

基于强度图像和地物偏振反射率数据的 光学遥感偏振成像仿真分析

黄红莲^{1,2} 易维宁¹ 乔延利¹ 杜丽丽¹ 崔文煜¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

(² 中国科学技术大学物理学院, 安徽 合肥 230026)

摘要 为获得满足偏振成像探测器的研制所需的偏振成像样本,并解决现有偏振遥感仿真分析中普遍缺乏实测数据支持的问题,提出了一种基于强度图像和实测地物偏振反射率数据的偏振成像仿真方法,介绍了其实现过程,并且得到了不同大气几何条件下的卫星高度偏振仿真图像。通过与强度仿真图像定量的对比表明,偏振成像对比度受大气能见度的影响较弱,在低能见度及后向散射条件下或者某些特定方向上优势更为突出。偏振成像的清晰度对观测方向较为敏感这一属性可以指导选择特定的方向进行偏振探测,并最终提升雾霾条件下偏振成像对地遥感的目标识别能力。

关键词 遥感;偏振仿真;矢量辐射传输方程;偏振反射率;对比度

中图分类号 TP701 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1028001

Analyzing of Optical Remote Polarization Imaging Simulation Based on Intensity Images and Surface Polarized Bidirectional Reflectance Data

Huang Honglian^{1,2} Yi Weining¹ Qiao Yanli¹ Du Lili¹ Cui Wenyu¹

(¹ Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

(² School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract For getting the samples of polarization imaging needed by the development of polarization imaging sensors and compensating the lack of experimental data usually in the research of polarization imaging simulation, a method of polarization imaging simulation based on the combination of intensity images and experimentally measured surface polarized bidirectional reflectance data is proposed. Several of the simulated images under different atmospheric and geometric conditions at the height of satellite are provided to illustrate the realization processing of the method. The comparison with the simulated intensity images in the same circumstance shows that, the contrast of polarization images are less affected by low visibility, the advantage appears more prominent in the conditions of backscatter or some particular directions. The fact that the clarity of polarization imaging is more sensitive to observational direction suggests that the simulation is helpful for the selection of a specific direction for polarization imaging. Eventually, it is helpful for enhancing the ability of identifying the ground target in haze conditions through polarization imaging.

Key words remote sensing; polarization simulation; vector radiative transfer function; polarized bidirectional reflectance; contrast

OCIS codes 280.4788; 010.5620; 010.7295; 110.5405

收稿日期: 2014-03-21; 收到修改稿日期: 2014-05-30

基金项目: 国防 973 计划(61322504)

作者简介: 黄红莲(1980—),女,博士研究生,助理研究员,主要从事定量遥感应用方面的研究。

E-mail: hlhuang@aiofm.ac.cn

导师简介: 易维宁(1956—),女,学士,研究员,主要从事遥感数字图像处理、遥感信息分析处理技术等方面的研究。

E-mail: yiwn@aiofm.ac.cn

1 引言

偏振是电磁波的重要属性之一,在微波波段称为极化。通常,自然光经大气、地表或其中的目标物体发生透射、散射和反射等过程后,或者目标物自身发射的电磁辐射中,均携带有与目标属性密切相关的偏振信息。所以,在光学遥感中,偏振信息的探测为研究目标物的光学特性提供了一个不同的视角。作为一种新兴的对地观测方法,偏振遥感近年来倍受关注^[1-2]。它与传统的光学或辐射学遥感方法相比较,其优势体现在:1)偏振遥感可同时获取目标物的偏振态和辐射强度两种信息;2)偏振遥感能够敏锐地探测到由目标的表面粗糙度、边缘和纹理等属性引起的偏振态的变化;3)根据偏振遥感数据能够发现一些反射率较低或者处于其它物体阴影下的暗目标^[3-4]。

