

文章编号 1004-924X(2019)03-0569-08

大气临边观测中视轴临边指向精度的在轨补偿

吴伟平, 马庆军*, 王淑荣

(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:为提高大气臭氧观测中的临边大气反演精度,克服臭氧探测仪在轨热变形和卫星姿态误差对临边指向精度的影响,建立了在轨视轴临边指向的精度补偿方法。通过分析低星等恒星的能量和观测时机,设计合适的恒星观测窗口和积分时间;采用平板玻璃获取星点像的弥散斑,用阈值距心法计算恒星像在像面上的位置;然后根据卫星轨道和探测仪的几何结构,设计临边指向精度的在轨补偿方法并分析了补偿后的临边指向精度。地面对星观测实验的结果表明:采用恒星定位补偿法,可使星点像的定位误差小于 $1.83''$,当前视轴的指向误差控制在 $\pm 3.08''$ 以内;在编码器的位置重复精度为 $\pm 2.47''$ 的条件下,使临边观测光轴位置上的扫描镜定位误差控制在 $\pm 3.95''$ 以内,臭氧探测仪临边指向精度达到 $\pm 7.9''$ 以上,完全满足反演所需的指向精度优于 $\pm 12.4''$ 的要求。

关键词: 大气观测;痕量气体;指向误差;在轨补偿;恒星定位

中图分类号: TP722.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192703.0569

On-orbit correction method for limb pointing error of ozone detector

WU Wei-ping, MA Qing-jun*, WANG Shu-rong

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

*Corresponding author, E-mail: qjma@ciomp.ac.cn

Abstract: To improve the accuracy of the atmospheric inversion of an ozone observation instrument and to overcome the effects of thermal distortion and satellite attitude error on the orbit for the accuracy of limb pointing, an error correction method for the limb pointing of an ozone detector on the orbit was established. First, through the analysis of low-magnitude star energy and based on observations, an appropriate star observation window and integration time were designed. The blur spot of a star was obtained using flat glass. An image motion compensation technique was then used to ensure the blur spot was stable. The position of the star in the image plane was calculated using a threshold centroid. Subsequently, based on the satellite orbit and detector geometry, a pointing correction method was designed and the pointing accuracy was analyzed after being modified. The results of star observation experiments on the ground show that with this method, the error of stellar positioning is less than $\pm 1.83''$ and the pointing error of the visual axis is less than $\pm 3.08''$. When the encoder repeats accura-

收稿日期:2018-11-15;修订日期:2018-12-25.

基金项目:国家自然科学基金-国家重大科研仪器研制项目(No. 41527806)

cy is $\pm 2.47''$, the positioning error of the scanning mirror in the limb observation axis is within $\pm 3.95''$, and the accuracy of limb pointing of the ozone detector is better than $\pm 7.9''$, which fully meets the inversion accuracy requirement of $\pm 12.4''$.

Key words: atmospheric observation; trace gas; pointing error; on-orbit correction; star location

1 引言

随着大气观测精细化程度的不断提高,臭氧观测由天底观测方式反演臭氧总量过渡到天底-临边交替观测方式反演臭氧垂直分布^[1-2]。由于臭氧在大气层中的垂直分布呈现出较大的梯度,500 m 的地球临边切向的高度误差将导致平流层臭氧反演误差增加 10%,对流层臭氧反演误差增加 20%^[3]。由于观测距离较远(大于 3 000 km),扫描镜定位角度 $1'$ 的误差将造成临边切向高度 1 km 的误差,因此臭氧临边观测时需要精确地控制光轴在地球临边切向上的高度,以保证臭氧垂直分布的反演精度^[4]。

