

日光诱导叶绿素荧光高光谱成像仪研究 (特邀)

张伟^{1,2}, 薛辉¹, 于磊^{1*}

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026)

摘要: 研究了一种可用于植被日光诱导叶绿素荧光遥感的高光谱成像仪样机, 用以满足对植被微弱荧光辐射探测的高信噪比、高光谱分辨率的科学探测需求。根据荧光与太阳夫琅禾费线的作用探测机理, 结合探测科学需求分析完成了具备高性能的光学系统设计。系统工作波段为 670~780 nm 的可见-近红外谱段, 可覆盖植物受太阳光照射而产生的荧光辐射特征波长; 系统数值孔径为 0.25, 这种大通光能力可确保系统具备足够的信噪比; 系统光谱分辨率优于 0.3 nm, 并同时具备良好的成像质量。样机的初步结果完全满足设计要求, 该研究将为我国未来日光诱导叶绿素荧光高光谱成像探测提供一种有力的手段。

关键词: 成像光谱仪; 日光诱导叶绿素荧光; 可见-近红外; 高光谱分辨率

中图分类号: O433.1; TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210311

Study on hyperspectral imager for the solar induced chlorophyll fluorescence observation(*Invited*)

Zhang Wei^{1,2}, Xue Hui¹, Yu Lei^{1*}

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: An prototype of imaging spectrometer for the remote sensing of solar induced chlorophyll fluorescence of vegetation was researched to satisfy the scientific requirements of high SNR and high spectral resolution for the weak fluorescence observation. Based on the principle of relationship between the fluorescence and solar Fraunhofer lines, the optimization of the optical system with high performance was completed. It covered the visible-near infrared working waveband of 670-780 nm, which also covered the special wavelengths of the solar induced fluorescence. The numerical aperture was 0.25 which ensured the enough SNR of the system. The imaging spectrometer also owned spectral resolution better than 0.3 nm and excellent imaging quality. The performance tests of the prototype were studied. The research will supply an excellent engineering application in the further solar induced chlorophyll fluorescence high spectral imaging observation.

Key words: imaging spectrometer; solar induced chlorophyll fluorescence; visible-near infrared; high spectral resolution

收稿日期:2021-05-13; 修订日期:2021-07-27

基金项目:国家自然科学基金(41504143); 中国科学院科研装备研制项目(YJKYYQ20190044); 中国科学院青年创新促进会(2016203)

作者简介:张伟,男,硕士生,主要从事光谱仪成像系统方面的研究。

导师(通讯作者)简介:于磊,男,研究员,博士生导师,博士,主要从事先进光学遥感仪器的设计与研发方面的研究。

0 引言

植被是地球表面某一地区内所覆盖的植物群落的总体,可通过光合作用为地球上其他生物提供初级生产力,并在生物地球化学循环中扮演着重要角色。植物进行物质代谢和能量代谢的基础是光合作用,在太阳光照条件下,光合作用在原初反应、传递吸收光能和电能转换的过程中,会有极小的一部分光能(0.5%~2%)以日光诱导叶绿素荧光(Solar Induced chlorophyll Fluorescence, SIF)形式进行释放^[1],植物叶片中的光能传输分布如图 1 所示。

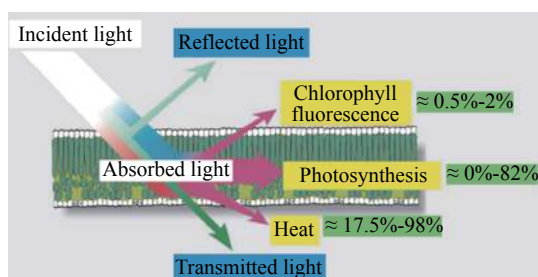


图 1 太阳光在叶片内的光能传输分布

Fig.1 Distribution of solar light transmission in the leaf

近年来,研究人员发现荧光和光合作用有着十分密切的关系。一方面,荧光是光合生产力的直接表征,并与光合速率相互负关联,可指示无胁迫条件下的光合生产力大小;另一方面,荧光特性与植物的胁迫程度密切相关^[2],比如:荧光可以避免叶绿体吸收光能超过光合作用的消化能力,从而将强光灼伤的损失降低到最小;水分胁迫会造成叶片原初光能转化效率降低,直接影响光合作用的电子传递和二氧化碳同化过程,而荧光可以敏感地反映叶片的水分状况;荧光动力学参数还可以快速反映营养环境和病虫害的胁迫对光合器官的伤害程度。因此荧光被称为植物健康状况和光合作用的“探针”,对其进行有效利用具有广阔的前景。

利用传统高光谱成像探测技术可以完成生物物理参量和化学参量的定量分析,但是当植被在处于环境胁迫或者病源侵害的早期,生化组分含量和冠层形态结构未发生显著改变的情况下,传统技术获取的遥感数据就无法反映出这种细微变化,也就无法定量给出各类胁迫因子在早期对植物可能造成的影响。此时,采用可对叶绿素光合作用释放的微弱荧光光谱变化信息进行高精度探测的高光谱成像技术,可以很好

