

基于大气辐射传输模型的地物偏振反射率反演方法

赵慧洁, 邢健, 贾国瑞*

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要:提出一种基于大气矢量辐射传输模型的地物偏振反射率反演方法. 利用辐射传输模型, 建立地表反射率、观测条件与传感器入瞳处辐亮度偏振态的查找表, 再进行查找表反查及数值计算, 完成偏振反射率反演. 验证实验表明, 典型地面目标物的偏振反射率反演精度可达到 90%.

关键词:偏振反射率; 反演; 大气矢量辐射传输模型

中图分类号:P4 **文献标识码:**A

Polarization reflectance retrieval method based on atmospheric radiative transfer model

ZHAO Hui-Jie, XING Jian, JIA Guo-Rui*

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Current polarization detection is mainly based on the polarization state of at-sensor radiance, which can enhance objects of interest or restrain background disturbance qualitatively. There is only empirical linear method for polarized reflectance retrieval of ground objects, which is inadequate in terms of adaptability and real-time capability under varied observation conditions. A polarized reflectance retrieval method based on polarized atmospheric radiative transfer model is hereby proposed. A lookup table (LUT) is established by using the radiative transfer model to illustrate the relationship among polarized reflectance, observation condition and at-sensor polarization state. Polarized reflectance can then be retrieved using the LUT combined with numerical calculation. Results show that the retrieval accuracy of polarized reflectance of typical ground objects can be up to 90%.

Key words: polarized reflectance, retrieval, atmospheric polarized radiative transfer model

PACS: 42. 68. Wt

引言

现有的偏振探测研究大多数是由传感器获取的偏振图像计算传感器入瞳处的偏振态. 采用此方法, 美国空军研究室对涂覆军用油漆的铝板做了偏振检测^[1], G. Forssell 和 Y. Aron 等人分别对车辆和帐篷做了野外偏振成像实验^[2-3]. 国防科技大学张朝阳等人利用偏振度和偏振角信息成像分析了军事伪装网的偏振成像特征, 讨论了偏振遥感在识别伪装方面

的优势^[4]. 脉冲功率激光技术国家重点实验室王启超等人提出一种利用地物偏振信息识别伪装目标的方法^[5]. 东北师范大学韩阳等人利用偏振探测方法研究了土壤盐碱化程度的预测^[6]. 这些研究表明, 偏振探测可以在传统探测手段的基础之上, 定性地增强感兴趣地物或抑制背景干扰. 但是, 上述研究均未涉及地物偏振反射率. 不足之处在于传感器获取到的偏振图像包含了大气辐射传输路径上的偏振贡献, 未能将地物自身的偏振特性定量地反演出来, 因

收稿日期:2018-01-03, 修回日期:2018-05-23

Received date:2018-01-03, revised date:2018-05-23

基金项目:国家自然科学基金(61675012), 中央高校基本科研业务费(YWF-17-BJ-Y-151)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61675012) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(YWF-17-BJ-Y-151)

作者简介 (Biography): 赵慧洁(1966-), 女, 辽宁人, 教授, 主要研究方向为光电精密测量、近景工业摄影测量、新型光学遥感探测及高光谱全链路建模与仿真技术. E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jiaguorui@buaa.edu.cn

此在不同观测条件下会产生不同的结果^[7],具有较大的不稳定性.

地物偏振反射率是指地物总反射率中的偏振反射部分,其值等于地物表面反射辐亮度中的偏振分量与入射辐照度之间的比值^[8].西北工业大学赵永强团队利用经验线性法进行地物偏振反射率反演^[9],该方法无需额外的大气参数及精确的大气模型即可获得地物的偏振反射率,但要在偏振探测的同时进行地物样本光谱测量,以确定经验线性法中辐亮度与地物偏振反射率之间的线性参数,对多变观测条件的适应性、实时性方面存在不足.

近年来国内外研究人员提出了多种大气矢量辐射传输模型,模拟在不同观测条件下含偏振的传感器入瞳辐亮度. Coulson table 模型^[10-11]是基于实验获取的数表,精确地描述了瑞利散射形成的天空光在诸多几何条件、表面边界条件与大气光学条件下的强度和偏振特性.但其对于大气偏振态的描述数据量大且查找繁琐,不利于直观地参照对比. RT3 模型^[12-14]采用倍加累加法求解矢量辐射传输方程,基于大气分层理论,结合地面实测数据模拟多种天气条件下天空光偏振态分布.该方法计算稳定且精度高,但地表不能设置偏振特性.因此本文采用 6SV 大气偏振辐射传输模型^[15],其运算高效、输入量易获取,且数据输出简洁、地表可以设置偏振特性.

