

文章编号 1004-924X(2014)11-2914-09

基于支持向量机预测偏振模式

汪方斌^{1,2*}, 洪 津¹, 孙晓兵¹, 王 羿¹, 胡亚东¹

- (1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 光学遥感中心, 安徽 合肥 230031;
2. 安徽建筑大学 机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 基于多光谱多角度偏振辐射探测研究了大气偏振模式预测方法。首先, 介绍了航空多角度偏振辐射计的探测原理与支持向量机回归算法; 然后, 从矢量传输模型出发, 说明大气状况不变时, 偏振模式主要取决于地表特征与观测几何, 并介绍了观测几何与姿态之间的关系以及地表特征的表达形式; 最后, 在考虑平台姿态与地表特征的情况下, 利用支持向量机回归算法预测了航空多角度偏振辐射计的探测偏振度, 并对预测与实际试验探测的偏振度进行了比较。结果显示: 偏振度预测误差小于 1%, 影响模型精度的主要因素不是姿态变化本身, 而是姿态改变造成的观测地表特性变化。

关键词: 大气遥感; 大气偏振模式; 预测; 支持向量机; 航空多角度偏振辐射计

中图分类号: P407 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20142211.2914

Prediction of polarization pattern by SVM

WANG Fang-bin^{1,2*}, HONG Jin¹, SUN Xiao-bing¹, WANG Yi¹, HU Ya-dong¹

- (1. *Center of Remote Sensing, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*
2. *School of Mechanical and Electrical Engineering,
Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China*)

* *Corresponding author, E-mail: wangfb@mail.ustc.edu.cn*

Abstract: On the basis of multi-spectral multi-angular radiative polarization measurements, a prediction method for atmospheric polarization patterns is investigated. Firstly, the principle of an Aviation Multi-angle Polarimetric Radiometer (AMPR) and the regression algorithm of a Support Vector Machine (SVM) are introduced. Then, according to Vector Radiative Transfer Equation (VRTE), it points out that the atmospheric polarization pattern is primarily dependent on view geometry and surface features when atmosphere condition is invariant. Meanwhile, it introduces the relationship between view geometry and platform attitude and the expressing form of surface features. Finally, how to use the regression algorithm of SVM to predict the detected polarization degree of the AMPR and to validate the application process is introduced in the consideration of the surface features and platform attitudes. Furthermore, the predicted degrees of polarization is also compared to that of real measurements. The results indicate that the error of polarization degree predicted is less than 1%. It concludes that the serious factor to affect the model accuracy is not the change of attitude but

收稿日期: 2013-10-28; 修订日期: 2013-11-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40971196)

the variation of underlying surface property caused by the changed attitudes.

Key words: atmospheric remote sensing; atmospheric polarization pattern; prediction; Support Vector Machine(SVM); Aviation Multi-angle Polarization Radiometer(AMPR)

1 引 言

偏振模式通常用偏振度来表述。太阳光经过大气散射形成部分偏振光,不同的太阳位置、观测几何、大气状况与地表特征具有不同的偏振模式^[1-7]。实时测量大气偏振特性的时空分布信息对于反演大气参数,建立大气散射辐射的偏振特性模型,目标识别,确定仿生偏振导航传感器系统的方位基准,提高载体姿态误差的估计精度和稳定性具有重要意义^[8-11]。现有研究表明,大气偏振模式可以为迁徙的鸟类提供方向信息与动物导航^[12],根据 Rayleigh 散射理论可以实现太阳视位置的计算及天空中偏振光分布模式的仿真^[9];基于单因素大气偏振模型能够建立地表反射偏振模式模型,仿真三维空间的大气偏振模式^[13]。但目前鲜有关于大气偏振模式预测的报道。

本文通过支持向量机(Support Vector Machine,SVM)回归算法,利用扫描型偏振遥感系统一个扫描周期的遥感数据来估计下一个扫描周期的探测偏振度(Degree of Polarization, DoP),以实现大气偏振模式的预测。并以中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的航空多角度偏振辐射计(Aviation Multi-angle Polarimetric Radiometer,AMPR)为例,验证了偏振模式 SVM 机预测的方法和思路。测量时,AMPR 进行沿轨扫描,进入主光学系统的光学信号被前置望远镜、Wollaston 棱镜分为振动方向互相垂直的两束线偏振光,经过分色、聚焦、滤光后被探测器接收

2 仪器描述

AMPR 的光学原理如图 1 所示,基本特性如表 1 所示。AMPR 通过分口径同时测量目标的 Stokes 矢量,获得测量信号在 0,45,90,135°方向的偏振信息,在保证测量时刻各辐射量相对精度的情况下,避免了“虚假”偏振,获得了较高的偏振解析精度。

