

矩形光瞳下双巴比涅型消偏器的设计与分析

刘晓林*, 李明, 安宁, 唐绍凡, 孙倩

北京空间机电研究所先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094

摘要 建立了矩形光瞳下适用于双巴比涅型消偏器的消偏理论及数值计算模型, 弥补了当前设计理论仅适用于圆形光瞳的不足。设计了一种适用于矩形光束口径且高度可靠的双巴比涅型消偏器。在确定最佳结构参数的基础上, 分析了晶体折射率和中心厚度差的误差要求。结果表明, 退偏器出射光的最大残余偏振度小于2%, 四像最大间距约为27 μm , 满足偏振灵敏度及像质要求。

关键词 物理光学; 偏振; 消偏器; 穆勒矩阵; 成像光谱仪; 偏振灵敏度

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082601

Design and Analysis of Dual Babinet Depolarizer Applied to Rectangular Pupils

Liu Xiaolin*, Li Ming, An Ning, Tang Shaofan, Sun Qian

Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract The depolarization theory and numerical calculation model for a dual Babinet depolarizer applied to rectangular pupils are built, which makes up the deficiency of the current design theories only suitable for circular pupils. A type of dual Babinet depolarizer with high reliability which can be applied to rectangular pupils is designed. On the basis of the optimal structural parameters, the error requirements of the refractive index and the central thickness difference of crystals are analyzed. The results show that the maximum residual polarization degree of the output light from the depolarizer is less than 2% and the maximum separation distance for the four images is 27 μm . The design requirements of polarization sensitivity and image quality are satisfied.

Key words physical optics; polarization; depolarizer; Muller matrix; imaging spectrometer; polarization sensitivity

OCIS codes 260.5430; 260.1440; 000.4430

1 引言

近年来, 基于星载成像光谱仪的大气环境遥感已得到迅猛发展。太阳光经过大气层散射后, 由于大气分子和气溶胶的瑞利散射作用, 散射光变为偏振光或部分偏振光, 大气散射辐射的偏振特性成为影响大气遥感精度的重要因素之一^[1-2]。用于气体监测的成像光谱仪常采用光栅实现超高光谱分辨率。可通过引入正交反射镜和低偏振膜层等传统方法来削弱光学系统中反射镜和透镜的偏振效应^[3]。光栅具有较强的双向衰减偏振效应, 难以通过传统方法消偏, 导致仪器响应依赖入射光的偏振态^[4-6], 从而降低了辐射测量和反演的精度。另外, 用于气

体监测的成像光谱仪要求1%的超高辐射测量精度, 对系统的偏振灵敏度提出了极高的要求^[7]。

在光学系统前或其内部引入消偏器是减小光学系统偏振灵敏度的常用方法之一。空间光学遥感器常采用空间域伪消偏器, 它利用入射偏振光在出瞳处产生快速变化的不同偏振态组合。其基本原理是偏振光入射到具有一定楔角的双折射晶体组合时, 出射光在不同的空间位置产生不同的双向相位延迟, 延迟在微小空间区域内相互叠加, 形成不同的偏振光, 最终在整个空间域积分, 形成等效的非偏振光, 实现退偏作用。引入消偏器后, 极大降低了后续光学系统对入射光偏振态的敏感度。消偏器的研究已有三十多年的历史, 目前主要的空间域退偏器有

收稿日期: 2018-02-05; 修回日期: 2018-03-06; 录用日期: 2018-03-23

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2016YFB0500500)

* E-mail: mojiexiaolin@163.com

双光楔 H-V (Horizontal-Vertical) 型消偏器^[8-9]、双光楔旋光消偏器^[10]、改进 Lyot 型消偏器^[11-14]、双巴比涅型消偏器^[15]。其中, 双巴比涅型消偏器能对所有的偏振光起退偏作用^[16-17], 可专用于高精度大气成分探测, 同时具有退偏特性与晶体厚度无关、安装与光栅刻槽方向无关、加工和装调难度小等优点。该类消偏器已成功应用到臭氧监测仪 (OMI)^[18] 等空间光学传感器中。

