

星载高分辨率超光谱成像仪分光方式的选择

汪逸群, 颜昌翔, 苗春安

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:从透光率、光谱范围杂散光、可靠性、色散线性、光谱带宽、成本等多个方面分析了超光谱成像光谱仪采用棱镜或光栅色散分光的优缺点。分析显示,棱镜光谱仪透过率高达95.24% (VNIR),而光栅的衍射效率仅为60%~70%。棱镜光谱仪的杂散光可达 10^{-4} ,而光栅的杂散光为 10^{-2} 。尽管光栅光谱仪的波长覆盖范围要比棱镜光谱仪好,但在 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$,棱镜光谱仪相对光栅光谱仪有优越性。此外,光栅光谱仪的色散基本为线性,但棱镜光谱仪的短波非线性问题可通过复合棱镜进行补偿,而且,棱镜光谱仪的可靠性好于光栅光谱仪。另外,两种光谱仪的光谱带宽和成本基本接近。这些结果表明,棱镜更适于星载高分辨率超光谱成像仪的分光。

关键词:超光谱成像仪;分光技术;棱镜色散;光栅色散

中图分类号:TP73 文献标识码:A

Choice of spectral-splitting modes in space-borne hyper-spectral imager

WANG Yi-qun, YAN Chang-xiang, MIAO Chun-an

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: This paper analyzes the advantages and disadvantages of two kind of splitting modes, prism splitting and grating splitting, from different points of view. The analysis indicates that the transmission efficiency of the prism spectrometer is 95.24% (VNIR) and the diffraction efficiency of the grating spectrometer is between 60% and 70%. Moreover, the stray light of the prism spectrometer is 10^{-4} and that of the grating spectrometer is 10^{-2} . Furthermore, the spectral covering ability of the sprism spectrometer is better than that of the grating spectrometer from $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$, although the latter has a good spectral working region. In the dispersion linearity aspect, the grating spectrometer are linear, but the nonlinear problem of shortwave for the prism spectrometer can be solved through a composite-prism. In addition, the prism spectrometer is more reliable than the grating spectrometer, but both the spectrometers are equivalent in the spectrum bandwidth and production cost. These results show that the prism splitting is more suitable for the space-borne high resolution hyper spectral imager.

Key words: hyper-spectrum imager; spectral-splitting technology; prism dispersion; grating dispersion

1 引言

超光谱成像仪是20世纪80年代在多光谱遥感成像技术的基础上发展起来的新一代光学遥感器。它以精细光谱分辨能力获取地表图像,对于探测地表构成及其变化具有特殊的识别能力。应用多数目光谱谱段的组合可以为农业、森林、矿产、水资源、军事等方面的用户提供大量相应的遥感图像产品^[1,2]。

超光谱成像仪是成像技术和光谱技术的有机结合,其光学系统一般由望远镜系统和光谱仪系统组成,光谱仪系统采用的分光技术直接影响整个超光谱成像仪的性能、结构复杂度、重量和体积等^[3]。目前超光谱成像仪的分光方式主要有棱镜色散型、光栅色散型、傅里叶变换型3种^[4],其中棱镜和光栅色散型光谱仪由于技术成熟度高而得到最广泛的应用。本文将从光谱仪器的透过率、杂散光、光谱范围、色散线性、光谱带宽等方面对这两种光谱仪器的技术性能做分析比较。

2 光谱仪器的透过率

2.1 棱镜光谱仪的透过率

辐射通量在棱镜中的损失包括棱镜表面的反射损失和棱镜材料吸收损失,根据费涅尔公式和朗伯-比尔定律可分别推导计算出棱镜表面的反射损失和材料吸收损失,从而得到棱镜的总透过率。

若选用 JGS_3 和 F_4 作为棱镜材料,经过计算可知,棱镜光谱仪透过率较高,可达88.76%(VNIR)或93.2%(SWIR)。如果VNIR棱镜表面镀增透膜,可减小6.5%的反射损失,透过率高达95.24%;SWIR光谱仪可以不镀增透膜。

2.2 光栅光谱仪的透过率

光栅光谱仪的主要光损失是反射损失和光栅光谱级次分离的损失。

反射光栅的反射损失主要由铝膜反射本领决定。但在成像光谱仪的光谱范围,特别是在VNIR光谱仪的光谱范围内,铝的反射率只有85%左右。

反射光栅的另一个损失是由光栅衍射能量的多级分布造成的。入射到光栅上的光能量,要分布到0级、 ± 1 级、 ± 2 级甚至更高级的光谱区,所能利用的光谱级(例如1级)能量只占入射光能量的一小部分,大部分能量都被分散到其它级次而成为杂散光的来源。现代光栅技术中有所谓的“定向”光栅,它可以把较多的能量“定向”在所要求的波长上,例如激光光栅,在定向波长处的能量可达95%以上。但是,它可工作的光谱范围却很窄。在成像光谱仪中,一般不采用定向光栅。此外,在光栅刻槽的非工作面,也会损失不少光能量。

根据目前的工艺水平,反射光栅可利用的光能量(衍射效率)一般在60%~70%,而且在使用波长范围内分布不均匀,在波长范围的两端,要降低到25%左右。

因此,从仪器透过率及在工作波长范围内透过率的均匀性方面考虑,棱镜式光谱仪具有无可争辩的优越性。

3 光谱仪器的杂散光

光谱仪器的杂散光是指在光谱仪器调定的波长上,其它波长的杂散辐射与调定波长带宽内的主辐射之比。

光栅光谱仪有多种杂散辐射源:首先是光栅的衍射能量分布,除工作光谱级的能量外,其他各级(零级、高级)光谱所分布的能量往往达40%以上。此外,光栅刻槽非工作表面的杂散光、光栅刻划误差形成的鬼线等,也都是产生杂散光的原因。在有出射狭缝的光栅单色仪中,杂散光约为 10^{-3} ,在没有出射狭缝的光栅式成像光谱仪中,杂散光可达 10^{-2} 。

而棱镜光谱仪却没有光栅光谱仪上述各种杂散光,它的杂散光来源主要是棱镜表面的反射,如果棱镜表面镀增透膜,则棱镜光谱仪的杂散光可达 10^{-2} 或更好。

综合上述两方面因素(透过率和杂散光),棱镜光谱仪比光栅光谱仪的光学信噪比可以高出1~2个数量级。

4 波长范围

一般而论,光栅光谱仪所能覆盖的波长范围要比棱镜光谱仪好得多。这是由于在很宽波长范围,色散棱镜材料很难满足良好透明性和大的色散等要求;而光栅光谱仪在这些方面都有明显的优越性。反射光栅可以在很宽波长范围内都有较高反射率;改变光栅刻线密度,就可以改变光栅色散,因此,反射光栅可以覆盖很宽的波长范围,甚至可以覆盖棱镜光谱仪不能工作的波长区域,如红外或远红外光谱区。因此,20世纪后半期光栅光谱仪得到飞速发展和广泛应用。

但是光栅光谱仪也有一些缺点,特别是受光栅自由光谱区的限制。就各种刻线密度的所有光栅而言,反射光栅可以覆盖很宽的波长范围,但对于特定光栅常数 d 的单块光栅而言,它能覆盖的波长范围受光栅自由光谱区限制。例如,一块刻线密度为 $1\ 200\ 1/\text{nm}$ 的光栅,它的自由光谱区为 $400\sim 800\ \text{nm}$,在 $800\sim 1\ 000\ \text{nm}$ 会出现 $400\sim 500\ \text{nm}$ 的二级光谱。如果是扫描型光栅单色仪,在扫描至某一波长时,于狭缝前置入前截止滤光片,即可滤去二级光谱。但在成像光谱仪中,谱面处是阵列探测器,光栅不做波长扫描,须在阵列探测器某一像元处镶嵌滤光片,这给阵列探测器的制作增加许多工艺困难。

因此,在成像光谱仪中,对于 $400\sim 1\ 000\sim 2\ 500\ \text{nm}$ 波段,只用两个棱镜就可以覆盖全部光谱区;而采用反射光栅,要在阵列探测器上镶嵌多个滤光片,而且可能要用多块光栅。

5 色散线性

光谱仪器的色散是指仪器对光辐射按波长展开的能力,它分为角色散($d\theta/d\lambda$)和线色散($dL/d\lambda$)。线色散表征在光谱仪器焦平面(阵列探测器)处相邻两线距离间所对应的波长间隔,与色散元件的角色散和聚光系统的焦距有关,实际中多应用线色散倒数表示。在最小偏向角位置,棱镜光谱仪的线色散倒数为:

$$\frac{d\lambda}{dL_p} = \sqrt{\frac{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}{2 \sin \frac{A}{2}}} \frac{1}{f_2 \frac{dn}{d\lambda}}, \quad (1)$$

式中, A 为棱镜顶角; $\frac{dn}{d\lambda}$ 为棱镜材料的色散; f_2 为光谱仪器聚光系统的焦距。

光栅光谱仪的线色散倒数为:

$$\frac{d\lambda}{dL_c} = \frac{d}{m} \cos \beta \frac{1}{f_2}, \quad (2)$$

式中, d 为光栅常数; m 为光谱级次; β 为光栅衍射角。

由式(1)可知,棱镜线色散强烈地取决于棱镜材料的色散 $dn/d\lambda$,在 $400\sim 600\ \text{nm}$,石英材料的 $dn/d\lambda$ 变化10倍以上,因此棱镜光谱仪的色散是非线性的。但是,从式(2)可知,光栅光谱仪的色散仅与光栅衍射角余弦有关,这个值变化很小,可以说,光栅光谱仪的色散基本上是线性的^[5]。在成像光谱仪中,色散线性直接影响光谱带宽的配准精度,即每个像元所对应的光谱带宽的一致性。在光栅光谱仪中,长、短波长光谱配准不超过0.4个像元。在棱镜光谱仪中,如果采用单块石英棱镜,光谱配准可大于10个像元。这显然是不允许的。但如果采用石英和 F_4 复合棱镜,可以补偿棱镜色散非线性,使光谱配准好于0.2个像元,从而做到棱镜光谱仪和光栅光谱仪的色散线性基本相当。

6 光谱带宽

光谱带宽是指当入射狭缝一定宽度时光谱仪器所能分解出的光谱带宽(半高宽 FHW)。

对于棱镜光谱仪,根据式(1)可知,光谱带宽为:

$$\Delta\lambda_p = \frac{d\lambda}{dL_p} \frac{S_1 + S'_2}{2} = \sqrt{\frac{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}{4 \sin \frac{A}{2}}} \frac{S_1 + S'_1}{f_2 \frac{dn}{d\lambda}}, \quad (3)$$

式中, S_1 为入射狭缝宽度; S'_1 为探测器像元宽度,一般取 $S_1 = S'_1$ 。

对于光栅光谱仪,根据式(2)可知,光谱带宽

为:

$$\Delta\lambda_c = \frac{d\lambda}{dl_c} \frac{S_1 + S'_1}{2} = \frac{d}{m \cos\beta} \frac{S_1 + S'_1}{2f_2}, \quad (4)$$

比较式(3)和(4)可知,光栅光谱仪的光谱带宽要比棱镜光谱仪的光谱带宽小得多。例如,一个顶角 $A = 60^\circ$ 的石英棱镜,在 $\lambda = 400 \text{ nm}$, 要比同狭缝宽度和同焦距长度的光栅光谱仪光谱带宽大一个数量级以上。

具有较高的光谱分辨本领(光谱带宽 $\Delta\lambda$ 较小)是一般光栅光谱仪的主要优点。但是,在航天成像光谱技术领域,光栅光谱仪高分辨率本领这一优越性并未得到真正发挥。因为在成像光谱技术中,还有一个地面像元分辨率(或称空间分辨率)制约着光谱分辨率。地面像元分辨率为^[6]:

$$\Delta L = \frac{H}{f} \Delta l, \quad (5)$$

式中, H 为飞行高度; f 为望远镜焦距; Δl 为探测器像元尺寸, 选定 $H = 600 \text{ km}$ 、 $f = 1.08 \text{ m}$ 、 $\Delta l = 0.036 \text{ mm}$, 可以保证地面像元分辨率 $\Delta L = 20 \text{ m}$ 。此时如果选通常 $1\ 200 \text{ l/mm}$ 的光栅, 则 $\Delta l = 0.036 \text{ mm}$ 的阵列探测器将给出 $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$ 的光谱带宽。

由于光谱仪器输出的光流量与光谱带宽的平方成正比, 在航天遥感仪器中, 探测器获取地物信号大小至关重要。显然, $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$ 的光谱带宽是不允许的。在成像光谱仪中, 通常取 $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$, 而由

$$\Delta\lambda = \frac{d\lambda}{dl} \Delta l$$

可以求得 $d\lambda/dl = 278 \text{ nm/mm}$ 。可见, 无论是光栅光谱仪还是棱镜光谱仪, 都不要有太高光谱分辨本领, 而不得不专门设计线色散为 278 nm/mm 左右的光谱仪。

因此, 从达到一定光谱带宽的角度说, 光栅光谱仪和棱镜光谱仪都不相上下。

7 其它性能

在可靠性方面, 棱镜光谱仪较光栅光谱仪工作可靠, 寿命耐久。

在制造成本方面, 棱镜需单件加工, 成本稍高, 而光栅可大量复制, 能降低成本。但对航天仪器, 不可能大量复制光栅, 因此光栅成本也不低。

综合上述分析, 将棱镜光谱仪与光栅光谱仪的主要性能比较列于表1。

表1 两种成像光谱仪主要性能比较

Tab.1 Comparison of main performance of two kind of spectral imagers

序号	性能	棱镜光谱仪	光栅光谱仪	结论
1	能量(透过率)	透率达95%	一级光谱衍射效率约为60%~70%, 两端约为25%	棱镜光谱仪较好(是光栅光谱仪的2~3倍)2光谱
2	光谱范围	0.4~1.0 μm 及 1.0~2.5 μm , 棱镜材料没有问题	在中、长波红外光谱区, 光栅有优越性。光栅式仪器为消除级次重叠, 须解决不少技术难题	在0.4~2.5 μm , 棱镜光谱仪较好
3	杂散光	只有反射表面散射光	有零级和高级光谱干扰及光栅刻划鬼线	棱镜光谱仪较好
4	可靠性	工作可靠, 寿命耐久	易损坏	棱镜光谱仪较好
5	色散线性	复合棱镜可补偿短波非线性	基本线性	二者接近
6	光谱带宽	受地面像元分辨率限制, 光谱带宽不要求很小, 棱镜尺寸可较小	光谱带宽不能太小	二者接近
7	成本	单件加工成本高	空间仪器没有批量复制问题, 成本不低	二者接近

8 结 论

超光谱成像仪已成为 21 世纪遥感技术发展的重点,分光技术选择的成功与否关系着超光谱

成像仪研制的成败。本文综合考虑透过率、光谱范围、杂散光、可靠性、色散线性、光谱带宽、成本等各方面的因素后认为棱镜分光更适合作为星载高分辨率超光谱成像仪的分光方式。

参考文献:

- [1] 禹秉熙. 高分辨率成像光谱仪(C-HRIS)研究[J]. 光机电信息,2000,17(4):1-5.
YU B X. Research of high resolution imaging spectrometer[J]. *Optics, Mechanics and Electronics Information*,2000,17(4):1-5. (in Chinese)
- [2] 沈中,朱军. 中国星载干涉型超光谱成像仪[J]. 航天器环境工程,2005,22(4):187-191.
SHENG ZH,ZHU J. China interference hyper-spectrum imager in satellite[J]. *Spacecraft Environment Eng.*,2005,22(4):187-191. (in Chinese)
- [3] 郑玉权,禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览[J]. 遥感学报,2002,6(1):76-79.
ZHENG Y Q,YU B X. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers[J]. *J. Remote Sensing*,2002,6(1):75-80. (in Chinese)
- [4] 李幼平,禹秉熙,韩昌元,等. 成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构[J]. 光学精密工程,2006,14(6):974-979.
LI Y P,YU B X,HAN CH Y,et al. . Tradeoff optimization design of optical configuration on imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(6):974-979. (in Chinese)
- [5] 包学诚. 光谱仪器[M]. 北京:机械工业出版社,1985.
BAO X CH. *Spectrum Instrument*[M]. Beijing:Mechanics Industry Press,1985. (in Chinese)
- [6] 陈世平. 空间相机设计与试验[M]. 北京:宇航出版社,2003.
CHEN SH P. *Spaceborne Camera Design and Test*[M]. Beijing:Navigation and Avigation Press,2003. (in Chinese)

作者简介:汪逸群(1983—),男,湖北鄂州人,研究实习员,硕士研究生,主要从事空间光学遥感技术的研究工作。

E-mail:hitwyq@yahoo.com.cn