进行遥感图像的仿真分析,是开展光学遥感传感器的设计与性能预测、图像质量评估、图像处理算法的验证、图像解译训练等研究过程中的必要环节,也是减少研制成本、缩减研发周期的有效方法。目前,国际上针对光学遥感强度图像的仿真研究比较活跃,例如 John 等^[5]对从场景、传感器到后端图像处理在内的光学遥感系统进行了仿真、建模与分析;Boerner 等^[6]通过分析包括场景、大气以及传感器硬件等的端到端机载或星载对地遥感成像过程,开发出了高光谱遥感系统仿真工具包 SENSOR;中国科学院安徽光学精密机械研究所也开发出了基于虚拟三维图像的遥感成像模拟仿真软件 ORSIS^[7]。但是,这些工作都没有涉及偏振。在偏振成像仿真方面,仅有 Michael 等^[8-9]基于数码与遥感图像生成(DIRSIG)发展了偏振成像建模、仿真方法。国内的有关文献报道,有些考虑了地表偏振二向反射特性,却没有考虑大气偏振辐射传输的影响^[10-11];有的则仅是针对大气偏振的建模与仿真^[12-13];仅张钧萍等^[14]结合四流地表-大气辐射传输模型和偏振反射率模型,获得了传感器入瞳处偏振图像。

当前国际上在轨运行的偏振成像探测器极为稀少,仅有法国空间局(CNES)的 POLDER 和美国的 EOSP,而在轨运行的辐射强度探测器很多,我国正在研制的空间偏振探测器又尚未升空^[15-16]。为解决我国有关偏振成像仿真分析工作中普遍缺乏实测数据支持的问题,本文提出了一种以强度图像为基础,结合实测地物偏振反射数据,进行传感器入瞳处偏振成像仿真的方法,其具体的实现过程是:利用强度图像,采用迭代自组织数据分析算法

(ISODATA)进行非监督分类,得到土地分类专题图;结合实测的地物偏振反射数据进行地物偏振反射率转换,获得地面偏振反射率图像;利用大气辐射传输模型,进行兼顾目标背景与大气相互耦合的大气辐射传输偏振仿真,得到传感器入瞳处的偏振仿真图像。将其与相同观测条件和大气条件下的强度仿真图像作对比分析,便于进一步揭示偏振遥感图像的特征属性。

2 偏振仿真方法与过程

自然光是非偏振的,但当它经地面目标的反射并往返两次通过大气层后到达探测器时,已演变成偏振光。整个过程中,大气成分、目标特性、环境背景以及探测器观测的方位角都会影响接收光的强度和偏振状态。因此,偏振成像的仿真过程实质上就是对太阳光经大气、目标/背景直至传感器系统的传输过程的模拟。该传输过程可分为两个阶段:1)太阳直射光经过大气的散射吸收和目标反射后演变为偏振光,实现这一过程的模拟即是通过测量或计算目标背景在不同光照和观测条件下的偏振辐射分布,以便获得目标背景偏振二向反射特性(p -BRDF),再根据强度图像,获得地面偏振反射率图像;2)目标反射光、环境背景光、以及目标背景在大气中的多次散射光一起到达偏振探测器,该过程中大气的路径辐射和地物目标辐射一起进入遥感探测器,导致图像模糊,质量和对比度下降。实现这个过程的模拟需要应用矢量大气辐射传输模型,进行不同传输环境下目标背景与大气相互耦合的入瞳处偏振成像仿真。所以,实现偏振成像的仿真可分为地面偏振反射率的图像获取和入瞳处偏振反射率图像的仿真两个步骤。

2.1 地面偏振反射率图像获取

为获取地面偏振反射率图像,通过对强度遥感影像进行分类,得到土地分类专题图。遥感图像的分类是指把图像中的每一个像元或区域划归为若干类别中的一种。目前常用的分类方法主要有基于传统统计分析的分类方法、人工智能分类法、支持向量机分类法、分层分类法、面向对象分类法、模糊数学分类法共五大类。基于传统统计分析的分类方法又包含监督分类与非监督分类,其中监督分类常用的方法有最小距离分类法、高斯最大似然分类法、神经元网络分类法、马氏距离法等,非监督分类主要有 K 均值算法、ISODATA 法等^[17]。选用了 ISODATA 法进行遥感图像的分类,其目的是将图像中的背景

和目标分割出来。该算法的实质是以初始类别为“种子”进行自动迭代聚类的过程,它可以自动地进行类别的“合并”和“分裂”,其各个参数也在不断地聚类调整中逐渐确定,并最终构建所需要的判别函数。这种方法不需要进行训练样本的选择,而且运算速度与精度均较好^[18]。

