

# 多通道共光栅转轴太阳光谱仪波长非线性研究

李占峰<sup>1</sup>, 黄煜<sup>1</sup>, 王淑荣<sup>1\*</sup>, 于淼<sup>2</sup>, 林冠宇<sup>1</sup>, 张子辉<sup>1</sup>, 曹佃生<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应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>上海卫星工程研究所载荷与地面应用技术研究室, 上海 200240

**摘要** 为了提高多通道光栅扫描光谱仪的波长定标精度,在介绍传统单通道光栅光谱仪线性波长扫描原理的基础上,分析并推导了多通道光谱仪中,共用光栅轴装调误差导致的光谱仪输出波长与丝杠移动距离的理论非线性公式。利用该非线性公式作为波长定标公式对风云三号太阳辐照度光谱仪原理样机进行波长定标,结果表明:传统线性公式的定标精度为 0.08 nm,利用波长非线性公式可将波长定标精度提高到 0.03 nm,满足仪器的波长定标精度,验证了多通道光栅扫描光谱仪波长非线性关系的准确性。

**关键词** 光谱学; 光栅光谱仪; 波长定标; 多通道光谱仪; 波长非线性; 正弦结构

中图分类号 O433.1; TP731

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0911004

## Wavelength Nonlinearity of Multi-Channel Solar Spectrometer with Common Grating Rotating Axis

Li Zhanfeng<sup>1</sup>, Huang Yu<sup>1</sup>, Wang Shurong<sup>1\*</sup>, Yu Miao<sup>2</sup>, Lin Guanyu<sup>1</sup>,  
Zhang Zihui<sup>1</sup>, Cao Diansheng<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Load and Ground Application Technology Laboratory, Shanghai Institute of Satellite Engineering,  
Shanghai 200240, China

**Abstract** To improve the wavelength calibration accuracy of multi-channel grating scanning spectrometers, the principle of linear wavelength scanning of traditional single-channel grating spectrometers is first introduced. Then, the theoretical nonlinear relationship between the spectrometer's output wavelength and the moving distance of the lead screw is derived based on the common grating axis error. Given the nonlinear relationship, wavelength calibration of a prototype of Fengyun-3 solar irradiance spectrometer is performed. The results demonstrate that the calibration accuracy of the traditional calibration is 0.08 nm, and the calibration accuracy is increased to 0.03 nm by using the wavelength nonlinear formula. This result satisfies the requirements of the instrument's specifications. Thus, the wavelength nonlinear relationship of a multi-channel grating scanning spectrometer is verified.

**Key words** spectroscopy; grating spectrometer; wavelength calibration; multi-channel spectrometer; wavelength nonlinearity; sinusoidal structure

**OCIS codes** 300.6190; 120.6200; 050.1950; 120.5630

## 1 引 言

太阳辐射是地球气候系统最重要的外部能源,监测太阳辐射变化不仅对太阳物理研究具有重要意义,还可为地球空间大气成分反演及长期气候变化

研究等提供重要的科学数据<sup>[1]</sup>。因此,从 20 世纪 70 年代起国内外就开始对太阳光谱辐射变化进行遥感监测。典型的仪器有太阳紫外光谱辐照度监测仪(SUSIM)、太阳/恒星辐射对比实验仪器(SOLSTICE)、太阳辐照度监测器(SIM)、太阳光谱

收稿日期: 2019-04-08; 修回日期: 2019-05-14; 录用日期: 2019-05-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF01011003)

