

现场测试偏振模色散

简介

竞争激烈的市场压力要求服务提供商不断升级和维护他们的网络，以确保他们能够向客户提供更高速度、更高质量的应用和服务。这需要验证并确保网络的光纤基础设施和设备能够满足严格的性能标准并可靠运行。由于传输速度的提高和 DWDM 系统的实施，光纤特征分析和系统启动发生了一些重要变化，需要新的测试工具和程序，这些在不同的 VIAVI 白皮书中有所描述。

偏振模色散 (PMD) 测试在光纤特征分析过程中变得越来越重要，但仍是最难测试的参数之一，因为它对许多环境限制很敏感。

偏振模色散的定义

PMD（偏振模色散）是由光纤传输的输入光脉冲的不同偏振分量的到达时间差。这种光脉冲总是可以分解成成对的正交偏振模式。这些偏振模式根据光纤双折射引起的慢轴和快轴以不同的速度传播。

双折射

光纤是略微双折射的。双折射是材料（例如光纤）的一种缺陷，其中有效折射率随着输入光的偏振状态而变化。

造成这种双折射的主要原因是制造设计中光纤的不完美的同心度和不均匀性，以及施加在光纤布线上的外部应力，例如弯曲或扭曲。

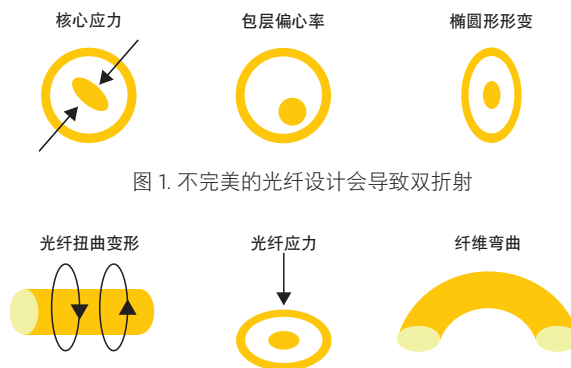


图 1. 不完美的光纤设计会导致双折射

图 2. 外部应力会导致双折射

差分群时延

在单模光纤中，光被引导通过整个纤芯和一部分包层（指模场直径），因此只有单一传播模式。然而，由于双折射，传播模式退化为两个正交模式，定义了两个主要偏振态 (PSP)。这两个 PSP 以不同的速度传播。

