

## LSSVM 模型下的 LCVR 相位延迟特性标定方法

胡冬梅<sup>1,2</sup>, 刘 泉<sup>1</sup>, 于林韬<sup>1</sup>, 朱一峰<sup>1</sup>

- (1. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;  
2. 北华大学 电气信息工程学院, 吉林 吉林 132021)

**摘要:** 为了标定液晶相位可变延迟器(Liquid Crystal Variable Retarder, LCVR)的相位延迟特性, 在 25 °C、405 nm 波长下, 利用搭建的测量装置采集了 141 组实验样本, 其中 71 组样本为训练集, 70 组样本为预测集, 利用最小二乘支持向量机(Least Squares Support Vector Machines, LSSVM)和支持向量机(Support Vector Machines, SVM)算法建立 LCVR 相位延迟量和驱动电压相关数学模型。实验表明, GASVR、PSOSVR、LSSVM 方法下最大波长偏差  $\Delta\lambda$  分别为 0.013 6 $\lambda$ 、0.013 7 $\lambda$  和 0.004 5 $\lambda$ , 均方误差提高两倍, 通过比较, 说明该模型能快速准确地预测 LCVR 工作范围内全部波长、全部电压值下的相位延迟。该方法可作为 LCVR 相位延迟特性标定的有效手段。

**关键词:** 液晶相位延迟器; 最小二乘支持向量机; 相位延迟; 标定

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0517004

## LCVR phase retardation characteristic calibration method using the LSSVM model

Hu Dongmei<sup>1,2</sup>, Liu Quan<sup>1</sup>, Yu Lintao<sup>1</sup>, Zhu Yifeng<sup>1</sup>

- (1. College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;  
2. College of Electrical and Information Engineering, Beihua University, Jilin 132021, China)

**Abstract:** To calibrate the phase characteristic of a Liquid Crystal Variable Retarder (LCVR) attached with a compensator. For LCVR, under 25 °C, 405 nm wavelength, the total of 141 experimental samples were obtained by the built setup based on Stokes parameters, in which 71 samples (calibration set) were used for model calibration, and 70 samples (prediction set) were used to validate the calibrated model independently. Least Squares Support Vector Machine(LSSVM) and Support Vector Machines(SVM) was used to calibrate model. Test results show, for prediction model based on GASVR, PSOSVR, LSSVM, the maximum wavelength deviation are respectively 0.013 6 $\lambda$ 、0.013 7 $\lambda$  and 0.004 5 $\lambda$ , the mean square error is increased by 2 times, and the phase retardation of all the wavelengths and all the voltage values of LCVR in the effective working range could be rapidly and accurately obtained by the LSSVM model, thies the prediction model based on LSSVM was an effective mean for LCVR phase calibration.

**Key words:** Liquid Crystal Variable Retarder(LCVR); Least Squares Support Vector Machines (LSSVM); phase retardation; calibration

收稿日期: 2015-09-11; 修订日期: 2015-10-15

基金项目: 国家 973 计划(613225); 国家自然科学基金(91338116)

作者简介: 胡冬梅(1979-), 女, 博士生, 主要从事光学偏振成像技术方面的研究。Email: haitianme@163.com

导师简介: 刘泉(1981-), 女, 博士生导师, 博士, 主要从事光学偏振成像技术方面的研究。Email: liuquancust@126.com

## 0 引言

传统成像探测技术是利用光强来实现的, 当不同目标的亮度相近, 从图像上就难分辨, 但其偏振特性可能有很大差异, 可利用偏振特性的差别实现目标的识别<sup>[1]</sup>, 偏振成像能够提供关于探测目标的表面粗糙度、密度、含水量、材料理化特性等信息, 对于识别不同的地面目标、大气气溶胶、云层等, 都有极大的潜在信息, 已成为遥感探测中的一个重要研究领域<sup>[2]</sup>。利用液晶相位可变延迟器(LCVR)在可见-近红外波段上可快速实时得到宽光谱范围的全偏振图像<sup>[3]</sup>, 特别适合于探测识别隐身、伪装、虚假目标, 提高在雾霾、烟尘等恶劣环境下光电探测装置的目标探测识别能力<sup>[4]</sup>。