如果同一种类地物的偏振反射率相同,那么在完成图像分类后将实测的地物偏振反射率映射到分类图中的对应区域,即可生成地面偏振反射率图像。但由于地物目标本身的非均匀性以及空间取向上的差异性,同一类地物在不同区域的偏振反射率并非完全一致,从而在偏振图像中表现出地物的纹理。理论上,地物强度图像的纹理反映出地面反射率的差异,从偏振图像看来,则反映了某一偏振方向上偏振反射率的差异。实验研究表明,强度图像的纹理和偏振图像的纹理在空间上具有相似的统计分布规律,这是基于两个正交方向上的偏振反射率在统计规律上的相似性。所以,选择在由分类图到地面偏振反射率图像转换过程中,利用强度图像的纹理信息为偏振仿真图像增加纹理细节。即在利用地面测量得到的偏振反射率值来取代分类图中对应的分割区域时,增加使用强度图像的灰度值,由此获得地面偏振反射率图像中每一像元值为

$$\rho_{P,\lambda}^{\text{Suf}}(i,j;\theta_s,\theta_v,\varphi) = \frac{\rho_{P,\lambda}^{\text{Meas},k}(\theta_s,\theta_v,\varphi) \cdot N^k(i,j)}{N_{\text{avg}}^k}, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, k 为地物种类, θ_s 为太阳天顶角, θ_v 为观测天顶角, φ 为相对方位角, $\rho_{P,\lambda}^{\text{Suf}}(i,j;\theta_s,\theta_v,\varphi)$ 为地面偏振反射率仿真图像中像元 (i,j) 的偏振反射率, $\rho_{P,\lambda}^{\text{Meas},k}(\theta_s,\theta_v,\varphi)$ 为在某一观测方向上测量得到的地物 k 的偏振反射率值, $N^k(i,j)$ 为强度图像中像元 (i,j) 的灰度值, N_{avg}^k 为强度图像中地物 k 的灰度平均值。

2.2 入瞳处偏振反射率图像仿真

偏振反射率反映了反射光的光强沿着传播方向的分布及变化情况。考虑目标背景的反射光和大气之间的耦合后,到达传感器入瞳处的偏振反射率与地表偏振反射率之间有如下关系:

$$\rho_{P,\lambda}^{\text{APP}}(z,\theta_s,\theta_v,\varphi) = \rho_{P,\lambda}^{\text{Atm}}(z,\theta_s,\theta_v,\varphi) + \rho_{P,\lambda}^{\text{Suf}}(\theta_s,\theta_v,\varphi)T_\lambda(\theta_s)T_\lambda(\theta_v,z), \quad (2)$$

式中 λ 为波长, z 为观测高度, θ_s 为太阳天顶角, θ_v 为观测天顶角, φ 为相对方位角, $\rho_{P,\lambda}^{\text{APP}}(z,\theta_s,\theta_v,\varphi)$ 为传感器入瞳处的偏振反射率, $\rho_{P,\lambda}^{\text{Atm}}(z,\theta_s,\theta_v,\varphi)$ 为大气分子和气溶胶散射产生的偏振贡献,即偏振程辐射

反射率, $\rho_{P,\lambda}^{\text{Suf}}(\theta_s,\theta_v,\varphi)$ 为目标背景偏振二向反射率(p-BRDF); $T(\theta_s)$ 为入射方向上(太阳-目标路径)总的散射透射率, $T(\theta_v,z)$ 为观测方向上(目标-观测点路径)总的散射透射率。

$$T_\lambda(\theta_s) = \exp\left[-\left(\frac{\psi\delta_{0,\lambda}^m + \zeta\delta_{0,\lambda}^a}{\mu_s}\right)\right], \quad (3)$$

$$T_\lambda(\theta_v,z) = \exp\left[-\left(\frac{\psi\delta_{0,\lambda}^m(z) + \zeta\delta_{0,\lambda}^a(z)}{\mu_v}\right)\right], \quad (4)$$

式中 μ_s 为太阳天顶角的余弦, μ_v 为观测天顶角的余弦, m,a 分别代表大气分子和气溶胶, $\delta_{0,\lambda}^m$ 和 $\delta_{0,\lambda}^a$ 分别为整层分子和气溶胶的光学厚度, $\delta_{0,\lambda}^m(z)$ 和 $\delta_{0,\lambda}^a(z)$ 分别为高度 z 下方的分子和气溶胶光学厚度。 ψ 和 ζ 是为了考虑地表和大气之间的多次散射而使用的两个经验系数。一般取 ψ 等于0.9,而 ζ 取决于气溶胶模型,可由下述经验公式来计算^[19]:

$$\zeta = 0.03658 + 0.1023\alpha + 0.0080\alpha^2, \quad (5)$$

式中 α 为气溶胶 Ångström 指数。

综上所述,(2)式中的目标背景偏振二向反射率 $\rho_{P,\lambda}^{\text{Suf}}(\theta_s,\theta_v,\varphi)$ 即为2.1节介绍的某一观测方向上的地面偏振反射率 $\rho_{P,\lambda}^{\text{Suf}}(i,j;\theta_s,\theta_v,\varphi)$;其余三项如 $T(\theta_s)$ 、 $T_\lambda(\theta_v,L)$ 和 $\rho_{P,\lambda}^{\text{Atm}}(z,\theta_s,\theta_v,\varphi)$ 都与大气散射有关, $T(\theta_s)$ 和 $T_\lambda(\theta_v,L)$ 可根据(3)式和(4)式计算, $\rho_{P,\lambda}^{\text{Atm}}(z,\theta_s,\theta_v,\varphi)$ 可以利用大气矢量辐射传输方程来精确计算。

至此,根据探测器每个波段的波段范围和光谱响应函数,由(2)式求得传感器入瞳处的偏振反射率 $\rho_{P,\lambda}^{\text{APP}}(z,\theta_s,\theta_v,\varphi)$,即可实现基于强度图像及考虑目标背景和大气耦合的光学偏振成像仿真。

在偏振成像仿真过程中,使用基于逐次散射法的6SV程序进行偏振程辐射反射率 $\rho_{P,\lambda}^{\text{Atm}}(z,\theta_s,\theta_v,\varphi)$ 的计算。不但可以模拟卫星高度观测、机载观测、设置目标高程,各种吸收气体的计算、大气分子和气溶胶的散射、解释双向反射分布函数(BRDF)作用和临近效应,以及地气、海气耦合效应;而且通过计算斯托克斯参量,即辐射的强度、垂直和水平量及椭圆偏振度,可以用以分析大气辐射传输中偏振的影响^[20]。

3 偏振图像仿真结果与讨论

使用2012年春季拍摄的航空强度图像,如图1所示。根据2.1节介绍的ISODATA遥感图像分类方法,得到土地分类专题图。根据(1)式,利用地面测得的每种类别地物的偏振反射率值对分类后的图像进行偏振反射率图像转换,所得的地面偏振反射

率图像如图 2 所示。其中,对地物偏振反射率的测量是通过在野外光谱仪探头前放置可以手动旋转偏振方向的偏振片来实现的。测量时,使用了可以调整角度的三脚架以便进行多角度测量,对于每一观测方向,通过转动偏振片分别测得了 0° 、 60° 、 120° 三个线偏振方向的强度值,进而获得了船舶、道路、水

体、干芦苇丛和农田裸土五种地物的偏振反射率值。根据拟仿真的传感器的响应函数和波段带宽,对测得的主平面上、不同观测天顶角下的偏振反射率进行积分,获得波段范围(0.647~0.693 nm)之间的 5 种地物不同观测方向上的偏振反射率如表 1 所示。

表 1 主平面上不同观测天顶角下的 670 nm 波段地物偏振反射率

Table 1 Measured surface polarized bidirectional reflectance of different view Zenith angles under 670 nm band in principal plane

View zenith angle / ($^\circ$)	Surface polarized bidirectional reflectance / %				
	Road	Ship	Water	Dryreedbeds	Bare soil of farmland
0	2.2150	0.7943	0.0792	1.4285	1.4749
15	2.2945	1.9301	0.2012	1.5895	1.8619
30	4.4354	5.4665	0.7523	1.6889	2.3142
45	5.5445	10.3508	1.8859	2.4462	3.0080
60	7.1009	16.4089	2.3566	—	3.8509
-15	0.5763	0.2996	0.0645	0.8196	0.9270
-30	1.0852	0.8517	0.0771	0.1848	0.2326
-45	0.5217	0.7815	0.1552	0.1959	0.2753
-60	0.8528	1.5978	0.3379	—	0.8170



