

混浊大气对偏振导航影响的研究

欧雅文¹, 武鹏飞², 魏合理^{1,2}

(1. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230022;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 偏振导航的有效性在很大程度上依赖于能否从不同大气状况中获取到有效的全天空偏振分布信息。文中依据矢量辐射大气传输方程仿真分析了无云晴空和混浊大气状况下的全天空偏振度和偏振角分布特征, 并研究了大气混浊度、太阳方位、观测高度和观测波段对偏振分布的影响, 进而探讨了不同大气状况下偏振导航的有效性。结果表明: 太阳位置决定了全天空偏振分布图景的整体形式; 混浊大气对近地层观测偏振信息的影响明显, 当整层光学厚度增大至 2 以上时, 偏振度将降低至 0.1 以下, 此时偏振信息的检测难度增大, 不利于导航, 而以晴空为主的中高层大气受混浊大气影响较小, 偏振信息稳定, 且符合 Rayleigh 单次散射分布特征, 可保证白天全时段导航的有效性; 在无云大气下, 可见光波段内长波段更适合作为偏振导航的观测波段。

关键词: 大气偏振导航; 矢量辐射传输; 偏振分布; Rayleigh 散射

中图分类号: P413 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0311002

Influence of turbid atmosphere on polarization navigation

Ou Yawen¹, Wu Pengfei², Wei Heli^{1,2}

(1. Department of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The effectiveness of polarization navigation depends heavily on the ability to derive effective all-sky polarization distribution information from different atmospheric conditions. Based on the simulation of vectorial atmospheric transport equation, the properties of all-sky distribution of degree and angle of polarization under cloudless clear and turbid atmosphere were analyzed, and the effects of different atmospheric turbidity, solar orientation, observed altitude and observed band on the polarization distribution were studied, and then the effectiveness of polarization navigation under different atmospheric conditions was discussed. The results show that the solar orientation determines the overall pattern of the all-sky polarization information. The turbid atmosphere has obvious influence on the polarization information of the near ground. When the whole layer of the optical thickness increases to more than 2, the degree of polarization will be reduced to below 0.1, in this case, the detection of the polarization

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(11404344)

作者简介: 欧雅文(1993-), 女, 硕士生, 主要从事大气偏振导航方面的研究。Email: ouyawen@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 魏合理(1965-), 男, 教授, 主要从事红外辐射大气传输、红外辐射测量大气修正、云辐射特性方面的研究。

Email: hlwei@aiofm.ac.cn

通讯作者: 武鹏飞(1987-), 男, 副研究员, 主要从事辐射大气传输、天文导航方面的研究。Email: wupengfei@aiofm.ac.cn

information becomes more difficult, and not conducive to the navigation. While the middle and upper atmosphere dominated by clear skies are less affected by turbid atmosphere, the distribution of polarization information is stable and in accordance with the distribution of Rayleigh single scattering, which can ensure the effectiveness of navigation during the daytime. And the long waveband is more suitable as the observation band for polarization navigation within the limits of visible band under cloudless clear atmosphere.

Key words: atmospheric polarization navigation; vector radiative transfer; polarization distribution; Rayleigh scattering

0 引言

天空中由于大气分子和气溶胶粒子的存在,使得非偏振太阳光经大气散射后形成偏振光,且呈现一定的分布规律,蕴含偏振信息,称为大气偏振模式^[1],其空间分布特征包括对称性、中性点等。近年来,利用大气偏振信息进行导航的方法以其抗干扰、误差不累积等特性,逐渐成为自主导航和组合导航的研究热点。

利用大气偏振光导航源于仿生偏振导航,1949年, Frisch^[2]首次发现蜜蜂可以利用紫外波段的天空偏振光进行导航。1981年,以 Wehner^[3]为首的研究者以沙蚁为研究对象,从其形态、行为及生理学等方面系统地阐述了沙蚁利用太阳偏振光进行导航的机理。之后,仿生学家又陆续发现蝶类、蜘蛛等生物也可以利用天空偏振光导航。1999年, Labhort^[4]制备仿生偏振敏感神经元模型,验证了沙蚁等生物的偏振敏感机理。2000年, Lambrinos 等^[5]通过研究分析沙蚁的导航策略,成功地应用到机器人 Sahabot2 自主导航的实验上,且性能远高于机器人本体原有的传感器。2003年, Froy 等^[6]发现,北美帝王蝶在迁徙时利用紫外偏振光辅助太阳罗盘进行导航。2010年, Mayet 等^[7]对沙蚁利用天空偏振光导航的行为进行了实验研究,结果验证了该导航方式的可行性。国内的研究也在逐步开展,2007年,褚金奎等^[8]设计研制了基于偏振光的导航传感器的原理样机,并将其搭载于自主导航机器人 DGRBT 之上成功地进行了户外导航实验,得出利用偏振光进行定向导航是可行的。2007年,卢鸿谦等^[9]研究了利用偏振光、GPS、地磁和 SINS 组合导航,提出利用偏振光进行辅助定

姿的方法。2008年,高隽等^[10]研制出导航传感器的原理样机,之后又将该传感器搭载在轮式机器人平台之上,同时配备地磁传感器和 GPS 导航模块,进行了户外的组合导航实验。2009年,周军等^[11]提出在大气层外利用天空偏振光进行自主导航并对其做了理论研究,为确定航天器空间的姿态提供新思路且拓展了偏振导航的应用领域。2013年,赵开春等^[12]研制出自动旋转偏振片的检测设备,可获取大量、准确的天空偏振光信息,且大大减小了测量误差。2015年,程珍等^[13]通过自主搭建的由天空偏振角测量装置、OCTANS 惯导装置组成的实验平台,获取了实验平台的经纬度信息。

