

## 近地面水平方向大气偏振辐射传输仿真与验证

提汝芳<sup>1,2</sup>, 孙晓兵<sup>1</sup>, 李 树<sup>1</sup>, 陈震霆<sup>1</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 近地面水平方向偏振成像是地基目标观测的有效手段之一。目标偏振信息在大气传输中受到大气气溶胶及分子等散射和吸收作用的影响, 叠加了非目标偏振信息, 干扰了目标本身偏振特性参数的提取。因此, 对大气的偏振影响研究具有重要意义。针对近地面水平方向偏振观测, 基于单次散射假设, 仿真计算了不同气溶胶光学厚度条件下的大气偏振辐射传输特性, 并开展了外场偏振特性传输实验验证。仿真结果表明, 地表贡献可以忽略; 随着气溶胶光学厚度的增大, 大气对总偏振反射的贡献越大; 针对外场实验, 仿真计算了不同时序同等观测条件下的线偏振度值, 与实测结果相对误差在 $\pm 0.1$  范围内, 一致性很好。研究结果为近地面偏振特性传输研究提供了理论支持, 并为近地面偏振观测中的大气校正奠定了基础。

**关键词:** 近地面; 水平方向; 遥感; 偏振

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1111001

## Simulation and validation of atmospheric polarized radiative transfer in horizon orientation near ground

Ti Rufang<sup>1,2</sup>, Sun Xiaobing<sup>1</sup>, Li Shu<sup>1</sup>, Chen Zhenting<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Polarized imaging in horizontal direction is an effective method to observe targets at ground. Due to the scattering and absorbing effects of aerosol and molecule in the atmospheric transfer path, the target polarized information composites other polarized information, which would limit the characteristics extraction of targets. It is very important to study the effects of atmospheric polarization. For the problem of polarized observation in horizontal near ground, the atmospheric transfer properties under different aerosol optical depth were simulated based on the single scattering hypothesis. And the experiment on atmospheric polarized properties transfer was performed outdoor. The result of simulation indicates that the contribution of surfaces could be ignored; the contribution of atmosphere to total polarized reflectance increases with the increase of the aerosol optical depth. The value of degree of line polarization which was simulated under the same observing conditions with the experiment outdoor at

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国防 973 计划(61322502); 国防科工高分专项(32-Y20A22-9001)

作者简介: 提汝芳(1986-), 女, 博士生, 主要从事偏振遥感方面的研究。Email: tirufang@163.com

导师简介: 孙晓兵(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事偏振遥感方面的研究。Email: xbsun@aiofm.ac.cn

different time, was consistent with the experiment, and the relative error was in the range  $\pm 0.1$ . The basic theory of investigation on both polarized radiative transfer and atmospheric correction near ground was proposed.

**Key words:** near ground; horizontal; remote sensing; polarization

## 0 引言

偏振遥感探测是近年来比较热门的遥感技术,在国际上已经成为一个快速发展的研究领域。偏振探测可以获取目标除光谱光强参数之外如偏振强度、偏振度、偏振角等特征参数,增加了被测目标的信息维度,具有提升目标探测与识别能力的潜力。对地的偏振观测可用于云、气溶胶的探测等领域,目前航天、航空对地偏振观测方面的研究比较热门,国际上法国 POLDER 仪器是第一个用于全球偏振观测的星载偏振相机<sup>[1]</sup>,国内安徽光学精密机械研究所自行研发了多角度偏振成像仪(DPC)和多角度偏振辐射计(AMPR)<sup>[2]</sup>,并开展了航空实验研究。对地观测的偏振辐射传输算法比较成熟,目前比较常用的方法有逐次散射近似法<sup>[3]</sup>、倍加累加法<sup>[4]</sup>、离散纵坐标法<sup>[5]</sup>等。近地面水平方向的偏振观测可用于道路交通、航运、机场瞭望、目标探测等<sup>[6]</sup>领域。目前对近地面水平的偏振特性传输理论研究较少,冯斌<sup>[7]</sup>模拟了近水平方向观测条件下大气背景光的偏振度,武鹏飞等<sup>[8]</sup>对近地面水平方向天空散射光的偏振方向进行了研究。

在对目标进行偏振遥感探测时,由于大气中气溶胶和大气分子等大气成分的影响,探测器获取的信息会带有非目标的偏振信息,干扰了目标偏振特征的提取<sup>[9]</sup>,因此对大气的偏振特性传输研究至关重要。但是在近地面偏振观测中,由于环境非常复杂,边界条件较多,构建辐射传输方程及求解难度更大。

