

文章编号: 0253-2239(2008)04-0700-05

基于偏振阵列的偏振迈克耳孙风场探测干涉仪系统的理论研究

汪 丽^{1,2} 赵葆常¹ 张淳民³

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学研究室, 陕西 西安 710068
² 中国科学院研究生院, 北京 100039; ³ 西安交通大学理学院, 陕西 西安 710049)

摘要 基于偏振阵列的偏振迈克耳孙风场探测干涉仪是一种新型的探测大气温度和风场速度的干涉仪。基于偏振干涉的原理,四个偏振方向分别相差 45° 的偏振片组成的偏振阵列紧贴于探测器前,由四面角锥棱镜出射的四束线偏振光分别经四个不同偏振方向的偏振片后,四个不同强度干涉图同时成像于探测器上,经过数据提取获得四个干涉强度值,进一步反演出大气温度和风场速度值。对以上干涉成像过程进行了模拟仿真,得到干涉图,经风速反演得到了与实际值一致的结果。具有结构简单稳定,测试精度高,利于快速变化的目标测试的优点。

关键词 偏振光学; 干涉仪; 风场探测; 偏振阵列

中图分类号 P407.4 文献标识码 A

Study on Theory of Polarizing Michelson Interferometer for Wind Measurement Based on Polarizing Arrays

Wang Li^{1,2} Zhao Baochang¹ Zhang Chunmin³

(¹ Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xian, Shaanxi 710068, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ Science School, Xian Jiaotong University, Xian, Shaanxi 710049, China)

Abstract The polarizing Michelson interferometer of wind measurement based on polarization arrays is a interferometer for detecting atmosphere temperature and wind velocity. It is based on the principle of polarization interference. Four polarizers whose polarization orientation has an interval of 45° in turn attach to the front of detector. Four beams of light from four-plate pyramid prism pass polarizers. Then four different interferential intensities are formed at the same time on the detector. Then wind velocity and atmosphere temperature will be deduced from the intensities. This imaging process is simulated and emulated. The result after data processing is coincident with true value. The interferometer offers advantages including simple and steady construction and high precision. It is fit for detecting fast goal.

Key words polarization optics; interferometer; wind-field measurement; polarization arrays

1 引言

偏振大气迈克耳孙干涉仪 (Polarizing atmosphere Michelson interferometer, PAMI)^[1] 是利用大气中原子氧气辉发射线的多普勒频移,来探测大气风速及大气温度的装置。它是利用偏振光束

器获得不同的偏振态,最后通过不同偏振方向的偏振片获得不同相位下的干涉强度。偏振大气迈克耳孙干涉仪是利用旋转偏振片的方法实现的,这种旋转偏振片的方法仍然没有摆脱运动部件,不适用于变化较快的目标的测试。偏振阵列是由偏振方向不一致

收稿日期: 2007-04-02; 收到修改稿日期: 2007-07-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40537031)、国家 863 计划 (2006AA12Z152)、国防基础科学研究项目 (XAJT2008169) 资助课题。

作者简介: 汪 丽 (1979—), 女, 河北人, 博士研究生, 主要从事空间光学方面的研究。E-mail: wlfuyun@163.com

导师简介: 赵葆常 (1939—), 男, 浙江人, 博士生导师, 主要从事空间光学及光谱学等方面的研究。

E-mail: zbc@opto. ac. cn

的偏振单元组成,线偏振光通过它可以在探测器的相应单元上产生不同的强度。这样无需旋转,并可以通过振动的相干迭加同时产生不同强度的图像,简化了装置,并提高了测试精度,适用于变化较快的目标的测试。本文从偏振态及强度方面对此系统进行了分析,得到了出射光干涉强度分布公式。通过模拟成像,获得了不同相位干涉强度图,经过一系列数据处

理,反演得到了风速值,与真实值基本一致。

2 偏振阵列

偏振阵列是镶嵌于透明基底上的四个偏振态不同的阵列,其大小与 CCD 大小相同,应用时置于 CCD 前,其相邻单元之间的偏振方向相差 45° 。偏振阵列有两种形式:单层和多层(图 1)^[2]。

