

宽视场干涉光谱成像仪技术研究

张智南^{1,2} 李立波^{1,2} 胡炳樑¹ 冯玉涛¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对海洋光谱成像技术对于宽视场(FOV)、大幅宽、高通量的需求,提出了一种基于像平面干涉技术的新型宽视场干涉光谱成像仪,研究了像平面干涉技术的原理,提出了相应的干涉方案并推导了系统的光程差公式,制定了详细的参数指标并根据相应参数设计优化了光学系统。光学系统前置镜和中继镜分别采用双高斯和Dyson结构,视场为 35.5° ,幅宽为320 km,系统 F 数为4,焦距为100 mm,在400~900 nm的谱段范围内,平均信噪比(SNR)大于100,在奈奎斯特空间频率为32 lp/mm处,调制传递函数(MTF)大于0.5,各项指标满足要求。

关键字 光学设计;干涉光谱成像技术;海洋光谱;像平面干涉技术;宽视场

中图分类号 TH744 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0130001

Study of Fourier Transform Imaging Spectrometer with Wide Field of View

Zhang Zhinan^{1,2} Li Libo^{1,2} Hu Bingliang¹ Feng Yutao¹

¹Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of CAS, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an, Shaanxi 710119, China

²University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract In order to meet the demand of wide field of view (FOV), wide swath width, and high throughput for the ocean spectrum, a new Fourier transform imaging spectrometer with wide FOV based on the image plane interference technologies presented. And the principle and expressions of the image plane interference are studied and deduced. The optical system is designed and optimized based on the calculated detailed parameters. Dyson and double Gauss structures are used in the relay lens and fore optics respectively. Under the circumstance of 400~900 nm spectral range, 35.5° FOV, 320 km swath width, $F/4$, and 100 mm focal length, the average signal noise ratio (SNR) is greater than 100 and the modulation transfer function (MTF) of the current design is greater than 0.5 at 32 lp/mm. All the parameters are well satisfied by the present design.

Key words optical design; Fourier transform spectrometer; ocean spectrum; image plane interference; wide field of view

OCIS codes 220.4830; 300.6300; 300.6190

1 引言

光谱成像技术是20世纪80年代发展的一种结合光谱处理技术和成像技术的多维信息获取处理技术^[1],它可以获得二维空间信息及一维光谱信息,得到目标的三维数据立方体。由于同时具备了空间位置信息、光谱信息和辐射度信息,光谱成像仪不但可以确定目标的几何形状,还能够识别目标的物理属性并进行物质成分含量的定量分析,因此已成为海洋遥感探测的一种主要工具。使用光谱成像技术对海水进行检测不仅可测

收稿日期: 2015-07-27; 收到修改稿日期: 2015-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(41005019)

作者简介: 张智南(1991—),男,硕士研究生,主要从事干涉光谱成像技术方面的研究。E-mail: jeffzhinanzhang@126.com

导师简介: 胡炳樑(1974—),男,博士,研究员,主要从事信号处理及光谱成像技术等方面的研究。

E-mail: hbl@opt.ac.cn(通信联系人)

量海水中悬浮泥沙含量,也可以对海洋中的微生物和污染物进行监测,在海洋探测及海洋安全领域具有非常广泛的应用前景^[2]。

光谱成像仪按光谱获取方式的不同可以分为直接型和间接性^[3],直接型光谱成像仪是指在探测器上直接获得目标光谱强度信息的一类光谱成像仪,常见的直接型光谱成像仪包括滤光片型、棱镜色散型、光栅色散型等几个类别;间接型光谱成像仪则不能直接获得光谱信息,需要通过后续的数据处理才能得到光谱信息,常见的间接型光谱成像仪包括计算层析型、哈达玛变换型、压缩传感型和傅里叶变换型等几个类别^[4]。

