

调制偏振光及空间正交方位信息传递系统物理模型

范玲^{1,†} 宋菲君²

(1 北京交通大学理学院物理系 北京 100044)

(2 大恒新纪元科技股份有限公司 北京 100085)

摘要 受到调制的偏振光可作为方位信息的载体在空间传递,从而实现方位角度信息的传递和精密测量,这是偏振光的一个新的应用领域,在航空航天、地质测量、生物医药、军事等领域具有广泛的应用前景.文章首先介绍了调制偏振光的物理意义和空间正交方位信息传递系统的应用领域,然后介绍了利用调制偏振光进行空间正交方位信息传递系统的物理模型,并分析了一个具体实现方案.

关键词 偏振光,电光调制,方位角

Polarization modulated light and model for an azimuthal information transmission system

FAN Ling^{1,†} SONG Fei-Jun²

(1 Science School, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(2 Daheng New Epoch Technology, Inc., Beijing 100085, China)

Abstract Modulated polarized light can be used to transmit and detect azimuthal information. This is a new application of polarized light, and has been used in many fields such as aviation, space flight, biochemistry, etc. An introduction to azimuthal information transmission systems based on polarization modulated light is presented, as well as various applications.

Keywords polarized light, electro-optical modulation, azimuth

1 引言

沙漠中有一种蚂蚁,在离开自己的巢穴时,总是弯弯曲曲地前进,到处寻找食物,可是一旦得到食物后,即使在离巢很远的地方,也会沿直线返回原地.蚂蚁是靠什么进行定位,准确寻找归途的呢?法国昆虫学家法布尔发现,蚂蚁是利用天空的偏振光导航的,它们的眼睛是天然的偏光导航仪.如果使天空光去掉偏振,变为非偏振光,蚂蚁的正常行动就会被打乱.

除了蚂蚁之外,蜜蜂、鸽子等许多其他的昆虫和鸟类也能够利用偏振光进行定位和导航.由于视觉细胞构造方式的限制,人的眼睛并不能分辨偏振光.然而作为万物之灵,人类凭借自身的智慧,充分利用

了偏振光的性质和特点,发明制造出利用偏振光进行空间正交方位信息传递的仪器系统,并可广泛应用于航空航天、地质测量、生物医药、军事等诸多领域.

2 空间正交方位信息传递系统的应用

在工程技术的许多领域中,都要求精确传递一个与传递方向垂直的基准方位,或测定两个与同一轴线正交的基准方位之间的夹角.这类系统我们称之为“空间正交方位信息传递系统”.例如,在航空航天领域,要求地面上相隔一定距离的望远镜对同一星体或航天目标作同步的追踪,测定位于同一铅

2007-01-24 收到初稿 2007-03-15 收到修改稿

† 通讯联系人. Email: lfan@bjtu.edu.cn

垂线上两台经纬仪水平方位的夹角. 在航天系统的自动控制中, 飞行器方位角度的精度直接影响飞行过程, 方位角度 $1(^\circ)$ 的误差, 经过 4000km 的飞行, 会产生 1km 的偏离. 只有对飞行器方位角进行精密测量, 获得高精度的方位角度数据, 才能及时对自动控制指令进行修正, 保证飞行器按照预定轨道飞行, 从而避免了“差之毫厘, 谬以千里”. 在生物医药行业中, 左旋和右旋结构的分子具有截然不同的药理作用, 而且旋光角度的大小和溶液浓度满足一定的关系. 对于其旋光角度的精密测量, 可实现多种测量目的: 区分药品生化性质, 测量分子的空间构形及测量药品溶液的浓度. 偏振旋光仪一类光学仪器, 究其实质, 是测量两个基准方位的夹角^[1-5]. 空间正交方位信息传递技术通过对方位角度信息进行传递, 可实现角度的精密测量, 具有广泛的应用前景.

3 调制偏振光

对方位角度信息的传递, 可以利用光的偏振特性来实现. 人们对于光的偏振特性的研究, 最早可追溯到 1809 年, 法国科学家马吕斯在研究晶体双折射现象时, 发现双折射的两束光线的相对强度和晶体的位置有关, 从而发现了光的偏振现象, 并认识到这与先前惠更斯关于光的纵波理论相矛盾. 后来随着布儒斯特定律、色偏振、人为双折射、旋光性等现象相继被发现, 证实了光波是横波, 偏振性作为光波的另一种重要性质, 得到了越来越多的研究.

