

文章编号 2095-1531(2016)05-0547-07

基于偏振特性对石英玻璃和绿漆涂层的反演

苏志强^{1,2}, 颜昌翔^{1*}, 张军强¹, 杨斌^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 物质的偏振特性与其复折射率、表面粗糙度以及观测几何条件有关,为了应用偏振探测技术实现对目标的定量反演,本文首先对两种典型目标(绿漆涂层和石英玻璃)的偏振特性进行了实验测定,并对偏振度与探测天顶角的关系进行了分析。利用实验数据并基于描述目标偏振特性的PG模型首次在考虑了粗糙度的影响下,对目标的折射率、消光系数进行了定量反演,最后将反演结果与参考结果进行比较。结果表明,石英玻璃的折射率相对误差为4.944 9%,绿漆涂层的折射率与消光系数的相对误差分别为11%和21.558 9%。该方法在考虑表面粗糙度的条件下能够更精确地测定物质的复折射率,同时也为偏振技术应用于目标定量反演提供了依据。

关键词: 偏振遥感; 目标识别; 复折射率; 粗糙度

中图分类号: O436.3 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20160905.0547

Inversion of quartz glass and green paint based on polarization characters

SU Zhi-qiang^{1,2}, YAN Chang-xiang^{1*}, ZHANG Jun-qiang¹, YANG Bin^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yanxc@ciomp.ac.cn

Abstract: The polarization characters of the material are connected with its complex refractive index, roughness of the surface and the observation conditions. In order to apply polarization detection technology to achieve the target's quantitative retrieval, firstly, the polarization characters of two typical objects (a kind of green paint and quartz glass) are measured in this paper, and an analysis on the relationship between DOP and detection zenith angle is carried out. Then, considering the influence of the roughness, the refractive index and extinction coefficient are quantified inverted for the first time based on the experimental data and the PG model describing objects' polarization properties. Finally, comparison is made between the inverse result

收稿日期: 2016-04-02; 修订日期: 2016-06-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2011AA12A103), 长春光机所创新资助项目(No. Y4CX1SS143)

Supported by National High-tech R&D Program of China(No. 2011AA12A103), Innovation Fund Project of CIOMP(No. Y4CX1SS143)

and the reference data. The result shows that the relative error of the refractive index for the quartz glass is 4.944 9% and the relative error of refractive index and extinction coefficient for the green paint is 11% and 21.558 9% respectively. By considering the roughness of the objects, this method can retrieve the complex refractive index more accurately and it also provides the gist for polarization detection used in quantitative inversion.

Key words: polarization remote sensing; object detection; complex refractive index; roughness

1 引言

偏振是光作为横波的重要特征,是指在垂直于传播方向的平面内,光的电矢量振动失对称的现象。光与不同物质作用后,偏振状态的变化不同,即反射光偏振状态的变化包含着与其作用的物质的信息。

不同物质的偏振特性一般有较大不同,应用偏振探测技术对目标进行探测成为一种新的目标探测方式,并已应用在遥感领域对大气气溶胶进行探测,可以有效获得气溶胶粒子的粒径、复折射率、光学厚度等参数^[1]。在对地面目标的偏振特性的研究中,发现偏振技术可以显著提高目标与背景之间的对比度,有效地提高目标检测效率^[2]。自20世纪70年代开始,国内外在目标的偏振特性等方面展开了广泛的研究,其中,美国很多机构开展了包括目标的偏振特性、偏振的基本理论以及偏振探测仪器的研制与应用等方面的研究。法国研制的POLDER应用偏振技术成功地对气溶胶进行了反演,成为偏振应用的典型代表。国内,东北师范大学赵云升课题组率先开展了偏振领域的研究,取得了大量的成果。目前,北京大学^[3]、西北工业大学^[4]、西安交通大学^[5]、中科院长春光机所^[6]以及安徽光机所^[7]等单位也都在偏振成像、偏振遥感等方面开展了研究,中国宇航协会光电技术专业委员会多次主办国际前沿光学成像技术与应用学术研讨会,重点对偏振技术的理论与应用进行了讨论。

由于地面目标纷繁复杂,而偏振特性受多种因素影响,难以用统一的物理规律描述,导致偏振信息数据库以及描述目标偏振特性的物理模型难于建立,这两方面直接限制了偏振技术在对地定