目前国内外具有代表性的海洋光谱成像仪有美国海军实验室研制的 Ocean PHILLS 海洋高光谱成像仪^[5],PHILLS 使用凸面光栅和 Offner 结构分光得到目标的光谱信息,光谱范围为 400~1000 nm,光谱分辨率为 4.6 nm,工作 F 数为 4;美国海军卫星 NEMO 上搭载的载荷 COIS 光谱成像仪^[6],采用光栅色散的方式获取目标的光谱信息,光谱范围为 400~2500 nm,光谱分辨率为 10 nm,地元分辨率为 30 m,视场角(FOV)为 2.84° ;美国海军实验室研制的 HICO 海洋高光谱成像仪^[7],该型号光谱仪搭载在国际空间站上,采用凸面光栅和 Offner 结构分光得到目标的光谱信息,光谱范围为 350~1080 nm,光谱分辨率为 5.73 nm,地元分辨率为 83 m,工作 F 数为 3.5,视场角为 6.92° ;由 Science and Technology International 公司研发的第四代机载高光谱成像仪 AAHIS^[8],该型号采用棱镜-光栅-棱镜(PGP)光栅色散获取光谱信息,光谱范围为 350~840 nm,光谱分辨率为 2.2 nm,地元分辨率为 6.5~2 m,AAHIS 采用分视场的方法视场可达 40° ;由美国空气动力实验室研发的 PRISM 机载海洋光谱成像仪^[9],采用凹面光栅获取目标的光谱信息,该型号的光谱范围为 350~1050 nm,光谱分辨率为 3 nm,工作 F 数为 1.8,FOV 可达 36° ;国内研究方面,由北京理工大学的刘洋等^[10]研制的大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪,该仪器采用静态迈克尔孙干涉仪为干涉器件,中继镜采用 Offner 成像镜结构,通过傅里叶变换得到目标的光谱信息,该仪器的谱段范围为 254~380 nm,视场为 3.8° ,系统 F 数为 8,焦距为 100 mm,波数分辨率为 80 cm^{-1} 。上述这些高光谱成像仪性能稳定成熟,在海洋遥感探测领域取得了重要成就,但是上述型号中除北京理工大学研制的大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪以外,均为色散型光谱仪,光学系统中有狭缝,能量利用率不高,且除了搭载在机载平台上的 AAHIS 和 PRISM 以外,其余几个工作在星载平台的高光谱成像仪视场均较小,刈幅宽度比较小。美国空气动力实验室在 30 年光谱成像技术报告中^[11]指出,科学技术和应用需求的发展推动光谱成像技术朝着高通量[高信噪比(SNR)]、宽光谱范围、大幅宽的方向发展。因此,研制一款干涉型宽视场光谱成像仪具有一定的必要性。

本文提出了一种基于像平面干涉技术的新型宽视场干涉光谱成像仪,研究了系统的原理,制定了相应的干涉方案并提出光程差公式,提出了系统的性能参数并完成光学系统设计。系统视场为 35.5° ,幅宽为 320 km,光谱范围为 400~900 nm,光谱分辨率为 5 nm,系统的干涉仪为静态迈克尔孙干涉仪,此方案采用在会聚光路中的像平面干涉技术,优点为:系统无狭缝、能量利用率高;干涉仪体积小且结构简单、干涉效率较高;在会聚光路中发生干涉,可实现宽视场。

2 宽视场干涉光谱成像仪原理

新型宽视场干涉光谱成像仪原理如图 1 所示,系统主要由前置镜、静态迈克尔孙干涉仪及中继镜组成,静

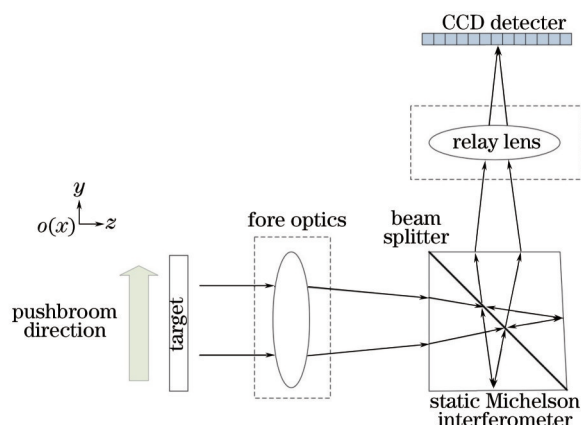


图 1 新型宽视场海洋干涉光谱成像仪原理图

Fig.1 Structure and optical principle of Fourier transform imaging spectrometer for ocean spectrum

态迈克尔孙干涉仪由一个直角棱镜和一个楔角棱镜胶合而成,胶合面为分束面。当此光谱成像仪工作时,光线经前置镜成像后进入干涉仪,经由分束面分成两束,分别成像于干涉仪直角棱镜的直角面和楔角棱镜的斜面,两个具有一定光程差的一次像面再经由中继镜成像于探测器表面并发生干涉,得到具有固定光程差的干涉图,并通过推扫得到目标的具有完整光程差的三维数据立方体。

