

测试架空光缆的偏振模色散

简介

偏振模色散 (PMD) 是高比特率光传输系统的一个限制参数。为了确定光纤是否适合支持 10 Gb/秒、40 Gb/秒甚至 100 Gb/秒等高速传输，测试 PMD 至关重要。与偏振相关的效应可能对许多环境限制很敏感，例如光缆中的运动会导致光纤中光的偏振状态 (SOP) 发生变化。SOP 中的这一变化会影响一些 PMD 测试方法（以及一些先进的传输系统！）。了解这些偏振相关效应的动态及其对测量和系统的影响是当今光纤光学中最复杂的问题之一。

环境限制和机械变化如何影响 PMD?

光纤链路可以分解为短的离散部分或各个光纤段。每个部分的纤芯不对称性略有不同，导致了所谓的双折射，即光纤的折射率随着光的偏振状态的不同而发生变化。当偏振光（在任意给定点具有偏振态）沿着光纤从一个部分传播到另一个部分时，会发生强烈的偏振模式耦合变化，从而改变光信号的偏振态。

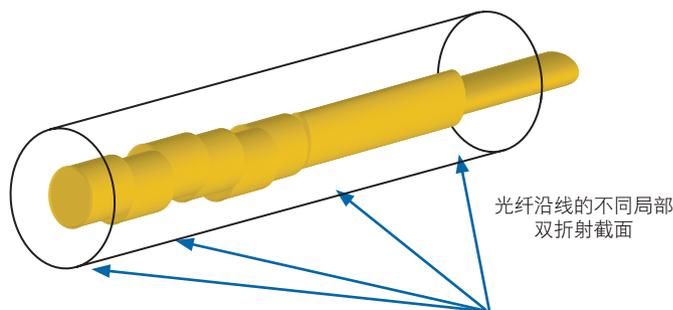


图 1: 随机集中的双折射截面

环境因素或外部应力（如温度或风对架空光缆的影响）会在光纤上引起一些应力诱发的双折射，并引起沿光纤链路的偏振模式耦合的随机变化。光纤双折射的变化将改变其 PMD。但是，应当注意，安装良好的优质光缆将设计为将光纤与导致光纤 PMD 变化的应力和应变隔离开来。



图 2: 电信光纤中的强模式耦合

一根光纤可以有几种传播模式，不同模式之间以及不同偏振态之间会发生耦合。

天气引起的架空光缆振动

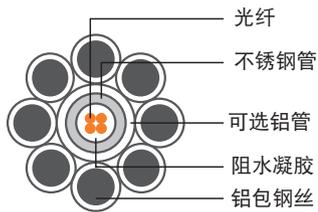
架空光缆广泛用于光纤链路。它们的安装费用比地下光缆要便宜。现场部署了各种类型的光缆，如 OPGW 光缆、ADSS 光缆、缠绕光缆和带状光缆。许多电信公司和运营商将这种链路用于他们的网络。

光功率地线 (OPGW)

光功率地线（也称为 OPGW，或在 IEEE 标准中称为光纤复合架空地线）是一种用于电力传输和配电线路建设的光缆。这种光缆结合了接地和通信的功能。OPGW 光缆的一种设计包含一个管状结构，其中有一根或多根光纤，周围有多层钢丝和铝线。另一种设计是用内含光纤的不锈钢管代替部分导线，如图 5 所示。OPGW 光缆在高压电塔的顶端之间延伸。



图 3: OPGW 的图片



中心松套管式

图 4: OPGW 光缆示意图



图 5: OPGW 光缆示例

风速

在某些条件下，如果风速很高，一些效应会干扰光纤的传输。风效应产生的振动可能会导致电缆共振和变形，例如弯曲。因此，承受应力和扭曲的光纤将经历其双折射的变化：该参数改变随波长（甚至光纤的 PMD）变化的 DGD 的分布。