综上所述,基于大气散射光偏振导航的研究主要集中在近地面,其局限性在于当大气混浊度较大时,大气偏振信息会受到严重的影响,进而影响导航的有效性和精度。而晴空大气和中高层大气以大气分子 Rayleigh 单次散射为主,大气散射辐射偏振图景非常稳定,可保证偏振导航的有效性。文中以不同大气状况下全天空偏振分布特征及对导航有效性影响为研究对象,首先简述了大气偏振导航的研究现状,然后在无云状态下,详细分析了晴空大气、混浊大气状况下的全天空偏振信息的分布特征,以及大气混浊度、太阳方位、观测高度及观测波段对偏振信息的影响,进而探讨在不同大气状况下偏振导航的有效性。

1 不同大气状况偏振分布特征

1.1 晴空大气偏振分布特征

在极好的晴空或中高层大气中,大气散射以分子单次散射为主,自然光经过分子散射后形成偏振

光,其偏振特性相对简单,采用 Rayleigh 单次散射偏振模型可以很好地予以描述。Rayleigh 模型中大气偏振模式通过天球坐标进行表征,天球坐标是以地面观测点 O 为球心, r 为半径的半球面^[13]。在如图 1 所示的天球坐标中,太阳位置为 $S(\theta_s, \varphi_s)$, θ_s 和 φ_s 分别表示太阳天顶角和方位角,天空中任意一点 $P(\theta, \varphi)$ 处的线偏振度表示为:

$$LP(\theta, \varphi; \theta_s, \varphi_s) = \frac{\sin^2 \Theta}{1 + \cos \Theta} \quad (1)$$

式中: Θ 表示散射角,依据球面几何关系,可得:

$$\cos \Theta = \cos \theta \cos \theta_s + \sin \theta \sin \theta_s \cos(\varphi_s - \varphi) \quad (2)$$

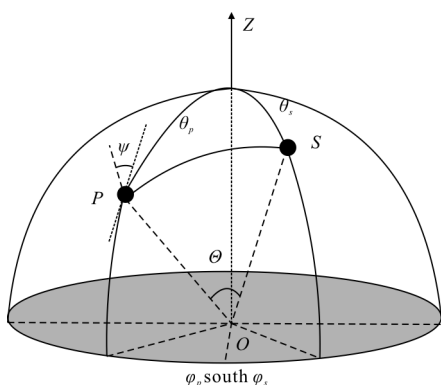


图 1 天球坐标几何示意图

Fig.1 Geometric schematic diagram of celestial coordinate

上述理论模型适用于均匀、各向同性的粒子,考虑到实际空气分子并非严格的各向同性,需要引进一个退偏振因子 δ ,此时线偏振度表示为:

$$LP(\theta, \varphi, \theta_s, \varphi_s) = \frac{\sin^2 \Theta}{\frac{1+\delta}{1-\delta} + \cos^2 \Theta} \quad (3)$$

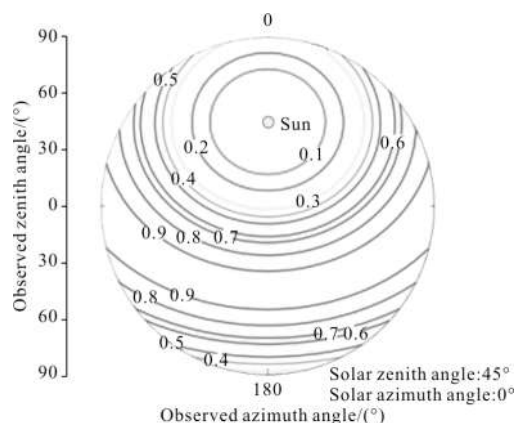
其中,退偏振因子对于不同的气体分子是不同的,通常取 δ 的值约为 0.031,此时在 90° 的散射角上,非偏振光的单散射射线偏振度不是 1,而是约等于 0.94,比较符合实际的情况。

依据偏振角 ψ 定义,即为 E -矢量振动方向与观测方向和天顶连线的夹角(如图 1 所示),结合球面几何关系可得偏振角计算表达式:

$$\psi(\theta, \varphi; \theta_s, \varphi_s) = \arctan \left[\frac{\sin \theta \cos \theta_s - \cos \theta \sin \theta_s \cos(\varphi_s - \varphi)}{\sin(\varphi_s - \varphi) \sin \theta_s} \right] \quad (4)$$

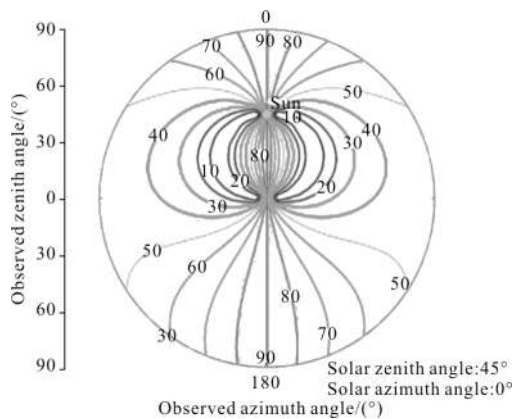
利用 Rayleigh 单次散射偏振模型(公式(3)和(4))可计算得到全天空任意观测方向的偏振信息,从而给出线偏振度与偏振角的全天空分布图景,如图 2

所示,其中取太阳天顶角为 45° ,方位角为 0° (定义正南为 0°)。从图 2 中可看到极好的晴空或中高层大气中全天空偏振分布特征:线偏振度关于太阳子午线与反太阳子午线对称,太阳中心附近区域线偏振度最小,而背向太阳区域线偏振度较大;偏振角同样关于太阳子午线与反太阳子午线呈现对称分布,偏振角越大,其分布逐渐向太阳子午线收缩,在对称线上有两个收缩点,分别在天顶处和太阳位置处,偏振角最大值出现在对称线上。



