多角度偏振成像光谱仪的光学设计

黄绪杰 1.2, 新阳明 1.2, 潘 俏 1.2, 朱嘉诚 1.2, 沈为民 1.2

(1. 苏州大学 物理与光电·能源学部 教育部现代光学技术重点实验室,江苏 苏州 215006;

2. 苏州大学 物理与光电·能源学部 江苏省先进光学制造技术重点实验室,江苏 苏州 215006)

摘 要: 大气气溶胶是引起全球气候变化和空气质量问题的重要因素之一,利用卫星遥感监测全球 大气气溶胶具有重要意义。利用大气气溶胶的多角度偏振光谱信息联合反演,可有效去除地表反射的 影响,获得精确的遥感结果,因此亟需研究具备多角度偏振光谱信息获取能力的一体化光学仪器。所 设计的多角度偏振成像光谱仪光学系统,前置望远物镜采用多镜头视场拼接方式,实现地面目标沿轨 方向±60°内多角度探测,分光系统共用一个 Offner 分光装架。像质评价结果显示,在探测器奈奎斯特 频率处中心波段的 MTF 达到 0.8,点列图均位于艾里斑范围内,各项指标均满足设计要求。光学系统 整体结构紧凑、无运动部件,可实现目标多角度偏振光谱图像的信息获取。

关键词:多角度; 偏振光谱仪; 强度调制; 光学设计

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.1118002

Optical design of multi-angle imaging spectropolarimeter

Huang Xujie^{1,2}, Jin Yangming^{1,2}, Pan Qiao^{1,2}, Zhu Jiacheng^{1,2}, Shen Weimin^{1,2}

 Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: The atmospheric aerosol is one of the most important factors leading to the global climate change and air quality problems, it is very meaningful to detect the global atmospheric aerosol by satellite. By the joint retrieval of the multi-angle spectral polarimetric information of atmospheric aerosol, the influences of earth surface reflection can be elimated and the accurate detecting outcome is gotten. Thus it is quite urgent to study the integrated optical instrument with the ability to detect multi-angle spectral–polarimetric information of target. The optical system of multi-angle imaging spectropolarimeter was designed, the fore telescope was composed of multi mini-lens, which realized the multi-angle detecting in range of $\pm 60^{\circ}$ along the orbit. The spectroscope system was a common Offner imaging spectrometer. The analysis of imaging quality shows that the MTF of middle waveband at Nyquist frequency is higher than 0.8, and the spot diagrams are all smaller than the Airy disk. All indexes satisfy the commands of system. This optical system is compact in size without any moving part, and can realize the detection of multi-angle polarization state, spectral information and intensity of target.

Key words: multi-angle; spectropolarimeter; intensity modulation; optical design

收稿日期:2017-03-05; 修订日期:2017-04-03

- 基金项目:国家自然科学基金(61201373);国家重点研发计划(2016YFB05500501-02);江苏高校优势学科建设工程(PAPD)
- 作者简介:黄绪杰(1990-),男,博士生,主要从事光学设计与光学仪器方面的研究。Email:JackHoang@126.com
- **导师简介**:沈为民(1963-),男,研究员,博士生导师,主要从事光学设计和仪器光学以及航天遥感技术等方面的研究。 Email:swm@suda.edu.cn

0 引 言

大气气溶胶是地球大气中最重要的成分之一, 通过对太阳辐射的吸收和散射作用,大气气溶胶可 引起全球气候变化及空气质量问题^[1]。利用卫星遥 感可快速监测全球大气气溶胶,然而由于受到地表 反射的影响,测量精度往往受到较大限制。研究发 现,利用大气气溶胶多角度偏振光谱信息联合反演 可以有效去除地表反射影响,得到更加精确的气溶 胶属性信息^[2],因此亟需研究星载多角度偏振成像 光谱仪器。多角度偏振光谱探测不仅适用于大气遥 感,还可广泛应用于环境监测^[3]、资源勘查^[4]、生物医 学^[5]及军事侦查^[6]等领域。

目前典型的多角度光学遥感仪器主要应用于星 载探测器。法国 1996 年发射的 POLDER 探测器,通 过广角物镜实现对地面目标的多角度探测,利用旋 转滤光轮分时获取目标偏振光谱信息,数据实时性 较差^[7];美国 1999 年发射的 MISR 探测器,在沿轨方 向的不同角度同时布置九台成像光谱仪,实现对目 标的多角度光谱探测,无法获取目标偏振信息^[8];美 国 NASA 研制的气溶胶偏振辐射计 APS,通过摆扫 镜沿轨扫描实现目标的多角度探测,具有较高的偏 振光谱探测精度,但是该系统共有 36 个焦平面探测 器,体积庞大^[9];荷兰国家航空航天局在 2010 年提出 的 SPEX 探测器,采用多角度前置物镜实现沿轨方 向多角度观测,采用线偏振光谱调制技术获取目标 的线偏振光谱信息,分光系统采用体全息光栅,易引 入较大的光谱弯曲,影响测量结果^[10]。

目前国内关于多角度偏振成像光谱仪的研究尚 处于起步阶段,有必要对其开展研究。文中首先给出 系统指标要求,介绍光谱偏振调制原理和系统设计 思想,然后给出光学系统设计结果及其像质评价。

1 系统指标要求

多角度偏振光谱的多维信息探测已成为目前公 认的最佳气溶胶观测方式²¹,该光学系统搭载于轨道高 度 800 km 的极轨气象卫星平台,高精度地探测气溶 胶多角度偏振光谱信息。

大气气溶胶颗粒物直径为 0.001~100 μm,由 Mie 散射理论可知气溶胶颗粒物散射光主要集中于 可见光波段范围,根据大气气溶胶探测反演需求可 确定仪器工作波段范围为 410~865 nm。该仪器主要 用于监测全球区域大气气溶胶,刈幅宽度为 400 km, 地面像元分辨率为 *S*=1 km,可有效探测全球大气气 溶胶分布及其梯度变化,计算得到光学系统交轨视 场为 28.1°线视场。CCD 面阵探测器像元尺寸 δ 为 12 μm,在轨道高度 *H* 为 800 km 的情况下,可知光 学系统的焦距 f'为 9.6 mm。

探测大气气溶胶的多角度信息不仅可以有效去 除地表反射的影响,还可获取气溶胶散射相函数和 偏振相函数等重要的微物理参数,得到更详细的气 溶胶属性信息。荷兰国家航天局的 Hasekamp 等人通 过建立气溶胶数学模型,模拟了多角度信息对反演 误差的影响,研究发现当探测角度达到5个时,便可 有效降低气溶胶反演误差,如图1所示^[2]。笔者提 出的方案在±60°范围内从五个角度探测大气气溶 胶后向散射光,设定探测器在沿轨方向的观测角度 分别为 0°, ±30°, ±60°。其中 0°方向垂直向下观测, 所获取的数据方便于跟传统的单角度气溶胶遥感仪 器的数据做比对;±30°角度的相机充分利用了气溶 胶散射光对角度变化敏感的特性,可有效提高气溶 胶测量精度;云层的辐射传输研究证明,在±60°角度 下各种类型的云定向反射的区别是最小的,并且关 于地表反射的研究证明、该角度下可以有效确定地 表反射率,因此该角度的信息可以有效去除云与地 表反射对大气气溶胶探测的干扰。。







另外,针对大气气溶胶探测的信噪比要求^[3],分 析系统 F 数与信噪比的关系,得知当系统 F 数为 6 时,可满足探测需求,光学系统的具体指标要求列于 表1。

表1光学系统指标要求

Tab.1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Spectral range/nm	410-865
Focal length/mm	9.6
Spectral resolution/nm	2
<i>F/</i> #	6
FOV/(°)	28.1
Viewing angles/(°)	$0, \pm 30, \pm 60$

2 偏振光谱调制原理与系统设计方案

2.1 偏振光谱调制技术原理

偏振光谱调制技术原理是将入射光的偏振信息 通过强度调制的方式调制到单幅光谱强度图像上, 将其调制光谱进行解调,即可复原出入射光的偏振 信息和光谱信息^[11]。如图 2 所示,是由两个特定厚度 的多级波片 R₁和 R₂,以及偏振片 A 组成,两个多级 波片的快轴方向分别为 0°和 45°,偏振片的检偏方 向为 0°。多级波片的延迟量随波数变化,入射光经 过由波片 R₁,R₂和偏振片 A 组成的调制模块后,由 光谱仪接受被调制后的光谱数据。采用傅里叶变换 法对其解调,即可得到入射光的偏振光谱信息^[12]。



图 2 偏振光谱调制原理示意图

Fig.2 Schematic of polarimetric spectral modulation principle

根据偏振光学理论可知,入射光经过调制模块 后的改变可用穆勒矩阵表示。偏振光谱调制模块的 穆勒矩阵可表示为:

$$M = M_{\rm A} \cdot M_{\rm R_a} \cdot M_{\rm R_a} =$$

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos\varphi_2(v) & \sin\varphi_2(v)\sin\varphi_1(v) & -\sin\varphi_2(v)\cos\varphi_1(v) \\ 1 & \cos\varphi_2(v) & \sin\varphi_2(v)\sin\varphi_1(v) & -\sin\varphi_2(v)\cos\varphi_1(v) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \varphi = 2\pi \cdot \Delta n \cdot D \cdot v \qquad (2) \end{cases}$$

式中: φ代表波片的延迟量; ν为波数, 针对空间某位

置 L(x₀, y₀)目标像元,输入光的斯托克斯矢量为:

$$S_{in}(x_0, y_0, v) = [S_0(x_0, y_0, v) \ S_1(x_0, y_0, v) \ S_2(x_0, y_0, v)$$

$$S_3(x_0, y_0, v)]^{\mathrm{T}}$$
(3)

则入射光经过偏振光谱调制模块后,利用输出 的调制光谱斯托克斯矢量表达式可以计算得出:

$$S_{\text{out}} = M \cdot S_{\text{in}} \tag{4}$$

由于探测器只响应光强,即只能获取输出的调制光谱斯托克斯矢量的第一个分量,所以经调制后的输出光谱强度可表示为:

$$I(x_{0}, y_{0}, v) = M \cdot S_{in}(x_{0}, y_{0}, v) = \frac{1}{2} \cdot S_{0}(x_{0}, y_{0}, v) + \frac{1}{2} \cdot S_{1}(x_{0}, y_{0}, v) \cdot \cos \varphi_{2}(v) + \frac{1}{2} \cdot S_{2}(x_{0}, y_{0}, v) \cdot \sin \varphi_{1}(v) \cdot \sin \varphi_{2}(v) - \frac{1}{2} \cdot S_{3}(x_{0}, y_{0}, v) \cdot \cos \varphi_{1}(v) \cdot \sin \varphi_{2}(v)$$
(5)

由输出光谱强度表达式(5)可知,经调制后的输 出光谱是输入斯托克斯矢量的各分量乘以余弦因子 后的线性叠加。利用光谱仪测量此输出调制光谱,并 采用傅里叶变换法对其解调,即可得到入射光的偏 振信息和光谱信息^[11]。

2.2 光学系统设计方案

由指标要求可知,系统需要在沿轨方向±60°的 范围内实现偏振光谱成像探测,因此需要研究设计 多角度前置望远物镜。采用广角镜头方案可以实现 多角度探测,但是易引入较大畸变,影响测量结果。 若采用五个独立的光学系统,分别探测不同角度的 信息,可有效保证成像质量,然而该方案光学系统体 积较大,成本较高。

因此前置系统采用多镜头方案,即在五个不同角 度分别布置五个相同的望远子系统,以实现对目标的 多角度探测;各个子系统所成的短狭缝像拼接为一条 长狭缝像,再通过同一个光栅分光装架,实现光谱分 离。五个望远子系统在沿轨方向同时以不同角度观 测,随着载荷平台的移动,即可实现对地面同一目标 的多角度观测,图3给出了整体方案的结构简图。

望远子系统的成像质量直接影响了整体偏振成 像光谱仪的像质,需要充分优化使其满足系统要求。 偏振光谱调制模块位于望远子系统光路中,模块内 的多级波片及偏振片均是无光焦度的元件,由于其 存在面型加工误差会引入波像差,因此在系统设计 时需要对设计结果进行公差分析,保证其面型误差 不影响系统像质。



Multi-angle fore telescope

图 3 整体方案结构简图 Fig.3 Sketch of optical system

分光系统采用凸面光栅 Offner 型分光装架,具 有固有像差小、像质良好等优点,孔径光阑置于凸面 光栅上,可实现物方、像方远心。采用反射元件,体积 紧凑,易于实现仪器的小型化与轻量化^[13]。

3 系统设计思想与优化结果

3.1 多角度前置望远物镜

根据指标分析可知,单个望远子系统的焦距为 9.6 mm,视场为28.1°,考虑到系统焦距较短,并且需 要有足够的后工作距以放置反射镜,因此选用具有 长工作距的反远距物镜结构。

反远距物镜结构如图 4 所示,是由负光焦度的 前组和正光焦度的后组所组成,入射光线经前组发



Fig.4 Structure of retrofocus lens

散再经后组汇聚于成像面,使系统主平面后移,可获 得比焦距更长的后工作距。为了实现像方远心,将孔 径光阑置于后组的前焦面上。归一化条件下,总光焦 度 φ 为1, φ_1 、 φ_2 和 d分别是前组、后组的光焦度以 及二者之间的距离。第一近轴光线以 h_1 =1的高度入 射到前组,以 h_2 的高度入射到后组;第二近轴光线 入射前组的视场角为 u_{p1} =-1,根据近轴光学理论可知 前组的角放大率为:

$$A = u_{pl}/u_{pl}' = 1 - \mathrm{d}\varphi_l \tag{6}$$

后截距为:

$$l'=h_2/u'=A \tag{7}$$

光学系统总长:

On

$$L=(1-A)/\varphi_1+A \tag{8}$$

后组光焦度:

$$=(1-\varphi_1)/(1-d\varphi_1)$$

由于系统的视场设计指标并不大,可将后组的 全视场定为 14°,即设定前组的角放大率 A=2。为保 证前组具有合理的光焦度,取 d=2,得到前组的光焦 度 $\varphi_1=-0.5$ 。计算可得后组的光焦度 $\varphi_2=0.75$,后工作 距为 2。

因为实际光学系统要求后工作距为 20 mm,所 以将上述归一化参量均放大 10 倍,可得到物镜的一 级设计结果,即系统焦距为 10 mm,前组焦距-20 mm, 后组焦距 13.3 mm,前后组间距 20 mm。

考虑到系统视场和相对孔径均不大,前组后组 可分别选用双分离式和三片式结构。

经过优化,得到望远子系统设计结果如图 5 所示,偏振器件位于望远子系统光路中。孔径光阑位于 后组透镜前焦面处,实现了像方远心。透镜均采用球 面镜,系统焦距 9.6 mm,所成狭缝像的长度为 4.8 mm, 系统总长为 72 mm,满足设计指标要求。





利用调制传递函数 MTF 曲线评价望远子系统的成像质量。图 6 是系统的调制传递函数曲线,在奈 奎斯特频率(41 lp/mm)处,系统 MTF 值大于 0.8,成 像质量良好,光学系统具有衍射受限的成像特性。



(9)

拼接而成的前置望远系统如图 7 所示,为展示 结构特点,列出了前置系统的正视和俯视两个不同 角度的视图。图 8 展示了折叠反射镜拼接狭缝处的 局部放大图,由于 0°天底角方向的望远子系统是正 入射狭缝方向的,因此不需要反射镜折转;其余四个 不同角度的望远子系统均被各自的反射镜调整出射 方向,使得五个望远子系统均沿同一个方向成狭缝 像。相邻反射镜之间最短间隔为 1 mm,每个子系统 所成短狭缝像的长度为 4.8 mm,相邻短狭缝像之间 的间隔为 3 mm,拼成的长狭缝像总长为 36 mm。因 为各子系统均具有良好的像质,因此拼接而成的长 狭缝像也具有良好的成像质量,满足整体偏振光谱 仪器设计要求。



图 7 前置望远系统立体图 Fig.7 Layout of the fore telescope



图 8 拼接反射镜局部放大图 Fig.8 Partial enlarged drawing of segmented mirrors

3.2 Offner 分光装架

Offner 分光装架结构如图 9 所示,是基于 Offner 中继系统用凸面光栅代替其次镜构成的,主要由入 射狭缝 O、主镜 M₁、凸面光栅 G 以及次镜 M₃ 组成。 前置多角度望远系统所成的狭缝像 O, 经主镜反射 至光栅 G 处分光,再经过次镜成像至焦平面探测器 I 上。分光系统孔径光阑置于光栅 G 上,入瞳、出瞳 位于无限远,实现了物方、像方远心。因为系统是同 心对称结构,可以消除初级彗差和畸变的影响;采用 全反射光学元件,避免了色差对像质的影响。



Fig.9 Structure of Offner configuration

分光装架的设计指标列于表 2,狭缝长度和数 值孔径均与前置系统相匹配,可对前置多角度望远 系统的拼接狭缝进行光谱分光。

表 2 分光系统参数

Tab.2 Parameters of dispersive light system

Technical index	Value
Work wavelength/nm	410-865
<i>F</i> /#	6
Numerical aperture	0.084
FOV/mm	36

设凸面光栅的曲率为 R₂, 主镜和次镜的曲率半 径分别为 R₁和 R₃,由同心对称性可知:

$$R_1 = R_3 = 2R_2$$
 (10)

系统探测的光谱范围为 410~865 nm,光谱采样 间隔为 2 nm,探测器的像元尺寸 δ为 12 μm,计算得 到系统的谱面宽度为:

$$\Delta l = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\Delta \lambda} \cdot \delta = 27.3 \text{ mm}$$
(11)

令 *m* 为光栅衍射级次, *N* 为光栅刻槽线密度, 根据光栅方程¹⁴⁴可知光栅 G 的曲率半径满足:

$$R_2 = \frac{\Delta l}{mN(\lambda_2 - \lambda_1)} \tag{12}$$

由于全息光栅 G 的槽密度 N 一般可以做到 50~ 3000 lp/mm,为了确保其曲率半径值在合适的范围 内,令N取80lp/mm作为初始值,在一级衍射条件 下根据公式(12)可计算求得 Offner 的初始结构 R,为 $80 \,\mathrm{mm}$, R_1 和 R_3 等于 160 mm_{\circ}

将计算得到的初始结构参数输入优化软件,控 制其成像质量以及遮拦等性能,经过优化得到最终 设计结果如图 10 所示。图 11 展示了在中心波段处 的 MTF 曲线,优化得到的 Offner 分光装架具有接近 衍射极限的成像质量, 谱线弯曲和色畸变均小于探 测器像元尺寸的1%。



图 10 Offner 分光装架设计结果

Fig.10 Design result of Offner spectrometer



图 11 Offner 分光装架 MTF 曲线

Fig.11 MTF curve of Offner spectroscopic configuration

3.3 光学系统拼接结果

将前置多角度望远物镜和后组 Offner 型分光装 架拼接,即得到多角度偏振成像光谱仪的最终设计 结果,如图 12 所示。系统总长为 223.5 mm,体积结构 紧凑。五个望远子系统分别观测沿轨方向五个不同 角度的目标信息,所成的短狭缝像首尾拼接为一条 长狭缝,经后组 Offner 装架进行分光接收,最终可在 探测器焦平面上得到目标的多角度偏振光谱图像。



图 12 光学系统设计结果 Fig.12 Design result of optical system

利用调制传递函数 MTF 曲线和点列图来评价 多角度偏振成像光谱仪的成像质量。图 13 是系统在 630 nm 中心波段处的调制传递函数曲线, 在奈奎斯 特频率(41 lp/mm)处,系统的 MTF 值达到 0.8,接近 衍射极限。图 14 为光线追迹像平面上中心波段处各 视场点列图,点列图均小于艾里斑范围,光学系统具 有衍射受限的成像特性。





IMA:-9.394,-0.000 mm

IMA:-8.677,-0.000 mm

IMA:-7.000,0.000 mm

OBJ:9.93,0.00 DEG

8

20.0

图 14 光线追迹点列图

Fig.14 Spot diagram of light tracing

4 结 论

文中设计了一种工作于可见光波段的多角度偏 振成像光谱仪,仪器采用偏振光谱调制技术同时获 取目标的偏振光谱信息。前置望远物镜创新性地采 用了多角度子系统视场拼接的方式,不仅降低了仪 器的体积与成本,亦能更加高效地获取多角度信息。 偏振光谱调制模块放置于各望远子系统中,可在沿 轨方向同时获取目标的多角度偏振光谱信息。后置 分光系统采用 Offner 结构,系统体积紧凑,成像质量 好,无运动部件,可靠性强,可广泛应用于大气探测、 地物遥感等重要领域。

参考文献:

- Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002, 297(5590): 2250–2253.
- [2] Wu L, Hasekamp O, Van Diedenhoven B, et al. Aerosol retrieval from multiangle, multispectral photopolarimetric measurements: importance of spectral range and angular resolution [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(6): 2625–2638.
- [3] Mishchenko M I, Cairns B, Hansen J E, et al. Monitoring of aerosol forcing of climate from space: analysis of measurement requirements [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2004, 88(1-3): 149–161.
- [4] Zhao Hu, Yan Lei, Zhao Yunsheng. Study on multiangle Polarized reflectance spectrum of granite [J]. Journal of Mineralogy & Petrology, 2004, 24(2): 9–13. (in Chinese) 赵虎, 晏磊, 赵云升. 花岗岩的多角度偏振反射光谱研究 [J]. 矿物岩石, 2004, 24(2): 9–13.
- [5] Snik F, Cravenjones J, Escuti M, et al. An overview of polarimetric sensing techniques and technology with applications to different research fields [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2014, 9099: 90990B-1-20.

- [6] Duan Jin, Fu Qiang, Mo Chunhe, et al. Review of polarization imaging technology for international military application I[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(3): 190–195. (in Chinese)
 段锦, 付强, 莫春和, 等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(上)[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 190–195.
- [7] Andre Y, Laherrere J M, Bret-Dibat T, et al. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument [C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1995, 2572: 79–90.
- [8] Jovanovic V M. Global earth mapping with NASA' s multiangle imaging spectroradiometer (MISR) [C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003, 4885: 22–33.
- [9] Peralta R J, Nardell C, Cairns B, et al. Aerosol polarimetry sensor for the Glory Mission [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2007, 6786: 67865L-1-17.
- [10] Snik F, Rietjens J H H, Harten G V, et al. SPEX: the spectropolarimeter for planetary exploration [C]//Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2010, 7731(1): 52–56.
- [11] Oka K, Kato T. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(21): 1475–1477.
- [12] Iannarilli F J, Jones S H, Scott H E, et al. Polarimetricspectral intensity modulation (P–SIM): enabling simultaneous hyperspectral and polarimetric imaging [C]//Proceedings of SPIE –The International Society for Optical Engineering, 1999, 3698: 474–481.
- [13] Ji Yiqun, Shen Weimin. Design and manufacture of Offner convex grating hyper-spectral imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 285–287. (in Chinese)
 季轶群, 沈为民. Offner 凸面光栅超光谱成像仪的设计与研制[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 285–287.
- [14] Prietoblanco X, Monteroorille C, Couce B, et al. Analytical design of an Offner imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9156–9168.