

# 星载光栅成像光谱仪的退偏器设计与分析

赵发财<sup>1,2</sup>, 王淑荣<sup>1\*</sup>, 曲艺<sup>1</sup>, 林冠宇<sup>1</sup>

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 星载光栅成像光谱仪中的光栅通常有着强烈的偏振响应, 为保证成像光谱仪测量结果的准确性, 加入退偏器是消除光学系统的偏振响应的一种常用方法。对水平-垂直(H-V)型石英退偏器的退偏原理进行了理论分析, 根据成像光谱仪的偏振响应特点, 采用一片H-V型石英退偏器即可实现光谱仪的退偏要求。重点分析了退偏器引入的双像对成像光谱仪像质的影响, 分析的结果表明, 加入退偏器后, 仪器偏振响应敏感度小于1%, MTF下降小于1.5%, 像质满足使用要求, 完全可应用于星载光栅成像光谱仪。

**关键词** 退偏器; Mueller 矩阵; 偏振响应; 双像

中图分类号: O436.3 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)07-1991-04

## 引言

大气层既是地球气候与环境的主要载体和活动舞台, 又是空间天气与环境的重要组成部分。大气层下连地球海洋及生物圈, 上接太阳活动重大影响区域磁层和电离层, 上下发生着重要的相互作用。对它进行遥感探测从而发现和理解其中的整体行为和相互作用, 一直是地球和空间科学界共同的追求目标<sup>[1]</sup>。成像光谱仪是一种图像和光谱合一的光学遥感仪器, 它利用入射狭缝将前置望远光学系统和光谱成像系统有机地结合在一起, 能够提供景物连续的光谱图像。成像光谱仪具有其他光学遥感器不能比拟的综合技术性能, 是光学遥感器发展的主流和方向<sup>[2,3]</sup>。

经地球大气的后向散射, 太阳光包含有大气成分分布的重要信息, 因此通过测量经大气散射的光谱辐亮度和太阳直射的光谱辐照度, 就可以反演计算出大气中各种微量气体和气溶胶的含量, 以监测全球温室效应、臭氧层厚度变化和和各种有害气体的排放等等。非偏振的太阳光经过大气层散射后, 由于大气分子和气溶胶的散射作用, 散射光中电矢量垂直分量和平行分量的振幅发生变化, 因此散射光不再是各向同性的自然光, 而成为部分偏振光或偏振光。由于光栅成像光谱仪中光栅、反射镜等元件对不同偏振光的响应度不同, 而在地面对成像光谱仪辐射定标时, 采用的定标标准光源通常是非偏振的。为了对此进行校正, 通常有两种方法: 一是

像 OMI 和 SBUV/2 等采用退偏器的方法<sup>[4]</sup>; 二是像 GOME, SCIAMACHY 和 GOME-2 等采用专门的偏振测试装置<sup>[5,6]</sup>。在结构紧凑、小型化的空间光谱遥感器中, 常常采用退偏器的方法。由于成像光谱探测的特点, 不仅要求退偏器在仪器的光谱范围内有好的退偏效果, 还要求对成像光谱仪的成像质量的影响尽量低, 本文对用于大气遥感探测临边成像光谱仪的退偏器作了分析设计, 分析结果表明采用结构简单的 H-V 型石英晶体退偏器可满足要求而不用采用双巴比涅补偿式退偏器<sup>[7]</sup>。

## 1 H-V 型石英退偏器理论分析

H-V 型石英退偏器结构如图 1 所示, 它可由两块任意厚度比的石英光楔组成, 这两块石英光楔的晶体光轴一为水平方向, 另一个为垂直方向, 因此称为 H-V 型退偏器, 结构像

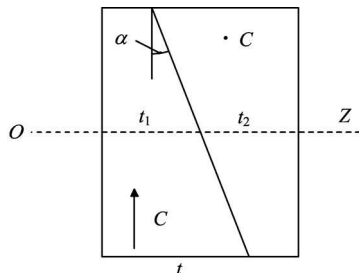


Fig 1 Structure of H-V quartz depolarizer

收稿日期: 2010-08-24, 修订日期: 2010-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41074126)资助

作者简介: 赵发财, 1984年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: zfcboom@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: srwang@ciomp.ac.cn

渥拉斯顿起偏器<sup>[8]</sup>，但这两块光楔的楔角 很小，在图中大大夸大了这个角度。 $t$  为退偏器的厚度， $Z$  为光传播方向， $O$  为光瞳的中心， $t_1$  和  $t_2$  分别为左右两边石英晶体楔中心的厚度。为简化分析，(1) 假定入射光是平行、均匀、正入射的圆光束；(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 e 光、o 光不同的吸收系数。

H-V 型石英退偏器的穆勒矩阵可以表示为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(x, \lambda) & \sin(x, \lambda) \\ 0 & 0 & -\sin(x, \lambda) & \cos(x, \lambda) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $\lambda$  为入射光波长， $x$  为归一化光瞳坐标， $(x, \lambda)$  为退偏器 o 光、e 光随位置变化的相位差，见下式

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{d} \int_0^d \cos(\cos \theta) d\theta & \frac{1}{d} \int_0^d \sin(\cos \theta) d\theta \\ 0 & 0 & \frac{1}{d} \int_0^d \sin(\cos \theta) d\theta & \frac{1}{d} \int_0^d \cos(\cos \theta) d\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \frac{J_1(\lambda)}{\lambda} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \frac{J_1(\lambda)}{\lambda} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中  $J_1(\lambda)$  为一阶贝塞尔函数，设  $\lambda = 2J_1(\lambda)/\lambda$ ，图 2 给出了矩阵参数 随 的变化情况。

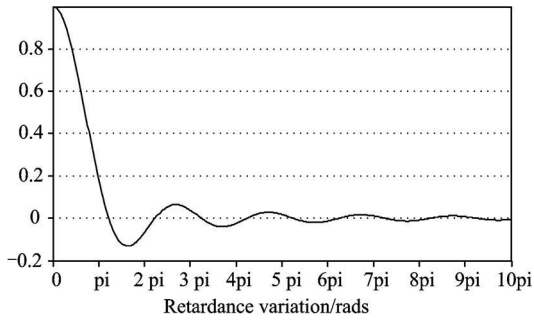


Fig 2 Matrix parameter as a function of

当 趋向于无穷时， 趋向于 0，即退偏器的穆勒矩阵变为

$$\overline{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由光的斯托克斯<sup>[10]</sup>表示法可以知道，偏振光通过此退偏器后，45 和 135 方向的线偏振光分量和圆偏振光分量将会被消去，而水平和垂直方向的线偏振光则没有变化。可以看出单一 H-V 结构的退偏器并不能对所有偏振光退偏，通常情况下，可再加入一块 H-V 结构的退偏器且其光轴方向与第一块夹角为 45，构成双巴比涅补偿式退偏器<sup>[7]</sup>，其理想情况下的穆勒矩阵可以表示为

$$\overline{M}_D = R(-45) \overline{M} R(45) \overline{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中的旋转转换矩阵  $R$  为

$$(x, \lambda) = \frac{4}{\lambda} (n_o - n_e) [(t_1 - rx \tan \alpha) - (t_2 + rx \tan \alpha)] \quad (2)$$

式中， $n_o$  和  $n_e$  分别为晶体的 o 光和 e 光的折射率， $\alpha$  为表示简便作如下定义

$$(x, \lambda) = \frac{4}{\lambda} (n_e - n_o) r \tan \alpha + \frac{2}{\lambda} (n_o - n_e) (t_1 - t_2) = x + \quad (3)$$

由文献[9]可知出射光偏振度与退偏器两晶体的中心厚度没有直接关系，不失一般性设  $t_1 = t_2$  即  $\lambda = 0$ 。这种退偏器是空域上的退偏效应，对式(1)在圆形光瞳范围求平均穆勒矩阵  $M$  有

$$\overline{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \frac{J_1(\lambda)}{\lambda} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \frac{J_1(\lambda)}{\lambda} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\lambda & \sin 2\lambda & 0 \\ 0 & -\sin 2\lambda & \cos 2\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

可以看出双巴比涅补偿式退偏器穆勒矩阵具有理想退偏器的形式，则此时不论入射光偏振情况如何，出射光均为非偏振光。

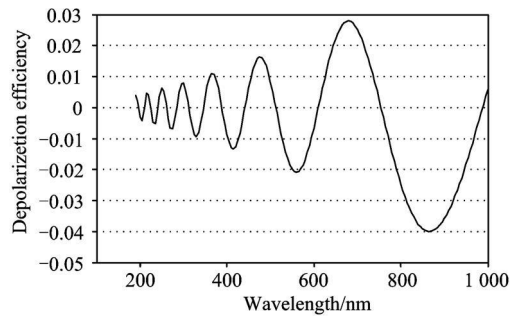


Fig 3 Matrix parameter as a function of

实际情况 不可能是无穷，由式(3)可知， 与石英晶体的双折射率差、入射波长、晶体楔角和入射光束口径等有关，由于随着波长变化，因此不能选择一个固定的 使得对所有的波长的矩阵参数 为 0。对 值大于 4 时，矩阵参数 小于 0.027。在图 3 中，给出的是在波长 800 nm 处， 为 4 时，矩阵参数 随波长的变化情况。可以看出退偏器在短波段退偏效果好，这是因为 与波长成反比关系。同样的分析可以得出，增大晶体楔角和入射光束口径， 变大，退偏效果变好。

## 2 成像光谱仪退偏设计

临边成像光谱仪<sup>[11]</sup>用来遥感大气中臭氧、NO<sub>2</sub> 等痕量

气体的垂直分布, 光谱范围为 270~ 780 nm, 系统焦距为 124.8 mm, 入瞳直径为 24 mm, 光谱分辨率为 1.4 nm, 探测器像元大小为 26 μm, 空间维方向为 2 像元合并使用, 光路图如图 4 所示。由光栅成像光谱仪的光学系统对称性<sup>[12]</sup>可以得到它的穆勒矩阵  $M_s$  为

$$M_s = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} T_p^2 + T_s^2 & T_p^2 - T_s^2 & 0 & 0 \\ T_p^2 - T_s^2 & T_p^2 + T_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2T_p T_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2T_p T_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,  $T_p$  和  $T_s$  分别为成像光谱仪对入射光电矢量平行于光栅刻槽方向和垂直于光栅刻槽方向的振幅透过率。

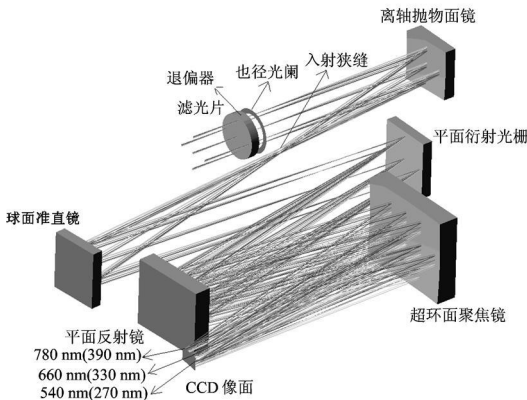


Fig 4 Optical layout of imaging spectrometer

在空间对地球的光学遥感中, 一般目标很少有圆偏振光分量, 也就是目标的斯托克斯矢量第四项为零<sup>[13]</sup>, 我们只考虑入射光为线偏振光的情况。根据双巴比涅补偿式退偏器的结构特点, 当使单一 H-V 结构退偏器位于成像光谱仪入瞳处且其光轴与光栅刻槽方向夹角均为 45° 时, 经过成像光谱仪系统的任意归一化入射线偏振光  $V = [1 \cos 2\theta \sin 2\theta 0]^T$  和出射光  $V'$  的关系可以表示为

$$V' = R(-45) M_s R(45) M V \quad (9)$$

则出射光强度  $I$

$$I = \frac{1}{2} (T_p^2 + T_s^2) + \frac{1}{2} (T_p^2 - T_s^2) \frac{2J_1(\cdot)}{\cdot} \sin 2\theta \quad (10)$$

整个成像光谱仪系统的线性偏振敏感度 (LPS) 定义为入射光偏振方向转过 180° 时, 系统最大输出  $I_{max}$  与最小输出  $I_{min}$  之差与它们之和的比值即

$$LPS = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (11)$$

则根据式(8)和(9)系统的偏振敏感度可以表示为

$$LPS = \left| \frac{(T_p^2 - T_s^2) \frac{2J_1(\cdot)}{\cdot}}{(T_p^2 + T_s^2)} \right| \quad (12)$$

加入退偏器后, 系统的偏振敏感度减小到原来的 1/2。系统的原来的偏振敏感度大约为 20%, 如果  $\theta$  小于 0.03 即大于 4°, 则加入退偏器后, 系统的偏振敏感度为 0.6%, 满足要求, 即只采用一块 H-V 结构退偏器, 也可使整个光谱仪系统起到退偏的作用。取 800 nm 处  $\theta = 4^\circ$ , 石英双折射率差为 0.009, 由光谱仪入瞳大小得到  $r = 12$  mm, 带入公式(3), 可计算得到退偏器楔角为  $\alpha = 0.44^\circ$ , 取  $t_1 = t_2 = 3$  mm, 退偏

器口径  $D = 30$  mm, 则可确定退偏器的基本参数。

### 3 退偏器对光谱仪的成像影响

H-V 退偏器两部分晶体间的光楔面发生双折射导致一个重要的问题: 双像<sup>[14]</sup>。在第一块石英晶体内的寻常光经过退偏器后将会向上偏, 非寻常光则将会偏向相反方向, 因此将会在焦面上形成两个像点。在图 5 中给出了在第一块晶体中寻常光垂直入射的情况。根据折射定律有

$$n_o \sin \alpha = n_e \sin \alpha_r \quad (13)$$

$$n_e \sin \alpha = \sin \alpha_r \quad (14)$$

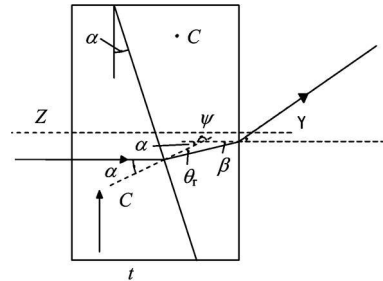


Fig 5 The principle of imaging double

从图 4 的几何结构可知

$$\alpha_r = 180^\circ - \alpha \quad (15)$$

$$\beta = 180^\circ - \alpha_r = \alpha \quad (16)$$

由式(13) (16)并对小角近似得到偏角  $\theta$  为

$$\theta = (n_e - n_o) \alpha \quad (17)$$

利用小角近似  $\tan \theta \approx \theta$ , 再由式(3)可得

$$\theta = \frac{r}{4} \quad (18)$$

由式(18)可知, 偏角  $\theta$  与石英晶体的双折射率没有关系。当这两束光线成像在探测器上时, 两个像点之间的距离为

$$2d = 2EFL \tan \theta \quad (19)$$

可以计算得, 双像在探测器上的距离为 16 μm。由于成像光谱仪空间分辨率要求较低, 为两像元合并使用, 是退偏器楔角垂直于光栅刻槽方向, 则双像分离位于空间维方向。退偏器引入的双像对系统传递函数的影响, 可以由点扩散函数计算得到, 双像的点扩散函数可以近似表示为

$$PSF = 1/2 [ \delta(x-d) + \delta(x+d) ] \quad (20)$$

其中,  $d$  为双像在探测器距离的一半, 传递函数 MTF 为点扩散函数 PSF 的傅里叶变换,

$$MTF = |f(PSF)| = \cos(kd) \quad (21)$$

其中,  $k$  为探测器的空间维方向的奈奎斯特频率, 由探测器的空间维方向的奈奎斯特频率 ( $19.2 \text{ lp/mm}$ ), 双像间隔  $d = 8 \mu\text{m}$ , 得到退偏器的  $MTF = 0.988$ 。则由退偏器引起的系统传递函数的下降小于 1.5%。

### 4 结论

对星载光栅成像光谱仪中的 H-V 石英晶体退偏器的退

偏原理进行了理论分析,应用 Mueller 矩阵计算法推导出了该退偏器的退偏条件,退偏效果与晶体的双折射率差、入射波长、晶体楔角和入射光束口径等有关,分析表明此种类型的退偏器在短波段退偏效果较好,增大晶体楔角和入射光束口径也可提高退偏效果。根据星载临边成像光谱仪的偏振响

应特点,只加入一块 H-V 石英晶体退偏器即可满足光谱仪的退偏要求,重点分析了加入退偏器对星载临边成像光谱仪像质的影响。结果表明,在星载临边成像光谱仪空间维方向 MTF 下降小于 1.5%,系统的偏振灵敏度小于 1%,满足要求。

## References

- [ 1 ] XING Ting, GONG Huixing(邢廷,龚惠兴). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 1999, 14(1): 5.
- [ 2 ] XIANGLI Bin, L. Quan-bo, HUANG Min, et al(相里斌,吕群波,黄旻,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 26(5): 1422.
- [ 3 ] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LI Fu-tian, et al(薛庆生,王淑荣,李福田,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(6): 1697.
- [ 4 ] Vries J D, Oord Gijbertus H, van den J, et al. SPIE, 2002, 4480: 315.
- [ 5 ] Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, et al. J. Atmos. Sci., 1999, 56: 151.
- [ 6 ] Burrows J P, Hildebrandt E, Goedert P H, et al. Acta Astronautica, 1995, 35(7): 445.
- [ 7 ] McGuire Chipman. Optical Engineering, 1990, 29(12): 1478.
- [ 8 ] Shurcliff W A. Polarized Light. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1966.
- [ 9 ] SONG Shixia, SONG Lianke(宋师霞,宋连科). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 27(7): 1947.
- [ 10 ] LIAO Yanbiao(廖延彪). Polarization Optics(偏振光学). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 2003. 51.
- [ 11 ] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LI Fu-tian, et al(薛庆生,王淑荣,李福田,等). Opt. Precision Eng.(光学精密工程), 2010, 18(4): 823.
- [ 12 ] Tatsuya Zama, Ichiro Saito. J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom., 2005, 1087.
- [ 13 ] Coulson K. Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere, A. Deepak, Hampton, Va. USA, 1988.
- [ 14 ] McClain S C, Chipman R A, Hillman L W. Applied Optics, 1992, 31: 2326.

## Design and Analysis of a Depolarizer for the Space-Borne Grating Imaging Spectrometer

ZHAO Fa-cai<sup>1,2</sup>, WANG Shu-rong<sup>1\*</sup>, QU Yi<sup>1</sup>, LIN Guan-yu<sup>1</sup>

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The main portion of the space-borne grating imaging spectrometer-grating has intense polarization response. The objective of spectrometer is to measure the intensity accurately without bias as to the incident polarization state. One common method to overcome polarization bias in optical systems is the insertion of a depolarizer. The theory of horizontal-vertical (H-V) quartz depolarizer operation is described. A single H-V depolarizer was met the spectrometer polarization requirement according to its polarization character. Both the degree of depolarization and image degradation (especially the image doubling) were analyzed for the depolarizer design. The analysis results show that it satisfies the design requirements of the spectrometer, the polarization sensitivity is within the specification of 1% and the decrease in MTF due to the depolarizer is less than 1.5%.

**Keywords** Depolarizer; Mueller matrix; Polarization response; Image doubling

(Received Aug. 24, 2010; accepted Nov. 30, 2010)

\* Corresponding author