

doi:10.3788/gzxb20184711.1101003

水下环境与目标监测高光谱成像仪光学系统

于磊,徐明明,陈结祥,薛辉

(中国科学院安徽光学精密机械研究所,合肥 230031)

摘 要:根据水下环境主要监测要素的特征光谱分析了可采用的观测方法,并给出对应的高光谱成像仪光学系统性能参数;分别设计了望远镜和成像光谱系统并进行匹配,望远镜以双高斯透射式系统为原型,利用较少的光学材料种类完成像方远心优化;成像光谱系统基于 Dyson 系统,通过光程分析与透镜的添加实现了良好的光学性能,并保证了工程的可实施性.最终设计系统在 350~700 nm 波段上实现了视场角为 28°、 F 数为 3、光谱分辨率为 3.5 nm、系统空间分辨率为 1 mrad 的良好光学性能,设计搭建的原理样机性能测试验证了设计理论的正确性.

关键词:成像光谱仪;高光谱;光学设计;水下探测;原理样机

中图分类号: O433.1; TH744.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)11-1101003-8

Optical System of the Hyper-spectral Imager for the Underwater Environment and Targets Monitoring

YU Lei, XU Ming-ming, CHEN Jie-xiang, XUE Hui

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The observation method is analyzed and the performances parameters of corresponding spectrometer are obtained based on the characteristic spectrums of the major elements in the underwater environment. The telescope and the imaging spectrometer are separately designed and coupled together. The telescope adopted double Gauss refractive system and realized optimization of the telecentric design with few optical materials. The imaging spectrometer based on the Dyson mounting also performed excellently with the analysis of optical path and the added lenses. The final design obtained the excellent performances that the field of view is 28°, the F number is 3, the spectral resolution is 3.5 nm, and the spatial resolution is 1 mrad in the waveband of 350 ~ 700 nm. The prototype verified the design theory.

Key words: Imaging spectrometer; Hyper spectrum; Optical design; Underwater detection; Prototype

OCIS Codes: 010.4450; 120.0280; 120.4570; 120.6200; 300.6190

0 引言

高光谱成像探测技术因其测量范围大、实时性强和应用性广等特点在海洋环境实时监测中起着举足轻重的作用^[1-3].目前,用于海洋水色探测的高光谱成像仪器主要搭载于卫星平台或飞机平台,在人们的生产生活中已有很多重要的应用.海洋内部的各种物质和组成,包括水底的地形,珊瑚、海藻等水下动植物,各种泥沙悬浊物,海底矿产以及一些特殊的水下目标等,都能以各种不同的特征光谱现象展示出来.研制可用于水下环境和目标监测的高光谱成像仪器便可对这些现象进行观测,进而有效获取海洋内部信息,具有重要的意义.

水下高光谱成像探测目前见诸报道的研究并不多,主要原因有二:一是高光谱成像仪器在进行水下目标探测时需要针对不同的应用环境采用不同的探测机理,为确保仪器可在复杂的海洋环境中准确提取关键信

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(No.41504143),中国科学院科研装备研制项目(No.YJKYYQ20170048)和中国科学院青年创新促进会人才项目(No.2016203)资助

第一作者:于磊(1984-),男,副研究员,博士,主要研究方向为成像光谱遥感仪器设计.Email:top1gods@email.ustc.edu.cn

收稿日期:2018-07-13; **录用日期:**2018-11-13

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

息,其相应的关键技术各有不同;二是水底目标的高光谱成像探测技术在军事上和经济上均有战略意义,故技术公开化程度极为有限,研究过程中很难借鉴国外先进技术,必须走自我研发创新的道路.从一些已公开的少量信息可以知道,美国在水下目标的高光谱成像探测上投入了相当多的精力,并已完成了相当多的工作.

本文对一种具备大视场和高分辨率的水下目标探测高光谱成像仪光学系统进行了研究,主要工作和创新之处:根据切实的水下环境目标特征光谱分析了仪器进行探测的方式和机理,并依据具体应用需求计算设定了仪器光学系统的性能参数,使得仪器系统指标有据可循;利用有限的几种材料完成了透射式望远系统的设计,视场达到 28° ,成像质量优越,且保证了紫外波段的良好传输效率;成像光谱系统以 Dyson 结构为基础,通过光程分析了最优消像散条件,并通过额外透镜的引入帮助消除了系统的额外像差,从而使得改进的 Dyson 系统具备足够的空间间距,大大降低了其工程化应用的难度.最终设计系统覆盖 $350 \sim 700 \text{ nm}$ 波段,光谱分辨率达到 3.5 nm ,系统空间分辨率达到 1 mrad , F 数达到 3,根据设计搭建的原理样机性能指标测试结果与设计结果基本相符,验证了系统理论设计的正确性.该研究将对未来用于水下环境监测和 underwater 目标探测的高光谱成像仪研制提供一种思路.

