

基于叶片含水量的激光偏振成像模型研究

李小路, 李昀晔, 谢鑫浩, 徐立军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 目标物体的偏振特性是一种固有特性, 由目标的外部结构、内部结构以及入射角度等决定, 因此利用偏振信息研究植物叶片含水量测量。主要研究过程分为以下五个部分: 搭建激光偏振成像测量实验系统、计算目标偏振度、测量叶片实际含水量、建立偏振度与叶片含水量间映射模型、验证映射模型。根据目标与环境特性, 选择和调整实验器件和实验步骤; 基于图像灰度提取方法计算目标偏振度; 采用水分梯度处理方法测量叶片实际含水量; 基于统计方法建立叶片偏振度与含水量的一到三阶函数映射模型, 比较一到三阶模型的稳定性与预测能力分析其适用情况, 为利用偏振测定植物叶片含水量的方面提供理论基础。结果发现: 在含水量所处 15%~75% 区间内, 偏振度随着水分含量上升呈现一个递增趋势。含水量较高情况下, 递增关系较明显; 含水量较小情况下, 映射关系不显著。

关键词: 偏振遥感; 偏振度; 叶片含水量; 水分梯度; 映射模型

中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1106004

Laser polarization imaging models based on leaf moisture content

Li Xiaolu, Li Yunye, Xie Xinhao, Xu Lijun

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

Abstract: The polarization characteristic of objects is an inherent characteristic, depending on the external and internal structure of targets as well as the incident angle. Therefore, the measurement of leaf moisture content was researched with polarization information. The research process was divided into the following five parts: Establishing the laser polarization imaging measurement system, calculating the polarization degree of targets, measuring the actual moisture content of leaf, establishing a mapping model between polarization degree and leaf moisture content, and validating the mapping model. According to the target and environment characteristics, the devices and steps of experiment can be chosen and adjusted. The polarization degree can be measured by the method of extracting grey-scale value of the image. Moisture gradient processing was used to measure the actual moisture content of leaf. The mapping models between polarization degree and leaf moisture content were established in the first to third orders based on statistical method. Their stabilities and predictive abilities were compared to analyze their applicable conditions, which provide a theoretic foundation of leaf moisture content measurement with polarization information. The result shows that the polarization degree increases progressively with the moisture

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61671038, 61121003, 61225006); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1203)

作者简介: 李小路(1981-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光雷达及光信号处理方面的研究。Email: xiaoluli@buaa.edu.cn

通讯作者: 李昀晔(1994-), 女, 硕士生, 主要从事偏振激光雷达及数据处理方面的研究。Email: hilary129@163.com

content rising from 15% to 75%. The mapping relationship was obvious in case of the high moisture content, while it was insignificant in case of the low moisture content.

Key words: polarization remote sensing; polarization degree; leaf moisture content; moisture gradient; mapping model

0 引言

激光雷达偏振遥感是一种主动遥感技术,其光束波长小、定向性好,因此空间、时间分辨能力较好,灵敏度较高^[1]。不同物质的偏振特性一般不同,因此偏振探测可有效地对目标进行反演^[2]。此项技术可用于叶片生物量、特别是含水量的测量,以此来准确评估干旱、指导作物灌溉,在农、林业方面潜力巨大。

现阶段国内外遥感测量叶片含水量主要利用光谱法,可以分为建立统计和物理模型两类。统计模型利用反射率和水分指数来建立, Penuelas 与 Gao 等人已在该领域取得成果^[3]。但是该方法推广到室外遥感会产生大量干扰因素,且缺乏鲁棒性与可移植性,时空尺度的限制明显。物理模型主要有两种:叶片光学模型 PROSPECT 和冠层模型 SAIL (Scattering from Arbitrarily Inclined Leaves),两者皆为叶片反射率、透射率与其水分含量或者干物质之间的关系,颜春燕等人利用该模型得到了玉米叶片的模拟结果^[3]。但该方法模型结构比较复杂,所含变量较多,测量难度较大,会影响实际应用效果。

