

高分辨大视场紫外-可见光偏振成像融合处理技术

李清灵^{1,2,3}, 尹达一^{1,2,3*}, 庾金涛^{1,2,3}, 李磊^{1,2,3}

¹中国科学院大学, 北京 100049;

²中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

³中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

摘要 采用蒙特卡罗方法对水云下大气的偏振态分布进行了仿真分析, 所建立的水云大气环境在紫外 360~400 nm 波段的偏振度响应最大。采用紫外-可见光偏振成像技术对同一视场下的楼房、云和天空进行了偏振成像实验, 并用霍夫变换分割方法对图像中的每个区域进行了统计分析, 发现观测区域内无云区与云区的偏振角均值相对差为 1.6%, 偏振度均值相对差为 -14%, 证明了大气偏振角较偏振度稳健。紫外光和可见光在对云目标的偏振观测中存在互补性, 采用拉普拉斯金字塔图像融合技术能够提高对大气目标的探测能力, 验证了大视场高分辨紫外-可见光偏振成像技术在大气探测中的可行性和有效性。

关键词 成像系统; 偏振成像; 高分辨; 大视场; 紫外-可见光; 融合处理

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0611001

Ultraviolet-Visible Polarimetric Imaging and Image Fusion Technology with High Resolution and Large Field-of-View

Li Qingling^{1,2,3}, Yin Dayi^{1,2,3*}, Yu Jintao^{1,2,3}, Li Lei^{1,2,3}

¹University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

²Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

³Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract The Monte Carlo method is used to simulate the atmospheric polarimetric distribution under water clouds. The results show that the polarimetric response of water clouds in the ultraviolet (UV) band of 360-400 nm is the largest as compared to that of other spectra. Polarization pictures of buildings, clouds, and the sky in the same field of view are taken using UV-visible polarimetric imaging technology. Hough transform is used to divide these pictures, and statistical analysis is applied to each segment. The statistical results show that the relative differences of the polarization degree and polarization angle of the cloud-free and cloudy areas are -14% and 1.6%, respectively, providing the robustness of polarization angle in atmospheric detection. The UV and visible are found to be complementary in polarimetric detection for the clouds. Thus, image fusion technology in conjunction with a Laplacian pyramid can improve the detection capability for atmospheric targets. Results verify that the UV-visible polarimetric imaging technology with large field-of-view and high resolution is feasible and effective for atmospheric detection.

Key words imaging systems; polarimetric imaging; high resolution; large field of view; ultraviolet-visible; image fusion

OCIS codes 110.5405; 110.2970; 260.7190; 350.2660

1 引 言

在大气成分探测尤其是气溶胶观测方面, 偏振探测技术相较传统光学遥感方法是必要的补充^[1]。

基于大气瑞利散射原理, 天顶下观测者接收到不同方向大气散射光的偏振态分布构成指向性: 偏振度 (DoP) 的对称中心轴平行于太阳子午线方向, 偏振角 (AoP) 的对称中心轴垂直于太阳子午线方向。将

收稿日期: 2018-12-29; 修回日期: 2019-01-28; 录用日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(40776100)

* E-mail: yindayi@mail.sitp.ac.cn

大气偏振态分布的对称轴指向性作为被动导航的罗盘,是动物偏振视觉的主要功能之一^[2]。由于粒子对辐射的散射能力与粒子的性质和波长有关,大气罗盘在不同波段下受大气成分的影响程度不同,偏振观测需要根据不同的目标偏振特性选择恰当的波段,例如,部分昆虫和蜘蛛的偏振敏感波段,大部分选在紫外-可见光(VIS, 330~530 nm)波段^[3]。研究表明,在天空散射光照充足、复杂遮挡环境下,紫外光最适合大气导航的波段^[4-6]。因此,紫外-可见光多波段大气偏振观测结果能反映大气性质。

