

doi:10.3788/gzxb20174609.0930001

# 可见近红外波段无人机载成像光谱仪设计

罗刚银,王弼陡,陈玉琦,赵义龙

(中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 中科院生物医学检验技术重点实验室,江苏 苏州 215163)

**摘 要:**为了满足地物成像光谱分析的需要,设计了同轴安装、体积小、重量轻的适用于无人机载的棱镜-光栅-棱镜型可见近红外成像光谱仪。通过角放大率选择、光焦度分配、相对孔径计算设计了视场较大的前置物镜;通过光栅方程求解、体相位全息光栅布拉格条件约束、棱镜折射定律设计了光谱系统的初始结构;通过工作光谱上下限出射角与探测器光谱维宽度的关系确定了成像物镜的焦距;通过出射光角度明确了出射光谱的非线性,设计的无人机载成像光谱仪工作光谱范围为 400~1 000 nm,视场角为 40°,全工作波段在空间截止频率 20.8lp/mm 处的传递函数值均大于 0.67,光谱分辨率小于 3 nm。装调了无人机载成像光谱仪对室外绿化树木进行光谱推扫成像实验,实现了树叶的多光谱成像。该成像光谱仪能够有效实现光谱成像,性能良好。

**关键词:**光学设计;可见近红外;前置物镜;棱镜-光栅-棱镜;成像光谱仪

**中图分类号:**O433.1;TH744.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2017)09-0930001-10

## Design of Visible Near Infrared Imaging Spectrometer on Unmanned Aerial Vehicle

LUO Gang-yin, WANG Bi-dou, CHEN Yu-qi, ZHAO Yi-long

(CAS Key Lab of Bio-Medical Diagnostics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu, 215163 China)

**Abstract:** A visible near infrared imaging spectrometer, which is mounted on the unmanned aerial vehicle, was designed for ground objects spectral analysis. The prism-grating-prism structure used in the spectrometer has the advantages of coaxial installation, small size and light weight. Objective lens with large field of view was designed through angular magnification selection, optical focal length distribution and relative aperture calculation. Initial spectral system structure was designed based on grating equation solution, volume phase holographic grating Bragg condition constraint and prism refraction law. The focal length of the objective lens was determined by the relationship between the emission angle and the detector width. The nonlinearity of the emission spectrum was shown by the exit light angle. The designed unmanned airborne imaging spectrometer has the spectral range of 400~1 000 nm and the filed angle of 40°. The transfer function value is greater than 0.67 in the whole spectral range at the cut-off frequency of 20.8lp/mm, and the spectral resolution is less than 3nm. An unmanned airborne imaging spectrometer was assembled for spectral push broom imaging experiments on trees outdoors, and the multi-spectral image of leaves was obtained. The imaging spectrometer can effectively realize spectral imaging, and has good performances.

**Key words:** Optical design; Visible near infrared; Objective lens; Prism-grating-prism; Imaging spectrometer

**OCIS Codes:** 300.6190; 300.6270; 220.0220; 220.2740; 220.4830

**基金项目:**国家重大科研装备研制项目(No.ZDYZ2013-1)和国家高技术研究发展计划(No. 2014AA020905)资助

**第一作者:**罗刚银(1983-),男,副研究员,博士,主要研究方向光谱技术. Email: luogy1237@sina.com

**收稿日期:**2016-10-17; **录用日期:**2017-04-04

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

## 0 引言

成像光谱技术已被广泛应用于地物分析领域,但是传统的大型机载成像光谱仪的地物分辨率基本都为米级,很难满足精准农林业分布、病虫害监测、水质监测、大气探测等领域对地物分辨率高至分米级甚至厘米级的要求.低空无人机载成像光谱仪因其携带方便、航线自由、地物分辨率高等优点可满足其需求.2010年美国 Idaho 国家实验室的 Ryan Hruska 等进行了基于固定翼无人机的高光谱成像实验<sup>[1]</sup>.2011年美国 Headwall 公司研制了适用于轻小型无人机的 Hyperspec 成像光谱仪<sup>[2]</sup>.2011年芬兰 VTT 实验室的 HeikkiSaari 等在森林等地方也进行了基于无人直升机的高光谱成像实验<sup>[3]</sup>.国内在这方面的研究仍处于起步阶段.2010年吴振洲等将 Offner 高光谱成像仪搭载在无人机上进行了农作物高光谱采集试验<sup>[4]</sup>.2012年李传荣等在重型无人机上实现了高光谱数据的获取<sup>[5]</sup>.2013年,国内欧普特公司将美国 HeadWall 公司的 Hyperspec 光谱仪搭载在无人机上,并宣称“国内第一台全自主飞行的高光谱无人机研发成功”.2014年南京理工大学与江苏省农科院合作进行了无人机载成像光谱仪的研究并开展了农田、果园病虫害监测,专门建立了农作物病虫害光谱库.2015年,中煤航测遥感局采用小型固定翼无人机搭载高光谱成像仪成功实施了多次高光谱数据获取<sup>[6]</sup>.2016年同济大学研制了在精细农业农情预判、林业珍稀树种定位、城市违建目标识别等诸多领域中使用的无人机载成像光谱仪<sup>[7]</sup>.目前,国内自主研发并已商品化的无人机载成像光谱仪还很少,而进口产品的价格昂贵,因此研制无人机载成像光谱仪对满足国内需求具有重要意义.

