光纤偏振控制及偏振相关测试技术

丁 楠 (中国电子科技集团公司第八研究所 淮南 232001)

[摘 要] 随着光纤通信及传感技术的发展,光纤的偏振特性越来越引起人们的关注。如何消除偏振带来的影响,更好地利用偏振特性,已成为业内人士研究的重点。简单介绍了偏振的基本概念,重点论述了光纤偏振控制技术及几个主要偏振特性的测试方法。

[关键词] 光纤偏振;偏振控制;偏振态;偏振度;偏振相关损耗;消光比;偏振模色散

1 引言

随着光纤通信技术的飞速发展,各大通信运营商 正在不断提高波分复用(WDM)系统中单信道的传 输速率。目前,单波长传输速率40 Gbps的系统正在 建设中,而传输速率更高的系统也已经进入人们的视 线。由此对光纤中的偏振模色散(PMD)、偏振相关 调制(PDM)、放大器的偏振相关增益(PDG)等都提 出了更高的要求。尤其近几年,偏振复用技术成为在 现有光缆中实现更高速率传输的热点解决方案。另 外,随着"物联网"技术的高速发展,光纤传感系统在 国民经济的各个领域得到广泛应用。作为相位、频移 等传感信号的重要解调方法之一,光纤干涉技术成为 分布式传感、角速度传感、声学传感和电流传感等领 域的核心技术,而控制偏振态是实现干涉信号稳定输 出的关键。

因此可以看出,无论是在通信领域还是传感领域,光的偏振都是大家关注的重点问题。本文将重点 介绍偏振相关的控制及测试技术。

2 偏振态的定义及表征方法

光的偏振是指光传播过程中其能量分布的偏向 性。光是一种横波,其能量分布是横向的,分布于传 播方向的横截面上,偏振态描述的就是能量在此平面 上的分布。对于完全偏振光,能量在此平面上的分布 是确定的,有固定的方向性。而自然光的能量分布则 是完全随机的,没有任何方向上的偏向性。我们日常 见到的绝大部分光介于这两个状态之间,其能量的分 布既有一定的随机性,也有一定的偏向性。

光是电磁波,其偏振状态可以用电矢量来描述。 根据电矢量末端的变化轨迹,偏振光可以分为线偏振 光、圆偏振光和椭圆偏振光。由电矢量可以派生出几 种偏振态表征方法,如偏振椭圆、Stokes 参数及邦加 球等。下面我们仅对 Stokes 参数和邦加球表征法加 以简单说明。

Stokes 参数通过 $S_0 \ S_1 \ S_2$ 和 S_3 这 4 个参数来全面描述光源的偏振特性。4 个 Stokes 参数的定义如下:

$$S_0 = P_0$$

$$S_1 = P_X - P_Y$$

$$S_2 = P_{+45^\circ} - P_{-45}$$

$$S_1 = P_1 + P_2$$

式中, P_0 是总的光功率(包括偏振光和非偏振光两部 分); P_X 、 P_Y 、 P_{+45° 、 P_{-45° 、 P_L 和 P_R 分别代表沿 X 轴 (0°方向)、Y 轴(90°方向)、+45°方向、-45°方向、右 旋(RHC)轴、左旋(LHC)轴的光功率。定义偏振度 (DOP)来表征偏振光强度占总光强的比重。

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \begin{cases} DOP = 1, 完全偏振光 \\ DOP = 0, 完全非偏振光 \\ 0 < DOP < 1, 部分偏振光 \end{cases}$$

对不同类型光源, DOP 的取值范围为 0~1。 DFB 激光器、外腔半导体激光器的 DOP 较高, 接近 1。而放大的自发发射(ASE)光源、发光二极管 (LED)和超辐射发光二极管(SLD)的 DOP 较低。

