

# 基于 Stokes 向量大气紫外光谱辐射的偏振修正研究

林冠宇 王淑荣 曹佃生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要** 通过在紫外(UV)大气成分探测仪中设置偏振测量通道,并采用基于 Stokes 向量方法对空间大气紫外光谱辐亮度探测输入值进行了偏振度修正。采用解析函数法建立了修正误差较大波段处的偏振度数学模型,将 240~380 nm 工作波段范围的偏振度修正误差最大值由 6.6% 减小至 1.6%。最大限度降低了由于大气散射偏振对探测大气入射光强的影响,提高了紫外大气测量精度,为航天遥感器大气紫外测量提供了理论和实验基础。

**关键词** 测量; Stokes 向量; 偏振修正; 紫外光谱; 解析函数

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0813001

## Study for Method Polarization Correction on Ultraviolet Atmospheric Spectral Radiation Based on Stokes Vector

Lin Guanyu Wang Shurong Cao Diansheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, China)

**Abstract** By setting polarization measurements channel in ultraviolet (UV) atmospheric constituents probe, the detection input value of UV atmospheric spectral radiance polarization is corrected based on the Stokes vector approach. The method of analytical functions is used to establish a mathematical model for the degree of polarization when correction error is largest, and the polarization degree maximum error correction is decreased from 6.6% to 1.6% in the working wavelength from 240 nm to 380 nm. The maximum influence on the atmosphere measurements is strongly reduced due to atmospheric scattering of incident light polarization detection, and the accuracy of UV atmospheric measurements is improved, which provides theoretical and experimental basis for aerospace remote sensing instruments to measure UV atmospheric.

**Key words** measurement; Stokes vector; polarization correction; ultraviolet spectrum; analytical functions

**OCIS codes** 120.0280; 120.4530; 300.6540

## 1 引 言

随着遥感技术的发展,大气成分探测的在轨偏振测试及修正方法已成为航天遥感器器的关键技术<sup>[1]</sup>。太阳中的紫外(UV)光照射大气层后,散射光中的垂直分量和平行分量振幅发生变化,因此散射光不再是各向同性,而成为部分偏振光或偏振光,影响了大气紫外遥感器器输入的光谱亮度值,从而降低了大气成分探测精度。解决大气偏振影响探测精度的传统方法是单独设置测量大气偏振度的有效载荷,此方法虽

然可以获得高精度的探测数据,但占据较大的卫星资源。本文针对用于地外大气成分探测的紫外遥感器器偏振修正方法,利用在主光路中设置偏振测量通道,基于 Stokes 矢量和 Mueller 的偏振测试原理,在紫外大气成分探测仪中设置偏振探测单元系统后,采用实时测量数据与理论推导相结合的方法,对入射光谱亮度的偏振测试和修正方法进行研究,并在该器器的地面实验样机进行了理论分析和实验验证。通过此方法可以提高用于卫星观测大气成分探测的紫外

收稿日期: 2014-01-05; 收到修改稿日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(41074126, 41175028)

作者简介: 林冠宇(1976—),男,博士,副研究员,主要从事空间紫外遥感光谱仪器方面的研究。

E-mail: linguanYu1976@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

遥感仪器的大气探测精度。

## 2 大气紫外光谱辐亮度偏振修正方法

传统的退偏方法是在光学系统入瞳处加消偏器,该消偏器只能在地面通过测试获得工作波段内光谱的残余偏振度,而无法获得仪器在轨实时系统偏振响应度,降低了仪器探测数据反演精度。为提高探测数据的精度,可在探测系统的主光路中设置偏振测量通道(PMD),在轨实时偏振测量,利用偏振测量数据与修正算法来修正偏振对光谱辐亮度测量的影响,从而提高大气反演精度。

欧空局开始研制全球臭氧监测实验装置(GOME)。GOME-1为三个宽波段测量通道,分别为300~400 nm,400~600 nm,600~800 nm。GOME-2增加为13个波段(如图1红色线段所示),特别是在310~335 nm范围内增加了四个波段,分别为311.0~315.5 nm,316.2~320.4 nm,321.1~325.5 nm,330.1~335.0 nm。由图1可看出,GOME-1偏振通道数较少引起反演辐亮度的误差较大,特别是在300~350 nm范围内,GOME-2增加了偏振测量通道,大大减少了误差,误差小于1%<sup>[7-8]</sup>。图1中 $\eta$ 为主光路探测值与主光路探测通道比值, $\theta$ 为太阳天顶角(SZA)。