成像光谱仪的工作波段主要有可见光、近红外、短波红外、中波红外和长波红外等,其中可见近红外波段在农业、林业等多个领域有着重要的作用<sup>[8-9]</sup>.成像光谱仪的分光结构有很多种,如棱镜、光栅、干涉、傅里叶变换、阿达玛变换、栅栏调制等,其中光栅分光又包括 Czerny-Turner 结构、Dyson 结构、Offner 结构、棱镜-光栅-棱镜(Prism-Grating-Prism, PGP)结构等多种形式.PGP 结构的光谱分光元件综合了棱镜、光栅色散分光技术的优点,具有直视性、光谱分辨率高、效率高、结构紧凑等优点.袁立银<sup>[10]</sup>等采用 PGP 结构设计了短波红外 PGP 成像光谱仪,采用离轴三反射式望远物镜.吴从均<sup>[11]</sup>等、朱善兵<sup>[12]</sup>等设计了可见光 PGP 成像光谱仪.肖功海<sup>[13]</sup>等设计了可见光 PGP 高光谱显微成像光谱仪.崔继承<sup>[14]</sup>等设计了 PGP 医用显微成像光谱仪.目前,对可见近红外波段 PGP 机载成像光谱仪的研究工作还不多.

本文基于 PGP 结构设计可见-近红外波段的光谱仪,用反摄远镜头作为前置物镜,用无人机作为成像光谱仪的推扫载体,所研制的可见近红外无人机载成像光谱仪可广泛应用于低空田地、森林、湖泊等野外环境的成像光谱分析.

## 1 无人机载成像光谱仪的设计

无人机载成像光谱仪的工作原理如图 1,采用推扫工作方式,形成地面环境的光谱数据立方,之后从光谱数据立方中的任意一点可以得到该点所对应的光谱曲线信息.

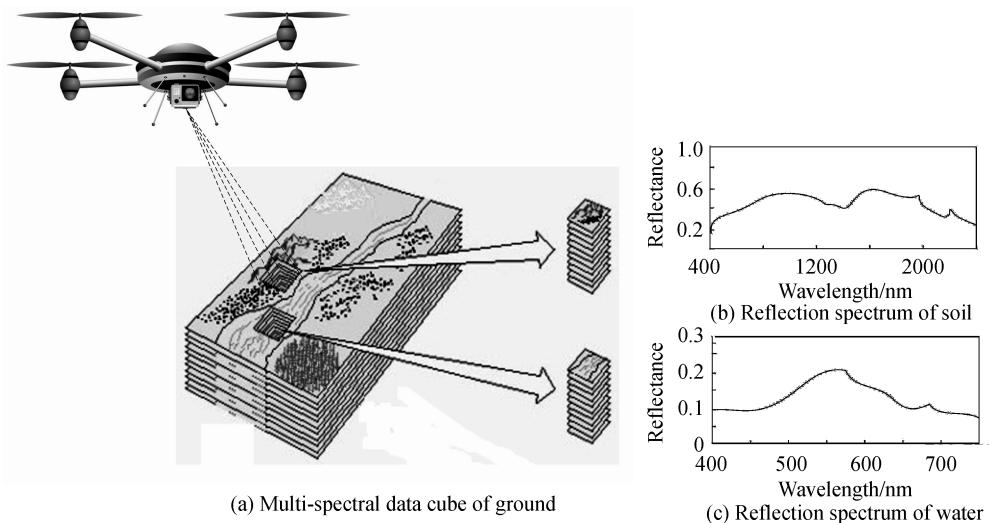


图 1 无人机载成像光谱仪工作原理

Fig.1 Principle of spectrometer on unmanned aerial vehicle

无人机载成像光谱仪主要由成像光谱仪、数据采集模块、图像存储模块、电源模块、无人机以及地面监测系统部分组成,如图 2。

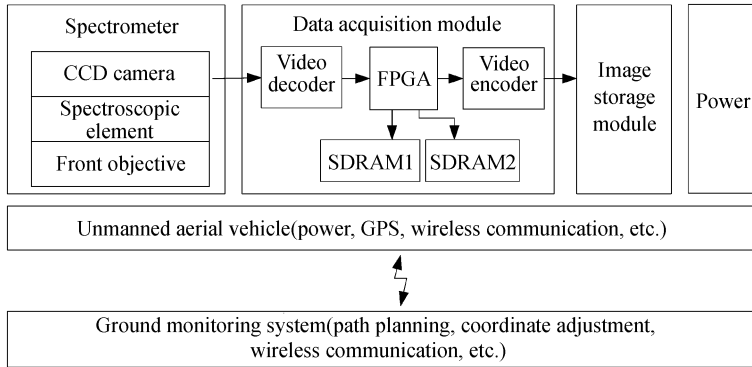


图 2 无人机载成像光谱仪系统框图

Fig.2 Block diagram of spectrometer on unmanned aerial vehicle

无人机载成像光谱仪的可靠高效工作需要解决一系列关键技术问题,要求所载设备体积小、重量轻、抗震性好、电池续航能力强、图像压缩算法高效、图像存储空间大、无人机与地面监测系统实时配合实现平稳运行等。其中,作为核心部件的成像光谱仪是需要重点研究的内容。传统的 Czerny-Turner 结构、Dyson 结构、Offner 结构都是离轴安装方式,各光学元件之间的位置可能会因为长期的震动而出现位置偏移。本文设计的成像光谱仪选择 PGP 分光结构,所有光学元件都用套筒同轴安装,具有结构紧凑、体积小、重量轻、安装容易、抗震性好的优点,非常适合用于无人机这种经常颠簸震动的工作场合。