液晶相位可变延迟器(LCVR)是一种基于电控双折射效应的相位延迟器件, 具有驱动电压低、易控制、功耗小、响应速度快、抗干扰能力强、价格便宜和体积小等优点, 因而被应用于偏振态的调制和检测中<sup>[5-6]</sup>。

由于 LCVR 中液晶分子在外电场作用下分布复杂且不均匀, 因此, LCVR 对入射光的相位延迟很难从理论上精确推导。对于每一个制备好的 LCVR, 要实现光的偏振态调制和检测, 必须对 LCVR 在特定波长、环境情况下, 标定其相位延迟特性曲线, 即获取不同相位延迟量对应的驱动电压。

目前, 对 LCVR 相位延迟特性的研究从以下两个方面进行, 在 LCVR 设计方面, 侧重于对液晶双折射色散特性的研究<sup>[7]</sup>; 在 LCVR 实际应用方面, 一是对 LCVR 的特定点( $\pi/2, \pi, 3\pi/4, 2\pi$ )标定; 二是从 LCVR 的出射光的光强与相位延迟量的关系出发, 推出相位延迟量的数学公式, 再利用最小二乘法拟合得出相位延迟曲线<sup>[8-9]</sup>。文中从实际应用出发, 首先, 通过偏振态测量仪测量不同驱动电压下 LCVR 出射光的 Stokes 参数, 其次, 利用最小二乘支持向量机的方法, 建立回归模型作为 LCVR 相位延迟特性的拟合函数, 实现 LCVR 任意相位延迟量下对应的驱动电压预测, 并通过实验数据验证该方法的有效性。

## 1 测量原理及实验装置

目前对波片的相位延迟测量主要采用光谱扫描法、Soleil 补偿器法、光强法等<sup>[10]</sup>, 文中采用测量 LCVR

出射光的 Stokes 参量的方法。

### 1.1 测量原理

光偏振态的斯托克斯参量定义式为:

$$S=[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T \quad (1)$$

式中:  $S_0$  表示光波的总强度;  $S_1$  表示水平分量和垂直分量的光强差;  $S_2$  表示  $45^\circ$  方向线偏振分量与  $-45^\circ$  方向线偏振分量的光强差;  $S_3$  表示光波右旋偏振光分量与左旋偏振光分量的光强差。

若入射光的偏振态  $S_{in}=[S_0' \ S_1' \ S_2' \ S_3']^T$ , 经一组光学器件后, 相应出射光偏振态的斯托克斯矢量为:  $S_{out}=[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ , 则  $S_{out}$  可以经过矩阵运算得到:

$$S_{out}=M \times S_{in} \quad (2)$$

式中: 矩阵  $M$  称为 Mueller 矩阵, 当光波依次通过  $n$  个光学元件时, 光学系统的总体穆勒矩阵为:  $M=M_n M_{n-1} \cdots M_2 M_1$ 。对公式(2)反演计算可获得系统输出的 Stokes 参量, 进而得到目标的偏振信息。偏振成像探测技术正是基于这样的原理。

LCVR 相位延迟特性测量原理如图 1 所示。

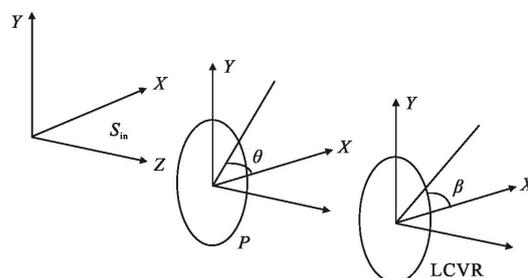


图 1 LCVR 相位延迟测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of LCVR phase retardation measurement