为了在更大空间范围内获得大气目标的细节信息,研究人员转向对大视场和高分辨率的偏振成像系统的研究。在可见光波段,国外已经有诸多航天偏振遥感仪器在轨运行,其中较早出现的是法国的多偏振多角度地球反射率成像仪(POLDER),其偏振通道成像结果在全球气溶胶观测、植被与海洋观测、耀斑抑制与大气校正等方面得到了运用^[7],其反演的云热力学相与瑞利云压力是全球气候模型的重要参数^[8];日本第二代全球成像仪(SGLI)进一步提高了偏振波段的分辨率,实现了地表反演中云干扰的修正^[9]。中国科学院安徽光学精密机械研究所设计并研制了星载多角度偏振成像仪(DPC),其工作光谱范围为420~930 nm之间的8个波段,其中3个偏振波段具有超广角画幅式低畸变成像特点,可以获取大气气溶胶及云的多角度偏振辐射成像信息^[10-11]。紫外光的大气偏振测量主要采用多偏振通道的紫外单元探测器同时进行全天多角度扫描^[4],或利用广角探测手段加紫外滤光片进行全球成像探测^[12-13],这两种观测的视场范围大,但其空间分辨率较低,仅适用于视野开阔环境下大气整体偏振性质的探测,因此发展大视场高分辨的成像级研究是紫外偏振成像的目标。

对紫外-可见光偏振高分辨大视场成像技术对于大气环境观测的必要性进行理论与实验研究。仿真分析了不同波段下的大气在有云条件下的偏振特性,利用自研的紫外偏振探测模块和商业级可见光偏振探测模块搭建大视场高分辨紫外-可见光偏振成像系统,对天空目标进行偏振成像外场实验,从而验证仿真结果。图像融合处理结果表明,紫外-可见光偏振成像在目标探测上存在互补性,证明了紫外-可见光偏振成像技术在大气探测中的可行性和有效性。

2 紫外-可见光大气偏振建模与仿真

粒子散射的远场辐射理论公式为

$$\mathbf{L}_{\text{sca}} = \frac{\sigma_{\text{sca}}}{4\pi R^2} \mathbf{P}(\alpha) \mathbf{L}_{\text{in}}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{P}(\alpha)$ 为散射角 α 对应的 4×4 散射相函数穆勒矩阵; σ_{sca} 为粒子散射截面; R 为散射体到观测者的距离; \mathbf{L}_{in} 、 \mathbf{L}_{sca} 分别为入射光和散射光辐亮度的Stokes表征,即 $\mathbf{L}_i = [S_{i0} \ S_{i1} \ S_{i2} \ S_{i3}]^T$ (下标 i 为1或2,分别代表in或sca), $S_{i0} \sim S_{i3}$ 分别为辐亮度矢量 \mathbf{L}_i 的总光强、水平线偏振方向分量光强、竖直线偏振方向分量光强和圆偏振分量光强。线偏振度和线偏振角的计算公式为

$$\begin{cases} f_{\text{DoP}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \\ f_{\text{AoP}} = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_2}{S_1} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: S_1 、 S_2 是散射角 α 、复折射率 n 、波长 λ 和粒子尺寸 a 的函数。对于给定的 \mathbf{L}_{in} ,散射光 \mathbf{L}_{sca} 的DoP和AoP只与散射相函数矩阵 $\mathbf{P}(\alpha)$ 有关。

大气罗盘的理论基础是瑞利散射,单次瑞利散射相函数矩阵可表示为

$$\mathbf{P}(\alpha) = \frac{3}{4} \begin{bmatrix} 1 + \cos^2 \alpha & -\sin^2 \alpha & 0 & 0 \\ -\sin^2 \alpha & 1 + \cos^2 \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (3)$$

仿真得到天底坐标系下的大气罗盘如图1所示。

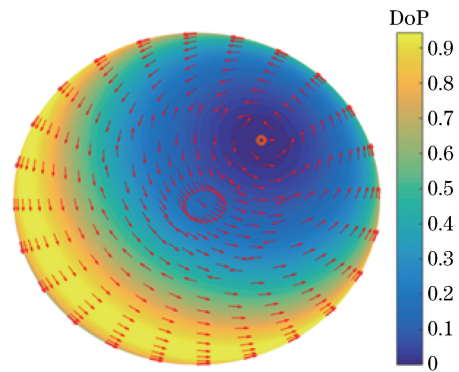


图1 单次瑞利散射大气偏振态的多角度分布(圈为太阳位置,箭头表明散射光偏振方向)

Fig. 1 Multi-angle distribution of atmospheric polarization by single Rayleigh scattering (circle refers to the sun position and arrows refer to the angle of the polarization light)

