

# 风云三号黎明星太阳辐照度光谱仪系统噪声与稳定性分析

雷 宽<sup>1,2</sup>, 李 乐<sup>1</sup>, 黄 煜<sup>1</sup>, 李占峰<sup>1</sup>, 杨小虎<sup>1</sup>, 王 彪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**介绍了搭载在风云三号黎明星上的太阳辐照度光谱仪系统,并对光谱仪可见光通道探测器中的光电倍增管和放大电路产生的噪声进行定量分析。研究表明,在无光照情况下,系统以光电倍增管暗噪声为主;在有光照条件下,系统以阳极散粒噪声为主。基于对噪声的分析,进行地面稳定性试验。采用太阳辐照度光谱仪初样测量丽江 2021 年 10 月份的太阳光谱辐照度数据,并根据响应度进行稳定性分析,发现太阳辐照度光谱仪系统整机可见光通道日不确定度低于 0.2%,月不确定度不超过 3%,满足数据测量要求。

**关键词:**光电倍增管;太阳光谱辐照度;稳定性;不确定度

中图分类号: O433 文献标识码: A doi: 10.14016/j.cnki.jgzz.2022.04.017

## Noise and stability analysis of Fengyun-3E solar spectral irradiance monitor

LEI Kuan<sup>1,2</sup>, LI Yue<sup>1</sup>, HUANG Yu<sup>1</sup>, LI Zhanfeng<sup>1</sup>, YANG Xiaohu<sup>1</sup>, WANG Biao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The solar spectral irradiance monitor system onboard Fengyun-3E is introduced, the noise generated by the photomultiplier tube and the amplifier circuit in the visible channel detector of the spectrometer is quantitatively analyzed. It is shown that the system is dominated by the dark noise of the photomultiplier tube in the absence of illumination and by the anode scattering noise in the presence of illumination. Based on the analysis of the noise, a ground stability test was conducted. The solar irradiance spectrometer initial sample was used to measure the solar spectral irradiance data in Lijiang in October 2021, and stability analysis was conducted based on the response. It was found that the daily uncertainty of the whole visible channel of the Solar Spectral Irradiance Monitor system was less than 0.2% and the monthly uncertainty was not more than 3%, which satisfied the data measurement requirements.

**Key words:** photomultiplier tube; solar spectrum irradiance; stability; uncertainty

## 1 引言

由于太阳表面黑子、耀斑、日珥和磁场等因素的影响,太阳辐射活动周期在不断发生变化<sup>[1]</sup>。空间载荷在轨期间常常受到严酷的环境考验,获取精确的、

可溯源<sup>[2]</sup>的太阳光谱辐照度测量比较困难,这就要求发射的载荷具备较高的稳定性。高精度的太阳辐照度数据可以帮助科研人员了解太阳光谱辐射变化与地球气候变化的关系,建立和修正已有的气候模型,对太阳物理学,大气物理学和环境科学的研究具有重要的科学意义和应用价值<sup>[3-5]</sup>,目前通常用太阳光谱仪监测太阳辐照度信息变化。

为了支持对太阳的研究,自 20 世纪 70 年代以来,向太空中发射的卫星载荷逐渐开始携带太阳光谱辐照度仪器。早期星载太阳光谱辐照度仪器如双光

收稿日期: 2021-01-27

基金项目: 吉林省重点科技研发项目资助( No. 20210204110YY)

作者简介: 雷宽(1997-),男,硕士,主要从事太阳光谱及空间遥感方面的研究。E-mail: lei18043048671@163.com

通信作者: 黄煜(1979-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间紫外遥感与辐射计量方面的研究。E-mail: ssshycn@yahoo.com.cn

