文章编号:1002-2082(2007)04-0412-04

多波段空间推扫相机光学系统设计

张祥翔,傅雨田

(中科院上海技术物理研究所,上海 200083)

摘 要:空间推扫相机的光学系统要求具有大视场、大口径、低F数等特点,据此设计了一种3波 段光学系统。在参考国内外各种扫描或推扫相机结构的基础上,根据像差理论和系统要求,采用有 效的分光方式和紧凑的光路结构,对不同的波段采用不同的像差校正方法,以及对系统优化组合 后,最终得到了一个实用的光学系统。该系统包括可见、中波红外和长波红外波段,视场达到2.93° ×0.3°,可见波段的F数为3.8,中波和长波波段的F数为1.9。从设计结果可以看出,系统3个波段 的光学调制传递函数(MTF)都接近衍射极限。

Optical system design for multi-band push-broom space camera

ZHANG Xiang-xiang, FU Yu-tian

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A multi-band optical system was designed for the push-broom space camera covering visible, medium infrared and far infrared wavebands. The system has large aperture and low F number due to the requirement of large FOV. With the reference to various scanning and push-broom cameras at home and abroad, an optimized compact optical system was achieved by an effective beam-splitting approach, in which the aberrations of three channels were corrected respectively according to the aberration theory and system requirement. The field-of-view of the optical system is $2.93^{\circ} \times 0.3^{\circ}$, and F number for the visible light is 3.8 while F number for both of medium infrared and far infrared is 1.9. The design result indicates that the optical modulation transfer functions of the three bands within the cut-off frequency are all close to the diffraction limitation.

Key words: space optical design; large field-of-view; large aperture; optical transfer function

引言

采用高分辨率、多波段的空间红外推扫成像系 统获取地面目标的红外图像信息是星载相机对地 观测的一项重要内容。多波段探测,包括可见、中波 和长波探测,是星载相机对地观测系统的一项关键 技术。可见、中波和长波是3个重要的大气窗口,可 以获取重要的气象和军事信息。推扫成像可以使每 一探测器获得较长的积分时间,不仅有利于提高探 测器的信噪比,还可以获得较高的灵敏度。因此设 计具有大光学口径,大视场角,高分辨率的多波段 光学系统在空间对地观测中具有重要意义。

国内外研究机构纷纷研制适合于推扫的,F数

收稿日期:2006-12-19; 修回日期:2007-01-24

作者简介:张祥翔(1981-),女,南京人,上海技术物理所硕士研究生,主要从事光学设计、像差分析和光学装校工作。E-mail:xiangxiang_zhang@163.com

更小且分辨率更高的多波段相机。文献[1]中的红 外双波段卡塞格林光学系统,其F数为2.6,视场角 为2.6°,分辨率为176 μ rad,具备短波和中波2 个波 段,采用非制冷红外焦平面;文献[2]的 SABER 仪 器望远镜光学系统F数达到2,视场角为0.6°,分辨 率为1 mrad,采用扫描方式可得到12 个波段的图 像;文献[3]的TIRI 光学成像仪采用推扫式成像,F 数为2.3,视场角为0.63°,分辨率为42.8 μ rad,只 有1 个8 μ m~12 μ m 红外波段。

本文设计的多波段空间推扫相机的光学系统 较之已有的光学系统有以下几个特点:多波段同时 成像(包括可见、中波和长波);视场角大(约为3°); 红外波段分辨率达到 50 µrad,可见波段分辨率达 到 12.5 µrad;F 数较小(有利于在观测中收集更多 的能量)。

1 设计过程和思想

1.1 系统参数确定

首先根据可见、中波和长波这 3 个大气窗口确 定探测波段。可见光为 0.54 μ m~0.7 μ m,中波为 3 μ m~5 μ m,长波为 8 μ m~10 μ m。

为了确定系统焦距、光学口径、系统F数,考察 光学系统的衍射极限在无限远点被理想光学系统 所形成的衍射图样中第一暗环半径,其计算公式为

$$a = \frac{1 \cdot 22 \cdot \lambda}{D} \cdot f'$$

在波长最大为 10 μ m 时,选用像元尺寸为 28 μ m 的探测器,第一暗环半径要求小于 28 μ m, 则系统的F 数小于2.3。为了实现高分辨率观测,衍 射极限的分辨角要小于 50 μ rad,因此光学系统的 口径需大于245 mm。从几何像差的角度分析,瞬时 视场角不可能小于衍射极限的分辨角 50 μ rad,光 学系统的焦距应大于560 mm。综合以上各个因素, 最终确定此光学系统在红外波段的口径为 290 mm,焦距为 560 mm,F 数为1.9,瞬时视场角 为 50 μ rad。在可见波段,探测器是像元尺寸为 14 μ m 的 CCD,衍射极限的分辨角很小,因此焦距 可以再增大,取可见波段的焦距为1 120 mm,这样 可见波段的瞬时视场角是 12.5 μ rad, F 数为3.8, 口径仍为 290 mm。

为配合长线列推扫的需要,要求光学视场为土 1.465°×(±0.15°),这样在红外波段可用1024元 的长线列探测器接收,在可见波段可用4096元的 长线列探测器接收。 另外,为了减轻系统质量和体积对光学装校带 来的压力,整个光学系统的最大长度控制在1.4 m 以内。

1.2 光学系统的结构

在空间光学系统设计中,可选的结构不外乎折 射系统、反射系统和折反射系统。折射系统在红外 波段可选的透射材料比较少,二级色差也很难校 正。而对反射系统来说,如果是同轴系统,视场角不 能做得很大,否则离轴系统在装调时也很困难。

因此,笔者决定选用折反射系统。反射部分采 用离轴共焦的双反射抛物面结构,这样的结构没有 中心遮拦,光线以平行光入射和出射,不仅有利于 进一步分光,而且出射的平行光只有初级场曲,这 对后面光路的像差校正很有益处。折射部分为各个 波段的校正镜组。

本系统采用通道分光的方式,从第2个抛物面 出射的平行光,先经过第一分色片分为可见和红外 2个波段,其中可见光路由一组校正镜校正像差。 红外光路继续经过第二分色片,被分为中波和长波 2个波段,分别由一组校正镜校正像差。第一分色 片和第二分色片都采用锗作为其基片,第一分色片 采用可见反射和红外透射的方式,红外透射的效率 可以达到 85%以上,反射的效率可以达到 90%以 上;第二分色片采用传统的长波透射及中波反射的 方式。这2种分色片在工艺上都是可以实现的。

另外,在长波红外波段,为了抑制背景辐射,需 要对探测器进行制冷,为达到较好的制冷效果,最 好能实现100%的冷光阑效率,这样就要求冷光阑 能够加在出瞳上,在光学结构上就要求出瞳位于像 面前一定距离处。

2 设计实例

根据以上设计要求,用 Zemax 设计了具有可 见、中波、长波 3 波段光学系统,该光学系统的 y-∞ 平面图如图 1 所示。



图1 3波段光学系统

Fig. 1 The layout of the three-waveband optical system

可见波段的校正镜组的 x-y 平面图如图 2 所 示,图 3 是可见波段的 MTF 图。



图 2 可见波段校正镜组 x-y 平面图

Fig. 2 Layout of correcting lens combination for





图 3 可见波段MTF

Fig. 3 MTF of visible spectrum range

可见波段的校正镜组全是球面型,材料分别选 用K5、ZF10、LAK5、F3、BAF15种牌号的玻璃,能 较好地校正色差和单色像差。

中波红外波段的校正镜组的*x*-y平面图如图4 所示,图5是中波红外波段的MTF图。



图 4 中波红外校正镜组 x-y 平面图

Fig. 4 Layout of correcting lens combination for mid-IR band in x-y plane

中波红外波段的校正镜组也全是球面型,为了 校正色差,需用到锗和硅2种透镜材料,在像面前 的透镜主要是校正场曲。若中波红外波段需要制 冷,可以把最后一块透镜连同探测器一起安装在冷 箱里。

长波红外波段的校正镜组如图 6 所示,图 7 是 长波红外波段的 MTF 图。

在长波红外波段的校正镜组中,沿光线传播方向上第1和第3个透镜的凹面用到了非球面,其二

次非球面的conic 系数分别是0.24 和0.95。长波校 正镜的材料全部选用锗。





Fig. 5 MTF of mid-IR band

图 6 长波红外校正镜组 x-v 平面图

Fig. 6 Layout of correcting lens combination for longwave infrared region in x-y plane



图7 长波红外MTF

Fig. 7 MTF of long-wave infrared region

在长波校正光路中有1个实像面,这是为了 使出瞳的位置能处在像面前。 这个实像面使长波 光路的长度明显增加,系统长度过长,会使系统 重量增加,从而导致装校困难。 因此本设计在系 统长度一定的情况下,牺牲了一定的像斑质量。

仅仅校正像面的单色像差是不够的,由于要 加冷光阑,并且出瞳处的光阑像差也比较小,这 样使冷光阑的口径比较小,可以减少背景杂光的 进入。从长波y-z平面的光路图(参见图8)可以看 出,在位置A(即高斯光学出瞳位置处),若没有光 阑像差,则可以达到100%冷光阑效率,但由于大 视场带来的光阑像差难以校正,在位置B处可以 实现最大80%的冷光阑效率。冷光阑效率是指景 物到达指定像素的总立体角与整个热挡板处冷屏 开口到达同一像素的总立体角之比。图8 中C 为探 测器所在位置。



图 8 长波红外校正镜组出瞳示意图

Fig. 8 Exit pupil of correcting lens combination for long-wave infrared region

3 结论

笔者设计的用于多波段空间推扫相机的光学 系统实现了高分辨率、大视场、大口径以及可见、中 波、长波3波段分光。该光学系统可见波段的口径 为290 mm,焦距为1120 mm,红外波段的口径仍为 290 mm,焦距为560 mm,视场达到±1.465°×(± 0.15°),并且这3个波段系统都达到了接近衍射限 的像质。

参考文献:

 [1] 樊学武,马臻,陈荣利,等. 红外双波段卡塞格林光学 系统设计[J]. 光子学报,2003,32(4):463-465.
 FAN Xue-wu, MA Zhen, CHEN Rong-li, et al. The design of Cassegrain optic system for double infrared wavebands[J]. Acta Photonica Sinica,

(上接第411页)

crystal with moving grating: theory and experiments[J]. J. Appl. Phys. ,1985, 58(1):45-57.

[15] DELAYE P, BLOUIN A, DROLET D, et al. Detection of ultrasonic motion of a scattering surface by photorefractive InP:Fe under an applied dc field[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1997, 14(7): 1723-1734. 2003, 32(4):463-465. (in Chinese)

- [2] ESPLIN R, BATTY C, JENSEN M, et al. SABER instrument overview [J]. SPIE, 2000, 2268: 207-216.
- [3] PERALDI A. Space optical instrument for earth observation: the polar platform era [J]. SPIE, 1982,972:135-142.
- [4] 潘君骅.关于大望远镜卡焦 R-C 系统视场改正镜设 计的研究[J].光学精密工程,2002,10(3):231-234.
 PAN Jun-hua. Research on the field corrector design for the R-C system of the large telescope Cassegrain focus [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(3):231-234. (in Chinese)
- [5] 潘君骅.大口径红外成像系统的光学设计[J].光学 学报,2003,23(12):1475-1478
 PAN Jun-hua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12):1475-1478.
 [6] 左保军,张爱红.成像光谱仪的光学系统设计[J].光
- [6] 左保年,张麦红. 放家元盲仪的元子系统设计[J]. 元 学技术,2002,28(33):187-190. ZUO Bao-jun, ZHANG Ai-hong. Optical system design of the imaging spectrometer [J]. Optical Technique,2002,28(33):187-190. (in Chinese)
- [7] 张良.中波红外变焦距系统的光学设计[J].应用光 学,2006,27(1):32-34.
 ZHANG Liang. Optical design for middle infrared zoom system[J]. Journal of Applied Optics,2006,27 (1):32-34. (in Chinese)
- [8] 袁旭沧.光学设计[M].北京:科学出版社,1983.
 YUAN Xu-cang. Optical design [M]. Beijing: Science Publishing House, 1983. (in Chinese)
- [16] 石顺祥,关义春,安毓英,等.光致折射晶体中双光束
 耦合的动态特性研究[J].中国激光,1989,16(8):
 462-467.
 SHI Shun-xiang, GUAN Yi-chun, AN Yu-ying, et

al. Study of dynamical properties of TWM in photorefractive crystals [J]. Chinese Journal of Lasers, 1989,16(8), 462-467. (in Chinese)