

# 高级超高速网络中的 PMD 问题

**EXFO**

本袖珍指南全面评述了偏振模色散 (PMD)。

到目前为止，PMD 已经给网络运营商带来了超过 10 年的困扰，但为什么会这样？PMD 是什么，它是否继续会对将来的网络造成麻烦？

本指南将介绍 PMD 的基本知识以及所有相关问题，如偏振、双折射和 DGD。其中涵盖了各种系统和传输速度的容限规格、必须遵从的不同国际标准以及市面上最常用的测试技术。

本指南的目的是综述 PMD 详细现象、特征、带来的后果、与其他关键参数相互作用的性质和效应、如何缓解、测试结果的例子、共性和限制。

# 目录

1. 引言.....	2	5. PMD 规格和国际标准.....	26
1.1 现象.....	4	5.1 PMD 光缆和链路设计规格.....	26
1.2 脉冲展宽, ISI 和 BER.....	6	5.2 系统 PMD 规格.....	28
1.3 较高比特率.....	6	5.3 各种应用和调制格式的 DGD <sub>max</sub> 规格.....	29
1.3.1 较长单模光纤.....	7	5.4 各种应用和调制格式的建议 DGD <sub>max</sub> 值.....	31
2. 偏振.....	8	5.5 以太网应用的 DGD <sub>max</sub> 规格.....	34
2.1 偏振态.....	8	6. PMD 导致的脉冲展宽和代价.....	36
2.1.1 线性偏振.....	8	7. PMD 测试和测量.....	37
2.1.2 圆偏振.....	13	7.1 可用测试方法介绍.....	38
2.1.3 椭圆偏振.....	15	7.1.1 固定分析法—傅立叶变换.....	38
2.2 非偏振光.....	16	7.1.2 干涉测量法 [TINTY/GINTY].....	41
3. 双折射, 原因和效应.....	17	7.1.2.1 传统分析法.....	42
3.1 内应力.....	17	7.1.2.2 扩展分析法.....	43
3.2 外应力.....	19	7.1.3 扰偏偏振态分析法.....	44
3.3 双折射平面和轴.....	20	7.1.3.1 一般理论.....	44
4. 主偏振态.....	21	7.1.3.2 实验实现.....	45
4.1 定义.....	21	7.1.3.3 将 PMD 作为距离的函数进行测量.....	46
4.2 DGD、PMD 和脉冲展宽.....	21	7.2 PMD 测试和测量中的不确定度.....	47
4.2.1 无脉冲展宽.....	22	7.3 PMD 测试和测量仪器的校准.....	47
4.2.2 固定 DGD、PMD 和脉冲展宽.....	23	7.3.1 可用 PMD 测试方法的适用性矩阵.....	48
4.2.3 随机 DGD、PMD 和不断增长的脉冲展宽.....	24		
4.2.4 随机 DGD、PMD 和不断增长的脉冲展宽 (作为光纤长度的函数).....	25		
4.2.5 脉冲展宽, ISI 和 BER.....	24		

## 1. 引言

电信网络对更大容量的需求一直存在，因而促使人们使用光纤。但光纤网络容量的这种增加带来了新的限制，科学界也在关注其效应的原理并致力于深入了解。

衰减和色散等问题目前已经得到了深入理解。但在超高比特率 (VHBR) 下，与偏振相关的参数（如偏振模色散 (PMD)、偏振相关损耗 (PDL) 和偏振相关增益 (PDG)）会相互作用，并且会与色度色散 (CD) 和非线性效应 (NLE) 相互作用。这类相互作用带来了额外的限制，因此需要进一步的考量。表 1 总结了与 VHBR 传输相关的各种问题。

表 1 – 与 VHBR 传输相关的问题

参数		问题
衰减		连接器脏污
		弯曲过度
色散	CD	与 PMD 相互作用时会发生随机现象
		残余 CD 变得关键
	PMD	与 PDL、PDG、CD 和系数相关 NLE 相互作用时有额外限制
		二阶参数变为主要问题
NLE	自相位调制 (SPM) 和交叉相位调制 (XPM)	与 CD 和 PMD 相互作用时在高功率下会造成负面影响
	Raman 光学放大	受激 Raman 散射 (SRS) 生成双重 Rayleigh 背向散射 (DRBS) 和多路干涉 (MPI)
	四波混频 (4WM)	在高功率 WDM 传输中始终存在

在使用新型高级调制格式向 40 和 100 Gbit/s 数据速率迁移时，已经对 PMD 和差分群延迟 (DGD) 进行了大量工作。

## 1.1 现象

PMD 会导致光脉冲在统计意义上扩展，并且在时域中可能发生畸变，这种观点现在已经被人们所接受。当展宽程度太高而导致脉冲过宽时，流脉冲会开始重叠，并且可能产生符号间干扰 (ISI)；眼图开始闭合且误码率 (BER) 大幅增加，这表明信号发生严重劣化。达到某个阈值后，系统会报告通信故障和运行中断。

PMD 的最大问题在于，它是一种随机现象（即本质上是随机的），并且只能使用采样、分发和求平均值进行量化。与任何统计调查相似，需要无限数量的样本才能获得绝对精确的结果。因为不可能获得无限数量的样本，所以必须考虑选择可管理的样本数量。然而，从有限样本计算得出的平均值具有一定的不确定度。由于 PMD 现象还会随着时间发生变化，因此所有方面都更加难以掌握。

PMD 需要对频率或波长进行鉴定，如同所有色散一样。与 CD 相似，基本鉴定参数为折射率 (IOR)，它是传输信号的介质（如光纤）的传播系数。该系数随着频率或波长变化的后续变化会导致作为频率函数或波长函数的群延迟。

但存在两个基本差异：

- › 传播信号的偏振
- › 随机行为（即不确定性）

由于 PMD 现象与偏振有关，因此它与传播轴（即传播系数不同的两个轴）有关，这会导致双折射（即折射率之间的差异）。与 CD 仅有一个群延迟不同，PMD 存在两个群延迟。群延迟差异（即 DGD）作为频率或波长的函数，在统计意义上变化。DGD 变化可能遵循常规平滑函数，也可能完全随机。

无论变化的性质如何，在最宽的频率或波长范围内，都将有最大值、最小值和平均值。

当然，PMD 现象也可能根据它应用于以下哪种对象而发生改变：

- › 长单模光纤 (SMF) 还是短单模光纤
- › 子系统、低速网络抑或高速网络中的简单或复杂、有源或无源光学器件
- › 上述对象在长度、尺寸和数量方面的组合

在 VHBR 下，PMD 的其他方面均相同，但传输脉冲在时域上彼此更加靠近。其效应是，速度更快，并且在统计展宽方面的结果更有意义。这就是为什么 VHBR 的 PMD 是要考虑的最重要和关键现象之一。

## 1.2 脉冲展宽，ISI 和 BER

PMD 导致的脉冲展宽对网络运行的影响与 CD 的影响相似。如果脉冲展宽过多，比特流中的连续脉冲可能重叠，并且可能发生符号间干扰 (ISI)，从而将 BER 增加到导致服务中断的程度。在高比特率、较长 SMF 长度和/或较强双折射时，该现象会变得更为不利，尤其是在传统 SMF 和外在随机应力的情况下。

## 1.3 较高比特率

在较低比特率下，即使应力较高且 DGD 较大，可能也不会有任何 PMD 效应，如图 1 所示。然而，在比特率 (br) 增大时，比特周期 (bp) 会缩短，比特流中的脉冲会彼此更加靠近，直至重叠。这会导致 ISI，以及 BER 增大，直到发生信息流中断，如图 1 所示。