经典电磁理论告诉我们, 光波是横波, 光矢量在垂直于光波传播方向的平面上作二维振动. 按照光矢量的振动方式, 可分为线偏振光、椭圆偏振光和非偏振光. 光矢量在一条直线上作简谐振动, 叫做线偏振光, 如果光矢量的末端轨迹为椭圆(或圆), 这种光叫做椭圆(或圆)偏振光. 普通的光源, 是大量原子(分子)的集合, 每个原子(分子)都可能随机地辐射光波, 由一个宏观光源辐射出来的光波是各个原子(分子)辐射的光波的叠加, 光波的偏振方向是随机变量, 通常认为是非偏振光. 空间任意方向的偏振光, 都可以分解为两个偏振方向相互正交的线偏振光. 在空间正交方位系统中, 就是利用偏振光的两个相互正交的偏振方向作为要传递的角度信号的基准, 角度信号通过偏振光在空间向远处传播, 在另一端通过一定的接收装置接收传播过来的信号, 从接收信号中获取接收装置和发射装置之间的方位变化信息.

当利用偏振光进行信息传递时, 一个重要的环节为调制, 就是将要传递的信号转换为偏振态随时间的变化. 可通过介质中的特殊物理效应对光束进行调制, 常用的效应有电光效应、磁光效应等. 各向同性介质在电场或磁场的作用下, 可表现出各向异性的双折射特性, 透射光是一对振动方向相互垂直的线偏振光. 通过调节外加电场或磁场的大小, 可对偏振光的振幅或相位进行调制^[6]. 调制偏振光作为光信号相位和方位的载体, 在空间传递. 在接收端通过对偏振态变化的精密探测, 可对正交方位信息进行高精度测量.

4 空间正交方位信息传递系统物理模型

下面我们就来详细介绍基于调制偏振光的空间正交方位信息传递系统的物理模型.

该系统所依据的基本原理是偏振和电光调制理论. 根据马吕斯原理, 两个偏振片相互转动时, 透光强度和两个偏振片透振方向夹角 α 之间满足 $I = I_0 \cos^2 \alpha$. 通过测量透射光强度, 可以检测夹角 α , 进而可以测量两台仪器间的方位角, 但精度不高. 要提高精度, 必须对偏振信号进行调制. 电光调制是一种常见的调制方式.

电光调制的物理原理基于电光效应^[7,8]. 各向同性介质在外电场作用下, 表现出各向异性的双折射特性, 透射光是一对振动方向相互垂直的线偏振光. 通过调节外加电场大小, 可对偏振光的振幅或相位进行调制. 例如, KDP 晶体沿光轴方向(z 方向)加外电场 E_z 后, 从单轴晶体变成了双轴晶体, 折射率椭球与 xy 平面的交线由圆变成了主轴在 45° 方向上的椭圆(图 1). 晶体内沿 z 轴传播的光, 因其振动方向只能在新的椭圆主轴(感生主轴)方向上, 故分解为一对沿 ξ, η 方向偏振的正交偏振光. 这一对正交偏振光的相位差与外加电场有关:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{63} V = \frac{\pi}{V_\pi} V, \quad (1)$$

式中 n_o 为寻常光折射率, γ_{63} 为电光系数, V 为外加电场的电压, V_π 称为电光调制器的半波电压, 通常和光源波长及晶体性质有关.

如果将电光晶体放在一对正交的偏振片之间, 即构成强度型电光调制器, 其透射率可表示为

$$T = \frac{I}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{V}{V_\pi} \right), \quad (2)$$

式中 I 为透射光强度, I_0 为光源强度. 调制曲线为余

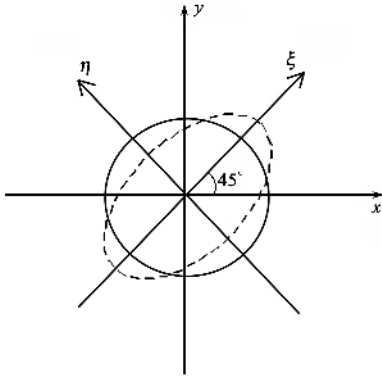


图1 加电场后 KDP 晶体折射率椭球的变化

弦型,通常利用调制曲线近似直线的部分,这样可满足输入和输出的线性关系.可以通过外加 $\frac{V}{2}$ 相位的方法,将电光调制器的工作点设在调制曲线直线部分的中点,这时(2)式变为

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} \left[1 + \sin\left(\pi \frac{V}{V_\pi}\right) \right], \quad (3)$$

(3)式表示起偏方向和检偏方向正交的情况.在起偏方向和检偏方向平行的情况下,透过率为

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \sin\left(\pi \frac{V}{V_\pi}\right) \right]. \quad (4)$$

将(3)(4)两式相减,可以得到平行振动和垂直振动光强差为

$$\Delta I = I_0 \sin\left(\pi \frac{V}{V_\pi}\right). \quad (5)$$

如果检偏方向和起偏方向成任意的角度 θ ,那么光强差的公式则为

$$\Delta I = \sin 2\theta \sin\left(\pi \frac{V}{V_\pi}\right). \quad (6)$$

从(6)式可以看出,在调制信号一定的条件下,平行振动和垂直振动光强差的大小只与起偏与检偏方向的夹角有关,所以只要测出 ΔI 的大小,就可以知道检偏与起偏方向之间的夹角,将起偏器和检偏器分别放置在两个相对运动的物体上,就可以测量出它们之间的夹角.图2是一个空间正交方位信息传递系统的具体方案^[9].