设分束面的反射比和透射比分别为 $r(\sigma)$ 和 $t(\sigma)$, 两束光走过的光程分别为 z_1 和 z_2 , 中继镜的衰减因子为 $\tau(\sigma)$, σ 为波数, E_0 为光波的振幅, z 为光波所走过的光程, t 为时间, Δ 为两束光的光程差, 则到达探测器的两束相干光发生干涉, 合成光的复振幅及光强表达式分别为

$$E(z_1, z_2, \sigma) = r(\sigma)t(\sigma)\tau(\sigma)E_0(\sigma)\left\{\exp\left\{-i\left[(2\pi z_1\sigma) - \omega t\right]\right\} + \exp\left\{-i\left[(2\pi z_2\sigma) - \omega t\right]\right\}\right\}d\sigma, \quad (1)$$

$$I(\Delta) = 2 \int_0^{\infty} [r(\sigma)t(\sigma)\tau(\sigma)]^2 E_0^2(\sigma) [1 + \cos(2\pi\sigma\Delta)] d\sigma. \quad (2)$$

忽略直流分量并简化为

$$I(\Delta) = \int_0^{\infty} B(\sigma)\cos(2\pi\Delta\sigma)d\sigma, \quad (3)$$

式中 $B(\sigma) = 2[r(\sigma)t(\sigma)\tau(\sigma)E_0(\sigma)]^2$, (3)式表示了干涉强度随光程差的变化, 携带了光谱信息, 将其在负波数维偶延拓即可得到干涉强度和光谱强度之间的傅里叶变换关系, 即

$$I(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma)\exp(i2\pi\Delta\sigma)d\sigma \quad (4)$$

$$B(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\Delta)\exp(-i2\pi\Delta\sigma)d\Delta$$

由(4)式可知, 通过对目标的干涉信息进行傅里叶变换可以得到目标的光谱信息, 从而可以得到包含二维空间信息和一维光谱信息的三维数据立方体。

干涉方案的制定对傅里叶变换型光谱仪至关重要, 本系统干涉仪结构如图 2(a)所示, 直角棱镜 ABC 与楔角棱镜 ACD 胶合构成干涉仪, 光线进入干涉仪后在分束面 AC 上被分成两束, 分别成像于直角棱镜的直角面 BC 和楔角棱镜的斜面 CD, 斜面 CD 与直角面 AB 夹角为 θ , 因此本干涉方案的实质即为两个夹角为 θ 的一次像面进行干涉, 如图 2(b)所示, 两个一次像面相交的地方即为 0 光程差位置。

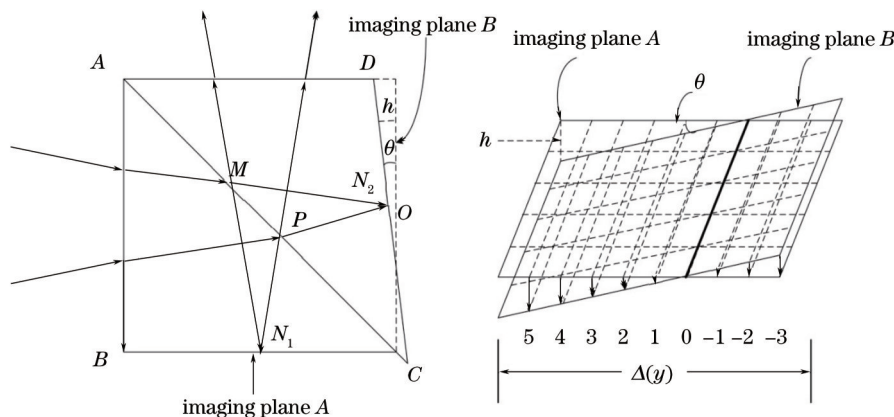


图 2 干涉仪结构及原理图。(a)干涉仪结构及光程差产生原理; (b)像平面干涉示意图

Fig.2 Structure and principle of the interferometer. (a)Structure of interferometer and principle of optical path difference; (b) principle of imaging plane interference process

由于两束光为同一光线分束而来, 因此两束光为相干光, 设 n 为干涉仪的折射率, $h(y)$ 为两一次像面在不同位置处的高度差, 则两相干光线的光程差为

$$\Delta = x_1 - x_2 = n[l_{MN_1} - l_{MN_2}] + [l_{N_1P} - l_{N_2P}] \approx 2l_{N_2O} = 2nh(y) = 2ny \tan \theta. \quad (5)$$