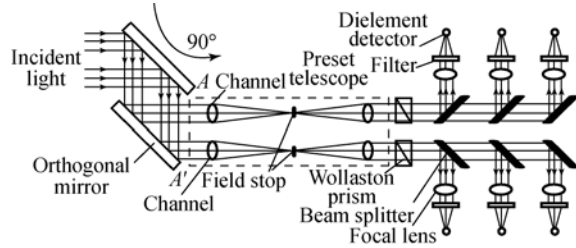


图 1 航空多角度偏振辐射计的光学原理示意图
Fig.1 Schematic of aviation multi-angle polarimetric radiometer

假设进入光学系统的光学信号的 Stokes 矢量 $S = [I \ Q \ U \ V]^T$,4 个方向上探测器特性相同、增益相同且对噪声不敏感,所获得的探测分量分别为 $S_0, S_{45}, S_{90}, S_{135}$,则有^[14]:

$$\begin{aligned} I &= S_0 + S_{90} (= S_{45} + S_{135}), \\ Q &= S_0 - S_{90}, \\ U &= S_{45} - S_{135}. \end{aligned} \quad (1)$$

V 很小,可以忽略^[15],由此解算出偏振角 φ 和偏振度 P ,分别为:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan(U/Q), \quad (2)$$

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} / I. \quad (3)$$

表 1 航空多角度偏振辐射计的基本特性

Tab.1 Characteristics of aviation multi-angle polarimetric radiometer

Parameter	Value
Spectral band/nm	490,555, 665,865, 960,1640
Instantaneous field of view/mrad	17
Viewing field/(°)	-55~+55, along track
Receiving aperture/mm	12
Detection azimuth/(°)	0,45,90,135 (Linear polarization)
Detector	SiPin(<1 100 nm), InGaAs(>1 100 nm)
Quantization precision/bit	14
Radiating accuracy	5%(calibration)
Polarimetric accuracy	0.5%

3 SVM 回归算法

目前,系统模型的建立方法还没有统一,用于非线性系统的主要有前馈神经网络和径向基函数(Radical Basis Function, RBF)神经网络等。SVM 是针对小样本条件下机器学习问题建立的一种新型学习机制。它通过最小化经验风险、最小化置信区间上界解决小样本、高维数和非线性问题,避免了诸如人工神经网络学习法的固有缺陷,具有很强的推广泛化和抗干扰能力,即使在样本输出受到噪音干扰的情况下,也能通过回归法在输入与输出之间构造出良好的映射关系,是一种有较好发展前途的学习方法^[16]。

假设给定训练样本集为 $(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \{x_i, y_i\}$, $i=1 \cdots N$, 其中 $x_i \in \mathbf{R}^s$ 为 s 维输入向量, N 为样本数, $y_i \in \mathbf{R}$ 为相应的输出值,其基本关系式为:

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\omega}^T \Phi(\mathbf{X}) + b, \quad (4)$$

式中: $\Phi(\mathbf{X})$ 将不可分的低维向量 \mathbf{X} 映射到高维空间,从而使数据可分。 $\boldsymbol{\omega}, b$ 为待定参数,利用下式求解:

$$\min J(\boldsymbol{\omega}, e) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\omega} + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*), \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} y_i - \boldsymbol{\omega}^T \Phi(x_i) - b \leq \epsilon + \xi_i \\ \boldsymbol{\omega}^T \Phi(x_i) + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: ξ_i, ξ_i^* 是松弛因子,以限制超出精度的拟合误差; ϵ 是损失函数的界; C 是人为选择的平衡回归函数平坦程度与偏差超出损失函数界样本个数的常数。将式(5)、式(6)归结为二次规划问题,得到相应的解:

$$\boldsymbol{\omega} = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) \Phi(x_i), \quad (7)$$

$$b = \begin{cases} y_j + \epsilon - \sum_{i,j=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x_j), \alpha_i \in (0, C) \\ y_j - \epsilon - \sum_{i,j=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x_j), \alpha_i^* \in (0, C) \end{cases}, \quad (8)$$

其中: α_i, α_i^* 是式(5)中 J 的最小化解,从而获得模型的表达式为:

$$y(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i K(x, x_i) + b, \quad (9)$$

其中: $K(x, x_i) = \Phi(x) \Phi(x_i)$, 为核函数^[16]。常用

的核函数有 RBF、多项式函数、感知器函数、线性函数等。

4 影响因素

4.1 矢量传输方程

根据式(3),偏振度可由 Stokes 矢量求解,而定义在观测本地子午面上的 Stokes 矢量又可以通过矢量辐射传输方程来表达^[17]:

$$\mu \frac{dS(\tau, \mu, \varphi)}{d\tau} = S(\tau, \mu, \varphi) - J(\tau, \mu, \varphi), \quad (10)$$

其中: τ 为大气层顶测量的光学厚度, μ 为观测天顶角的余弦, φ 为观测方位角, J 为源函数:

$$J(\tau, \mu, \varphi) = \frac{\sigma(\tau)}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\mu' \mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi; \mu', \varphi') \cdot S(\tau, \mu', \varphi') + \Omega(\tau, \mu, \varphi), \quad (11)$$