国外的臭氧探测载荷对临边指向精度这一关键指标进行了深入的研究。Snel 等人根据临边指向位置信息来提高痕量气体的反演精度,分析了扫描镜位置精度对反演精度的影响^[5]。von Savigny 等人总结了指向精度误差的在轨变化规律,并发现载荷的临边指向精度随着季节会产生振幅约为 800 m 的周期性误差^[6-7]。Kaiser 等人分析了臭氧临边辐射的“膝”形特点^[8],Von Savigny 等人利用“膝”形特点使探测器临边指向精度达到 300 m,但该方法需要具体地区和具体时间内臭氧分布的先验知识。Bramstedt 等人在大气层上方对太阳进行观测,利用太阳中心光强最大的特点将临边指向偏差修正到 126 m,通过长时间数据统计将指向精度修正到 26 m (1σ) 以内^[3]。但该方法需要太阳敏感器提供准确的太阳位置,高精度的轨道预报和在轨长时间的数据统计。

目前,我国风云系列卫星平台都为卫星载荷提供轨道参数和姿态的实时信息,其中三轴指向精度小于 $0.15^\circ (3\sigma)$,三轴姿态稳定度小于 $21.6 (")/s (3\sigma)$,惯性姿态三轴测量精度小于 $21.6 (") (3\sigma)$ 。不过,卫星平台提供的指向精度无法

满足痕量气体探测所要求的视轴指向精度,必须采用更高精度的方法补偿卫星的初始指向误差。卫星的姿态稳定度和测量精度较高,但仍小于视轴临边指向精度的要求。卫星平台的热状态情况变化复杂,星敏感器对卫星姿态的测量精度传递到载荷后下降较大,载荷光学系统的热变形等因素会导致视轴临边指向难以满足 200 m 以内的精度要求。因此,本文设计了一种适合我国臭氧探测仪的在轨临边定位精度补偿方法,以保证临边观测的定位精度,满足臭氧气体反演的精度要求。

2 臭氧临边-天底观测方式

臭氧层的临边观测方式是采用方位扫描镜和俯仰扫描镜将地球临边大气辐射成像于光谱仪的入射狭缝,观测临边大气辐射的垂直精细分布,俯仰扫描镜控制仪器视场在地球临边方向上的观测高度,方位扫描镜控制仪器观测指定高度内水平方向上的大气辐射。天底观测方式是采用俯仰扫描镜将仪器星下点的大气辐射成像于光谱仪的入射狭缝^[9]。探测仪首先进行持续时间为 473.6 s

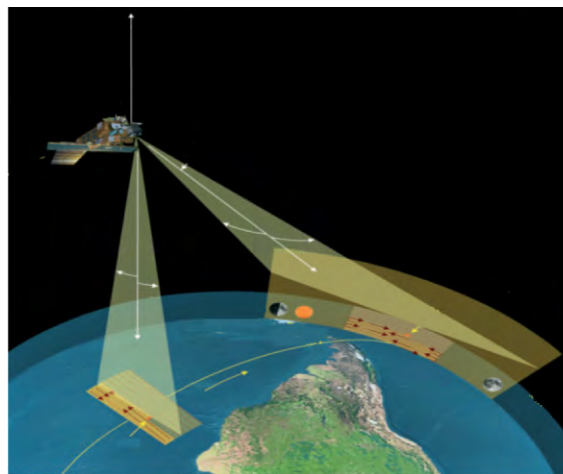


图 1 临边-天底观测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of limb-nadir observation

的沿轨临边观测,然后进行持续时间为 473.6 s 的天底观测,使临边-天底交替观测能够对同一地区的臭氧大气总量和垂直分布进行高时间分辨率的比对观测,如图 1 所示^[10]。

卫星平台运行于 837 km 高度的太阳同步轨道,临边观测距离为 3 371 km,因此保证 ± 200 m 的切向高度精度需保证 $\pm 12.4''$ 的光轴指向精度。视轴临边方向上的观测精度由俯仰扫描镜的指向精度决定,俯仰扫描镜的指向精度由俯仰扫描镜的初始定位精度和俯仰编码器精度决定。俯仰编码器精度可通过采购合适的高精度编码器予以控制,而俯仰扫描镜的初始定位精度会随着卫星平台的姿态和热环境发生变化,因此本文对俯仰扫描镜的初始定位精度进行周期性的补偿。由于光线经过俯仰扫描镜会将临边切向的误差放大 2 倍,因此俯仰扫描镜的补偿精度要在 $\pm 6''$ 以内。本文通过在轨恒星观测的方式补偿仪器视轴的临边定位误差,使视轴临边观测精度满足上述指标要求。