量遥感中的应用。西安工业大学高明等人基于偏振模型对偏振度与入射角、方位角以及复折射率的关系进行了数值模拟,结果表明这些因素都对目标的偏振特性有较大影响^[8]。北京大学晏磊、赵虎等人以典型地物目标岩石为对象进行研究,基于折射定律与洛伦茨-洛伦兹公式对岩石的反射光的偏振度与岩石密度的关系进行了讨论,提出了基于偏振光谱反演矿物密度的方法,并对橄榄岩、辉岩等典型矿物的密度进行了反演^[9],结果与真值符合较好,进一步将此方法推广,应用到对星体表面密度的测量。Melissa A. Sawyer基于偏振特性对玻璃、树叶以及金属(铝、金、绿漆涂层)等材料的折射率与消光系数进行了反演,并与材料的色散方程相结合,实现了对所有波段的复折射率同时反演^[10]。

然而,物质的偏振特性不仅与其材质(复折射率)有关,还与其表面粗糙度有关。表面粗糙度越大,反射光中漫反射成分越强,其偏振度越低,反之,表面越光滑,偏振度越大。考虑到表面粗糙度对目标偏振特性的影响后,对目标的复折射率能够进行更准确的反演,进而应用到目标的分类与检测。本文在考虑粗糙度对物质偏振特性的影响后,利用实验获得数据,并基于PG模型对物质的复折射率与表面粗糙度进行了定量反演,并与参考结果进行了比较分析,结果表明,偏振探测技术可以有效地对目标进行反演,为偏振定量遥感提供了一定的参考。

2 基本理论

物质的偏振特性表现为光与物质作用后,反射光偏振状态的改变,包括对入射光的起偏、退偏、双向衰减以及位相延迟等^[11],物质的偏振特

性由偏振双向反射分布函数(BPDF)表征,BPDF是一个四阶方阵(即Muller矩阵),在不考虑圆偏振分量时,退化为三阶。定义为式(1)^[12]:

$$\begin{bmatrix} L_0 \\ L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{00} & F_{01} & F_{02} \\ F_{10} & F_{11} & F_{12} \\ F_{20} & F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 L 是反射光的辐亮度的斯托克斯矢量, E 是入射光的辐照度的斯托克斯矢量,三阶方阵 F 即为目标的偏振双向反射分布函数。

基于小面元模型以及菲涅尔反射理论推导出的偏振双向反射分布函数模型为^[12]:

$$f_{ij}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) = \frac{\exp\left(-\frac{\tan^2\alpha}{2\sigma^2}\right) \times G(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) \times m_{ij}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)}{8\pi\sigma^2 \cos^2\alpha \cos\theta_i \cos\theta_r}, \quad (2)$$

式中 θ_i 是入射天顶角, θ_r 是反射天顶角, $\Delta\phi$ 是相对方位角, σ 是指表面高斯谱粗糙度。在 $\Delta\phi = 180^\circ$ 时 $\alpha = \frac{\theta_i + \theta_r}{2}$ 。

G 表示由于表面粗糙而引起的遮蔽效应,由几何光学定律得出其表达式如下^[13-14]:

$$G(\theta_i, \theta_r) = \min\left[1, \frac{2\cos\theta_i \cos\alpha}{\cos\left(\frac{\theta_i - \theta_r}{2}\right)}, \frac{2\cos\theta_r \cos\alpha}{\cos\left(\frac{\theta_i - \theta_r}{2}\right)}\right], \quad (3)$$

$m_{ij}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)$ 是反射表面的 Muller 矩阵。

假设入射光是无偏光,相对方位角是 180° ,并且材料对入射光没有吸收,则出射光的偏振度可以表达为^[14]:

$$DoP(n, k, \sigma, \theta_i, \theta_r) = \left(\frac{R_s - R_p}{R_s + R_p}\right) \left\{ \frac{\Gamma(\theta_i, \theta_r, \pi, \sigma)}{\Gamma(\theta_i, \theta_r, \pi, \sigma) + [(1 - \rho_{HDR}^{s, PEC})/\pi]} \right\}, \quad (4)$$