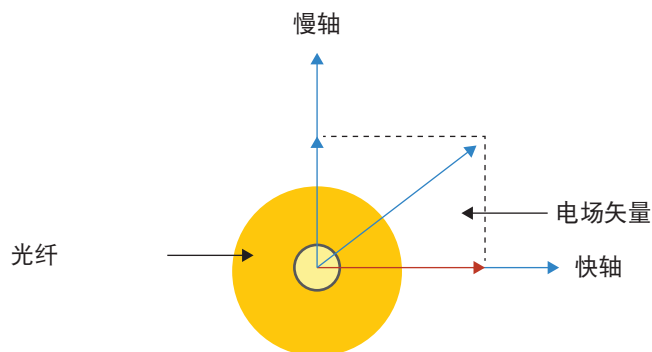


图 3: 电场矢量被分解成两种极化模式（快和慢）

介质(光纤)输出端的到达时间差称为差分群时延 (DGD) [$\Delta\tau$ (皮秒)]。

通过“均匀的”高双折射 (HiBi) 或保偏光纤传输的光脉冲可以定义为将脉冲分解为两个正交脉冲（见图 1），以不同但恒定的速度传播。

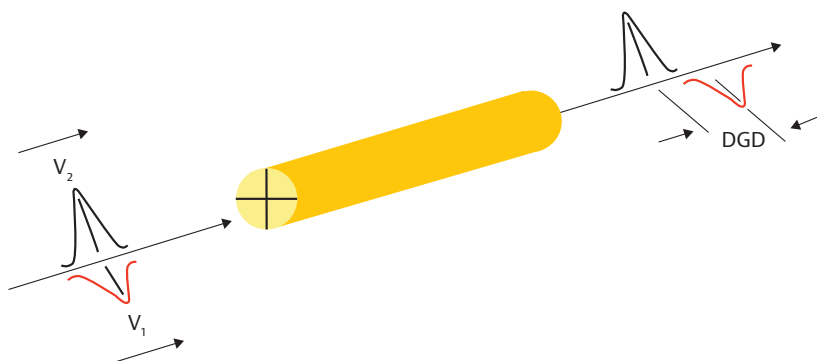


图 4. HiBi 光纤中的差分群时延

然而，在电信光纤中，双折射水平和主轴在整个链路上是不均匀的，并且可以被认为是随机耦合在一起的 HiBi 光纤的结果。因此，在快和慢本地 PSP 之间存在偏振模式耦合。这被称为强模式耦合。尽管如此，该光纤在一个给定的波长上仍然表现出两个 PSP 和一个 DGD。

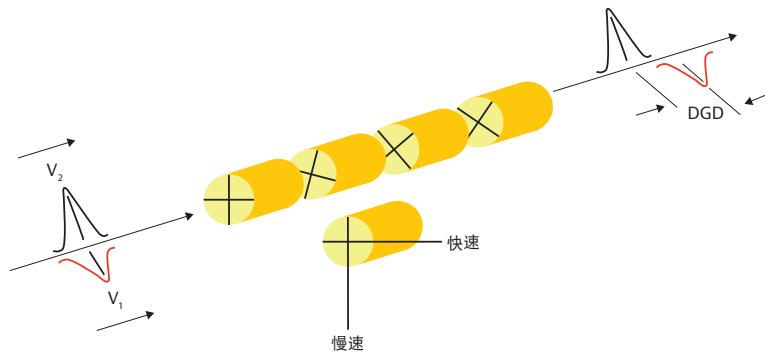


图 5. 电信光纤中的强模式耦合

PSP 和 DGD 都随波长而变化（图 4）。影响 DGD 分布的最大因素是温度。仅仅几度的变化就足以完全扭曲数据。此外，任何人为干预光纤链路，改变光纤布局，都会带来同样的后果。

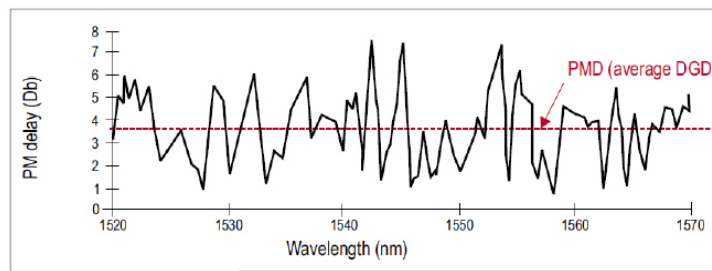


图 6. 一定波长范围内的 DGD 变化

DGD 分布遵循麦克斯韦曲线，如图 7 所示。

结果，一个波长的 DGD 信息仅在给定时间有效。

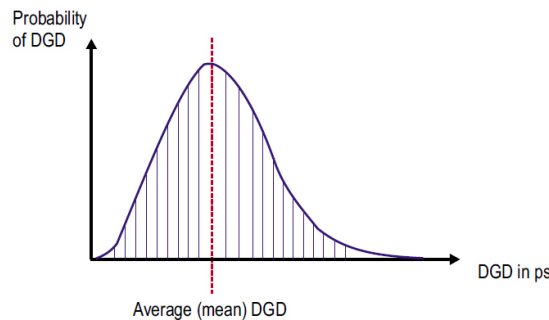


图 7. 差分群时延的麦克斯韦分布

依据数据确定。DGD 随时间缓慢变化，但随波长快速变化……数据显示与麦克斯韦分布有很好的 consistency。在出现显著温度波动的期间，平均 DGD 的频率平均变化约为 10% 或更少。¹

一个普遍接受的用于表征 PMD 延迟的参数是某一波长范围内的平均 DGD ($\Delta\tau$)，用 [皮秒] 表示。

$$\text{平均 DGD} = (\Delta\tau)$$

平均 DGD 与光纤长度的平方根成正比。如果平均 DGD 增加一倍，则光纤长度必须增加至四倍。

¹埋地单模光纤 DGD 测量数据的分析和比较。Allen 等人，2002 年

PMD 系数 $\Delta\tau_c$ [皮秒/ $\sqrt{\text{千米}}$] 用于表示随光纤长度变化的 PMD 延迟。

$\Delta\tau = \Delta\tau_c \times \sqrt{L}$; 其中 L 是光纤长度

然后, 使用最多四个主要参数定义 PMD:

- PMD 延迟 [皮秒] 或平均 DGD
- PMD 系数 [皮秒/ $\sqrt{\text{千米}}$]
- 二阶 PMD 延迟或 DGD₂ [皮秒/纳米]
- 二阶 PMD 系数或 PMD₂ [皮秒/(纳米 × 千米)]

二阶 PMD

二阶 PMD 描述了偏振感应延迟如何随波长而变化。它提供了 PMD 延迟的波长依赖性的指示。

有两个贡献因素:

- DGD 随波长的变化率
- 它描述了 PSP 方向的变化

必须将二阶 PMD 添加到色度色散图中, 这进一步限制了 CD 约束。

事实上, 只有非常高速 ($\geq 40 \text{ Gb/秒}$) 的传输系统才会受到二阶 PMD 的影响。

限制光纤参数

平均 DGD 导致传输脉冲在沿光纤传播时变宽, 产生失真并增加光学系统的误码率 (BER)。结果是限制了给定比特率的传输距离。

PMD 随以下因素而降低:

- 更好的光纤制造控制 (光纤几何形状)
- PMD 补偿模块

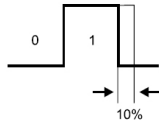
与较新的 G.652、G.653、G.655 光纤相比, PMD 对旧的 G.652 光纤 (< 1996) 来说是一个更大的问题。

如果最大 PMD 延迟已知, 则可以推导出最大容许光纤长度。

$$L = \frac{\Delta\tau^2}{\Delta\tau_{\text{cmax}}^2}$$

在将最大可容忍 PMD 延迟定义为系统的比特长度 T_B 的 10% 时, 考虑了 PMD 的统计特性, 在 1550 纳米处, 使用 NRZ 编码, 对网络性能的干扰不超过 1 dB 的损耗。

$$\Delta\tau_{\text{max}} \leq \frac{T_B}{10}$$



比特长度的最大允许位移

考虑 10 Gb/秒的传输速度，可以确定比特长度 (100 皮秒)，然后使用它来计算理论上的最大 PMD 延迟：

$$\Delta\tau = 0.1 * 100 \text{ 皮秒} = 10 \text{ 皮秒}$$

在实践中，根据编码结构的不同，一些系统并驾齐驱可以接受 13-14 皮秒。

下表总结了根据不同传输速度的计算结果。

比特率	SDH 格式	SONET 格式	等效时隙 (UI)	PMD 延迟限制	400 千米的 PMD 系数
1.2 Gb/秒		OC-24	803 皮秒	80 皮秒	<4 皮秒/√千米
2.5 Gb/秒	STM-16	OC-48	401 皮秒	40 皮秒	<2 皮秒/√千米
10 Gb/秒	STM-64	OC-192	100 皮秒	10 皮秒	<0.5 皮秒/√千米
40 Gb/秒	STM-256	OC-768	25.12 皮秒	2.5 皮秒	<0.125 皮秒/√千米

表 1. 随比特率变化的最大 PMD 延迟

此 PMD 限制用于确定最大容许光纤长度。

对于典型的传输系统，下面是在给定传输比特率下随长度变化的最大 PMD 系数。

此图具有以下假设：PMD 被认为符合麦克斯韦分布，使用 NRZ 编码，使用 1550 纳米激光，最大功率损失 1 dB 是可接受的，误码率通常在 10^{-9} 和 10^{-12} 之间。考虑到这一点，可以应用以下公式 (L 是以千米为单位的距离，B 是以 Gb/秒为单位的比特率，PMD 是以 皮秒/√千米为单位的 PMD 值)：

