于操作不便且带有一定安全风险（有可能肉眼直接观察有光的光纤导致眼睛损伤），已经被淘汰。因此，光纤端面检测器是目前市场上的主流产品。



图 121. 光纤端面检测探头。

在检测光纤端面的时候，可能遭遇两种问题：端面损坏或者端面污染。

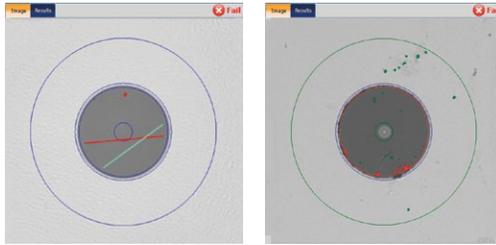
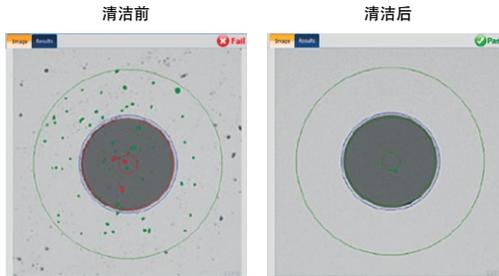


图122.端面有划痕（左）和包层破裂（右）。

端面划痕和破裂无法通过清洁的方法来修复。如果严重，需要更换连接器。我们通常通过清洁的方式来进行去除污染，清洁分为干擦和湿擦两种方式。

混合法清洁结合干法清洁和湿法清洁。第一步是使用溶剂清洁连接器端面，然后依据清洁的连接器的不同类型用拭纸或棉签将任何残留的溶剂擦干。在实际操作中，我们推荐 ICIC (Inspection Clean Inspection Clean) 方法。下一页上的图是清洁前后的光纤端面的比较。在光纤端面检测中，相关的国际标准（如IEC和IPC）都有着非常详细的标准要求，同时运营商也可以根据各自的情况，定义自己的光纤端面检测标准。



需要指出的是目前的CFP模块的40GBASE-SR4采用的是多模光纤MPO/MTP接口。MPO接口有12条纤芯，其中的8条纤芯（最外侧各4条纤芯）用于以太网信号的收发。MPO/MTP连接器如右侧第一个图所示。

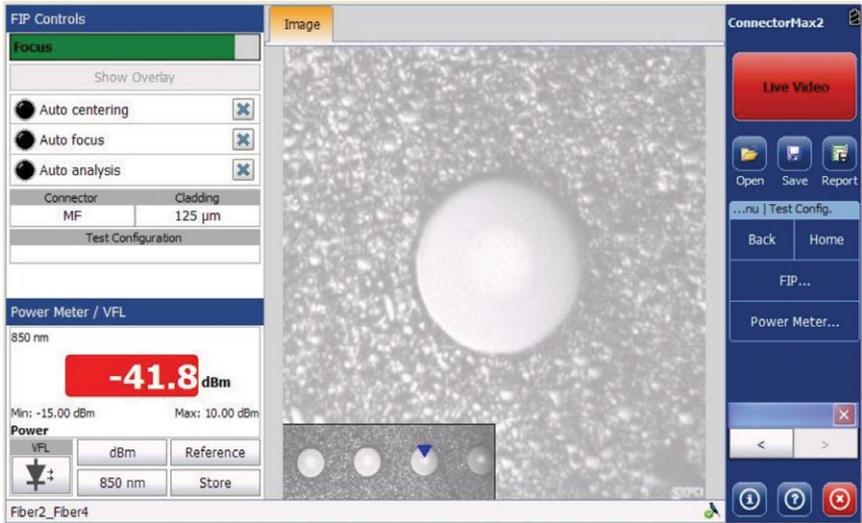


100GBASE-SR10采用24芯多模MPO/MTP接口，其中的20芯光纤用于以太网信号的收发和传输。24芯MPO/MTP连接器如右侧第二个图所示。



EXFO的光纤检测解决方案

EXFO是业内首个提供全自动光纤端面检测和测试设备的公司。我们的光纤端面检测器（FIP）系列产品提供全自动光纤对中、自动对焦、自动抓取光纤端面图像以及根据相关标准自动判断通过/未通过的功能。特别是它的多纤芯光纤功能可用于检测40G/100G多纤芯MPO/MTP连接器。测试界面如下所示：



3.5. 故障分段和CFP性能验证

内部环回

FTB-88100NGE现场测试仪支持内部环回功能，因而能够随时隔离测试设备，以确保工作正常无误，然后测试光链路上的下一个元器件。在确认FTB-88100NGE运行正常无误之后，用光纤连接40G/100G CFP收发接口作光口环回，以识别有故障的CFP并在需要时予以更换。在这种情况下，可以进行确认以确保CFP环回配置也运行正常无误。下一步包括检测40G/100G NE或路由器，以及可插拔的CFP模块等。

每光通道激光控制和发射/接收功率测量

与传统的2.5G和10G网络中所用的单波长收发器不同的是，必须监测每个CFP并行光通道的发射和接收功率水平。虽然全部通道（4或10个）的总功率可能在可接受的范围内，但这可能是因为某个通道功率非常低，这会影响光通道的传输和性能，而通道上的功率太高也会损坏另一端的光接收器。FTB-88100NGE、FTBx-88200NGE和FTB-890/890NGE可以支持每个光通道的发射/接收功率测试。

每通道频率和频率偏移测量

FTB-88100NGE、FTBx-88200NGE和FTB-890/890NGE等现场测试仪支持各通道频率、频率偏移以及最大正负偏移（ppm）测量，以确保网络时钟和计时恢复正确无误。

CFP/CFP2/CFP4/QSFP信息页面提供插入的CFP/CFP2/CFP4/QSFP模块ID、厂商名称、支持速率、固件和硬件版本，以及其它详细信息。因此，不再需要将CFP/CFP2/CFP4/QSFP拆下便可读取CFP模块详情。这些信息可帮助找出来自相同或不同供应商的两个收发器之间的互通性问题。此外，可在FTB-88100NGE、FTBx-88200NGE或FTB-890/890NGE生成的测试报告中获取所有这些信息。在一天进行多项任务时，可以根据服务及其速率来使用不同类型的收发器。

用户定义的偏差阈值和超额偏差监测

40G/100G实施带来了挑战，由于数据在多个通道上的分布，可能造成到达时间出现不同的时延，这被称为偏差。虽然这种效应造成在现场部署设备前，需要在实验室内测试各个概念，如PCS通道、PCS偏差及定位标记（这并非标准的调试和开通做法），但EXFO的FTB-88100NGE、FTBx-88200NGE和FTB-890/890NGE可灵活配置偏差告警阈值并监测每通道超额偏差，这是其标准的BERT和RFC 2544测试应用的一部分。高级测试功能显示被归在告警功能项下，与默认的简化测试结果页面截然不同。

CFP MDIO读/写和高级CFP故障诊断

EXFO FTB-88100NGE、FTBx-88200NGE和FTB-890/890NGE现场测试仪的用户界面可提供验证和操作CFP电气引脚所需的访问功能，以及全面的管理数据输入/输出（MDIO）读/写访问功能，使用户能够读取CFP温度、启用高级的CFP功能，甚至是将CFP设置为故障诊断模式。

此外，与EXFO的简化测试方法相一致，高级CFP/CFP2/CFP4/QSFP测试功能（包括MDIO/i2C读写以及其它功能）在GUI中被归到“功能”项下，与默认设置和结果页面分开。“功能”项可提供中级技术人员进行高级现场故障诊断所需的各种40G/100G测试功能，因此不需要另一台测试仪表。

每通道BER测试和高级CFP故障诊断

EXFO的FTB-88100NGE、FTBx-88200NGE和FTB-890/890NGE现场测试仪具备每通道BER测试功能，可通过特定的PRBS图案（PRBS 9-PRBS 31）来测试串扰。这个重要的测试能够验证任何在CFP中可能造成误码的信号完整性问题。

3.6. 收发器测试

智能可插拔光模块测试应用程序 iOptics 设计成为在现场和实验室环境中，评估网元内所安装的收发器的首选工具，还可以验证光设备的运行是否正常。

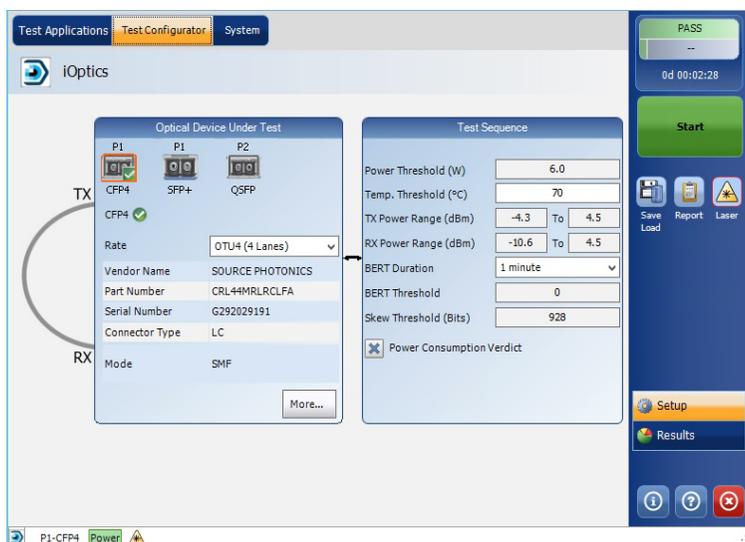
它只需要非常少的人工配置，便可以迅速验证光设备的状况，它包括一系列的基本子测试，参数和阈值可自动设置，也可以由用户配置。

它支持各种一系列光模块：QSFP28、QSFP+、CFP、CFP2、CFP4、CFP8、XFP、SFP+、SFP。

按照以下顺序进行自动测试：

1. 功率监测
2. 快速检查（MDIO/I2C、通用状态/控制引脚）
3. 温度监测
4. 光发射功率范围测试（对于多通道设备，每个通道分别测试）
5. 光接收信号状态和功率范围测试（对于多通道设备，每个通道分别测试）
6. 压力BERT
7. 成帧的超额偏差测试（仅适用于40G/100G设备）