实际情况下,大气分子存在非各向同性结构,造成大气罗盘的消偏。在粒子坐标系下,分子单次散射相函数矩阵为

$$\mathbf{P}(\alpha) = \frac{3}{2} \frac{1-\delta}{1+\delta/2} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{1+\delta}{1-\delta} + \cos^2 \alpha \right) & -\frac{1}{2} \sin^2 \alpha & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} \sin^2 \alpha & \frac{1}{2} (1 + \cos^2 \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\delta}{1-\delta} \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中： δ 为分子的消偏率，与分子结构和波长有关，说明不同波长对应的分子散射偏振态分布相较理想瑞利散射模型存在不同程度的消偏。显然，散射次数越多，消偏效应越大。

大气中另一个影响偏振的主要因素是气溶胶，散射相函数矩阵与粒子形状密切相关。对于中心对称的气溶胶粒子，在粒子坐标系下的散射符合米氏散射模型，其相函数矩阵为

$$\mathbf{P}(\alpha) = \frac{\lambda^2}{\pi \sigma_{\text{sca}}} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (S_1 S_1^* + S_2 S_2^*) & \frac{1}{2} (S_1 S_1^* - S_2 S_2^*) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} (S_1 S_1^* - S_2 S_2^*) & \frac{1}{2} (S_1 S_1^* + S_2 S_2^*) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} (S_1 S_2^* + S_2 S_1^*) & \frac{i}{2} (S_1 S_2^* - S_2 S_1^*) \\ 0 & 0 & -\frac{i}{2} (S_1 S_2^* - S_2 S_1^*) & \frac{1}{2} (S_1 S_2^* + S_2 S_1^*) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中： $*$ 代表求共轭； σ_{sca} 为粒子微分散射截面； S_1 和 S_2 为散射模型参数，球形水气溶胶的 S_1 和 S_2 为散射角 α 的球谐函数。图 2 是紫外和可见光宽波段的无偏光入射下，不同尺寸的米氏散射粒子和大气分子在空气中单次散射的偏振度与散射角关系的仿真结果。结果表明：当气溶胶尺寸相对波长很小时，不论尺寸多大，都表现为理想瑞利散射分布，散射光较分子散射整体表现为起偏；当气

溶胶尺寸均值大、方差小时，背向和正向散射表现为起偏，垂直方向表现为消偏；当气溶胶尺寸均值和方差均较大时，出射光较分子散射整体表现为消偏；对于 $10 \mu\text{m}$ 和 $0.1 \mu\text{m}$ 的气溶胶，紫外与可见光偏振度分布一致，但 $1 \mu\text{m}$ 与 $2.5 \mu\text{m}$ 的气溶胶分布区别较大，说明通过紫外-可见光双波段同时探测时，能够区分 $1 \mu\text{m}$ 与 $2.5 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子。

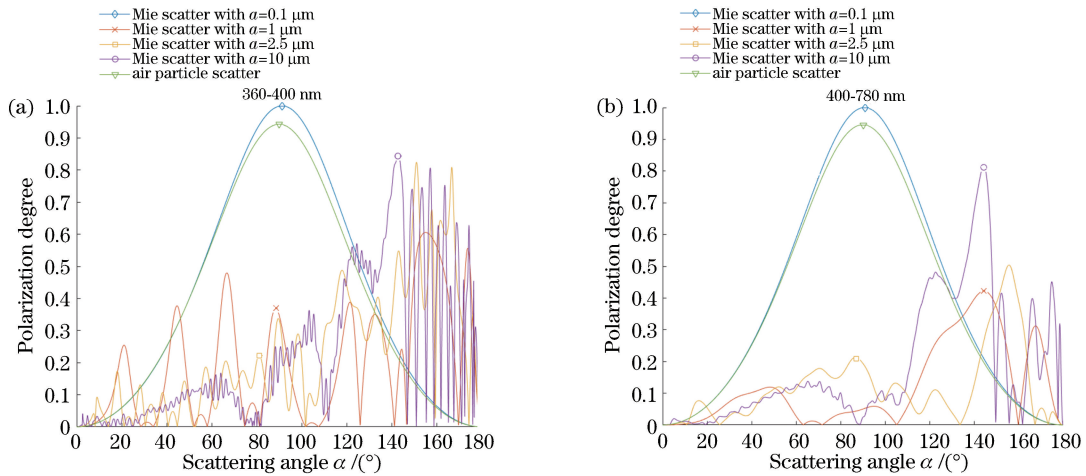


图 2 不同波段的无偏光入射下偏振度与散射角的关系。(a) 紫外；(b) 可见光

Fig. 2 Relationship of polarization degree and scattering angle under incidence of unpolarized light at different wave bands.