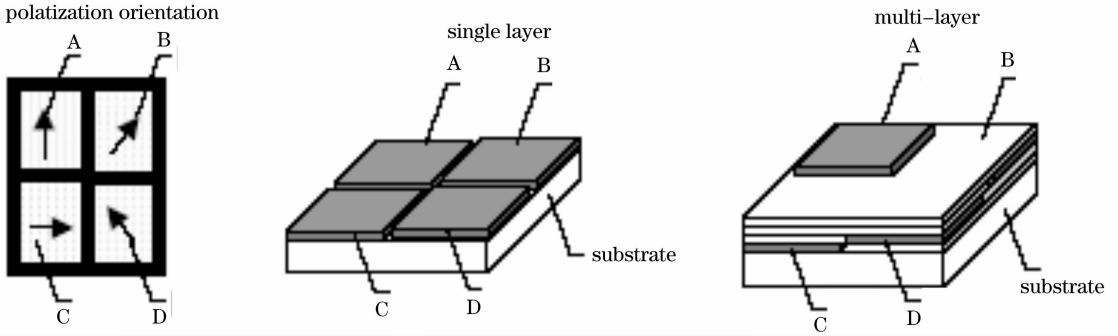


图 1 偏振阵列偏振单元的偏振方向及两种制作形式

Fig. 1 Polarization orientation of unit cell of micro polarizing arrays and two methods of fabrication

3 基于偏振阵列的偏振迈克耳孙干涉仪

偏振迈克耳孙风场干涉仪的几何结构如图 2。进入装置光首先遇到 45° 的线偏器,产生同振幅的水平和垂直的偏振光,因为输入光是非偏振的,偏振器中一半的光被吸收。偏振分束器(PBS)会透射所有的水平偏振光,而反射所有的垂直偏振光。这样两种组分的光被偏振分束器送到迈克耳孙干涉仪的两臂^[3~7]。

之间的相位差 90° 。因此就产生了圆偏振光。通过 QWP 后的反射镜反射后,再次通过 QWP,又产生的 90° 的相位差,两个组分之间的相位差为 180° 。相位位移使矢量的方向发生反转,水平线偏振变为垂直线偏振。这样当光再次到达分束器的时候被反射并出射,而不是回到分束器的入射面。由于干涉仪的两臂长度不同,可得到两光束之间的光程差。离开分束器后两光束穿过另一个 QWP 后变为圆偏振光,一个为左旋另一个为右旋。两个的和为线偏振光,其旋转角度决定于光程差 Δ 。线偏振平行光通过四面角锥棱镜分为四束光,经过成像系统,线偏振光通过探测器前的偏振阵列。偏振阵列相邻单元之间偏振方向不同,偏振方向相对 QWP 快轴的角度分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$,通过偏振阵列后,将在探测器上形成包含不同相位的一幅干涉图。通过提取相同相位的像素值,分别获得不同相位的四幅图。

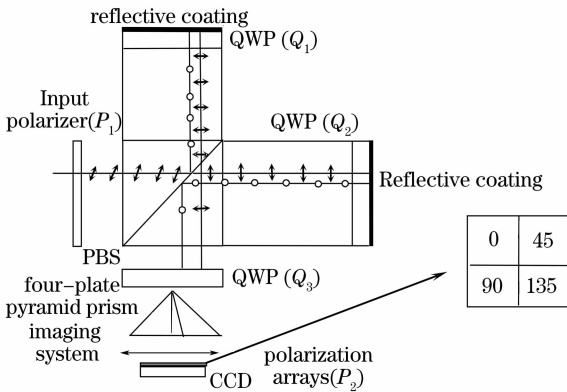


图 2 基于偏振阵列的偏振迈克耳孙干涉仪结构示意图

Fig. 2 Layout of polarizing Michelson interferometer based on polarizing arrays

水平偏振光穿过置于臂末端的 $45^\circ \lambda/4$ 波片(QWP), $\lambda/4$ 波片中波传播快的方向为快轴,此轴相对水平方向成 45° 。这样水平偏振光分解为平行及垂直快轴的组分。在穿过 QWP 时,快慢轴组分

由于观测波长不同,因此 $\lambda/4$ 波片只是针对某一种波长而言,对于其他波长不再严格为 $\lambda/4$ 波片,分别射向两臂的不同偏振方向的光经过 $\lambda/4$ 波片再反射回分束器时为椭圆偏振光这样反射回分束器时将会有光回到光源处,有一定的能量损失。

4 偏振态分析

光经过 45° 起偏器后,设其振幅为 A ,经过分束器后分成振幅大小相同振动方向互相垂直的两束线

偏振光, 振幅分别为

$$A_x = A \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} A, \quad A_y = A \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} A, \quad (1)$$

经过臂末端 $\lambda/4$ 波片后由反射镜再反射回 $\lambda/4$ 波片, 相当于经过了一个 $\lambda/2$ 波片, 振动矢量为

$$E_{xx'} = \frac{\sqrt{2}}{2} A \sin 45^\circ \cos \omega t = \frac{1}{2} A \cos \omega t, \quad (2)$$

$$E_{xy'} = \frac{\sqrt{2}}{2} A \cos 45^\circ \cos(\omega t + \pi) = \frac{1}{2} A \cos(\omega t + \pi) = -\frac{1}{2} A \cos \omega t,$$

$$E_{yx'} = \frac{\sqrt{2}}{2} A \sin 45^\circ \cos \omega t = \frac{1}{2} A \cos \omega t, \quad (3)$$

$$E_{yy'} = -\frac{\sqrt{2}}{2} A \cos 45^\circ \cos(\omega t + \pi) = -\frac{1}{2} A \cos(\omega t + \pi) = \frac{1}{2} A \cos \omega t,$$

经过 $\lambda/2$ 波片, 两臂上线偏振光的两个振动矢量相位差 π , 偏振态旋转 90° 。偏振态改变的光经过分束器时将全部透过或反射, 不再有光回到光源, 这样减少了光的损失, 两束光在经过 $\lambda/4$ 波片前, 因为其偏振方向互相垂直不发生干涉, 经过 $\lambda/4$ 波片后线偏振将变为圆偏振, 由于两臂长度不同, 两臂光将有相差位 $2\pi(\Delta/\lambda)$ (两臂光程差为 Δ):

$$E_{xx'} = \frac{1}{2} A \cos \omega t, \quad (4)$$

$$E_{xy'} = -\frac{1}{2} A \cos(\omega t + \pi/2) = -\frac{1}{2} A \sin \omega t,$$

$$E_{yx'} = \frac{1}{2} A \cos\left(\omega t + 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right), \quad (5)$$

$$E_{yy'} = \frac{1}{2} A \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right) = \frac{1}{2} A \sin\left(\omega t + 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right).$$

两圆偏振光旋向相反具有一定的相位差将合成线偏振光, 偏振方向相对入射时将转过一定角度 $\pi(\Delta/\lambda)$ 。合成线偏振光

$$E_{x'} = A \cos\left(\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right) \cos\left(\omega t + \pi \frac{\Delta}{\lambda}\right), \quad (6)$$

$$E_{y'} = A \sin\left(\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right) \cos\left(\omega t + \pi \frac{\Delta}{\lambda}\right),$$

振幅 $A' = \sqrt{A^2 \cos^2\left(\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right) + A^2 \sin^2\left(\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right)} = A$ 。经

过四面角锥棱镜分成四束平行光, 四束光经过成像系统分别会聚于偏振阵列面上, 设偏振阵列某单元的偏振方向与 $\lambda/4$ 波片的快轴方向夹角为 ψ , 通过偏振阵列后的振幅 $A'' = A \cos\left(\pi \frac{\Delta}{\lambda} - \psi\right)$ 。考虑到经过成像系统进行傅里叶变换, 因此需增加干涉条纹的调制因子 V , 强度为

$$I = A''^2 = \frac{1}{2} A^2 \left[1 + V \cos\left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda} - 2\psi\right) \right] = \frac{1}{2} I_0 \left[1 + V \cos\left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda} - 2\psi\right) \right], \quad (7)$$

当 $\psi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时, 分别对应 I_1, I_2, I_3, I_4 为

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{2} I_0 \left[1 + V \cos\left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right) \right], \\ I_2 &= \frac{1}{2} I_0 \left[1 + V \sin\left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right) \right], \\ I_3 &= \frac{1}{2} I_0 \left[1 - V \cos\left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right) \right], \\ I_4 &= \frac{1}{2} I_0 \left[1 - V \sin\left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

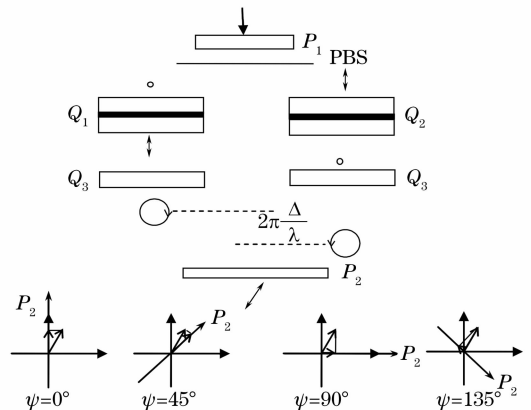


图 3 光通过系统时偏振态的变化

Fig. 3 Change of polarization states in course of transmission

由以上四式,可以分别得到强度、相位和调制度:

$$\begin{aligned} I_0 &= (I_1 + I_3)/2 = (I_2 + I_4)/2, \\ V &= [(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2]^{1/2}/(2I_0), \quad (9) \\ \tan\left(2\pi \frac{\Delta}{\lambda}\right) &= (I_4 - I_2)/(I_1 - I_3), \end{aligned}$$

再根据风场探测原理中调制度和温度及相位和速度之间的定量关系获得风场速度和温度值。图 3 所示为光通过系统的过程中偏振态的变化情况。

5 仿真结果及数据处理

根据以上原理在计算机中进行模拟仿真, 557.7 nm 线偏振光入射偏振干涉系统, 图 4 为模拟系统结构图, 在探测器上接受光偏振方向情况如图 5, 可见偏振方向依次相差 45° 。光强度如图 6, 两个三角棱镜采用玻璃为 BaF9, 两臂分别为 LF5 (右臂) 和 LAF21 (上臂), 相应长度分别为: 16 mm 和 14.75 mm, 由两臂所产生的基准光程差为

$$\Delta = 2 \times (1.79107 \times 14.75 - 1.58379 \times 16) = 2.155 \text{ mm},$$

对应的基准相位:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta = 30.47^\circ,$$

在零风速情况下, 波长值为 557.7 nm, 对应不同偏振方向的强度值依次为

$$\begin{aligned} \psi_1 &= 0^\circ, & I_1 &= 1.31 \times 10^{10} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}), \\ \psi_2 &= 45^\circ, & I_2 &= 1.11 \times 10^{10} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}), \\ \psi_3 &= 90^\circ, & I_3 &= 1.13 \times 10^{10} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}), \\ \psi_4 &= 135^\circ, & I_4 &= 1.21 \times 10^{10} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}), \end{aligned}$$

得到

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) = 30.47^\circ,$$

此值与基准相位一致, 从而验证了该方法的正确性。

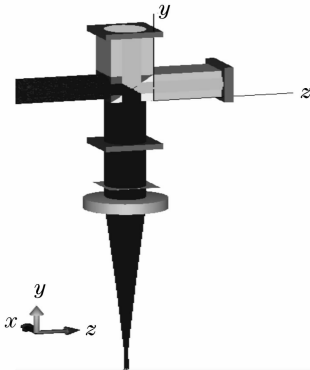


图 4 偏振迈克耳孙干涉仪系统结构仿真图

Fig. 4 Emulating architecture layout of polarizing Michelson interferometer system

下面在中心波长有一定位移的情况下, 验证所反演的风速值与真实值的一致性。

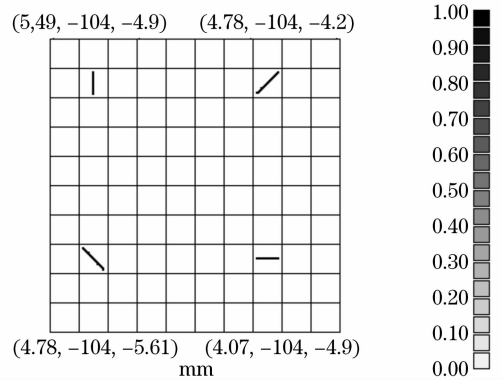


图 5 接收探测器上偏振方向图

Fig. 5 Polarizing orientation layout in detector

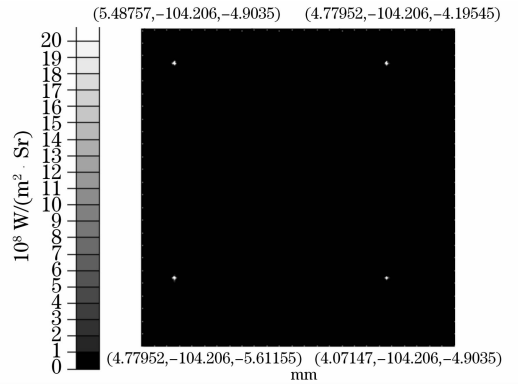


图 6 $\lambda=557.7 \text{ nm}$ 时探测器上接收光强分布图

Fig. 6 Optical intensity map in detector with $\lambda=557.7 \text{ nm}$

入射波长设为 $\lambda=557.699 \text{ nm}$, 由多普勒原理,

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_0} \left(1 + \frac{v}{c}\right), \text{ 风场速度应为 } v = 537.92 \text{ m/s}.$$

在探测器上得到的对应不同偏振方向的强度值:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= 0^\circ, & I'_1 &= 9.19 \times 10^9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}), \\ \psi_2 &= 45^\circ, & I'_2 &= 6.74 \times 10^9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}), \\ \psi_3 &= 90^\circ, & I'_3 &= 7.56 \times 10^9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}), \\ \psi_4 &= 135^\circ, & I'_4 &= 7.80 \times 10^9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}), \end{aligned}$$

那么, $\varphi' = \arctan\left(\frac{I'_4 - I'_2}{I'_1 - I'_3}\right) = 33.04^\circ$, 根据风场探测

原理, $2\pi \frac{\Delta}{\lambda_0} \frac{v}{c} = \delta\varphi = \varphi' - \varphi$, 得到 $v = 553.43 \text{ m/s}$ 。

由此反演出的风速值与真实值相差 15.51 m/s, 在允许误差范围内。说明此方法是可靠的。因为入射波长的离散性, 该模拟无法得到具有一定展宽谱线的模拟值, 因此也就无法验证反演温度。

偏振阵列的采用保证了不同相位干涉图同时成像, 相对于采用运动部件产生不同相位的方法, 不存

在运动部件所带来的机械误差,风速变化也不会对测试结果产生影响,因此将提高测试精度。

6 结 论

基于偏振阵列的偏振迈克耳孙风场探测干涉仪不需要运动部件,与其他偏振大气迈克耳孙干涉仪的主要区别在于采用了偏振阵列,它将四个不同偏振方向的偏振片集成于一个基底上,这样线偏振光通过它成不同强度的干涉光于探测器上。这种干涉仪对随时间变化迅速的目标,将显示出优越性。这种方法将使结构更加简单稳定,精度提高。分析表明,这种干涉仪给大气温度和风场速度的测试提供了一种切实可行的方法。

参 考 文 献

- 1 John C. Bird, Facheng Liang, Biran H. Solheim *et al.*. A polarizing Michelson interferometer for measuring thermospheric winds[J]. *Meas. Sci. Thechol.*, 1995, **6**: 1368~1378
- 2 James Millerd, Neal Brock, John Hays *et al.*. Pixelated phase-mask dynamic interferometer[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5531**: 304~314
- 3 G. G. Sheperd. *Spectral Imaging of Atmosphere* [M]. International geophysics series Vol. 82, Academic Press, 2002
- 4 Wang Li, Zhao Baochang, Xiangli Bing *et al.*. The selective principle of fixed optical path difference of wind measurement interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1254~1258
汪 丽,赵葆常,相里斌 等. 风场探测干涉仪中基准光程差的选择原理[J]. *光子学报*, 2006, **35**(8): 1254~1258
- 5 Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiangli Bing *et al.*. Analysis and calculation of throughput of the polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 192~197
张淳民,赵葆常,相里斌 等. 偏振干涉成像光谱仪通量的分析与计算[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 192~197
- 6 Tang Yunhe, Zhang Chunmin, Liu Hanchen *et al.*. Study of the technique of 4-face coated pyramid prism for measurement of upper atmospheric wind field[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(9): 4065~4071
唐远河,张淳民,刘汉臣 等. 基于镀膜四面角锥棱镜技术的上层大气风场探测研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(9): 4065~4071
- 7 Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiangli Bing. Influence of polarized direction on modulation depth of a polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8): 1077~1083
张淳民,赵葆常,相里斌. 偏振干涉成像光谱仪中偏振化方向对调制度的影响[J]. *光学学报*, 2000, **20**(8): 1077~1083