在图2所示系统中,包括发射部分和接收部分.发射部分包括:光源 L,扩束镜 BE,起偏器 P,1/4 波片 Q_1 (它用于将工作点转移到调制曲线的线性区部分,从而实现线性调制).调制晶体 M(它可采用不同的调制方式将入射光变成调制偏振光).由 M 输出一对调制偏振光,其振动平面互相正交,沿晶体的感生主轴方向.感生主轴构成发射部分的基准方位.

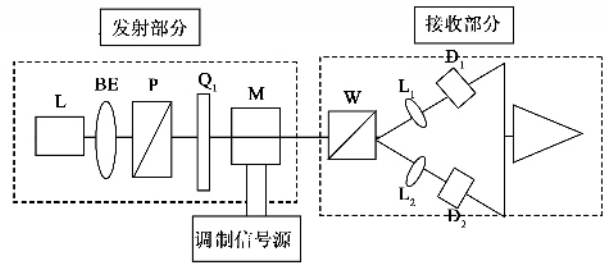


图2 空间正交方位信息传递系统框图

感生主轴系由晶格结构所决定,所以基准方位精度极高.调制偏振光通过较长距离的传输,射入接收部分的偏振棱镜 W.调制偏振光的一对正交分量分别在 W 的两个光轴方向上相干叠加,输出的两束光分别由光探测器 D_1, D_2 探测,变成电信号输出.当 W 的光轴与调制偏振光方位一致时,即 $\Delta\theta = 0$ 时,干涉效应消失, $\Delta I = 0$,形成信号的零点.因此,零点信号的出现表示发射端和接收端的空间方位一致,这就实现了与光波传播方向正交的空间方位的传递.当 $\Delta\theta \neq 0$ 时,也可通过测量 ΔI 获得方位角度的数值.

为了提高信号的测量精度,可以将外加电压变为交流电压,则(6)式变为

$$\Delta I = I_0 \sin 2\theta \sin\left(\pi \frac{V_m}{V_\pi} \sin \omega t\right). \quad (7)$$

由偏振棱镜 W 输出的两光束分别由光探测器 D_1, D_2 探测,变成反相的交流电信号,经窄带滤波、选频放大选出信号中的基频成分,将两路基频信号进行差分运算,再将差分结果中的直流部分经放大后输出.由于噪声是同相的,因此在差分放大-相敏检波器中被消去.光电信号的空间、时间频率特征和相位特征使系统具有很高的抗干扰性.采用这种方法,可以实现秒级的角度分辨^[10-15].例如,南开大学盛秋琴等采用 LiNbO_3 晶体作为电光调制器,在简单的装置上,成功地实现了角度变化为 $2.5(\prime)$ 的信息传递和检测;中国科学院西安光学精密机械研究所的申小军等采用磁旋光玻璃进行磁光调制,实现了两台无机械连接的仪器间方位失调角测量或方位同步,工作距离达 10m,工作范围达 $\pm 90^\circ$,同步标准偏差小于 $3(\prime)$.

5 结束语

从 1809 年马吕斯研究晶体双折射至今,对偏振光的研究已经有将近 200 年的历史了,但在近半个

世纪,由于激光技术、光电子技术、计算机技术的飞速发展,对偏振光的应用研究得到了充分的扩展,我们上面所介绍的实际上就是一种基于偏振光的集光、机、电于一体的复杂测量系统.我们相信,随着科技的发展,偏振技术的应用必然得到更大的发展.