式中: σ 为单散射反照率,而 \mathbf{M} 为散射相矩阵。第一项表示了多向散射的贡献,而第二项 Ω 为非齐次源函数:

$$\Omega(\tau, \mu, \varphi) = \frac{\sigma(\tau)}{4\pi} \times M(\tau, \mu, \varphi; -\mu_0, \varphi_0) \mathbf{S}_0 T_a e^{(1-\lambda\tau)}, \quad (12)$$

其中: μ_0 是相对太阳本地子午面的太阳观测天顶角的余弦, φ_0 为太阳方位角, \mathbf{S}_0 是太阳入射时的 Stokes 矢量, T_a 为透过率, λ 为几何因数。

由式(10)~式(12)可知,在大气状况不变的情况下,Stokes 矢量主要由观测几何、地表特征来决定,或者说仪器观测的偏振度主要取决于观测几何以及覆盖的地表类型。在一个扫描周期内,由于时间很短,通常认为太阳位置不变,因此观测几何的变化主要是指平台姿态变化引起了观测视线的偏移;而地表特征的影响则主要是由不同扫描周期地表覆盖区域不同和因观测几何偏离预定扫描路径造成的地表类型差异引起的。

4.2 观测几何

通常遥感探测前,扫描路径与时间均已作出规划,即有确定的观测几何,包括太阳天顶角、太阳方位角、观测方位角,而观测天顶角与扫描角联系在一起,也是确定的。由此计算出规划散射角 θ_p :

$$\cos \theta_p = \cos \theta_m \cos \theta_v + \sin \theta_m \sin \theta_v \cos \varphi, \quad (13)$$

其中: θ_m, θ_v 分别为入射天顶角、出射天顶角。平台姿态变化时,式(13)所表示的散射角将与实际观测散射角 θ_r 之间存在偏差。假设规划路径的观测视线矢量为 \mathbf{V}_p , 而实际观测视线矢量为 \mathbf{V}_r ,

则两者存在下列关系^[18]:

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{R}(\theta_r) \mathbf{R}(\theta_p) \mathbf{R}(\theta_y) \mathbf{V}_p, \quad (14)$$

其中: $\theta_r, \theta_p, \theta_y$ 均为姿态角, \mathbf{R} 是坐标系旋转变换矩阵。当姿态角不为 0 时, 实际观测散射角 θ_r 与规划散射角 θ_p 有明显不同。

4.3 地表特征

大气偏振探测必须考虑地表特征的影响, 不同类型的地表对偏振模式的影响也不相同^[19-21]。由于大气阻抗植被指数 (ARVI) 相对于气溶胶浓度能够保持稳定, 因此可以用来表示不同类型的地表对大气偏振度的贡献^[1,21]:

$$ARVI = \frac{R_i^{NIR} - R_i^{RB}}{R_i^{NIR} + R_i^{RB}}, \quad (15)$$

$$R_i^{RB} = R_i^{RED} - \gamma(R_i^{BLUE} - R_i^{RED}), \quad (16)$$

其中: $R_i^{NIR}, R_i^{BLUE}, R_i^{RED}$ 分别是近红外光、蓝光与红光波段的总反射率, γ 是取决于气溶胶类型的光路辐射订正系数(大陆型气溶胶取 $\gamma=0.9$)^[1]。

5 预测与验证

5.1 方法构建

由第 4 节的讨论可知, 当相邻两个扫描周期的时间间隔较短时, 测量结果具有某种内在的相似性, 测量参数相差也较小, 随机选择训练样本和测试样本, 预测准确度应该不会有明显的差异。由于式(13)、式(14)计算的散射角已经包含了姿态、太阳位置、观测方位等的相关信息, 因此选择散射角、ARVI 为输入参数, 偏振度为输出参数, 以第 3 节讨论的 SVM 回归算法建立偏振模式预测方法, 选择 RBF 作为核函数, SVM 参数通过输入、输出参数求解二次规划问题得到^[22]。

预测目标以前一扫描周期的实测遥感与观测几何数据为基础, 以规划的当前探测路径与探测时间预测当前周期可能探测的偏振度。为便于验证预测效果, 需要建立一个训练集和两个测试集, 两个测试集分别称为预测集与验证集。其中, 训练集对应前一周期的实际扫描; 预测集对应当前周期的规划扫描(不包括姿态变化); 而验证集对应当前周期的实际扫描, 相对于规划扫描, 其包括姿态由于平台不稳定而发生的改变。

输入参数如下: 训练集的散射角由前一周期的定姿系统实测数据计算获得; 预测集散射角根据规划的当前周期探测路径和时间计算出太阳与

扫描点位置而后得到; 验证集散射角由当前周期的定姿系统实测数据计算获得。这里主要考虑姿态变化对大气偏振模式探测的影响, 因此, 所有数据集的 ARVI 均由相应周期的实际观测数据代入式(15)、式(16)计算给出。