$$L = \frac{10^4}{(B * PMD)^2}$$

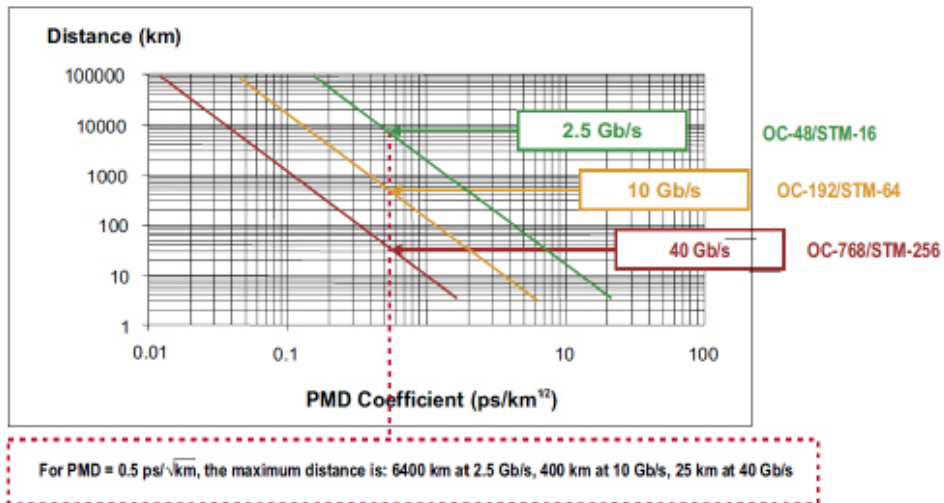


图 8. 随 PMD 系数和数据比特率变化的最大距离

何时测试 PMD

当每个信道的传输比特率上升时，或者随着相应距离的增加，PMD 测试成为一种要求。看来至少应该在比特率等于或高于 10 Gb/秒时进行测量。然而，对于 1996 年以前的光纤或某些应用，例如模拟有线电视应用，更低的传输比特率也会受到 PMD 的影响。

总而言之，需要 PMD 测量的主要情况包括：

- 光纤制造过程中的验收
- 电缆制造过程中的验收
- 安装新的光纤网络，比特率为 10 Gb/秒或更高。
- 安装 2.5 Gb/秒或更高速率的超长距离网络

根据 ITU-T 建议，光纤和电缆制造商规定其光纤的最大值为 0.5 皮秒/ $\sqrt{\text{千米}}$ 。然而，目前制造的光纤很容易超过 0.2 皮秒/ $\sqrt{\text{千米}}$

由于 PMD 是一种统计测量，而且对外部环境敏感，建议在不同的时间间隔进行不同的测量，以便监测 PMD 的长期波动，提供更好的光缆记录。

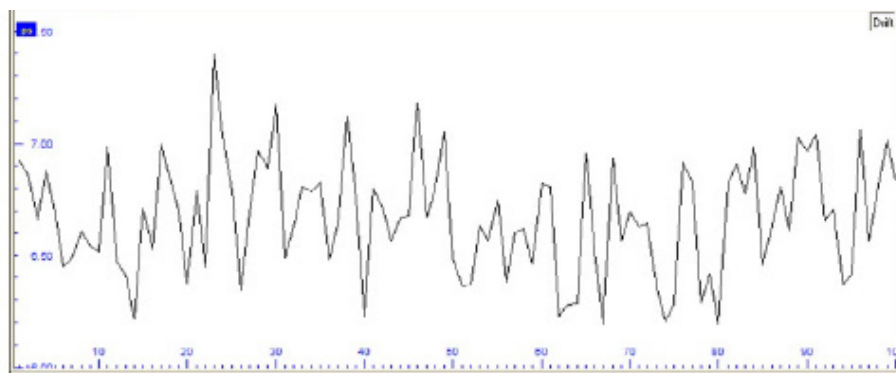


图 9. 长期 PMD 延迟测量的波动表示

高 PMD 值

如果 PMD 测量值高于给定比特率的容许极限，则该光纤被分类为对该特定传输速度的 PMD “敏感”。对于给定比特率下的合格 PMD 结果（在容许限度内），光纤不能被分类为“非 PMD 敏感”。相反，它应该被归类为在给定时间“适合于特定的传输速率”。

目前，没有简单和低成本组件允许校正具有高 PMD 值的链路。虽然许多组件正在验收和开发中，但目前只有极少数 PMD 补偿器在现场部署。

对于给定的网络应用，色散在限制距离（或传输比特率）方面显然很重要。因此，已经开发了几种允许补偿传输链路上 PMD 效应的解决方案，包括在更短的距离上传输、以每波长更低的比特率传输、使用低啁啾激光器、使用色散管理的 RZ 光孤子传输或使用前向纠错 (FEC) 传输。