针对光谱法手段实时应用性差的问题,文中提出采用偏振法测量叶片含水量。Vanderbilt 等人发现,光照射叶片返回后分为两个部分:一是叶片内部的多次反射,受其内部信息的影响;二是表面的单次镜面反射,受其外部因素影响^[4]。前者表现出无偏特性,而后者具有十分显著的偏振特性。因此,叶片含水量变化会相应地改变反射光中偏振光的比例,即改变偏振度,该结论为文中所采用方法提供了理论基础。

偏振成像相较于上述传统测量优势明显,对比度更高,抑制背景噪声能力更强,可获得物体更多信息。目前国内外在测量叶片生物特性方面已逐渐开始应用偏振手段。Shibayama 等人利用小麦实现偏振测量对叶片平均叶倾角的反演^[5-6]。Raven 等人发现叶片表面结构对于其偏振特性的影响,证明了偏振特性反演叶片结构的可行性^[7-8]。Vanderbilt 等

人发现偏振度还受叶片含水量以及其他内部因素影响,均为偏振度反演叶片生理参数奠定了基础^[4]。基于上述事实,文中采用激光偏振成像技术测量叶片的含水量,建立偏振度与叶片含水量之间的映射模型,为农、林业遥感提供了一种新思路。

1 激光偏振成像测量实验系统

激光偏振成像测量系统主要是通过对目标后向散射光的偏振态进行检测,计算其偏振度。参考其他偏振遥感系统^[9-10],最终搭建的系统主要由激光器、偏振产生系统(Polarization State Generator, PSG)、扩束系统、接收系统、偏振状态检测系统(Polarization State Analyzer, PSA)以及数据采集系统 6 个部分组成。图 1 为系统光路图。

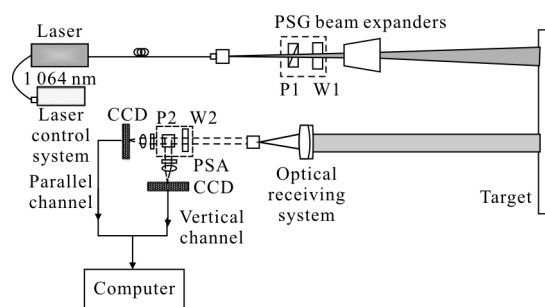


图 1 激光偏振成像测量实验系统光路

Fig.1 Beam path of laser polarization imaging measurement experiment system

该实验系统采用半导体连续激光器,其中心波长为 $1064\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$; PSG 由 Glan-Taylor 偏振棱镜 P1 和 1/4 波片 W1 组成;扩束透镜为 K9 平凹透镜;接收系统采用近红外双胶合透镜;PSA 由偏振分光棱镜 P2 与 1/4 波片 W2 构成;CCD 相机为 Allied Vision Technologies 公司生产的 GC2450。实验前需要调节 P1 和 P2 的透光轴和 y 轴重合,W1 的快轴以及 W2 的慢轴均和 x 轴夹角为 17.63° 。基于 P1、W1、P2 和 W2,产生适当的偏振夹角,可以得到系统两通道光强得出目标偏振度,详细推导见下文。

2 叶片含水量与偏振度映射模型

穆勒矩阵是一个表示光照射到物体前后偏振态变化的 4×4 系数矩阵。当背景中没有双折射材料时,偏振度与目标穆勒矩阵关系为^[11-12]:

$$P_d = \frac{m_{11} + m_{22} + m_{33}}{3m_{00}} \quad (1)$$

式中: P_d 为偏振度; m_{00} 、 m_{11} 、 m_{22} 、 m_{33} 分别为目标穆勒矩阵的对角线元素。

采用 CCD 相机进行两个通道数据采集得到图像,已知系统中 P1、W1、P2 和 W2 四参数的角度,可以求得两通道光强 $I_{//}$ 和 I_{\perp} 。可以表示为^[12]:

$$\begin{cases} I_{//} = m_{00} + \frac{4}{9}m_{11} + \frac{2}{9}m_{22} + \frac{1}{3}m_{33} \\ I_{\perp} = m_{00} - \frac{4}{9}m_{11} - \frac{2}{9}m_{22} - \frac{1}{3}m_{33} \end{cases} \quad (2)$$