输出参数如下: 训练集偏振度与验证集的参考偏振度也由探测数据根据式(1)、式(3)计算给出, 验证集的预测偏振度与预测集的预测偏振度为计算结果。

参考式(4)构建出偏振模式预测方法的表达式, 为:

$$P([\theta_{i,k}, ARVI_{i,k}]) = \boldsymbol{\omega}^T \Phi(\theta_{i,k}, ARVI_{i,k}) + b, \quad (17)$$

其中: $\theta_{i,k}, ARVI_{i,k}$ 分别为当前扫描周期即预测集或验证集第 k 个扫描角对应的散射角与大气阻抗植被系数, $\boldsymbol{\omega}, b$ 以及 SVM 的参数通过训练集数据求解二次规划问题获得, 从而有:

$$P([\theta_{i,k}, ARVI_{i,k}]) = \sum_{j=1}^N \alpha_j K([\theta_{i,k}, ARVI_{i,k}], [\theta_{i-1,j}, ARVI_{i-1,j}]) + b, \quad (18)$$

其中: $\theta_{i-1,j}, ARVI_{i-1,j}$ 分别为前一扫描周期即训练集第 j 个扫描角对应的散射角与大气阻抗植被系数, α_j, α_j^* 为通过二次规划问题求解获得的式(5)的最小化解。

5.2 实现流程

扫描型遥感系统工作时, 为提高模型精度与预测效果, 训练集数据一直取自实际观测数据,

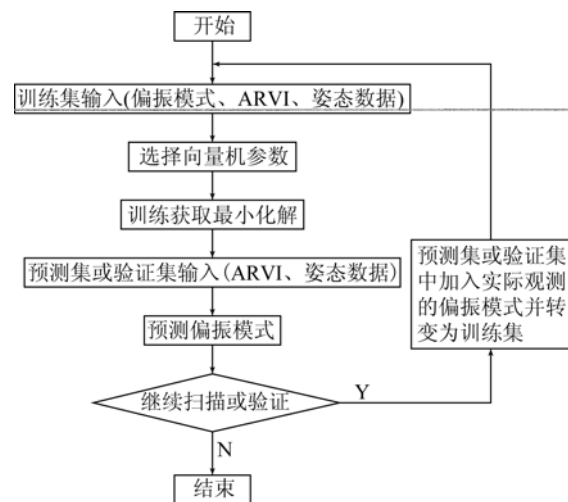


图 2 偏振模式预测与验证流程

Fig. 2 Procedure of prediction and validation for polarization pattern

SVM 参数随着实际观测的进行实时更新,因此,训练、预测与验证的具体算法流程如图 2 所示。

5.3 数据描述

2012 年 8 月 10 日,AMPR 进行了两次航飞实验。通常 AMPR 以沿轨扫描方式工作,为便于分析对比不同扫描方式下姿态变化对偏振模式的影响,分别进行了叉轨扫描与沿轨扫描。扫描过程如图 3 所示,表 2 列出了试验条件与飞行状态。

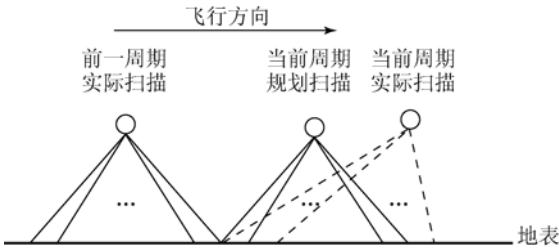


图 3 航空多角度偏振辐射计扫描示意图
Fig. 3 Schematic diagram of aviation multi-angle polarization radiometer scanning

表 2 航空多角度偏振辐射计 2012 年航飞试验条件

Tab. 2 Conditions of 2012 aviation multi-angle polarization radiometer trial flight

Condition	Value
Time	09:49:50—10:53:24(along track) 13:42:34—14:47:08(cross track)
Location	Tianjin
Weather	Clearness
Longitude, latitude	117°57', 38°58'
Platform	B-3807
Aircraft attitude	POS_AV510(INS/GPS)
Flight altitude	460~3 200 m
Surface type	Dry land,vegetation

为验证 5.1 节构建的方法,下面以沿轨与叉轨扫描方式下前后连续 2 次的扫描数据与应用结果作为示例进行介绍。表 3 列出了示例扫描过程中的相关信息。

表 3 两次示例应用的条件

Tab. 3 Conditions of 2 illustration examples

Scan mode	Along track	Cross track
Start time	10:03:02.284	13:55:48.006
Longitude/(°)	117.826	117.295
Latitude/(°)	38.971	38.971
Altitude/km	3190.039	3 195.350