3 恒星定位补偿方法

采用恒星作为定位补偿的观测目标,需详细地分析恒星的定位精度和观测时机、仪器对恒星的观测能力、星点识别算法精度等因素。

3.1 恒星的定位精度与观测时机

在地球轨道上可以观测到的恒星(除太阳外),其观测张角都远小于 $1''$,表 1 中列出了亮度较大的恒星的观测张角。因此,采用恒星作为观测目标能够提供高精度的观测目标张角。

表 1 低星等恒星张角

Tab. 1 Observation angles of low magnitude stars

代号	名称	观测张角/($''$)	星等
32349	天狼星	0.006 8	-1.47
91262	织女星	0.001 7	0.03
24608	五车二	0.003 7	0.08
11767	北极星	0.000 52	1.97

臭氧探测仪运行在轨道倾角为 98.75° ,高度为 837 km,降交点地方时为上午 10 点整的卫星

平台上,仪器可观测视场为沿轨方位角 0.9° 、沿轨俯仰角 0.18° 。由于仪器的观测视场大于卫星平台的三轴指向精度,因此可以保证视轴的指向误差,避免目标星(为便于叙述,下文将定位补偿时选择的目标恒星简称为目标星)偏离视场。臭氧探测仪对低星等恒星的观测时机如表 2 所示。由于北极星在该轨道上整个年份都可以进行观测,因此以北极星作为定位观测的主要目标;以天狼星、五车二等几颗低星等恒星作为定位观测的复核目标,在它们的可观测月份对扫描镜的定位精度进行复核校正。

表 2 目标星的观测时机(以 2020 年为例)

Tab. 2 Observing opportunity of target stars in 2020

代号	名称	可观测区间	最短连续观测时间/s
32349	天狼星	3 月 1 日—3 月 14 日	16
91262	织女星	8 月 28 日—9 月 23 日	11
24608	五车二	2 月 7 日—3 月 8 日, 7 月 20 日—8 月 19 日	11
11767	北极星	全年	13

3.2 仪器观测能力

臭氧探测仪的光学系统设计和探测器选型主要以观测大气辐射为目标,因此需分析臭氧探测仪是否满足观测恒星的要求。臭氧探测仪能够观测到目标星的必要条件如下:

$$H_{\text{cm}} \gg H_{\text{m}}, \quad (1)$$

其中: H_{cm} 为臭氧探测仪探测恒星目标所获得的辐照度, H_{m} 为探测器正常工作的最小可探测辐照度。其计算公式为:

$$H_{\text{cm}} = H \cdot \omega \cdot \eta \cdot S/S_l, \quad (2)$$

$$S_{\text{m}} = E_a/(DR \cdot T_m), \quad (3)$$

其中: H 为目标恒星的辐照度, $H = 5 \times 10^{10} hc/2.512^{m_s(\lambda)}$, $m_s(\lambda)$ 为目标星等数, h 为普朗克常数, c 为光速; ω 为探测器接收光谱能量占总能量的百分比(取 10%); η 为光学透过率(取 87%); S 为通光面积, $S = \pi D^2/4$, D 为入瞳直径(取 31 mm); S_l 为星点像面积, $S_l = \pi d^2/4$, d 为星点像直径,取 5 倍像元直径 $55 \mu\text{m}$; E_a 为探测器的饱和曝光量($0.6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$); DR 为 CCD 的动

态范围(取 2^{12}), T_m 为最大积分时间(取 1 s)。由此可得:

$$H_{cm} = 0.447\ 23 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2 \gg H_m = 0.6 \times 10^{-10} / 4\ 096 \text{ W/m}^2$$

臭氧探测仪光学系统点列图的均方根值小于 $20\ \mu\text{m}$, 即在合焦状态下星点像在焦面上形成的弥散斑直径小于 2 个像元, 其点扩散函数可近似表示为:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\text{PSF}}^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right], \quad (4)$$