由于本系统所设计的中继镜的放大率为 -1, 系统工作的谱段范围为 400~900 nm, 光谱分辨率为 5 nm, 所选电荷耦合器件(CCD)的阵列规模为 4096×256, 像元尺寸为 16 μm, 考虑系统的最大光程差与最小采样间隔, 可将系统光程差表达式修正为

$$\Delta(Y) = -2n \tan \theta(Y - 0.832)Y \in [-2.048, 2.048], \quad (6)$$

式中 Y 为探测器 Y 方向的坐标参数。由(6)式可得到系统最大光程差为 0.036 mm。

研究的光谱成像仪采用时空联调的技术体制来获得目标的三维数据立方体, 预计工作在轨道高度为 500 km 的太阳同步轨道上, 刈幅宽度为 320 km, 地元分辨率为 80 m, 仪器的光谱范围为 400~900 nm, 光谱分辨率为 5 nm, 系统所选 CCD 规模为 4096×256, 像元尺寸为 16 μm。根据光谱成像仪的技术指标和所选定的 CCD 的指标参数, 计算并确定系统相关的参数如表 1 所示。使用 Modtran 软件模拟大气在入瞳处的辐射亮度, 辐射亮度曲线如图 3 所示, 并根据干涉型光谱仪信噪比计算系统的信噪比^[12]

$$V_{\text{SNR}}(\sigma) = \frac{T_{\text{total}} \frac{\pi d^2 \tau_{\text{opt}} \eta \Delta \sigma L_s(\sigma)}{4F^2 hc \sigma}}{\sqrt{2N_{\text{FTIS}} \bar{n}_d^2 + T_{\text{total}} \frac{\tau_{\text{opt}} \eta \Delta \sigma}{4F^2 hc} \sum \frac{L_s(\sigma)}{\sigma}}} \quad (7)$$

其中总积分时间 $N_{\text{total}} = N_{\text{FTIS}} T$, N_{FTIS} 为干涉型光谱仪的通道数, T 为积分时间, τ_{opt} 为光学系统透射率, h 为普朗克常数, \bar{n}_d 为探测器噪声, $L_s(\sigma)$ 为大气辐射在光学系统入瞳处的光谱辐射亮度, 经计算, 系统信噪比如图 4 所示。

表 1 新型光谱成像仪系统参数

Table 1 Parameters of current spectrometer

Parameter	Value	Parameter	Value
Orbital altitude	500 km	CCD Array size	4096×256
Swath width	320 km	Pixel size	16 μm
Spectral range	400~900 nm	Spectral sample width	5 nm
Ground speed	7.0 km/s	FOV	35.5
Ground sample distance	80 m	F number	4
SNR	>100	Focal length	100 mm