其中,物质的复折射率 $\eta = n + ik$, n 是复折射率实部,决定了电磁波在物质中的传播速度,是光学中最重要的一个物理量, k 是复折射率虚部,表示物质对电磁波的吸收情况,称为消光系数。 R_s, R_p 是分别为平行和垂直于入射面的 Fresnel 反射比分量方程,是复折射率以及入射角度的函数^[15],另外,式(4)中 $\Gamma(\theta_i, \theta_r, \pi, \sigma)$ 和 $\rho_{HDR}^{s, PEC}$ 分别具有如下

形式^[16]:

$$\Gamma(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi, \sigma) = \frac{G(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) \exp\left(-\frac{\tan^2\alpha}{2\sigma^2}\right)}{8\pi\sigma^2 \cos\theta_i \cos\theta_r \cos^4\alpha}, \quad (5)$$

$$\rho_{HDR}^{s, PEC} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f_{00}^{s, PEC} \cos\theta_i \sin\theta_r d\theta_r d\Delta\phi, \quad (6)$$

$\rho_{HDR}^{s, PEC}$ 是目标的半球方向反射分布函数,被积函数中 $f_{00}^{s, PEC}$ 即式(2)中 $i=j=0$ 时的值。

上述模型中同时包含了物质的复折射率以及表面粗糙度参数,可以对目标的固有参数进行定量反演。

3 实验

实验仪器采用东北师范大学偏振测量重点实验室的多角度测量平台^[17],由长春光机所和东北师范大学合作研制,该仪器可以用来测量目标的双向反射特性和偏振反射特性。仪器由光源系统、控制系统以及探测系统三部分组成。光源是卤钨灯,利用 ASD FieldSpec 3 波谱仪测定反射光的强度值,光谱仪的有效波段范围是 350 ~ 2500 nm,波谱仪的光纤镜头前配有偏振棱镜,在镜头前配置不同方向的偏振片,即可测出相应方向的偏振光强。图 1 为实验仪器图。

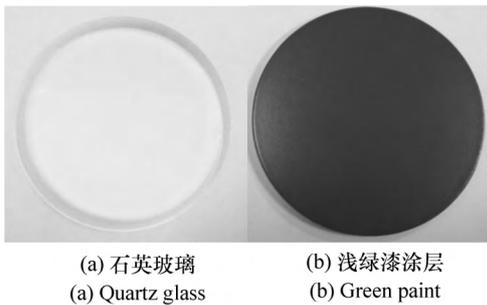


图 1 多角度偏振测量平台

Fig. 1 Multi-angle polarization measurement platform

实验测量对象是两种典型目标:常用的石英

玻璃和一种绿漆涂层,样品直径分别为 72 mm、100 mm,厚度为分别为 8 mm、5 mm,如图 2 所示。



(a) 石英玻璃 (a) Quartz glass
(b) 浅绿漆涂层 (b) Green paint

图 2 石英玻璃和浅绿漆涂层

Fig. 2 Quartz glass and green paint

实验测量时,设定光源入射天顶角为 45° 相对方位角为 180° ,即在光源入射主平面内对目标进行探测。探测天顶角选择为 $30^\circ \sim 60^\circ$,间隔为 2.5° 的 13 个角度以及 0° 、 10° 、 20° 和 65° 、 70° ,共计 18 个角度,探测角度由步进电机调节。将待测样品水平放置在圆形载物台上,结合样品的大小以及波谱仪探头视场,计算出探头的合适高度,以满足大角度探测时探头接收的能量全部来自目标反射。在不同的探测天顶角处分别测出 0° 、 45° 、 90° 以及 135° 方向的偏振光强,根据式 (7) 式求解出反射光斯托克斯矢量:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(I_{0^\circ} + I_{90^\circ} + I_{45^\circ} + I_{135^\circ}) \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

进一步,按照式 (8) 求解出反射光的偏振度:

$$DoP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}. \quad (8)$$

4 实验数据分析与处理

4.1 两种物质的偏振特性

波谱仪可同时获得反射光中 350 ~ 2 500 nm 波段的偏振光强,即可获得不同波长的偏振度信息。图 3 为 550 nm 时,两种物质的偏振度随探测角度的变化关系,其中探测角度较小 (0° 、 10° 、 20°) 以及大角度探测时 (65° 、 70°) 目标的反射光的能量较低,受波谱仪信噪比限制,获取的数据不