但是, 目前双巴比涅型退偏器的设计大都基于 McGuire 等^[15] 推导的计算理论。该计算方法仅适用于圆域光瞳, 对于矩形光瞳的光学系统不再适用。本文依据偏振光学和晶体光学理论, 详细推导了消偏器的穆勒矩阵; 并通过数值计算的方法, 建立了矩形光瞳下消偏器最大残余偏振度的计算模型, 分析了双巴比涅消偏器的退偏特性与楔角、折射率等因素的变化规律。利用该数值计算模型, 设计了一种用于矩形光瞳气体监测成像光谱仪的消偏器, 确定了其光学结构参数及加工误差。

2 设计理论

双巴比涅型消偏器由光轴相对旋转 45° 的两组 H-V 型消偏器组合而成, 结构如图 1 所示, 其中 xyz 、 $x'y'z'$ 为空间坐标系。每组 H-V 型消偏器的结构类似于小楔角的渥拉斯顿起偏器, 由两块等厚的单轴晶体光楔组成, 一个光楔的晶体光轴为水平方向, 另一个为垂直方向, 如图 2 所示, 其中 $OXYZ$ 为坐标系, α 为楔角, t_1 、 t_2 分别为晶体中心处的厚度。

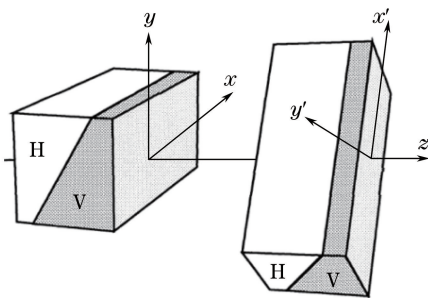


图 1 双巴比涅型消偏器的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of dual Babinet depolarizer

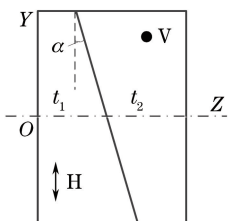


图 2 H-V 型消偏器的结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of H-V depolarizer

为简化分析, 作如下假设: 1) 假定入射光是平行、均匀、正入射的光束; 2) 忽略晶体表面的反射和晶体光楔面的双折射; 3) 忽略晶体对非寻常光 (e 光)、寻常光 (o 光) 不同的吸收系数引起的双向衰减效应, 只考虑晶体的双向延迟。由于双巴比涅型退偏器是由两组 H-V 型消偏器组合而成的, 首先分析一组 H-V 型消偏器的两垂直本征偏振光波的相位延迟情况。建立的直角坐标系如图 2 所示, 入射光沿光轴 Z 方向垂直入射到 H-V 型消偏器上, 进入第一块晶体后分解为 o 光、e 光。由于两块晶体的光轴相互垂直, 光束进入第二块晶体后, o 光变为 e 光, e 光变为 o 光, 则在第一块晶体内为 o 光、在第二块晶体内为 e 光的一束偏振光通过一块 H-V 型消偏器后相位为

$$\varphi_{oe} = \frac{2\pi}{\lambda} n_o (t_1 - y \tan \alpha) + \frac{2\pi}{\lambda} n_e (t_2 + y \tan \alpha), \quad (1)$$

式中 λ 为入射光波长, n_o 和 n_e 分别为晶体的 o 光和 e 光在波长 λ 下对应的折射率, y 为光瞳坐标。同理, 在第一块晶体内为 e 光、在第二块晶体内为 o 光的一束偏振光通过退偏器后相位为

$$\varphi_{eo} = \frac{2\pi}{\lambda} n_e (t_1 - y \tan \alpha) + \frac{2\pi}{\lambda} n_o (t_2 + y \tan \alpha). \quad (2)$$