(a) UV; (b) visible light

采用蒙特卡罗方法仿真太阳位置(240°, 80°)入射情况下有水性云覆盖的大气散射偏振态。其中,大气分子模型为1976年美国标准大气分子廓线,地表气溶胶模型为城市气溶胶模型,其粒子谱为

$$n(r) = \frac{dN(r)}{dr} = \sum_{i=1}^2 \frac{N_i}{\ln(10)r\sigma_i\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\lg r - \lg r_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (6)$$

式中: $N(r)$ 为粒子平均密度; r 为粒子平均半径; r_i 为*i*粒子的粒子半径; N_i 为*i*粒子的粒子密度; σ_i 为*i*粒子的微分散射截面,具体参数见表1。海拔为3~4 km范围内有水含量为1 g/m³、水滴有效半径为10 μm的云层。所有气溶胶散射都采用米氏散射模型。

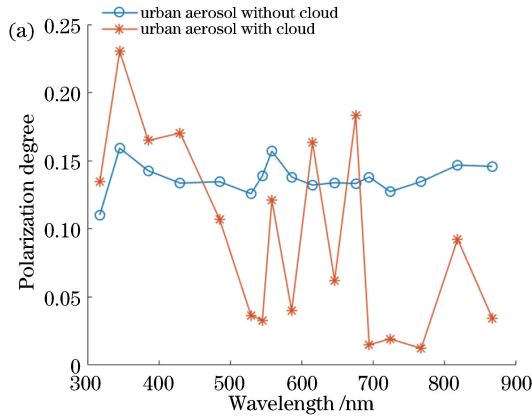


表1 城市地表气溶胶模型粒子谱参数及成分
Table 1 Particle spectrum parameters and composition of urban surface aerosol model

Aerosol model	Size distribution			Type
	N_i	r_i	σ_i	
Urban	0.999875	0.03	0.35	Mixture of water soluble, dust-like aerosol, and soot-like aerosol
	0.000125	0.50	0.40	

在 HITRAN 96 波段条件下,分析在(50°, 60°)观测方向下不同中心波长的有云和无云大气情况下的偏振态仿真结果,如图3所示,结果发现380 nm中心波长处有云和无云的偏振度都较大,说明在该探测条件下,以偏振角作为探测信号、偏振度作为噪声指标时,在该波段最易发现此类云层。

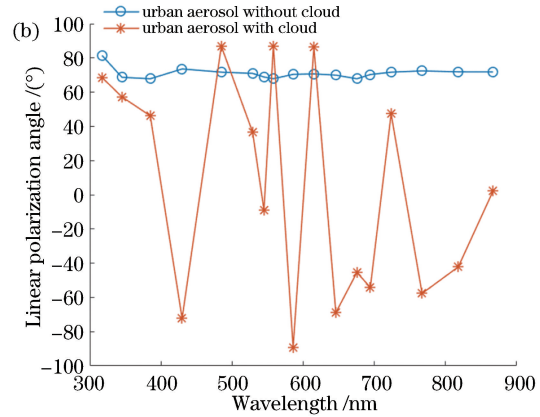


图3 HITRAN96 带宽响应条件下的偏振态仿真结果。(a)偏振度;(b)偏振角

Fig. 3 Simulation results of polarization state under condition of HITRAN96 bandwidth response.