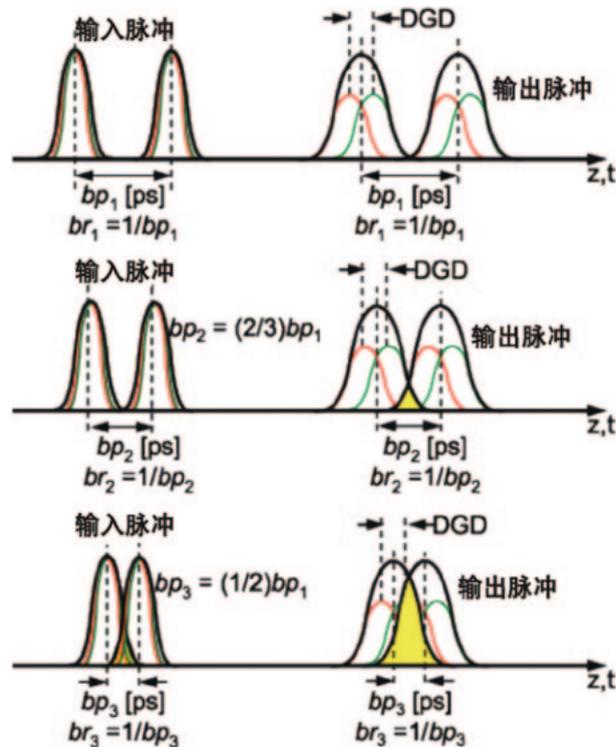


图 1 - 比特率增大  
(比特周期缩短) 对 ISI 的影响

### 1.3.1 较长单模光纤

如果 SMF 长度增加，累积应力和脉冲重叠的概率会增大，ISI 和 BER 也会增大，如图 2 所示。

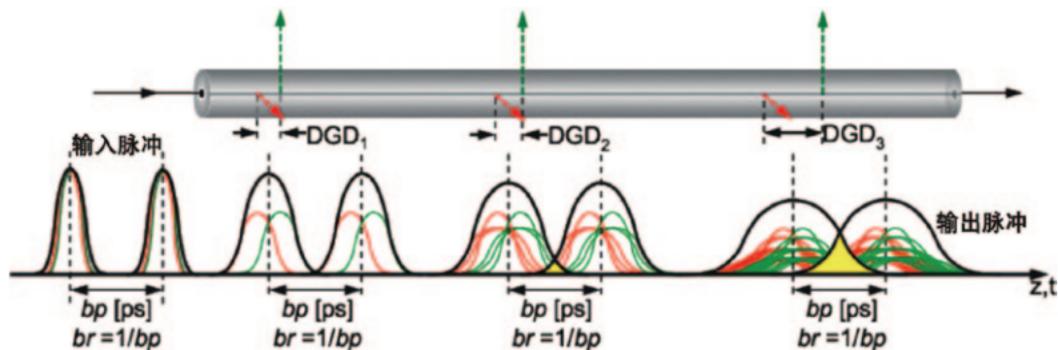


图 2 - SMF 长度增加 (恒定比特周期) 对 ISI 的影响

## 2. 偏振

光学中偏振的概念与社会学中使用的“极化”概念相似。例如，在到达公共会议的随机人群中，不能感知到精确、确定或具有特征的行为；而只有个人谈话形成的背景噪声。人群是非极化或未极化的；这就是噪声的定义。人群中的每个个体都有自己的意见，并且所有意见都同时存在。然而，从局外人的角度来看，人群似乎是混乱的，没有确定的意见或者根本没有意见。如果有明确偏向的强硬发言人进行陈述，则听众会开始展示出兴趣，即人群会发生极化。可以根据展示出兴趣的人数的百分比，认为人群是稍微极化还是强烈极化。光学中的情况同样如此。

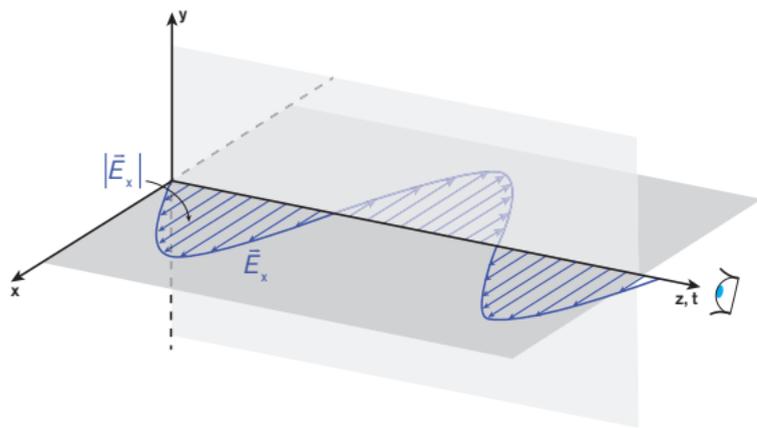
光作为横电磁波，由在相同方向（称为传播轴）传播的正交电磁场构成。由于常见电子检测器/接收器 (Rx) 会响应材料中电子的电场 (E-field) 效应，而不响应磁场效应，因此本文只考虑玻璃介质（如光纤）中的电场及其传播。

### 2.1 偏振态

偏振是光的一种性质。事实上，人们认为，当光波的电场矢量相对于传播  $z, t$  轴成特定角度时，光波即是偏振的。偏振态 (SOP) 由发送器 (Tx) 决定，但却是从 Rx 角度或由观察发送器或光源的观察者来定义。

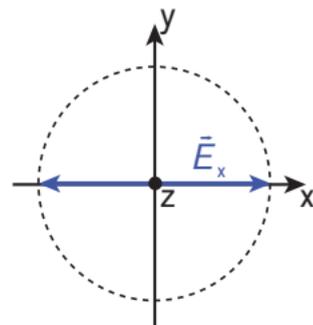
#### 2.1.1 线性偏振

电场矢量可能仅在  $x - z, t$  平面中传播，在这种情况下，认为光波线性水平 (LH) 偏振。这是因为当沿  $z$  轴从 Rx 到 Tx 进行观察时，输入的电场矢量在水平平面沿直线往返移动。这种情况如图 3 所示。



备注：眼睛代表观察者或接收器观察的方向

(a)  $x - z, t$  平面中的 SOP

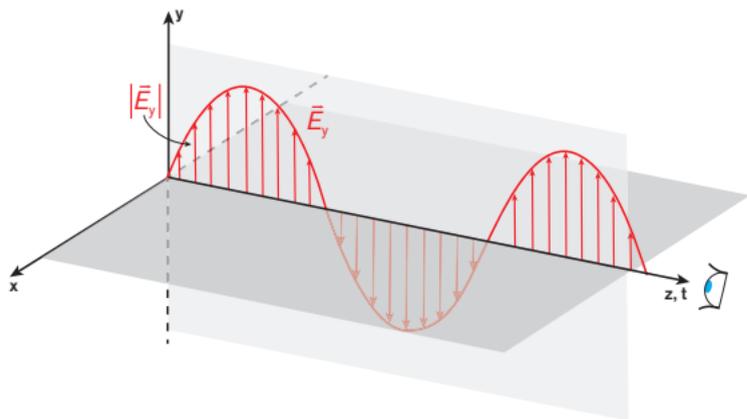


备注：z 轴方向为从页面向外

(b) 观察者或接收器观察到的 (a) 中的传播

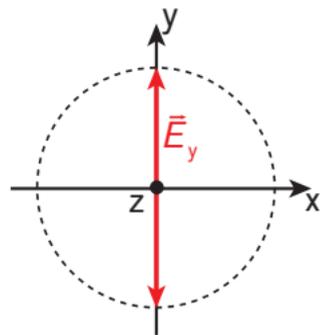
图 3 - 线性水平 SOP 的电场矢量传播

光波也可以在  $y-z, t$  平面中垂直传播，在这种情况下，认为它线性垂直 (LV) 偏振。这种情况如图 4 所示。



备注：眼睛代表观察者或接收器观察的方向

(a)  $y-z, t$  平面中的 SOP

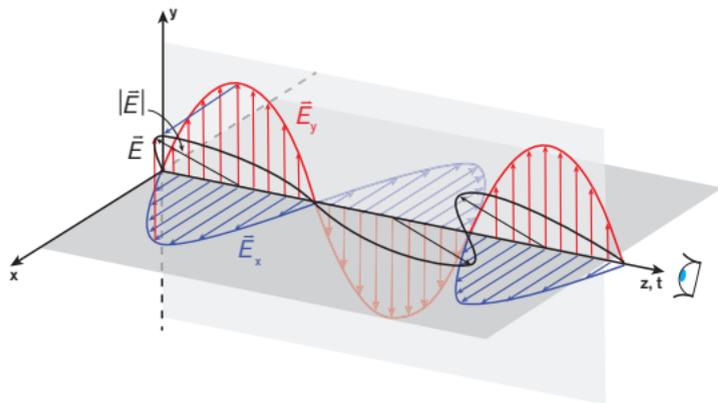


备注：z 轴方向为从页面向外

(b) 观察者或接收器观察到的 (a) 中的传播

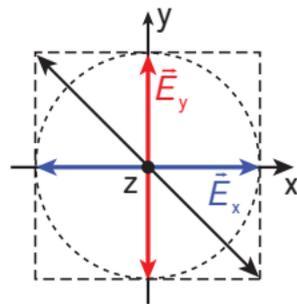
图 4 - 线性垂直 SOP 的电场矢量传播

还可以将光波定义为  $x - z, t$  平面波和  $y - z, t$  平面波的组合，如图 5 所示。它们形成的波以  $+\pi/4$  ( $+45^\circ$ ) 或  $-\pi/4$  ( $-45^\circ$ ) 等特定角度或其他任意角度传播，如图 5 所示。