PMD 补偿技术

由于 PMD 的统计特性及其随时间和波长的变化，抵消它是特别困难的。PMD 的随机性使得减少 PMD 的影响并不一定意味着完全消除这种影响，而是减少了 PMD 造成的运行中断概率。这一过程称为 PMD 缓解。

在过去几年中，已经提出了几种 PMD 补偿技术。它们可分为两大类：

- 电气 PMD 补偿
- 光学 PMD 补偿

PMD 的电气补偿包括在光电二极管之后均衡电信号。这种均衡可以通过多种方式实现：横向滤波器 (TF)、非线性判决反馈均衡器 (DFE)、相位分集检测。一般来说，电气补偿方案是稳健的，并且将改善信号对各种传输损伤的抵抗力。另一方面，它们的性能不如光学 PMD 补偿器，并且它们需要高速电子器件来获得更好的性能。

光学 PMD 补偿试图减少由传输光纤和补偿器引起的总 PMD 损伤。一般光学 PMD 补偿方案的框图如图 9 所示。它具有自适应计数器元件、反馈信号和控制算法。

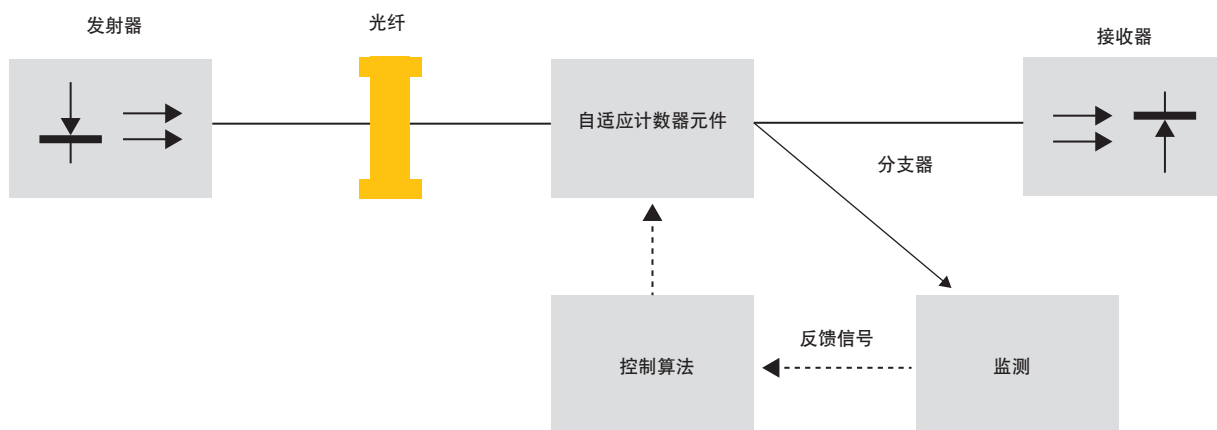


图 10. 光学 PMD 补偿示意图

自适应计数器元件是任何 PMD 补偿器的核心。它必须能够抵消 PMD 损伤，并且是可调的。需要反馈信号来向补偿器的控制算法提供 PMD 信息。

PMD 国际标准和建议

ITU-T、IEC 和 TIA/EIA 等标准提供了与 PMD 及其相关测量相关的指南和建议。以下是与 PMD 相关的主要参考文献列表。

标准版	描述
ITU-T G.650.2	单模光纤和光缆统计和非线性属性的定义和测试方法
ITU-T G.652	单模光纤和光缆的特性
ITU-T G.653	色散位移单模光纤和光缆的特性
ITU-T G.654	切断位移单模光纤和光缆的特性
ITU-T G.655	非零色散位移单模光纤和光缆的特性
ITU-T G.656	用于宽带传输的非零色散光纤和光缆的特性
IEC/TS 61941	单模光纤偏振模色散测量技术规范
IEC 60793-1-48	测量方法和试验程序 - 偏振模色散
GR-2947-CORE	便携式偏振模色散 (PMD) 测试仪的一般要求
TIA/EIA-455-FOTP-113	固定检偏器法测量单模光纤的偏振模色散
TIA/EIA-455- FOTP-122A	斯托克斯参数评估法测量单模光纤的偏振模色散
TIA/EIA-455- FOTP-124A	干涉法测量单模光纤的偏振模色散
TIA/EIA-TSB-107	光缆偏振模色散的统计规范指南