图 4、图 5 与图 6、图 7 分别显示了 AMPR 叉轨与沿轨扫描方式下相邻两个扫描周期内的姿态与散射角。

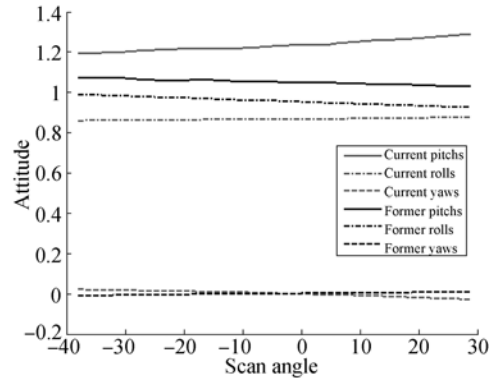


图 4 相邻扫描周期的姿态(叉轨)

Fig. 4 Attitudes of adjacent scanings (cross track)

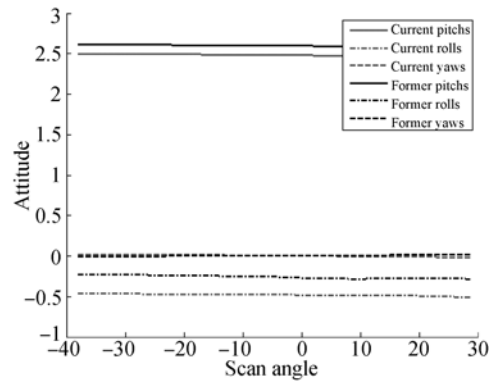


图 5 相邻扫描周期的姿态(沿轨)

Fig. 5 Attitudes of adjacent scanings (along track)

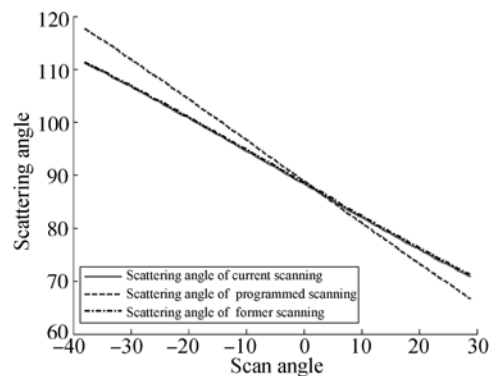


图 6 相邻扫描周期的散射角(叉轨)

Fig. 6 Scattering angles of adjacent scanings (cross track)

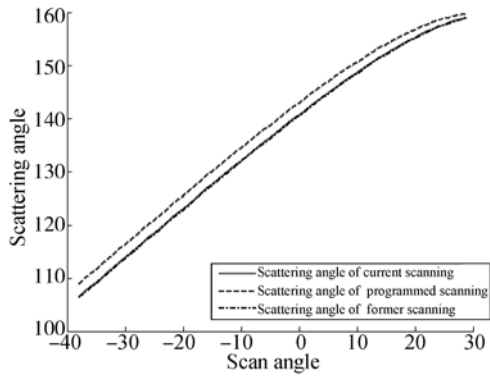


图 7 相邻扫描周期的散射角(沿轨)

Fig. 7 Scattering angles of adjacent scanings (along track)

从图 4、图 5 中可以看出,由于一个周期时间相对较短(1.047 s),周期内姿态角变化不大,基本呈线性变化,但也必须注意姿态角的微小变化可能导致每次扫描的瞬时视场不同,地表覆盖重叠度减小,表现出不同的地表特性。相邻两个周期的姿态角的相对变化较大,虽然每个周期姿态角可以进行测量,但两次观测的地表可能存在明显的差异,从而对测量结果产生影响。

从图 6、图 7 可知,叉轨扫描时,规划与实际散射角之差的变化方向因姿态改变而在一定的散射角前后明显不同;而沿轨扫描却不存在这种现象,且规划与实际散射角之间的差别在整个扫描角范围内变化较小。

以 ARVI 表示地表特性,分别计算 865, 665 与 490 nm 波段的探测数据,计算结果如图 8、图 9 所示。

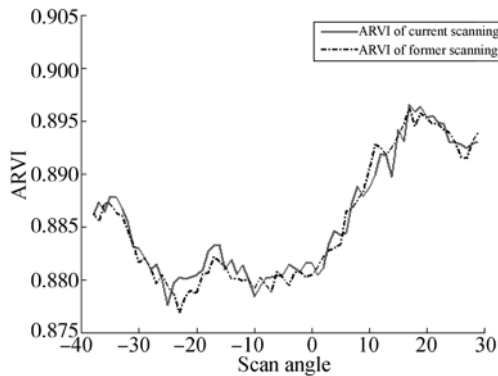


图 8 相邻扫描周期内的 ARVI(叉轨)

Fig. 8 ARVIs of adjacent scanings (cross track)