<http://www.laserjournal.cn>

栅色散结构的太阳背向式散射紫外光谱仪(Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer, SBUV)<sup>[6]</sup>、研究地球臭氧的太阳紫外线光谱辐照度监测仪(Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor, SUSIM)<sup>[7]</sup>和太阳-恒星辐照度光谱仪(Solar-Stellar Irradiance Comparison, SOLSTICE)<sup>[8]</sup>,这些光谱仪集中研究太阳紫外波段光谱辐照度,后续逐步开始关注宽波段光谱辐照度和数据的不确定度。近年来陆续发射的光谱仪稳定性得到较大提高,如太阳光谱仪(Solar Spectrum, SOLSPEC)<sup>[9]</sup>、太阳辐射与光谱辐照度监测器(Solar Radiation and Climate Experiment Spectral Irradiance Monitor, SORCE~SIM)<sup>[10]</sup>、太阳总光照度与光谱辐照度传感器(Total and Spectral solar Irradiance Sensor, TSIS-1~SIM)<sup>[11-12]</sup>和紧凑型光谱辐照度监测仪(Compact Spectral Irradiance Monitor, CSIM)<sup>[13]</sup>。这些用于在轨长期监测太阳辐照度的光谱仪相继研发并成功发射,获得了大量关于太阳辐照度及其长期变化的数据。

由于缺少国产太阳辐照度天基观测设备,国内对日定量观测尚未完全展开。为填补这一空白,中科院长春光机所研制的太阳辐照度光谱仪(Solar Spectral Irradiance Monitor, SSIM)于2021年7月由风云三号黎明星搭载成功发射,是我国首个自主研发的星载高光谱太阳辐照度光谱仪,用于监测太阳光谱辐照度变化,对地球气候研究具有重要意义。太阳辐照度光谱仪的光学系统及探测器要在轨长期工作8年,不可避免地存在性能衰减问题。实现光谱仪系统长期稳定性工作的前提需要两方面进行保证,一是高稳定的电子学系统,排除噪声干扰,保证数据的稳定可靠;二是实现高精度定标,以修正光学系统及探测器的长期衰变<sup>[14-15]</sup>。在利用探测器进行光电转换过程中,输出信号的电压和电流常伴随噪声,影响检测系统的准确性<sup>[16]</sup>。

本文简要介绍了太阳辐照度光谱仪内部装置和工作原理,主要分析光谱仪可见光通道探测器的噪声来源,研究发现,除探测器自身工艺和外界环境影响外,系统的噪声主要由光电倍增管暗噪声和运算放大器噪声组成,并讨论这些噪声对系统噪声的贡献。然后根据实验室和外场试验得到的测量数据进行不确定度分析,量化光谱仪的稳定性。

## 2 太阳辐照度光谱仪结构与原理

太阳辐照度光谱仪的主要任务是获取太阳紫外

到红外波段的高精度光谱辐照数据,光谱范围在165~2400 nm,光谱仪探测头部三维模型如图1所示。用溯源于德国PTB同步辐射基准源的标准氙灯和溯源于中国计量院高温黑体基准源的标准石英卤钨灯进行辐射定标<sup>[17]</sup>。太阳辐照度光谱仪具有星上光谱定标、辐射定标和自动跟踪太阳的能力。

目前,搭载在风云三号上的太阳辐照度光谱仪已在轨业务运行,并且每周、每月进行定标测试。风云三号太阳辐照度光谱仪使我国第一次具备在轨对日辐照度高光谱观测能力,填补了我国空间太阳辐射精细光谱观测的空白。

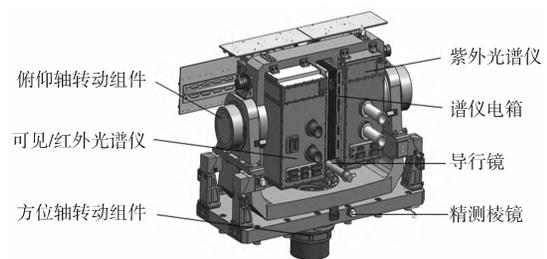


图1 太阳辐照度光谱仪探测头部三维模型图

太阳辐照度光谱仪由紫外通道(UV1、UV2)、可见通道(VIS)和红外通道(NIR、IR)组成,通过二维转台提供指向,太阳导行镜进行对日跟踪,获取每日太阳光谱辐照度数据<sup>[18]</sup>。紫外、可见和红外光谱仪均为双通道结构,各单通道工作原理相同。每个通道主光学系统均采用光栅双单色仪设计方案,如图2所示。

每日光谱测量时,太阳光经过遮光罩和熔石英平板窗口后入射到漫透射板上,从漫透射板出射的光进入通道的人射狭缝后由光栅双单色仪进行扫描,经出射狭缝输出不同波长的单色辐射,最后由探测器接收。