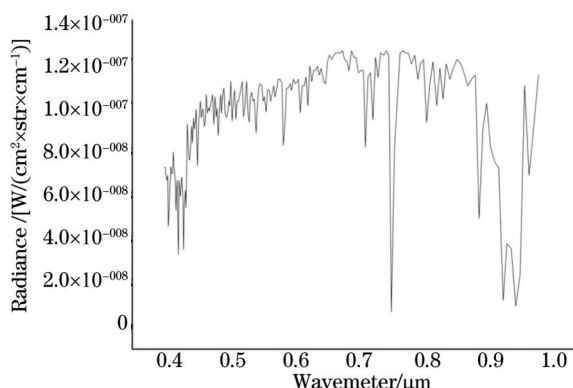


图 3 大气在仪器入瞳处的辐射亮度模拟曲线

Fig.3 Imitation of radiance of atmosphere at entrance pupil

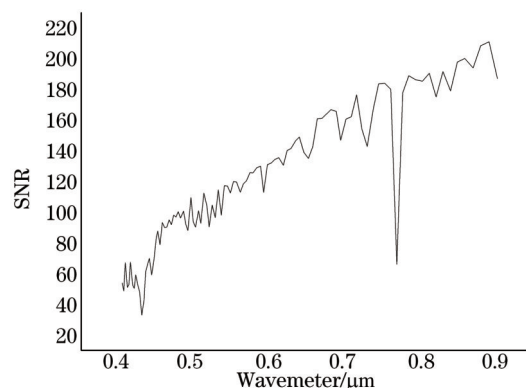


图 4 新型宽视场海洋干涉光谱成像仪信噪比

Fig.4 SNR of Fourier transform imaging spectrometer for ocean spectrum

3 光学系统设计

对于采用像平面干涉式的干涉光谱成像仪来说, 中继镜的选择至关重要, 目前在国内外使用同心结构的光谱成像仪中, Offner 结构的应用较为普遍, 美国海军实验室研制的 Ocean PHILLS 高光谱成像仪和 HICO 高光谱成像仪, Nemo 卫星上搭载的 COIS 和 EO-1 卫星上搭载的 Hyperion, 以及北京理工大学研制的大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪, 均使用 Offner 结构。Offner 结构为同心结构, 由一个凹面反射镜和一个凸面反射镜组成, 如图 4 所示, 凸面反射镜为系统的孔径光阑, 由于系统为同心对称反射式结构, 因此系统不存在色差, 初级球差、彗差、畸变也都可以得到很好的校正^[13], 当凹面反射镜的半径 r_1 等于凸面反射镜的半径 r_2 时, 系统满足远心条件, 此时系统的初级像散和场曲也可以得到很好的校正。但是, 由于 Offner 系统为反射式结构, 体积较大, 并且在数值孔径较大时, 像差难以校正, 因此不能很好地实现本系统的技术指标^[14]。

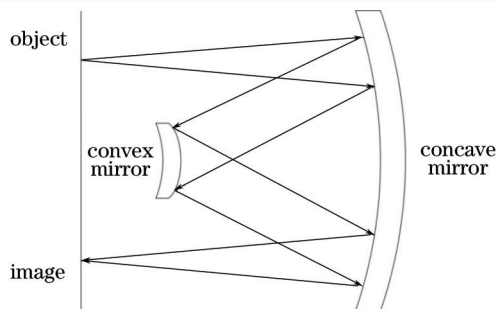


图 5 Offner 系统结构

Fig.5 Structure of Offner concentric system

Dyson 系统是平凸透镜和凹面反射镜组成的折反式同心光学系统^[15],如图 5 所示,凹面反射镜为系统孔径光阑,当反射镜位于透镜的焦平面时,即反射镜的曲率半径 R 和透镜凸面的曲率半径 r 满足 $R = \frac{n}{n-1}r$ 时,系统为远心系统,此时系统像方和物方均为远心。在 Dyson 系统中,平凸透镜的平面既是物面也是像面,系统的初级球差、彗差、像散、场曲、畸变均为零,且像面和球心都在透镜平面附近,因此系统可以有较大的数值孔径^[16]。由于存在透镜因此系统的色差不能忽略,且当数值孔径较大时,高级像差也需要校正。与 Offner 系统相比,Dyson 系统采用折反式结构,结构紧凑,体积较小,并且能够实现宽视场及大数值孔径,因而本系统中选择 Dyson 结构作为中继镜的初始结构。

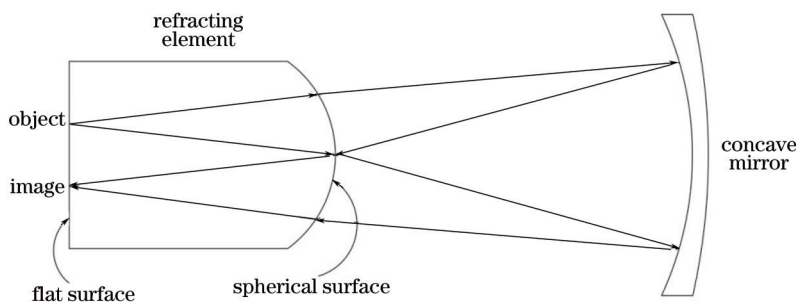


图 6 Dyson 系统结构

Fig.6 Structure of Dyson concentric system

光谱成像仪前置镜的选择同样重要,前置镜决定了系统的空间分辨率,且需要与后端的中继镜相匹配,保证系统相对口径的一致,对于本系统而言,由于存在一次像面,故前置镜需要满足像方远心且要有较高的成像质量,因此前置镜的优化设计格外重要。本系统前置镜要求像方远心、可以实现宽视场、畸变较小且光路体积小。为实现上述要求,初步考虑选择离轴三反作为初始结构进行设计,与透射式系统相比,反射式系统光路可以折叠,因而可以减小光路体积重量,光路中无透射镜组,不产生色差^[17]。然而在实际设计过程中发现,在视场较大的情况下,离轴三反系统很难做到像方远心并且会产生比较大的畸变,且离轴反射式系统在加工、装调时较为困难,难以实现本系统的技术要求,故改用双高斯结构作为系统前置镜的初始结构,双高斯系统为对称式透射结构,可以实现大相对口径及大视场,并且易于加工。