基于辐射传输原理,在单次散射近似假设下,仿真计算并分析了不同气溶胶光学厚度条件下近地面水平方向大气偏振辐射传输特性,开展了外场偏振特性传输实验验证,为进一步研究近地面水平方向偏振特性传输及大气影响扣除奠定了基础。

## 1 近地面水平方向偏振特性传输基本理论

通常用二向反射矩阵  $\gamma$  来描述物体表面的方向性矢量反射特征<sup>[10]</sup>,表示入射辐射与反射辐射之间的关系:

$$I = \frac{1}{\pi} \cdot \gamma(\lambda, \mu_s, \mu_v, \phi) I_0(\lambda) \mu_s \quad (1)$$

式中:  $I_0 = [I, Q, U, V]^T$  为入射 Stokes 参量,  $I = [I, Q, U, V]$ ,  $T$  是反射 Stokes 参量,一般情况下  $V$  分量非常小,不予考虑;  $\mu_s$ 、 $\mu_v$  分别为太阳天顶角和观测天顶角的余弦,  $\phi = \phi_v - \phi_s$ ,  $\phi_v$ 、 $\phi_s$  表示太阳和观测方位角。

观测到的反射率和偏振反射率归一化后可以表示为:

$$R = \frac{\pi I}{\mu_s S_0} \quad (2)$$

$$Rp = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{\mu_s S_0} \quad (3)$$

式中:  $S_0$  为与波段对应的大气顶的太阳辐照度。

假设大气是平面平行分层并且水平方向大气光学特性是均一的,近地面水平方向的偏振观测中,最终进入偏振传感器的信息是经过大气散射和吸收作用影响的目标偏振信息,包含经目标反射和未经目标反射的两部分偏振辐射信息,如图 1 所示。

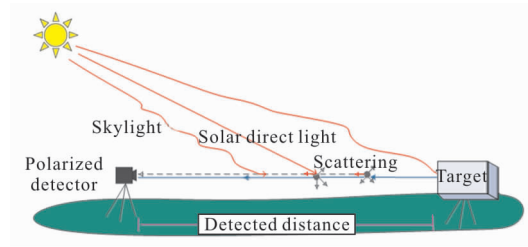


图 1 近地面水平方向偏振观测示意图

Fig.1 Diagram of polarized observing horizontal near ground

太阳直射光、太阳漫射光到达目标表面后被反射,携带目标特征的偏振反射辐射沿目标—探测器路径传输,经传输路径上的大气散射和吸收作用后到达探测器,可依次表达为以下两式,下标 dir 表示

太阳直射光,下标diff表示天空漫射光,上标obj表示经目标反射。

$$I_{\text{dir}}^{\text{obj}} = T_{\lambda,1}(\mu_s) \frac{\gamma(\lambda, \mu_s, \mu_v=0, \varphi_s, \varphi_v)}{\pi} \cdot S_{\text{dir},\lambda} \cdot \mu_s \cdot T_{\lambda,2} \quad (4)$$

$$I_{\text{diff}}^{\text{obj}} = \int_0^{\pi} \int_0^1 \frac{\gamma(\lambda, \mu', \varphi', \mu=0, \varphi_v)}{\pi} \cdot I_{\text{diff},\lambda} \cdot (-\mu', \varphi') \mu' d\mu' d\varphi' \cdot T_{\lambda,2} \quad (5)$$

太阳直射光、天空漫射光、地表反射光经目标—探测器传输路径上的大气散射和吸收作用后到达探测器,依次表达为公式(6)~(8)。

$$I_{\text{dir}}^{\text{atm}} = \int_0^{\tau} T_{\lambda,1}(\mu_s) \cdot S_{\text{dir},\lambda} \cdot \omega(\lambda) \cdot \frac{P(\mu_s, \varphi_s, \mu_v=0, \varphi_v)}{\pi} \cdot e^{-\tau} d\tau' \quad (6)$$

$$I_{\text{diff}}^{\text{atm}} = \int_0^{\tau} \omega(\lambda) \int_0^{\pi} \int_0^1 I_{\text{diff},\lambda} \cdot (\tau_v, \mu', \varphi') \cdot \frac{P(\mu', \varphi', \mu_v=0, \varphi_v)}{4\pi} \cdot d\mu' d\varphi' \cdot e^{-\tau} d\tau' \quad (7)$$

$$I_{\text{surf}}^{\text{atm}} = \int_0^{\tau} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} T_{\lambda,1}(\mu_s) \frac{\gamma_s(\lambda, \mu_s, \mu_v, \varphi_s, \varphi_v)}{\pi} S_{\text{dir},\lambda} \cdot \omega(\lambda) \cdot \frac{P(\mu', \varphi', \mu_v=0, \varphi_v)}{4\pi} \cdot e^{-\tau} d\varphi_v' d\theta_v' d\tau' \quad (8)$$

