

一种长狭缝均匀色散的 Dyson 棱镜成像光谱仪

范纪泽^{1,2}, 李博^{1*}, 叶新¹, 李寒霜^{1**}, 林冠宇¹¹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 国内外研究的 Dyson 棱镜成像光谱仪有自身像差较小、高透过率等优点。对 Dyson 棱镜式成像光谱仪存在的色散均匀性进行改进,通过分析不同材料棱镜的色散规律,选用了熔融石英及 CaF₂ 材料构成的消色差棱镜组,并采用超环反射面及透镜组校正其余像差。优化得到一种长度为 80 mm 的狭缝、色散较为均匀的 Dyson 棱镜成像光谱仪,同时采用双反物镜结构及拼接狭缝的手段达到总体 200 km 的幅宽要求。结果表明,在 400~2500 nm 波段范围及狭缝长度为 80 mm 的条件下,光谱分辨率为 10 nm,光学系统设计值在 25 lp/mm 截止频率下,调制传递函数大于 0.6。通过各波长色散后的像面光谱位置可以得出,在 400~1200 nm 范围内,色散曲线与拟合直线之间的拟合精度由单材料棱镜时的 0.88 提高到两种材料棱镜时的 0.94,色散均匀性也得到了极大的改善。

关键词 光学设计; 成像光谱仪; 消色差棱镜; Dyson 棱镜

中图分类号 TH744

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1322002

Dyson Prism Imaging Spectrometer with Long Slit and Uniform Dispersion

Fan Jize^{1,2}, Li Bo^{1*}, Ye Xin¹, Li Hanshuang^{1**}, Lin Guanyu¹¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The advantages of small aberration and high transmittance exist in Dyson prism imaging spectrometers studied at home and abroad. The purpose of this paper is to improve the dispersion uniformity of the Dyson prism imaging spectrometer. By analyzing the dispersion law of prisms made of different materials, this paper chooses fused silica and CaF₂ materials to form achromatic prism group, and uses super-ring reflecting surface and lens group to correct other aberrations. Through optimization, a Dyson prism imaging spectrometer with a slit length of 80 mm and uniform dispersion is obtained. At the same time, the structure of double-objective lens and the means of splicing slits are chosen to meet the overall requirement of 200 km swath. The results show that the resolution is 10 nm in 400–2500 nm band and the slit length is 80 mm. The design value of the optical system is under the 25 lp/mm cut-off frequency, and the modulation transfer function is larger than 0.6. According to the spectral position of the image surface after dispersion of each wavelength, we obtain that in the range of 400–1200 nm, the fitting accuracy between the dispersion curve and the fitting line increases from 0.88 in the case of a double material prism to 0.94 in the case of a single material prism, which greatly improves the dispersion uniformity.

Key words optical design; imaging spectrometer; achromatized prism; Dyson lens

1 引言

目前,成像光谱有较大的发展,分辨率较高。但对于地表有机质等微弱信号的探测,往往需要 200 以上的信噪比。由于全息光栅光谱仪的衍射效率仅为

30%,能量通过率低的特点使得检测相关物质的存在成为一个难点。对一些变化极为缓慢的物理化学量进行检测时,仪器的信噪比较低使得全息光栅光谱仪结构更难以进行变化率的检测,因而考虑利用透过率较高的棱镜分光手段。

收稿日期: 2021-12-03; 修回日期: 2022-01-08; 录用日期: 2022-01-20

基金项目: 黑土地保护与利用科技创新工程专项资助(XDA28050102)

通信作者: *libo0008429@163.com; **lihanshuang06@163.com

国外典型设计中, HypsIRI-2018 概念设计中提及的 Dyson 光栅结合方式, 望远系统 F 数为 1.8、全视场为 52° , 且利用两狭缝拼接达到了 180 km 幅宽^[1]。凹面光栅对 400~2500 nm 实现了 7.4 nm 的光谱分辨率, 该结构的整体尺寸较 Offner 基础结构的小。这种光栅分光的方式较棱镜分光方式来讲, 能量利用率较低, 信噪比低一些, 但色散的线性程度比较高。典型的 EO-1 Hyperion 完成了 400~2500 nm 内 10 nm 的光谱分辨率, 在 430~2290 nm 波段内 Landsat-8 上 OLI 传感器的信噪比在 80~130 之间浮动, Spot-7 在 455~890 nm 内的多光谱分辨率为 6 nm, 幅宽为 60 km^[2]。国内 GF-5 采用了 Offner 光栅结构, 利用可见光、红外双通道分别成像^[3], 其在 400~2500 nm 波段内拥有 10 nm 分辨率, 有着与 HypsIRI-2018 光栅结构相似的特性与信噪比。HJ-B 在 430~12500 nm 内的可见光空间分辨率为 30 m, 红外部分空间分辨率为 150 m。Zhuhai-1 在 400~1000 nm 波段内的光谱分辨率为 2.5 nm。