本文提出基于大气辐射传输模型的地物偏振反射率反演方法.类比基于标量大气辐射传输模型的地表反射率反演方法^[16],基于 6SV 大气偏振辐射传输模型^[15],建立地表反射率、观测条件与传感器入瞳处辐亮度偏振态的查找表,并利用查找表反查及数值计算,实现由遥感偏振图像反演地表偏振反射率,可以适用于不同观测条件下的地物偏振反射率的反演计算.

1 反演方法

地物偏振反射率反演计算的总体流程为:由传感器获取的偏振图像计算得到地物反射辐射在传感器入瞳处的偏振态(偏振度和偏振角),代入观测条件与偏振态的查找表中,通过插值匹配计算,得到地物偏振反射率.其中观测条件与偏振态的查找表是将观测几何参数、大气特性参数、地物偏振反射率、波长参数等代入大气偏振辐射传输模型得到的.流程图如图 1 所示.

1.1 地物反射率反演

传感器入瞳处观测到的辐亮度 \vec{L}_s 由三部分组

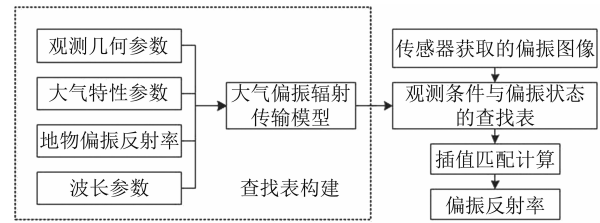


图 1 地物偏振反射率反演流程图

Fig. 1 Flow chart of polarized reflectance retrieval

成:太阳光直射到目标然后反射进入传感器的辐亮度 \vec{L}_r 、天空散射光照到目标然后反射进入传感器的辐亮度 \vec{L}_d 以及程辐射 \vec{L}_u ^[17],即

$$\vec{L}_s = \vec{L}_r + \vec{L}_d + \vec{L}_u \quad (1)$$

且分别有

$$\vec{L}_r = T_r(\theta_r) \mathbf{F}_r(\theta_i, \theta_r, \phi) T_i(\theta_i) \cos\theta_i E_s(\theta_i) \quad (2)$$

$$\vec{L}_d = T_r(\theta_r) \iint_{\Omega_i} \mathbf{F}_r(\theta_i, \theta_r, \phi) \cos\theta_i \vec{L}_d^{\Omega_i}(\theta_i, \phi_i) d\Omega_i \quad (3)$$

$$\vec{L}_u = \vec{L}_u(\theta_r, \phi_r) \quad (4)$$

其中 E_s 为大气层外太阳辐亮度, T_i 为入射太阳光的大气透过率, T_r 为反射光的大气透过率, θ_i 为入射太阳光天顶角, θ_r 为反射光天顶角, ϕ 为相对方位角, ϕ_i 为入射太阳光方位角, ϕ_r 为反射光方位角, \mathbf{F}_r 为偏振二向反射分布函数(pBRDF)^[18], $\vec{L}_d^{\Omega_i}$ 为天空散射光的偏振辐亮度, $d\Omega_i = \sin\theta_i d\theta_i d\phi$ [sr]. 将(2)-(4)代入,得到

$$T_r \mathbf{F}_r T_i \cos\theta_i E_s = \vec{L}_s - T_r \iint_{\Omega_i} \mathbf{F}_r \cos\theta_i \vec{L}_d^{\Omega_i} d\Omega_i - \vec{L}_u \quad (5)$$

大气层外的太阳辐亮度的偏振态是随机的,直射太阳光的反射光在反射通量的镜面反射部分中占主导地位,在参考平面(入射光与反射光组成的平面)附近观测时,由于求解 pBRDF 穆勒矩阵需要不同变化偏振态的照明,这对于被动遥感来说较为困难,因此在太阳直射辐射 \vec{L}_r 的表达中只考虑 pBRDF 穆勒矩阵的第一列,于是式(5)可以转化为

$$\begin{bmatrix} f_{00} \\ f_{10} \\ f_{20} \end{bmatrix} = \frac{\vec{L}_s - T_r \iint_{\Omega_i} \mathbf{F}_r \cos\theta_i \vec{L}_d^{\Omega_i} d\Omega_i - \vec{L}_u}{T_r T_i \cos\theta_i E_s} \quad (6)$$