(a) 偏振度

(a) Degree of polarization



(b) 偏振角

(b) Angle of polarization

图 2 晴空下全天空偏振分布图

Fig.2 All-sky polarization distribution under clear sky

1.2 混浊大气偏振分布特征

实际大气一般为分子和气溶胶粒子同时存在的混浊大气,尤其是在 2~3 km 高度以下的近地面层,此时偏振信息不仅与散射角有关,还与大气混浊度、观测高度、观测波段等因素有关,为了保证偏振导航的有效性,有必要分析实际混浊大气条件下的偏振

分布特征。

实际大气的散射偏振已经不能用 Rayleigh 单次散射偏振模型表征, 虽然一些经验模型也反映了大气混浊度等因素对偏振度的影响^[14-15], 但目前计算散射偏振最准确的方式还是要依据矢量辐射大气传输方程。

对于平面平行层, 可见光到近红外波段, 大气热辐射可以忽略, 矢量辐射大气传输方程表示为^[16]:

$$\mu \frac{\partial I(\tau, \mu, \varphi)}{\partial \tau} = I(\tau, \mu, \varphi) - \frac{\omega}{4\pi} \int_{-1}^1 d\mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' P(\mu, \varphi; \mu', \varphi') I(\tau, \mu', \varphi') - \frac{\omega}{4\pi} P(\mu, \varphi; -\mu_0, \varphi_0) F_0 \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) \quad (5)$$

式中: τ 为大气光学厚度; ω 为单次散射反照率; $P(\mu, \varphi; \mu', \varphi')$ 为单次散射相矩阵; F_0 为大气层顶太阳辐照度; 矢量强度 $I = [I \ Q \ U \ V]^T$, 即为四个 Stokes 参数, 分别给出了光波的强度、偏振度、偏振面和椭圆率, 其中 T 代表转置算符。

针对球形粒子群, 散射相矩阵 P 可表示为:

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} P_{11}(\theta) & P_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ P_{12}(\theta) & P_{11}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}(\theta) & -P_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & P_{34}(\theta) & P_{33}(\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: θ 为散射角, 各元素表示为:

$$\begin{cases} P_{11}(\theta) = \frac{2\pi}{k^2 \beta_s} \int_{r_1}^{r_2} [i_1(\theta, r) + i_2(\theta, r)] n(r) dr \\ P_{12}(\theta) = \frac{2\pi}{k^2 \beta_s} \int_{r_1}^{r_2} [i_2(\theta, r) - i_1(\theta, r)] n(r) dr \\ P_{33}(\theta) = \frac{2\pi}{k^2 \beta_s} \int_{r_1}^{r_2} [i_3(\theta, r) + i_4(\theta, r)] n(r) dr \\ P_{34}(\theta) = -\frac{2\pi i}{k^2 \beta_s} \int_{r_1}^{r_2} [i_4(\theta, r) - i_3(\theta, r)] n(r) dr \end{cases} \quad (7)$$

式中: $n(r)$ 为粒径谱分布, $i_1 = S_1 S_1^*$, $i_2 = S_2 S_2^*$, $i_3 = S_2 S_2^*$, $i_4 = S_1 S_2^*$, S_1 和 S_2 为 Mie 散射理论中定义的散射函数^[17], 是散射角、粒子尺度参数和复折射率的函数。

大气中气溶胶的成分、浓度和粒径谱分布随时间、地点和高度而变, 在辐射传输计算中, 通常采用气溶胶模式来描述。气溶胶模式确定了气溶胶粒子

的粒径谱分布和复折射率, 可利用 Mie 散射理论计算气溶胶的散射相矩阵, 进而依据矢量辐射传输方程得到表征偏振信息的 Stokes 矢量。文中采用乡村型气溶胶模式进行大气散射背景的偏振信息分析。

对于矢量辐射传输方程, 笔者采用倍加累加法进行数值求解^[18], 基本思路是: 假设已知两个介质层的反射和透射性质, 则可通过计算两层之间的连续反射过程得到组合层的反射和透射性质。因此可将大气划分为多个离散薄层, 通过计算其组合获得反射和透射性质。

首先将散射相矩阵利用 Fourier 变换对方位角展开^[19], 表示为:

$$\pm \mu_l \frac{\partial I^{(m)}(\tau, \pm \mu_l; \mu_0)}{\partial \tau} = -I^{(m)}(\tau, \pm \mu_l; \mu_0) + \omega \sum_{j=1}^N w_j [P^{(m)}(\pm \mu_l; \mu_j) I^{(m)}(\tau, \mu_j; \mu_0) + P^{(m)}(\pm \mu_l; -\mu_j) I^{(m)}(\tau, -\mu_j; \mu_0)] + S_{S+}^{(m)}(\pm \mu_l; \mu_0) \exp(-\tau/\mu_0) + S_{S-}^{(m)}(\pm \mu_l; \mu_0) \exp[-(2\tau_a - \tau)/\mu_0] \quad (8)$$

式中: $\pm \mu_l$ 和 w_j 为高斯积分的积分点和权重; S_{S+} 和 S_{S-} 为单次散射源函数; τ_a 为整层大气光学厚度, “+” 和 “-” 表示从下入射和从上入射, 进而利用离散坐标法求解每层大气的反射和透射特性。

根据每层大气的反射矩阵 R 、透射矩阵 T 以及源函数 ε , 利用矩阵算法, 当已知相邻层 1 和层 2 的散射特性, 可得到结合层向下的辐射特性:

$$\begin{cases} R_{1+2}^+ = R_1^+ + T_1^{-1} (1 - R_2^+ R_1^-)^{-1} R_2^+ T_1^+ \\ T_{1+2}^+ = T_2^+ (1 - R_1^- R_2^+)^{-1} T_1^+ \\ \varepsilon_{1+2}^+ = \varepsilon_2^+ + T_2^+ (1 - R_1^- R_2^+)^{-1} (R_1^- \varepsilon_2^- + \varepsilon_1^+) \end{cases} \quad (9)$$