国内对于棱镜成像光谱仪有一定的研究, 如杨晋^[4]的 Dyson 成像光谱仪分别利用两成像光谱仪及不同材料的 Fery 棱镜实现 400~2500 nm 覆盖, 其分辨率为 10 nm, 狭缝长度为 12 mm, 整体调制传递函数 (MTF) 大于 0.7。张云翠等^[5]基于 Fery 棱镜设计的成像光谱仪在 1200 nm 波长位置的 MTF 大于 0.5, 其孔径为 0.03; Nie 等^[6]设计的机载棱镜成像光谱仪在 400~1000 nm 范围内的分辨率可达到 10 nm, 数值孔径为 0.125, 且在截止频率处 MTF 大于 0.7。孙佳音^[7]设计的长波红外成像光谱仪的 F 数为 2, 光谱分辨率为 25 nm, MTF 大于 0.7。冯蕾团队^[8]利用了分色片

实现的成像光谱仪覆盖 400~2500 nm 波段范围, 其 MTF 大于 0.5。

现有在轨运行卫星绝大多数采用光栅分光方法, 其优点在于具有更高的光谱分辨率, 且色散线性度较高。但其较低的信噪比及衍射效率使得对地面微小变化量的测量较为困难。棱镜成像光谱仪相比全息光栅成像光谱仪具有更大的通量, 因此可以达到更高的信噪比, 具有更高的光谱辐射 (光谱辐亮度) 探测灵敏度。综上, 有必要设计一套长狭缝宽谱段均匀色散的成像光谱仪。本文选取 Dyson 小像差初始结构进行设计, 通过材料匹配的方式降低棱镜组的色散非线性, 最终得到一套狭缝长度为 80 mm、像面曲线与拟合结果接近的成像光谱仪系统。

2 Dyson 棱镜成像光谱仪

2.1 指标需求

Dyson 棱镜成像光谱仪系统设计指标如表 1 所示。该成像光谱仪为星载光谱仪, 可对地面微变量进行观测。为有效观测土地中有机物等微变量, 将成像光谱仪的波长范围设置为 400~2500 nm, 光谱分辨率设置为 10 nm。为有效分辨地面小面积特性土壤, 将地面分辨率设置为 30 m。为满足更高的信噪比及更好的观测能量需求, F 数选取为 3。为了合理利用空间布局, 提出利用两狭缝拼接的方法拼接出 200 km 的幅宽, 并将轨道高度设置为 600 km, 以降低对回归周期的需求, 同时可利用卫星侧摆来有效减小重访周期, 从而提高特定区域的时间分辨率。本文探测器为长光辰芯探测器, 空间维像元尺寸为 20 μm , 光谱维像元尺寸为 24 μm 。

表 1 设计指标

Table 1 Design indexes

Index	Value	Index	Value
Height	600 km	Wavelength range	400~2500 nm
Swath	200 km	Focal length	480 mm
GSD (ground sample of distance)	25 m	F	3
Resolution	10 nm	Field of view	9.6°
Coefficient of determination	>0.9	Slit length	80 mm
Pixel size of spectral dimension	24 μm	Root-mean-square radius	<20 μm
Pixel size of spatial dimension	20 μm	MTF	>0.6@25 lp/mm

2.2 成像光谱仪选型

棱镜光谱仪系统具体分为望远物镜组分、成像光谱仪组分及探测器组分, 望远物镜组分有透射式及反射式等, 但考虑到 400~2500 nm 波段范围较大, 透射系统难以校正大量色差, 并且有较多的组分使得整体结构冗长且沉重。因此, 考虑使用离轴式的两反结构, 以降低整体的质量、减小轴向尺寸。