备注：眼睛代表观察者或接收器观察的方向

(a)  $y - z, t$  和  $x - z, t$  平面中两个线性正交 SOP 形成的  $-\pi/4$  ( $-45^\circ$ ) SOP

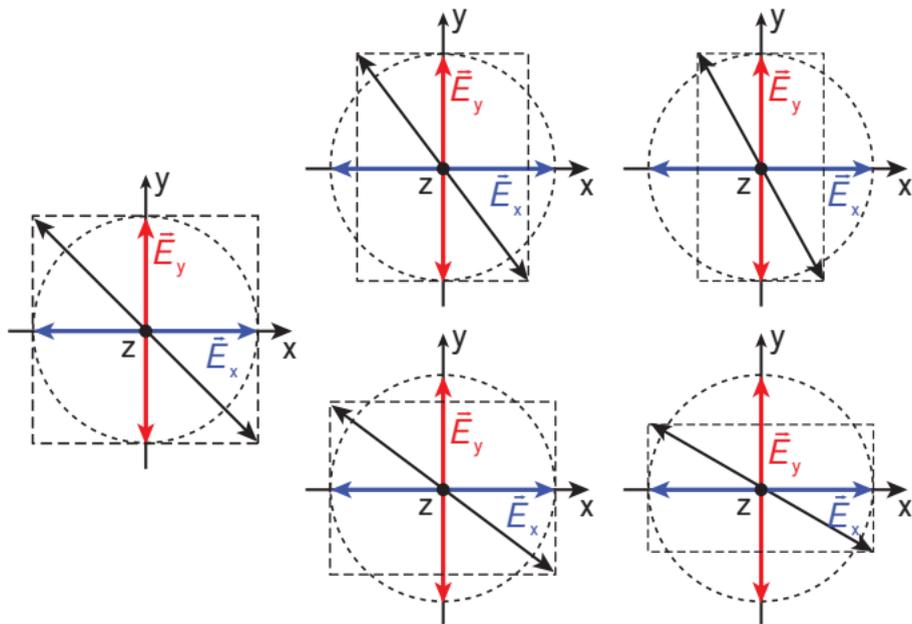


备注：z 轴方向为从页面外向

(b) 观察者或接收器观察到的 (a) 中的传播

图 5 - 线性  $+45^\circ$  SOP 的角度电场矢量传播

根据两个电场矢量的相对振幅，所得电场矢量将具有成比例的偏振角度，如图 6 所示。

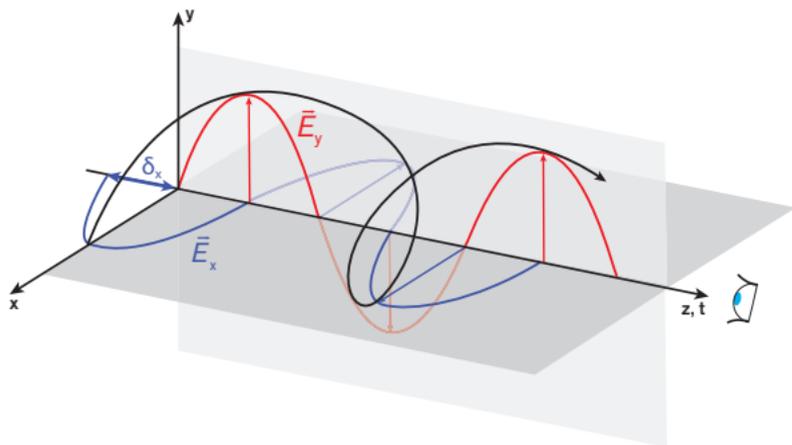


备注: z 轴方向为从页面向外

图 6 - 不同振幅和角度的线性角度电场矢量传播

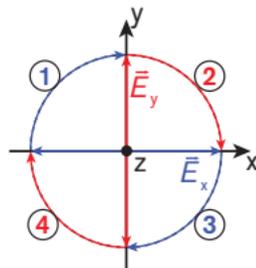
## 2.1.2 圆偏振

当一个正交波的相位与另一个正交波的相位相差  $+\pi/2$  ( $+90^\circ$ ) 时, 所得的波为圆偏振波。该圆偏振的旋转方向(顺时针或逆时针)取决于两个波( $x-z, t$  波和  $y-z, t$  波)之间的相对相移的符号。在相对相移为  $+\pi/2$  ( $+90^\circ$ ) 时, 所得的波为顺时针圆偏振波。在这种情况下,  $x-z$  平面波滞后  $y-z$  平面波  $+\pi/2$  ( $+90^\circ$ ), 如图 7 所示。该偏振也被称为左旋圆偏振 (Clh)。



备注: 眼睛代表观察者或接收器观察的方向

(a)  $y-z, t$  平面和  $x-z, t$  平面的 -SOP

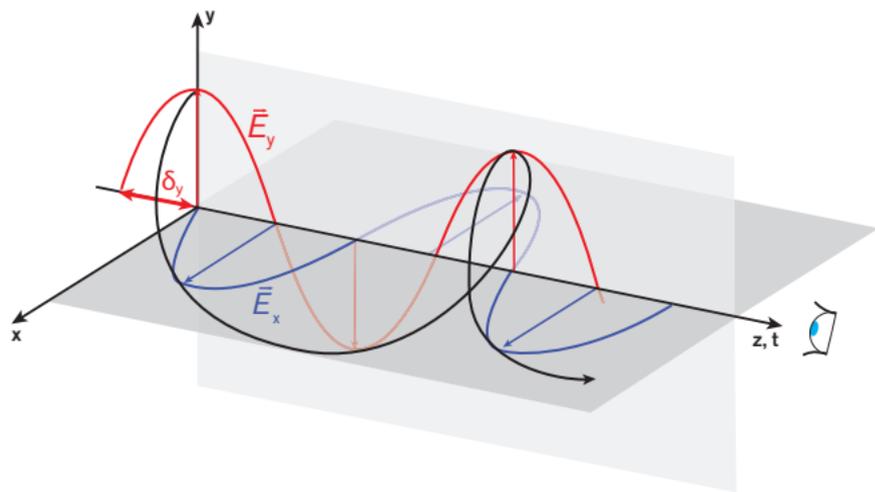


备注:  $z$  轴方向为从页面向外

(b) 观察者或接收器观察到的、  
波矢量从 (a) 开始的顺时针旋转

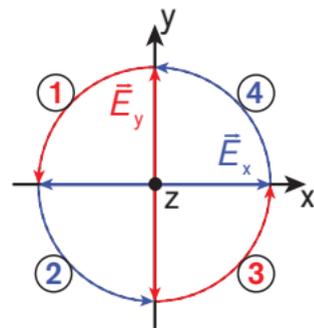
图 7 - 波矢量的顺时针旋转

在相对相移为  $-\pi/2$  ( $-90^\circ$ ) 时 (这时  $x-z$  平面波滞后  $y-z$  平面波  $+\pi/2$ , 或  $+90^\circ$ ) , 所得的波也可以逆时针传播。在这种情况下, 认为所得的偏振为右旋圆偏振 (Crh), 如图 8 所示。



备注: 眼睛代表观察者或接收器观察的方向

(a) 右旋圆偏振波的 SOP



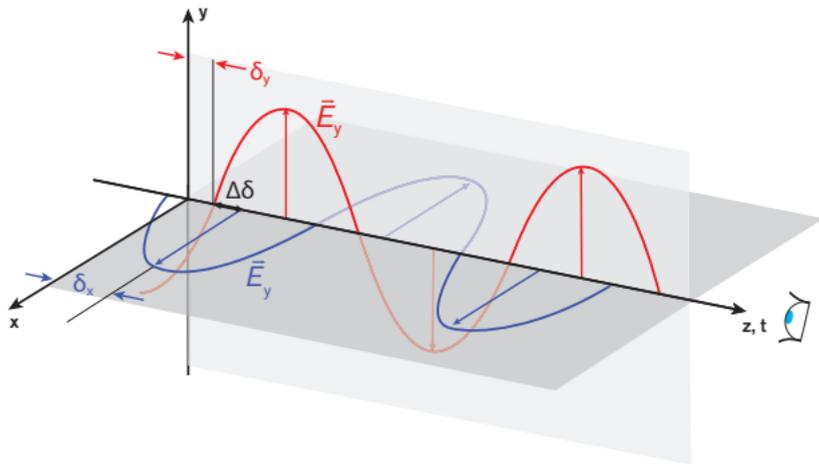
备注:  $z$  轴方向为从页面向外

(b) 观察者或接收器观察到的、波矢量从 (a) 开始的逆时针旋转

图 8 - 右旋圆 SOP 的电场矢量传播

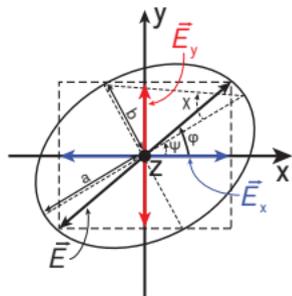
### 2.1.3 椭圆偏振

更加普遍的情况是， $x - z$  平面波和  $y - z$  平面波之间的相对相移为任意非零值，在这种情况下，所得的波为椭圆偏振波。观察者或接收器观察到的偏振波的  $x - y$  平面的一般表示如图 9 所示。



备注：眼睛代表观察者或接收器观察的方向

(a) 椭圆偏振波的 SOP



备注：z 轴方向为从页面外向

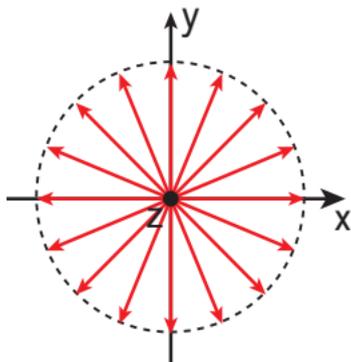
(b) 观察者或接收器观察到的、波矢量从 (a) 开始的椭圆旋转

图 9 - 椭圆 SOP 的电场矢量传播

当然，根据  $x - z, t$  平面和  $y - z, t$  平面中电场矢量的振幅关系以及它们各自的相位关系，可以观察到无限数量的椭圆偏振。

## 2.2 非偏振光

在电场矢量沿  $z$ ,  $t$  轴的任意随机方向、沿  $z$  轴的任意点及/或在任意时间点传播时，认为该波为非偏振波；这非常类似于前述的听众模拟（请参阅第 8 页 – 偏振）。图 10 中示出了这种情况。



备注:  $z$  轴方向为从页面外向

图 10 - 非偏振波的电场矢量的传播

### 3. 双折射，原因和效应

双折射意味着有两个（“双”）折射率（“折射”）。光纤中出现双折射的原因在于光纤芯的缺陷和扰动，从而造成光纤折射率 (IOR) 的偏振依赖性。这些缺陷或扰动可能是随机的，也可能是施加的内应力或随机外应力。内部和外部应力源导致了光纤芯中的双折射。

#### 3.1 内应力

在设计和制造预制品、光纤和光纤线缆时会产生内应力。这些应力源的例子如图 11 所示。随机内应力形成光纤基准双折射，它始终存在，相对较弱，并且在一定程度上可控（可管理）。施加的内应力形成相对较强的双折射。例子如图 12 所示。

