

偏振模色散的原理和测试方法分析

摘要：偏振模色散将引起高速光脉冲畸变，制约传输距离，是 40Gb/s 高速光纤通信的主要技术难点之一。本文研究了偏振模色散的产生原理、对传输光脉冲的影响等问题；分析了偏振模色散的三种主要测试方法的测量配置和各自优缺点；讨论了每种方法的最佳应用场合。

一、引言

光纤的色散引起传输信号的畸变，使通信质量下降，从而限制了通信容量和通信距离。在光纤的损耗已大为降低的今天，色散对高速光纤通信的影响就显得更为突出。40Gb/s 系统和 10Gb/s 系统相比，在光纤传输上的色散效应对系统性能的影响有新的差异。特别是偏振模色散（Polarization Mode Dispersion, 简称 PMD）的影响难以克服。所以，在 40Gb/s 系统技术中，必须考虑和研究光纤的色散，PMD 和非线性的影响等。同时，由于偏振模色散的测试是比较复杂的问题，如何根据其特点，比较迅速和准确地测出偏振模色散值，从而进行色散补偿，将是本文讨论的重点。

本文作者主要从事高速光传输收发模块的研究开发，于 2002 年 11 月参加了在上海举行的 Tektronix 2002 亚太区大型巡回讲座和研讨会，针对偏振模色散的最新测试技术这一问题，作者与 Tektronix 公司的偏振模色散测试技术人员、工程师作了沟通和交流，并在本文中作了比较详细的分析和探讨。

二、色散的原理和分类

色散是光纤的一个重要参数。降低光纤的色散，对增加通信容量，延长通信距离，发展高速 40Gb/s 光纤通信和其它新型光纤通信技术都是至关重要的。

光纤的色散主要由两方面引起：一是光源发出的并不是单色光；二是调制信号有一定的带宽。实际光源发出的光不是单色的，而是有一定的波长范围。这个范围就是光源的线宽。在对光源进行调制时，可以认为信号是按照同样的方式对光源谱线中的每一分量进行调制的。一般调制带宽比光源窄得多，因而可以认为光源的线宽就是已调信号带宽，但对高速和线宽极窄的光源，情况不一样。进入光纤中去的是一个调制了的光谱，如果是单模光纤，它将激发出基模；如果是多模光纤，则激发出大量模式。由此可以看出，光纤中的信号能量是由不同的频率成分和模式成分构成的，它们有不同的传播速度，从而引起比较复杂的色散现象。