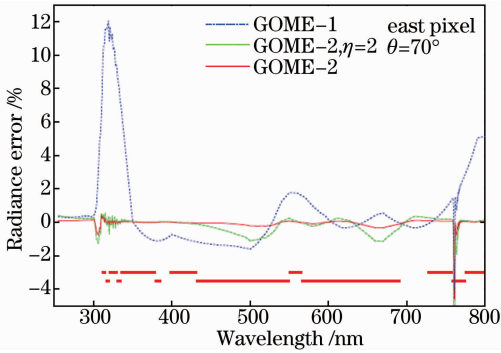


图1 GOME-1各个偏振测量通道的误差

Fig. 1 Deviations of each channel of polarization measurement for GOME-1

### 2.1 基于 Stokes 矢量的偏振测试原理

光的偏振状态可以有几种表示方法,在描述目标反射以及散射特性时常用的 Stokes 矢量法,Stokes 矢量法是由 Stokes<sup>[4]</sup>在 1852 年提出的。一束光的偏振状态可以由 4 个 Stokes 参数表示,分别为  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  和  $V$ ,每个 Stokes 参数都可用光强度表示,入射光  $\mathbf{S}$  可以表示为<sup>[5]</sup>

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $I$  表示光辐射总亮度; $Q$  表示  $0^\circ \sim 90^\circ$  线偏振光分量之差; $U$  表示  $-45^\circ \sim 45^\circ$  线偏振光分量之差; $V$  与圆偏振有关(在大气 Rayleigh 散射状态  $V=0$ )<sup>[4]</sup>。则偏振光的偏振度  $P$  可表示为

$$P = (\sqrt{Q^2 + U^2})/I. \quad (2)$$

偏振角度  $\chi$  为  $\chi = 0.5 \arctan(U/Q)$ 。其中偏振度和偏振角的取值范围<sup>[6]</sup>为: $0 < P < 1, 0 < \chi < 180^\circ$ 。

入射光强的 Stokes 向量  $\mathbf{S}_{in}$  和探测器所探测光强的 Stokes 向量  $\mathbf{S}_{det}$  可以表示为  $\mathbf{S}_{det} = \mathbf{M}\mathbf{S}_{in}$ ,其中  $\mathbf{M}$  为  $3 \times 3$  阶 Mueller 矩阵,该矩阵可以表示使入射偏振光的 Stokes 参数变换成透射偏振光参数的偏振光器件。则探测器探测光强为<sup>[7]</sup>

$$\mathbf{S}_{det} = \begin{bmatrix} S \\ Q \\ U \end{bmatrix}_{det} = \mathbf{M} \times \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix}_{in}, \quad (3)$$

则入射光的偏振态可以由探测系统的 Mueller 矩阵和出射光的偏振态来确定:

$$\mathbf{S}_{in} = \mathbf{M}^{-1} \times \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix}_{det}, \quad (4)$$

$$\text{式中 } \mathbf{M} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha \\ \sin 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & \sin^2 2\alpha \end{bmatrix}, \alpha \text{ 为偏振方向。}$$

在确定  $0^\circ$  参考方向后,任意偏振方向  $\alpha$  上的光强为<sup>[8]</sup>

$$I_\lambda(\alpha) = \frac{1}{2} (I_\lambda + Q_\lambda \cos 2\alpha + U_\lambda \sin 2\alpha). \quad (5)$$

由(5)式可知,只需  $\alpha$  取三个值,测得三个透过偏振器的工作波长  $\lambda$  的光强度值  $I_\lambda(\alpha)$ ,就可以获得入射光 Stokes 参数,进而得出入射光的偏振度、偏振角等参数。

### 2.2 紫外大气成分探测仪

紫外大气成分探测仪功能是通过观测大气散射光谱,实现大气臭氧( $O_3$ )、二氧化氮( $NO_2$ )、一氧化氮( $NO$ )、甲醛( $H_2CO$ )、气溶胶等微量气体的密度和垂直分布探测。其工作波段为 240~380 nm,系

统焦距为 240 mm,光谱分辨率为 0.3 nm。探测仪由望远单元、预色散单元、偏振测量单元、二次色散单元和成像单元组成,其光路如图 2 所示。

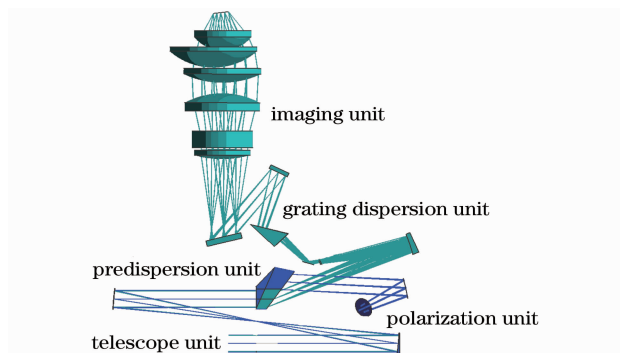


图 2 紫外大气成分探测仪光路图

Fig.2 Optical graph of UV atmosphere constituents probe

入射光经望远单元成为准直光束,以布儒斯特角入射到预色散棱镜的后表面,约 13% 的入射光经 2 次内表面反射成为垂直偏振辐射,再透过棱镜,经聚焦镜会聚和折转镜入射到偏振探测器上,实现偏振通道的偏振测量;而垂直偏振和平行偏振辐射直接透射光栅色散单元进行主通道光谱探测,偏振测量单元测量原理图如图 3 所示。

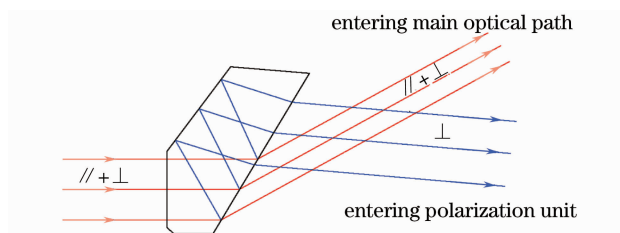


图 3 偏振测量单元示意图

Fig.3 Drawing of the polarization unit

### 2.3 在轨偏振测试和修正方法

根据紫外大气成分探测仪的工作波段为 240~380 nm,系统的偏振测量通道工作波段设置为 240~380 nm,采用 Stokes 向量方法获得该工作波段的偏振参量。

应用 Mueller 矩阵可以得到光学系统与偏振相关的强度透射率公式,总强度即为 Stokes 向量的第一个分量。紫外大气成分探测仪偏振测试及对入射光谱辐射亮度的修正方法流程如图 4 所示。

通过大气传输模拟软件得到工作波段大气辐亮度  $I_0$ 、 $Q_0$  和  $U_0$ ,大气辐亮度的模型计算是通过文献[9]中的大气辐射传输程序计算得到,图 5 为应用于模拟计算中的大气辐亮度图,图中  $\psi - \psi_0$  为太阳方位角。经系统的辐射定标,得到仪器主通道的非

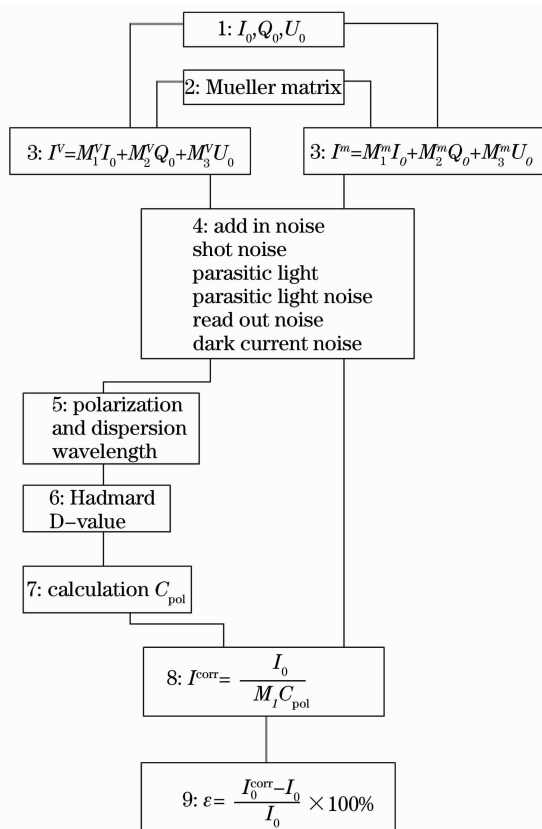


图 4 偏振测量及修正流程图

Fig.4 Schematic diagram of polarization unit for measuring and correcting

偏振光的系统透射率,及所需要的 Mueller 矩阵元素值。采用模拟输入值和相应的 Mueller 矩阵值,通过计算得到主通道及偏振测量通道的探测信号值,将杂散光噪声、散粒噪声、读出噪声和暗电流噪声加入探测信号中进行修正;模拟计算的偏振测量通道信号在工作波段内进行像元合并;计算有效波长,有效波长的计算可以根据主通道的模拟信号得到;为计算工作波段内的偏振参数,在主通道的波长范围内进行阿克玛插值(Hadamard D-value)<sup>[10-12]</sup>,可以得到全波段范围内的偏振参数。根据偏振参数

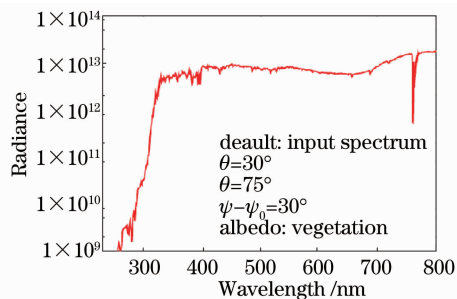


图 5 240~800 nm 波段模拟大气辐亮度值

Fig.5 Simulated atmospheric radial brightness values from 240 nm to 800 nm

可计算得到偏振校正因子  $C_{\text{pol}}^{[13]}$ , 即

$$C_{\text{pol}} = \frac{M_1^m}{M_1^m \cdot + M_2^m \cdot Q_0/I_0 + M_3^m \cdot U_0/I_0}, \quad (6)$$

式中  $M_1^m$  为仪器主探测通道对非偏振光的辐亮度响应度;  $M_2^m$ 、 $M_3^m$  为测量仪器的偏振响应即相应 Mueller 矩阵参数, 可以通过地面定标测量获得;  $Q_0/I_0$ 、 $U_0/I_0$  可以通过在轨测试获得。

主通道信号应用偏振校正因子  $C_{\text{pol}}$  计算得到修正后的辐亮度  $I_0^{\text{corr}}$ , 即

$$I_0^{\text{corr}} = \frac{S_m}{M_1^m \cdot C_{\text{pol}}}, \quad (7)$$

式中  $S_m$  为主科学探测通道信号。修正辐亮度误差可由模型输入辐亮度比较计算得到, 即

$$\epsilon = \frac{I_0^{\text{corr}} - I_0}{I_0} \times 100\%. \quad (8)$$

## 2.4 紫外大气成分探测仪线性偏振响应模型

对紫外大气成分探测仪入射光谱辐亮度的在轨修正, 关键在于解算仪器的  $3 \times 3$  阶 Mueller 矩阵各个参数, 因此需要在地面建立紫外大气成分探测仪线性偏振响应模型。

入射光的偏振采用通过偏振方向平行于光谱仪入缝方向光的分量来描述, 这个偏振参数由  $p$  来表示, 这与所选坐标系有关。参数  $p$  定义为振动方向平行于入缝方向的光强度占光总强度的比重, 入射光振动方向垂直于入缝方向则  $p = 0$ , 入射光是非偏振的则  $p = 0.5$ , 入射光振动方向平行于入缝方向则  $p = 1$ 。参数  $q$  定义为振动方向与入缝高度方向夹角为  $+45^\circ$  时的光强度占光总强度的比重。

根据定义有光辐射总亮度 Stokes 矢量可表示为

$$\mathbf{S} = I \begin{bmatrix} 1 \\ Q \\ U \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} 1 \\ 2p - 1 \\ 2q - 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由信号  $S_m$  计算得到大气辐亮度  $I_0^{\text{corr}}$  可由(7)式获得。定义如下定标参数, 则偏振响应校正因子  $C_{\text{pol}}$  又可表示为<sup>[14]</sup>

$$C_{\text{pol}} = \frac{1}{1 - 2 \left[ \frac{(\eta - 1)p}{\eta + 1} + \frac{(\zeta - 1)q}{\zeta + 1} + \frac{1 - \xi}{(\eta + 1)(\zeta + 1)} \right]}, \quad (10)$$

式中  $\eta$  为主光路 ( $0^\circ$ ) 探测值与主光路探测通道 ( $90^\circ$ ) 比值;  $\zeta$  为主光路 ( $45^\circ$ ) 探测值与主光路探测通道 ( $135^\circ$ ) 比值;  $\xi$  为主光路 ( $90^\circ$ ) 探测值与偏振探测通道 ( $90^\circ$ ) 比值。

取  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$  分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$ , 则可

获得偏振通道工作波段内的 3 个 Stokes 分量, 即

$$I_\lambda = [I_\lambda(0^\circ) + I_\lambda(90^\circ)],$$

$$Q_\lambda = [I_\lambda(0^\circ) - I_\lambda(90^\circ)],$$

$$U_\lambda = [I_\lambda(45^\circ) - I_\lambda(135^\circ)], \quad (11)$$

式中  $I_\lambda(0^\circ)$ 、 $I_\lambda(45^\circ)$  和  $I_\lambda(90^\circ)$  是偏振通道的探测器测量值。根据(7)式, 得出  $I_0^{\text{corr}}$ , 根据(8)式即可计算出偏振修正误差值  $\epsilon$ 。

## 3 结果分析

紫外大气成分探测仪的主光路和偏振测量通道的测量, 是通过在实验室条件下采用偏振测量定标系统完成的, 其结构示意图如图 6 所示。该装置由可提供已知偏振性质单元、强度入射光的光源单元和三维转台测试单元组成, 可完成扫描镜、漫反射板等单个元件在不同入射波长、不同入射角度、不同偏振情况下的偏振响应测量及仪器的整机测量。该系统的指标: 光谱范围为  $240 \sim 1000 \text{ nm}$ ; 带宽为可调单色 (偏振) 或白光 (偏振); 光源为氙灯  $240 \sim 700 \text{ nm}$ , 石英卤钨灯  $400 \sim 1000 \text{ nm}$ ; 出射光束为平行光, 口径  $\Phi = 50 \text{ mm}$ , 非均匀性小于  $1\%$ 。

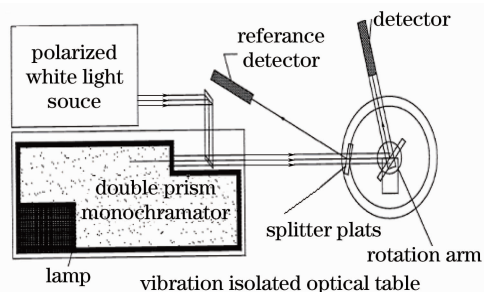


图 6 偏振测量定标系统示意图

Fig. 6 Schematic plan of polarization measuring and calibration system

将紫外大气成分探测仪放在偏振通道测量定标系统中的转台上, 将入射光束调制为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  的 4 束线偏振光, 从而进行紫外大气成分探测仪的主光路通道和偏振通道测量。将紫外大气成分探测仪偏振测量通道的测量值代入(11)式中, 解算仪器的 Mueller 矩阵各个参数。根据(10)式求解偏振响应校正因子  $C_{\text{pol}}$  之后, 根据(7)式计算出经过偏振修正后的入射光强度。图 7 为根据(8)式归一计算修正后的入射辐亮度与输出辐亮度的误差随波长变化的曲线。

由图 7 可以看出, 在  $300 \sim 340 \text{ nm}$  范围内, 求得的误差值较大, 因此所修正的入射光辐亮度值在此范围内引入的误差也较大,  $320 \text{ nm}$  左右最大误差均

为 6.6%。

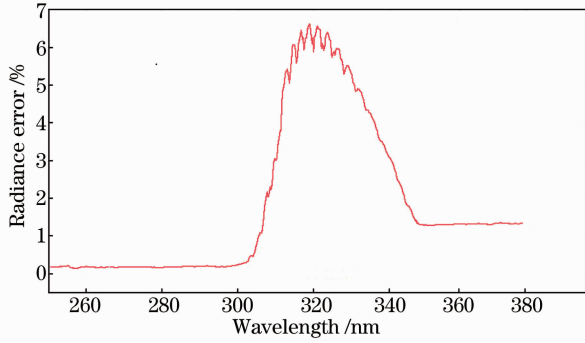


图 7 修正后的入射辐亮度与输出辐亮度的误差的曲线

Fig. 7 Error curve between corrected input intensity and output intensity

图 8 为大气辐射亮度在 240~2400 nm 波段范围内的偏振度变化曲线,由图 8 可以看出 320 nm 位于 II 区,该区入射光的偏振变化剧烈,这也是引起测量误差偏大的原因。因此,在 300~325 nm 波段内,采用根据  $\lambda_0 = 300$  nm 以下波段理论值和  $\bar{\lambda} = 340$  nm 以上波段测量值  $P_A$  的解析函数法理论修正入射光的偏振度,其解析函数的形式为<sup>[15]</sup>

$$P(\lambda) = \bar{P}(\bar{\lambda}) + \frac{\omega_0 \cdot \exp[-(\lambda - \lambda_0) \cdot \beta]}{\{1 + \exp[-(\lambda - \lambda_0) \cdot \beta]\}^2}, \quad (12)$$

式中  $\bar{P}(\bar{\lambda})$ 、 $\omega_0$  和  $\beta$  为描述此解析函数的参数,保证此函数可拟和到给定的插值点。求解拥有三参数的解析函数,但是在波长  $\lambda_0$  和  $\bar{\lambda}$  区域之间只有两个独立的限制( $P_0, P_1$ )。

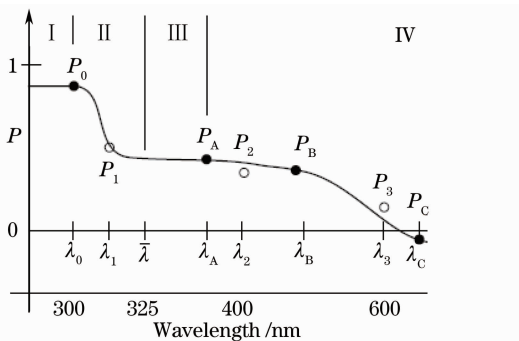


图 8 大气辐射亮度在 240~2400 nm 的偏振度变化

Fig. 8 Polarization change curve of atmosphere intensity from 240 nm to 2400 nm

解决方案是扩展解析函数曲线到  $\lambda_A$ , 利用  $P_A$  作为第三个独立的限定参数。这个方案的主要缺点是在  $\bar{\lambda}$  和  $\lambda_A$  规定了一个非常平坦的偏振曲线,采用点  $(\lambda_A, P_A)$  确定解析函数参数,但是在波长  $\bar{\lambda}$  终结。这并没有改变  $P_A$  不能很好地代表紫外偏振性质的问题,但是根据  $\lambda_A$  附近的测量为算法描述曲线的形

状提供了更多的自由度。这种方法求解解析函数的三个参数如下所示。定义辅助函数:

$$g_A(\beta) = 4 \cdot \frac{\exp[-(\lambda_A - \lambda_0) \cdot \beta]}{\{1 + \exp[-(\lambda_A - \lambda_0) \cdot \beta]\}^2},$$

$$g_1(\beta) = 4 \cdot \frac{\exp[-(\lambda_1 - \lambda_0) \cdot \beta]}{\{1 + \exp[-(\lambda_1 - \lambda_0) \cdot \beta]\}^2}. \quad (13)$$

$\beta$  可由公式获得:

$$g_1(\beta) \cdot (P_A - P_0) + g_A(\beta) \cdot (P_0 - P_1) + (P_1 - P_A) = 0. \quad (14)$$

根据  $\beta$  值求得  $\bar{P}(\lambda)$ :

$$\bar{P}(\bar{\lambda}) = [P_A - P_0 \cdot g_A(\beta)] / [1 - g_A(\beta)], \quad (15)$$

进而求得参数  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = 4 \cdot [P_0 - \bar{P}(\bar{\lambda})]. \quad (16)$$

利用对 300~340 nm 偏振度理论模型计算和偏振通道实际测试结果进行组合拼接,紫外大气成分探测仪修正后的入射辐亮度与输出辐亮度的误差随波长变化的曲线见图 9。

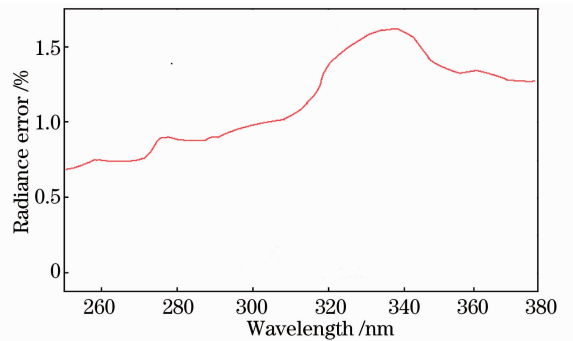


图 9 修正拼接后的入射辐亮度与输出辐亮度的误差的曲线

Fig. 9 Error curve between corrected splicing input intensity and output intensity after correcting and matching

