

文章编号: 1007-5461(2002)02-0143-05

航空型多波段偏振遥感探测及其 光学系统的设计与研究

罗睿智, 乔延利, 曹汉军, 洪津, 荀毓龙

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要 本文简要分析了遥感偏振探测的机理和与遥感强度探测相比所具有的优越性, 并指出了偏振遥感探测广阔的应用前景, 结合 863 课题给出了航空型多波段偏振遥感探测中光学系统的设计与分析, 同时也给出了一定应用结果。

关键词 偏振探测; 遥感技术; 光学设计

中图分类号 TP722.4 **文献标识码** A

1 引言

偏振探测作为遥感探测中的一个新的研究领域越来越受关注, 这是因为同非偏振测量相比, 偏振测量能得到更多易于区分目标的特征信息。偏振状态对于识别不同的地物目标(自然地物、人工设施)、大气气溶胶、云层等, 都具有极有价值的潜在信息。偏振信息能够区分冰云和水云, 有助于研究高空运载火箭的飞行影响及气象要素, 极有可能发展成为一种大气污染的有效监测手段。砂土壤的岩石等偏振信息与其结构、化学成分、水分含量、金属含量等有密切关系, 这些对于研究水旱环境土壤墒情侵蚀等有着广阔的应用前景。总的来讲, 偏振特性能在特殊背景和条件下提高目标的识别率, 特别在军事侦察应用中, 对于辨别人为模拟制造的假目标和伪装有独特的区分能力, 这是因为与真实目标相比两者有本质的区别。

2 偏振斯托克斯参量解译

任意目标表面在给定波长上发射或反射的非相干光束可以应用四个斯托克斯参量来全面描述。在斯托克斯参量中, 第一个参量 I 是辐射总强度的度量, 第二个参量 Q 是用以计量水平方向线偏振的量和第三个参量 U 用于计量与水平夹角 45 度的线偏振量, Q 和 U 等同于偏振度 P 和偏振角 θ , 这正是来自目标自身的最本质的辐射信息 - 偏振辐射信息。

通常考虑具有相速相等, 沿 Z 轴传播的平面波束总能分解为两个分别沿 X 轴和 Y 轴取向的线性极化波 $E_x(z, t), E_y(z, t)$:

$$\begin{cases} E_x(z, t) = E_x \sin(\omega t - \beta z + \varphi_x) \\ E_y(z, t) = E_y \sin(\omega t - \beta z + \varphi_y), \end{cases} \quad (1)$$

量化地给出偏振光的偏振信息, 在遥感探测过程中多用斯托克斯矢量表示法。通常把斯托克斯矢量 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$ 写成另一种形式 $(I, Q, U, V)^T$, 其中 I 为非偏振光强, Q 、 U 分别代表两个方向上的线偏振光, V 代表圆偏振光, 在遥感探测中通常假定 $V = 0$:

基金项目: "863-13 (信息获取与处理技术) 主题" 基金项目 (2001AA130004)。

收稿日期: 2001-02-22, 修改日期: 2001-04-03

$$\begin{cases} I = S_0 = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ Q = S_1 = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ U = S_2 = 2\langle E_x E_y \cos \varphi \rangle. \end{cases} \quad (2)$$

上式中, $\langle E \rangle$ 表示时间平均的效果, 在任一 xoy 平面, 在与 X 轴的夹角为 α 的方向上进行观测所得到的光强可以下式表述:

$$I(\alpha) = \langle E_x^2 \rangle \cos^2 \alpha + \langle E_y^2 \rangle \sin^2 \alpha + \langle E_x E_y \rangle \sin 2\alpha, \quad (3)$$

或:
$$I(\alpha) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha). \quad (4)$$

因此要获得某一瞬使目标真正的偏振信息, 至少应从两个以上方向来检测偏振, 就可以联立求出斯托克斯四个参量的前三个 I 、 Q 、 U , 并可以求出偏振光的偏振度 P 和偏振角 θ 。我们只要测出三个不同角度的线偏振光的光强 $I(\alpha_i)$, 分别取 α 等于 0° 、 60° 、 120° 三个观测方向, 得到的联立方程如:

$$\begin{cases} I(0^\circ) = \frac{1}{2}(I + Q) \\ I(60^\circ) = \frac{1}{2}(I - \frac{1}{2}Q + \frac{\sqrt{3}}{2}U) \\ I(120^\circ) = \frac{1}{2}(I - \frac{1}{2}Q - \frac{\sqrt{3}}{2}U). \end{cases} \quad (5)$$

变化得:
$$\begin{cases} I = \frac{2}{3}(I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)) \\ Q = \frac{2}{3}(2I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)) \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}}(I(60^\circ) - I(120^\circ)). \end{cases} \quad (6)$$

由此, 对应的偏振度和偏振角分别为:

$$\begin{cases} P = \sqrt{(Q^2 + U^2)}/I \\ \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1}(U/Q). \end{cases} \quad (7)$$

3 光学系统设计及参数计算

从可调波段(多波段)偏振 CCD 相机的主要功能与特点考虑, 为了获取某一瞬时目标真正的偏振信息, 至少应从两个以上方向来检测偏振, 如 POLDER 通过旋转偏振片, 分别以 0° 、 60° 和 120° 来检测偏振, 最后通过数据处理得到偏振度 (polarization rate) 和偏振角 (polarization angle), 从机载飞行的过程性能考虑, 需要同时获取三个偏振方向的图像, 这样经过图像处理及数据处理系统后, 才能分析被测目标的偏振信息, 达到区分目标的效果。

基于上述基本要求, 系统总体上确定了偏振三通道探测方案: 即三路采用同一个前置光学系统, 同一分光器件, 通过分束器和三个不同方向的偏振片入射到 CCD 相机, 从而获得地物目标的偏振信息; 系统采用模块化设计, 可调波段(多波段)偏振 CCD 相机光学系统结构如图 1 所示: 其中, 右边部分是三分棱镜从入射光线方向看的示意图, 通过它把经过中继光学系统 (Second optics system) 的光束一分为三, 分别通过后继光学系统 (Subsequence optics system) 后用三个不同的 CCD 相机接收。

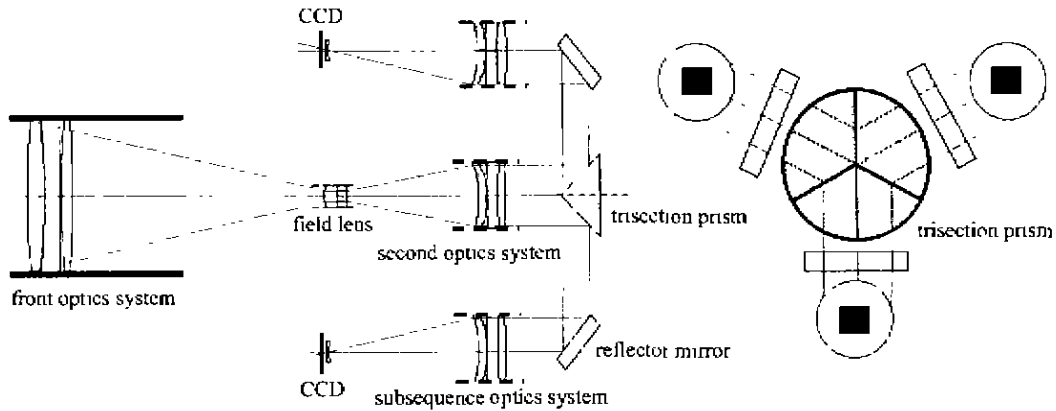


Fig.1 Configuration of optical system (main lens $f=360$ mm, caliber=40 mm)

为了满足航空偏振遥感的需要，光学系统必须满足 (1) 系统本身的消偏；(2) 对相对弱信号探测；(3) 对多波段探测；(4) 具有高空间分辨率；(5) 三偏振方向图像要严格配准。

3.1 光学系统的消偏

光学系统的消偏采用已经成熟的反射面正交抵消的零偏振成像系统理论 (具体理论见后面的有关参考文献)、两个互相垂直的镀银平面镜安装在与各自入射的反射光成 45° 的位置。这就意味着、垂直于第一平面镜入射的光束平行与第二平面镜的入射面、同样平行于第一平面镜入射的光束将于第二平面镜的入射面垂直。前置光学系统前面的地物辐射可认为由平行和垂直与入射平面的两种成分组成。对于有复折射率 m 的金属镜，平行和垂直与入射面 (45° 入射) 的反射分量 $r_{//}$ 和 r_{\perp} 由文献 [Egan et al 1979] 中的公式导出：

$$\left\{ \begin{aligned} r_{//} &= \frac{0.707m_1^2 - [m_1^2 - 0.500]^{1/2}}{0.707m_1^2 + [m_1^2 - 0.500]^{1/2}} \\ r_{\perp} &= \frac{0.707m_1^2 + [m_1^2 - 0.500]^{1/2}}{0.707m_1^2 - [m_1^2 - 0.500]^{1/2}} \end{aligned} \right.$$

因为金属反射是各向同性的，假设入射辐射具有较低的时间相干性，图 2 中的两垂直平面镜的总反射为：

$$r_T = (r_{//})(r_{\perp}) = (r_{\perp})(r_{//})$$

因此，如果平面镜是理想的，则由第一个平面镜引起的偏振，由第二个平面镜的反方向起偏而消除。如果两镜的安装精度为 0.1° ，则残留偏振度小于 0.1%。

3.2 弱信号的探测

由于机载相机在飞行过程中对同一地物目标辐射所接收的能量远小于静态时的能量，也就是说，动态过程的相机曝光时间较短，为了满足探测器对相同地物辐射的探测，在其它条件不变的情况下，就光学系统本身设计而言，必须采用较大的相对孔径以提高系统的信噪比来满足对弱信号探测的需要。对本系统来讲，我们采用了相对孔径为 1:4 的光学系统。

3.3 多波段探测要求 - 光学校正设计

经过光学设计，得出理论上设计的各个波段的光学传递函数 (MTF)，如图 3 所示。

由图 3 可以看出，在 30 线对时，对不同的视场而言，光学系统的传递函数 (MTF) 均在 0.4 以上，由此来看整个光学系统具有较高的成像质量。

为了验证设计的结果，我们利用线扩散函数测量法对光学系统的 MTF 进行了测量，测量装置如图 4 所示。用 $40 \mu\text{m}$ 宽的狭缝安装在光电倍增管前面对光学系统所成的刀口像进行扫描，用测微调整架进行扫描，PM1 的敏感区比狭缝要大得多，可以消除非均匀误差，但狭缝本身的响应不能忽略，是一 sinc 函数，试验中

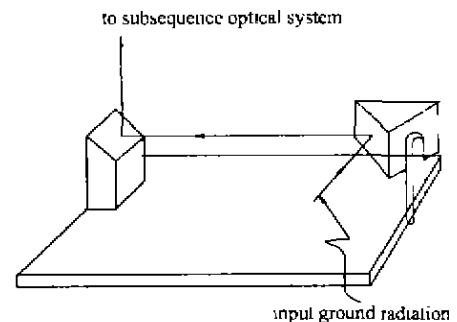


Fig.2 Optical principle of eliminate polarization

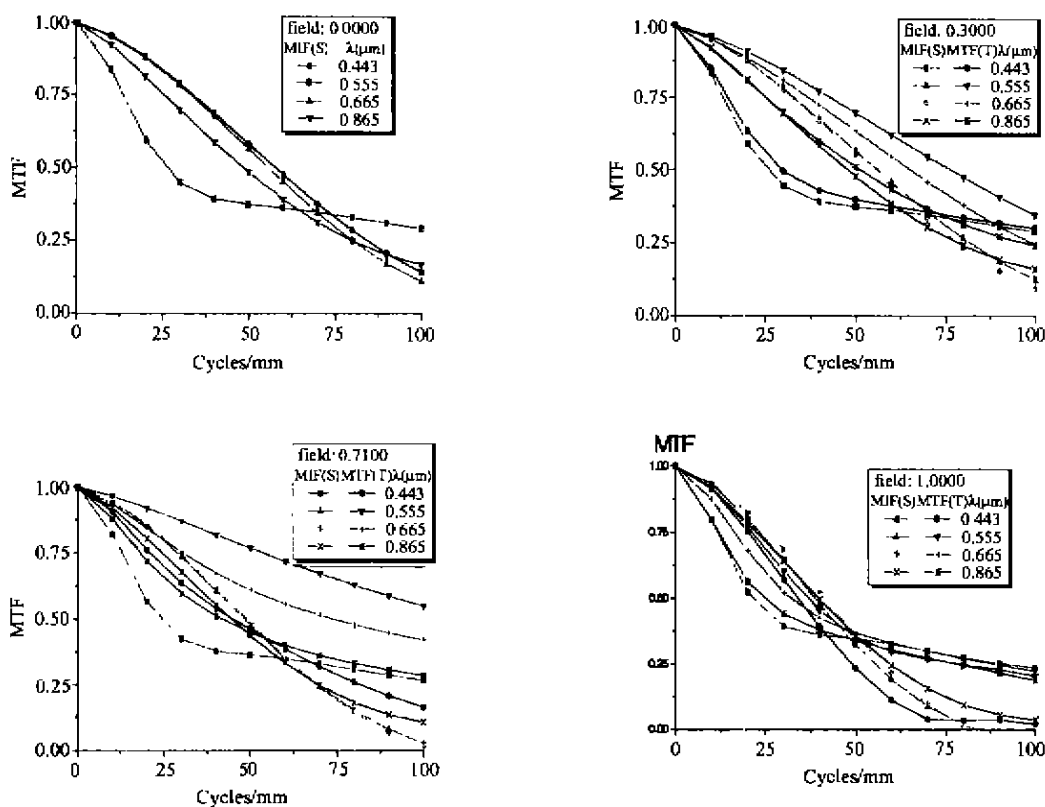


Fig.3 Transfer function of optical (MTF)

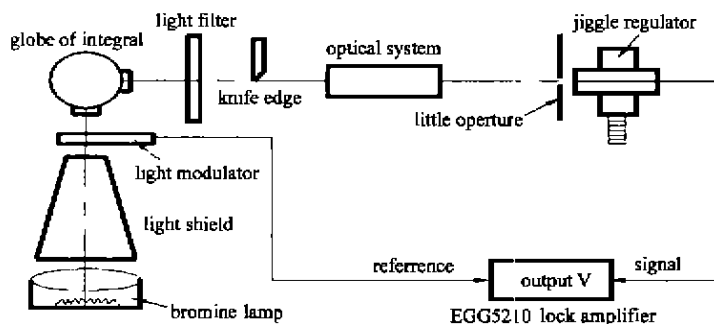


Fig.4 Measurement principle of transfer function of optical

得到的将是系统和狭缝共同的 MTF, 要从结果中消去狭缝的影响。光源由一个 100 W 的溴钨灯和一个 5 cm 的积分球组成, 以提供高度非相干均匀照射, 滤光片采用 800 nm 以下透过的滤光片, 基本与原理样机工作波段一致, 探测器用一只滨松公司的 PMT 管子, PMT 输出信号送 EGG 公司的锁相放大器, 同步信号由光路中的斩波频率高为 30 Hz 的 EGG 光调制器提供, 整个测量步骤为: 1) 单向移动 PMT 探测器 / 狭缝; 2) 从锁相放大器读出输出电压; 3) 重复 1、2, 只到辨认出一个清晰的刀口纪录; 4) 把刀口扫描对距离为分, 得出线扩展函数; 5) 作线扩展函数的傅氏变换, 得出系统的 MTF; 6) 用计算出的狭缝的傅氏变换除以系统的傅氏变换, 得到光学系统自身的 MTF。通过测量, 我们得到的 MTF 与图 3 理论 MTF 相差无几。

由于不同波段的辐射通过光学系统后, 所形成的球差大小不一样, 在同一靶面上弥散斑的大小不一样, 也就是说通过光学系统后, 所形成的汇聚光点的位置不同, 这就给机载系统在飞行过程中连续更换波段带来困难, 所以必须在设计过程中加入矫正设计, 以满足不同波段的光波经过后继光学系统后, 都能在探测器靶面成清晰的像。下面是矫正前和矫正后的曲线。

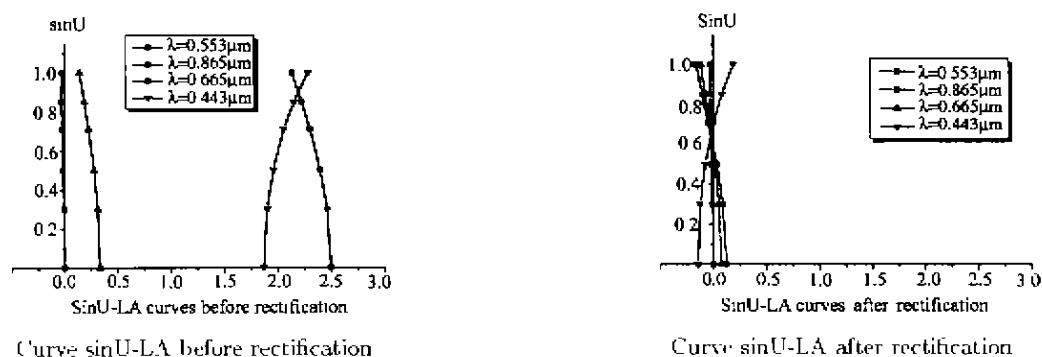


Fig.5 The curves before and after rectification

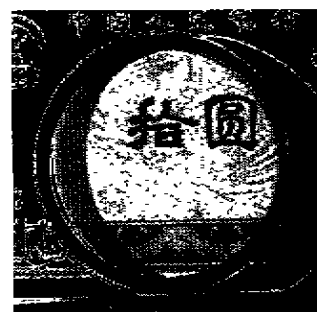
由上图可以看出, 矫正不同波段的焦面位置通过光学系统后基本上在同一位置。

4 设计结果验证

为了验证整个光学系统的合理性和科学性, 特别是消偏性能, 我们在实验室条件下通过对线偏振镜的检测来验证。让整个光学系统对线偏振镜后面的目标成像, 通过数据处理得出通过偏振镜的目标的偏振度, 然后与线偏振镜自身的偏振特性相比较来验证。我们知道, 自然光通过线偏振镜后的偏振度为 100%, 而我们通过光学系统后所得到的目标的偏振度为 97%, 由此, 我们可以看出, 系统自身所产生的偏振影响很小, 系统的消偏性能很好。



natural intensity image



polarization information image

Fig 6 Natural intensity image and polarization information image

当然, 偏振探测作为一个新的研究领域, 其光学系统的设计也还处于探索研究阶段, 随着偏振特性的进一步应用, 其光学系统的设计也会越来越受到重视。本文旨在起到抛砖引玉的作用, 来推动偏振光学设计的发展。

参 考 文 献

- 1 乔延利. 对地遥感中的光谱偏振探测方法研究 [J]. 高技术通讯, 2001, 7
- 2 刘建国. 波段随机调协偏振成像光谱技术研究 [C]. 中科院安徽光机所博士论文, 1999.

- 3 Egan W G. Proposed design of an imaging spectropolarimeter/photometer for remote sensing of earth resources [J]. *Opt. Eng.*, 1986, 25: 1155~1159
- 4 张以谟. 应用光学 [M]. 天津: 天津大学出版社

Airborne Multi-band Polarization Remote Sensing Detection and its Optical System Research and Design

Luo Ruizhi, Qiao Yanli, Cao Hanjun, Hong Jin, Xun Yulong

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract In this paper we have simply analysed the mechanism of polarization remote sensing detection and the advantages contrast to intensity remote sensing detection. We also pointed out the wide application of polarization remote sensing detection in the future. On the base of 863 Projects, we have designed an optical system of the airborne multi-band polarization remote sensing. At the end of paper, we presented the system's application results.

Key words polarization detect; remote sensing; optics design

罗睿智 (1976 -), 男, 1998 年于合肥工业大学精密仪器系获工学学士学位, 现在中国科学院安徽光机所攻读硕士学位。