## 2 光学系统结构原理

PGP 结构成像光谱仪主要由前置物镜、入射狭缝、准直物镜、PGP 分光元件、成像物镜、CCD 探测器组成,如图 3。

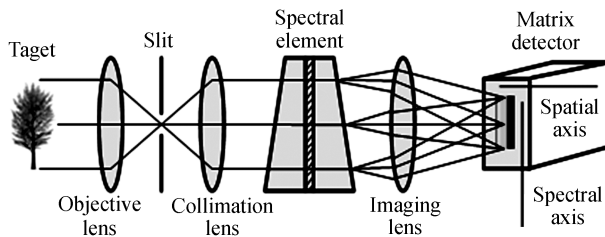


图 3 PGP 成像光谱仪结构原理

Fig.3 Structure principle of PGP imaging spectrometer

### 2.1 前置物镜参数选择

成像光谱仪的前置物镜主要包括反射式和透射式两种。反射式物镜的结构型式主要有离轴三反射型<sup>[10]</sup>、Schwarzschild 型、Schmidt 型、Cassegrain 型等;透射式物镜的结构型式主要有埃尔弗型、双高斯型,其中双高斯型具有视场大、后工作距离远等优点而被广泛使用。本文选用反摄远物镜作为成像光谱仪的前置物镜,该型式属于透射式物镜。

反摄远物镜的负正透镜分离,负光焦度透镜组作为前组,正光焦度透镜组作为后组。当平行光束入射时,经前组发散后,被后组成像在焦面上。这样,整个系统的主面向后移出物镜之外,从而获得比焦距还要长的工作距离。而视场角很大的轴外光束经前组发散以后,相对于后组来说视场角变小,从而达到广角的目的。因此,反摄远物镜能够实现大视场角和

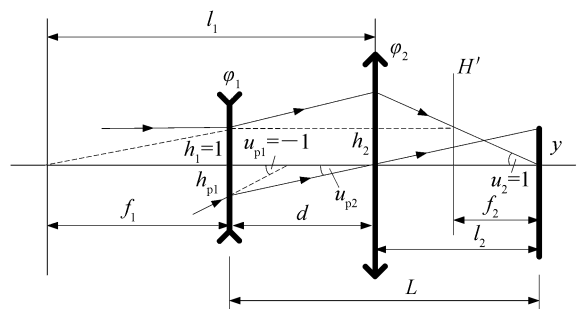


图 4 反摄远物镜的结构原理

Fig.4 Structure principle of reverse telephoto lens

长工作距离的目的.反摄远物镜的结构原理如图 4<sup>[15]</sup>.

在归一化条件下,即总焦距  $\varphi=1$ ,设  $\varphi_1$  为前组光焦距, $\varphi_2$  为后组光焦距, $d$  为前组与后组之间的距离.令  $h_1=1$  时, $u_2=1$ .

设前组主光线的角放大率的倒数为

$$\frac{1}{\gamma_1} = \frac{u_{P1}}{u_{P2}} = 1 - d\varphi_1 \quad (1)$$

且前组角放大率的倒数等于近轴光学的工作距离,即

$$l_2 = h_2 = 1 - d\varphi_1 = \frac{1}{\gamma_2} \quad (2)$$

此时物镜的总长度为

$$L = d + l_2 = \frac{1 - 1/\gamma_1}{\varphi_1} + \frac{1}{\gamma_1} \quad (3)$$

前后二组的光焦距与  $\gamma_1$  的关系为

$$\varphi_2 = (1 - \varphi_1)\gamma_1 \quad (4)$$

前组负担的孔径角为

$$u_1 = \varphi_1 \quad (5)$$

后组负担的孔径角为

$$u_2 - u_1 = 1 - \varphi_1 \quad (6)$$

前组轴外主光线负担的相对孔径为

$$2h_{P1}\varphi_1 = 2(1 - \gamma_1) \quad (7)$$

前组轴外主光线的高度为

$$h_{P1} = \frac{1 - \gamma_1}{\varphi_1} \quad (8)$$

根据式(1)~(8)选择  $\gamma_1$  与  $\varphi_1$ ,进而求出  $\varphi_2$ 、 $h_2$ 、 $h_{P1}$  和总长度  $L$ ,并且计算出前后二组的相对孔径.

前置物镜将分析目标成像在入射狭缝处,当分光系统 1:1 成像时,狭缝长度等于探测成像维长度  $l$ ,狭缝宽度等于探测像素尺寸  $\delta$ .

前置物镜的成像维视场角  $\omega_l$  与焦距  $f_1$  的关系为

$$\omega_l = 2\arctan\left(\frac{l}{2f_1}\right) \quad (9)$$

前置物镜的光谱维视场角  $\omega_\delta$  与焦距  $f_1$  的关系为

$$\omega_\delta = 2\arctan\left(\frac{\delta}{2f_1}\right) \quad (10)$$

## 2.2 PGP 分光系统参数选择

PGP 分光系统的核心是 PGP 分光元件,如图 5.其中,光栅选择衍射效率极高的体相位全息光栅<sup>[16]</sup>, $\beta_1$  为棱镜的倾斜角,同时也是光线的入射角, $\beta_2$  为光线的出射角,可见入射光线先经过棱镜的色散,后经过光栅的色散,再经过棱镜的色散,而光栅色散起主要作用.