由图 9 可以得出结论,经过对 300~340 nm 波段偏振度进行理论模型计算和偏振通道实际测试结果相结合,紫外大气成分探测仪在工作波段 240~380 nm 修正后的入射辐亮度与输出辐亮度的误差最大值为 1.6%。

## 4 结 论

通过在紫外大气成分探测仪设置偏振测量通道,采用 Stokes 矢量法原理对入射光进行偏振修正。在 300~340 nm 采用解析函数法建立该波段入射光的偏振度理论计算模型,并结合偏振仪测量结果得出紫外大气成分探测仪在 240~380 nm 波段修正后的入射辐亮度与输出辐亮度的误差最大值

为 1.6%。实验结果表明:在紫外大气成分探测仪设置实时偏振测量通道,结合实际偏振测量结果建立了特殊波段的偏振度理论计算模型,最大限度地降低了由于大气散射对探测大气入射光强的影响,提高了紫外大气测量精度,可以为该仪器在今后航天遥感仪器大气测量领域提供理论和实验基础。

### 参 考 文 献

- 1 Conrad Wells. Polarization sensitivity modeling of reflective imaging systems[C]. SPIE, 1994, 2265: 239-244.
- 2 N A J Schutgens, P Stammes. Improving the polarization correction algorithm of GOME[C]. SPIE, 1999, 3754: 411-422.
- 3 J F De Haan, P B Bosma, J W Hovenier. The adding method for multiple scattering calculations of polarized light [J]. *Astron Astrophys*, 1987, 183: 371-391.
- 4 David B Chenault, J Larry Pezzaniti, Russell A Chipman. Mueller matrix algorithms[C]. SPIE, 1922, 1746: 321-246.
- 5 A C Russell. Progress in polarization ray tracing [C]. SPIE, 1994, 2265: 141-151.
- 6 K L Coulson. Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere[M]. USA: A Deepak Pub, 1988.
- 7 Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Method of improving measurement accuracy of stokes parameters [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0408006.  
汤飞龙, 李中梁, 步 扬, 等. 一种提高偏振光斯托克斯参量测量精度的方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0408006.
- 8 Wang Wei, Chu Jinkui, Cui Yan, *et al.*. Modeling of atmosphere polarization pattern based on vector radiative transfer[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513001.

王 威, 褚金奎, 崔 岩, 等. 基于大气矢量辐射传输的大气偏振建模[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513001.

- 9 J C Roger J C, R Santer, M Herman, *et al.*. Polarization of the solar light scattered by the earth-atmosphere system as observed from the U. S. shuttle[J]. *Remote Sensing Environ*, 1994, 48(3): 275-290.
- 10 Matthew H Smith. Interpreting Mueller matrix images of tissues [C]. SPIE, 2001, 4257: 82-89.
- 11 Li Zhanfeng, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. A method on measurement of Mueller matrix elements for polarization correction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0628001.  
李占峰, 王淑荣, 黄 煜, 等. 用于偏振修正的穆勒元素的测量方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0628001.
- 12 Qiu Zhenwei, Hong Jin, Li Shuang, *et al.*. Methods to simultaneously achieve radiometric and polarimetric accuracy for multichannel ultra-wide-angle polarimetric camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0828003.  
裘桢炜, 洪 津, 李 双, 等. 多通道超广角偏振相机辐射精度和偏振精度的同时实现方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0828003.
- 13 K F Evans, G L Stephens. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. *J Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1991, 46(5): 413-423.
- 14 J Frerick, H Bovensmann, S Noel, *et al.*. SCIAMACHY on-ground/in-flight calibration, performance verification and monitoring concepts[C]. SPIE, 1997, 3117: 176-187.
- 15 Zhang Lingling. On approximation with restricted interpolation zeroes of analytic function[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2011, 32(4): 356-357.  
张玲玲. 解析函数限制插值点的逼近[J]. *太原理工大学学报*, 2011, 32(4): 356-357.

栏目编辑: 王晓琰