在可见光以及近红外波段, \vec{L}_r 是 \vec{L}_d 的 5 ~ 10 倍^[17],因此将 \vec{L}_d 看做一个“误差项”,则式(6)可以写成

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} f_{00} \\ f_{10} \\ f_{20} \end{bmatrix} &= \frac{\vec{L}_s - \vec{L}_u}{T_r T_i \cos \theta_i E_s} - \frac{T_r \iint_{\Omega_i} \mathbf{F}_r \cos \theta_i \vec{L}_d^{\Omega_i} d\Omega_i}{T_r T_i \cos \theta_i E_s} \\ &= \frac{\vec{L}_s - \vec{L}_u}{T_r T_i \cos \theta_i E_s} - \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix}, \quad (7) \end{aligned}$$

即

$$\begin{bmatrix} f_{00} + \varepsilon_0 \\ f_{10} + \varepsilon_1 \\ f_{20} + \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \frac{\vec{L}_s - \vec{L}_u}{T_r T_i \cos \theta_i E_s}. \quad (8)$$

且这一“误差项”是由天空光以及地物偏振反射率共同决定,不易直接求解,因此需要建立观测条件与入瞳偏振状态查找表,将观测条件(几何参数、大气参数、地物偏振反射率)与传感器的入瞳偏振状态建立对应关系.基于此方法可以利用遥感图像,通过反查查找表反演 pBRDF,进而得到地物偏振反射率.

1.2 观测条件与入瞳偏振状态查找表构建

地物反射率反演的本质是由传感器获取的地物在入瞳处的偏振度及偏振角计算地物偏振反射率.由传感器入瞳偏振图像,通过对图像的处理得到传感器入瞳处辐亮度的 Stokes 矢量,进而计算偏振度以及偏振角^[17]:

$$\begin{aligned} DOP &= \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (9) \\ AOP &= \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} \end{aligned}$$

其中, DOP 为传感器入瞳处辐亮度的偏振度, AOP 为传感器入瞳处辐亮度的偏振角, $[I, Q, U]$ 为传感器入瞳处辐亮度的 Stokes 矢量.

观测条件与入瞳偏振状态查找表是目标偏振反射率反演的数据库,该查找表基于 6SV 模型构建,其本质是模拟各种不同观测条件下的大气辐射传输过程.式(8)中的 \vec{L}_s 由传感器获取, E_s 、 θ_i 、 \vec{L}_u 由查找表中的观测几何条件确定, T_i 、 T_r 由查找表中气溶胶类型确定.按实际需求设定观测几何条件(照明天顶角、观测天顶角、相对方位角)、大气类型(热带大气模式、中纬度夏季模式、中纬度冬季模式、副极地夏季模式、副极地冬季模式等)、气溶胶类型(大陆型、城市型、海洋型、沙漠型)、波长、高程等数据以及地表标量反射率和偏振反射率,并将上述数据代入 6SV 模型进行计算,得到传感器入瞳处辐亮度的偏振度以及偏振角的仿真值.即查找表的输入量为

几何条件、大气类型、气溶胶类型、高程条件、波长条件等决定的观测条件下,不同的地表标量反射率及地表偏振反射率,输出量为与其对应的传感器入瞳处辐亮度的偏振度以及偏振角的仿真值.

1.3 查找表反查与插值算法设计

根据构建的观测条件与入瞳偏振状态的查找表,将传感器获取的偏振图像的数据,即偏振度和偏振角代入查找表进行反查,运用适当的算法确定偏振图像上每个像元所对应的偏振反射率:

设定一个阈值,将查找表中不满足下式的数据排除:

$$|AOP - \alpha| < \varepsilon, \quad (10)$$

其中 α 为传感器入瞳处辐亮度的偏振角的仿真值, AOP 为通过偏振图像处理得到的传感器入瞳处辐亮度的偏振角 ε 为所设定的阈值;然后对剩余的有效数据做如下处理:在查找表中分别选取距离 DOP 最近的两个 η : η_1 和 η_2 , 分别对应偏振反射率 r_1 和 r_2 , 且有

$$\begin{aligned} \eta_1 &\leq DOP \\ \eta_2 &> DOP \end{aligned}, \quad (11)$$

其中 η_1 、 η_2 为传感器入瞳处辐亮度的偏振度的仿真值, DOP 为通过偏振图像处理得到的传感器入瞳处辐亮度的偏振度.采用线性插值法确定反演值:

$$r_p = \frac{DOP - \eta_1}{\eta_2 - \eta_1} \times (r_{p2} - r_{p1}) + r_{p1}, \quad (12)$$

其中 r_p 为偏振反射率的反演值,即认为所获取图像的地物类型与查找表中的该数值所表征的地物对应.