欲知该设备的详情，请参阅第2.3节。



3.7. 连续性测试

OTN支持多种跟踪消息，包括光通道数据单元（ODU）、通道监测（PM）、路径跟踪标识（TTI）、光通道传输单元（OTU）、段监测（SM）TTI以及六个串联连接监测（TCMi）TTI跟踪消息。调试新OTN链路时，跟踪消息通常用于监测连接建立过程中终端之间连接路由的完整性。此外，当连接处于激活状态时，需要TTI消息来确保维持连接。OTN的TTI消息包含与网络有关的信息，其采用源接入点标识（SAPI）和目标接入点标识（DAPI）的形式。通常，当发现TTI中的接收SAPI和/或DAPI值与预先提供的预期值不匹配时，会生成跟踪标识失配（TIM）告警。利用测试模块的TTI测试功能，用户便可以在SM、PM或TCM TTI中提供SAPI、DAPI和特定于运营商的信息字段，并验证这些字段在整个网络中是否正确发送。这些模块还可用于监测通过网络管理系统提供的TTI消息。

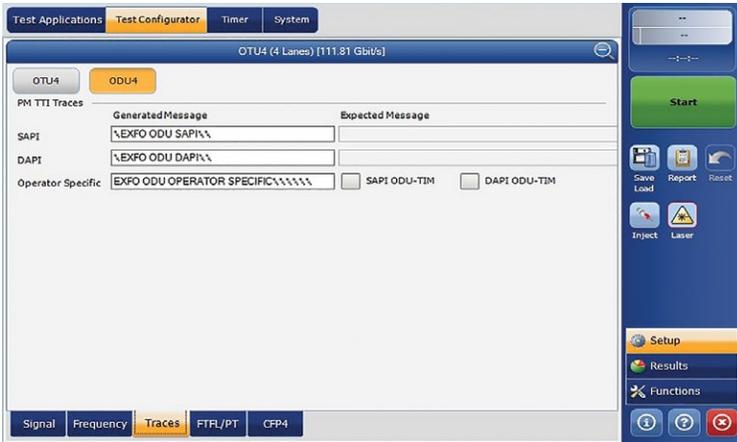


图 123. 使用FTBx-88200NGE Power Blazer进行TTI SAPI/DAPI/运营商信息测试。

3.8. OTN长期误码率测试（BERT）

最典型的OTN项目性能测试是24小时无差错测试。可通过OTU4接口承载100G以太网客户端信号来进行误码测试。测试配置：

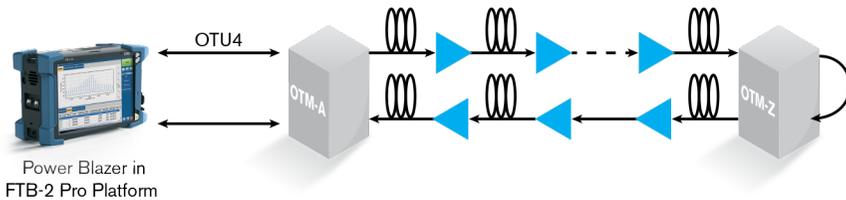


图 124. OTN长期BER测试配置。

测试流程：

- 按上图连接测试配置。所有OTU4服务必须分别级联。所有服务应正常激活。
- 将客户信号配置为100 Gbit/s，然后启动长期误码率测试。
- 24小时后记录测试结果。

3.9. 以太网服务测试方法ITU-T Y.1564

随着以太网逐渐成为首选的传输技术，网络也将其重心从仅传输数据转向在互联的世界中提供各种娱乐和特定应用。移动回传、商业和批量服务等基于以太网的服务需要承载各种应用，即语音、视频、电子邮件、网上交易和其它应用。这些新应用对网络性能和用来鉴定以太网服务性能的方法提出了更多要求。

接下来将探讨用于以太网服务开通、安装和故障诊断的ITU-T新标准EtherSAM或ITU-T Y.1564。EtherSAM是仅有的一种标准测试方法，可通过一次测试更迅速地全面鉴定以太网服务等级协议（SLA），且精确度最高。

网络现况

以太网目前传输实时和敏感服务。这里所说的服务指网络可承载的各种流量。总体而言，所有网络流量可分为三种类型：尽力而为、实时和高优先级。每种类型的流量受网络特性的影响也不尽相同，且都必须进行梳理和整形，以满足各自的最低性能目标。

流量类型	主要应用	服务示例
尽力而为型数据	非实时或数据传输	<ul style="list-style-type: none">· 数据· 互联网接入· FTP下载/上传· 服务器、存储应用
实时数据	在丢失后不能重现的实时广播	<ul style="list-style-type: none">· VoIP· IPTV、视频点播· 互联网广播、电视· 网络游戏· 视频会议
高优先级数据	用于维持网络稳定性的必需数据	<ul style="list-style-type: none">· OAM帧· 交换/路由控制帧· 网络同步，如SyncE、1588v2

图 125. 网络流量类型。

为确保QoS，提供商需要正确配置自己的网络，规定如何确定网络内流量的优先级。为此，需要给每种服务分配不同的优先级并准确配置网络优先级算法。QoS实施指用来通过帧内特定字段区分不同服务流量，从而使某些服务的帧优先于其它帧的方法。通过这些字段，网元可以服务并区分高优先级和低优先级流量。

SLA的重要性

SLA是服务提供商与客户之间有约束力的合同，用以保证所提供服务能达到最低性能。这些SLA规定了主要的转发特性及每个特性的最低保证性能。

关键性能指标	尽力而为数据（互联网接入）	实时数据	高优先级数据
CIR (Mbit/s)（绿色流量）	2.5	5	10
EIR (Mbit/s)（黄色流量）	5	0	5
帧时延 (ms)	<30	<5	5-15
帧时延变化 (ms)	N/A	<1	N/A
丢帧 (%)	<0.05	<0.001	<0.05
VLAN	300	100	200

图 126. 各种类型流量的关键性能指标 (KPI)。

客户流量被划分为三个等级，且为每个等级指派一种颜色（如图127所示）：绿色用于承诺流量、黄色用于超额流量而红色用于被丢弃流量。

- 承诺信息速率 (CIR) 或绿色流量：指保证随时可为特定服务提供的带宽；对于绿色流量而言，要保证满足最低的性能目标（即关键性能指标或KPI）。
- 超额信息速率 (EIR) 或黄色流量：指取决于网络负载和使用情况，可能提供高于CIR的超额带宽；对于黄色流量而言，不保证满足最低的性能目标。
- 被丢弃或红色流量：指高于CIR或CIR/EIR速率、在不中断其它服务时不能被转发的流量；因此红色流量会被丢弃。

流量等级	带宽	性能目标	KPI
绿色流量	从0到CIR	保证转发	KPI受保证
黄色流量	从CIR到EIR	尽力而为	KPI不受保证
红色流量	> EIR或CIR	被丢弃流量	不适用

图 127. 流量等级。

关键性能指标

KPI是具体的流量特性，显示特定流量配置的最低性能。在流量为绿色情况下，网络必须保证所有转发的流量都满足这些最低性能要求。典型的KPI包括：

- **带宽：**带宽指可转发的数据的最大数量。其测量结果表示在一秒的测量窗口内，被转发流量总和的比值。在采取不同的性能保障时，带宽可以是“承诺”值，也可能是“超额”值。必须要控制带宽，这是因为通常情况下多种服务会共享一个链路。因此，必须限制每种服务的带宽以避免影响其它服务。生成超过带宽限制的流量通常会导致帧缓冲、拥塞、丢帧或服务中断。
- **帧时延（延迟）：**帧时延或延迟是数据包发送和接收时间之间的时延测量结果。通常情况下，它是往返测量结果，这意味着它要在近端至远端和远端至近端两个方向上同时测量。该指标对语音应用至关重要，因为延迟太高会影响呼叫质量，导致回音、通话时断时续甚至掉话。
- **丢帧：**导致丢帧的原因有很多，如传输错误或网络拥塞。可能在传输帧的期间出现物理现象造成的错误，导致交换机或路由器等网络设备根据帧校验序列字段的比较结果丢弃某些帧。网络拥塞也会导致某些帧被丢弃，这是因为在出现拥塞时网络设备必须丢弃这些帧以避免使链路饱和。
- **帧延迟变化（数据包抖动）：**帧时延变化或数据包抖动指传输的数据包的到达时间变化。数据包在网络内传输时，经常会排队，以突发的形式传输到下一跳。可能会出现随机的优先安排，造成数据包以随机速率进行传输。因此，接收数据包的时间间隔没有规律。这种抖动会给端点节点的接收缓冲带来压力，导致在出现抖动大幅摇摆时，缓冲可能会使用过度或使用不足。

语音和视频等实时应用对数据包抖动尤为敏感。缓冲设计用来保存一定数量的视频或语音包，接下来这些视频或语音包会按照有规律的时间间隔进行处理，然后被流畅、无误地传送给最终用户。抖动太高会影响体验质量（QoE），因为数据包到达的速率较高会导致缓冲溢出，造成丢包。数据包到达的速率较低会导致缓冲变空，造成图像或声音停顿。

测试方法：EtherSAM (ITU-T Y.1564)

为了解决现有方法存在的问题，ITU-T推出了一个测试方法标准：符合目前以太网服务要求的ITU-T Y.1564。EXFO率先在其以太网测试产品中实施了基于该新标准的以太网服务测试方法EtherSAM。

EtherSAM可通过一次测试全面鉴定所有的SLA参数，以确保最佳的QoS。相比其它方法，它可以支持多业务产品。事实上，EtherSAM可以模拟网络上运行的所有类型的服务并同时鉴定各种服务的所有关键SLA参数。另外，它还可以验证网络中部署的QoS机制，为不同服务类型排列优先顺序，从而使验证更准确，部署和故障诊断更快捷。此外，EtherSAM还提供其它功能，如双向测量。

EtherSAM (ITU-T Y.1564) 的开发基础是大部分服务问题出现在两个不同的方面：（1）承载服务的网元配置；或（2）多个服务导致拥塞，负载较高时的网络性能。

服务配置

交换机、路由器、桥接器和网络接口单元等转发设备是任何网络的基础，这是因为它们将网络的各个部分互连起来。这些转发设备的配置必须正确，以确保流量能够根据其SLA被充分梳理和转发。

如果没有在端到端路径的某个设备上对服务进行正确配置，网络性能会受到极大影响。这可能会导致服务中断和整个网络问题，如拥塞和链路故障。因此，很重要的一部分测试工作就是确保设备的配置正确，并能够按照要求承载网络流量。