设  $M_P(\theta)$  为主光轴与  $X$  轴夹度  $\theta$  的起偏器的 Mueller 矩阵;  $M(\beta, \delta)$  为快轴与  $X$  轴夹度  $\beta$ 、相位迟  $\delta$  的 LCVR 的 Mueller 矩阵, 依据偏振光的 Stokes-Muller 理论<sup>[11]</sup>, 则出射光的斯托克斯参量为:

$$S_{out}=M(\beta, \delta)M_P(\theta)S_{in} \quad (3)$$

$\beta=45^\circ$  时, 归一后的出射光为:

$$S_{out}=\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\theta \cos \delta \\ \sin 2\theta \\ \cos 2\theta \sin \delta \end{bmatrix} \quad (4)$$

由公式(4)可知, 液晶可变相位延迟器产生的延迟为:

$$\delta = k\pi + \arctan(S_3/S_1) \quad (5)$$

参数  $k$  是通过测量过零点的  $S_1$  次数确定。当 LCVR 的驱动电压为饱和电压时,  $k=0$ , 随着电压逐渐减小, 直到降为 0,  $S_1$  过零点的次数即为  $k$  值。

### 1.2 测试装置

实验测量装置实物图如图 2 所示。采用激光器、偏振片、LCVR、偏振态测量仪和计算机组成。

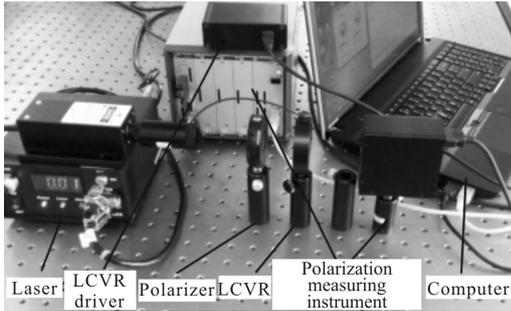


图 2 实验测量装置实物图

Fig.2 Physical map of measuring device

激光器采用波长可调、功率可调的半导体激光器。起偏器的消光比为  $5 \times 10^5$ , 通光口径 20 mm。待测可变相位延迟器(LCVR)为瑞士 Arcoptix 公司产品, 厚度为 10  $\mu\text{m}$ , 具有补偿功能, 通光孔径为 20 mm, 输入电压 0~8 V 可调, 波长范围为 400~700 nm; Stokes 参量测量仪工作波长范围为 400~700 nm, 工作频率大于 30 Hz。

## 2 研究方法

### 2.1 最小二乘支持向量机原理

最小二乘支持向量机 (Least Square Support Vector Machines, LSSVM) 是支持向量机的一种改进形式, 它是把传统 SVM 的不等式约束条件改为等式约束条件, 将低维非线性回归问题转化为高维特征线性回归问题, 并且训练集的经验函数利用了误差平方和的损失函数, 这样把问题由凸二次规划转化为求解线性方程组, 大大降低了计算的复杂性, 提高了求解问题的速度和收敛精度<sup>[12]</sup>。其主要思想是:

给定  $l$  个独立同分布的训练样本  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_l, y_l), i=1, 2, \dots, l, x_i \in R^n$  为  $n$  维训练样本输入量,  $y_i \in R$  为训练样本输出量, LSSVM 寻求一个最优的函数:

$$y = \omega^T \varphi(x) + b \quad (6)$$

式中:  $\varphi(x): R^n \rightarrow R^{n'}$  为核空间映射函数;  $\omega \in R^{n'}$  为权矢量;  $b$  为常值偏量。

根据结构风险最小的原则, 建立 LSSVM 的目标函数为:

$$\min_{\omega, b, \xi} J(\omega, \xi) = \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^l \xi_i^2 \quad (7)$$

约束条件为:  $y_i = \omega^T \varphi(x_i) + b + \xi_i$

式中:  $J$  为损失函数;  $\gamma$  为可调整的正规化参数。为了解决函数优化问题, 构造 Lagrange 函数:

$$L(\omega, b, \xi, \alpha) = \frac{\|\omega\|^2}{2} + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^l \xi_i^2 + \sum_{i=1}^l \alpha_i [\omega^T \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i] \quad (8)$$

式中:  $\alpha_i$  为 Lagrange 乘子。

根据 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件:

$$\frac{\partial L}{\partial \omega} = 0, \frac{\partial L}{\partial b} = 0, \frac{\partial L}{\partial \xi} = 0, \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \quad (9)$$

