

# 基于大气偏振模式全局特征的中性点识别方法

王子谦<sup>1</sup> 范之国<sup>1\*</sup> 金海红<sup>2</sup> 张旭东<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)  
(<sup>2</sup> 安徽建筑大学电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要** 中性点是大气偏振模式的重要分布特征之一,在偏振光导航、大气环境监测、遥感探测等方面具有重要价值。在分析大气偏振模式的偏振度分布特性和中性线分布特性的基础上,提出了两种中性点检测识别方法,实现了对中性点的自动识别。实验结果表明,两种方法均实现了对实际大气偏振模式中中性点的识别。其中,基于中性线相交特性的中性点识别方法具有较高的精度;基于偏振度分布的中性点识别方法具有较好的稳定性,在正午时分,优于基于中性线相交特性的中性点识别方法。综合运用两种方法,可以进一步提高对中性点的检测与识别精度。

**关键词** 大气光学;中性点;中性线;椭圆拟合;大气偏振模式

**中图分类号** TP391.4; P422.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0701001

## Neutral Points Recognition Based on the Atmospheric Polarization Pattern's Global Characteristics

Wang Ziqian<sup>1</sup> Fan Zhiguo<sup>1</sup> Jin Haihong<sup>2</sup> Zhang Xudong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)  
(<sup>2</sup> School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230009, China)

**Abstract** Neutral points are one of important distribution characteristics of the atmospheric polarization pattern, which have important value on polarotactic navigation, atmospheric environmental monitoring, remote sensing, et al.. Based on the analysis of the degree of polarization's and the neural line's distribution characteristics, two recognition methods of neutral points are proposed. The experimental results show that, both of these methods can recognize the neutral points from the real atmospheric polarization pattern automatically and precisely. The recognition method based on the intersection features of the neutral lines has better algorithm performance. Meanwhile, the recognition method based on the distribution characteristics of the degree of polarization has better algorithm robustness, and has much better algorithm performance than the other method at the midday. By the integrated application of two methods, the accuracy of the neutral points recognition can be further improved.

**Key words** atmospheric optics; neutral points; neutral lines; ellipse fitting; atmospheric polarization pattern

**OCIS codes** 010.1290; 100.3008; 280.4788

## 1 引言

太阳光在大气中传输会受到大气粒子的散射,形成特殊的偏振光分布模式,称为大气偏振模式<sup>[1-2]</sup>。通过解析该模式的分布特征,可获得空间

方位、地表特性以及大气成分等信息,对偏振光导航、生物偏振感知机理、大气光学特性分析以及遥感探测等研究都具有十分重要的意义<sup>[3-5]</sup>。越来越多的国内外学者开展了针对大气偏振模式特征的分析

收稿日期: 2013-12-03; 收到修改稿日期: 2014-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61102153,61271121)、国家 863 计划

作者简介: 王子谦(1988—),男,硕士研究生,主要从事智能信息处理方面的研究。E-mail: ziqianwang@aliyun.com

导师简介: 张旭东(1966—),男,博士,教授,主要从事智能信息处理、机器视觉等方面的研究。

E-mail: xudong1118@163.com

\* 通信联系人。E-mail: ibcshfut@163.com

和研究<sup>[4-11]</sup>。

中性点是大气偏振模式的重要分布特征之一,是由于太阳光受到气溶胶的退偏作用而形成的天空偏振奇点<sup>[6]</sup>,中性点处偏振度为0<sup>[2]</sup>。目前已发现,大气偏振模式中共存在4个中性点,即 Arago 中性点、Babinet 中性点、Brewster 中性点和第四中性点。它们的分布与变化特性同大气浑浊度<sup>[8]</sup>(大气中气溶胶的浓度)有关,可以作为大气环境质量监测及分析预测的重要参考。中性点是大气中的偏振窗口,透过中性点进行遥感探测能够减小大气偏振特性的影响,获得更准确的目标特性<sup>[12]</sup>。中性点的分布具有明显的方位特性,可作为偏振导航的航标,为自主导航提供准确的方向信息<sup>[13]</sup>。因此,研究中性点的形成与变化,实现对中性点的检测识别在实际应用中具有重要价值。但是,目前尚未发现有关大气偏振模式中中性点自动检测识别的研究报道。通过人工分析大气偏振模式分布的方法来获取中性点,过程繁琐,且不能实时跟踪中性点的变化过程,而通过自动检测识别中性点的方法,可以实现中性点在大气偏振模式中分布变化的实时跟踪和监测,并可以为不同条件下的中性点特性研究提供统一的检测标准。

为了提高中性点的观测识别精度和效率,本文基于大气偏振模式天空分布的全局特性检测,通过分析中性点在大气偏振模式中的偏振度分布特性,以及中性点与中性线分布交点共点的特征,分别提

出了两种大气偏振模式中中性点的检测识别方法,实现了对大气偏振模式中的 Arago 中性点和 Babinet 中性点的检测识别,及其变化特性的跟踪定位。其中,中性点的定位是通过中性点的中心位置实现。通常,在实际观测中较难获得 Brewster 中性点和第四中性点。实验结果表明,两种检测识别方法都实现了对中性点的准确识别。对比两种方法,基于中性线相交特性的识别方法具有较高的检测识别准确性,对中性点识别的算法性能较高;但是,对于太阳直射的影响较为敏感,正午时分对 Babinet 中性点的识别准确度受到影响。基于中性点偏振度分布特性的识别方法的稳定性较高,并且能够克服正午太阳直射的影响,综合运用两种方法可有效地提高中性点识别精度。

## 2 中性点特性的检测与分析

### 2.1 大气偏振模式的检测方法

大气偏振模式全局分布特性的观测装置由 Nikon D50 相机、Nikkor AF DX 10.5 mm f/2.8G ED 鱼镜头和偏振片组成,偏振片置于鱼镜头前端,如图1(a)所示。鱼镜头具有较大的观测视场,可以获得较广天空范围的光分布特性,实现对天空全局特性的感知;前置偏振片对不同偏振光的透过性不同,完成对偏振态的检测;CCD 相机实现对光强信息的感知和记录,相机的图像量化位数为8位。

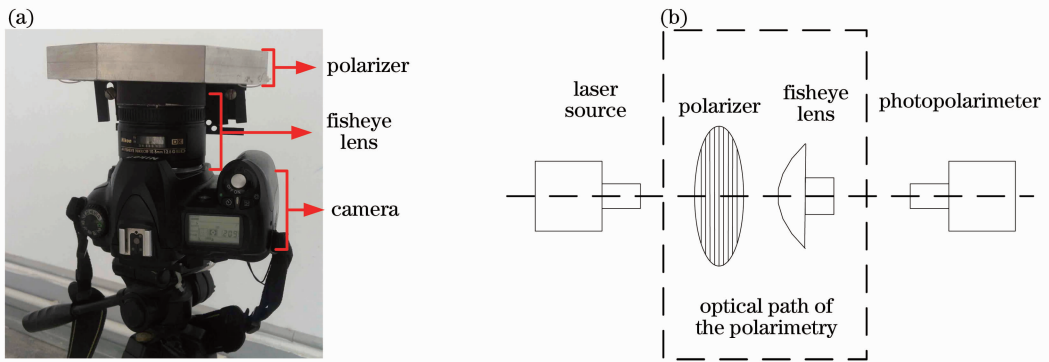


图1 偏振检测装置与标定实验。(a)偏振检测装置;(b)标定实验框图

Fig. 1 Polarimeter and calibration experiments. (a) Polarimeter experiment; (b) chart of calibration experiments

