

文章编号 2095-1531(2021)06-1459-09

应用于作物荧光检测的改进型 Offner 光谱仪设计

范纪泽^{1,2}, 李 博^{1*}, 张 璐^{1,2}, 巨燕方^{1,2}

(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: 为了对作物进行更灵敏、更高效的生长监测, 国内外相继设计了各类高光谱分辨率的光谱仪用来探测叶绿素荧光效率。本文对传统 Offner 光谱仪系统进行改进, 得到了光谱分辨率更高的整体结构。光学系统选用双反射望远镜系统, 光谱仪部分采用高刻线密度反射型凸面光栅, 实现更高的光谱分辨率。在此基础上, 添加放大透镜以满足长狭缝需求, 同时得到了一种狭缝-像面在光栅同一侧的 Offner 结构。利用 codeV 软件对望远镜系统和光谱仪部分的初始结构进行优化。结果表明, 工作在 670~780 nm 波段时, 光谱分辨率为 0.3 nm, 在 17 lp/mm 截止频率下整体调制传递函数 $MTF > 0.75$, 各视场条件下弥散斑均方根半径 $RMS < 15 \mu m$ 。由此可知, 该方法可以满足作物生长叶绿素监测领域的高精度、实时性要求。

关键词: 光学设计; Offner 光谱成像系统; 超高光谱分辨率

中图分类号: TP731 TH744 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2021-0073

Design of an improved Offner spectrometer for crop fluorescence detection

FAN Ji-ze^{1,2}, LI Bo^{1*}, ZHANG Lu^{1,2}, JU Yan-fang^{1,2}

(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: libo0008429@163.com*

Abstract: To monitor crop growth more efficiently, various kinds of hyperspectral spectrometers have been designed to detect chlorophyll fluorescence. In this paper, the traditional Offner spectrometer system is improved, and a structure with a higher spectral resolution is obtained. The double-reflection telescope system is selected, and the spectrometer adopts a highly dense linear reflective convex grating to achieve higher spectral resolution. On this basis, an amplifying lens is added to meet the need for a long slit. An Offner structure is obtained with a slit and image plane on the same side of the grating. The initial structure of the telescope system and the spectrometer are optimized by codeV software. The results show that the spectral resolution is 0.3 nm in the range of 670~780 nm, the overall Modulation Transfer Function (MTF) is greater than 0.75 at the cut-off frequency of 17 lp/mm, and the Root Mean Square radius (RMS) of the speckle is less than

收稿日期: 2021-04-07; 修订日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62005268)

Supported by National key Research and Development Program of China (No. 62005268)

15 μm . The proposed system can meet the requirements of highly precise real-time monitoring in crop growth chlorophyll detection.

Key words: optical design; Offner spectral imaging system; ultra-high spectral resolution

1 引言

作为近年来各航天仪器上的有效载荷—光谱探测器,使得对地大范围、同步性监测成为可能。多项研究表明光谱分析及荧光检测方法对识别作物生长环境及生长状态有较大作用^[1-3],通过分析作物中叶绿素荧光光谱特征可较好地研究作物生长情况。在叶绿素荧光过程中,将在 670~780 nm 之间形成 H_a 、 O_2-A 、 O_2-B 等 3 条吸收暗线,理想的观察条件是从卫星上分析 O_2-A 、 O_2-B 气体在大气光谱中的吸收程度,较好的办法是使用高光谱分辨率的光谱仪^[4]。国外较早提出该方法,较为先进的机载光谱仪(AAHIS)的相对孔径达到了 0.33,工作在可见光波段^[5]。2015 年,欧洲航天局提出了荧光卫星计划(FLEX)专门用作叶绿素荧光检测,其中含有 Offner 型光谱仪,在可见光波段的光谱分辨率达到了 0.3 nm^[6]。

国内作物荧光检测方法提出较晚,且绝大部分用作反演工作的数据皆源自基于美国的卫星数据或便携式探测器^[7]。如 Orbiting Carbon Observatory-2 卫星,工作波段为 750~2000 nm,光谱分辨率为 0.5 cm^{-1} 。其他像日本研制的工作在 750~1430 nm 波段,光谱分辨率为 0.2 cm^{-1} 的温室气体观测卫星 GOSAT、欧空局的 GOME-2、以及国产碳卫星 Tansat 等也频繁被用作荧光检测的数据来源。以上提及的卫星搭载的光谱仪均不是专门用来进行作物荧光检测的,此类专用光谱仪较少。在光谱仪方面,我国自主研制的高分辨卫星,如高分 5 号卫星及珠海一号卫星搭载的光谱仪在近紫外至近红外波段的光谱分辨率可达 3~5 nm。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称长光所)提出了一种工作在可见光范围内的光谱分辨率为 2.4 nm 的 Offner 凸面光栅高分辨率光谱仪^[8]。苏州大学朱雨霁团队提出一种工作波段为 250~400 nm、光谱分辨率为 0.3 nm、且在 35 lp/mm 处调制传函接近衍射极限的 Offner 光谱仪,综合性能较好^[9]。综上所述,大多数光谱仪的光谱分辨率大于 1 nm,且由于它们为非专用叶绿素荧光检测光谱仪,波段范围与叶绿素荧光部

分有所偏差。

目前,光谱仪正朝着大视场、长狭缝、更高光谱分辨率方向发展^[10]。本文将设计一款专用于叶绿素荧光检测的光谱仪,以 Offner 型光谱仪为原型,通过改进更高密度的凸面光栅实现作物荧光 0.3 nm 的光谱分辨率,通过在光谱仪外部附加弯月放大透镜来满足 30 mm 长狭缝的条件。优化后的光谱仪与无色差的反射物镜系统衔接,得到的完整结构能更好地满足使用要求。

2 光谱仪系统的构成及其设计理论

2.1 光谱仪系统的整体参数

用于作物荧光检测的超高光谱分辨率改进型 Offner 光谱仪整体指标如表 1 所示。该光谱仪由卫星搭载对地表作物进行观测,且需要短周期测量,因此选取高度为 810 km 的极轨。因为在叶绿素荧光过程中,大部分辐射能量集中在 670~780 nm 波段内,且在该波段范围内有两个峰值。在这个波段内,可较好地收集反射信号中仅占据 2% 的叶绿素荧光效应信息。本系统包括反射物镜及改进型光谱仪两部分,最终将截止频率 17 lp/mm 处 MTF 控制在 0.75 以上。当光谱分辨率为 0.3 nm 时,可直接反演得到红外和近红外波段叶绿素荧光,用于作物叶绿素荧光的实时监测。将 x 、 y 向半视场设为 4° 及 20° ,因为要兼顾精度、地面幅宽及通光量的大小,将焦距设定为 240 mm。

表 1 超高光谱分辨率改进型 Offner 光谱仪各项指标
Tab. 1 Indexes of an improved Offner spectrometer with ultra high spectral resolution

项目	指标
探测高度/km	810
光谱分辨率/nm	0.3
工作波长/nm	670~780
焦距/mm	240
入瞳直径/mm	75
半视场($^\circ$)	$x: 4, y: 20$
调制传函(MTF)	>0.75 (17 lp/mm)
弥散斑均方根半径(RMS)/ μm	<15

本文设计的用于作物荧光探测的超高光谱分辨率改进型 Offner 光谱仪, 包含两反望远物镜、狭缝、折转反射镜、光谱仪放大透镜、光谱仪反射镜、高密度光栅、探测器。

为了在狭缝位置满足衔接原则。选取高密度凸面光栅以满足高分辨要求, 其基底为融石英^[11]。经由折转反射镜的光线经过放大透镜、光谱仪反射镜以及光栅后, 按原光路出射, 最终使得像面位置与狭缝位置同时处于光栅的左侧, 且光谱仪中的各组分工作面皆为同球心结构, 不同于传统 Offner 光谱仪像面及狭缝位置的分布。

光学系统的均方根半径小于 15 μm, 且像面大小为 30 mm 左右。探测器像元尺寸选为 9 μm, 分辨率选为 4096×4096。综合考虑上述要求, 本文选用长光辰芯 GSENSE4040BSI 探测器, 相关指标如表 2 所示。

表 2 GSENSE4040BSI 探测器指标
Tab. 2 Detector parameters of GSENSE4040BSI

项目	参数
分辨率	4096×4096
像元尺寸/μm	9×9
感光面积/mm	36.8×36.8
照明方式	背照明
帧频(frame·s ⁻¹)	24

2.2 反射物镜组设计理论

一般光谱仪的成像物镜有透射式与反射式两种。因反射式系统不含有色差, 且组分相比透射系统少, 虽然仅有两个反射面, 但设定两面为二次曲面时, 系统将获得更多的参量, 整体优化时更灵活^[12]。因此, 本文选用经典的凹凸两面反射结构, 下面对反射镜组进行分析。

设第一反射面顶点曲率半径为 r_1 , 第二反射面顶点曲率半径为 r_2 , 两镜间隔为 d , 第一反射面形状系数为 k_1 , 第二反射面形状系数为 k_2 。如图 1 所示。

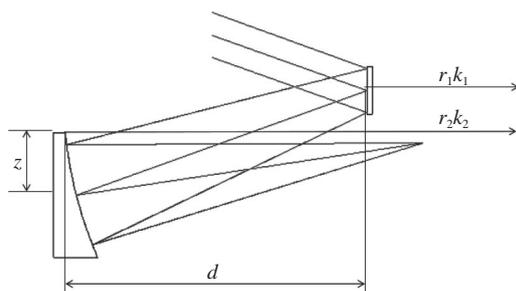


图 1 双反射物镜结构图

Fig. 1 Structural diagram of double reflection objective

由此可得矢高公式为:

$$sag = \frac{z^2}{r + \sqrt{r^2 - (1+k)z^2}}, \quad (1)$$

其中 sag 为 z 处矢高。 r 为两表面曲率半径, k 为形状系数, z 为反射镜表面任意点离反射镜旋转对称轴的距离。考虑到系统中的球差及彗差, 可以得到像差相对较低时, 形状系数为:

$$k_1 = \frac{c_1^2}{2} + c_1 - 1, \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{-c_1^3 + 2c_1^2 + 12c_1 - 8}{(c_1 + 2)^3}, \quad (3)$$

其中 c_1 为第一反射面曲率, 形状系数也与其有关联, 经计算 $c_1 = -0.00434$, $k_1 = 1$, $k_2 = 1.005$ 。以上并未考虑畸变及像散因素, 因此可在光学设计软件中将形状系数、半径及间隔设为变量进行设计, 以获得综合像差较小的反射望远组分。

2.3 改进型 Offner 光谱仪设计理论

传统 Offner 结构如图 2 所示, 主反射镜 M_1 与光栅 M_3 同球心^[13]。经由狭缝的入射光从上方入射, 经折转后进入凸面光栅及反射镜, 再从下方出射, 其整体结构为对称式分布, 可对像差进行良好的校正。该光栅基于全息技术, 衍射效率为 30%^[14]。

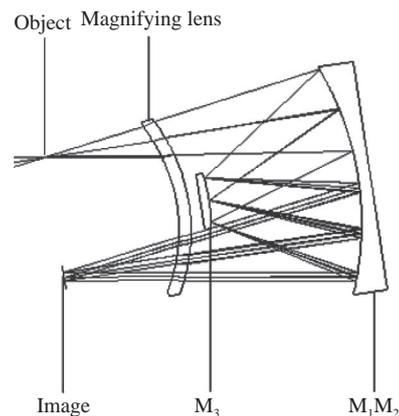


图 2 传统 Offner 结构图

Fig. 2 Traditional Offner structure diagram

本文在 Offner 的基础上进行改进。通过引入高刻线密度光栅使得入射光与出射光位于光栅同侧, 如图 3 所示。

从图 3 可以看到, 光线由 A 点入射, 经由 A' 点出射, 位于凸面光栅同一侧。现将其中的反射面

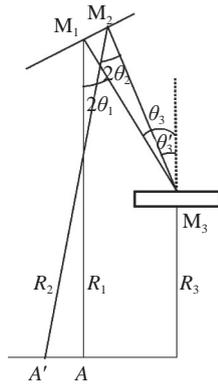


图 3 改进型 Offner 结构图

Fig. 3 Schematic diagram of improved Offner structure

分裂成两个,分析光谱分辨率及像散像差,首先设定光谱仪光谱范围为 $\lambda_0 \sim \lambda_1$,光栅方程为

$$\sin \theta_{21} - \sin \theta_{20} = m(\lambda_1 - \lambda_0)/d \quad (4)$$

其中 $\sin \theta_{20}$ 为 λ_0 时的 $\sin \theta_2$, $\sin \theta_{21}$ 为 λ_1 时的 $\sin \theta_2$, m 为级次, d 为光栅间隔。再根据 Offner 消像散条件^[15],可得到出射部分的谱线展开长度

$$L = R_2(\sin \theta_{21} - \sin \theta_{20}) \quad (5)$$

当像散最小时,其赛德尔系数为零,光栅尺寸及光谱仪分辨率间有如下关系

$$R_3 = \frac{dL}{m\Delta\lambda} \quad (6)$$

光栅部分 $R_3=220$ mm, $d=689.6$ nm, $L=35$ mm,将其代入初始结构中,可以获得更为合适的系统结构。

$$\lambda/\Delta\lambda = mN \quad (7)$$

其中 N 为刻线数,当工作在 600 nm 处且分辨要求为 0.3 nm、衍射级次为 1 时, N 要大于 2000。

3 系统设计过程

3.1 两反望远物镜设计

根据上一部分阐述,选取一种凸凹两反结构作为初始结构,将表面的面型系数及半径等设为变量进行优化,在对焦距进行约束后,利用 codeV 进行优化。最终获得的反射物镜结构如图 4 所示。

图 4(a)为反射镜部分 YOZ 平面截图,First Mirror 为主镜,设置光阑以承担相应视场,Second Mirror 为凹面反射次镜,承担了望远组成像的作用。而 Image 像面位置将放置 X 向狭缝并与光谱仪中的 object 物面相衔接,将视场传递给光谱仪。图 4(b)为三维图像。从以上结果中可看出,光路之间无遮挡,视场完整,故没有中心遮拦导致

的盲区及像面照度的降低,为光谱仪的进一步搭建提供了良好的入射光基础。仅使用两个二次曲面也可降低加工难度。

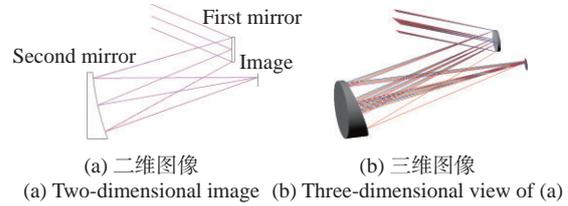


图 4 望远物镜结构图

Fig. 4 Structure diagram of the telescope objective

由于该系统无色差,因此只列出一个波长位置的 MTF(见图 5,彩图见期刊电子版)及 RMS(见图 6)。

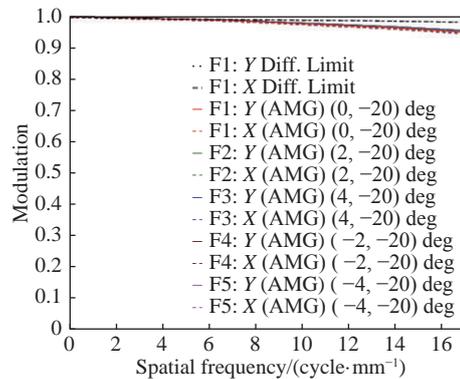


图 5 望远系统 MTF 图像

Fig. 5 MTF image of telescope system

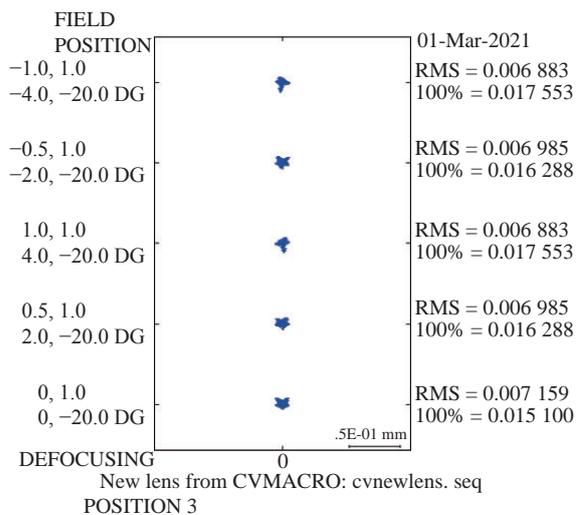


图 6 望远系统 RMS 图像

Fig. 6 RMS image of telescope system

由图 5~图 6 可看出,该系统在截止频率 17 lp/mm 处,MTF>0.9,接近衍射极限;其 RMS 最

大为 $7.159\ \mu\text{m}$, 小于 $9\ \mu\text{m}$, 像质良好, 可视为成像优良、出射光束优质的一套物镜。

3.2 改进型超高光谱分辨率 Offner 光谱仪设计

在狭缝长度为 $30\ \text{mm}$ 的基础上, 将一阶凸面光栅间隔设置为 $0.0007\ \text{mm}$, 光阑设置在光栅表面, 将上述光栅部分的初始结构代入, 并对该结构进行优化, 优化完毕的二维、三维结构如图 7 所示。

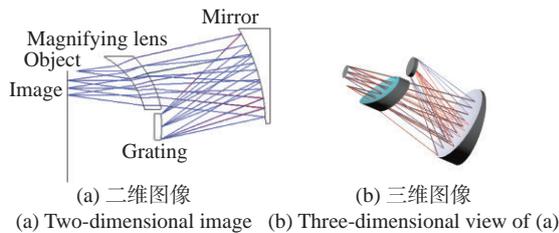


图 7 优化后 Offner 光谱仪结构图

Fig. 7 Structure diagram of optimized Offner spectrometer

图 7(a) 为光谱仪部分的 YOZ 平面截面图。object 为物点, 对于光谱仪来说即为狭缝放置位置, 实际应用中, 该位置处存在一条 X 向的 $30\ \text{mm}$ 长狭缝。对于整机衔接来说, 该位置将与望远系统像方位置相连, 即望远系统成像焦点处也为狭缝位置。图中 Magnifying lens 即放大透镜, 本质上为弯月透镜, 为了适应长狭缝引起的 X 向物高的影响, 采用该结构引入两组球面参量, 可使得成像质量更高。图中 Mirror 为凹面反射镜, Offner 系统中采用该类型反射镜进行成像, 图中凹面反射镜将光栅衍射出的光会聚在一起, 通过弯月透镜后, 在 Image 像方位置成像。Image 平面将放置探测器以接收光谱仪所成的像。

该系统本质上仍然是 Offner 系统, 像差特征也与 Offner 类似, 但其整体像差较小。该结构由于引入了高密度光栅, 使得衍射光路分布在光栅一侧, 对比图 2 的原结构, 其出射与入射光都偏向于光栅的同侧, 光路整体上除了衍射角导致的出射方向不一致外, 大体相同。在工作级次、入射角不变时, 改变光栅刻线间隔, 虽然衍射角会发生变化, 但依然满足光栅方程。因此, 像差只会发生少量变化, 并不影响设计过程中整体分析优化。

从图 7 可看出, 入射光与出射光在光栅的同一侧, 在得到高光谱分辨率的同时减小了大反射镜的尺寸, 使得加工更为容易。由于衍射角的存在, 使得物方光路与像方光路会有一定程度的偏差, 这使得和前方物镜系统搭配时会造成

部分空间尺寸拥挤, 在实际工程应用中无法放置相应部件的情况。对于该问题, 利用折转反射镜作为中间机构, 通过改变光轴方向提高空间预留尺寸。

改进型超高光谱分辨率的 Offner 光谱仪系统的 MTF 曲线如图 8(彩图见期刊电子版) 所示。

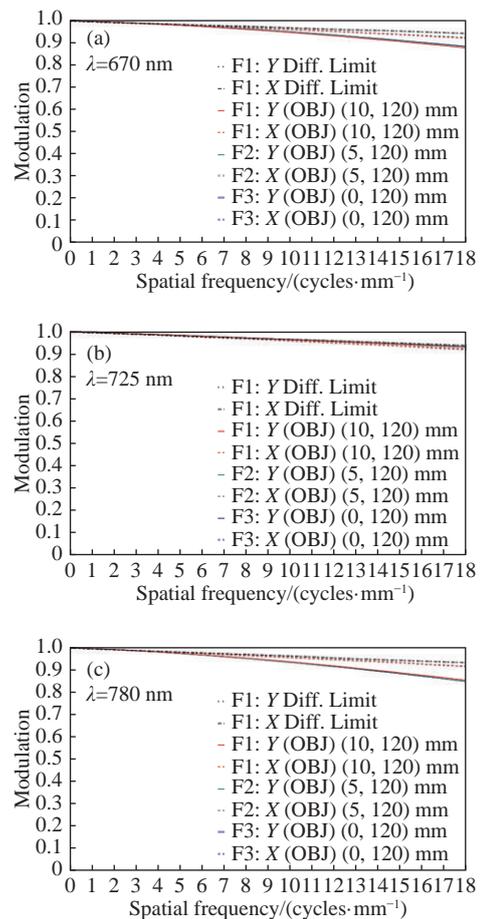


图 8 各波段 MTF 曲线图

Fig. 8 MTF curves at different wavelengths ($\lambda=670$ 、 725 、 $780\ \text{nm}$)

由图 8 可看出, 在全波段全视场时, 改进型 Offner 光谱成像仪在截止频率 $17\ \text{lp/mm}$ 下的 MTF 均大于 0.85 , 接近衍射极限, 且在中心波长 $725\ \text{nm}$ 处 MTF 曲线与衍射极限重合。该 MTF 满足整体系统的成像质量要求。改进型 Offner 系统优化后的 RMS 点列图如图 9(彩图见期刊电子版) 所示。

从图 9 中可看出优化后的系统在各视场各波段下弥散斑均方根半径均小于 $10\ \mu\text{m}$, 可以满足整体系统的要求。

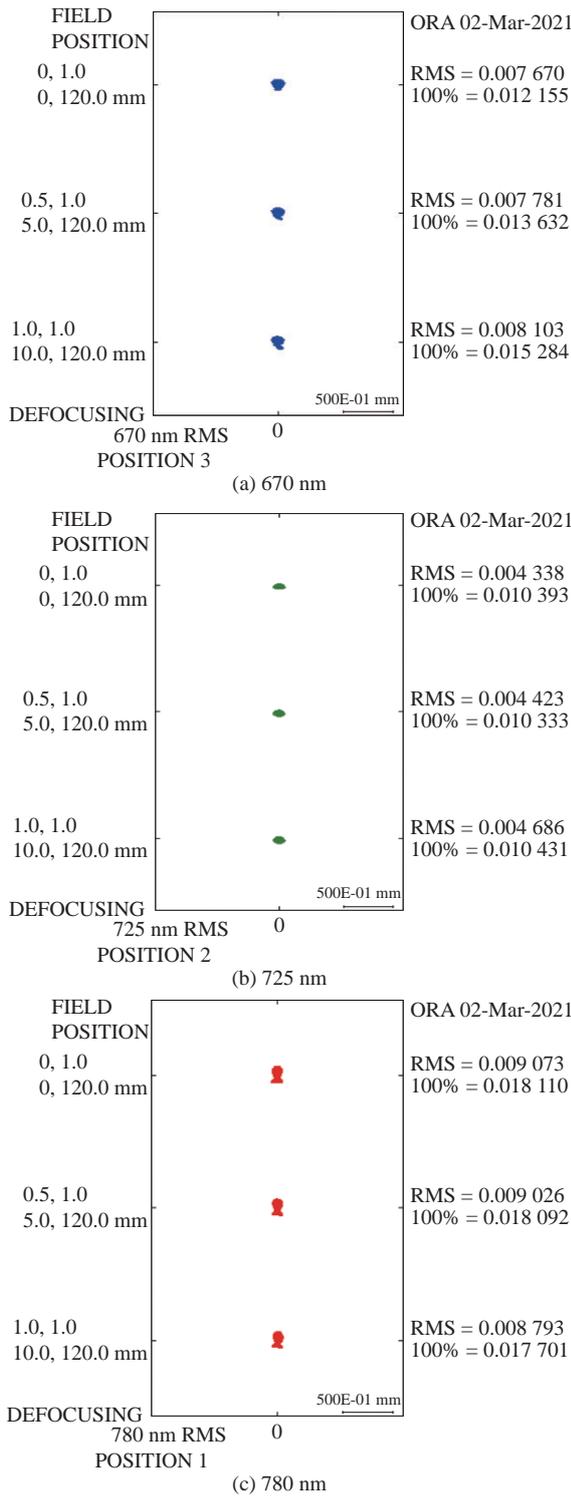


图 9 各波段 RMS 点列图

Fig. 9 RMS point diagrams at different wavelengths ($\lambda=670$ 、725、780 nm)

4 整体设计结果

4.1 整体结构

对物镜、狭缝、折转反射镜以及光谱仪根

据衔接原则进行设计。在反射系统像方位置处放置狭缝,本文设置狭缝长 30 mm,并在其后方一段距离放置折转反射镜,使得狭缝、反射镜、探测器即光谱仪像面及相邻透镜空间分布合理。本文将狭缝与后方第一面反射镜的距离设置为 30 mm。需注意的是反射镜至光谱仪第一面距离加上狭缝至反射镜距离为光谱仪的物距。通过调节两方的距离来寻找光线不被遮拦且各部分分布最为合理的整体结构。最终的整体结构如图 10 所示。

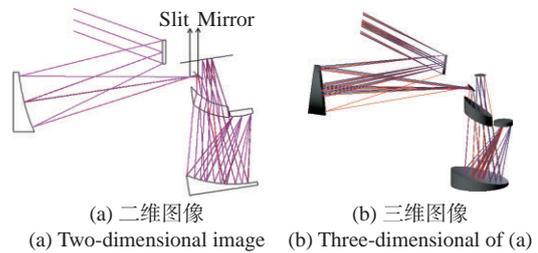


图 10 整体结构图

Fig. 10 Overall structure diagram

图 10(a) 为反射式衔接系统 YOZ 平面截面图,其中 Silt 处放置 X 向 30 mm 狭缝,其也是望远像面和光谱仪物面。Mirror 为折转反射镜,将光路折转以实现狭缝、探测器的合理放置,需注意的是反射面要与狭缝之间有一定距离以保证空间的容纳性,且系统像面到光学系统最后一面的距离要尽可能长,以利于实际应用时加滤光片、光陷阱等部件从而消除二级光谱等杂光的影响^[16]。由图 10 可看出其狭缝、反射镜、探测器间的间隔较大,可合理布置各部分,使结构紧凑。同时,将反射面背部设为平面,有利于作为基准进行装配。折转反射镜的使用使得该结构较图 11(彩图见期刊电子版)中透射型连接模式中的圆圈部分更加合理,探测器及狭缝之间有更充足的空间。

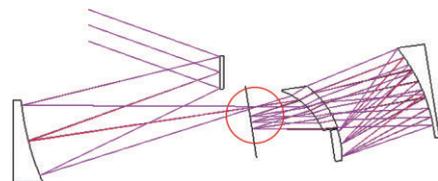


图 11 透射式光谱仪整体系统

Fig. 11 Overall structure of the transmission-type spectrometer

4.2 整体系统 MTF、RMS 及径向能量分析

整体系统的 MTF 曲线图如图 12(彩图见期刊电子版)所示。

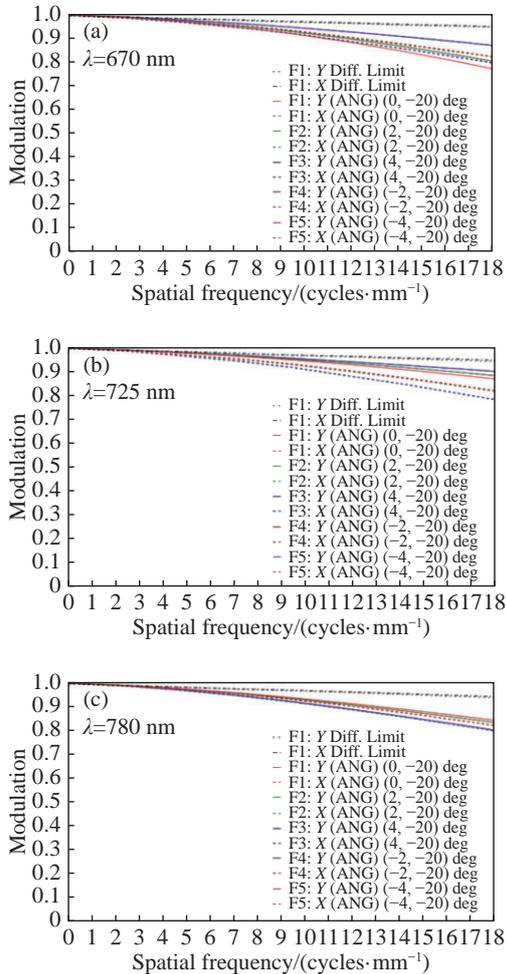


图 12 各波段整体结构 MTF 曲线图

Fig. 12 MTF curves of the system at different wavelengths (λ=670、725、780 nm)

可看出在全波段全视场条件下, 该系统的 MTF>0.75, 符合 MTF 的传递规律, 满足技术指标, 接近衍射极限, 可满足叶绿素荧光成像需求。整体系统的 RMS 如图 13 所示。

由图 13 可见, 整体结构在全波段全视场条件下 RMS<15 μm, 满足表 1 中的技术指标要求, 满足叶绿素荧光探测需求。

整体系统的径向能量分布如图 14(彩图见期刊电子版)所示。图 14 中横轴坐标最大值为 0.028 mm, 约为各波长下 RMS 的 2 倍, 由图 14 可见, 系统像面的能量分布合理, 可以良好地衔接探测器, 输出信号可被探测器接收。

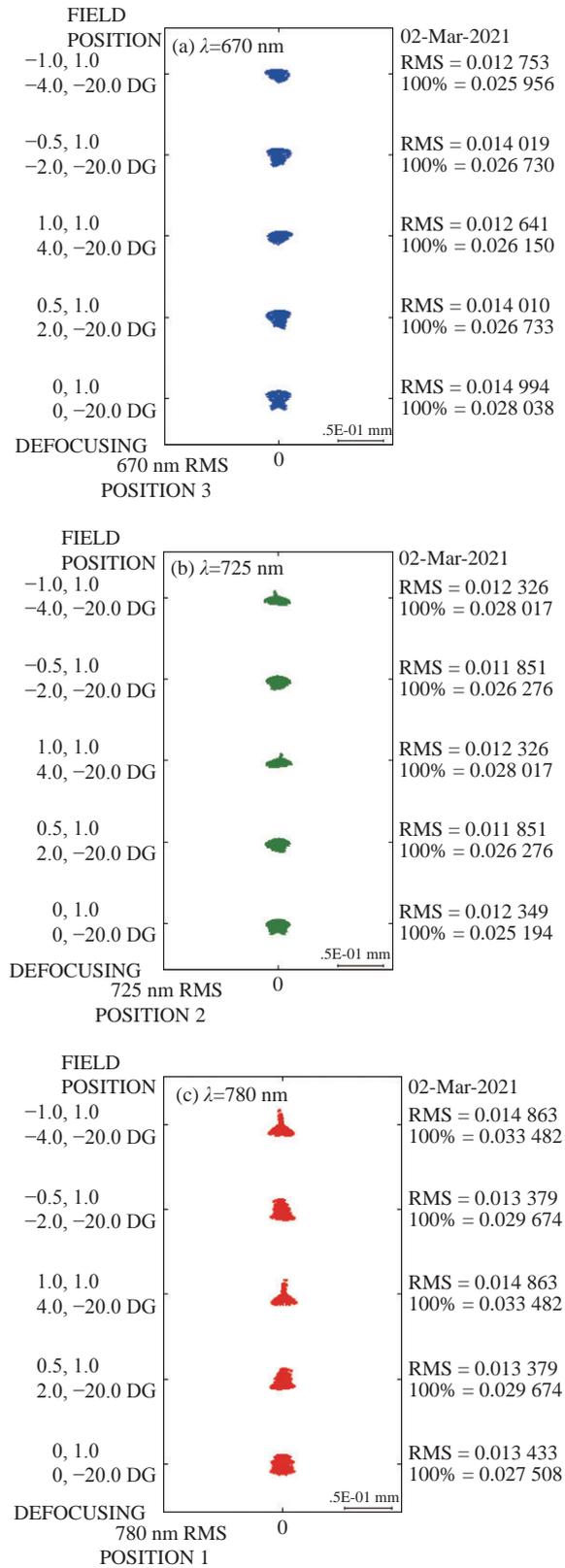


图 13 各波段整体结构 RMS 点列图

Fig. 13 RMS point diagrams of the system at different wavelengths (λ=670、725、780 nm)

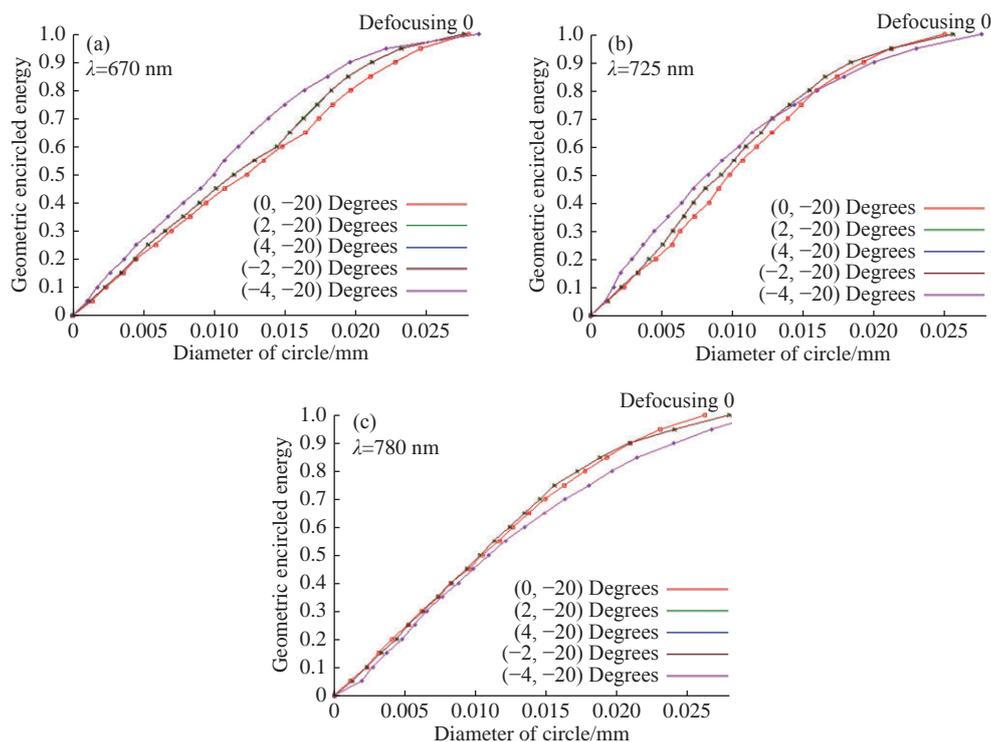


图 14 整体结构径向能量分布图

Fig. 14 Radial energy distributions of the system at different wavelengths ($\lambda=670$ 、725、780 nm)

5 结 论

本文就叶绿素荧光检测方面所需的 0.3 nm 光谱分辨率及更高的要求,提出了利用高密度光栅中超高光谱分辨率特性,阐述了整体工作过程及原理,并对结构进行了选型。通过对物镜及光谱仪部分分别进行优化,得到像质较为良好的两个部分。最后,通过调整折转反射镜角度与位置

衔接部分以获得空间分布较为合理的结构。像质图像测试结果表明:在 17 lp/mm 下 MTF>0.75 且 RMS<15 μm ,均满足设计指标要求。此外,通过对能量分布的分析可看出系统能量集中,可更好地满足叶绿素荧光探测的工作要求。本文提出的系统光谱分辨率目标为 0.3 nm,但可通过加大光栅密度的方法来进一步提高分辨率,此时狭缝与像面位置也将发生相应的改动。