式中:atm表示经大气气溶胶和大气分子散射和吸收作用;surf为地表反射光; $P$ 为大气散射矩阵,由大气单次散射相矩阵 $P'$ 经过参考平面转换后得到,单次散射相矩阵可由MIE散射理论计算得到。

$$P'(\Theta) = \begin{bmatrix} P'_{11}(\Theta) & P'_{12}(\Theta) & 0 & 0 \\ P'_{12}(\Theta) & P'_{22}(\Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P'_{33}(\Theta) & P'_{34}(\Theta) \\ 0 & 0 & -P'_{34}(\Theta) & P'_{44}(\Theta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\Theta$ 为散射角:

$$\cos\Theta = -\cos\theta_s \cos\theta_v - \sin\theta_s \sin\theta_v \cos(\varphi_v - \varphi_s) \quad (10)$$

式中: $S_{\text{dir},\lambda}$ 为中心波长为 $\lambda$ 的大气层顶的太阳辐照度; $\omega$ 为大气的单次散射反照率; $I_{\text{diff}}^{\downarrow}$ 为太阳漫射光。 $T_{\lambda,1}$ 、 $T_{\lambda,2}$ 分别为太阳到目标路径上的透过率和目标到观测点路径上的透过率,可以通过下面的方程计算:

$$T_{\lambda,1}(\mu_s) = e^{-\tau/\mu_s} \quad (11)$$

$$T_{\lambda,2} = e^{-\tau'} \quad (12)$$

式中: $\tau$ 为大气垂直方向的光学厚度; $\tau'$ 为目标至观测点路径方向的光学厚度,大气包含大气分子和气溶胶,大气分子成分比较稳定,光学厚度值几乎不变。

近地面水平方向的偏振辐射传输,由于边界条件比较复杂,构建辐射传输方程的难度比较大,对于陆地气溶胶,可以用单次散射近似的方法来简化模拟偏振辐射传输过程。到达探测器的偏振辐射信息包括目标偏振反射、大气偏振反射以及地表偏振贡献,可以表示为:

$$I = I_{\text{dir}}^{\text{obj}} + I_{\text{dir}}^{\text{atm}} + I_{\text{surf}} \quad (13)$$

由公式(4)、(6)、(8)可知,在气溶胶模式一定的情况下,气溶胶光学厚度和地表是影响大气偏振辐射传输的主要因素,下面分析地表和气溶胶光学厚度的影响。

首先分析地表影响,分别模拟计算了植被覆盖率为20%、80%以及不考虑地表贡献3种情况下的大气传输偏振特性随太阳天顶角的变化。地表偏振模型采用Breon等<sup>[11]</sup>提出的植被裸土相结合的参数模型,如公式(12)所示。

$$R_p^{\text{veg}} = \frac{F_p(\alpha_l, n)}{4(\mu_s + \mu_v)} \quad (14)$$

$$R_p^{\text{soil}} = \frac{F_p(\alpha_l, n)}{4\mu_s \mu_v} \quad (15)$$

式中:veg和soil分别表示植被和裸土; $F_p(\alpha_l, n)$ 为偏振光的Fresnel系数; $\alpha_l$ 为相位角,可以由下式计算得到:

$$\cos(2\alpha_l) = -\cos\theta_s \cos\theta_v + \sin\theta_s \sin\theta_v \cos(\varphi_v - \varphi_s) \quad (16)$$

仿真计算条件:假设近地面水平方向观测的目标反射率和偏振反射率分别为0.2和0.05,气溶胶光学厚度为0.3,太阳天顶角 $20^\circ \sim 72^\circ$ ,间隔 $2^\circ$ ,观测天顶角 $=90^\circ$ ,观测—太阳相对方位角 $45^\circ$ 。气溶胶参数:复折射率(1.45+0.0035i),采用体积谱分布,如公式(17)所示:

$$\frac{dV}{d\ln r} = \frac{FMF}{\sqrt{2\pi} \sigma_f} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_{mf})^2}{2\sigma_f^2}\right) + \frac{1-FMF}{\sqrt{2\pi} \sigma_c} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_{mc})^2}{2\sigma_c^2}\right) \quad (17)$$