当 DOP = 1 时,我们将 S₁、S₂和 S₃对 S₆进行归 一化,并将 S₁、S₂和 S₃作为一组坐标,由此得到一个 球体的方程 S₁² + S₂² + S₃² = 1,也就是我们所说的邦加 球(如图1所示)。可以看到,赤道上各点的 S₃=0, 对应于线偏振光;两个极点的 S₁ = S₂ = 0,对应于圆偏 振光:球面上的其它点对应于椭圆偏振光:球面以内 的部分 DOP <1,对应于部分偏振光。



图 1

3 偏振态的控制方法

偏振态的控制方法种类很多,具体实现方法和实 际性能各不相同。但其原理均是通过双折射效应来 使一个偏振态的两个分量产生不同的相位延迟,从而 重新生成所期望的偏振态。根据其实现方法,偏振态 控制器大体可分为三类:

① 由多个延迟固定、方位角可变的波片组成:

② 由单个延迟可调、方位角可变的波片组成;

③由多个方位角固定、延迟可调的波片组成。

图 2 示出一个典型偏振控制器的结构图,它由三 个延迟固定、方位角可变的波片组成。一个 λ/2 $(HWP) 波片处于两个 \lambda/4 (OWP) 波片中间, 每个波$ 片都可沿着光轴相对于其它波片自由转动。第一个 $\lambda/4$ 的作用是将任意输入偏振光转变为线偏振光,然 后 λ/2 波片将此线偏振光旋转到任一希望得到的偏 振方向,于是第二个 $\lambda/4$ 波片就能将该偏振光转变为 任意希望得到的输出偏振态。



虽然这种方法应用在商用产品中颇见成效,但此 技术存在很多缺点。光纤的准直、对轴、聚焦不仅费 时,要将光从一根光纤中耦合输出,然后再将其聚焦 耦合入另一根光纤,导致插入损耗很大;而且,波片本 身对波长敏感,从而使此种偏振控制器也对波长敏 感,采用机械装置旋转波片会降低偏振控制器的控制 速度。

而基于相同原理的全光纤偏振控制器(如图3所 示)则可以达到减小插入损耗、降低成本的目的。在 此偏振控制器中,三个光纤环取代了自由空间的延迟 波片。光纤环弯曲产生的应力可以产生与光纤环直 径平方成反比的双折射效应。调节光纤线圈的直径 及圈数,即可得到任意希望得到的全光纤波片。但是 这种控制器也存在对波长敏感、控制速度慢的缺点。 而且,为了减少光纤的弯曲损耗,光纤线圈直径不能 太小。所以,这种偏振控制器的体积比较大,主要限 于实验室使用。



机械旋转波片难以满足调节速度方面的要求,如 何提高控制速度成了偏振控制技术发展的一个关键 要素。因此,人们研发出基于 LiNbO, 材料的电光晶 体快速偏振控制器(如图4所示)。这种偏振控制器 由三个波导结构组成,其中两个波导用来充当 λ/4 波 片,另外一个用来充当 λ/2 波片。不再需要机械旋转 控制,控制电压即可决定各波片的相对取向。这种方 法的主要缺点是高插入损耗(~3 dB)、高偏振相关损 耗(~0.2 dB)、高启动损耗(~0.15 dB)以及有多个电 参数需要优化,操作复杂。



偏振控制器还可以通过采用几个取向成 45°角 的自由空间波片来实现(如图5所示)。每个波片的 延迟随加载电压的变化而变化,波片的取向固定。这 种可变延迟波片可由液晶、电光晶体或电光陶瓷等材 料制成。采用液晶材料的缺点是调节速度慢,光电晶 体的缺点是需要极高的电压,且该种类型的偏振控制 器插入损耗高,成本高,工作带宽窄。



目前,有一种与图 5 所示控制器工作原理相同的 全光纤偏振控制器(如图 6 所示),可以解决插入损 耗高和成本高的问题。波片的延迟随光纤挤压器施 加的压力而变化。这种偏振控制器中有 0°、45°、0°、 45°四个挤压器,每个挤压器对应邦加球上一个从球 心到球面的轴。通过给挤压器加电压,偏振态就会绕 该轴在邦加球上做弧形变动。而且 0°、45°挤压器在 邦加球上是正交的,通过在两个正交轴上的四个挤压 器,就可以实现任意输入偏振态到任意输出偏振态的 转变。