成像光谱仪部分原则上可选用 Dyson 或 Offner 的基础结构, 再结合光栅或棱镜的方式进行设计, 但如前文所说的一些反射极低的物质, 光栅的衍射效率在 30% 附近, 同时存在较低的信噪比, 使得检测效果急剧下降, 于是考虑利用棱镜色散的方式进行成像光谱

仪设计。设计过程中考虑了 Offner 结合曲面棱镜的设计思路, 但因其在两轴向上的尺寸都较大, 进而考虑利用 Dyson 结构结合曲面棱镜的方式进行设计, 该设计组成如图 1 所示。

2.3 Dyson 棱镜成像光谱仪原理

图 1 中从左至右分别为透镜组分、棱镜组分及代替凹面光栅位置的凹面反射镜组分。其中透镜组分主要用来校正系统像差, 因此常用非球面。棱镜组分的主要作用为提供色散, 因大多数棱镜拥有偏心角度及离轴量, 所以本方案中并不对该组分设置非球面。凹面反射镜主要通过提供光路回射角度来控制光线合理性, 于是在此位置设置光阑。同时, 由于该凹面对像差

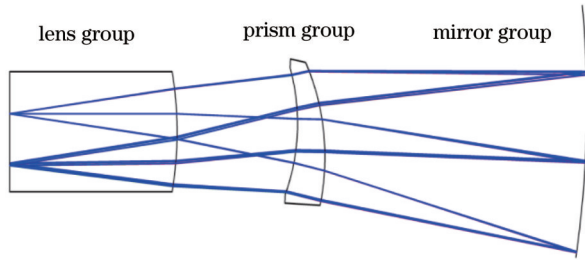


图 1 Dyson 棱镜式成像光谱仪

Fig. 1 Dyson prism imaging spectrometer

较为敏感,在该位置设置超环面以进一步降低像差。其中,在棱镜组中利用不同材料之间的色散差异并通过选用不同材料可达到均匀色散的目的。

从望远系统出射的光线经由棱镜组校正像差后,通过棱镜组进行分光处理,可使不同波长的光以不同的入射角度进入凹超环反射面,通过调整该面的角度使得最终出射光高度合理,在像面位置设置探测器靶面以接收成像。基于上述讨论,提出将传统离轴两反射镜、Dyson 基础结构及棱镜分光组分融合的成像光谱仪结构,并对初始结构进行计算和优化。

3 Dyson 棱镜成像光谱仪光学系统设计

3.1 组分分析与参数确定

3.1.1 望远系统组分分析与参数确定

两反射面不同的凹凸结构可组成 4 组形式,而凹凸反射系统可成像且容易实现反远距要求,能更好地承担该设计中的大视场任务。该反射系统如图 2 所示。图中 M_1 和 M_2 为反射镜, d_1 为两镜距离, d_2 为像面到次镜的距离。

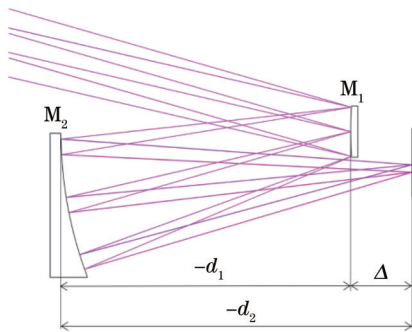


图 2 凹凸反射镜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of concave-convex mirrors

在衔接前后系统时,望远系统的场曲会降低成像光谱仪系统的光通量,因此整体需满足平像场条件,根据文献[9]中的计算方法,有

$$\Delta = f' + \frac{R_1}{2} - \frac{R_1^2}{4f'}, \quad (1)$$

式中: R_1 、 f' 分别为曲率半径及焦距; Δ 为像方伸出量, $\Delta > 200$ mm。计算求得光阑位置即第一反射面的曲率半径 $R_1 = 800$ mm, 将其代入结构中进行进一步

优化。

3.1.2 成像光谱仪棱镜组分材料与参数的确定

因 Dyson 结构的成像光谱仪内部选用 Fery 棱镜进行成像,为较为方便地选取材料,下面将 Fery 棱镜简化为三角棱镜^[10]。不同于光栅的线性色散,棱镜分光时色散的非线性是需要考虑的问题。

单一棱镜材料的相关折射率可表示为

$$n = \sqrt{A + \frac{B}{\lambda^2 - C} - D\lambda^2} = n_1(\lambda) + Kn_2(\lambda^2, \lambda^3, \dots), \quad (2)$$