表 2. 与 PMD 相关的主要标准、指南和建议

PMD 测试方法描述

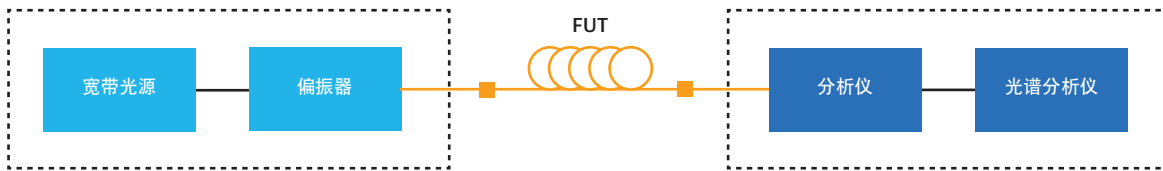
如测试和测量标准所述，在现场测量 PMD 有不同的方法。下面只描述四种方法。还有其他方法专门用于生产/实验室测试（庞加莱球法、偏振态法、调制相移法、脉冲延迟法、时间延迟法和基带曲线拟合法）。

下面的前 3 种方法按照 IEC-60793-1-48 国际标准进行分类，其中 GINTY 方法不是尚未发布的 IEC 标准化方法。所有测试方法也通过 ITU-T G650.2 发布。EIA/TIA 为每个单独的测试解决方案提供了建议。

固定检偏器法（或波长扫描）

所需设备

这种方法需要一个宽带偏振光源和一个偏振（可变）光谱分析仪 (OSA)。



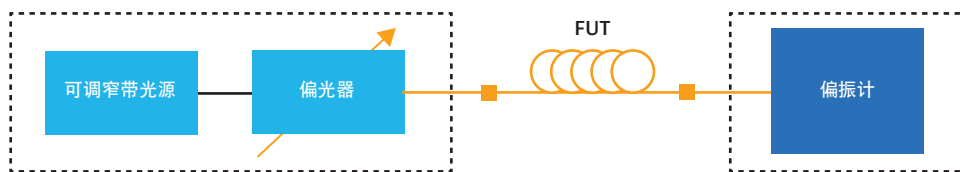
该方法的原理

根据功率波动谱，测量强度调制的平均周期。这是通过计算极值的数量（即测量偏振态随波长变化的速率）来实现的，以便给出平均 DGD。或者，到时域的傅立叶变换也将给出图形，并且 RMS DGD 值由高斯曲线的标准偏差确定（对于具有强模式耦合的光纤链路）。

琼斯矩阵特征分析 (JME)（或斯托克斯参数评估）

所需设备

这种方法需要一个可调窄带光源，配有三个线性偏振器和一个偏振计



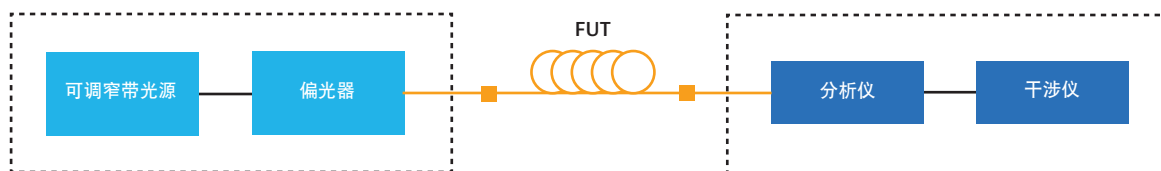
该方法的原理

偏振光的三种已知状态使偏振计能够获得琼斯矩阵。相邻波长对处的琼斯矩阵值提供了 DGD 值。然后通过简单地对波长上获得的 DGD 值进行平均来计算 PMD。

干涉测量法：传统方法 (TINTY)

