

单探测器共孔径多光谱成像系统设计

侯晴宇, 张树青

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了解决多光谱成像系统的轻小型设计难点, 采用单探测器多谱段成像方案进行了同时刻四谱段成像系统的光学系统设计。分光原理为, 在物镜组前方设置四片楔形滤光棱镜, 并在棱镜表面镀上透过不同谱段的透过薄膜; 物体辐射经过棱镜后不同谱段的辐射发生不同方向的偏折, 即在焦平面的不同位置形成了分离的光谱像。设计过程中, 采用渐晕的方法解决谱段间的重叠问题。设计得到的光学系统波段数为4, 工作波长为8.20~8.60 μm 、9.40~9.80 μm 、10.60~11.20 μm 及 11.20~12.20 μm , 焦距为55 mm, 全孔径为80 mm, 光学系统的弥散圆直径小于40 μm , 并分析了系统的像差特性。分析结果表明, 该系统具有良好的成像质量, 满足多谱段成像要求。

关键词: 光学系统; 分光成像; 红外; 多光谱; 渐晕

中图分类号: TN141 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1638-05

Design of optical system of multi-spectral imaging system with single detector

Hou Qingyu, Zhang Shuqing

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The design of four spectrum imaging of a single sensor spectro-imaging system was presented. The prism was placed before lens set, departure at different direction of the objective radiation across prism, the separate spectro-image was formed at different place of focal plane. The F number of the spectro-imaging system whose working wavebands are 8.2–8.6 μm , 9.4–9.8 μm , 10.6–11.2 μm and 11.2–12.2 μm is 4, the focal length is 55 cm and the aperture diameter is 50 mm. The spot diagram diameter is less than 40 μm . Vignetting was introduced to solve the superimposition between different spectrum. The aberration characteristic and the blur circle diameter distribution of the system was analyzed. The analysis results showed that the system had a good image quality and met with spectro-imaging requirements.

Key words: optical system; spectro-imaging; IR; multi-spectral; vignetting

收稿日期: 2014-09-05; 修订日期: 2014-10-10

作者简介: 侯晴宇(1982-), 男, 副研究员, 主要从事红外图像处理、红外目标检测与跟踪方面的研究。Email: hongqingyu@126.com

0 引言

为了利用多光谱成像信息融合技术进行目标的检测与识别^[1-5],必然需要设计合理、高效的多光谱传感器。在考察一种多光谱传感器的品质时,系统结构和操作方式的某些关键特性是必须考虑的。特别是数据采集的方法、同时采集与按顺序采集的比较、多路传输方案(空间、光谱、时间)的使用,以及数据的配准率(空间和时间)等^[6-10]。

目前在多光谱成像领域应用比较广泛的多光谱传感器的构建方案主要分为以下几种:(1)滤光片轮传感器^[6];(2)共孔径分光传感器^[7];(3)多色单片传感器^[9];(4)多视野单片传感器^[10]。(1)的主要缺点是光谱图像在时间上是多路传输的,而且如果传感器或者景物移动的话,所采集的图像在空间上难以配准。(2)在光谱图像的空间配准上难度也较大,并且系统成本很高,体积很大,可靠性比较低。(3)是新型的多色量子阱单片探测器阵列,是有望实现多色空间/时间配准的传感器,然而这些焦平面阵列仍处于研究阶段,其成本很高,而且目前只能以有限的光谱带通(与干涉滤光片系统相似)控制操作;(4)同时(在时间上)把多光谱图像置于单个二维焦平面阵列的特定区域,而且具有高的空间配准率。由于低成本、大面积焦平面阵列在市场上的大量出现,这种方法在设计多光谱凝视传感器方面具有很大的吸引力。而且,系统的质量和体积都明显降低,可靠性却更高。

基于上述分析,文中以多视野单片传感器为系统的设计原型,对8~12 μm内4个光谱波段成像仪的光学系统进行设计,并分析了系统的成像性能。

1 设计思想

1.1 总体思想

为了在一个焦平面器件上接收到一个目标的四个光谱像,一般需要4个成像物镜。但是如果在成像物镜前加一个棱镜,棱镜的4个面有一定的倾斜角度,这样就可以在一个焦平面上的不同区域获得同1个目标几个分离的像。在棱镜的4个倾斜面上镀有不同通带的滤光薄膜,就可以在焦平面上得到1个目标4个谱段的像,该系统的设计正是基于这种原理,见图1。

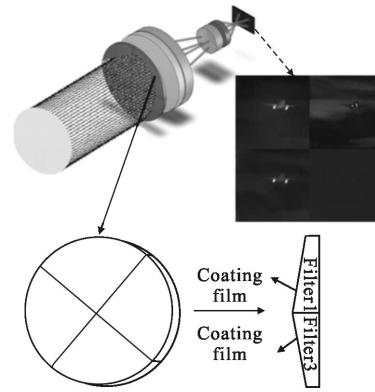


图1 多谱段光学系统成像原理

Fig.1 Principle of multi-spectral imaging system

1.2 设计原理

可见,设计的创新之处在于镀膜的楔形滤光棱镜的引入,因此核心在于楔形滤光棱镜楔角的设计。设计步骤为:(1)根据任务需求,确定物镜的结构形式及系统的焦距、孔径以及探测器参数;(2)确定光谱像在探测器上的成像位置;(3)结合系统焦距确定成像区域中心偏离成像物镜视场中心的角度;(4)根据成像区域中心偏离角计算棱镜的楔角。

若成像区域偏离角度为:

$$\delta = a(n-1)$$

式中: δ 为光线的偏离角度; a 为棱镜楔角; n 为折射率。即得到棱镜楔角为:

$$a = \frac{\delta}{n-1}$$

虽然将不同光谱段的图像成像到探测器的不同位置,但是如果不对各个谱段视场加以限制的话,各谱段间必然会发生重叠,这样就不能得到清晰的像,解决各谱段间的重叠问题也是设计的难点。在设计时,文中采用渐晕的方法来解决谱段间的重叠问题。

2 设计实例

2.1 设计目标

根据任务需求,设计选择的焦平面响应波段为8~12 μm,总像元数为160×120,像元尺寸为35 μm×35 μm,设定的有效光谱成像区域如图2所示,有效像元数为32×32。

成像物镜系统光学设计参数为:

(1)焦距55 mm;(2)相对孔径1:1.2;(3)成像谱段为:8.20~8.60 μm,9.40~9.80 μm,10.60~11.20 μm,11.20~12.20 μm。

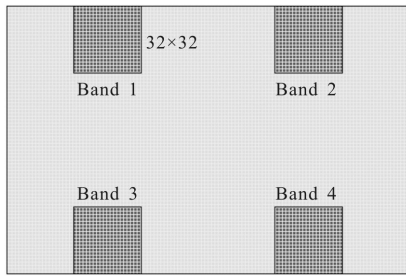


图 2 探测器四个谱段成像区域

Fig.2 Imaging zones of sensor four band

2.2 设计结果

由于光学系统的相对孔径较大,为了消除各种像差、保证系统的成像质量,前透镜组采用两片式结构,后透镜组采用两片式结构。为了减小系统的体积,光学成像系统采用摄远物镜形式结构,如图 3 所示。

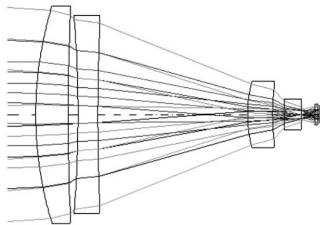


图 3 成像物镜系统结构图

Fig.3 Frame of imaging lens system

图 4 为探测器成像谱段所对应的视场角。可以看出,成像物镜前加一个带有一定倾角的棱镜后,目标像向下移动一定量的位移,这样一个目标通过光学系统后,棱镜不同倾斜面内的光线通过光学系统后在