图 1 航空拍摄的强度图像

Fig. 1 Airborne intensity image

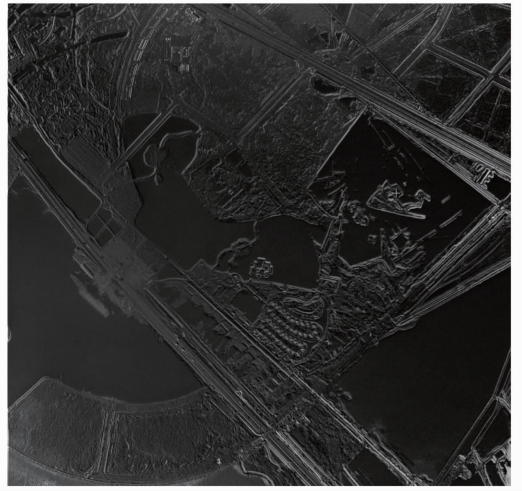


图 2 地面偏振反射率图像

Fig. 2 Surface polarized reflectance image

根据上述地面偏振反射率图像和 2.2 节介绍的传感器入瞳处偏振反射率图像仿真方法,再利用(3)式、(4)式和 6SV 程序分别计算出 $T(\theta_s)$ 、 $T_\lambda(\theta_s, L)$ 以及 $\rho_{P,\lambda}^{Att}(z, \theta_s, \theta_v, \varphi)$, 最终实现传感器入瞳处偏振反射率图像的仿真,其结果分别如图 3(a) 和(b) 所示。图中在利用 6SV 计算 $\rho_{P,\lambda}^{Att}(z, \theta_s, \theta_v, \varphi)$ 时, 设定太阳天顶角为 48.99° 、方位角 128.93° ; 观测天顶角为 -45° 、方位角 128.93° ; 大气模式为中纬度冬季; 气溶胶模型为大陆模型; 观测高度为卫星高度; 波段带宽为 $0.647\sim 0.693$ nm; 大气能见度分别为 5 km 和 25 km。

同时,使用航空强度图像进行了卫星高度的强度仿真,其方法参考文献[18]。图 3(c)和图 3(d)为强度仿真结果,图中在使用 6SV 进行大气散射量计算时,设定的几何条件、大气条件是图 3(c)和图 3(a) 相同,图 3(d)和图 3(b)相同。通过对比 4 张图像不难看出,无论偏振仿真图像还是强度仿真图像,在相同几何条件下,大气能见度低的图像更模糊,反之则更清晰;在几何条件和大气条件均相同时,偏振仿真图像比强度仿真图像更清晰,这直观地反映出了相比于强度成像,偏振成像受大气中雾霾的影响较弱,更适于较恶劣大气条件下的目标探测。

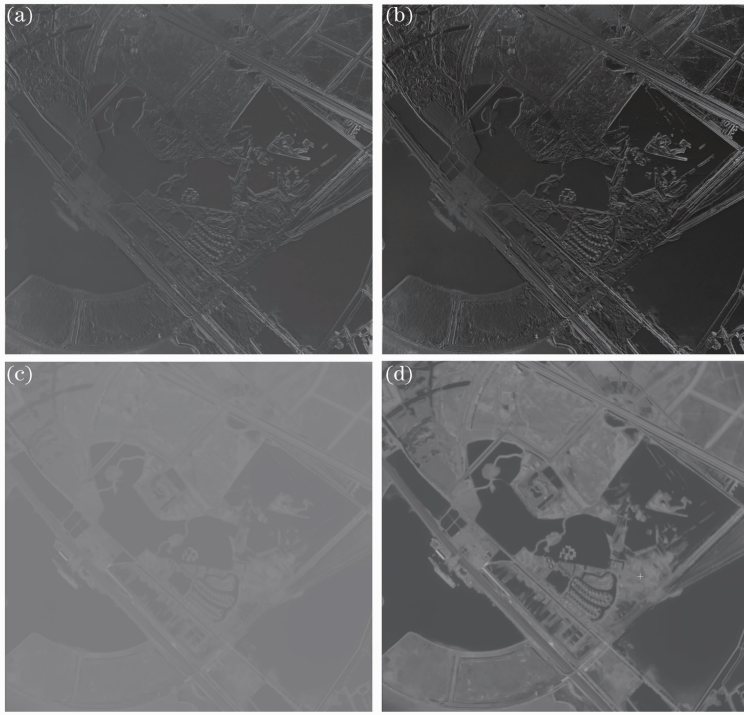


图 3 强度仿真和偏振仿真的对比结果。(a)能见度 5 km 的偏振仿真图像；(b) 能见度 25 km 的偏振仿真图像；
(c)能见度 5 km 的强度仿真图像；(d)能见度 25 km 的强度仿真图像