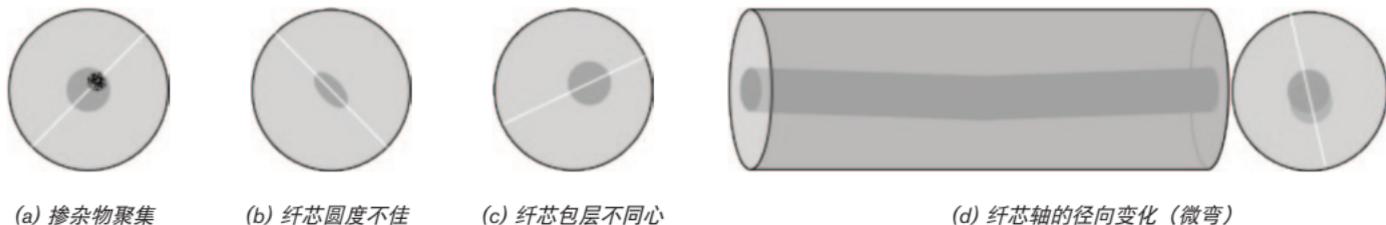
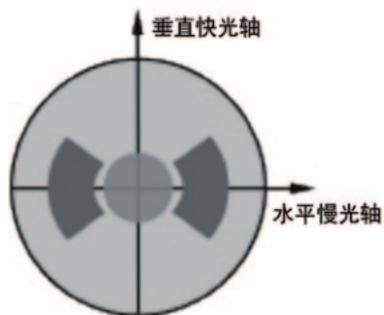
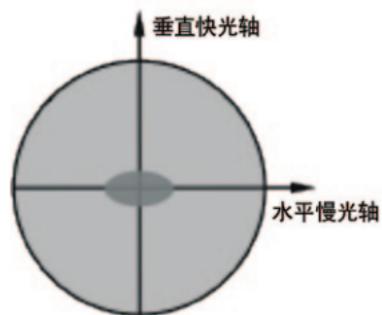


图 11 - 光纤芯上随机内应力的例子



(a) 偏振保持光纤



(b) 高双折射 (Hi-Bi) 光纤

图 12 - 施加的系统内应力的例子，其导致导致线性光纤双折射

缠绕光纤（如图 13 所示）不会产生任何轴向应力，因此不会产生 PMD。

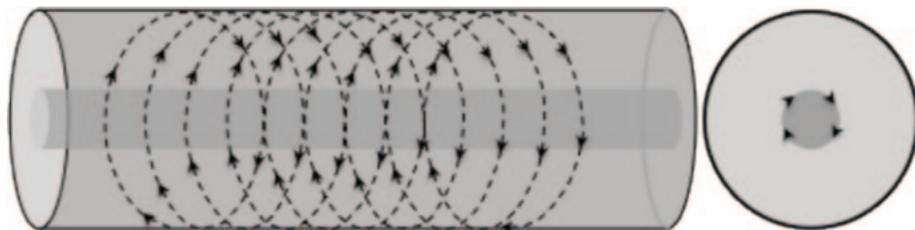


图 13 - 导致圆光纤双折射的外应力（缠绕扭转）的例子

## 3.2 外应力

光缆安装期间，以及网络运行期间的环境会产生外应力。这些外应力本质上是随机的，并且很难减轻，因此是已安装的成缆光纤中 PMD 的最大成因。双折射的量级取决于这些应力的性质和条件。

值得注意的是，现场 PMD 与外应力以及已安装成缆光纤段、径距和链路的长度成正比。术语的定义如下：

- › 已安装成缆光纤段为两个熔接点之间的距离
- › 径距为两个光中继放大器之间的距离
- › 链路为 Tx 和 Rx 之间的距离

短距离（数米）上产生的局部应力事件（例如，检查孔中光纤的挤压、弯曲和缠绕，或从管井拆除光纤）基本上不会影响长距离（数公里）上的随机累积应力。它们很少或者根本不会增加整体 PMD。

### 3.3 双折射平面和轴

如前一页所示，在垂直于传播轴（ $z$  平面）的两个不同平面上，双折射材料呈现出两个不同的折射率。这些（偏振）平面的 IOR 不相等。较大的 IOR 会造成沿该平面的相速度较慢。该轴不一定是图 14 所示的  $x$  或  $y$  轴；它取决于扰动（应力）的方向。

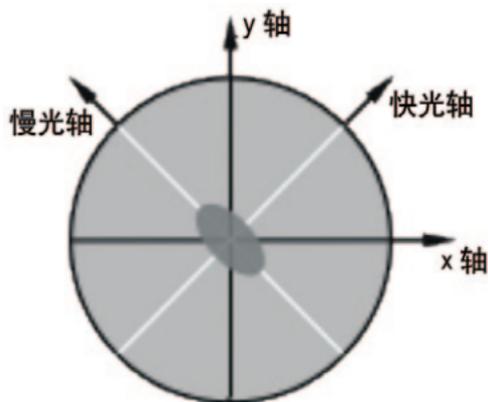


图 14 -  $x$ 、 $y$  轴和快、慢光轴之间的差异

在扰动平面传播的具有最低相速度的波相对于其他波是延迟的，并且其偏振轴被称为慢光轴；快光轴对应于较小的 IOR 和较快的相速度。延迟的原因就在于双折射。

## 4. 主偏振态

本章将介绍造成 PMD 的其中一个最重要参数：主偏振态。

### 4.1 定义

在双折射介质（如光纤）中，有两个偏振态 (SOP) 称为主偏振态 (PSP)。

其中一个 PSP 称为慢 PSP。它与慢光轴（较高 IOR 或传播系数）一致，产生最慢的群速度，因此传播延迟最大。另一个 PSP 称为快 PSP。它会产生最快的群速度，因此传播延迟最小。

这两个 PSP 通常是正交的。

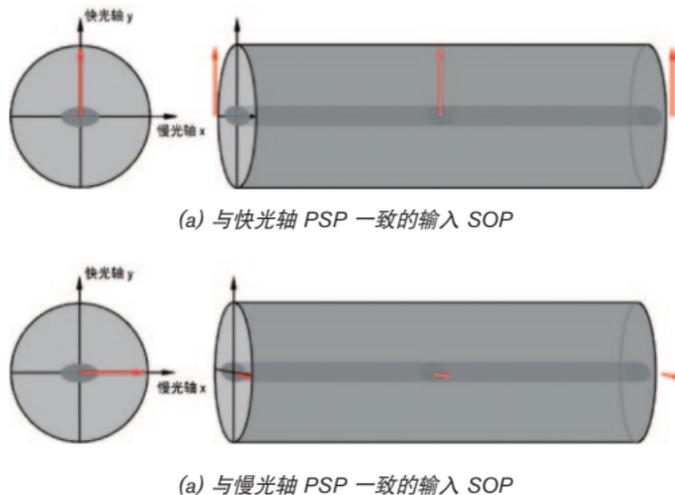


图 15 - 对于与 PSP 一致的输入 SOP，输出 SOP 不变

### 4.2 DGD、PMD 和脉冲展宽

脉冲展宽与 PSP 分束以及脉冲 SOP 相对于 PSP 轴发射的方式有关。时域中的 PSP 分束与群速度的 PSP 差异以及其群延迟的差异（称为 DGD）有关。

## 4.2.1 无脉冲展宽

图 16 示出了在脉冲的 SOP 与 PSP 轴一致的情况下，脉冲从输入传播至输出而未受到干扰。例如，沿完美跑道前行的赛车会在没有干扰的情况下行驶。



图 16 - SOP 与 PSP 一致的脉冲未遭遇任何 DGD 及脉冲展宽

## 4.2.2 固定 DGD、PMD 和脉冲展宽

图 17 示出了能量由两个 PSP 平分所发射的输入脉冲 SOP。如果该脉冲在偏振保持光纤 (PMF) 中发射, 则脉冲从输入传播至输出时会受到 PMF 设计施加的固定应力的干扰。例如, 一辆赛车在一条路面粗糙的车道上行驶, 而另一辆赛车在没有任何干扰的另一条车道上行驶。因此, 就会有较大的固定应力, 并且一辆车会相对于另一辆车滞后固定不变的延迟, 直到竞赛结束。该例子示出了以下条件:

- › PMF 情形
- › 施加至一个 PSP 轴/平面的系统固定应力
- › 一致程度在两个 PSP 之间相等 (脉冲中的 PSP 能量相同) 的发射 SOP
- › 取决于长度的 PMD 值 (平均值或 RMS DGD)