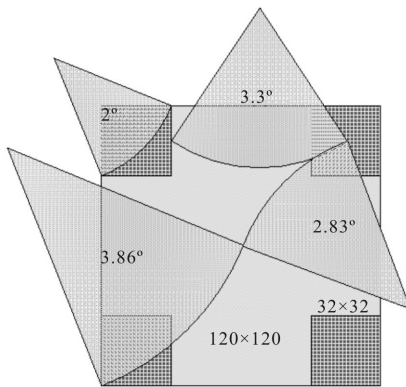


图 4 成像谱段所对应的有效视场

Fig.4 Effective field of view corresponding imaging band

焦平面上就得到分离的 4 个像,各成像谱段中心偏离成像物镜视场中心 2.83° ,即得 $\delta=2.83 \times \frac{\pi}{180}$,在设计

时,棱镜的材料为锗, $\lambda_1=8 \mu\text{m}$, $\lambda_2=10 \mu\text{m}$, $\lambda_3=12 \mu\text{m}$, 对应的折射率为 $n_8=4.00526$, $n_{10}=4.003073$, $n_{12}=4.002073$ 。可以看出,材料锗对于 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 波段折射率变化很小,因此四个谱段对应的楔角度可以认为是一样的。在计算时,取 $n=4.003073$,得到楔角为 $a=\delta/(n-1)=0.016$ 。

图 5 给出了加入带有楔角的棱镜后,光学系统光路图。

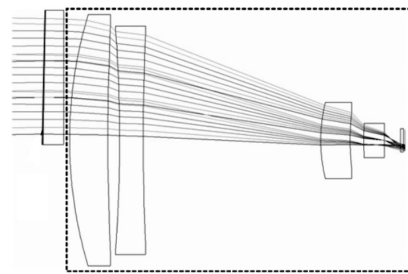


图 5 加棱镜的光学系统结构图

Fig.5 Frame of optical system with prism

2.3 性能分析

图 4 给出各个谱段间发生重叠的最小视场为 3.3° ,也就是每个谱段成像时,视场角为 3.3° 的渐晕为 100%,图 6~8 给出了设计结果。

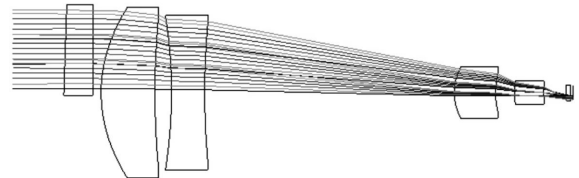


图 6 有效视场成像光线

Fig.6 Imaging rays of effective field of view

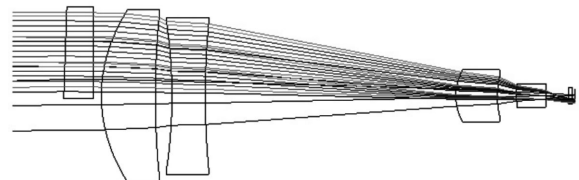


图 7 2.5°视场成像光线

Fig.7 Imaging rays of 2.5° field of view

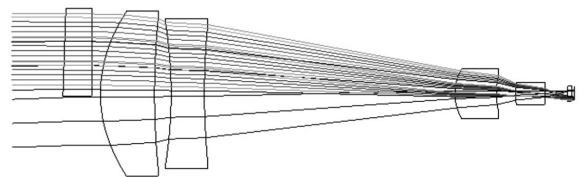


图 8 3.3°视场成像光线

Fig.8 Imaging rays of 3.3° field of view

可以看出,有效视场内光线无渐晕,2.5°视场光线渐晕约 70%,3.3°视场光线渐晕 100%,这样就很好地解决了各谱段间的重叠问题。

图 9、图 10 给出了系统各个视场在整个 8~12 μm 谱段范围内的点列图和子午面、弧矢面上的像差曲线。

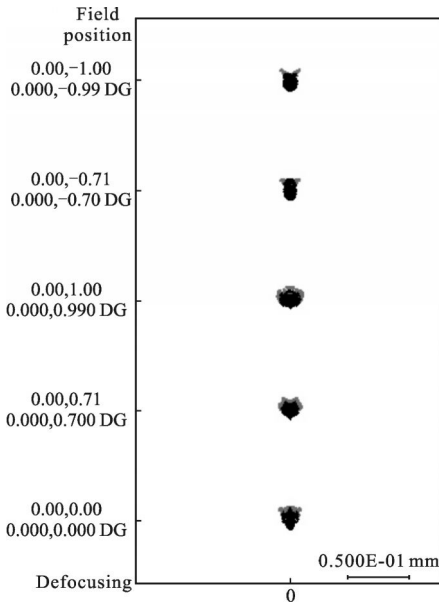


图 9 系统各个视场的全谱段点列图

Fig.9 Spot diagram of all band with each field of view

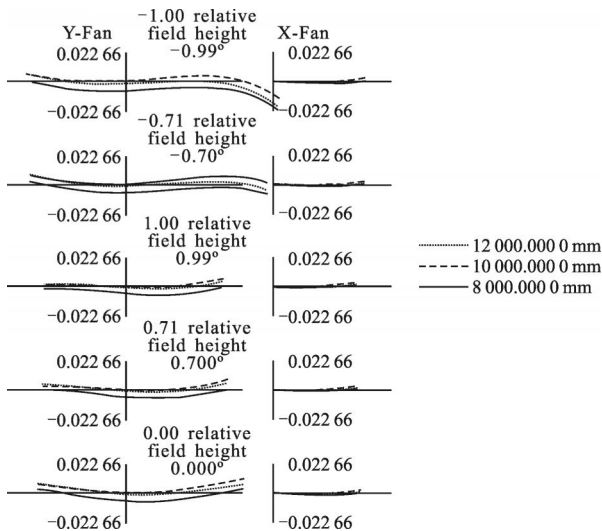


图 10 系统各个视场的全谱段像差曲线

Fig.10 Aberration curve of all band with each field of view

图 11 为对应于各个视场位置的弥散圆直径分布。可见,系统的弥散圆能量的 80%均集中在直径为 35 μm 的圆内。显然,对应于各个窄谱段时,系统的成像质量还将优于全谱段的情况,因此,该光学系统的成像质量是有保障的。

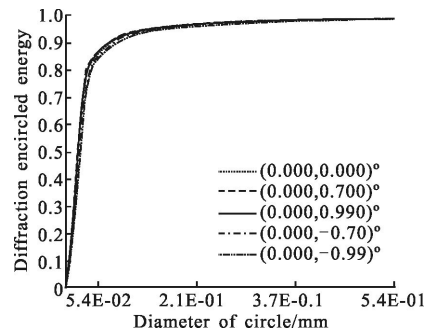


图 11 系统各个视场位置的弥散圆直径分布

Fig.11 Distribution at different place of each field of view

以上只是设计结果,对于实际应用,由于零部件的加工误差、装调误差、环境条件变化等因素,必将导致系统的成像质量下降。为此需对此予以估算和分析。首先进行系统的加工与装调误差分析。根据目前的实际工艺情况,初步确定的系统加工与装调误差如表1所示。

表 1 系统加工与装调公差

Tab.1 Optical processing and assembly tolerances

No.	Tolerance type	Value
1	Thickness(spacing)	0.02 mm
2	Thickness	0.01 mm
3	Radius	0.001
4	Index	0.008
5	Abbe number	2
6	Fringes	0.2
7	Irregularity	0.01 mm
8	Decenter	0.01 mm
9	Tilt	1'

按照上述公差对光学系统的最终成像质量进行了估算,其结果用系统的传递函数变化情况表证。图 12 给出了考虑到上述公差情况后光学系统各个

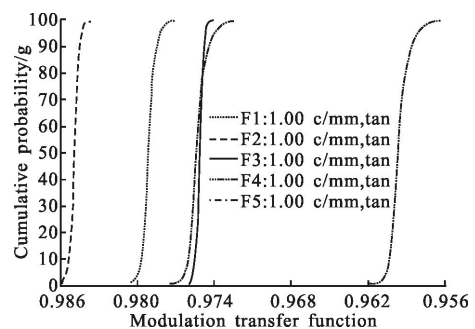


图 12 考虑公差后光学系统各个视场传递函数的可能变化

Fig.12 Different field of view' MTF after considering tolerances

视场传递函数的可能变化。

考虑到公差情况后,系统的最佳像面位置将后移 0.066 mm,此时轴上与边缘视场的成像质量变化较大,传递函数值将分别降低 0.03 和 0.05,即分别降低 5%和 10%。其余视场的变化则相对较小,传递函数值总平均将降低 7%。该结果可以接受。

3 结论

文中设计了同时四谱段成像的轻小型分光成像仪的光学系统。该成像仪采用单片凝视焦平面探测器,通过在物镜组前方设置四片楔形滤光棱镜,使得物体辐射经过棱镜后发生不同方向的偏折,即在焦平面的不同位置形成了分离的光谱像。文中给出了系统的详细设计过程和性能分析结果,表明该系统可以满足实时多光谱成像需求。

参考文献:

- [1] Wu Chunfeng, Zhang Wei, Li Jie, et al. Problems and its analysis of infrared imaging detection and identification facing [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(2): 231–234. (in Chinese)
武春风, 张伟, 李洁, 等. 基于时空信息的红外成像系统在探测识别目标时所面临的问题及分析[J]. *光学技术*, 2005, 31(2): 231–234.
- [2] Cao Jelin, Wu Chunfeng, Hou Qingyu, et al. Survey of target recognition technology based on spectrum imaging[J]. *Optical Technique*, 2010, 36(1): 145–150. (in Chinese)
操乐林, 武春风, 侯晴宇, 等. 基于光谱成像的目标识别技术综述[J]. *光学技术*, 2010, 36(1): 145–150.
- [3] Xu Weilin, Wu Chunfeng, Lu lihong, et al. IR target recognition based on invariant sequential spectral angle [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 257–262. (in Chinese)
许伟琳, 武春风, 逯力红, 等. 基于光谱角时序不变性的红外目标识别[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 257–262
- [4] Shi Zhenwei, Wu Jun, Yang Shuo, et al. RX and its variants for anomaly detection in hyperspectral images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 796–802. (in Chinese)
史振威, 吴俊, 杨硕, 等. RX 及其变种在高光谱图像中的异常检测[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 796–802
- [5] Liu Zhigang, Lu Yunlong, Wei Yiwei. Supervised method for hyperspectral image camouflage target detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3076–3081. (in Chinese)
刘志刚, 卢云龙, 魏一苇. 有监督的高光谱图像伪装目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 3076–3081
- [6] Breiter R, Cabanski W, Mauk K H, et al. Multicolor and dual-band IR camera for missile warning and automatic target recognition[C]//SPIE, 2002. 4718: 280–288.
- [7] Tanikawa K, Okamura T, Kudo J, et al. Six-band multispectral sensor using off-axis three-mirror reflective optics[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(10): 2781–2788.
- [8] Escobar D E, Everitt J H, Noriega J R. A twelve-band airborne digital video imaging system [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, 66: 122–128.
- [9] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K, et al. 640×512 pixel narrow-band, four-band, and broad-band quantum well infrared photodetector focal plane arrays[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, (44): 411–425.
- [10] Michael A S, Stanley R, Robert R. Multiview: a novel multispectral IR imaging camera [C]//SPIE, 1997, 3063: 239–256.