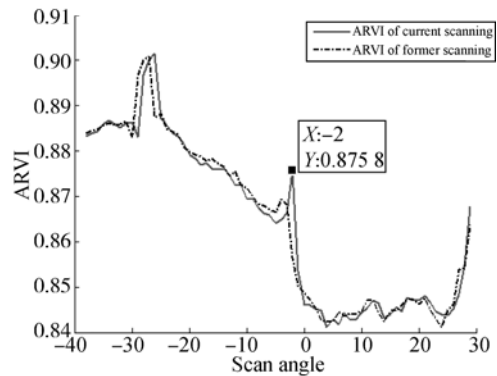


图 9 相邻扫描周期内的 ARVI(沿轨)

Fig. 9 ARVIs of adjacent scanings(along track)

从图 8、图 9 可见,相邻两次扫描的时间间隔较短,ARVI 的变化趋势基本一致;同一周期内,平台移动、姿态变化可能引起覆盖区域地表类型的差异,从而使 ARVI 发生跳动。这种跳动使仪器探测的偏振出现突变。

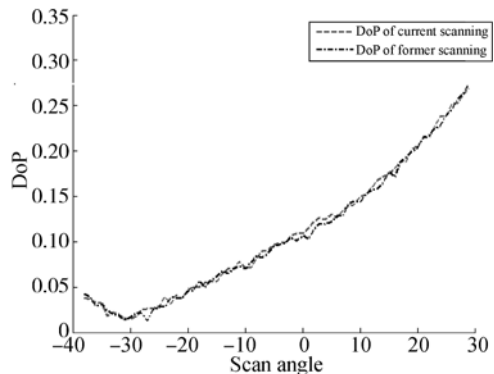


图 10 相邻扫描周期的偏振度(叉轨)

Fig. 10 Degrees of Polarization(DoP) of adjacent scanings(cross track)

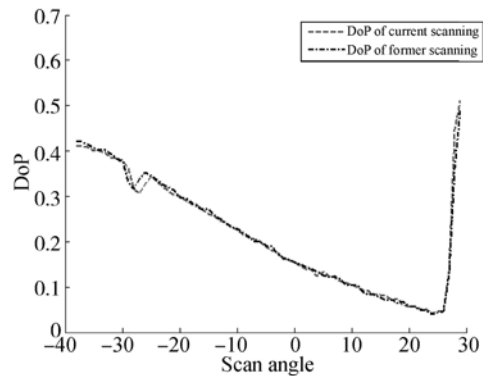


图 11 相邻扫描周期的偏振度(沿轨)

Fig. 11 Degrees of polarization(DoP) of adjacent scanings(along track)

图 10、图 11 为叉轨与沿轨扫描时 490 nm 波段偏振度的变化。从图中可以看出,相邻扫描周期探测的偏振度变化较小,在整个扫描角范围内,偏振度曲线具有较大的相似性,说明探测偏振度的预测是可能的。另外,比较图 8 与图 10、图 9 与图 11 可以发现,探测偏振度的这种变化主要是由于不同周期扫描视场所对应的地表类型不同、姿态变化使瞬时视场重叠度变化引起的。

5.4 验证与预测结果

基于 5.3 节给出的试验数据,图 12~图 15 显示了叉轨与沿轨扫描方式下,利用观测几何与 ARVI 进行 490 nm 波段偏振度回归与预测的结果,图 16~图 17 为相应的预测误差,图中 2 条虚线表示 $\pm 1\%$ 的精度范围。

从图 12、图 13 可以看出,基于 SVM 的回归曲线与探测数据的一致性较好,说明预测方法是适用的。

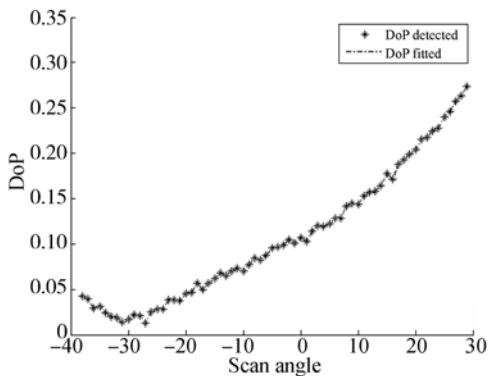


图 12 偏振度相对散射角与 ARVI 回归(叉轨)

Fig. 12 Regression of degree of polarization(DoP) (cross track)

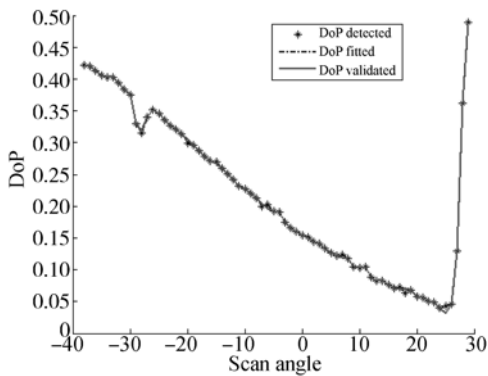


图 13 偏振度相对散射角与 ARVI 回归(沿轨)

Fig. 13 Regression of degree of polarization(DoP) (along track)

