

# 航空多角度偏振成像仪及其光学系统设计

汤伟平, 洪津, 汪元钧, 杨伟锋

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 航空多角度偏振成像仪采用面阵 CCD 探测器进行画幅式成像, 分时获取三个偏振方向图像的工作方式, 并最终解析出偏振信息。光学系统设计充分考虑了该系统的特点, 设计出了全视场  $80^\circ$  的像方远心超低畸变的镜头, 满足了航空多角度偏振成像仪的系统要求。

**关键词:** 偏振; 多角度; 光学设计

中图分类号: TH74

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2008)03-0212-05

## Airborne Directional Polarization Camera and Its Optical System Design

TANG Wei-ping, HONG Jin, WANG Yuan-jun, YANG Wei-feng

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

**Abstract:** Airborne directional polarization camera works with an area array CCD sensor to obtain images of three polarization directions in time-sharing mode. In this way, polarization information can be obtained. The design of this optical system, taking into full consideration of the system characteristics, consists of a lens with full vision field  $80^\circ$ , very small distortion and telecentric. This system meets the design requirement of airborne directional polarization camera.

**Key words:** polarization; directional; optical design

### 1 引言

地球大气散射辐射、地表地物反射辐射具有明显的偏振特性, 这使得多角度偏振遥感技术可以应用于大气气溶胶和云的光学、微物理特性参数的探测<sup>[1]</sup>。本文介绍的多角度偏振成像仪可以探测大气的多角度偏振信息, 通过航空校飞试验, 可验证多角度偏振信息的大气反演算法, 为

航天多角度偏振成像仪的发展打下基础, 并最终通过多角度偏振遥感获得大气气溶胶、云特性参数, 以满足数值天气预报、大气气溶胶监测、灾害性天气监测等领域的应用; 并通过周期性偏振探测为我国民用卫星遥感的精确大气校正提供大气参数。

目标偏振信息的获取已经有很多成功的方

收稿日期: 2008-02-19; 修改日期: 2008-03-19

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题 (2006AA703304G)

E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

法。在星载遥感器方面, 法国的 POLDER<sup>[2]</sup> 和 PRARSOL 采用单个面阵 CCD 探测器, 滤光片 / 偏振片旋转分时工作获取多波段的偏振和辐射成像信息; 美国的 EOSP/RSP 等仪器采用多通道单元探测器转镜扫描的工作方式<sup>[3]</sup>。在机载遥感器方面, 中科院安徽光机所的机载偏振 CCD 相机则采用了 3 个面阵 CCD 探测器获取偏振信息, 用旋转滤光片的工作方式获得多波段的偏振信息。

本文介绍的多角度偏振成像仪的设计目标是对目标进行多角度探测, 其视场幅宽大, 因此, 该系统必须采用广角成像镜头。为获取偏振信息, 需要在系统中配备检偏器。检偏器如果放置在系统的最前端, 能避免系统对入射光偏振状态的影响, 但是检偏器不能允许较大的入射角, 而本系统是一个广角系统, 所以, 检偏器不宜放置在系统的最前端。基于以上分析, 本系统类似于 POLDER/PRARSOL, 采用已成熟应用的单面阵 CCD 画幅式成像方案。

## 2 航空多角度偏振成像仪原理

### 2.1 仪器工作原理

仪器设计上采用面阵 CCD 探测器进行画幅式成像, 偏振信息的获取则采用分时工作方式, 即检偏器 - 滤光片组合置于转轮之上。对于需要探测偏振信息的波段, 我们配置了三个检测通道, 每个通道均配有该波段的滤光片和探测某一偏振方向的检偏器。通过转轮转动获取同一波段三个偏振方向的图像, 并最终解析出偏振信息, 如图 1 所示。在光学设计上采用广角镜头, 以满足多角度探测应用需求。

