

## 基于中阶梯光栅的光谱定标装置设计方法

李永强<sup>1,2</sup>, 郭永祥<sup>1</sup>, 王静怡<sup>1</sup>

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100076; 2 西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 针对紫外-可见光波段高光谱成像仪光谱定标装置的设计进行研究, 论述了中阶梯光栅的光学原理, 根据光谱定标原理, 利用中阶梯光栅工作角度大、衍射级次高、光谱分辨率高的优点, 建立了基于中阶梯光栅的光谱定标装置, 提出了基于中阶梯光栅的光谱成像仪光谱定标装置的设计方法。以大气探测卫星 Aura 上所搭载的臭氧观测仪为例论述了光谱定标装置的设计过程, 仿真分析了光谱定标装置带宽对光谱定标精度的影响, 给出了衍射级次、光谱分辨率、平行光管焦距等光谱定标装置主要性能参数的设计计算方法, 为基于中阶梯光栅的光谱成像仪光谱定标装置的设计提供了依据。

**关键词:** 光谱定标; 中阶梯光栅; 高光谱成像仪; 仪器线性

中图分类号: TH744.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)01-0208-04

## Method of designing spectral calibration equipment based on echelle

Li Yongqiang<sup>1,2</sup>, Guo Yongxiang<sup>1</sup>, Wang Jingyi<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China;

2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Design method of spectral calibration device for ultraviolet-visible band hyperspectral imager was studied. The optical principle of echelle grating was discussed. According to the theory of spectral calibration and taking the advantages of large working angle, high diffraction order and high spectral resolution of echelle grating, a spectral calibration equipment based on echelle grating was founded. Design method of spectral calibration device based on echelle grating for hyperspectral imager was proposed. Taking the ozone monitoring instrument (OMI) carried on Aura satellite as an example, the design process of spectral calibration device was discussed. The spectral calibration device bandwidth effect on the precision of spectral calibration was analysed by simulation. The calculation methods of the main performance parameters of spectral calibration device such as the diffraction order, spectral resolution of grating and the focal length of collimator were given, providing the design basis of spectral calibration device based on echelle grating.

**Key words:** spectral calibration; echelle; hyperspectral imager; instrument line shape

## 0 引言

自 20 世纪 80 年代光谱成像仪概念提出后,可将空间信息获取和光谱信息获取集于一身的高光谱成像技术成为遥感技术研究领域的热点之一,目前在环境监测、气象观测和深空探测领域正得到快速发展<sup>[1-3]</sup>,在定量化应用方面也提出了不同于传统传感器定标的新要求,针对高光谱遥感器的光谱定标也成为高光谱传感器研制工作者所关注的问题。

高光谱成像遥感器的光谱定标主要包括中心波长定标和仪器线形函数测量。在高光谱成像仪光谱定标中,通常使用物理谱线灯(汞灯、空心阴极灯)、可调谐激光器、光栅单色仪等作为定标光源<sup>[4]</sup>,这些光源各有特点。谱线灯具有有限个特定的物理谱线,但这些谱线不均匀分布在有限波长范围内,光谱定标工作只能在这些谱线位置处进行;可调谐激光器和一般闪耀光栅单色仪一次只能完成一个波长位置的定标<sup>[5-6]</sup>,当需要的定标点数量较多时整个光谱定标过程耗时很长。

1949 年美国麻省理工学院的 Harrison 教授通过增加衍射角,利用“短槽面”获得高级次衍射入手,增加两刻线间的距离研制而成了中阶梯光栅(Echelle),中阶梯光栅具有使用的光谱级次高,光谱范围宽,色散率大,分辨本领高等优点<sup>[7]</sup>,中阶梯光栅的这些特点使其比较适用于高光谱成像仪的光谱定标。美国 2004 年发射的地球观测卫星上搭载的臭氧监测仪(Ozone Monitoring Instrument, OMI)的实验室光谱定标试验中就采用中阶梯开展了光谱定标<sup>[8]</sup>。基于中阶梯光栅的光谱定标装置虽然在工程上得到了一定应用,但目前尚未有公开提出或发表基于中阶梯光栅光谱定标装置的系统设计方法的研究成果,定标装置的设计方法和理论尚待完善。

介绍了中阶梯光栅的原理<sup>[9]</sup>,探讨了基于中阶梯光栅的光谱定标装置的系统设计方法。

## 1 中阶梯光栅原理

中阶梯光栅工作原理图如图 1 所示, $\alpha$  为入射角, $\beta$  为衍射角, $d$  表示光栅常数, $W$  为光栅总宽度。

反射式中阶梯光栅的光栅方程为

$$\sin\alpha + \sin\beta = \frac{m\lambda}{d} \quad (1)$$

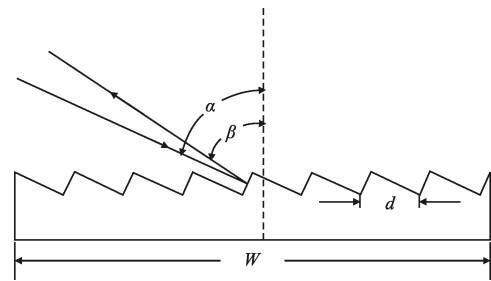


图 1 中阶梯光栅

Fig.1 Principle of echelle

不同于闪耀光栅主要将光强集中到某一有用的光谱级上,中阶梯光栅的刻线间距较大,光以不小于  $45^\circ$  的角度入射,因此,中阶梯光栅能产生非常高的条纹级次。由光栅自由光谱范围计算公式:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m} \quad (2)$$

式中: $m$  为衍射级次。由于  $m$  值较大,因此中阶梯光栅的自由光谱范围较小,易于实现高级次的多波长输出,即在出射狭缝处可以得到一系列离散的窄带衍射狭缝像。

## 2 基于中阶梯光栅的光谱定标装置的建立

图 2 为定标装置中多级谱线发生装置原理图,反射镜  $M1$  和反射镜  $M2$  组成准直系统,可将通过入射狭缝的光进行准直后入射至中阶梯光栅,经光栅后的衍射光经反射镜  $M2$  后聚焦于出射狭缝处。

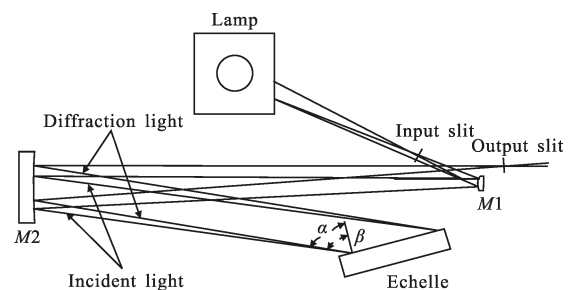


图 2 定标装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of spectral calibration equipment

## 3 定标装置主要性能参数的设计

### 3.1 中阶梯光栅的选择

在建立定标装置时,首先应针对待标定的高光谱成像仪的工作波段范围及拟使用的衍射级次谱线数量来选择合适的阶梯光栅。以大气臭氧监测常用的工作波段  $270\sim 500\text{ nm}$  为例,如果要在该波长

范围内有 50 条左右谱线,则谱线间平均波长间隔为 4.6 nm,可按公式(2)以中心波长 385 nm 计算得到该波长下衍射级数:

$$m = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \approx 84$$

选择常用的闪耀角为  $76^\circ$  的中阶梯光栅,在 Littrow 条件下,根据公式(1)计算得到光栅常数  $d$  为 0.016 7 mm,即应选择 60 gr/mm 的中阶梯光栅。从尽可能选用商业化标准产品考虑,为定标装置选择刻线密度为 72 gr/mm、闪耀角为  $76^\circ$  的中阶梯光栅,经计算在 270~500 nm 波长范围内在出射狭缝处可得到衍射级次分别为 100~54 的 57 个波长的谱线。

### 3.2 定标装置光谱分辨率的设计

对于大气臭氧探测,一般要求遥感器的光谱分辨率优于 0.6 nm,为了定量确定定标装置的光谱带宽,下面进行了仿真分析。

仿真时,假设定标装置和被定标的高光谱成像仪的仪器线形函数均为高斯函数,高光谱成像仪仪器线形函数的半高全宽(FWHM)为 0.6 nm,分别以定标装置带宽 0.3 nm(光谱成像仪光谱带宽的 1/2)和 0.12 nm(光谱成像仪光谱带宽的 1/5)进行定标过程仪器线形函数仿真,仿真依据的原理是:定标得到的仪器线形函数可以描述为定标装置的仪器线形函数和高光谱成像仪仪器线形函数的卷积。仿真结果见图 3 和图 4。

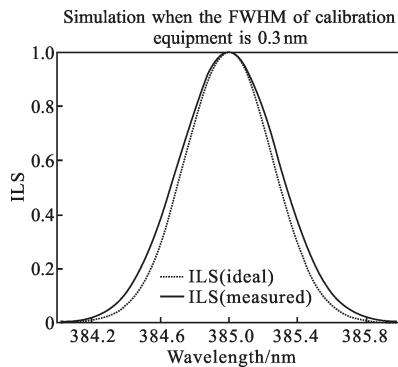


图 3 定标装置带宽 0.3 nm 的仿真结果

Fig.3 Simulation when the FWHM of the calibration equipment is 0.3 nm

由仿真结果可知,当定标装置带宽为 0.12 nm 时,定标装置的带宽对测试结果的影响已经很小,因此,在定标装置设计上应使定标装置的带宽不大于

被定标额光谱成像仪光谱分辨率的 1/5,定标装置带宽越窄,对光谱成像仪仪器线性测量结果影响越小,但从保证信噪比的角度考虑,定标装置带宽不宜过小,综上所述,推荐设计定标装置时使其带宽为被定标光谱成像仪带宽的 1/5~1/10。

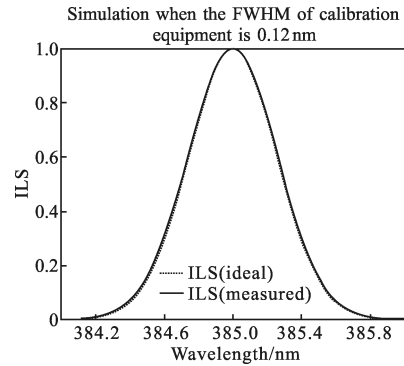


图 4 定标装置带宽 0.12 nm 的仿真结果

Fig.4 Simulation when the FWHM of the calibration equipment is 0.12 nm

### 3.3 定标装置出射焦距计算

以 OMI 为例,其光谱分辨率为 0.45~0.63 nm,经上述分析,为保证光谱成像仪线形函数测量的精度,要求定标装置的光谱分辨率应不大于 0.09 nm。

根据衍射光栅的线色散计算公式:

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{10^6 \cos\beta}{mnf} \quad (3)$$

有:

$$f = \frac{10^6 \cos\beta}{mn} \cdot \frac{dx}{d\lambda} \quad (4)$$

式中: $f$  为出射焦距长度; $n$  为刻线密度; $dx$  为出射狭缝宽度。

选择出射狭缝宽度为 0.5 mm,为了保证在全部定标波长范围定标装置的光谱带宽都满足不大于 0.09 nm 的要求, $m$  和  $d\lambda$  都应取最小值进行计算,即  $m=54$ , $d\lambda=0.09$  nm,由公式(4)可得定标装置的出射焦距长度  $f=357$  mm,即图 2 中反射镜  $M2$  的焦距应不小于 357 mm。

### 3.4 定标装置在不同波长下的光谱分辨率分析

根据上述定标装置设计参数,根据公式(3)有:

$$d\lambda = \frac{10^6 \cos\beta}{mnf} dx \quad (5)$$

根据上式,可计算得到定标装置在不同波长下的光谱分辨率,见表 1。

表 1 定标装置光谱分辨率分析

Tab.1 Analysis of spectral resolutions of the calibration equipment

$m$	$\lambda/\text{nm}$	$d\lambda/\text{nm}$
54	499.104	0.090
55	490.030	0.088
60	449.194	0.081
65	414.641	0.075
70	385.023	0.069
75	359.355	0.065
80	336.895	0.061
85	317.078	0.057
90	299.463	0.054
95	283.701	0.051
99	272.239	0.049
100	269.510	0.049

### 3.5 光栅旋转机构的参数设计

通过以上定标装置,在  $76.5^\circ$  入射角、 $75.5^\circ$  衍射角下可以定标得到 57 个波长下的仪器线性函数,若要在全部波长范围内进行测量可通过旋转阶梯光栅来实现,当改变阶梯光栅的角度时,高光栅成像仪面阵传感器上获取的峰值的位置和大小均会发生改变。

以同一波长出现两个级次为计算依据,根据中阶梯光栅的光栅常数、入射角、衍射角计算得到光栅旋转范围为  $4.5^\circ$  左右,在设计时应考虑一定余量。旋转机构的转角间隔按光谱分辨率的  $1/10$  进行设计,取  $0.005 \text{ nm}$ ,则转角分辨率为  $0.02^\circ$ 。

### 3.6 光源的选择

对于紫外/可见光波段的定标光源常选择氘灯、氙灯和卤素灯。相比于氘灯和卤素灯,氙灯具有光谱分布与日光接近、光谱能量分布稳定、可输出功率高、发光效率高的优点,在定标过程中更易于实现与航天高光栅传感器动态范围的匹配,是进行近紫外/可见光波段光谱定标的良好选择。

氙灯功率的选择主要依据光谱定标装置的光展量和待定标系统的动态范围确定。光展量是发射源面积  $S$  和光信号传播的立体角  $Q$  这两个参数的函数。

$$G = \iint dS \cdot dQ \quad (6)$$

式中: $G$  为光谱定标装置的光展量。

光源进入定标装置的光通量为光源的辐亮度和光谱定标装置光展量的乘积。

在试验前,应根据待定标系统的动态范围推算对光源光辐射功率的要求。

## 4 结论

从中阶梯光栅的光学原理出发,以臭氧探测常用的紫外可见波段为例,阐述了基于中阶梯光栅的光谱定标装置的设计过程和设计方法,为该类光谱定标装置的设计提供了参考。

需要指出的是,该定标装置虽然实现了很精细的单色光输出,可以实现高光栅成像仪各像元位置处仪器线性函数的标定,但由于很难获得  $d$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  的准确数值,该装置必需经过校准后才能给出准确的波长定位精度,定标装置的波长校准可以用 Hg 灯等物理谱线灯或可调谐激光器等来完成。在定标时,应使会聚光源系统、后继准直光学系统的  $F$  数与该定标装置的  $F$  数相匹配。

### 参考文献:

- [1] Shen Zhong, Ge Zhijiang, Zhang Liantai. The principle of the spaceborne hyper-spectrum imager [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, 23(2): 28-34. (in Chinese)
- [2] Hong Yu, Wang Shurong, Song Kefei, et al. Design of solar spectral radiomet and out-field experiments in Lijiang [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 530-533. (in Chinese)
- [3] Ji Yiqun, Shen Weimin. Design and manufacture of offner convex grating hyper-spectrum imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 285-287. (in Chinese)
- [4] Chrien Thomas G, Green Robert O, Eastwood Michael L. Accuracy of the spectral and radiometric laboratory calibration of the airborne visible/Infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [C]//SPIE, 1990, 1298: 37-49.
- [5] Mark Folkman, Jay Pearlman, Lushalan Liao, et al. EO-1/ Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization and calibration [C]//SPIE, 2001, 4151: 40-51.
- [6] Jerry Zadnik, Daniel Guerin, Robert Moss, et al. Calibration procedures and measurements for the COMPASS hyperspectral imager [C]//SPIE, 2004, 5425: 182-188.
- [7] Zhu Cunguang, Qi Hongxing, Zhang Jun, et al. Investigations on the calibration method of grating response in the application of echelle [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(10): 1095-1099. (in Chinese)
- [8] Kees Smoreburg, Marcel Dobber, Erik Schenkeveld, et al. Slit function measurement optical stimulus [C]//SPIE, 2003, 4881: 511-520.
- [9] Wang Zhijiang. Optical Technology Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1994: 277-281.