2 验证实验及分析

为验证提出的反演方法,开展实实验验证实验.选定目标物以及遥感器,分别在室内理想条件下和室外自然条件下进行观测并对所获取的图像进行处理,得到目标地物偏振反射率的标准值和反演值,将两者进行对比,验证反演方法的精度.

2.1 室内实验及数据处理

使用基于 LCVR(液晶相位可变延迟器)的偏振成像仪^[19]如图 2 所示近距离拍摄目标物以获取偏振图像,使用卤钨灯作为光源,可认为是自然光,目标物与光源和传感器的距离很近,大气影响可忽略不计.获得的数据经解算得到传感器入瞳处的偏振度和偏振角^[19],反演得到目标地物的偏振反射率.

碳纤维板在 676 nm 条件下室内实验获取的一组偏振图像如图 3 所示,四幅图对应着四种不同的液晶相位状态,产生四幅强度不同的图像,以及经过

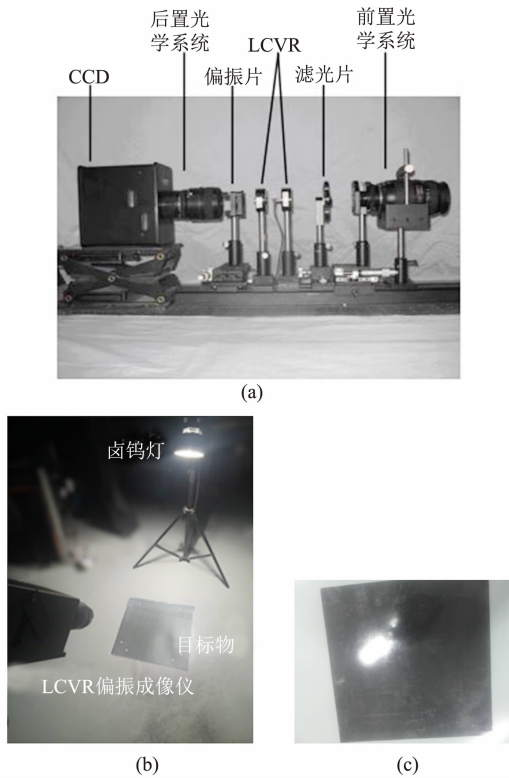


图2 基于 LCVR 的偏振成像仪及室内实验图 (a) LCVR 偏振成像仪, (b) 室内实验图, (c) 碳纤维板
Fig. 2 LCVR polarized imager and laboratory experiment (a) LCVR polarized imager, (b) laboratory experiment, (c) carbon fiber board

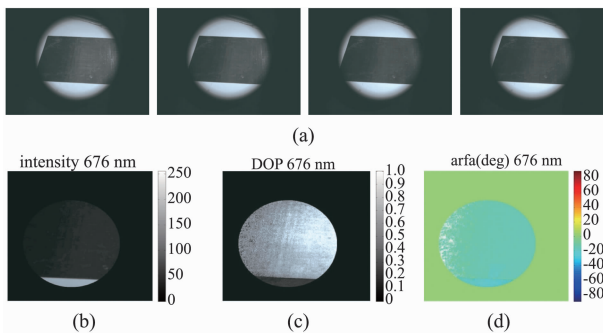


图3 室内实验碳纤维板偏振图像及处理所得图像 (波长 676 nm, 照明天顶角 25°, 观测天顶角 45°, 相对方位角 0°) (a) 偏振原始图像, (b) 强度图像, (c) 偏振度图像, (d) 偏振角图像
Fig. 3 polarization images and processed images of carbon fiber board obtained from laboratory experiments (Wavelength = 676 nm, SZA = 25°, VZA = 45°, RAA = 0°) (a) polarization original images, (b) intensity image, (c) polarization degree image, (d) polarization angle image