式中: n 为折射率; A 、 B 、 C 、 D 为材料相关折射系数; K 为色散率; $n_1(\lambda)$ 为一阶线性量; $n_2(\lambda^2, \lambda^3, \dots)$ 为折射率随波长变化的高阶非线性量。式(2)的泰勒展开式为

$$n_{\text{Taylor}} = \sqrt{A} - \frac{BD}{4\sqrt[3]{A}} + \left(\frac{B}{2\sqrt{A}} + \frac{BCD}{4\sqrt[3]{A}} \right) \lambda^{-2} - \frac{D}{2\sqrt{A}} \lambda^2 = C_{\text{Taylor}} + L_1 \lambda^{-2} - L_2 \lambda^2, \quad (3)$$

式中: C_{Taylor} 为线性量; L_1 和 L_2 为非线性量, $L_1 = \frac{B}{2\sqrt{A}} + \frac{BCD}{4\sqrt[3]{A}}$, $L_2 = \frac{D}{2\sqrt{A}}$ 。本设计中中心波长为 $1.5 \mu\text{m}$, 则有

$$n_{\text{Taylor}} = C_{\text{Taylor}} + 0.45L_1 - 2.25L_2. \quad (4)$$

由式(4)可见,非线性参量 L_2 对非线性更为敏感。双棱镜的色散特性可写为

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: L 为双棱镜搭配下的整体色散矩阵。式(5)第一行表征第一种材料的非线性参量,第二行表征第二种材料的非线性参量。若要尽量满足双棱镜色散的非线性,就要满足非线性参量接近条件,有

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{11} & L_{12} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

根据图 3,棱镜特性还与顶角有关,则有

$$\delta = 2\arcsin \left\{ n \sin \left[\frac{\alpha}{2} \frac{\cos\left(\frac{I_1' + I_2}{2}\right)}{\cos\left(\frac{I_1 + I_2'}{2}\right)} \right] \right\} - \alpha, \quad (7)$$

式中: δ 为光偏向角; I_1 、 I_1' 分别为光线入射第一表面时

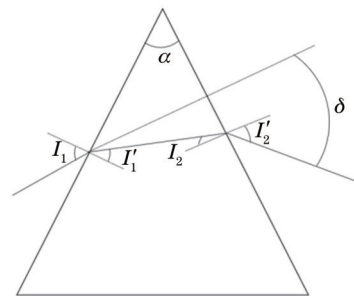


图 3 棱镜色散示意图

Fig. 3 Prism dispersion diagram

的入射角、折射角; I_2 、 I_2' 分别为光线由第二表面出射时的出射角、折射角; α 为三角形的顶角。因为三角函数会引入色散的非线性因素, 考虑利用不同的棱镜材料、顶角对非线性进行校正。因 Fery 棱镜组的非线性色散与材料、入射角、曲率半径、厚度、间隔相关, 为简化选取材料步骤, 将 Fery 棱镜简化为等腰胶合三棱镜, 且选取两形状相同、材料不同的配合形式进行分析。双胶合棱镜色散示意图如图 4 所示。图中 α_1 为等腰棱镜顶角, α_2 为等腰棱镜底角, i_{11} 、 i_{12} 为光线入射第一表面时的入射角、折射角, i_{21} 、 i_{22} 为光线入射第二表面时的入射角、折射角, i_{31} 、 i_{32} 为光线入射第三表面时的入