的解决这一问题^[3]。

日光诱导叶绿素荧光的高光谱成像探测技术研究起步较晚,近年来有少量的机载高光谱成像仪应用于植被荧光观测,例如:欧洲研制的 Airborne Prism Experiment (APEX) 是一台高精度机载遥感高光谱成像仪^[4],工作波段 380~2 500 nm,通过推扫观测完成地物植被成像观测;美国的喷气动力实验室研制的 Chlorophyll Fluorescence Imaging Spectrometer (CFIS) 是一台专用机载荧光高分辨率成像光谱仪^[5],主要用于验证 OCO-2 的荧光探测性能;其光谱分辨率达到 0.07 nm,这台仪器性能较好,但体积巨大,重量达到上百公斤。欧洲研制的机载荧光探测高光谱成像系统 HyPlant 旨在航空平台尺度上提供荧光遥感能力,探测植物的光合作用活力^[6-7]。该系统主要包含两台高光谱成像仪,一台为芬兰 SPECIM 公司出产的 AisaFENIX,另一台为该公司出产的 AsiaIBIS;其中 AisaFENIX 主要完成 380~970 nm 和 970~2 500 nm 两个通道上的宽波段辐射信号监测(包括植被上行辐射信号和太阳辐射);AsiaIBIS 则主要实现对 670~780 nm 的荧光谱段的信号观测,最小光谱分辨率 0.3 nm,空间分辨率 1.5 mrad;AsiaIBIS 也是目前仅有的在售荧光高光谱成像探测仪产品。该系统受限于其过于昂贵的价格和植被荧光探测领域研究不够深入等原因,目前尚未得到有效的广泛利用,且其核心技术完全为国外所垄断。

目前,国内外尚无在卫星平台上应用的专用荧光探测器,研究人员主要利用一些大气高分辨率探测载荷的部分通道数据进行荧光反演应用,这些载荷包括:欧空局的中分辨率成像光谱仪 MERIS,日本的温室气体观测卫星 GOSAT,美国的碳观测卫星 OCO-2,欧空局的痕量气体观测载荷 GOME-2、SCIAMACHY、TROPOMI,以及中国的碳卫星 TanSat 等^[8-10]。2022 年,欧洲预计将发射 FLEX(Fluorescence Explorer),其中包含一台专用于植被荧光高光谱成像的探测仪器,该仪器幅宽 150 km,空间分辨率 300 m,覆盖 500~780 nm 波段,光谱分辨率 0.3~2 nm,最大信噪比 1 015^[11-12];我国预计于 2021 年发射陆地碳卫星,同样也布置了一台专门的荧光探测载荷,其幅宽为 34 km,空间分辨率 2 km,工作波段 670~780 nm,光谱分辨率 0.3 nm,最大信噪比高于 300^[13-14],指标相比国外有一定差距。

日光诱导叶绿素荧光高光谱成像仪能将微弱的荧光光谱从植被的反射光谱中提取出来,从而定量、无损、快速地检测植物的生理、生长、病害以及胁迫作用下的光合作用情况,并对植物受光抑制、温度胁迫、盐胁迫以及空气污染和 UVB(紫外线)伤害等方面进行精准的定量分析和研究,进而解决传统高光谱成像遥感参量所不能解决的问题。随着荧光研究的深入和发展,荧光高光谱成像探测技术势必会在未来的植被生态环境研究和精准农业实施中具有十分重要的科学意义和应用价值^[15]。但是目前可用于广域遥感的荧光超光谱成像仪器十分稀缺,研究理论和关键技术亟待攻关,在国内开展同类设备的研制,实现关键核心研制技术的突破,将有望在较短时间周期内赶超国外仪器研究水平,使探测得到的荧光数据产品业务化,从而在该领域建立独立自主的、相对完善的知识产权体系。

文中主要对可用于植被日光诱导叶绿素荧光探测的高光谱成像仪样机开展研究,对荧光探测机理、系统方案与性能参数、高性能光学系统设计与验证、以及原理样机的初步测试等工作进行了阐述。该研究对同类仪器的进一步研究具有重要意义。

1 探测机理与高光谱成像仪性能、实施方案设计

日光诱导叶绿素荧光的被动探测原理是:到达地

表的太阳辐照度光谱由于大气的吸收存在许多带宽 0.1~10 nm 的夫琅和费暗线,其中部分暗线的中心强度比其相邻谱区低 10% 以上。受日光激发的叶绿素产生的荧光辐射量会将夫琅和费暗线的吸收阱进行一定程度的填充。通过比较太阳入射标准光谱和植被反射光谱中临近某个夫琅和费暗线及其相邻谱区的相对强度,就可以定量获知荧光信号的强度。也就是说,只要能够测定太阳夫琅和费暗线处的光谱反射率、太阳辐照度、冠层反射辐照度,就可以测算出荧光信号,且在探测器的光谱分辨率和信噪比足够高的前提下,探测到的荧光光谱辐射特性和线宽特性就与夫琅和费暗线的宽度、深度、形状无关^[16-17]。使用高光谱成像探测仪器对日光诱导叶绿素荧光进行探测的原理如图 2 所示。

