

精准农业观测高数值孔径短波红外成像光谱仪光学系统

于磊*, 陈素娟, 陈结祥, 薛辉

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: 研究了一种在 1.0~2.5 μm 短波红外波段上可用于机载精准农业观测的成像光谱仪光学系统。研究分析了用于精准农业探测所需的成像光谱仪科学性能参数, 着重改进了 Dyson 成像光谱仪系统并获得了完善的消像散条件, 使得其各组成部分在沿光轴方向和垂直光轴方向均具备足够的空间, 确保了狭缝、探测器和光学镜片的光机结构放置。设计成像光谱仪具备良好光学性能, 光学系统 F 数为 1.5, 视场 28° , 狭缝长度 25 mm, 光谱分辨率 12.7 nm, 空间分辨率 1 mrad, 系统像差得到充分校正, 公差比较宽松。该系统的研究将为精准农业遥感应用提供一种思路。

关键词: 精准农业; 成像光谱仪; 戴森系统; 短波红外

中图分类号: O433.1; TH744.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1218007

Optical system of imaging spectrometer in short-wave infrared with high NA for precision agriculture observation

Yu Lei*, Chen Sujuan, Chen Jiexiang, Xue Hui

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

Abstract: An imaging spectrometer in the short infrared waveband of 1.0–2.5 μm was obtained for the precision agriculture observation by air. The scientific performances parameters of the imaging spectrometer were analyzed for the requests of the precision agriculture. The perfect astigmatism corrected conditions were obtained based on the advanced Dyson imaging spectrometer. The enough axial and lateral spaces among each parts of the system guaranteed the arrangement of mechanisms of the slit, the detector and the optical elements. An imaging spectrometer with high optical performances as F number 1.5, the field of view 28° , the slit length 25 mm, the spectral resolution 12.7 nm and the spatial resolution 1 mrad was designed. The aberrations were totally corrected and the tolerances of the system were loose. The research will be helpful for application of precision agriculture remote sensing.

Key words: precision agriculture; imaging spectrometer; Dyson system; short-wave infrared

收稿日期: 2018-07-10; 修订日期: 2018-08-20

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(YJKYYQ20170048);
中国科学院青年创新促进会资助(2016203)

作者简介: 于磊(1984-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事成像光谱遥感仪器设计方面的研究。Email: top1gods@mail.ustc.edu.cn

0 引言

精准农业的概念最早由欧美发达国家提出,其核心理念为通过利用各类先进科学技术,如光学、生化、基因等检测分析技术,在不同的观测尺度上为农业工作者提供精准的农业与产品记录,从而科学合理地增加作物的产量和质量,降低管理风险,保护生态环境,提高农业利润。精准农业实施的首要条件就是可对复杂环境要素实现实时定量分析的监测技术。在各种监测分析技术中,光学遥感监测技术因其快速、无破坏性、准确和多尺度观测适应性等特点,在农田生态环境的观测中得到了以下方面的重要应用^[1-2]:

(1) 土壤监测。通过土壤调查获取有机质、纹理、水情、紧密度、侵蚀、盐分等土壤属性,建立农田土地数字模型和土壤微型气候模型。

(2) 农作物监测。监测要素包括农作物的类型和种植面积、水分、盐度、pH、营养和生物性、作物外力作用等。对农作物长势和收成、种子萌发、作物质量等进行估产与预测,为作物管理提供依据。

(3) 施肥与药剂管控。通过检测农作物营养属性,判定肥料和化学药剂的使用程度,并对各种原因造成的不规则种植模式进行检测。

在各种光学遥感监测方法中,高光谱成像仪可以同时快速提供大范围的农田作物的成像细节和特征光谱辐射信息,从而实现不同作物的识别和分类、生物物理参数的估算、长势监测以及病虫害监测等,因而正在精准农业环境监测中得到越来越多的使用^[3]。在我国,高光谱成像探测技术在农业的应用研究较少,相关数据库和理论基础匮乏,配套基础设施不完善,应用省份和地区少之又少。可用于精准农业的高光谱成像探测仪的应用必要性和能力总结如下:

(1) 在各种尺度的空间范围上实现农田环境中的各类主要空间要素的精细调查和区分。为此,需要仪器具备从无穷远到较近距离的高空间分辨成像能力和适应各种使用环境和平台的观测覆盖范围;

(2) 对农田环境中各种复杂成分所产生的特征谱段进行覆盖和准确提取。这需要仪器具备足够的工作谱段覆盖和精细的光谱分辨率;

(3) 在作物生长关键时期进行实时的数据获取和探测的能力。

同心类成像光谱仪是一种可以满足以上探测要求

并被得到广泛应用的成像光谱仪类型。这类光谱仪具有优越的成像质量,相对紧凑的体积,较高的能量传输效率,并在各类星载、机载、地面平台和实验室的应用中形成了很多的产品。Offner 光谱仪和 Dyson 光谱仪是同心光谱仪中两类具有代表性的光谱仪结构,其中 Offner 成像光谱仪已经在多个遥感领域得到应用^[4-5]。相比 Offner 成像光谱仪,Dyson 成像光谱仪结构更为紧凑,在同等光学性能下数值孔径可做的更高,能量收集能力更好^[6]。但是传统的 Dyson 成像光谱仪结构过于紧凑,在轴向和径向上空间间隔很小,因而在实际应用上会发生狭缝、光学元件和像面光机结构干涉的情况。为了解决这个问题,Wynne、Mouroulis 和 Warren 等人都做了不同的研究^[7-9]。但是这些改进研究对狭缝与像面的光机结构空间尺寸要求仍然很高,在实际的工程应用中实施难度仍然较大。

文中主要针对可用于精准农业遥感监测的宽波段、高分辨率高光谱成像仪的光学系统进行了研究,获得了一种具有较大空气间隔的改进型 Dyson 成像光谱系统,并对这种改进型的光学系统进行了设计和工程分析。该高光谱成像仪光学系统波段覆盖 1~2.5 μm ,F 数为 1.5,光谱分辨率 12.7 nm,搭配望远镜视场为 28°,可实现 1 mrad 的空间分辨率。可为精准农业高光谱成像探测提供一种切实可行的系统设计形式。

1 高光谱成像仪农业监测应用条件分析

拟研制的高光谱成像仪主要针对机载平台进行设计,其基本原理如图 1 所示。

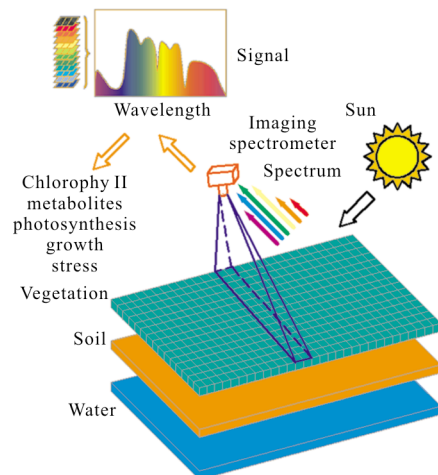


图 1 机载成像光谱仪农业观测原理图

Fig.1 Principle of the agriculture observation for the airborne imaging spectrometer

实际上,这种仪器除了可以用于机载平台外,还可应用于各种不同的观测平台,完成从无穷远处目标到有限距目标的成像光谱分析能力,对星载、地基和实验室观测均能提供有效的仪器手段帮助。根据农田复杂环境的特征光谱研究^[10-11],将特征目标与对应光谱总结如表 1 所示。