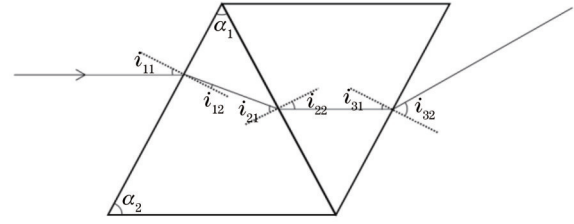


图 4 双胶合棱镜色散示意图

Fig. 4 Dispersion diagram of double glued prism

射角、折射角, 前后两块棱镜折射率分别为 n_1 、 n_2 , 双棱镜角色散率表达式为

$$R = \frac{d\delta}{d\lambda} = \left[\frac{\sin i_{12}}{n_2 \cos i_{22}} - \frac{\cos i_{12} \sin i_{11}}{n_1 n_2 \cos i_{12} \cos i_{22}} + \frac{\sin i_{11}}{n_1^2 \cos i_{12}} + \frac{\sin i_{12}}{\sqrt{1 - n_2^2 \sin^2 i_{22}} \cos i_{22}} \right] \frac{dn_1}{d\lambda} + \left[\frac{\sin i_{22}}{\sqrt{1 - n_2^2 \sin^2 i_{22}}} - \frac{n_1 \sin i_{12}}{n_2^2 \cos i_{22}} - \frac{n_1 \cos i_{22} \sin i_{12}}{n_2 \sqrt{1 - n_2^2 \sin^2 i_{22}} \cos i_{22}} \right] \frac{dn_2}{d\lambda}, \quad (8)$$

式中: $\sin i_{11} = n_1 \sin i_{12}$, $n_1 \sin i_{21} = n_2 \sin i_{22}$, $i_{21} = i_{12} - \alpha_1 + \alpha_2$ 。根据式(8), 将 α_1 即棱镜顶角设置为 $5^\circ \sim 15^\circ$, 以利于后续结构设计。

为便于前期设计, 将棱镜设置为胶合形式, 在后期整体设计时, 为满足更多应用环境尤其是空间应用的要求, 将其分离并进行微小调整。

在本设计中由于幅宽较大, 且组分较少, 可供选择的变量随之变少, 于是便引用了超环面。本设计中超环面反射表面承担的主要任务是像差校正以及调整像方位置。在具体应用过程中, 通过改变该表面的放置位置及倾角, 使得光束经由后方光学系统后, 像点在像方

焦面的高度被改变。再结合 Dyson 系统改变倾角及位置, 使得物像距离产生从大致重合到逐渐分离的变化过程。

3.2 光学系统设计

3.2.1 望远系统光学系统设计

将表 1 的望远系统参数及 3.1.1 节求得的第一面曲率半径 800 mm 代入初始结构, 以焦距 480 mm 进行约束, 并进行系统优化。本文在设计过程中, 在两个不同视场像方分离处添加反射镜, 将光路进行折转, 以便对接两成像光谱仪组分。其中, 两像面位置即狭缝放置位置。图 5 为物镜组分的设计结果。

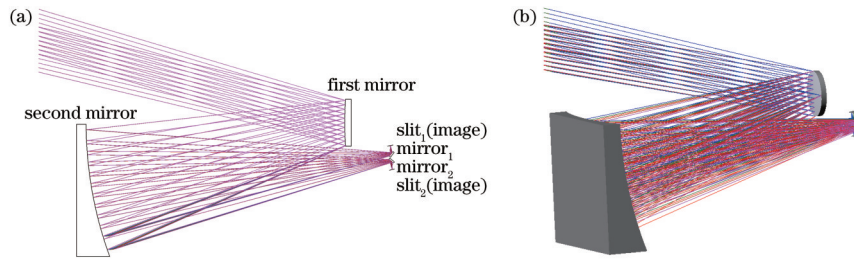


图 5 反射系统设计结果图。(a) 二维图; (b) 三维图

Fig. 5 Design results of reflecting system. (a) Two-dimensional graph; (b) three-dimensional graph

图 5 中不同角度的入射光经由第一、第二反射面后, 在出射时将会有相应的夹角。利用该特点在 $mirror_1$ 、 $mirror_2$ 处设置折转镜, 使得两狭缝(像面)位置上下分离, 以对接两个成像光谱仪。系统 MTF 曲线如图 6 所示。

在长波及短波不同位置处, 因波长跨度过大, 实际反射系统对于长短波的像质有一定的差异, 但 MTF 均大于 0.6。在长短波全视场下, 望远部分均方根(RMS)为 $9.5 \sim 11 \mu m$, 相差不大, 均符合设计指标, 可以进行后续的衔接。

将成像光谱仪的数值孔径设置为 0.16, X 向高度设置为狭缝半长度即 40 mm, Y 向高度设为 10 mm, 利用 Silica 及 CaF_2 两种材料进行色差的校正, 三块棱镜材料分别为 Silica、 CaF_2 和 Silica, 利用透镜组及超环反射面进行像差的校正。设置棱镜顶角为 $5^\circ \sim 15^\circ$, 在 len_3 位置的透镜设置非球面变量, 将初始参数代入结构中进行优化。在优化过程中, 调整棱镜顶角数值, 以满足色散宽度及像面线性效果, 通过调整 $mirror_1$ 的倾斜角度, 使得最终从透镜表面出射的光路可被折转出系统。对于 $mirror_2$ 要恰当地进行偏心及角度设置, 使