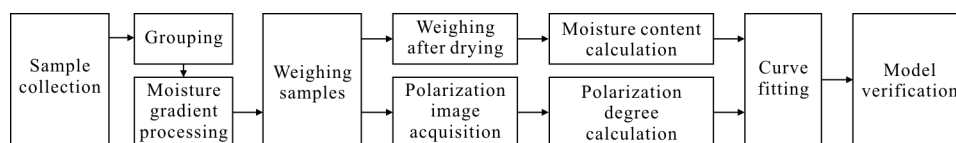


图 2 测量叶片偏振度与含水量框图

Fig.2 Block diagram of measuring leaf polarization degree and moisture content

富,易采集,适合作为本实验样本。采集时间为早晨 8 点钟,此时的含水量较高,在同块区域进行采样以保证叶片生长状况基本相同,共采集 48 片。采摘后密封保存并分组编号,共分 8 组,每组 6 片样本。由于之后进行偏振度测量实验时,固定叶片的背景板面积较小,样本皆剪为同一形状待用。

3.2 水分梯度处理实验

该实验采用干燥箱加热烘干的方式设置 8 个水分梯度,第 1 组不进行任何处理。实验中选取 50 °C 作为加热温度,该温度下生物活性破坏较小。将第 2~8 组样本放入干燥箱中,从第 2 组开始每 10 min 后取出一组,作为一个水分梯度,最后用精度为 0.000 1 g 的电子天平对叶片样本称重。

采用无量纲形式 MR(Moisture Ratio)来表示叶片含水量,可简化为:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} \quad (4)$$

式中: m_t 、 m_0 、 m_e 分别为干燥 t 时间时、初始状态与烘干至恒重后的样本叶片重量。作干燥曲线,可以直观

已有研究成果表明^[12], $m_{11} \approx m_{22}$,将公式(2)与公式(1)联立,得到用 $I_{//}$ 和 I_{\perp} 表示的偏振度 P_d 。

$$P_d = \frac{I_{//} - I_{\perp}}{I_{//} + I_{\perp}} \quad (3)$$

因此该系统可测量目标偏振度。系统出射光照射叶片后会发生散射,水含量越大,内部后向散射的情况越多,其偏振态的改变越强,偏振度越大。孟夏在敏感波段针对两者关系做出了定性分析,与上述结论相符^[13]。

3 实验与结果分析

为了研究叶片偏振度与含水量的关系,首先需要通过对二者分别进行测量。设计思路如图 2 所示。

3.1 实验取样

冬青叶片质地较厚,大小均匀,含水量较为丰

描述在某一温度下叶片的含水量变化情况。在 50 °C 下,以 10 min 为间隔的干燥曲线如图 3 所示,得到 8 组水分梯度。

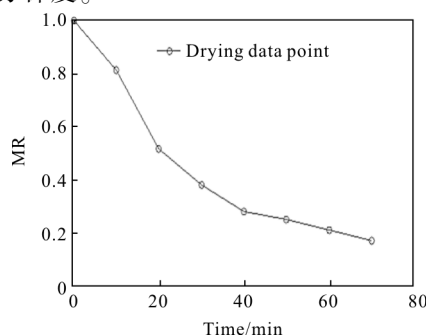


图 3 50 °C 下干燥曲线

Fig.3 Drying curve under the condition of 50 °C

3.3 偏振度测量实验

激光经扩束后发散角约为 3.8°,探测距离为 6 m,故光斑直径 0.398 m,足以将目标全部覆盖,得到完整的两通道图像。为了保证入射角度不会影响所测偏振度^[13],确保含水量是偏振反演映射模型中唯一的输入变量,每一样本均置于光斑同一位置。