1 探测目标机理

通常用于海洋水体遥感的高光谱成像仪主要工作波段多集中在海洋窗口即可见光波段,后又增加了红外波段来对溢油、赤潮等海洋污染进行监测,随着研究的逐步深入,研究人员发现紫外波段也在海洋遥感领域中具有不可忽视的作用.基于此,分析了目前研究主要关注的海洋水体特征物质分布及其对应的特征光谱^[4],如表 1.可知,涉及到水体内部物质分布的主要特征光谱分布于 $350 \sim 700 \text{ nm}$ 波段,因此仪器波段同样设置为该波段.为了对这些特征光谱进行区分,仪器需具备 5 nm 以上的光谱分辨率.

表 1 海洋水体观测特征波段与物质
Table 1 Characteristic bands of the materials in the ocean

Bands (primary wavelength)/nm	FWHM (threshold)/nm	Observed targets		
350~390 (350, 360, 385)	15	Oil slicks, COD		
400~430 (412, 425)	10	Yellow substance and turbidity		
433~453 (443)	10	Chlorophyll absorption maximum, Eutrophication		
460~500 (460, 475, 490)	10	Chlorophyll and other pigments absorption		
510~535 (510, 532)	10	Chlorophyll absorption,		
555~590 (555, 583)	10 <tr <td>615~680 (617, 640, 655, 665, 678)</td> <td>10</td> <td>Suspended sediment, Fluorescence signal, Chlorophyll, Atmospheric correction</td>	615~680 (617, 640, 655, 665, 678)	10	Suspended sediment, Fluorescence signal, Chlorophyll, Atmospheric correction

海洋遥感最常采用的观测方式是星载或机载的高光谱成像仪,这种观测方式具备大观测范围和高时间分辨率的特点,可以提供丰富的观测信息,并在良好的观测天气下可以通过海洋窗口获取一定深度下的水体信息;但是由于海洋环境和天气的复杂要素,使得这种观测方式下的被动观测很难持续提供水下环境监测,即使是在观测条件极为优越的环境中也无法提供海洋水体深处的内部信息.如果我们将高光谱成像仪用于机载平台进行水体内部信息探测,与主动探测手段结合是个好的方法^[5].通过激光光源等高能、宽波段辐射光源对水体进行照射,用高光谱成像仪器将水下地形和目标受光源照射后辐射的特征光谱进行接收和目标成像,从而完成水下环境监测,其原理如图 1.

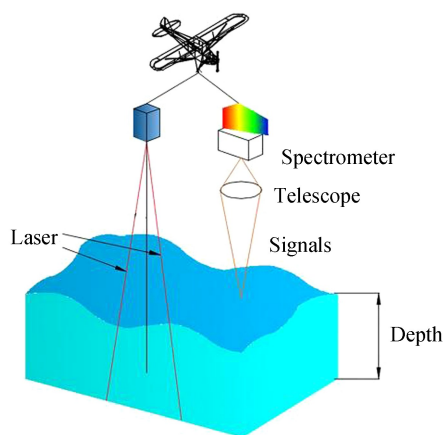


图 1 机载高光谱成像仪水下主动探测原理
Fig.1 Underwater active detection principle of the hyperspectral imager by air

机载平台仪器的一个重要问题是不能对重点观测区域提供持续的长周期观测,为解决这一问题,可将仪

器放置于海洋观测基站上,便可使仪器持续工作提供水下环境监测信息.我国在沿海区域建立了大量的小型基站用于放置持续观测仪器.高光谱成像探测仪器可直接安置在基站上,随时对近海浅滩处 10 m 以内的区域进行观测,主要获取各种藻类、无机物和有机物的光谱信息,并同时提供水面上的各类观测信息;当观测条件不利时,可以搭配激光或 LED 光源通过主动探测的方式完成水下观测.高光谱成像仪还有一种观测方式,将仪器进行防水处理后进行定点投放或舰艇水下携带,这种观测方式可以对浅水区和深水区进行定点监测^[6].

由于水对光的散射、选择性吸收和折射率的不同,会对水中的光学成像带来较大的影响.较常用的光学系统设计方法包括同心球面防护窗、镜头前端增加附加镜组和使用水接触专用摄影物镜^[7].本文设计的成像光谱仪系统可使用同心球面防护窗,这样不会影响后端的光学系统设计.海洋深处的光学辐射较弱,若仪器需要对这里进行探测,需配备主动光源对待探测目标进行照射,进而实现水下环境与目标监测识别.设定的仪器所需具备的基本性能指标如表 2.

表 2 高光谱成像仪性能参数
Table 2 Parameters of the hyperspectral imager

Parameter	Value
F/#	3
Waveband	350~700 nm
Field of view	28°
Spatial resolution (per pixel)	0.5 mrad
Spectral resolution	≤5 nm
Detector	CCD, 1 024×1 024, 13 μm

2 望远系统设计

仪器光学系统观测波段包括紫外波段,且工作波段较宽,考虑到视场角要达到 28°,且焦距相对较短,使用反射式系统光学元件较难加工和装调且造价较昂贵,因此考虑使用透射式望远镜系统.由于适用于紫外波段的光学透射材料并不多,为了实现望远系统的高光学性能,综合考虑各要素,选择双高斯形式作为望远镜系统原型以提供较大的视场角和较小的 F 数优化设计,并实现良好的成像能力.设计系统二维光路结构如图 2.

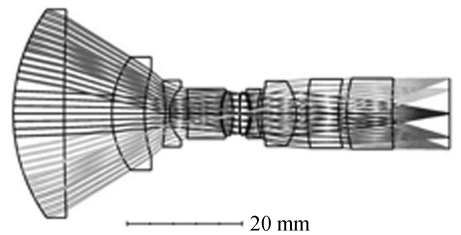


图 2 望远系统光路
Fig.2 Optical path of the refractive telescope

望远镜由十片透镜组成,其中前组有 5 片透镜,后组有 5 片透镜;前镜组的材料分别为:Silica、CaF₂、Silica、

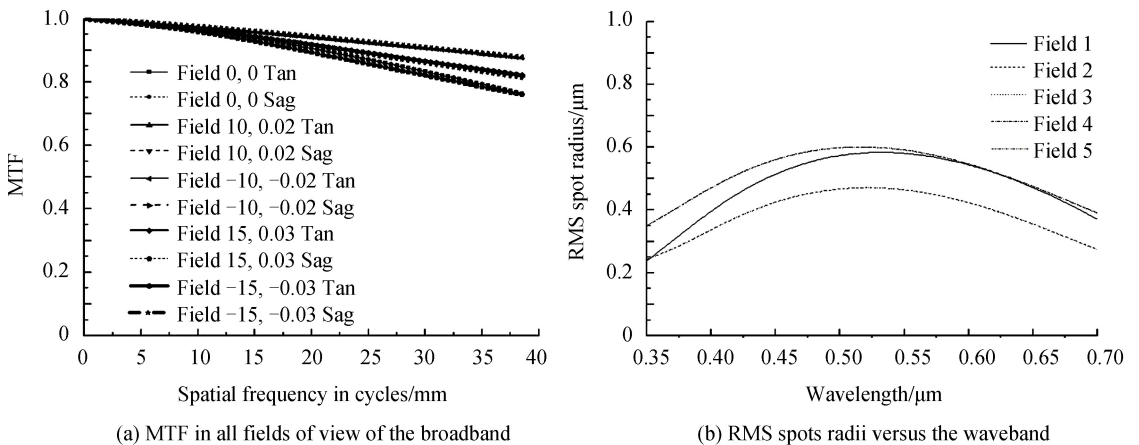


图 3 望远镜设计结果
Fig.3 Design results of the telescope

BK7 和 CaF_2 , 后镜组材料分别为 CaF_2 、Silica、 CaF_2 、FK5 和 FK5. 由于系统涉及的紫外波段并不长, 故除 Silica 和 CaF_2 外增加了 2 种在 350 nm 以上具有不错传输效率的材料, 从而更有效的去除色差影响. 望远镜设计结果如图 3.

由图 3(a) 可知, 全视场全波段的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 在 40 lp/mm 的奈奎斯特频率下优于 0.6, 根据图 3(b), 最终各视场的成像像斑的点列图半径在全波段小于 $6 \mu\text{m}$, 系统具有良好的成像质量.

3 成像光谱系统设计

Dyson 成像光谱系统由凹面光栅和半球透镜组成, 传统结构将狭缝置于光栅和透镜的共同曲率中心上, 狭缝入射光经半球透镜入射, 并由光栅进行色散反射回经透镜而成像^[8]. 其结构紧凑, 在同样的成像质量下具有更高的数值孔径^[9-10]. 但是由于过于紧凑的结构使得其在工程化应用上远少于 Offner 系统^[11]. 为了改善紧凑布局带来的光机结构布局影响, 对 Dyson 结构进行了改进研究, 改进之后的基本光路如图 4.

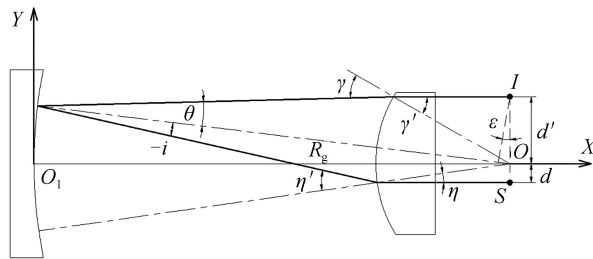


图 4 改进型 Dyson 结构光路图
Fig.4 Optical path of the advanced Dyson spectrometer

图中 i 和 θ 满足光栅方程, γ 和 γ' , η 和 η' 均满足 Snell 定律. 根据图 3 的光路图分析, 在满足同心系统的前提下, 减小了半球透镜的厚度, 使狭缝点 S 在轴向和垂直轴向上均具有一定的距离. 根据 Lobb 等人的理论^[12], 狭缝 S 离开共轴的垂直距离 d 和像面对应像点 I 的垂直距离 d' 满足如下条件

$$(-d/\cos \epsilon)/R_g + (d'/\cos \epsilon)/R_g = g\lambda \tag{1}$$

式中夹角 ϵ 在像散消除时满足几何关系 $\epsilon = \gamma' - \gamma + i$. 故所有角度关系满足如下条件

$$\eta - \eta' - i + \theta + \gamma - \gamma' = 0 \tag{2}$$

根据 Snell 定理, 各入射角和衍射角满足 $\sin \eta/\sin \eta' = 1/n$ 和 $\sin \gamma/\sin \gamma' = 1/n$. 由三角关系式可知 $\eta = \arctan(d/R_1)$, $R_g/\sin \eta' = R_1/\sin i$. 将以上各式合并可获得熔石英半球透镜的曲率半径 R_1 和凹面光栅的曲率半径 R_g 之间的关系^[13].

$$\begin{aligned} 0 = & \arctan\left(\frac{d}{R_1}\right) - \arcsin\left\{n \sin\left[\arctan\left(\frac{d}{R_1}\right)\right]\right\} + \arcsin\left\{\frac{R_1}{R_g}\left\{n \sin\left[\arctan\left(\frac{d}{R_1}\right)\right]\right\}\right\} + \\ & \arcsin\left\{g\lambda + \frac{nR_1}{R_g} \sin\left[\arctan\left(\frac{d}{R_1}\right)\right]\right\} + \arcsin\left\{g\lambda R_g \cos\left\{\arcsin\left\{n \sin\left[\arctan\left(\frac{d}{R_1}\right)\right]\right\}\right\}\right\} - \arctan\left(\frac{d}{R_1}\right) - \\ & \arcsin\left\{\frac{R_1}{R_g}\left\{n \sin\left[\arctan\left(\frac{d}{R_1}\right)\right]\right\}\right\} + d/R_1 \Big\} - \arcsin\left\{n\left\{g\lambda R_g \cos\left\{\arcsin\left\{n \sin\left[\arctan\left(\frac{d}{R_1}\right)\right]\right\}\right\}\right\} - \right. \\ & \left. \arctan\left(\frac{d}{R_1}\right) - \arcsin\left\{\frac{R_1}{R_g}\left\{n \sin\left[\arctan\left(\frac{d}{R_1}\right)\right]\right\}\right\} + d/R_1 \Big\} \right\} \tag{3} \end{aligned}$$

式(3)即改进型 Dyson 成像光谱仪结构的消像差条件. 需要注意的是, 这个条件并不能消除狭缝和像面在轴向上与半球透镜之间的距离所带来的额外像差(主要是球差和色差). 在光路中增加了两片弯月形透镜, 并保持系统基本光学元件的同心性, 增加了消像差变量, 进而保持系统的完善成像性能. 最终获得的改进型 Dyson 成像光谱系统设计和结果图如图 5.

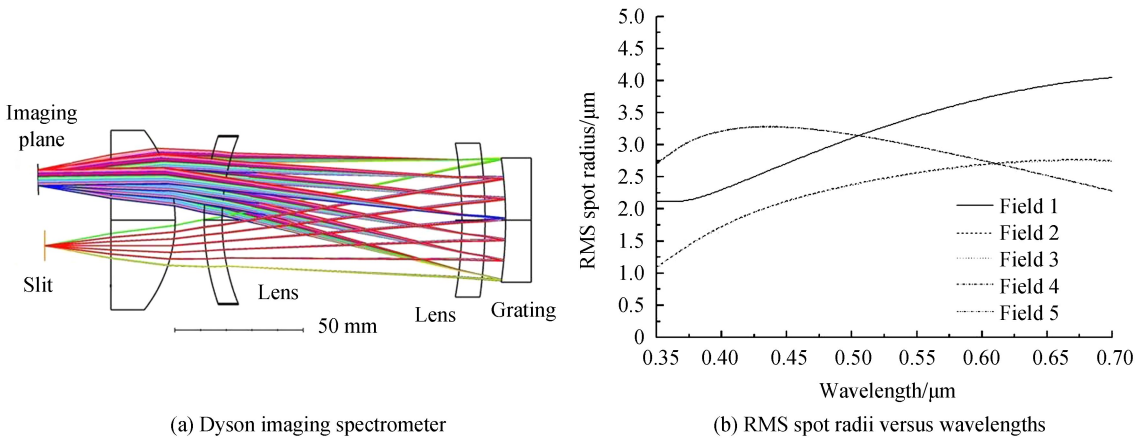


图5 改进型 Dyson 成像光谱系统光路与设计结果图

Fig.5 Optical path of the advanced Dyson spectral system and the results of the design

根据图 5, Dyson 改进成像光谱系统在全视场全波段下点列图均方根半径值小于 $4.5 \mu\text{m}$, 设计结果良好. 成像光谱系统结构参数如表 3.

表 3 成像光谱系统光学参数

Table 3 Optical parameters of the imaging spectrometer

Parameter	Value
NA	0.167
Slit	13 mm \times 0.039 mm
Magnification	1:1
Hemisphere lens	$R_1 = \infty$, $R_2 = 56.985$ mm
Lens 1	$R_1 = 100.46$ mm, $R_2 = 87.74$ mm
Lens 2	$R_1 = 175.1$ mm, $R_2 = 227$ mm
Grating	83 1/mm, $R = 173.9$ mm

4 设计结果与样机实验结果分析

4.1 系统匹配与设计结果分析

将设计完成的望远镜系统和成像光谱系统在狭缝处进行对接匹配获得整体光路结构图如图 6.

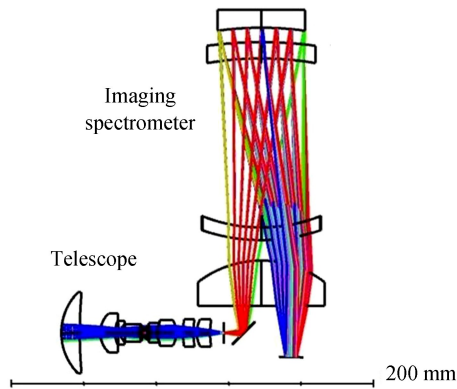


图6 全系统成像光谱仪系统光路图

Fig.6 The optical paths of the imaging spectrometer

图 7 给出了系统全视场的点列图半径 RMS 值随波长变化图以及中心波长和边缘波长的调制传递函数 (MTF) 曲线, 全视场全波段均方根半径值均达到 $6.5 \mu\text{m}$ 以下, 在 38.5 lp/mm 的奈奎斯特频率下, 全视场全波段 MTF 值达到 0.68 以上, 设计结果满足设计要求.

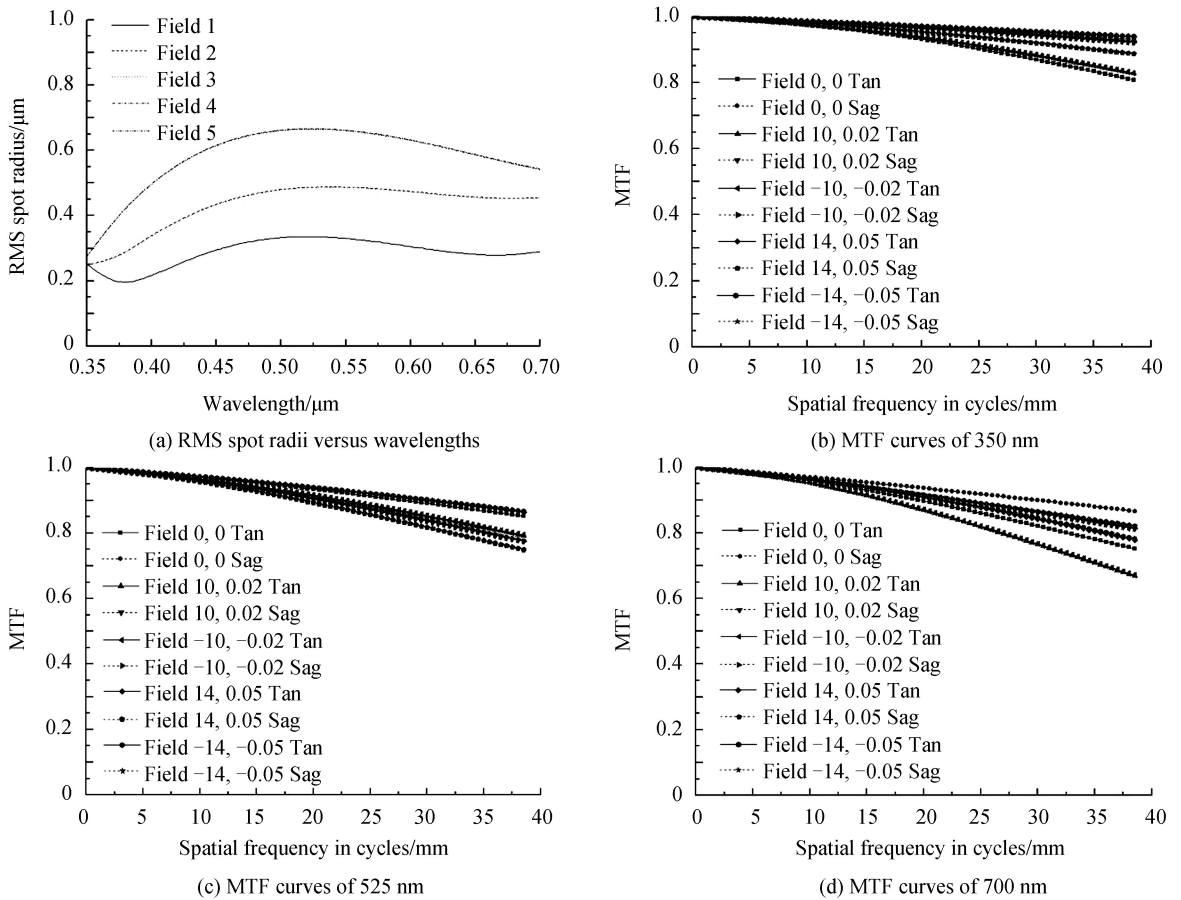


图7 全系统设计结果图
Fig.7 Design results of the total system

根据于磊等的研究^[14],光谱分辨率与狭缝宽度、光学系统焦距、光栅入射角、光栅衍射级次和光栅刻线密度等相关,其理论计算值可以表达为

$$d\lambda = \frac{\cos i}{mgf} b \cos \delta \quad (4)$$

其中 i 为光栅入射角, m 为衍射级次, g 为光栅刻线密度, f 为准直镜焦距, b 为狭缝宽度, δ 为像面倾角, 将各值代入计算可得光谱分辨率为 3.5 nm.

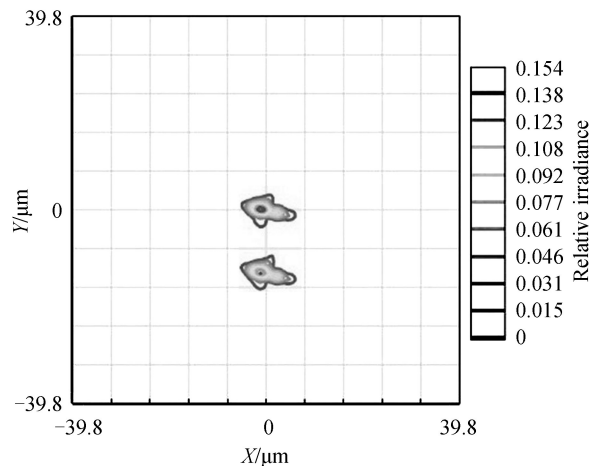


图8 光谱分辨率设计结果图
Fig.8 Design results of the spectral resolution

在 Zemax 中,可参考 PSF 图对光谱采样进行分析,理想设计值的光谱采样为 1.08 nm/pixel,设置

615 nm和616.2 nm两个波长,如图8,可知在PSF图中可将两个波长完全区分开来,满足设计需求。

利用Zemax进行公差分析,以525 nm的MTF平均值为判断准则,预先设置系统各光学元件的倾斜误差最大值为3分,曲率半径误差最大值为0.05 mm,中心厚度误差最大值为0.05 mm,偏心量最大值为0.05 mm,经蒙特卡洛法分析后可知,90%以上MTF值大于0.59,80%以上MTF值大于0.56,50%以上MTF值大于0.5。结果表明所设计的高光谱成像仪光学系统在设定的公差容许下完全满足性能要求,即所设置的公差无需特殊加工和装调要求便可较容易实现。

4.2 样机实验结果分析

对于成像光谱仪,最重要的指标是光谱分辨率和空间分辨率指标。样机也将遵循测试标准进行性能测试^[15]。在实验室采用汞灯配合毛玻璃对搭建样机进行测试,由于汞灯特征谱线的线宽极窄,因此足够作为标准光谱光源对样机进行光谱分辨率测试。测试图谱如图9。

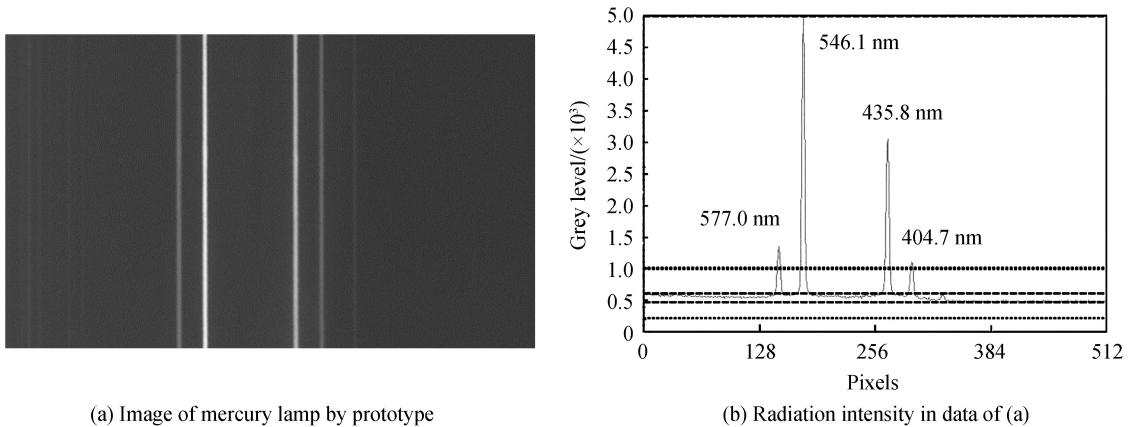


图9 光谱分辨率测试结果图

Fig.9 Test results of the spectral resolution

根据图9(b)的分析,在特征谱546.1 nm和435.8 nm之间共覆盖98个探测器像元,即像元光谱采样为1.125 nm/像元,这几个特征波长的半峰宽基本都覆盖3个像元,大约对应3.375 nm,该值可被认为是样机的光谱分辨率,同时也满足设计的要求。

使用不同的单色光作为光源,配合平行光管 and 美军标鉴别率板对样机进行照射,获取样机在三个不同波长下的鉴别率板图像,如图10。

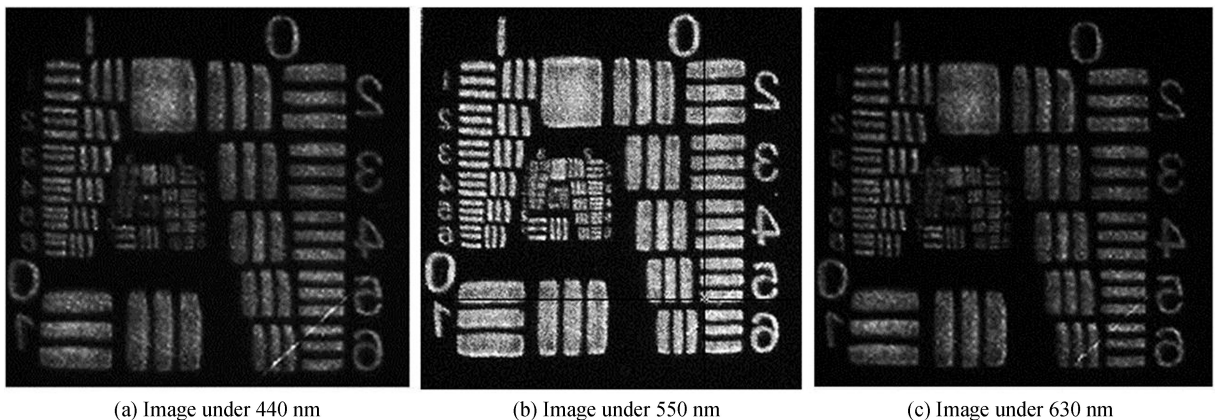


图10 样机实测美军标鉴别率板单色图

Fig.10 Monochromatic images of the USAF resolution test target by prototype

根据美军标鉴别率板计算公式,可分辨的线对数表示为

$$N_c = 2^{[k+(m-1)/6]} \quad (5)$$

其中 k 和 m 分别对应鉴别率板的行和列数。对图10中的图像进行分析可得样机可分辨 $k=5, m=2$,对应的线对数为36.0 lp/mm,与CCD的奈奎斯特频率38.5 lp/mm非常接近,可以认为其等效空间分辨率在全波

段上达到了 0.5 mrad/pixel, 满足设计要求.