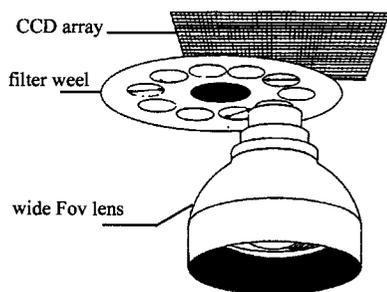


图 1 系统工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of the system

随着飞机平台的飞行, 仪器按照一定的时间控制进行多次成像, 可实现沿航线方向的同一目标多角度探测, 如图 2 所示。

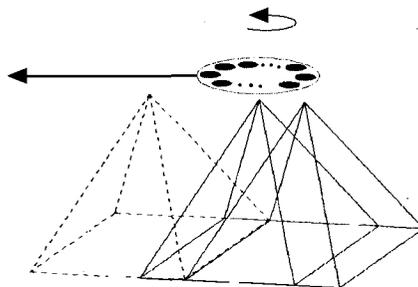


图 2 系统多角度信息获取原理图

Fig.2 The multi-angle information achievement schematic diagram of the system

### 2.2 仪器偏振信息获取原理<sup>[4]</sup>

对于来自被探测目标的任一准单色平面波, 其偏振信息可以用 Stokes 矢量  $S = [I, Q, U, V]^T$  来表征<sup>[5]</sup>。

如上所述  $V = 0$ , 则来自目标的光波偏振度  $P$  (degree of polarization) 和偏振角  $\alpha$  (polarization azimuth) 为

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (0 \leq P \leq 1), \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} \quad (-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ). \quad (2)$$

偏振光器件可以认为是使入射偏振光的 Stokes 参数变换成透射偏振光参数的器件, 可以用  $4 \times 4$  矩阵表示, 这种矩阵称为 Mueller 矩阵 (Mueller matrix)。当光波顺序受级联的  $N$  个光学元件作用时, 总的组合效果的 Mueller 矩阵是

$$M = M_N M_{N-1} \dots M_2 M_1, \quad (3)$$

式中  $M_k$  是第  $k$  个光学元件对光波施加作用的 Mueller 矩阵,  $1, 2, \dots, N$  是光学元件与光波相遇的次序。则出射光波的 Stokes 矢量  $S_0$  可以用偏振光器件的 Mueller 矩阵左乘入射光波的 Stokes 矢量  $S_i$  得到, 即

$$S_0 = M S_i. \quad (4)$$

对于理想的线偏振器, 透过轴与 OX 轴成  $\theta$  方位角, 其 Mueller 矩阵是

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

将 (5) 式代入 (4) 式, 并将  $S_o$ 、 $S_i$  写成列向量形式, 得

$$\begin{bmatrix} I_o \\ Q_o \\ U_o \\ V_o \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由 (6) 式, 得

$$I_o(\theta) = \frac{1}{2}(I_i + Q_i \cos 2\theta + U_i \sin 2\theta). \quad (7)$$

由 (7) 式可知, 只要  $\theta$  取三个值, 测得三个透过偏振器的光波强度  $I_o(\theta)$  值, 就可以求得来自目标的光波的 Stokes 参数  $I_i$ 、 $Q_i$ 、 $U_i$ , 进而得出光波的偏振度、偏振角等参数。

### 3 系统特点及对光学设计的要求

根据仪器的工作原理, 为了获得高精度的目标偏振和方向分布函数, 以下所列举的成像物镜特点是必须具备的:

1) 广角视场。全视场为  $80^\circ$ , 多角度遥感要求大视场以满足其对同一目标的多角度探测需求。

2) 像方远心系统<sup>[6]</sup>。像方远心指光学系统出瞳位于无穷远处, 即像方每一视场的主光线平行于光轴。像方远心光学系统的优点在于: 如果 CCD 探测器不能准确定位于焦平面, 像点的中心位置不改变; 更为重要的是, 在远心光路中加入检偏器不会因双向衰减不同而产生 MALTESE CROSS 现象, 这种现象将影响偏振测量精度。

3) 反远距。反远距就是光学系统的后工作距大于其焦距。由于系统是一个广角短焦距系统,

但后工作距必须能够在物镜和探测器间安装检偏器-滤光片轮, 因此后工作距需要大于焦距。

4) 校正色差。校正色差后可以保证各波段的成像质量, 图像可以直接进行对应像元之间的比较, 不需要对不同波长的图像进行复杂的几何校正。

5) 图像畸变小。对所有波段, 所有视场, 图像的百分比畸变应尽可能地小。小的畸变使图像可读性强, 有利于图像配准、拼接。对于角度定位要求不高的应用, 甚至可以不作几何校正。