可得:

$$\omega = \sum_{i=1}^l \alpha_i \varphi(x_i), \sum_{i=1}^l \alpha_i = 0, \alpha_i = \gamma \xi_i$$

$$y_i - \omega^T \varphi(x_i) - b - \xi_i = 0 \quad (10)$$

消去  $\xi$  和  $\omega$ , 即可得  $\alpha_i$  和  $b$ , 从而得到的 LSSVM 的回归模型为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^l \alpha_i K(x, x_i) + b \quad (11)$$

式中:  $K(x, x_i) = (\varphi(x))^T (\varphi(x_i))$  为满足 Mercer 条件的核函数。

### 2.2 LSSVM 模型的建立

以 Matlab 7.11.0 为开发环境, 利用美国 K Pelekmans, J.A.K, Suykens 开发的 LSSVM lab 工具箱建立最优模型, 实现对液晶相位延迟器延迟特性的预测。

LSSVM 建模主要是核函数和参数的选取, 多项式核函数的参数较多, 相应的复杂程度比 RBF 核函数高, 为了提高样本的训练速度, 文中采用径向基函数(RBF)作为核函数; 参数选取需要确定核函数参数  $\sigma^2$  和正规化参数  $\gamma$  的最优组合, 采用网格搜索 (grid-search) 和交互验证 (cross validation) 方法确定。

最终得到估计函数式:  $f(x) = \sum_{i=1}^l \alpha_i K(x, x_i) + b$ , 其中, 核函数  $K(x, x_i) = \exp(-\|x - x_i\|^2 / 2\sigma^2)$ ,  $\sigma > 0$ 。

### 2.3 数据样本的获取及处理

采用图 1 所示的装置,通过偏振测量仪测量  $S_1$ 、 $S_3$  的值并由计算机记录,多次测量并对每组数据取平均值作为研究数据样本,根据公式(5),在 MATLAB 平台上编写程序进行数据处理,从而得到不同驱动电压  $U$  对应的相位延迟量  $\delta$  值。测量数据情况如下:在 635 nm 波长下,LCVR 分别处于 25 °C、30 °C、40 °C 环境时,每种情况测得 256 组数据;通过观察,原始样本数据取 6 V 以内的 161 组数据,如图 3 所示。

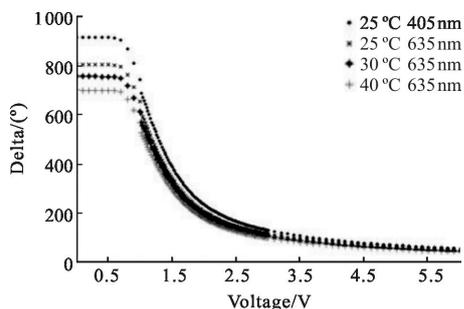


图 3 161 组原始样本数据  
Fig.3 161 set of raw samples

从图 3 可看出,LCVR 入射光波长为定值时,LCVR 的相位延迟量随温度下降;当驱动电压  $U \leq 1.2$  V 时,相位延迟量  $\delta$  基本不变,从 LCVR 工作原理可知,此时液晶偏转角度理论上基本不变,故这部分数据在仿真时去除;当  $1.2 < U \leq 1.6$  V 时,相位延迟量急剧下降,说明 LCVR 阈值电压约为 1.2 V;当  $U > 1.6$  V 时,LCVR 相位延迟量的变化缓慢,最后趋于一个极值。

建模采用的数据样本为 25 °C、405 nm 波长、驱动电压  $1.2 < U \leq 6$  V 下测得的 141 组实验数据,输入为相位延迟量,输出为驱动电压  $U$ 。用 mapminmax 函数对图 3 中的数据进行 [0, 1] 归一化处理,并将实验样本数据分为训练集(71 组)和测试集(70 组)。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 LSSVM 预测结果

对同一训练集采用 LSSVM、遗传算法和粒子群算法参数寻优方法的 epsilon-SVM 算法回归建模,分别依次简称为 LSSVR、GASVR、PSOSVR 算法,依据所建立模型对测试样本进行验证,测试样本验证拟合曲线如图 4 所示。