实验中的关键问题是背景和曝光时间的选择。背景本身的偏振度对目标并无影响,只需尽量减小噪声干扰。选择吸光性能好的黑色卡纸,表面粗糙度会引起相干斑噪声。因此将透过率 90% 的 1 064 nm 波长滤光片置于卡纸前,通过比较两图像背景,发现使用滤光片后相干斑噪声更小。

为了加强图像信号,需要增大曝光时间。由于曝光时间过长,噪声过大影响图像质量。实验中设置了几种曝光时间,拍摄同一样本,并分别计算出其相干斑噪声系数。经比较发现选取曝光时间 0.5 s 最为合适。拍摄后,基于图像灰度提取方法,得出样本两通道图像每个像素的光强值,匹配后的偏振图像每个像素点的值由公式(3)计算得出,实验中采取截部分区域求平均值的方法来计算偏振度。

实验其中一个样本匹配合成后的偏振图像如图 4 所示。

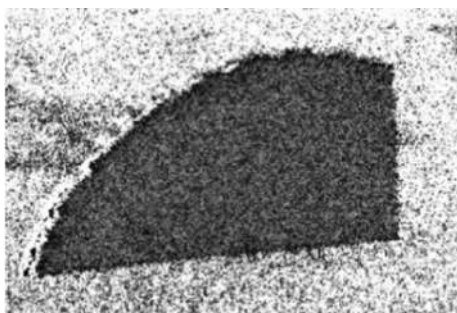


图 4 样本偏振图像

Fig.4 Polarization image of the sample

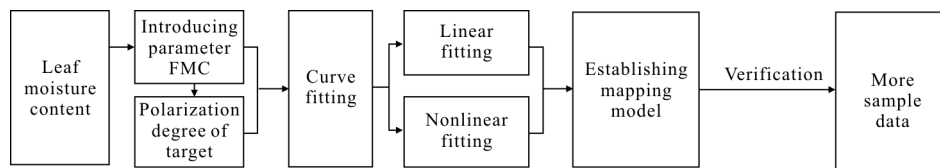


图 6 映射模型建立与验证的流程图

Fig.6 Flow chart of establishing and validating a mapping model

利用统计软件建模,如表 1 所示。其中, x 代表含水量, y 代表偏振度。映射模型曲线图如图 7 所示。

表 1 映射模型

Tab.1 Mapping models

Order	Model
1st	$y=0.120 2x+0.195 4$
2nd	$y=0.404 7x^2-0.270 9x+0.280 8$
3rd	$y=1.099 0x^3-1.107 0x^2+0.370 3x+0.197 9$

3.4 含水量测量实验

该实验中的样本均采用可燃物含水量 FMC (Fuel Moisture Content) 来衡量其含水量,计算公式如:

$$FMC = \frac{W_f - W_d}{W_f} \times 100\% \quad (5)$$

式中: W_f 为叶片新鲜时重量; W_d 为叶片烘干后重量。烘箱温度设定为 85℃,将所有叶片样本在其中烘干直至恒重,在电子天平上分别称重。烘干后的叶片样本如图 5 所示。