(a) Polarization degree; (b) polarization angle

3 大气紫外偏振图像获取

目标的一次线偏振成像需要获取至少三个偏振方向的目标强度图像。紫外-可见光偏振成像系统结构如图4所示,两个模块采用两套独立的光机电系统,通过交换机实现两个模块的同步控制。其中,紫外偏振探测模块采用时间分割方式,通过切换滤光轮分时获取4个偏振方向的图像;可见光偏振探测模块采用微阵列技术,在探测器每2×2的4个像元前分别加4个不同偏振方向的微偏振片,分焦平面获取可见光4个偏振方向的图像。同时,对成像系统进行了偏振辐射误差的理论分析^[14],成像系统整体参数如表2所示。

在2018-11-22T15:04左右的有云晴朗天气下对楼宇间的天空进行可见光与紫外光的偏振对比观测实验,此时太阳位置与仿真条件(240°, 80°)一致,

探测方向为(50°, 60°)。目标的辐射度、偏振度和偏振角图像经过图片重采样特征配准,同一视场的目标成像结果如图5(a)~(e)所示,图中包含天空和被云或楼房遮挡的部分。

成像结果表明,紫外光与可见光的天空背景偏振角整体存在偏移。对于图5中的楼房目标和云目标,紫外光和可见光的偏振度与偏振角图像特征都存在较大差异。基于拉普拉斯金字塔高斯融合^[15]对图5(b)、(d)进行偏振度图像融合,结果如图5(f)所示,对图5(c)、(e)进行图像融合,结果如图5(g)所示,偏振角融合图可以同时突显出楼房和云的边缘特征,说明了双波段融合方案的合理性。

4 分析与讨论

紫外-可见光偏振融合产生单幅图像无法表现的效果,说明目标在不同通道之间存在差异。利用

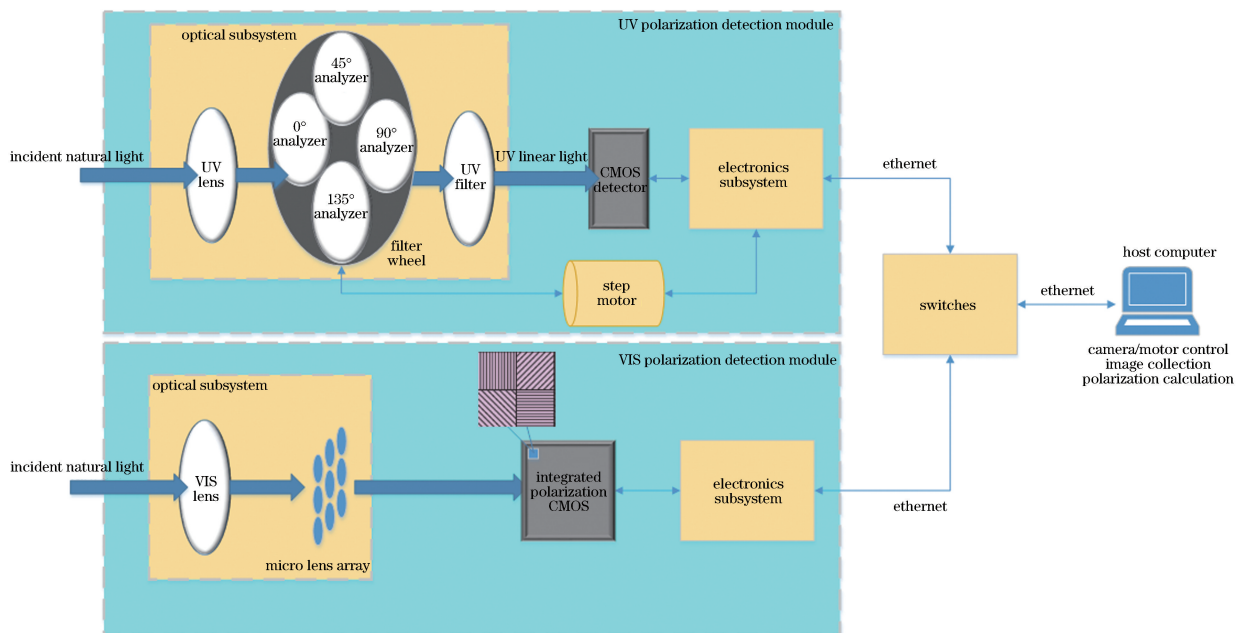


图 4 紫外-可见光偏振成像系统功能框图

Fig. 4 Functional schematic of UV-visible light polarization imaging system

表 2 紫外-可见光偏振成像系统参数

Table 2 Parameters of UV-visible light polarization imaging system

Parameter	UV module	Visible module
Sensitive wavelength /nm	360-400 (peak at 380 nm)	380-780 (peak at 520 nm)
Polarization detection approach	rotating element	division of focal plane
Total field of view /[(°)×(°)]	8.7×6.4	19.6×16.4
Angular resolution /mrad	0.23	0.28
Number of detected polarized directions	4	4
Quantization bits	14	12
Frame frequency /Hz	20	24
SNR	623.5(50% solar constant)	101.5(50% solar constant)
Polarization degree dynamic range	0.1-0.9	0.05-0.95
Measurement error of linear polarization degree /%	<1.5	<2.7

光强图中的楼房的规则几何特性,对该图作霍夫变换,标记楼房边界并根据边界将图像分割为楼房和天区两个区域,再利用可见光强码值阈值区分云遮挡区和无云区。对每一区域的偏振度和偏振角图像分别作像素的概率统计分析,如图 6 所示。在可见光强上三种目标可区分,天空目标的图像偏振度与偏振角在统计概率分布上较楼房目标更集中。特别在偏振角统计概率分布特性上,楼房区域的偏振角分布于±90°之间,而紫外天空区域集中在-85°,可见光天空区域集中在-54°附近。

紫外与可见光波段云遮挡区域图像偏振度和偏

振角的统计结果如表 3 所示,在紫外和可见光的探测波段内,云遮挡使偏振角增加、偏振度减小,该结果与理论值的趋势一致。偏振值的标准差表征了区域内粒子的整体谱分布特性。所测紫外天空无云区比云区的偏振角均值相对差为 1.6%,偏振度均值相对差为-14%;可见光偏振角均值相对差为 0.3%,偏振度均值相对差为-16%。说明云层干扰的观测值偏振角稳定性优于偏振度,更适合作为大气导航。

综上分析表明,紫外与可见光在大气偏振观测中存在互补性,采用紫外-可见光偏振图像融合技术能够提高对大气目标的探测能力。

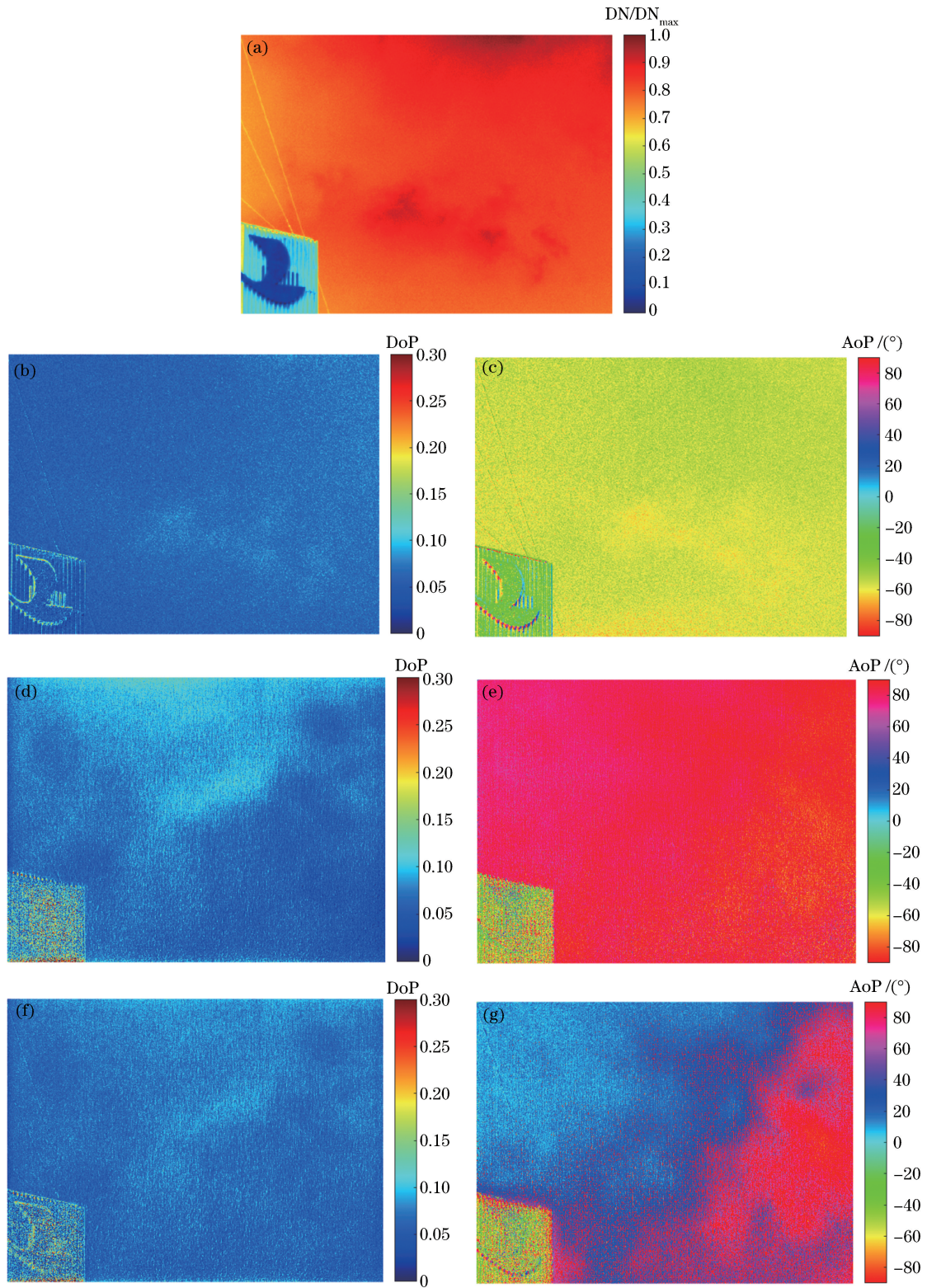


图 5 天空目标偏振成像伪彩图结果。(a)可见光强;(b)可见光偏振度;(c)可见光偏振角;(d)紫外偏振度;(e)紫外偏振角;
(f)紫外-可见光融合偏振度;(g)紫外-可见光融合偏振角

Fig. 5 Sky target polarization images in pseudo color map. (a) Visible intensity; (b) visible polarization degree; (c) visible polarization angle; (d) UV polarization degree; (e) UV polarization angle; (f) UV-visible fusion polarization degree; (g) UV-visible fusion polarization angle

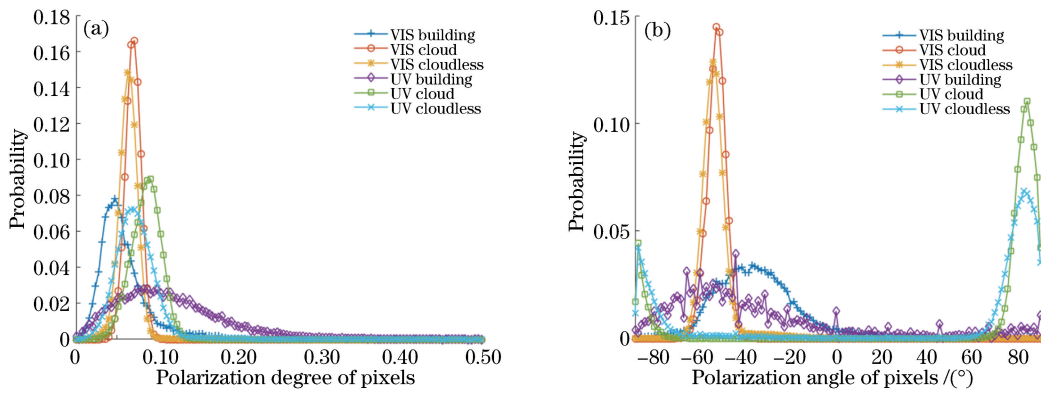


图 6 三个区域像素的偏振态统计分布。(a)偏振度;(b)偏振角

Fig. 6 Polarization statistical distributions of pixels in three regions. (a) Polarization degree; (b) polarization angle

表 3 可见光和紫外光无云区和云区图像偏振度和偏振角统计结果

Table 3 Statistical results of image polarization degree and polarization angle in cloud-free area and cloud area in UV and visible light

Parameter	Cloudlessregion in visible		Clouddregion in visible		Cloudlessregion in UV		Clouddregion in UV	
	DoP	AoP / (°)	DoP	AoP / (°)	DoP	AoP / (°)	DoP	AoP / (°)
Average	0.060	-52.1	0.060	-60.9	0.07	86.4	0.090	84.7
Standard deviation	0.010	8.7	0.010	4.1	0.03	14.2	0.020	5.7
Simulation result	0.125	70.9	0.036	36.6	0.143	67.8	0.164	46.2