能真实反映物质的性质,故这里只考虑 $30^\circ \sim 60^\circ$ 探测时的偏振度变化情况。

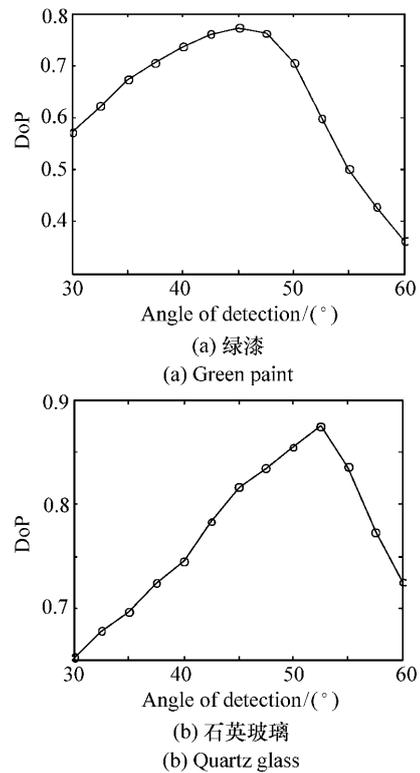


图 3 偏振度随探测角度的变化曲线

Fig. 3 DOP curves response with the detection angle

图 3 (a)、3 (b) 分别是经过绿漆涂层以及石英玻璃反射后反射光的偏振度曲线,所选波长为 550 nm,可以看出,两种物质的反射光的偏振度随着探测角度的增加先增大后减小,在镜面反射方向附近出现偏振度最大值,当探测角度过大时,偏振度下降。

由两种物质的偏振度曲线可以看出,对于两种光谱反射率相近的物质,其偏振光谱可能有较大不同,同时由于角度效应引起的偏振特性的不同也可以作为目标检测与伪装识别的重要依据,表现了偏振技术在目标识别中的巨大潜力。

4.2 对目标的定量反演

由式 (4) 可知,偏振度是 $(n, k, \sigma, \theta_i, \theta_r, \Delta\phi)$ 的多元非线性函数,其中 (n, k, σ) 是目标的固有属性,可以作为目标定量识别的物理参数,并可作为不同目标进行区分的依据。 $(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi)$ 是实际对目标进行观测的几何参数,由实验条件决定。对目标进行定量反演的具体过程如下:

(1) 采集实验数据,记录实验条件。包括光源入射天顶角、探测天顶角以及不同探测天顶角的偏振光强。

(2) 计算在固定波长、不同探测角度下的偏振度。

(3) 以式(4)为拟合模型,由于对 (n, k, σ) 3个参数进行反演,所以需要至少4个探测角度的偏振度信息才能利用MATLAB由非线性最小二乘法拟合得到目标的3个参数,实现参数的定量反演。

下面选择波长为550 nm时,不同的角度组合对两种物质进行反演,反演结果分别如表1和表2。

表1 不同探测角度时对绿漆的反演结果

Tab.1 Inversed results of the green paint at different detection angles

探测角度个数	n	k	σ
5	1.240 8	0.411 2	0.056 4
6	1.270 2	0.412 1	0.049 4
7	1.200 4	0.416 7	0.054 9
平均值	1.237 1	0.413 3	0.053 6

表2 不同探测角度时对石英玻璃的反演结果

Tab.2 Inversed results of the quartz glass at different detection angles

探测角度个数	n	k	σ
5	1.527 3	0.266 5	0.015 0
6	1.540 9	0.184 5	0.013 8
7	1.528 8	0.167 4	0.013 4
平均值	1.532 3	0.206 1	0.014 0

由于镜面反射方向能量以及偏振度较高,相应的采集的数据的信噪比较高,为了提高反演结果的准确度,采用的拟合数据在 $35^\circ \sim 55^\circ$ 的9个探测角度中选择。