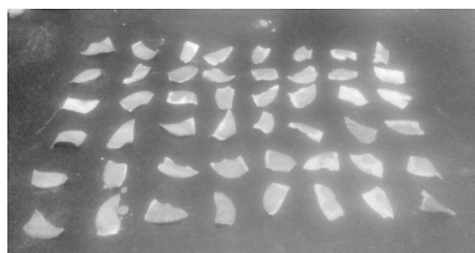


图 5 烘干至恒重后的叶片样本

Fig.5 Samples after drying to constant weight

值得注意的一点是,从样本采摘到烘干的整个过程时间不宜过长,否则水分会随着时间散失,使得测量结果出现较大误差。

3.5 映射模型的建立与验证

实验中每个水分梯度的前 4 组用于建立模型;后 2 组用于验证模型。整个建模过程示意图如图 6 所示。

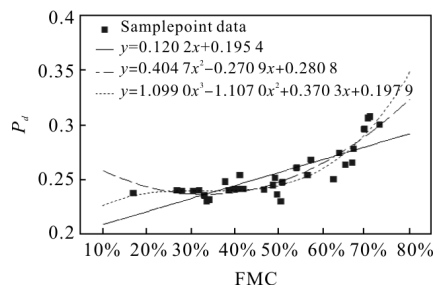


图 7 映射模型曲线

Fig.7 Curve of mapping models

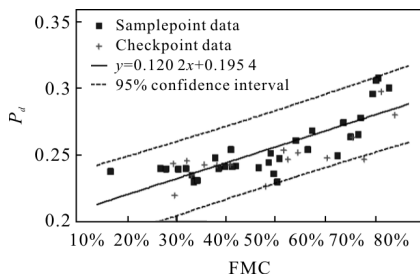
利用模型决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 可从稳定性与预测能力方面对模型进行评价, 结果见表 2。可知阶数增大, R^2 增大, RMSE 减小, 说明映射模型的稳定性和精度随着阶数增加而增加。二阶以上模型的 R^2 变化越来越小, 说明二阶模型可以较好地兼顾简单性与稳定性; 且三种模型 RMSE 相差不大, 认为其预测能力相近。

表 2 映射模型评价情况

Tab.2 Evaluation of the mapping models

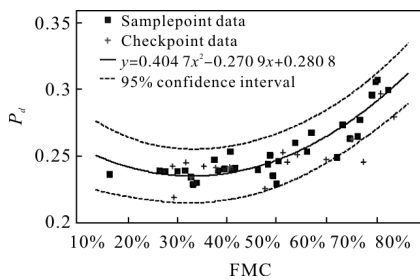
Order	R^2	RMSE
1st	0.665	0.013 22
2nd	0.832 9	0.009 495
3rd	0.863 2	0.008 741

为了减小模型的偶然性, 增大其可信度, 需要对所建立的三种模型进行检验。检验情况如图 8 所示,



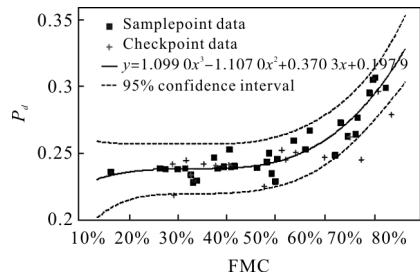
(a) 一阶模型检验情况

(a) Inspection of the first-order model



(b) 二阶模型检验情况

(b) Inspection of the second-order model



(c) 三阶模型检验情况

(c) Inspection of the third-order model

图 8 模型验证

Fig.8 Inspection of the models

其中方形代表建模所用数据点, 十字代表用于检验的数据点, 虚线表示 95%置信区间边界。图中检验点基本都处于曲线 95%置信区间之内, 因此可以认为映射模型是可信的。

3.6 结果分析

由实验结果可以看出, 在含水量所处 15%~75% 区间内, 样本的偏振度随着水分含量总体上呈现一个递增趋势, 符合文中分析结论。

并且含水量较高时, 偏振度随其递增关系明显; 含水量较小时, 两者映射关系不显著。可解释为: 叶片内部存在许多影响偏振度的生物组分, 在含水量较大而其他生物量默认相同的情况下, 其偏振度受水分的影响较大; 而当样本含水量较小时, 水分不再是偏振度的主要影响因素, 叶片偏振度随水分变化趋势渐缓。

结果显示偏振度在 0.2~0.3 之间变化, 范围较小。有其他研究表明, 在 1 430~1 480 nm 波段偏振度对叶片含水量较敏感, 而在红外与近红外波段并不敏感^[13]。因此在实验室 1 064 nm 的波长下, 所测偏振度变化不大。上述结论需要进一步研究证实。