为了满足特殊的日光诱导叶绿素荧光高光谱成像探测机理,需要仪器具备以下探测能力以解决其高精度探测需要的科学技术问题:

(1) 满足荧光反演精度的工作波段覆盖

太阳光谱被大气吸收后会形成多条夫琅和费暗线。根据目前各类先进 SIF 反演算法的需求进行分析可知,在地球大气的 O_2-B (677~697 nm) 带和 O_2-A (740~780 nm) 带 2 个窗口内选择多个具有填充效应的荧光谱线对荧光反演精度提升最为有利。故设置仪器的工作波段主要覆盖 670~780 nm 波段。

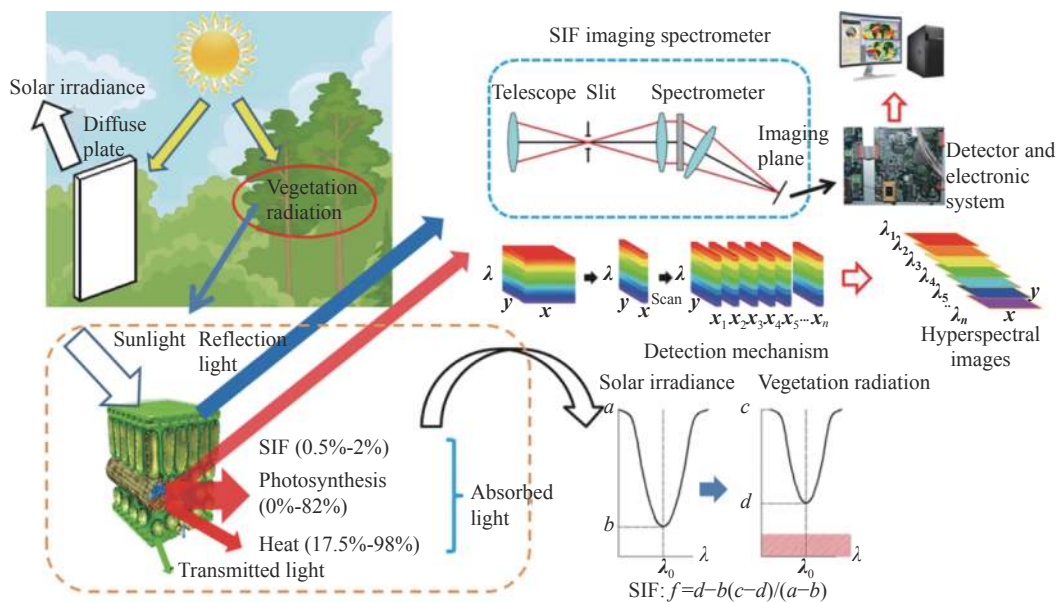


图 2 日光诱导叶绿素荧光高光谱成像探测示意图

Fig.2 Diagram of SIF hyperspectral imaging detection

(2) 精细光谱分辨能力

一般传统高光谱成像探测仪器所提供的光谱分辨率(纳米级以上)在进行荧光信息反演时是很难将一些精细信息从所填充的狭窄线宽暗线中提取出来的。但同时过高的光谱分辨率又会使得仪器的信噪比有一定程度的下降,需要结合 SIF 反演应用需求进行综合评估;根据目前 SIF 算法和实际应用分析可知当仪器具备 ≤ 0.3 nm 的亚纳米级光谱分辨率时,探测数据将可以很好地满足荧光特征光谱定量探测的科学需求。

(3) 广域覆盖成像能

仪器系统需要具备一定的视场以满足广域遥感要求下的地物覆盖幅宽,同时系统还需具备较高的空间分辨能力,以配合荧光光谱特征观测实现植被的分布和性状的精准识别匹配。

(4) 高信噪比探测能力

植被表观光谱以反射光谱为主,荧光光谱只占叶片吸收总能量的 0.5%~2%,比如 O_2-A 波段处日光诱导叶绿素荧光亮度大约在 $0.5\sim 3$ $mW/(m^2 \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1})$ 。为了实现这种微弱信号的探测,需要仪器在高分辨率指标的保持下具备极高的信噪比(一般而言,在最优光谱分辨率和参考最小辐亮度信号下信噪比达到 100 以上时反演效果良好)。这种高信噪比要求仪器系统具备对微弱信号的高传输效率和快速收集能力^[18]。

文中设计的专用 SIF 高光谱成像探测仪光学系统为狭缝式光栅色散成像光谱仪,可通过与不同的望远镜搭配,可实现无穷远到 0.5 m 处的不同分辨率和不同视场的幅宽覆盖成像,并可用于不同场合完成不同尺度下的荧光高光谱成像观测。仪器可以用于航空平台,通过推扫完成对地面指定观测区域的覆盖,从而实现最大范围的高时间分辨率区域探测;仪器也可用于高塔和野外原位观测平台,安装在一维转台或者导轨上,通过运动平台的高精度连续扫描完成对指定目标的观测。另外仪器也可以用于实验室进行采样观测。