阵风

阵风被定义为突然而短暂的风力增强。阵风可以达到比平均风速高 50% 的速度。阵风的速度用千米/小时或米/小时来表示。当瞬时风速超过平均风速 18.5 至 27.8 千米/小时时，气象学家就会使用“阵风”一词。当风速差达到 27.8 到 46.3 千米/小时时，就会用“强风”这个词，当时速超过 46.3 千米时，就会用到“猛烈的阵风”（法国气象局）。

阵风会对光缆产生影响，因为它可能会导致振动和高振幅运动。它们会造成光缆弯曲和轻微变形。这显然对双折射和偏振有影响，因此对 PMD 也有影响。

光缆舞动（振动）

舞动是一种在温度足够低以及特定风力条件下出现的现象。从力学的角度来看，舞动改变了静力系数，引起了趋向于椭圆的变形。舞动失控振动的特点是频率低、振幅大。虽然有不同的方法来减小 OPGW 上的舞动效应，如“狗骨式”或 Stockbridge 阻尼器装置，但不受控制的振动具有频率低、幅值大的特点。它将对 SOP 产生显著影响，并可能对遇到这种效应的光缆中的光纤的 PMD 产生影响。

电流感应振荡（嗡嗡声）

嗡嗡声是高压线下非常容易听到的现象，会使光缆振动。在一些同时存在光纤和铜缆的架空光缆中，由于电力引起的振荡可能发生在 50 Hz 或 60 Hz（电网上的频率）。因此，会产生与电信号频率相关的 SOP 振荡。许多现场观察表明，光谱功率密度 S 与强度 I^2 的平方成比例地变化。这意味着 SOP 随电流 $I(t)$ 线性变化。

这种耦合是由载流电缆周围的磁场产生的。这种磁场可能以至少两种不同的方式影响光传输：要么通过某种机械振动间接影响，要么直接通过光纤中的磁光耦合影响。

由此产生的磁感应强度为 $B = \frac{I \cdot \mu_0}{2\pi \cdot d}$ ，其中 d 为距离， μ_0 为真空磁导率。

法拉第效应可以解释由于传输线的非完美平行性而导致的偏振对 B 的线性依赖； B 在光纤方向上具有空间变化分量。这会引入法拉第旋转，增加了随机效应，足以解释 SOP 的 50 Hz 振荡。因此，磁感应圆双折射也会影响 PMD 的统计变化。

对偏振和色散的影响

如上所述，架空光缆上的风可能引起双折射变化和偏振耦合随时间变化。这些直接转化为 DGD 图相对波长的时间变化，以及主要偏振态图相对波长图的时间变化。更广泛地说，链路的平均 DGD (PMD) 会波动。这些波动是真实存在的，也是链路 PMD 动态变化的特点。

当然，人们期望完美的测量工具能够准确地监控这些波动。正如我们将在下面看到的，不同的测量工具受光缆移动的影响不同。

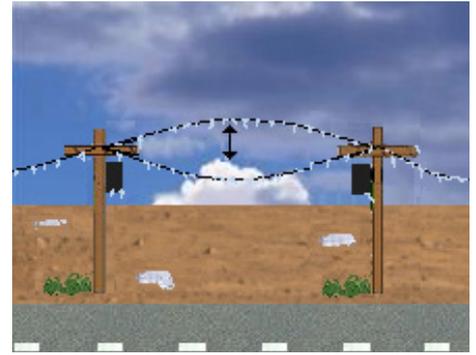


图 6：架空光缆上的结冰舞动效应

PMD 测试方法对机械干扰的理论敏感性

根据所使用的测试方法，测试仪器可能会受到光缆波动的干扰。让我们区分两种类型的干扰：

第一类干扰

一些仪器对被测光纤输入端和输出端的偏振发射状况很敏感。对于这种测试仪器，光缆从一个测量值到另一个测量值的波动会引起 PMD 读数的变化，无论 PMD 本身是否发生变化。这必须被视为一个测量重复性问题。由于 PSP 随波长变化，这种变化在 PMD 较高时变得更快，所以当测量波长范围或 PMD 较大时，第一类干扰较小。模拟和测量证实，这种干扰与波长跨度 \times PMD 的平方根成反比。