PGP 分光系统的主要设计内容是初始结构参数的设计.Aikio<sup>[17]</sup> 提出了一种根据 PGP 结构中光栅刻线密度  $g$  计算成像物镜焦距  $f$  的方法,将其计算公式适当变形为

$$q^4(\lambda_c - g^2) + q^2(\lambda_l - 2\lambda_c^2 + 2g^2) - 2q\lambda_c\lambda_l + 2\lambda_c^2 - g^2 = 0 \quad (11)$$

式中, $q = \sqrt{1 + \frac{h}{2f}}$ , $\lambda_c$  为光谱范围的中心波长, $\lambda_l$  为光谱上限, $h$  为探测器光谱维长度.但是,Aikio 并未完全

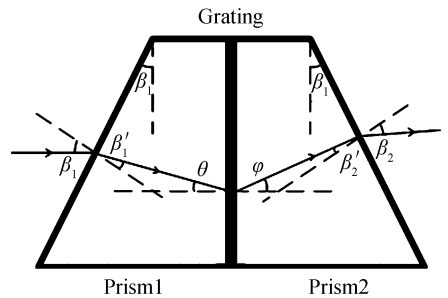


图 5 PGP 分光元件结构

Fig.5 Structure of PGP element

考虑棱镜的色散导致 PGP 光谱分光的非线性,本文基于棱镜的折射原理和光栅的分光原理,建立了一种考虑棱镜色散的 PGP 初始结构参数的简单设计方法。

光栅方程为

$$n_{\lambda}(\sin\theta + \sin\varphi) = k\lambda g \quad (12)$$

式中,  $n_{\lambda}$  为不同波长  $\lambda$  下棱镜玻璃对应的折射率,  $\theta$  为光栅入射角,  $\varphi$  为光栅衍射角,  $k$  为选择的光栅衍射级次,  $g$  为光栅刻线密度。

根据体相位全息光栅的布拉格条件<sup>[16]</sup>, 光谱范围内的中心波长  $\lambda_c$  对应入射角  $\theta_{\lambda_c}$  和衍射角  $\varphi_{\lambda_c}$  为

$$\theta_{\lambda_c} = \varphi_{\lambda_c} = \arcsin\left(\frac{k\lambda_c g}{2n_{\lambda_c}}\right) \quad (13)$$

式中,  $n_{\lambda_c}$  为波长  $\lambda_c$  下棱镜玻璃对应的折射率。

根据棱镜的折射定律

$$\frac{\sin\beta_1}{\sin\beta_1'} = n_{\lambda} \quad (14)$$

由  $\beta_1' = \beta_1 - \theta$  以及式(13)、(14)可得棱镜的倾斜角  $\beta_1$  为

$$\frac{\sin\beta_1}{\sin(\beta_1 - \theta)} = n_{\lambda} \quad (15)$$

非中心波长  $\lambda$  对应的光栅入射角  $\theta$  与光栅衍射角  $\varphi$  为

$$\theta = \beta_1 - \arcsin\left(\frac{\sin\beta_1}{n_{\lambda}}\right) \quad (16)$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\lambda g}{n_{\lambda}} - \sin\theta\right) \quad (17)$$

由  $\frac{\sin\beta_2}{\sin(\beta_2 - \varphi)} = n_{\lambda}$  以及式(16)、(17)可得波长  $\lambda$  的出射角为

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{n_{\lambda} \sin\varphi}{n_{\lambda} \cos\varphi - 1}\right) \quad (18)$$

假设光谱仪的光谱下限为  $\lambda_s$ , 对应的棱镜出射角为  $\beta_s$ ; 光谱上限为  $\lambda_l$ , 对应的棱镜出射角为  $\beta_l$ . 选择 CCD 探测器光谱维的宽度为  $h$ , 则成像物镜焦距  $f_2$  为

$$f_2 = h / [\tan(\beta_l - \beta_s) + \tan(\beta_l - \beta_1)] \quad (19)$$

### 3 系统参数指标

选择像素为  $1\,024 \times 1\,024$  的 CCD 探测器, 其像素尺寸为  $6\ \mu\text{m}$ , 选择四个像素合并为一个实际工作像素, 则工作像素尺寸  $24\ \mu\text{m}$ , 光谱维长度和成像维长度都为  $6.144\ \text{mm}$ . 由工作像素尺寸可得空间截止频率为  $20.81\ \text{lp/mm}$ . 光谱仪的工作光谱范围为可见近红外波段, 即  $400 \sim 1\,000\ \text{nm}$ , 中心波长为  $700\ \text{nm}$ . 选择光栅刻线密度为  $3001/\text{mm}$ , 光栅衍射级次为  $+1$  级, 假设 PGP 光谱仪  $1:1$  成像, 则入射狭缝的长度等于光谱维长度为  $6.144\ \text{mm}$ , 宽度等于工作像素尺寸为  $24\ \mu\text{m}$ . 系统参数指标见表 1.

表 1 系统参数指标

Table 1 System parameter

| Parameter                                   | Value     |
|---|-----------|
| Spectral range/nm                           | 400~1 000 |
| Spectral axis length/mm                     | 6.144     |
| Spatial axis length/mm                      | 6.144     |
| Pixel size/ $\mu\text{m}$                   | 24        |
| Grating density/ $(1 \cdot \text{mm}^{-1})$ | 300       |
| Grating order                               | +1        |
| Slit length/mm                              | 6.144     |
| Slit width/ $\mu\text{m}$                   | 24        |

### 4 系统光学设计

#### 4.1 PGP 分光元件光学设计

根据式(18)得到不同棱镜玻璃材料折射率  $n_{\lambda}$  下  $400\ \text{nm}$ 、 $700\ \text{nm}$ 、 $1\,000\ \text{nm}$  波长所对应的出射角度, 如图 6. 可见棱镜折射率越大, 各波长的出射角度越小, 则对应成像物镜的视场角越小, 而小视场角物镜的结构



往往比大视场角物镜的结构简单,且容易设计.因此,选择折射率较大的 ZF15 作为棱镜的玻璃材料,ZF15 对应中心波长 700 nm 处的折射率为 1.933,根据式(15)可得棱镜倾斜角为  $6.452^\circ$ .根据式(18)计算各波长从 PGP 元件的出射光与中心波长从 PGP 元件的出射光之间的夹角,如图 7,可见波长下限 400 nm 和波长上限 1 000 nm 与中心波长的出射光夹角是不同的,PGP 分光元件的光谱是非线性的.

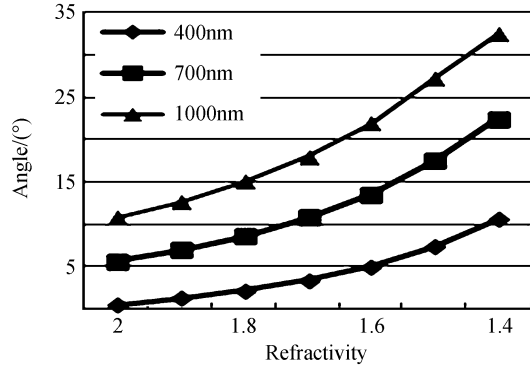


图 6 各波长的棱镜出射角

Fig.6 Exit angle at different wavelength

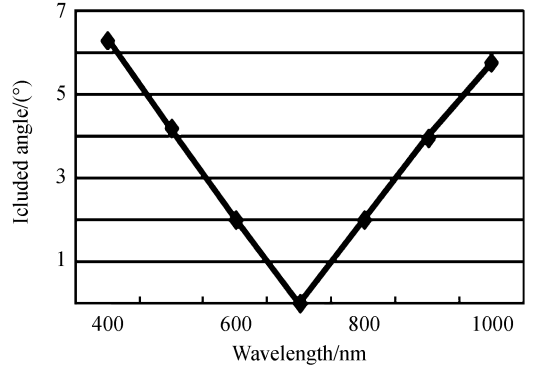


图 7 各波长与中心波长出射光夹角

Fig.7 Included angle between different wavelength and central wavelength

#### 4.2 前置物镜光学设计

为简化设计,选择现有的一款反摄远物镜作为初始结构<sup>[18]</sup>,设计前置物镜  $F\#$  为 5,视场角  $40^\circ$ ,则根据式(9)可得前置物镜焦距为 8.44mm.为了和光谱仪入射狭缝匹配,前置物镜需要设计成像方远心.经过 ZEMAX 软件自动优化,所得前置物镜的结构如图 8.

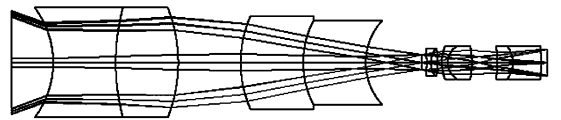


图 8 前置物镜结构

Fig.8 Structure of front objective lens

#### 4.3 成像物镜光学设计

根据图 7 可得波长下限 400 nm 和波长上限 1 000 nm 从 PGP 元件的出射角分别为  $0.104^\circ$  和  $12.367^\circ$ ,与中心波长的夹角分别为  $6.348^\circ$  和  $5.915^\circ$ ,因此选择成像物镜的视场角为  $6.5^\circ$ .根据视场匹配原则,设计成像物镜的像方  $F\#$  与前置物镜的物方  $F\#$  相等.根据式(19)可得成像物镜的焦距为 28.6 mm.选择四片式皮兹阀结构设计光谱仪的成像物镜,经过 ZEMAX 软件自动优化,所得成像物镜的结构如图 9.

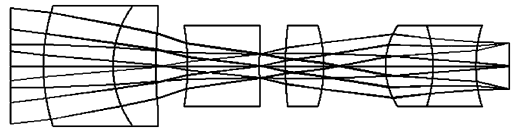


图 9 成像物镜结构

Fig.9 Structure of imaging objective lens

#### 4.4 成像光谱仪一体化优化设计

将根据系统参数设计的前置物镜、PGP 分光元件、成像物镜集成在一起,同时选择准直物镜和成像物镜结构相同以简化设计,并加入入射狭缝,形成完整的成像光谱仪.之后限制各分系统参数的变化范围,进一步优化整个成像光谱仪的光学性能.最终得到的成像光谱仪一体化优化后的系统结构如图 10,系统参数如表 2,其外形尺寸为  $24\text{mm} \times 24\text{mm} \times 305\text{mm}$ (CCD 探测器的尺寸未计算在内),为安装方便的直视型细长结构.

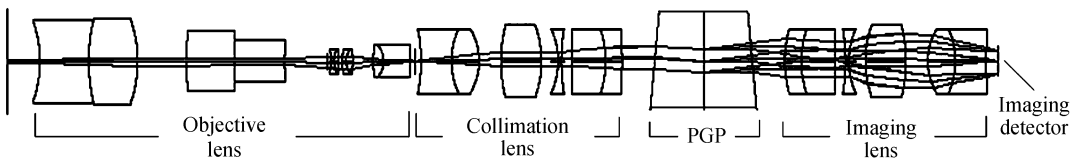


图 10 成像光谱仪优化后的结构

Fig.10 Optimized structure of imaging spectrometer

表 2 优化后的系统参数  
Table 2 System parameter after optimization

| Parameter                       | Value |
|---------------------------------|-------|
| F number of front lens          | 5     |
| Field angle of front lens/(°)   | 40    |
| Focal length of front lens/mm   | 8.44  |
| Grating thickness/mm            | 3     |
| Glass material of prism         | ZF15  |
| Central thickness of prism/mm   | 5     |
| Inclination angle of prism/(°)  | 6.452 |
| F number of imaging lens        | 5     |
| Field angle of imaging lens/(°) | 40    |
| Focal length of imaging lens/mm | 28.6  |

该成像光谱仪的点列图如图 11,其弥散斑基本都在  $24\ \mu\text{m}$  的工作像素尺寸之内,其在  $400\ \text{nm}$ 、 $700\ \text{nm}$ 、 $1\ 000\ \text{nm}$  处的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)曲线分别如图 12(a)~(c)所示,可见其在空间截止频率  $20.8\text{lp}/\text{mm}$  处的传递函数值均大于  $0.67$ 。其在  $397\ \text{nm}$ 、 $400\ \text{nm}$ 、 $403\ \text{nm}$ 、 $697\ \text{nm}$ 、 $700\ \text{nm}$ 、 $703\ \text{nm}$ 、 $997\ \text{nm}$ 、 $1\ 000\ \text{nm}$ 、 $1\ 003\ \text{nm}$  处的点列图如图 13,在工作波段的光谱分辨率小于  $3\ \text{nm}$ 。因此,该成像光谱仪具有很好的光谱分光性能。

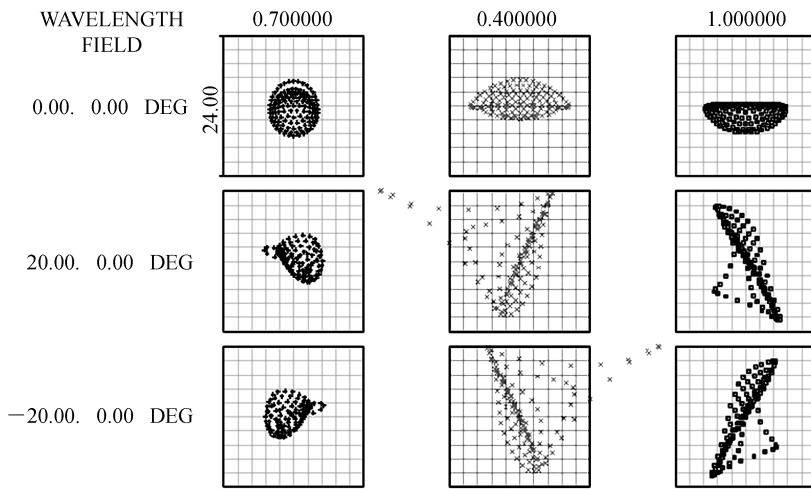
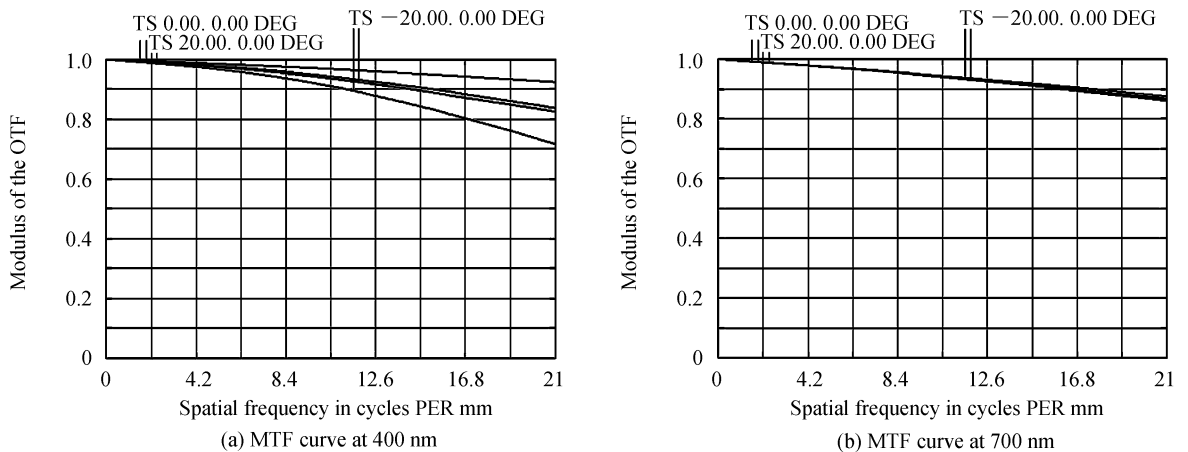


图 11 成像光谱仪优化后的点列图

Fig.11 Spot diagram of imaging spectrometer after optimization



(a) MTF curve at  $400\ \text{nm}$

(b) MTF curve at  $700\ \text{nm}$

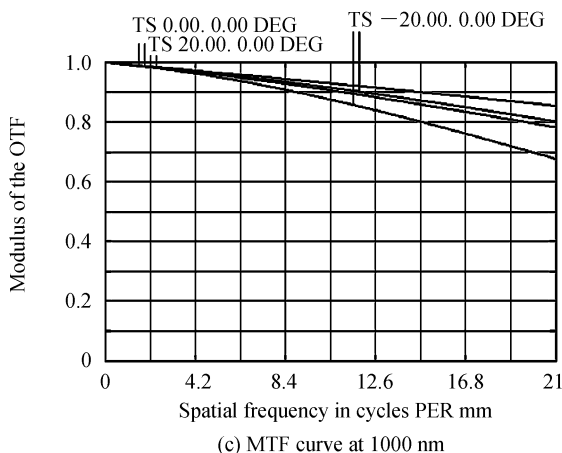


图 12 不同波长处传递函数曲线

Fig.12 MTF curve at different wavelength

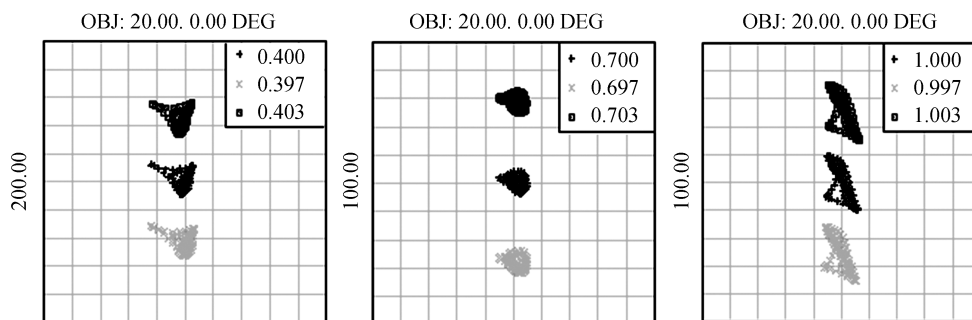


图 13 3 nm 波长间隔的点列图

Fig.13 Spot diagram with 3 nm interval

该成像光谱仪在全视场、全波段的点列图如图 14,以  $D$  点为原点  $(0, 0)$ , 则各点的坐标分别为  $A(3.068, 2.959)$ ,  $B(0, 2.963)$ ,  $C(3.071, 0)$ ,  $E(3.066, 3.175)$ ,  $F(0, 3.182)$ , 可见光谱维的偏差最大为  $5 \mu\text{m}$ , 成像维的偏差最大为  $7 \mu\text{m}$ , 基本小于工作像素尺寸的  $1/4$ , 该成像光谱仪具有较小的谱线弯曲和色畸变. 另外, 波长下限  $400 \text{ nm}$  与波长上限  $1000 \text{ nm}$  对应的光谱维像高也是不同的, 这也进一步验证了图 7 所示的 PGP 分光元件的光谱非线性.

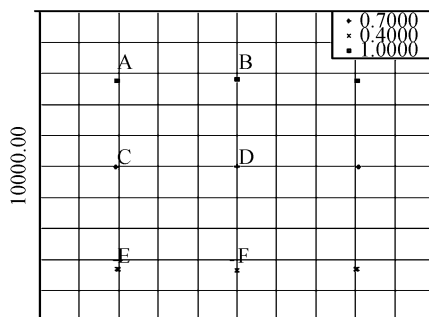


图 14 全视场、全波段点列图

Fig.14 Spot diagram of full field and wavelength range

## 5 光谱成像实验

根据设计结果加工装调的 PGP 成像光谱仪与图像采集盒的总重量小于  $1.5 \text{ kg}$ , 因此选择了额定载重为  $2 \text{ kg}$  的六旋翼无人机. 将 PGP 成像光谱仪与图像采集盒固定在无人机的底部支架上, 如图 15.

选择光线充足的时候, 采用 PGP 成像光谱仪对室外的绿化树木进行光谱推扫成像试验, 通过树叶的光谱数据立方可以建立多光谱伪彩色图以及树叶表面某点的反射太阳光谱曲线, 如图 16. 提取树叶上一点的反射太阳光谱曲线, 可见树叶对绿光反射较多 ( $B$  点), 对蓝光 ( $A$  点)、红光 ( $C$  点) 吸收较多, 对



图 15 无人机载成像光谱仪

Fig.15 Spectrometer on unmanned aerial vehicle



近红外波段(D点)反射较多,基本与绿色植物的反射光谱特征一致.可见,该 PGP 成像光谱仪能够实现树叶的多光谱成像.

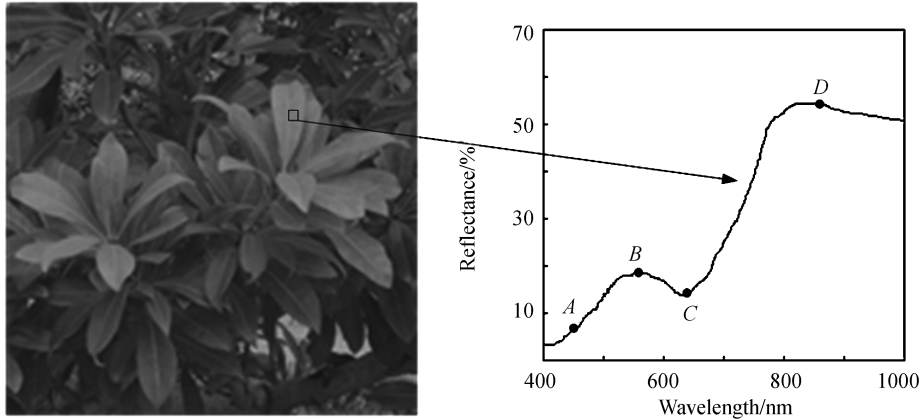


图 16 树叶多光谱图像与反射光谱曲线

Fig.16 Multi spectral image and reflectance spectrum of leaves

## 6 结论

采用反望远镜作为前置物镜,采用无人机作为成像光谱仪的推扫载体,所研制的可见近红外无人机载成像光谱仪的工作光谱范围为 400~1 000 nm,视场角为 40°;全视场弥散斑尺寸基本都在 24  $\mu\text{m}$  的工作像素尺寸之内;全工作波段在空间截止频率 20.8lp/mm 处的传递函数值均大于 0.67,光谱分辨率小于 3 nm.该成像光谱仪具有很好的光谱分光性能,可广泛应用于低空田地、湖泊、矿山等野外环境的成像光谱分析.

### 参考文献

- [1] HRUSKA R, MITCHELL J, ANDERSON M, *et al.* Radiometric and geometric analysis of hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle[J]. *Remote Sensing*, 2012, **4**(9): 2736-2752.
- [2] LUCIEER A, MALENOVSKY Z, VENESS T, *et al.* Hyper UAS—Imaging spectroscopy from a multirotor unmanned aircraft system[J]. *Journal of Field Robotics*, 2014, **31**(4): 571-590.
- [3] HILL S, CLEMENS P. Miniaturization of sub-meter resolution hyperspectral imagers on unmanned aerial systems[C]. SPIE Sensing Technology+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2014: 91040A.
- [4] WU Zhen-zhou. Compact Offner imaging spectrometer and spectral data processing[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.  
吴振洲. 微型 Offner 成像光谱仪和光谱数据处理[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [5] LI Chuan-rong. An UAV remote sensing payload system[J]. *China Science and Technology Achievements*, 2012, **10**: 10-11.  
李传荣. 无人机遥感载荷综合验证系统技术[J]. 中国科技成果, 2012(10): 10-11.
- [6] YUAN Yuan, HU Bo, WU Xing-hou, *et al.* Remote sensing estimation of chlorophyll content in different growth periods of summer corn based on vegetation index[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015(15): 254-259.  
袁媛, 瑚波, 武兴厚, 等. 基于植被指数的夏玉米不同生育期叶绿素含量遥感估算[J]. 中国农学通报, 2015(15): 254-259.
- [7] SUN Wei-wei, LIU Chun, LI Wei-yu. Sparse representation classification on hyperspectral imagery based-multiple measurement vector[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, **44**(3): 454-461.  
孙伟伟, 刘春, 李巍岳, 等. 基于多观测向量的高光谱影像稀疏表达分类[J]. 同济大学学报自然科学版, 2016, 44(3): 454-461.
- [8] LIN Tao, YU Hai-yan, YING Yi-bin. Review of progress in application visible/near-Infrared spectroscopy in liquid food detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(2): 285-290.  
林涛, 于海燕, 应义斌. 可见/近红外光谱技术在液态食品检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(2): 285-290.
- [9] HAN Zhong-zhi, WAN Jian-hua, LIU Jie, *et al.* Multispectral imaging detection using the ultraviolet fluorescence characteristics of oil[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(11): 1335-1341.  
韩仲志, 万剑华, 刘杰, 等. 利用油品紫外荧光特性的多光谱成像检测[J]. 发光学报, 2015, **36**(11): 1335-1341.
- [10] YUAN Li-yin, HE Zhi-ping, SHU Rong, *et al.* Optical design of a SWIR PGP imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 831-834.  
袁立银, 何志平, 舒嵘, 等. 短波红外棱镜-光栅-棱镜成像光谱仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2011, **40**(6): 831-834.

- [11] WU Cong-jun, YAN Chang-xiang. Imaging spectrometer optical design based on prism-grating-prism dispersing device [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(1):37-43.  
吴从均, 颜昌翔. 棱镜-光栅-棱镜型光谱成像系统光学设计[J]. *应用光学*, 2012, **33**(1):37-43.
- [12] ZHU Shan-bing, JI Yi-qun, GONG Guang-biao, *et al.* Optical design of prism-grating-prism imagings spectrometers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9):2270-2273.  
朱善兵, 季轶群, 宫广彪, 等. 棱镜-光栅-棱镜光谱成像系统的光学设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9):2270-2273.
- [13] XIAO Gong-hai, SHU Rong, XUE Yong-qi, *et al.* Design of microscopic hyperspectral imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(4):367-372.  
肖功海, 舒嵘, 薛永琪, 等. 显微高光谱成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(4):367-372.
- [14] CUI Ji-cheng, TANG Yu-guo, HAN Peng-peng, *et al.* Development of diagnostic imaging spectrometer for tumor on-line operation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(12):3043-3049.  
崔继承, 唐玉国, 撤芑芑, 等. 用于肿瘤手术在线诊断的成像光谱仪的研制[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(12):3043-3049.
- [15] DAI Jian-ning. Imaging theory and optimization design of fish eye lens [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 1999.  
戴建宁. 鱼镜头的成像理论与优化设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 1999.
- [16] REN Zhong, LIU Guo-dong, HUANG Zhen. A spectrometer splitting-light system based on volume phase holographic transmission grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(6):245-251.  
任重, 刘国栋, 黄振. 一种体相位全息透射式光栅的光谱仪分光系统[J]. *中国激光*, 2015, **42**(6):245-251.
- [17] Mauri A. Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph [D]. Finland: VTT Electronics, 2001:43-44.
- [18] LAIKIN M. Lens design [M]. China Machine Press, 2009:90-95.  
莱金. 光学系统设计[M]. 机械工业出版社, 2009:90-95.