

VIAVI

G.654E 长距离高速传输型 光纤测试案例分享

G.654E 长距离高速传输光纤的主要指标

- 中国电信开拓创新，2021年9月22日，建成业界首条全 G.654E 陆地干线光缆并完成业界首次基于 G.654E 光缆的 400Gb/s 超长距现网传输试验。
- ITU-T 自 2013 年 7 月开始讨论这种适用于陆地传输系统的 G.654 光纤 (G.654.E)，可以在保持与现有陆地应用单模光纤基本性能一致前提下，增大光纤有效面积，同时降低光纤衰减系数，从而提升 400G 传输性能。
- ITU-TG.654 标准上一版本发布于 2012 年，共包含 A、B、C 和 D 四个子类，主要区别在于 MFD 范围和宏弯性能上。在 G.654 最新版本修订中，针对陆地高速相干传送系统应用，增加了 E 子类。G.654.E 光纤标准主要修订内容
- 在 2016 年 9 月 ITU-TSG15 全会上，G.654 标准修订完成并通过，标志着应用于陆地高速传送系统的 G.654.E 光纤正式完成标准化工作。此次会议主要针对 G.654.E 光纤的模场直径 (MFD) 与有效面积、宏弯损耗特性、色散参数和衰减系数等特性进行了规定。

- **模场直径 (MFD) 与有效面积**
- G.654.E 光纤在 1550nm 区的 MFD 范围为 11.5 μ m ~ 12.5 μ m，相应的有效面积范围从 110 μ m² 到 130 μ m²，相比现有 G.654.B 子类 (9.5 μ m ~ 13 μ m)，缩严了 MFD 标称值范围，但容差仍然保持为 $\pm 0.7\mu$ m。
- **宏弯损耗特性**
- 陆地应用工作环境复杂，温度和气候等复杂多变，外部环境对光纤性能影响较大；因此 G.654.E 光纤弯曲性能尤为重要，需要远优于海底应用的 G.654 光纤。
- 因此针对 G.654.E 子类，其标准要求在 100 圈 30mm 半径打环时，在 1625nm 处的最大附加衰减应不超过 0.1dB，要远优于 G.654.B 子类 (0.5dB) 和 G.654.D 子类 (2dB)，达到与 G.652.D 完全相同的弯曲性能，以打消有效面积增大可能导致陆地应用弯曲性能劣化的顾虑。
- 在中国联通现网试点工厂测试中，基于 ITU 规范的测试方法，分别测试了 1550nm 和 1625nm 处的宏弯损耗，可发现附加衰减基本都小于 0.1dB，其中 81.8% 要小于 0.05dB。

G.654.E 光纤性能指标要求

- 衰减系数 - 标准文件正文中明确指出在 1550nm 区域, 可以实现 0.15dB/km 到 0.19dB/km 的光纤衰减系数, 其中最低衰减系数取决于制造工艺、光纤材料与设计以及光缆设计。
- 色散参数 - 由于 G.654 光纤主要工作波长区域在 1530nm ~ 1625nm, 因此针对该波长区规范了色散和色散斜率的范围, 其中在 1550nm 处, 色散最大值 Dmax 为 23ps/(nm·km), 最小值 Dmin 为 18ps/(nm·km), 色散斜率最大值 Smax 为 0.07ps/(nm²·km), 最小 Smin 为 0.05ps/(nm²·km)