表 1 精准农业观测目标与对应特征光谱
Tab.1 Characteristic spectrum of targets in the precision agriculture observation

| Observed targets | Spectrum/nm |
|--|-------------|
| Organic matter and clay content in soil | 420-2480 |
| Phosphorus in soil | 471-826 |
| Nitrogen content in leaves of wheat and corn | 550-1 000 |
| Chlorophyll | 400-700 |
| Cotton yield prediction | 467-931 |
| Diseases and insect pests | Visible |
| Vegetation fluorescence | 670-780 |

农业环境中各种成分和特征的辐射光谱遍布多个波段,并在光学参量上表现出宏观上的一致性。目前在 400~1 000 nm 波段各类成像光谱仪产品很多,技术也相对成熟,因此文中将主要针对可用于短波红外(100~2 500 nm)的高光谱成像仪进行深入研究,该系统将有效的实现对农业环境要素的短波红外特征光谱覆盖。农业环境的多样性和复杂性使得仅具有有限光谱分辨率的探测方法极易产生虚假识别和错误混淆。比如:如果需要有效区分土壤粘土含量,需要 20 nm 以内的光谱分辨率。项目拟研制的高光谱成像仪可以实现优于 15 nm 的光谱分辨能力,这种能力有助于在已有的研究基础之上对观测目标进行更精细的定量区分,发现以往可能存在但却并未发现的现象。通常而言,对作物类型监测和土壤的相关测绘分辨要求一般在 10~20 m 之间,如果要实现对于土壤、作物和杂草管控等特殊需求,则需要 3~5 m 甚至更高的空间分辨率。项目拟研制的高光谱成像探测仪可在 1 km 飞行高度上提供较大的空间覆盖能力(400~500 m)和较高的空间分辨率(1 mrad),能够帮助用户有效建立精准农业测绘模型。根据以上分析,设定拟研制的高光谱成像仪器的性能参数如表 2 所示。

表2 高光谱成像仪性能参数

Tab.2 Performace parameters of the hyper-spectral imager

| Parameter | Value |
|-------------------------|-------------|
| F number | 1.5 |
| Field of view/(°) | 28 |
| Spatial resolution/mrad | 1 |
| Spectral resolution/nm | Swir<15 |
| Waveband/nm | 1 000-2 500 |

2 望远系统设计

前端望远镜可以采用透射式或反射式的望远镜,该研究主要采用了双反射镜望远系统(Schwarzschild 望远系统,部分文献中因其构型与卡塞格林望远系统相似且光传播路径相逆而称为逆卡塞格林望远系统),其主镜和次镜均为二次非球面镜,这种结构可以在小 F 数和大视场下实现良好的成像质量,根据视场与分辨率需求,经设计后主镜曲率半径为 143.06 mm,非球面系数为 5.95;次镜曲率半径为 138.76 mm,非球面系数为 0.18,系统焦距为 50.1 mm,拟采用的探测器像元尺寸大小为 25 μm,共 1 024×1 024 个。设计的望远镜结构如图 2 所示。

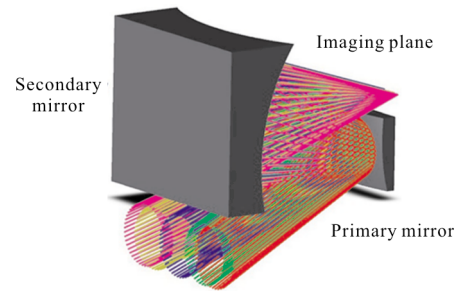
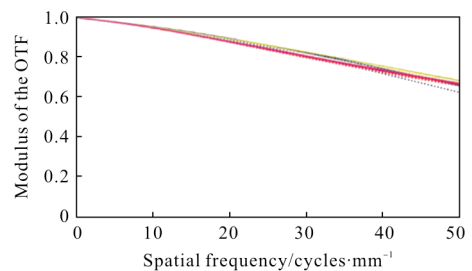


图 2 望远镜设计光路图

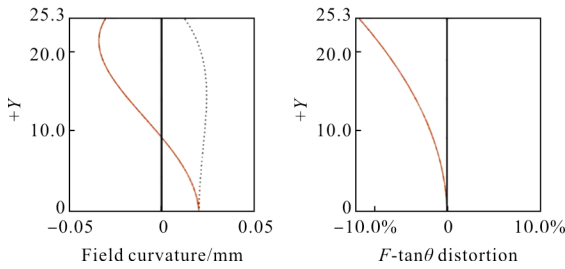
Fig.2 Beam path diagram of telescope design

图 3 为望远系统设计结果。



(a) 望远镜 MTF 曲线图

(a) MTF curves of telescope



(b) 场曲和畸变

(b) Field curvature and distortion

图 3 望远镜设计结果

Fig.3 Design results of telescope

使用全视场的中心波长和边缘波长的调制传递函数(MTF)曲线来评判望远镜设计,在 50 lp/mm 的奈奎斯特频率下,望远镜全视场的边缘波长和中心波长的 MTF 数值均高于 0.6,设计结果良好。由于两反望远系统没有可以矫正畸变和场曲的变量,因此该系统的畸变较大,在边缘视场接近 10%,如果需要在光学系统中对畸变进行校正,则需要增加校正板或校正镜,这样会破坏系统的紧凑性;在设计结果中可以看到,这种畸变随视场变化具有很好的规律,因此可以在最终的电子学成像系统中直接对成像进行修正。

3 改进型 Dyson 成像光谱仪系统完善消像散条件分析

改进型 Dyson 成像光谱仪基本结构如图 4 所示。建立以光栅中心 O 为原点的坐标系, X 方向为光栅和半球透镜的中心共轴方向, Y 方向为垂直于该光轴的方向。Q 为狭缝上一点 S 出射光线在光栅上的入射位置, R_g 为光栅曲率半径, R_l 为半球透镜曲率半径, 入射角 $-i$ 和衍射角 θ 满足光栅方程 $\sin i + \sin \theta = mg\lambda$, 其中 m 为利用的光栅衍射级数, g 为光栅刻线密度, λ 为波长。

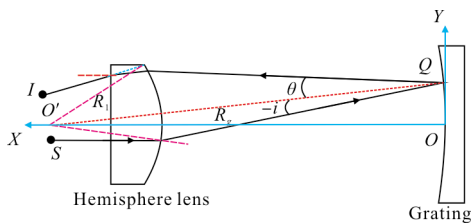


图 4 改进型 Dyson 成像光谱仪基本光路图

Fig.4 Basic optical path of the advanced Dyson spectrometer

可以看到,与传统 Dyson 光谱仪系统相比,狭缝上的点 S 或对应的像面上的点 I 均不再落于系统的对称光轴 OX 上,而是双双在垂直轴向方向拉开了一定距离;同时为了在轴向上获得足够的放置空间,原本的半球透镜也进行了减薄,使狭缝和像面与透镜之间产生了足够的空气间隔,此时,改进系统整体仍然满足同心系统条件,但是之前的 Dyson 成像光谱系统的同心完善消像差条件需要重新进行计算。用于光路分析的系统二维光路结构如图 5 所示。

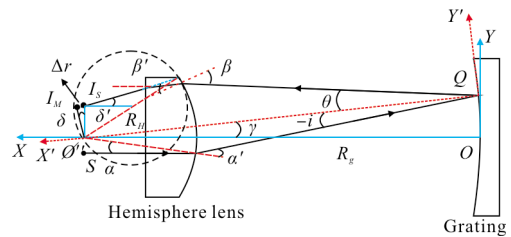


图 5 改进型 Dyson 成像光谱仪光路图

Fig.5 Optical path of the advanced Dyson imaging spectrometer

图中 Δr 可以用来表示系统产生的像散差。根据图 5,当 δ 为 0 时,像散差可以得到消除,此时出射到像面上的光线可以认为是垂直出射于半球透镜的后表面。建立新的坐标系 $X''O''Y''$, Q 为入射光线在光栅上的入射点,两坐标系夹角为 γ ,可表达为:

$$\gamma = \alpha' - \alpha + 1 \quad (1)$$

式中: α 和 α' 满足折射定律。根据 Lobb 等人的研究^[12],物点的离轴垂直距离 d 和像点的离轴垂直距离 d' 关系式表达为:

$$(-d/\cos \gamma)/R_g + (d'/\cos \gamma)/R_l = g\lambda \quad (2)$$

由折射定律,图 5 中各个角度表示如下:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{d}{R_H}\right), & \beta = \arcsin\left(n \frac{d'}{R_H}\right) \\ \alpha' = \arcsin\left(n \sin\left[\tan^{-1}\left(\frac{d}{R_H}\right)\right]\right), & \beta' = \arcsin\left(\frac{d'}{R_H}\right) \end{cases} \quad (3)$$

根据三角公式正弦定理,获得如下关系:

$$\frac{R_g}{\sin(180^\circ - \alpha')} = \frac{R_l}{\sin(-i)} \quad (4)$$

同时根据图 5,各个角度之间的关系可以表达为:

$$\alpha - \alpha' - i + \theta + \beta' - \beta = 0 \quad (5)$$

将公式(1)、(2)、(3)和(4)均代入公式(5)中,由于光栅参数可以事先设定,而离轴垂直距离可以根据狭缝和像面的光机结构的大小进行预先设定,这样

获得的关系式就是曲率半径 R_H 和 R_g 之间的关系式，同样也就是改进 Dyson 成像光谱仪的完善消像散条件。

在上面的推导中并没有涉及到沿光轴方向的空气间隔所带来的像差影响，这是由于推导主要针对的是像散和光瞳像差，而空气间隔主要带来的像差是额外的球差和色差，为了消除这些额外的像差，可以通过增加新的透镜来进行校正，这种方法在以往的研究中得到过应用。具体方法是在贴近光栅处和贴近半球透镜处各增加一个球面透镜，通过对间距和曲率半径的调整即可将额外像差完善消除。

4 光学系统设计与结果分析

根据前述理论，结合第 1 节提出的精准农业应用需求，该研究设计并优化了一个改进结构的 Dyson 成像光谱仪，其工作波段为 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ ，狭缝长度为 $25\ \text{mm}$ ，数值孔径为 0.33 ，探测器像元尺寸为 $25\ \mu\text{m}$ ， $1\ 024\ \text{pixel}\times 1\ 024\ \text{pixel}$ ，透镜材料均为石英。低刻线凹面光栅拟从 JY 公司或 Grating Works 公司引进，或通过国内中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光栅中心进行研制，这些单位均有类似的高性能光栅。最终获得的优化结构参数如表 3 所示。

表 3 光学结构初始和优化参数

Tab.3 Original and optimal parameters of optical structure

| Characteristic | Value |
|------------------|--|
| Hemisphere lens | Radius 62.68 mm, Thickness 25 mm |
| First lens | Radii 75.65 mm, 72.52 mm, Thickness 8 mm |
| Secondary mirror | Radii 282.2 mm, 266.1 mm, Thickness 9 mm |
| Grating | Concave |
| Ruling | 27 line/mm |
| Radius | 200 mm |

图 6 给出了望远镜和成像光谱仪组合后的全系统成像光谱仪光路图。图 7 给出了设计优化后的系统中心波长和边缘波长的 MTF 曲线、点列图半径 RMS 值随波长变化图和模拟成像图。

在探测器奈奎斯特频率($20\ \text{lp/mm}$)下，全视场全波段 MTF 值达到 0.4 以上，全波段均方根半径值均小于 $12.1\ \mu\text{m}$ ，因此全视场全波段的像差都得到了很好的校正，模拟成像图中使用 RGB 三色来表征两

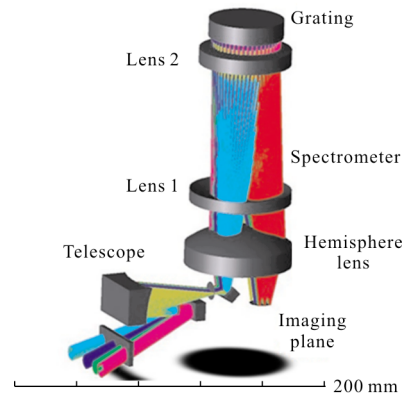
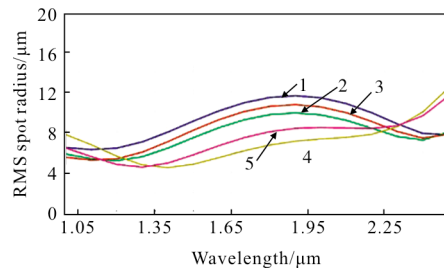


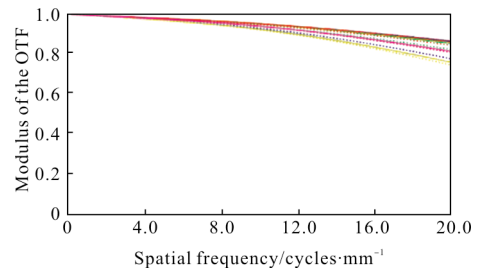
图 6 成像光谱仪光路结构

Fig.6 Optical path of the imaging spectrometer



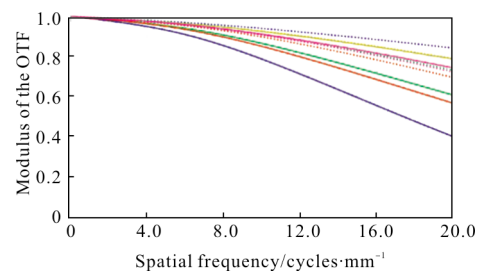
(a) 全视场点列图均方根半径随波长变化

(a) RMS Radii of all fields of view versus wavelengths



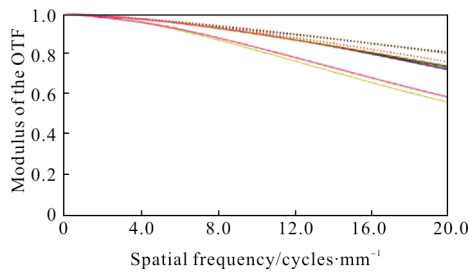
(b) $1\ \mu\text{m}$ 波长 MTF 曲线

(b) MTF of $1\ \mu\text{m}$ wavelength



(c) $1.75\ \mu\text{m}$ 波长 MTF 曲线

(c) MTF of $1.75\ \mu\text{m}$ wavelength



(d) 2.5 μm 波长 MTF 曲线

(d) MTF of 2.5 μm wavelength



(e) 图像模拟

(e) Imaging simulation

图 7 优化系统设计结果

Fig.7 Design results of the optimized optical system

个边缘波长和中心波长，可以看到成像效果和设计结果完全满足要求。成像光谱仪中影响光谱性能的另一个重要因素就是谱线弯曲和色畸变，在设计结果中通过 Smile (色散角随视场中不同位置变化而产生的变化)和 Keystone(随波长变化的放大倍率)体现出来，这两个属性主要与成像光谱系统相关，因此主要对成像光谱系统部分进行分析，根据设计结果分析可知设计系统的 Smile <0.082 μm, Keystone<0.014 μm,设计结果比较良好。

利用 ZEMAX 软件对系统进行了公差分析，其中设置偏心公差为 0.05 mm,倾斜公差为 4',半径公差为 0.05 mm,间距公差为 0.05 mm,元件厚度误差为 0.05 mm。这些数值属于光学系统中较容易实现的公差。以系统在 1.6 μm 处的 MTF 为准则，利用蒙特卡洛法进行公差灵敏度分析得知，90%的 MTF 相比准则 MTF 数值下降了 0.110 6,80%的 MTF 相比准则 MTF 数值下降了 0.088 6,50%的 MTF 相比准则 MTF 数值下降了 0.067 4,这种下降是设计结果所允许的。因此只要加工和装调的公差优于该设置，系统最终的成像质量将认为是可以接受的。

根据最终设计，系统放大倍率为 1:1，设置狭

缝宽度为对应两个像元大小的宽度，并在像面处获得最终色散成像宽度为 6.2 mm 左右。根据参考文献[13]结合系统参数对理论设计的光谱分辨率进行计算，可得成像光谱仪系统的光谱分辨率为 12.7 nm,满足设计应用要求。目前基于该系统设计的仪器正在研制中，并将在不久的将来实现样机应用。

5 结论

文中主要针对精准农业的实时监测设计了一种适用于短波红外波段的机载改进型 Dyson 成像光谱仪，推导了该系统的完善消像差条件和，并根据具体应用需求设计了一套成像光谱仪系统，设计结果和工程应用分析结果证明这种成像光谱仪可以在宽波段、高数值孔径等性能参数要求下获得优越的成像质量，且其加工装调要求的公差较松，完全满足工程应用需求。这种改进型成像光谱系统除了可在机载平台上得到应用外，还可在许多不同观测尺度的平台上得到应用，并将对未来的相关应用提供重要的理论依据和实践指导。

参考文献：

- [1] Whiting M L, Ustin S L, Zarco-Tejada, et al. Hyperspectral mapping of crop and soils for precision agriculture [C]// SPIE, 2006, 6298: 62980B.
- [2] Saito Y, Kobayashi K. Proposal of optical farming: development of several optical sensing instruments for agriculture use[C]//SPIE, 2013, 8881: 888109.
- [3] Wang C L, Tang B H, Huo X, et al. New method to estimate surface upwelling long-wave radiation from MODIS cloud-free data[J]. Opt Express, 2017, 25(12): A574-A588.
- [4] Blanco X P, Orille C M, Couce B, et al. Analytical design of an Offner imaging spectrometer[J]. Opt Express, 2006, 14 (20): 9156-9168.
- [5] Luo Gangyin, Wang Bidou, Chen Yuqi, et al. Design of athermal mid-infrared imaging spectrometer based on Offner scheme [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(11): 1101004. (in Chinese)
罗刚银, 王弼陡, 陈玉琦, 等. Offner 型消热差中波红外成像光谱仪设计 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46 (11): 1101004.
- [6] Sun Jiayin, Li Chun, Liu Ying, et al. Comparison of long-

- wave infrared imaging spectrometers with concentric under different grating constants [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0720002. (in Chinese)
- 孙佳音, 李淳, 刘英, 等. 不同光栅常数下同心长波红外成像光谱仪对比[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0720002.
- [7] Wynne C G. Monocentric telescopes for microlithography[J]. *Opt Eng*, 1987, 26: 300-303.
- [8] Mouroulis P, Green R O, Wilson D W. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer [J]. *Opt Express*, 2008, 16(12): 9087-9096.
- [9] Warren D W, Gutierrez D J, Keim E R. Dyson spectrometer for high-performance infrared applications [J]. *Opt Eng*, 2008: 47(10): 103601.
- [10] Robert P C. Precision agriculture: New developments and needs in remote sensing and technologies [C]//SPIE, 2003, 5153: 85-94.
- [11] Myers V I, Allen W A. Electrooptical remote sensing methods as nondestructive testing and measuring techniques in agriculture[J]. *Appl Opt*, 1968, 7(9): 1819-1838.
- [12] Lobb D R. Theory of concentric designs for grating spectrometers[J]. *Appl Opt*, 1994, 33(13): 2648-2658.
- [13] Yu L, Wang S R, Lin G Y, et al. Spectral broadband anastigmatic Wadsworth imaging spectrometer [J]. *Opt Express*, 2015, 23(1): 101-109.