

偏振风成像干涉仪多波长探测理论研究*

朱化春 张淳民†

(西安交通大学理学院, 非平衡物质结构及量子调控教育部重点实验室, 西安 710049)

(2009年8月1日收到; 2010年9月7日收到修改稿)

简述了偏振风成像干涉仪(PAMI)探测高层大气风场的基本原理;研究得出了多波长探测时偏振风成像干涉仪干涉强度、仪器调制度与位相延迟片的延迟位相之间的理论表达式;得出了偏振风成像干涉仪的干涉强度和仪器调制度受所探测谱线波长调制的重要结论;采用计算机模拟分析了使用偏振风成像干涉仪(设计谱线为高层大气氧原子跃迁时辐射的630nm的极光谱线)探测高层大气时各目标谱线的干涉强度和仪器调制度,给出了干涉强度和仪器调制度与探测谱线波长之间的关系,得出了732nm的极光谱线不适合用作探测目标的结论. 本文为高层大气风场探测理论的发展、偏振风成像干涉仪多波长探测理论和应用研究,以及风场信息反演提供了理论依据和实践指导.

关键词: 高层大气风场探测, 偏振风成像干涉仪, 调制度, 多波长探测

PACS: 42.30.Lr, 42.25.Ja, 42.25.Hz

1. 引言

高层大气风场被动探测的原理是干涉成像光谱技术和电磁波的多普勒效应^[1-17],它以高层大气中的气辉(极光)作为被探测源,在大光程差的条件下探测干涉条纹的调制度和谱线的频移,从而利用“四强度探测法”反演出高层大气的温度、速度等信息. 被动式大气风场探测由于具有较高的灵敏度,并且无须自带发射源,更适合星载探测,因此已成为近年来的研究热点^[18-27]. 目前国际上比较成功的风成像干涉仪是1991年航空航天美国航空航天局(NASA)发射的一颗上层大气研究卫星UARS(upper atmosphere research satellite)搭载的Sherpherd等人研制的风成像干涉仪(WINDII)^[18]和以及正在研究之中的用于红外探测的SWIFT^[22]. 在国内,目前只有西安交大和中科院西安光机所联合开展了高层大气风场被动探测研究. 从1997年开始,本课题组对高层大气被动探测的理论、原理、方案进行了深入的研究,先后获得了国家自然科学基金、国防基础科研等

项目的多项大力资助^[28-41].

1980年, Title和Ramsey设计了一个偏振大气风成像干涉仪,其核心部件是偏振宽场迈克耳逊干涉仪^[42],由此开启了使用偏振风成像干涉仪探测大气风场的先河,但是目前偏振风成像干涉仪多使用单谱线对风场进行探测.

而高层大气风场探测,为了覆盖80—300 km这个高度的空间,使用了多个谱线作为探测光源(见表1). 而偏振风成像干涉仪要使用位相延迟片($\frac{\lambda}{4}$ 波片),而 $\frac{\lambda}{4}$ 波片只是对特定波长而言,如果干涉仪从一个谱线切换到另一个谱线时,势必导致位相延迟片的延迟相位发生变化,必定会对仪器的干涉结果造成影响. 目前尚无文献对偏振风成像干涉仪多波长探测的干涉强度与调制度进行研究.

本文对使用偏振风成像干涉仪进行多波长探测时的干涉强度与波片的位相延迟之间的关系进行理论分析和推导;给出了干涉强度以及仪器调制度与波片位相延迟之间的关系式;得出了偏振风成像干涉仪的干涉条纹的干涉强度和调制度受到所探测波长调制的结论;计算分析了高层大气

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:40537031), 国家高技术研究发展计划863项目(批准号:2006AA12Z152), 国防基础科学研究项目(批准号:A1420080187)和国家自然科学基金(批准号:40875013, 40375010, 60278019)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

探测所用到的各个谱线在偏振风成像干涉仪中干涉强度系数和仪器调制度;比较可知,如果偏振风成像干涉仪是针对 630 nm 的谱线设计,732 nm 的谱线不适合用作探测谱线. 本文为高层大气风场的探测理论的发展、使用偏振风成像干涉仪进行多波长探测理论研究、风场信息的反演以及偏振风成像干涉仪的研制提供了理论依据和实践指导.

2. 偏振风成像干涉仪多波长探测大气原理

2.1. 偏振风成像干涉仪测量大气风场基本原理

如图 1 所示^[42],PAMI 由起偏器,偏振分束器,视场补偿玻璃板, $\lambda/4$ 波片以及检偏器构成. 从结构上来说,PAMI 与风成像迈克耳逊风场探测装置基本相似,不同的是其分光元件为偏振分束器 PBS,步进装置为旋转偏振片. 其基本原理为当光线入射到起偏器 P_1 时,将成为一束偏振化方向与纸面夹角为 $\pi/4$ 的线偏振光,该线偏振光在 PBS 的分束膜上将被分解为两个振动方向相互正交的线偏振光 s 分量和 p 分量. s 光(振动方向垂直纸面),p 光(振动方向平行纸面). 并分别被反射和透射入 I 臂和 II 臂. 由于两臂的末端分别为 $\lambda/4$ 波片 R_1 和 R_2 ,其快轴方向与纸面垂直方向的夹角为 $\pi/4$,因此 I 臂的 s 光在返回时候将变为 p 光,II 臂的 p 光在返回时候将变为 s 光(为了更好的表现光线偏振方向的改变,此处有意的将反射光线做了横向的偏移处理). 最后两束光射出 PBS 并经过 $1/4$ 波片后,在检偏器透射方向发生干涉. 改变检偏器与竖直方向上的夹角(每次改变 45°)四次,可以得到四个干涉强度,利用四强度法,可以反演出大气风场的速度、温度、体辐射率等信息.

2.2. 偏振风成像干涉仪多波长探测原理

与水平方向成 45° 角放置的波片,其 Jones 矩阵为^[43]

$$J_{45^\circ} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) & i\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ i\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) & \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

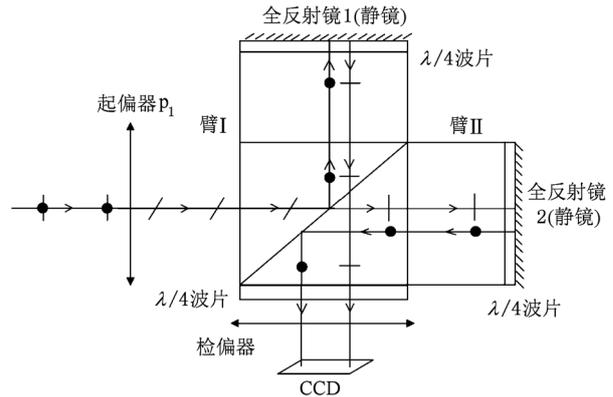


图 1 PAMI 结构示意图

式中, δ 为光线经过波片由波片引起的位相差.

与水平方向成 135° 角放置的波片,其 Jones 矩阵为^[43]

$$J_{135^\circ} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) & -i\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ -i\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) & \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

与光轴垂直的反射镜的 Jones 矩阵为

$$J_M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

偏振分束器的反射矩阵为

$$J_R = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

偏振分束器的透射矩阵为

$$J_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

假定探测目标发出的光线为自然光,经过与水平方向成 45° 角,变为线偏振光,其电矢量

$$E_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} \varepsilon(\sigma) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中 $\varepsilon(\sigma)$ 为光线的初始振幅, σ 为波数,单位为 cm^{-1} .

线偏振光的垂直分量经过偏振风成像干涉仪,到达检偏器之前的矢量为

$$E_1 = J_{45^\circ} J_T J_{135^\circ} J_M J_{45^\circ} J_R E_0. \quad (7)$$

线偏振光的水平分量经过偏振风成像干涉仪,到达检偏器之前的矢量为

$$E_2 = J_{45^\circ} J_R J_{135^\circ} J_M J_{45^\circ} J_T E_0. \quad (8)$$

将(1)–(6)式分别代入(7)式和(8)式,可得

* Jones 矩阵的计算,必须按照光波通过的先后顺序依次相乘.

$$E_1 = \sqrt{2}\mathcal{E}(\sigma) \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \begin{pmatrix} -i\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$E_2 = \sqrt{2}\mathcal{E}(\sigma) \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \begin{pmatrix} -\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ i\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

所以光线的合成矢量为

$$E = E_1 + E_2. \quad (11)$$

将(9)和(10)式代入(11)式可得

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{2}\mathcal{E}(\sigma) \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \begin{pmatrix} -i\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \end{pmatrix} e^{i\phi} + \sqrt{2}\mathcal{E}(\sigma) \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \begin{pmatrix} -\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ i\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \end{pmatrix} \\ &= \sqrt{2}\mathcal{E}(\sigma) \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) e^{i\left(\frac{5\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)} \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ i\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \end{pmatrix} e^{i\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}\right)} + \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ -i\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \end{pmatrix} e^{-i\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}, \end{aligned} \quad (12)$$

上式中 ϕ 为两臂上的相位差.