4.3 反演结果与实际结果的比较

表3中绿漆涂层的折射率与消光系数的参考值由工厂提供,石英玻璃的折射率与消光系数由光学手册或文献[18]查询得到,并利用椭偏仪进行了实测。

表3 实验样品参数的参考值

Tab.3 Reference value of the samples

实验样品	n	k
绿漆	1.39	0.34
石英玻璃	1.460 1	0

将反演结果与参考结果进行比较,对于石英玻璃来说,折射率相对误差为4.944 9% [18],误差较小。浅绿漆折射率相对误差为11%,消光系数相对误差为21.558 9%,相对误差较大。由于玻璃的消光系数为0,不考虑其相对误差。从反演结果来看,消光系数较折射率实部小很多,即材料对光吸收较小,可以认为材料属于电介质。

从反演的粗糙度信息看,石英玻璃的粗糙度小于绿漆涂层的粗糙度,即石英玻璃的表面应该比绿漆涂层表面光滑,实际上石英玻璃是经过抛光处理的,而绿漆涂层表面颗粒较大,相对粗糙,与反演结果一致。一般来说,人造目标比相对自然目标较光滑,基于此技术对粗糙度进行定量反演,是区分人造目标与自然目标的有效方法,在军事应用中有较大的应用潜力。

然而,反演结果与参考结果存在一定的偏差,误差产生的主要原因有:

(1) 实验误差:包括样品未能水平放置、探测天顶角的角度误差、环境杂光的影响等因素。

(2) 仪器精度误差:由于仪器的偏振测量精度的不足所带来的误差不可避免,这也是反演结果与参考结果有一定误差的重要原因。高精度的偏振探测仪器的研制是偏振探测技术在遥感领域获得应用的必要条件,是新型遥感技术发展的一个关键环节,偏振探测仪器的精度直接决定了其获取遥感数据的有效性。

(3) 反演模型的误差:尽管式(4)能较好地描述物质的偏振特性,然而,由于模型做了较多的假设,比如假设了漫反射光服从朗伯定律、假设物质为理想电导体,即对光没有吸收作用以及表面形态的分布不完全符合高斯分布等,都会与实际情况不一致。

通过高精度偏振探测仪器获取偏振数据,并进一步完善反演模型,将能够提高反演精度,使得偏振探测技术在对地遥感观测领域得以应用。

5 结 论

为实现利用偏振技术对目标进行反演,本文对两种典型目标的偏振特性进行了测量,并根据测量数据,在考虑表面粗糙度的偏振特性的影响下,对目标的折射率、消光系数以及表面粗糙度进行了定量反演,对于石英玻璃,折射率的相对误差为4.944%,对绿漆涂层,其折射率和消光系数的相对误差分别为11%和21.558%,在考虑了

粗糙度的影响后,反演得到的复折射率更接近真值,同时,反演得到的粗糙度信息也可以作为目标检测与分割的参数。从实际反演的结果看,反演结果与实际结果有一定偏差,这是受探测仪器的精度所限,仪器的精度越高,相应的反演结果相对误差越小。所以,高精度的偏振探测仪器是偏振技术应用于遥感探测的必要条件。通过此种方法对目标的复折射率进行测定也成为一种新的有效的探测方法。

参考文献:

- [1] MISHCHENKO M I, TRAVIS L D. Satellite retrieval of aerosol properties over the ocean using polarization as well as intensity of reflected sunlight [J]. *Geophys. Res.* 1997, 102: 16989-17014.
- [2] QIUT W, ZHANG Y, LI J, CHEN J *et al.*. Target information enhancement using polarized component of infrared images [J]. *SPIE* 2014, 9300(12): 1-6.
- [3] 晏磊, 相云, 李宇波, 等. 偏振遥感研究进展 [J]. *大气与环境光学学报* 2010, 5(3): 162-174.
YAN L, XIANG Y, LI Y B *et al.*. Progress of polarization remote sensing research [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics* 2010, 5(3): 162-174. (in Chinese)
- [4] 赵永强, 潘泉, 程咏梅. 成像偏振光谱遥感及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
ZHAO Y Q, PAN Q, CHENG Y M. *Imaging Spectropolarimetric Remote Sensing and Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [5] 李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术 [J]. *中国光学* 2013, 6(6): 803-809.
LI SH J, JIANG H L, ZHU J P *et al.*. Development status and key technologies of polarization imaging detection [J]. *Chinese Optics* 2013, 6(6): 803-809. (in Chinese)
- [6] DAI H, YAN C X. Measurement errors resulted from misalignment errors of the retarder in a rotating-retarder complete Stokes polarimeter [J]. *Optical Express* 2014, 22(11): 11869-11883.
- [7] 宋茂新, 孙斌, 孙晓兵, 等. 航空多角度偏振辐射计的偏振定标 [J]. *光学精密工程* 2012, 20(6): 1153-1158.
SONG M X, SUN B, SUN X B *et al.*. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.* 2012, 20(6): 1153-1158. (in Chinese)
- [8] 高明, 宋冲, 巩蕾, 等. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙面光散射偏振特性研究 [J]. *中国激光* 2013, 40(12): 1-6.
GAO M, SONG CH, GONG L. Analysis of polarization characteristics about rough surface light scattering based on polarized bidirectional reflectance distribution function [J]. *Chinese J. Lasers* 2013, 40(12): 1-6. (in Chinese)
- [9] 朱兴, 赵虎, 叶小杭, 等. 岩石矿物的偏振反射光谱与物质折射率的关系研究 [J]. *遥感信息* 2012, 13(3): 67-70.
ZHU X, ZHAO H, YE X H *et al.*. Relationship between spectral reflectance of polarization and refractive index of mineral rock [J]. *Remote Sensing Information* 2012, 13(3): 67-70. (in Chinese)
- [10] SAWYER M A. Material characterization using passive multispectral polarimetric imagery [D]. Ohio: Air University of Technology, 2013.
- [11] 王燕涛. 用于激光偏振探测的穆勒矩阵研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
WANG Y T. Study on Muller matrix for laser polarization detection [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012. (in Chinese)
- [12] 王霞, 邹小凤, 金伟其. 粗糙表面反射辐射偏振特性研究 [J]. *北京理工大学学报* 2011, 31(11): 1327-1333.
WANG X, ZOU X F, JIN W Q. Study of polarization properties of radiation reflected by roughness objects [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology* 2011, 31(11): 1327-1333. (in Chinese)

- [13] HYDE IV M W ,SCHMIDT J D ,HAVRILLA M J. Determining the complex index of refraction of an unknown object using turbulence-degraded polarimetric imagery [J]. *Optical Engineering* 2010 49(12) : 126201(1-11) .
- [14] HYDE IV M W ,SCHMIDT J D ,HAVRILLA M J. A geometrical optics polarimetric bidirectional reflectance distribution function for dielectric and metallic surfaces [J]. *Optics Express* 2009 17(24) : 22138-22153.
- [15] 刘卿,战永红,杨迪,等. 粗糙表面偏振二向反射特性建模方法研究 [J]. 飞行器测控学报 2014 33(4) : 354-359.
LIU Q ,ZHAN Y H ,YANG D *et al.* . Methods of modeling of polarized BRDF of rough surfaces [J]. *J. Spacecraft TT&C Technology* 2014 33(4) : 354-359. (in Chinese)
- [16] PRIEST R G ,MEIER S R. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces [J]. *Opt. Eng.* 2002 41(5) : 988-993.
- [17] 晏磊,陈伟,杨彬,等. 偏振遥感物理 [M]. 北京: 科学出版社 2014 12.
YAN L ,CHEN W ,YANG B *et al.* . *Polarization Remote Sensing Physics* [M]. Beijing: Science Press 2014 12. (in Chinese)
- [18] 李景镇. 光学手册 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社 2010.
LI J ZH. *Handbook of Optics* [M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press 2010. (in Chinese)

作者简介:



苏志强(1989—)男,吉林榆树人,硕士研究生,2013年于吉林大学获得学士学位,主要从事地物目标的偏振探测技术方面的研究。E-mail: suzq927@sina.com



颜昌翔(1973—)男,湖北洪湖人,博士,研究员,1995年于长春光学精密机械学院获得学士学位,1998年于浙江大学获得硕士学位,2001年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事空间光学遥感仪器的光机电一体化技术、空间光学遥感成像原理,多光谱、超光谱空间遥感成像相关技术方面的研究。E-mail: yancx@ciomp.ac.cn