所需设备

这种方法需要一个宽带偏振源和一个干涉仪（Mach-Zehnder 或 Michelson）。



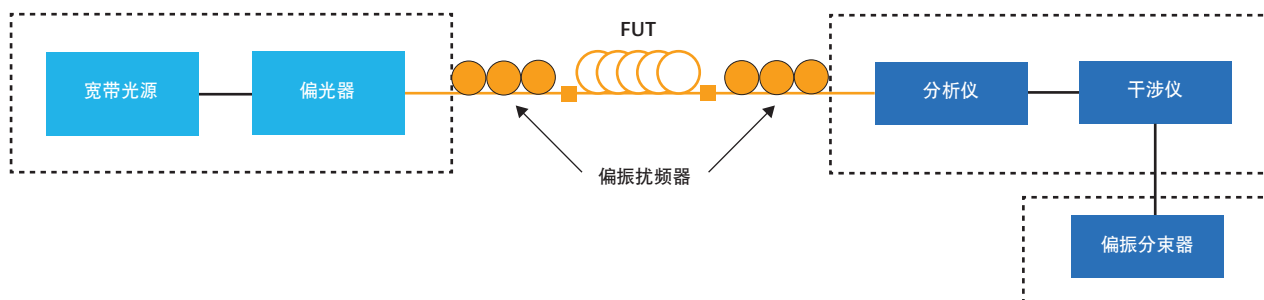
该方法的原理

对于光纤链路（通常是强模式耦合），结果是具有随机相位的干涉图，并且平均 DGD 值由其曲线的标准偏差确定。然而，获得的条纹包络是两个函数的组合。必须使用一种算法来试图去除不包含 PMD 信息的中心自相关峰值。

干涉测量法：广义方法 (GINTY)

所需设备

这种方法需要一个宽带偏振源、一个带有偏振分束器的干涉仪（Mach-Zehnder 或 Michelson）和两个偏振扰频器。



该方法的原理

对于光纤链路（通常是强模式耦合），结果是具有随机相位的干涉图，平均 DGD 值由曲线的标准偏差确定。由此，偏振分集检测的两个信号允许去除源自相关峰值的贡献。借助偏振分束器，可以获得没有中心峰值的干涉图。然而，这种方法的真正好处只有通过使用偏振扰频器才能获得，从而改善测量结果的绝对不确定性。

不同 PMD 测试方法的比较

国际组织已经对结果进行了相互比较，目前，实验室间的测量表明，所有不同方法之间的一致性在 +/-10% 到 +/-20% 之间。这一点在 TIA/EIA-455 PMD 文档中有详细描述。在固定检偏器和琼斯矩阵特征分析之间有相当好的统计一致性。另一方面，干涉测量法和傅里叶变换固定检偏器具有良好的统计一致性。然而，这两种方法之间可能存在差异。

在相同的采集条件下，对不同的链路配置进行了现场测量（以皮秒显示的 DGD）。

	距离	距离 TINTY 方法	固定检偏器法	差异
新光纤测量（在鼓上）	100 千米	0.77 皮秒	0.85 皮秒	10%
新部署的光纤测量 (>2000)	69 千米	0.282 皮秒	0.282 皮秒	1%
	89 千米	0.519 皮秒	0.479 皮秒	8%
旧光纤测量 (<1993)	16 千米	7.26 皮秒	6.16 皮秒	16%
	32 千米	8.37 皮秒	7.0 皮秒	16%

表 3. 显示 TINTY 和固定检偏器 PMD 测试方法之间差异的 DGD 测量

该数据证实了干涉测量法 (TINTY) 和固定检偏器法之间的差异（由 TIA/EIA 公布）在 10% 至 20% 的范围内。此外，由于 PMD 值的统计变化，重复测量显示了两种方法的结果差异。

不同 PMD 测试方法的优点。

固定检偏器法	JME 法	TINTY 法	GINTY 法
已在市场中投入使用		已在市场中投入使用	
高动态范围 (>45 dB, 使用手持式耐用型光源)	高动态范围 (最高 50 dB, 使用台式光源)	高动态范围 (最高 65 dB, 使用台式光源)	高动态范围 (最高 47 dB, 使用台式光源)
良好的绝对不确定度	良好的绝对不确定度	良好的绝对不确定度 (但包括因去除干涉图中心峰值而产生的系统误差)	良好的绝对不确定度
最小 DGD 测量范围适用于任何光纤	最小 DGD 测量范围适用于任何光纤	最小 DGD 测量范围适用于任何光纤	最小 DGD 测量范围适用于任何光纤
可以通过多个 EDFA 进行测量	可以通过多个 EDFA 进行测量		可以通过多个 EDFA 进行测量
非常快速的测量 (用时低至 5 秒)	不要求平均值, 但是每个波长需要一次采集		非常快速的测量 (用时低至 5 秒)