式中:下标 $f$ 和 $c$ 分别表示细模态和粗模态; $r_m$ 为平均半径; $\sigma$ 为标准偏差; $FMF$ 为细粒子占比。模拟采

用典型气溶胶模型参数:平均半径(细模态 0.1 μm,粗模态 2 μm),标准偏差(细模态 0.45,粗模态 0.6),细粒子占比为 0.8,观测距离为 2、4 km。模拟结果如图 2 所示。

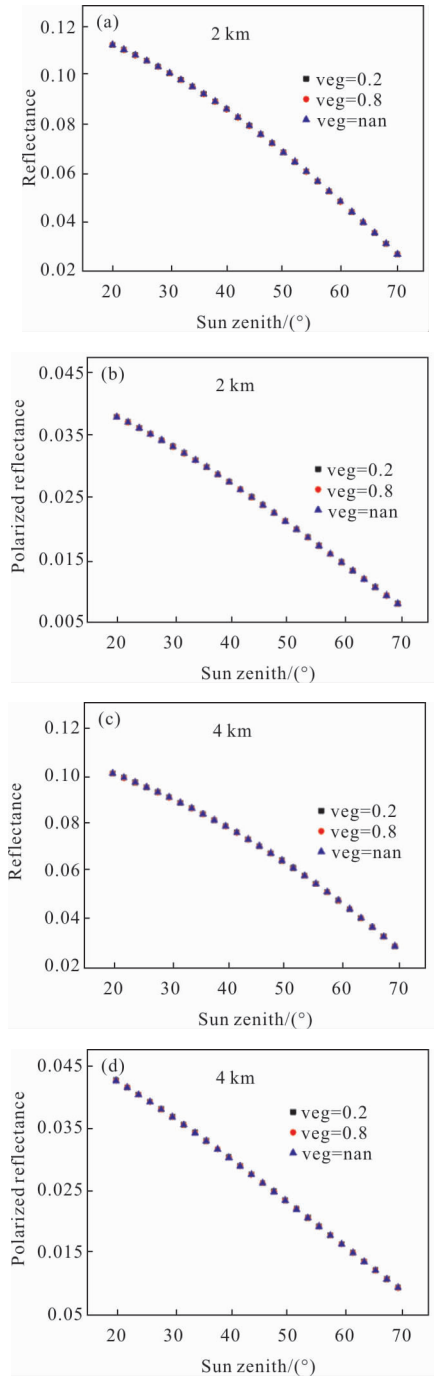


图 2 考虑地表植被覆盖率为 20%(veg=0.2)、80%(veg=0.8)与不考虑地表(veg=nan)情况下的反射率和偏振反射率  
Fig.2 Reflectance and polarized reflectance of considering surface contribution with vegetation coverage 20% (veg=0.2), 80%(veg=0.8)and none surface contribution

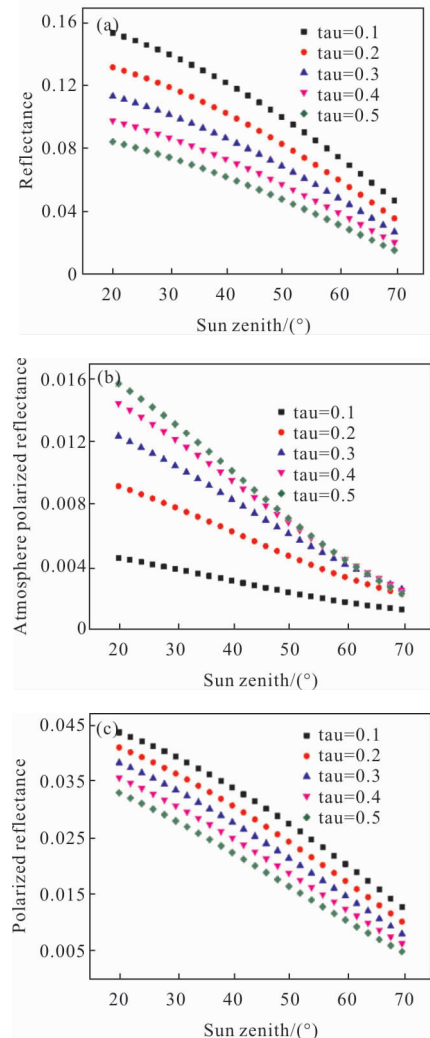
由图 2 考虑地表贡献的仿真计算结果表明:植被覆盖率为 20%和 80%以及不考虑地表情况下的反射率和偏振反射率值变化极小,说明地表贡献对近地面水平方向大气偏振特性传输的影响很小,可以忽略不计。