2 荧光高光谱成像仪光学系统

2.1 光学系统设计难点分析

SIF 高光谱成像仪的核心是可同时实现高分辨率和高信噪比的光学系统设计,这种光学系统的实现在

国内外都是一个具有难度的科学技术问题。解决该问题的关键就在于如何平衡系统的高光通量和高光学性能之间的矛盾,从而使其达到满足应用需求的平衡。

在实际的光学系统设计中,为了实现高光通量传输能力,必须实现较大的数值孔径;根据国外先进载荷仪器的系统设计方案,结合现有的荧光辐射模型估算 SIF 高光谱成像仪光学系统的数值孔径需达到 0.17~0.25。而同时,可实现第 1 章中所述的高光学探测性能则需要光学系统具备接近衍射极限的像差校正能力。

在各类已有的成像光谱系统形式中,可同时实现以上二者要求的系统形式多为同心光谱仪形式,即 Offner 光谱仪和 Dyson 光谱仪。其中,Offner 结构很难在 0.17 以上的数值孔径下保持良好的成像能力,而 Dyson 结构则很难提供所需的超高光谱分辨率。两种同心光谱仪所用的光栅其全息衍射效率一般在 25%~40% 之间,这种核心衍射器件的效率也大大限制了系统的光传输效率。

为了解决以上问题,实现 SIF 高光谱成像仪的合理光学系统设计,解决高光学性能与高信噪比之间的矛盾。首先光栅选用具有极高衍射效率的体相位全息透射光栅,其一阶衍射效率可达 80% 以上,大大高于传统的凸面和凹面光栅^[19],提升了核心分光器件的光能传输效率;其次虽然荧光观测所需的分辨力较高,但是由于工作波段并不很宽,可用光学透射材料较多,因此采用透射式消色差的成像光谱光学系统,即准直透镜组和聚焦透镜组即可实现最优的像差校正。光谱仪光学系统的主要性能参数如表 1 所示。

表 1 SIF 成像光谱仪光学系统性能参数

Tab.1 Parameters of optical system of SIF imaging spectrometer

Characteristic	Value
Waveband/nm	670-780
Spatial resolution/mrad	≤ 1.1
Spectral resolution/nm	≤ 0.3
Field of view/(°)	20×0.06(Instantaneous)
Slit/mm	11.5×0.033
Ruling of density (Grating)/lp·mm ⁻¹	1 200
Numerical aperture	0.25
Magnification	-1

2.2 成像电子学系统设计

为了实现对日光诱导叶绿素荧光这种微弱光的准确观测,需要在高光谱成像仪中使用合适的探测器。为了使仪器具备多平台应用的普适性,需要探测器具备较高的量子效率、较快的帧率、较大的像面等参数指标。综合考量,最终选用了辰芯公司出产的背照式 GSENSE400BSI CMOS 探测器。这是一款可以满足科研以及高精度工业设计的高端 sCMOS 传感

器,其量子效率在工作波段高于 70%,主要性能指标如像元数 (2 048×2 048)、像元大小 (11 μm×11 μm)、帧频 (24/48 fps)、量化位数 (12/16 bit) 和满阱电荷 (90 ke⁻) 等均满足本仪器的应用需求。为了满足庞大的数据运算量以及复杂的时序逻辑控制,设计人员完成了一种新型传感器驱动和图像采集系统^[20]。其功能如图 3 所示。

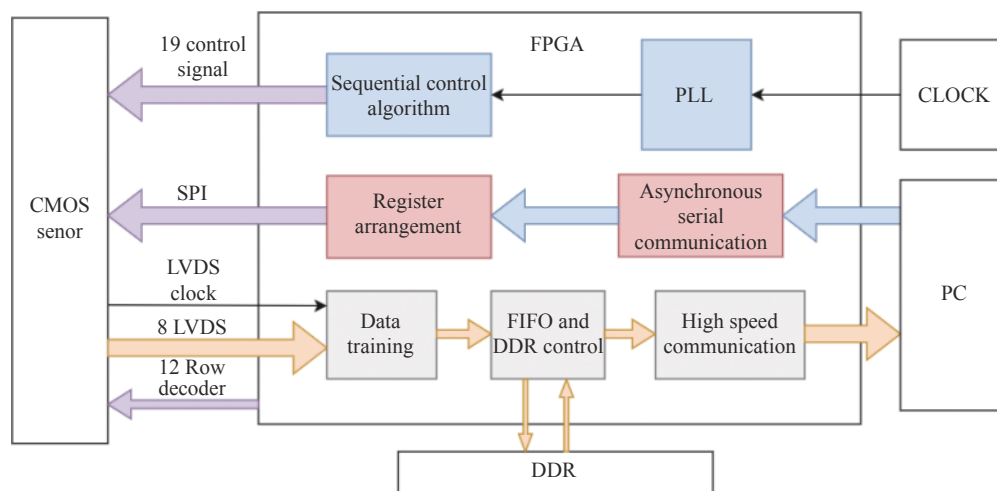


图 3 成像电子学系统功能框图

Fig.3 Functional block diagram of imaging electronics system

图像采集系统主要由 CMOS 探测器、FPGA 控制模块、图像存储模块、通信模块、供电模块等几部分组成。FPGA 作为控制模块,通过 SPI 通信协议配置 CMOS 传感器的工作模式,并且产生传感器的驱动时序。传感器正常工作时产生的数据图像通过 8 路 LVDS 数据对传送到 FPGA 进行训练和组帧,处理后的图像数据被暂存在 FIFO 送入 DDR-SDRAM 中,可以通过 USB3.0 或以太网将数据读出传输给上位机。

2.3 光学系统设计及模拟结果分析

为了保证成像光谱光学系统可以与前置的望远镜镜头相对接,需要成像光谱光学系统实现物方远心。故将孔径光阑放置于光栅衍射面上,前端狭缝入射光经准直系统平行入射在光栅上,出射的平行衍射光线经聚焦系统会聚成像在像面上。使准直系统和聚焦系统的焦距一致,故成像光谱光学系统放大倍率为-1。

由于系统的数值孔径较大,因此在透射系统的初始结构选择上采用可对有限远距的长目标进行良好

成像的双高斯初始结构,在该成像光谱系统中准直系统和聚焦系统形式一致,并对于衍射光栅呈对称形式。通过材料更换、曲率优化和光焦度的重新调整,可以对系统的球差、彗差、像散、色差和高阶像差进行良好修正,从而实现像质的最优化。优化获得的最终高光谱成像仪光学系统组成如图 4 所示。

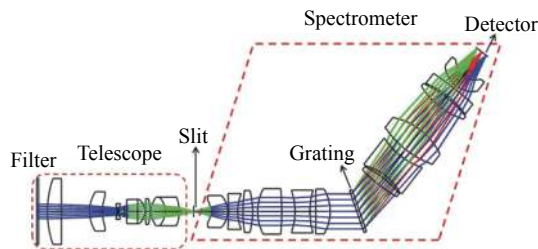


图 4 光学系统图

Fig.4 Diagram of optical system

系统最终优化结果如图 5 所示。

可以看到,设计高光谱成像仪光学系统在全工作

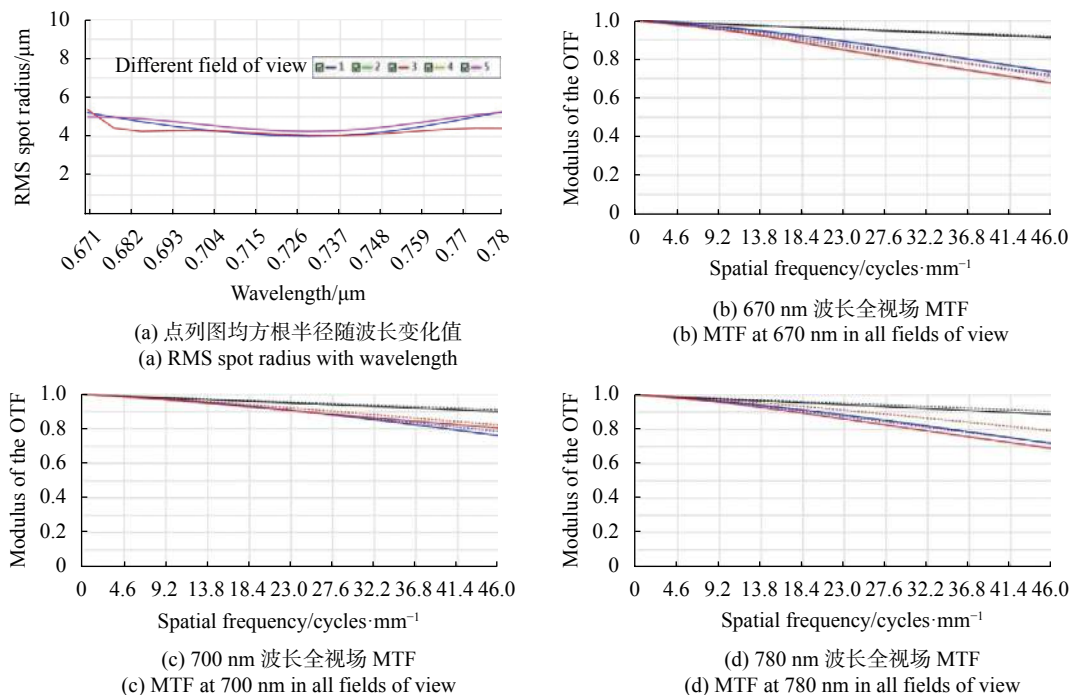


图 5 光学系统设计模拟结果图

Fig.5 Results of optical design

波段范围内的全视场点列图均方根半径值小于 5.5 μm , 中心波长和边缘波长全视场下的 MTF (调制传递函数) 值在奈奎斯特频率 (46 lp/mm) 处高于 0.65, 因此设计系统具备很好的成像质量。同时设计系统畸变小于 0.6%, 像面上光谱 keystone 最大变化值约为 1 个像元, smile 最大变化值为 0.8 个像元, 光学性能优越。

2.4 样机主要性能测试分析

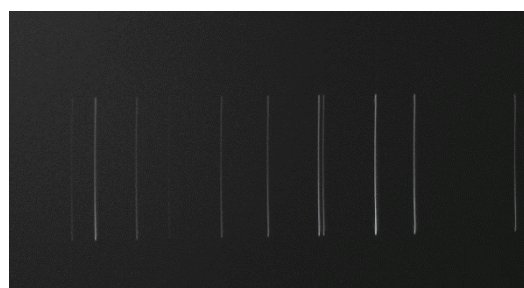
根据设计搭建了日光诱导叶绿素荧光高光谱成像仪样机系统, 样机所用的光学元件表面面型 PV 值优于 $\lambda/6$, RMS 值优于 $\lambda/40$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$), 光栅面型 RMS 值优于 $\lambda/20$ 。主要对光谱分辨率和空间分辨率指标进行测试, 并进行了成像测试试验。

(1) 光谱分辨率测试分析

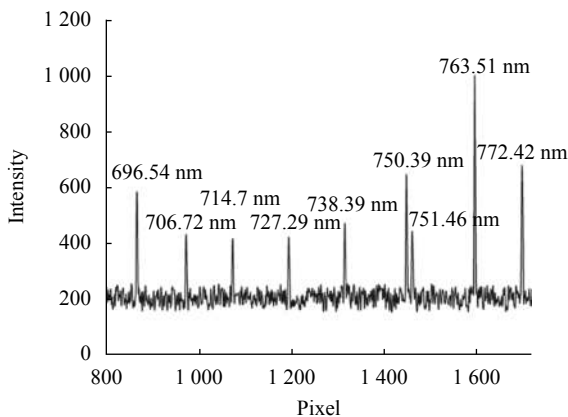
使用海洋光学出产的汞氙灯校准光源配合毛玻璃对样机进行光谱定标, 首先获得了各特征波长在像面上的同时成像, 取竖直谱线的中间像元行 (狭缝中心, 对应探测器像面第 1000 行) 的光谱强度拟合出特征光谱与像元关系的分布图, 如图 6 所示。

根据图 6 和像元位置各特征谱线的光谱定标结果如表 2 所示。

根据波长与像元号对应关系推导出, 一阶线性拟合:



(a) 谱线成像图
(a) Spectral lines imaging



(b) 光谱定标
(b) Spectral calibration

图 6 光谱测试图

Fig.6 Spectrum calibration of the spectrometer

表 2 光谱定标结果

Tab.2 Spectrum calibration results

Pixel number (Row, Column)	Peak wavelength/nm	Resolution/nm
(1 000,864)	696.54	0.29
(1 000,974)	706.72	0.28
(1 000,1 058)	714.7	0.27
(1 000,1 190)	727.29	0.27
(1 000,1 306)	738.39	0.3
(1 000,1 433)	750.39	0.27
(1 000,1 445)	751.46	0.28
(1 000,1 577)	763.51	0.27
(1 000,1 679)	772.42	0.29

$$\lambda=621.777 1+0.094 55X \quad (1)$$

二阶线性拟合:

$$\lambda=616.7+0.1051X-4.827^{-6}X^2 \quad (2)$$

三阶线性拟合:

$$\lambda=618.2+0.100 1X+9.46^{-9}X^2-1.472^{-9}X^3 \quad (3)$$

式中: λ 为波长; X 为像元号。

根据以上定标结果分析仪器的像元光谱采样率约为 0.93 nm/pixel。仪器光谱响应的半高宽 (即光谱

分辨率) 平均为 0.28 nm。由以上结果分析仪器的光谱分辨率完全满足设计要求。

(2) 空间分辨率测试和成像模拟

该仪器的成像光谱系统放大倍率为 1 : 1, 因此在光谱分辨率达到要求的情况下, 整机的空间分辨率即为前置望远镜的空间分辨率。使用 TriOptics 出产的 MTF 传函测试仪对前置望远镜的传递函数进行了测试获得结果如图 7 所示。