\* E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

仪(SOLSPEC)以及神舟三号太阳紫外监视器等<sup>[2-6]</sup>。

为满足高光谱分辨率、高灵敏度以及大动态范围探测的需求,太阳光谱监测仪通常采用扫描型光栅光谱仪,即利用波长扫描机构带动光栅转轴转动,使光栅入射角度连续变化,最终实现不同光谱信号的探测。为了满足扫描机构电机步数与探测输出波长之间的线性关系,扫描光栅的旋转轴一般由摆杆带动,摆杆的转角正弦值与波长为线性关系,这种波长扫描机构称为正弦结构<sup>[7]</sup>。对于单通道光栅光谱仪,只要保证光栅转轴的初始位置与摆杆的夹角满足一定的关系即可实现波长的线性扫描。但多通道光栅光谱仪共用了一条光栅轴,并且通道之间光栅的安装具有一定的差异性,导致其中的一个通道满足波长线性关系时,其他通道就会出现波长非线性。通常光栅光谱仪的波长定标都采用线性或三次以下多项式,这样就会导致波长定标出现一定误差。

为了提高多通道光栅扫描型光谱仪波长定标的精度,本文在分析传统单通道光谱仪线性扫描机构的基础上,详细推导了多通道光谱仪的波长与扫描步长的理论非线性公式,并在风云三号太阳辐照度光谱仪原理样机波长定标中验证波长非线性公式的精度。

## 2 单通道光栅光谱仪线性扫描原理

在图1中, $i$ 为入射角, $\theta$ 为衍射角, $N$ 为光栅的法线, $2\delta$ 为入射光线(入射臂)与衍射光线(出射臂)的夹角, $B$ 为出入射臂夹角的角平分线, $\varphi$ 为光栅法线 $ON$ 与角平分线 $OB$ 的夹角。由光栅方程可得

$$d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda, \quad (1)$$

式中: $d$ 为光栅常数; $m$ 为衍射级次; $\lambda$ 为波长。由图1中的关系可得

$$\begin{cases} i = \delta + \varphi \\ \theta = \delta - \varphi \end{cases} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,可得

$$\sin(\delta + \varphi) + \sin(\delta - \varphi) = \frac{m\lambda}{d} \quad (3)$$

对(3)式进行简化可得

$$\sin \varphi = \frac{m\lambda}{2d \cos \delta} \quad (4)$$

光栅扫描光谱仪利用光栅轴的转动来实现波长的扫描,光栅轴转动时入射光和衍射光方向不变,由于光栅法线 $ON$ 在变化,所以光栅法线 $ON$ 与角平分线 $OB$ 的夹角 $\varphi$ 也在变化,进而改变了输出光的波长 $\lambda$ 。