光纤的色散可以分为下列三类：

模间色散：在多模光纤中，即使是同一波长，不同模式的光由于传播速度的不同而引起的色散称为模式色散。

色度色散：是指光源光谱中不同波长在光纤中的群延时差所引起的光脉冲展宽现象。

偏振模色散：单模光纤中实际存在偏振方向相互正交的两个基模。当光纤存在双折射时，这两个模式的传输速度不同而引起的色散称为偏振模色散。

图 1 是这三种色散的示意图：

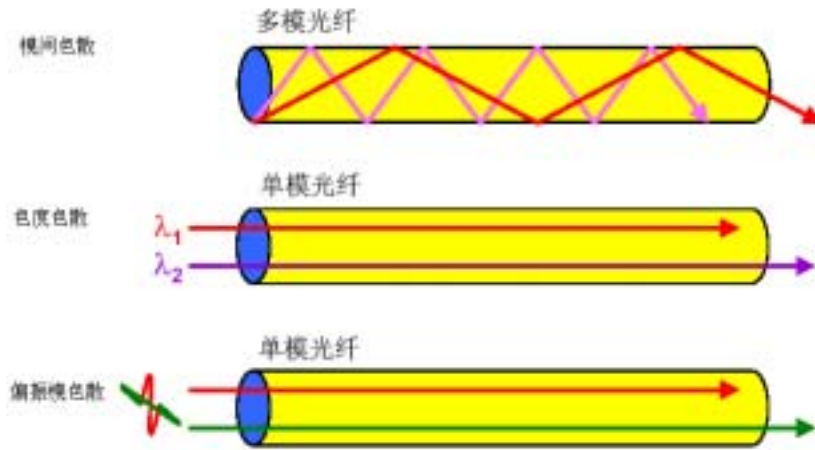


图 1 光纤色散示意图

三、偏振模色散的原理和特点

(1) 偏振模色散的概念

双折射与偏振是单模光纤特有的问题。单模光纤实际上传输的是两个正交的基模，它们的电场各沿 x, y 方向偏振。在理想的光纤中，这两个模式有着相同的相位常数，它们是互相简并的。但实际上光纤总有某种程度的不完善，如光纤纤芯的椭圆变形、光纤内部的残余应力等，将使得两个模式之间的简并被破坏，两个模式的相位常数不相等，这种现象称为模式双折射。由于存在双折射，将引起一系列复杂的效应。例如，由于双折射，两模式的群速度不同，因而引起偏振色散；由于双折射偏振态沿光纤轴向变化，外界条件的变化将引起光纤输出偏振态的不稳定，这对某些应用场合，影响严重。

光纤的固有偏振模色散是由非圆形纤芯引起，构成双折射现象导致的色散，而对双折射引起的偏振模色散是由外部因素如机械压力、热压力等导致的色散。

图 2 是引起偏振模色散的光纤示意图：

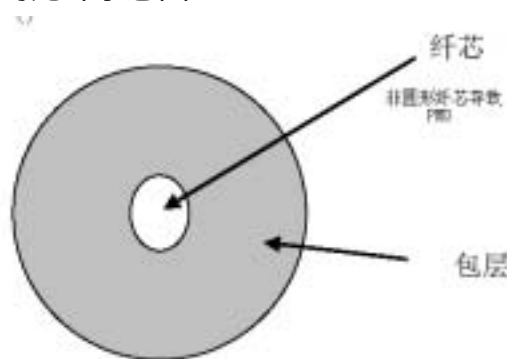


图 2 光纤示意图

偏振模色散不能避免，只能最小化。由于光纤存在 PMD，已经给 10Gb/s 链路带来了严重限制。而在 40Gb/s 速率上，任何器件也有少量的 PMD。

(2) 偏振模色散对于光脉冲的影响

偏振模色散具有随机性，这与具有确定性的波长色散不同，其值与光纤制作工艺、材料、传输线路长度和应用环境等因素密切相关。

由于受工艺水平的制约，传输链路上使用的每一段光纤结构上存在差异，即使同一段光纤，也必然存在纵向不均匀性，因而 PMD 的值也会因光纤而异。从工程安装和链路环境看，影响因素不仅多，而且具有不定性。比如环境温度，夏冬温差可能达 30~80℃，昼夜温差也有可能达 10~30℃。PMD 的大小，由这些因素的综合影响决定，也具有不确定性，是一个随机变量。通常所说的 PMD 是多少，指的是（统计）平均值。在光纤链路上，两个正交的偏振模产生的时延差遵守一定的概率密度分布。PMD 的值与光纤长度的平方根成反比例的变化，因而其单位记作 $\text{ps} / \text{km}^{1/2}$

PMD 和色度色散对系统性能具有相同的影响，即引起脉冲展宽，从而限制传输速率，如图 3 所示。然而，PMD 比波长色散小得多，对低速率光传输的影响可忽略不计，甚至没有列入早先的光纤性能指标之中。但是随着系统传输速率的提升，偏振模色散的影响逐渐显现出来，成为继衰减、波长色散之后限制传输速度和距离的又一个重要因素。如何减少 PMD 的影响，是目前国际上研究的热点之一。PMD 是一个随机变量，其瞬时值随波长、时间、温度、移动和安装条件的变化而变化，导致光脉冲展宽量不确定，其影响相当于随机的色散。它与波长色散发生的机制虽然不同，但是对系统性能具有同样的影响，因此也有人将偏振模色散称作单模光纤中的“多模色散”。