处理得到的强度、偏振度、偏振角数据。

2.2 室外实验及数据处理

将偏振成像仪架设在高层建筑上, 拍摄水面目

标物的偏振图像, 碳纤维板在 676 nm 条件下室外实验获取的偏振图像如图 4 所示, 根据实验的时间及地理信息计算照明天顶角, 并结合指南针和角度测量仪器确定观测天顶角和相对方位角. 获得的数据经解算得到传感器入瞳处的偏振度和偏振角^[19], 再通过查找表反查及数据拟合得到目标地物偏振反射率。

为保证观测几何条件尽可能保持一致, 在处理得到的图像中碳纤维板的中心处选取 25 个有效采样点 (无其它物体遮挡), 利用上述反演算法, 对碳纤维板进行偏振反射率反演, 得到的结果如图 5 所示。

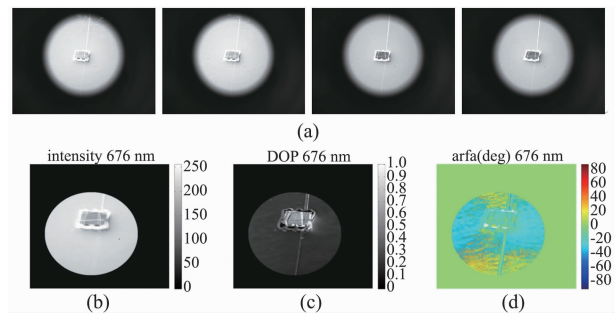


图4 室外实验碳纤维板偏振图像及处理所得图像 (波长 676 nm, 照明天顶角 25°, 观测天顶角 45°, 相对方位角 0°) (a) 偏振原始图像, (b) 强度图像, (c) 偏振度图像, (d) 偏振角图像
Fig. 4 Polarization images and processed images of carbon fiber board obtained from outdoor experiments (wavelength = 676 nm, SZA = 25°, VZA = 45°, RAA = 0°) (a) polarization original images, (b) intensity image, (c) polarization degree image, (d) polarization angle image

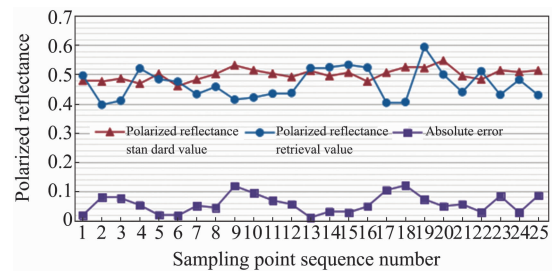


图5 676 nm 处碳纤维板实验数据结果
Fig. 5 Experimental results of carbon fiber board at 676 nm

2.3 反演精度分析

目标偏振特性的反演是对遥感图像的逐个像元进行的, 每一个像元均会得到一个目标偏振反射率, 这个量即表征了目标的偏振反射特性. 针对某个单一像元, 其误差可表示为:

$$e_{ij} = \frac{|r_{ij} - r_{ij}^0|}{r_{ij}^0} \times 100\% \quad (13)$$

其中 i, j 为整数, 表示在偏振图像中的采样像元编

号, r_{ij} 为目标偏振率的反演计算值, r_{ij}^0 为目标偏振反射率的标准值. 然后可以得到整幅偏振遥感图像偏振反射率反演的相对误差为:

$$M_r = \sqrt{\frac{\sum_n e_{ij}^2}{n}} \times 100\% \quad , \quad (14)$$

即表征了目标偏振反演方法的精度.

根据上述精度评价方法, 得到图 5 中采样区域整体相对误差为 6.6%.

产生误差的原因有以下几点:

(1) 室内实验的光源采用卤钨灯, 光源的投射角大约有 5 度, 在同一幅图像上很难保证完全相同的几何角度, 尽管已尽量采用图像正中的像元以求避免此问题, 但仍可能有少许影响.

(2) 仪器自身产生的误差, 实验用偏振仪的定标精度优于 95%^[19], 因此在图像处理计算中会产生些许误差.

(3) 算法是由正向模型建立查找表, 再反查查找表构成, 在正向模拟的过程中可能也会带来一些舍入误差, 从而作用于反演的结果中.

3 结论

针对目标偏振反射特性的探测及应用, 提出利用 6SV 矢量辐射传输模型构建观测条件与传感器入瞳偏振状态的查找表, 通过对查找表的反查计算, 反演目标偏振反射率, 并给出了精度验证的方法.