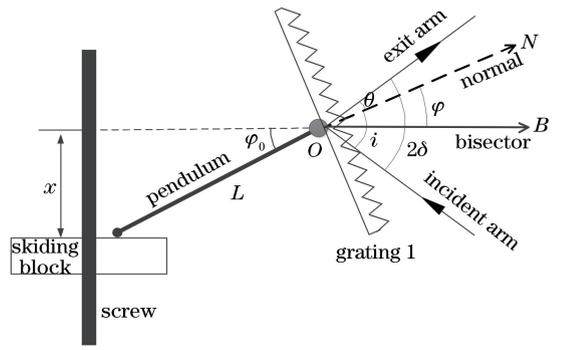


图1 波长线性扫描机构示意图

Fig. 1 Diagram of wavelength linear scanning mechanism

由图1可知,波长线性扫描机构由丝杠、滑块和摆杆组成<sup>[7]</sup>,由图中的几何关系可得

$$\sin \varphi_0 = \frac{x}{L}, \quad (5)$$

式中: $\varphi_0$ 为光栅转角; $x$ 为摆杆末端移动的距离; $L$ 为摆杆长度。

当 $\varphi = \varphi_0$ (即滑块运动方向垂直于出入射臂角平分线 $OB$ 的方向)时,由(4)~(5)式可得

$$\lambda = \frac{2d \cos \delta}{Lm} x. \quad (6)$$

令常数 $A_1 = 2d \cos \delta / (Lm)$ ,起始位置对应的波长为常数 $A_0$ 。则由(6)式可得波长定标公式为

$$\lambda = A_1 x + A_0. \quad (7)$$

可见,光谱仪输出波长 $\lambda$ 与丝杠移动距离 $x$ 呈线性关系,即实现了波长的线性扫描。

## 3 多通道光栅光谱仪波长非线性关系推导

由第2节的介绍可知,对于单通道光栅光谱仪来说,只要保证滑块运动方向垂直于入射臂与出射臂角平分线方向,即可实现波长线性扫描。但对于多通道共光栅轴的光谱仪,光栅参数不同以及安装误差导致不同通道光栅的法线方向存在一定的夹角,如图2所示,两通道法线方向的夹角为 $\alpha_0$ ,通道1的光栅转角为 $\varphi$ ,则通道2的光栅转角 $\varphi_2 = \varphi + \alpha_0$ 。由第2节的讨论可知通道1是波长线性扫描,下面推导通道2的波长非线性关系。

对于通道2,由(5)~(6)式可得

$$\sin(\varphi + \alpha_0) = \frac{m\lambda}{2d \cos \delta} \quad (8)$$

对(8)式进行分解可得

$$\sin \varphi \cos \alpha_0 + \cos \varphi \sin \alpha_0 = \frac{m\lambda}{2d \cos \delta} \quad (9)$$

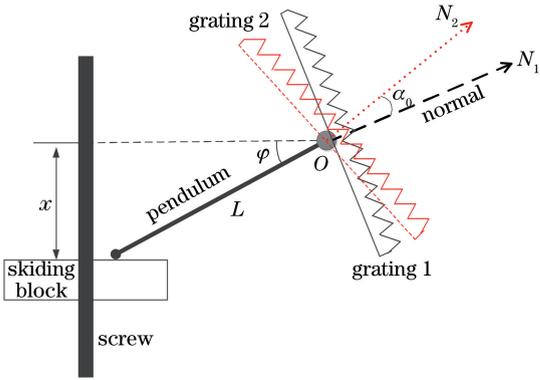


图2 双通道光栅光谱仪波长扫描机构示意图

Fig. 2 Diagram of wavelength scanning mechanism of dual-channel grating spectrometer

令  $\cos \alpha_0 = k_1, \sin \alpha_0 = k_2, m/(2d \cos \delta) = l_1$ , 联合(5)式和(8)式可得

$$k_1 \frac{x}{L} + k_2 \sqrt{1 - \frac{x^2}{L^2}} = l_1 \lambda. \quad (10)$$

令  $l_1/k_2 = t_1, k_1/(Lk_2) = t_2$ , 对(10)式进行变形可得

$$\lambda = \frac{t_2}{t_1} x + \frac{1}{Lt_1} \sqrt{L^2 - x^2}. \quad (11)$$

令常数  $B_1 = t_2/t_1$ , 常数  $B_2 = 1/(Lt_1)$ , 则由(11)式可得通道2的波长定标公式为

$$\lambda = B_1 x + B_2 \sqrt{L^2 - x^2}. \quad (12)$$

由(12)式可知, 通道2的输出波长  $\lambda$  与丝杠移动距离  $x$  呈非线性关系。

由上述推导可知, 在多通道共光栅轴单色仪中, 可以通过调节滑块、摆杆与光栅轴之间的关系实现其中任意一个通道的波长线性扫描, 其他通道的波长是否为线性扫描取决于该通道与线性通道光栅法线方向的夹角  $\alpha_0$ 。如果  $\alpha_0 = 0$ , 则该通道使用(7)式所示的线性波长定标公式; 如果  $\alpha_0 \neq 0$ , 则该通道使用(12)式所示的非线性波长定标公式。

#### 4 波长非线性关系的验证

风云三号太阳辐照度光谱仪是一台覆盖紫外到近红外的高稳定性紧凑型扫描式光谱仪<sup>[8]</sup>, 它的主要任务是通过每日对太阳进行跟踪观测来提高对太阳辐射变化的监测能力, 进而积累科学数据。太阳辐照度光谱仪由可见光通道和近红外通道组成。为保证整机结构的小型化, 两通道共用一条光栅转轴和一套波长扫描机构, 如图3所示, 摆杆长度  $L$  为140 mm。每个通道的工作原理如图4所示。可见光通道的工作波段为280~650 nm, 光谱分辨率优

于1 nm, 近红外通道的工作波段为600~2400 nm, 光谱分辨率优于8 nm。为了保证太阳光谱辐射测量的精度, 要求仪器的波长定标精度为: 可见光通道优于0.05 nm, 近红外通道优于0.1 nm。

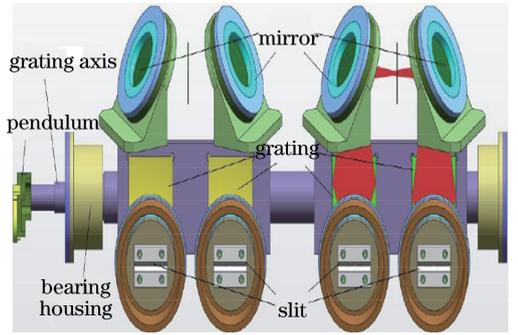


图3 太阳辐照度光谱仪结构图

Fig. 3 Structural diagram of solar irradiance spectrometer

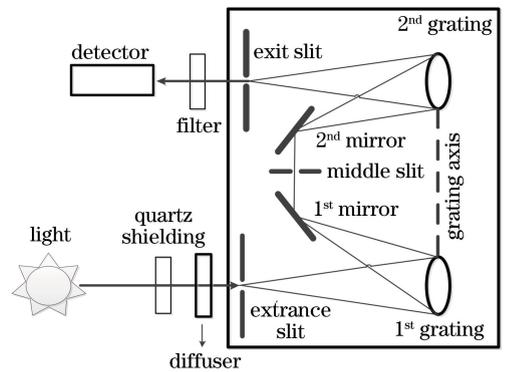


图4 每个通道的工作原理图

Fig. 4 Working principle diagram of each channel

为了保证仪器的大部分波段满足波长公式简单化要求及定标精度, 在波长扫描机构装调时, 以红外通道为基准, 通过调节丝杠摆放方向来保证红外通道为波长线性扫描。可见光通道与红外通道在共用光栅轴、出入臂装调中存在一定的误差, 导致可见光通道输出波长与丝杠移动距离在理论上是非线性的。为了验证可见光通道分别采用线性公式和非线性公式拟合导致的波长定标误差, 利用高压汞灯作为标准谱线光源, 照射到入射狭缝前的漫透射板上, 经漫透板匀化后照射到后续光谱仪系统, 通道丝杠电机和摆杆带动光栅轴转动, 最后由光电倍增管探测器依次接收不同波长的信号输出。得到丝杠移动距离与输出信号的变化曲线如图5所示。

对图5中的每条汞灯谱线进行高斯拟合, 得到每条谱线峰值位置对应的丝杠移动距离如表1所示。分别利用(7)式和(12)式对丝杠移动距离与波长之间的关系进行拟合, 利用(7)式拟合得到变量  $A_1 = 10.199399677, A_0 = 12.97593131$ ; 利用(12)式

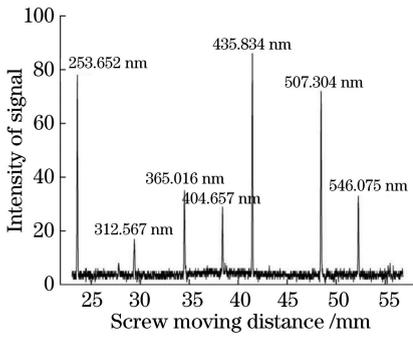


图 5 汞灯光源照明可见光通道的输出信号曲线

Fig. 5 Output signal curve of visible channel of mercury lamp source

表 1 线性和非线性公式的拟合误差

Table 1 Fitting errors of linear and nonlinear formulas

Standard wavelength /nm	Screw distance /mm	Fitting using equation (7)		Fitting using equation (12)	
		Wavelength /nm	Error /nm	Wavelength /nm	Error /nm
253.65	23.604	253.73	<b>0.08</b>	253.677	<b>0.03</b>
312.57	29.374	312.57	<b>0.00</b>	312.572	<b>0.01</b>
365.02	34.510	364.96	<b>-0.06</b>	364.987	<b>-0.03</b>
404.66	38.396	404.59	<b>-0.07</b>	404.625	<b>-0.03</b>
435.83	41.455	435.79	<b>-0.04</b>	435.822	<b>-0.01</b>
507.30	48.468	507.33	<b>0.02</b>	507.326	<b>0.02</b>
546.08	52.274	546.14	<b>0.06</b>	546.106	<b>0.03</b>

## 5 结 论

本研究首先介绍了单通道光栅光谱仪的波长线性扫描原理,在此基础上分析并推导了多通道光栅光谱仪输出波长与丝杠移动距离的非线性关系公式。为了验证该公式的准确性,利用汞灯标准谱线对风云三号太阳辐照度光谱仪原理样机进行了波长定标。分别利用传统的线性公式和本研究推导的非线性公式作为定标公式对数据进行拟合,拟合结果表明,相对于线性公式拟合,非线性公式的拟合精度由 0.08 nm 提高到 0.03 nm,可以满足仪器的波长定标精度,为后续多通道光栅光谱仪高精度波长定标提供了借鉴和参考。

### 参 考 文 献

[1] Xiao Z N, Zhong Q, Yin Z Q, *et al.* Advances in the research of impact of decadal solar cycle on modern climate[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(12): 1335-1348.  
肖子牛, 钟琦, 尹志强, 等. 太阳活动年代际变化对现代气候影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(12): 1335-1348.

[2] Cao H X, Zhao Y F, He M, *et al.* Design of small-

拟合得到变量  $B_1 = 1.02253 \times 10^{-5}$ ,  $B_2 = 8.9235 \times 10^{-8}$ 。分别利用拟合结果计算丝杠移动距离对应的中心波长,并与汞灯标准谱线进行比对,得到比对偏差如表 1 所示。通常采用线性公式拟合的最大误差为 0.08 nm,超出了太阳辐照度光谱仪的波长定标精度,而采用本研究推导的非线性公式拟合的最大误差为 0.03 nm,可满足仪器的波长定标精度。由于两种拟合方法采用的拟合变量都为两个,所以拟合结果对比中排除了拟合变量不同而导致的拟合差异。拟合精度的差异表征了拟合公式的准确性。实验结果表明,多通道光栅扫描光谱仪采用本研究推导的波长非线性公式作为定标公式,可有效提高波长定标精度。

size high resolution echelle grating spectrometer with divided spectral coverage [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1105002.

曹海霞, 赵英飞, 何森, 等. 小型分段式高分辨率中阶梯光栅光谱仪的设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1105002.

[3] Jerald W H, George M L, Gary J R, *et al.* Spectral irradiance monitor (SIM) for the SORCE mission[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 4135: 204-214.

[4] Snow M, McClintock W E, Woods T N. Solar spectral irradiance variability in the ultraviolet from SORCE and UARS SOLSTICE [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(3): 296-302.

[5] 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.

[6] Wang S R, Song K F, Li F T. Radiometric calibration on ground of satellite-borne solar ultraviolet spectral monitor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2256-2261.  
王淑荣, 宋克非, 李福田. 星载太阳紫外光谱监视器的地面辐射定标 [J]. *光学学报*, 2007, 27(12): 2256-2261.

[7] Cao D S, Lin G Y, Wen B P, *et al.* Wavelength

scanning mechanism design and accuracy analysis of infrared double grating spectrometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0511002.

曹佃生, 林冠宇, 闻宝朋, 等. 红外双光栅光谱仪波长扫描机构设计与精度分析[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0511002.

[8] Xu D. Research of satellite-borne high precision solar irradiance spectrometer wavelength scanning mechanism [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.

许典. 星载高精度太阳辐照光谱仪波长扫描机构研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.