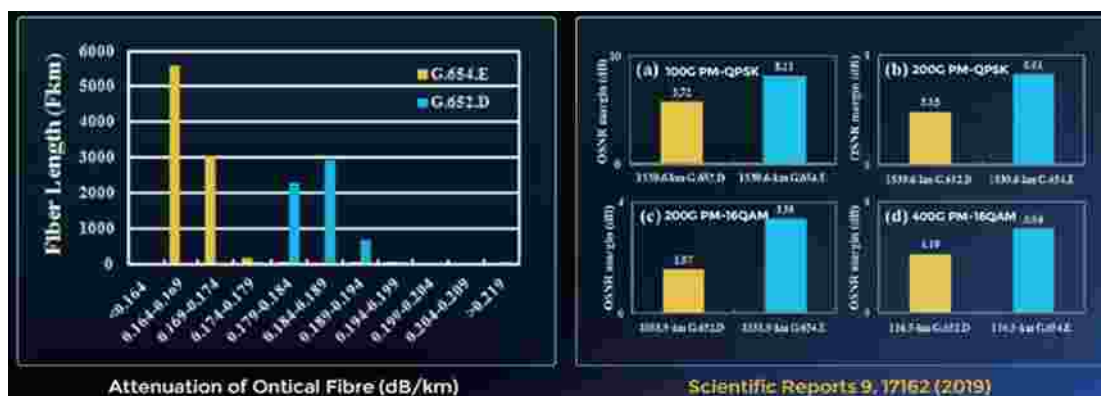
项 目		单 位	技 术 指 标
1550nm 模场直径		μm	12.5±0.5
截止波长 λ _{cc}		nm	≤1530
30mm 半径, 100 圈, 1550nm\1625nm 处宏弯损耗最大值		dB	0.05
微弯损耗		dB/km	参考项
衰减系数	1550nm	dB/km	≤0.17
	1625nm	dB/km	≤0.20
衰减波长特性	1530~1575nm 波长范围内	dB/km	≤0.03
衰减均匀性		dB/km	光纤衰减曲线应有良好的线性并且无明显台阶。 用 OTDR 检测光纤时, 在 1550nm/1625nm 处任意 500m 光纤的衰减应不大于 $(\alpha_{mean} + 0.10\text{dB})/2$, α_{mean} 是光纤的平均衰减系数。
色 散 特 性	1550nm 波长的色散系数	ps ² /(nm.km)	17~23
	1550nm 波长的色散斜率	ps ² /(nm ² .km)	0.05~0.07
	1530nm 到 1625nm 间的色散参数(D)	ps ² /(nm.km)	$17 + 0.05(\lambda - 1550) \leq D \leq 23 + 0.07(\lambda - 1550)$
偏振模色散 1550nm		ps/√km	≤0.15

400G+ 的需求使 G.654.E 成为超高传输技术光纤主流

- 随着 5G 时代的数据流量不断增长, 承载网的数据传输和带宽压力不断增加, 骨干网传输速率将从 100G 不断向 200G/400G 等更高速率升级。超 100G 网络在整体市场份额中将超过 60%, 并且 400G+ 将成为超 100G 网络的主流应用。从骨干网层面来看, 单波 400G 即将开启, 并进入长周期。
- 因此, 提前部署支持 200G、400G 系统的光纤光缆产品是建设高速信息网络的基础。但是, 现网

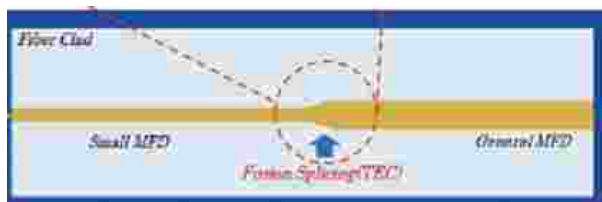
中使用的 G.652 光纤, 已经无法满足未来光传输网络超高速率、超大容量、超长距离的传输需要。

- 将视线回落到光纤技术的发展, 其正呈现出三大趋势: 低 / 超低损耗光纤、大有效面积光纤、大有效面积和低 / 超低损耗光纤。因此, 国内厂商在选择技术路径时, 基本都选择了将大有效面积和低 / 超低损耗结合, 而同时满足超低损耗和大有效面积两大特性的超低损耗大有效面积 G.654.E 光纤是 400G/1T 系统的最佳选择。