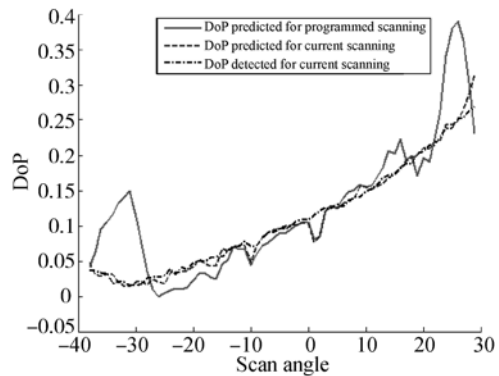


图 14 预测集、验证集预测与实测偏振度(叉轨)

Fig. 14 Comparison among degree of polarizations(DoPs) predicted and measured(cross track)

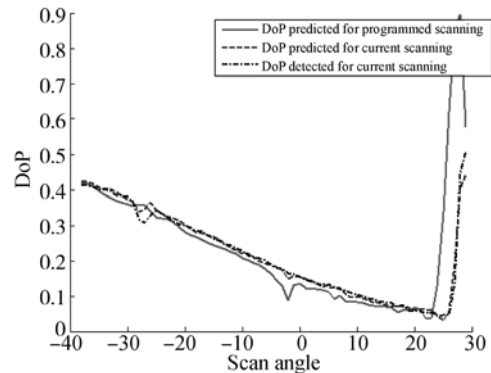


图 15 预测集、验证集预测与实测偏振度(沿轨)

Fig. 15 Comparison among degree of polarizations(DoPs) predicted and measured sets(along track)

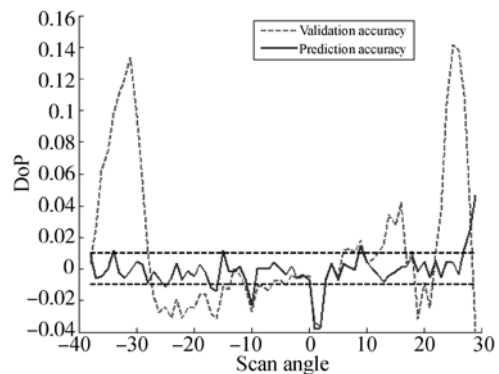


图 16 预测、验证偏振度误差(叉轨)

Fig. 16 Errors of degree of polarizations(DoPs) for prediction and validation(cross track)

图 14~图 17 显示,无论是叉轨还是沿轨扫描方式,以实际观测几何预测的偏振度与实测偏振度之间的差异较小,偏振度预测误差基本小于

1%,说明预测有效并且具有较高的精度。个别数据点的误差大于 1%,对比 ARVI 曲线可以发现,基本出现在 ARVI 随扫描角发生较大突变处,说明姿态变化引起瞬时视场地表特性的改变对偏振模式观测的影响较大,但其直接影响相对较小;因此,模型在实际应用时需要数据作进一步的平滑处理。

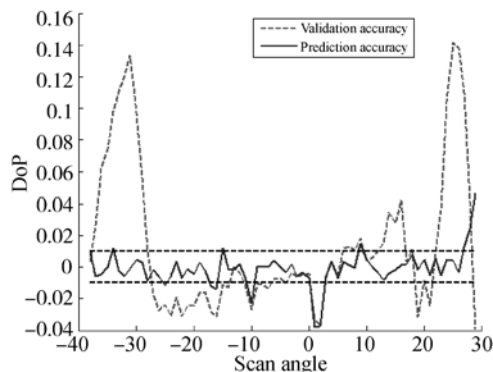


图 17 预测、验证偏振度误差(沿轨)

Fig. 17 Errors of degree of polarizations(DoPs) for prediction and validation(along track)

参考文献:

- [1] LITVINOV P, HASEKAMP O, CAIRNS B, *et al.* Reflection models for soil and vegetation surfaces from multiple-viewing angle photopolarimetric measurements [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2010, 111: 529-539.
- [2] 赵开春, 卢皓, 尤政. 天空光偏振模式自动探测装置[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 239-245.
ZHAO K CH, LU H, YOU ZH. Automatic detection system for skylight polarized pattern [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 239-245. (in Chinese)
- [3] CAIRNS B, TRAVIS L, MISHCHENKO M I, *et al.* Aerosol retrievals over land surfaces (the advantages of polarization) [C]. *Proc. AMS Annu. Meeting*, 2001:119-122.
- [4] WAQUET F, LÉON J F, CAIRNS B, *et al.* Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(6):1228-1236.
- [5] 褚金奎, 王威, 崔岩. 气溶胶对天空偏振辐射影响的测量[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3):520-526.
CHU J K, WANG W, CUI Y. Measurement for influence of aerosols on polarized sky radiance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 520-526. (in Chinese)
- [6] LITVINOV P, HASEKAMP O, CAIRNS B, *et al.* Semi-empirical BRDF and BPDF models applied to the problem of aerosol retrievals over land: testing on airborne data and implications for modeling of top-of-atmosphere measurements [C]. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 2011: 313-340.
- [7] KNOBELSPIESSE K D, CAIRNS B, SCHMID B, *et al.* Surface BRDF estimation from an aircraft compared to MODIS and ground estimates at the Southern Great Plains site [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008:113, D20105.
- [8] 卢鸿谦, 尹航, 黄显林. 偏振光/地磁/GPS/SINS 组合导航方法[J]. *宇航学报*, 2007, 28(4):897-902.
LU H Q, YING H, HUANG X L. Combination navigation method with polarized light/geomagnetic/GPS/SINS[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 897-902. (in Chinese)
- [9] 赵开春, 褚金奎, 姚弘轶, 等. Rayleigh 大气天空光偏振分布仿真与预测[J]. *四川大学学报:工程科学版*, 2007, 39(s1): 288-291.