6) 防止晕斑。由于采用 CCD 作为探测器, 而 CCD 有较强的反射率, 如果镜头最后一个光学面曲率半径为正值, 即该面弯向 CCD, 则可能出现一个晕斑, 因此, 要求镜头最后一个光学面曲率半径为负值。

此外, 光学系统的成像质量, 如弥散点的大小, 调制传递函数等都是设计中要加强控制的。在多角度偏振成像仪的物镜设计中, CCD 的像元尺寸为  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ , 因此探测器的尼奎斯特采样频率为  $41.67 \text{cycles/mm}$ , 取  $42 \text{cycles/mm}$ , 对于这一频率, 我们要求  $MTF \geq 0.4$ 。即任何视场的情况下, 子午面和弧矢面的平均  $MTF$  都必须大于 0.4。

根据以上要求, 光学系统参数如下: 系统形式为像方远心; 视场角为  $80^\circ$ ; 焦距为  $10.64 \text{ mm}$ ;  $F^\#$  为 3.5; CCD 面阵为  $1024 \times 1024$ , 像元大小为  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ ; 测量波段中心波长为  $490 \text{ nm}$ 、 $555 \text{ nm}$ 、 $665 \text{ nm}$ 、 $780 \text{ nm}$ 、 $810 \text{ nm}$ 、 $865 \text{ nm}$ , 波段带宽  $20 \sim 60 \text{ nm}$ , 其中  $490 \text{ nm}$ 、 $665 \text{ nm}$ 、 $865 \text{ nm}$  三个波段为偏振波段, 需要测量偏振信息。偏振监测方向为  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ; 系统畸变为  $< 1\%$ 。

#### 4 光学系统设计结果

出于加工时间和成本的考虑, 本系统全部镜片均采用球面镜设计。而要满足以上的各种条件, 系统不可避免相对复杂, 最终设计结果如图 3, 系统形式为 7 组 9 片, 最后两片平行平板分别为滤光片和偏振片。系统分成两大组, 孔径光阑前的透镜组称为前组, 其后的透镜组称为后组。前组实质上为一扩束系统, 把大视场的细光束平行光转换成小视场的粗光束平行光, 主要校正像散、场曲和畸变; 后组提供正光焦度, 主要校正球差、

彗差, 并使系统形式形成像方远心; 通过玻璃的选择来校正色差。这样, 5 种三级象差和色差就都获得了比较好的校正。

该系统后工作距为  $38 \text{ mm}$  (含滤光片、检偏器厚度), 能满足机械转轮及附属机械结构的厚度要求。根据设计结果, 边缘视场光束的主光线与探测器平面法线的夹角为  $0.1^\circ$ , 满足了系统像方远心的要求。镜头最后一个光学面曲率半径经过控制为负值, 满足了系统防止晕斑的要求。

从各波段重心偏离全色像点重心情况表可以看出, 各波段的色差得到了很好的矫正。所有视场各波长偏离全色像点重心不到 0.5 个像元, 很好地解决了色差问题。

从系统传递函数图可以看出, 该系统  $0.7$  视场以内子午面和弧矢面的  $MTF$  值均高于 0.4, 边缘视场的子午面和弧矢面的平均  $MTF$  值也高于 0.4, 符合系统  $MTF$  的要求。从系统畸变图可以看出, 该系统任意视场畸变被控制在  $1\%$  以内, 符合系统畸变要求。

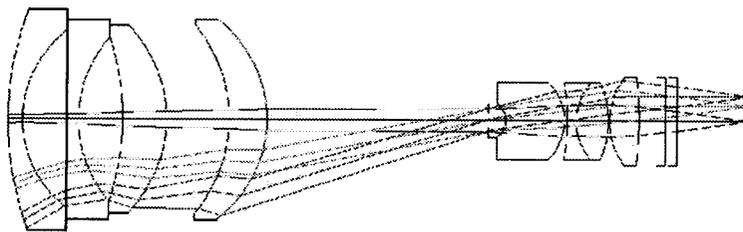


图 3 光学系统结构图

Fig.3 Structure diagram of the optical system

表 1 各波段重心偏离全色像点重心情况表

Table 1 The difference between each waveband RMS centroid and all waveband RMS centroid