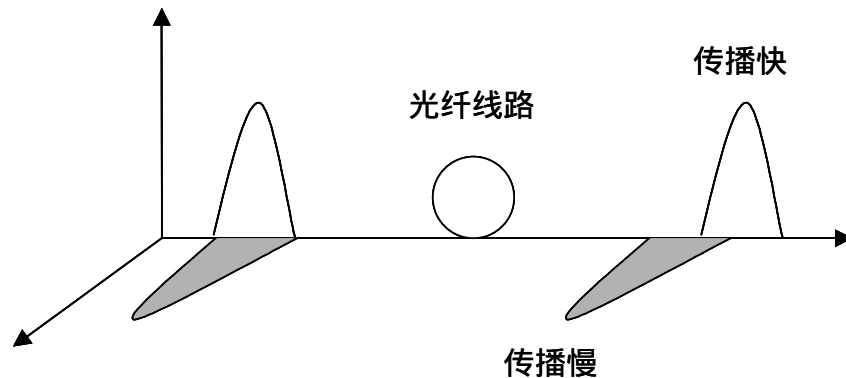


图 3 正交偏振模之间产生群时延差

(3) 偏振模色散对于光传输距离的影响

不同时期敷设的光纤，PMD 值差别很大。10 年前应用的光缆受当时光纤工艺水平所限，PMD 通常大于 $2\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ ，有的高达 $6\sim 7\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ ；后来布设的光缆，PMD 不大于 $0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ ，不会对 10Gbit/s 速率系统造成限制；近年来敷设的光缆，多为 $0.2\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 甚至更小。最优秀的光纤，PMD 已经控制到 $0.001\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 的水平。

当两个正交的偏振模之间的时延差 $\delta\tau$ 达到系统速率一个脉冲时隙的三分之一时，将会付出 1dB 的信号功率代价。由于 PMD 的随机统计特性，PMD 的瞬时值有可能达到平均值的 3 倍。为了保证信号功率代价低于 1dB，PMD 的平均值必须小于系统速率一个脉冲时隙的十分之一。

因为

$$\text{PMD} = \delta\tau / L^{1/2} \quad \text{ps}/\text{km}^{1/2} \quad (\text{公式 1})$$

现在要求 $\delta\tau = 1/(10B)$ ，设速率为 B 的系统受 PMD 限制的最大传输距离为 L km, 则

$$L = (\delta\tau/\text{PMD})^2 = (1/(10*B*\text{PMD}))^2 \text{ km} \quad (\text{公式 2})$$

早期布设光纤中，有一部分对 STM-16 信道速率的系统也产生限制。当 PMD=0.5ps/km^{1/2} 时,STM-64 系统受 PMD 限制的传输距离(1dB 代价)大约为 400km,对于 40Gbit/s 系统,却只有 25km。如果容许两个正交偏振模之间的时延差达到一个脉冲时隙的三分之一,40Gbit/s 传输的 PMD 容限约 8.3ps;若要保证在任何情况下系统功率代价都不超过 1dB,即限定两个偏振模的传输时延差不超过一个脉冲时隙的十分之一,则 PMD 容限只有 2.5ps。要实现 600km 以上的长途传输, PMD 系数就要不高于 0.1ps/km^{1/2}。根据上述分析可知, PMD 是重要的限制因素。不同速率系统受 PMD 限制的传输距离可以计算出来。利用公式 2 计算不同速率系统受偏振模色散限制的最大传输距离, 其结果列于下表 1 中。

表 1 不同速率系统受 PMD 限制的最大传输距离

PMD Ps/km ^{1/2}	受 限 距 离 km						
	10 Gb/s	20 Gb/s	40 Gb/s	80 Gb/s	160 Gb/s	320 Gb/s	640 Gb/s
0.001	100000000	25000000	6250000	1562500	390625	97656.25	24414.06
0.005	4000000	1000000	250000	62500	15625	3906.25	976.5625
0.01	1000000	250000	62500	15625	3906.25	976.5625	244.1406
0.03	111111.11	27777.78	6944.444	1736.111	434.0278	108.5069	27.12674
0.05	40000	10000	2500	625	156.25	39.0625	9.765625
0.06	27777.778	6944.444	1736.111	434.0278	108.5069	27.12674	6.781684
0.07	20408.163	5102.041	1275.51	318.8776	79.71939	19.92985	4.982462
0.08	15625	3906.25	976.5625	244.1406	61.03516	15.25879	3.814697
0.09	12345.679	3086.42	771.6049	192.9012	48.22531	12.05633	3.014082
0.1	10000	2500	625	156.25	39.0625	9.765625	2.441406
0.2	2500	625	156.25	39.0625	9.765625	2.441406	0.610352
0.3	1111.1111	277.7778	69.44444	17.36111	4.340278	1.085069	0.271267