这种干扰可以通过使用偏振扰频器或控制器，以及在几个发射状况下对 PMD 测量值求平均值来减少。

第二类干扰

一些其他方法对测量期间偏振转移特性的波动敏感。在后一种情况下，会引入可变的测量偏差，影响测量的可重复性和绝对不确定性。

固定检偏器 (FA) 法

根据 IEC 61280-4-4 的定义，固定检偏器法记录通过偏振器的光谱，代表随波长变化的典型偏振变化。为了消除对光源光谱形状的任何依赖性，光谱也被记录（没有偏振器），然后通过偏振器的光谱被归一化。对于光纤 PSP，光源的偏振状态和偏振器的取向都不受控制，因此该方法表现出对发射状况的依赖性。然而，固定检偏器可具有 190 纳米的有效测量跨度（VIAVI 解决方案），第一类干扰显著减少。

在光谱记录过程中，风可能会产生偏振态旋转。实际上，可调谐滤波器或可调谐激光器的扫描总是需要有限的时间。如果扫描速度不够快，仪器将记录偏振的时间变化，并将它们与偏振的光谱变化同化，导致高估 PMD。因此，表征基于固定检偏器的仪器的稳健性的重要参数是可调谐滤波器扫描的速度。通常，VIAVI 解决方案的扫描速率为 200 纳米/1.5 秒 = 133 纳米/秒。

琼斯矩阵特征分析 (JME) (或斯托克斯参数评估) 法

此方法由 IEC 61280-4-4 定义，提供了偏振色散矢量的光学频率依赖关系的完整信息。这个矢量的大小是差分群时延 (DGD)，它的取向给出了被测光纤的主要状态。在这些频率中的每一个频率下，偏振控制器被调节到 3 种不同的偏振态（例如，线偏振光到被测光纤为 0° 、 45° 和 90° ）。输入端的 3 种已知偏振态和在输出端记录的偏振信息提供了随波长变化的被测光纤完整传输矩阵。

原则上，该测量中不存在第一类干扰。这种方法与固定检偏器法在记录过程中对光纤运动的依赖程度相同。为了实现与固定分析仪解决方案相同的稳健性，JME 需要在非常短的时间内执行波长扫描，这增加了必须为 3 个输入状态获取 3 个光谱的难度。

干涉测量法：传统 (TINTY) 方法

该方法由 IEC 61280-4-4 定义，记录通过偏振器的透射光谱的干涉图。众所周知，自从张伯伦的干涉光谱学工作以来，干涉图等价于光谱的傅立叶变换；因此，获得的信息在数学上等同于固定检偏器。在不控制偏振发射状况的情况下，该方法会受到第一类干扰的影响。与固定检偏器的主要不同之处在于，干涉仪工作在时间域而不是频谱域。这种差异有几个后果：

- 使用干涉设置不可能进行光谱形状归一化。透射光谱的形状在干涉图中产生一个自相关峰值。通常使用一种算法来去除不包含 PMD 信息的中心自相关峰值。
- 有效波长跨度是光源的宽度，相当于常规 SLED 的约 60 纳米全宽半高 (FWHM)。与波长跨度为 190 纳米的固定检偏器解决方案相比，它对第一类干扰的影响几乎是 2 倍。

干涉测量法：广义方法 (GINTY)

由 IEC 61280-4-4 定义的广义方法提供了一种消除自相关峰值的替代解决方案：它使用偏振分集检测方案的 2 个信号。然而，由于自相关峰值的宽度约为 100 飞秒，因此只有在被测光纤的每一端使用额外的偏振扰频器时，才能感受到这种方法的真正好处，从而提高测量结果的绝对不确定性。

与 TINTY 方法一样，广义方法具有波长范围相对较小（第一类不确定性）的相同缺点，并具有理论上不受光纤运动影响的优点。

波长扫描 OTDR 和偏振态分析 (WSOSPA)

这是一种基于 OTDR 原理的单端方法：来自可调谐光源的脉冲被发射到光纤中，并在远端被反射。光纤的往返传递函数通过分析随波长而变的偏振变化来表征，如偏振分集检测器所感知的那样。光纤的前向路径 PMD 是从可测量的往返 PMD 推导出来的。

使用偏振扰频器并对平均数据进行编译。因此，在光纤前端不会引入第一类不确定性。然而，远端的偏振发射状况不受控制，导致与固定检偏器法和干涉测量法 (INTY) 不同的第一类不确定性，作为往返不确定性引入。在数学处理中，会考虑来自成对波长的数据，并且光纤的偏振传递函数在此期间保持稳定是至关重要的，否则会导致较大的第二类不确定性。

这里，调谐时间也是一个重要的参数。根据 TIA-455-243，在通常相隔 270 皮米的两个波长处进行测量需要约 0.2 秒（波长步长取决于 PMD，此处是 3 皮秒 PMD 的被测光纤的典型值），这相当于 1.35 纳米/秒的扫描速率。同时，已经实施了软件对策，以便在检测到暂时 SOP 移动时，将所有测量值加倍并丢弃数据点。这种解决方案不能避免这样一个事实：如果干扰不变，测量点的数量将大大减少，增加了估计 PMD 的绝对不确定性，最终将不可能进行测量。

PMD 测量对风的敏感性综述

每种方法对光纤运动都有一定程度的敏感性和依赖性。

表 1 总结了各种测试方法对干扰的敏感性，以及在现场设备上有效实施的应对这些影响的解决方案。

第一类干扰				第二类干扰		
方法	敏感	可行的解决方案	实践中观察到的情况	敏感	可行的解决方案	实践中观察到的情况
FA	是	大跨度偏振扰频器	高达 190 纳米 VIAVI 高分辨率 包括扰频器	是	快速获取	133 纳米/秒 (典型值)
JME	否			是	快速获取	不适用
TINTY	是	大跨度偏振扰频器	60 纳米 无	否		
GINTY	是	大跨度偏振扰频器	60 纳米 无	否		
WSOSPA	是	大跨度偏振扰频器	146 纳米 (在一端上)	是	快速获取 丢弃数据	1.35 纳米/秒 (典型值) 已实施

表 1: 各种测试方法对干扰的敏感性

苏格兰的实地测试活动

2008 年 12 月的第一周，在格拉斯哥郊区（苏格兰）组织了一次各种测试方法之间的 PMD 比较活动。这些测试是应 TIA TR42.11 小组委员会的要求进行的。使用各种类型的架空光缆在不同的跨距上对每种方法进行各种测量。在一根光纤上测试 PMD 的同时，在另一根并行光纤上测量 SOP 的变化率。目标是确定 PMD 测量的重复性以及各种测试方法对 SOP 变化的敏感性。

实际示例

其中一个测量跨度是从兰布希尔到温迪希尔的 80 千米环路。光纤相当新，预计 PMD 值较低。顺便说一句，这是任何新光
缆部署都应具备的条件，尤其是在考虑高比特率传输时。

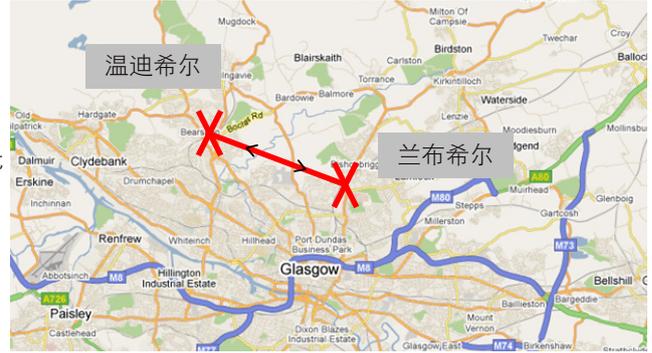


图 7：跨度 C 对比活动的地点

跨度 C	
位置 A: 兰布希尔	位置 B: 温迪希尔
日期	2008 年 12 月 4 日
光纤路线长度	20 千米（标称）
地下、空中电缆路线描述 (OPGW/ADS/Wrap)	OPGW – 相当新的路线，所以 PMD 应该很低。 测试配置环回两次，以提供 80 千米的路线
天气状况（温度、降水、风……）	天气阴沉，潮湿，温度略高于冰点，风很小

表 2：跨度 C 测量的测试条件

VIAVI 测试结果

宽带源是一个 OBS-500 独立单元，接收器模块是一个安装在 MTS-6000 主机中的 81DISPAP 模块，它提供了以下结果：

PMD 测试方法 5 – VIAVI (FA) 2008 年 12 月 4 日（星期四）					
	测试 1	测试 2	测试 3	测试 4	测试 5
PMD 总计（皮秒）	1.55	1.54	1.54	1.48	1.53
PMD 系数（皮秒/√千米）	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
数据文件名	5Cf1r1	5Cf1r2	5Cf1r3	5Cf1r4	5Cf1r5
测试时间	11:00:00	11:02:00	11:04:00	11:06:00	11:08:00
仪器设置	1449.2 至 1640 纳米波长范围				
平均值	1.528				

表 3：跨度 C 的 VIAVI FA 测量结果

这些现场测试表明，VIAVI 固定检偏器测量方法是稳定的，并提供了良好的重复性。事实上，DISPAP 模块表现出良好的性能和对偏振态的低敏感性。这是意料之中的，因为之前的实验室测试表明，VIAVI 解决方案即使在庞加莱球上的 SOP 变化速率达到每秒 1000 度时也能提供稳定的结果，如图 8 所示。

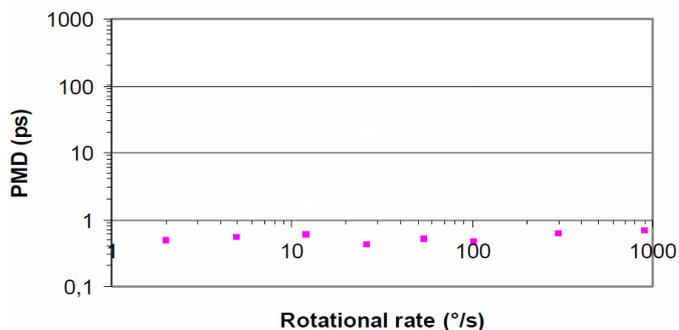


图 8: PMD 测量对放置在 50 千米光纤前的旋转半波片的敏感性 - 总插入损耗 = 12 dB

对跨度 C 光纤偏振态变化率的分析表明，即使在主要测量开始前一天风最大的时候，SOP 的变化率也远低于此值，如图 9 所示。

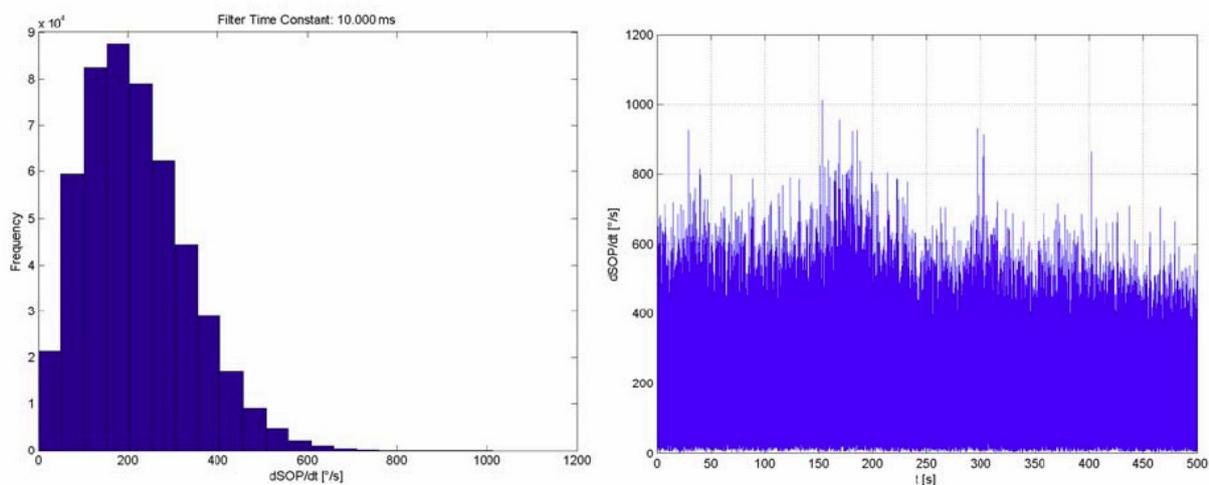


图 9: 路线 C - SOP 随时间的变化率直方图 (500 秒)

PMD 方法相互比较

图 10 显示了各种测量方法随时间而变的 PMD 测量值的变化。结果显示了从已公布的实验不确定度中提取的误差条形图。

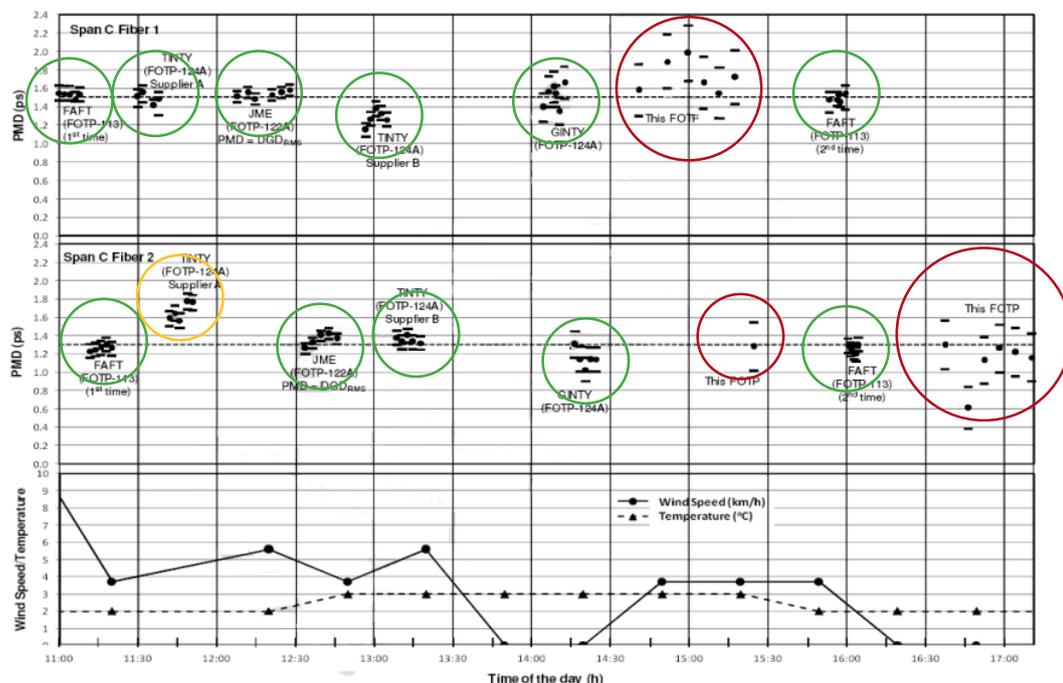


图 10：苏格兰比对活动期间不同方法的 PMD 测试结果 – 跨度 C

注释：在图上，“此 FOTP”对应于基于 WSOSPA 的测量方法

结果清楚地显示了不同方法之间不确定性和可重复性的差异。JME 和 FA 方法提供了最稳定的结果，同时也与所有方法的平均测量值最一致，TINTY 和 GINTY 方法相差不远（全部用绿色圈出）。

WSOSPA 方法给出了最差的结果（用红色圈出）。风级不显著，无法解释如此高的不可重复性和与所有其他方法的平均测量值的偏差。我们不能将 WSOSPA 方法的较低精度归咎于温度变化（在试验期间几乎稳定）风速（低于 10 千米/小时）。据推测，尽管有内部扰频器，WSOSPA 仍然对发射状况高度敏感，特别是光纤远端未知偏振耦合引入的往返不确定性。

结论

随着传输速度的提高，对任何光纤进行 PMD 特征分析至关重要。尽管存在各种限制或对干扰的依赖性，但它们是适用于这项工作的不同现场测试方法。最近的现场对比测试证实，在正常情况下，JME、FA 和较小程度上的干涉测量方法提供了很好的一致性。与此同时，它显然对新的 WSOSPA 方法的可靠性提出了质疑。

首字母缩写词

DGD	差分群时延
GINTY	广义干涉测量法
FA	固定检偏器
JME	琼斯矩阵特征分析
OPGW	光功率地线
PMD	偏振模色散
PSP	主偏振态
SOP	偏振态
WSOSPA	波长扫描 OTDR 和偏振态分析
TINTY	传统干涉测量法

作者

Vincent Lecoeuche – Gabriel Jagot 博士 – 应用工程师，Gregory Lietaert – 产品营销

相关文档

1. VIAVI, 《偏振模色散 (PMD) 的现场测试 (Testing Polarization Mode Dispersion (PMD) in the Field)》
2. IEC 61280-4-4. 2006-02, 《光缆设备和链路 – 已安装链路的偏振模色散测量 (Cable plants and links – Polarization mode dispersion measurement for installed links)》
3. TIA-455-243 SP-3-0305, FOTP-243; 《通过波长扫描 OTDR 和偏振态分析对已安装的单模光纤进行偏振模色散测量 (Polarization-mode dispersion measurement for installed single-mode optical fibers by wavelength-scanning OTDR and states-of polarization analysis)》
4. 《风和电力线电流引起的架空光纤偏振振荡 (Polarization Oscillations in Aerial Fiber Caused by Wind and Power-Line Current)》，作者：Joachim Wuttke、Peter M. Krummrich 及 Jörg Rösch、Member, 《IEEE 光子学技术快报 (IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS)》，第 15 卷第 6 期 2003 年 6 月
5. Wikipedia – OPGW 光缆
6. 《风作用引起的光缆振动? (Cables vibrations due to wind action?)》 M. Belloli, A. Collina, F. Resta, Politecnico di Milano, O.I.T.A.F. SEMINAR. Grenoble 2006 年 4 月 27 日
7. 《PMD 测试方法的现场试验和各种已安装光缆环境中偏振效应动态的调查 (Field trial of PMD test methods and investigation into the dynamics of polarization effects in a variety of installed cable environments)》. Richard Ednay- Optical Technology Training Ltd. Terena Networking Conference, Vilnius, Lithuania, 2010 年 6 月



北京
上海
上海

深圳
网站:

电话: +8610 6539 1166
电话: +8621 6859 5260
电话: +8621 2028 3588
(仅限 TeraVM 及 TM-500 产品查询)
电话: +86 755 8869 6800
www.viavisolutions.cn

© 2018 VIAVI Solutions Inc.
本文档中的产品规格和描述如有更改，恕不另行通知。
pmdaerial-cables-wp-fop-tm-zh-cn
30193628 900 0818