其次,分析气溶胶光学厚度影响,基于前述分析,地表贡献可以不予考虑。即:

$$I = I_{dir}^{obj} + I_{dir}^{atm} \quad (18)$$

基于公式(18)仿真计算了气溶胶光学厚度为 0.1~0.5 条件下,近地面水平方向偏振观测距离分别为 2 km 和 4 km 的反射率和偏振反射率,给出了大气偏振反射率以及大气偏振贡献在总偏振反射中的占比。大气模式与太阳观测几何条件与图 2 一致。仿真计算结果分别如图 3 和图 4 所示。

由图 3 和图 4 仿真计算结果可知,随着气溶胶光学厚度的增大,观测到的总反射率和总偏振反射



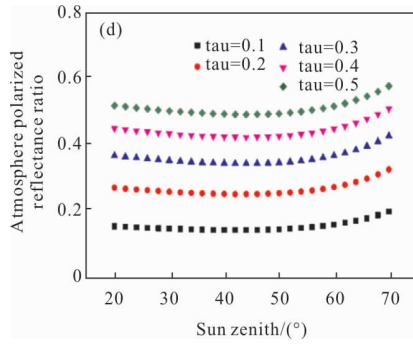


图 3 不同气溶胶光学厚度条件下反射率和偏振反射率随太阳天顶角的变化趋势(2 km 观测距离)

Fig.3 Reflectance and polarized reflectance are variable according to sun zenith under different aerosol optical depths(observing distance: 2 km)

率减小;大气的偏振反射率增大并且增加幅度变小,大气的偏振反射贡献在总偏振反射率中的占比也变大。气溶胶光学厚度越大,传输路径上的大气对目标偏振反射辐射的衰减越厉害,目标偏振反射辐射降

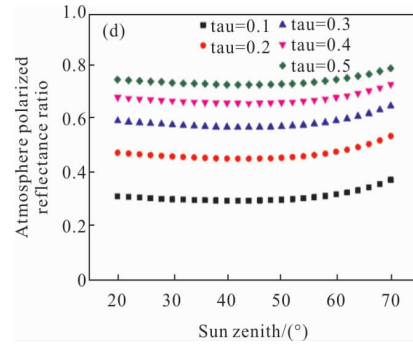
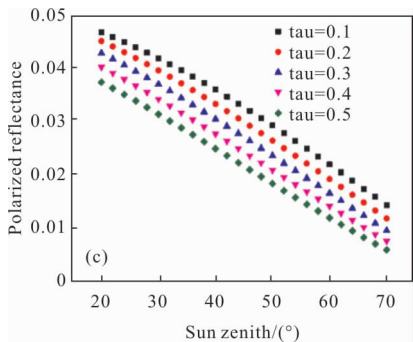
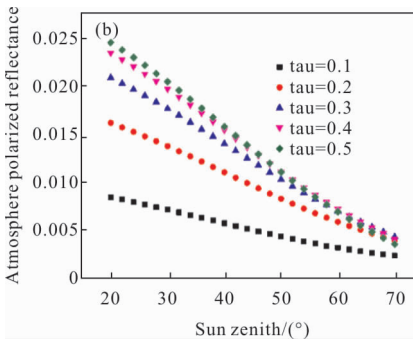
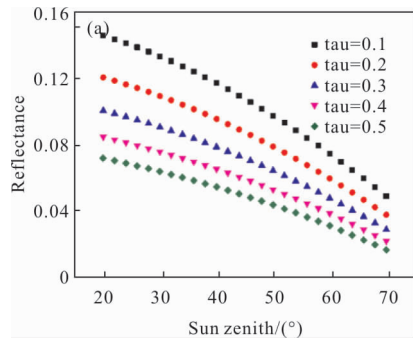


图 4 不同气溶胶光学厚度条件下反射率和偏振反射率随太阳天顶角变化趋势(目标反射率 0.2,偏振反射率 0,4 km 观测距离,相对方位角 45°)

Fig.4 Reflectance and polarized reflectance variable according to sun zenith under different aerosol optical depth (observing distance: 4 km)

幅越大;参与到大气偏振反射的气溶胶越多,同时大气的偏振反射辐射衰减也变快,但是大气偏振反射增加幅度大于其自身的衰减幅度,最终大气偏振反射辐射是增大的,但是增幅变小;总的偏振反射辐射中目标偏振反射辐射是减小的,而大气偏振反射是增加的,因此,大气偏振反射在中偏振反射率中的贡献随光学厚度增大。

比较观测距离 2 km 和 4 km 的近地面水平方向偏振辐射传输仿真结果可知,随着传输距离的增大,观测到的总反射率减小,偏振反射率增大,大气偏振反射贡献增大。大气偏振反射辐射的增幅大于总的偏振反射降幅,最终偏振反射辐射是增大的。

## 2 实验验证

2017 年 10 月 8 日在安徽合肥科学岛和距离科学岛 4.2 km 处的观测点,进行了近地面水平方向偏振特性大气传输实验。在零视距和 4.2 km 的远场观测点同时对同一目标进行偏振观测,并且保持观测几何条件一致,传输路径上没有任何遮挡物,传输路径上的下垫面是浓密植被。目标是反射率约为 60%、尺寸为 7.8 m×8 m 的靶标布,在距离地面约 16 m 高的楼顶沿墙面垂下。零视距(<1 m)对靶标布进行水平方向的观测,由于传输距离很短,获取的目标偏振特性不受传输路径上大气的影响。在距离 4.2 km 的远场观测点,获取的目标偏振特性在传输路径上受到了大气的散射和吸收影响。

2.1 测量原理及测量装置

实验采用的偏振测量方法是通过旋转偏振片来获取被测目标的偏振特性。如图 5 所示,在探测器光学系统前端,安装可以任意旋转的偏振片,通过旋转 3 次偏振片,获取检偏角度 0°、60°、120°的标量辐射信息,解析出目标 Stokes 矢量的前 3 个参数(I、Q、U)。

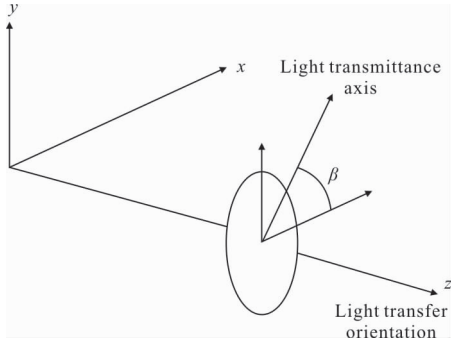


图 5 线偏振测量原理

Fig.5 Principle of line polarization measurement

在偏振观测中,辐射信息通过偏振器后的辐亮度可以表示为:

$$L(\alpha) = \frac{1}{2}(I + Q\cos 2\alpha + U\sin 2\alpha) \quad (19)$$

式中:L(α)为检偏角度为 α 时测量到的辐亮度。通过测量 0°、60°、120°检偏角的辐亮度,可以联合获取 Stokes 参数 I、Q、U:

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3}(L(0^\circ) + L(60^\circ) + L(120^\circ)) \\ Q = \frac{2}{3}(2L(0^\circ) - L(60^\circ) - L(120^\circ)) \\ U = \frac{2\sqrt{3}}{3}(L(60^\circ) - L(120^\circ)) \end{cases} \quad (20)$$

线偏振度(DOLP)可表示为:

$$DOLP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (21)$$

DOLP 的有效值为[0,1]。

外场实验测量框图如图 6 所示。

近场测量采用经过技术改造的偏振光谱仪,光谱仪是由 Spectra Vista 公司生产的 SVC HR-1024 便携式地物光谱仪,在 SVC 的光学系统前端,加装一个可以任意旋转的线偏振片和 10°光阑,通过旋转偏振片检偏角度(0°、60°、120°)获取目标偏振特性,偏振度测量精度优于 2%。对比标准白板测量,可以获取靶标在可见光波段的反射率和偏振反射率。

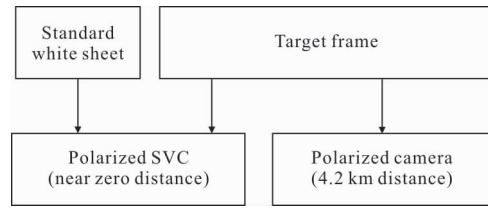


图 6 外场实验框图

Fig.6 Block diagram of experiment outside

远场 4.2 km 距离处的偏振观测采用中国科学院安徽光学精密机械研究所自行研制的地面线偏振相机,相机通过旋转 3 次偏振片的检偏角度 (0°、60°、120°)获取靶标的偏振特性。相机主要参数为:光学系统焦距 200 mm,总视场大于 3°,CCD 分辨率 1 kx1 k,实验所用的探测波段中心波长是 670 nm,带宽 20 nm,偏振度测量精度优于 2%。