为了方便计算和表达,令

$$K = \sqrt{2}\mathcal{E}(\sigma) \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) e^{i\left(\frac{5\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)}, \quad (13)$$

$$\phi' = \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}. \quad (14)$$

所以(12)式可写成

$$E = K \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) e^{i\phi'} + \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) e^{-i\phi'} \\ i\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) e^{i\phi'} - i\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) e^{-i\phi'} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

将(15)展开可得

$$\begin{aligned} E_t &= K\cos(\phi') \left(\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \right) \\ &\quad + iK\sin(\phi') \left(\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) - \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \right), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} E_s &= iK\cos(\phi') \left(\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) - \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \right) \\ &\quad - K\sin(\phi') \left(\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) + \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \right). \end{aligned} \quad (17)$$

光线经过检偏器后,可得其干涉的矢量为

$$E_\theta = E_t \cos(\theta) + E_s \sin(\theta), \quad (18)$$

式中 θ 为检偏器与水平方向的夹角.

将(16)和(17)式代入(18)式,可得

$$\begin{aligned} E_\theta &= K\cos(\phi') \cos(\theta) \left(\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \right) \\ &\quad - K\sin(\phi') \sin(\theta) \\ &\quad \times \left(\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) + \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \right) \end{aligned}$$

$$+ iK\sin(\phi') \cos(\theta)$$

$$\times \left(\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) - \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \right)$$

$$+ iK\cos(\phi') \sin(\theta)$$

$$\times \left(\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) - \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \right). \quad (19)$$

所以光线的干涉强度为

$$I_{(\theta,\sigma)} = E_\theta E_\theta^*. \quad (20)$$

将(19)式代入(20)式,可得到干涉强度为

$$\begin{aligned} I_{(\theta,\sigma)} &= \frac{1}{2}\mathcal{E}(\sigma)^2 \sin^2(\delta) \\ &\quad \times [1 + \sin\delta \cos(\phi' + 2\theta)]. \end{aligned} \quad (21)$$

因为^[44]

$$B(\sigma) = \frac{1}{2}cK_0\mathcal{E}(\sigma)^2, \quad (22)$$

其中 $B_{(\sigma)}$ 为光谱函数, c 为真空中的光速, K_0 为真空介电常数, 大小为 $8.85 \times 10^{-12} \text{MKC}$,

$$\phi' = 2\pi\Delta\sigma, \quad (23)$$

上式中 Δ 为两臂上的光程差.

在高层大气风场(80 km—300 km)探测中,一般认为极光或气辉的谱线线型为高斯线型^[19],其线型函数为

$$B_{(\sigma)} = B_0 \exp\left\{ -\frac{4\ln 2(\sigma - \sigma')^2}{w^2} \right\}, \quad (24)$$

式中 σ 是波数, σ' 为谱线的中心波数, B_0 为 $\sigma = \sigma'$ 的光谱强度. w 为峰值半高宽(所有单位为 cm^{-1})

$$w = [(7.16 \times 10^{-7})^2 \sigma_0^2 T/m]^{1/2}, \quad (25)$$

式中 m 为发光粒子的分子量, T 为风场的温度.

所以可得光谱的干涉强度为

$$I_{\theta} = \frac{1}{cK_0} \int_{\sigma'_{-\infty}}^{\sigma'_{+\infty}} \left(B(\sigma) \sin^2(\delta) \times \left[1 + \sin\delta \cos(2\pi\Delta\sigma + 2\theta) \right] \right) d\sigma. \quad (26)$$

所以有

$$I_{\theta} = \frac{B_0}{cK_0} \int_{\sigma'_{-\infty}}^{\sigma'_{+\infty}} \left\{ \exp \left[-\frac{4\ln 2(\sigma - \sigma')^2}{w^2} \right] \sin^2(\delta) \times \left[1 + \sin\delta \cos(2\pi\Delta\sigma + 2\theta) \right] \right\} d\sigma. \quad (27)$$

因为对特定的谱线,其光谱宽度很窄,我们假定 δ 不变,所以可得

$$I_{(\theta)} = I_0 [1 + \exp(-QT\Delta^2) \times \sin(\delta) \cos(2\pi\Delta\sigma' + 2\theta)], \quad (28)$$

式中, $I_0 = \frac{B_0}{cK_0} \sqrt{\frac{4\ln 2}{w^2}} \sin^2(\delta)$, $Q = \frac{2\pi^2 k\sigma'^2}{mc^2}$, 其中 k 为波尔兹曼常数, m 为发光粒子的分子量, c 为光束, T 为风场的温度.

令

$$V = \exp(-QT\Delta^2) \quad (29)$$

为谱线的调制度,且

$$U = \sin(\delta) \quad (30)$$

为仪器调制度,且

$$\alpha = \sin^2(\delta) \quad (31)$$

为干涉强度系数.

所以(28)式可以写为

$$I_{(\theta)} = I_0 [1 + UV\cos(2\pi\Delta\sigma' + 2\theta)]. \quad (32)$$

根据多普勒原理,可得视线方向上的多普勒频移为

$$\sigma' = \sigma_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right), \quad (33)$$

其中 σ_0 为未发生频移的真空中的波数, v 为风速.

将(33)式代入(32)式可得

$$I_{(\theta)} = I_0 \left[1 + UV\cos \left(2\pi\Delta\sigma_0 + \frac{2\pi\Delta\sigma_0 v}{c} + 2\theta \right) \right]. \quad (34)$$

令 $\Delta\sigma_0 = N$ (N 为整数), 且

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta\sigma_0 v}{c}. \quad (35)$$

所以有

$$I_{(\theta)} = I_0 [1 + UV\cos(\varphi + 2\theta)]. \quad (36)$$

旋转四次检偏器,可得

$$I_{(0^\circ)} = I_0 [1 + UV\cos(\phi)], \quad (37)$$

$$I_{(45^\circ)} = I_0 [1 - UV\sin(\phi)], \quad (38)$$

$$I_{(90^\circ)} = I_0 [1 - UV\cos(\phi)], \quad (39)$$

$$I_{(135^\circ)} = I_0 [1 + UV\sin(\phi)]. \quad (40)$$

联立(36), (37), (38), (39)式可以求得 I_0, V, ϕ , 其分别为

$$I_0 = \frac{(I_{(0^\circ)} + I_{(45^\circ)} + I_{(90^\circ)} + I_{(135^\circ)})}{4}, \quad (41)$$

$$V = \frac{[(I_{(0^\circ)} - I_{(90^\circ)})^2 + (I_{(45^\circ)} - I_{(135^\circ)})^2]^{1/2}}{2UI_0}, \quad (42)$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{I_{(135^\circ)} - I_{(45^\circ)}}{I_{(0^\circ)} - I_{(90^\circ)}} \right). \quad (43)$$

由(42)式求出 V 后,可以由(29)式求出风场温度 T ; 由(43)式求出 φ , 可以由(35)式求出风速.

3. 探测谱线的干涉强度和仪器调制度分析

高层大气风场探测所使用的谱线如表 1 所示. 因而在实际设计仪器的时候,我们一般针对中间波长 630 nm 进行设计,这样可以使仪器兼顾短波 557.7 nm 和长波段的 762 nm 波长的谱线. 而此时,我们用有效光程差代替(35)式中的光程差,其公式为^[45]

$$\Delta_{\text{eff}} = \Delta - \lambda_0 \frac{d\Delta}{d\lambda}. \quad (44)$$

我们知道波长为 λ 的 $\frac{\lambda}{4}$ 波片的厚度与波长的关系为

$$(n_e - n_o)d = \frac{\lambda(2K + 1)}{4}, \quad (45)$$

其中 n_e 为 e 光在单轴晶体中的折射率, n_o 为 o 光在单轴晶体里面的折射率, K 为与波片厚度相关的常数,这里我们取 $K = 1000$.