4 结论

文中通过偏振图像方法, 对冬青叶片的含水量进行了梯度测量和映射建模, 对模型稳定性与预测能力的评价分析, 可以总结成下面这些结论:

(1) 在含水量所处 15%~75% 区间内, 样本偏振度随其总体上呈现一个递增趋势。且含水量较高的情况下该递增关系较为明显, 含水量较低的情况下递增关系不显著。

(2) 忽略模型稳定性与精度要求情况下, 可以认为冬青叶片的偏振度与含水量之间满足一阶映射模型关系。

(3) 满足模型稳定性与预测能力的要求且模型简易, 可以认为冬青叶片的偏振度与含水量之间满足二阶映射关系。

由于上述结论来自于对单片特定种类叶片(冬青)的实验室研究, 方法的鲁棒性和广泛性可以进一步实验验证。文中的双通道偏振图像法测量植物含水量系统及其方法, 具有简易和广泛应用的潜在可能, 可以对特定植物物种进行测量标定后应用。

参考文献:

- [1] Zhao Jinsong. Developments of polarization imaging technology [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(12): 743–750. (in Chinese)
赵劲松. 偏振成像技术的进展 [J]. 红外技术, 2013, 35(12): 743–750.
- [2] Su Zhiqiang, Yan Changxiang, Zhang Junqiang, et al. Inversion of quartz glass and green paint based on polarization characters [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(5): 547–553. (in Chinese)
苏志强, 颜昌翔, 张军强, 等. 基于偏振特性对石英玻璃和绿漆涂层的反演[J]. 中国光学, 2016, 9(5): 547–553.
- [3] Zhang Jiahua, Xu Yun, Yao Fengmei, et al. Advances in estimation methods of vegetation water content based on optical remote sensing techniques [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2010, 40(10): 1121–1129. (in Chinese)
张佳华, 许云, 姚凤梅, 等. 植被含水量光学遥感估算方法研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(10): 1121–1129.
- [4] Vanderbilt V C, Grant L. Plant canopy specular reflectance model [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-23(5): 722–730.
- [5] Wang Xia, Xia Runqiu, Jin Weiqi, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175–3182. (in Chinese)
王霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振成像探测技术进展 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3175–3182.
- [6] 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现状及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803–809.
- [7] Shibayama M, Watanabe Y. Estimating the mean leaf inclination angle of wheat canopies using reflected polarized light [J]. *Planet Production Science*, 2007, 10(3): 329–342.
- [8] Raven P N, Jordan D L. Polarized directional reflectance from laurel and mullein leaves [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(5): 1002–1012.
- [9] Song Zhiping, Yin Yuhao, Zhang Minghui, et al. Verification of PSIM system based on tunable polarization light source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(3): 477–481. (in Chinese)
宋志平, 殷雨豪, 张明辉, 等. 基于可调偏振度源验证偏振光谱强度调制系统[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 477–481.
- [10] Wang Fangbin, Hong Jin, Sun Xiaobing, et al. Prediction of polarization pattern by SVM [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 2914–2922. (in Chinese)
汪方斌, 洪津, 孙晓兵, 等. 基于支持向量机预测偏振模式 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2914–2922.
- [11] Yang Wei, Gu Guohua, Chen Qian, et al. Obtaining and processing of Mueller matrix image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3831–3836. (in Chinese)
杨蔚, 顾国华, 陈钱, 等. 穆勒矩阵图像的获取及处理[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3831–3836.
- [12] Sébastien Breugnot, Philippe Clémenceau. Modeling and performances of a polarization active imager at $\lambda=806$ nm [J]. *Opt Eng*, 2000, 39(10): 2681–2688.
- [13] Meng Xia, Xie Donghui, Wang Yan, et al. Study on multi-angular polarized spectrum characteristics of leaf based on some indoor experimental data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 619–623. (in Chinese)
孟夏, 谢东辉, 汪艳, 等. 叶片多角度偏振光谱特性影响因素的实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(3): 619–623.