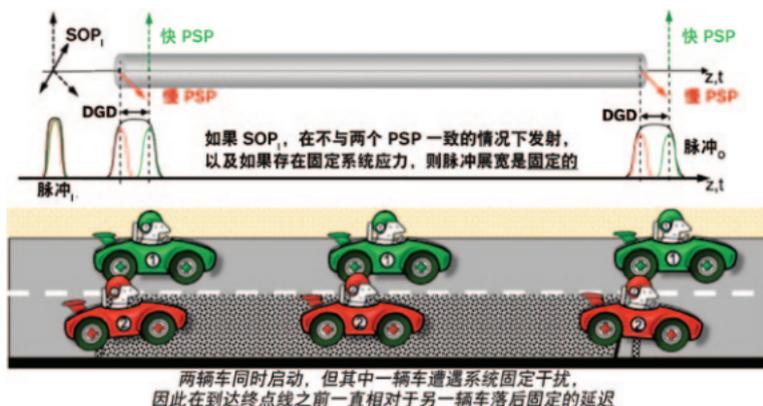


图 17 - SOP 与两个 PSP 均一致的脉冲遭遇固定 DGD 和脉冲展宽

在以上例子中, 应力 (双折射) 在 SMF 的整个长度上是恒定的。

### 4.2.3 随机 DGD、PMD 和不断增长的脉冲展宽

在图 18 中，在光纤的完整距离上，应力（双折射）在量级和长度上随机变化。在两个 PSP 上共享一定量能量的情况下发射输入脉冲 SOP。因此，脉冲会遭遇从输入到输出的随机应力导致的连续展宽。例如，两辆赛车沿跑道行驶，它们都遇到在跑道整个距离上大小和长度各不相同的凸块。在恒定速度下，每辆车遭遇的延迟都与另一辆车相当，这些延迟的统计累积将决定终点线时的总体延迟。该例子示出了以下条件：

- › 传统电信光纤情形
- › 施加至两个 PSP 轴/平面的随机可变应力
- › 在两个 PSP 之间共享的发射 SOP
- › 取决于 SMF 长度、各个应力的量级以及随机度（理想或半随机）的 PMD 值（平均值或 RMS DGD）

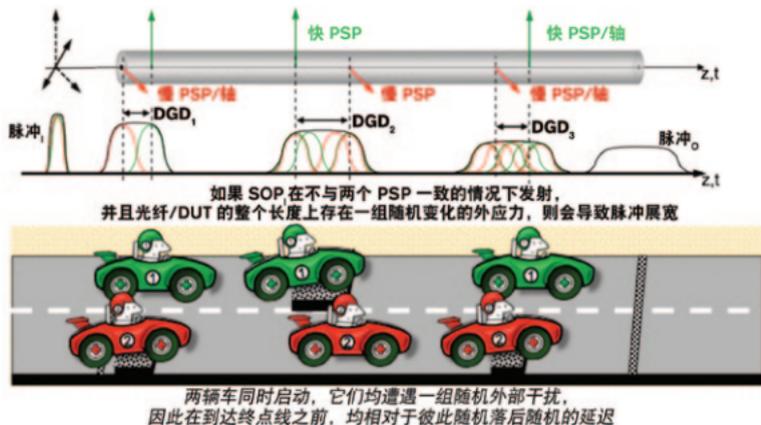


图 18 - 随机耦合、DGD 和不断增长的脉冲展宽的 SMF 情形

#### 4.2.4 随机 DGD、PMD 和不断增长的脉冲展宽（作为光纤长度的函数）

在图 18 中，脉冲沿整个 SMF 长度展宽。图 19 示出了各种 SMF 长度的这一性质。

根据图 19，建立短长度 PMD 情形的基础是光缆段 ( $\leq 6$  km) 特别考虑为降低 SMF 中的 PMD 而在生产中进行的恒定改进。该情形不适用于光纤跳线、其他跳线及任何短线缆组件。

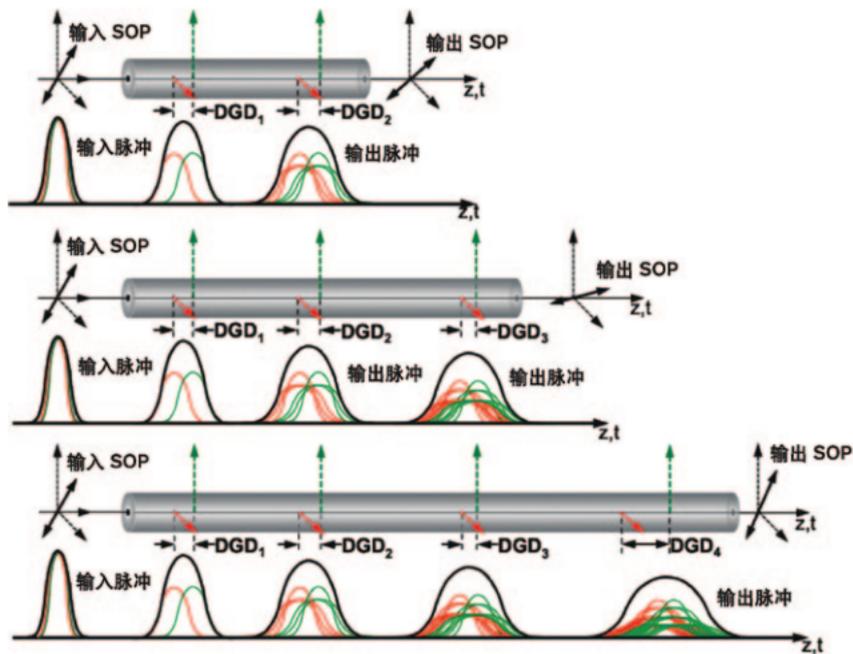


图 19 - 随 SMF 长度不断增大的脉冲展宽

## 5. PMD 规格和国际标准

随着使用新型高级调制格式的 40 和 100 Gbit/s 速率的出现，IEEE 802.3、ITU-T 及其第 15 研究组以及 IEC 技术委员会 – TC 86 已经撰写了大量关于 PMD 和 DGD 规格的文章。

### 5.1 PMD 光缆和链路设计规格

PMD 链路设计值  $PMD_Q$ 。用作光缆/链路的 PMD 系数（单位距离的 PMD）。 $PMD_Q$ （系数）用作 M 个光缆段定义的级联链路中一段长的成缆 SMF 的 PMD 系数上限。该上限根据概率水平 Q 定义，该概率是这段长成缆 SMF 的 PMD 系数值超过  $PMD_Q$ （系数）的概率。对于表 2（请参见第 27 页）中给出的 M 值和 Q 值，不会超过  $PMD_Q$ （系数）的对应值。

表 2 – 最大 PMD 系数的建议（标准化）值

光缆段数量 M	概率水平 $\rho$	SMF			PMD <sub>0</sub> (系数) [ps/km <sup>1/2</sup> ]
		ITU-T		IEC	
		类型	类别	60793-2-50	
20	1 x 10 <sup>-4</sup> (即 0.01%)	G.652	A 和 C <sup>1</sup>	B1.1	≤ 0.5
			B 和 D <sup>1</sup>	B1.3	≤ 0.20
		G.653	A	B2	≤ 0.5
			B		≤ 0.20 (制造商和用户可以协商更大的值)
		G.654	A	B1.2	≤ 0.5
			B 和 C		≤ 0.20
		G.655	A 和 B	B4	≤ 0.5
			C、D 和 E		≤ 0.20
		G.656		B5	≤ 0.20
		G.657	A	B6	≤ 0.20
			B		不是必需的, 因为 SMF 支持弯曲半径非常小的接入网安装

<sup>1</sup> G.652.C 和 G.652.D SMF 也称为低水峰 SMF

必须记住的是, PMD<sub>0</sub> 规格只能用于生产中的成缆 SMF, 而在用于已铺设链路、径距和光缆段时, 应仔细考虑 PMD 测量的不确定度, 如上文所述。

## 5.2 系统 PMD 规格

最大 DGD ( $DGD_{max}$ ) 用作传输系统的 PMD 规格。 $DGD_{max}$  定义为：在表 3 中指定的持续时间内，传输系统将遭遇大于  $DGD_{mean}$  的 DGD 值的概率所对应的 DGD 值。

由于 PMD 的统计学特性，可以使用  $DGD_{max}$  与  $DGD_{mean}$  的比值  $S$  来以概率统计的方式建立和定义  $DGD_{max}$  和  $DGD_{mean}$  之间的关系，如表 3 中所示。

许多国际组织提供了面向多种应用和比特率 (br) 的  $DGD_{max}$  规格相关文档。除非另行说明，否则下面几节介绍的  $DGD_{max}$  规格汇总均采用 1-dB 代价。

大多数测试设备都能测量  $DGD_{mean}$  (或  $DGD_{rms}$ )，但系统使用的是  $DGD_{max}$ 。表 3 有助于根据可接受的 BER 将系统要求转换为测试要求。

表 3 – 最大 DGD 与平均 DGD 之比以及相应概率

$DGD_{max}$ 与 $DGD_{mean}$ 之比	$DGD_{mean}$ 超过 $DGD_{max}$ 的概率	每年中 $DGD_{mean}$ 超过 $DGD_{max}$ 的时间
2.5	$1.5 \times 10^{-3}$	13.1 小时
3.0	$4.2 \times 10^{-5}$	22 分钟
3.1	$2.0 \times 10^{-5}$	10.5 分钟
3.2	$9.2 \times 10^{-6}$	5 分钟
3.25	$6.19 \times 10^{-6}$	3.2 分钟
3.3	$4.1 \times 10^{-6}$	2.15 分钟
3.4	$1.8 \times 10^{-6}$	56.6 秒
3.5	$7.7 \times 10^{-7}$	24 秒
3.6	$3.2 \times 10^{-7}$	10.1 秒
3.7	$1.3 \times 10^{-7}$	4.1 秒
3.75	$8.21 \times 10^{-8}$	2.6 秒
3.775	$6.5 \times 10^{-8}$	2.0 秒
3.8	$5.1 \times 10^{-8}$	1.6 秒
3.9	$2.0 \times 10^{-8}$	0.63 秒
4.0	$7.4 \times 10^{-9}$	0.23 秒
4.1	$2.7 \times 10^{-9}$	0.09 秒
4.2	$9.6 \times 10^{-10}$	0.03 秒
4.3	$3.3 \times 10^{-10}$	0.01 秒
4.4	$1.1 \times 10^{-10}$	0.0035 秒
4.5	$3.7 \times 10^{-11}$	0.0012 秒
4.6	$1.2 \times 10^{-11}$	0.00038 秒