当波长由 λ 变为 λ' 后,该波片的位相延迟变为

$$\delta' = \frac{2\pi(n'_e - n'_o)d}{\lambda'}. \quad (46)$$

将(45)式代入(46)式,可得

$$\delta' = \frac{(2K + 1)\pi}{2} \frac{\lambda(n'_e - n'_o)}{\lambda'(n_e - n_o)}. \quad (47)$$

假设我们使用方解石来制造 $\frac{\lambda}{4}$ 波片,我们知道方解石的 o 和 e 的折射率与波长的关系分别为

$$n_o(\lambda) = \sqrt{2.69705 + \frac{0.0192064}{\lambda^2 - 0.01820}} - 0.015162\lambda^2, \quad (48)$$

$$n_e(\lambda) = \sqrt{2.18438 + \frac{0.0087309}{\lambda^2 - 0.01018}} - 0.0024411\lambda^2. \quad (49)$$

由(30)式和(31)式可知,谱线的仪器调制度和干涉强度系数是位相延迟的函数,而由(47)—(49)式可知,不同谱线所对应的位相延迟与谱线的波长有关,如图2所示.

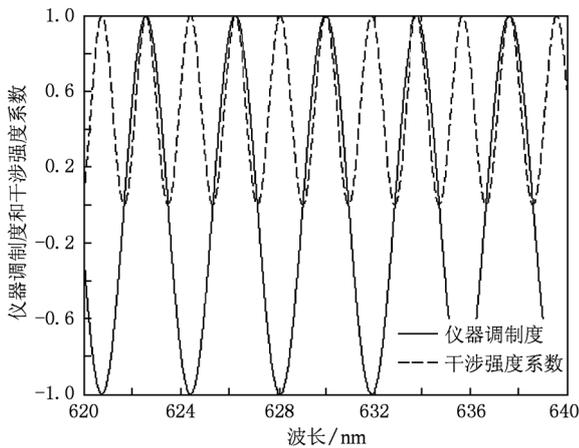


图2 偏振风成像干涉仪仪器调制度和干涉强度系数与谱线波长的关系

图2为630 nm附近偏振风成像干涉仪仪器调制度和干涉强度系数随波长变化的示意图.由图2可知谱线的仪器调制度和干涉强度系数受波长调制,成周期性变化.

由(45)—(49)式,我们可以求出高层大气风场探测所用各谱线对应的位相延迟,由(30)和(31)式可以求出各谱线所对应的仪器调制度和干涉强度系数,如表2所示.

表1 高层大气风场探测所用谱线

谱线	波长/nm	高度范围/km
O(¹ S)绿线	557.7	较低的80—90 较高的150—300
O(¹ D)红线	630.0	150—300
HeNe 激光器(实验室用)	632.8	NA
OH(8-3)带	730.0	80—110
O ₂ 分子(0-0)带	762.0	80—110
O ⁺ 线	732.0	200—300

表2 各谱线的仪器调制度和干涉强度系数

波长/nm	n_o	n_e	δ'/π	U	$\alpha(\lambda)/\alpha(630)$
557.7	1.660756	1.487521	1147.6889	-0.8290	0.6872
630	1.655823	1.485257	1000.5000	1	1
632.8	1.655665	1.485185	995.5702	-0.9758	0.9522
730	1.651147	1.483166	850.3582	0.9024	0.8143
732	1.651070	1.483132	850.3582	-0.5488	0.3012
762	1.649968	1.482656	811.4071	-0.9577	0.9172

表2为使用630 nm的谱线作为我们设计仪器的目标谱线,并用方解石来制作波片的时候,计算所得到的各个谱线所对应的波片的位相延迟、仪器调制度和干涉强度系数与630 nm的干涉强度系数的比值.

由表2中可知:

1)除630 nm的谱线外,其他各谱线的仪器调制度的绝对值不为1,其中732 nm的最小,仅为0.5488,小于0.6的期望值,已不适合用作高层大气风场探测的目标谱线.

2)各谱线干涉强度系数也会随着波长的变化而变化,其中732 nm的干涉强度系数最小,762 nm的干涉强度系数最大.实际探测时,当探测干涉强度系数小于1的谱线的时候,我们应该适当的增加探测时间,以增大信噪比.

综合上述,当仪器针对630 nm设计时,由于732 nm的谱线的仪器调制度绝对值过小,小于0.6,已不适合用作高层大气风场探测目标谱线.