参 考 文 献

[1] Hernandez F E ,Hagan D J. Continuously variable , wavelength - independent polarization rotator. In : Conference on Lasers and Electro - Optics. 2000. (CLEO 2000) :610

[2] Aillerie M *et al.* Rev of Scientific Instruments ,2000 ,71(4) : 1627

[3] 常悦 钱小陵.量子电子学报 ,1999 ,4 :375[Chang Y , Qian X L. Chinese Journal of Quantum Electronics ,1999 ,4 :375(in Chinese)]

[4] Chen E , Chou S Y. Photonics Technology Letters , IEEE , 1997 ,9 :1259

[5] 王召兵 宋连科.光电子·激光 ,2001 ,12(4) :397[Wang Z B , Song L K , Journal of Optoelectronics Lasers. 2001 ,12(4) : 397(in Chinese)]

[6] 钱小陵 常悦.首都师范大学学报 ,2001 ,22(1) :46 [Qian X L , Chang Y. Journal of Capital Normal University ,2001 ,22 (1) :46(in Chinese)]

[7] 廖延彪.偏振光学.北京:科学出版社,2003.110[Liao Y B. Polarization Optics. Beijing :Science Publishing House , 2003.110(in Chinese)]

[8] 张铁强等.量子电子学报 ,1992 ,9(3) :242[Zhang T Q *et al.* Chinese Journal of Quantum Electronics ,1992 ,9(3) :242 (in Chinese)]

[9] 范玲 宋菲君.光学技术 ,2006 ,32(Suppl) :166[Fan L , Song F J , Optical Technique ,2006 ,32(Suppl) :166(in Chinese)]

[10] 盛秋琴 吕福云.光电子·激光 ,2003 ,14(12) :1365[Sheng Q Q , Lü F Y. Journal of Optoelectronics Lasers , 2003 ,14 (12) :1365(in Chinese)]

[11] 王文倩等.量子电子学报 ,2003 ,20(5) :603 [Wang W Q *et al.* Chinese Journal of Quantum Electronics ,2003 ,20(5) :603 (in Chinese)]

[12] 郭文刚等.光电子·激光 ,2004 ,15(8) :959 [Guo W G. Journal of Optoelectronics Lasers ,2004 ,15(8) :959(in Chinese)]

[13] 董晓娜等.光子学报 ,2001 ,30(11) :1389 [Dong X N *et al.* Acta Photonica Sinica ,2001 ,30(11) :1389(in Chinese)]

[14] 郑宏志等.光子学报 ,2004 ,33(5) :638 [Zheng H Z. Acta Photonica Sinica ,2004 ,33(5) :638(in Chinese)]

[15] 申小军 马彩文.光子学报 ,2001 ,30(7) :892 [Shen X J , Ma C W. Acta Photonica Sinica ,2001 ,30(7) :892(in Chinese)]

· 物理新闻和动态 ·

导电聚合物的先驱麦克狄尔米德逝世

诺贝尔奖得主、公认的导电聚合物先驱、新西兰科学家麦克狄尔米德 (Alan MacDiarmid) 于 2007 年 2 月 7 日逝世,享年 80 岁. 2000 年他与黑格 (A. J. Heeger)、白川英树 (Hideki Shirakawa) 共同分享了诺贝尔化学奖. 在获奖者自传中,他写道:我出生在一个相对节俭但充满爱心的 Antipodean(地球另一端的人,这是英国人对澳洲人的称谓) 家庭. 例如,一次家宴,有一些客人不请自来了. 于是,父母就让家人退席,而让客人们先吃. 好客和慷慨的家庭环境养成了麦克狄尔米德热情宽厚的品格. 这一点,是所有与他有过接触的人的共识.

在美国威斯康星大学获得博士学位以后,他又在新西兰奖学金的资助下到英国剑桥工作. 以 Antipodean 为自豪的麦克狄尔米德把后者看成是绝不能丢失的机会. 1964 年,进入宾夕法尼亚大学化学系,此后,他一直在这里工作,直至生命走到尽头. 在这儿,他遇到了凝聚态物理学家黑格,二人在导电聚合物领域的通力合作和终身友谊,被同行们传为佳话. 1975 年麦克狄尔米德出席了东京的一个研讨会. 会后,白川英树向他展示了用乙炔 (C_2H_2) 聚合而成的带有银光色泽的薄膜. 在确认了薄膜的导电性后,麦克狄尔米德邀请白川英树到美国合作,并为白川英树申请到了美国海军的研究资助——它被认为是那个时期最有远见的一次资助. 借助于与黑格合作的经验,麦克狄尔米德和白川英树对聚乙炔施行碘掺杂,结果与未掺杂的材料相比,电导提高到 10^7 倍——第一个导电聚合物诞生了. 今天,各类导电聚合物已经被制成晶体管、太阳能电池和发光器件,材料的最高电导率已达 $10^5 / \Omega \text{ cm}$, 可以与金属铜相媲美. 麦克狄尔米德身在美国,但他时时惦记着新西兰、澳洲乃至整个亚太地区科学的发展. 在中国的吉林大学,也建有麦克狄尔米德实验室.

(戴闻 编译自 Nature 2007 ,446 :390)