根据前文提出的系统参数,制定出光学系统的指标:系统为远心光路,其中前置镜要求像方远心,中继镜要求像方远心且物方远心,远心度小于 0.02;刈幅宽度为 320 km,系统视场为 35.5° ;系统焦距为 100 mm, F 数为 4,中继镜的近轴放大率为 1;由探测器参数可计算出,要求系统的调制传递函数(MTF)在 32 lp/mm 处优于 0.5。根据上述要求及指标参数,系统前置镜选择双高斯结构、中继镜选择 Dyson 结构为初始结构进行优化。最终系统光路图如图 6 所示,系统 MTF 如图 7 所示,系统点列图如图 8 所示,系统场曲和畸变如图 9 所示。系统的调制传递函数、点列图以及场曲和畸变均满足指标要求。

在中继镜的设计中,由于 Dyson 结构不能消除色差,故在中继镜的设计中加入色散能力强和弱的透镜进行组合,以消除系统色差。并且在干涉仪相对应的位置处加一与其形状相同的棱镜,以满足系统对称性。由中继镜的调制传递函数和点列图可以看出,与 Offner 结构相比,所设计的基于 Dyson 结构的中继镜可

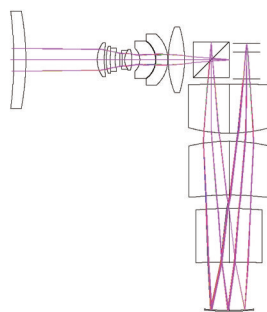


图7 新型宽视场海洋干涉成像光谱仪系统光路

Fig.7 Optical system of Fourier transform imaging spectrometer for ocean spectrum