其中: σ_{PSF} 为弥散斑半径, 小于 1 个像元; (x_0, y_0) 为曲面中心点, 则质心计算半径可取为弥散斑半径的 2 倍以上。为了提高星点像的定位精度, 根据星点定位精度与星点在探测器上弥散斑尺寸的关系(如表 3 所示), 在提高定位精度的同时兼顾系统的加工难度, 因此采用离焦的方式将星点像弥散到 5×5 像元进行位置定位。

表 3 弥散斑大小与星点定位精度的关系

Tab. 3 Relation between blur spot and star location precision

95%能量弥散斑像元数	识别精度
1×1	0.2
2×2	0.035
3×3	0.01
5×5	0.009

臭氧探测仪的系统焦距 f 为 62 mm, F 数为 2, 探测器像元边长为 $11\ \mu\text{m}$ 。若要使弥散斑达到 5×5 像元, 需要像面离焦 $110\ \mu\text{m}$ 。由于臭氧探测仪的焦平面位于像面上, 光学设计中没有调焦机构。为了尽量减少仪器的体积、质量和复杂度, 这里不采用传统的电控运动部件调焦的方式获取星点像的弥散斑。利用臭氧探测仪的定标轮机构, 在定标板上增加一个能够安装 $33\ \text{mm} \times 33\ \text{mm}$ 固定平板玻璃的孔位, 采用固定平板玻璃的离焦方式获取弥散斑, 其原理如图 2 所示。

平板玻璃产生的焦移为:

$$\Delta l = (n-1)d/n, \quad (5)$$

其中 n 为平板玻璃的折射率, 取 1.516 3。则采用

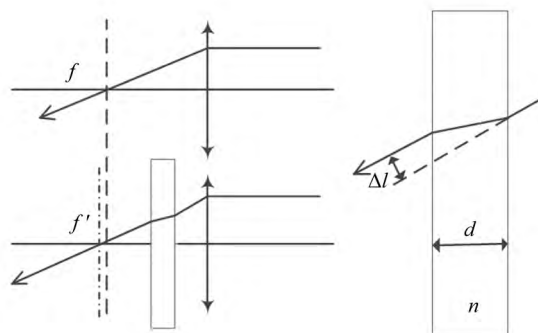


图 2 平板玻璃离焦获取弥散斑示意图

Fig. 2 Obtaining blur spot by defocusing with flat glass

厚度为 $323\ \mu\text{m}$ 的 K9 平板玻璃。

3.3 星点识别与位置校正算法

本文采用带阈值的矩心法进行星点识别, 矩心法的计算公式为:

$$x_0 = \frac{\sum \sum x \cdot I'(x, y)}{\sum \sum I'(x, y)}, \quad (6)$$

$$y_0 = \frac{\sum \sum y \cdot I'(x, y)}{\sum \sum I'(x, y)}, \quad (7)$$

其中 $I'(x, y) = I(x, y) - T$, T 为信号阈值, 可通过观测恒星附近的暗背景获得。当 $I(x, y) > T$, $I'(x, y) = 0$; 当 $I(x, y) \leq T$, $I(x, y)$ 为信号强度。 x, y 满足 $(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 \leq R^2$, R 为弥散斑半径。

设臭氧探测仪的焦距为 f , 探测仪观星的物距为 d , 距离所观测恒星的距离为 r , 主光轴与恒星光线的夹角为 α , 如图 3 所示。由几何光学可知, 像点与焦点的距离 $x = \frac{f \cdot r \cdot \sin \alpha}{f + r \cdot \cos \alpha}$, 若主光轴角度偏移 $\Delta\theta$, 偏移后恒星像高 $x' = \frac{f}{f + r \cdot \cos(\alpha + \Delta\theta)}$, 则恒星像的偏移距离为:

$$\Delta x = f \cdot [\tan(\alpha + \Delta\theta) - \tan \alpha]. \quad (8)$$

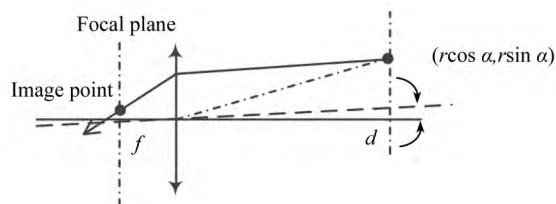


图 3 臭氧探测仪观星光学示意图

Fig. 3 Sketch of star-gazing by ozone detector

当主光轴通过恒星,即 $\alpha = 0^\circ$ 时, $\Delta x = f \tan \Delta\theta$, 可得偏移角公式为:

$$\Delta\theta = \arctan \frac{\Delta x}{f}. \quad (9)$$

臭氧探测仪开始在轨运行后,根据卫星轨道和姿态数据计算自身光轴指向位置。在目标星观测时机内,将仪器光轴对准目标星进行观测,观测过程中扫描镜反向转动补偿卫星运动带来的角度变化,目标星的像应该位于仪器的焦点上。目标星的实际成像点与仪器焦点的距离即为恒星像的偏移距离 Δx ,由公式(8)可计算得到偏移角 $\Delta\theta$ 。 $\Delta\theta$ 在方位方向的分量为方位偏移角,在俯仰方向的分量为俯仰偏移角。将方位偏移角和俯仰偏移角作为当前光轴指向的固定误差补偿光轴指向位置。焦点位置由地面定标的方式得到。

3.4 误差分析

卫星在三维(俯仰、偏航和横滚)方向上的姿态变化均可引起仪器视轴在水平和俯仰方向上的指向变化,从而引起临边观测高度的变化。本补偿方法采用单一恒星作为定位目标,无法解算出卫星在三维方向上的姿态信息,但能够计算出当前视轴在俯仰和方位方向上的偏差,因此单星测量可以满足临边观测高度补偿的需求。

本单星补偿方法能够消除俯仰扫描镜的固定指向误差和缓变指向误差(补偿周期内变化小于 $1''$),主要包括仪器光轴与卫星平台的安装误差,卫星平台的姿态误差,(季节变化)温度漂移导致的光机组件误差;但无法消除编码器和定位算法的随机测量误差。由于成本的限制,宇航编码器的位置精度最高可以达到 $9.88''$ (17 bits),位置重复性为 $2.47''$ (19 bits)。显然单靠编码器的位置精度,无法满足 $6''$ 的扫描镜定位要求。因此,本文设计了固定光轴位置的临边观测方式,如图4所示。任务观测区为地球大气层 $20 \sim 80$ km 高度的区域,对应仪器 1.08° 的观测窗口。这里将观测窗口两边各扩展 0.45° ,使临边观测区达到 1.98° 。由于卫星平台的三轴指向精度为 0.15° ,因此可以保证临边观测区严格覆盖任务观测区。俯仰扫描镜每次在 10 个固定位置完成定位观测,这 10 个位置称为临边观测光轴位

置,可通过地面标定的方式将这 10 个观测光轴位置标定到编码器重复性(即 $2.47''$)以内。本文选择中间的临边观测光轴作为指向补偿方法使用的补偿观测窗口,为整个扫描镜定位提供基准。

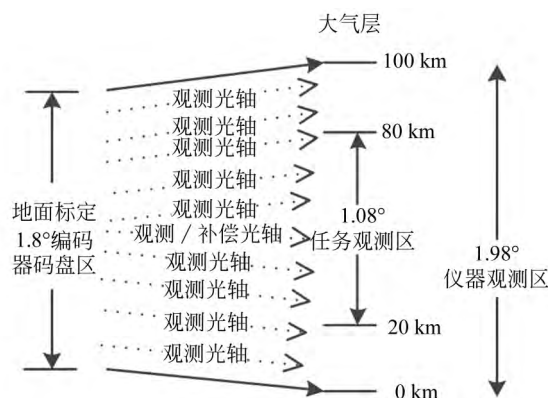


图4 固定光轴位置的临边观测方式

Fig. 4 Limb observation mode of fixed optical axes

在润滑良好的情况下扫描镜轴系在临边观测光轴位置的控制精度可以达到 $2.5''$ 。由于像元边长为 $11 \mu\text{m}$,则扫描镜定位时的晃动误差小于 $f \cdot \tan 2.5'' = 0.752 \mu\text{m} < 0.07$ 像元。

定位算法的误差主要来源于观星传感器的暗噪声,像元大小造成的采样不连续,程序的舍入误差以及拍摄时视轴角度变化引起的像移。根据星敏感器理论和臭氧探测仪的探测器参数,前三项误差引起的 5×5 像元弥散斑的定位误差不会超过 $1/20$ 像元^[11]。如果在曝光过程中星点像的像移小于 0.9 个像元,则像移对定位算法的影响小于 $1/40$ 像元^[12],因此星点像定位误差小于 $\sqrt{(1/20)^2 + (1/40)^2} = 0.056$ 像元。按每个像元边长 $11 \mu\text{m}$ 计算,由公式(9)可得由星点像定位误差导致的俯仰扫描镜的定位误差,其值小于 $2.04''$,因此俯仰扫描镜的初始定位误差为星点像定位误差与编码器重复性误差的合成误差,小于 $3.21''$ 。俯仰扫描镜的临边观测点定位误差是由俯仰扫描镜的初始定位误差与编码器的观测点重复性误差合成的,最大不超过 $4.06''$,则俯仰扫描镜的指向误差不超过 $8.12''$,满足指向精度优于 $12.4''$ 的指标要求。

4 实验与结果

4.1 实验方法

为了验证本补偿方法的正确性,进行了外场实验,实验原理如图 5 所示。将地球看成一个匀速运动的转台,自转周期为 T ,将焦距为 f 的观测仪主光轴对准赤纬为 β 的恒星,进行时间间隔为 t 的多次观测。其中,第一次观测的时间点为 t_0 ,第二次观测的时间点为 t_1 ,第 n 次观测的时间点为 t_n 。两次观测地球转过角度 $\Delta = 360 \cdot t/T$, T 为地球自转周期,取 86 164 s,由立体几何可得两次观测的视轴夹角 $x = 2 \cdot \arcsin\left(\sin \frac{\Delta}{2} \cdot \cos \beta\right)$,则由公式(8)得两次观测的像点在像面上移动的距离 $l = f \cdot [\tan(\alpha + x) - \tan \alpha]$ 。多次观测实验中,保证观测仪的观测位置和观测角度恒定,通过定位算法计算相邻观测图像上目标星像点之间的距离,通过比较计算值与理论值之间的差异,确定补偿方法的精度。

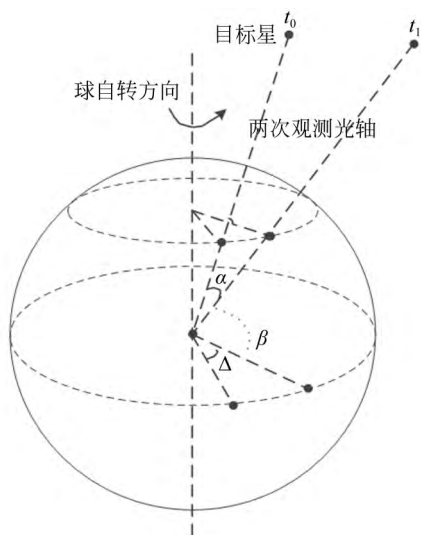


图 5 地球自转角度观测示意图

Fig. 5 Observation sketch of earth rotation angle

4.2 实验结果与分析

按照 4.1 节的实验方法,采用焦距为 62 mm,像元尺寸为 $11 \mu\text{m}$ 的探测系统经过扫描镜反射后对天狼星(天球坐标:赤纬 $-16^\circ 42' 47.315''$,赤经 $06\text{h}45\text{m}9.249\text{s}$)进行连续曝光

观测。曝光的积分时间设置为 1 s,拍摄间隔时间为 1 s,拍摄 3 组天狼星图像,前两组每组 8 张图像,后一组每组 20 张图像。拍摄过程中,保持探测系统的位置固定不变,扫描镜采用空间矢量控制方式动态稳定到目标位置。拍摄的天狼星弥散斑如图 6 所示,弥散斑半径约为 4 像素(能量 $>95\%$)。采用不同半径的质心距求得每个星点像的位置,并计算出每组图像中相邻两张星点像之间的距离,测得的距离与理论距离如表 4 所示。

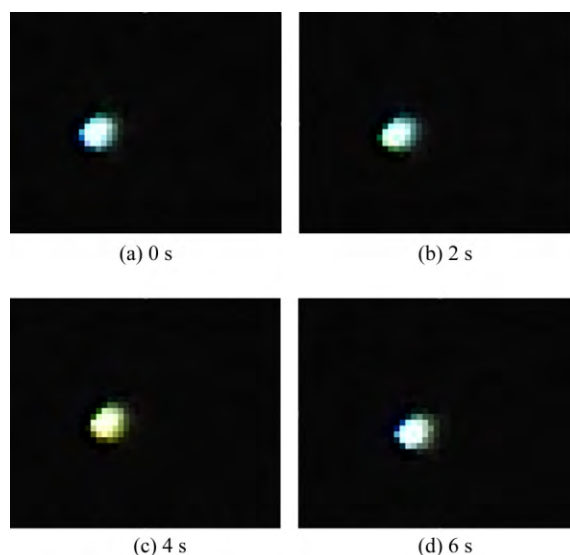


图 6 实验中拍摄的天狼星弥散斑

Fig. 6 Blur spots of Sirius captured in experiments

通过公式(8)计算得到星点像移动的理论距离为 1.573 像元(由于实验在地面进行,所以计算中增加 $152.6''$ 的蒙气差^[13-14])。通过图 7 可以看到,弥散斑半径为 4 像素(光斑能量大于 95%),当计算半径大于等于弥散斑半径时,不同半径的定位算法计算的像元位置值之间的差异小于 0.02 像元。因此综合计算量和计算误差,选取质心定位算法的计算半径为 5 像素。

计算半径为 5 像素的所有测量均值与真值的最大误差不超过 0.05 像元,测量方差均小于 0.14 像元,如图 7 所示。通过公式(9)计算得到星点像的定位误差小于 $\pm 1.83''$,在编码器位置重复精度为 $\pm 2.47''$ 的条件下,扫描镜的初始定位误差小

于 $\pm 3.08''$,临边观测光轴的扫描镜定位误差控制在 $\pm 3.95''$ 以内,补偿后仪器的临边指向精度可以达到 $\pm 7.9''$ 以上,均优于理论最大误差值,满足臭氧探测系统临边指向精度优于 $\pm 12.4''$ 的设计要求。

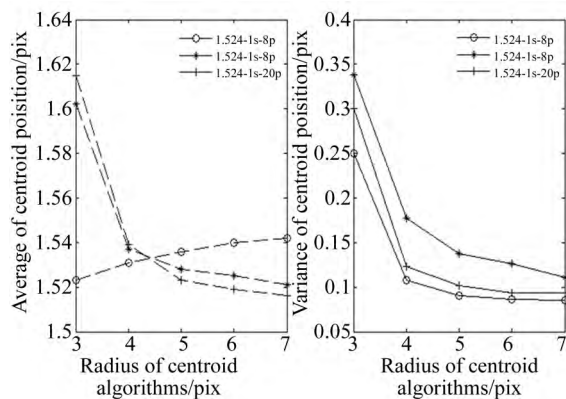


图7 不同计算半径的位置定位结果

Fig.7 Orientation result with different computation radii

参考文献:

- [1] FRITH S M, KRAMAROVA N A, STOLARSKI R S, et al.. Recent changes in total column ozone based on the SBUV Version 8.6 Merged Ozone Data Set [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119: 9735-9751.
- [2] NÖEL S, BRAMSTEDT K, ROZANOV A, et al.. Water vapour profiles from SCIAMACHY solar occultation measurements derived with an onion peeling approach [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2010, 3: 523-535.
- [3] BRAMSTEDT K, NOEL S, BOVENSMANN H, et al.. Precise pointing knowledge for SCIAMACHY solar occultation measurements [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2012 (5): 2867-2880.
- [4] BRAMSTEDT K, NÖEL S, BOVENSMANN H, et al.. Pointing knowledge for SCIAMACHY solar occultation measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 5: 2867-2880.
- [5] SOËL S, BOVENSMANN A, SKUPIN J, et al.. The SCIAMACHY calibration/monitoring concept and first results [J]. *Advances in Space Research*, 2003, 32(11): 2123-2128.
- [6] VON SAVIGNY C, KAISER J W, BOVENSMANN

5 结论

为了提高臭氧探测仪的临边大气反演精度,补偿卫星平台姿态误差和仪器在轨热变形对临边指向精度的影响,本文通过分析低星等恒星的能量和观测时机,设计了适合臭氧探测仪的恒星观测窗口和积分时间;采用移入平板玻璃的方法获取星点像的弥散斑,用阈值距心法计算恒星的星点像在像面上的位置;然后根据卫星轨道和探测仪的几何结构,设计了临边指向的在轨补偿方法并分析了补偿后的临边指向精度。通过地面对星观测实验,确定了本补偿方法的指向补偿精度。本补偿方法可使当前视轴的指向误差达到 $\pm 3.08''$;在编码器的位置重复误差小于 $\pm 2.47''$ 的条件下,使临边观测光轴位置的扫描镜角度定位误差达到 $\pm 3.95''$,臭氧探测仪的临边指向精度达到 $\pm 7.9''$ 以上,完全满足反演所需的指向精度要求。

- H, et al.. Spatial and temporal characterization of SCIAMACHY limb pointing errors during the first three years of the mission [J]. 2005, 5: 2593-2602.
- [7] GOTTWALD M, KRIEG E, LICHTENBERG G, et al.. The status of the SCIAMACHY line-of-sight pointing knowledge [J]. *ESA Living Planet Symposium*, 2010, 7: SP-686.
- [8] KAISER J, VON SAVIGNY C, EICHMANN K, et al.. Satellite pointing retrieval from atmospheric limb scattering of solar UV-B radiation [J]. *Can. J. Phys.*, 2004, 82: 1041-1052.
- [9] 薛庆生. 星载扫描层析临边成像光谱仪光学设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0422001-1-0422001-7.
- XUE Q SH. Optical design of space-based scanning tomographic limb imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0422001-1-0422001-7. (in Chinese)
- [10] 朱海龙, 梁斌, 张涛. 基于星点有序集的全天球自主星图识别算法 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1577-1586.
- ZHU H L, LIANG B, ZHANG T. All-sky automation star identification algorithm based on ordered star points set [J]. *Opt. Precision Opt.*, 2017, 25(6): 1577-1586. (in Chinese)

- [11] 郭敬明,刘冰,何昕,等. 基于高精度星敏感器的船载雷达海上精度鉴定[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(7):1909-1918.
GUO J M, LIU B, HE X, *et al.*. Maritime precision appraisal for ship-borne radar based on high-precision star sensor [J]. *Opt. Precision Opt.*, 2017, 25(7): 1909-1918. (in Chinese)
- [12] 唐君,苏轼鹏. 船用星敏感器天体的跟踪辨识[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(7): 1948-1953.
TANG J, SU SH P. Celestial bodies tracking identification for ship-borne star sensor [J]. *Opt. Precision Opt.*, 2017, 25(7): 1948-1953. (in Chinese)
- [13] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers-a tutorial [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.
- [14] 刘明,邓军,冯献飞,等. 高灵敏度空间点目标探测系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 115-122.
LIU M, DENG J, FENG X F. Design of highly sensitive space point target detection system [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 115-122. (in Chinese)

作者简介:



吴伟平(1980—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2006年于吉林大学获得硕士学位,2015年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事光学遥感器的研制工作。E-mail: rainciomp@sina.com



马庆军(1979—),男,黑龙江密山人,博士,副研究员,2003年于中国科学技术大学获得学士学位,2008年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事遥感数据获取和处理算法的研究。E-mail: qjma@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:曹 金)