4. 结 论

1. 本文证明了可以使用偏振风成像干涉仪,利用高层大气发出的多个波长的自然光源和“四强度法”测量高层大气的风速、温度、粒子体辐射率等信息.

2. 给出了使用偏振风成像干涉仪进行多波段高层大气风场测量时的干涉强度与光程差、谱线调制度及波片延迟相位之间的关系式;因波片的位相延迟与所探测谱线的波长有关,所以偏振风成像干涉仪的干涉强度与仪器调制度受所探测谱线的波

长调制.

3. 由(27)式可知,使用偏振风成像干涉仪多谱段探测时,谱线的干涉强度与仪器调制度随波片的位相延迟(由谱线的波长变化引起)变化而成周期性变化.当波片的位相延迟为 $\frac{\pi}{2}(\lambda/4)$ 时,仪器调制度 U 的绝对值有最大值1;当波片的位相为 $\pi(\lambda/2)$ 时,仪器调制度为0,两光束不发生

干涉.

4. 论文对630 nm谱线作为目标进行了仪器设计,计算了高层大气风场探测中使用的各谱线的仪器调制度和干涉强度系数的理论值.因732 nm的 O^+ 谱线的仪器调制度的绝对值较小(小于0.6)不再适合作为高层大气风场探测的谱线,余下的五条谱线可以作为高层大气风场探测谱线.

- [1] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2004 *Appl. Opt.* **33** 6090
- [2] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **8** 815
- [3] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2002 *Opt. Commun.* **1-2** 21
- [4] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2003 *Opt. Commun.* **4-6** 221
- [5] Wu L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Opt. Commun.* **1** 67
- [6] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 824 (in Chinese) [简小华、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 824]
- [7] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **12** 6413 (in Chinese) [袁志林、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]
- [8] Peng Z H, Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Wu F Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6374 (in Chinese) [彭志红、张淳民、赵葆常、李英才、吴福全 2006 物理学报 **55** 6374]
- [9] Jian X H, Zhang C M, Zhu B H, Zhao B C, Du J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7565 (in Chinese) [简小华、张淳民、祝宝辉、赵葆常、杜娟 2008 物理学报 **57** 7565]
- [10] Wu H Y, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 930 (in Chinese) [吴海英、张淳民、赵葆常 2009 物理学报 **58** 930]
- [11] Wu H Y, Zhang C M, Zhao B C, Li Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1642 (in Chinese) [吴海英、张淳民、赵葆常、李英才 2009 物理学报 **58** 1642]
- [12] Zhang C M, Mu T K, 2010, *Opt. Eng.* **49** 043002
- [13] Zhang C M, Yan X G, Zhao B C 2008 *Opt. Commun.* **281** 221
- [14] Bu Z C, Zhang C M, Zhao B C, Zhu H C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2415 (in Chinese) [步志超、张淳民、赵葆常、朱化春 2009 物理学报 **58** 2415]
- [15] Zhang C M, Jian X H 2010 *Optics Letters* **35** 366
- [16] Zhang C M, Zhao B C, Yuan Y 2006 *SPIE* **6032** 6032T
- [17] Wang Jin-Chan, Zhang C M, Zhao B C, Liu Ning 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1631 (in Chinese) [王金婵、张淳民、赵葆常、刘宁 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1631]
- [18] Gault W A, Shepherd G G 1983 *Adv. Space Re.* **2** 111
- [19] Shepherd G G 1985 *Appl. Opt.* **24** 1571
- [20] Rochon Y J, Rahnama P, McDade I C, Scott A, Gault W A, Lukovich J V 2004 Barcelona, Spain *Proceedings of SPIE* **5234** 335
- [21] Gault W A, McDade I C, Rochon Y, Scott A 2003 Agia Pelagia, Crete, Greece *Proceedings of SPIE* **4881** 60
- [22] McDade I C, Shepherd G G, Gault W A, Rochon Y J, McLandress C, Scott A, Rowlands N, Butter G 2001 *IEEE* 1344
- [23] Gault W A, Ward W E, Shepherd G G, Rowlands N 1999 *IEEE* 1612
- [24] Shimoda H 2003 Agia Pelagia, Crete, Greece *Proceedings of SPIE* **4881** 52
- [25] Bird J C, Facheng Liang, Solheim B H, Shepherd G G 1995 *Meas. Sci. Technol.* **6** 1368
- [26] Gault W A, Brown S, Moise A, Liang D, Sellar G, Shepherd G G, Wimperis 1996 *Appl. Opt.* **35** 2913
- [27] Ward W E, Gault W A, Rowlands N, Wang S, Shepherd G G, McDaded I C, McConnell D J, Michelangelid D, CaldWelle J 2002 Quebec Canada *Proceedings of SPIE* **4833** 226
- [28] Zhang C M, Wang W, Xiang L B, Zhao B C 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 234 (in Chinese) [张淳民、王伟、相里斌 2000 光学学报 **20** 234]
- [29] Zhang C M, He J 2006 *Optics Express* **14** 12561
- [30] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B, Li Y C 2006 *Optik* **117** 265
- [31] He J, Zhang C M, Zhang G Q 2007 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **27** 423 (in Chinese) [贺健、张淳民、张庆国 2007 光谱学与光谱分析 **27** 423]
- [32] He J, Zhang C M 2005 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7** 613
- [33] Jian X H, Zhang C M, Zhang L, Zhao B C 2010, *Optics Express*, **18**:5674
- [34] Ye J Y, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **57** 67 (in Chinese) [叶健勇、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **57** 67]
- [35] Wang L, Zhao B C, Xiang L B, Zhang C M 2007 *Acta Photonica Sinica* **36** 1697 (in Chinese) [汪丽、赵葆常、相里斌、张淳民 2007 光子学报 **36** 1697]
- [36] Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Ye J Y 2007 *Xi'an China Proc. SPIE* **6279** 62791D1-8
- [37] Ruan K, Zhang C M, Zhao B C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 9 (in China) [阮凯、张淳民、赵葆常 2008 物理学报 **57** 9]
- [38] Du J, Zhang C M, Zhao B C, Sun Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 10 (in China) [杜鹃、张淳民、赵葆常、孙尧 2008 物理学报 **57** 10]