0.4	625	156.25	39.0625	9.765625	2.441406	0.610352	0.152588
0.5	400	100	25	6.25	1.5625	0.390625	0.097656
0.6	277.77778	69.44444	17.36111	4.340278	1.085069	0.271267	0.067817
0.7	204.08163	51.02041	12.7551	3.188776	0.797194	0.199298	0.049825
0.8	156.25	39.0625	9.765625	2.441406	0.610352	0.152588	0.038147
0.9	123.45679	30.8642	7.716049	1.929012	0.482253	0.120563	0.030141
1	100	25	6.25	1.5625	0.390625	0.097656	0.024414
2	25	6.25	1.5625	0.390625	0.097656	0.024414	0.006104
3	11.111111	2.777778	0.694444	0.173611	0.043403	0.010851	0.002713
4	6.25	1.5625	0.390625	0.097656	0.024414	0.006104	0.001526
5	4	1	0.25	0.0625	0.015625	0.003906	0.000977
6	2.777778	0.694444	0.173611	0.043403	0.010851	0.002713	0.000678
7	2.0408163	0.510204	0.127551	0.031888	0.007972	0.001993	0.000498

四、偏振模色散的测试方法

偏振模色散具有随机性，在 DWDM 系统中，造成偏振和引起偏振模色散的因素很多，示意图如图 4 所示：

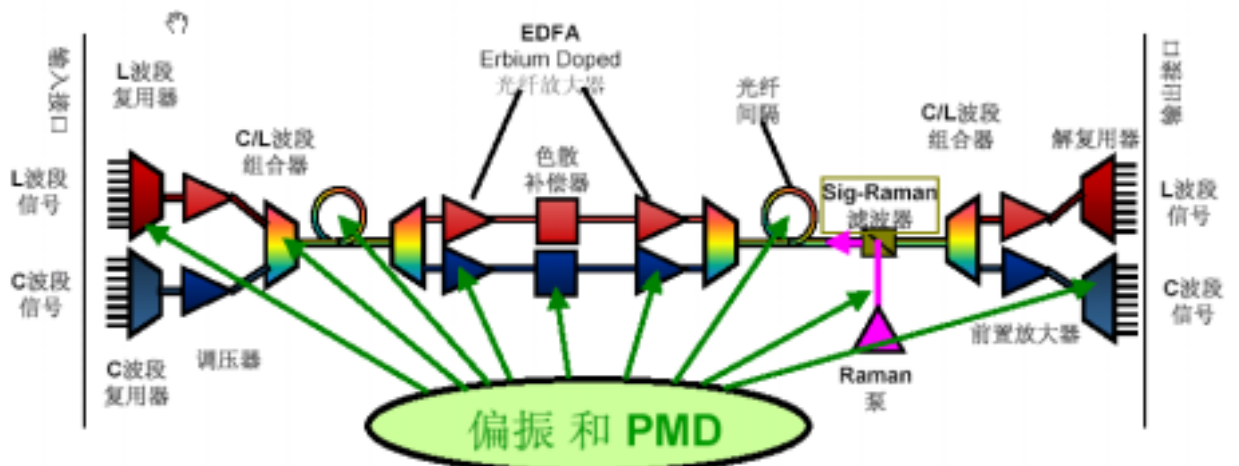


图 4 引起偏振和偏振模色散的因素

下面是偏振模色散 PMD 和偏振相关损耗(Polarization Dependent Loss, 简称 PDL)的测试方法:

偏振模色散 PMD 是指在一定时间内一定波长范围内或在指定波长上某时间窗口上的平均时延, 与时间相对无关, 具有确定性。PMD 的测试方法主要有琼斯矩阵特征分析法、干涉测量方法和波长扫描法等。

1、琼斯矩阵特征分析法的测试原理和步骤如下:

测试的配置包括可调谐光源 (Tunable Laser Source,简称 TLS)、被测器件 (Device Under Test, 简称 DUT)、偏振器和偏振计等。如图 5 所示。

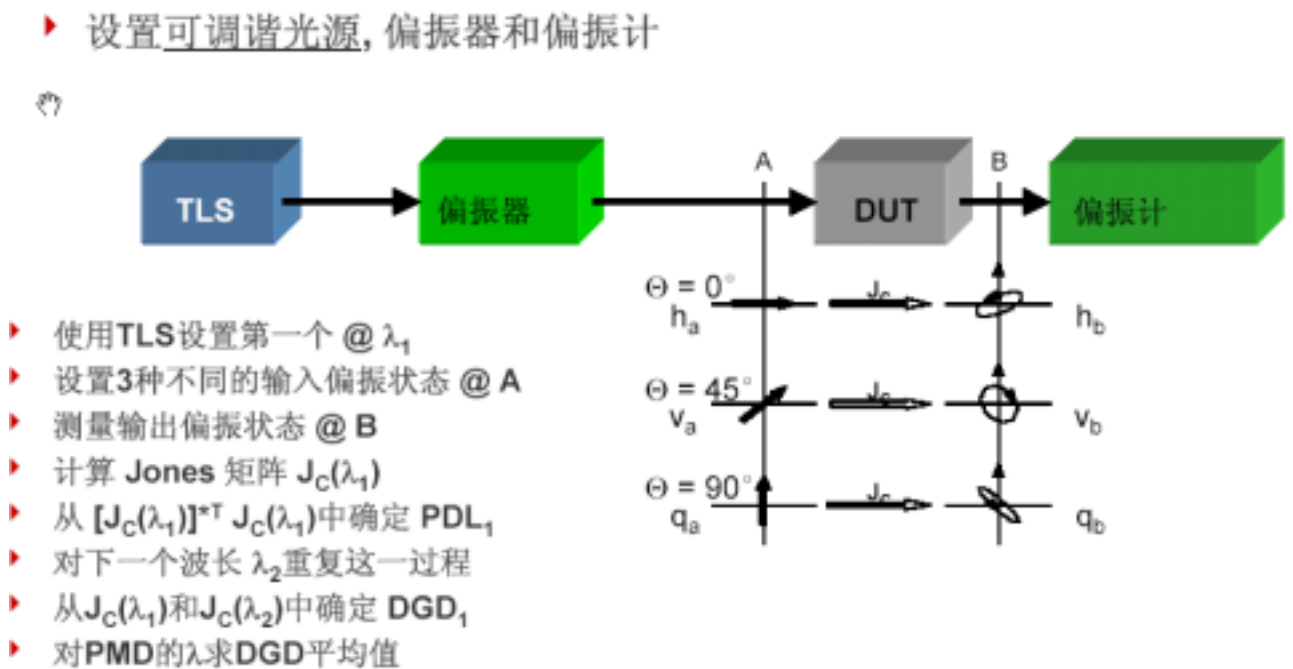


图 5 琼斯矩阵分析法的测量配置和步骤

从琼斯矩阵 J_c 数据中可以提取 PMD 和 PDL 等参数。由于一般运营商关注的 PMD_λ 是指在特定波长 λ_n 上一段时间内的平均微分群时延 (Differential Group Delay, 简称 DGD), 而测量值 PMD_λ 是在某个波长范围内特定时间 t_0 的平均 DGD。理论计算如下:

$$PMD_\lambda = \frac{1}{N} \sum_1^N DGD(\lambda_n, t_0) \sim PMD_t = \frac{1}{N} \sum_1^N DGD(\lambda_1, t_n)$$

理论计算和实验测试的结果表明, 时间平均值 PMD_t 与波长平均值 PMD_λ 相等。这也是 PMD 测量方法的基础, 所有测试都是基于能够快速测试 PMD_λ 从而确定 PMD 值的。

