

文章编号 1004-924X(2010)02-0303-08

FY-3A 紫外臭氧垂直探测仪程控设计与实现

汪龙祺^{1,2}, 王淑荣¹, 李福田¹, 阚珊珊¹, 刘海波¹, 宋克非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 研究生院, 北京 100039)

摘要: 描述了 FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪的组成和 4 种主要工作模式, 即大气测量模式、太阳连续测量模式、太阳分立测量模式及标准灯测量模式。在此基础上对在轨运行的任务进行了分析说明。针对仪器运行参数多、测量模式转换复杂等特点, 提出了合理的在轨运行控制方案, 介绍了其程控设计要点与实现。给出了 FY-3A 星紫外臭氧垂直探测仪在轨测量的太阳模式和大气模式紫外辐射遥感数据, 其太阳分立模式波长重复性为 ± 0.03 nm, 自动增益转换功能使系统的动态范围达到 10^6 量级。实验结果表明, FY-3A 星紫外臭氧垂直探测仪在轨工作正常, 测量模式转换和执行准确, 其运控方案完备, 数据获取有效, 仪器在轨工作处于最佳性能状态。

关键词: 星载紫外臭氧垂直探测仪; 在轨运行; 软件; 设计

中图分类号: TP73; TP311.1 **文献标识码:** A

Software design and implementation of FY-3A Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer

WANG Long-qi^{1,2}, WANG Shu-rong¹, LI Fu-tian¹, KAN Shan-shan¹, LIU hai-bo¹, SONG Ke-fei¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A satellite borne Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer (SBUS) developed by our country has been put into operation in-orbit for the first time. This paper introduces the composition of the SBUS and gives its main working modes (atmospherical mode, solar modes and standard lamp mode). After analysis of run missions, a reasonable scheme of operation control in-orbit is presented according to the characteristics of various operation parameters and complicated mode transitions, and then the main points of software design is explained in detail. The remote sensing data of ultraviolet radiation measured in-orbit with the solar/atmospheric working modes are given, which shows that the wavelength reproducibility by the discrete solar mode is ± 0.03 nm and the dynamic range of the system reaches 10^6 magnitude with the function of automatic gain control. Obtained results demonstrate that the proposed measurement modes have been implemented correctly and the scheme of operation control is completed. The SBUS are working in a best state with reasonable parameters and optimum performance.

收稿日期: 2008-11-12; 修订日期: 2008-12-23.

基金项目: 粤港关键领域重点突破资助项目 (No. 2004A10403021); 广东省攻关资助项目 (No. 2006A10401006)

Key words: satellite borne Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer (SBUS); in-orbit operation; software; design

1 引言

臭氧是大气中的重要气体,臭氧的存在可使生物避免遭受太阳紫外辐射的伤害,是人类赖以生存的重要防护气体之一。随着人类生产生活中直接和间接地对臭氧层的破坏,大气中的臭氧含量日益减少,从而给人类的生存环境带来严重威胁。近些年来,许多国家竞相开展了对大气臭氧的探测,通过观测太阳紫外辐射数据,并经过数据反演后得到了大气中臭氧的时空分布,从而对全球气候和环境变化进行了有意义的评价和预测。国外早在 20 世纪 70 年代就使用卫星遥感技术对大气臭氧进行监测,有效地获取了地外太阳辐射数据^[1-2]。

2008 年 5 月 27 日,我国第二代极轨气象卫星风云三号首发星(FY-3A 星)成功发射。2008 年 6 月 4 日,FY-3A 星携带的我国自主研发的紫外臭氧垂直探测仪开机进入正常工作状态。紫外臭氧垂直探测仪是一台高精度、小型化空间紫

外遥感仪器,其主要任务是测量臭氧总量的垂直分布,为环境监测、气候预报和全球气候变化研究提供重要参数。紫外臭氧垂直探测仪投入在轨应用,从根本上改变了我国大气臭氧探测和研究的现状。

本文主要描述紫外臭氧垂直探测仪系统组成、工作模式、程控软件设计与实现,并给出了在轨验证结果。

2 仪器组成和工作模式

紫外臭氧垂直探测仪是一台能在 160~400 nm 波段测量绝对光谱辐亮度和绝对光谱辐照度的扫描式光谱仪器,由定标光源、漫反射器、消偏器、调制器、光栅双单色仪(单色仪分主光路和参考光路)、探测器、光度计、电控系统及接口电路等 9 个单元组成,方框图如图 1 所示。针对主光路、参考光路和光度计 3 套光路,电控系统设计成包括 3 路静电计放大器 and 3 路高压电源、调制器锁