则在坐标 y 处出射光的 e 光和 o 光两分量的相位延迟为

$$\varphi = \varphi_{oe} - \varphi_{eo} = \frac{4\pi}{\lambda} (n_e - n_o) y \tan \alpha + \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) (t_1 - t_2) = \delta y + \mu, \quad (3)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n 2 \tan \alpha, \quad (4)$$

$$\mu = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n (t_1 - t_2), \quad (5)$$

式中 δ 为双向延迟的变化斜率, μ 为消偏器中心点的相位延迟, $\Delta n = n_e - n_o$, 若晶体材料采用属于正单轴晶体的石英晶体, $n_e > n_o$ 。为了简化设计结构, 设定楔角恒定且楔板中心厚度相同, 即双向延迟的变化斜率恒定, 中心相位延迟为零, 故两分量的相位延迟 $\varphi = \delta y$ 。根据相位延迟器的穆勒矩阵^[19] 可知, 0° 方位 H-V 型消偏器的穆勒矩阵为

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta y) & \sin(\delta y) \\ 0 & 0 & -\sin(\delta y) & \cos(\delta y) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

同理,45°旋转的 H-V 型退偏器的穆勒矩阵为

$$\mathbf{M}_{45} = \mathbf{R}(45)\mathbf{M}_0\mathbf{R}(-45) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta y') & 0 & \sin(\delta y') \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\sin(\delta y') & 0 & \cos(\delta y') \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{R}(\alpha)$ 为旋转矩阵, y' 为 45° 旋转的 H-V 型退偏器的局部光瞳坐标。则坐标 y 处单一光线经过双巴比涅消偏器的穆勒矩阵为

$$\mathbf{M}_{\text{DB}} = \mathbf{M}_{45}\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta y') & -\sin(\delta y)\sin(\delta y') & \sin(\delta y)\cos(\delta y') \\ 0 & 0 & \cos(\delta y) & \sin(\delta y) \\ 0 & -\sin(\delta y') & -\cos(\delta y')\sin(\delta y) & \cos(\delta y)\cos(\delta y') \end{bmatrix}. \quad (8)$$

对(8)式中的每个元素在整个光瞳面求平均,得到双巴比涅消偏器的平均穆勒矩阵 $\bar{\mathbf{M}}_{\text{DB}}$ 。假设消偏器的入射光为线偏光,偏振方向与 Y 轴的夹角为 θ ,则入射光的斯托克斯矢量为 $\mathbf{S}_i = [1 \ \cos(2\theta) \ \sin(2\theta) \ 0]^T$,上标 T 代表转置。单一出射光的斯托克斯矢量为

$$\mathbf{S}_o = \mathbf{M}_{\text{DB}}\mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(\delta y')\cos(2\theta) - \sin(\delta y)\sin(\delta y')\sin(2\theta) \\ \cos(\delta y)\sin(2\theta) \\ -\sin(\delta y')\cos(2\theta) - \cos(\delta y')\sin(\delta y)\sin(2\theta) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

消偏器通常放置在光学系统的光瞳位置,设光瞳面积为 S ,则出射光的平均斯托克斯矢量为

$$\bar{\mathbf{S}}_o = \begin{bmatrix} I_o \\ Q_o \\ U_o \\ V_o \end{bmatrix} = \iint_s \mathbf{S}_o dx dy, \quad (10)$$

式中 I_o 、 Q_o 、 U_o 、 V_o 分别为为斯托克斯矢量的四个参量。

大多数光学系统的光瞳为圆形,基于圆域的对称性,可以获得含有贝塞尔函数的解析积分结果,文献[15]给出了详细的计算结果。由于消偏器的偏振特性与孔径形状、大小直接相关,该圆域积分结果不适用于矩形光瞳光学系统中消偏器的设计与分析。采用数值积分法,建立了矩形光瞳下的消偏器计算方法。设矩形光瞳沿 X 方向的边长为 $2a$,沿 Y 方向的边长为 $2b$,则出射光的平均斯托克斯矢量为

$$\bar{\mathbf{S}}_o = \begin{bmatrix} I_o \\ Q_o \\ U_o \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_{-b}^b \int_{-a}^a 1 dx dy \\ \int_{-b}^b \int_{-a}^a \cos(\delta y')\cos(2\theta) - \sin(\delta y)\sin(\delta y')\sin(2\theta) dx dy \\ \sin(2\theta) \int_{-b}^b \int_{-a}^a \cos(\delta y) dx dy \\ \int_{-b}^b \int_{-a}^a -\sin(\delta y')\cos(2\theta) - \cos(\delta y')\sin(\delta y)\sin(2\theta) dx dy \end{bmatrix}. \quad (11)$$

消偏器出射光的偏振度为

$$P = \sqrt{Q_o^2 + U_o^2 + V_o^2} / I_o. \quad (12)$$

由(11)式可知,双巴比涅型退偏器出射光的偏振度与入射光的偏振状态、光瞳面积及消偏器的相位延迟变化率 δ 有关。而由(4)式可知,相位延迟变化率 δ 与楔角、工作波长、晶体材料折射率相关,与厚度无关。

另外,加入消偏器后光学系统出射光的斯托克斯矢量为

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M}_r \bar{\mathbf{M}}_{\text{DB}} \mathbf{S}_i, \quad (13)$$

式中 \mathbf{M}_r 为消偏器后剩余光学系统的穆勒矩阵,对应的偏振灵敏度为 S_{LP_0} 。根据光学系统偏振敏感度的定义,加入消偏器后光学系统的偏振灵敏度^[8,17]为

$$S_{LP} = S_{LP_0} \times P_{max}, \quad (14)$$

式中 P_{max} 为消偏器出射光的最大偏振度, 也称为消偏器的最大残余偏振度。由(14)式可知, 加入消偏器后, 光学系统的偏振敏感度减小为原来的 P_{max} 。

3 消偏器设计

气体监测成像光谱仪用于遥感大气中近红外氧气 A 吸收带气体浓度的分布, 光谱范围为 752 ~ 768 nm, 系统空间维的焦距为 89.2 mm, 入瞳口径为 73.64 mm × 26 mm (前者为空间维, 后者为光谱维), 光谱分辨率为 0.04 nm, 探测器像元大小为 22.5 μm, 空间维方向的 14 个像元合并, 合并后像元尺寸为 315 μm。气体监测成像光谱的光路示意图如图 3 所示, 消偏器置于前端平行光路中。整个系统要求偏振灵敏度低于 1%, 利用系统全光路偏振效应进行分析计算, 要求退偏器的残余偏振低于 5%。考虑到晶体加工和装调误差等因素, 设计阶段要求消偏器的最大残余偏振度小于 2%。

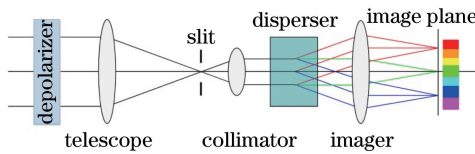


图 3 气体监测成像光谱仪的结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of imaging spectrometer for gas monitoring

消偏器选用石英晶体材料, 利用空间间隙代替传统的胶合方式, 提高消偏器在空间环境使用的可靠性, 消偏器的基本结构参数如下。四块楔形晶体的中心厚度均为 9 mm, 每组楔形晶体组合的空气间隔为 2 mm, 两组之间的空气间隔为 4 mm, 如图 4 所示。

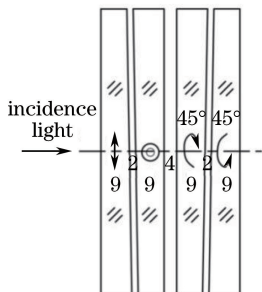


图 4 双巴比涅消偏器的结构参数

Fig. 4 Structural parameters of dual Babinet depolarizer

矩形光瞳积分复杂, 难以获取解析积分解, 借助 Matlab 进行数值分析计算。首先仿真分析中心波长 760 nm 时不同楔角下不同偏振方向的线偏振态光入射到消偏器后出射光的偏振度, 分析结果如

