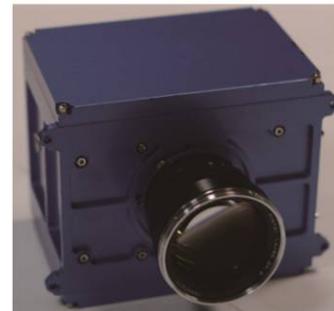




小型机载偏振成像系统研制及应用研究

王海峰, 胡奇琪, 段佳著, 黄立贤, 乔冉, 李大鹏,
吴凡, 储松南*

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900



摘要: 机载偏振成像是未来遥感探测领域的重要研究方向之一。首先基于液晶双折射率效应完成了高精度液晶偏振控制器研制, 并对其偏振调制精度进行标定; 然后利用液晶偏振控制器搭建了高精度小型机载偏振成像系统, 并基于小型固定翼无人机完成了系统的搭载飞行测试和目标识别探测试验。试验结果表明, 液晶偏振控制器的 Stokes 偏振参数调制精度优于 98%, 利用液晶偏振控制器搭建的小型机载偏振成像系统可有效抑制背景干扰, 提高低对比度目标的轮廓提取能力和目标识别能力。研究成果为偏振成像技术在目标侦察、环境监测、农作物普查等方面的应用提供了一种有效的技术途径。

关键词: 机载; 偏振成像; 遥感探测; 液晶; 无人机; 增强探测; 目标侦查

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

Development and applications of small airborne polarization imaging system

Haifeng Wang, Qiqi Hu, Jiazhu Duan, Lixian Huang, Ran Qiao, Dapeng Li, Fan Wu and Songnan Chu*

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Abstract: Airborne imaging polarimeter is one of the important research techniques in the remote sensing fields. The high-precision polarization controller based on the birefringence effect of liquid crystal is developed and calibrated. Then, a miniaturized airborne imaging polarimeter (integrating liquid crystal polarization controller, optical detector, imaging memorizer, and electrical system) is built and fixed on small unmanned aerial vehicles to detect specific targets. The experimental results show that the stability of the Stokes polarization parameter of the liquid crystal polarization controller is better than 98%, and the small airborne polarization imaging system could be used to effectively suppress the background interference and improve the contour extraction ability and target recognition ability of the low contrast targets. This study provides an effective technical approach for expanding the polarized imaging applications in target surveillance, environmental monitoring, crop investigating, and so on.

Keywords: airborne; polarization imaging; remote sensing; liquid crystal; unmanned aerial vehicle; enhanced detect; target surveillance

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.11.006

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(11): 1075-1082

收稿日期: 2017-08-18; 收到修改稿日期: 2017-10-17

*E-mail: 15378234135@163.com

1 引言

偏振是电磁波的重要特征,是光所携带信息中除了波长、振幅、相位以外的又一重要属性^[1-4]。根据菲涅耳反射定律和基尔霍夫热辐射理论,地球表面及大气中的任何目标,在发射、散射、透射和辐射电磁波的过程中都会产生与他们自身性质和光学基本定律相关的特殊偏振特性,而且不同物体或同一物体的不同状态的偏振信息都会有所差别^[5,6]。偏振成像探测可同时获取目标的光强、空间和偏振信息,实现目标的光强度图像无法显示的表面粗糙度、纹理走向、表面取向、表面电导率、材料的理化特性、含水量等信息探测,可有效提高对比度目标探测和识别的准确性。美国、法国、日本、中国等国的研究表明,偏振成像系统在云和大气溶胶的探测、地质勘探、资源分析、环境检测、目标识别、生物及医学诊断等领域都具有广泛的应用前景和较高的经济价值^[7-10]。

在成像搭载平台方面,小型无人机由于使用简单,生存能力强、机动性好等特点,逐渐成为环境监测、农业普查、目标监视等军民遥感探测应用的重要平台。基于小型无人机平台的机载偏振成像系统将在未来的军事侦察和民事遥感探测中扮演越来越重要的角色。小型无人机平台搭载能力和应用市场的灵活性要求偏振成像系统必须具备轻小型、高精度、低功耗、工艺可靠和易于功能扩展(如偏振光谱融合探测)等特点^[11-13]。偏振调制方式是整个系统的核心,关系到整个成像系统的使用性能。目前常用偏振调制方式主要有偏振片机械旋转型、分振幅型、分波前型、分焦平面型和电控调制型,其中机械旋转型和电控调制型属时域偏振调制方式,分振幅型、分波前型和分焦平面型属空域偏振调制方式^[2]。