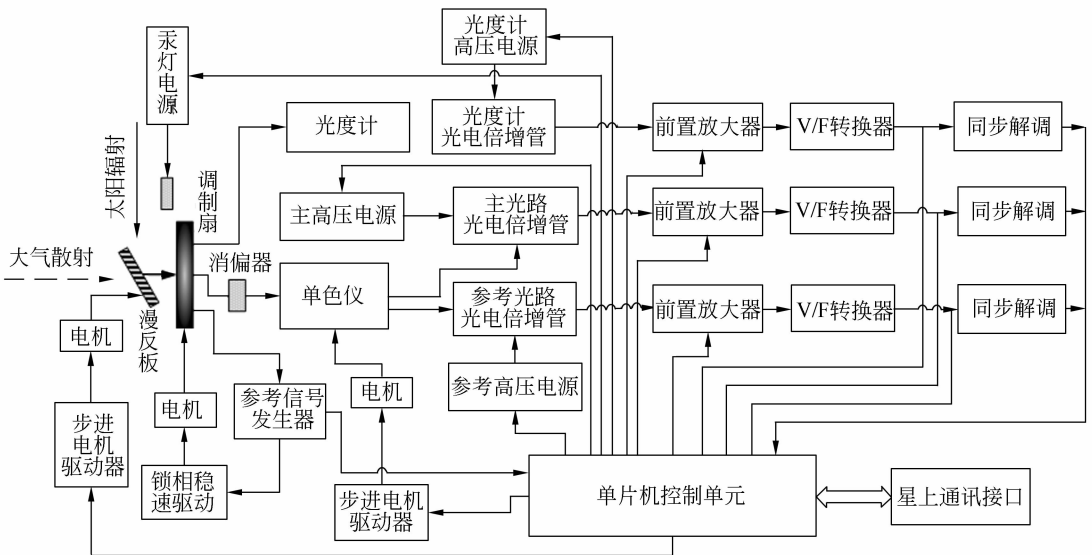


图 1 紫外臭氧垂直探测仪系统框图

Fig. 1 System scheme of SBUS

相稳速驱动器、3路多通道数据采集器、2路步进电机驱动器、汞灯稳流源、单片机控制单元、星上通讯接口单元等。系统的各种工作模式由软件控制实现。

紫外臭氧垂直探测仪在轨探测时其入射窗口直接指向地心,利用太阳后向散射光谱与太阳光谱比对方法获取大气臭氧垂直分布数据和总量全球分布数据,主要工作模式为:大气测量模式、太阳连续测量模式、太阳分立测量模式及标准灯测量模式4种。

大气工作模式如图2所示,部分偏振的太阳后向散射辐射经消偏器后成为非偏振辐射,通过Ebert-Fastie单色仪色散,在单色仪出射狭缝平面形成谱带。当单色仪光栅转动时,不同波长的单色辐射依次通过出射狭缝,由探测器—放大器转变为太阳后向散射紫外光电光谱,完成太阳后向散射紫外光谱12个特征波长(252.00,273.62,283.10,287.70,292.29,297.59,301.97,305.87,312.57,317.56,331.26,339.89 nm)的辐亮度测量。

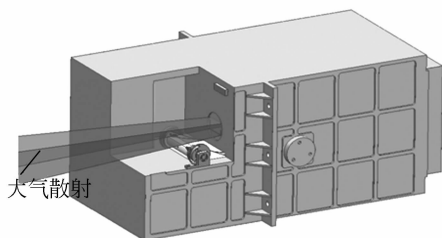


图2 大气工作模式示意图
Fig. 2 Atmospherical mode

太阳工作模式如图3所示,FY-3A卫星出阴影后,在便于进行太阳观测的区域,漫反射器移入光路,太阳辐射经过漫反射器进入紫外臭氧垂直探测仪,完成太阳紫外光谱辐照度测量。太阳紫外光谱辐照度测量分为160~400 nm波段连续光谱扫描(采样间隔0.21 nm)和12个特征波长(与大气模式相同)处的分立谱扫描。