不同 PMD 测试方法的优点（续）。

固定检偏器法	JME 法	TINTY 法	GINTY 法
坚固耐用的现场专用仪器，没有移动部件（法布里-珀罗滤波技术）；减少故障风险；体积小、重量轻			
非常易于使用；不需要特定的参数设置			
	对输入偏振不敏感		使用偏振扰频器时，对输入偏振不敏感
	对模式耦合不敏感		
	直接测量二阶 PMD		

表 4. 不同 PMD 测试方法的优点

不同 PMD 测试方法的缺点和局限性。

固定检偏器法	JME 法	TINTY 法	GINTY 法
	现场解决方案的成本太高		新干涉测量法
	实验室解决方案，未经现场验证，也不方便使用台式光源)	不便于现场使用，有因移动部件导致故障的风险	不便于现场使用，有因移动部件导致故障的风险；需要偏振扰频器
需要求平均值，但总损耗仅超过 30 dB		测量时间长；需要求平均值	便携式光源的动态范围有限
		不容易使用；必须在测试前设置正确的 DGD 范围	
		无法通过 EDFA 进行测量	
二阶 PMD 不是直接测量而得，而是计算得出		二阶 PMD 不是直接测量而得，而是计算得出	二阶 PMD 不是直接测量而得，而是计算得出
最大 PMD 限制为 60 皮秒；适用于任何电信光纤	最大 PMD 限制为 50 皮秒；适用于任何电信光纤		
对输入偏振敏感		对输入偏振敏感	当没有偏振扰频器时，对输入偏振敏感

表 5. 不同 PMD 测试方法的缺点和局限性

结论

对于已安装的光纤 PMD，没有简单的理论预测，但 PMD 对制造时几何控制比现在少的老式光纤更为关键。

当通过补偿光纤或啁啾光栅等最新技术降低色度色散时，PMD 长单模光纤中主要的比特率限制效应。必须测量 PMD，以便对专用于此传输速度的光纤进行特征分析。

相关文档

1. 测量方法和测试程序 - 偏振模式色散 IEC 60793-1-48:2003-05
2. ITU-T G.650.2, 单模光纤和光缆的统计和非线性相关属性的定义和测试方法, 2005-01。
3. 用固定检偏器法测量单模光纤的偏振模色散, TIA FOTP-113 草案 (1997-02)
4. 通过琼斯矩阵特征分析进行单模光纤的偏振模色散测量, TIA FOTP-122-A 草案 (2002-08)
5. 用干涉测量法测量单模光纤的偏振模色散, TIA FOTP-124-A 草案 (2004-02)
6. “偏振模色散”, 康宁电缆系统, 工程服务部, 应用工程师笔记 48, 修订版 2, 2002-12。
7. Ricci, Vincent 博士, 康宁公司 “长距离奉献 - 偏振模色散”。2001-07
8. 高速光纤传输系统中的偏振模色散, Henrik Sunnerud, Magnus Karlsson, Chongjin Xie, IEEE 成员, 以及 Peter A. Andrekson, IEEE 高级成员, OSA 成员
9. Allen, Christopher, Pradeep Kumar Kondamuri, Douglas L. Richards 和 Douglas C. Hague. “埋地单模光纤 DGD 测量数据的分析和比较。” 《光纤测量研讨会 (Symposium on Optical Fiber Measurements)》, Boulder, CO, 第 195-198 页, 2002 年 9 月 24-26 日
10. Galtarossa, A. 等人 “PMD 测量技术的现场比较”。《光波技术杂志》第 14 卷, 第 1 期, 1996 年版)
11. Hanson, T.A. “偏振模式色散及相关主题”。2000-10。
12. Kapron, Felix, Ariel Dori, John Peters 和 Helmut Knehr. “偏振模色散: 您应该担心吗?” Belcore.
13. Karlsson, Magnus, Jonas Brentel, and Peter A. Andrekson. “已安装光纤中 PMD 和偏振漂移的长期测量。” 《光波技术杂志》第 18 卷, 第 7 期, 2000 年 7 月