液晶偏振调制探测技术使得用户通过控制液晶可调相位延迟器上的加载电压即可实现入射光束的偏振状态控制和全 Stokes 偏振参数反演计算,该技术具有体积小、重量轻、功耗低、通光口径大、探测精度高、可移植性强等技术特色,适用于小型机载偏振成像系统^[14-16]。目前市场上的高精度液晶可调相位延迟器主要由美国的 CRI 公司和 Meadowlark 公司研制,

近年来,中国工程物理研究院流体物理研究所、广州星博科仪有限公司为代表的单位也实现了高精度液晶可调相位延迟器的研制和生产^[14]。

本文基于液晶双折射率效应完成了高精度液晶偏振控制器研制,并对其偏振调制精度进行了标定;利用液晶偏振控制器搭建了高精度机载偏振成像系统,并基于小型固定翼无人机完成了系统的搭载飞行测试和目标识别探测试验。实验结果表明,液晶偏振控制器的 Stokes 偏振参数调制精度优于 98%。

2 液晶偏振控制器调制原理

液晶偏振控制器工作示意图如图 1 所示,系统主要由一个可调滤光片(前置滤光片)、两个液晶可调相位延迟器(L1、L2)和一片线性偏振片(P)组成。当确定波长、液晶可调相位延迟器的快轴偏角和线性偏振片的偏振透射方向后,控制加载到液晶可调相位延迟器上的电压,可以实现参考光束的偏振状态控制。在不同的调制状态下,通过探测光束的光强,可以推算出入射光束的 Stokes 偏振参数,进而实现光束偏振参数的探测。

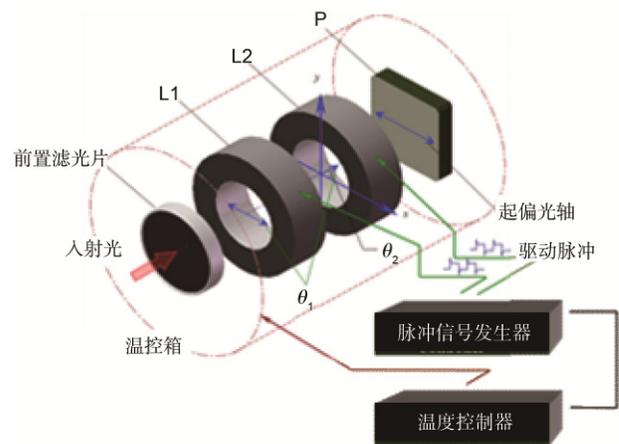


图 1 液晶偏振调制器工作示意图。

Fig. 1 The working scheme of liquid crystal polarized modulator.

液晶可调相位延迟器的 Muller 矩阵 M_L ^[14,17]如式(1)所示:

$$M_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos \delta & \cos 2\theta \sin 2\theta (1 - \cos \delta) & -\sin 2\theta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \cos 2\theta (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cos \delta & \cos 2\theta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \sin \delta & -\cos 2\theta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： θ 为液晶可调相位延迟器的快轴方向与参考水平方向夹角， δ 为延迟器对光束偏振状态的相位延迟量。

当入射光束依次通过液晶可调相位延迟器 L1，液晶可调相位延迟器 L2 和理想线偏振片 P 时，其出射光束 Stokes 参数 S_{out} 为

$$S_{out} = M_P \times M_{L2} \times M_{L1} \times S_{in}, \quad (2)$$

式中： M_P 为理想线偏振片 Muller 矩阵， M_{L2} 为 L2 液晶可调滤光器 Muller 矩阵， M_{L1} 为 L1 液晶可调滤光器 Muller 矩阵， S_{in} 为入射光 Stokes 参数。

根据理论分析和优化设计，系统选取 $\theta_1=0^\circ$ ， $\theta_2=45^\circ$ ，理想线偏振片偏振方向 $\beta=90^\circ$ ，则

$$S_{out} = \begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_2 & 0 & -\sin \delta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \delta_2 & 0 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_1 & \sin \delta_1 \\ 0 & 0 & -\sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中： $[I', Q', U', V']^T$ 为出射光的 Stokes 参数矩阵， $[I, Q, U, V]^T$ 为入射光的 Stokes 参数矩阵。

从式(3)可以得出：

$$I'_{(\delta_1, \delta_2)} = (I/2) - (Q/2) \cos \delta_2 - (U/2) \sin \delta_1 \sin \delta_2 + (V/2) \cos \delta_1 \sin \delta_2, \quad (4)$$

式中： δ_1 为 L1 液晶可调相位延迟器的相位延迟量， δ_2 为 L2 液晶可调相位延迟器的相位延迟量。

由于需要求解 4 个参数，因此 (δ_1, δ_2) 必须取 4 组参数，基于计算方便的原则，L1、L2 的相位延迟量 (δ_1, δ_2) 分别取 $(0^\circ, 0^\circ)$ 、 $(0^\circ, 90^\circ)$ 、 $(90^\circ, 90^\circ)$ 和 $(0^\circ, 180^\circ)$ ，根据式(3)和式(4)可计算出入射光的偏振参数为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'_{(0,0)} + I'_{(0,180)} \\ I'_{(0,180)} - I'_{(0,0)} \\ I'_{(0,0)} + I'_{(0,180)} - 2I'_{(90,90)} \\ 2I'_{(0,90)} - I'_{(0,0)} - I'_{(0,180)} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} / I. \quad (6)$$

3 液晶偏振控制器及调制精度测试

基于液晶相位可调延迟器搭建了高精度液晶偏振控制器，该控制器采用模块化设计，如图 2 所示，主要由液晶偏振控制模块、温度检测传感器、半导体制冷器(TEC)、隔热材料、保温玻璃和金属构架等组成。

液晶材料是一种复杂的分子系统，其折射率主要由分子结构、波长和温度决定。温度在影响液晶的折射率方面扮演着重要角色。根据扩展 Cauchy 模型分析，常用液晶混合物的折射率与温度之间存在着密切关系^[18]：

$$n_e(T) \approx n_i + G'(1 - \frac{T}{T_c})^\beta, \quad n_o(T) \approx n_i - \frac{G'}{2}(1 - \frac{T}{T_c})^\beta, \quad (7)$$

$$G' = G \cdot \frac{\lambda^2 \lambda^{*2}}{\lambda^2 - \lambda^{*2}}, \quad \Delta n(T) \approx \frac{3}{2} G'(1 - \frac{T}{T_c})^\beta,$$

式中： n_i 为液晶处于各向同性状态时的折射率， G 为一个对温度不敏感的常数， β 为拟合参数， T_c 为液晶材料的清亮点。

由式(7)可以看出，液晶材料的双折射率差 $(n_e - n_o)$ 随着温度的增加逐渐降低。为了抑制由于温度变化导致的相位延迟的漂移，对液晶偏振控制模块进行了主动温度精确控制措施。

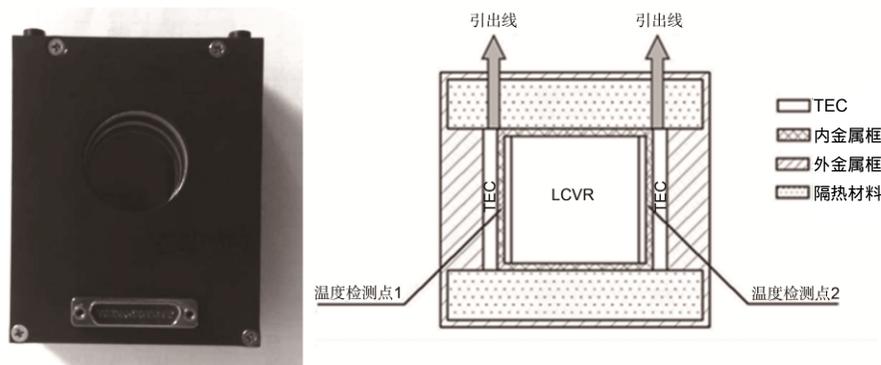


图 2 液晶偏振调制器实物图。

Fig. 2 The practicality structure of liquid crystal polarized modulator.

精密温控执行器件采用 TEC 实现。在液晶偏振控制组件的内金属框和外金属框之间对称安装两个相同功率的 TEC,在它们之间均匀地涂一层薄导热硅脂,使之紧密贴合在一起,有效传导 TEC 的热量。同时,在外金属框的外侧安装加热器,当环境温度低于设定温度范围的最小值时,启动加热器加热 LCTF 组件,使之整体温度升高,达到粗略控制温度的目的。在温控电路中,采用 H 桥电路驱动 TEC,这种驱动方式可以在使用单电源时,通过驱动 H 桥电路相对位置上的场效应管,在 TEC 两端获得不同方向的电流,从而实现精确温控的目的。

利用 Thorlabs 公司生产的偏振态测试仪,基于图 3 所示光路对液晶偏振控制器的调制精度进行了测试。其中液晶相位调制器反方向放入光路(内部排序如图 4 所示),此时液晶可调相位延迟器 L2 快轴方向与参考水平方向夹角 $\theta_2 = -45^\circ$ 。假设入射光为非理想水平线偏振光,入射光的 Stokes 参数 $S_{in} = [I_{in}, Q_{in}, U_{in}, V_{in}]^T$,则出射光的 Stokes 参数 S_{out} 如式 (8)所示:

$$S_{out} = M_{L1} \times M_{L2} \times M_P \times S_{in} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_1 & \sin \delta_1 \\ 0 & 0 & -\sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_2 & 0 & \sin \delta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\sin \delta_2 & 0 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \\ U_{in} \\ V_{in} \end{bmatrix} = \frac{(I_{in} - Q_{in})}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -\cos \delta_2 \\ \sin \delta_1 \sin \delta_2 \\ \cos \delta_1 \sin \delta_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

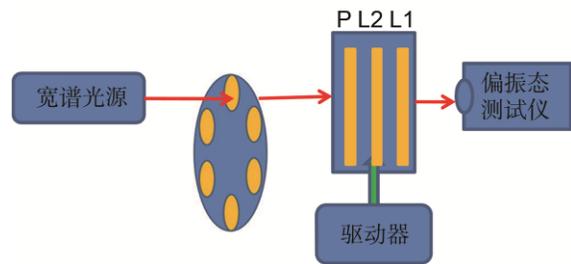


图 3 液晶相位调制器偏振参数调制精度检测光路图。
Fig. 3 The optical path of modulated precision measurement of liquid crystal polarized modulator.

当 L1、L2 的相位延迟量 (δ_1, δ_2) 分别取 $(0^\circ, 0^\circ)$ 、 $(0^\circ, 90^\circ)$ 、 $(90^\circ, 90^\circ)$ 和 $(0^\circ, 180^\circ)$ 时,入射到偏振测试仪的光偏振参数 (Q, U, V) 理论上应该分别为 $(-1, 0, 0)$ 、 $(0, 0, 1)$ 、 $(0, 1, 0)$ 和 $(1, 0, 0)$ 。

表 1 给出了 6 组波长下的实测结果(6 次测量结果平均值),可以看出,基于液晶相位可调延迟器搭建的液晶偏振控制器可实现偏振参数小于 1% 的调制误差,该误差直接影响成像系统的测量不确定度。

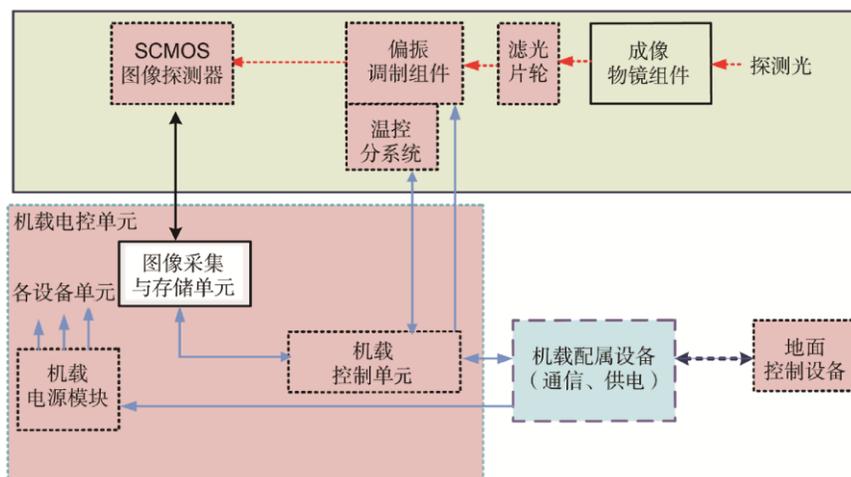


图 4 小型机载偏振成像系统结构框图。
Fig. 4 The physical design of small airborne imaging polarimeter.

表 1 液晶偏振控制器偏振参数调制精度实测结果。

Table 1 The measurement results of modulated precision of liquid crystal polarized modulator.

波长/nm	驱动电压组序	理论值	实测值(6次测量平均值)	调制误差/%
480	1	(-1,0,0)	(-0.9994,0.0034,0.0030)	<1
	2	(0,0,1)	(0.0098,0.0029,0.9987)	<1
	3	(0,1,0)	(0.0054,0.9999,0.0034)	<1
	4	(1,0,0)	(0.9954,0.0037,0.0009)	<1
532	1	(-1,0,0)	(-0.9982,0.0028,0.0034)	<1
	2	(0,0,1)	(0.0038,0.0026,0.9994)	<1
	3	(0,1,0)	(0.0014,0.9999,0.0074)	<1
	4	(1,0,0)	(0.9982,0.0042,0.0021)	<1
632	1	(-1,0,0)	(-0.9986,0.0014,-0.0032)	<1
	2	(0,0,1)	(0.0078,0.0087,0.9996)	<1
	3	(0,1,0)	(0.0014,0.9949,0.0034)	<1
	4	(1,0,0)	(0.9985,0.0048,0.0086)	<1
780	1	(-1,0,0)	(-0.9992,-0.0021,0.0030)	<1
	2	(0,0,1)	(0.0038,0.0029,0.9987)	<1
	3	(0,1,0)	(0.0054,0.9999,0.0034)	<1
	4	(1,0,0)	(0.9954,0.0022,0.0012)	<1
850	1	(-1,0,0)	(-0.9999,0.0015,-0.0032)	<1
	2	(0,0,1)	(0.0052,0.0019,0.9997)	<1
	3	(0,1,0)	(0.0024,0.9999,0.0014)	<1
	4	(1,0,0)	(0.9989,0.0077,-0.0019)	<1
980	1	(-1,0,0)	(-0.9974,0.0031,0.0031)	<1
	2	(0,0,1)	(0.0088,0.0009,0.9989)	<1
	3	(0,1,0)	(-0.0023,0.9999,0.0012)	<1
	4	(1,0,0)	(0.9979,0.0072,0.0019)	<1

4 小型机载偏振成像系统

基于液晶偏振控制器研制了一套适用于小型无人机载平台的偏振成像系统，系统基于机载平台的图传设备或数传设备进行实时图像监控和下传，利用地面工作站对下传或事后导出的偏振图像进行图像处理 and 光谱分析，进而实现目标的偏振分析和特征识别功能。

图 4 给出了该系统的结构框图。从功能性划分，本系统可分为光学成像单元、偏振调制单元、图像采集单元、机载电控单元、地面控制单元、图像处理分析单元 6 个部分。光学成像单元主要包括成像物镜，位于整个光学系统的最前端，用于将被测目标的光信号进行收集并成像于图像传感器焦平面上；偏振调制单元包括滤光片轮和液晶偏振调制器，位于光学成像单元的后面，用于实现对入射光进行偏振调制；图像采集单元主要包括图像探测器以及图像采集和存储模块，用于对感兴趣成像区域进行图像采集和存储；机

载电控单元包括机载控制模块、机载电源模块和机载配属设备等，用于实现系统各子单元的驱动控制和同步协调工作；地面控制单元包括系统控制软件、机载无线通信装备，用于在地面上与设备进行通信和数据传输，实时地对设备的工作状态进行监控和调节；图像处理分析单元包括图像处理软件和地面工作站，用于对采集到的图像进行图像配准、偏振参数计算、图像分析处理等。

图 5 给出了小型机载偏振成像系统的实物图和技术指标。用户首先利用地面控制单元通过机载飞控链路或数控链路向设备发送控制指令，机载控制单元根据指令通过输出一组多通道的低压交变信号，驱动偏振调制单元、图像采集和存储模块等电子单元模块协调工作。偏振调制单元在驱动控制器作用下，对来自景物的光信号进行偏振调制；图像传感器接受透过偏振调制器的来自景物的光信号对景物成像；图像采集和存储模块将来自图像传感器的图像信号在线存储，

同时输出一路压缩后的实时数字或模拟信号给机载数传或图传设备进行实时监控;图像处理软件对事后导出的偏振图像进行图像配准、计算和图像处理。需要特别说明的是,系统指标里的偏振参数测量误差未包括商用镜头引入的偏振效应,由于光学系统中的反射和折射现象会对入射光带来一定的起偏退偏因素^[19],为了进一步推动该系统在偏振定量分析方面的应用研究,未来还将在系统定标和校准方面进行深入研究。

5 结果与讨论

将研制的机载偏振成像系统搭载于西安爱生科技有限公司生产的 ASN206 小型固定翼无人机,无人机升限 5 km,最大平飞速度 140 km/h,巡航速度 60 km/h~90 km/h,续航时间 4 h,最大起飞重量 25 kg,任务载荷 4 kg,完成了多轮室外飞行测试试验,试验中偏振成像系统各分系统全部正常工作,说明相机系统可



相机尺寸/mm	150×100×80 (不含镜头)	整机质量/kg	2.5
探测偏振参数	Full Stokes	工作波段/nm	480,532,632,780,850,980 (customizable)
偏振参数测量误差	<2%	CCD 像素数	2048×2048
探测距离/km	1~5	存储时间/h	3
数据传输协议	GieE 和 PAL	工作方式	Storing online/ real-time processing
抗冲击能力	20 g(垂直), 15 g(水平)	抗振能力	5 g(垂直), 2 g(水平) 20 Hz~500 Hz
工作温度/	-20 ~50	平均功耗/W	20

图 5 小型机载偏振成像系统实物图及技术指标。

Fig. 5 The practicality structure and technical index of small airborne imaging polarimeter.

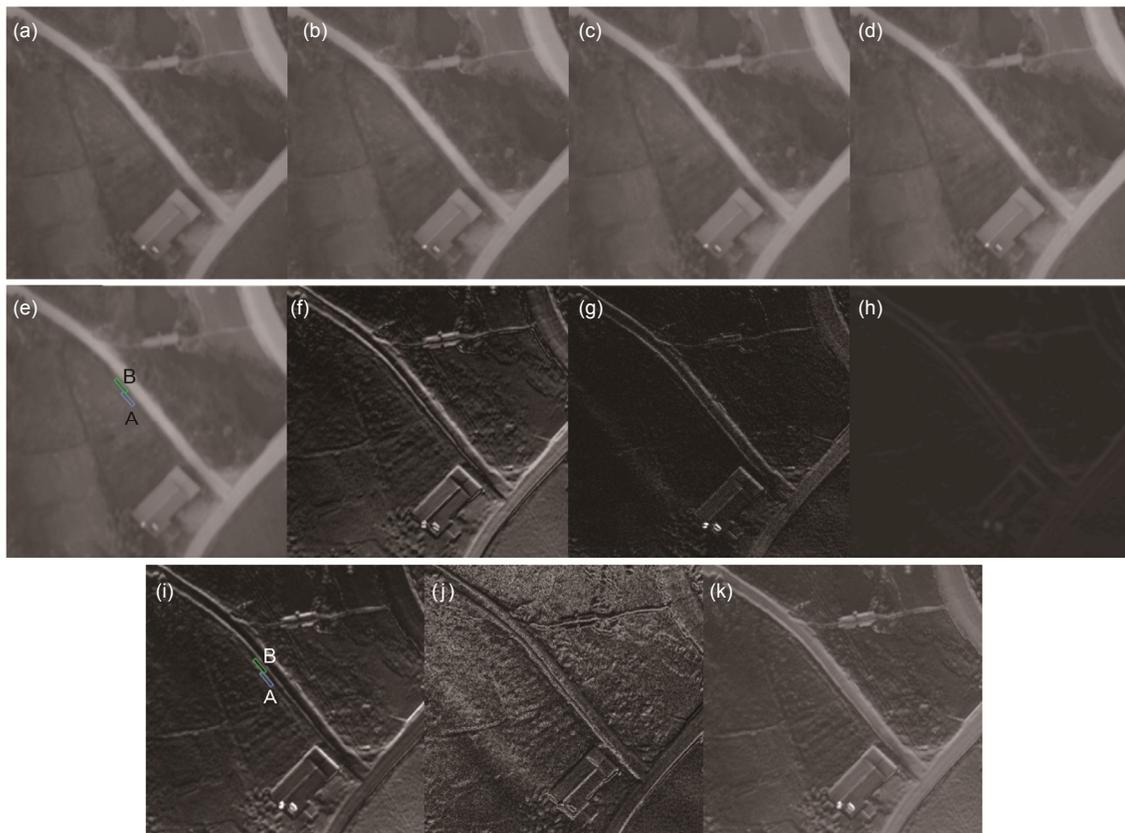


图 6 532 nm 机载偏振成像实验(300 m 航高). (a) $I_{(0,0)}$. (b) $I_{(0,90)}$. (c) $I_{(90,90)}$. (d) $I_{(0,180)}$. (e) S_0 图像. (f) S_1 图像. (g) S_2 图像. (h) S_3 图像. (i) P 图像. (j) C 图像. (k) $P+S_0$ 图像.

Fig. 6 The airborne polarized imaging at 532 nm (300 m altitude). (a) $I_{(0,0)}$. (b) $I_{(0,90)}$. (c) $I_{(90,90)}$. (d) $I_{(0,180)}$. (e) S_0 . (f) S_1 . (g) S_2 . (h) S_3 . (i) P. (j) C. (k) $P+S_0$.

以在无人机平台上良好地适应振动、冲击、温度环境、复杂电磁干扰等机载环境,实现长时间正常工作。

图6~图8给出了利用该小型机载偏振成像系统实现的地面目标偏振遥感成像结果(所有图已完成配准处理),可以看出该系统可以很好地实现目标的高质量偏振图像快速获取。在室外晴天的环境下,利用偏振成像系统,在532 nm工作波段、300 m航高下,在绵阳市仙海地区对农事目标进行了偏振遥感探测试验,图6给出了一组偏振成像探测原始图及偏振参数图像,可以看出:1) S_1 图反映了入射光水平和垂直偏振分量的强度差, S_2 图反映了入射光 45° 和 -45° 偏振分量的强度差, S_3 图反映了入射光左旋偏振和右旋偏振分量的强度差^[20];2) 大多数自然界地物材料为各向同性材料,因此圆偏振分量较弱^[21];3) 偏振图像可实现特定物体的轮廓增强探测能力,如图6所示的A区(车辙边缘)和B区(车辙底部), S_0 图像中A区和B区的平均灰度值对比度 $A_I=117/108\approx 1.08$,P图像(本文中偏振度图

像均已经过线性拉伸处理)中A区和B区的平均灰度值对比度 $A_P=95/33\approx 2.88$, $A_P/A_I=2.67$;4) 普通图像无法清晰区分的车辙轮廓在偏振度图中体现出了明显区分,这是由于车辙边缘和车辙底部之间不同的表面取向所导致的偏振度差异所决定的。

人造物体表面相对较光滑,以镜面反射为主,表现出较大的线偏振度;自然物体表面相对粗糙,以漫反射和多次反射为主,表现出较小的线偏振度,因此,偏振度图像可以实现低对比度人造物体的增强识别功能^[2]。图7是利用偏振成像系统,在532 nm工作波段、300 m航高下,在绵阳市仙海地区的偏振遥感探测图,可以看出,偏振度图像可以有效增强人造目标(汽车、建筑物等)的轮廓提取和探测能力,以汽车(A区)和水泥路(B区)为例, S_0 图像中A区和B区的平均灰度值对比度 $A_I=104/100\approx 1.04$,P图像中A区和B区的平均灰度值对比度 $A_P=207/51\approx 4.06$, $A_P/A_I\approx 2.67$,偏振图像比普通光强图像的汽车对比度增强了约2.67倍。

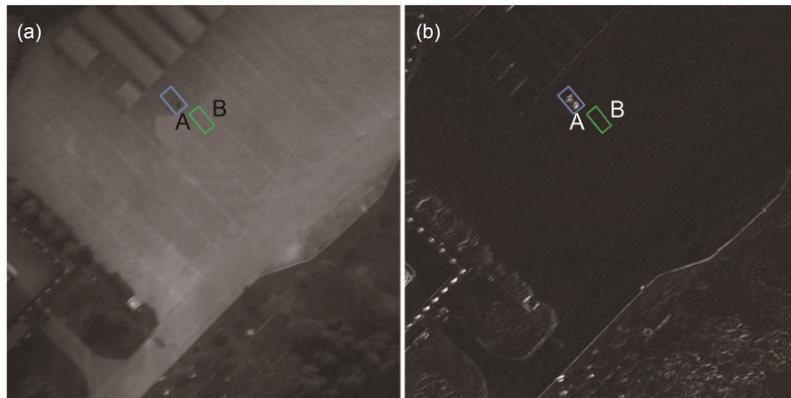


图7 人造目标偏振遥感成像实验(300 m航高). (a) S_0 图像. (b) P图像.

Fig. 7 The polarized detection of man-made objects (300 m altitude). (a) S_0 . (b) P.

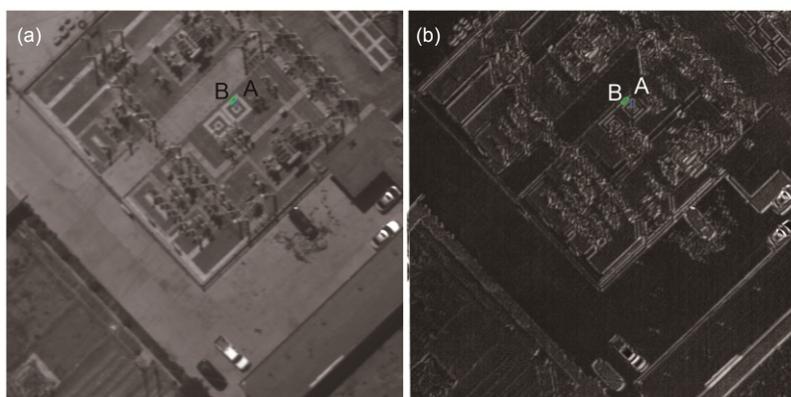


图8 低对比度目标偏振遥感成像实验(2000 m航高). (a) S_0 图像. (b) P图像.

Fig. 8 The polarized detection of low-contrast objects (2000 m altitude). (a) S_0 . (b) P.

低对比度目标由于表面粗糙度、导电率等差异,其反射光偏振状态会存在一定的差异。图 8 是利用 532 nm 偏振成像系统在甘肃省白银市靖远县 2000 m 航高下的偏振遥感探测结果。图中,阴影部位和低对比度建筑物拼接图(A 区和 B 区所示)在偏振图像中得到了对比度增强识别。其中建筑拼接图案可能用了两种颜色相似但粗糙度不同的材料所组成,因此 S_0 图像中基本无法识别图案细节,A 区和 B 区的平均灰度值对比度 $A_1=170/167\approx 1.01$,而在偏振度图像中,由于粗糙度的不同,可以发现拼接图案的对角线部位和两边部位所用材料有着明显差异, $A_p=117/22\approx 5.32$, $A_p/A_1=5.32/1.01\approx 5.27$ 。

6 结论

液晶偏振调制探测技术使得用户可以通过控制液晶可调相位延迟器的加载电压实现入射光束的偏振状态控制和全 Stokes 偏振参数反演计算,具有体积小、重量轻、通光口径大、探测精度高、可移植性强等技术特色。

本文基于液晶双折射率效应完成了高精度液晶偏振控制器研制,并对其偏振调制精度进行了标定,液晶偏振控制器的 Stokes 偏振参数调制精度优于 98%。利用液晶偏振控制器搭建了高精度机载偏振成像系统,并基于小型固定翼无人机完成了系统的搭载飞行测试和目标识别探测试验。实验结果表明,利用液晶偏振控制器搭建的小型机载偏振成像系统可有效抑制背景干扰,提高低对比度目标的轮廓提取能力和目标识别能力,在目标侦察、环境监测、农作物普查等方面具有一定的应用价值。

参考文献

- Wolff L B. Polarization-based material classification from specular reflection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, **12**(11): 1059–1071.
- Mo Chunhe, Duan Jin, Fu Qiang, et al. Review of polarization imaging technology for international military application (II)[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(4): 265–270.
莫春和, 段锦, 付强, 等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(下)[J]. *红外技术*, 2014, **36**(4): 265–270.
- Wang Qichao, Shi Jiaming, Zhao Dapeng, et al. Design of hyperspectral polarization image system based on acousto-optic tunable filter[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, **40**(1): 66–71.
王启超, 时家明, 赵大鹏, 等. 基于 AOTF 的高光谱偏振成像系统设计[J]. *光电工程*, 2013, **40**(1): 66–71.
- Sun Jie, Gao Jun, Huai Yu, et al. Real-time measurement system for the pattern of all skylight polarization[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(9): 45–50,55.
孙洁, 高隽, 怀宇, 等. 全天域大气偏振模式的实时测量系统[J].

- 光电工程, 2016, **43**(9): 45–50.
- Egan W G, Duggin M J. Optical enhancement of aircraft detection using polarization[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, **4133**: 172–178.
- Ben-Dor B, Oppenheim U P, Balfour L S. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, **1971**: 68–77.
- Schmugge T J. Remote sensing of surface soil moisture[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, **17**(10): 1549–1557.
- Shao Weidong, Wang Peigang, Wang guiping, et al. Study on spectropolarimeter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(1): 60–64.
邵卫东, 王培刚, 王桂平, 等. 分光偏振计技术研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 60–64.
- Forssell G, Karlsson E. Measurements of polarization properties of camouflaged objects and of the denial of surfaces covered with cenospheres[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **5075**: 246–258.
- De Jong W, Cremer F, Schutte K, et al. Usage of polarization features of landmines for improved automatic detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, **4038**: 241–252.
- Zhang Z X, Wang P G. Polarimetry for four stockes parameters in space[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences* 2002, **45**(3): 300–305.
- Sun X B, Hong J, Qiao Y L, et al. Analysis of characteristic of multiband aerial polarization image[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5832**: 219–227.
- Chen Shupeng, Tong Qingxi, Guo Huadong. Mechanism of remote sensing information[M]. Beijing: Science Press, 1998: 278–355.
陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 278–355.
- Jiang Jijun, Zhang Dayong, Li Jianfeng, et al. Research of polarization converter based on two liquid-crystal variable retarders[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(1): 13–17.
江继军, 张大勇, 李剑峰, 等. 基于液晶可变相位延迟器的两片式线偏振态转换器研究[J]. *应用光学*, 2011, **32**(1): 13–17.
- Gu Dongfeng, Winker B, Wen Bing, et al. Liquid crystal tunable polarization filters for polarization imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7050**: 705001.
- De Martino A, Kim Y K, Garcia-Caurel E, et al. Optimized Mueller polarimeter with liquid crystals[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(8): 616–618.
- Laude-Boulesteix B, De Martino A, Drévilon B, et al. Muller polarimetric imaging system with liquid crystals[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(14): 2824–2832.
- Li J, Wu S T. Extended Cauchy equations for the refractive indices of liquid crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **95**(3): 896–901.
- Qiu Zhenwei, Hong Jin. Retardane characteristics analysis of lens in polarization remote sensors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(3): 806–811.
裘楨炜, 洪津. 偏振遥感器镜头相位延迟特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(3): 806–811.
- Azzam R M A, Bashara N M. Ellipsometry and polarized light[M]. Liang Minji, trans. Beijing: Science Press, 1986: 37–38.
阿查姆 R M A, 巴夏拉 N M. 椭圆偏振测量术和偏振光[M]. 梁民基, 译. 北京: 科学出版社, 1986: 37–38.
- Wolff L B, Mancini T A, Pouliquen P, et al. Liquid crystal polarization camera[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1997, **13**(2): 195–203.