

文章编号 1004-924X(2006)06-0974-06

成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构

李幼平^{1,3}, 禹秉熙², 韩昌元², 李柱^{2,3}

(1. 北京市地理信息研究所, 北京 100011;

2. 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;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:对应用需求、卫星可提供资源和技术能力等方面进行综合工程技术权衡,提出了总体优化的光学结构设计方案。设计了在 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 工作,焦距为800 mm,焦比为4.5,视场为 1.43° 的非球面三反射镜望远镜和棱镜色散非球面准直-成像光学结构的新型成像光谱仪,其调制传递函数(MTF)达到 $0.44\sim 0.62$,光谱分辨率为 $3\sim 23\ \text{nm}$,仪器的总重量约为70 kg。在焦平面器件性能和信噪比等技术指标相同的情况下,如果用光栅或干涉式傅里叶变换光谱仪,则需要FN在3以下,仪器的总重量将 $>100\ \text{kg}$ 。取得了成像光谱仪分辨率高、积分时间短,焦平面器件接受的辐射能量弱等参数条件下的权衡优化设计。

关键词:卫星遥感;权衡优化;望远镜;成像光谱仪

中图分类号:TP752;TH744.1 **文献标识码:**A

Tradeoff optimization design of optical configuration on imaging spectrometer

LI You-ping^{1,3}, YU Bing-xi², HAN Chang-yuan², LI Zhu^{2,3}

(1. *Beijing Institute of Geography Information, Beijing 100011, China*; 2. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 3. *Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China*)

Abstract: Using the tradeoff optimization of the application requirement and the available technology, an optimized optical system was introduced to design a new type of imaging spectrometer consisting of a three-mirror-off-axis anastigmat (TMA), a dispersive prism and an asphere mirror collimating and imaging system. This kind of imaging spectrometer works over the spectral region of $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ and the focal length is 800 mm, $\text{FN}=4.5$, $\text{FOV}=1.43^\circ$, the MTF can reach $0.44\sim 0.62$, spectrum resolution is about $3\sim 23\ \text{nm}$, and the total mass is about 70 kg. While the FN must be within 3 and the total mass will reach 100 kg if uses the type of imaging spectrometer of grating or interference Fourier transform spectrometer at the condition of the same properties of focal plane elements and SNR. It is showed that the system has an optimum configuration in high resolutions of ground and spectrum, short integral time and low accepted radiant energy, it can be used in selecting the optical

收稿日期:2006-03-14;修订日期:2006-10-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40675083)

configuration especially.

Key words: satellite remote sensing; tradeoff optimization; telescope; imaging spectrometer

1 引言

卫星对地观测遥感正在发展一种地面分辨率为数十米,光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda=100$,具有波长上相邻接的一、二百个窄带光谱通道的高分辨率成像光谱仪(也称超光谱成像仪),该光谱仪在农、林、水、土、矿等资源调查和环境监测等领域有广阔的应用前景。已经研制的高分辨率成像光谱仪有美国 Lewis 小卫星上的 HSI^[1]、NEMO 卫星上的 COIS^[2]、EO-1 卫星上的 Hyperion^[3]、MightySat 卫星上的 FTHSI^[4],以及英国小卫星上的 CHRIS^[5]等。

高分辨率成像光谱仪采用一维视场(1-D FOV)望远镜和光谱仪相结合的光学结构,在其分光光谱的成像焦平面上用面阵列(2-D)探测器采集数据,卫星飞行沿轨迹方向推扫(也称帚扫 Pushbroom)成像。成像光谱仪光学系统有几种不同的望远镜和光谱仪结构可供选择^[6,7]。光谱仪的分光方法也有光栅色散型、棱镜色散型和干涉式傅里叶变换型等三种。

成像光谱仪技术方案必须在应用需求,卫星可提供资源和技术能力等方面进行综合的工程权衡,优选光学结构,确定仪器参数。高分辨率成像光谱仪的地面和光谱分辨率都很高,积分时间短,焦平面器件接受的辐射能量弱,这是比较技术方案、优选光学结构时工程权衡考虑的重点。

为设计一种卫星上轻量化的高分辨率成像光谱仪,在工程权衡光学方案的基础上优选了望远镜和光谱仪的光学结构。望远镜采用离轴非球面三反射镜系统,研制了棱镜色散,非球面准直和成像的新光学结构光谱仪,并采用一个光谱仪覆盖可见至短波红外(0.4~2.5 μm)光谱区的光学设计方案。为了减少体积和重量,采用小口径的光学系统,用望远镜前的指向反射镜沿轨道方向摆动,视轴相对地面运动补偿(GMC)增加积分时间的方法提高信噪比^[8]。这一光学结构具有结构简单、重量轻、辐射能利用率高、成像质量好的特点,并能够满足应用要求的技术指标和性能,在卫星资源(体积、重量)限制和当前技术能力下能够实现。

2 技术方案的工程权衡

2.1 工程技术权衡

成像光谱仪的光学结构和仪器参数(焦距、口径、光效率等)是根据应用任务要求的性能指标(地面分辨率,光谱分辨率,幅宽,信噪比等)和焦平面器件的规格性能(阵元尺寸、数目、探测率、光谱响应等),在卫星提供的资源(体积、重量、电功率等)的约束条件下进行综合的工程技术权衡、总体优化方案而确定的。这些参数和指标是相互制约的。信噪比(SNR)方程是工程上权衡技术指标和仪器参数的主要依据。

遥感信噪比(SNR)方程可表示为:

$$\text{SNR} = \frac{A_D^{1/2}}{4FN^2} t_m^{1/2} \times \tau_a(\lambda) \times E(\lambda) \times D^*(\lambda) \times \rho(\lambda) \times \cos(z) \times \Delta\lambda$$

式中, A_d —探测器像元面积

$FN(=f/D)$ —光学系统焦比,

f —光学系统焦距,

D —光学孔径

$\tau_o(\lambda)$ —光学系统透过率

$\tau_a(\lambda)$ —大气路径光谱透过率

$E(\lambda)$ —太阳在地面光谱辐照度

z —太阳天顶角

t_m —积分时间,探测器在卫星飞行时地面像元上驻留时间

$D^*(\lambda)$ —探测器件的探测率($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)

$\Delta\lambda$ —光谱带宽(半峰值宽度)

根据应用需求的地面分辨率和光谱分辨率要求,只要选定了焦平面器件(像元尺寸),望远镜的焦距、光谱仪的狭缝及线色散等就被确定了。但是为了在焦平面上获得足够的辐射能量,还需要调整和确定一些其它参数,如:相对口径 $D/f=FN^{-1}$;探测器阵元尺寸 A_d ;光学系统总透过率 $\tau_o(\lambda)$;探测率 $D^*(\lambda)$ (或量子效率 $\eta(\lambda)$ 和噪声电子数 N_e);积分时间 t_m 等。采用如下不同的技术方法,选择、确定和调整这些参数,可使光学结构提

供的焦平面辐射能量满足信噪比要求。

(1) 加大光学口径是增强辐射能量的直接方法(辐射能量同相对口径的平方成正比($(D/f)^2 = FN^{-2}$)),但这时要增加仪器的体积和重量。

(2) 选择像元尺寸 A_d 大的探测器,加宽光谱仪的狭缝来增加辐射能量,但这时望远镜焦距要加长。

(3) 选择光学总透过率 $\tau_o(\lambda)$ 高的光学结构,减少辐射损失。

(4) 观测过程中使仪器的视轴在地面的驻留时间长,增加探测器的积分时间 t_m 来提高辐射能量。

(5) 选择探测率 $D^*(\lambda)$ 高的器件,虽然未增加辐射能量,但提高了信噪比,同增加辐射能量的效果是一样的。

美国 TRW 公司为 Lewis 小卫星和 EO-1 卫星研制的两个成像光谱仪 HSI 和 Hyperion,其焦距都很长(分别为 $f=1.04$ m 和 1.4 m);为减轻仪器重量,相对口径都选得比较小,分别为 $D/f=1/8.3$ 和 $D/f=1/14$;光学口径都是 $D=150$ mm,这样的配置减轻了仪器的重量(两个仪器都小于 40 kg),同时它用探测器阵元尺寸大($A_d=60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$)的器件和加宽光谱仪狭缝的方法弥补了口径小而减少的辐射能量。

NEMO 卫星上的 COIS,其光谱仪采用全息光栅作为色散元件,衍射效率低(20~40%),探测器的阵元尺寸也小($A_d=18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$),所以采用了相对口径大的光学系统($D/f=1/2.4$),但是由于它的焦距短($f=360$ mm),其口径($D=150$ mm)也不算大,所以仪器的重量也不重(40 kg)。

英国的 CHRIS(光谱范围 $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$)采用了棱镜色散的光谱仪,其光透过率 $\tau_o(\lambda)$ 高,所以采用了相对口径小的光学系统($D/f=1/6$),虽然焦距长($f=746$ mm),但是口径不大($D=120$ mm),因此仪器的重量很轻(14 kg)。

COIS、Hyperion、CHRIS 等都采用了仪器的观测视轴对地面运动补偿(GMC)增加积分时间的方法提高信噪比,这也是当前焦平面器件帧频限制条件下为获得地面分辨率高的图像不得不采取的措施。

2.2 光学系统优选

高分辨率成像光谱仪的地面分辨率高,这样光学系统的焦距就长。若用相对口径大的光学系统来满足所要求的辐射能量、仪器的体积和重量就增加很多,有时卫星资源承受不了。用镜面数少的望远镜和分光效率(透过率)高的棱镜光谱仪组成的光学结构提高系统总透过率 $\tau_o(\lambda)$,就可以减少口径。

本文为设计在卫星高度 800 km,地面像元分辨率(GSD) 20 m,在可见至短波红外光谱范围($0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$)工作,光谱分辨率 10 nm 左右的高分辨率成像光谱仪,优选了非球面三反射镜望远系统(TMA),设计了棱镜色散非球面准直和成像的新光学结构光谱仪。

2.2.1 望远镜方案选择

成像光谱仪的望远镜方案中采用了离轴非球面三反射镜(TMA)光学结构,同其它方案相比较,具有结构简单、无中心遮拦、镜面数小、辐射能量利用效率高、工作的光谱范围宽的优点。把望远镜设计为像方远心光路系统,能够获得全视场均匀、像质好的图像。随着非球面光学技术发展,成像光谱仪和其它遥感系统中越来越多的采用 TMA 望远镜结构。如 HSI、COIS 和 Hyperion 都用了 TMA 型望远镜。

2.2.2 光谱仪方案比较与优选

成像光谱仪的光谱仪,用一维视场(1-D FOV)望远镜的情况下有三种可选的分光方式:光栅色散、棱镜色散和干涉式傅里叶变换型光谱仪。它们都需要狭缝,对望远镜和焦平面器件的要求也基本相同。这三种分光方式的光谱仪中棱镜色散光谱仪的辐射能量利用效率最高,杂散光也比较小,用非球面光学技术可以把以往棱镜光谱仪的结构简化。棱镜和光栅光谱仪的准直和成像系统大致相同,它们的辐射利用效率主要取决于色散元件的效率。棱镜的辐射能利用率就是光经过棱镜的透过率(光损失主要是表面反射),在工作的全光谱范围可达 90%左右。光栅的辐射能利用效率就是它的衍射效率。光栅的衍射效率在闪烁波长处最高也只有 70%,其它波长迅速下降,工作波长的两端不足 30%。同棱镜相比较大多数波长上的效率低 2 倍以上(若用全息光栅其效率更低只有 20-40%)。此外,还有二级光谱叠

加等问题。用一维视场望远镜同干涉仪组成的傅里叶变换型成像光谱仪中要采用空间调制型干涉仪,由于它是带狭缝的干涉仪,没有传统的傅里叶变换光谱仪那样的大孔径、高通光量的特性(从光谱分辨率要求来说干涉式光谱仪不需要狭缝,因此它有大孔径特性,但在成像光谱仪中为了地面分辨率需要用狭缝,它不是光谱分辨需要的,因此没有大孔径特性。现在正在研究一种用二维视场望远镜和无狭缝的干涉仪相组合的成像光谱仪方案,但由于它有其它问题不适用于高分辨率成像光谱仪^[9])。干涉仪获得的亮、暗干涉条纹分布在比色散型光谱仪的光谱波段通道数目多的阵列探测器像元上,分散了辐射,探测器像元上的辐射能量比色散型弱。另外,为了把入射光分成相干涉的两束光,用了一个半反射-半透射的分束板,两束光都来回两次经过这个分束板,又损失了一半以上的辐射能量。所以干涉仪的辐射能量利用效率反而比光栅或棱镜色散型成像光谱仪低,这一点同一般的傅里叶光谱仪(不成像)是不同的。干涉成像光谱仪获得的是干涉图,对它进行傅里叶变换后才能得到光谱,这在数据处理,辐射与光谱定标方面也带来很多困难和问题。

利用非球面光学技术能够设计一种棱镜色散型的光谱仪,其结构简单,可用一个光谱仪覆盖可见至短波红外光谱范围工作。

由于棱镜光谱仪的辐射能量利用效率比光栅光谱仪高 2 倍以上,相对口径可以减少 $\sqrt{2}=1.4$ 倍,如果棱镜光谱仪的口径为 $FN=4.5$,那么光栅光谱仪则需要 $FN=3.2$ 或更小才能得到相同的辐射能量,而且光栅型光谱仪要用两个光谱仪才能覆盖 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 光谱范围,所以棱镜光谱仪能够减轻很多重量。

尽管这种光学结构的辐射能量利用率高,但是仍然需要观测视轴相对地面运动补偿(GMC)增加积分时间。对卫星高度 $H=800\ \text{km}$,地面像元分辨率 $GSD=20\ \text{m}$ 来说,卫星地面运动速度约为 $v=6.6\ \text{km/s}$,积分时间为 $3\ \text{ms}$,那么要求焦平面器件的帧频 $f_0=330\ \text{Hz}$ 。 $3\ \text{ms}$ 的积分时间太短,不能满足信噪比要求的能量,而且实现 $330\ \text{Hz}$ 帧频的焦平面器件也是很困难的。因此选用地面运动补偿(GMC)1:2 或 1:4,把积分时间增

加 2 或 4 倍, $3\ \text{ms}\times 2=6\ \text{ms}$ 或 $3\ \text{ms}\times 4=12\ \text{ms}$,器件的帧频降低到 $330\ \text{Hz}\div 2=165\ \text{Hz}$ 或 $330\ \text{Hz}\div 4=83\ \text{Hz}$,则能够提高信噪比。

3 光学结构设计

3.1 光学和焦平面器件参数选择

焦平面器件在 VNR($400\sim 1\ 000\ \text{nm}$)光谱区用 CCD 像元尺寸 $A_d=20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$,规格 1024×256 像元。在 SWR($1\ 000\sim 2\ 500\ \text{nm}$)光谱区用 HgCdTe 像元尺寸 $A_d=20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$,规格 $1\ 024\times 256$ 。根据卫星高度 $H=800\ \text{km}$,地面像元分辨率 $GSD=20\ \text{m}$, $A_d=20\ \mu\text{m}$,则望远镜焦距 $f=\frac{800\ \text{km}}{20\ \text{m}}\times 20\ \mu\text{m}=800\ \text{mm}$, $FN=4.5$,像元视场(即光谱仪入射狭缝)为 $20\ \mu\text{m}\times 20\ \text{mm}$,视场角 $FOV=\arctan(20/800)=1.432^\circ$,地面幅宽 $GW=800\ \text{km}\times \frac{20}{800}=20\ \text{km}$ 。

3.2 望远镜

望远镜为离轴非球面三反射镜(TMA)系统。为了减少前置指向反射动镜(为了仪器视轴相对地面运动补偿增加积分时间,需要沿轨道方向摆动)的尺寸,把入射光瞳设置在指向反射镜上,并设计为像方远心光路,把光谱仪设计成物方远心光路,这样望远镜的像面就不用放场镜就可以实现光瞳匹配,光谱仪无轴外渐晕。

望远镜光学系统如图 1 所示,图 2 为望远镜的调制传递函数(MTF)曲线。在 Nyquist 频率($f_n=25\ \text{lp/mm}$)的 $MTF(25\ \text{lp/mm})=0.90$ 。

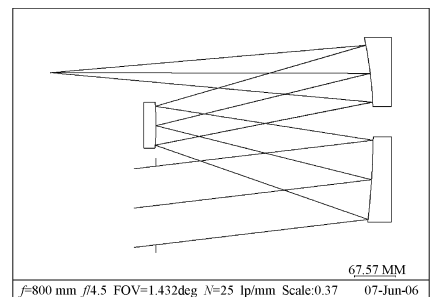


图 1 望远镜光学系统

Fig. 1 Optical system of telescope

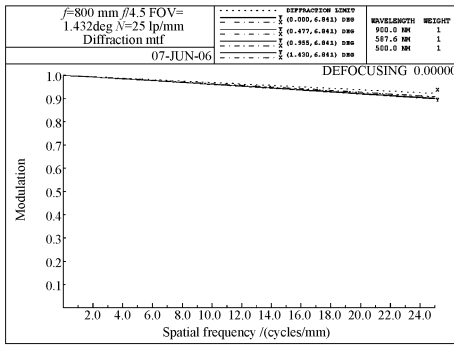


图 2 望远镜的调制传递函数(MTF)曲线

Fig. 2 MFT curve of telescope

3.3 光谱仪

棱镜光谱仪采用非球面准直和成像镜结构,取消了离轴全球面光谱成像仪(OASIS)的校正透镜等,也取消了利特罗反射镜而直接在棱镜背面镀反射膜。光谱仪入射和出射狭缝的放大倍率为一倍,入射和出射相对口径同望远镜匹配 $FN=4.5$,光谱仪的准直和成像镜焦距 $f=400$ mm。

光谱仪的色散元件为复合棱镜,像面是平场、平谱面。其谱面色散 VNIR(400~1 000 nm)为 1.56 mm,用 CCD 的 78 个像元采集,SWIR(1 000~2 500 nm)为 3.10 mm,用 HgCdTe 器件的 155 个像元采集。在光谱仪成像光路上用一个分色片把 VNIR 和 SWIR 谱段分开,分别成像在 CCD 和 HgCdTe 焦平面器件上。图 3 为光谱仪的光学结构图,表 1 是光谱仪的色散值和全视场平均调制传递函数。

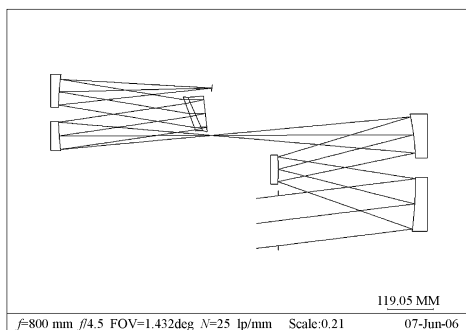


图 3 光谱仪的光学结构

Fig. 3 Optical configuration of spectrometer

表 1 光谱仪的色散值和全视场平均调制传递函数

Tab. 1 Dispersion values and full view average MFTs of spectrometer

λ (nm)	MTF(25 lp/mm)	$\Delta\lambda$ (nm/0.040 mm)
400	0.486	3
500	0.503	4.9
600	0.503	7.4
700	0.500	10
800	0.492	12.5
900	0.485	14
1000	0.475	15
1500	0.623	23
2000	0.548	17.4
2500	0.443	13.4

在光谱范围用离轴非球面三反射镜望远镜和一个棱镜色散光谱仪组成的这一高分辨率成像光谱仪其仪器的总重量约为 70 kg,在焦平面器件性能和信噪比等技术指标相同的情况下,若用光栅或干涉式傅里叶变换光谱仪,无论望远镜采用何种光学结构,FN 都要小于 3,仪器的总重量将大于 100 kg。

4 结 论

星载高分辨率成像光谱仪为了减少体积和重量,在有些卫星上不能用大口径光学系统。采用非球面三反射望远镜和棱镜色散非球面准直-成像光谱仪结构,用提高光学总透过率的方法增加了辐射能量,满足了信噪比要求。成像光谱仪的望远镜为像方远心光路,其光瞳设在指向反射镜上,有效地降低了动镜的重量,结构简单、重量轻、无中心遮拦、镜面少、辐射能利用率高。把光谱仪设计成物方远心光路,同望远镜光瞳直接匹配,不需要在望远镜像面上放置场镜,光谱仪无轴外渐晕,用一个光谱仪能够覆盖可见到短波红外(0.4~2.5 μm)光谱范围工作,用复合棱镜修正非线性色散,满足光谱分辨率要求。运用非球面光学技术简化了以往离轴全球面光谱成像系统(OASIS)的结构,还取消了利特罗反射镜,而在棱镜背面镀反射膜,直接从棱镜反射的方法,简化了结

构,减轻了重量。在实验室光谱仪器中现在很少用的棱镜色散光谱仪,在高分辨率成像光谱仪中都找到了用途,展现了它的优越性。

在工程上综合技术权衡优化这种轻量化、辐

射能量效率高的光学结构,对高分辨率成像光谱仪这样辐射能量弱但要求仪器轻量化情况,是一种好的光学方案。

参考文献:

- [1] WILLOUGHBY C T, MARMO J, FOLKMAN M A. Hyperspectral imaging payload for the NASA small satellite technology initiative program[C]. 1996 *IEEE Aerospace Appl. Conference. proc.* 1996, 2: 67~79.
- [2] WILSON T L, DAVIS C O. Naval EarthMap Observer (NEMO) satellite[J]. *SPIE*, 1999, 3753: 2-11.
- [3] FOLKMAN M A, PEARLMAN J, LIAO L B, *et al.* EO-1/hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration[J]. *SPIE*, 2001, 4151: 40-51.
- [4] YARBROUGH S, CAUDILL T R, KOUBA E T, *et al.* MightySat II. 1 hyperspectral imager: summary of on-orbit performance[J]. *SPIE*, 2002, 4480: 186-197.
- [5] CUTTER M A, LOBB D R, WILLIAMS T L, *et al.* Integration and testing of the Compact High-resolution Imaging Spectrometer (CHRIS)[C]. *SPIE*, 1999, 3753: 180-191.
- [6] BLECHNINGER F, CHARLTON D E, DAVANCENS R, *et al.* High-resolution imaging spectrometer (HRIS); optics, focal plane and calibration[J]. *SPIE*, 1993, 1937: 207-224.
- [7] BLECHINGER F, HARNISCH B, KUNKEL B P. Optical concept for high-resolution imaging spectrometers[J]. *SPIE*, 1995, 2480: 165-179.
- [8] ROCKEY D E. High-resolution imaging spectrometer: a major advance in imaging spectroscopy[J]. *SPIE*, 1990, 1298: 93-104.
- [9] SLOUGH W J, RAFERT B, ROHDE C A, *et al.* THRIFTI: tomographic hyperspectral remote imaging Fourier transform interferometer[J]. *SPIE*, 1998, 3393: 207-216.

作者简介:李幼平(1965—),女,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事卫星遥感应用研究工作。E-mail:liyoup@sohu.com

(本栏目编辑 严寒)