结合层向上的辐射特性:

$$\begin{cases} R_{1+2}^- = R_2^- + T_2^+ (1 - R_1^- R_2^+)^{-1} R_1^- T_2^- \\ T_{1+2}^- = T_1^- (1 - R_2^+ R_1^-)^{-1} T_2^- \\ \varepsilon_{1+2}^- = \varepsilon_1^- + T_1^- (1 - R_2^+ R_1^-)^{-1} (R_2^+ \varepsilon_1^+ + \varepsilon_2^-) \end{cases} \quad (10)$$

利用上述公式(9)和(10)进而可得结合层的 Stokes 矢量^[20]:

$$\begin{cases} I^+ = (1 - R_1^- R_2^+)^{-1} (R_1^- \varepsilon_2^- + \varepsilon_1^+) \\ I^- = R_2^+ I^+ + \varepsilon_2^- \end{cases} \quad (11)$$

得到 Stokes 矢量后,可求得大气散射偏振度和偏振角:

$$Dop = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (12)$$

$$Aop = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (13)$$

利用上述散射偏振计算方法,可仿真分析实际混浊大气的全天空偏振分布特征及各项因素的影响,进而探讨不同条件下偏振导航的有效性,仿真中考虑了无云状态下的中纬度夏季大气条件。

(1) 不同太阳方位下的偏振分布特征

图 3 给出不同太阳方位条件下,大气偏振度和偏振角的全天空分布图。其中,太阳天顶角分别取 45°、90°,方位角为 0°,观测高度为 0 km(地面),整层大气光学厚度(指大气分子和气溶胶粒子混合的光学厚度)取 0.2,观测波长为 550 nm。

从图 3 中可以看出,不同的太阳位置呈现不同的全天空偏振度和偏振角分布。从图 3(a)和(b)中可具体看到,偏振度在太阳附近较小,在上述仿真条件下均小于 0.1,而在背向太阳呈 90° 散射角附近偏

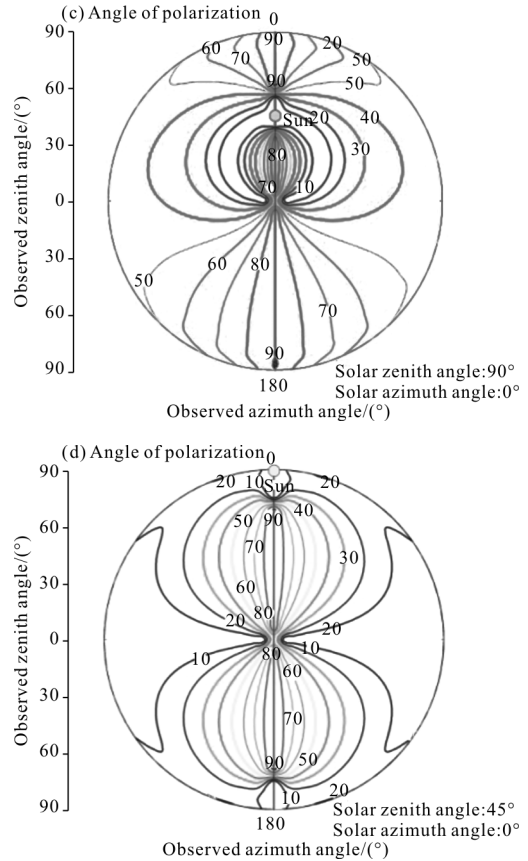
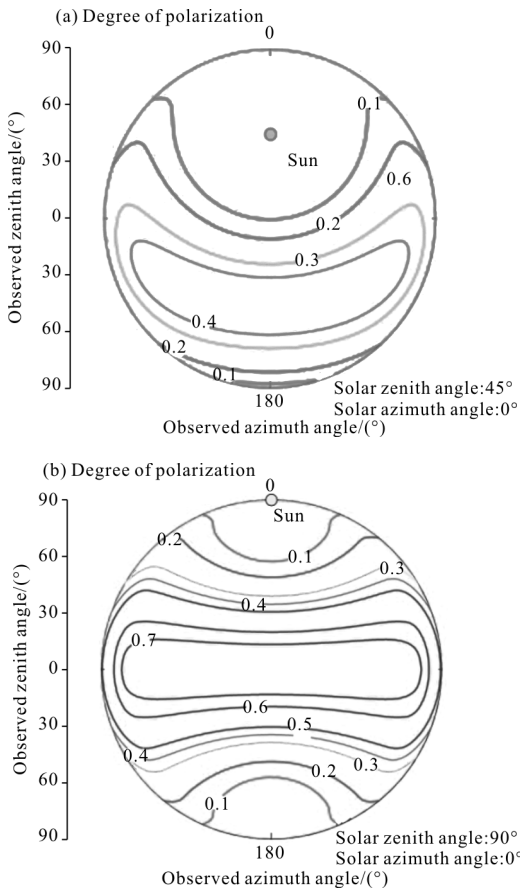
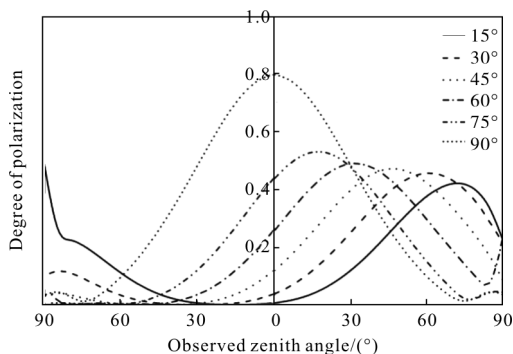