G.654.E 光缆的熔接机熔接及测试需求

- 工程方面，主要反馈熔接一次成功率低，导致光缆接续时间长。通过分析，主要原因来自于：一是环境因素，工程反映不同季节熔接成功率差异大，车内施工有利于改善质量；二是装备原因，熔接机自动接续模式下，熔接损耗缺乏稳定性。
- G.654.E 较宽泛的模场直径——不同厂家纤芯互熔产生较大接续损耗（高达 0.2dB）
- G.654.E 的大有效面积——某些熔接机无法准确识别纤芯、包层，需要设为包层对准、甚至多模模式才能熔接，对熔接损耗有潜在影响
- G.652.D 和 G.654.E 在折射率剖面设计、模场直径差异明显——二者互熔存在熔接损耗过大、反射明显。



熔接损耗数据	G.654 和 G.652 熔接, 比同种光纤熔接时大 0.081 dB (统计数值)
法兰损耗数据	G.654 和 G.652 之间法兰连接损耗, 比同种光纤法兰连接时大 0.102 dB (统计数值)

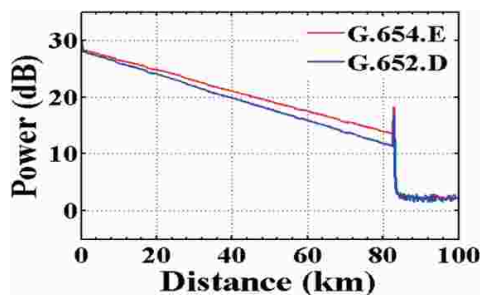
需要 OTDR 的更加精准的双向测试验收！

G.654.E OTDR 测试方案

MTS4000、MTS6000 测试平台



4100B/C
+
E8136C



*** 电信 G.654E 长途光缆 - OTDR 测试仪表

XX 电信 G.654E 长途光缆 OTDR 测试报告

测试时间：2021 年 10 月 29 日

测试地点：中国电信 *** 分公司

测试人员：VIAVI 仪表厂家、** 电信工作人员

测试仪表：VIAVI MTS-6000A E8136D

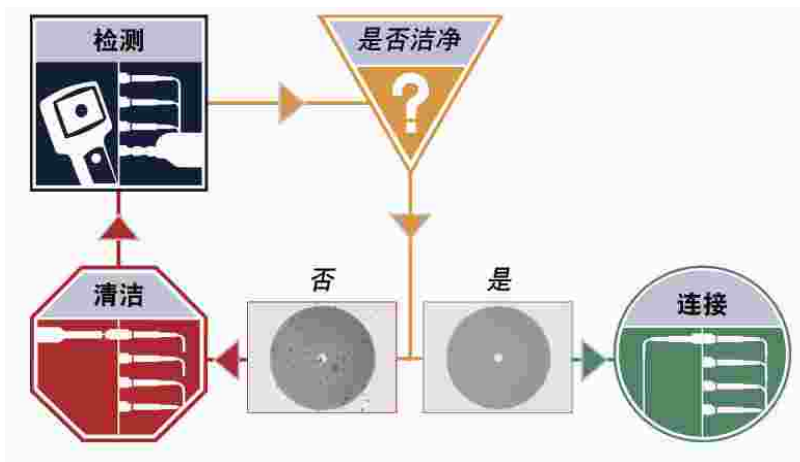
仪表主要技术参数：

MTS-6000A D8136D	
激光安全等级	(21 CFR) 1 级
数据点数最多	256,000 个数据点
显示范围	0.1 千米至 400 千米
采样分辨率	4 厘米
距离精度	(±0.75 米) ± (采样分辨率) ± (1.10-5 x 距离)
衰减分辨率	0.001 dB
衰减线性	±0.03 dB/dB
中心波长	1,310/1,550 纳米 ±20 纳米, 1625 纳米 +15/-5 纳米
RMS 动态范围	50/50/50 dB
脉冲宽度	3 纳秒至 20 微秒
事件盲区	0.5 米
衰减盲区	2.5 米