视场 ( $^\circ$ )	490 nm 重心 偏差像元数	555 nm 重心 偏差像元数	665 nm 重心 偏差像元数	780 nm 重心 偏差像元数	810 nm 重心 偏差像元数	860 nm 重心 偏差像元数
0	0	0	0	0	0	0
28	0.083	0.33	0.417	0	0.083	0.33
40	0.25	0.083	0.33	0	0.083	0.25

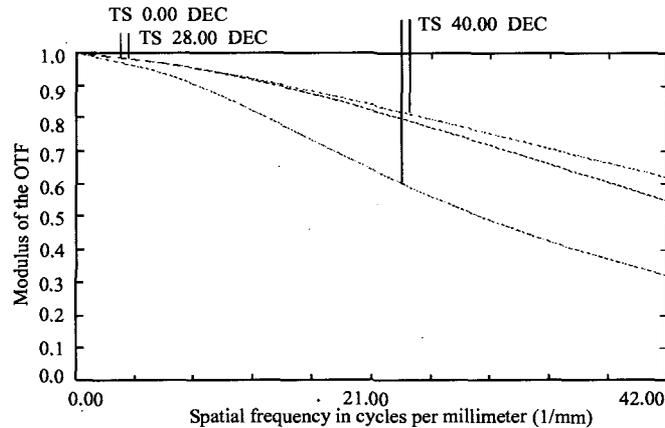


图 4 系统传递函数

Fig.4 MTF of the system

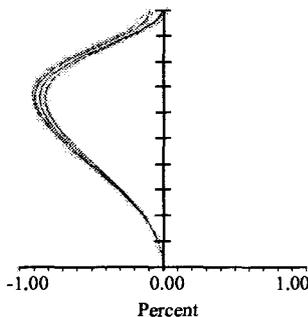


图 5 系统畸变

Fig.5 Distortion of the system

## 5 结 论

根据航空多角度偏振成像仪的工作原理, 我们分析了光学系统应具备的几大特点, 并在光学系统设计时通过参数控制, 成功的实现了所有的系统参数, 满足了航空多角度偏振成像仪的系统要求。

### 参考文献:

- [1] Qiao Yanli, Yang Shizhi, Luo Ruizhi. Research on polarized spectral monitoring for remote sensing of earth [J]. *High-Tech Communication*, 2001, 11(7): 36-39 (in Chinese).

- 乔延利, 杨世植, 罗睿智. 对地遥感中的光谱探测方法研究 [J]. *高技术通讯*, 2001, 11(7): 36-39.
- [2] André Y, Laherrère J M, T Bret-Dibat, et al. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument[C]. *SPIE*, 1995, 2572:79-90.
- [3] Brian Cairns, Edgar E. Russell, Joseph D. LaVeigne. Research scanning polarimeter and airborne usage for remote sensing of aerosols [J]. *SPIE*, 2003. 5158: 33-44.
- [4] Sun Xiaobing, Qiao Yanli, Hong Jin, et al. Experimental study on polarization characteristic of man-made object [J]. *High-Tech Communication*, 2003, 13(8): 23-27 (in Chinese).
- 孙晓兵, 乔延利, 洪津, 等. 人工目标偏振特征实验研究 [J]. *高技术通讯*, 2003, 13(8): 23-27.
- [5] Peterson J Q, Jensen G L, Kristl J A. Imaging polarimetry capabilities and measurement uncertainties in remote sensing applications [J]. *SPIE*, 2000. 4133: 221-232.
- [6] Chang Lingying, Yang Jianfeng, Zhao Baochang et al. A new plane array CCD space three-dimensional photographic system. *Acta Photonica Sinica*. 2005, 34(8): 1165-1168 (in Chinese).
- 常凌颖, 杨建峰, 赵葆常, 等. 一种新型面阵 CCD 航天立体摄影测量光学系统 [J]. *光子学报*, 2005, 34(8): 1165-1168.

作者简介: 汤伟平 (1982-), 男, 安徽枞阳, 安徽光学精密机械研究所 2005 级硕士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。