主光线穿过其中心位置,其结构如图 7 所示。

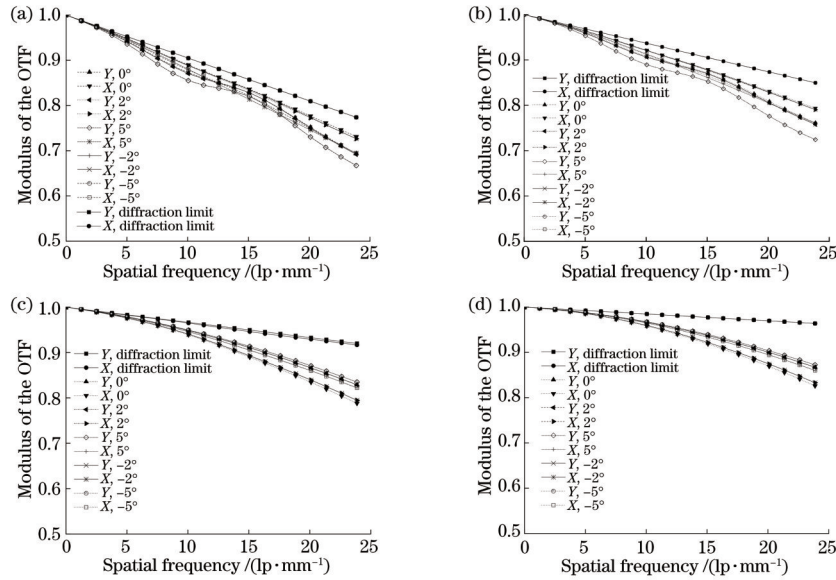


图 6 望远系统 MTF 曲线图。(a) 2500 nm; (b) 1700 nm; (c) 900 nm; (d) 400 nm
Fig. 6 MTF curves of telescope system. (a) 2500 nm; (b) 1700 nm; (c) 900 nm; (d) 400 nm

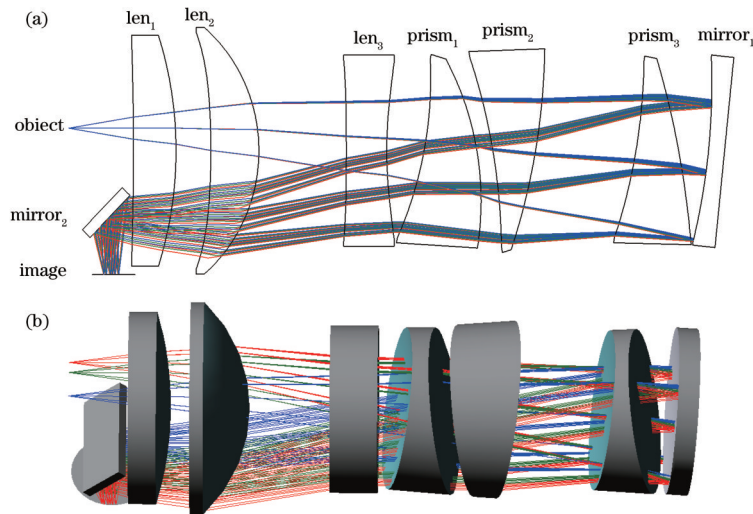


图 7 Dyson 成像光谱仪设计结果。(a) 二维图; (b) 三维图
Fig. 7 Design results of Dyson imaging spectrometer. (a) Two dimensional graph; (b) three dimensional graph

如图 7(a)所示,入射光经由透镜组、棱镜组及超环反射面 mirror₁后由原系统以一定角度出射,经折转反射镜 mirror₂后光路被折转,使得最终像面即探测器靶面有合理的安装位置。为合理地配置探测器 image 及狭缝 object 位置,将物距及像距设为 80 mm,像距中,将 mirror₂与前方透镜的距离设置为 30 mm,将 mirror₂与成像面的距离设置为 50 mm。图 8 为 Dyson 成像光谱仪的 MTF 曲线。