在全局特性的检测中,光的偏振态可采用 Stokes 矢量  $S = (I, Q, U, V)^T$  表示,  $I$  为辐射总光强,  $Q, U$  为线偏振光强,  $V$  为圆偏振光强。大气中圆偏振光极少,故 Stokes 矢量可简化为  $S = (I, Q, U)^T$ 。检测装置中的光路部分,即鱼镜头及偏振片,对大气光偏振特性会产生一定改变,这一改变可

通过 Mueller 矩阵进行描述<sup>[14]</sup>。若入射光的偏振态为  $S$ ,检测装置的 Mueller 矩阵为  $M$ ,相机感知到的光的 Stokes 矢量  $S'$  为

$$S' = \begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中辐射光强  $I'$  可直接由相机获得。偏振片的 Mueller 矩阵随着检偏角的变化而改变,故可通过调整偏振片的检偏角改变检测装置的 Mueller 矩阵。当  $n \geq 3$  时,在不同检偏角  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  下,获取  $n$  幅天空偏振图像  $I'_1, I'_2, \dots, I'_n$ , 各检偏角对应的 Mueller 矩阵为  $M^1, M^2, \dots, M^n$ , 故可计算大气光的 Stokes 矢量  $S = (I, Q, U)^T$ , 表达式如下:

$$\begin{bmatrix} M_{11}^1 & M_{12}^1 & M_{13}^1 \\ M_{11}^2 & M_{12}^2 & M_{13}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{11}^n & M_{12}^n & M_{13}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ \vdots \\ I'_n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

检测装置在不同偏振片检偏角度下的 Mueller 矩阵,可通过标准激光光源和偏振态测量仪测量标定。由(2)式可见,通过旋转偏振片至最少 3 个不同的检偏角,可获得大气偏振模式的分布特性。故分别对偏振片检偏角为  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$  时,检测装置的 Mueller 矩阵进行标定。具体标定方法为:通过激光器产生 10 组强度不同的无偏光,依次沿检测装置的光轴方向入射至检测装置的光路部分(包括偏振片和鱼镜头)中,在每组相同强度的激光照射下,分别旋转装置偏振片至  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ , 并通过偏振态测量仪逐一测量出射光的偏振态,实验框图如图 1(b)所示。

将检偏角分别为  $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$  时的 10 组实验结果代入(2)式,通过最小二乘法即可获得 Mueller 矩阵的相关参数,如表 1 所示。利用表 1 所列参数可计算大气光的 Stokes 矢量。

表 1 系统 Mueller 矩阵参数标定结果

Table 1 Calibrated system's Mueller matrix parameters

Angle of polarization detection / ( $^\circ$ )	$M_{11}$	$M_{12}$	$M_{13}$
0	0.5000	0.5000	0.0001
60	0.5000	-0.2499	0.4330
120	0.5000	-0.2501	-0.4328

为充分利用镜头视场,通常使相机成像靶面略大于鱼镜头的成像孔径,导致在图像传感器边缘存在部分不能感光的像素,形成由无效像素构成的黑色区域  $Z_{\text{invalid}}$ ,如图 2(b)所示。无效区域  $Z_{\text{invalid}}$  的大小取决于镜头孔径和相机靶面尺寸间的比例,与大气光的偏振特性无关。由于天空偏振图像存在无效区域  $Z_{\text{invalid}}$ ,需在计算过程中去除。通过大津阈值<sup>[15]</sup>对全部天空偏振图像进行二值化处理。大津阈值是一种自适应图像阈值,该阈值可在图像中目标和背景的类型间方差最大,即目标与背景错分概率最小的条件下对图像进行二值化。二值化后,对所

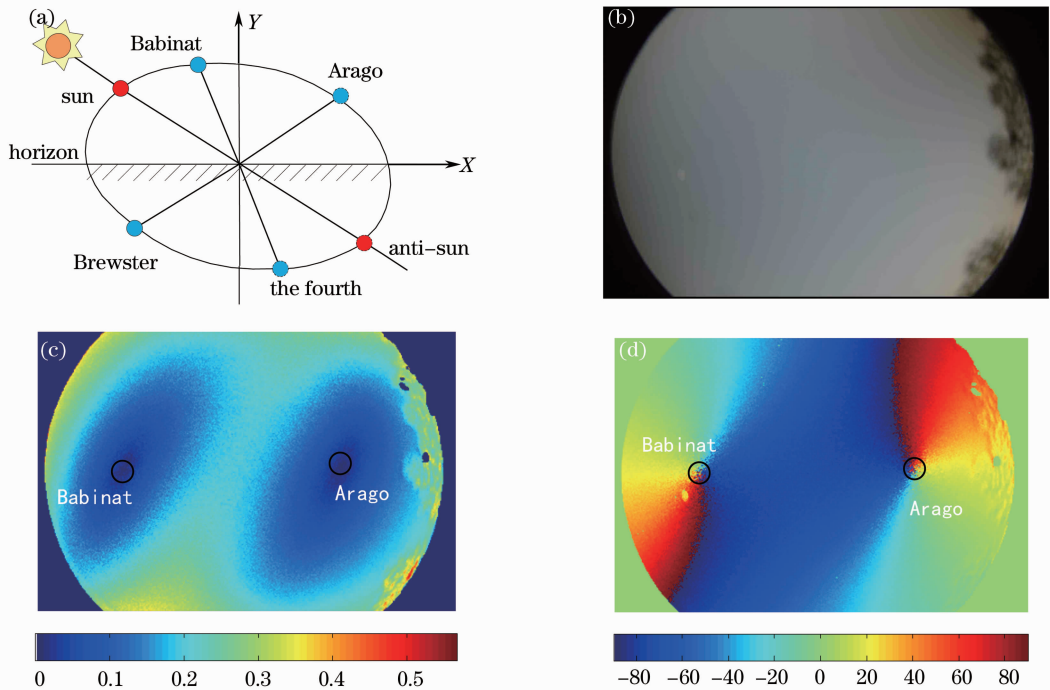


图 2 中性点分布特性。(a)中性点分布示意;(b)无云的天空图像;(c)偏振度分布;(d)偏振角分布

Fig. 2 Distribution characteristic of the neutral points. (a) Schematic plot of the neutral points' distribution; (b) clear sky map; (c) DOP distribution; (d) AOP distribution