### 5.3 各种应用和调制格式的 DGD<sub>max</sub> 规格

表 4.a 和 b 中列出了同步数字体系 (SDH)/同步光网络 (SONET) 的非归零 (NRZ) 应用以及光传送网 (OTN) 应用的 DGD<sub>max</sub> 规格。假设在低于该表所列值的比特率下，DGD<sub>max</sub> 变得太大，从而对 PMD 导致的功率代价产生巨大影响。

表 4.a – SDH/SONET NRZ 应用的 DGD<sub>max</sub> 规格

NRZ 应用		比特率 [Gbit/s]		DGD <sub>max</sub> [ps]
STM-x	OC-x	准确值	额定值	
4	12	0.622	0.622	480
8	24	1.244	1.25	240
16	48	2.488	2.5	120
64	192	9.953	10	30
256	768	39.813	40	7.5
(一些 SMF 类别的 PMD 系数过高, 无法保证该 DGD)				

表 4.b – OTN 应用的 DGD<sub>max</sub> 规格

OTN 应用	比特率 [Gbit/s]	DGD <sub>max</sub> [ps]
NRZ OTU1 + FEC	2.666	120
NRZ OTU2 + FEC	10.709	30
NRZ OTU3 + FEC	43.018	7.5
		(一些 SMF 类别的 PMD 系数过高, 无法保证该 DGD)

备注: OTU: 光传输单元; FEC: 前向纠错

表 4.c – NRZ 25G (OTN NRZ OTL4.4) 应用的  $DGD_{max}$  规格

参数	单位	OTN NRZ OTL4.4 <sup>1</sup> + FEC	
额定比特率	Gbit/s	25	
OTN 比特率		4 x 27.953 [111.810]	
波长窗口	nm	1310	
频率范围	THz	229.0 + [0.8•m], m = 0 至 3	
源端类型	—	SLM	
通路间距	GHz	800	
通道数量	—	4	
SMF 类型		ITU-T 建议标准 G.652 [??]	
最大 BER		1x10 <sup>-12</sup>	
最大通道代价	dB	1.5	2.5
最大衰减	dB	6.3	18
距离	km	10	40
$DGD_{max}$	ps	8	10.3

<sup>1</sup> 光通路传输通道 (OTL) 4.4 (在 4 个通路上运行的 OTU4 信号也称为通道) =  
 $255/227 \times 24.883200 \text{ Gbit/s} = \text{每通道 } 27.952493 \text{ Gbit/s}$ , 总共 111.810 Gbit/s

## 5.4 各种应用和调制格式的建议 $DGD_{max}$ 值

表 5 和 6 分别列出了 40 和 100 Gbit/s 速率的各种系统 PMD 规格建议。 $DGD_{max}$  值不应被解释为或用作系统 PMD 规格。提供这些信息仅旨在介绍国际标准化团体为理解 PMD 在超高比特率和各种传输机制中的效应而开展的工作。这些持续且不断改进的工作最终有希望建立起系统 PMD 规格。

表 5.a – 使用各种调制格式的 40-Gbit/s OTN 应用的建议  $DGD_{max}$  值

OTN 应用		40G OTU3 + FEC				
参数	单位	ODB/PSBT	NRZ-DPSK	NRZ-p-DPSK 66 GHz FSR	P-DPSK	DP-QPSK (相干)
比特率	Gbit/s	43.018				4 x 10.7545
波长范围	nm	1530 - 1565 (C 波段)				
SMF 类型参考	—	ITU-T 建议标准 G.652 [??] 和 G.655 [80]				
$DGD_{max}$ (1-dB OSNR 代价)	ps	5.5/7	8	7	6	75

ODB: 光学双二进制; PSBT: 相位整形二进制传输; DPSK: 差分相移键控; FSR: 自由光谱范围; DP-QPSK: 双偏振正交相移键控

表 5.b – 使用各种 RZ（归零）调制格式的 40-Gbit/s OTN 应用的建议  $DGD_{max}$  值

OTN 应用		40G OTU3 + FEC			
参数	单位	RZ-QPSK	RZ-DQPSK (相干)	OPFDM-RZ-DQPSK	RZ-AMI
比特率	Gbit/s	43.018	2 x 21.509	2 x 21.509	43.018
波长范围	nm	1530 - 1565			
SMF 类型参考	—	ITU-T 建议标准 G.652 [??] 和 G.655 [80]			
$DGD_{max}$ (1-dB OSNR 代价)	ps	9	18/20	20	9.5

DQPSK: 差分 QPSK; OPFDM: 正交偏振频域复用; AMI: 交替传号反转

表 6.a – 使用各种调制格式的 100-Gbit/s OTN 应用的建议  $DGD_{max}$  值

OTN 应用		100G OTU4				
参数	单位	NRZ		ODB/PSBT		
比特率	Gbit/s	4 x 27.953 (111.810)	3 x 43.018 (130)	43.018	4 x 27.953 (111.810)	3 x 43.018 (130)
波长范围	nm	1530-1565 (未提及, 为假定值)				
SMF 类型参考	—	ITU-T 建议标准 G.652 [??] 和 G.655 [80]				
$DGD_{max}$ (1-dB OSNR 代价, BER = $1 \times 10^{-4}$ )	ps	2.9	2.5	7	2.7	2.3

表 6.b – 使用各种调制格式的 100-Gbit/s OTN 应用的建议  $DGD_{max}$  值

OTN 应用		100G OTU4					
参数	单位	RZ-DQPSK			DPSK		
比特率	Gbit/s	43.018	4 x 27.953 [111.810]	3 x 43.018 [130]	4 x 27.953 [111.810]	3 x 43.018 [130]	
波长范围	nm	1530-1565 (未提及, 为假定值)					
SMF 类型参考	—	ITU-T 建议标准 G.652 [??] 和 G.655 [80]			ITU-T 建议标准 G.652 [??] + DCF (80 km + 12.8 km)		
$DGD_{max}$ (1-dB OSNR 代价, $BER = 1 \times 10^{-4}$ )	ps	19	7.3	6.3	9		7.7
					DGD 与符号持续时间之比 = 10%		

DCF: 色散补偿光纤

表 6.c – 使用大多数高级调制格式的 100-Gbit/s OTN 应用的建议  $DGD_{max}$  值

OTN 应用		100G OTU4					
参数	单位	DP-QPSK		DQPSK		DP-DQPSK	
比特率	Gbit/s	4 x 27.953 [111.810]	3 x 43.018 [130]	4 x 27.953 [111.810]	3 x 43.018 [130]	4 x 27.953 [111.810]	3 x 43.018 [130]
波长范围	nm	1530-1565 (未提及, 为假定值)					
SMF 类型参考	—	ITU-T 建议标准 G.652 [??] + DCF (80 km + 12.8 km)					
$DGD_{max}$ (1-dB OSNR 代价, $BER = 1 \times 10^{-4}$ )	ps	27	23	18	15.4	36	30.8
				DGD 与符号持续时间之比 = 10%			

## 5.5 以太网应用的 $DGD_{\max}$ 规格

下表示出了各种比特率的以太网系统 PMD 规格。

表 7.a – 40-Gbit/s 以太网串行应用的  $DGD_{\max}$  规格 [95]

OTN 应用		40GBASE-FR	
参数	单位		
信号速率	Gbit/s	41.25	
通路间距	nm	—	
波长范围	Tx	1530 至 1565	
	Rx		1290 至 1330 1530 至 1565
SMF 类型	—	IEC 60793-2-50 类型 B1.1、B1.3、B6 [96]	
距离	km	0.002 至 2	
$DGD_{\max}$ (2-dB 代价, $BER = 1 \times 10^{-12}$ )	ps	0.5	

表 7.b – 40-Gbit/s 和 100-Gbit/s 以太网应用的  $DGD_{max}$  规格 [97]

OTN 应用				
参数	单位			
信号速率	Gbit/s	4 通道 x 10.3125 GBd (41.25 Gbit/s)	4 通道 x 25.78125 GBd (103.125 Gbit/s)	
通路间距	nm	20 [CWDM]		
	GHz		800 [DWDM]	
中心波长 (波长范围)	nm	1271 nm (1264.5 至 1277.5) 1291 nm (1284.5 至 1297.5) 1310 nm (1304.5 至 1317.5) 1331 nm (1324.5 至 1337.5)		
中心频率 (波长范围)	THz		231.4 THz (1294.53 至 1296.59) 230.6 THz (1299.02 至 1301.09) 229.8 THz (1303.54 至 1305.63) 229.0 THz (1308.09 至 1310.19)	
SMF 类型	—	IEC 60793-2-50 类型 B1.1、B1.3、B6		
距离	km	0.002 至 10	0.002 至 10	0.002 至 30
				0.002 至 401
$DGD_{max}$ (2.6-dB 链路代价, BER = $1 \times 10^{-12}$ )	ps	10	8	10.3