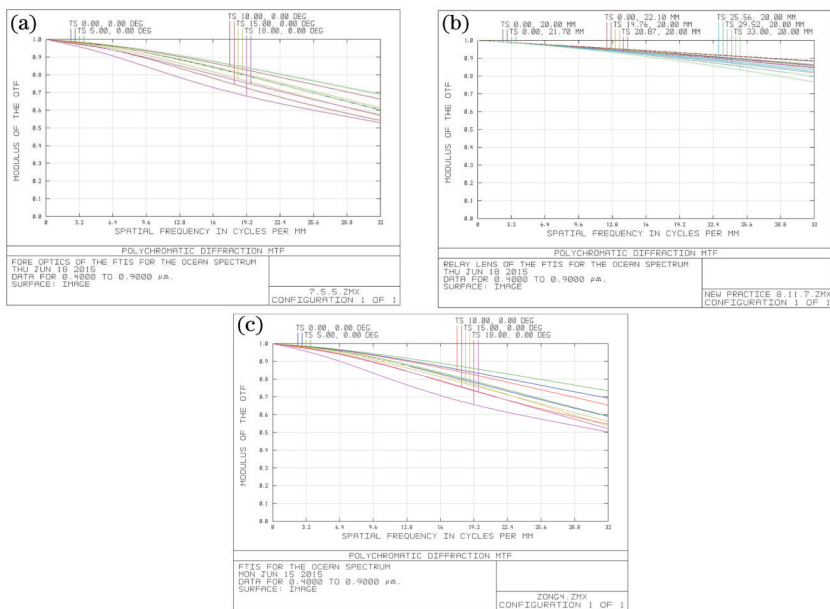


图8 (a) 前置镜的MTF曲线; (b) 中继镜的MTF曲线; (c) 系统的MTF曲线

Fig.8 (a) MTF of fore optics; (b) MTF of relay lens; (c) MTF of current design

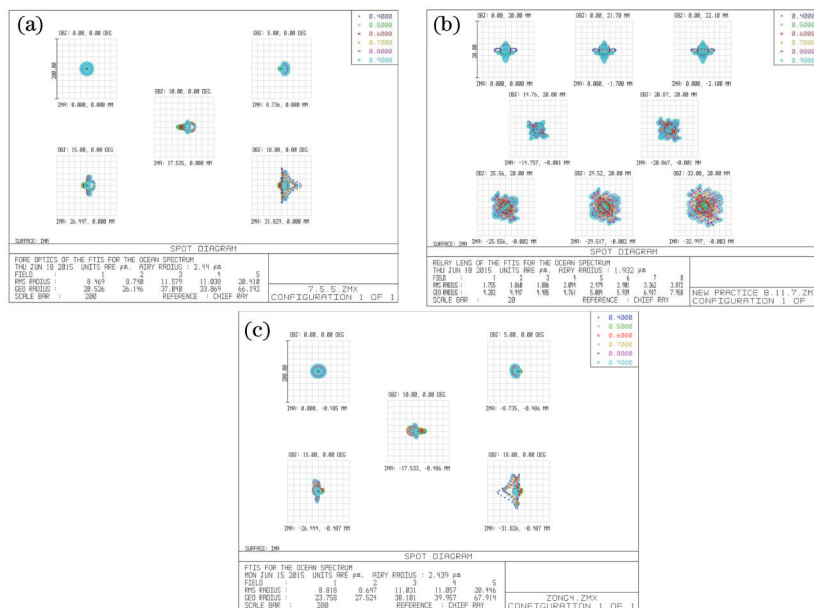


图9 (a) 前置镜的点列图; (b) 中继镜的点列图; (c) 系统的点列图

Fig.9 (a) Spot diagram of fore optics; (b) spot diagram of relay lens; (c) spot diagram of current design

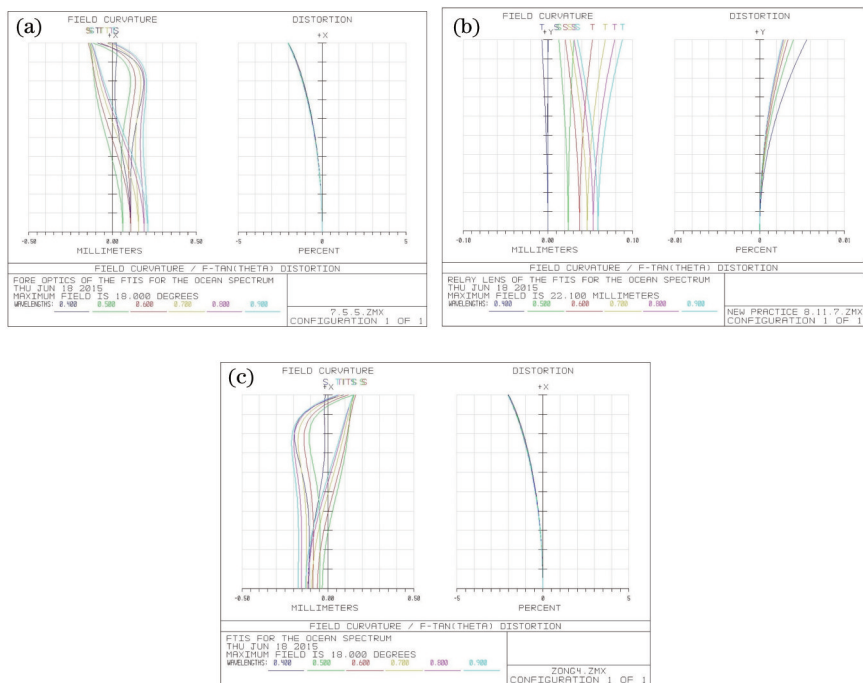


图 10 (a)前置镜的场曲与畸变; (b) 中继镜的场曲与畸变; (c) 系统的场曲与畸变
 Fig.10 (a) Field curvature and distortion of fore optics; (b) field curvature and distortion of relay lens;
 (c) field curvature and distortion of current design

以实现宽视场覆盖,且在宽视场及大相对孔径的条件下具有更好的成像质量,且中继镜长度小于 300 mm,结构更为紧凑。

由设计结果可以看出前置镜和中继镜均满足系统参数,并且成功匹配。在 32 lp/mm 处,前置镜的 MTF 大于 0.5,中继镜的 MTF 大于 0.9,接近衍射极限;前置镜与中继镜均为远心系统,远心度小于 0.02 度;在场曲和畸变方面,中继镜成功限制了这两项像差,场曲小于 0.1 mm,畸变小于 0.005%,而前置镜由于视场较大,畸变未能很好地控制,畸变小于 2%。对于整个系统而言,体积较小,且除了中继镜中的反射镜外,所有透镜表面均为球面,易于加工,在 400~900 nm 波段,系统的 MTF 在 32 lp/mm 处大于 0.5,场曲小于 0.5 mm,畸变小于 2%,所设计的宽视场干涉光谱成像仪满足各项指标,具有良好的成像质量。

4 总 结

研究了基于像平面干涉技术的宽视场干涉光谱成像技术的原理,制定了相应的干涉方案并对光程差进行了分析推导,得出了本系统光程差的公式,制定了相应的系统参数,并根据相关参数设计了干涉光谱仪的光学系统。系统前置镜和中继镜分别以双高斯和 Dyson 为初始结构进行优化,整体系统为折反式,系统 F 数为 4,焦距为 100 mm,在 400~900 nm 的谱段,系统可实现宽视场覆盖,视场为 35.5°,在 500 km 的轨道高度,刈幅宽度为 320 km,地元分辨率为 80 m;在 32 lp/mm 处,系统的 MTF 优于 0.5,具有良好的成像质量。与其他海洋光谱成像仪相比,本系统具有宽视场、能量利用率高、结构简单、系统体积小等优点,但是由于宽视场和像方远心的要求,系统前置镜的成像质量仍有待进一步优化提高。

参 考 文 献

1 Ma Ling, Cui Deqi, Wang Rui, *et al.*. Study and developments of imaging spectrometer technique[J]. Optical Technique, 2006, 32(Suppl): 573-580.
 马 玲, 崔德琪, 王 瑞, 等. 成像光谱技术的研究与发展[J]. 光学技术, 2006, 32(Suppl): 573-580.
 2 Xue Qingsheng. Optical system design of wide field of view and large relative-aperture of hyperspectral imager[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0222003.
 薛庆生. 宽视场大相对孔径高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0222003.

- 3 Dong Ying, Xiang Libin, Zhao Baochang. Analysis of large aperture static imaging spectrometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3): 330-334.
董 瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪的干涉系统分析[J]. 光学学报, 2001, 21(3): 330-334.
- 4 Wang Jincheng, Kuang Cuifang, Wang Yifan, *et al.*. Multispectral fluorescence microscopic imaging based on compressive sensing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1204003.
王金成, 匡翠方, 王轶凡, 等. 基于压缩感知的荧光显微多光谱成像[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1204003.
- 5 Davis C O, Bowles J, Leathers R, *et al.*. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration[J]. Opt Express, 2002, 10(4): 210-221.
- 6 Davis C O. Spaceborne imaging spectrometer for environmental assessment of the coastal ocean[C]. SPIE, 1996, 2817: 224-230.
- 7 Lucke R L, Corson M, McGlothlin N R, *et al.*. Hyperspectral imager for the coastal ocean: instrument description and first images[J]. Appl Opt, 2011, 50(11): 1501-1516.
- 8 Topping M Q, Pfeiffer J E, Sparks A W, *et al.*. Advanced airborne hyperspectral imaging system(AAHIS)[C]. SPIE, 2002, 4816: 1-11.
- 9 Mouroulis P, Green R O, Wilson D W. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer[J]. Opt Express, 2008, 16(12): 9087-9096.
- 10 Liu Yang, Liao Ningfang, Bai Tingzhu, *et al.*. Study of the structure of large aperture ultraviolet Fourier transform imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0330001.
刘 洋, 廖宁放, 白廷柱, 等. 一种大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪结构研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0330001.
- 11 Green R O. Lessons and key results from 30 years of imaging spectroscopy[C]. SPIE, 2014, 9222: 92220B.
- 12 Wang Shuang. Research on the Signal-To-Noise Ratio of the Large Aperture Static Imaging Spectrometer[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Science, 2013: 37-62.
王 爽. 大孔径静态干涉光谱成像仪信噪比研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013: 37-62.
- 13 Liu Guanghong, Wu Gang, Ling Qing, *et al.*. Modeling of Offner imaging spectrometers and aberration analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0322001.
刘光宏, 吴 刚, 凌 青, 等. Offner成像光谱仪建模及像差分析[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0322001.
- 14 Xue Qingsheng, Cao Diansheng, Yu Xiangyang. Optical design of neotype Schwarzschild spectral imaging system with a large relative aperture[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0116001.
薛庆生, 曹佃生, 于向阳. 新型大相对孔径 Schwarzschild 光谱成像系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0116001.
- 15 Sun Jiayin, Liu Ying, Li Chun, *et al.*. Comparative study on performances of long-wave infrared imaging spectrometers based on Offner form and Dyson form[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1030003.
孙佳音, 刘 英, 李 淳, 等. Offner型与 Dyson型长波红外成像光谱仪性能对比研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1030003.
- 16 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316003.
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316003.
- 17 Chen Wei, Xue Chuang. Design of wide field-of-view off-axis three-mirror telescope for imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 42(8): 950-955.
陈 伟, 薛 闯. 用于成像光谱仪的宽视场离轴三反望远镜设计[J]. 光学学报, 2013, 42(8): 950-955.

栏目编辑: 韩 峰