服务性能

服务性能指网络在不降低性能的条件下，以保证的最大速率承载多种服务的能力；也就是说KPI必须始终保持在可接受的范围内。

在网络设备承载时，必须做出质量决策。它们必须使某个流量的优先级高于另一个，以满足每个等级流量的KPI要求。之所以要这样做，是因为在流量增加时，发生性能故障的可能性也相应增加。

必须进行中长期服务性能评估，因为从长远来看，通常会出现问题，且无法通过短期测试发现这些问题。

因此，EtherSAM（ITU-T Y.1564）的重点有三个：

- 首先，该方法作为鉴定工具，确保网络满足SLA要求，方法是确保速率不同且在承诺速率范围内的情况下，服务满足其KPI性能目标。
- 其次，该方法可确保网络承载的所有服务在最大承诺速率情况下，满足各自的KPI性能目标。这就证明在负载最大时，网络设备和路径能够按照设计要求，服务所有流量。
- 再次，可进行中长期服务性能测试，以确认网元在持续承受压力的情况下能够正确承载所有服务。

EtherSAM：测试和子测试

EtherSAM包括两个测试：服务配置测试和服务性能测试。可以采用尺寸不变的帧或多个尺寸不同的帧进行服务配置测试和服务性能测试。ITU-T Y.1564定义了一个尺寸可变的帧序列格式，称为EMIX或Ethernet Mix。EMIX帧序列格式可配置为2至8个帧，而帧尺寸可配置为64字节至16000字节。EMIX的主要目的是模拟实际情况下的网络流量并揭示在采用尺寸不变的帧进行测试时不会出现的潜在问题。

服务配置测试

服务配置测试是一种单服务测试，按照用户的规定，验证某个服务的带宽和性能要求。该过程包括三个主要阶段，并在各个阶段监测所有的性能指标，以确保同时满足这些指标。

第1阶段：从最低数据速率到CIR

在该阶段，服务的带宽逐渐从最低数据速率增加到承诺信息速率（CIR）。这可以确保网络能够在不同数据速率下支持这种服务，并维持性能水平。此外，它还提供了一种能够安全、有效地增加网络利用效率，且在服务配置不正确时不会造成网络超载的方法。在服务带宽逐渐增加到CIR时，系统在每一步都会自动测量KPI，确保始终满足最低性能目标。要通过这一阶段测试，必须在每一步增加速率，直至CIR时都满足所有的性能指标。

第2阶段：从CIR到EIR

在该阶段，将服务速率从CIR逐渐增加到超额信息速率（EIR）。这可以确保服务的EIR配置正确，且可达到该速率。然而，根据公认的准则，在速率为EIR时，性能得不到保证；因此，没有评估KPI。在这个阶段，系统仅监测接收的吞吐量。由于EIR得不到保证，因此可能无法为所有超过CIR的流量提供带宽。如果接收的最低速率为CIR，而最高速率可能为EIR，则认为测试通过。如果测得的任何速率低于CIR，则认为测试未通过。

第3阶段：流量监管测试

分组传输的特点之一是能够处理突发流量。在突发或超过承诺带宽的情况下会发生EIR，这通常导致流量被丢弃。在这一步中，以超过EIR的速率发送流量，并监测接收速率。最后必须转发CIR。如有可用资源，应转发EIR流量。应丢弃任何超过这个最高值的流量，以避免网络超载。如果接收的流量超过EIR，意味着某个设备的配置不正确，并表示测试未通过。

每种服务需要经过这三个阶段，因此，如果网络上存在多种服务，应先后测试每种服务。这可以确保没有其它数据流的干扰，且测量服务带宽和性能。在以太网服务配置测试的最后，用户可清楚评估网元和路径是否正确配置以转发服务，并满足最低的KPI性能指标。

第4阶段：突发测试

突发测试是服务配置测试的一项子测试。在评估SLA时，突发测试的目的是验证预计尺寸的突发可以通过网络设备传输且损耗最小。网络设备配置包括承诺突发尺寸（CBS）和超额突发尺寸（EBS）属性，服务提供商每次激活服务时需要测试这些属性，以验证它们的配置是否正确。目前，IP网中最常见的协议是传输控制协议（TCP），它本质上是一种突发协议。因此，服务提供商在服务开通和故障诊断阶段，对FTP、HTTP和电子邮件服务等基于TCP的应用进行突发测试非常有用。突发测试阶段包括两部分，即CBS和EBS测试。CBS是分配用于以超过CIR的速率传输并满足SLA要求的突发的字节数。EBS是分配用于以超过CIR+EIR的速率传输并符合EIR要求的突发的字节数。下图为CBS和EBS突发测试过程示例。

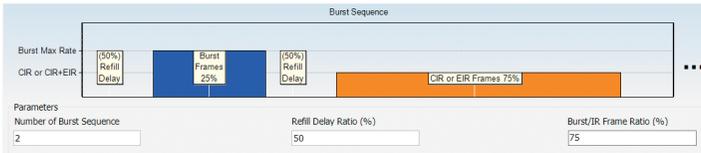


图 128. CBS和EBS突发测试过程。

因为网络设备上的CBS和EBS属性可能会针对各个服务方向采用不同配置，所以在往返配置（环回的一端）内测试CBS和EBS几乎或完全没有任何价值。在每个服务方向独立测试这些参数非常重要。网络运营商可以充分利用EXFO提供的同步双向测试功能，在其服务开通和故障诊断阶段模拟实际的网络流量进行压力测试。这是精准测试并验证网络配置和运行是否正确的唯一方法——尤其在使用上述的TCP等突发类型流量测试时。除了CBS和EBS突发尺寸，突发过程参数可在EXFO的PowerBlazer系列测试仪上进行配置。

The screenshot shows the 'SLA Parameters' configuration window. It includes sections for 'Information Rate' (set to %), 'Burst Size' (set to Bytes), and 'Performance Criteria'. Under 'Information Rate', CIR is 50.0000 and CIR+EIR is 75.0000. Under 'Burst Size', CBS is 12144 and EBS is 13000. Under 'Performance Criteria', Max Jitter (ms) is 2.0, Round-trip Latency (ms) is 15.0, and Frame Loss (%) is 0.1.

图 129. 突发测试——SLA参数配置。

服务性能测试

服务配置测试主要关注每种服务在网元内的配置是否正确无误，而服务性能测试则关注承诺流量情况下的QoS参数实施情况，模仿实际服务。在该测试中，以相同的CIR同时生成配置的所有服务，持续一段时间（从几秒钟到最长30天不等）。在该阶段，分别监测每种服务的性能。如果任何服务未能满足性能参数，则表示测试未通过。

这两种测试结合起来，便可通过简单、完整的测试方法提供所有的关键结果。服务配置测试关注每种服务，以及路径上的网元如何应对每种服务，从而迅速发现配置问题。服务性能测试关注网络同时应对并保证各种服务的能力。在这两个阶段成功验证后，电路可以随时激活并投入使用。

EtherSAM测试拓扑结构：环回和双向（双测试设备）

EtherSAM还可通过环回设备进行往返测量。在这种情况下，测量结果反映从测试设备到环回点再返回测试设备这两个测试方向的平均值。在该情景中，可由处于环回模式的另一台测试设备或网络接口设备（NID）来执行环回功能。也可以在双测试设备模式中开始相同的测试。在这种情况下，将一台设备指定为本地设备，另一台设备为远端设备，用于交换数据并各自在每个方向上同时进行测试。这可以提供更精准的测试结果，如独立评估每个方向，并能够迅速确定链路的哪个方向出现故障。需要指出的是EXFO的EtherSAM测试应用可同时进行双向测试，这意味着流量在两个方向同时在线。同时在两个方向上测试现有的高级网络非常重要。

这会模拟实际的网络流量，并揭示在不同时进行的双向测试中可能不被发现的网络设备配置问题。此外，同时进行双向测试可将测试时间缩短50%，从而大幅降低成本。

运营商和服务提供商不断面临着确保正确向客户提供服务的挑战。需要在更短的时间内向客户提供以太网服务，并证明比以前更可靠。EtherSAM缩小了服务验证和性能评估之间的差距，提供直观、易用的方法，帮助用户可靠地控制并管理网络，同时降低OPEX并增加收入。EtherSAM是仅有的一种标准测试方法，可通过一次测试更迅速地全面验证以太网服务等级协议（SLA），且精确度最高。

iSAM: 简化以太网服务激活

有多少次当现场技术人员开始测试时，才发现需要专业技术水平更高的人来配置并进行测试？iSAM的目标非常清楚：为水平参差不齐的现场技术人员简化以太网服务激活测试。

其解决之道是使服务开通回归本来面目：简单、迅速。我们根据全球各地的客户反馈及其现场测试知识开发了iSAM，它将重点放在目前业内所用的从10M直至100G的以太网服务开通配置上，从而简化现场技术人员的日常工作。

假设现场技术人员可以在一个页面上便可以设置以太网服务测试，自动连接远程测试设备，完成测试，然后自动将测试报告上传给基于云的存储。而iSAM可以使得这一切成为现实。

现场技术人员经常将宝贵的时间浪费在多个页面进行测试设置上。由于iSAM采用的创新的方法，因此能够在一个页面上完成配置，从而最大限度地提高效率。

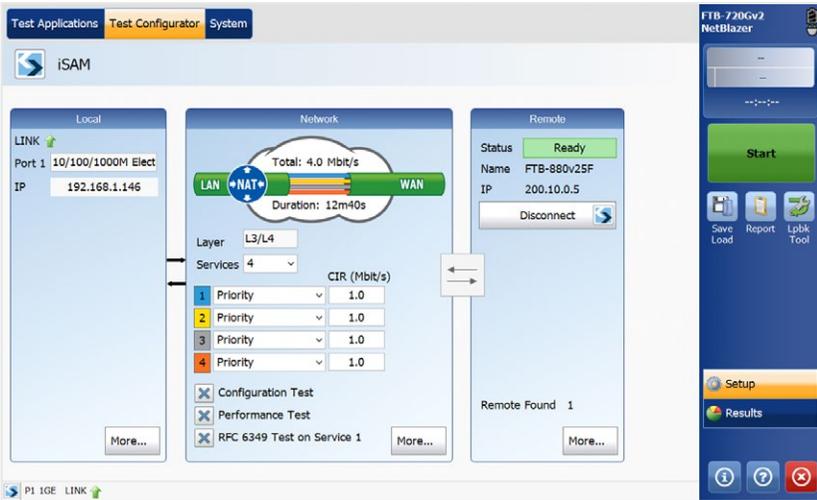


图 130. iSAM——简单的单页测试设置。

应对传输控制协议 (TCP) 层测试挑战

随着电信行业的竞争日益白热化，服务提供商需要确保为客户提供最佳的体验质量，以防止客户流失并提高客户忠诚度。因此，服务提供商要了解自己的网络状况以及向客户提供的服务质量，就必须全面验证以太网和互联网协议 (IP) 层 (2层和3层) 以及TCP 4层。