<sup>1</sup> 将功率预算相同的 > 30 km 的链路视为工程链路。此类链路的衰减需要小于为 B1.1、B1.3 或 B6A SMF 指定的最坏情况

## 6. PMD 导致的脉冲展宽和代价

$DGD_{\max}$  的设置使得不允许超过指定的功率代价。这些最坏情况功率代价也会受到以下传输格式的影响：NRZ 或 RZ。

对于 40-Gbit/s NRZ 应用，1-dB 的代价容限对应于 7.5 ps 的  $DGD_{\max}$ ，它是接收器处 DGD 的限值。如果允许该代价的一半，则  $DGD_{\max}$  会下降；如果允许该代价的两倍，则  $DGD_{\max}$  会增大，从而使系统对 PMD 的容限更高。

图 20 示出了 PMD 导致的功率代价均值（作为 PMD 的函数）。

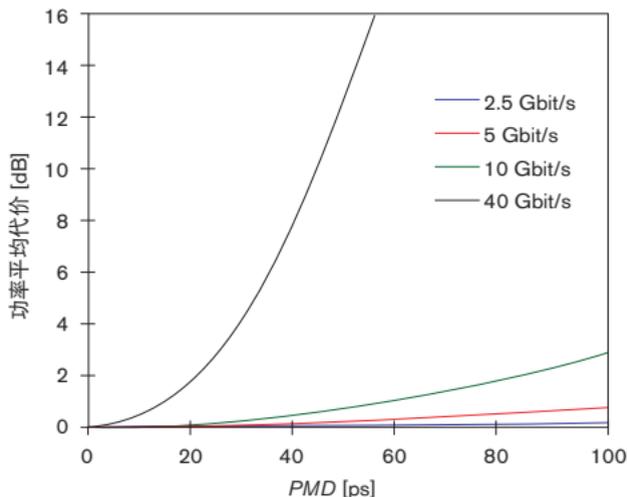


图 20 — PMD 导致的功率代价均值（作为 PMD 和比特率的函数）

## 7. PMD 测试和测量

20 世纪 90 年代早期，运营商开始观察到随机网络中断时，10 Gbit/s 速率下 PMD 的影响；从这时起，包括国际论坛中的长篇讨论在内的大量研究和出版物就已经在讨论 PMD 测量。

自那以来，已经建议了不少 PMD 测量和测试方法。以下列表包含了主要方法，按英文字母顺序排列分别为：

- › 固定分析法
  - 极值计数 (FA-EC) (已标准化；不适用)
  - 傅立叶变换 (FA-FT) (已标准化；可以购买)
- › 干涉测量法：
  - 扩展干涉 (GINTY) 法 (已标准化；可以购买)
  - 传统干涉 (TINTY) 法 (已标准化；可以购买)
- › 调制相移法 (MPS) (已标准化；不适用)
- › 邦加球圆弧法 (PS)，也称为 SOP 法 (已标准化；不适用)
- › 偏振相移法 (PPS) (已标准化；不适用)
- › 扰偏 SOP 分析法 (SSA) (已标准化；可以购买)
- › 斯托克斯参数评估法：
  - 琼斯矩阵特征分析 (JME) (已标准化；可以购买)
  - 邦加球分析 (PSA) (已标准化；不适用)

*备注：不适用是指方法仅仅已经发表或者不可购买。*

下文仅讨论可购买并且可以在安装链路 PMD 测试的现场仪器中使用的方法。

## 7.1 可用测试方法介绍

### 7.1.1 固定分析法—傅立叶变换

FA-FT 使用宽带光源 (BBS) 或可调式激光光源 (TLS) 产生的一个 SOP 以及相应光谱分析仪或功率计得到的一个 SOP (具体取决于设置), 如图 21 所示。

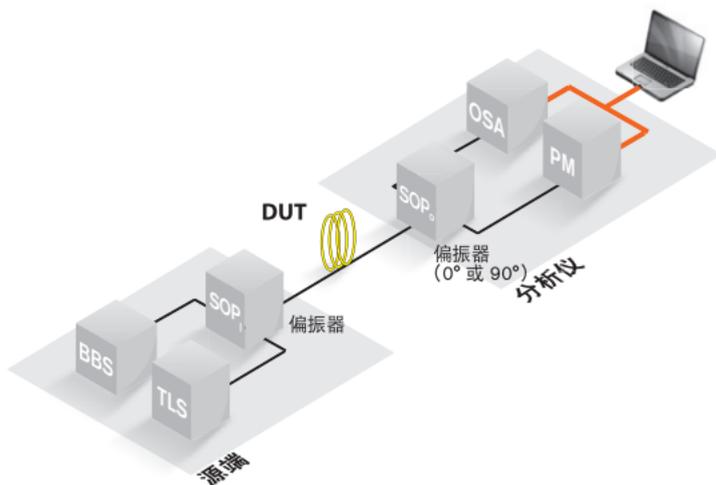


图 21 – FA-FT 测试方法设置示意图

该方法用于测量波长扫描期间通过 DUT 并被其改变的 SOP 的统计功率变化 (这是“波长扫描”这一术语的起源)。

与下文将讨论的 TINTY 相似，FA-FT 必须遵守严格的要求（为了精简文字，TINTY 部分不再赘述这些严格要求）：

- › 如果使用 BBS，则其频谱必须符合高斯分布并且没有频谱功率波动
- › 模耦合必须是随机的（不允许混合耦合测量）；图 22 示出了随机模耦合 (RMC)

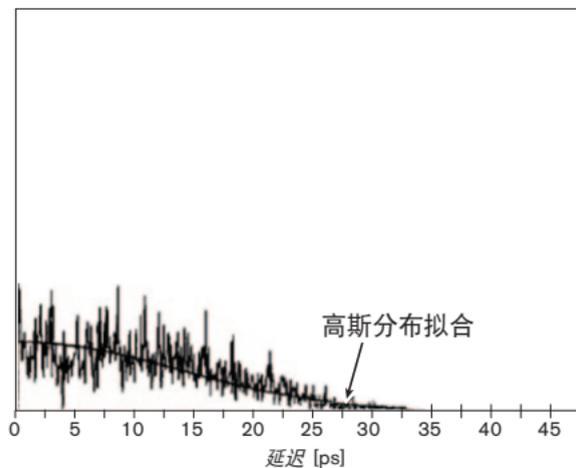


图 22 - FA-FT 测试方法设置示意图

- › SMF 必须非常长（数公里）
- › 所得干涉图（半边）必须符合理想高斯分布（半边），且包含大量条纹（数百条至数千条）
- › 所得干涉图（半边）超出零的长度必须至少为其 RMS 半宽度的三倍
- › PMD 必须足够大（不允许数量级低于 ps 的测量）；不允许光缆段测量
- › BBS 不允许测量光放大器或窄带组件或包含这些器件的链路
- › TLS 偏振度 (DOP) 在测量期间必须保持较高水平
- › 频率增量/间隔必须固定
- › 源端频谱 (BBS) 或范围 (TLS) 被限制为预定义的固定窗口，因此统计平均值被限制为有限量的波长（或窗口），这带来的结果是，平均值或 RMS 值的不确定度与频谱窗口成正比。

与任何其他 PMD 测试方法相似，在随机模耦合 (RMC) 的情形下，光源窗口必须尽可能宽（例如，通常  $\geq 200$  nm，理论上到无限大），以获得最大数量的统计采样。这样就可以使所得统计平均值的不确定度最低。这就是为什么使用短 SMF 和低 PMD 难以获得精确 PMD 值的原因：不确定度会高得不可接受。

## 7.1.2 干涉测量法 (TINTY/GINTY)

PMD 干涉测量法分为两种不同的分析方式：

- › 传统分析，它有多项严格条件的限制，用于获得前一节定义的 RMC 情形（较大的 PMD，长 SMF）的  $DGD_{RMS}$
- › 扩展分析，没有限制，用于获得任意模耦合情形（任意 SMF 类型和长度，以及任意 PMD 值）的  $DGD_{RMS}$ 。

