

doi:10.3788/gzxb20184708.0822003

用于沿海水色探测的机载宽波段小 F 数 高光谱成像仪光学系统

申远¹, 于磊², 陈结祥², 薛辉²

(1 合肥师范学院 电子信息工程学院, 合肥 230601)

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要:为解决传统 Dyson 成像光谱系统结构过于紧凑而难于实际应用的缺点,通过减薄半球透镜厚度和偏置狭缝位置的办法,将狭缝、像面与半球透镜之间拉开了足够的轴上距离和垂轴距离;结合光程进行分析,获得了改进后 Dyson 系统的消像散条件;在半球透镜和凹面光栅之间增加两个球面透镜,对轴上距离带来的额外球差和色差进行校正.结合改进的 Dyson 成像光谱仪和 Schwarzschild 双反射镜系统,设计了宽波段、小 F 数高光谱成像仪光学系统.对一工作波段为 320~1 000 nm 的实例设计结果进行分析可知, F 数为 1.8 的全系统像差得到充分校正,全视场全波段调制传递函数值在 0.5 以上,光谱分辨率达到 3.6 nm.该系统可用于沿海环境的高光谱观测.

关键词:高光谱;成像光谱仪;沿海环境;Dyson 系统;宽波段

中图分类号:O433.1;TH744.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)08-0822003-8

Optical System of Hyper-spectral Imaging Sensor with Small F Number in Broadband by Air for the Coastal Ocean Observation

SHEN Yuan¹, YU Lei², CHEN Jie-xiang², XUE Hui²

(1 School of Electronics and Information Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230061, China)

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

Abstract: To solve the problems that the structure is too close to mounting the optomechanism for the engineering application, the bias slit and the thinned hemisphere lens were supplied to move enough lateral and axial air spaces between the slit, the imaging plane and the hemisphere lens. The stigmatic condition for the advanced Dyson system was obtained by the geometric optical path analysis. Another two spherical lenses were introduced between the hemisphere lens and the concave grating to eliminate extra spherical aberrations and chromatic aberrations brought by the axial air spaces. The optical system of the imaging spectrometer with small F number in a broadband was designed by the advanced Dyson spectrometer and Schwarzschild two mirrors system. An example operating in 320~1 000 nm with F number 1.8 was built. The results demonstrate that aberrations are totally corrected, the modulation transfer functions of all fields of view are larger than 0.5 in the waveband, and the spectral resolution is 3.6 nm. The proposed system can be used for the coastal ocean hyper-spectrum observation.

Key words: Hyper-spectrum; Imaging spectrometer; Coastal ocean; Dyson system; Broadband

OCIS Codes: 220.4830; 120.0280; 120.4570; 120.6200; 300.6190

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),安徽省自然科学基金重点项目(No.KJ2018A0487),安徽省科技重大专项计划(No.15czz04124)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:申远(1986-),男,副教授,博士,主要研究方向为光机电一体化.Email:shenyuan@ustc.edu.cn

通讯作者: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:2018-03-15; **录用日期:**2018-05-29

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

0 引言

沿海地区连接着海洋与大陆,主要组成包括海岸、近海大陆架及其附属岛屿等水域地带,是人类繁衍和生产的密集区,对人类的生产与生活质量有着直接的影响作用^[1].对沿海地区的遥感观测,本质上是对水体的各种参数以及水体中所含物质进行定量分析,尤其是对海洋环境污染,包括海水富营养化造成的赤潮以及石油等有毒物质泄漏造成的污染进行实时监测^[2-3].由于同时受海洋和大陆的影响,沿海水体的成分比较复杂,根据 NASA 总结的沿海水色环境观测要求,沿海环境遥感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,并区分灾害或环境造成的沿海水域的环境变化.

高光谱成像是满足上述需求的最优观测仪器之一^[4],如 PHILLS, AVIRIS, MaRS 和 PRISM^[5-8],它能将探测目标以光谱维方向上一系列的二维空间色散光谱图像展示出来,这种多维信息同时获取的方式可以同时提供沿海环境水域成像细节和物质分布物质的光谱辐射特征信息.目前在国内,虽然高光谱成像仪已经得到广泛的研究和应用,但是用于沿海环境机载观测的成像光谱探测方法和关键技术却仍处于比较初级的阶段.

结合我国沿海水色环境的自身特点^[9],根据国内外发展形势,总结适用于我国沿海环境探测的机载高光谱成像仪的先进科学需求为:1) 通过较大空间覆盖范围和较高空间分辨率对区域内的特征进行成像和细节分辨;2) 通过覆盖紫外-可见-近红外的宽波段高光谱分辨能力实现对沿海水色环境中各种成分的精确定量区分;3) 通过较高的信噪比准确提取水体中的各类相对其它要素较暗的信号.同心类光谱仪是可以满足上述要求的一种光栅色散型光谱仪.目前在各类同心光谱仪中,较常用的是 Offner 光谱仪,但是 Offner 光谱仪也具有一定的局限性:1) 凸面光栅属于比较难于制作的光学元件,其衍射效率难以提高;2) Offner 光谱仪的数值孔径不易做小,通常 0.2 已经是极限值;3) 反射式的 Offner 系统由于离轴反射的存在一定程度上也影响了其性能的进一步提高.相比于 Offner 光谱仪, Dyson 光谱仪可以在高数值孔径(0.2~0.33)下提供更高的光学性能,且光学元件的研制难度进一步降低.但是 Dyson 光谱仪过于紧凑的结构,使得其工程应用性较弱. MOUROULIS P 等^[8, 10]对其进行改进,通过内部全反射与外部小反射镜两种方式,将狭缝与透镜拉开了一定距离,但是探测器与半球透镜之间仍然只有 1 mm 左右的间距,且狭缝和探测器之间的垂直距离仍然较小,需要探测器和狭缝的光机结构设计得极为精细才能实现.薛庆生、曹佃生等^[11-12]基于文献[8, 10]也开展了相关研究,但是其结构中的狭缝、半球透镜和探测器等之间的紧凑性仍然没有太大改善,在实际应用中存在较大难度.

基于以上问题,本文对适用于沿海水色探测的宽波段高光谱成像仪光学系统进行了研究.着重对 Dyson 光谱仪系统进行了改进,通过减薄半球透镜的厚度增加了狭缝、像面与透镜间的轴向间距,通过狭缝的偏置增加了狭缝与像面之间的垂直间距,分析了这种改变下的 Dyson 成像光谱仪的完善会聚成像条件,并通过在半球透镜和光栅之间引入两片球面透镜消除了增大间距带来的额外的球差和色差.

1 望远系统设计

通过对国外已有载荷的望远系统特点进行分析可知,由于沿海水色环境观测信号微弱,为了保证仪器有足够的信噪比,光学系统需要具备较小的 F 数(一般在 1.5~3.5),同时镜片数量需要尽可能的少以提高系统传输效率.另外,反射式系统不存在色差,更适用于宽波段观测.

为了尽可能提高望远系统会聚信号能量的能力,选取了双反射镜的 Schwarzschild 望远系统,这种望远镜可以提供较大的视场角,同时实现小 F 数设计,并具有良好的成像能力.设计系统拟在 1 km 的空中高度对星下点进行推扫观测,采用 1024×1024 的 CCD 探测器,像元大小为 $13 \mu\text{m}$,像元分辨率达到 0.5 m,据此计算得到望远系统视场角为 28° ,焦距为 26 mm,望远系统 F 数设为 1.8.设计系统二维光路结构和结果如图 1 所示.

可以看到,全视场全波段的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)在 CCD 探测器的奈奎斯特频率(38.5 lp/mm)下优于 0.7,具有良好的成像质量.

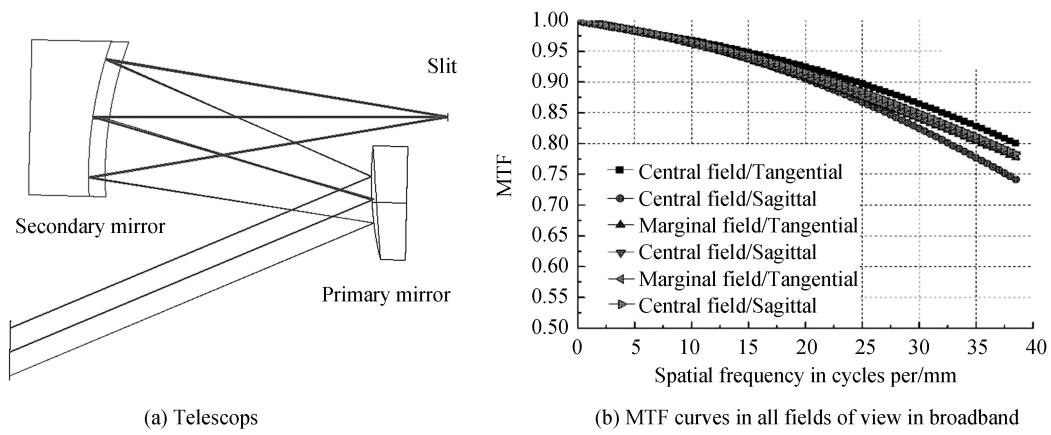


图 1 Schwarzschild 望远系统光路与设计结果
Fig.1 Optical path and the design results of the Schwarzschild telescope

2 光谱成像系统分析与设计

与传统 Dyson 系统相比, 本文设计不再将狭缝放置于 Dyson 系统的半球透镜和凹面光栅的共心处, 而是将其放置在垂直光轴的方向上, 背离像面一段距离; 同时为了保证系统仍然保持同心系统特性, 缩短了半球透镜的中心厚度, 不再等于半球透镜前凸表面的曲率半径, 这样在轴向上狭缝、像面均可以与半球透镜具备足够的间隔, 改进之后, 这些间隔量将有效防止空间不足带来的光机结构难于放置的问题. 但是需要注意的是, 这种改变将使原有的 Dyson 完善会聚成像条件发生改变, 需要进行重新分析与研究. 改进后的光路如图 2.

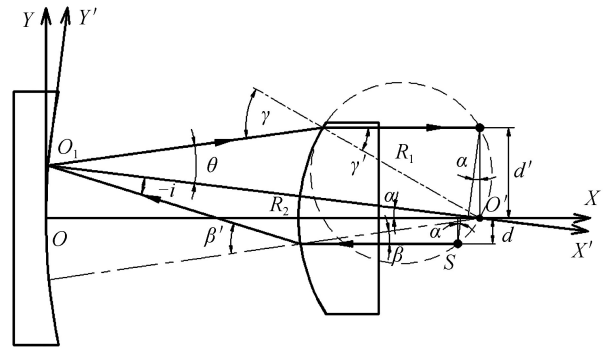


图 2 改进的 Dyson 光谱仪光路结构
Fig.2 Optical path structure of the advanced Dyson spectrometer

O 点为凹面光栅顶点, O' 点为凹面光栅和厚半球透镜的曲率中心, O_1 点为狭缝中心处的中心光线中所选取的波长在光栅上的入射点. 利用以上各点建立两个不同坐标系, 其夹角为 α ; 狭缝出射光波长正入射于厚半球透镜后平面上, 与透镜的凸面入射角为 β , 折射角为 β' , 光栅入射角 $-i$ 和衍射角 θ 满足光栅衍射方程 $\sin i + \sin \theta = mg\lambda$, 其中 m 为衍射级数, g 为光栅刻线密度, λ 为所选波长. 光线经光栅衍射后入射在厚半球透镜凸面上的入射角为 γ , 折射角为 γ' , 物点 S 和像点 I 相对于 X 轴的垂直距离为 d 和 d' . 后半球透镜凸面曲率半径为 R_1 , 凹面光栅曲率半径为 R_2 .

根据文献[13], 当改进型的 Dyson 系统满足 Rowland 环准则时, 其完善会聚成像条件依然成立. 根据图 2 中的光程分析, 当最终入射到像面上的主光线平行于从狭缝出射的光线时, 该 Rowland 环条件得到满足. 根据文献[14], 只要符合同心系统的结构, 则不论光线中间经过介质如何, 对于物点和像点始终满足同一关系式, 考虑到系统坐标系的转角, 该关系可以变形表示为

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

根据图 2, 存在角度关系式

$$\alpha = \beta' - \beta + i \quad (2)$$

根据折射定律和图 2 中的几何关系可知

$$\begin{cases} \beta = \arctan \left(\frac{d}{R_1} \right), \beta' = \arcsin \left\{ n \sin \left[\arctan \left(\frac{d}{R_1} \right) \right] \right\} \\ \gamma = \arcsin \left(n \frac{d'}{R_1} \right), \gamma' = \arcsin \left(\frac{d'}{R_1} \right) \end{cases} \quad (3)$$

根据正弦定理可得

$$\frac{R_2}{\sin(180^\circ - \beta')} = \frac{R_1}{\sin(-i)} \quad (4)$$

同时可以获得入射角和衍射角的表达式为

$$\begin{cases} i = -\arcsin \left\{ \frac{R_1}{R_2} \left\{ n \sin \left[\arctan \left(\frac{d}{R_1} \right) \right] \right\} \right\} \\ \theta = \arcsin \left\{ g\lambda + \frac{R_1}{R_2} \left\{ n \sin \left[\arctan \left(\frac{d}{R_1} \right) \right] \right\} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

最终可以根据图 2 获得角度关系为

$$\beta - \beta' - i + \theta + \gamma' - \gamma = 0 \quad (6)$$

将各角度的表达式代入到式(6)中,并根据光谱分辨率要求预先设定光栅刻线密度,选择中心波长,同时根据光机结构放置要求确定各元件之间的距离,可以确定式中其它各项未知量,最终获得仅包含 R_1 和 R_2 的表达式,这里不再赘述.当两个半径满足式(6)时,就实现了改进结构的近似完善会聚成像条件.

上述优化条件消除了改变后的 Dyson 系统中的入瞳像差,但需要注意的是,分析中并没有涉及到轴上空气间隔带来的像差问题,而这些空气间隔的引入虽不会影响入瞳像差,却会增加额外的球差和色差,最终对成像质量造成一定的影响.对此的处理方法是在半球透镜和凹面光栅之间增加球面透镜,其材料与半球透镜材料相同,通过引入的透镜增加的变量对这些额外像差进行消除.同时为了保证改进 Dyson 系统条件不被破坏,将分析得到的改进 Dyson 结构中的半球透镜进行拆分,获得新的半球透镜和球面透镜的组合,并保持光焦度不变,这样可以保持之前的优化条件.通过 ZEMAX 等计算程序可以完成这一优化过程.

3 光学系统设计与结果分析

3.1 宽谱段高光谱成像仪设计要求与系统设计参数

设计仪器运行在 1 km 高的飞行器上对星下点视场覆盖的沿海区域进行推扫式观测.仪器各项主要特性参数见表 1.

表 1 成像光谱仪特性参数

Table 1 Characteristic parameters of imaging spectrometer

Parameters	Value
Spatial resolution/pixel	0.5 m (at 1 km)
Field of view	28°
Spectral coverage	320~1 000 nm
Spectral resolution	<4 nm
Detector array size and pixel size	1 024(spectrum)×1 024 (space) 13 μm × 13 μm
Focal length	26 mm
F/#	1.8

根据第 2 节理论设计初始结构参数,并利用 ZEMAX 进行光路追迹优化得到光学系统设计参数见表 2.

表 2 光学结构初始和优化参数

Table 2 Original and optimal parameters of optical structure

Characteristic	Value	
Entrance aperture	Φ 14.4 mm	
Telescope	Primary mirror	Radius 74.04 mm, conic 5.831
	Secondary mirror	Radius 72.17 mm, conic 0.188
Spectrometer	Entrance slit	0.039 mm×13 mm
	Hemisphere lens	Radii ∞ and 53.44 mm, silica
	First lens	Radii 132.31 mm and 107.38 mm, silica
	Second lens	Radii 175.57 mm and 228.46 mm, silica
Grating	Ruling	83 l/mm
	Radius	173.9 mm

图 3 给出了所设计成像光谱仪的光路结构. 该光学系统整体尺寸约为 $265\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 80\text{ mm}$, 体积较小, 重量较轻.

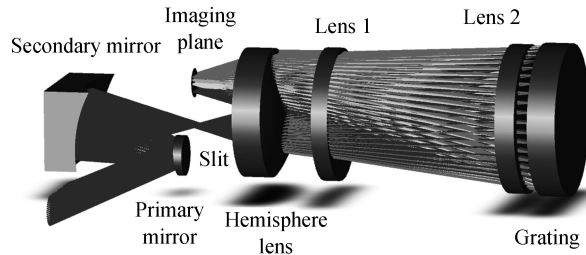


图 3 成像光谱仪光路结构
Fig.3 Optical path of the imaging spectrometer

3.2 优化结果

图 4 给出了优化后的系统中心波长和边缘波长的 MTF 曲线, 以及不同视场的点列图半径均方根 (Root Mean Square, 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 MTF 值达到 0.5 以上, 全波段 RMS 半径值均小于 $6.5\text{ }\mu\text{m}$, 因此全视场全波段的像差都得到了很好的校正, 完全满足设计要求.

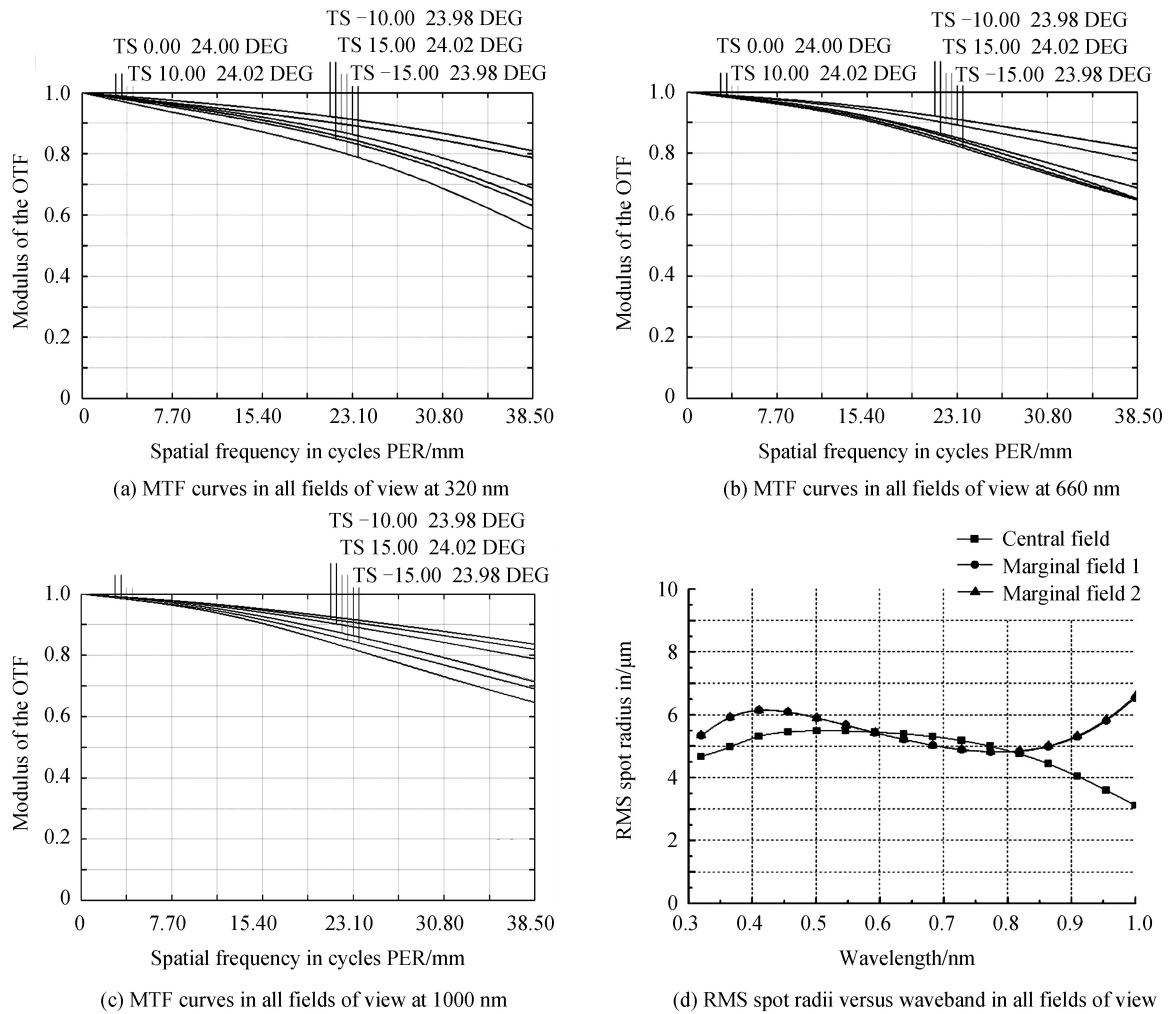


图 4 优化系统结果
Fig.4 Optimized optical system results

图 5 给出了光谱仪系统的畸变和谱线弯曲情况. 可以看到设计光谱仪的畸变小于 0.8%, 谱线弯曲最大值经计算可达 0.039 mm , 相比于整个像面光谱仪的谱线弯曲约为 0.5%. 两项指标均满足应用需求.

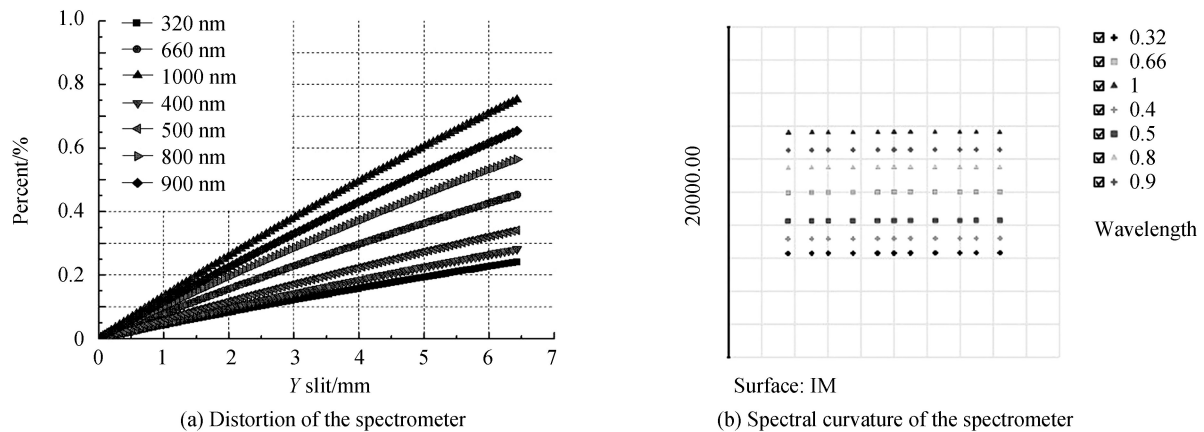


图5 畸变和谱线弯曲分析图
Fig.5 Analysis of the distortion and spectral curvature

3.3 可应用性分析

3.3.1 公差分析

系统的公差决定了设计系统的工程可实施性,宽松的公差设置与分配有益于系统的装调和集成.利用 ZEMAX 软件对系统进行公差分析,设置公差分析参数见表 3.这些公差属于光学系统中常见的设置,较容易实现加工和装调.

表 3 公差分析设置参数

Table 3 Set of the tolerances analysis

Tolerances	Value
Radius	0.02 mm
Thickness	0.05 mm
Decenter X	0.05 mm
Decenter Y	0.05 mm
Tilt X	0.02°
Tilt Y	0.02°
S+A Irreg	0.3

以系统在 660 nm 处的 MTF 为准则进行公差灵敏度分析,利用蒙特卡洛法分析结果得知,90%的 MTF 分析数值相比准则 MTF 数值下降了 0.030 5,80%的 MTF 分析结果相比准则 MTF 数值下降了 0.016 77,这种数值的下降不影响最终的优化设计结果.同时分析得到了 10 个最影响系统成像质量的参数,其中半球透镜的阿贝数偏差对 MTF 数值影响最大,当其达到图 5 中设置的公差值时,可使 MTF 最大下降 0.012 8,而其它 9 个公差参数最多可使 MTF 下降不超过 0.011,均在允许范围内,因此可认为系统具有良好的公差容许性.

3.3.2 光栅色散范围与光谱分辨率分析

改进系统中的凹面色散反射光栅应用的光谱范围是 320~1 000 nm,覆盖波段较宽,在长波处会产生二级谱重叠的问题.根据文献[9]中的研究可知,通过使透射元件和反射元件的透射和反射效率达到 98%以上,同时配合高通滤光片(长波高效率传输)和低通滤光片(短波高效率传输)的方法,可以将这种二级谱重叠的影响降至最低.而另一方面,由于改进型系统各元件之间的垂轴间距的存在,光栅的 0 级和 2 级以上衍射级次不会落在像面上,从而消除了其他光谱范围的影响.

根据文献[15],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

$$d\lambda = \frac{\cos i}{mgf} \cdot b \cos \delta \quad (7)$$

式中, $d\lambda$ 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 为狭缝宽

度, δ 为像面倾角, 系统中狭缝宽度约为 0.039 mm, 对应 3 个像元的宽度, 光谱仪系统的放大倍率为 1:1, 将各值代入计算可得光谱分辨率为 3.6 nm, 满足光谱分辨率 < 4 nm 的设计要求。

本文设计的改进型 Dyson 成像光谱仪由于增大了各部分之间的垂轴距离和沿光轴之间的距离, 使得各光学元件的通光孔径相比传统的 Dyson 光谱仪都有了一定程度的增大, 因此会增大光谱仪的体积, 并提高元件加工的成本, 但是这种增加是可控和可以接受的, 根据光谱分辨率的分析还可发现, 这种改进型 Dyson 成像光谱仪更适用于较宽波段上的高光谱应用, 如果需要进一步提高光谱分辨率, 则需要增加光栅的刻线密度, 这会使系统中的各个光学元件进一步增大, 从而可能将制作成本和光谱仪体积大大提高, 可认为是这种光谱仪相比 Offner 光谱仪的一个缺点。

4 结论

本文研究了适用于 320~1000 nm 波段沿海水域探测的机载高光谱成像仪光学系统, 设计了大视场、小 F 数(1.8)的反射式望远系统, 并对 Dyson 成像光谱仪进行改进, 解决了传统 Dyson 结构光机结构难以放置的问题, 光学系统设计实例结果表明, 设计的高光谱成像仪光学系统成像质量优越, 在空间频率 38.5 lp/mm 和数值孔径为 0.278 的情况下, 全视场全波段 MTF 值达到 0.5 以上, 空间分辨率达到 1 mrad(1 km 高度可分辨 1 m), 光谱分辨率为 3.6 nm, 系统畸变小于 0.8%, 谱线弯曲小于 0.5%, 系统体积较小, 系统公差宽松, 各元件易于加工引进, 光学系统易于装调, 研究结果可对未来机载沿海水色探测载荷的研制提供参考。

参考文献

- [1] MOREL A, PRIEUR L. Analysis of variations in ocean color[J]. *Limnology & Oceanography*, 1977, **22**: 709-722.
- [2] BU Zhi-guo. Research of data integration and application of oceanic ecological environment monitoring system[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
卜志国. 海洋生态环境监测系统数据集成与应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [3] YU LEI. 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.
- [4] GOETZ A F H, SOLOMON G V J, ROCK B N. Imaging spectrometry for earth remote sensing[J]. *Science*, 1985, **228**(4704): 1147-1153.
- [5] CURTISS O D, JEFFREY B, ROBERT A L, et al. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design characterization, and calibration[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(4): 210-221.
- [6] HU Chuan-min, FENG Lian, HOLMES J, et al. Remote sensing estimation of surface oil volume during the 2010 deepwater horizon oil blowout in the gulf of Mexico: scaling up AVIRIS observations with MODIS measurements[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, **12**(2): 026008.
- [7] CHRISTOPHER S, EMEST R, FRED O. The mapping reflected-energy sensor-MaRS: a new level of hyperspectral technology[C]. SPIE, 2009, **7457**: 745703.
- [8] MOUROULIS P, GORP B E V, GREEN R O, et al. The portable remote imaging spectrometer (PRISM) coastal ocean sensor[J]. *Imaging and Applied Optics Technical Digest*, 2012: RM2E.5.
- [9] WANG Di-feng, GONG Fang, PAN De-lu, et al. Airborne marine surveillance platform and its application in water quality monitoring[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, **31**(2): 49-56.
王迪峰, 龚芳, 潘德炉, 等. 海监航空遥感平台及其在近海水体环境质量监测中的应用[J]. 海洋学报, 2009, **31**(2): 49-56.
- [10] MOUROULIS P, GREEN R O, WILSON D W. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(12): 9087-9096.
- [11] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, YU Xiang-yang. Dyson spectral imaging system with large relative aperture and wide spectral region[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(10): 2535-2542.
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.
- [12] CAO Dian-sheng, SHI Zhen-hua, LIN Guan-yu. Development of airborne ocean modified Dyson hyperspectral imager[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(6): 1403-1409.
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.
- [13] CARLOS M O, XESUS P B, HECTOR G N, et al. Design of Dyson imaging spectrometers based on the Rowland

circle concept[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(35): 6487-6494.

[14] LOBB D R. Theory of concentric designs for grating spectrometers[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(13): 2648-2658.

[15] YU L, WANG S R, LIN G Y, *et al.* Spectral broadband anastigmatic Wadsworth imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(1): 101-109.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41504143), Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (No. YJKYYQ20170048), Anhui Province NSR (No.KJ2018A0487), Anhui Province Science and Technology Major Project (No. 15czz04124), Youth Innovation Promotion Association CAS (No.2016203)

引用格式: SHEN Yuan, YU Lei, CHEN Jie-xiang, *et al.* Optical System of Hyper-spectral Imaging Sensor with Small F Number in Broadband by Air for the Coastal Ocean Observation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0822003

申远, 于磊, 陈结祥, 等.用于沿海水色探测的机载宽谱段小 F 数高光谱成像仪光学系统[J].光子学报, 2018, **47**(8):0822003