图 6 基于光纤挤压器的全光纤偏振控制器

- 4 偏振的测试方法
- 4.1 偏振态的测试方法

根据 Stokes 参数四个分量的定义,我们可以采用 图 7 所示的两种偏振测试仪对偏振态进行测量。



图 7 两种偏振测试仪结构。(a) 旋转波片型偏振测试仪;(b) 分波型偏振测试仪

图 7(a)所示的偏振测试仪采用一个 λ/4 波片和一 个检偏器的组合,通过旋转 λ/4 波片,分别形成 0°、 45°、90°和左旋方向的线偏振光。测量经过检偏器后 的光强,计算得出实时准确的 Stokes 分量。图 7(b)采 用分波的形式将输入光分成四束,同时分别测量,得 到 Stokes 分量。由此可以避免光源变化引起的测量 误差,具有很好的可重复性。

4.2 偏振度(DOP)的测试方法

无论光纤传感还是光纤通信领域,偏振度都是光 源的一个重要指标。尤其在光纤干涉传感应用方面, 光源的偏振度直接影响传感系统的设计。在设计中 如果需要将低偏振度的光源变成高偏振度光源,需要 用起偏器将光源起偏;如果需要得到低偏振度的光, 需要用消偏器或者偏振合波器消除光源的偏振。

偏振度的测试方法主要有以下三种。

 ① 采用偏振态测试仪,测出光束的 Stokes 分量, 再计算得出偏振度。其缺点是测量误差由四个 Stokes 参量的测量误差共同决定,尤其在测量低偏振 度时,测量误差比较大。

②采用扰偏方法测量。理想情况下,在扰偏器的一个周期内一定会出现信号光的偏振部分与起偏器的起偏方向平行或者垂直。当两者平行时,信号光的偏振部分全部通过起偏器,探测到的功率最大(P_{最大值});两者垂直时,如果起偏器的消光比足够高,信号光的偏振部分被完全隔离,探测到的功率最小(P_{最小值})。而信号光的非偏振部分不受扰偏器的影响,对探测到的功率来说是个常量。于是有:

$$\begin{split} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{u}} \boldsymbol{k} \boldsymbol{k}} &= \mathbf{P}_{\boldsymbol{k} \boldsymbol{k} \boldsymbol{t} \hat{\mathbf{u}}} - \mathbf{P}_{\boldsymbol{k} \boldsymbol{h} \boldsymbol{t} \hat{\mathbf{u}}} \\ \mathbf{DOP} &= \frac{\mathbf{P}_{\boldsymbol{k} \boldsymbol{k} \boldsymbol{t} \hat{\mathbf{u}}} - \mathbf{P}_{\boldsymbol{k} \boldsymbol{h} \boldsymbol{t} \hat{\mathbf{u}}}}{\mathbf{P}_{\boldsymbol{k} \boldsymbol{k} \boldsymbol{t} \hat{\mathbf{u}}} + \mathbf{P}_{\boldsymbol{k} \boldsymbol{h} \boldsymbol{t} \hat{\mathbf{u}}}} \end{split}$$

但由于扰偏器的速度有限,此方法不适合 DOP 测量速度要求高的场合。



③ 最大值/最小值搜寻法(如图 8 所示)。采用 一个反馈回路来控制偏振控制器、调整偏振状态,以 探测得到最大功率和最小功率,再计算得出偏振度。 这种方法实质上是一种闭环控制的扰偏法,测量的速度和准确性都可以得到保证,克服了上述方法中存在的缺点。

4.3 偏振消光比(PER)的测试方法

偏振消光比是指沿偏振主态方向分解的两个正 交偏振分量之间的大小关系。对于光源来说,消光比 越高,输出光越接近线偏振光;对于起偏器来说,消光 比越高,将输入的光变成线偏振光的能力越强。