5 结论

本文分析了海洋水体观测的特征目标及其特征光谱, 进而对水下环境与目标的探测方法、机理和仪器系统实现上给出了科学依据; 根据科学探测需求分析计算了水下监测高光谱成像仪的性能参数, 为高光谱成像仪的系统设计实现提供了理论基础. 该研究方法切实可行, 可以保证仪器设计对科学探测的要求. 在仪器系统具体设计上, 实现了包含紫外波段的大视场、宽谱段、小 F 数透射式望远镜系统设计, 一定程度上减小了紫外波段下光学玻璃材料种类不足对设计的影响, 全视场全波段 MTF 在奈奎斯特频率下优于 0.6, 性能优越. 在成像光谱系统设计方面, 结合水下应用的特点, 改进了 Dyson 成像光谱系统, 利用光程分析和增加透镜的方法, 解决了其结构过于紧凑、杂散光和多级谱干扰严重等问题, 改善了其工程应用性. 根据最终系统的设计结果和搭建的原理样机测试结果可知, 设计的成像光谱仪实现了视场角为 28° , F 数为 3, 光谱分辨率为 3.5 nm, 系统空间分辨率为 1 mrad 的良好光学性能, 该研究可为水下环境与目标探测高光谱成像仪的工程应用提供重要设计依据.

参考文献

- [1] PAN De-lu, WANG Di-feng. Advances in the science of marine optical remote sensing application in China[J]. *Advances 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的新进展[J]. *地球科学进展*, 2004, **19**(4): 506-512.
- [2] YANG Yue-zhong, CAO Wen-xi, SUN Zhao-hua, et al. Development of real-time hyperspectral radiation sea-observation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 102-107.
杨跃忠, 曹文熙, 孙兆华, 等. 海洋高光谱辐射实时观测系统的研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 102-107.
- [3] GOETZ A F H, SOLOMON G V J, ROCK B N. Imaging spectrometry for earth remote sensing[J]. *Science*, 1985, **228**(4704): 1147-1153.
- [4] YU L. Upgrade of a UV-VIS-NIR imaging spectrometer for the coastal ocean observation: concept, design fabrication, and test of prototype[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(13): 15526-15538.
- [5] ALEM N, PELLEN F, BRUN G L, et al. Extra-cavity radiofrequency modulator for a lidar radar designed for underwater target detection[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(26): 7367-7372.
- [6] MULLEN A D, TALU T, ROBERTS P L D, et al. Underwater microscopy for in situ studies of benthic ecosystems[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 12093.
- [7] SUN Chuan-dong, LI Chi, ZHANG Jian-hua, et al. Optical design of the lens for underwater imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, **6**(5): 5-11.
孙传东, 李驰, 张建华, 等. 水下成像镜头的光学设计[J]. *光学精密工程*, 1998, **6**(5): 5-11.
- [8] ORILLE C M, BLANCO X P, NUNEZ H G, et al. Two-wavelength anastigmatic Dyson imaging spectrometers[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(14): 2379-2381.
- [9] WILSON D W, MOUROULIS P, GREEN R O. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(12): 9087-9096.
- [10] ORILLE C M, BLANCO X P, NUNEZ H G, et al. Design of Dyson imaging spectrometers based on the Rowland circle concept[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(35): 6487-6494.
- [11] MOUROULIS P, GREEN R O, GORP B V, et al. Landsat swath imaging spectrometer design [J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(1): 015104.
- [12] LOBB D R. Theory of concentric designs for grating spectrometers[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(13): 2648-2658.
- [13] YU L, XUE H, CHEN J X. Stigmatic broadband imaging spectrometer with a high numerical aperture[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(10): 2414-2419.
- [14] YU L, WANG S R, LIN G Y, et al. Spectral broadband anastigmatic Wadsworth imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(1): 101-109.
- [15] MOUROULIS P, GORP B V, GREEN R O, et al. The portable remote imaging spectrometer (PRISM) coastal ocean sensor[M]. 2012, *Imaging and Applied Optics Technical Digest*, OSA.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No.41504143), Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (No.YJKYYQ20170048), and Youth Innovation Promotion Association(No.2016203)

引用格式: YU Lei, XU Ming-ming, CHEN Jie-xiang, et al. Optical System of the Hyper-spectral Imager for the Underwater Environment and Targets Monitoring[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1101003

于磊, 徐明明, 陈结祥, 等. 水下环境与目标监测高光谱成像仪光学系统[J]. *光子学报*, 2018, **47**(11): 1101003