由于客户使用习惯出现了变化，而对带宽密集型应用的需求也日益增长，因此服务提供商还必须调整自己的测试要求以满足客户的期望。15年前，服务提供商很少谈及TCP层测试或验证。但现在，他们需要超越传统的RFC 2544测试，甚至ITU-T Y.1564服务激活测试。

由于iSAM简化了测试，因此服务提供商能够轻松验证自己的服务，直至TCP 4层。只需要在iSAM设置页面中启用RFC 6349测试，便可以在2层和3层测试后自动执行TCP吞吐量验证测试。这样做可以确保验证基本层 (以太网和IP) 以及TCP层，从而实现真正的端到端服务激活测试。

RFC 6349测试会自动判断路径的最大传输单元 (MTU) 以避免出现数据包分段。该测试还测量基准往返时间 (RTT)，包括TCP数据包被发送出去并被接收器确认接收所需要的最大往返时间。通过基准RTT和用户输入的承诺消息速率 (CIR)，可以计算出带宽时延积 (BDP) 或最佳窗口大小。BDP (最佳窗口大小) 会用来进行TCP吞吐量测试。现场技术人员因而能够迅速判断被测电路的运行是否符合预期要求。

The screenshot displays the iSAM test results interface. It is divided into four main sections: Service Configuration Test, Service Performance Test, RFC 6349 Test, and TCP Throughput. Each section shows test results for a 'Priority' service. The Service Configuration Test shows TX CIR of 40.0 Mbit/s, FD (RTT) of 56.456 ms, IFDV (Jitter) of 3.014 ms, FLR (Frame Loss) of 0.0000%, and RX Rate of 39.9898 Mbit/s. The Service Performance Test shows TX CIR of 40.0 Mbit/s, FD (RTT) of 57.234 ms, IFDV (Jitter) of 3.39 ms, FLR (Frame Loss) of 0.0000%, and RX Rate of 39.9998 Mbit/s. The RFC 6349 Test shows MTU (bytes) of 1500 and Minimum RTT (ms) of 55.995. The TCP Throughput table shows Ideal L4 of 37.5 Mbit/s, Actual L4 of 38.0 Mbit/s, TCP Efficiency of 100.00%, and Buffer Delay of 0.02% for L->R and -0.03% for R->L.

Service Configuration Test		Completed, Pass		Start Time 10/19/2015 03:15:48 PM		
Service		TX CIR (Mbit/s)	FD (ms) (RTT) (Latency)	IFDV (ms) (Jitter)	FLR (%) (Frame Loss)	RX Rate (Mbit/s)
1	Priority	40.0	56.456	3.014	0.0000	39.9898
	L->R	40.0				
	R->L	40.0		2.471	0.0000	39.9956

Service Performance Test		Completed, Pass				
Service		TX CIR (Mbit/s)	FD (ms) (RTT) (Latency)	IFDV (ms) (Jitter)	FLR (%) (Frame Loss)	RX Rate (Mbit/s)
1	Priority	40.0	57.234	3.39	0.0000	39.9998
	L->R	40.0		2.523	0.0000	39.9951
	R->L	40.0				39.9998
Total RX Rate (Mbit/s)						39.9951

RFC 6349 Test		Completed, Pass			
MTU (bytes)	Minimum RTT (ms)				
1500	55.995				

TCP Throughput							
Service	Window	Ideal L4 (Mbit/s)	Actual L4 (Mbit/s)	TCP Efficiency (%)	Buffer Delay (%)		
1	Priority	37.5	38.0	100.00	0.02		
	L->R (5 conn. @ 51 KiB)						
	R->L (5 conn. @ 51 KiB)						

图 131.2/3层和4层 (TCP) 服务验证。

性能标准

除了能够简化以太网测试外，iSAM还包括最新的城域以太网论坛（MEF）标准。通过使用MEF 23.1预定义的性能指标配置文件，现场技术人员可以快速选择需要测试的MEF服务类型，并以一致、可重复和自动的方式来验证以太网服务。在这方面，iSAM使用针对现在出现的下一代以太网进行调整的简单测试方法，以便能够正确鉴定完整的服务等级协议（SLA）。

iSAM的设计原理和EtherSAM一样，也集成了两个子测试概念：配置测试和性能测试。配置测试根据每种服务的标准来验证性能。该测试验证每种以太网服务在CIR时是否满足MEF定义的性能指标，如丢帧率（FLR）、帧时延（FD）、帧间时延变化（IFDV）。另一方面，性能测试验证所有服务都以组合CIR运行时，是否满足性能指标。

性能指标命名规范	
传统	MEF
丢帧	丢帧率（FLR）
延迟	帧时延（FD）
抖动	帧间时延变化（IFDV）

多年以来，许多服务提供商都在寻找测试以太网服务所需的正确性能指标设置方面的指导。例如，对于短距离服务（如城域网服务），FLR是否应该低于0.5%？FD是否应该小于10 ms、20 ms或30 ms？人们对提供的各种以太网服务需要哪些正确指标感到非常困惑。iSAM通过为现场技术人员提供MEF性能配置文件，消除了这种困惑。借助iSAM，服务提供商和现场技术人员可以根据这些基于所提供的以太网服务的指导方针轻松测试。

MEF 23.1规定了三个性能目标和四个性能层（PT）。性能目标与所提供的服务等级（CoS）有关，而性能层与以太网距离有关。

性能目标	
H（高）	严格性能，如时序分布
M（中）	实时应用，如VoIP
L（低）	尽力而为型应用（网络流量）

性能层（PT）——距离（km）	
城域网	< 250 km
区域	< 1200 km
大陆	< 7000 km
全球	< 27 500 km

将这些性能目标和性能层结合起来，可确定12级不同的运营商以太网服务。下表显示的是某些服务的性能指标示例。

	FLR (%)	FD (ms)	IFDV (ms)
城域 L	≤ 0.1%	≤ 37 ms	未指定
大陆 M	≤ 0.025%	≤ 115 ms	≤ 40 ms
全球 H	≤ 0.05%	≤ 230 ms	≤ 32 ms

因为iSAM包括多种以太网服务，所以服务提供商在开通和验证以太网服务时，不再需要进行猜测。现场技术人员可以根据向最终客户提供的以太网服务，轻松地选择需要的性能标准。

自定义性能指标

如果MEF预定义的性能指标不能满足用户的要求怎么办？借助iSAM，用户可以修改预定义的MEF性能指标或创建自己的性能指标配置文件。有些服务提供商甚至可能有自己的以太网服务产品（如Gold、Silver和Bronze）及与这些服务相关的性能指标。如果有iSAM，就可以非常容易地创建自定义的性能指标配置文件。

这些自定义的性能指标配置文件通过主模板进行创建，这些模板可在平台上获得（而不是在测试应用程序内），仅供管理人员和/或主管使用。此外，如果用户修改了MEF性能标准模板，在性能指标名称旁边会出现星号，表示对指标进行了一些修改。

3.10. 利用过滤和抓包进行40GE/100GE故障诊断

随着100G即将开始大规模部署，以满足不断增长的带宽需求，服务提供商和网络运营商开始面临多重挑战。有些挑战与100G网络提供的多业务产品、其支持的每种服务的特性及其对SLA影响有关。此外，随着这些服务的速率向100G扩展，并变得更加复杂，网络工程师需要进行更多的故障诊断和服务调用。

100G网络故障诊断需要进行各种复杂测试来找出网络出现故障的位置和原因。网络变得越来越复杂，通常提供很少的事件信息，因此网络工程师需要调查各种可能的故障原因。

这些任务比较艰巨，调查的时间有限，且可能会影响用户。

网络工程师可以采取的方法之一是在受影响的线路上采集并解析流量。对流量进行解析通常包括分析报头流量，以发现任何问题，如修改或内容有误。

过滤

过滤是采集流量的第一步。因为在正常传输时有很多流量，所以过滤的关键因素是关注某个特定的流量。过滤会将某个重要的流量隔开，并去掉任何不必要的流量，从而优化搜索引擎。

过滤引擎可提供基本和高级过滤功能。可基于不同的逻辑运算（AND、OR、NOT）来配置过滤条件。下图显示了过滤过程，以太网数据包可通过并/或被选中，进行采集和分析。

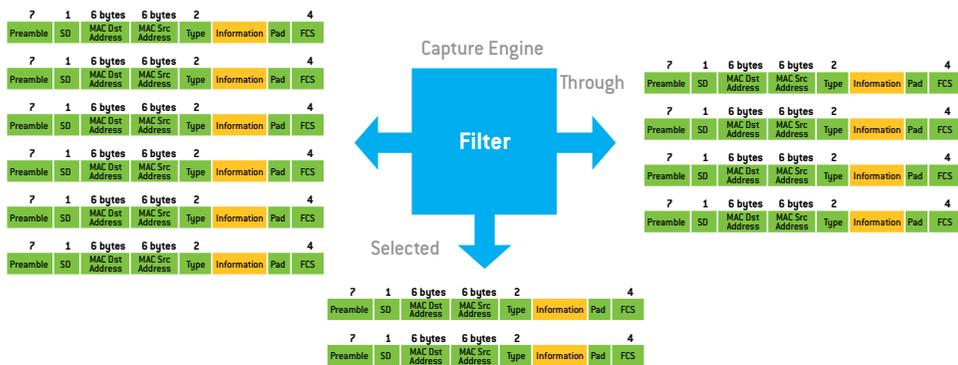


图 132. 流量过滤机制。

在多数采集情况下，净荷信息通常为私有信息，不能被测试设备解析。因此，网络工程师通常关注报头信息，解析该信息并将其用于更深入的故障诊断。这样做可以避免采集不必要的的数据，要不然，这些数据会占用内存，却不提供任何有用信息。

FTB-88100NGE、FTBx-88200NGE和FTB-890/890NGE现场测试仪具备创新的截取功能，使用户能够从以太网帧第一个比特开始，仅采集特定数量的字节。因此，网络工程师可以仅采集报头的前几个字节，或采集更多字节来获取更高层信息。

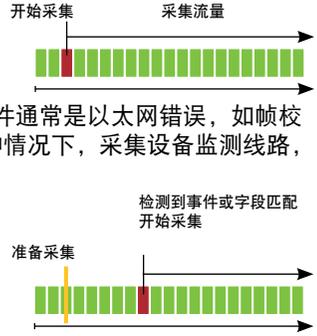
采集触发

一般采集工具非常普遍的问题是一启用便开始采集数据。然而，用户关心的事件可能在晚些时候才会发生，使得先前采集的流量占用内存缓冲，却不提供任何有用信息。在某些情况下，由于采集的数据比较多，而事件窗口较短，导致完全错失测试机会。

EXFO的以太网采集工具可解决该问题，它提供一系列触发功能，使用户能够调整并指定采集过程开始的具体时间。这种强大功能可简化故障诊断过程，只有在检测到关注的事件后才会占用内存。因此，能够高效地利用内存和故障诊断时间，从而采集有价值的信息，并最终提供更重要的信息。

用户可基于以下三种触发来采集流量：

- 人工触发是最简单的触发形式，通常在启用后立即开始采集数据。它是默认的运行模式，类似于传统采集工具。
- 错误触发是在检测到特定的错误后开始采集数据。这些事件通常是以太网错误，如帧校验序列（FCS）错误。该模式可进行事件数据采集，在这种情况下，采集设备监测线路，直至检测到特定事件，才会触发采集过程。
- 字段匹配触发是在检测到符合特定过滤条件的帧后开始采集数据。该条件使用与流量过滤系统类似的系统，使用户能够检测线路，并在检测到特定的帧条件后立即开始采集数据。



触发位置

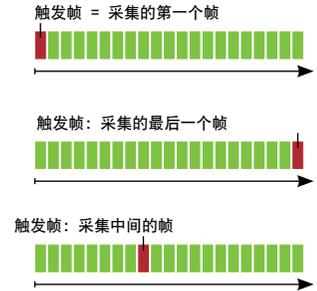
触发位置用于判断触发的帧在采集数据中的位置，解决传统采集工具常见的问题，经常在采集数据中定位关注的事件。

触发位置的常见用途是进行前期和后期分析。在网络故障诊断中，了解导致发生故障的事件并查看故障后的事件非常重要。这两个关键阶段可提供大量有关故障的信息，包括故障原因以及网络如何反应。

触发位置功能使用户能够指定触发事件在数据采集中的位置，从而能够根据帧相对于触发事件的位置来选择要采集的帧。传统的采集工具不提供事件中触发和事件前触发功能；相反，它们仅提供事件后触发功能。同样，用户只能人工搜索采集的数据，找出事件并进行分析。再加上缺少触发机制，从而导致在使用传统的采集工具时，可能会完全错过关注的事件，造成采集过程效率低下。

EXFO的以太网数据采集工具提供以下三种触发位置：

- 事件后触发模式：采集的第一个帧始终是触发帧，而其它的帧都在触发事件之后。该模式通常用于分析事件后的内容。
- 事件前触发模式：采集的最后一个帧是触发事件，因此采集的数据包括该事件前的所有帧。该模式可用来判断导致特定事件的原因。
- 事件中触发模式：它是一种强大的应用，可提供触发事件前后的流量概况。在该模式中，触发事件通常位于所采集流量的中间。



采集数据输出和分析

在完成采集后，所采集的数据可输出到平台的内存进行解析。数据输出过程可生成符合行业标准的PCAP文件，供各种开源解析工具使用。然后，使用Wireshark应用程序来进行解析和后期处理。

随着100G开始大规模部署，FTB-88100NGE、FTBx-88200NGE和FTB-890/890NGE现场测试仪的以太网数据采集和解析功能使网络工程师能够在现场迅速定位问题，并加快故障诊断过程，从而确保服务能快速恢复。

3.11. 以太网服务OAM (SOAM)

全球各地的服务提供商和运营商为建立自己的网络已花费数十亿美元。随着网络日益复杂，有效的管理功能变得非常必要。可靠性、可用性以及快速故障转移与恢复都是非常重要的参数，服务提供商和运营商依据它们来确保服务等级协议（SLA）。在部署基于以太网的解决方案时，服务提供商面临的主要挑战之一是如何获得与传统承载网络要求一致的操作、管理和维护（OAM）支持。本质而言，无论使用何种底层技术来提供服务，都需要满足这些服务的SLA要求。为满足这些SLA要求，需要的功能包括以太网OAM。

什么是以太网OAM?

OAM是一组功能，提供系统或网络故障指示、性能监测、安全管理、诊断、配置和用户配置。这些管理工具或功能旨在监测网络并在网络出现故障时迅速恢复。鉴于网络通常包括由很多制造商制造、属于不同运营商的设备，必须将OAM标准化，以确保一致性和互通性。OAM实体会感知网络，因为它们使用来自其它网络实体的信息，并向这些网络实体提供信息。此外，它们相互协调，确保一致，这对各实体的OAM功能至关重要。以太网OAM在第2层将OAM包插入到分组交换的数据流中，并使用端点来处理这些包，然后通过配置有误的节点、未经确认和错位节点、断开或故障节点、丢帧、帧时延、端到端路径识别和误码率等参数来确定性能。

以太网服务OAM (SOAM) 可提供管理解决方案来保证并测量端到端性能。它可从机房为标准的以太网服务提供端到端SLA保证、服务中SLA验证以及网络监测和故障诊断。以太网服务OAM协议支持两组功能，第一组是连接故障管理（CFM），它按照ITU Y.1731、IEEE 802.1ag和MEF30.1规范检测、验证并隔离连接故障。虽然其中部分功能可用来进行故障定位，但通过端到端进行通信。支持的第二组功能是性能监测（PM），它按照ITU Y.1731和MEF 35规范提供性能监测功能。该组功能也通过端到端进行通信。其它OAM协议包括用于链路层发现的IEEE 802.1ab、用于第一英里以太网的IEEE 802.3ah和用于MPLS-TP（多协议标签交换-传输参数）OAM的ITU-T G.8113.1。城域以太网论坛（MEF）还定义了其它服务OAM要求，即MEF 17。

定义

- 维护域 (MD)：网络的一部分，通常由一个实体所有并操作，通过它可以管理连接故障。MD配有域名，共分为八级，分别用整数0-7表示。不同域之间存在逐级分层关系。

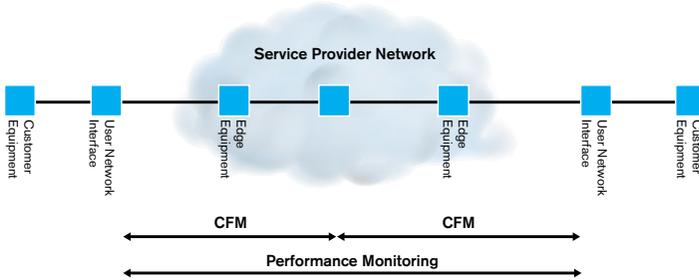


图 133. 客户维护域。

- 维护实体组端点 (MEP)：维护域的边界点。它们可以发起或终止OAM帧。端到端测试由MEP发起或终止。
- 维护实体组中间点 (MIP)：维护域内的中间点。它们不发起OAM帧，但可以响应某些OAM帧（环回和链路跟踪）来隔离故障。
- 维护实体 (ME)：该实体需要管理，并定义两个维护实体组端点之间的关系。
- 维护实体组 (MEG)：同一个管理边界内的一组ME，它们具备相同的MEG级别，并属于相同的点到点或多点以太网连接。
- 维护集 (MA)：一组MEP，旨在验证单个服务实例的完整性。

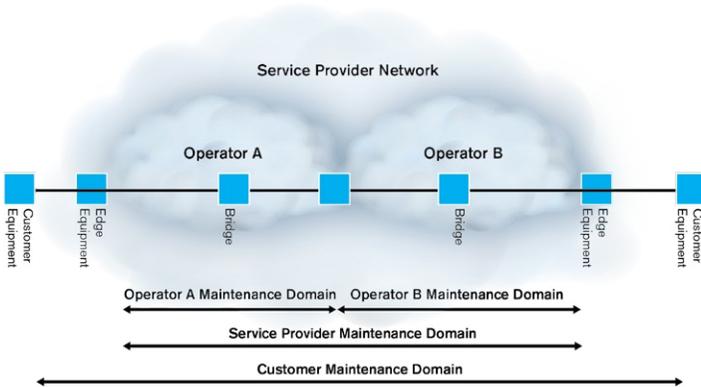


图 134. 存在分层关系的维护域。

SOAM功能通过端到端进行通信（如客户至客户）。因此，当出现连接故障时，可以确定其位置。在图134中，发生故障的位置可能是三个部分中的任何一个。在服务提供商的维护域中，在MEG内执行端到端SOAM功能，MEG包括两个MEP和两个MIP。在这当中，发生故障的位置也可能是三个部分中的任何一个。另外两个部分分别属于运营商A和运营商B。因此，运营商A和运营商B可以使用SOAM功能，但只能是在各自的MEG中才能使用。

以太网OAM标准

这一部分主要探讨现有的以太网OAM标准，包括各自的功能和用例。

- IEEE 802.1ag: 802.1ag主要关注以太网内的端到端连接和节点连续性。因此，它被称为连接故障管理（CFM）标准。由于它适用于桥接和桥接应用，因此除了单播数据包外，它还规定了多个多播数据包。它还用于多点和点到点连接。

802.1ag有三大主要功能：连续性检测消息（CCM）、环回消息和环回应答消息（LBM和LBR）以及链路跟踪消息（LTM）和链路跟踪应答消息（LTR）。

- CCM: 连续性检测消息是一个OAM协议数据单元（OAMPDU），监测从一个端点到另一端点（MEP到MEP）的服务。MEP间交换的CCM与“心跳”消息类似，可配置按照以下七个标准间隔的任何一个发送：3.3毫秒、10毫秒、100毫秒、1秒、10秒、1分钟和10分钟。虽然首选使用多播数据包，但CCM可以多播也可以单播，而且它们会持续传输，直至被关闭。当某个节点停止接收CCM消息时，这意味着失去与该节点的连接。从某个未知节点接收CCM消息表示可能出现节点配置有误。

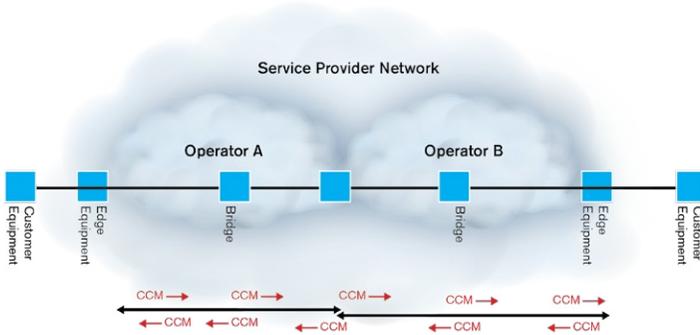


图 135. 连续性检测消息。

- LBM/LBR: LBM和LBR用于确定数据路径的完整性。一旦出现网络故障,服务提供商可以开始802.1ag测试来验证服务丢失。环回类似于3层ping要求/应答。在环回测试中,某个MEP向另一个MEP或MIP发送消息,以验证整个已知MA上的连接情况。虽然首选使用多播,但这些消息可以单播也可以多播。
- LTM/LTR: LTM和LTR用来确定源端MEP到目标MEP的路径。每个源MIP和目标MEP都会响应LTM。一旦服务提供商确认网络故障,链路跟踪功能可用来隔离其具体位置。这项功能可以跟踪从MEP经过MA中所有MIP到目标MEP的服务。
- ITU-T Y.1731: ITU-T Y.1731是一种主要用于故障管理和性能监测的协议,它定义了性能监测测量(即丢帧率、帧时延、帧时延变化、服务可用性)来帮助SLA保障和规划容量。它适用于多点和点到点连接,依据802.1ag进行传输,因此成为802.1ag的一个扩展协议。Y.1731测量以下性能参数:丢帧、时延、时延变化和服务可用性。其主要功能包括告警指示信号(ETH-AIS)、远端故障指示(ETH-RDI)、锁定信号(ETH-LCK)、测试信号(ETH-Test)、性能监测(ETHPM)、丢帧测量(ETH-LM)、帧时延测量(ETH-DM)和客户端信号故障(ETH-CSF)。

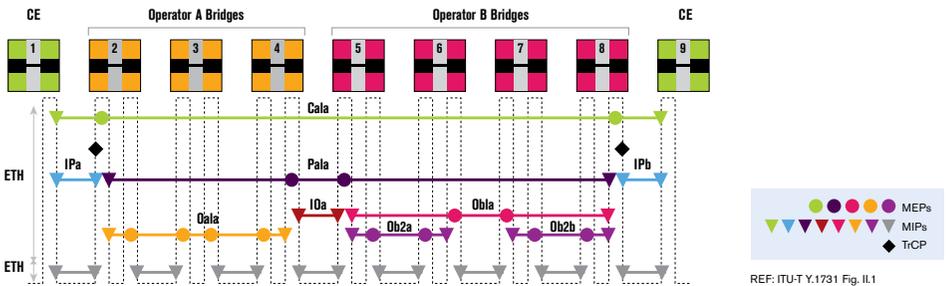


图 136. 连接故障管理功能。

- ETH-AIS: 在近端检测到告警时,通过CCM数据包向远端发送该消息。AIS帧定期发送,直至故障情况被消除。
- ETH-RDI: 该指示用于故障通知。如果某个MEP有故障,它会向目标MEP发送RDI,告知出现了故障。
- ETH-LCK: 该信号用于向远端传输管理性锁定,导致数据传输出现中断。它告知远端,虽然存在近端,但不能使用。LCK帧也定期发送,直至管理员清除锁定。

- **ETH-Test**: 该测试信号由一个MEP生成, 向目标MEP发送以便从目标MEP验证接收测试信号的完整性。此外, 它还用于误码率 (BER) 和吞吐量测量。
- **ETH-PM**: 该功能用于在已知域上监测点到点或端到端流量性能。
- **ETH-LM**: 该功能被用来测试从一个MEP到目标MEP的双向丢帧。
- **ETH-DM**: 该功能被用来测量一个MEP和目标MEP之间的往返时延。它也用于测量时延和时延变化。
- **ETH-CSF**: 该功能用于故障通知。它被MEP用来告知目标MEP在以太网客户端信号内检测到故障或事件。在客户端不支持故障检测机制时使用该功能。
- **IEEE 802.3ah**: 该标准也被称为第一英里以太网 (EFM) OAM。802.1ag规定了如何验证多个域和跳上的端到端连接, 而802.3ah则规定了如何验证一个跳上的点到点连接。它使用以下机制: 发现、环回、管理信息库 (MIB) 变量轮询、远端故障指示和链路监测。
 - **发现**: 它是第一阶段机制。此时, 对网络内的设备及其OAM功能进行识别。如果发现机制由于某种原因出现故障, 则中止所有其它OAM活动, 直至能够重新建立发现机制。
 - **环回**: OAM实体可使用环回控制净荷将远端对等实体配置为环回模式。这就可以帮助管理员在安装和故障诊断过程中确保链路质量。
 - **MIB变量轮询**: IEEE802.3ah提供了到部分特定远程MIB的只读型访问。该功能的实现, 有赖于管理员也能够在远端检索/重置MIB变量。这些变量是可向系统管理员提供的OAM信息的主要来源。
 - **远端故障指示**: 该机制使OAM实体能够通过OAM净荷中的特定标签, 向其对等实体传输以太网链路劣化的情况。
 - **以太网链路跟踪**: 该功能用于故障隔离, 使MEP能够验证至目标MEP的整个链路。每个MEP及其目标MEP都会响应链路跟踪消息。

测试以太网OAM的重要性

以太网OAM影响运营商以太网服务的方方面面。它对网络至关重要，因为它可实现自动配置、监测和故障隔离，使运营商以太网成为真正集成、可扩展的互连服务。

支持OAM功能的网络设备正在承载以太网服务的网络中大规模部署，这是因为它们在这些网络中提供基本功能。确保这些设备配置正确并提供应具备的功能非常必要。因此，在部署前测试OAM服务可帮助服务提供商和运营商节省时间和资金。

如何测试以太网OAM

所用的测试方法或功能取决于要鉴定的OAM功能及网络架构。根据所用OAM标准的不同，功能集可能会很少，也可能很多。这一部分将着重探讨必须测试的主要OAM功能。可将不同测试归为两大类：故障管理和性能监测。服务生命周期包括三个部分：配置和开通（使用服务激活测试，如ITU-T Y.1564进行测试和鉴定）、性能监测（通过OAM测试进行鉴定）、故障管理（通过OAM测试进行测试）。为了测试并鉴定服务及承载这些服务的网络，不但需要测试网元的OAM功能，还需要在配置和服务开通期间测试网络和服务本身。因此，只有结合ITU-T Y.1564和服务OAM的测试才能达到这些目的。

- **故障管理**：取决于所用的OAM标准，可进行多种测试来检测、验证、定位并通知各种故障情况。
- **连续性检测**：该功能用于确认网络上是否存在MEP或测试设备，并验证是否存在目标MEP。在该测试期间，传输的帧被使用单播目标地址的目标MPE接收，或被使用多播目标地址的MEG中的所有MEP接收。
- **环回测试**：在该测试期间，测试仪发送一个带特定序列号的LBM净荷。目标MEP通过LBR净荷响应LBM。该测试鉴定每个接收到的LBR，并报告任何无效LBR、无效净荷和LBR超时。
- **链路跟踪测试**：该测试验证到目标MEP的整个链路。测试仪发送LTM消息，并接收LTR消息。
- **测试功能**：在这一阶段，测试仪生成带特定测试图案和序列号的帧，以验证目标MEP接收到的信号的完整性。该测试需要两台测试仪：每端一台。
- **RDI测试**：在这一阶段，测试仪生成远端故障指示（RDI），模拟故障，并鉴定目标MEP的反应和行为。

- 锁定信号测试：该测试用于生成并检测锁定信号。在收到锁定帧时，测试仪会发出告警。
- CSF测试：在这一阶段，测试仪通过生成并检测客户端信号故障（CSF）来鉴定目标MEP的接收和行为情况。

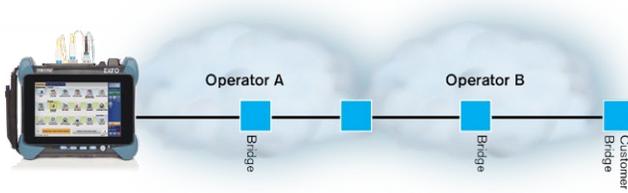


图 137. 客户端信号故障阶段测试配置。

- 性能监测：性能监测用于测量帧时延、丢帧和合成丢帧等参数。
- 帧时延测试：帧时延是关键的OAM指标，在这个测试中，测试仪测量至目标MEP的往返时延。为了模拟实际情况，应使用不同尺寸的帧来鉴定帧时延。
- 丢帧：该测试用于检测一个MEP和目标MEP之间的双向丢帧，应在尽可能长的时间内进行该测试，以全面了解网络的表现如何。为了模拟实际情况，应使用不同尺寸的帧来验证丢帧。
- 合成丢帧：该测试使用特别的合成测试帧，检测一个MEP和目标MEP之间的双向丢帧。该测试也应使用不同尺寸的帧。

随着多业务网络变得日益复杂，新技术也必然不断涌现。尽管自同步光网络和同步数字体系（SONET/SDH）早期以来，网络操作、管理和维护的概念就一直存在，但以太网OAM在不断发展，而在人们刚开始了解现有标准时，更多标准被不断开发出来。

考虑到OAM在网络中的重要性，网络必须正确配置以支持OAM提供的所有功能。然而，只有彻底、全面地测试本文所述的所有参数，才能达到这个目标。从实用的角度来看，由于用户并非一直都能够全面了解最新技术，因此网络运营商可采用的最有效方法莫过于使用配备所有必备OAM功能和指标的测试仪。

3.12. POTN和MPLS-TP测试

OTN传输网正经历前所未有的变化。从服务要求上讲，既需要继承传统的基于电路交换技术的优秀性能，同时又需要满足分组服务高效灵活的特点。从功能特征上将具备分组与光的融合，即在OTN网络上具备2层甚至3层汇聚和交换功能。目前对于支持分组服务的OTN有不同的名称，如：POTS、EOTN、MS-OTN、PEOTN或POTN。虽然这些系统的技术和对分组服务的支持不尽相同，但目前业界的共识是将二层的功能下沉至OTN设备上，其中以PWE3和MPLS-TP为技术特征的POTN网络将受到行业的青睐。

POTN基于ITU-T的光传输网（OTN）G.709标准组建，同时又具有分组网络的特征。传统的G.709基于电路交换技术，其优势是可以保证零丢包、低时延、较小的包时延变化以及优秀的同步时钟性能。而传统的分组网络则通过统计复用提高了传输效率，具有服务灵活的特点，但并不能提供OTN网络类似的高时钟性能，即高质量传输。而POTN网络即在此背景下产生：在单一设备下集成了OTN网络固有的电路交换特性，同时又吸收了分组交换的高效的统计复用特性。

POTN网采用MPLS-TP技术，而MPLS-TP是MPLS用于传输网的一种简化版本，它去掉了某些MPLS功能，如倒数第二跳弹出（PHP）、标签交换路径（LSP）合并和等价多路径（ECMP）。MPLS-TP不要求MPLS控制面功能，使用户能够通过管理面人工设置LSP。

这种OAM功能，用于MPLS-TP网，旨在降低网络性能监测和管理、故障管理及保护倒换的操作复杂程度。MPLS-TP OAM的设计目的之一是提供监测并管理网络所需的工具，采用和传统传输技术所提供的相同属性。

OAM机制的两个重要组成部分是通用关联通道（G-Ach）和通用告警标签（GAL），通过它们，操作人员可以向伪线（PW）或标签交换路径（LSP）发送任何类型的控制流量。G-Ach用于PW和MPLS-TPLSP，而GAL用于在MPLS-TP LSP中给G-Ach打标签。

MPLS-TP用于故障管理的OAM功能主要包括两种类型的管理，即主动故障管理（Proactive FM OAM）和按需故障管理（On-demand FM OAM）功能。

主动故障管理包括如下功能：

- 连续性检查 (CC) 和连接验证 (CV)：该功能在主动工作模式下，源端维护端点周期性发送CC/CV消息，在宿端维护端点检测之间的LOC故障以及误合并、误连等连接故障。设备支持的最小发送周期为3.3 ms，以保证最短在10 ms内完成故障检测。
- 远端故障指示 (RDI)：用于将本地检测到的故障信息通告给对端。
- 告警指示信号 (AIS)：在本地服务子层检测到故障后，向客户层上插入该告警，并向下游维护端发送该告警。该告警主要作用是抑制客户层的次要告警，避免产生大量冗余告警。
- 链路断开指示 (LDI)：出现AIS告警后的指示信息。
- 锁定报告 (LKR)：是服务中断后源端发送到宿端的的消息。它主要用来抑制不必要的冗余告警。

按需FM OAM包括如下功能：

- 连接验证 (CV)、路由跟踪 (RT)、传输面环回和锁定指示 (LI)
- RT和传输面环回消息可以让所有的MIP和MEP收到该消息后会返回相应的OAM消息，可以用于MEP和MIP之间的双向连接，从而检测节点间及节点内部的故障和定位故障。

用于性能管理的OAM功能主要包括如下几个功能：

丢包测量 (PLM)、包时延测量 (DM)、吞吐量测量和时延变化测量。其中丢包测量可以通过连续性检测和连接验证消息来实现；吞吐量测量则是通过丢包测量来进行的，可以包括服务中和服务中断两种方式测试；包时延测量则通过专门的带有发送和接收时间戳的消息来实现，可以测量单向或双向时延；时延变化测量则可以通过包时延测试来获得。

典型的测试方法：EXFO的FTB-890/890NGE、FTB-88100NGE或FTBx-88200NGE可用于MPLS-TP网络的OAM验证和测试。该仪表可以单独用于MEP或MIP点的测试，也可以用于端到端的对测，如下图所示：

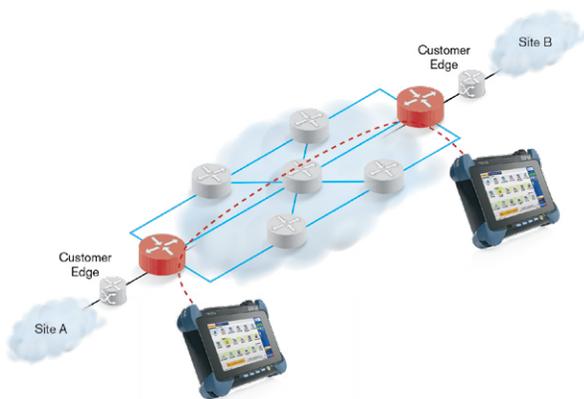


图 138. 服务质量验证测试设置。

3.13. POTN分组/以太网服务质量验证

在目前的网络中存在不同类型的流量，每种流量的性能要求也各不相同，需要QoS机制对最敏感的流量进行隔离和优先处理。

传统的TDM网络没有这些参数，它们仅提供保证的吞吐量。这些网络效率低下且比较复杂，只关注数据的普通传输。所有流量不分类型，均以相同的优先级进行传输。随着分组网络的部署，网络必须服务应用；然而，这些应用对性能的要求也不尽相同。Voice over TDM会做出与OTT (over-the-top) 视频、广播电视、网页或电子邮件完全不同的假设。为了让不同的应用共享同一个回传电路，该电路必须能够支持多种服务等级 (CoS)，每个服务等级具有各自的QoS要求。另一方面，分组技术可提供差异化机制，使网络能够优先传输某些流量，并提供一定程度的传输保证。

POTN保留了IP/MPLS QoS系统，如IP区分服务 (DiffServ) 和MPLS标签，使网络能够承载语音、视频和数据包。网络可以根据数据包各自的优先级对它们进行区分，然后进行传输以确保这些数据满足各自的性能要求。

POTN网络中以太网服务的QoS测试包括如下项目的测试：服务流分类和优先级映射能力测试、基于流分类的访问控制列表 (ACL) 能力测试、接入速率控制测试、接入速率控制的粒度、色敏感功能验证、连接允许控制 (CAC) 机制、客户服务优先级重映射能力。

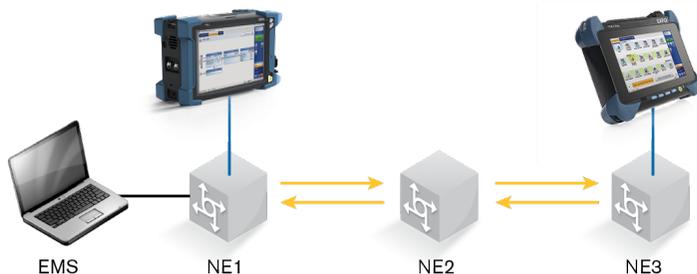


图 139. 服务质量验证测试设置。

测试方法：典型的网络配置如上所示。在NE1和NE3间建立LSP和PW。将PW复用到LSP内。建立流量分类标准，将其映射到PW内，然后验证以下的流量分类标准：

- a. 端口
- b. VLAN
- c. VLAN PRI
- d. 源或目标MAC地址
- e. 源或目标IP地址
- f. 区分服务代码点 (DSCP)
- g. IP TOS
- h. TCP/IP端口数 (可选)
- i. 以上的任意组合

EXFO FTB-8880/88100NGE和FTBx-88200NGE的流创建界面如下:

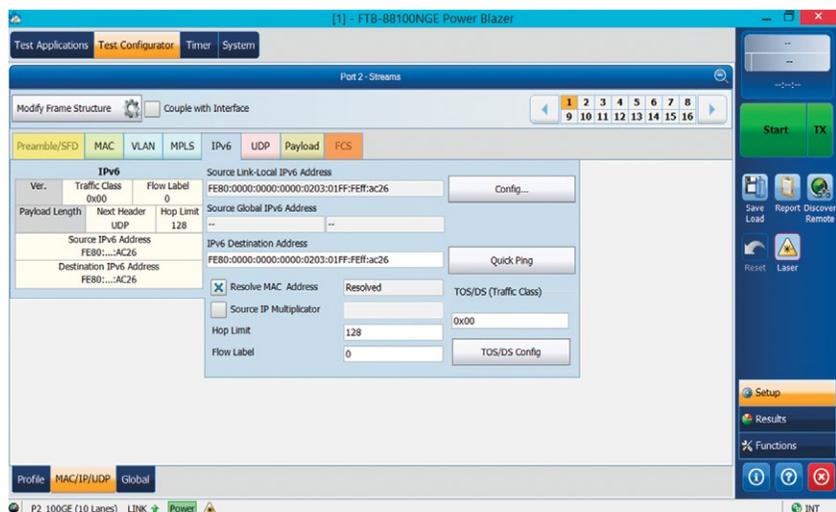


图 140. EXFO 的流创建界面。

3.14. 基于分组交换的POTN设备对ODUk/ODUflex客户端信号的时钟性能测试

在POTN网中，必须支持频率和时间同步。频率同步应支持客户端信号的频率直通模式和网络时钟同步；时间同步应支持光监控信道（OSC）带外模式或ODUk带内模式。对于基于OPF分组交换的网元，在OIF-OPF010文件中，要求在基于分组交换的设备能够具备保留ODUk/ODUflex客户端信号的时钟信息的能力，其中要求：分组交换的最大时延应小于100 μ s，时延变化小于50 μ s；应使用一种机制来补偿分组交换带来的时延，该预设值与最大时延的关系为：最大交换时延 < 预设时延值 < 100 μ s。

EXFO的SychWatch-110是一款频率和时间同步测试仪。SyncWatch-110可具有精确的基准——高精度铷基准时钟或内置的GPS接收器。其主基准时钟精度超过G.811中规定的主基准时钟（PRC）性能。当GPS信号中断时，每个标准时钟都可以提供精准的保留功能，并在现场测试实现稳定的测量。



图 141. POTN设备和网络时钟性能测试。

EXFO的SyncWatch-110设备还可以采用由客户端提供的外接标准时钟，从而充分利用现有的同步基础设施，并确保测量结果采用和本地标准时钟一样的源时钟。SyncWatch-110可实时测量时间间隔误差（TIE），并可计算和显示任意一点的最大时间间隔误差（MTIE）和时间漂移（TDEV）测量结果。

测试方法和连接示意图：测试的主要内容包括同步网、SyncE和1588v2相关的参数，其中最重要的参数包括用于SyncE的MTIE、TIE和TDEV，以及用于1588v2时钟分布的双向丢包、时延和时延变化性能。

EXFO的Sychwach-110可与单个高精度基准（如铷接口）相连，其一个或两个输入端口用来进行典型的设备基准测试。此外，SyncWatch-110可同时在两个输入端口上测量性能，并根据基准对两个设备进行准确的基准测试。测试连接如右图所示：

测试结果：图135显示的是TIE测试结果，而图136显示的则是MTIE测试结果。

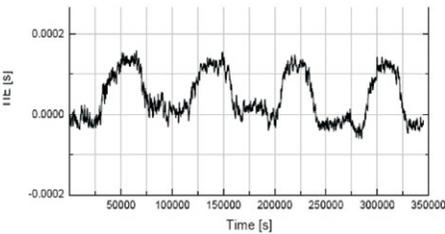
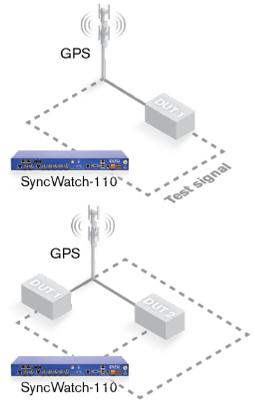


图 142. TIE测试结果。

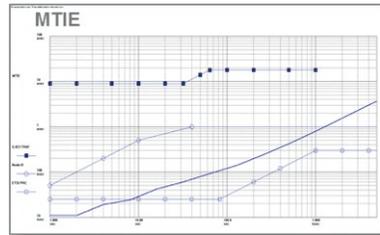
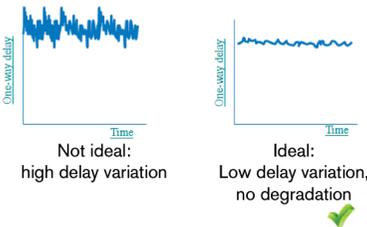
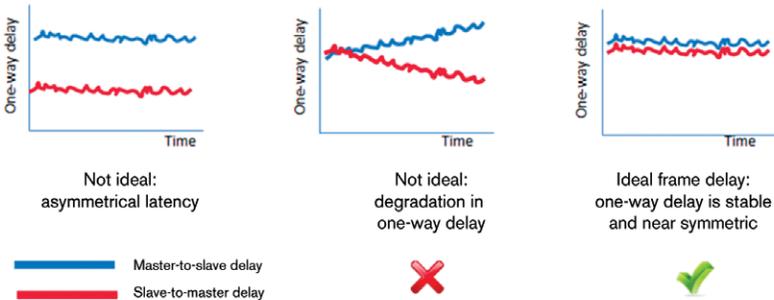


图 143. MTIE测试结果。

对于IEEE 1588v2 PTP测试，主要考虑的是时延的不对称性和时延变化。下图显示的是典型的时延对称示例。在左边的图中，主时钟到从时钟的时延要高于从时钟到主时钟的时延，因此结果是未通过测试。在中间的图中，单向时延出现严重劣化，这同样导致未通过测试。当每个方向的时延都对称时，可以获得理想的结果。



右边的图是单向时延变化的示例；在这个示例中，时延变化过高，导致未通过测试。

3.15. OTN和POTN网中的多业务应用鉴定

OTN或POTN必须能够应对不同类型的流量，才能使得其投资长期可行。TDM电路仍然作为一种传统连接介质被广泛应用。在很多应用中，这些电路仍然可以提供有效的带宽和保证的服务，且由于广泛部署，因此不能在短期内将它们全部替换。以太网和基于IP的分组网络现在是下一代网络的首选技术，这是因为它们的单位比特成本极低、易于部署、维护且被普遍接受。

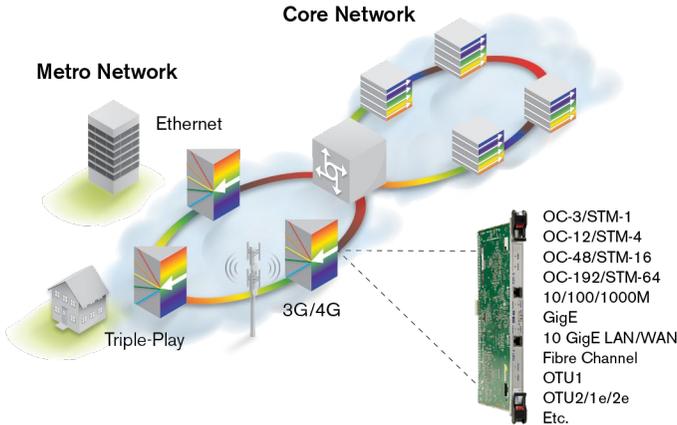


图 144. OTN和POTN环境。

POTN可通过实施边缘到边缘的伪线仿真（PWE3）转发来提供应对两种流量的功能。该封装方法旨在将TDM和分组传输的信息分段并封装到分组网络上，从而使这两种流量都可以在POTN上透明传输，并确保传输封装和被封装数据之间相互独立、互不影响。

如下图所示，FTBx-88200NGE的多端口测试功能可以满足网络维护的要求：



- ✓ 紧凑的10M至10G现场解决方案
- ✓ 在一个模块中实现真正的10M至100G多业务测试，可通过软件选件进行配置
- ✓ 通过软件选件，10G模块可以升级到40G/100G
- ✓ 支持CFP4/QSFP+/QSFP28

图 145. FTB-2 Pro平台和FTBx-88200NGE模块。

3.16. 40GE/100GE接口Ping和路由跟踪

Ping和路由跟踪可用来向远端设备发送信息包，从而检索信息。Ping可以测试连接速度、到目标的“距离”以及连接是否运行正常。路由跟踪功能会跟踪数据包从源设备到目标地址所采取的路径。以下示例采用了EXFO产品的GUI。

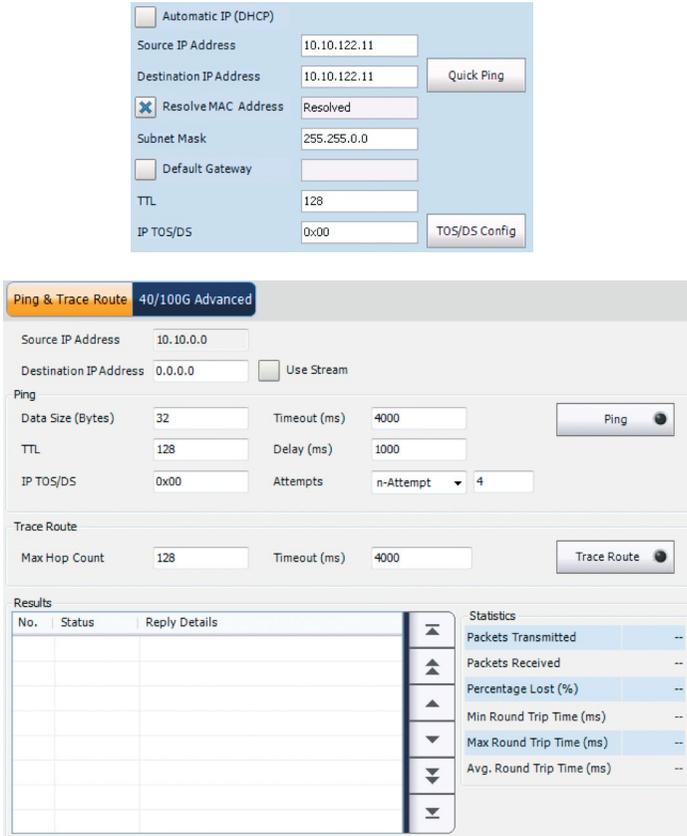


图 146. Ping和路由跟踪。

4. 缩略语——传输与数据通信

ADC	模数转换器	OH	开销
APS	自动保护倒换	OIF	光互联网论坛
BDI	后向故障指示	OPU	光通道净荷单元
BEI	后向错误指示	OSNR	光信噪比
BER	误码率	OTL	光通道传输通道
BIAE	后向输入定位错误	OTN	光传输网
BIP-8	比特交织奇偶校验8	OTU	光通道传输单元
CAUI	100 Gbit/s连接单元接口	PAM4	脉冲幅度调制
CD	色度色散	PCC	保护通信通道
CFP	C型可插拔光模块	PCS	物理编码子层
CGMI I	100 Gbit/s介质无关接口	PM	通道监测
CPRI	通用公共无线接口	PMA	物理介质连接
DAP I	目标接入点标识	PMD	偏振模色散
DPSK	差分相移键控	PMOH	性能监测开销
DQPSK	差分正交相移键控	POTN	无源光传输网
DSP	数字信号处理器	PRBS	伪随机比特序列
EVM	误差矢量幅度	PSI	净荷结构标识
EXP	实验	PT	净荷类型
FAS	帧定位信号	QPSK	正交相移键控
FC	光纤通道	RES	预留
FCS	帧校验序列	RF	射频
FEC	前向纠错	RMS	均方根
FTFL	故障类型和故障位置	ROADM	可重构光分插复用器
GMP	通用映射规程	RS	调和子层
GPON	千兆无源光网络	RZ	归零
IAE	输入定位错误	SAPI	源接入点标识
IEC	国际电工委员会	SDH	同步数字序列
IP	互联网协议	SFD	帧首定界符
JC	调整控制	SNC	子网连接
LAN	局域网	SNR	信噪比
LLC	逻辑链路控制	SOAM	服务操作、管理和维护
LWDM	局域网波分复用	SOP	偏振态
MAC	介质访问控制	SP	偏差点
MDI	介质相关接口	STAT	状态
MDIO	管理数据输入/输出	TC	串联连接
MFAS	复帧定位信号	TCM	串联连接监测
MSI	复用结构标识	TCM ACT	串联连接监测激活
MSIM	复用结构标识不匹配	TS	支路时隙
NRZ	不归零	TTI	路径跟踪标识
ODTU	光通道数据支路单元	UI	单位时间间隔
ODTUG	光通道数据支路单元群	VLAN	虚拟局域网
ODU	光通道数据单元	GCC	通用通讯通道

关于EXFO

EXFO为全球通信业的固定和移动网络运营商、网络级公司和设备制造商开发更加智能的测试、监测与分析解决方案。客户依靠我们来确保出众的网络性能、可靠的服务以及对用户的洞察力。他们相信我们的独特设备、软件与服务能够加快与光纤、4G/LTE和5G部署有关的数字化转型。他们信赖我们在自动化、实时故障诊断与大数据分析方面的专业技术，这些对他们的经营绩效至关重要。我们花费了30多年的时间赢得这种信任，今天我们在超过25个国家有2000多名员工，在实验室、现场、数据中心等地方与客户携手合作。欲知详情，敬请访问[EXFO.com](https://www.exfo.com)或登录[EXFO博客](#)，了解公司最新情况。

如欲获得我们产品和服务的详细信息，或下载技术和应用说明，敬请访问公司网站：

www.exfo.com。