Fig. 3 Comparison of intensity imaging simulation and polarization imaging simulation. (a) Polarization simulated images when visibility is 5 km; (b) polarization simulated images when visibility is 25 km; (c) intensity simulated images when visibility is 5 km; (d) intensity simulated images when visibility is 25 km

为了定量地展现天气条件对偏振以及强度图像的影响,进一步仿真获得了多个能见度条件下传感器入瞳处的偏振图像和强度图像,然后计算其对比度,以此来比较天气条件对两类图像清晰度的影响情况。对比度,即图像灰度反差的大小,它是表征图像画质清晰度的主要参量,是图像中明暗区域最亮的白和最暗的黑之间不同亮度层级的测量。在图像中目标背景的对比度的计算公式如下^[21]:

$$C = \sum_{\delta} \delta^2(i, j) P_{\delta}(i, j), \quad (6)$$

式中 C 为图像对比度, $\delta(i, j) = |i - j|$, 即图像相邻像素间的灰度差, $P_{\delta}(i, j)$ 为灰度差为 δ 的像素分布

概率。

表 2 列出了根据(6)式算出的不同能见度条件下(1、5、10、15、20、25 km)两个观测方向上偏振仿真图像和强度仿真图像的对比度。仿真过程中使用的大气条件除能见度外均与图 3 相同,只是两个观测方向分别为 $(-45^{\circ}, 128.93^{\circ})$ 和 $(45^{\circ}, 128.93^{\circ})$, 它们对应的散射角分别为 86.01° 和 176.01° , 分别代表了两侧散射和后向散射两种情况。从表 2 中可以看出,无论偏振图像还是强度图像,其对比度都随能见度的降低而减小,但是偏振图像的对比度普遍高于强度图像的对比度,特别是在低能见度和后向

表 2 偏振仿真图像和强度仿真图像的对比度计算结果

Table 2 Contrast results of polarization simulated images and intensity simulated images

Visibility /km	Contrasts of polarizationsimulated images		Contrasts of intensity simulated images	
	$(-45^{\circ}, 128.93^{\circ})$	$(45^{\circ}, 128.93^{\circ})$	$(-45^{\circ}, 128.93^{\circ})$	$(45^{\circ}, 128.93^{\circ})$
25	107.025	122.025	90.36	64.17
20	105.315	121.83	81.72	57.69
15	105.045	121.56	69.21	48.51
10	100.875	121.035	49.95	35.01
5	67.635	119.475	20.7	15.21
1	21.435	95.34	0.243	0.225

散射方向上,其差异更为显著。另外,从观测方向来看,在某些特殊方向上,即使大气能见度很低,通过偏振成像也能获得较高的对比度,而强度探测的方向选择性弱,无法突显该属性。这表明,通过偏振成像仿真分析,可用于指导选择特定的方向进行偏振探测,以便充分发挥偏振成像在目标识别上的优势。

4 结 论

提出了基于强度图像和地物偏振反射率数据的光学遥感偏振成像仿真方法,借助于现有的航空、航天辐射强度探测器拍摄的影像以及地面测量的目标背景偏振二向反射率数据,利用大气矢量辐射传输软件包进行大气修正,可实现不同大气条件和不同几何条件下的偏振成像仿真,以便解决缺乏偏振成像探测器条件下的偏振遥感理论分析问题。另外,掌握各种目标及背景的偏振特性,把握偏振遥感图像的特征规律,也能为使用偏振信息进行目标探测提供数理依据。

通过地物偏振反射率和反射率仿真图像对比度的定量比较表明,相比于强度成像,偏振成像受大气的影响普遍较弱;在某些特定方向上,即便在恶劣的大气条件下仍然能够保持较好的图像对比度。通过仿真分析,选定特殊方向进行偏振探测,可以充分发挥在雾霾等较差大气条件下运用偏振遥感技术进行目标探测的优势,以便进一步提高目标识别的效能。