2.2 实验结果与分析

在零视距处测量的靶标布可见光波段的反射率和偏振反射率曲线如图 7 所示。

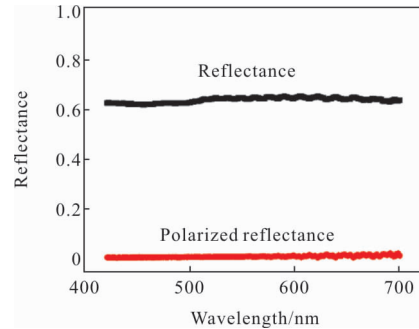


图 7 零视距处靶标布在可见光波段的反射率(黑色)和偏振反射率(灰色)

Fig.7 Reflectance and polarized reflectance of target in visible wavelength band at zero visible distance

2017 年 10 月 8 日当天采集时间及太阳观测几何条件如表 1 所示,以正北方向为方位角起始,顺时针向东方向为正。

表 1 2017 年 10 月 8 日实验太阳—观测几何条件  
Tab.1 Sun and view geometry condition of experiment at 2017.10.8

	Time	$\theta_s/(\circ)$	$\varphi_s/(\circ)$	$\theta_v/(\circ)$	$\varphi_v/(\circ)$
Morning	10:45–11:30	41.7–38.4	151.7–168.4	90	180
	14:00–16:00	47.6–67.7	222.8–247.2	90	180

图 8 所示为距离近场观测点约 100 m 处的太阳辐射计同步测量获取的 670 nm 波段的气溶胶光学厚度。

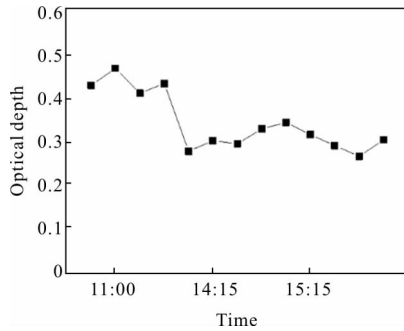


图 8 太阳辐射计在偏振探测时刻测量的 670 nm 波段气溶胶光学厚度

Fig.8 670 nm optical depth measured by sun photometer at the same time with the polarized measurement outdoor

近场零视距和远场 4.2 km 观测点测量到的靶标线偏振度如图 9(a)所示,由测量结果可知,近场测量的目标线偏振度在 0.025 附近,而在远场实测的目标线偏振度基本都在 0.1~0.2 之间,远远大于零视距处的线偏振度测量值,可见大气对目标的偏振特性传输的影响不可忽略。

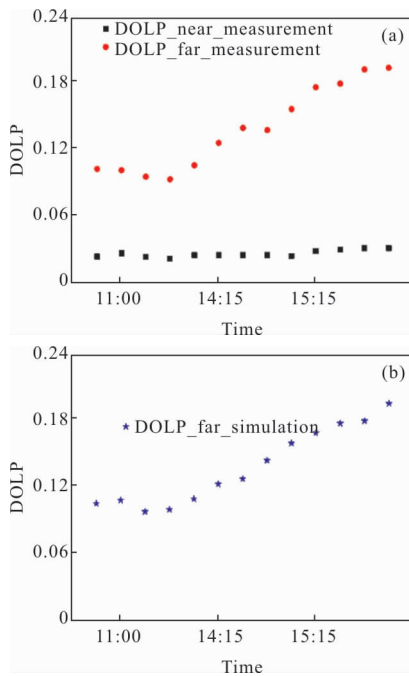


图 9 零视距及 4.2 km 处目标线偏振度的测量值(a)和 4.2 km 处模拟计算值(b)

Fig.9 Degree of line polarization measured at zero distance and 4.2 km distance(a), the simulated value(b)

以近场零视距实测的靶标的反射率和偏振反射率值作为仿真计算的输入条件,基于公式(13),得到目标偏振辐射经过 4.2 km 近地面水平传输路径上的大气散射和吸收作用后的线偏振度值如图 9(b)所示。

线偏振度模拟计算相对误差定义如下:

$$\text{error} = \frac{DOLP^{\text{simu}} - DOLP^{\text{meas}}}{DOLP^{\text{meas}}} \quad (22)$$