图 3 不同太阳位置下全天空偏振分布图

Fig.3 All-sky polarization distribution under different solar orientation

振度较大,且整体偏振度随着太阳天顶角的增大而增大;图 4 为不同太阳位置下,太阳子午线与反太阳子午线上大气偏振度随观测天顶角的变化趋势,从图 4 中可以看到偏振度最小值分别出现在太阳天顶角 15°、30°、45°、60°、75°、90°附近,峰值分别在背向太阳方向观测天顶角 75°、60°、45°、30°、15°、0°附近,即对称线上的偏振度在太阳附近几乎为零,与太阳呈 90° 散射角附近最大,随着太阳天顶角逐渐减小(趋近天顶),偏振度最大值逐渐向地平方向移动;从图 3(d)中可具体看出,当太阳天顶角较大时(趋近地平),偏振角分布在太阳附近、背向太阳附近的对称位置和天顶处出现三个收缩点。随着太阳天顶角减小(趋近天顶),如图 3(c)所示,太阳附近的偏振角曲率增大,逐渐向太阳子午线收缩,且在太阳附近与天顶处出现三个收缩点,而背向太阳方向的收缩点逐渐消失,与 Rayleigh 单次散射模型偏振分布有差异的地方在于太阳附近出现两个收缩

点,这主要是由于实际大气中多次散射的影响,以太阳为中心的区域大气偏振效应消失,出现两个中性点。



(a) 太阳子午线 (b) 反太阳子午线
(a) Solar meridian (b) Anti solar meridian
图 4 对称线上大气偏振度随观测天顶角的变化

Fig.4 Relationship between degree of polarization and observed zenith at symmetry line

综上所述,全天空偏振分布与太阳位置密切相关,太阳附近偏振效应减弱甚至消失,太阳位置决定了全天空偏振分布图景的整体形式。

(2) 不同观测高度下的偏振分布特征

图 5 给出观测高度分别为 0 km(地面)、20 km (中层大气)处,大气偏振度和偏振角的全天空分布图。其中,太阳天顶角为 45°,方位角为 0°,整层大气光学厚度为 0.2,观测波长为 550 nm。

从图 5(a)和(b)中可以看到,在整层光学厚度为 0.2 时,不同观测高度处的大气偏振度差异较大,且随着高度的升高偏振度整体增大;图 6 为背向太阳方向的大气偏振度随观测高度的变化趋势,从图中可以看出偏振度随高度的升高呈快速上升至趋于平缓,上述仿真条件下在 10 km 高度内偏振度从

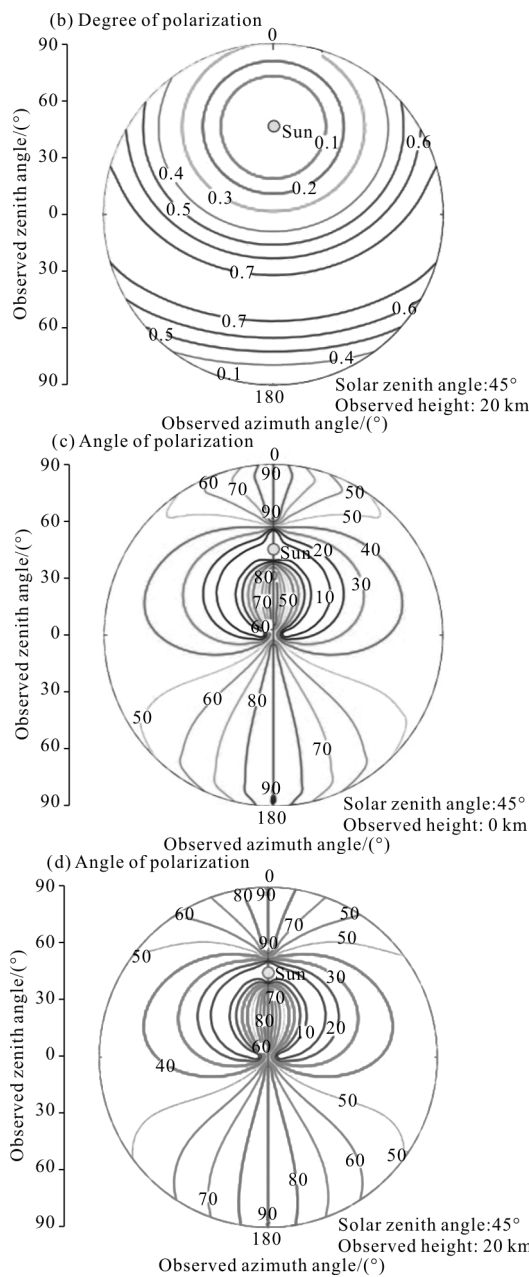
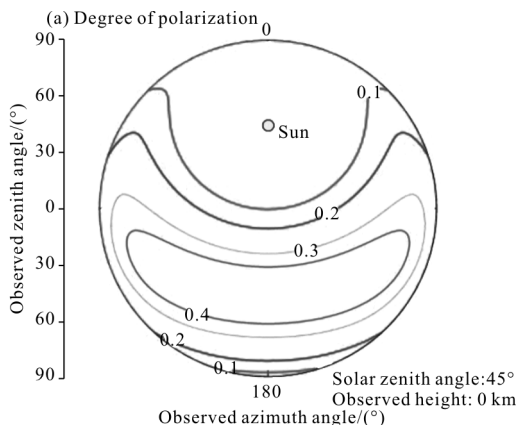


图 5 不同观测高度下全天空偏振分布图

Fig.5 All-sky polarization distribution under different observed heights

0.47 变化至 0.73 左右,而 20 km 高度以上偏振度变化范围在 0.02 以内;从图 5(c)和(d)中可看出,偏振角随观测高度的升高差异不大,主要区别在于收缩点的位置不同,且随高度的增大收缩点距离减小。总体来看,中高层大气偏振度与偏振角的分布规律与 Rayleigh 单次散射偏振模型较为一致,这主要是因为对于平流层以上的中高层大气,天气晴朗无云,气溶胶粒子较少,气体分子占主要成分,大气以