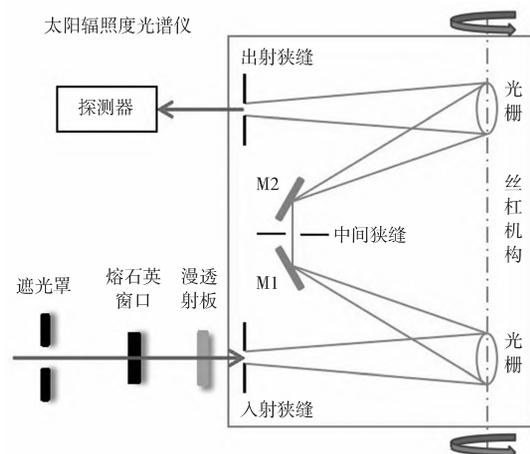


图2 太阳辐照度光谱仪单个通道工作原理图

### 3 系统噪声分析

#### 3.1 探测器选择

探测器是进行后续信号处理的前提条件,其性能的优劣直接决定光谱测量的精度和稳定性。故探测器的选择尤其重要,根据太阳辐照度光谱仪的设计要求,需要找到一种具有良好稳定性及较高线性,结构紧凑,光谱波长覆盖较宽并且具有自身响应度标准的探测器<sup>[19-21]</sup>。

综合考虑以上因素,选用日本滨松公司的 R1925A 型光电倍增管( Photomultiplier Tube, PMT) 作为可见光通道探测器,该探测器增益与暗电流特性如图 3 所示,根据设计要求, PMT 高压需要设定为 579 V,从图 3 中找到对应的增益  $M$  取  $3.0 \times 10^4$ 。

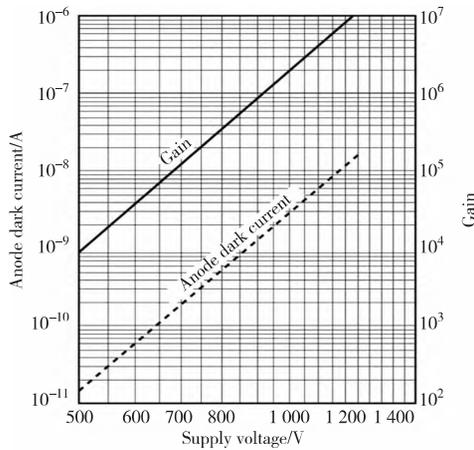


图3 探测器增益和暗电流特性

前置放大电路如图 4 所示,相较于后续锁相放大器来说,噪声在前置放大电路中会被放大,故锁相放大器的噪声可忽略<sup>[22]</sup>。

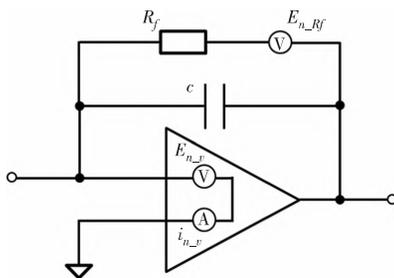


图4 前置放大器原理示意图

#### 3.2 光电倍增管噪声分析

PMT 噪声主要由阳极暗噪声 ( $I_{nan\_d}$ )、阳极散粒噪声 ( $I_{nan\_1}$ ) 和阳极电阻热噪声组成,通常阳极电阻热噪声远小于前两者,因此可忽略不计。阳极暗噪声和阳极散粒噪声分别由式(1),式(2)表示:

$$I_{nan\_d} = \sqrt{2eI_{an\_d}M\Delta f}, \quad (1)$$

$$I_{nan\_1} = \sqrt{2eI_{an\_1}M\Delta f}. \quad (2)$$

式中,  $I_{an\_d}$  为暗电流,  $I_{an\_1}$  为光电流,  $M$  为光电倍增管增益取  $3.0 \times 10^4$ ,  $\Delta f$  为测量带宽取 5 Hz。根据式(1) 直接计算出阳极暗噪声为 1.55 pA。

由式(2) 可知阳极散粒噪声如图 5 所示。

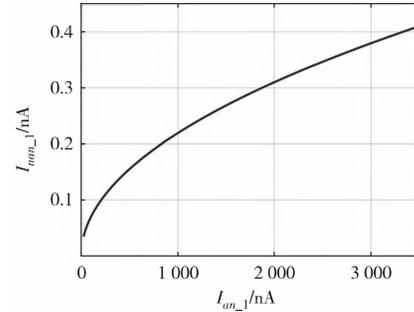


图5 光电流 ( $I_{an\_1}$ ) 与阳极散粒噪声 ( $I_{nan\_1}$ ) 曲线图

计算发现,在光电流为 5.42 pA 的情况下,阳极散粒噪声为 0.51 pA,远小于阳极暗噪声值,此时光强为  $1.08 \times 10^{-4} \mu\text{W}$ 。因此光强小于  $1.08 \times 10^{-4} \mu\text{W}$  的情况下, PMT 噪声以阳极暗噪声为主。在光电流增大到 450 pA 的情况下,阳极散粒噪声为 4.65 pA,远大于阳极暗噪声值,此时光强为  $9 \times 10^{-3} \mu\text{W}$ 。因此在光强大于  $9 \times 10^{-3} \mu\text{W}$  的情况下, PMT 噪声以阳极散粒噪声为主。而在光强处于  $1.08 \times 10^{-4} \mu\text{W}$  至  $9 \times 10^{-3} \mu\text{W}$  之间, PMT 噪声值由阳极暗噪声和阳极散粒噪声共同决定。

由于光强  $9 \times 10^{-3} \mu\text{W}$  较小,即无光照条件下, PMT 噪声以光电倍增管暗噪声为主;在有光照条件下, PMT 噪声以阳极散粒噪声为主。

#### 3.3 运算放大器噪声分析

##### 3.3.1 电压噪声

放大器电压噪声为宽带 RMS 噪声电压 ( $E_{nBB}$ ) 和  $1/f$  均方根噪声电压 ( $E_{nf}$ ) 二者叠加,由式(3) ~ (5) 表示:

$$E_{nBB} = e_{bb}\sqrt{f_H K_n}, \quad (3)$$

$$E_{nf} = e_{fnorm}\sqrt{\ln(f_H/f_L)}, \quad (4)$$

$$E_{n_v} = \sqrt{E_{nBB}^2 + E_{nf}^2}. \quad (5)$$

式中,  $e_{bb}$  为宽带噪声电压密度取  $3.5 \times 10^{-8}$ ,  $e_{fnorm}$  为 1 Hz 归一化噪声电压密度取  $3.12 \times 10^{-7}$ ,  $f_H$  为高频截止频率取 802 Hz,  $f_L$  为低频截止频率取 797 Hz,  $K_n$  为转换因子取 1.57。

根据式(3) ~ (5) 计算出宽带 RMS 噪声电压为 1 241.95 nV,  $1/f$  均方根噪声电压为 24.67 nV, 放大

器电压噪声为 1 242. 20 nV。

### 3.3.2 电流噪声

放大器电流噪声 ( $I_{n_v}$ ) 为宽带 RMS 噪声电流 ( $I_{n_{BB}}$ ) 和  $1/f$  均方根噪声电流 ( $I_{n_f}$ ) 二者叠加, 可由式 (6) ~ (8) 表示:

$$I_{n_{BB}} = i_{n_{bb}} \sqrt{f_H K_n}, \quad (6)$$

$$I_{n_f} = i_{n_{norm}} \sqrt{\ln(f_H/f_L)}, \quad (7)$$

$$I_{n_v} = \sqrt{I_{n_{BB}}^2 + I_{n_f}^2}. \quad (8)$$

式中  $i_{n_{bb}}$  为宽带噪声电流密度取  $1.1 \times 10^{-16}$ ,  $i_{n_{norm}}$  为 1 Hz 归一化噪声电流密度取  $1.68 \times 10^{-16}$ 。根据式 (6) ~ (8) 计算出宽带 RMS 噪声电流为  $3.90 \times 10^{-6}$  nA,  $1/f$  均方根噪声电流为  $1.33 \times 10^{-8}$  nA, 放大器电流噪声为  $3.90 \times 10^{-6}$  nA。

### 3.3.3 电阻热噪声

放大器电阻热噪声电动势 ( $E_{i_{n_{Rf}}}$ ) 仅与电路反馈电阻  $R_f$  本身有关, 由式 (9) 表示:

$$E_{i_{n_{Rf}}} = \sqrt{4KT\Delta f R_f}. \quad (9)$$

将放大器电压噪声和电阻热噪声以噪声电流的形式表示出来, 可由式 (10) ~ (11) 表示:

$$I_{n_{e-v}} = \frac{E_{n-v}}{R_f}, \quad (10)$$

$$I_{n_{Rf}} = \frac{E_{i_{n_{Rf}}}}{R_f} = \sqrt{\frac{4KT\Delta f}{R_f}}. \quad (11)$$

式中电阻  $R_f$  为  $2.4 \times 10^6 \Omega$ , 根据式 (10) ~ (11) 计算出放大器电压噪声和电阻热噪声贡献的噪声电流分别为  $5.18 \times 10^{-4}$  nA,  $1.86 \times 10^{-4}$  nA。

### 3.3.4 放大器总噪声

放大器总噪声电流为电压噪声电流, 电阻噪声电流和电流噪声三者叠加<sup>[22]</sup>, 由式 (12) 表示:

$$I_{n_{sum}} = \sqrt{I_{n_{e-v}}^2 + I_{n_v}^2 + I_{n_{Rf}}^2}. \quad (12)$$

将数据带入公式 (12) 得放大器总噪声电流为 0.55 pA。而根据公式 (1) 计算出的阳极暗噪声为 1.55 pA, 发现运算放大电路的噪声为 PMT 阳极暗噪声的 1/3, 说明运算放大电路的噪声已经淹没在 PMT 阳极暗噪声之中, 可认为 PMT 噪声即为系统噪声。

## 4 稳定性评估

### 4.1 仪器工作模式

太阳辐照度光谱仪须在轨工作 8 年, 工作期间谱仪电箱一直处于长加电状态, 谱仪和转台间歇工作。太阳辐照度光谱仪由紫外 (UV1、UV2)、可见 (VIS) 和红外 (NIR、IR) 五个通道组成, 共有 17 种工作模式,

上电后进入待机模式, 17 种工作模式均可通过数据注入单独执行, 也可通过数据注入进行多种工作模式的组合执行。

太阳辐照度光谱仪每日完成一次太阳光谱测量模式, 每月进行紫外通道备板比对模式、不跟踪下暗电流连续谱测量模式和全通道备板比对模式以实现月定标。接下来主要根据太阳辐照度光谱仪每日, 每月可见光通道数据进行日稳定性和月稳定性分析。

### 4.2 实验室日稳定性评估

由于太阳辐照度光谱仪在轨单次工作测量时间为 20 分钟, 故地面日稳定性试验可以通过检测太阳光谱仪对稳定辐射目标卤钨灯在 20 分钟内的变化情况来评估, 地面稳定性试验如图 6 所示。首先在可见光通道, 将卤钨灯与透镜等高放置, 对准可见光通道入瞳, 确保卤钨灯与可见光通道入瞳二者共轴; 之后调节卤钨灯、透镜与可见光通道之间的相对位置, 使输出信号接近在轨太阳光谱能级水平; 最后将可见光通道通电预热 30 分钟后, 开启采集模式进行定点连续数据的采集。

记录连续工作 20 分钟内全过程输出数据; 以各采集信号点与基准值相对偏差的平均值作为评价该通道稳定性的依据。

将 20 分钟内采集到的  $n$  个信号值  $S_i$  的平均值  $S_v$  作为基准值,

$$S_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i, \quad (13)$$

计算  $n$  个信号值  $S_i$  与平均值  $S_v$  的相对偏差  $d_i$ ,

$$d_i = \frac{|S_i - S_v|}{S_v}, \quad (14)$$

$n$  个相对偏差  $d_i$  的平均值作为该通道的稳定性依据,

$$d_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i. \quad (15)$$

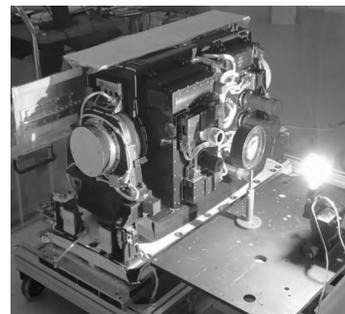


图6 地面稳定性试验装置照片

在可见光波段测量多组数据来评定可见光通道

的稳定性,选取其中一组典型波长进行分析,在 500 nm 处实测信号数据如图 7 所示。

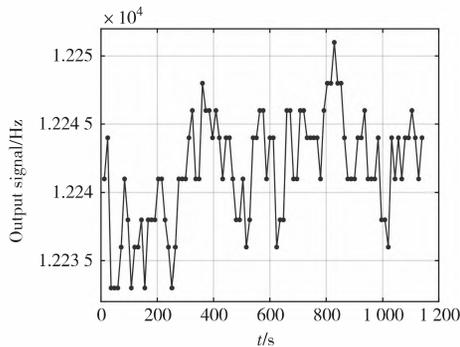


图 7 波长 500 nm 处输出信号曲线

稳定性记录如表 1 所示。根据各个波长数据测量结果可知,可见光通道日不确定度低于 0.2%,满足光谱数据测量要求。

表 1 可见光通道稳定性数据表

项目	500 nm
基准值/Hz	12 241.58
稳定性	0.17%

### 4.3 外场月稳定性评估

本文采用太阳辐照度光谱仪初样在丽江进行地面试验,测量该地 10 月份的太阳辐照度数据,选择该月天气晴朗时进行测量,当月共有 18 天满足测量需求。在光谱测量时,先执行“不跟踪下暗电流连续谱测量模式”,得到遮光条件下的测量结果,然后执行“太阳光谱测量模式”,得到对日测量结果。在同一波长位置下,测得的实际结果为对日测量结果与暗电流测量结果之差。由于噪声低,所以获得了较高的信噪比,保证了测量结果的一致性。挑选 350~700 nm 可见光波段内 8 个波长处进行分析,绘制出各个波段光谱数据如图 8 所示,柱状图表示在这 18 天测量光谱数据的平均值,线段表示此波段 18 天内测量的极值数据。

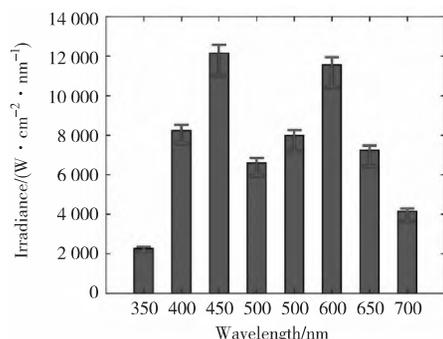


图 8 可见光各波段太阳光谱分布图

为了方便分析数据变化,根据测量数据绘制出该 8 个波长处的太阳辐照度数据在这 18 天内的变化,如图 9 所示。发现各波段测量的数据呈下降趋势并且趋势一致。

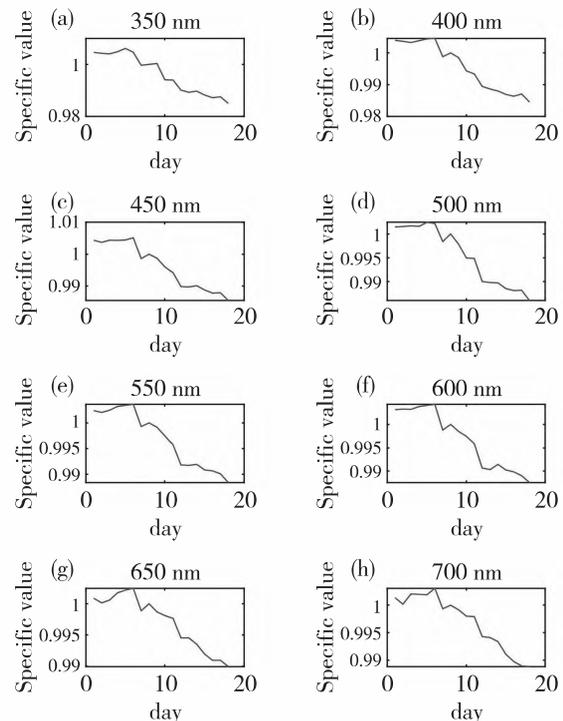


图 9 可见光各波段太阳光谱趋势图

根据各个波长数据测量结果可知,可见光通道月不确定度不超过 3%,且在轨太阳辐照度光谱仪每月进行月定标,满足数据测量要求。

## 5 结论

本文介绍了搭载在风云三号上的太阳辐照度光谱仪系统,并对光谱仪可见光通道的噪声和稳定性进行了定量分析。发现光谱仪可见光通道探测器中的噪声由光电倍增管和放大电路组成,研究结果表明放大电路产生的噪声被淹没在 PMT 噪声中,系统噪声即为 PMT 噪声。基于对噪声的分析,采用太阳辐照度光谱仪初样在实验室和丽江进行地面稳定性试验,计算出太阳光谱仪系统整机可见光通道日不确定度低于 0.2%,月不确定度不超过 3%,满足光谱仪稳定性要求。

## 参考文献

- [1] Usoskin I G. A history of solar activity over millennia [J]. Living Reviews in Solar Physics, 2017, 14(1): 1–97.
- [2] 王玉鹏,胡秀清,王红睿,等. 可在轨溯源的太阳反射波

- 段光学遥感仪器辐射定标基准传递链路[J]. 光学精密工程,2015,23(7):1807-1812.
- [3] 杨东军,方伟,叶新,等. 星载太阳辐射监测仪的高精度太阳跟踪[J]. 光学精密工程,2014,22(9):2483-2490.
- [4] 张亮,王赤,傅绥燕. 太阳活动与全球气候变化[J]. 空间科学学报,2011,31(05):549-566.
- [5] 贾瑞栋,夏志伟,王玉鹏,等. 太阳光谱辐照度绝对测量及其定标单色仪[J]. 发光学报,2017,38(8):1097-1101.
- [6] Huang L K, Cebula R P, Taylor S L, et al. Determination of NOAA-11 SBUV/2 radiance sensitivity drift based on measurements of polar ice cap radiance [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(2): 305-314.
- [7] Lumpe J D, Floyd L E, Herring L C, et al. Measurements of thermospheric molecular oxygen from the Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D16).
- [8] Meclintock W E, Rottman G J, Woods T N. Solar - stellar irradiance comparison experiment II (solstice II): instrument concept and design [J]. *Solar Physics*, 2005, 230(1): 225-258.
- [9] Thuillier G, Foujols T, Bolsée D, et al. SOLAR/SOLSPEC: Scientific objectives, instrument performance and its absolute calibration using a blackbody as primary standard source [J]. *Solar Physics*, 2009, 257(1): 185-213.
- [10] Rottman G, Woods T, George V. The Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) [J]. *Sol. Phys.*, 2005, 230: 360-417.
- [11] Coddington O M, Richard E C, Harber D, et al. The TSIS - 1 Hybrid Solar Reference Spectrum [J]. *Geophysical research letters*, 2021, 48(12): e2020GL091709.
- [12] Richard E, Harber D, Coddington O, et al. SI-traceable spectral irradiance radiometric characterization and absolute calibration of the TSIS-1 spectral irradiance monitor (SIM) [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1818.
- [13] Richard E, Harber D, Drake G, et al. Compact spectral irradiance monitor flight demonstration mission [C]// *CubeSats and SmallSats for Remote Sensing III*, 2019: 1113105.
- [14] 李寒霜. 紫外-真空紫外太阳光谱仪及光谱/辐射定标研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2019.
- [15] 黄雄豪. 高精度太阳直射光谱辐照度仪的研制[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
- [16] 韩勇. 光电检测电路的噪声分析与处理[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [17] 李志刚,李福田. 新一代高温黑体和同步辐射装置及其在地外太阳光谱辐照度测量中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*,2017,37(10):3242-3248.
- [18] 郭旭,胡春晖,颜昌翔,等. 基于蒙特卡罗法的星载太阳辐照度光谱仪对日指向误差分析[J]. *光学精密工程*, 2021,29(3):474-483.
- [19] 王锐. 紫外-真空紫外探测器定标技术研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2010.
- [20] Lubsandorzhev B K. On the history of photomultiplier tube invention [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2006, 567(1): 236-238.
- [21] Roth J M, Murphy T E, Xu C. Ultrasensitive and high-dynamic-range two-photon absorption in a GaAs photomultiplier tube [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(23): 2076-2078.
- [22] 李乐,汪龙祺,黄煜,等. 光电探测系统噪声特性研究与降噪设计[J]. *光学精密工程*,2020,28(12):2674-2683.