仿真计算的 4.2 km 观测距离处的线偏振度值与线偏振相机实测的线偏振度值的相对误差如表 2 所示,相对误差在 ±0.1 范围内,仿真计算结果与实测结果一致性较好,表明基于单次散射假设的近地面水平方向的大气偏振特性传输理论具有一定的可靠性。相对误差来源主要有几个方面:(1)偏振测量仪器本身的测量误差;(2)气溶胶模式假设带来的仿真计算误差,实际大气中的气溶胶是动态变化的,而仿真计算只采用了一种气溶胶模式;(3)实际大气偏振辐射传输是多次散射作用的,单次散射假设会带来一定的误差。

表 2 线偏振度仿真计算相对误差

Tab.2 Relative error of DOLP

Observing time	Relative error
10:45	0.034 28
11:00	0.073 6
11:15	0.030 61
11:30	0.079 82
14:00	0.039 5
14:15	-0.020 69
14:30	-0.081 49
14:45	0.053 87
15:00	0.025 76
15:15	-0.035 83
15:30	-0.006 41
15:45	-0.060 47
16:00	0.0143 3

### 3 结论

在平面平行大气假设条件下,假设目标传输路

径上的大气气溶胶是均匀的, 基于辐射传输理论给出了在单次散射近似情况下的近地面水平方向大气辐射传输表达式, 仿真计算并分析了不同气溶胶光学厚度条件下, 在 2 km 和 4 km 观测距离的近地面水平方向的大气偏振传输特性。仿真结果表明: 地表贡献可以忽略; 随着气溶胶光学厚度的增大, 总反射率和总偏振反射率减小, 大气偏振反射贡献增大; 随观测距离增大, 反射率减小, 大气偏振反射的贡献增大。

经过实验数据与仿真计算比较, 提出的近地面水平方向的偏振辐射传输计算方法具有一定的可靠性, 后续需要进一步考虑多次散射贡献。由于近地面偏振观测环境极其复杂, 边界条件较多, 对目标的偏振观测受到环境的影响因素较多, 需要建立典型偏振观测环境下的目标和背景的偏振特性, 为偏振信息的提取支持。

#### 参考文献:

- [1] Deschamps Y, Breon F M, Leroy M, et al. The POLDER mission: Instrument characteristics and scientific objectives [J] *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(3), 598-614.
- [2] Wang Han, Sun Xiaobing, Hong Jin, et al. Review of air-borne and space-borne polarized remote sensing of aerosol over land [J] *Journal of Atmosphere and Environmental Optics*, 2015, 10(2): 186-196. (in Chinese)  
王涵, 孙晓兵, 洪津, 等. 航空/航天偏振遥感陆地上空气溶胶研究进展 [J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(2): 186-196.
- [3] Deuze J L, Herman M, Santer R. Fourier series expansion of the equation in the atmosphere-ocean system [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1989, 41(6): 483-494.
- [4] Evans K F, Stephens G K. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1991, 46(5): 413-423.
- [5] Stamnes K, Conklin P. A new multi-layer discrete ordinate approach to radiative transfer calculation in anisotropically scattering atmospheres [J] *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1984, 31: 273-282.
- [6] Aron Y, Gronau Y. Polarization in the LWIR: a method to improve target acquisition [C]//Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXI, 2005, 5783: 653-661.
- [7] Feng Bin, Shi Zelin, Ai Rui, et al. Computational model for polarization degree of airlight under condition of near-horizontal observation [J] *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 704-712. (in Chinese)  
冯斌, 史泽林, 艾锐, 等. 近水平观测条件下大气背景光偏振度的计算模型[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 704-712.
- [8] Wu Pengfei, Xu Qingshan, Rao Ruizhong. Research on the polarization direction of near-ground horizontal skylight [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2147-2151. (in Chinese)  
武鹏飞, 徐青山, 饶瑞中. 近地面水平方向天空散射光偏振方向研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2147-2151.
- [9] Liang Tianquan, Zhao Qiang, Sun Xiaobing, et al. Research on image restoration by polarized remote sensing through haze [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 244-247. (in Chinese)  
梁天全, 赵强, 孙晓兵, 等. 雾霾天气条件下偏振遥感图像复原研究[J]. 武汉大学学报, 2014, 39(2): 244-247.
- [10] Xie Donghai, Gu Xingfa, Cheng Tianhai, et al. Research on the bidirectional reflectance of typical urban surface types measured by the directional polarimetric camera [J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(7): 077801. (in Chinese)  
谢东海, 顾行发, 程天海, 等. 基于多角度偏振相机的城市典型地物双向反射特征性研究 [J]. 物理学报, 2012, 61(7): 077801.
- [11] Breon F M, Tanre D, Lecomte P, et al. Polarized reflectance of bare soil and vegetation: measurement and models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 487-499.