Rayleigh 散射为主, 大气散射偏振信息很稳定。

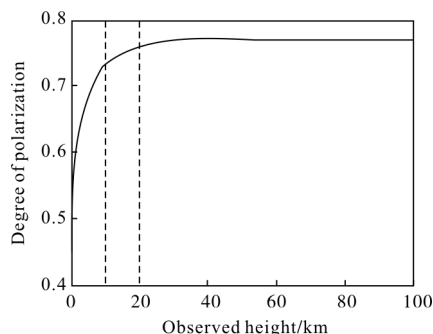


图 6 大气偏振度随观测高度的变化

Fig.6 Relationship between degree of polarization and observed height

综上所述, 全天空偏振度分布与观测高度密切相关, 高度越低, 偏振度随高度变化越明显, 而 20 km 以上高度偏振度相对稳定; 虽然全天空偏振分布图景的整体形式不会出现较大改变, 但是偏振度量值变化明显, 偏振角收缩点位置也会稍有变化, 这是由随高度递减的大气介质决定的。此外, 大气偏振度的降低表现在偏振测量系统在不同检偏方向获得的强度差异减小, 从而造成利用 Stokes 参量获得偏振角的稳定性降低, 容易受到系统噪声等的干扰, 使得导航有效性降低。

(3) 大气混浊度对偏振分布的影响

整层大气光学厚度可以用来表征地面至大气层顶的大气混浊度, 一般情况下, 当整层光学厚度较小时, 可反映气溶胶粒子较少的晴朗天空; 当光学厚度较大时, 表示气溶胶粒子较多, 大气散射以 Mie 散射为主。图 7 给出不同大气状况下的大气偏振度和偏振角的全天空分布图, 其中整层大气光学厚度分别为 0.2、2, 太阳天顶角为 45° , 方位角为 0° , 观测高度为 0 km (地面), 观测波长为 550 nm。

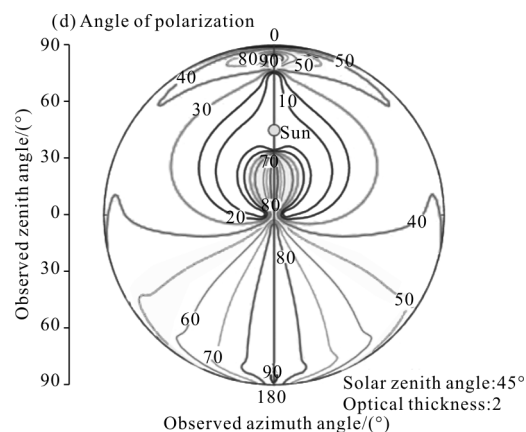
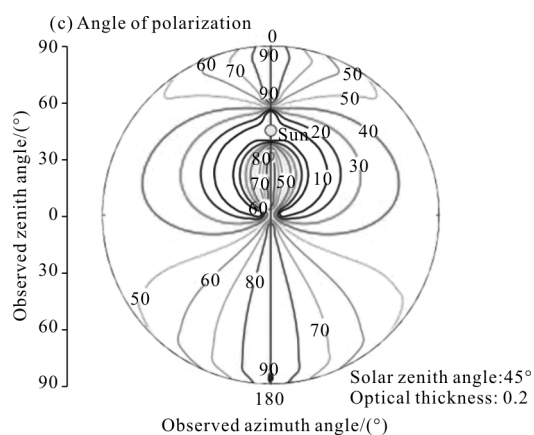
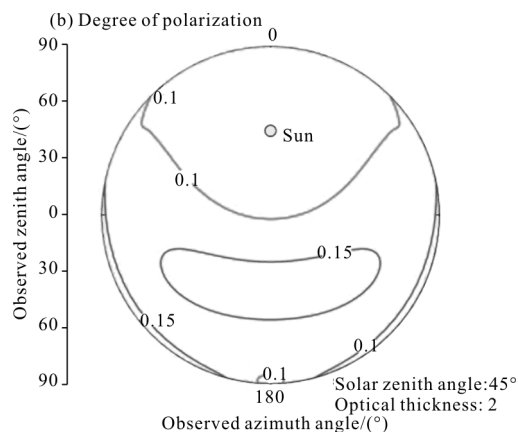
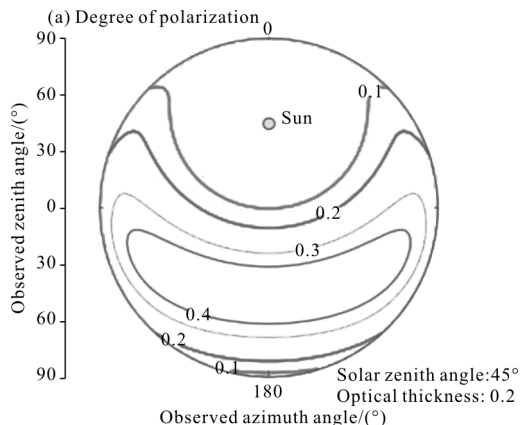


图 7 不同大气状况下全天空偏振分布图

Fig.7 All-sky polarization distribution under different atmospheric conditions

从图 7(a)和(b)中可以看到, 当整层大气光学厚度较小时, 全天空偏振度较大, 随着光学厚度的增大, 偏振度逐渐减小, 对于气溶胶粒子较多的混浊大气, 在上述仿真条件下全天空偏振度整体平均值为 0.06。图 8 为背向太阳方向的大气偏振度随整层大气光学厚度的变化趋势, 从中可看到 0 km (地面) 处的偏振度随整层光学厚度的增大快速减小至 0.05