图 5 所示。可以看出, 线偏光经消偏器后, 出射光的偏振度随线偏光偏振方向 θ 发生周期性变化, 变化周期为 $\pi/2$ 。当入射线偏光的偏振方向与第一块晶体光轴(Y 轴)的夹角为 $\pi/4$ 的奇数倍时, 残余偏振度达到最大值。因此, 评估消偏器的最大残余偏振度, 仅需分析 45° 线偏光入射时出射光的偏振度。

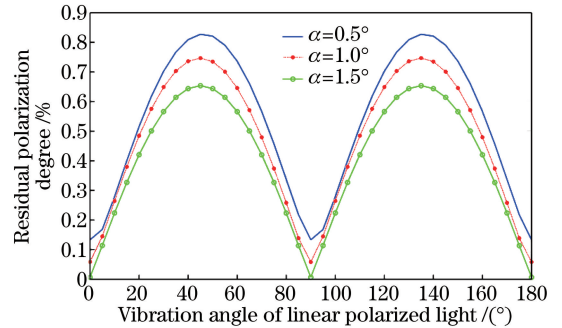


图 5 波长 760 nm 下消偏器出射光的偏振度随入射光偏振态的变化

Fig. 5 Polarization degree of output light from depolarizer versus polarization state of incident light at wavelength of 760 nm

进一步仿真分析了不同波长下最大残余偏振度随楔角的变化, 结果如图 6 所示, 可见最大残余偏振度随楔角增大呈现震荡减小的趋势。震荡是由(11)式中 Q_0 和 U_0 两项积分结果决定的, 其随着相位延迟量的增大而减小。当楔角增大时, 延迟量也相应增大, 当楔角趋于无限大时, 最大残余偏振度趋于 0。但是大楔角会导致出射光束分离, 影响仪器的空间分辨率, 因此不能无限增大楔角, 需考虑退偏效果与像质两者之间的平衡。如图 6 所示, 当楔角大于 0.52° 时, 最大残余偏振度均小于 2%。

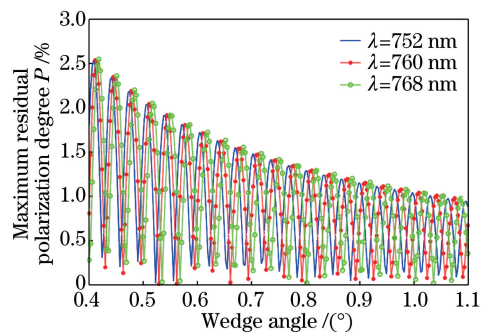


图 6 消偏器出射光的最大残余偏振度随楔角的变化

Fig. 6 Maximum residual polarization degree of output light from depolarizer versus wedge angle

为了进一步确定楔角大小及其加工误差, 分析楔角在 0.5° ~ 0.6° 范围内的退偏效果, 如图 7 所示, 最终选取楔角为 0.53°, 对应的最大残余偏振度仅为

1.1%，在 $(0.53^\circ \pm 0.01^\circ)$ 范围，退偏器的残余偏振度均小于2%。

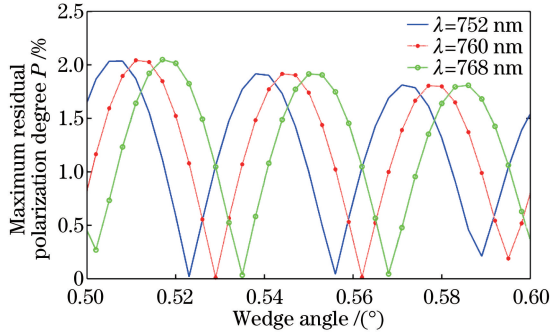


图7 不同波长下 0.53° 楔角附近的最大残余偏振度

Fig. 7 Maximum residual polarization degree near wedge angle of 0.53° under different wavelengths

4 消偏器对成像性能的影响

消偏器是多个具有一定楔角的单轴晶体的组合。由于晶体双折射效应，两种线偏光在晶体间的楔形斜面处折射时存在一定离散角，导致多像的产生，会降低成像光谱仪的空间分辨率。双巴比涅消偏器会产生四个像。通常当消偏器产生多像的像间距小于一个探测器像元尺寸时，消偏器对系统像质的影响可以接受。利用ZEMAX软件的偏振光线追迹功能，模拟分析消偏器的四像位置。分析结果如图8所示，一个视场点会在像面形成四个不同

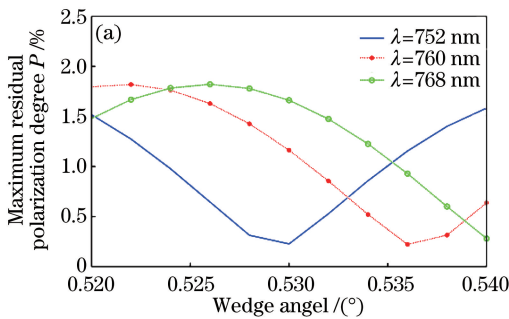


图9 $(0.53^\circ \pm 0.01^\circ)$ 楔角范围内消偏器出射光的最大残余偏振度。(a) $\Delta n = 0.001$; (b) $\Delta n = -0.001$

Fig. 9 Maximum residual polarization degree of output light from depolarizer in wedge angle range of $(0.53^\circ \pm 0.01^\circ)$.

(a) $\Delta n = 0.001$; (b) $\Delta n = -0.001$

此外，晶体中心厚度差存在即 $\mu \neq 0$ 时，同理应用第二节的理论，分析中心厚度差对最大残余偏振度的影响。结果表明，当中心厚度差在 $-1 \sim 1$ mm范围内变化时，消偏器的最大残余偏振度在楔角 $(0.53^\circ \pm 0.01^\circ)$ 的范围内均小于1.55%，相对图7所示的等厚情况，消偏效果有所提高。可见该类消偏器对中心厚度差不敏感，大大降低了加工难度。

的弥散斑，四像最大距离约为 $27 \mu\text{m}$ (约为像元尺寸的0.086)，远小于合并后的像元尺寸 $(315 \mu\text{m})$ 。当楔角为 $(0.53^\circ \pm 0.01^\circ)$ 时，四像距在 $26.5 \sim 27.5 \mu\text{m}$ 范围内，同样也远小于合并后的像元尺寸，满足系统的空间分辨率要求。

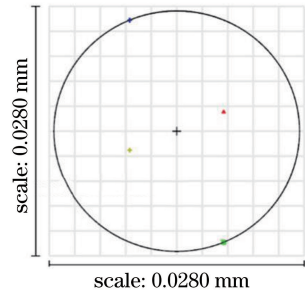


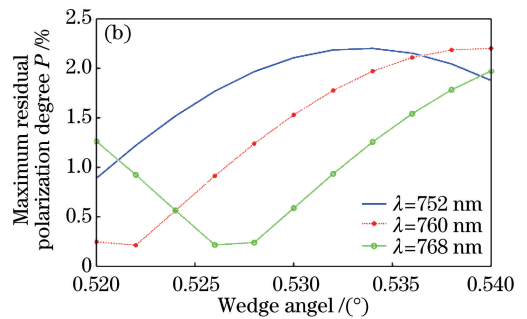
图8 楔角为 0.53° 时的四像分布

Fig. 8 Distribution of four images at wedge angle of 0.53°

5 误差分析

消偏器的加工误差除了楔角误差外，还包括石英晶体的双折射率差和光楔中心厚度差。

当双折射率差 Δn 在 ± 0.001 范围内变化时，消偏器的最大残余偏振度如图9所示。当双折射率差增大0.001时，退偏效果有所提高，最大值为1.8%；当双折射率差减小0.001时，退偏效果会稍变差，最大残余偏振度增大到2.2%。



6 结论

依据偏振光学和晶体光学理论，详细推导了消偏器的穆勒矩阵，建立了适用于矩形光瞳的双巴比涅型消偏器的数值计算模型，克服了现有设计方法的局限性。根据矩形光瞳气体监测成像光谱仪的退偏要求，设计了双巴比涅型消偏器，确定了最佳结构参数及楔角，偏振灵敏度设计值小于2%，四像最大

距离约为 $27 \mu\text{m}$, 满足系统的空间分辨率要求。

参 考 文 献

- [1] Hu S, Gao T C, Li H, *et al.* Analysis on impact of atmosphere refraction on radiative transfer process at visible and infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0601005.
胡帅, 高太长, 李浩, 等. 大气折射对可见近红外波段辐射传输的影响分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0601005.
- [2] Zhang X L. Linear depolarization ratios characteristics of dust aerosol particles model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0829001.
张小林. 沙尘气溶胶粒子模型的线退偏比特性[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0829001.
- [3] Xianyu Z A, Hou L Z. Research on eliminating polarization characteristic of metal reflectors of double reflection[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(5): 67-75.
鲜于子安, 侯立周. 金属镜面双反射消偏研究[J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(5): 67-75.
- [4] Morgan M F, Chipman R A, Torr D G. Measurement of the instrumental polarization of a high resolution ultraviolet spectrometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 1166: 401-409.
- [5] Breckinridge J B. Polarization properties of a grating spectrograph[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(2): 286-294.
- [6] Maymon P, Chipman R A. Linear polarization sensitivity specifications for spaceborne instruments[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1746: 148-156.
- [7] Dubroca G, Richert M, Loiseaux D. Recent developments in the design and verification of crystalline polarization scramblers for space applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9626: 962622.
- [8] Stephen C, Peter W, Chipman R A. Design and analysis of a depolarizer for the NASA moderate-resolution imaging spectrometer-tilt[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1746: 375-385.
- [9] Zhao F C, Wang S R, Qu Y, *et al.* Design and analysis of a depolarizer for the space-borne grating imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(7): 1991-1994.
赵发财, 王淑荣, 曲艺, 等. 星载光栅成像光谱仪的退偏器设计与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(7): 1991-1994.
- [10] Song S X, Song L K. Analysis of double plate rotation depolarizer by Mueller matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1947-1950.
宋师霞, 宋连科. 双光楔旋光退偏器的 Mueller 矩阵分析[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1947-1950.
- [12] Waluschka E, Wilson M, Quijada M, *et al.* ORCA's depolarizer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8153: 81530U.
- [13] Liu Y, Fu S J, Li F T. The depolarization characteristic of quartz depolarizer in UV-VUV spectral region[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, 24(3): 372-375.
刘颖, 付绍军, 李福田. 石英消偏器紫外-真空紫外消偏特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(3): 372-375.
- [14] Burns W. Degree of polarization in the Lyot depolarizer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1983, 1(3): 475-479.
- [15] Chen F, Li M, Xu P M. The numerical analysis method of depolarizer for broadband imaging spectrometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8532: 85320W.
- [15] McGuire J, Chipman R. Analysis of spatial pseudodepolarizers in imaging systems [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(12): 1478-1484.
- [16] Mao J H, Wang Y M, Shi E T, *et al.* Design and test of depolarizer for space-borne imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0423001.
毛清华, 王咏梅, 石恩涛, 等. 星载成像光谱仪退偏器的设计及测试[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0423001.
- [17] Zhao F C. The study on polarization correction of imaging spectrometer for space-borne ultraviolet atmospheric remote sensing[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 62-74.
赵发财. 空间紫外大气遥感成像光谱仪偏振校正研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012: 62-74.
- [18] Dobber M R, Dirksen R J, Levelt P F, *et al.* Ozone monitoring instrument in-flight performance and calibration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5962: 59621L.
- [19] Dennis G. Polarized light, revised and expanded[M]. 2nd edition. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003: 70.