

引用格式: XUE Qing-sheng, TIAN Zhong-tian, YANG Bai, *et al.* Optical System Design of Geostationary Hyperspectral Ocean Water Color Imager with Wide Coverage[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(5):0501001

薛庆生, 田中天, 杨柏, 等. 静止轨道高光谱海洋水色仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2020, 49(5):0501001

静止轨道高光谱海洋水色仪光学系统设计

薛庆生¹, 田中天¹, 杨柏¹, 纪振华², 栾晓宁¹, 牟冰¹, 邱心涛³

(1 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(3 青岛市产品质量监督检验研究院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 设计了由超大口径前置望远系统和超大视场光谱仪组成的超大口径高光谱海洋水色仪。前置望远系统采用同轴三反光学系统结构, 口径为 4 m, 视场为 0.64° , 焦距为 21.6 m, 波段范围为 400 ~ 1 000 nm。超大视场光谱仪采用改进的 Offner 结构, 视场为 240 mm, 光谱分辨率为 10 nm。探测器像元尺寸为 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$, 4 片探测器交错拼接实现 400 km 幅宽。超大视场光谱仪在 400 ~ 1 000 nm 的宽波段内, 点列图半径的均方根值均小于 $3.9\ \mu\text{m}$, 静止轨道高光谱海洋水色仪全系统不同波长的 MTF 在 33.3 lp/mm 处大于 0.52, 各项指标均满足应用要求。

关键词: 光学设计; 海洋水色; 望远系统; 光谱仪; 分辨率

中图分类号: TH703

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204905.0501001

Optical System Design of Geostationary Hyperspectral Ocean Water Color Imager with Wide Coverage

XUE Qing-sheng¹, TIAN Zhong-tian¹, YANG Bai¹, JI Zhen-hua², LUAN Xiao-ning¹,
MU Bing¹, QIU Xin-tao³

(1 College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

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

(3 Qingdao Product Quality Supervision and Inspection Institute, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: An ultra-large-caliber hyperspectral ocean water meter composed of an ultra-large-caliber front telescope system and an ultra-large-field-of-view spectrometer is designed. The front telephoto system uses a coaxial three-reflection optical system structure with a diameter of 4 m, a field of view of 0.64° , a focal length of 21.6 m, and a wavelength range of 400 to 1 000 nm. The large field of view spectrometer uses an improved Offner structure with a field of view of 240 mm and a spectral resolution of 10 nm. The detector pixel size is $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$, and four detectors are staggered to achieve a width of 400 km. The ultra-large field-of-view spectrometer is in a wide band of 400 to 1 000 nm, and the root mean square value of the dot chart radius is less than $3.9\ \mu\text{m}$. The MTF of the entire system of the static orbit hyperspectral ocean water meter is greater than 0.52 at 33.3 lp/mm, and each index meets the application requirements.

Key words: Optical design; Ocean color; fore-telescope; Spectrometer; Resolution

OCIS Codes: 010.4450; 080.2740; 110.6770; 300.6190; 350.5730

基金项目: 国家重点研发计划(Nos.2016YFB0500300, 2016YFB0500301, 2016YFB0500302, 2016YFB0500303, 2016YFB0500304, 2018YFF01011003), 国家自然科学基金项目(Nos.41575023, 41105014), 吉林省科技发展计划(No.20190302083GX), 中国工程院咨询研究项目(No.2020-XZ-5)

第一作者: 薛庆生(1979—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学系统设计、光谱成像技术及应用。Email: xueqingsheng@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019-12-02; 录用日期: 2020-04-02

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

海洋水色仪是进行空间海洋遥感的重要光学遥感仪器,通过对海洋表面的水色进行探测,反演出海洋生态环境参数,得到关于海洋的各种信息,广泛应用于海洋防灾减灾、海洋权益维护、海洋资源开发、海洋环境保护以及远洋渔业生产、海洋科学研究等^[1-3].水色遥感器的发展始于1978年NASA成功发射的海岸带水色扫描仪(Coast Zone Color Scanner,CZCS),这标志着星载海洋水色遥感的开始^[4].随后历经第二代海洋宽视场观测仪(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor,SeaWiFS)^[5],第三代中等分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer,MODIS)^[6],此外,具有代表性的海洋水色仪主要有日本ADEOS2卫星平台上的全球成像仪(Global Imager,GLI)、印度遥感卫星IRS平台上的海洋水色监测仪(Ocean Color Monitor,OCM)^[7]以及中国海洋-1A卫星及海洋-1B卫星上的水色水温扫描仪(Chinese Ocean Color And Temperature Scanner,COCTS)^[8].

静止轨道海洋水色仪“站的高,看的远”,具有监测范围大、连续性强、重访周期短、时间分辨率高的特点,对更广阔空间尺度上的多维信息网络的实时获取有着重要意义.近地轨道卫星空间分辨率一般为一天到几天,难以对地球目标进行连续观测.各类海洋观测时间普遍发生较快,如赤潮、绿潮、海冰和海雾等现象,实际探测应用所需的时间分辨率要求较高,只有利用静止轨道水色仪才能满足其时间分辨需求.另外,如溢油泄露等随海流逐步演化的海洋事件因缺少大检测范围、高时间分辨率的探测手段,无法对后续事件实时探测和追踪.针对高时间分辨率的探测需求,2009年,韩国发射了第一颗地球静止水色图像仪(Geostationary Ocean Color Imager,GOCI)^[9],开启了海洋水色遥感器的新时代.但空间分辨率较低,且为多光谱遥感,不能为遥感技术在环境调查中提供完整的理论基础和更充分的信息,在高精度上不能满足用户需求,因此,开展静止轨道高光谱探测技术研究,实现高轨道高分辨率光谱探测技术,可以为遥感技术再全球尺度上的高时间分辨率的长期监测提供解决思路,满足灾害实时预警,以及环境、资源等领域对高时间分辨率和大检测范围的水色遥感的迫切需求.

星载高分辨率静止轨道高光谱海洋水色仪的设计,要求海洋水色仪具有大幅宽、高空间分辨率、高光谱分辨率的特点,在静止轨道实现与低轨高光谱成像仪相当的空间分辨率.为满足高精度、高分辨率空间海洋遥感的迫切需求,本文在分析主要技术指标的基础上,根据空间海洋水色探测的应用要求,研究了高分辨率静止轨道高光谱海洋水色仪光学系统,该系统由超大口径前置望远镜光学系统和超大视场光谱仪光学系统组成,二者通过入射狭缝形成完整系统.超大口径前置望远镜采用同轴三反结构,超大视场光谱仪采用加入弯月透镜的改进型Offner结构.

1 主要技术指标

静止轨道高光谱海洋水色仪要求具有高空间分辨率、高光谱分辨率、大幅宽.静止轨道高光谱海洋水色仪的技术指标如表1.

表1 静止轨道高光谱海洋水色仪技术指标
Table1 Specifications of stationary orbit hyperspectral ocean color imager

Specifications	Value
Track height	36 000 km
Waveband range	400~1 000 nm
Spectral resolution	10 nm
Spatial resolution	25 m
Coverage width	400 km

根据轨道高度和幅宽要求计算得到仪器视场大于等于 0.64° ,幅宽为400 km,空间分辨率为25 m,幅宽方向的像元数为16 000.探测器选择大面阵互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor,CMOS)探测器,探测器的量子效率曲线如图1所示,像元尺寸 $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$,像元数 $4\ 096\ \text{pixel}\times 4\ 096\ \text{pixel}$.采用4片探测器交错拼接,拼接方式如图2,其中,探测器1和探测器2用于接收第一狭缝投射的光,探测器3和探测器4用于接收第二狭缝投射的光,相邻探测器间重叠部分长度为1.92 nm.

根据轨道高度和空间分辨率的要求, 确定高光谱海洋水色仪的焦距为 21.6 m. 光谱仪系统的变倍比取 1 : 1, 则前置望远系统的焦距为 21.6 m.

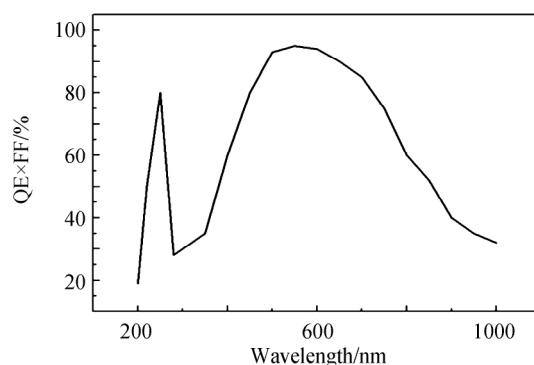


图 1 探测器量子效率曲线

Fig.1 Quantum efficiency curve of the detector

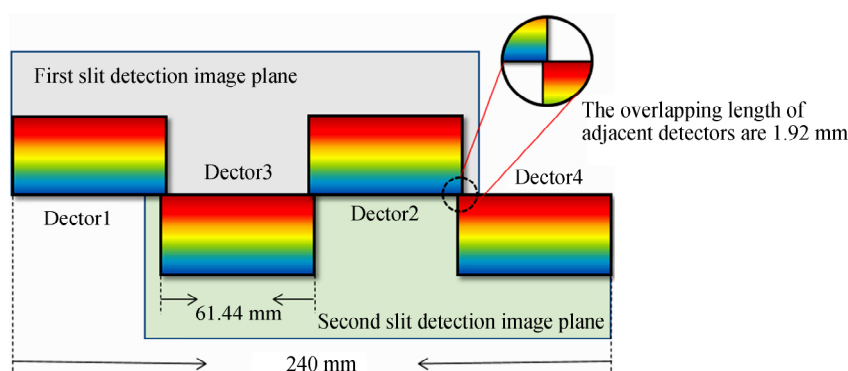


图 2 四探测器拼接示意图

Fig.2 Splicing diagram of four detectors

2 前置望远系统设计

前置望远系统的焦距为 21.6 m, 相对孔径为 1/5.4, 则前置望远光学系统的口径为 4 m, 视场为 0.64° . 从前置望远系统的主要技术指标要求可以看出, 前置望远系统是一个超大口径、长焦距光学系统. 从结构型式选择全反射结构系统形式, 该结构系统无色差. 常用的全反射式光学系统有两反 R-C 系统和三反系统. 本系统视场为 0.64° , 焦距为 21.6 m, 两反 R-C 系统不能满足成像质量要求, 因此, 选择三反系统. 三反系统又分为同轴三反系统和离轴三反系统. 与同轴系统相比, 离轴系统无中心遮拦, 并且视场可以比同轴系统大, 缺点是总的尺寸比同轴系统大. 同轴三反系统光学结构如图 3, 该系统成像质量相对较高, 且与离轴三反系统相比具有尺寸小、结构紧凑的独特优点, 在综合权衡的基础上, 前置望远镜光学系统采用同轴三反系统结构形式.

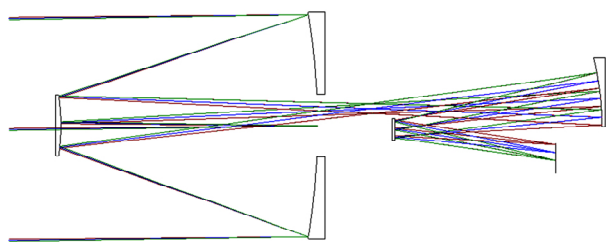


图 3 同轴三反系统光学结构示意图

Fig.3 Optical path of coaxial tri-reverse system

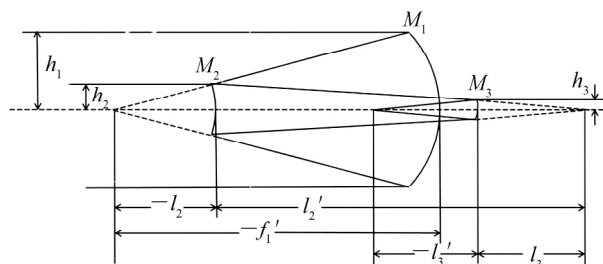


图 4 同轴三反系统高斯光学结构

Fig.4 Optical path of Gauss optics of coaxial three-mirror system

同轴三反系统高斯光学结构^[11,12]如图 4. 根据高斯光学理论可推导出同轴三反光学系统的球差 S_I 、彗差 S_{II} 和像散 S_{III} 的三级像差系数, 其表达式分别为^[11]

$$S_I = \frac{1}{4}\beta_1^3\beta_2^3e_1^2 - \frac{1}{4}\alpha_1\beta_2^3(1+\beta)^3e_2^2 + \frac{1}{4}\alpha_1\alpha_2(1+\beta_2)^3e_3^2 + \frac{1}{4}[-\beta_1^3\beta_2^3 + \alpha_1\beta_2^3 + (1+\beta_1)(1-\beta_1)^2 - \alpha_1\alpha_2(1+\beta_2)(1-\beta_2)^2] \quad (1)$$

$$S_{II} = -\frac{(\alpha_1-1)\beta_2^3(1+\beta_1)^3}{4\beta_1\beta_2}e_2^2 + \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1) + \beta_1(1-\alpha_2)](1+\beta_2)^3}{4\beta_1\beta_2}e_3^2 + \frac{(\alpha_1-1)\beta_2^3(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1) + \beta_1(1-\alpha_2)](1+\beta_2)(1-\beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{1}{2} \quad (2)$$

$$S_{III} = -\frac{\beta_2(\alpha_1-1)^2(1-\beta_1)^3}{4\alpha_1\beta_1^2}e_2^2 + \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1) + \beta_1(1-\alpha_2)]^2(1+\beta_2)^3}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2}e_3^2 + \frac{\beta_2(\alpha_1-1)^2(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{\beta_2(\alpha_1-1)(1-\beta_1)(1+\beta_1)}{\alpha_1\beta_1} - \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1+\beta_2}{\alpha_1\alpha_2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1) + \beta_1(1-\alpha_2)](1-\beta_2)(1+\beta_2)}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2} \quad (3)$$

根据式(1)~(3)计算初始结构的流程如图 5.初始结构根据高斯光学利用 Matlab 软件完成计算,然后通过 ZEMAX 光学设计软件对成像效果优化,设计后的前置望远镜光学部分的结构如图 6.调制传递曲线如图 7 所示,曲线在特征频率 33.3 lp/mm 处大于 0.68,满足前置望远镜成像质量要求.

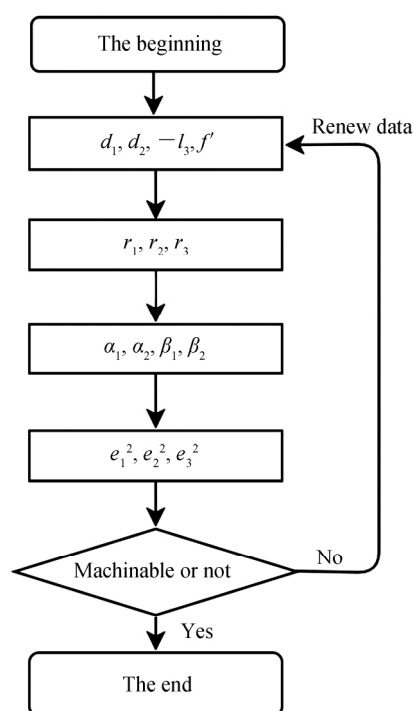


图 5 初始结构参数计算流程

Fig.5 Initial structure parameter calculation flow chart

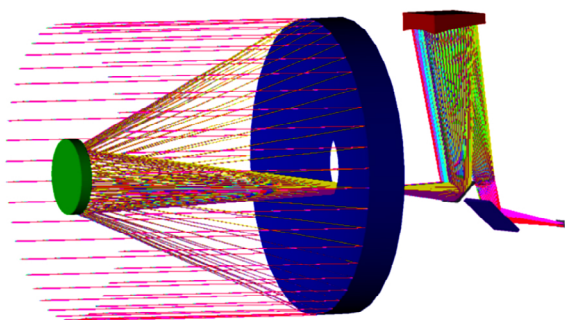


图 6 优化设计的前置望远系统光学结构

Fig.6 Optical path of optimized fore-telescope

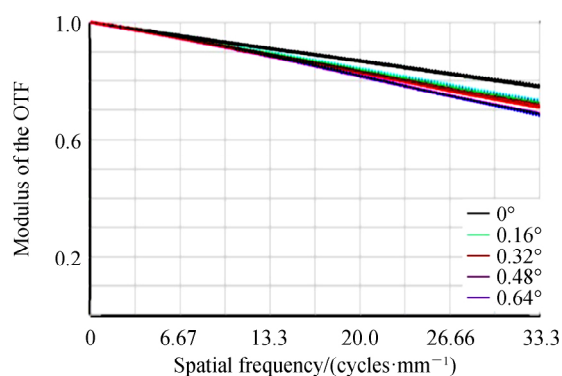


图 7 优化前置望远系统调制传递函数

Fig.7 Modulation transfer function of optimized fore-telescope system

3 超大视场光谱仪设计

静止轨道高光谱海洋水色仪的光谱仪视场超大, 达到了 240 mm, 比现有的高光谱成像仪的光谱仪视场大了一个数量级. 美国典型的高光谱成像仪 Hyperion^[13] 光谱仪视场仅为 7.65 mm. 我国研制的天宫一号高光谱成像仪^[14] 的光谱仪视场仅为 18 mm. 光谱仪视场超大, 光谱仪光学结构型式的选择至关重要. 采用凸面光栅色散的 Offner 结构是一种准对称的光学结构形式, 与处在准直光束中的平面光栅和平面棱镜色散结构相比, 具有体积小、质量小、成像质量高等优点. 因此, 选择凸面光栅色散的 Offner 结构作为超大视场光谱仪光学系统的结构型式.

光谱仪系统是一个超大视场、高分辨率光谱成像系统, 随着狭缝长度的增大, 系统的像散也增大, 成像质量受到影响, 由一个凸面光栅和一个凹面反射镜组成的传统的 Offner 结构不能满足应用要求. 本文对传统的 Offner 结构进行了改进, 在传统的 Offner 结构的两臂中插入一个弯月型的校正透镜, 从而减小所成像像散, 并减少光谱弯曲, 减少色畸变.

传统 Offner 结构如图 8 所示, C 为主镜 M 和凸面衍射光栅 G 的公共球心, O 为狭缝上一点. 从狭缝上点 O 入射的主光线在 M 的入射角为 η_1 , 在 G 的入射角为 η_2 , 衍射角为 η_2' , 随后以 η_3 入射角再次入射 M , 设 M 和 G 的曲率半径分别为 R_1 、 R_2 .

同时, 设 OC 和 x 轴夹角为物极角 φ , 主光线第一次经 M 反射的弧矢像极角为 φ'_{s1} . 主光线第二次经 M 反射后的子午和弧矢像点分别为 I_M 、 I_S , 弧矢物极角为 φ'_{s2} , 子午和弧矢像极角分别为 φ'_M 、 φ'_S . 子午成像满足罗兰圆条件时^[15]

$$OC = R_1 \sin \eta_1 = R_2 \sin \eta_2 \quad (4)$$

$$CI_M = R_2 \sin \eta_2 = R_1 \sin \eta_3 \quad (5)$$

$$\varphi = \eta_2 - 2\eta_1 \quad (6)$$

$$\varphi'_M = 2\eta_3 - \eta'_2 \quad (7)$$

同时由杨氏弧矢成像式可得如下关系

$$\varphi'_{s1} = \varphi \quad (8)$$

$$\varphi'_{s2} = \varphi'_S \quad (9)$$

设 γ 和 γ' 分别为主光线入射光栅和衍射的方位角. 则在 G 处根据光栅空间方程有

$$\sin \eta'_2 \times \cos \gamma' - \sin \eta_2 \times \cos \gamma = m\lambda \quad (10)$$

$$\sin \eta'_2 \times \sin \gamma' - \sin \eta_2 \times \sin \gamma = 0 \quad (11)$$

将光栅的空间衍射过程投影为 xOy 平面内的反射和垂直于该平面的衍射两个过程, 在衍射过程中, 设衍射弧矢物极角为 $\varphi'_{s1\perp}$, 衍射弧矢像极角为 $\varphi'_{s2\perp}$. 在反射过程中, 入射和反射角相等均为 α , 反射弧矢物极角为 $\varphi'_{s1\parallel}$, 反射弧矢像极角为 $\varphi'_{s2\parallel}$, 则满足如下关系

$$\tan \varphi'_{s1\parallel} = \tan \varphi'_{s1} \times \sin \gamma \quad (12)$$

$$\tan \varphi'_{s2\parallel} = \tan \varphi'_{s2} \times \sin \gamma' \quad (13)$$

$$\sin \alpha \times \tan \varphi'_{s1\parallel} = \sin \alpha' \times \tan \varphi'_{s2\parallel} \quad (14)$$

因此, 根据式(10)~(14), φ'_S 与 φ 满足关系

$$\tan \varphi'_S = \tan \varphi \times \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \quad (15)$$

Offner 光谱仪的狭缝上任一点像散可以表示为^[15,16]

$$a_1 = CI_M \times (\varphi'_S - \varphi'_M) \quad (16)$$

设主光线入射坐标为 $O(x, z)$, $k = \sqrt{x^2 + z^2} / R_2$, $k_1 = R_1 / R_2$, 则像散式中的三项整理可得

$$CI_M = k \times R_2 \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \quad (17)$$

$$\varphi'_S = \arctan \left[\frac{\sin \gamma'}{\sin \gamma} \times \tan \left(\arcsin k - 2 \arcsin \frac{k}{k_1} \right) \right] \quad (18)$$

$$\varphi'_M = 2 \arctan\left(\frac{k}{k_1} \cdot \frac{\sin\gamma}{\sin\gamma'}\right) - \arcsin\left(k \cdot \frac{\sin\gamma}{\sin\gamma'}\right) \quad (19)$$

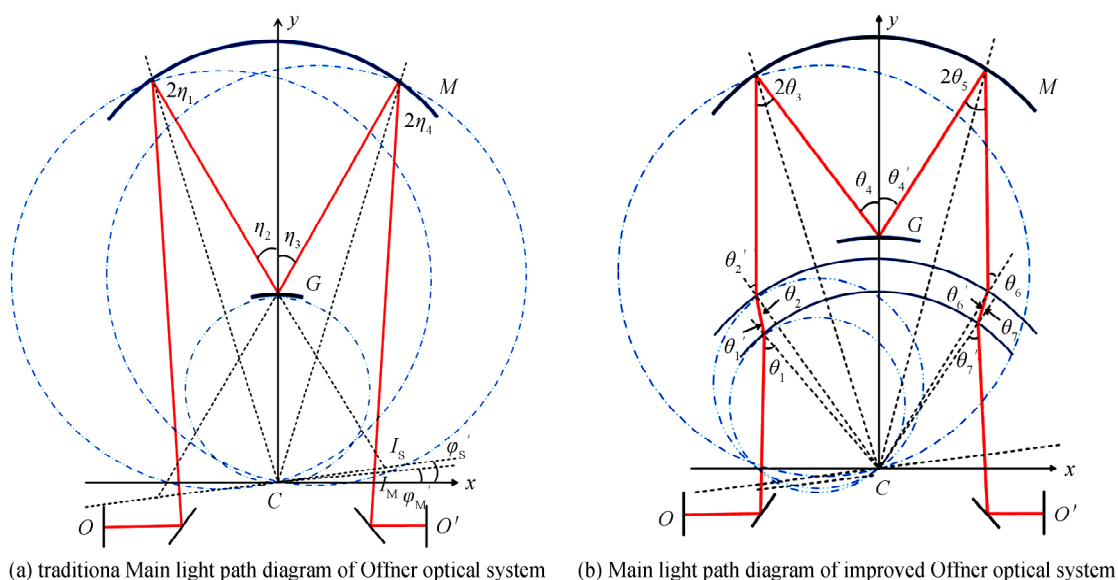


图 8 传统与改进后 Offner 光学系统主光线光路

Fig.8 Main light path diagram of traditional and improved Offner optical system

与上述推导过程类似,在光路中增加折射率为 n ,半径与凸面光栅相同,均为 R_2 弯月补偿透镜后,如图 8(b)所示,设 C 为狭缝上一点的主光线在反射镜 M 、凸面光栅 G 和弯月透镜入射点的内切圆的公共点, M 曲率半径为 R_1 , G 与弯月透镜分离,曲率半径均为 R_2 .主光线以 θ_1 入射到弯月透镜中,折射角为 θ_1' ,以 θ_2 出射弯月透镜,折射角为 θ_2' ,在 M 上反射角为 θ_3 .光栅处入射角和衍射角分别为 θ_4 和 θ_4' ,主光线再次入射 M 的入射角为 θ_5 ,第二次入射弯月透镜入射角为 θ_6 、折射角为 θ_6' ,出射时入射角为 θ_7 、折射角为 θ_7' .出射光路中子午和弧矢像点分别为 I_M 和 I_S ,子午像极角和弧矢像极角分别为 φ'_M 和 φ'_S ,类比传统 Offner 光谱仪, φ'_M 、 φ'_S 和 CI_M 满足如下等式

$$\varphi = 2\theta_3 + \theta_2 + \theta_1 - \theta_4 - \theta_2' - \theta_1' \quad (20)$$

$$\varphi_M' = \theta_4' + \theta_6 + \theta_7 - 2\theta_5 - \theta_6' - \theta_7' \quad (21)$$

$$CI_M = R_1 \sin \theta'_7 = R_1 n \sin \theta_7 = R_2 \sin \theta'_6 = R_2 \sin \theta_6 = R_1 \sin \theta_5 = R_2 \sin \theta'_4 \quad (22)$$

$$\tan\varphi'_s = \tan\varphi \times \frac{\sin\gamma}{\sin\gamma'} \quad (23)$$

光栅 G 表面上根据空间光栅方程有

$$\sin\theta_4' \times \cos\gamma' - \sin\theta_4 \times \cos\gamma = mg\lambda \quad (24)$$

$$\sin\theta_4' \times \sin x' - \sin\theta_4 \times \sin y = 0 \quad (25)$$

通过增加弯月透镜后的像散可以表示为

$$a_2 = CI_M \times (\phi'_S - \phi'_M) \quad (26)$$

设 $k' = \sqrt{x^2 + y^2} / R_2, k_1' = R_1 / R_2$, 由式(15)~(25), 可将式(26)中所得像散式的三项表示为

$$CI_M = k' \times R_2 \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \quad (27)$$

$$\varphi_s' = \arctan \left\{ \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \times \tan \left[3 \arcsin \left(\frac{k'}{k_1} \right) + \arcsin \left(\frac{k'}{n} \right) - 2 \arcsin k - \arcsin \left(\frac{k'}{nk_1} \right) \right] \right\} \quad (28)$$

$$\varphi'_M = 2\arcsin\left(k' \cdot \frac{\sin\gamma}{\sin\gamma'}\right) + \arcsin\left(\frac{k'}{nk'} \cdot \frac{\sin\gamma}{\sin\gamma'}\right) - 3\arcsin\left(\frac{k'}{k'} \cdot \frac{\sin\gamma}{\sin\gamma'}\right) - \arcsin\left(\frac{k'}{n} \cdot \frac{\sin\gamma}{\sin\gamma'}\right) \quad (29)$$

经 ZEMAX 与 Matlab 模拟优化,改进后的 Offner 光谱仪结构在超大视场光谱仪的 240 mm 视场下像散和调制传递函数可以满足超大视场高光谱成像要求,所设计的超大视场光谱仪光学结构如图 9.

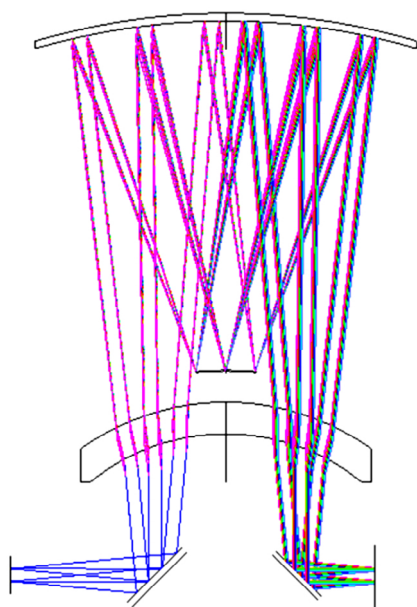
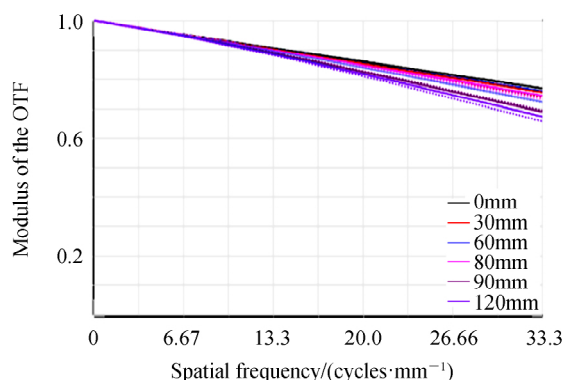
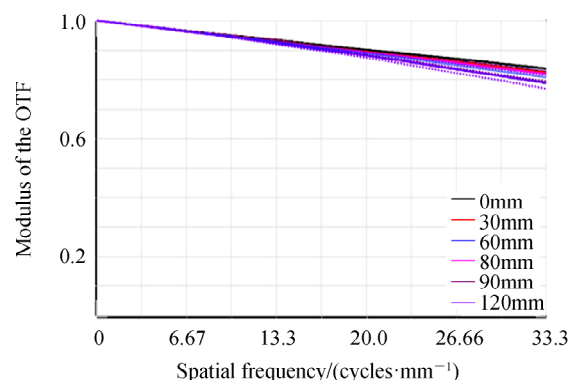


图9 超大视场光谱仪光学结构

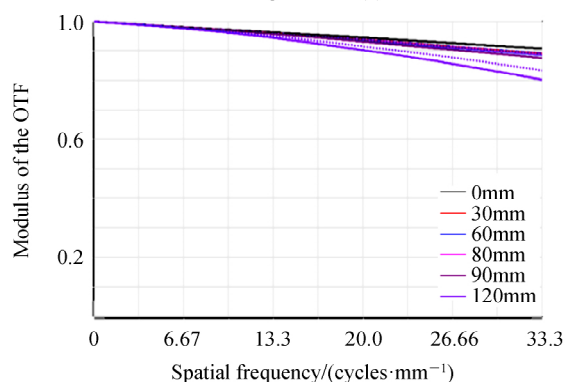
Fig.9 Optical path of spectrometer with ultra-large field of view



(a) Modulation transfer function of 1000 nm center wavelength



(b) Modulation transfer function of 700 nm center wavelength



(c) Modulation transfer function of 400 nm center wavelength

图11 调制传递函数值在中心及边缘波长的变化曲线

Fig.11 Modulation transfer function of center and marginal wavelenths

图10为光谱仪像面上点列图的均方根值半径随波长的变化关系曲线,在400~1 000 nm全波段范围内,点列图RMS值半径在 $3.9 \mu\text{m}$ 范围内,未超过探测器像元的 $1/2$ 尺寸,目标探测波段范围成像效果良好.图11为中心波长和边缘波长的调制传递函数曲线,调制传递函数值在 33.3 lp/mm 处大于0.65,满足成像质量要求.

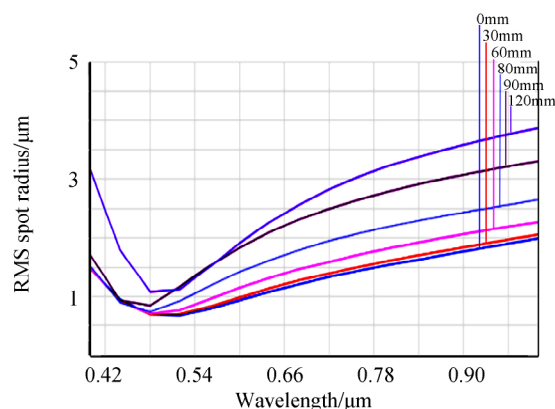


图10 不同波长下的点列图均方根值半径变化

Fig.10 RMS spot radius at different wavelengths

光谱弯曲和色畸变是考核光谱成像系统质量的重要指标,且对大视场的光谱仪器更为重要.两者均影响光谱仪的成像质量,给数据分析及处理造成困难.图12为光谱仪系统这两项指标的分析曲线,光谱仪系统的谱线弯曲优于0.4个像元,色畸变小于0.2个像元,满足使用要求.

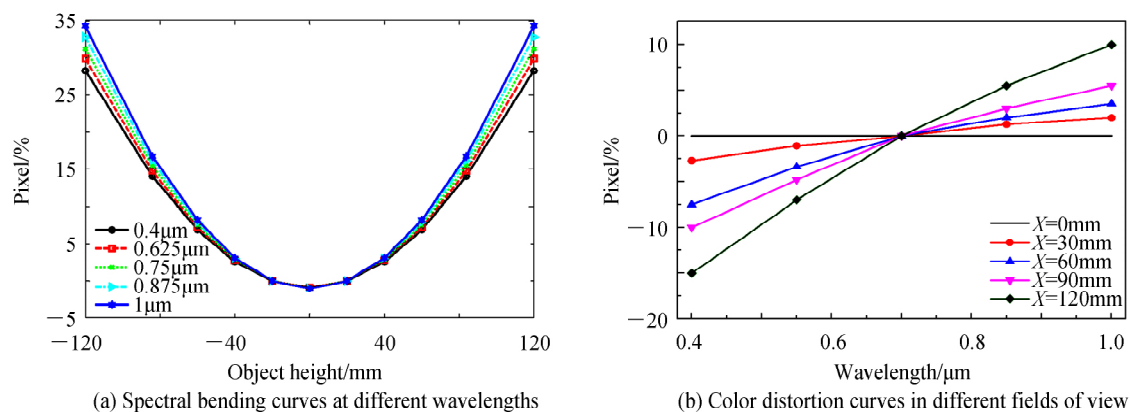


图 12 光谱仪系统的光谱弯曲及色畸变曲线

Fig.12 Spectrum bending and color distortion curve of spectrometer system

4 高光谱海洋水色仪全系统

把前置望远系统和超大视场光谱仪连接,二者用 240 mm 超长狭缝连接在一起.240 mm 超长狭缝位于前置望远系统的焦平面上,同时位于超大视场光谱仪的物面上.高光谱海洋水色仪全系统的光学结构如图 13,光谱仪局部放大图如图 14.

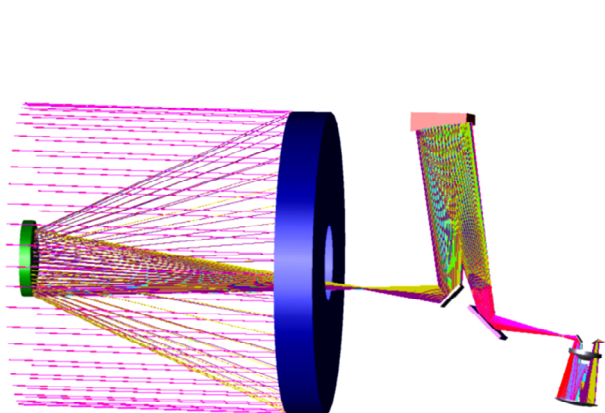


图 13 高光谱海洋水色光学结构

Fig.13 Optical path of hyperspectral ocean color imager

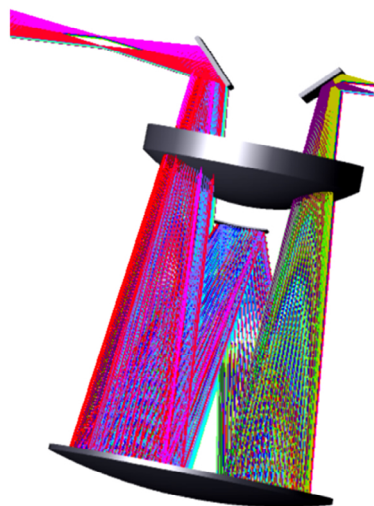
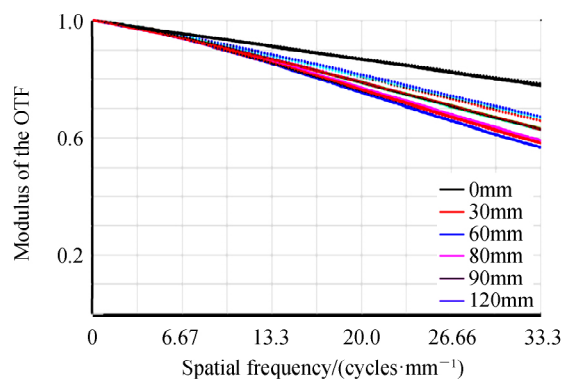
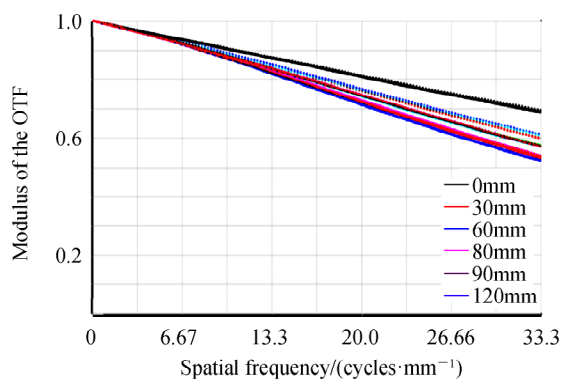


图 14 光谱仪局部放大图

Fig.14 Magnified view of spectrometer

高光谱海洋水色仪全系统不同波长的调制传递函数曲线如图 15,系统调制传递函数在 33.3 lp/mm 处大于 0.52,满足高光谱海洋水色仪成像质量要求.



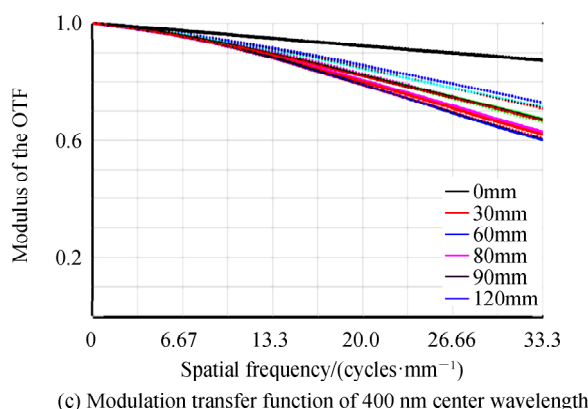


图 15 高光谱海洋水色仪调制传递函数随波长变化

Fig.15 Modulation transfer function of hyperspectral ocean color imager for different wavelengths

5 结论

本文设计了由超大口径前置望远系统和超大视场光谱仪组成的超大口径高光谱海洋水色仪。前置望远系统采用同轴三反光学系统结构,口径为 4 m,视场为 0.64° ,焦距为 21.6 m,波段范围为 400~1 000 nm。超大视场光谱仪采用改进的 Offner 结构,视场为 240 mm,光谱分辨率为 10 nm。探测器像元尺寸为 $15\ \mu\text{m}$,4 片探测器交错拼接实现 400 km 幅宽。超大视场光谱仪在 400~1 000 nm 的宽波段内,点列图半径的均方根值均小于 $3.9\ \mu\text{m}$,不同波长的 MTF 在 33.3 lp/mm 处大于 0.52,各项指标均满足应用要求。本文所设计光谱仪系统狭缝长度远大于目前国内外同类型仪器,针对于超大视场光谱仪采用传统 Offner 结构存在像散过大的问题,本文在光路中设计增加弯月补偿镜,并通过推导传统 Offner 光谱仪与改进后 Offner 光谱仪结构的理论模型分析系统像散。该光谱仪模型可为静止轨道高光谱海洋水色仪的研制提供参考,将极大提高静止轨道高光谱系统成像效果和探测能力。

参考文献

- [1] PAN De-lu, WANG Di-feng. Progress in scientific research of marine optical remote sensing in China[J]. *Progress in Earth Science*, 2004, **19**(4): 506-512.
潘德炉,王迪峰. 我国海洋光学遥感应用科学研究进展[J]. *地球科学进展*, 2004, **19**(4): 506-512.
- [2] WANG Quan-bin, QIN P, ZHAO Xiao-chen. Advances in the application study of the first geostationary ocean color imager[J]. *Coastal Engineering*, 2017, **36**(2): 71-78.
王泉斌,秦平,赵晓晨. 世界首颗静止轨道海洋水色卫星应用研究进展[J]. *海岸工程*, 2017, **36**(2): 71-78.
- [3] LIN Ming-sen, ZHANG You-guang, YUAN Xin-zhe, et al. Development history and trends of marine remote sensing satellites[J]. *Journal of Oceanography*, 2015, **37**(1): 1-10.
林明森,张有广,袁欣哲,等. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望[J]. *海洋学报*, 2015, **37**(1): 1-10.
- [4] JIANG Li-jun, WANG Qing, JIANG Li-li. Development and prospect of remote sensing research on coastal ocean color[J]. *Journal of Ludong University (Natural Science Edition)*, 2018, **34**(2): 173-177.
姜丽君,王庆,姜丽丽,等. 海岸带海洋水色遥感研究发展与展望[J]. *鲁东大学学报(自然科学版)*, 2018, **34**(2): 173-177.
- [5] MEI Lin-lu, VOUNTAS M, GÓMEZ-CHOVA L, et al. A cloud masking algorithm for the XBAER aerosol retrieval using MERIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **197**: 141-160.
- [6] LEVY R, MATTOO S, SAWYER V, et al. Exploring systematic offsets between aerosol products from the two MODIS sensors [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **1746**: 375-385.
- [7] TERUYUKI N, HIROSHI M, MASAHIRO H, et al. Overview and science highlights of the ADEOS-II/GLI project [J]. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 1994, **11**(7): 4073-4092.
- [8] DAI Li-qun, TANG Shao-fan, XU Li-na, et al. Development overview of space-borne multi-spectral imager with band range from visible to thermal infrared[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(2): 107-117.
戴立群,唐绍凡,徐丽娜,等. 从可见光到热红外全波段探测的星载多光谱成像仪器技术发展概述[J]. *红外技术*, 2019, **41**(2): 107-117.
- [9] EUNSONG O, SUG-WHAN K, YUKYEONG J, et al. In-orbit image performance simulation for GOCI from integrated ray tracing computation[J]. *SPIE*, 2011, **8175**: 81751H.
- [10] MENG Qing-yu, FU Zhong-liang, DONG Ji-hong, et al. The optical system design of the high-resolution visible

- spectral camera for china mars exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, **5**(5):458-464.
- 孟庆宇,付中梁,董吉洪,等. 火星探测高分辨率可见光相机光学系统设计[J]. *深空探测学报*, 2018, **5**(5):458-464.
- [11] XUE Qing-sheng. Large field of view off-axis three-reverse system design for hyperspectral imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 942-946.
- 薛庆生. 用于高光谱成像仪的大视场离轴三反系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(4): 942-946.
- [12] XUE Qing-sheng, HUANG Yu, LIN Guan-yu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822001.
- 薛庆生,黄煜,林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0822001.
- [13] THOMPSON D R, THORPE A K, FRANKENBERG C, *et al.* Space - based remote imaging spectroscopy of the Aliso Canyon CH₄ superemitter [J]. *Geophysical Research Letters* banner, 2016, **43**(12):6571-6578.
- [14] LI Zhen-wang, LIU Liang-yun, ZHANG Hao, *et al.* Radiometric calibration and validation of TG-1 hyper-spectral imager[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, **28**(5):850-857.
- 李振旺,刘良云,张浩,等. 天宫一号高光谱成像仪在轨辐射定标与验证[J]. *遥感技术与应用*, 2013, **28**(5): 850-857.
- [15] XESUS P, FUENTE R. Compact Offner - Wynne imaging spectrometers[J]. *Optics Communications*, 2014, **328**: 143-150.
- [16] ZHU Jia-cheng, SHEN Wei-min. Compact anastigmatic long-slit spectrometer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, **38**(4):542-548.
- 朱嘉诚,沈为民. 紧凑型消像散长狭缝光谱仪光学系统[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, **38**(4):542-548.

Foundation item: National Key Research and Development Program of China(Nos.2016YFB0500300, 2016YFB0500301, 2016YFB0500302, 2016YFB0500303, 2016YFB0500304, 2018YFF01011003), the National Natural Science Foundation of China(Nos.41575023, 41105014), Jilin Province Science and Technology Development Plan Project(No.20190302083GX), Consulting Research Project of Chinese Academy of Engineering(No.2020-XZ-5)