### 7.1.2.1 传统分析法

传统 PMD 干涉测量法 (TINTY) 基于线性偏振 BBS、干涉仪（其中正交 SOP 互相干涉）以及输入端使用的偏振分析仪，如图 23 所示。

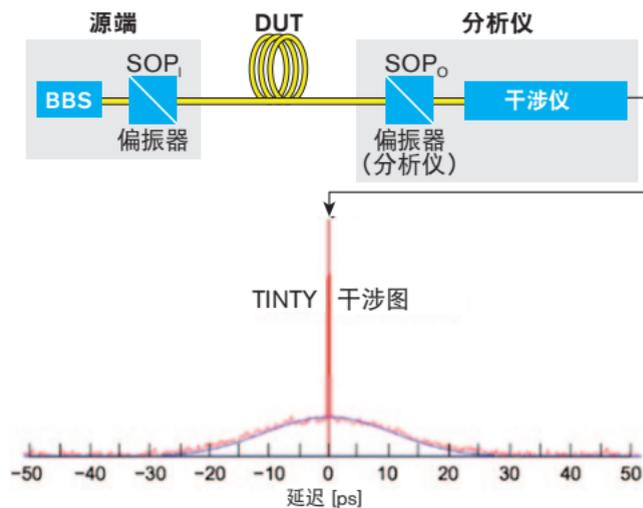


图 23 - TINTY 示意图与典型测试结果干涉图

## 7.1.2.2 扩展分析法

在 GINTY 情形下，没有任何限制条件，因此该方法适用于从极复杂 DUT 或使用混合模耦合的链路的最低 PMD（零）开始或到任意光源形状和频谱的任何情形。

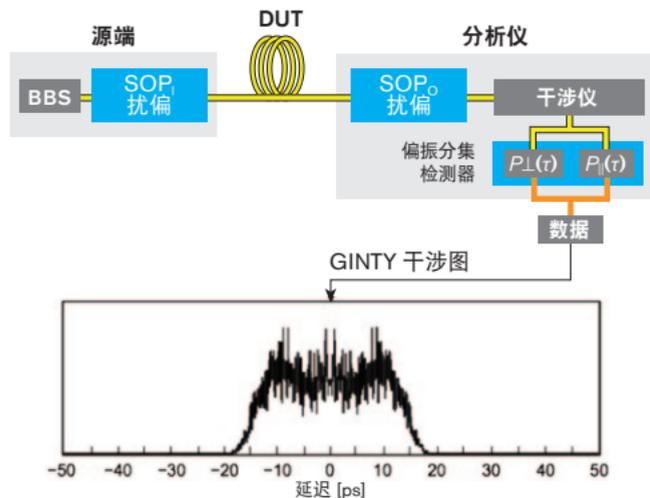


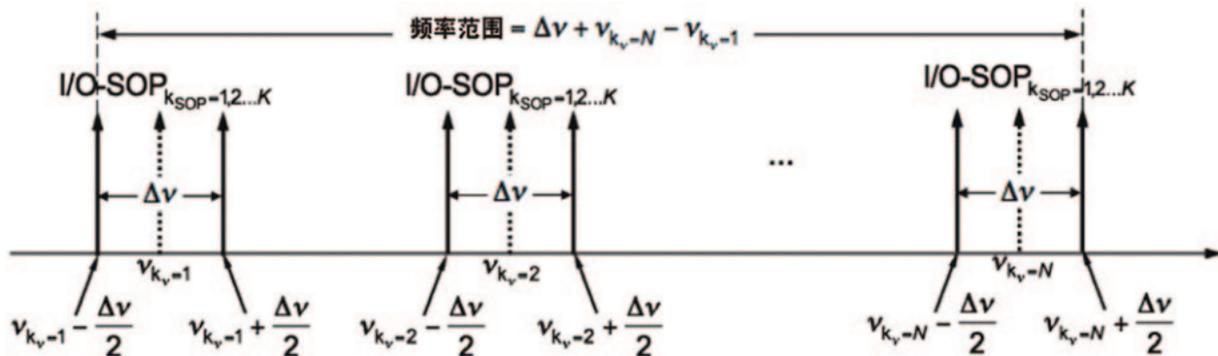
图 24 - GINTY 示意图与典型互相关干涉图测试结果

## 7.1.3 扰偏偏振态分析法 (SSA)

### 7.1.3.1 一般理论

SSA 用于测量 DUT 在  $k = 1$  至  $N$  的两个紧密相邻频率（即频率对）的功率，其中  $N$  为所选频率上的频率对总数。每个频率对与一组随机且均匀扰偏偏输入/输出 SOP 关联，以获得 DGD；或一个随机扰偏偏输入/输出 SOP 关联，以获得 PMD。

图 25 示出了 SSA 实现中频率对、中心频率的数量、频率间隔以及频率范围的概念。



备注：I/O-SOP 在每个频率对上均是随机且均匀扰偏偏的

图 25 - SSA 的频率对、间隔和范围概念，以及 I/O-SOP 扰偏偏

从测量的角度来看，大量 I/O-SOP（数千个）可以改善不确定度，但这需要较长的时间来进行测量和计算平均值。另一方面，少量 I/O-SOP（几十个）需要更短的时间来进行测量和计算平均值，但不确定度会增加。

### 7.1.3.2 实验实现

通过以上方法，可以在端到端转发实现或单端环回实现中使用 SSA。每种实现都有专门的实验配置和应用条件。

表 8 列出了各种 SSA 实现、条件和结果。

表 8 – 使用 TLS 的 SSA 实验配置矩阵

参数	SSA 实现	
	端到端转发	单端环回
SOP	随机独立且均匀扰偏的 I-SOP 和 O-SOP	随机组合且均匀扰偏的 I/O-SOP
光源	CW TLS	脉冲 TLS
检测	偏振分集检测器	

### 7.1.3.3 将 PMD 作为距离的函数进行测量

另一种 SSA 实现是使用随机扰偏偏振光时域反射法 (RS-POTDR)，将 PMD ( $DGD_{RMS}$ ) 作为沿已安装成缆 SMF 的距离的函数进行定量测量。

由于该实现基于 OTDR，因此使用单端环回配置，如图 26 所示。

相同 SSA 理论在此处也是适用的，例外之处是在这种情况下，使用从已安装 SMF 相对于所选 OTDR 脉冲宽度的特定距离间隔将平均值作为距离的函数进行计算。

从 OTDR 曲线对的局部差异值（它对应于相距很近的随机频率/波长对）计算 PMD(z) 值。

图 27 提供了双向测试结果例子，它示出了一段长 18.9-km、有熔接点和 PMD 仿真器的 SMF 的累积 PMD。两端均使用了连接器。

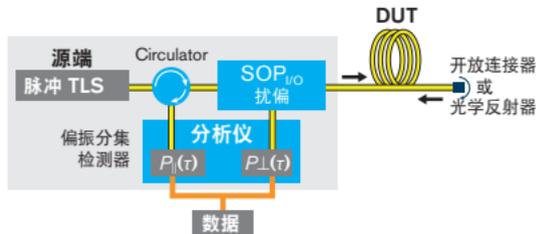


图 26 - 使用脉冲 TLS、组合  $SOP_I$  和  $SOP_O$  扰偏与 PDD 的单端环回配置

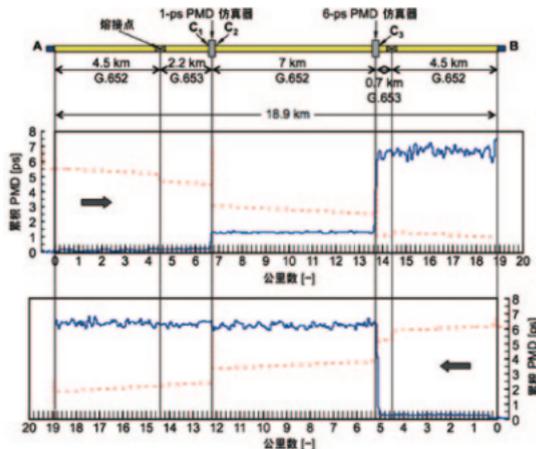


图 27 - SSA 累积 PMD 测试结果（作为距离的函数）的例子

## 7.2 PMD 测试和测量中的不确定度

PMD 测试和测量结果的不确定度基于两个分量，如图 28 所示。

第一个分量是根据所选仪器实现和设备参数设置的测量不确定度。

第二个分量是所选频率/波长范围和 PMD 值的基本不确定度。这被称为 Gisin 不确定度，它在很多情况下都会限制低 PMD 值的测量和/或精度。这种不确定度的绝对值相当小，但对于低 PMD 测量值而言，则会变得很重要（相对而言）。

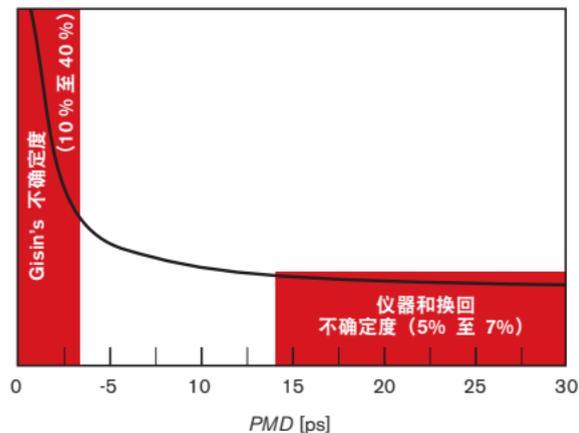


图 28 - 典型实验不确定度的例子

## 7.3 PMD 测试和测量仪器的校准

与其他任何测试仪器相似，必须使用溯源流程和包含大量关键步骤的一套程序来校准 PMD 测试仪器。

第一个步骤包括使用国际认可的独立国家计量实验室 (INML) 设计和提供的标准参考材料 (SRM)。该 SRM 随附校准证书，列出 PMD 的保证值及其不确定度（从精确控制环境条件下的固定频率/波长范围测量得到的 DGD 获得）。为了获得保证值，INML 会在自己的实验室设计和构建自己的仪器。

### 7.3.1 可用 PMD 测试方法的适用性矩阵

表 9 给出了 PMD 测试方法及其应用的总览。

表 9 – PMD 测试方法的适用范围

	可用 PMD 测试方法			
	FA-FT	INTY		SSA
		TINTY	GINTY	
配置	端到端	端到端	端到端	单端
应用	RMC	RMC	任何 MC	任何 MC
工厂光纤和光缆	PMD > 1 ps, 长光纤		X	
工厂无源器件				
工厂掺杂放大器				
现场架空链路	PMD > 1 ps, 长光纤		X	X
现场非放大链路	PMD > 1 ps, 长光纤		X	X
现场放大链路	TLS/OSA PMD > 1 ps, 长光纤		X	

## 致谢

如果没有 EXFO 全体员工的积极工作和共同努力，尤其是产品线管理团队的辛勤工作和专业技术，就不会有本指南。

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。

中国印刷和装订

ISBN 978-1-55342-106-1

法定送存-加拿大国家图书馆 2012

法定送存-魁北克国家图书馆 2012

要获得有关我们任何产品和服务的详细信息，或者下载技术和应用说明，请访问我们的网站：  
[www.EXFO.com](http://www.EXFO.com)。

**EXFO**