琼斯矩阵特征分析法的特点是: 测量精度较高, 最小可测量的 PMD 可达 0.005ps, 但测试速度较慢, 且与波长相关, 测试过程中光纤必须固定, 不许移动; 该测试方法在实验室测试器件的 PMD 将是首选; 同时也适合工程上光纤 PMD 测试的现场应用。

2、干涉测量方法的原理和步骤如下, 如图 6 所示。

设置干涉计和宽带光源

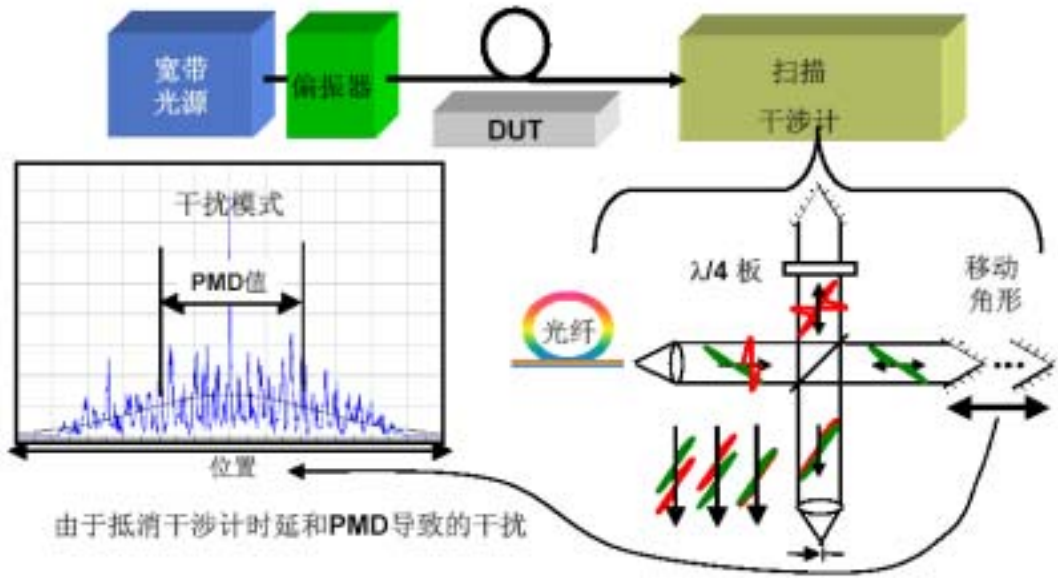


图 6 干涉测量的配置图

干涉测量方法的特点是：测量精度较低，最小可测量 PMD 达 0.03ps，但测试速度较快，且与波长无关，测试过程中光纤允许移动。由于测试精度较低，该测试方法不适合实验室使用；但由于设备简便易用，体积、成本和信息内容小，适合作为现场仪器使用，在工程现场测试光纤的 PMD 将是首选。

3、PMD 测试的其他方法还有邦加半球方法。该测试方法的特点是能够直观地反映偏振态和测试 PMD 参数，可以用于科学研究分析。

由于偏振光的电场强度可分解为 E_x , E_y 两个分量，其瞬时值为

$$E_x = E_{x0} \cos(\omega t + \phi_x)$$

$$E_y = E_{y0} \cos(\omega t + \phi_y)$$

两分量的幅度比 $R = E_{y0}/E_{x0}$ ，相位差 $\phi = \phi_y - \phi_x$ 。根据 R 、 ϕ 的不同可得到线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光。偏振光偏振态的全部信息包含在 R 、 ϕ 中。 R 有时用另一参数 δ 表示， $\delta = \arctan R$ 。椭圆偏振是最一般的形式，它说明电场强度矢量端点描绘出一个椭圆，如图 7 所示。