消光比可以通过旋转起偏器的方法进行测量 (如图9所示)。只要起偏器的消光比足够大(大于 光源的消光比),并且可以连续旋转,就可以采用此 方法测量消光比。当起偏器的起偏方向与输入光的 偏振主态方向重合时,功率计探测到的功率最大;当 起偏器与偏振主态方向正交时,功率计探测到的功率 最小。因此,偏振消光比可以通过下式计算得出:



图9 偏振消光比的测量方法

消光比是描述光束线性度的一个参量,对于线偏 振光,其能量完全集中于一个方向上,消光比无穷大; 对于圆偏振光,其能量平均分布于两个正交方向上, 消光比为0;对于其它偏振光,消光比介于0和无穷 大之间。另外,对于非偏振光,由于各轴上能量均相 等,其消光比也为0。

在此实际应用中,通常会将偏振串音与偏振消光 比相混淆。偏振串音是指线偏振光经过一个偏振器 件时,偏振主态与其正交方向上的能量串扰。偏振串 音越大,线偏振光的消光比劣化越大,偏振器件的保 偏能力就越弱。偏振串音通常由两种因素造成:1) 偏振光注入偏振器件时没有良好对轴,或者两个偏振 器件对接时快慢轴没有完全匹配;2)保偏器件受制 作工艺限制,其自身的保偏性能有限。

4.4 偏振相关损耗(PDL)的测试方法

偏振相关损耗是指不同偏振态通过待测器件后 最大功率与最小功率的比值,以对数的形式表示,体 现了一个器件对不同偏振态的敏感度。理想情况下 的各向同性器件对各个偏振态的损耗相同,偏振相关 损耗值为0;而理想情况下的起偏器对一个偏振方向 没有损耗,在正交方向上损耗则无穷大,偏振相关损 耗值趋近无穷大。对于任何无源器件,其偏振相关损 耗的数值都是确定的,可以将确定偏振相关损耗的无 源器件等效为部分起偏器 + 无损耗的偏振态变换元 件。

偏振相关损耗的测试方法有很多种,常用的有以 下四种方法。

 ① 扰偏法(具体方法参考本文 4.2 节"偏振度 (DOP)的测试方法")。

② 四态测量法:也叫米勒矩阵法(此测试方法 涉及大量理论计算,本文不做详细论述)。

③ 三态测量法:也叫琼斯矩阵法。偏振光经过待测器件后测量琼斯矩阵,从而计算出偏振相关损耗。与米勒矩阵法类似,本文不做详细论述。

④ 最大值/最小值搜寻法(具体方法参考本文 4.2 节"偏振度(DOP)的测试方法")。

4.5 偏振模色散(PMD)的测试方法

在单模光纤中,传输的基模有两个相互垂直的偏 振模式,在理想情况下(光纤横截面圆对称,使用环 境没有外界干扰)这两个模式是相互兼并的。但由 于光纤生产过程中光纤的不对称性、内应力、光纤成 缆过程中的边应力和光纤扭曲、光缆使用过程中的压 力、弯曲及环境温度变化等因素,造成两个偏振模式 分开,以不同的速度传输,这就是偏振模色散效应。 两个偏振模之间的差分群时延(DGD)会导致信号光 的脉冲展宽。光纤中的差分群时延定义为特定波长 下快、慢偏振主态之间的相位延迟,单位为 ps。通常 我们用 PMD 系数来表征光纤的偏振模色散特性, PMD 系数定义为对测量长度归一化的偏振模色散平 均值。对线路较长的光纤,两个偏振模呈强耦合状 态,PMD 系数为差分群时延线性平均值(PMD_{来物值}) 或均方根(PMD_{均方根})除以光纤长度的平方根,单位 为 ps/ √km; 对短距离光纤或保偏光纤, 两个偏振模 呈弱耦合状态,PMD 系数为 PMD_{平均值}或 PMD_{均方册}除 以光纤长度,单位为 ps/km。