参 考 文 献

- 1 J T Scott, D H Goldstein, D B Chenault, *et al.*. Polarization in remote sensing—introduction [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(22): 5451—5452.
- 2 Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, *et al.*. The present research and developing trend of polarization remote sensing [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(12): 1237—1240.
张朝阳,程海峰,陈朝辉,等.偏振遥感的研究现状及发展趋势[J].*激光与红外*, 2007, 37(12): 1237—1240.
- 3 M J Duggin, W G Egan, Y J Gregpr. Measurements of polarization of targets of differing albedo and shadow depth [C]. *SPIE*, 1999, 3699: 212—217.
- 4 M J Duggin, R Loe. Algorithms for target discrimination and contrast enhancement using narrowband polarimetric image data [C]. *SPIE*, 2001, 4481: 247—256.
- 5 J Kerekes, D Landgrebe. Modeling, Simulation, and Analysis of Optical Remote Sensing Systems [D]. West Lafayette: School electrical Engineering Purdue University, 1989.
- 6 A Böerner, L Wiest, P Keller, *et al.*. SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems [J]. *ISPRS J Photogr Remote Sensing*, 2001, 55(5-6): 299—312.
- 7 Yi Weining, Gu Youlin, Du Lili, *et al.*. Introduction of optical remote sensing imaging simulation system [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 459—463.
易维宁,顾有林,杜丽丽,等.光学遥感图像仿真软件 ORSIS 介绍 [J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(6): 459—463.
- 8 D P Michael, J P Kerekes. Modeling and measurement of optical

- polarimetric image phenomenology in a complex urban environment [C]. *IEEE*, 2010: 4389—4392.
- 9 D P Michael, A D Raisanen, D R Pogorzala, *et al.*. Dynamic scene generation, multimodal sensor design, and target tracking demonstration for hyperspectral/polarimetric performance-driven sensing [C]. *SPIE*, 2010, 7672: 76720T.
- 10 Ma Shuai, Bai Tingzhu, Cao Fengmei, *et al.*. Infrared polarimetric scene simulation based on bidirectional reflectance distribution function model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3357—3361.
马 帅,白廷柱,曹峰梅,等.基于双向反射分布函数模型的红红外偏振仿真[J].*光学学报*, 2009, 29(12): 3357—3361.
- 11 Chen Xingfeng, Gu Xingfa, Cheng Tianhai, *et al.*. Simulation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sunglint [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1648—1653.
陈兴峰,顾行发,程天海,等.真实海洋表面的太阳耀光偏振辐射特性仿真与分析[J].*光谱学与光谱分析*, 2011, 31(6): 1648—1653.
- 12 Lin Jinjin. Modeling and Simulation of Skylight Polarization Pattern [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
林金金.大气偏振建模与仿真研究[D].合肥:合肥工业大学, 2010.
- 13 Sun Xuejin, Li Hao, Tang Liping. Study on atmosphere volume scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0501001.
孙学金,李 浩,唐丽萍.可见光和红外波段大气体散射偏振度特性研究[J].*光学学报*, 2011, 31(5): 0501001.
- 14 J P Zhang, J W Chen, B Zou, *et al.*. Modeling and simulation of polarimetric hyperspectral imaging process [C]. *IEEE*, 2012, 50(6): 2238—2253.
- 15 Cui 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.
- 16 Qiu Zhenwei, Hong Jin, Li Shuang, *et al.*. Methods to simultaneously achieve radiometric and polarimetric accuracy for multichannel ultra-wide-angle polarimetric camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0828003.
裘桢炜,洪 津,李 双,等.多通道超广角偏振相机辐射精度和偏振精度的同时实现方法[J].*光学学报*, 2013, 33(8): 0828003.
- 17 Shi Zepeng, Ma Youhua, Wang Yujia, *et al.*. Review on the classification methods of land use/cover based on remote sensing image [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(12): 273—278.
史泽鹏,马友华,王玉佳,等.遥感影像土地利用/覆盖分类方法研究进展[J].*中国农学通报*, 2012, 28(12): 273—278.
- 18 Gu Youlin, Qiao Yanli, Yi Weining. Application of satellite image in the scene simulation of thermal infrared [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 247—254.
顾有林,乔延利,易维宁.卫星影像在热红外外场景仿真中的应用[J].*红外与激光工程*, 2008, 20(14): 247—254.
- 19 F Waquet, J F Léon, B Cairns, *et al.*. Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(6): 1228—1236.
- 20 S Y Kotchenova, E Vermote, R Matarrese, *et al.*. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(26): 6762—6774.
- 21 Ding Guoge. Research on Area Array CCD Camera Simulation System [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Science, 2013. 47—49.
丁国歌.面阵 CCD 相机仿真系统研究[D].合肥:中国科学院合肥物质科学研究院, 2013. 47—49.