以碳纤维板为目标物, 在水面背景下开展了偏振探测和反射率反演实验. 通过与室内探测结果对比, 验证了偏振反射率反演的精度: 波长 676 nm 条件下反演误差 6.6%, 即反演精度优于 90%.

相对现有的经验线性反演方法, 改善了实时性和对多种观测条件的适应性. 可用于由星载或机载遥感器获取的偏振数据的反演. 此外, 本文通过误差分析, 为今后进一步完善理论研究和实验方案指出了方向.

References

[1] Goldstein D H. Polarimetric characterization of federal standard paints[J]. *Proc of SPIE*. 2000, **4133**:112–123.
 [2] Forssell G, Hedborg-Karlsson E. Measurements of polarization properties of camouflaged objects and of the denial of surfaces covered with cenospheres[J]. *Proc of SPIE*. 2003, **5075**: 246–258.
 [3] Aron Y, Gronau Y. Polarization in the LWIR[J]. *Proc of SPIE*. 2005, **5783**:653–661.
 [4] ZHANG Chao-Yang, CHENG Hai-Feng, CHEN Zhao-Hui, et al. Detecting low reflectivity camouflage net by using po-

larization remote sensing[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 偏振遥感识别低反射率伪装网研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28** (2):137–140.
 [5] WANG Qi-Chao, ZHAO Da-Peng, WANG Jia-Chun. Recognition of camouflage targets with multi-spectral polarization detection system[J]. *Opto-Electronic Engineering* (王启超, 赵大鹏, 汪家春. 多光谱偏振探测对伪装目标的识别研究. *光电工程*), 2013, **40**(3):29–34.
 [6] HAN Yang, XU Wen-Ru, JIN Lun. A study on the polarized reflectance hyperspectral characteristics and models of typical sailing soil[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (韩阳, 徐文茹, 金伦. 典型盐渍化土壤偏振反射高光谱特征与模型分析. *红外与毫米波学报*), 2015, **34** (5):606–612.
 [7] YAN Lei, CHEN Wei, XIANG Yun, et al. *Polarization Remote Sensing Physics*[M]. Science Press (晏磊, 陈伟, 相云, 等. *偏振遥感物理*. 科学出版社), 2014.
 [8] Breon F M, Tanre D, Lecomte P, et al. Polarized reflectance of bare soils and vegetation: Measurements and models[J]. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **33**(2): 487–499.
 [9] ZHAO Yong-Qiang, PAN Quan, CHENG Yong-Mei. *Imaging Spectropolarimetric Remote Sensing and Application* [M]. National Defense Industry Press. (赵永强, 潘泉, 程咏梅. *成像偏振光谱遥感及应用*. 国防工业出版社), 2011.
 [10] Coulson K L, Dave J V, Sekera Z. *Tables related to radiation emerging from a planetary atmosphere with Rayleigh scattering*[M]. University of California Press, 1960.
 [11] Coulson K L. *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*[M]. Virginia: A. DEEPAK Publishing, 1988:199–210, 259–261.
 [12] 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.
 [13] WANG Wei, CHU Jin-Kui, CUI Yan, et al. Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer[J]. *Chinese Journal of Lasers* (王威, 褚金奎, 崔岩, 等. 基于矢量辐射传输的大气偏振建模. *中国激光*), 2013, **40**(5):215–221.
 [14] ZHANG Ying, ZHANG Yi, ZHAO Hui-Jie. A skylight polarization model of various weather conditions[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (张颖, 张熠, 赵慧洁. 多种天气条件下的天空光偏振模型. *红外与毫米波学报*), 2017, **36**(4):453–459.
 [15] Vermote E, D Tanré, J L Deuzé, et al. *Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum-Vector* [OL]. (2006. 11). <http://6s.ltdri.org>.
 [16] Jia G R, Hueni A, Tao D X, et al. Spectral super-resolution reflectance retrieval from remotely sensed imaging spectrometer data [J]. *Optics Express*, 2016, **24** (17): 19905–19919.
 [17] Schott J R. *Fundamentals of Polarimetric Remote Sensing* [M]. Washington: SPIE, 2009:107–111.
 [18] Shell J R. *Polarimetric Remote Sensing in the Visible to Near Infrared* [D]. Rochester Institute of Technology, 2005:25.
 [19] ZHAO Hai-Bo. *Research on polarization detection technique based on LCVR* [D]. Beihang University (赵海博. 基于 LCVR 的偏振探测技术研究. 北京航空航天大学), 2008.