5 结 论

研究分析了紫外与可见光大气偏振观测的特点。采用蒙特卡罗方法仿真不同波段水云下大气偏振态多角度分布特性,并采用紫外-可见光偏振成像系统对同一视场下的楼房、云和天空进行偏振成像实验,理论仿真与实验结果都表明水云在紫外光与可见光波段存在偏振特性差异。该结果验证了在云层干扰的观测条件下,大气散射的偏振角相对变化小于偏振度,更适合作为大气偏振罗盘标准。紫外和可见光在对不同目标的偏振观测具有互补性,观测结果与理论值的趋势一致。采用图像融合技术能够提高对大气目标的探测能力,表明大视场高分辨紫外-可见光偏振成像技术在大气探测中的可行性和有效性。

参 考 文 献

[1] Gu X F, Cheng T H, Li Z Q, *et al.* Atmospheric aerosol polarized remote sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015: 1-2.
顾行发, 程天海, 李正强, 等. 大气气溶胶偏振遥感 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 1-2.

[2] Gao J, Fan Z G. Bionic polarized light navigation method[M]. Beijing: Science Press, 2014: 107-108.

高隽, 范之国. 仿生偏振光导航方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 107-108.

[3] Horváth G, Varjú D. Polarized light in animal vision [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004: 53-73.

[4] Wang X, Gao J, Fan Z G. Empirical corroboration of an earlier theoretical resolution to the UV paradox of insect polarized skylight orientation[J]. *Naturwissenschaften*, 2014, 101(2): 95-103.

[5] Barta A, Horváth G. Why is it advantageous for animals to detect celestial polarization in the ultraviolet? Skylight polarization under clouds and canopies is strongest in the UV[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2004, 226(4): 429-437.

[6] Hegedüs R, Barta A, Bernáth B, *et al.* Imaging polarimetry of forest canopies: how the azimuth direction of the sun, occluded by vegetation, can be assessed from the polarization pattern of the sunlit foliage[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(23): 6019-6032.

[7] Bréon F M, Buriez J C, Couvert P, *et al.* Scientific results from the Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances (POLDER) [J]. *Advances in Space Research*, 2002, 30(11): 2383-2386.

[8] Parol F, Buriez J C, Vanbauce C, *et al.* Review of capabilities of multi-angle and polarization cloud measurements from POLDER[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(7): 1080-1088.

- [9] Okamura Y, Tanaka K. Optical multi-band radiometer onboard earth observing satellite [J]. Japanese Journal of Optics, 2010, 39(12): 572-577
岡村吉彦, 田中一広. 衛星搭載用多波長光学放射計 [J]. 光学, 2010, 39(12): 572-577.
- [10] Zhang M M, Meng B H, Luo D G, *et al.* Measurement precision verification and deviation analysis of spaceborne directional polarimetric camera [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0812004.
张苗苗, 孟炳寰, 骆冬根, 等. 星载多角度偏振成像仪测量精度验证与偏差分析 [J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0812004.
- [11] Yang W F, Hong J, Qiao Y L. Optical design of spaceborne directional polarization camera [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0822005.
杨伟锋, 洪津, 乔延利. 星载多角度偏振成像仪光学系统设计 [J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0822005.
- [12] Carey N, Stürzl W. An insect-inspired omnidirectional vision system including UV-sensitivity and polarisation [C]//2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), November 6-13, 2011, Barcelona, Spain. New York: IEEE, 2011: 312-319.
- [13] Zhang W J, Cao Y, Zhang X Z, *et al.* Sky light polarization detection with linear polarizer triplet in light field camera inspired by insect vision [J]. Applied Optics, 2015, 54(30): 8962-8970.
- [14] Qian H H, Ye Q H, Meng B H, *et al.* The polarized radiometric theoretical error of spaceborne directional polarimetric camera [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(5): 1558-1565.
钱鸿鹄, 叶擎昊, 孟炳寰, 等. 星载多角度偏振成像仪偏振辐射测量的理论误差分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(5): 1558-1565.
- [15] Li J S, Yang W, Zhang X M, *et al.* Infrared image processing, analysis and fusion [M]. Beijing: Science Press, 2009: 158-164.
李俊山, 杨威, 张雄美. 红外图像处理、分析与融合 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 158-164.