- [39] Liu N, Zhang C M, Wang J C, Mu T K 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 385 (in China) [刘 宁、张淳民、王金蝉、穆廷魁 2010 物理学报 **59** 385]
- [40] Zhang L, Zhang C M, Jian X H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 899 (in China) [张 霖、张淳民、简小华 2010 物理学报 **59** 899]
- [41] Zhu H C, Zhang C M, Jian X H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 893 (in China) [朱化春、张淳民、简小华 2010 物理学报 **59** 893]
- [42] Title A M, Ramsey H E 1980 *Appl. Opt.* **19** 2047
- [43] Jones R C 1941 *J. Opt. Soc. Am.* **31** 488
- [44] Bell, Robert John 1972 *Introductory Fourier transform spectroscopy* (New York: Academic) p37
- [45] Thuillier G, Herse M 1991 *Appl. Opt.* **24** 1599

Theoretical study of polarization atmosphere Michelson interferometer using multi-wavelength*

Zhu Hua-Chun Zhang Chun-Min[†]

(School of Science, Xi'an Jiaotong University, Non-equilibrium Condensed Matter and Quantum Engineering Laboratory, the Key Laboratory of Ministry of Education, Xi'an 710049, China)

(Received 1 August 2009; revised manuscript received 7 September 2010)

Abstract

The basic principle of measuring the upper atmosphere using the polarization atmosphere Michelson interferometer (PAMI) is briefly described. The relationships between the intensity and the visibility of the PAMI and the Delayed phase of the wave plate are presented. The visibility and the intensity of the PAMI are dependent on the wavelength of spectral line, showing that the 732nm line is inapplicable for measuring spectral line if the PAMI is designed specifically for the 630 nm line. The research provides a theoretical basis and practical guidance both for the theoretical study of polarization atmosphere Michelson interferometer and for the design and development of the new polarization atmosphere Michelson interferometer.

Keywords: upper atmosphere measurement, polarization atmosphere Michelson interferometer, visibility, measurement with multi wavelength

PACS: 42.30.Lr, 42.25.Ja, 42.25.Hz

* Project supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40537031), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA12Z152), the National Defense Basic Scientific Research Project (Grant No. A1420080187), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40875013, 40375010, 60278019).

[†] Corresponding author. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn