

多模式星载被动大气探测仪在轨天底/ 临边探测匹配方法研究

崔程光^{1,2} 王淑荣¹ 黄煜¹ 李博¹

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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 研究的星载被动大气探测仪搭载于太阳同步轨道卫星,具有扫描型多模式探测功能,主要探测目的是对同一大气目标交替进行天底探测和临边探测。为实现天底/临边交替探测,研究了临边探测与天底观测模式的匹配方法及时间间隔 ΔT 。根据载荷运控模式、卫星运行轨道和地球自转等,建立交替探测数学模型,研究天底/临边交替探测方法,采用Matlab计算和卫星工具包(STK)仿真场景验证分析得出时间间隔分别为429 s和430 s。根据地球扁率和轨道衰减等误差分析,结合两种探测扫描设定,统一天底探测与临边探测目标区域,最终设定天底/临边交替探测匹配间隔为430 s。

关键词 大气光学; 大气探测; 匹配; 天底; 临边; 时间间隔

中图分类号 P412.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0601001

Study on the Method of Passive Multi-Mode Space-Based Atmospheric Sounding Spectrometers Nadir and Limb Matching in-Flight

Cui Chengguang^{1,2} Wang Shurong¹ Huang Yu¹ Li Bo¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The passive space-borne atmospheric sounding spectrometer is a multi-mode hyper-spectral spectrometer and in a sun synchronous polar orbit. One of its main objectives is to observe the same atmospheric volume in both nadir and limb within one orbit, i.e. nadir/limb matching. In order to observe the same atmospheric volume in both nadir and limb, the method and time interval ΔT of nadir/limb matching are researched. According to the operation modes of the payload, satellite orbit and Earth's rotation, the mathematical matching model is founded to study the method of nadir/limb matching. Through calculation of Matlab and simulation of nadir/limb matching in Satellite Tool Kit (STK), the time interval are intended to be 429 s and 430 s respectively. At last, considering Earth's oblateness and orbit decay, combining with the two settings of nadir and limb scanning, and uniforming detection target area of nadir and limb, the final time interval is confirmed to be 430 s.

Key words atmospheric optics; atmospheric sounding; matching; nadir; limb; time interval

OCIS codes 010.0280; 010.4950; 010.3920; 010.1120

1 引言

大气痕量气体探测在空间环境监测及大气环境保护中至关重要^[1]。近年来国内外大力发展该类探测仪器,根据探测方式被动遥感的痕量气体探测主要可分为掩日/月探测、天底观测以及临边观测等3种。天底

收稿日期: 2014-11-19; 收到修改稿日期: 2014-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(41105014)

作者简介: 崔程光(1988—),男,博士研究生,主要从事空间紫外光学遥感技术方面的研究。E-mail:497583460@qq.com

导师简介: 王淑荣(1961—),女,研究员,博士生导师,主要从事空间紫外光谱及成像遥感技术和相关辐射计量方面的研究。Email:srwang@ciomp.ac.cn(通信联系人)

观测模式的典型载荷有欧空局臭氧监测仪(OMI)^[2]和全球臭氧监测试验装置(GOME)^[3]。临边探测模式的载荷有机载臭氧临边探测实验(SOLSE)^[4]和欧空局扫描成像大气吸收制图仪(SCIAMACHY)^[5], SCIAMACHY还具有天底和掩日/月探测功能。国内目前尚无在轨应用的临边探测仪器,在轨运行的紫外臭氧总量探测仪(TOU)^[6]及臭氧垂直探测仪(SBUS)^[7]只具有天底探测模式。

大气痕量气体探测仪在痕量气体监测中起到重要作用,各种模式各具特点。掩日/月探测方式可得到高垂直分辨率的痕量气体廓线,但空间覆盖范围小;天底探测可得到高水平分辨率的全球痕量气体柱含量分布,但无垂直分辨率信息;临边探测可得到高垂直分辨率的痕量气体廓线并具有大空间覆盖率^[8],已成为一项大气痕量气体探测的重要技术^[9-10]。

本文多模式星载被动大气探测仪可分别完成天底、临边探测和掩日/月探测,通过天底/临边交替探测得到的光谱信息不仅具有很强的互补性,更重要的是通过处理两种模式探测数据能够确定对流层痕量气体总量,从而实现多层次、多目标探测。研究天底/临边交替探测匹配方法并确定时间间隔,是实现天底/临边交替探测任务的重要前提。本文以多模式星载被动大气探测仪为对象,建立天底/临边交替探测的理论匹配模型,研究匹配方法,确定时间间隔,并通过卫星工具包(STK)进行仿真分析验证了理论模型。

2 理论模型

多模式星载被动大气探测仪主要探测模式包括掩日探测、天底和临边探测模式,如图1所示。探测模式由方位镜和扫描镜结合完成,典型轨道起始于北半球,卫星刚出阴影区进行掩日探测和定标(SO&C),随后进入天底/临边交替探测模式,当卫星运行至南半球时,进行掩月观测和定标(MO&C)。结合卫星轨道参数及地球自转,建立天底/临边匹配模型,如图2(a)所示。首先对目标区域A进行临边探测,经时间间隔 ΔT ,此区域随地球自转运动至A',同时卫星运动至A'正上方进行天底探测。随后进入下一个交替探测周期,即实现天底/临边交替探测。由于地球自转和天底/临边交替探测时间间隔,需要临边扫描方位角补偿: $Z_\theta = w_{\text{Earth}} \cdot \Delta T$,使观测区域保持一致,其中 w_{Earth} 为地球自转角速度。

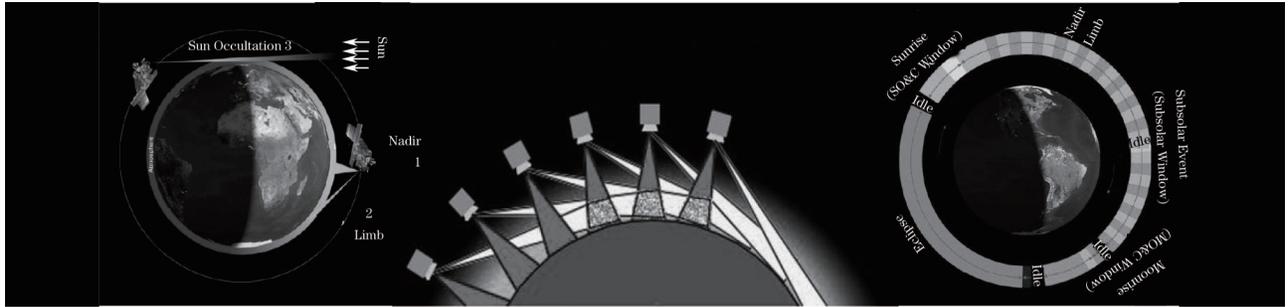


图1 星载被动大气探测仪观测方式及典型轨道

Fig.1 Observation concept and the typical orbit of space-based atmospheric sounding spectrometers

交替探测匹配数学模型如图2(b)所示, $R = |\overline{OA}|$,为地球半径, θ 为A点所处纬度, θ_0 为仪器开机时卫星相对地球自转轴顺时针夹角, θ_1 为卫星轨道过地球自转轴的平面与卫星夹角, θ_2 、 $\Delta\theta$ 分别为地球、卫星在 ΔT 内转过的角度,且 $\theta_2/\Delta\theta = \omega_{\text{Earth}}/\omega_{\text{Satellite}}$, $\omega_{\text{Satellite}}$ 为卫星角速度, $\theta_3 = \arccos[R/(R+H)]$,为临边探测模式和地球表面切点A与卫星相对地心夹角,H为轨道高度,代入搭载轨道参数可得, $\theta_3 = 27.8^\circ$, θ_4 为 $\angle O'A'O''$,所涉及物理量均采用国际制单位。由几何关系可得

$$\cos \theta_1 = \cos \theta_0 / \cos 8.5^\circ, \quad (1)$$

$$\cos(\theta_1 + \Delta\theta) \cdot \cos 8.5^\circ = \sin \theta, \quad (2)$$

$$\sin \theta_4 = \sin \theta \cdot \tan 8.5^\circ, \quad (3)$$

$$x = |\overline{OQ}| = R \cdot \cos(\theta_1 + \Delta\theta) / \cos \theta_1, \quad (4)$$

$$x' = R \cdot \sin(\theta_1 + \Delta\theta) - R \cdot \cos(\theta_1 + \Delta\theta) \cdot \tan \theta_1, \quad (5)$$

$$l^2 = R^2 + x^2 - 2 \cdot x \cdot R \cdot \cos \theta_3, \quad (6)$$

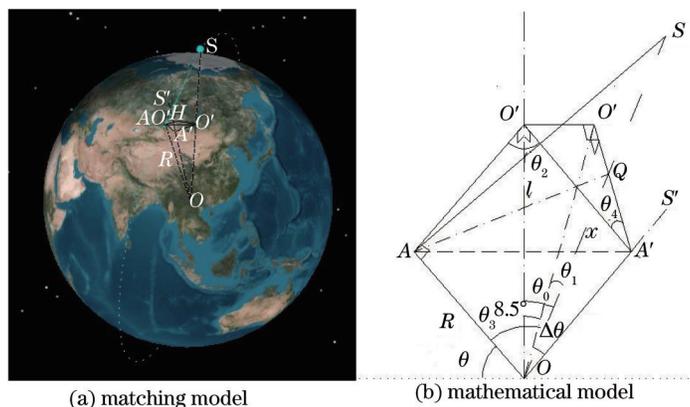


图2 天底/临边匹配模型

Fig.2 Model of limb/ nadir matching

$$l^2 = [2 \cdot R \cdot \cos \theta \cdot \sin(\theta_2/2)]^2 + x'^2 - 2 \cdot x' \cdot 2 \cdot R \cdot \cos \theta \cdot \sin(\theta_2/2) \cdot \cos(90^\circ - \theta_2/2 + \theta_4), \quad (7)$$

$$\Delta T = \Delta \theta \cdot (GM)^{1/2} \cdot (R + H)^{-3/2}, \quad (8)$$

式中 G 为万有引力常数, M 为地球质量。联立(1)~(8)式得到方程 $F(\theta_0, \Delta\theta) = 0$, 求 $\Delta\theta$ 满足方程。载荷在刚出阴影区时, 180 s 之后进入天底/临边交替探测模式, 即 $\theta_0 > 13.8^\circ$, 此时通过 Matlab 计算可得 $\Delta T = 429$ s。

3 仿真实验

根据天底/临边交替探测理论匹配模型, 在 STK 建立仿真模型, 输入多模式星载被动大气探测仪轨道参数如表 1 所示, 表中 RAAN 为升交点赤经。

表 1 多模式星载被动大气探测仪轨道参数

Table 1 Orbit parameters of passive multi-mode space-based atmospheric sounding spectrometers

Semi-major axis	Eccentricity	Inclination	Argument of perigee	RAAN	True anomaly
7210 km	0.001	98.5°	0°	349°	0°

天底和临边瞬时视场角(IFOV)均为 $0.045^\circ \times 1.8^\circ$, 对应空间分辨率分别为 $0.6 \text{ km} \times 26 \text{ km}$ 、 $3 \text{ km} \times 26 \text{ km}$, 设定 STK 相应参数如表 2 所示, 建立地面观测站(Test), 其地理位置为经度 29.5°E , 纬度 31°N 。表 2 中 V 和 H 分别为竖直和水平半视场角。应用匹配模型建立分析场景, 对其进行可见性分析, 研究天底/临边交替探测时间间隔。同理建立多个地面站, 仿真结果如表 3 所示, 此时综合空间分辨率垂直为 3 km , 水平为 0.6 km 。

表 2 多模式星载被动大气探测仪天底/临边探测模式参数

Table 2 Parameters of passive multi-mode space-based atmospheric sounding spectrometers

Nadir	Basic → definition → rectangular	$V \times H \rightarrow 0.9^\circ \times 0.0225^\circ$
	Basic → pointing → point type	Fixed in axes
Limb	Basic → definition → rectangular	$V \times H \rightarrow 0.9^\circ \times 0.0225^\circ$
	Basic → pointing → point type	Fixed → azimuth × elevation → $1.95^\circ \times 28^\circ$

表 3 STK 仿真周期计算

Table 3 Calculation of period simulated by STK

Access	Limb-to-test	Nadir-to-test	Interval
1	2014.09.17 06:16:58.142	2014.09.17 06:24:06.470	428 s
2	2014.09.17 04:49:35.930	2014.09.17 04:56:42.941	427 s
3	2014.09.17 05:25:58.654	2014.09.17 05:33:07.799	429 s

结合理论匹配模型并应用 Matlab 计算地球扁率对匹配周期的影响, 得到随着地球半径变小, 匹配时间间隔变化 1 s。

理论模型中大气探测仪视场为直线, STK 仿真 IFOV 天底和临边视场角均为 $0.045^\circ \times 1.8^\circ$, 角度误差为 $10''$, 对应探测目标区域近似变化 0.163 km , 探测目标区域运行速度 6.5 km/s , 时间间隔变化 0.025 s 。因此在

误差允许范围内,仿真计算匹配时间间隔和理论计算时间间隔一致。通过STK仿真可知,建立的天底/临边交替探测的数学模型是正确的,即实现多模式星载被动大气探测仪的天底/临边交替探测。

4 匹配时间间隔确定及误差分析

多模式星载被动大气探测仪扫描模式如图3所示,临边探测目标区域为0~100 km(海拔)×1000 km,临边探测模式单次扫描周期 $t_1=1.5$ s,空间分辨率为3 km(沿轨)×100 km(跨轨)。实现目标0~100 km临边扫描需要 $100\text{ km}/3\text{ km}=33.3\approx 34$ 步,即 N_{Limb} ,此时临边探测时间为51 s,沿轨地面观测覆盖距离 $L_{\text{Limb}}=t_1\cdot\omega_{\text{Satellite}}\cdot R\cdot N_{\text{Limb}}$,经计算得 L_{Limb} 为342 km,随地球自转跨轨漂移距离 $L_{\text{Ex}}=t_1\cdot\omega_{\text{Earth}}\cdot R\cdot N_{\text{Limb}}$,经计算得 L_{Ex} 为23.8 km。

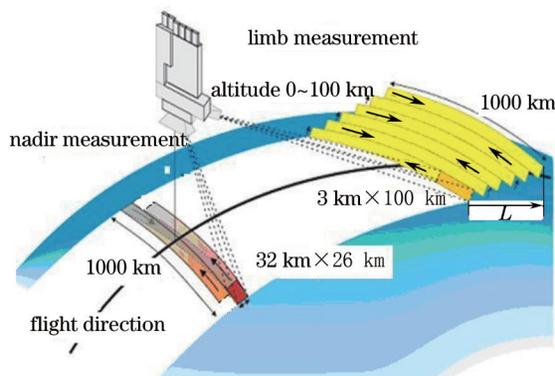


图3 多模式星载被动大气探测仪扫描模式

Fig.3 Scanning model of passive multi-mode space-based atmospheric sounding spectrometers

在完成临边探测后,经过 ΔT 后进行天底探测,沿轨覆盖区域最少为342 km,且跨轨漂移距离要和临边探测模式一致。天底探测模式单次扫描周期 $t_2=3.7$ s,若积分时间为125 ms,此时空间分辨率为26 km(沿轨)×32 km(跨轨)。天底和临边观测区域相同,则要求天底观测区域最少要为342 km,因此完成天底探测需要 $342\text{ km}/26\text{ km}=13.15\approx 14$ 步,即 N_{Nadir} ,扫描时间为52 s,此时沿轨对地观测覆盖距离为 $L_{\text{Nadir}}=t_2\cdot\omega_{\text{Satellite}}\cdot R\cdot N_{\text{Nadir}}$,为347 km。天底观测模式随地球自转跨轨距离变化 $t_2\cdot\omega_{\text{Earth}}\cdot R\cdot N_{\text{Nadir}}$,为23.8 km。完成天底/临边观测区域匹配,建立探测时间序列如图4所示,天底/临边匹配时间间隔为428 s。

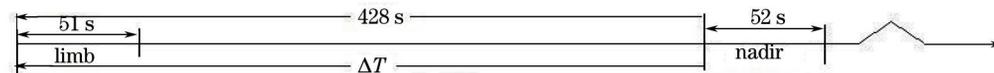


图4 多模式星载被动大气探测仪时间序列

Fig.4 Timeline of passive multi-mode space-based atmospheric sounding spectrometers

已知地球扁率影响匹配周期变化1 s,即天底探测延迟1 s到达匹配区域,此时对应观测区域延迟6.7 km,与临边探测模式完成匹配观测区域为 $342\text{ km}+6.7\text{ km}=348.7\text{ km}$,因此完成天底观测需要 $348.7\text{ km}/26\text{ km}=13.411\approx 14$ 步,天底观测时间为52 s。

卫星在实际运行时会受到大气阻力、太阳引力等影响,引起卫星半长轴变化^[11],采用长期轨道模型预测载荷在三年内半长轴衰减约10 km,如图5所示,利用匹配模型计算得到匹配时间间隔随半长轴衰减最大减少5 s。匹配周期减少5 s,多模式星载被动大气探测仪天底探测提前5 s到达目标区域,此时观测区域提前33.5 km,对应天底观测模式提前2步,即在时间序列中天底扫描观测提前7.4 s,如图6所示,即时间间隔 ΔT 减小7.4 s。

STK仿真得到的周期浮动为 ± 1 s,卫星匹配周期保持不变。因此在天底/临边匹配时作为极地太阳同步卫星,轨道高度在卫星参数设计时是保证几乎不变的,在此不予以考虑。

天底探测和天底/临边交替探测模式是通过俯仰扫描镜(ESM)和方位扫描镜(ASM)的运行实现,其角度误差为 $10''$,引起观测区域变化0.16 km,对匹配时间间隔影响相对很小,可以忽略。因此,确定多模式星载被动大气探测仪天底/临边交替探测模式时间间隔 $\Delta T\in[421.6\text{ s},434.4\text{ s}]$ 。

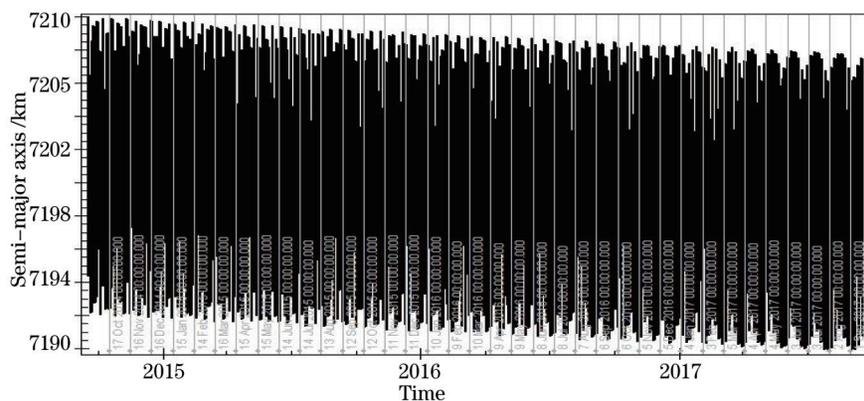


图5 预测多模式星载被动大气探测仪半长轴变化

Fig.5 Prediction of passive multi-mode space-based atmospheric sounding spectrometers semi-major axis

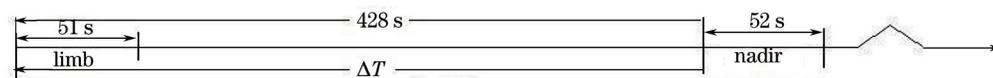


图6 多模式星载被动大气探测仪时间序列变化

Fig.6 Timeline change of passive multi-mode space-based atmospheric sounding spectrometers

5 结 论

多模式星载被动大气探测仪具有天底/临边交替探测功能,可获得同一目标区域大气垂直和水平分布光谱,通过两种模式的交替探测可确定对流层大气痕量气体信息。为解决天底/临边交替探测模式匹配这一难题,研究了天底/临边交替探测及匹配方法,建立了天底/临边交替探测时间匹配模型,利用卫星工具软件STK对交替探测模型进行了仿真验证,并针对轨道参数及大气探测仪扫描设定等信息,确定了天底/临边交替探测时间间隔,为多模式星载被动大气探测仪在轨运控模式设计和后期数据反演提供重要参数。

参 考 文 献

- 1 Qie Xiushu, Lv Daren, Chen Hongbin, *et al.*. Advances in high technology of atmospheric sounding and application researches[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 867-881.
 郗秀书, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 大气探测高技术及应用研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 867-881.
- 2 Johan de Vries, Gijsbertas H J van den Oord, Ernest Hilsenrath, *et al.*. Ozone monitoring instrument (OMI)[C]. SPIE, 2002, 4480: 315-325.
- 3 J P Burrows, M Weber, M Buchwitz, *et al.*. The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56(2): 151-175.
- 4 R D McPeters, S J Janz, E Hilsenrath, *et al.*. The retrieval of O₃ profiles from limb scatter measurements: Results from the shuttle ozone limb sounding experiment[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(17): 2597-2600.
- 5 Rolf Mager, Wolfgang Fricke, John P Burrows, *et al.*. SCIAMACHY: A new-generation of hyperspectral remote sensing instrument[C]. SPIE, 1997, 3106: 84-94.
- 6 Jiang Fang, Wang Weihe, Wang Yongmei, *et al.*. Calibration in-orbit and retrieval result study of FY-3 total ozone unit (TOU)[J]. Chinese J Geophys, 2012, 55(3): 760-767.
 江 芳, 王维和, 王咏梅, 等. FY-3 气象卫星紫外臭氧总量探测仪辐亮度在轨定标与反演结果分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 760-767.
- 7 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu. Spectral irradiance calibration research of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer in air/vacuum conditions[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101004.
 杨小虎, 王淑荣, 黄 煜. 大气/真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度定标研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101004.
- 8 Shenbo Chen. A new technique for atmospheric chemistry observations[C]. SPIE, 2006, 6031: 6031R.
- 9 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu. Research on radiation characteristic of the multi-azimuth/multi-waveband earth limb ultraviolet imager[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0801001.

- 杨小虎,王淑荣,黄煜.多方位/多波段地球临边紫外成像仪辐射特性研究[J].光学学报,2014,34(8):0801001.
- 10 Xue Qingsheng. Optical system design of multi-model hyper-spectral imager for space-based atmospheric remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822005.
- 薛庆生.空间大气遥感高光谱成像仪光学系统设计[J].光学学报,2014,34(8):0822005.
- 11 Tong Kewei, Zou Jianping, He Linshu. A reduce dorbit propagation model of low-earth orbit satellite[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4): 1327-1333.
- 童科伟,周建平,何麟书.近地卫星简化轨道预报方法研究[J].宇航学报,2007,30(4):1327-1333.

栏目编辑:史敏