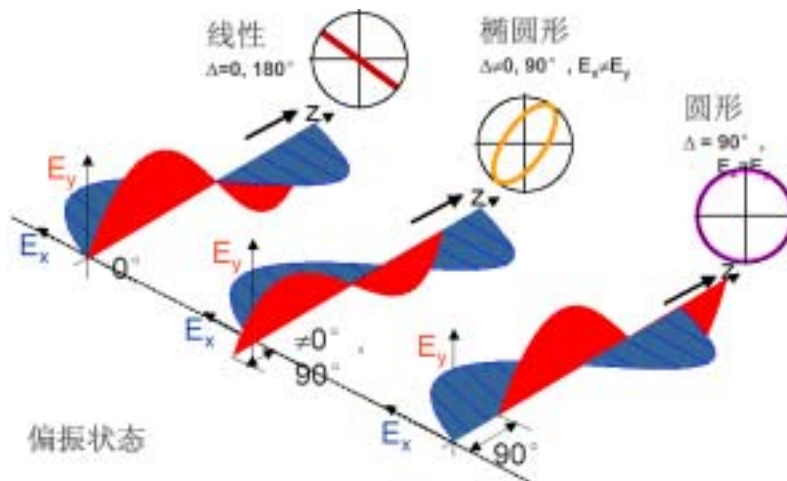


图 7 光的偏振状态图解

可以采用邦加球法 (Poincare) 来直观地、动态适时地显示偏振态, 跟踪和计算偏振模色散变化值。由于邦加球采用了归一化测量方法, 因此可以用两个参数来描述偏振椭圆: 方位角 θ 和椭率角 ε 。如图 8 所示。

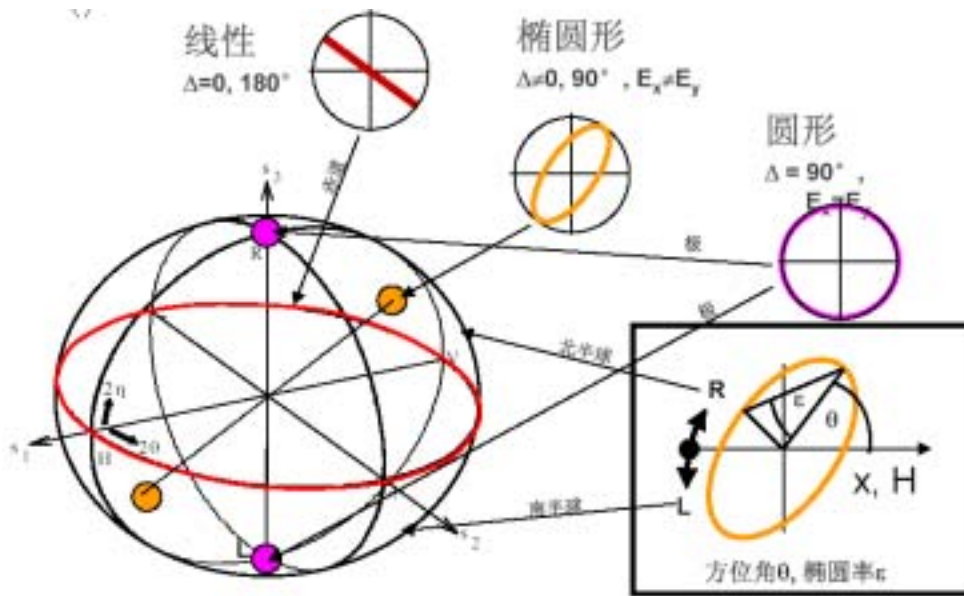


图 8 邦加球法 (Poincare) 表示的偏振状态

邦加球法的配置与琼斯矩阵特征分析法的测量配置相同。采用调谐波长作为光源, 偏振状态将在邦加半球上描出一个弧形角, 偏振模色散值与这个角成正比。

五、结论

偏振模色散具有随机性和不确定性, 其原理和补偿方法正在不断的研究之中。我们可以根据应用场合的不同, 选取不同的偏振模测试方法, 灵活、快速地测试和评估, 以便有效地补偿偏振模色散。例如, 在研发和实验时, 如果测试精度较高, 可采用琼斯矩阵特征分析法; 如果要求动态地跟踪偏振模色散, 可以采用邦加球法; 而工程现场中可以采用干涉法快速测试等。