对比规划的观测几何预测偏振度与实际观测的偏振度发现,两者有较大的差异。从图 16 和图 17 中可以看出:叉轨扫描时,根据 AMPR 的工作原理,扫描瞬时视场的重合度相对要小,地表特性改变明显,姿态变化与地表特性不同,对预测结果影响显著;沿轨扫描时,主要是姿态变化造成的地表特性突变对预测结果非常敏感。

6 结 论

本文通过分析大气偏振光探测偏振模式的影响因素,利用 SVM 回归算法预测了 AMPR 航空飞行试验探测时的偏振度。结果显示,模型预测偏振度误差小于 1%,模型精度受平台姿态变化的直接影响较小,而对姿态变化引起的地表特性改变具有较强的敏感性。

本文以观测的 ARVI 参数作为预测输入,而实际扫描时,当前周期瞬时视场的地表特性并不可知,这是预测偏振度不确定性的一项重要来源,有待今后工作中进一步展开研究。

- ZHAO K CH, CHU J K, YAO H Y, *et al.*. Simulation and prediction for Rayleigh skylight polarization distribution[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2007, 39(s1): 288-291. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 周军, 刘莹莹. 基于自然偏振光的自主导航新方法研究进展[J]. *宇航学报*, 2009, 30(2): 409-414.
- ZHOU J, LIU Y Y. Research progress of new method on autonomous navigation based on natural polarimetric light [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2): 409-414. (in Chinese)
- [12] ABLE K P. Skylight polarization patterns and the orientation of migratory birds[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1989, 141: 241-256.
- [13] 王玲妹, 高隽, 谢昭. 光的地表反射偏振特性分析及空间偏振模式计算方法[J]. *中国科学: 物理学·力学·天文学*, 2013, 43(7): 833-843.
- WANG L M, GAO J, XIE ZH. Analysis on polarized lights by ground-reflection with calculating its spatial patterns[J]. *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.*, 2013, 43(7): 833-843. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] MISHCHENKO M I, ROSENBUSH V K, KISELEV N N, *et al.*. *Polarimetric Remote Sensing of Solar System Objects* [M]. Kyiv: Akadempriodyka, 2010.
- [16] 邓乃扬, 田英杰. 数据挖掘中的新方法-支持向量机[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- DENG N Y, TIAN Y J. *New Method on Data Mining-Support Vector Machine* [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [17] MISHCHENKO M I. Microphysical approach to polarized radiative transfer: extension to the case of an external observation point [J]. *Appl. Optics*, 2003, 42(24): 4963-4967.
- [18] 许永森, 丁亚林, 田海英, 等. 航空遥感器姿态像移仿真分析[J]. *激光与红外*, 2007, 37(12): 1303-1306.
- XU Y S, DING Y L, TIAN H Y, *et al.*. The simulation of aerial remote sensor's gesture image motion[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(12): 1303-1306. (in Chinese)
- [19] WQUQUET F, CAIRNS B, KNOBELSPIESSE K, *et al.*. Polarimetric remote sensing of aerosols over land [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009; 114, D01206.
- [20] SPURR R J D. A new approach to the retrieval of surface properties from earthshine measurements [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2004, 83(1): 15-46.
- [21] KAUFMAN Y J, TANRE D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS [C]. *Proc. IEEE Int. Geosci. and Remote Sensing Symp.*, New York, 1992: 261-270.
- [22] WANG F B, LI D H. A method of parameters selection with higher accuracy for SVM[C]. *ICA-CI2012*, 2012: 248-252.

作者简介:



汪方斌(1972—),男,安徽桐城人,讲师,博士研究生,1994年于宁波大学获得学士学位,2007年于中国科学技术大学获得硕士学位,主要从事偏振遥感、航空航天遥感器工程技术方面的研究。E-mail: wangfb@mail.ustc.edu.cn

导师简介:



洪津(1969—),男,浙江杭州人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获得学士学位,主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空/航天遥感器工程技术的研究。E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn