

文章编号 1004-924X(2017)06-1403-07

机载海洋改进型 Dyson 高光谱成像仪的研制

曹佃生¹, 石振华^{1,2*}, 林冠宇¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对海洋环境、海洋水色等领域的发展需要,设计了一种适于机载的宽视场、大相对孔径的改进型 Dyson 光谱成像系统。根据海洋环境污染的光学特性,利用不同目标反照率值估算目标信号的信噪比,将高光谱成像仪的工作波段扩宽至紫外波段;使用大像元尺寸的探测器、大相对孔径的成像系统来满足对海洋目标弱信号的识别,同时通过降低积分时间来避免近海岸沙滩信号过强引起的探测器饱和。该光谱仪的工作波段为 $0.32\sim 1.05\ \mu\text{m}$ 、相对孔径为 $f/1.8$ 、像元尺寸为 $24\ \mu\text{m}\times 24\ \mu\text{m}$,通过加入弯月形的矫正镜避免了狭缝、探测器、滤光片和单透镜相互之间产生干涉。设计结果表明,整个光学系统各波长的传递函数均大于 0.83,谱线弯曲和谱带弯曲均小于像元尺寸的 4%。所设计成像光谱仪系统适用于海洋环境污染,尤其是海洋溢油污染的监测。

关键词:光学遥感;高光谱成像仪;信噪比估算;紫外波段;大像元尺寸;大相对孔径

中图分类号:O433.1; TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172506.1403

Development of airborne ocean modified Dyson hyperspectral imager

CAO Dian-sheng¹, SHI Zhen-hua^{1,2*}, LIN Guan-yu¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: shizhenhua2008@yeah.net

Abstract: Aiming at development requirements of marine environment, ocean color and other fields, an airborne improved Dyson spectral imaging system with wide field of view and large relative aperture was designed. According to optical properties of marine environmental pollution, albedo value of different targets was used to estimate the signal-to-noise ratio (SNR) of target signal for expanding the working waveband of the hyper-spectral imager to the ultraviolet. A detector with large pixel size and an imaging system with large relative aperture were employed for the identification of weak signal of marine target; meanwhile, integration time was reduced to avoid detector saturation caused by excessively strong signals from inshore sand beach. The working waveband of the spectrometer was $0.32\sim 1.05\ \mu\text{m}$ with relative aperture of $f/1.8$ and pixel size of $24\ \mu\text{m}\times 24\ \mu\text{m}$. Mutual interferences among slit, detector, optical filter and single lens were avoided through adding falcate correction lens. The design result shows that the optical transfer function at all wavelengths of the whole optical system is

收稿日期:2016-12-06;修订日期:2017-12-18.

基金项目:国家重大科研仪器设备研制专项(No. 41527806);国家自然科学基金资助项目(No. 41504143);长春市重大科技攻关项目(No. 14KG024)

more than 0.83. In addition, both the smile and the keystone are less than 4% of pixel size. The designed imaging spectrometer is applicable to monitor marine environmental pollutions, especially marine oil pollution.

Key words: remote sensing; hyperspectral imager; estimated calculation of SNR; ultraviolet waveband; large pixel size; large relative aperture

1 引言

随着近海岸海洋环境污染问题的日益突出,利用新型遥感仪器监测近海岸海洋环境,获取海洋目标的高空间分辨率和高光谱分辨率的信息,在有效控制海洋环境污染,了解海洋水色信息方面具有举足轻重的作用。海洋环境光谱成像仪作为获取海洋环境监测和海洋水色信息的先进科学仪器,具有十分广泛的应用。机载海洋光谱成像仪在近海海洋环境、海洋水色监测方面具有比航天光谱成像仪更高的空间分辨率和更短的重访周期,因此在海洋环境污染调查和海洋水色信息获取等方面可弥补航天海洋水色光谱成像仪的空间分辨率低、重返周期长等不足。

国外对海洋遥感成像光谱仪的研究起步较早,AAHIS^[1]、PHILLS^[2]、CASI^[3]、SAMSON^[4]、VNIR^[5]、PRISM^[6-7]等海洋成像光谱仪专门用于监测近海岸海洋环境和获取海洋水色信息,在监测浮游生物分布、海藻区域、珊瑚生存状况等方面具有广泛的应用。这些仪器均为推扫式高光谱成像仪,工作波长主要集中在 350~1 050 nm,具有上百个谱段,带宽为 2~5 nm。其中,VNIR 和 PRISM 的光谱成像系统采用了由 Dyson 透镜和凹面光栅组成的 Dyson 光谱成像系统,与采用凸面光栅的 Offner 光谱成像系统的 PHILLS、SAMSON 和采用棱镜-光栅-棱镜的 AAHIS 成像系统相比,相对孔径可以达到 $f/1.8 \sim f/1.4$,并且具有高的响应均匀性,谱线弯曲和谱带弯曲较小,易于光谱和辐射定标。由于光谱成像系统不仅决定了成像光谱仪的光谱分辨率,还与空间分辨率有关,因此是设计成像光谱仪的关键。

近几年,我国在 Dyson 及其改进型成像光谱仪方面的研究有了一定的发展。薛庆生等^[8-10]设计了适用于不同领域的 Dyson 光谱成像系统,并

对国外现有 Dyson 光谱成像系统的指标和设计进行了提升和改进,为国内机载海洋成像光谱仪的研究提供了思路。但是在海洋水色和海洋环境研究方面,对仪器工作波段和海洋不同目标等的研究还不充分。

本文针对海洋环境污染问题的特殊需求,设计了大相对孔径、大像元尺寸的改进型 Dyson 光谱成像系统,基于像差理论分析了改进型 Dyson 光谱成像系统球差的校正方法,给出了设计优化结果,并对设计优化结果进行了分析与评价。

2 系统设计需求

根据近海岸海洋环境污染物和海洋水色信息的多样性,一般认为沿海海洋的光谱信号主要位于 $0.9 \mu\text{m}$ 以下。在设计海洋光谱成像系统时,考虑到海洋资源环境(如海面溢油污染)的光谱特性和需求,以及近紫外波段海洋污染的相关研究^[11-12],工作波段选择为 $0.32 \sim 1.05 \mu\text{m}$ 。在监测近海岸海洋环境目标时,由于海水的反射率低至 3%,而海岸沙子的反射率高达 90%,因此,改进型 Dyson 系统采用大相对孔径的光谱成像系统并且选择大像元尺寸的探测器来满足信噪比要求。但是这种系统识别亮目标时可能会引起探测器饱和,因此要求该系统数据的读出速率迅速。考虑大像元尺寸与近紫外波段的实际需求,本设计选取 e2v 厂家 77-00 型号的 CCD,其单个像元尺寸 $p_{\mu} = 24 \mu\text{m}$,光谱维和空间维的像元尺寸均为 512。为了满足载荷高度 $H = 5 \text{ km}$ 时地表分辨率 $\text{GSD} = 5 \text{ m}$ 的要求,根据地面分辨率、载荷高度和 CCD 像元尺寸确定成像光谱仪光学系统的焦距为 24 mm。光谱仪的变倍比取 1:1,则望远系统的焦距 $f_1' = 24 \text{ mm}$ 。为了增加地表的刈扫宽度,望远系统的视场 $2W = 28.6^\circ$,设计时 $2W$ 取 29° ,狭缝尺寸为 $12.288 \text{ mm} \times 48 \mu\text{m}$ 。本文采用 F 数为 1.8 来满足信噪比要求,该海洋成像光谱

仪的设计指标如表 1 所示。

根据海洋光谱成像系统的设计要求,利用 Modtran 估算进入到探测器的辐亮度,再据此估算不同目标、不同背景下仪器的信噪比。该仪器在 3 种不同亮度目标下的信噪比随波长的变化曲线如图 1 所示。对海水和溢油目标来说,反照率分别为 3% 和 5%,比海滩的反照率 90% 低。在积分时间为 20 ms,2 个光谱通道(5.7 nm)和相对孔径 $f/1.8$ 的观测条件下,在近紫外波段 0.32~0.38 μm 的信噪比均能达到 78 以上,满足海洋水色和海洋环境观测的应用需求。

表 1 海洋成像光谱仪的设计指标

Tab. 1 Design specifications of ocean imaging spectrometer

Parameter	Value
Spectral range/ nm	320~1050
Spectral resolution/nm	≤ 3
Field of view/(°)	29
Spatial resolution/ m	5($H=5$ km)
Detector pixel size/ μm	24 \times 24
Detector array size/ pixel	512 \times 512
Focal length of system/ mm	24
Focal length of telescope/ mm	24
Slit size(L \times W)	12.288 mm \times 48 μm

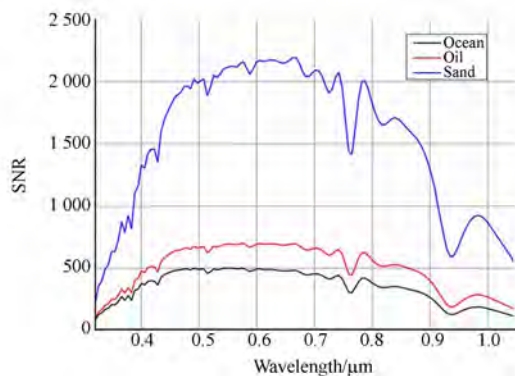


图 1 在太阳天顶角为 45° , 观测天底角为 45° , 观测方位相对太阳位置为 135° , 积分时间为 20 ms, 2 个光谱通道(5.7 nm)的条件下,海洋成像光谱仪在 3 种不同目标下的信噪比

Fig. 1 Wavelength versus SNR for three different targets with sun zenith angle of 45° , observation nadir angle of 45° , 135° relative azimuth angle to sun, integration time of 20 ms and 2 spectral channels (5.7 nm)

3 光学系统设计

3.1 色散系统设计

根据设计要求,该光谱成像系统是大相对孔径、宽波段、大视场的成像系统,Dyson 色散系统在设计波长处无 Seidel 像差,成像质量优秀,谱线弯曲和谱带弯曲均能控制在 5% 以内。传统的 Dyson 光谱成像系统具有如下两个缺点^[9]:一是透镜材料为单一材料,无法校正色差;二是商业化的焦平面处有前置窗口保护玻璃,探测器焦面到保护玻璃之间有一定的距离,而传统 Dyson 成像系统的入射狭缝和探测器焦面均置于单透镜的平面上,造成入射狭缝和探测器的安装困难。如果将成像位置远离最佳成像位置的话,该光谱成像系统的成像质量会迅速下降。Mouroulis^[13]指出减少成像面处单透镜的厚度并不会使中心波长的像散变化,但会产生球差和色差。考虑到主光线的正入射和单透镜在成像空间的缩短量 d ,透镜的折射率 n_i 和相对孔径 $f/\#$,三阶纵向球差 LSA 为:

$$LSA = d(n_i^2 - 1) / [8n_i^3 (f/\#)^2]. \quad (1)$$

除此之外,焦距的位置还取决于波长,最佳的焦点位于光斑尺寸最小处,即:

$$D_{CLC} = 0.25 LSA / (f/\#). \quad (2)$$

由于最佳焦点位置处的弥散圆最小,焦面和单透镜之间的距离 t_{CLC} :

$$t_{CLC} = \frac{d}{n_i} \left[1 - \frac{3}{32} \frac{n_i^2 - 1}{n_i^2 (f/\#)^2} \right]. \quad (3)$$

根据设计指标要求,当单透镜材料为 Silica,波长为 0.32~1.05 μm , $f/1.8$ 时,成像空间缩短距离 d 为不同值时,最小光斑尺寸 D_{CLC} 和焦点位置与波长的关系如图 2 所示。从图中可以看出,在 d 相同时,最小光斑尺寸随着波长的变化较小;当 d 从 0.5~3 mm 时,最小光斑尺寸大约从 1 变化到 6 μm 左右,说明 d 对该光谱成像系统的影响较大。从式(1)可知,三阶纵向球差与 d 成正相关关系,因此设计时要在保证探测器面与单透镜不发生干涉的前提下,尽可能减少它们之间的距离。对于同一 d ,当波长从 0.32 μm 变化到 1.05 μm 时,焦点位置的变化几乎达到 40 μm ,因此为了减少像面处单色像差的影响,需要将探测器面倾斜一定的小角度 α :

$$\alpha = \arctan \left[\frac{t_{CLC}(\lambda_S) - t_{CLC}(\lambda_L)}{h} \right]. \quad (4)$$

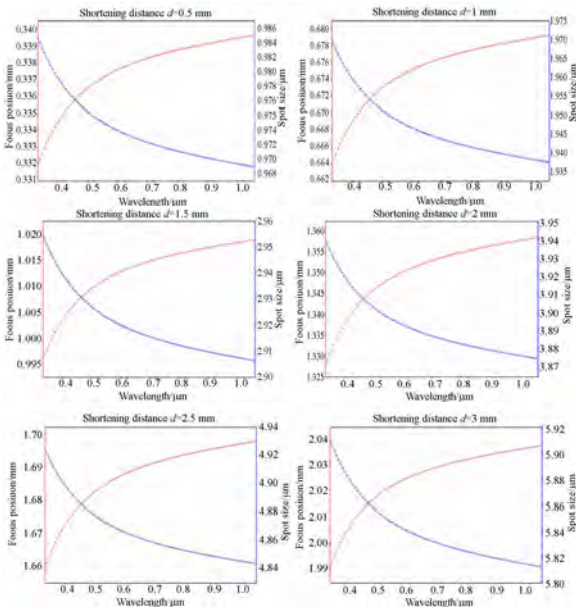


图 2 单透镜不同缩短距离时,焦点位置与光斑尺寸与波长之间的关系曲线

Fig. 2 Spot size and focal curve for a modified Dyson spectrometer with different shortening distances between lens and image plane

Mouroulis 指出虽然将探测器与单透镜像面分开一定距离会引起球差,但是这种球差使得像斑更加均匀。一般情况下,尽管可保证探测器和单透镜不发生相互干涉,但是由于狭缝位置距离色散系统的像面较近,也会导致探测器无法正确安置,因此需要继续增加探测器像面与单透镜之间的距离^[18]。由焦平面移动所引起的球差可通过两种方法来消除或者减少:一是通过对称的非球形光栅刻痕来实现,采用非球面光栅来校正球差,但是此类型的光栅加工困难。在光栅刻划时,复杂的刻划部件运动可能会使光栅表面产生高空间频率的不规则性^[14];二是在靠近光栅表面引入非球面校正镜,利用该校正镜所产生的球差抵消焦面和狭缝移动所产生的球差^[15]。本文在近光栅位置处加入弯月形透镜来校正由于狭缝和像面移动所产生的像差,并且通过折转像面的位置使得狭缝和像面置于不同平面内,避免狭缝与像面产生干涉,设计光路如图 3 所示。

在光线追迹图中,狭缝与单透镜的分开距离为 1 mm,像面与级次滤光片的距离为 3 mm,级次滤光片厚度为 1 mm,且它与单透镜的分开距离为 0.5 mm,这种方式既可保证狭缝安装方便,使所选探测器、级次滤光片安装时不会与单透镜

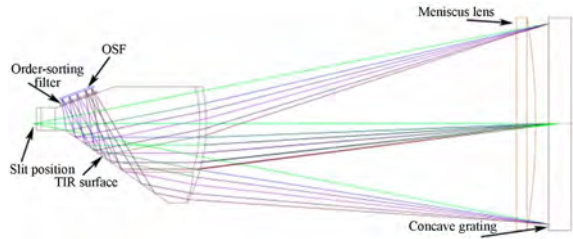


图 3 色散系统光路图

Fig. 3 Ray trace of dispersion system

产生干涉。级次滤光片^[16]的加入可消除杂散光,并且能够消除由于探测器反射光所产生的鬼影的影响。本设计所采用的单透镜材料为 Si,保证在近紫外波段处可透,单透镜一表面与光轴夹角为 55°,该角度下所有光线的入射角均大于全反射临界角 43.6°;校正镜为弯月形透镜,材料为 Ohara 公司的 BSM51Y;光栅为凹面光栅,其光栅刻线密度为 118 g/mm,衍射级次为 +1 级,刻痕槽型为三角形槽型,可提高衍射效率,降低偏振敏感度。利用 Zemax 模拟计算所知,短波波长的能量集中度已达到衍射极限,而中心波长和长波波长处的能量集中度曲线较差,结果如图 4 所示。从图中可以看出,中心波长和长波波长 95% 以上的能量集中在一个像元内,在此情况下可以获得较佳的成像质量。图 5 所示为不同波长和不同视场处的色散系统的点列图,从图中可以看出,弥散斑尺寸均小于单个像元尺寸 24 μm。

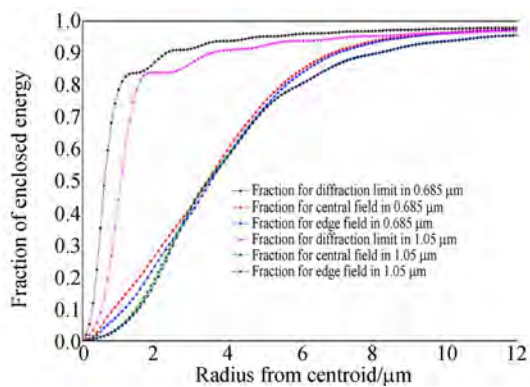


图 4 海洋光谱成像系统的能量集中度曲线

Fig. 4 Encircled energy of ocean spectral imaging system

对于推扫式高光谱成像系统而言,谱线弯曲和谱带弯曲直接影响高光谱成像系统的成像质量和光谱分辨率,其最大值最好控制在 10% 的像元,甚至 5% 的像元内。在整个波长处,最大谱线

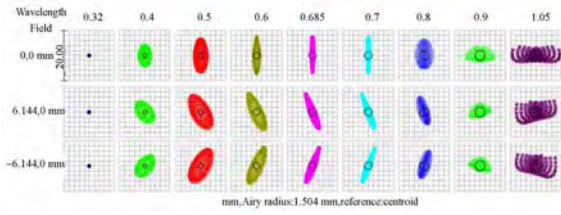


图 5 海洋光谱成像系统不同波长不同视场的点列图
Fig. 5 Spot diagrams of ocean spectral imaging system for different wavelengths and fields of view

弯曲为 0.7% 像元(谱线弯曲量为 $0.17 \mu\text{m}$, 对应的探测器的像元尺寸为 $24 \mu\text{m}$)。在整个视场处, 最大谱带弯曲为 3.9% 像元(最大谱带弯曲量为 $0.94 \mu\text{m}$)。由分析可知, 该光谱成像系统在整个波段范围内具有良好的成像质量, 各项设计指标均满足技术要求。

3.2 光学系统匹配设计

由表 1 可知, 望远系统为大相对口径、宽波段、视场较大的系统, 两反系统几乎能够达到衍射极限的情形; 同折射系统相比, 它不仅可以避免色差, 而且不影响光谱成像系统的谱带弯曲。由于两镜反射系统只存在一个虚拟孔径光阑, 因此在设计机械结构时要考虑杂光的影响。关于前置光学系统的设计与分析, 本文不再赘述, 具体可参考文献[17]。

将望远系统和色散系统进行匹配, 并对光学系统进行一体化设计, 得到的光谱成像系统的结构示意图如图 6 所示。系统体积为 $426 \text{ mm} \times 144 \text{ mm} \times 144 \text{ mm}$, 在满足成像质量良好的前提下, 适用于航空遥感领域。全系统不同波长的 MTF 是评价光谱仪成像系统质量的重要因素, 其像面处的传递函数曲线如图 7 所示。由图可知, 该海洋光谱成像系统的光学传递函数在 Nyquist

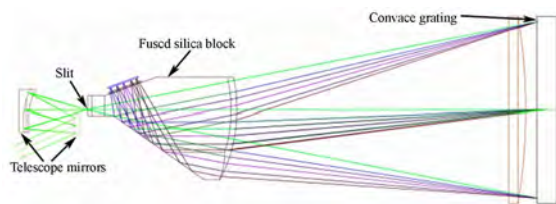
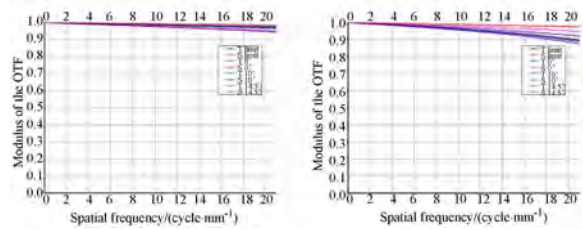
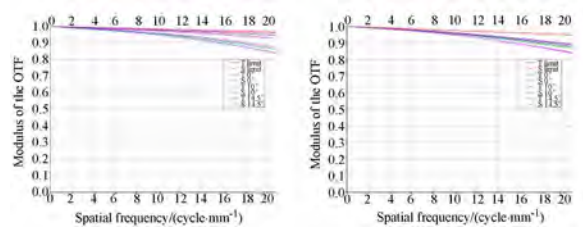


图 6 望远系统和色散系统的光线追迹图
Fig. 6 Ray trace of telescope and dispersion system



(a) $0.32 \mu\text{m}$ (b) $0.5 \mu\text{m}$



(c) $0.685 \mu\text{m}$ (d) $1.05 \mu\text{m}$

图 7 海洋成像光谱仪不同波长的传递函数

Fig. 7 Wavelengths versus optical transfer function for ocean imaging spectrometer

频率为 21 lp/mm 时均能够达到 0.83 以上, 满足机载海洋光学遥感的要求。

4 结 论

机载大相对口径、大探测器像元尺寸的海洋成像光谱仪已成为海洋应用的基本需求, 本文根据不同目标的反照率值, 完成了这些目标信号的信噪比估算, 在此条件和前人工作的基础上, 将工作波段范围扩宽至近紫外波段以满足对海洋溢油污染的识别, 并利用大像元尺寸的探测器和缩短积分时间来解决暗、亮目标之间的所产生的信号不足和探测器饱和之间的矛盾。根据设计需求, 设计了视场角为 29° , 工作波段为 $0.32 \sim 1.05 \mu\text{m}$, 相对口径为 1.8, 光谱分辨率小于 3 nm 的改进型 Dyson 光谱成像仪系统。该系统通过加入弯月形的校正镜, 将狭缝与探测器接收面分离, 狭缝与单透镜分离, 探测器、滤光片和单透镜分离, 避免了相互之间的干涉。设计结果表明, 各个波长处的光学传递函数均达到 0.83 以上, 谱带弯曲和谱线弯曲均小于像元尺寸的 4%, 可应用在海洋遥感中。

参考文献:

- [1] TOPPING M Q, PFEIFFER J E, SPARKS A W, *et al.*. Advanced airborne hyperspectral imaging system (AAHIS)[J]. *SPIE*, 2002, 4816:1.
- [2] DAVIS C O, BOWLES J, LEATHERS R A, *et al.*. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration[J]. *Optics Express*, 2002, 10(4): 210-221.
- [3] GOEL P K, PRASHER S O, LANDRY J A, *et al.*. Potential of airborne hyperspectral remote sensing to detect nitrogen deficiency and weed infestation in corn[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2003, 38(2): 99-124.
- [4] KOHLER D D, BISSETT W P, STEWARD R G, *et al.*. Hyperspectral remote sensing of the coastal environment[C]. *Fourier Transform Spectroscopy/Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment*, *Optical Society of America*, 2007: JWA19.
- [5] MOUROULIS P, GREEN R O, WILSON D W. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 9087-9096.
- [6] VAN GORP B, MOUROULIS P, WILSON D, *et al.*. Polarization and stray light considerations for the Portable Remote Imaging Spectrometer (PRISM)[J]. *SPIE*, 2010, 7812: 78120R.
- [7] MOUROULIS P, VAN GORP B, GREEN R O, *et al.*. *Design of an airborne portable remote imaging spectrometer (PRISM) for the coastal ocean* [R]. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2010.
- [8] 薛庆生. 宽视场大相对孔径高光谱成像仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0222003.
XUE Q SH. Optical system design of wide field of view and large relative-aperture hyperspectral imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0222003. (in Chinese)
- [9] 薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0316003.
XUE Q SH. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 0316003. (in Chinese)
- [10] 薛庆生, 王淑荣, 于向阳. 大相对孔径宽波段 Dyson 光谱成像系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2535-2542.
XUE Q SH, WANG SH R, YU X Y. Dyson spectral imaging system with large relative aperture and wide spectral region[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2535-2542. (in Chinese)
- [11] 方西安, 黄小仙, 尹达一, 等. 海洋溢油模拟目标的紫外反射特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(3): 738-742.
FANG S A, HUANG X X, YIN D Y, *et al.*. Research on the ultraviolet reflectivity characteristic of simulative targets of oil spill on the ocean[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(3): 738-742. (in Chinese)
- [12] SHI Z H, YU L, CAO D S, *et al.*. Airborne ultraviolet imaging system for oil slick surveillance: oil-seawater contrast, imaging concept, signal-to-noise ratio, optical design, and optomechanical model[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(25): 7648-7655.
- [13] MONTERO-ORILLE C, PRIETO-BLANCO X, GONZÁLEZ-NUÑEZ H, *et al.*. Design of Dyson imaging spectrometers based on the Rowland circle concept [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(35): 6487-6494.
- [14] XUE Q S. Modified Dyson imaging spectrometer with an aspheric grating surface[J]. *Optics Communications*, 2013, 308: 260-264.
- [15] WARREN D W, GUTIERREZ D J, KEIM E R. Dyson spectrometers for high-performance infrared applications[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(10): 103601.
- [16] MOUROULIS P, VAN GORP B, GREEN R O, *et al.*. Optical design of a Cube Sat-compatible imaging spectrometer [J]. *SPIE*, 2014: 92220D-92220D-8.
- [17] MOUROULIS P, VAN GORP B, GREEN R O, *et al.*. Portable remote imaging spectrometer coastal ocean sensor: design, characteristics, and

first flight results[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(7): 1363-1380.

- [18] 高志良. 高光谱成像仪等效焦面装调模组设计[J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 644-650.

GAO ZH L. Design of hyperspectral imager equivalent focal plane assembling module[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2014, 7(4): 644-650. (in Chinese)

作者简介:



曹佃生(1987—),男,山东日照人,博士,助理研究员,2007年于吉林大学获得学士学位,2012年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事空间光学遥感仪器光机结构设计与分析方面的研究。E-mail: caodiansheng1987@163.com

通讯作者:



石振华(1989—),男,山东泰安人,博士研究生,主要从事海洋高光谱成像仪、光机系统设计与分析、海洋溢油污染遥感监测技术等方面的研究。E-mail: shizhenhua2008@yeah.net