文章编号:1002-2082(2013)01-0021-05

宽谱段近红外星敏感器光学系统的设计

赵 坤,车驰骋

(1. 华中光电技术研究所,武汉光电国家实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要:近红外波段测星已成为星敏感器的重点发展方向之一,针对近红外星敏感器使用波段宽的特点,依据消二级光谱理论中可行的两种消二级光谱方法,采用选取相对部分色散系数相同或接近、色散系数相差较大的玻璃组合的方法对近红外星敏感器光学系统进行设计。设计了一组工作波长为 900 nm ~1 700 nm,F 数为 1.5,焦距为 150 mm 的光学镜头,该镜头在宽光谱范围内实现了二级光谱的校正,在空间频率等于 32 lp/mm 时各视场 MTF 均大于 0.65,使系统具有良好的像质,能够满足近红外波段的测星要求。

关键词:光学设计;近红外星敏感器;宽谱段;二级光谱

中图分类号:TN202; TH74 **文献标志码**:A **doi**:10.5768/JAO201334.0101004

Wide spectral SWIR star sensor optical system

ZHAO Kun, CHE Chi-cheng

(Wuhan National Laboratory for Opto-Electronics, Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan 430074, China)

Abstract: Observing star in shortwave infrared (SWIR) spectrum has been considered as one of the important development directions of star sensor. According to the characteristic of wide waveband used in SWIR star sensor and the two feasible methods for correcting secondary spectrum in theory, an SWIR star sensor optical system with 900 nm~1 700 nm band, F number of 1.5 and the equivalent focal length (EFL) of 150 mm was designed based on the method of selecting the glass combination of the same or nearly relative dispersion coefficient and obviously different dispersion coefficient. Result shows that the secondary spectrum is corrected in broad band, the MTF in full field of view is more than 0.65 at 32 lp/mm. The system has excellent performance that can satisfy the requirement of observing star in near infrared band.

Key words: optical design; SWIR star sensor; wide spectral range; secondary spectrum

引言

星敏感器主要用于恒星定位和确定运载体的姿态,其观测目标是天空中的恒星。对于水面舰艇和飞机导航等应用而言,对白天测星能力提出了相当高的要求。研究发现在近红外波段测星概率比可见光波段大约高一个数量级,而且在近红外波段大气具有更高的传输率、低的散射效应和大气衰减。随着近红外探测器性能的提高,大大提高了星敏感器的白天测星能力,目前近红外波段测星已成为地面和机载高性能星敏感器的重点发展方向之一[1-5]。

为使近红外波段工作的星敏感器对弱亮度恒星具有较高的探测能力,其光学系统要求具有较宽的工作谱段、大的通光口径。同时星敏感器光学系统在工作时需保证恒星在 CCD 上的成像位置有一定的精度,因此像差校正时,需考虑在宽谱段范围内工作时光学系统需要具有良好的色差特性,以减小不同波段色差造成的光斑质心计算误差。本文针对某近红外星敏感器需求,分析了宽谱段条件下近红外波段光学系统的二级光谱,设

收稿日期:2012-05-31; **修回日期**:2012-06-12

作者简介:赵坤(1964—),男,湖北荆门人,研究员,主要从事光电成像系统和导航系统的研究工作。
E-mail:Zhaokun717@yahoo.com.cn

计了具有宽谱段、大孔径的近红外星敏感器光学系统,可以满足星敏感器的探测能力要求。

1　近红外星敏感器光学系统的设计要求

某近红外星敏感器光学系统的主要技术指标如表1所示。

表1　光学系统的技术指标一览表

Table 1　Technical indices of optical system

项目	参数要求
系统焦距	150 mm
入瞳直径	φ100 mm
光谱范围	900 nm～1 700 nm
系统透过率	≥85 %
能量集中度	星体经光学系统后所形成的弥散斑的85%能量集中在30μm×30μm的范围内

从上述技术指标要求可以看出,光学系统的工作波段范围为900 nm～1 700 nm,谱段宽度 $\Delta\lambda$=800 nm,因此该光学系统在设计时必须有效地减小其色差才能获得良好的像质。

2　消二级光谱的基本理论

光学系统对两种色光校正位置色差后,即两种色光的焦点相重合,其相对于第3种色光的焦点仍有偏离,这种偏离则称为二级光谱,二级光谱是高级色差的一种。对于一定焦距的透射光学系统,二级光谱初级量的大小与系统结构参数无关,完全由玻璃的色散特性决定。