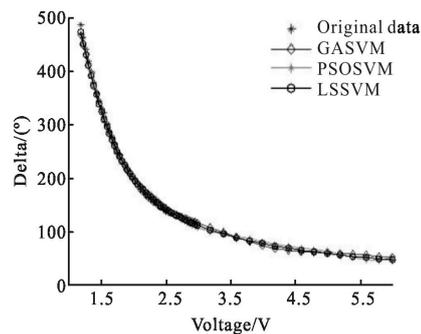


图 4 基于不同模型的相位延迟特性拟合曲线

Fig.4 Phase delay characteristic curve fitting based on different models

从图 4 可看出,GASVR、PSOSVR 算法对大部分样本的预测效果非常好,而对个别数据预测效果欠佳;LSSVM 算法总体拟合效果较好。

### 3.2 三种建模方法性能的比较

三种建模方法的性能如表 1 所示,测试集均方误差(MSE)和测试集最大波长偏差( $\Delta\lambda$ )两方面来呈现。

表 1 三种方法性能比较

Tab.1 Performances comparison of three methods

Performance index	Modeling methods		
	GASVR	PSOSVR	LSSVM
Optimal parameters	$c=3.758\ 62$ $g=22.169\ 1$	$c=7.876\ 17$ $g=20.179\ 2$	$\gamma=597.451\ 3$ $\sigma^2=0.227\ 559$
MSE	4.055 6	3.969 1	2.076 8
$\Delta\lambda(\lambda)$	0.013 6	0.013 7	0.004 5

经过反复实验,GASVR 模型在  $c=3.758\ 62$ 、 $g=22.169\ 1$  和 PSOSVR 模型在  $c=7.876\ 17$ 、 $g=20.179\ 2$  达最佳拟合状态,两者的 MSE 接近相同,约为 4;LSSVM 预测模型在  $\gamma=597.451\ 3$ 、 $\sigma^2=0.227\ 558\ 9$  达最佳拟合状态,MSE 约为 2.1。对拟合数据研究得出,GASVR、PSOSVR、LSSVM 方法下最大波长偏差  $\Delta\lambda$  分别为  $0.013\ 6\lambda$ 、 $0.013\ 7\lambda$  和  $0.004\ 5\lambda$ ,精度大大提高。

综上,LSSVM 的建模方法性能优于其他两种建模方法,同时兼顾训练精度和泛化能力两方面的性能。应用 LSSVM 得到的决策函数作为 LCVR 相位延迟曲线,即可预测任意相位延迟量  $\delta$  对应的驱动电压。

影响 LCVR 测试系统测量数据的主要因素有两个:一是温度变化,根据 LCVR 数据表提供的延迟量

下降率为  $0.4\%/^{\circ}\text{C}$ ,可依据此推算 LCVR 的延迟量值;二是起偏器  $P$  的方位角  $\theta$ 、LCVR 快轴方位角  $\beta$ ,由公式(4)可知,当  $\theta=0^{\circ}$ 、 $\beta=45^{\circ}$ 时,偏振片的方位角  $\theta$  对  $S_1$  和  $S_3$  的影响是相同比例,在公式(6)中  $S_3/S_1$  消除,故未影响 LCVR 的相位延迟值;而  $S_2$  的值为零。通过先调  $\theta=0^{\circ}$ ,再粗调 LCVR 的  $\beta=45^{\circ}$ 后,再细调  $P$  和 LCVR 的  $\theta$  和  $\beta$ ,通过偏振态测量仪观察  $S_2$  使其为 0,降低 LCVR 方位角的影响。同时受工艺的限制,激光经过起偏器和 LCVR 后具有初始的相位延迟,应测得该初始相位,从所得结果中减去相应的初始相位。这样测试的数据误差是很小的。