附近,而 20 km 处的偏振度小幅度降低,且随整层光学厚度的增大仍保持在 0.6 以上;从图 7(c)和(d)中可看到,不同大气混浊度下的偏振角整体分布规律有一定的变化,在太阳附近两个收缩点位置处差异较大,且随大气混浊度的增大,两个收缩点的距离逐渐增大。

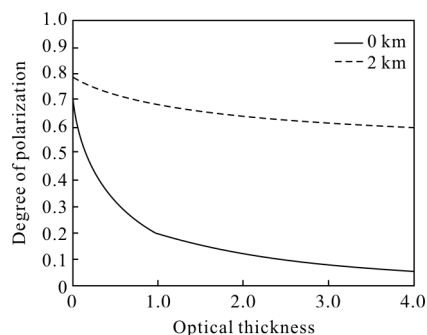


图 8 不同观测高度下偏振度随大气混浊度的变化

Fig.8 Relationship between degree of polarization and atmospheric turbidity under different observed heights

综上所述,大气混浊度会对近地层观测时的全天空偏振分布产生较大影响,表现在随光学厚度增大,偏振度降低和偏振角分布的变化,在上述仿真条件下,当整层光学厚度大于 2 时,偏振度降低至 0.1 以下,此时利用偏振度在近地面处进行导航会造成偏振检测系统很难检测到有效的偏振度信息,而偏振角信息虽维持了整体分布特征,但仍然可能因为系统获得的不同检偏方向强度差异的减小而造成偏振角分布的稳定性降低,增大导航误差,具有一定局限性,而大气混浊度对中高层观测时的影响相对要小得多,比如在 20 km 高度偏振度均在 0.6 以上,偏振信息稳定,可保证导航的有效性。

(4) 波段对偏振分布的影响

大气中的分子和气溶胶粒子对不同波段的光的吸收和散射作用不同,从而造成不同波段散射偏振特性存在差异。图 9 给出不同观测高度下背向太阳方向的大气偏振度随观测波长的变化趋势,图 10 给出 0 km 高度(地面)下观测波长分别为 450、550、650 nm 时太阳子午线与反太阳子午线上偏振角随观测天顶角的变化趋势。其中,太阳天顶角为 45°,方位角为 0°,整层大气光学厚度为 0.2。

从图 9 可以看出偏振度随着观测波长的增大而增大,中高层大气(20、30 km)的偏振度明显大于近

地面(0 km、2 km)的偏振度,并且 350~1 000 nm 波段范围内近地面偏振度变化范围小于 0.2,而中高层大气小于 0.15,因此近地面处变化幅度要更大。

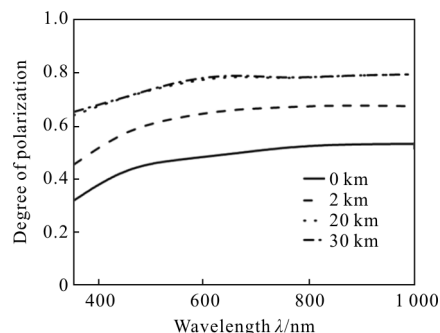
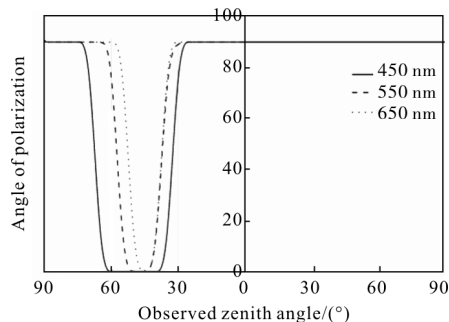


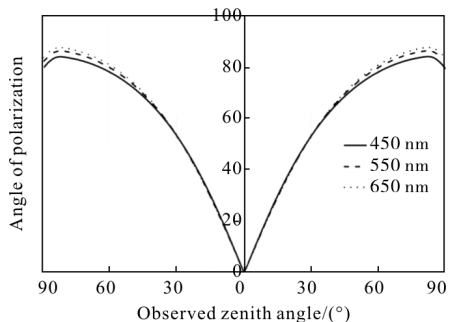
图 9 不同观测高度下背向太阳方向大气偏振度随观测波段的变化

Fig.9 Relationship between degree of polarization of back to the sun and observed band under different observed heights



(a) 太阳子午线与反太阳子午线

(a) Solar meridian and anti solar meridian



(b) 太阳子午线与反太阳子午线的垂直线

(b) Vertical line of the solar meridian and anti solar meridian

图 10 大气偏振角随观测天顶角的变化

Fig.10 Relationship between angle of polarization and observed zenith

从图 10(a)中可以看出,可见光波段内波长越长,偏振角在太阳子午线上的两个收缩点距离逐渐变短,且均逐渐靠近太阳位置处(天顶角为 45°),更符合 Rayleigh 散射下的分布;其他观测方向上,如

图 10(b), 偏振角随观测波长增大而小幅度增加。

综上所述, 在上述仿真条件下, 观测波段对全天空偏振度和偏振角都存在影响, 表现在随观测波长的增大偏振度增大和偏振角分布的变化。从仿真结果可初步得到无云条件下, 可见光波段内长波段更适合作为大气偏振导航的观测波段。

2 结论

文中利用矢量辐射大气传输方程进行仿真模拟计算, 详细分析了不同条件下的全天空偏振信息的分布特征, 得到以下结论:

(1) 全天空偏振度和偏振角分布随着太阳位置的变化而变化, 太阳位置决定了全天空偏振度和偏振角分布的整体形式, 太阳附近的偏振度几乎为 0, 背向太阳呈 90° 散射角附近偏振度最大, 因此, 无论在晴空还是混浊大气中, 利用背向太阳方向的偏振信息提取对称线等特征可较好地保证导航的有效性, 而当正对太阳观测时, 导航将面临失效的风险; 此外, 太阳在近地平时的全天空偏振度整体要比太阳在天顶时大, 因此, 在早、晚时刻进行导航要优于中午。