标准灯模式如图4所示,汞灯253.7 nm光谱线测量用于仪器自身波长定标,两块漫反射器分

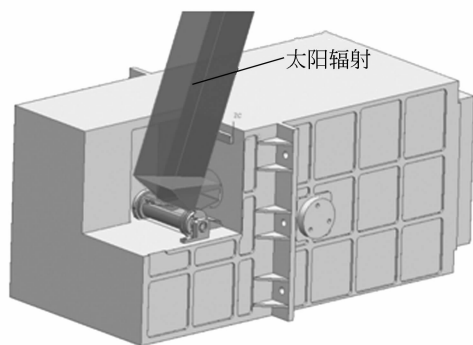


图3 太阳工作模式示意图
Fig. 3 Solar mode

别进行太阳光谱辐照度测量和标准灯测量用以监测漫反射器漫反射率的变化。

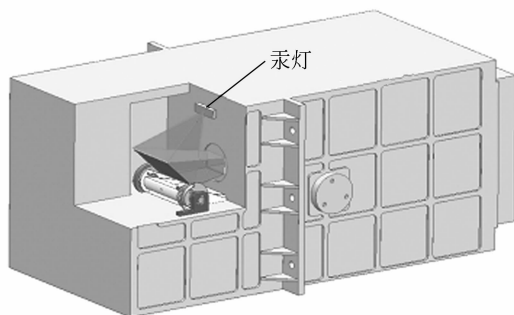


图4 汞灯工作模式示意图
Fig. 4 Mercury lamp mode

太阳和大气模式在轨测量过程如图5(a)所示。每天卫星出阴影区进行1次太阳连续谱测量,每7天进行3次12个波长的太阳分立谱测量替代1次太阳连续谱测量。每轨道周期进行48次大气模式测量。

每月1次的标准灯模式占用两轨道周期,测量过程如图5(b)所示。标准灯模式第一轨道周期出阴影后,参考漫反射板移入光路,进行1次太阳连续谱测量;参考漫反射板移出光路,进行48次大气测量。第一轨道周期进阴影后,开启汞灯,预热,参考漫反射板和标准漫反射板相继到位,分别测量汞灯184.950,253.728,296.815和365.120 nm 4条谱线。两漫反射板测量结束后,