## 4 结 论

文中从实用性出发,测量 LCVR 调制的出射光  $S_1$  和  $S_3$  参数,通过计算得出 LCVR 的相位延迟量与驱动电压对应数据样本,采用 SVM 和 LSSVM 算法建立 LCVR 相位延迟特性回归模型,消除了起偏器方位角误差引起的对相位延迟量的影响,且 LSSVM 预测模型在  $\gamma=597.4513$ ,  $\sigma^2=0.2275589$  时拟合效果最佳,测试集的均方误差在 2.1 左右,最大波长误差为  $0.0045\lambda$ ,LSSVM 算法可提高预测精度,快速、准确地实现驱动电压值的预测,满足全偏振成像系统的高精度要求,是一种具有实用价值的全波段 LCVR 相位延迟特性的预测方法。

## 参考文献:

- [1] Li Yubo, Zhang Peng, Zeng Yuxiao, et al. Remote sensing measurement by full-Stokes-Vector based on opto-electronic modulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 335-338. (in Chinese)  
李宇波,张鹏,曾宇晓,等.基于光电调制器的全 Stokes 矢量的遥感测量[J].红外与激光工程,2010,39(2): 335-338.
- [2] Li Jie, Zhu Jingping, Qi Chun, et al. Large aperture static hyperspectral imaging full polarimetry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 574-578.  
李杰,朱京平,齐春,等.大孔径静态超光谱全偏振成像技术[J].红外与激光工程,2014,43(2): 574-578.
- [3] Wang Xia, Zhang Chaoyang, Chen Zhenyu, et al. Overview on system structure of active polarization imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2244-2251. (in Chinese)  
王霞,张朝阳,陈振跃,等.主动偏振成像的系统结构概述[J].红外与激光工程,2013,42(8): 2244-2251.
- [4] Li Shujun, Jiang Huilin, Zhu Jingping, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803-809. (in Chinese)  
李淑军,姜会林,朱京平,等.偏振成像探测技术发展及关键技术[J].中国光学,2013,6(6): 803-809.
- [5] Jiang Jijun, Zhang Dayong, Li Jianfeng. Liquid crystal variable retarder development and electric-control retardation measurement [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(5): 652-655. (in Chinese)  
江继军,张大勇,李剑峰.液晶可变延迟器研制及其电控相位延迟测量[J].激光技术,2011,35(5): 652-655.
- [6] Gilman S E, Baur T G, Gallagher D J, et al. Properties of tunable nematic liquid-crystal retarders [C]//SPIE, 1990, 1166: 461-471.
- [7] Zhang Ying, Zhao Haibo. Liquid crystal variable retarder attached with compensator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(8): 1798-1803. (in Chinese)  
张颖,赵海博.带有补偿器的液晶相位可变延迟器 [J].光学精密工程,2009,17(8): 1798-1803.
- [8] Devaraj R, Sankarasubramanian K, Surekha Kamath. Integration and calibration of a multi slit spectropolarimeter [J]. *Advances in Space Research*, 2013(52): 232-240.
- [9] Hou Junfeng, Wang Dongguang, Deng Yuanyong, et al. Phase retardation measurement with least squares fitting method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0812001-1-6. (in Chinese)  
侯俊峰,王东光,邓元勇,等.基于最小二乘拟合的波片相位延迟测量 [J].光学学报,2011,31(8): 0812001-1-6.
- [10] Zhang Zhiyong, Deng Yuanyong, Wang Dongguang, et al. Comparison and analysis of several methods for measuring waveplate retardation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11): 1678-1685. (in Chinese)  
张志勇,邓元勇,王东光,等.几种波片相位延迟量方法的对比 [J].光学精密工程,2007,15(11): 1678-1685.
- [11] Liao Yanbiao. The Polarization of Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 52-56,243-244. (in Chinese)  
廖延彪.偏振光学 [M].北京:科学出版社,2003: 52-56,243-244.
- [12] Liang Dong, Xie Qiaoyun, Huang Wenjiang, et al. Polarization orientation calibration of simultaneous imaging polarimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 243-248. (in Chinese)  
梁栋,谢巧云,黄文江,等.最小二乘支持向量机用于时间序列叶面积指数预测 [J].红外与激光工程,2014,43(12): 243-248.