

文章编号 1004-924X(2018)10-2363-08

## 用于沿海水色探测的机载紫外-可见-近红外 高光谱成像仪

于磊<sup>1</sup>, 陈结祥<sup>1</sup>, 薛辉<sup>1</sup>, 申远<sup>2\*</sup>

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031;
2. 合肥师范学院电子信息工程学院, 安徽合肥 230601)

**摘要:** 本文主要设计一种新型的可用于机载的紫外-可见-近红外高光谱成像系统, 从而为沿海水色环境与污染观测提供一种有效的观测仪器。首先, 根据探测目标特点确定了仪器系统的性能设计参数, 选择了 Dyson 成像光谱系统来满足系统在宽谱段上的高信噪比和高光学性能; 但 Dyson 成像光谱系统的结构过于紧凑, 因此对 Dyson 成像光谱系统进行了研究, 调整了狭缝、像面和光学元件的位置, 使它们在轴向和垂直轴向上均具备足够的间隔, 并在这种大空气间隔下分析了系统的完善消像差条件。通过光程分析和弯月透镜的加入, 使改进型 Dyson 系统在 0.278 的数值孔径和 320~1 000 nm 的宽波段上具备良好的成像结果, 全视场全波段 MTF 值在探测器奈奎斯特频率下 (38.5 lp/mm) 高于 0.5, 研制原理样机的光谱分辨率为 3.375 nm, 满足设计要求。该系统可为沿海水色环境的高光谱观测提供良好的工程应用基础。

**关键词:** 成像光谱仪; 沿海环境; 戴森系统; 宽谱段

**中图分类号:** O433.1; TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182610.2363

## Hyper-spectral imaging sensor in UV-VIS-NIR region in air for coastal ocean observation

YU Lei<sup>1</sup>, CHEN Jie-xiang<sup>1</sup>, XUE Hui<sup>1</sup>, SHEN Yuan<sup>2\*</sup>

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, China)

\* Corresponding author, E-mail: shenyuan@ustc.edu.cn

**Abstract:** A novel ultraviolet-visible-near infrared imaging spectral system in air has been demonstrated to provide an effective instrument to measure the environment and pollution of the ocean along the coastal area. Based on the characteristics of the targets, different parameters of the performance of the system have been proposed. The Dyson imaging spectrometer was chosen to satisfy the requirements of the signal-to-noise ratio and the high optical performance. The Dyson spectrometer has not been widely applied in the engineering field because of its structural limitations. To solve this problem, the distances amongst the slit, the imaging plane, and the optical elements were increased to modify the traditional shape of the spectrometer. Therefore, perfect aberration eliminated conditions of the ad-

**收稿日期:** 2018-01-18; **修订日期:** 2018-03-10.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 41504143); 中国科学院科研装备研制项目资助 (No. YJKYYQ20170048); 中国科学院青年创新促进会人才项目资助 (No. 2016203); 吉林省科技发展计划青年科研基金资助项目 (No. 20160520096JH)

vanced system were obtained through analysis and addition of lenses. The advanced Dyson spectrometer presents excellent design features with an NA of 0.278 in the range of 320–1 000 nm. The Modulation Transfer Functions (MTFs) in all fields of views and all wavebands are larger than 0.5 at the Nyquist frequency 38.5 lp/mm of the detector. The prototype has a spectral resolution of 3.375 nm, satisfying the design requirement. This new spectrometer is more convenient and effective for coastal ocean observation.

**Key words:** imaging spectrometer; coastal ocean; Dyson system; broadband

## 1 引言

沿海地区与人类的生产与生活质量关系密切<sup>[1]</sup>。由于同时受到来自内陆河流排放和海洋的风浪与潮汐的影响,沿海地区的水域成分比较复杂,且变化较快。在我国,由于缺少观测仪器,对沿海水域的海洋测绘和水体成分分析等的研究并不精确。近年来,由于海水富营养化、赤潮和石油等有毒物质的泄漏,沿海地区的污染在进一步加重。因此,实现沿海水色环境监测,建立长期有效的环境观测数据模型,及时有效地监控污染,就成为一个重要的发展方向。根据 NASA 总结的先进沿海水色环境观测要求,相关遥感方式需要能以高光谱分辨率和高空间分辨率对水域内的无机物和有机物进行良好的区分,并精确刻画沿海水域的环境变化。

机载类宽波段高光谱成像仪可通过推扫观测,将天底探测目标以光谱维方向上一系列的二维色散光谱图像显示出来<sup>[2-3]</sup>,这种对观测目标的信息获取方式可以同时提供沿海环境水域细节和不同物质含量与分布的光谱辐射特征信息。国外同类先进机载载荷有 PHILLS, AVIRIS, MaRS 和 PRISM<sup>[4-7]</sup>。而在我国,适用于沿海水色环境机载观测的成像光谱探测技术尚不完善。未来发展中应结合我国沿海水色环境的自身特点,从机理上分析相关先进设备需求,对仪器系统进行专门设计。随着近年来国外先进载荷的广泛应用,人们发现紫外波段在海洋溢油和浮游植物的识别上具有更大的优势,因此,用于沿海水色环境探测的仪器工作波段需要能够覆盖一定的紫外波段。为了保证仪器在紫外波段具备极高的信噪比,设计的成像光谱系统数值孔径最好可达到 0.25 以上;同时为了精确提供沿海水色环境的细节和分布物质特征,需要成像光谱系统具备很高的成像质量和光谱分辨率。

同心类光谱仪可以较好地满足以上需求,其两种主要形式是 Offner 光谱仪和 Dyson 光谱仪<sup>[8]</sup>。其中,Offner 光谱仪在 0.25 乃至更高的数值孔径下难以获得较好的成像质量;而 Dyson 光谱仪不仅结构紧凑,而且在高数值孔径(0.25~0.4)下具备优越的光学性能,因此更适用于沿海水色环境。但是 Dyson 型系统的缺点也是显而易见的,由于结构过于紧凑,使得它的狭缝、探测器和光学元件之间几乎没有任何间隙,这种理论设计是很难在工程上实现的;而若要增大这些间隙以放置各类光机结构,其像质又会大大下降使得它不能使用。针对这一问题,Wynne<sup>[9]</sup>提出了一种增加光学变量参数的方法,但是这种 Wynne-Dyson 系统所提供的光轴方向的探测器与光学元件间的间隙量十分有限,只有 1~2 mm。Mouroulis 等人<sup>[7,10]</sup>设计并研制了改进型的 Dyson 成像光谱仪,通过改变半球透镜的形状,使它产生内反射从而将像面位置与狭缝位置进行偏离,在实际研制时他们又尝试在外部加小反射镜的方法,通过外反射使狭缝和探测器分离,但是这种改进系统没有改变探测器离半球透镜轴向距离过近的问题(像面距透镜只有 1 mm),给光机结构的设计带来很大难度,大大提高了研制成本。在国内,薛庆生、曹佃生<sup>[11-12]</sup>等人也针对 Dyson 系统进行了设计和改进,但是他们的设计也是基于 Mouroulis 等人的研究,改善不大,工程应用性不足。

本文主要对适用于沿海水色探测的机载宽波段高光谱成像仪进行了研究。对 Dyson 成像光谱系统进行了极大的优化和改善,拉开了狭缝、镜头和探测器的摆放位置,使它们在光轴方向和垂直光轴方向上相比以往系统具有极大的空气间隔(由 1~2 mm 变为几十毫米),从而令各元件的光机结构具有足够的空间进行摆放和装调;系统选用 1 024×1 024 像元、像元大小为 13 μm 的探测器,成像光谱仪的狭缝尺寸为 13 mm×0.039

mm,数值孔径为 0.278,在 320~1 000 nm 的宽波段上全视场调制传递函数(MTF)高于 0.5,光谱分辨率优于 3.5 nm,并根据设计研制了一台原理样机,实测光谱分辨率达到 3.375 nm,验证了理论设计的正确性,为同类仪器的后续研究奠定了理论基础。

## 2 科学应用需求分析

沿海水色环境中的各类分布物质会反射或吸收阳光中的不同波长,通过对不同波长的接收和准确分析就可以获取各种物质的含量和分布情况;同时,对环境的大范围观测成像则可以反映沿海水色环境的组成和变化,二者的组合观测就可以获取沿海水色环境中的绝大部分重要信息。沿海水色科学研究的观测目标与其特征波段<sup>[13]</sup>如表 1 所示。

表 1 沿海水色观测目标与特征谱段

Tab.1 Characteristics bands of objects in coastal ocean observation

主要波段/nm	分辨阈值/nm	观测目标
320~390(350, 360, 385)	15	浮油, COD
400~430 (412, 425)	10	黄色物质与浑浊度
433~453 (443)	10	最大叶绿素吸收
460~500 (460, 475, 490)	10	叶绿素和其它颜色吸收
510~535 (510, 532)	10	叶绿素吸收
555~590 (555, 583)	10	悬浮泥沙和荧光基线 1
615~680 (617, 640, 655, 665, 678)	10	悬浮泥沙, 荧光信号, 叶绿素和大气修正
710~770 (710, 748, 765)	15/10	大气修正, 荧光基线 2 和气溶胶辐射
820~885 (820, 865)	15	气溶胶光学厚度, 沿海植被和海洋水汽

由此可知,本文的仪器系统设计波段可以限定在 320~1 000 nm,当光谱分辨率优于 5 nm 时,就可以完善区分观测目标的各种特征。选取 CMOS 探测器以满足飞行时的快速帧频响应,像元尺寸为 13 μm,像元数为 1 024×1 024;同时,

由于该仪器主要搭载在机载平台上,因此飞行高度一般在 1~5 km 左右,为了获得足够的幅宽空间覆盖,设置仪器系统可覆盖 28°视场,结合探测器计算得到系统在 1 km 飞行高度下仪器的空间分辨率可达 1 m,对应 1 mrad,满足空间分辨需求。由于我们的系统包含了紫外波段,且波段较宽,因此望远镜系统选用 Schwarzschild 望远系统,该望远镜由一个凸面非球面镜和一个凹面非球面镜组成,可以满足大视场和小 F 数的需求,在参考文献[7]中有叙述,这里不再赘述。

## 3 成像光谱系统设计与分析

### 3.1 Dyson 改进型成像光谱系统设计

为了使设计能够改善 Dyson 系统的紧凑布局,本文对传统的 Dyson 成像光谱结构进行了改进。在改进设计中,狭缝的位置不再紧贴于半球厚透镜表面,而是在轴向上与之产生一段距离,同时狭缝在竖直方向上也与光学元件的共光轴离开一定距离,在保证同心系统的前提下,相当于将原始的半球厚透镜的中心厚度大大减小。这些垂轴距离和轴向距离确保了改进系统的狭缝、探测器像面和光学元件的光机结构具备足够的放置空间。改进光学系统的光路如图 1 所示。

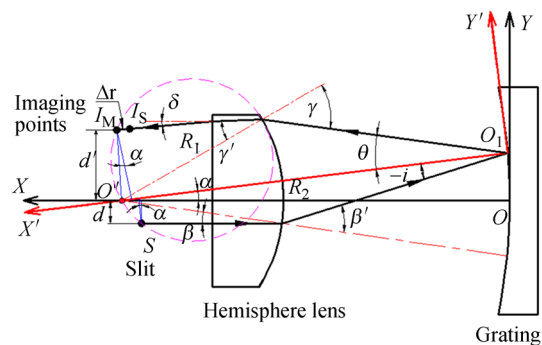


图 1 改进型 Dyson 成像光谱系统中心光线光路追迹图  
Fig.1 Optical path of chief ray in advanced Dyson spectral system

凹面光栅表面中心顶点为 O,O'为半球透镜弯曲表面和光栅凹面的共同曲率中心,O<sub>1</sub>为选取的狭缝中心光线在凹面光栅上的入射点,以 O 和 O<sub>1</sub>建立两个坐标系,二者在 O'点产生转角为 α,光栅曲率半径为 R<sub>2</sub>,半球透镜的弯曲表面半径为 R<sub>1</sub>,光栅入射角 -i 和衍射角 θ 满足光栅衍射方程 sin i+sin θ=mgλ。其中 m 为衍射级次,g 为光栅刻线密

度,  $\lambda$  为波长。在透镜上的入射角  $\beta$  和折射角  $\beta'$  以及入射角  $\gamma$  和折射角  $\gamma'$  均满足 Snell 折射定律。S 代表狭缝中心光线出射点,  $I_M$  和  $I_S$  分别代表与该点对应的子午像点和弧矢像点,  $\Delta r$  表示二者之间的光程差。当系统实现像散的完全消除时, 两个像点应重合, 根据 M. Orille 等人<sup>[14]</sup> 的研究, 改进型 Dyson 系统还需要满足 Rowland 环准则才能实现完善会聚成像条件。而实现这一情况的简单条件就是光线在半球透镜上出射的角度  $\delta$  为 0, 即最终入射到像面上的主光线与狭缝出射的主光线平行时,  $\Delta r = 0$ , 像散得到消除。根据 Lobb 的研究<sup>[13]</sup>, 同心类系统无论光线经过介质如何, 物点和像点与光轴之间的间距  $d$  和  $d'$  均可满足一恒等关系, 由于改进型系统改变了传统 Dyson 系统中狭缝的位置, 因此需要通过坐标变换才能将这一恒等关系引入后续的推导中, 这一关系表示为:

$$-d + d' = g\lambda R_2 \cos \alpha \quad (1)$$

根据图 2 的分析可以得到:

$$\beta - \beta' - i + \theta + \gamma' - \gamma = 0, \quad (2)$$

式中  $\tan \beta = d/R_1$ ,  $\sin \beta' = n \sin \beta$ ,  $\sin \gamma = n \sin \gamma'$ ,  $\sin \gamma' = d'/R_1$ 。其中  $n$  为透镜材料的折射率。根据正弦定理有:

$$\frac{R_2}{\sin(180^\circ - \beta')} = \frac{R_1}{\sin(-i)}. \quad (3)$$

$$\arctan\left[\frac{d}{R_1}\right] - \arcsin\left[n \sin\left[\arctan\left[\frac{d}{R_1}\right]\right]\right] + \arcsin\left[\frac{R_1}{R_2} n \sin\left[\arctan\left[\frac{d}{R_1}\right]\right]\right] + \arcsin\left[g\lambda + \frac{R_1}{R_2} n \sin\left[\arctan\left[\frac{d}{R_1}\right]\right]\right] + \arcsin\left[\frac{d'}{R_1}\right] - \arcsin\left[n \frac{d'}{R_1}\right] = 0, \quad (5)$$

最终获得的改进型 Dyson 成像光谱系统参数如表 2 所示, 系统光路如图 2 所示。

表 2 改进型 Dyson 成像光谱仪的初始参数和最终优化参数

Tab. 2 Initial and final optimized parameters of advanced Dyson spectrometer

类型	曲率半径/mm		距离/mm		玻璃类型
	初始	优化	初始	优化	
1 狭缝	无限	无限	> 25	25.7	空气
2 半球透镜	无限	无限	25	25	熔石英
3	-57.4	56.99	11	11.3	空气
4 透镜 1	101.52	100.46	7	7	熔石英
5	88.8	87.7	95.6	93.5	空气
6 透镜 2	174	175.1	7	7	熔石英
7	229	227	5	5	空气
8 反射光栅	173.9	173.9			83 1/mm
9 像面	无限	无限	>25	28.4	空气

可以获得光栅入射角和衍射角的表达式:

$$\begin{cases} i = -\arcsin\left[\frac{R_1}{R_2} \sin \beta'\right] \\ \theta = \arcsin\left[g\lambda + \frac{R_1}{R_2} \sin \beta'\right] \end{cases} \quad (4)$$

将各角度表达式代入到方程(2)中, 在选定光栅刻线密度和中心波长后, 根据光机结构尺寸要求设定好狭缝和像面与光轴之间的离轴垂直距离以及与半球透镜之间的轴向距离, 即可最终推导获得仅包含  $R_1$  和  $R_2$  的方程表达式(5)。

当系统中选定的凹面光栅曲率半径和半球透镜弯曲表面的曲率半径满足式(5)时, 改进型 Dyson 成像光谱系统即可实现完善会聚消像散成像条件。需要注意的是, 由于狭缝和像面在轴向方向上也存在与以往 Dyson 系统不同的变化, 由于厚半球透镜大幅度减薄, 二者与透镜间具备足够的空间间隔, 这一大的间距同样会对系统的像差消除带来影响。经过分析, 该间距所带来的像差主要是额外的色差和高阶球差, 且对这些像差的合理消除方法并不会影响之前的像散消除条件。这里采用与前人相似的研究方法, 即通过增加两片弯月形透镜来提高系统消除像差的能力。需要注意的是, 这种改变并没有改变系统的同心性, 因此仍可以保持系统的成像性能。

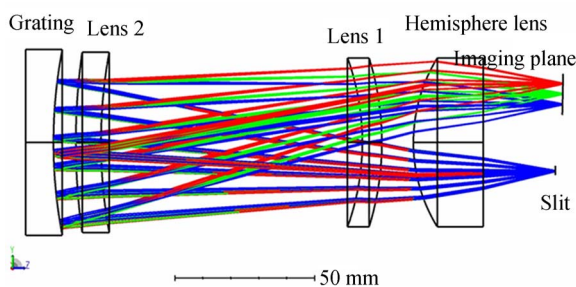


图 2 改进型 Dyson 成像光谱系统光路设计图

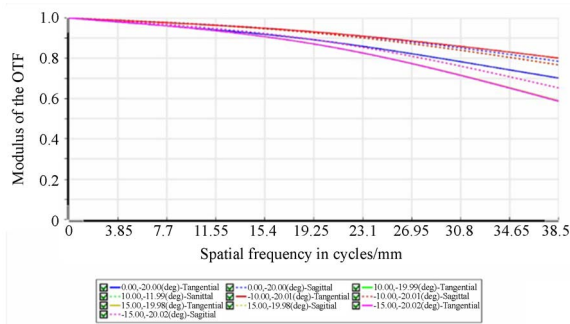
Fig. 2 Optical path of designed advanced Dyson spectral imaging system

### 3.2 设计结果分析

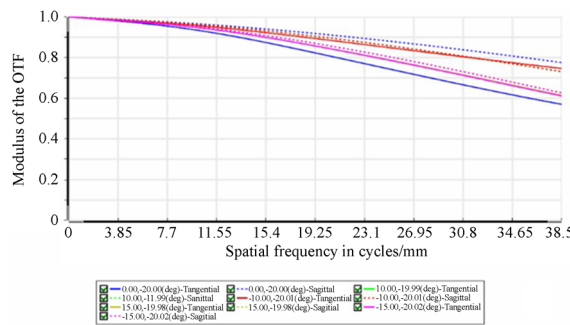
改进系统狭缝与像面之间的水平间距超过 20 mm, 狭缝和像面与半球透镜之间的轴向间距超过 25 mm, 可以满足目前各类狭缝和探测器等

常规光机结构的放置。图 3 给出了系统中心波长和边缘波长的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线,以及全视场的点列图半径 RMS 值随波长的变化,可以看到,在设计指标要求的空间频率 (38.5 lp/mm) 下,全视场全波段的 MTF 值达到 0.5 以上,全视场全波段的 RMS 值均小于 6  $\mu\text{m}$ ,因此系统像差得到了很好的校正,满足设计要求。

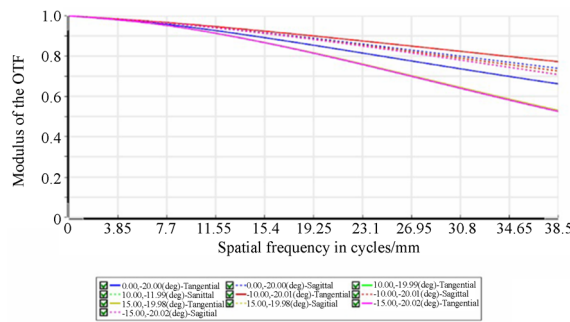
这种紧凑型成像光谱仪系统的杂光主要来自两个部分,一是宽谱段覆盖带来的其他级次光谱的影响,二是系统中多次反射产生的杂光。对于



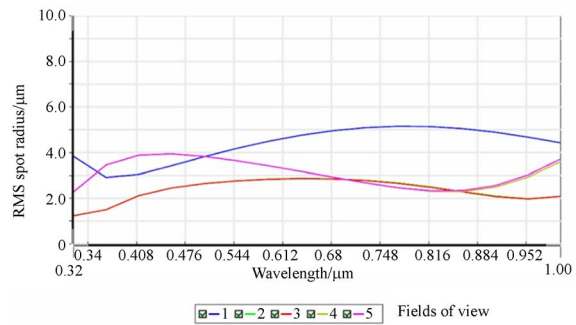
(a) 320 nm 各视场 MTF 曲线  
(a) MTF curves of fields of view at 320 nm



(b) 660 nm 各视场 MTF 曲线  
(b) MTF curves of fields of view at 660 nm



(c) 1 000 nm 各视场 MTF 曲线  
(c) MTF curves of fields of view at 1 000 nm



(d) 全视场全波段点列图均方根曲线  
(d) RMS spot radii curves of all fields of view in all wavebands

图 3 改进型 Dyson 光谱仪的设计优化结果

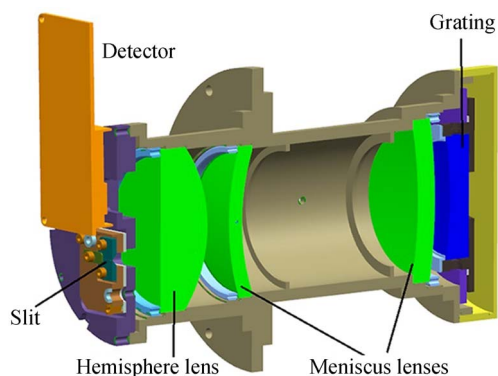
Fig. 3 Optimized results of advanced Dyson spectrometer

前者而言,由于光谱系统中像面和狭缝在垂直于光轴的方向产生了很大的距离,因此只有一部分二级光谱可以到达像面附近。根据文献[10]中的研究,当各透射元件的镀膜使之对工作波段的传输效率达到 98% 以上时,配合滤光片就可以将二级光谱的影响降到最低。对于多次反射产生的杂光,高传输效率的光学元件可以降低无效的多次反射,而根据 ZEMAX 分析结果可知多次反射产生的鬼像距离像面最近为 1.6 mm,该距离可确保鬼像几乎无影响,故光学系统中的杂光得到了很好的校正。

### 3.3 原理样机初步测试结果分析

本文涉及的改进型 Dyson 成像光谱仪的另一个重要优点是公差宽松和装调方便。根据 Zemax 的公差灵敏度分析,设置曲率半径公差为 0.04 mm,中心厚度公差为 0.05 mm,元件和元件表面的倾斜公差为 0.03°,离轴公差为 0.05 mm,光学元件表面不规则度为 0.4 个 fringes,除以上公差参数外,光栅元件的刻线密度(即周期)也是一个公差参数。但是根据以往的设计和研制经验,这一公差参数对系统的性能影响是最小的,因此在软件分析中可以忽略<sup>[15]</sup>。利用蒙特卡洛分析法可知,80% 的 MTF 分析结果相比设计的 MTF 数值只下降了 0.046,因此系统最终的成像质量具有良好的公差容错性。本文对光谱仪的光机结构进行了设计,并对光学元件和结构进行了加工和集成装调,结果如图 4 所示。

光谱分辨率是成像光谱仪最重要的检验指标,如果系统测试得到的光谱分辨率与设计值基



(a) 原理样机结构设计图

(a) Schematic diagram of prototype



(b) 实物图

(b) Photo of prototype

图 4 改进型 Dyson 成像光谱仪的光机结构图

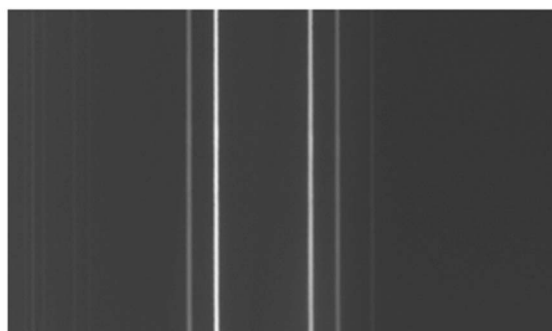
Fig. 4 Opto-mechanical system of advanced Dyson spectrometer

本相同,则表示系统装调已经到位,因此对试装的原理样机的光谱分辨率进行了测试。在进行光谱分辨率测试前,使用卤钨灯和氙灯配合单色仪对光谱仪样机的光谱范围进行了预先测定,确认了该成像光谱仪的实际波段符合设计的 320~1 000 nm 的要求。之后使用高压汞灯作为光源,通过毛玻璃后对原理样机的狭缝进行照射,探测器采集汞灯特征线谱,获取的图像及其分析结果如图 5 所示。

根据于磊等人的研究<sup>[16]</sup>,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,其理论计算值为:

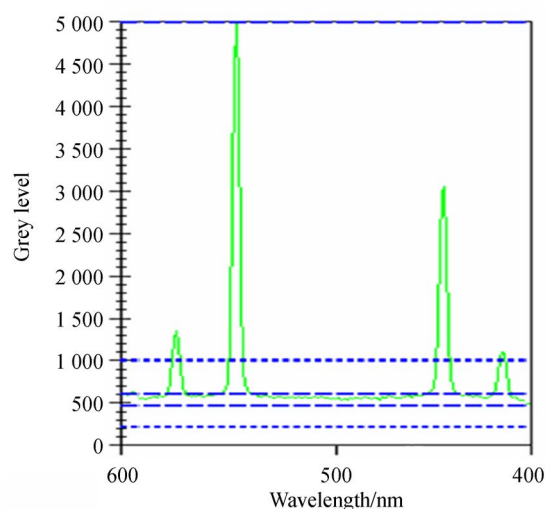
$$d\lambda = \frac{\cos i}{mgf} \cdot b \cos \delta, \quad (6)$$

其中: $d\lambda$  为光谱分辨率, $i$  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



(a) 光谱分辨率谱图

(a) Spectral image of spectral resolution



(b) 光谱分辨率数据图

(b) Data of spectral resolution

图 5 样机光谱分辨率测试结果

Fig. 5 Test result of spectral resolution of prototype

狭缝宽度, $\delta$  为像面倾角。系统中狭缝宽度约为 0.039 mm,将各值代入式(6)计算可得光谱分辨率为 3.3 nm。由图 5 中的谱线分布可知,装调后系统每个像元所占的光谱带宽约为 1.125 nm,图中 4 个汞灯特征谱线为 577.0,546.1,435.8 和 404.7 nm。系统的放大倍率为 1:1,即狭缝宽度与最终像面上的狭缝像所占宽度一致,结合计算分析可知光谱特征谱线的半峰宽占 3 个像元,因此原理样机的光谱分辨率为 3.375 nm,与设计值基本一致。

## 4 结 论

本文主要研究了可用于机载沿海水色环境探测的宽波段高光谱成像仪光学系统。根据沿海水

色探测的科学需求,分析仪器光学系统的性能参数,完成了改进型 Dyson 成像光谱仪系统的光程分析与设计,并改进系统设计进行了原理样机的光谱分辨率测试。最终获得的成像光谱仪系统的成像质量优越,在数值孔径为 0.278 和 320~1 000 nm 的宽光谱范围内全视场 MTF 值在奈奎斯特频率(38.5 lp/mm)下高于 0.5,光谱分辨率

达到 3.375 nm。最为重要的是,改进的 Dyson 系统大大增加了狭缝、光学元件和像面之间的间距,从原来 1~2 mm 的间距扩展到了几十毫米以上,且光学性能保持不变,公差宽松、装调简单,大大降低了 Dyson 系统在实际工程应用中的难度。本文的设计研究为未来机载沿海水色探测载荷的研制提供了一个重要的工程应用方法。

### 参考文献:

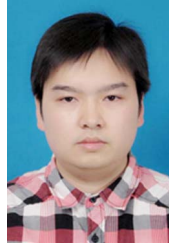
- [1] MOREL A, PRIEUR L. Analysis of variations in ocean color[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1977, 22(4): 709-722.
- [2] 张晶,王淑荣,黄煜,等. 临边成像光谱仪的发展现状与进展[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 692-700. ZHANG J, WANG SH R, HUANG Y, *et al.*. Status and development of limb imaging spectrometers[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 692-700. (in Chinese)
- [3] 尹诗,冯玉涛,白清兰,等. 紧凑型空间外差成像光谱仪设计[J]. *光子学报*, 2018, 47(3): 161-169. YIN, SH, FENG Y T, BAI Q L, *et al.*. Design of compact spatial heterodyne imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3): 161-169. (in Chinese)
- [4] OH E, KANG H, HYDN S, *et al.*. Design and performance analysis of front end optical instrument for coastal water remote sensing [J]. *SPIE*, 2015, 9655: 96553Z 1-4.
- [5] WALLIAMS M D, VAN AARDT J, KERKES P. Generation of remotely sensed reference data using low altitude, high spatial resolution hyperspectral imagery[J]. *SPIE*, 2016, 9840: 98401R1-10.
- [6] CHRISTOPHER S, EREST R, FRED O. The mapping reflected-energy sensor-MaRS: a new level of hyperspectral technology [J]. *SPIE*, 2009, 7457: 1-8.
- [7] MOUROULIS P, VAN GORP B, GREEN R O, *et al.*. Portable remote imaging spectrometer coastal ocean sensor: design, characteristics, and first flight results[J]. *Appl. Opt.*, 2014, 53(7): 1363-1380.
- [8] LOBB D R. Theory of concentric designs for grating spectrometers[J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(13): 2648-2658.
- [9] WYNNE C G. Monocentric telescopes for microlithography[J]. *Opt. Eng.*, 1987, 26(4): 300-303.
- [10] MOUROULIS P, GREEN R O, WILSON D W. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(12): 9087-9096.
- [11] 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)
- [12] 曹佃生,石振华,林冠宇. 机载海洋改进型 Dyson 高光谱成像仪的研制[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1403-1409. CAO D SH, SHI ZH H, LIN G Y. Development of airborne ocean modified Dyson hyperspectral imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6): 1403-1409. (in Chinese)
- [13] YU L. Upgrade of a UV-VIS-NIR imaging spectrometer for the coastal ocean observation: concept, design, fabrication, and test of prototype [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(13): 15526-15538.
- [14] CARLOS M O, XESUS P B, HECTOR G N, *et al.*. Design of Dyson imaging spectrometers based on the Rowland circle concept[J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(35): 6487-6494.

- [15] LIU CH, CHRISTOPH S, THOMAS F P, UWE D Z, *et al.*. Comparison of hyperspectral imaging spectrometer designs and the improvement of system performance with freeform surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 2017, 56(24):6894-6901.
- [16] YU L, WANG SH R, LIN G Y, *et al.*. Spectral broadband anastigmatic Wadsworth imaging spectrometer[J]. *Opt. Express*, 2015, 23(1): 101-109.

#### 作者简介:



于磊(1984—),男,内蒙古呼伦贝尔人,博士,副研究员,硕士生导师,2007年于中国科学技术大学获得学士学位,2012年于中国科学院长春光机所获得博士学位,主要从事成像光谱遥感仪器的设计。E-mail: top1gods@mail.ustc.edu.cn



申远(1986—),男,湖南怀化人,博士,副教授,2007年于中国科学技术大学获得学士学位,2012年于中国科学技术大学获得博士学位,现为合肥师范学院机械电子系系主任,主要从事光机电一体化研究。E-mail: shenyuan@ustc.edu.cn