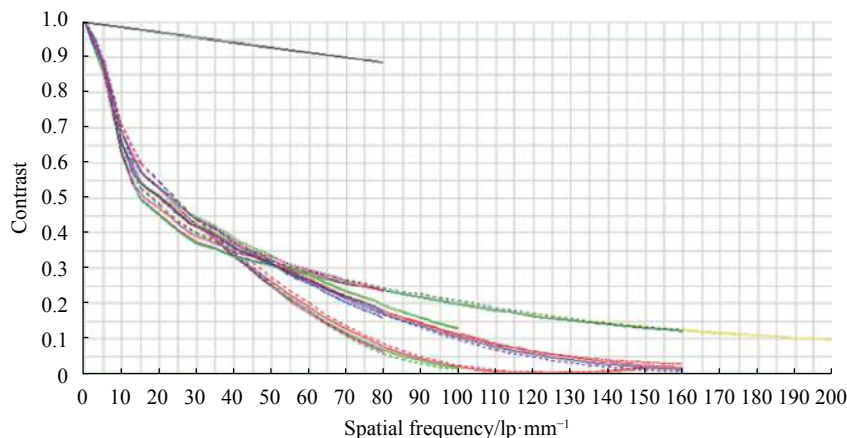


图 7 MTF 测试曲线图

Fig.7 MTF test curves

由图分析可知, 仪器全视场下的 MTF 在探测器对应的奈奎斯特频 (45 lp/mm) 下均高于 0.3; 同时利用目视显微镜观测望远镜对空间鉴别率板的成像, 发现可以清晰分辨 50 lp/mm 以上的条纹, 因此仪器具备很好的空间分辨率, 达到了设计指标要求。

在下午 3 时左右使用仪器对远处景物进行拍摄。将成像光谱仪放置在精密转台上, 设置转台转速

与仪器积分时间 50 ms 相匹配, 不同单波长的图像如图 8 所示。在距仪器 300 m 左右处拍摄, 这些未被校准的原始图像对树林和天空的分辨较为清晰, 图像照度和质量很高, 噪声水平低; 且此时太阳辐射较弱, 地物反射的上行辐射较弱, 但仪器仍可在较短的积分时间内获取清晰的高分辨率图像, 间接的证明了仪器在实地应用中具备很好的分辨率和信噪比。

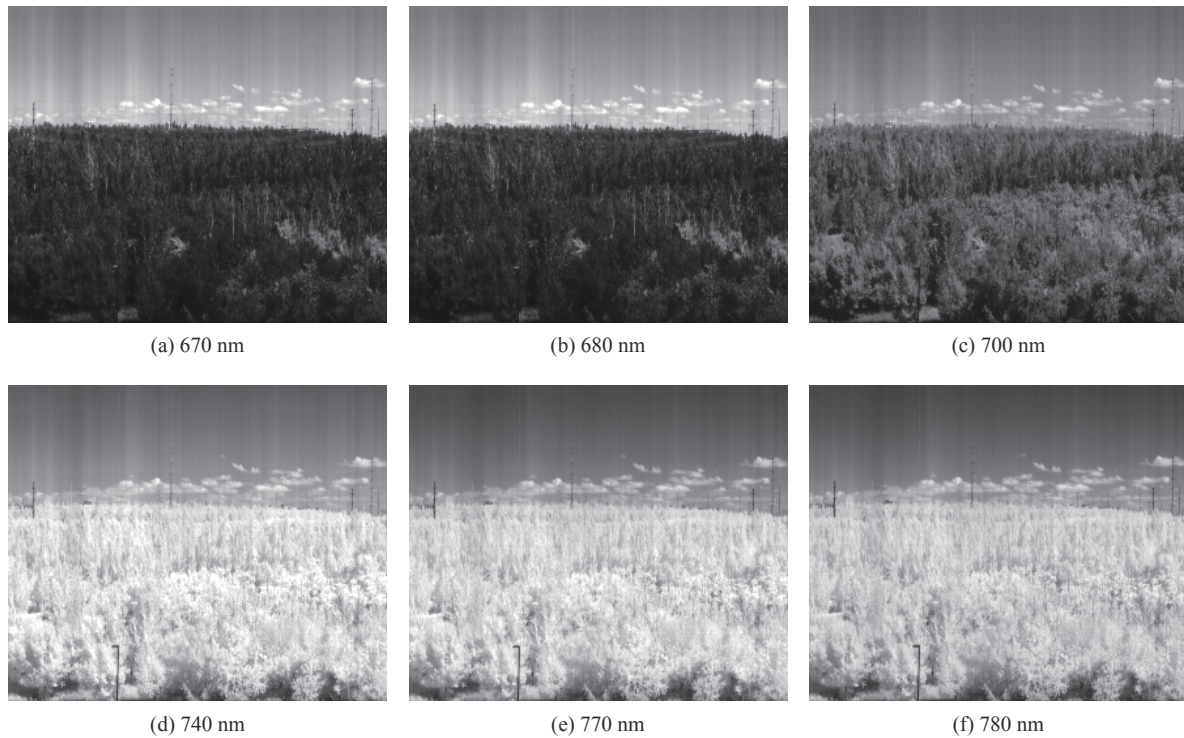


图 8 不同波长的成像结果

Fig.8 Results of imaging at different wavelengths

3 结 论

文中主要研究了可用于日光诱导叶绿素荧光探测的高光谱成像仪光学系统。主要研究内容总结如下: (1) 分析了日光诱导叶绿素荧光光谱探测的重要意义, 总结了当前日光诱导叶绿素荧光高光谱成像探测仪器的发展趋势, 分析了对 SIF 进行精准高光谱成像探测的科学需求; (2) 在此基础上分析了先进科学需求与探测仪器性能之间的耦合关系, 将先进科学应用与仪器参数进行了良好结合, 设计了高光谱成像仪的性能参数, (3) 以系统的高分辨率和高信噪比为目的, 采用高衍射效率的 VPH 光栅和高数值孔径透射式高光谱成像系统的优化设计的方法进行了实现; (4) 完成基于 G-400 探测器和 FPGA 的高速成像电子学系统; (5) 对集成研制的荧光高光谱成像仪样机性能进行了性能测试, 其性能参数达到了先进水平, 同时验证了光学指标设计和工程可应用性。这种用于 SIF 探测的高光谱成像仪的相关研究将对未来同类仪器的研制提供一定的理论依据和实践指导。

参考文献:

[1] Mohammed G H, Colombo R, Middleton E M, et al. Remote

sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress [J]. *Remote Sens Environ*, 2019, 231: 111177.

[2] Pérez-Priego O, Zarco-Tejada P J, Miller J R, et al. Detection of water stress in orchard trees with a high-resolution spectrometer through chlorophyll fluorescence in-filling of the O₂-A band [J]. *IEEE Trans Geosci & Remote Sens*, 2005, 43(12): 2860-2869.

[3] Flexas J, Briantais J M, Cerovic Z G, et al. Steady-state and maximum chlorophyll fluorescence responses to water stress in grapevine leaves: A new remote sensing system [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, 73: 283-297.

[4] Odorico P D, Alberti E, Schaepman M E. In-flight spectral performance monitoring of the airborne prism experiment [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(16): 3082-3091.

[5] Christian F, Philipp K, Troy S M, et al. The chlorophyll fluorescence imaging spectrometer (CFIS), mapping far red fluorescence from aircraft [J]. *Remote Sens Environ*, 2018, 217: 523-536.

[6] Rascher U, Alonso L, Burkart A, et al. Sun-induced fluorescence-a new probe of photosynthesis: First maps from the imaging spectrometer HyPlant [J]. *Glob Chang Biol*, 2015, 21: 4673-4684.

[7] Rossini M, Nedbal L, Guanter L, et al. Red and far red sun-induced chlorophyll fluorescence as a measure of plant

- photosynthesis [J]. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 1632-1639.
- [8] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P. First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space [J]. *Biogeosciences*, 2011, 8: 637-651.
- [9] Liu X J, Liu L Y. Retrieval of chlorophyll fluorescence from GOSAT TANSO-FTS data based on weighted least square fitting [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(6): 1518-1532. (in Chinese)
- [10] Frankenberg C, O'Dell C, Berry J, et al. Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the orbiting carbon observatory-2 [J]. *Remote Sens Environ*, 2014, 147: 1-12.
- [11] Coppo P, Taiti A, Pettinato L, et al. Fluorescence imaging spectrometer (FLORIS) for ESA flex mission [J]. *Remote Sens*, 2017, 9: 649.
- [12] Drusch M, Moreno J, DelBello U, et al. The fluorescence explorer mission concept—ESA's earth explorer 8 [J]. *IEEE Trans Geosci & Remote Sens*, 2017, 55: 1273-1284.
- [13] Du S, Liu L, Liu X, et al. The solar-induced chlorophyll fluorescence imaging spectrometer (SIFIS) onboard the first terrestrial ecosystem carbon inventory satellite (TECIS-1): specifications and prospects [J]. *Sensors*, 2020, 20: 815.
- [14] Du S, Liu L, Liu X, et al. Retrieval of global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence from TanSat satellite [J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(22): 1502-1512.
- [15] Joiner J, Guanter L, Lindstrom R, et al. Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate spectral resolution near-infrared satellite measurements: Methodology, simulations, and application to GOME-2 [J]. *Atmos Meas Tech*, 2013, 6: 2803-2823.
- [16] Liu X, Liu L. Influence of the canopy BRDF characteristics and illumination conditions on the retrieval of solar-induced chlorophyll fluorescence [J]. *Int J Remote Sens*, 2018, 39: 1782-1799.
- [17] Zhang Lifu, Wang Siheng, Huang Changping. Top-of-atmosphere hyperspectral remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: A review of methods [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(1): 1-12. (in Chinese)
- [18] Aasen H, Wittenberghe S V, Medina N S, et al. Sun-induced chlorophyll fluorescence II: Review of passive measurement setups, protocols, and their application at the leaf to canopy level [J]. *Remote Sens*, 2019, 11: 927.
- [19] Taiti A, Coppo P, Battistelli E. Fluorescence imaging spectrometer optical design[C]//Proceedings of the SPIE, 2015, 9626: 7-10.
- [20] Tang H, Wang H W, Cao J Zh, et al. A CMOS high-speed imaging system design based on FPGA[C]//Proceedings of the SPIE, 2015, 9675: 101-105.