目前偏振模色散的测试方法主要有偏振态分析

法、波长扫描法和干涉法三种。

① 偏振态分析法:该种方法通过测试待测器件 (系统)的米勒矩阵、琼斯矩阵或 Stokes 参数,从中计 算出偏振模色散。(此测试方法涉及大量理论计算, 本文不做详细论述,具体的测试步骤参考本文 4.1 节 "偏振态的测试方法"。)

② 波长扫描法:波长扫描法的光路如图 10 所 示,当偏振态发生器产生一个偏振态后,该偏振态在 可调激光器波长扫描过程中保持不变。通过偏振分 析仪测量输出偏振态与波长之间的变化曲线,计算得 出差分群时延和偏振模色散的平均值。其工作原理 来源于 PMD 随信号光频率变化的一个基本定义式: ds/dw = Ω×s。其中,s为光频率变化过程中偏振态在邦 加球上的变化轨迹;Ω 为一确定矢量。可见,随着可 调激光器的波长扫描,偏振态将在邦加球上画圆,输 出脉冲的强度也呈周期变化。因此,通过输出偏振态 与波长之间的变化曲线,计算波峰、波谷的数量,就可 以计算得出差分群时延和偏振模色散的平均值。

 $PMD = \frac{k(N_e - 1)\lambda_a\lambda_b}{2(\lambda_a - \lambda_b)c}$

式中, λ_a , λ_b 分别为波长扫描范围内 S₁、S₂和 S₃的第 一个和最后一个波峰出现时的波长; N_a为扫描范围 内出现的峰值个数; k 为常数。



图 10 波长扫描法光路

③ 干涉法:干涉法测量偏振模色散的光路如图 11 所示。LED 光源的光束起偏后经过待测光纤,然 后被耦合器分成两束光,分别经过一个固定的反射镜 和一个由步进电机控制的可移动的反射镜,之后在耦 合器处发生干涉,形成 Michelson 干涉仪。由于采用 宽谱的 LED 光源,相干长度很短,当两束光光程长度 相等时,探测器可以观测到干涉条纹。而当可移动反 射镜移动时,位置发生变化,干涉条件被破坏,干涉条 纹消失。干涉仪的两路光均有两个正交的偏振态,由 于偏振模色散两臂的正交偏振态不能同时到达反射 镜,可以通过移动反射镜使一路光的快轴光和另一路 的慢轴光同时到达耦合器,重新建立干涉条件,探测 器重新观测到干涉条纹。由于是部分光干涉,强度将 比完全干涉减弱,因此通过测量出现较弱干涉条纹时 反射镜的移动距离,就可以直接算出光纤或器件的偏 振模色散。



5 结束语

到目前为止,人们对偏振相关技术开展的研究还 很少。随着高速光通信和光纤传感技术的发展,这方 面的劣势必将成为制约其技术进步的瓶颈。希望本 文所论述的偏振控制及测试技术能为今后光纤光缆、 光器件及光纤传感器的设计提供帮助。

参考文献

[1] 王伟,李国华. 斯托克斯空间用邦加球表示光偏振态的 再研究. 应用光学. 2002,3

[2] 赵娜,赵小研,刘继红.保偏控制器的研究进展.西安邮 电学院学报.Vol.13,2008,No.3

[3] 胡永明,陈哲,孟洲 等. 全保偏光纤迈克尔逊干涉仪. 中国激光. 1997,10

 [4] S. T. Rumbaugh, et al. Polarization control for coherent fiber optic system using nematic liquid crystals. Lightwave Technol. Vol. 8,1990

[5] 黄建余,季家熔. 偏振干涉法用于偏振器消光比的测量. 应用激光. 1996,6

[6] 李彦,冯丽爽,徐宏杰.保偏光纤偏振特性测试系统的 光路研究. 红外与激光工程. 2005,4