对于宽谱段的光学系统在满足光焦度要求的前提下校正正位置色差的条件[6-12]为

$$C_1 = \sum_{i=1}^{n} h_i^2(\varphi_i/\upsilon_i) = 0 \tag{1}$$

式中:C_1 为轴向色差;h_i 为入射光线高度;φ_i 和 υ_i 为第 i 个透镜的光焦度和色散系数。

从式(1)可以看出,在单片透镜光焦度不增加的情况下,系统设计时正透镜选用大色散系数、负透镜选用小色散系数的玻璃材料组合能有利于系统色差的消除。

光学系统在校正色差的基础上,同时校正二级光谱的条件为

$$\sum_{i=1}^{n} h_i^2(\varphi_i/\upsilon_i)P_i = 0 \tag{2}$$

式中 P_i 为透镜材料的相对部分色散。

3　玻璃材料选择

根据上述消二级光谱理论中的公式(1)和公式(2),为了同时校正色差与二级光谱,一种方法是选择3种玻璃,它们在部分色散系数 P_i 与 υ_i 的分布图上所围的三角形具有尽可能大的面积。实际上是其中的2种玻璃组合成一种新的虚拟玻璃,它与第3种玻璃具有相同或接近的部分色散系数,而同时又有一定的阿贝数之差。用该方法时,还需要通过合适的光焦度分配才能达到同时校正位置色差与二级光谱的目的,因此给光学系统的像差自动校正带来较大的困难。

另一种做法是选用相对部分色散 P_i 相同或接近、色散系数 υ_i 相差比较大的玻璃组合,其优点是可以使系统的二级光谱校正与光焦度分配无关,解除了光学系统自动优化设计中二级光谱对光焦度的约束条件,亦即它满足消位置色差条件后,自动满足消二级光谱条件,较容易设计出高像质的光学系统[4]。该方法也是本文在设计中采用的方法。

以可见光玻璃材料数据库进行分析,玻璃材料在不同波段时色散系数与相对部分色散系数的分布如图1所示。可以看出玻璃材料的色散系数与相对部分色散系数分布在可见光波段呈线状,在近红外波段呈散布状。

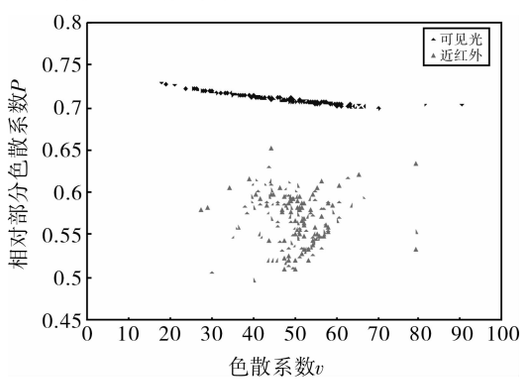


图1　不同波段内玻璃材料的色散特性

Fig. 1　Dispersion characteristics of glass chromatic dispersion in different bands

考虑到具有良好消色差效果的 CaF_2 晶体较脆、化学稳定性差、光学工艺性欠佳、价格昂贵,故在该光学系统中未采用,而是选择了成都光明牌号为H-FK61、H-ZF3、H-ZBaF3的玻璃材料。3种玻璃材料在900 nm～1 700 nm波段内的折射率、色散系数和相对部分色散系数见表2。从表2可以看出,3种玻璃的相对部分色散系数非常接近,然而色散系数又有较大的差异。

表 2　玻璃材料的折射率与色散特性表

Table 2　Refractive index and dispersion coefficient of glass material

玻璃	波长/nm			色散系数 υ	相对部分色散系数 P
	900	1300	1700		
H-FK61	1.49125	1.48785	1.48511	79.448	0.5535
H-ZF3	1.69695	1.68635	1.67791	36.049	0.5567
H-ZBaF3	1.64530	1.63881	1.63366	54.878	0.5582

4　设计结果分析

利用 CODE V 光学设计软件,在保证系统有足够高的透过率的条件下,尽可能减少系统中光学零件的数目,同时为减少系统中光学零件的外形尺寸,系统光阑位于第一片透镜的前表面,经优化设计,系统共由 6 片透镜构成,总长 185 mm,系统光路图如图 2 所示。

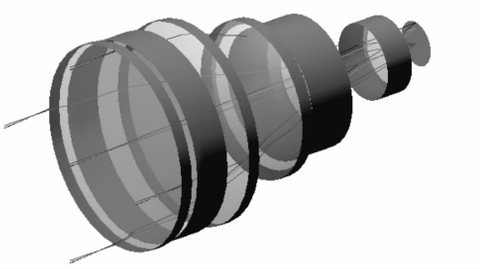


图 2　系统光路图

Fig. 2　Optical path of system

系统的色球差曲线、像散和畸变曲线如图 3 所示,垂轴色差如图 4 所示。从图 3 和图 4 可以看出,系统已经达到了较好的二级光谱校正效果,系统的最大畸变小于 0.6 %。

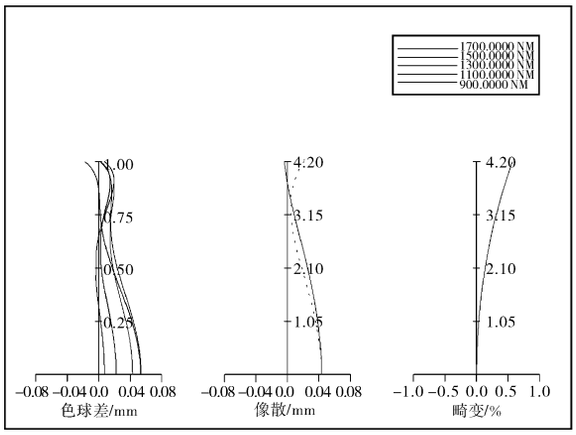


图 3　二级光谱、色球差、像散和畸变曲线

Fig. 3　Curves of secondary spectrum, spherochromatism, astigmatism and distortion

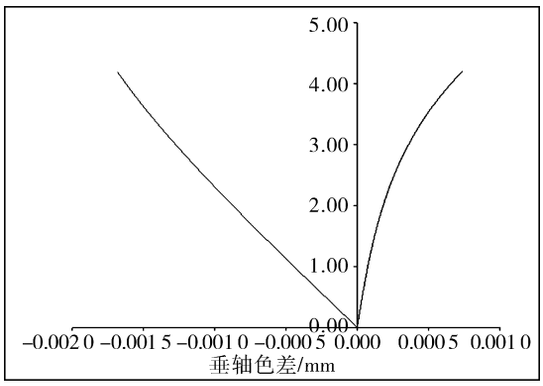


图 4　光学系统的垂轴色差

Fig. 4　Longitudiinal aberration of optical system

系统各视场的弥散斑如图 5 所示,弥散斑能量分布曲线如图 6,弥散斑的 85%能量集中的最大直径为 13.4μm,满足光学系统的技术指标要求。

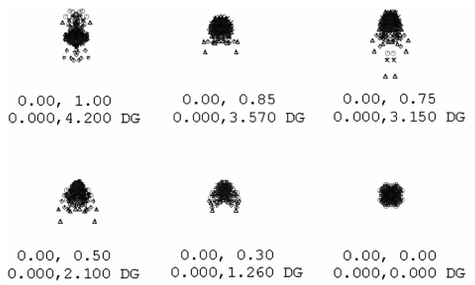


图 5　系统的弥散斑

Fig. 5　Dispered spot diagrams of system

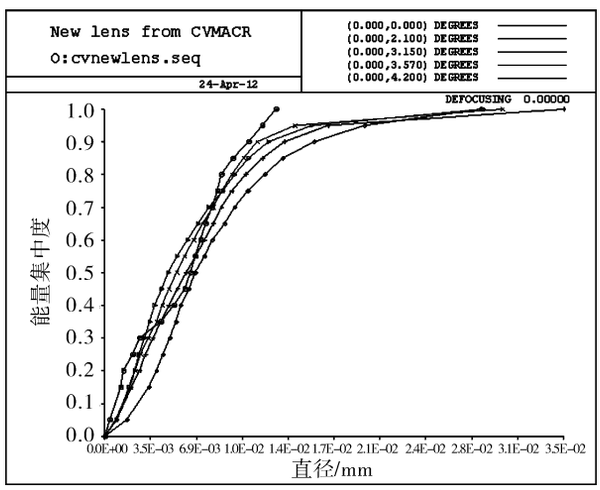


图 6　光学系统的弥散斑能量分布曲线

Fig. 6　Geometric encircled energy curves of dispered spots

光学系统的光学传递函数见图 7 所示。传递函数的计算结果表明,当空间频率等于 32 lp/mm 时,中心视场 MTF 达到 0.82,边缘视场 MTF 仅下降0.15,复色光各视场 MTF 均大于 0.65。

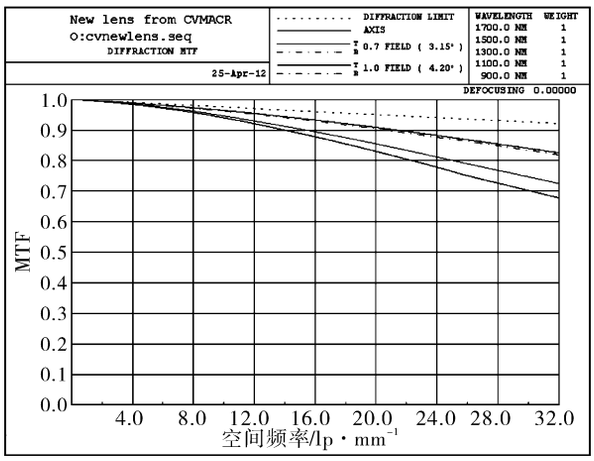


图 7　光学系统的传递函数曲线

Fig. 7　MTF of optical system

5　结论

针对近红外星敏感器使用波段宽的特点,依据消二级光谱理论中可行的两种消二级光谱方法,采用了选用相对部分色散系数相同或接近、色散系数相差较大的玻璃组合的方法对近红外星敏感器光学系统进行了设计,在 900 nm～1 700 nm 的宽光谱范围内实现了二级光谱的校正,使系统具有良好的像质。

注:实际工程设计中,由于玻璃材料制造过程中的不稳定性,必须对玻璃材料在使用波段范围内的折射率进行测定,然后依据折射率实测值对设计数据进行修正。

参考文献:

[1]　梁娟.短波红外昼光恒星成像光学系统设计[J].光学与光电技术,2010,8(2):35-38.
LIANG Juan. Optical system design of the SWIR daylight star imager[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2010,8(2):35-38. (in Chinese with an English abstract)

[2]　王虎,苗兴华,纹德胜,等.宽视场大相对孔径星敏感器光学系统设计[J].光子学报,2005,34(12):1822-1824.
WANG Hu,MIAO Xing-hua,WEN De-sheng,et al. Optical system design of star sensor with wide-view field and small F-number[J]. Acta Photonica Sinica, 2005,34(12):1822-1824. (in Chinese with an English abstract)

[3]　CATANZARO B,DOMBROWSKI M,HENDRIXSON J,et al. Design of dual band SWIR/MWIR and MWIR/LWIR[J]. SPIE,2004,5406:829-835.

[4]　周艳,赵建科,昌明,等. 星敏感器光学系统弥散斑测试方法[J].应用光学,2009,30(3):454-456.
ZHOU Yan,ZHAO Jian-ke,CHANG Ming,et al. Measurement of dispered spot for star sensor optics [J]. Journal of Applied Optics,2009,30(3):454-456. (in Chinese with an English abstract)

[5]　谭伟明.星敏感器恒星检测若干问题研究[J].光学与光电技术,2004,2(1):8-10.
TAN Wei-ming. Study on some problems in star observations by using star sensors[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004,2(1):8-10. (in Chinese with an English abstract)

[6]　杨庆华,赵葆常,周仁魁.基于正常色散玻璃二级光谱的校正[J].光子学报,2008,37(4):772-775.
YANG Qing-hua,ZHAO Bao-chang, ZHOU Ren-kui. Correction of secondary spectrum based on normal dispersion glasses[J]. Acta Photonica Sinica, 2008,37(4):772-775. (in Chinese with an English abstract)

[7]　王美钦,王忠厚,白加光.宽谱段光学系统消二级光谱的设计[J].应用光学,2010,31(3):360-364.
WANG Mei-qin,WANG Zhong-hou,BA Jia-guang. Removing secondary spectrum in wide spectrum optical system[J]. Journal of Applied Optics,2010,31(3):360-364. (in Chinese with an English abstract)

[8]　DUPLOV R. Apochromatic telescope without anomalous dispersion glasses[J]. Appl. Opt.,2006,45(21):5164-5167.

[9]　ROSETE-AGUILAR M. Correction of secondary spectrum using standard glasses[J]. SPIE, 1996,2774:378-386.

[10]　赵葆常,杨建峰,陈立武,等.干涉成像光谱仪中宽谱段傅式光学系统设计[J].光子学报,2009,38(3):468-473.
ZHAO Bao-chang,YANG Jian-feng,CHEN Li-wu, et al. Design of the wide bands Fourier lens[J]. Acta Photonica Sinica,2009,38(3):468-473. (in Chinese with an English abstract)

[11]　肖相国,王忠厚,白加光,等.大视场近红外微光摄像镜头设计[J].红外技术,2006,28(2):85-87
XIAO Xiang-guo, WANG Zhong-hou, BAI Jia-

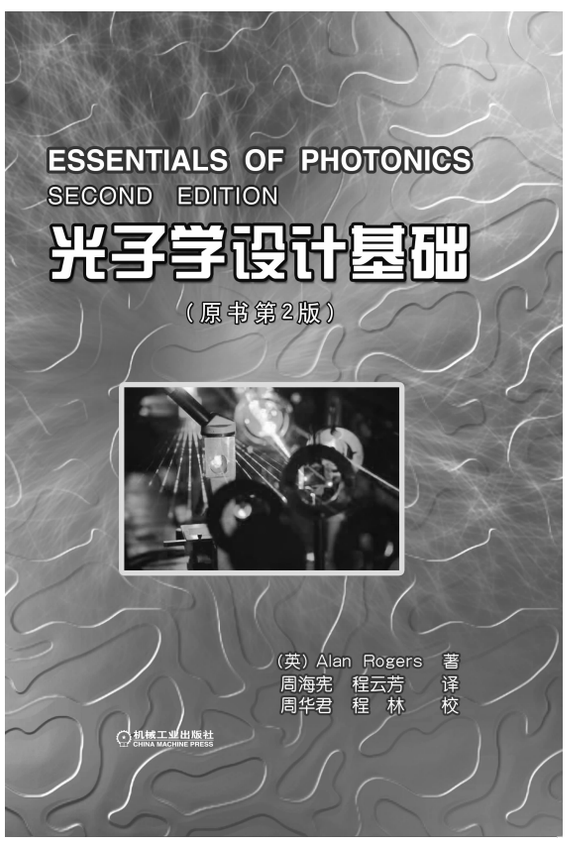
guang, et al. A camera lens of low near infrared with large field of view[J]. Infrared Technology, 2006,28(2):85-87. (in Chinese with an English abstract)

[12] 陈立武,赵葆常,杨剑峰,等.折射率、色散变化量与宽谱段傅氏镜二级光谱变化量的分析[J].光子学报,2005,34(9):1355-1358.
CHEN Li-wu, ZHAO Bao-chang, YANG Jian-feng, et al. Analysis on increment of index of glass and increment of secondary spectrum of the wide bands FT lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(9): 1355-1358. (in Chinese with an English abstract)

《光子学设计基础》
(The Essentials of Photonics)

Alan Rogers(英国)著,周海宪　程云芳　译

机械工业出版社出版



《光子学设计基础》(原文第二版)一书内容丰富,不仅有详尽的光子学理论基础,同时论述了许多实际的光子学应用技术。该书的显著特点是:第一,光子学既是一门纯科学,也是一种应用技术。为帮助光子学(尤其光子学应用技术)领域的研究人员开展该方面领先课题的研究,此书较少论述数学分析的细节,而是以比较容易理解的形式提供更为坚实的光子学理论基础,换句话说,该书的内容偏重于光子学应用技术,但又不失完整、易懂的光子学基础理论,因此,具有很强的实用性;第二,涵盖了光子学独立发展的完整内容,对早期光子学学科的学生以及希望在物理学领域进一步发展的科研人员都是非常有用的;第三,为使本书便于不同程度的研究人员阅读,提供了参考文献,并为读者列出了"推荐阅读资料",使之能够更深入地进行研究。随着光子学理论和工程应用技术的发展,《光子学设计基础》第二版与时俱进,增加了许多新的重要内容,例如,光子晶体纤维(PCF),波分复用(WDM)技术,偏振模式散布(PMD)的扩展处理和分布式光纤传感器(DOFS),以及对琼斯(Jone)偏振算子更为详细的论述。由于光子学是一个蓬勃发展、方兴未艾的学科,会不断出现新的理论、方法和应用技术,作者在本书第十二章中对光子学的未来前景提出了个人见解,供读者参考。

该书由13章组成:第一章 光子和电子;第二章 光的波动性;第三章 偏振光学;第四章 光和物质的作用:发射、传播和吸收过程;第五章 光的干涉和相关;第六章 辐射和固体的一些基本物理性质;第七章 光源、调制器和探测器;第八章 光学波导;第九章 非线性光学;第十章 实践中的光子学;第十一章 结束语:未来的工作;第十二章 附录;第十三章 对数学问题的解答。

本书可供光电子学领域从事光子学研究和仪器设计的工程师阅读,也可以作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。希望本书提供的理论和应用技术能够有益于我国光子学事业的快速发展,对我国军事、航空航天和民用光学仪器的设计提供有益指导。