参考文献:

- [1] 杨卫梅,刘刚,欧全宏,等.红外光谱结合曲线拟合对自然老化豆类种子的研究[J].分析化学,2019,47(12):2004-2016.
YANG W M, LIU G, OU Q H, *et al.*. Study on natural aging legume seeds by infrared spectroscopy combined with curve fitting[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(12): 2004-2016. (in Chinese)
- [2] 刘亚超,李永玉,彭彦昆,等.红外漫透射光补偿法无损快速检测大米直链淀粉[J].分析化学,2019,47(5):785-793.
LIU Y C, LI Y Y, PENG Y K, *et al.*. Non-destructive rapid detection of rice amylose content by near-infrared diffuse transmission optical compensation method[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(5): 785-793. (in Chinese)
- [3] 马文强,张漫,李源,等.基于高光谱成像的核桃仁品质检测与分类方法[J].分析化学,2020,48(12):1737-1746.
MA W Q, ZHANG M, LI Y, *et al.*. Detection and grading method of walnut kernel quality based on hyperspectral image[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 48(12): 1737-1746. (in Chinese)
- [4] 王恒.应用于植物生理检测的高通量叶绿素荧光成像系统研究[D].杭州:浙江大学,2018.
WANG H. Research on high throughput chlorophyll fluorescence imaging system applied in plant physiology detection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

- [5] TOPPING M Q, PFEIFFER J E, SPARKS A W, *et al.*. Advanced airborne hyperspectral imaging system (AAHIS)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4816: 1-11.
- [6] COPPO P, PETTINATO L, NUZZI D, *et al.*. Instrument predevelopment activities for FLEX mission[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(7): 075102.
- [7] 付严宇, 杨枕, 关世豪. 航空航天高光谱成像仪研究现状及发展趋势[J]. *红外*, 2020, 41(8): 1-8, 14.
FU Y Y, YANG G, GUAN SH H. Research status and development trend of hyperspectral imagers onboard airborne and spaceborne platforms[J]. *Infrared*, 2020, 41(8): 1-8, 14. (in Chinese)
- [8] 刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格, 等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 52-57.
LIU Y J, CUI J CH, BAYANHESHIG, *et al.*. Design and application of imaging spectro meter with convex grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 52-57. (in Chinese)
- [9] 朱雨霖, 尹达一, 陈永和, 等. 高光谱分辨率紫外Offner成像光谱仪系统设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0222001.
ZHU Y J, YIN D Y, CHEN Y H, *et al.*. Design of hyperspectral resolution ultraviolet Offner imaging spectrometer system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0222001. (in Chinese)
- [10] 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.
ZHU J CH, SHEN W M. Compact anastigmatic long-slit spectrometer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(4): 542-548. (in Chinese)
- [11] 徐达, 张国玉, 孙高飞. 改进Offner型凸面光栅光谱辐射定标光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0822002.
XU D, ZHANG G Y, SUN G F. Design of advanced Offner-type convex grating spectral radiation calibration optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0822002. (in Chinese)
- [12] 周正平, 赵知诚, 靳阳明, 等. 大相对孔径宽视场无遮拦平场两反射镜望远物镜分析与设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0322002.
ZHOU ZH P, ZHAO ZH CH, JIN Y M, *et al.*. Analysis and design of unobscured flat-field two-mirror telescopic objective with wide field of view and large relative aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0322002. (in Chinese)
- [13] 杨拓拓, 陈新华, 赵知诚, 等. Offner分光成像系统的球面自准直法快速装调[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1324-1331.
YANG T T, CHEN X H, ZHAO ZH CH, *et al.*. Fast alignment of an offner imaging spectrometer using a spherical autostigmatic method[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1324-1331. (in Chinese)
- [14] 兰卫华, 王欣, 刘银年, 等. 凸面光栅的衍射效率计算及其二级光谱抑制[J]. *红外技术*, 2009, 31(5): 256-258.
LAN W H, WANG X, LIU Y N, *et al.*. The convex grating diffractive efficiency calculating and second diffraction suppression[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(5): 256-258. (in Chinese)
- [15] 徐达, 岳世新, 张国玉, 等. Offner型凸面光栅宽动态范围辐射定标光源设计[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 1085-1093.
XU D, YUE SH X, ZHANG G Y, *et al.*. Design of an Offner convex grating radiation calibration light source with a wide dynamic range[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1085-1093. (in Chinese)
- [16] 陈醒, 胡春晖, 颜昌翔, 等. 大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制[J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 678-685.
CHEN X, HU CH H, YAN CH X, *et al.*. Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 678-685. (in Chinese)

作者简介:



范纪泽(1997—), 男, 吉林四平人, 硕士研究生, 2020年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事紫外光学设计方面的研究。E-mail: 1582177641@qq.com



李博(1981—), 男, 吉林梨树人, 博士, 副研究员, 2011年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事高光谱遥感总体设计方面的研究。E-mail: libo0008429@163.com



张璐(1997—)女, 吉林长春人, 硕士研究生, 2020年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 1499201809@qq.com



巨燕方(1997—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 2020年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 260286190@qq.com