关闭汞灯,改变漫反板角度挡住入射狭缝,进行暗电流测量;第二轨道周期出阴影后,标准漫反射板

移入光路,进行 1 次太阳连续谱测量。全过程实现漫反射板比对、波长定标及仪器噪声监测。

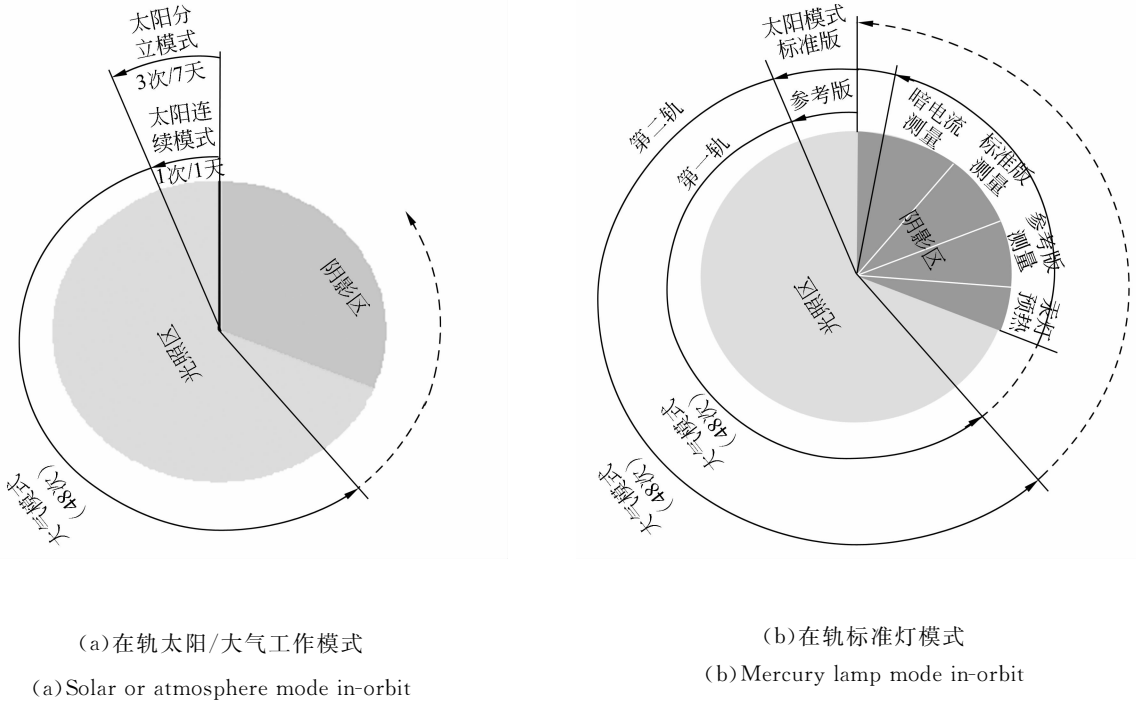


图 5 在轨测量过程示意图

Fig. 5 Measurement process in-orbit

3 程控设计与实现

紫外臭氧垂直探测仪运控功能软件严格按照软件工程化要求进行研制,其运控功能软件的数据流图如图 6 所示。总线控制器发送广播时间、数据注入、内部指令给运控软件,运控软件向总线控制器发送服务请求以及数据源包。运控软件在测量过程中先保存测量数据到数据区,然后再向总线控制器发送。

运控软件包含两个模块:星上通讯和测量控制,每个模块下含有子模块。星上通讯模块完成与总线控制器进行消息交换,包括接收广播时间、注入内部指令,发送遥感数据。测量控制模块是

运控功能实现的执行模块,负责运行参数读取和校验,各种测量模式的转换、执行及数据保存等。

运控功能软件具有以下特点:

a) 智能模式转换:按照设定的频度自动计算指定模式的执行,并兼顾优先级,还可人为选择模式,增强了在轨测量的灵活性;

b) 增益量程自动选择:大气模式下可以按照输入信号的大小选择增益量程;

c) 自动容错:输入的参数多,能对其进行校验避免错误参数影响仪器运行。

针对紫外臭氧垂直探测仪在轨运控功能进行分析,其主要任务可划分为 3 个方面:数据测量及下传、模式转换、运行参数修改。

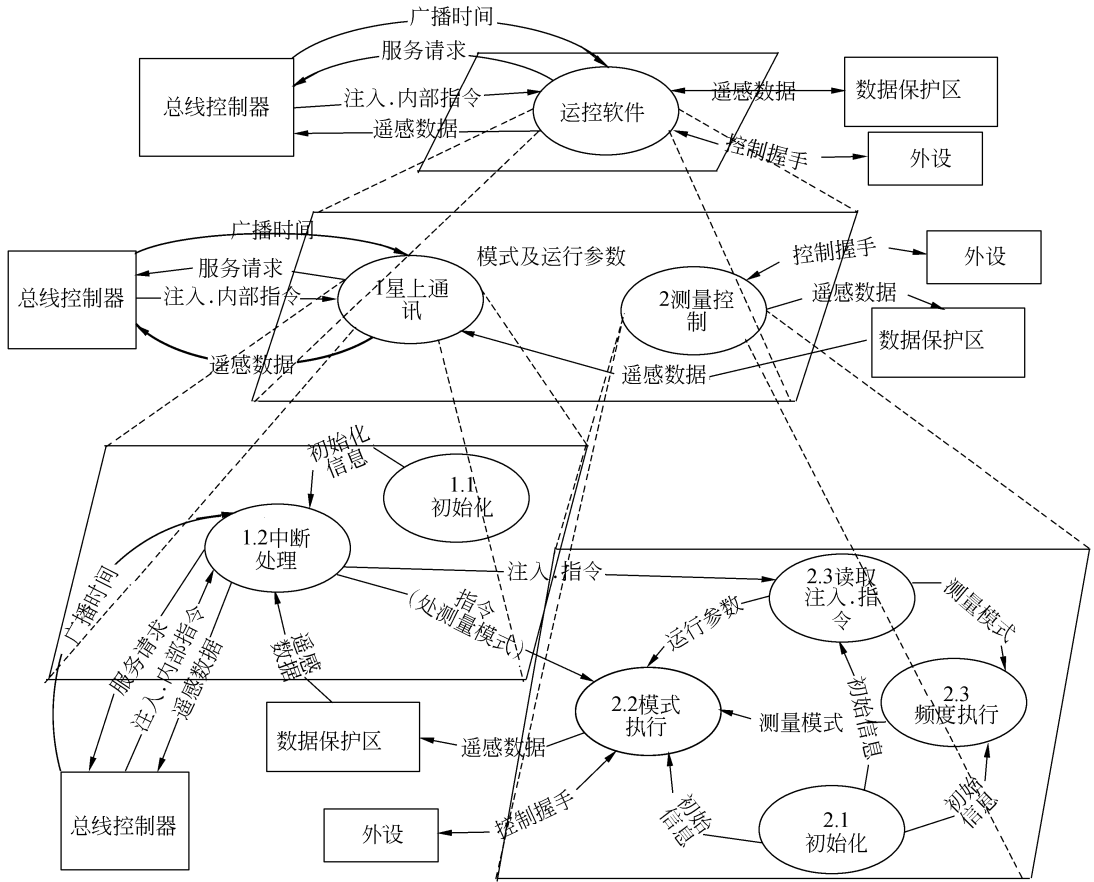


图 6 运控软件数据流图

Fig. 6 Data flow chat of operation and control software

3.1 数据测量及下传

在轨测量的模式信息如表 1。所有模式保存数据必须有其增益和状态信息(包括模式标识,测量开始时间等),以便数据后续处理。

(1) 大气模式测量 12 个特征波长为不等间隔步距,且信号变化跨越幅度大,测量过程中需要准确计算每点间隔进行驱动并自动选择增益量程测量。其中主光路和参考光路使用同一增益量程,默认以主光路信号为准。3 个通道同时采集,

如果有 1 个通道增益量程不合适,则进行选择后重新采集,直到 3 个通道数据均为合适量程,但量程选择次数不超过 4 次。量程合适定义为 0.45 ~9.0 V 如果小于 0.45 V,增益量程增加,大于 9.0 V 则减少。

(2) 太阳连续模式测量步距为 0.21 nm,共分 4 段进行采集,每段增益不同,由数据注入进行选择,采样点为 1 195 点。需要保存漫反射板状态(参考移入、标准移入、全部移出。全部移出时

表 1 紫外臭氧垂直探测仪测量模式信息

Tab. 1 Information of measurement modes of SUBS

测量模式	波段	扫描间隔	采样间隔	波长精度	采集时间	每组测量次数	数据量	频度
大气模式	250~340 nm	0.02 nm	12 特征波长	±0.03 nm	1.24 s	每轨 48 次	512 Byte×48	每轨 48 次
太阳连续	160~400 nm	0.035 nm	0.21 nm	±0.05 nm	0.1 s	1 次	512 Byte×10	每天 1 次
太阳分立	250~340 nm	0.02 nm	12 特征波长	±0.03 nm	0.1 s	3 次	512 Byte×3	每 7 天 1 次
标准灯	同太阳连续模式(分别使用参考板、标准板)				0.1 s	2 次	512 Byte×20	每月 1 次
	160~400 nm	0.035 nm	0.035 nm	±0.05 nm	0.1 s	3 次(参考板、标准板、暗电流)	512 Byte×30	

为大气连续模式)。

(3) 太阳分立模式通过移入漫反射板进行大气模式测量,每组测量 3 次,保存要求与大气模式同,但使用不同的测量标识。

(4) 标准灯模式测量执行两轨固定漫反射板状态的太阳连续模式(第一轨参考板,第二轨标准板),日照其他时间执行大气模式,在第一轨阴影区进行 3 组汞灯定标。为区别太阳连续模式,在标准灯模式下要使用不同的测量标识。汞灯定标采集有间隔的 4 个连续波段,每段增益可由数据注入选择,保存要求同上述模式。

(5) 数据下传顺序:太阳连续模式、标准灯模式优先下传,大气模式、太阳分立模式次之。

3.2 模式转换

紫外臭氧垂直探测仪在轨运行时的测量模式按照既定的顺序和频度执行,频度执行必然会遇到 3 种模式频度均满足的情况,此时按其优先级判断准则执行。可由内部指令和数据注入更改下轨的执行测量模式,执行一次后仍按照既定顺序和频度执行。如果标准灯模式正在测量中,注入或内部指令选择的模式必须等待当前标准灯模式执行完毕才能响应。没有频度执行和注入、内部指令时,默认为大气模式测量。

3.3 运行参数修改

运行参数包括全局性参数和相关模式参数。全局性参数修改包括:主、参和光度计三单元高压分别开关、波长修正、出阴影延时时间。相关模式下参数修改包括:太阳模式/标准灯模式 4 段增益修改及参考板/标准板移入/移出。

4 在轨测试结果

仪器入轨后工作正常,频度执行有序,指令响应无误,数据接收正确。通过数据注入对运行参数进行了调试,使得仪器正常工作,最终获得了太阳/大气紫外遥感数据。

4.1 太阳/大气分立模式遥感数据^[3-9]

图 7 为在轨测量的太阳辐照度分立光谱,表 2 是太阳/大气分立光谱数据及光度计测量数据。大气光谱辐亮度数据表明系统的动态范围达到 10^6 量级,波长精度为 ± 0.03 nm。

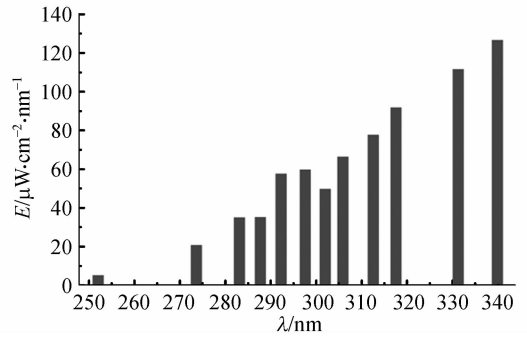


图 7 SBUS 在轨太阳辐照度分立光谱图例

Fig. 7 Discrete solar spectral irradiance measured by SBUS in-orbit

表 2 太阳/大气分立光谱及光度计数据

Tab. 2 Data from solar/atmosphere discrete spectra and photometer

波长 (nm)	太阳光谱辐照度/ $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$	大气光谱辐亮度/ $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
252	5.16×10^0	1.42×10^{-2}
273.62	2.07×10^1	5.21×10^{-3}
283.1	3.51×10^1	1.18×10^{-2}
287.7	3.52×10^1	1.47×10^{-2}
292.29	5.76×10^1	3.00×10^{-2}
297.59	5.97×10^1	5.04×10^{-2}
301.97	4.97×10^1	1.24×10^0
305.87	6.64×10^1	5.97×10^1
312.57	7.77×10^1	2.91×10^1
317.56	9.18×10^1	5.41×10^1
331.26	1.12×10^2	1.03×10^1
339.89	1.27×10^2	1.33×10^1
379(光度计)	126.700	

4.2 太阳连续模式光谱

在轨测试太阳连续光谱谱图例见图 8,表明紫外臭氧垂直探测仪太阳连续光谱测量模式响应正

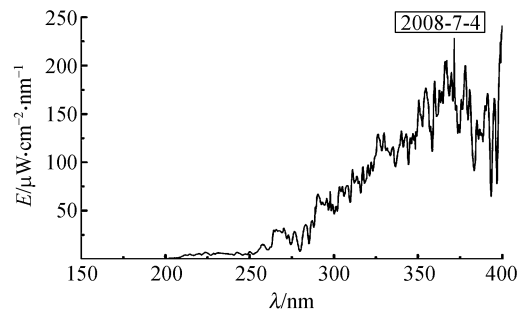


图 8 SBUS 在轨太阳辐照度连续光谱图例

Fig. 8 Continuous solar spectral irradiance measured by SBUS in-orbit

常,160~400 nm 光谱波段正确。

5 结 论

本文介绍了紫外臭氧垂直探测仪的工作模式,分析了在轨运控任务需求,实现了复杂参数的

设置和多种测量模式的程控设计。紫外臭氧垂直探测仪入轨后工作正常,性能稳定,运行参数已全部设置完毕,其遥感数据结果表明程控设计在轨运行正常,系统性能指标满足设计要求,为获取太阳/大气紫外光谱数据和进一步反演臭氧垂直分布提供了保证。

参考文献:

- [1] WEI Z Y, KELLY K W. BRDF measurement and calibration for SBUV/2 radiance calibration test diffruser[J]. *SPIE*, 2004, 5542, 311-3223.
- [2] AHMAD S P, LEVELT P F, BHARTIA P K, *et al.*. Atmospheric products from the ozone monitoring instrument (OMD)[J]. *SPIE*, 2003, 5151, 619-631.
- [3] 刑进,王淑荣,李福田. 紫外-真空紫外辐射标准光源的比对[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(4): 373-379.
XING J, WANG SH R, LI F T. Comparisons between radiometric scales on UV-VUV radiant standard light sources [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 373-379. (in Chinese)
- [4] 唐玉国,李福田. 200~350 nm 石英窗口氙灯光谱辐射度的绝对定标[J]. *光谱学与光谱分析*, 1996, 16(4): 7-10.
TANG Y G, LI F T. Spectral irradiance absolute calibration of deuterium lamp in range from 200 nm to 350 nm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1996, 16(4): 7-10. (in Chinese)
- [5] 刑进,王淑荣,李福田. 空间紫外遥感光谱辐射计光谱辐亮度定标三种方法的比较[J]. *中国激光*, 2006, 33(4): 509-515.
XING J, WANG SH R, LI F T. Comparison of spectral radiance calibrations of spectroradiometer for ultraviolet space remote sensing using three calibration techniques [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(4): 509-515. (in Chinese)
- [6] 刑进,王淑荣,李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 185-190.
XING J, WANG SH R, LI F T. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 185-190. (in Chinese)
- [7] 李幼平,禹秉熙,王玉鹏,等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 822-828.
LI Y P, YU B X, WANG Y P, *et al.*. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 822-828. (in Chinese)
- [8] 方伟,王玉鹏. 紫外辐照对绝对辐射计锥腔吸收率的影响[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 775-780.
FANG W, WANG Y P. Influence of UV radiation on absorptivity of cavity of absolute radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 775-780. (in Chinese)
- [9] 王家华. 软件工程[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2003.
WANG J H. *Software Engineering* [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:



汪龙祺(1978—),男,辽宁抚顺人,博士,助理研究员,主要从事微弱信号检测及紫外遥感技术的研究。E-mail: suntoweed@yahoo.com.cn



阚珊珊(1980—),女,吉林长春人,助理研究员,主要从事光学检测和光电探测技术的研究。E-mail: angelkss@163.com

导师简介:



王淑荣,女,吉林长春人,研究员,博士生导师,FY-3 卫星紫外臭氧垂直探测仪主任设计师,主要从事空间紫外光学遥感技术及光学检测、紫外辐射计量测试方法的研究。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn



刘海波(1981—),男,吉林舒兰人,研究实习员,硕士,主要从事微弱信号检测及嵌入式系统设计的研究。E-mail: lhb142857@yahoo.com.cn



李福田(1941—),男,天津人,1964 年南开大学物理系毕业,研究员,博士生导师,主要从事短波光学与空间遥感技术的研究,曾任神舟三号飞船对地观测分系统主任设计师。E-mail: Li_futian@yahoo.com.cn

通讯作者:



宋克非(1967—),女,研究员,主要从事微弱信号检测及紫外遥感技术的研究。E-mail: songkefei@sina.com

● 下期预告

基于 ZEMAX 用户自定义操作数的波前编码成像系统优化设计

周 峰^{1,2}, 闫 海¹, 王晓莉¹, 陈京平¹

(1. 空军装备研究院 雷达与电子对抗研究所, 北京 100085;

2. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

针对目前波前编码成像系统中相位板的设计工作量大且未能考虑除相位板外其它光学元件像差的问题。提出两种基于常用光学设计软件 ZEMAX 的设计方法: 使用 ZPL 宏指令编写用户自定义操作数, 优化点扩散函数的能量集中度和一致性, 实现了旋转对称型相位板的设计; 以斯托列尔比不小于 0.8 为衡量标准, 设计结果能使景深扩展到传统光学系统的 5.5 倍; 使用在外部定义和编译的 C 程序编写用户自定义操作数, 优化调制传递函数的离焦不变性, 实现了奇对称型相位板的设计; 以 MTF 离焦不变性为衡量标准, 设计结果能使景深扩展到传统光学系统的 12.5 倍, 而同等条件下的三次方相位板只能使景深扩展到传统光学系统的 10.1 倍。