得的二值图像进行与和,即获得  $Z_{\text{invalid}}$  的掩模图像,通过同该掩模相或,可去除无效区域  $Z_{\text{invalid}}$ 。计算大气偏振模式的偏振度分布 ( $DOP, D_{OP}$ ) 和偏振角分布 ( $AOP, A_{OP}$ ) 得

$$\begin{cases} \text{if}(I, Q, U) \parallel Z_{\text{invalid}} \neq 0, \\ \left\{ \begin{aligned} D_{OP} &= \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ A_{OP} &= \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \end{aligned} \right. , \\ \text{else } D_{OP} = 0, \quad A_{OP} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

校正偏振角分布  $A_{OP}$  的计算结果,使  $A_{OP}$  满足如下条件:

$$Q \times \cos(2A_{OP}) \geq 0. \quad (4)$$

通过鱼镜头和检偏器获取的大气偏振模式的分布特性,实现对大气偏振模式的全局检测。中性点是大气偏振模式的分布特征之一,全局的大气偏振模式中包含了中性点的分布信息,因此通过全局大气偏振模式,可以实现对中性点的检测与识别。

## 2.2 中性点特性分析

中性点是大气偏振模式中偏振度为 0,而偏振角为发生旋转的天空点的集合。大气偏振模式的中性点具有以下分布特性<sup>[2,3,16-17]</sup>:

- 1) 在天空中,该位置的偏振度最低且为 0;
- 2) 在偏振度分布模式中,该点偏振度随着相对位置的角距离增加逐渐增大;
- 3) 在偏振角分布模式中,当沿着平行于太阳子午线或者反太阳子午线的方向经过该位置时,偏振角的方向将发生旋转,从而改变了偏振角取值的正负符号。

目前,已经发现大气偏振模式中存在四个中性点,即 Arago 中性点、Babinet 中性点、Brewster 中性点和第四中性点。其中,Arago 中性点和 Babinet 中性点位于太阳和反太阳位置之间较易观测,Arago 中性点位于反太阳位置一侧,Babinet 中性点位于近太阳位置一侧;Brewster 中性点和第四中性点通常位于地平线以下,当太阳高度角较高或由高空位置进行观测时方能获得<sup>[7]</sup>,如图 2(a)所示。针对 Babinet 中性点和 Arago 中性点进行检测识别,当观测 Brewster 中性点和第四中性点时,也可以通过相同的过程进行检测识别。图 2(b)~(d)是对大气偏振模式进行观测,获得的天空图像、偏振角分布模式和偏振度分布模式,图中黑色标记位置即为中性点。

## 3 中性点特性的检测与分析

中性点是大气偏振模式中的特殊点,利用中性点在大气偏振模式的特殊分布特性,可以实现对中性点的检测和识别。基于中性点在大气偏振模式中的偏振度分布特性,和中性点与中性线的分布交点共点的特征,提出了两种中性点检测识别方法。这两种方法均采用中性点的中心位置作为中性点的定位。

### 3.1 基于偏振度椭圆拟合的中性点检测与识别方法

在大气偏振模式中,中性点的偏振度最小且为 0,中性点附近的偏振度分布是以中性点为中心向外逐渐增大。通过大量观测发现,中性点周围天空区域的偏振度较低,且在观测模式中近似为圆或椭圆,其等偏振度线以中性点为中心呈环形分布<sup>[16-20]</sup>。因此,对较小偏振度的分布形态进行椭圆形态拟合,通过检测拟合椭圆的中心实现对中性点的识别。

基于偏振度椭圆拟合的中性点识别方法如下:

1) 偏振度图像预处理。将(3)式所得偏振度的数值分布  $DOP$  映射为偏振度图像,并进行滤波预处理,平滑偏振度图像。

2) 提取中性点所在的区域。大气偏振模式的全局观测中,可获得 Arago 和 Babinet 两个中性点的信息,这两个中性点所在区域的偏振度较低,并以中性点为中心呈环状分布<sup>[16]</sup>,如图 2(b)所示。利用大津阈值二值化偏振度图像,获得天空中的低偏振度区域。所得的低偏振度区域中,包含以中性点为中心的环状区域和由随机误差产生的低偏振度区域两类。通常随机误差形成的区域较小,故可将所得的各个连通区域分别进行标记<sup>[21]</sup>,从中选取出两处最大区域,即为中性点所在的区域。

3) 拟合求解中性点中心。分别提取两个中性点所在区域的边缘  $I_{\text{edge1}}$  和  $I_{\text{edge2}}$ ,中性点位于该区域的中心位置。并对  $I_{\text{edge1}}$  和  $I_{\text{edge2}}$  进行最小二乘椭圆拟合<sup>[22]</sup>,获得与  $I_{\text{edge1}}$  和  $I_{\text{edge2}}$  形态最接近的拟合椭圆。拟合椭圆可以通过二次曲线多项式表示:

$$F(x, y) = a \cdot u = ax^2 + bx + cy^2 + dx + ey + f = 0, \quad (5)$$

式中  $a = [a \ b \ c \ d \ e \ f]^T$ ,  $u = [x^2 \ xy \ y^2 \ x \ y \ 1]^T$ 。空间中一点  $(x_0, y_0)$  到椭圆的代数距离为  $f(x_0, y_0)$ ,最小二乘椭圆拟合是通过最小二乘法寻找一组椭圆参数  $a$  使数据点与拟合椭圆间距离的最小化,即

$$\hat{a} = \arg \min_a \left\{ \sum_{i=1}^n E(a, u_i)^2 \right\} = \arg \min_a \| u_a \|^2, \quad (6)$$



式中  $U = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5 \ u_6]^T$ 。为避免平凡解  $a = 0$ ，需约束  $\|a\| = 1$ ，并约束椭圆方程满足  $4ac - b^2 = 1$ 。通过对(5)式的广义特征值求解，可获得最小二乘的椭圆拟合方程。椭圆中心  $C(x_c, y_c)$  即为中性点：

$$\begin{cases} x_c = \frac{be - 2cd}{4ac - b^2} \\ y_c = \frac{bd - 2ac}{4ac - b^2} \end{cases} \quad (7)$$

利用该方法对中性点进行识别，如图 3 所示。图 3(a)为基于偏振度椭圆拟合的中性点识别方法的算法流程；图 3(b)为对中性点所在区域的区域边缘椭圆拟合，图中椭圆型曲线即拟合椭圆，椭圆中心为中性点；图 3(c)为在偏振度分布模式中识别中性点。

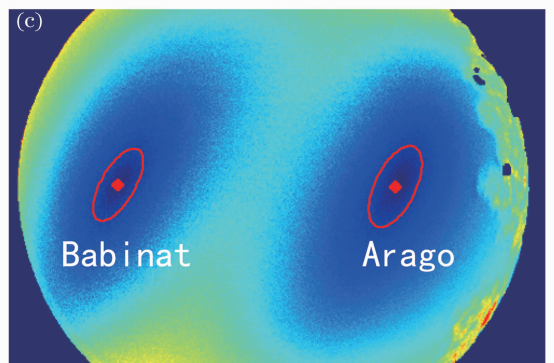
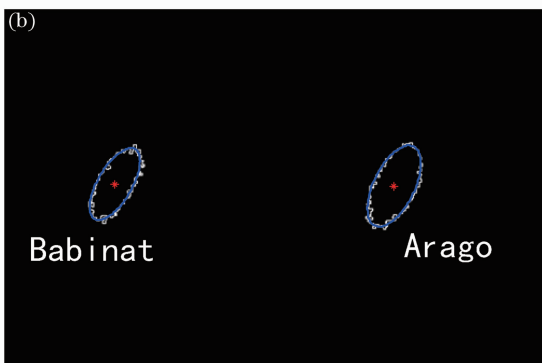
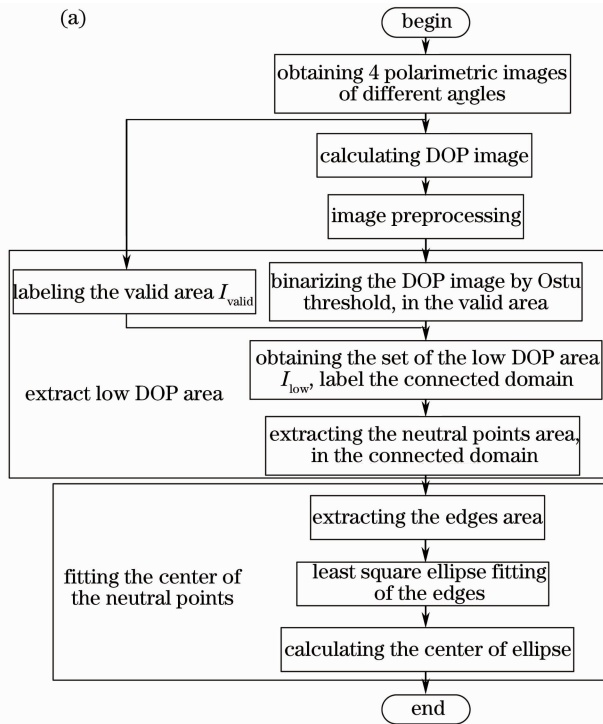


图 3 基于偏振度椭圆拟合的中性点识别方法。(a)算法流程；(b)中性点所在区域的椭圆拟合；(c)偏振度分布中的中性点识别

Fig. 3 Neutral points recognition based on the DOP ellipse fitting. (a) Flow chart of recognition; (b) ellipse fitting for DOP distribution; (c) neutral points recognition in DOP distribution

过由本节方法检测获得的中性点，分别沿太阳子午线方向和垂直太阳子午线方向对天空中点的偏振度进行检测，如图 4 所示。图中横坐标表示被测位置偏振度同中性点间的角距离，其中 0 点即为本

节方法识别所获得的中性点位置。从图中可以看出，在平行和垂直太阳子午线方向上，识别获得的中性点都是天空中偏振度分布的极小位置，且该点处的偏振度为 0。在垂直太阳子午线方向上，中性点

两侧的偏振度分布呈线性增大,且增大趋势对称,如图 4(a)和(c)所示。在平行太阳子午线的方向上,除对应的 Arago 或 Babinet 中性点外,还存在另一个偏振度极小值点,但其偏振度不为 0。对比图 4(b)和(d),可以发现这一极小值点虽不为中性

点,但该点位置非常接近天空中的另一中性点。在中性点与这一极小值间,天空偏振度分布存在极大值。中性点两侧的偏振度分布在到达极大值前,具有对称的增大特性,如图 4(b)和(d)所示。故识别获得的中性点满足中性点的分布特性。

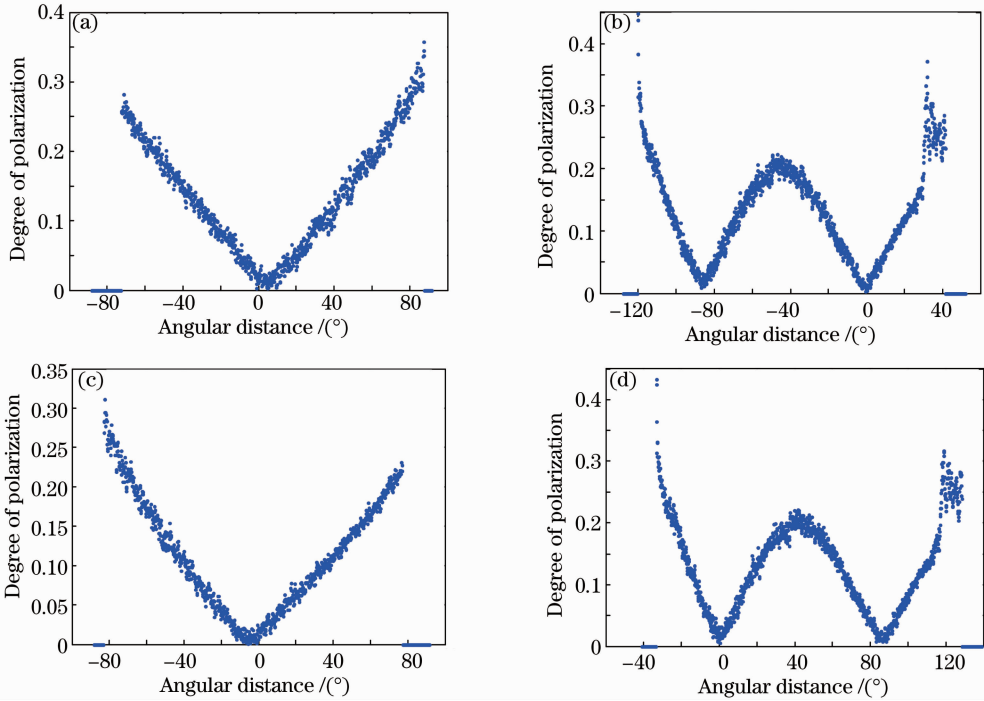


图 4 过中性点的天空偏振度分布。(a)过 Arago 点垂直太阳子午线;(b)过 Arago 点平行太阳子午线;(c)过 Babinet 点垂直太阳子午线;(d)过 Babinet 点平行太阳子午线

Fig. 4 DOP distributions through the neutral points. (a) Through the Arago point and perpendicular to the sun meridian; (b) through the Arago point and parallel to the sun meridian; (c) through the Babinet point and perpendicular to the sun meridian; (d) through the Babinet point and parallel to the sun meridian

### 3.2 基于中性线相交特性的中性点识别方法

中性点处线偏振度为 0,由(3)式可知,其 Stokes 矢量的线偏振分量  $U$ 、 $Q$  同时为 0。中性线是大气偏振模式中  $U=0$  或  $Q=0$  的天空点集。中性点可同时满足  $U=0$  和  $Q=0$  特性,故中性点恰好位于  $Q=0$  中性线和  $U=0$  中性线的交点处。因此,通过  $U=0$  和  $Q=0$  中性线的相交特性可以实现对中性点的检测识别。

基于中性线相交特性的中性点识别方法的算法如下:

1) 提取中性线。通过直接提取(2)式计算获得的  $U$ 、 $Q$  分布中取值为 0 的点集,即可获得中性线。但是,由于测量过程中会引入随机误差,在检测获得的偏振模式中,存在  $U$  或  $Q$  为 0 的随机分布的散杂点,