由图 8 可看出,全波段全视场条件下 MTF 大于 0.7 且 RMS 均小于 12 μm,满足成像要求,下面准备将反射物镜组分及成像光谱仪组分进行衔接。

将望远组分及成像光谱仪组分进行拼接,在望远系统像面位置放置狭缝并将成像光谱仪物点设置在该处,对望远组分的折转镜角度进行调整,使得上下两个

谱仪对称分布,最终得到整体结构如图 9 所示。

图 9 中两个成像光谱仪对称分布于上、下两侧,且将最终成像位置折转出系统外部利于探测器的放置,这可在满足 200 km 幅宽的条件下尽可能地满足空间合理性。在连接望远系统和成像光谱仪时,将像面的角度设置为变量进行微小的调整,以获得较优的像质。整体结构 MTF 如图 10 所示。

由图 10 可见,各波长位置处的 MTF 均大于 0.6,望远物镜部分对整体结果影响较大,本文主要介绍一种长狭缝均匀色散的成像光谱仪,对望远系统指标的要求并不是很严格,且整体 RMS 小于 12 μm,成像良好。

图 11 为像面能量分布情况,可看出在 20 μm 即一个像元尺寸中各波长视场条件下可以满足 0.85 以上的能量集中度,这利于探测器接收信息。

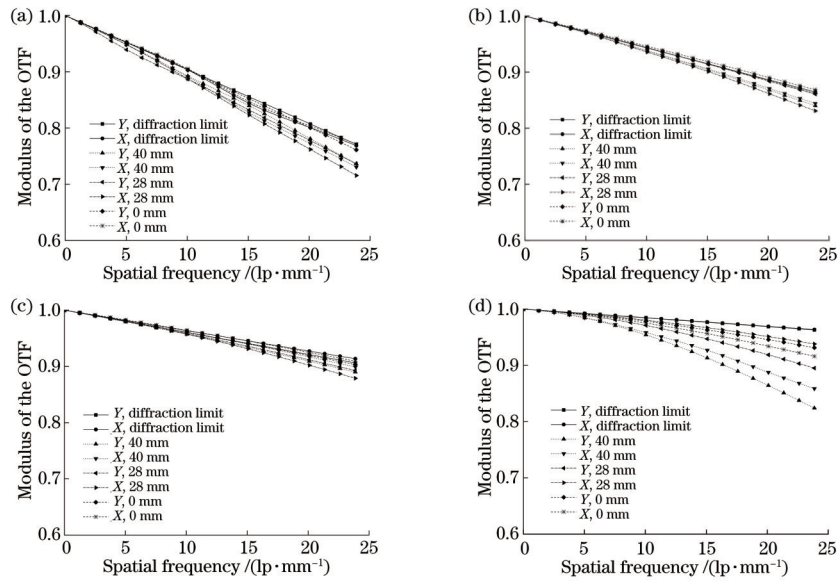


图 8 成像光谱仪组分 MTF 曲线图。(a) 2500 nm; (b) 1700 nm; (c) 900 nm; (d) 400 nm
 Fig. 8 MTF curves of imaging spectrometer components. (a) 2500 nm; (b) 1700 nm; (c) 900 nm; (d) 400 nm

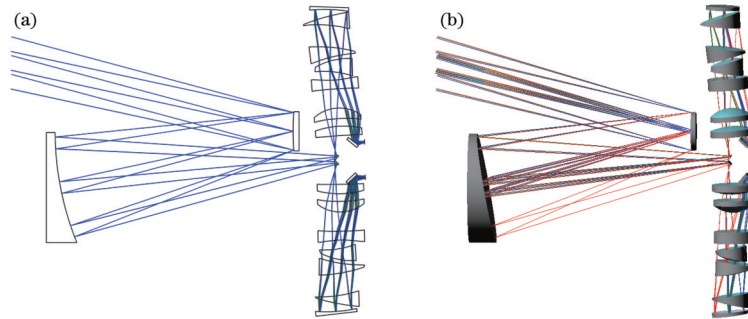


图 9 整体结构拼接结果。(a) 二维图; (b) 三维图
 Fig. 9 Overall structure splicing results. (a) Two dimensional graph; (b) three dimensional graph