(2) 随着观测高度的增大, 全天空偏振度随之增大, 且偏振度与偏振角逐渐趋于 Rayleigh 单次散射分布。近地层观测时, 其本身整层光学厚度就要比高处观测大, 并且经常会遇到雾霾等大气状况, 大气混浊度会对全天空偏振分布产生较大影响, 当整层光学厚度增大至 2 以上时, 偏振度将降低至 0.1 以下, 此时利用偏振度信息在近地面处进行导航会造成偏振检测系统很难检测到有效的偏振度信息, 增大导航误差。而偏振角信息虽维持了整体分布特征, 但仍然可能因为系统获得的不同检偏方向强度差异减小, 造成利用 Stokes 参量获得偏振角的稳定性降低, 容易受到系统噪声等的干扰, 具有较大局限性; 中高层大气以晴空为主, 受混浊大气影响较小, 随着整层光学厚度的增大, 偏振度仍大于 0.6, 当整层光学厚度为 0.2 时, 中高层大气的偏振度均大于 0.75, 且变化范围在 0.02 以内, 偏振信息稳定, 可保证白天全时段导航的有效性。因此, 近地层大气偏振导航的应用时段受到大气状况的限制, 而具有高有效性、白天全时段性的中高层大气偏振导航将是今后值得

拓展的应用方向。

(3) 在无云条件下, 大气散射偏振度和偏振角都随着波长的增大而增大, 因此, 无论在晴空还是混浊大气下, 可见光波段范围内利用全天空偏振信息进行导航选择长波段作为观测波段都要优于短波段。

文中通过仿真模拟分析了无云状态下混浊大气对偏振导航的影响, 而实际大气中还容易出现云等天气情况, 云层的光学厚度较大, 一般大于 1, 对天空散射光有明显的退偏作用, 因此, 云对大气偏振特性和导航精度的影响是非常重要的, 也是后续研究工作的重要组成部分。

参考文献:

- [1] Coulson K L. Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere[M]. Hampton: A Deepak Pub, 1988.
- [2] Von Frisch K. Die polarisation des himmelslichtes als orientierender faktor bei den tänzen der bienen [J]. *Experientia*, 1949, 5(4): 142-148.
- [3] Wehner R, Srinivasan M V. Searching behaviour of desert ants, genus *cataglyphis* (formicidae, hymenoptera) [J]. *Journal of Comparative Physiology*, 1981, 142: 315-338.
- [4] Labhart T. How polarization-sensitive interneurons of crickets see the polarization pattern of the sky: A field study with an opto-electronic model neurone [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1999, 202(7): 757-770.
- [5] Lambrinos D, Möller R, Labhart T, et al. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30(1): 39-64.
- [6] Froy O, Gotter A L, Casselman A L, et al. Illuminating the circadian clock in monarch butterfly migration [J]. *Science*, 2003, 300(5623): 1303-1305.
- [7] Mayet R, Roberz J, Schmickl T, et al. Antbots: A Feasible Visual Emulation of Pheromone Trails for Swarm Robots [M]. Heidelberg: Springer, 2010: 84-94.
- [8] Chu Jinkui, Chen Wenjing, Wang Hongqing, et al. Mobile robot navigation tests with polarization sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2419-2426. (in Chinese)
褚金奎, 陈文静, 王洪青, 等. 基于偏振光传感器的移动机器人导航实验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2419-2426.
- [9] Lu Hongqian, Yin Hang, Huang Xianlin. Polarized-light/geomagnetism/GPS/SINS integrated navigation [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 897-902. (in Chinese)

- 卢鸿谦,尹航,黄显林. 偏振光/地磁/GPS/SINS 组合导航方法[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 897-902.
- [10] Fan Zhiguo, Gao Jun. Investigation of atmospheric polarization information measurement method imitating POL-neurons of cataglyphis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(4): 745-749. (in Chinese)
范之国, 高隽. 仿沙蚁 POL-神经元的偏振信息检测方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 745-749.
- [11] Zhou Jun, Liu Yingying. Research progress of polarized skylight navigation[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2): 409-414. (in Chinese)
周军, 刘莹莹. 基于自然偏振光的自主导航新方法研究进展[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 409-414.
- [12] Zhao Kaichun, Lu Hao, You Zheng. Automatic detection system for skylight polarized pattern [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 239-245. (in Chinese)
赵开春, 卢皓, 尤政. 天空光偏振模式自动探测装置[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 239-245.
- [13] Cheng Zhen, Mei Tao, Liang Huawei, et al. Analysis and implementation of the skylight polarization autonomous positioning method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(6): 33-38. (in Chinese)
程珍, 梅涛, 梁华为, 等. 一种偏振光自定位方法的分析及实现[J]. 光电工程, 2015, 42(6): 33-38.
- [14] Preetham A J, Shirley P, Smits B. A practical analytic model for daylight [C]//Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. 1999: 91-100.
- [15] Wilkie A, Robert F T, Ulbricht C, et al. An analytical model for skylight polarization [C]//Eurographics Symposium on Rendering, 2004.
- [16] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres[J]. *Space Science Reviews*, 1974, 16(4): 527-610.
- [17] Liao Guonan. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. 2nd ed. Beijing: Meteorology Publishing House, 2004: 181-201. (in Chinese)
廖国男. 大气辐射导论 [M]. 第2版. 北京: 气象出版社, 2004: 181-201.
- [18] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1991, 46(5): 413-423.
- [19] Hulst H C V D. Multiple Light Scattering: Tables, Formulas and Applications[M]. New York: Academic Press, 1980.
- [20] Nakajima T, Tanaka M. Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1986, 35(1): 13-21.