而实际中性线上检测得到的  $U$ 、 $Q$  不全为 0。在大气偏振模式中, $U=0$ 、 $Q=0$  对应的中性线两侧的  $U$  或  $Q$  正负相反。因此,分别在  $U$  分布和  $Q$  分布中提取正负分界线,即可获得中性线,如图 5(a)和(b)所示。图 5(a)中的  $q_1$  和  $q_2$  为  $Q=0$  中性线,图 5(b)中的  $u_1$  和  $u_2$  为  $U=0$  中性线。

由(3)式知,在  $Q=0$  中性线上的偏振角为  $\pm 45^\circ$ ,而  $U=0$  中性线上的偏振角为  $0^\circ$  和  $\pm 90^\circ$ 。根据中性线的这一特性,验证检测获得的中性线,如图 5 所示。其中, $q_1$  上的偏振角分布如图 5(c)所示, $q_2$  上的偏振角分布如图 5(e)所示, $u_1$  上的偏振角分布如图 5(d)所示, $u_2$  上的偏振角分布如图 5(f)所示。图中横坐标为沿列序列优先扫描  $q_1$  和  $q_2$ 、 $u_1$  和  $u_2$  后,分别得到的 4 条中性线上各点的线性索引。

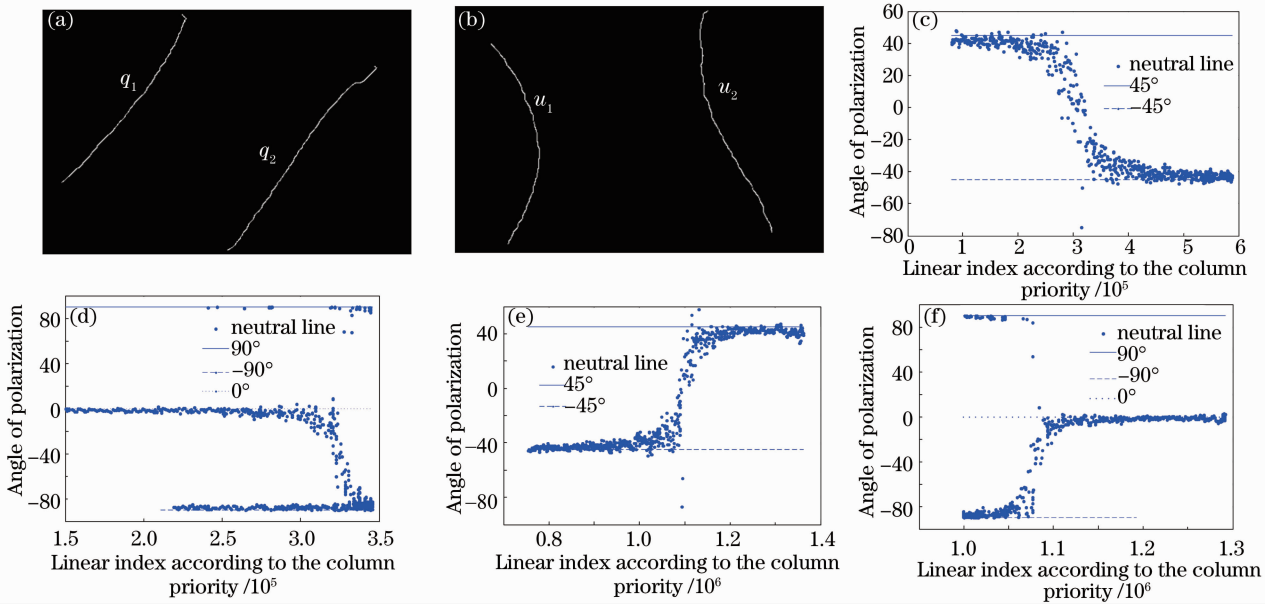


图 5 中性线的检测。(a)  $Q=0$  中性线；(b)  $U=0$  中性线；(c) 中性线  $q_1$  的偏振角分布；(d) 中性线  $u_1$  的偏振角分布；(e) 中性线  $q_2$  的偏振角分布；(f) 中性线  $u_2$  的偏振角分布

Fig. 5 Detection of the neutral lines. (a)  $Q=0$  neutral lines; (b)  $U=0$  neutral lines; (c) AOP distribution of  $q_1$ ; (d) AOP distribution of  $u_1$ ; (e) AOP distribution of  $q_2$ ; (f) AOP distribution of  $u_2$

由图 5 可见,检测得到的  $Q=0$  中性线的偏振角分布在  $\pm 45^\circ$  附近,如图 5(c)和(e)所示;检测得到的  $U=0$  中性线的偏振角分布在  $0^\circ$ 和  $\pm 90^\circ$ 附近,如图 3(d)和(f)所示,同中性线的偏振角分布特性相符。中性点位于中性线的偏振角分布跳变位置。分别对比图 5(c)和(d),以及图 5(e)和(f)可以发现  $q_1$ 和  $u_1$ ,  $q_2$ 和  $u_2$  中偏振角分布发生跳变的位置一致。因此,通过检测  $Q$ 、 $U$  中性线的交点可以对中性点进行识别。

2) 将中性线转换为像素链表。平滑连接各条中性线  $q_i$ 、 $u_i$  ( $i=1, 2$ ),并细化为单像素曲线,中性线按行或列优先扫描图像,将中性线上的像素点以链表形式进行存储,以便对中性线交点进行遍历查找。

3) 求解中性点位置。遍历并比较  $q_i$ 、 $u_i$  ( $i=1, 2$ ) 中性线链表的各个元素,  $q_i$  和  $u_i$  的链表中的相同节点,即为中性点。

利用该方法对中性点进行识别,如图 6 所示。图 6(a)基于中性线相交特性的中性点识别方法的算法流程。图 6(b)表示中性点与中性线交点共点特性,图中圆点为中性点。图 6(c)为在偏振角分布模式中识别中性点,折线为中性线,圆点为中性点。

过由本节方法检测获得的中性点,分别沿太阳子午线方向和垂直太阳子午线方向对天空中的点的偏振度进行检测,如图 7 所示。图中横坐标表示被

测位置偏振度同中性点间的角距离,其中 0 点为本节方法识别所获得的中性点位置。从图中可以看出,识别所得的中性点为天空偏振度分布中的最低点,其偏振度为 0,在中性点附近,其两侧偏振度呈对称的增大趋势。通过中性线相交方法可以正确识别获得的中性点特征。

## 4 实验与分析

分别利用本文提出的两种方法对实际大气偏振模式的中性点进行识别,如图 5 所示。大气偏振模式的观测时间为 2013 年 1 月 4 日正午前 1 h(11:12)至日落后 0.5 h(17:42),地点为合肥工业大学操场,经度  $E117^\circ 17'$ ,纬度  $N32^\circ 52'$ 。图 8(a)和(e)为被测天空,图 8(b)和(f)为基于偏振度椭圆拟合方法对中性点的识别结果,图 8(c)和(g)为基于中性线相交特性方法对中性点的识别结果,图 8(d)和(h)为对两种方法的识别结果取平均位置。为简化说明,基于偏振度椭圆拟合的中性点识别方法简记为偏振度拟合方法(DOP FIT),基于中性线相交特性的中性点识别方法简记为中性线相交方法(NL CROSS)。

利用图像中像素坐标表示 Arago 中性点和 Babinat 中性点位置的识别结果,如表 2 所示。表 2 分别列出了通过偏振度拟合方法、中性线相交方法及对两种方法的识别结果取平均,得到 Arago 中性

点坐标和 Babinat 中性点坐标。实际位置是通过人工识别的方法确定的,具体过程为:由 12 名志愿者(同实验室研究生)根据中性点的分布特性,独立对大气偏振模式的偏振度和偏振角分布模式图像进行观察,并分别标记出 Arago 中性点和 Babinat 中性点的位置,将 12 名志愿者识别的中性点坐标求取平均,即为实际中性点位置。

统计实际中性点与不同识别方法中性点识别结果间的差异,如表 3 所示。其中识别误差为:识别中性点同实际中性点之间的距离与测量图像的宽度之

比;当识别中性点位于实际中性点上方时,识别误差为正;反之,则识别误差为负。由表 3 可见,中性线相交方法的总体误差小于偏振度拟合方法。对两种方法的识别结果进行平均后,总体误差同中性线相交方法相近;而偏振度拟合方法的误差方差低于中性线相交方法;对两种方法的结果进行平均后,识别误差方差可进一步降低。由此表明,中性线相交方法具有较高的准确性,偏振度拟合方法则具有较高的稳定性。

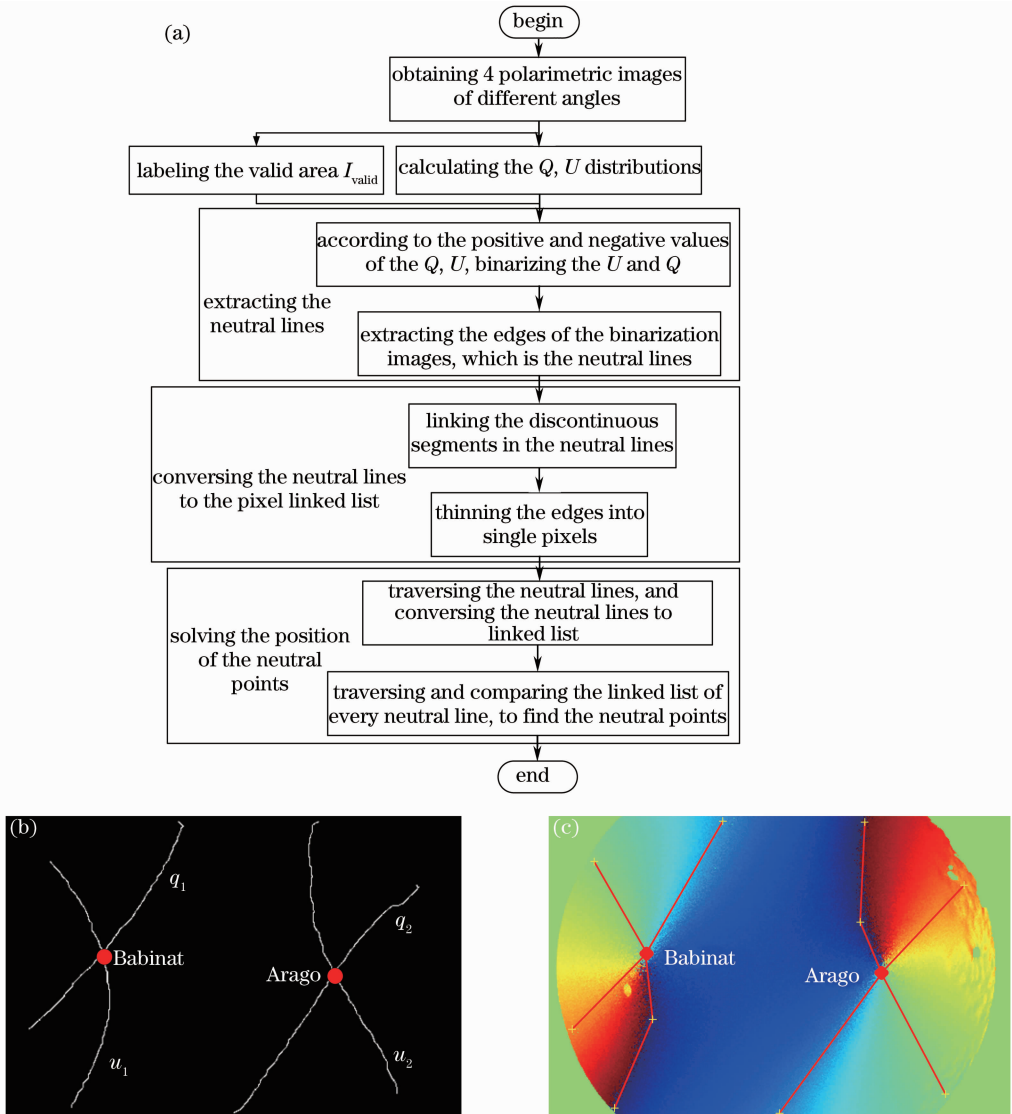


图 6 基于中性线相交特性的中性点识别方法。(a) 算法流程; (b) 中性点与中性线间的交点共点;

(c) 在偏振角分布中的中性点识别

Fig. 6 Neutral points recognition based on the intersection of the neutral lines. (a) Flow chart of recognition; (b) intersections of neutral lines and the neutral points; (c) neutral points recognition in the AOP distribution



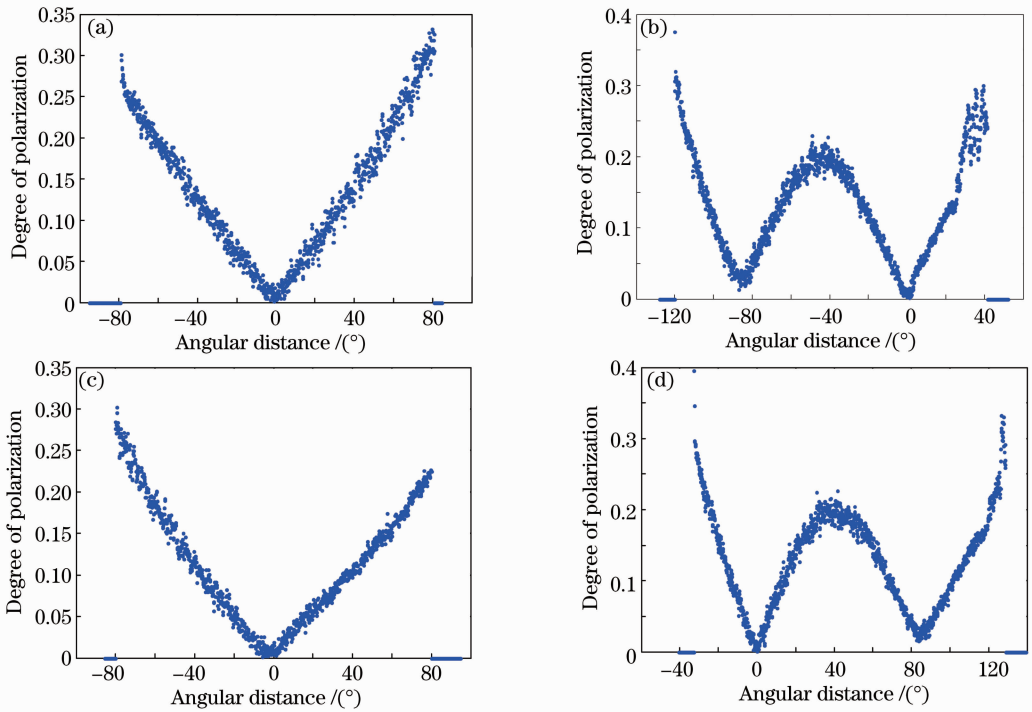


图 7 过中性点的天空偏振度分布。(a)过 Arago 点垂直太阳子午线；(b)过 Arago 点平行太阳子午线；  
(c)过 Babinat 点垂直太阳子午线；(d)过 Babinat 点平行太阳子午线

Fig. 7 DOP distributions through the neutral points. (a) Through the Arago point and perpendicular to the sun meridian; (b) through the Arago point and parallel to the sun meridian; (c) through the Babinat point and perpendicular to the sun meridian; (d) through the Babinat point and parallel to the sun meridian

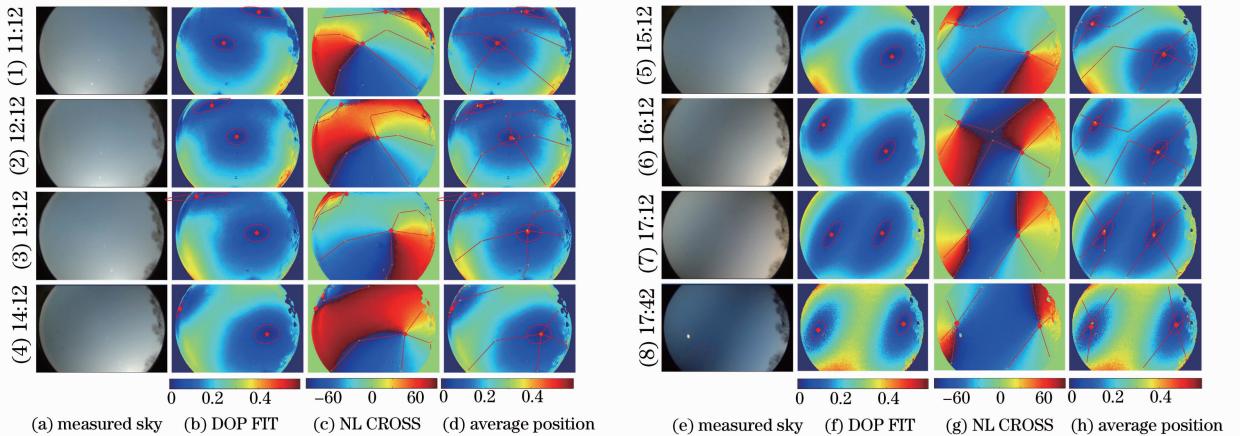


图 8 连续时间下的中性点识别

Fig. 8 Neutral points recognition under continuous time

对比不同方法在连续时间下观测误差的变化情况,中性点识别误差的变化曲线如图 9 所示。不同识别方法在黄昏时刻较正午时刻都具有较高的准确性,这是因为黄昏时大气的偏振特性较强,中性点特性较明显;而正午时刻大气的整体偏振特性较弱,中性点特性不明显。对比两种识别方法可得,中性线相交方法的算法性能较高,但中性线相交方法对正午太阳直射影响较为敏感,导致正午时分对位于近

太阳位置上的 Babinat 中性点识别误差升高;而在该时刻上,偏振度拟合方法由于通过椭圆拟合方法提高了算法的容错性能,故在正午时刻对 Babinat 中性点的识别性能更优。从图 9 中可以看出,通过将两种方法的检测结果进行平均后,算法的误差分布明显减小,提高了对中性点的识别性能。因此,综合利用两种方法能够进一步优化算法性能,提高对中性点的识别精度。



表 2 不同方法对中性点的识别

Table 2 Neutral points recognition by different methods

Observation time	Name of the neutral points	DOP FIT	NL CROSS	Average	Real position
(1) 11:12	Arago	(628.0,407.0)	(593.4,409.1)	(610.7,408.1)	(576,415)
	Babinat	(892.0,47.0)	(998.1,54.2)	(945.0,50.5)	(994,75)
(2) 12:12	Arago	(796.0,440.7)	(742.9,426.4)	(769.5,433.6)	(764,433)
	Babinat	(387.0,63.5)	(460.5,71.1)	(423.8,67.3)	(435,67)
(3) 13:12	Arago	(441.2,26.0)	(281.9,53.8)	(361.5,39.8)	(411,0)
	Babinat	(954.3,439.3)	(971.2,467.6)	(962.7,453.4)	(971,454)
(4) 14:12	Arago	(1113.0,566.0)	(1091.2,564.7)	(1091.2,564.7)	(1099,547)
	Babinat	(94.0,275.0)	(94.3,280.8)	(94.3,280.8)	(80,297)
(5) 15:12	Arago	(1075.7,538.0)	(1081.3,578.0)	(1078.5,558.0)	(1083,562)
	Babinat	(258.0,212.0)	(270.4,187.4)	(264.2,199.7)	(266,185)
(6) 16:12	Arago	(291.7,274.0)	(296.4,301.8)	(294.0,287.9)	(292,304)
	Babinat	(1013.0,617.0)	(1009.7,600.4)	(1011.3,608.7)	(1012,596)
(7) 17:12	Arago	(965.0,507.5)	(966.9,481.0)	(965.9,494.2)	(977,475)
	Babinat	(399.0,459.0)	(388.7,498.2)	(393.8,478.6)	(385,499)
(8) 17:42	Arago	(1211.0,489.0)	(1220.0,462.7)	(1215.5,475.9)	(1217,446)
	Babinat	(262.0,461.0)	(239.0,532.7)	(250.5,496.9)	(252,522)

表 3 中性点识别的误差统计

Table 3 Error statistics of the neutral points recognition

Statistical characteristic	DOP FIT	NL CROSS	Average
Mean value of absolute error	0.0265	0.0151	0.0153
Error variance / $10^{-4}$	1.98	4.53	1.19

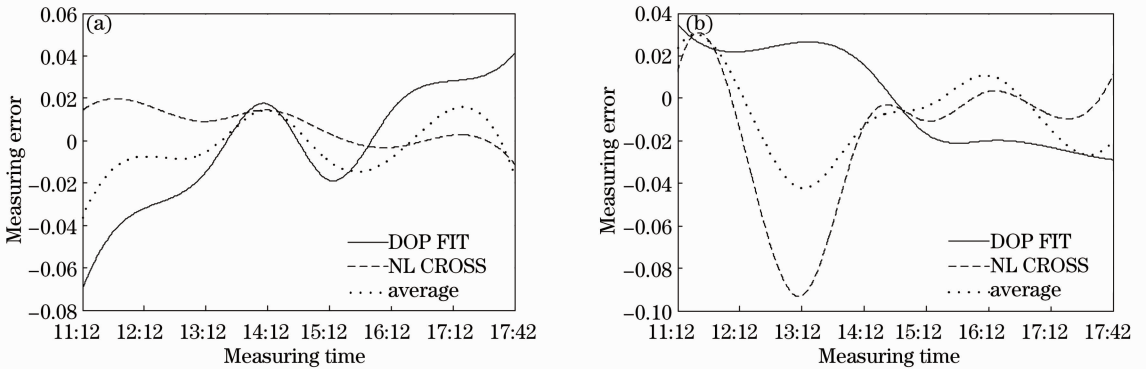


图 9 中性点识别的误差分布比较。(a) Arago 中性点测量误差；(b) Babinat 中性点测量误差

Fig. 9 Comparison of the neutral points recognition errors. (a) Comparison of the Arago neutral points recognition error; (b) comparison of the Babinat neutral points recognition error

## 5 结 论

中性点是大气偏振模式的重要特征之一,在偏振光导航、大气环境检测与预报、遥感探测等方面的研究中具有重要价值。通过分析中性点的分布特性,利用中性点在大气偏振模式中同偏振度分布与中性线分布特性间的关系,提出了两种对中性点识别的方法。通过在连续时间下对实际大气偏振模式中中性点进行检测和识别,对本文方法的方法进行了验证和分析。得出以下结论:

1) 基于大气偏振模式的全局特性检测,提出了两种中性点检测方法,这两种检测方法都可有效实现对中性点的检测与识别。

2) 通过对比两种识别方法发现,中性线相交方法具有较高的准确性,整体的性能较优;偏振度拟合方法具有较好的稳定性,特别是在正午时刻对中性点的识别性能优于中性线相交方法。综合运用两种识别方法可以提高中性点的检测与识别精度。

## 参 考 文 献

- 1 Jun Gao, Wang Lei, Bo Mei, *et al.*. Information acquisition in desert ant navigation [J]. *International Journal of Information Acquisition*, 2006, 3(1): 33–43.
- 2 K L Coulson. *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere* [M]. Hampton, VA: A. Deepak Pub, 1988. 269–329.
- 3 G Horvath, D Varju. *Polarized Light in Animal Vision: Polarization Patterns in Nature* [M]. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 131–176.
- 4 Zhang Ruijin, Xian Hao, Rao Changhui, *et al.*. Study on effect of polarization filter for suppressing sky background light in daytime [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0501003.  
张锐进, 鲜浩, 饶长辉, 等. 偏振滤波白天抑制天光背景作用分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0501003.
- 5 G Horvath, A Barta, I Pomozi, *et al.*. On the trail of Vikings with polarized skylight: experimental study of the atmospheric optical prerequisites allowing polarimetric navigation by Viking seafarers [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, 366(1565): 772–782.
- 6 J H Hannay. Polarization of sky light from a canopy atmosphere [J]. *New J Phys*, 2004, 6(1): 197.
- 7 J Gál, G Horváth, V B Meyer-Rochow, *et al.*. Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of the arctic circle [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, 457(2010): 1385–1399.
- 8 George W Kattawar, Gilbert N Plass, Stephen J Hitzfelder. Multiple scattered radiation emerging from Rayleigh and continental haze layers. 1: radiance, polarization, and neutral point [J]. *Appl Opt*, 1976, 15(3): 632–647.
- 9 Wang Wei, Chu Jinkui, Cui Yan, *et al.*. Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513001.  
王威, 褚金奎, 崔岩, 等. 基于矢量辐射传输的大气偏振建模[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513001.
- 10 Zhang Qianqian, Gao Jun, Xu Xiaohong, *et al.*. Analysis of multiple scattering polarization transmission properties [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1213001.  
张倩倩, 高隽, 徐小红, 等. 多粒子散射的偏振传输特性分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1213001.
- 11 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. System design and implementation of multi-angle polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002.  
郝增周, 龚芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101002.
- 12 Yang Shangqiang, Guan Guixia, Zhao Haimeng, *et al.*. Airborne validation of ground-object detection from polarized neutral-point atmosphere [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(9): 2525–2531.
- 杨尚强, 关桂霞, 赵海盟, 等. 基于大气中性点的地-气分离方法空基验证探究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(9): 2525–2531.
- 13 Tian Liu, Gao Jun, Fan Zhiguo, *et al.*. The method of the navigation direction angle acquisition based on the symmetry detection of the atmosphere polarization mode [J]. *Signal Processing*, 2011, 27(11): 1701–1705.  
田柳, 高隽, 范之国, 等. 基于大气偏振模式对称性检测的航向角获取方法[J]. *信号处理*, 2011, 27(11): 1701–1705.
- 14 Cun Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, *et al.*. System design and implementation of multi-angle polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828003.  
崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计与实现[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0828003.
- 15 Wang Haiyang, Pan Delu, Xia Deshen. A fast algorithm for two-dimensional Otsu adaptive threshold algorithm [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(9): 968–971.  
汪海洋, 潘德炉, 夏德深. 二维 Otsu 自适应阈值选取算法的快速实现[J]. *自动化学报*, 2007, 33(9): 968–971.
- 16 Guan Guixia, Yan Lei, Chen Jiabin, *et al.*. Analysising dynamic property of skylight polarization pattern graph [J]. *Computer Applications and Software*, 2009, 26(12): 179–181.  
关桂霞, 晏磊, 陈家斌, 等. 天空偏振模式图动态特性分析[J]. *计算机应用与软件*, 2009, 26(12): 179–181.
- 17 Yan Lei, Guan Guixia, Chen Jiabin, *et al.*. The bionic orientation mechanism in the skylight polarization pattern [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, (4): 616–620.  
晏磊, 关桂霞, 陈家斌, 等. 基于天空偏振光分布模式的仿生导航定向机理初探[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2009, (4): 616–620.
- 18 M V Berry, M R Dennis, R L Lee Jr. Polarization singularities in the clear sky [J]. *New J Phys*, 2004, 6(1): 162.
- 19 J T Adams, D J Gray. Neutral points in an atmosphere-ocean system. 2: downwelling light field [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(3): 335–346.
- 20 C. Bellver. Influence of particulate pollution on the positions of neutral points in the sky at Seville (Spain) [J]. *Atmospheric Environment*, 1987, 21(3): 699–702.
- 21 R J Schalkoff. *Digital Image Processing and Computer Vision* [M]. New York: Wiley, 1989. 155–121.
- 22 Yan Bei, Wang Bin, Li Yuan. Optimal ellipse fitting method based on least-square principle [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(3): 295–298.  
闫蓓, 王斌, 李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(3): 295–298.

栏目编辑: 王晓琰