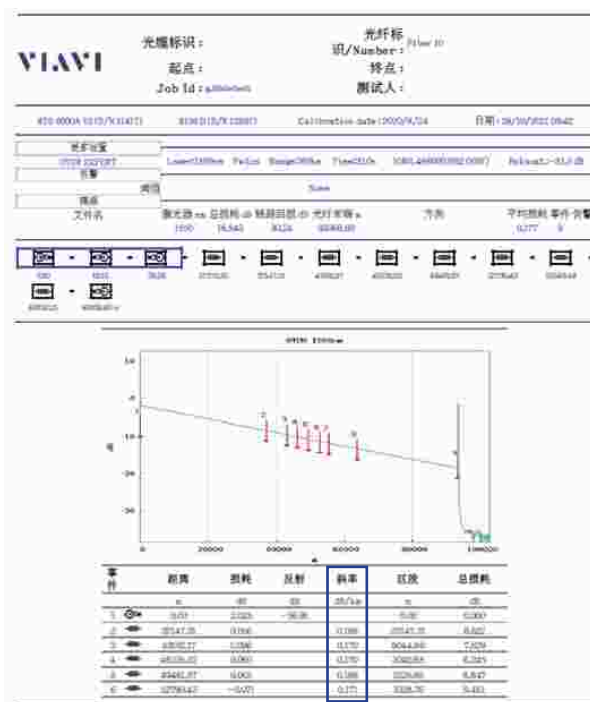


光纤端面检测 - 先检查，后连接

确保符合 IEC 61300-3-35（端面验收标准）的简单方法是遵循先检查，后连接™（IBYC）最佳实践。检查连接的两侧非常重要 - 例如，检查连接的公头端和母头端的连接器。检查连接的两侧是确保连接没有污染和缺陷的唯一方法。使用 IBYC 时，请务必先检查光纤 - 无需清洁干净的端面。如果脏了，请清洁并再检查以确认清洁是否有效。只有当两个连接器都干净时，才能进行连接。



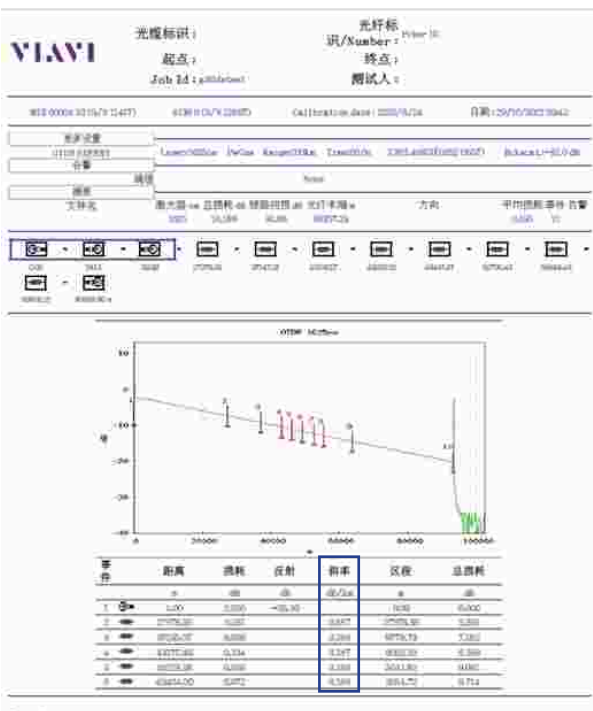
1550nm 波长结果分析:



事件	距离	消耗	反射	斜率	区段	总消耗
1 	35549.411	0.145		0.179	3850.06	11.897
8 	60018.22	0.059		0.180	3186.73	11.375
9 	93388.177		-135.72	0.171	3950.387	16.543

VIABI G654.E 分析配置文件测试结果可直观反映长途光纤，并针对其中的光纤接头，熔接，连接器等有明显标注、解释，方便非专业技术人员查看，理解。在 1550nm 波长下，测得光缆总损耗 16.543dB（包含链路中的所有接头损耗），平均损耗 0.177dB，链路回损 30.24dB，以及各分段的长度，斜率（小于 0.17dB 或等于 0.171dB/km，其中包含接头及熔接）等参数。同时也可呈现真实测试的 OTDR 曲线。

1625nm 波长结果分析:

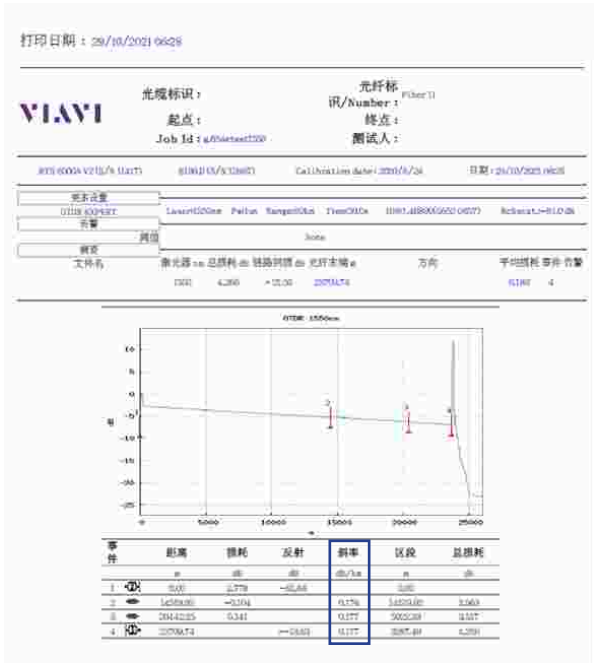


事件	距离	损耗	反射	斜率	区段	总损耗
1	0.00	0.00	-0.00	0.187	10.00	0.00
2	52772.45	0.138	-0.138	0.188	3396.45	10.415
3	52853.25	0.054	-0.054	0.182	3878.50	10.852
4	63856.90	0.054	-0.054	0.165	8165.05	12.519
5	93557.23	0.165	-0.165		25540.33	18.188

VIAVI G654.E 分析配置文件测试结果可直观反映长途光纤，并针对其中的光纤接头，熔接，连接器等有明显标注、解释，方便非专业技术人员查看，理解。在 1625nm 波长下，测得光缆总损耗 18.188 dB（包含链路中的所有接头损耗），平均损耗 0.195dB，链路回损 30.66dB，以及各分段的长度，斜率（均小于 0.19dB/km，其中包含接头及熔接）等参数。同时也可呈现真实测试的 OTDR 曲线。

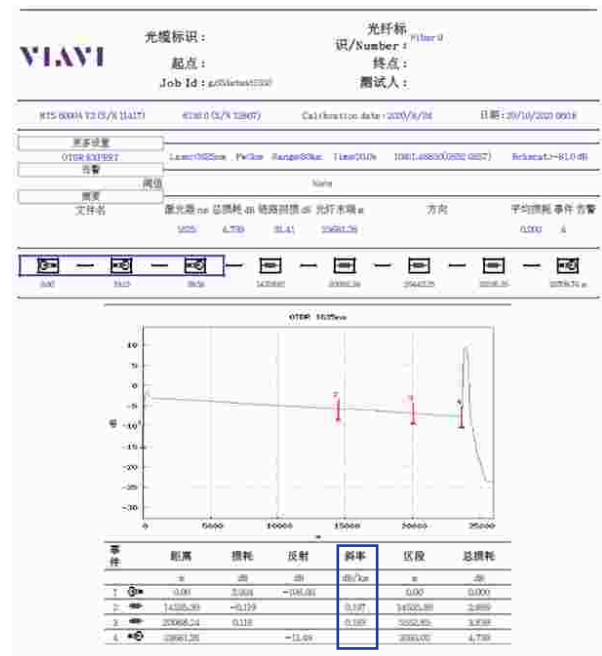
1550nm 波长结果分析:

VIAVI G654.E 分析配置文件测试结果可直观反映长途光纤，并针对其中的光纤接头，熔接，连接器等有明显标注、解释，方便非专业技术人员查看，理解。在 1550nm 波长下，测得长途光缆总损耗 4.264dB（包含链路中的所有接头损耗），平均损耗 0.18dB，链路回损 30.94dB，以及各分段的长度，斜率（均小于 0.177dB/km，其中包含接头及熔接）等参数。同时也可呈现真实测试的 OTDR 曲线。



1625nm 波长结果分析：

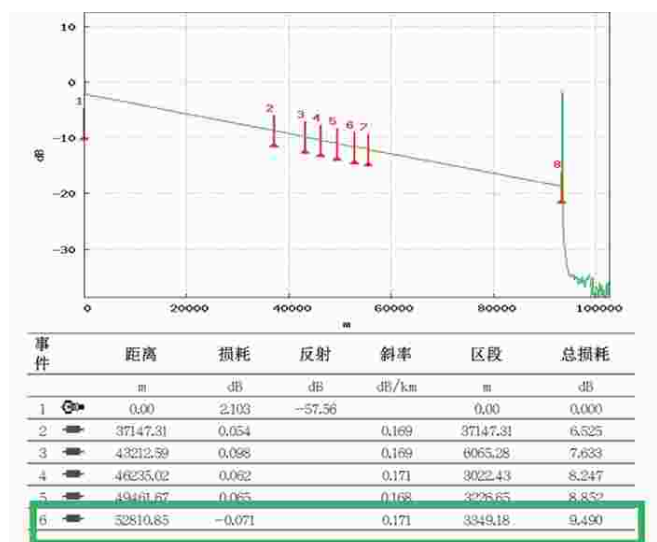
VIAVI G654.E 分析配置文件测试结果可直观反映长途光纤，并针对其中的光纤接头，熔接，连接器等有明显标注、解释，方便非专业技术人员查看，理解。在 1625nm 波长下，测得长途光缆总损耗 4.739 dB（包含链路中的所有接头损耗），平均损耗 0.200dB，链路回损 31.41dB，以及各分段的长度，斜率（均小于 0.2dB/km，包含接头及熔接）等参数。同时也可呈现真实测试的 OTDR 曲线。



熔接增益及双向测试

在 XX 电信的测试中，我们发现每条链路都出现了增益现象。如右图 *** 到 ** 枢纽段的测试结果，第六个事件的损耗为 -0.017dB，此为熔接增益现象。为准确测试该事件点的损耗，需执行 OTDR 双向测试。

双向分析的概念如下：如果在两个熔接的光纤之间存在后向散射系数的不匹配，则根据测量的方向，此差异的代数含义将会改变。即，如果在一个方向上执行测量，则此差异作为增益出现。如果在相反方向测量，则此差异作为损耗出现。此差异将与测量过程中的实际熔接损耗相结合。然而，如果在两个方向上所读取的熔接损耗读数被平均，则后向散射的影响将被减去，生成实际的熔接损耗。



为何要双向测试

消除光纤增益影响，测试熔接点实际损耗，科学辅助工程验收



真正的熔接损耗: $(\text{Event}_{\text{loss A} \rightarrow \text{B}} + \text{Event}_{\text{loss B} \rightarrow \text{A}}) / 2$
@ 1550 nm : **0.049 dB** ✓

传统双向测试很麻烦，效率很低

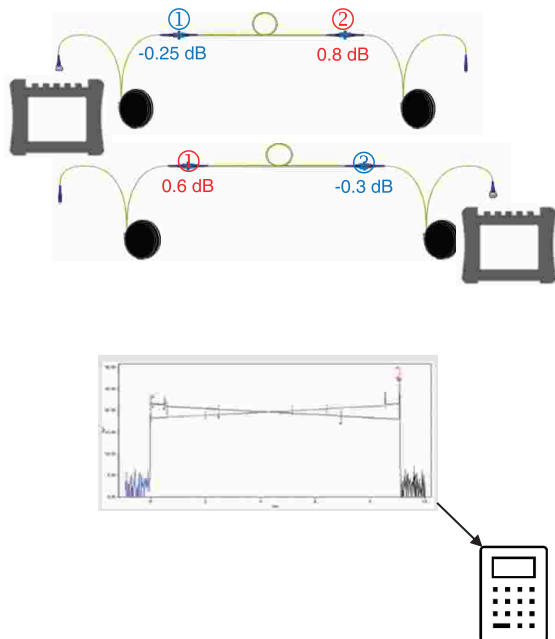
第一步：做一端测试 A-B:

第二步：做另一端测试 B-A:

第三步：将测试数据导出到电脑中，使用专用的分析软件，做双向数据合并分析，软件给出双向测试结果。

第四步：根据电脑软件的数据分析结果，在次去处理故障问题，不能实时给出测试结论。

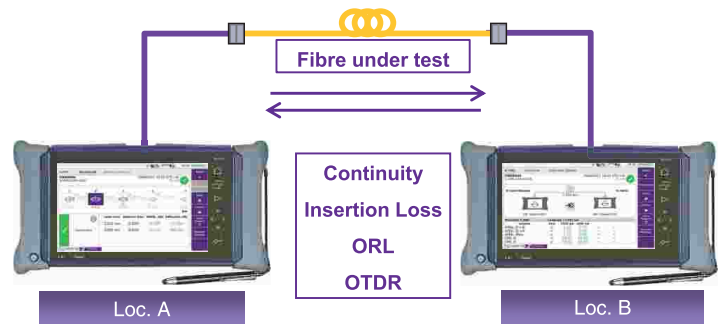
重复以上过程。



TestPRO/FCOMP: 智能真双向测试

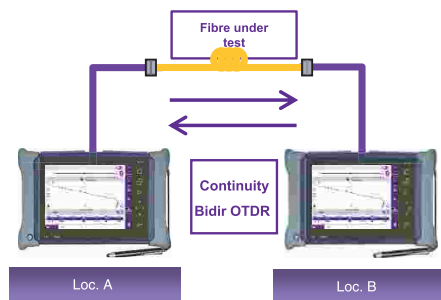
特点：

- 自动智能双向测试
 一键测试，基于一个光口
- 连续测试
- 全面测试出所有指标：
 双向测试插损及反射指标
 双向 OTDR 曲线
- 远程控制
- 两台 OTDR 自动交互
- 测试设备直接生成双向测试报告，当场给出测试结果。



自动真双向测试

特点	VIAVI TRUE Bidir OTDR
更全面的光纤指标及联通测试	Yes
高效自动化测试	Yes
测试实时给出双向测试结果，方便即时处理故障，查找问题	Yes



See results in the field with TrueBidirOTDR license option(averaged values):



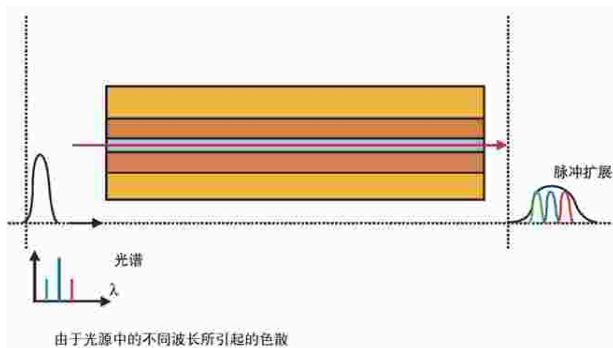
Use of automatic dashboard with StrataSync option:



色散

在传输过程中，影响信号的另一个因素是色散。色散减少了有效的可用传输带宽，单模光纤有两种类型的色散：色散以及极化模式色散。

色散（CD）的出现是因为光脉冲是由不同波长组成的，每个波长以不同的速度沿着光纤进行传输。当光脉冲到达接收机时，这些不同的传输速度展宽了光脉冲，减少了信噪比，增加了比特误码。



色散由三个主要参数来定义：

- 给定波长上的延时，以 ps 表示。
- 色散 (D) 系数，以 ps/nm 表示。它对应于延时的漂移与波长之间的关系（或者对应于在给定波长上表示延时与距离之间关系曲线的斜率）。如果它相对 1 km 进行归一化，则它被表示为 ps/(nm·km)。
- 斜率 (S)，以 ps/(nm²·km) 表示。它对应于色散系数的漂移作为波长的函数（或者表示在给定波长上，色散作为距离的函数曲线的斜率）。

色散系数（相对 1 km 进行归一化）以及斜率依赖于光纤的波长。色散主要依赖于生产过程。当设计不同类型的光纤用于不同的应用与不同的需求时，光缆生产厂家考虑色散的效应，例如标准光纤，色散偏移光纤或者零色散偏移光纤。

极化模式色散

极化模式色散（PMD）是单模光纤的一个基本特性。它影响传输速率的大小。PMD 是由于给定波长上的能量的传输速率的不同而引起的，PMD 被分为两个极化轴，这两个极化轴互相垂直（如下图所示）。引起 PMD 的主要原因是光纤设计的非圆度以及外界加在光纤上的压力（宏弯、微弯、扭曲与温度变化）。



PMD 也被称为所有差分群时延 (DGD) 的平均值，以 ps 表示。它还可以被称为 PMD 系数，此系数与距离的方根值有关，被表示为 $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$

当传输脉冲沿着光纤传送时，PMD(平均 DGD) 引起传输脉冲展宽。此现象会生成失真，增加了光系统的比特误码率 (BER)。PMD 的影响是它限制了链路上的传输比特率。因此，非常重要的一点是了解光纤的 PMD 值以便计算光纤链路的比特率限值。

G.654.E 干线色散测试方案

- 测试光源、PMD/CD 分析仪集成方案，全部为便携式仪表方案，电池供电
- 测试距离长，跨度大，精度高，速度快。



OBS-550



MTS6000+ODM

总结

- 中国电信在国内率先建成该干线光缆、推动了 G.654E 产业链的成熟、对干线光缆网从 G.652D 迈入 G.654E 新型光纤时代具有引领作用，对建设绿色低碳全光网络具有积极重要的示范意义。
- 使用 VIAVI 仪表可准确测试 G.654.E 长途光纤斜率，损耗和光纤距离。
- 测试中可准确判断连接器，熔接点等各种事件类型。
- 仪表支持智能链路分析功能，可智能图形化呈现测试结果，便于查看。同时对于事件点给出原因分析，便于后续故障处理。
- 仪表动态范围达到 50/50/50dB (1310/1550/1625nm)，超高动态范围可测试更远距离。
- 仪表的事件盲区和衰减盲区分别为 0.5/2.5 米，更好的盲区可保证更高的测试精度。
- MTS6000+ODM, OBS-550 色散测试方案，测试距离长，跨度大，精度高，满足 PMD/CD 测试分析的所有需求。
- FiberComplete - OTDR 双向测试能够更精确，更真实给出熔接 / 事件损耗。
- 为了能够更加全面的测试 G.654E 光纤具备优异的光学性能。VIAVI 的测试仪表可以为 G.654E 的现场验收及测试给以更大的帮助与支持。
- 仪表采用基于 LINUX 研发的专用仪表操作系统，在运行稳定性和安全性方面有更多优势。