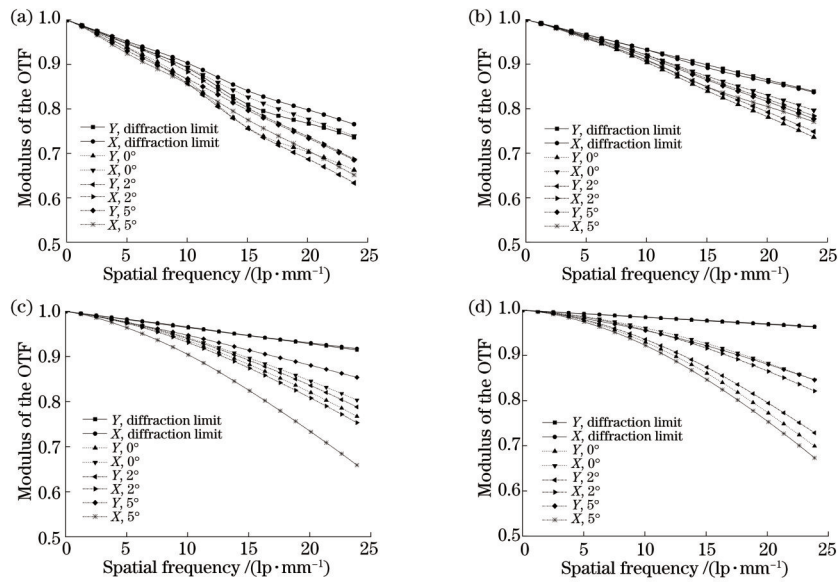


图 10 整体结构 MTF 曲线。(a) 2500 nm; (b) 1700 nm; (c) 900 nm; (d) 400 nm
 Fig. 10 MTF curves of integral structure. (a) 2500 nm; (b) 1700 nm; (c) 900 nm; (d) 400 nm

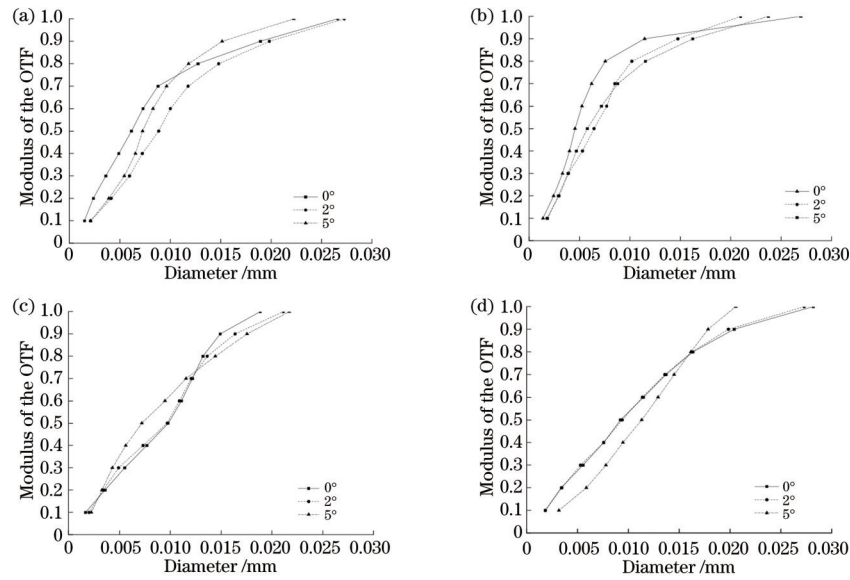


图 11 能量集中度曲线。(a) 2500 nm; (b) 1700 nm; (c) 900 nm; (d) 400 nm

Fig. 11 Energy concentration curves. (a) 2500 nm; (b) 1700 nm; (c) 900 nm; (d) 400 nm

图 12(a)为本文提及的成像光谱仪的像面光谱位置曲线,图 12(b)为同样结构下利用单一 Silica 材料优化得到的像面色散位置曲线。各图中直线为线性拟合情况,曲线为实际系统波长与色散位置的关系。可看出 Silica 及 CaF_2 搭配可得到较单一 Silica 更接近测量

曲线的拟合直线。在 400~1200 nm 波段,通过计算各图中两条曲线的决定系数,可得色散曲线与拟合直线之间的拟合精度由单材料棱镜时的 0.88 提高到两种材料棱镜时的 0.94,这极大地改善了色散均匀性,且利用两种材料的成像质量较单一材料的更好。

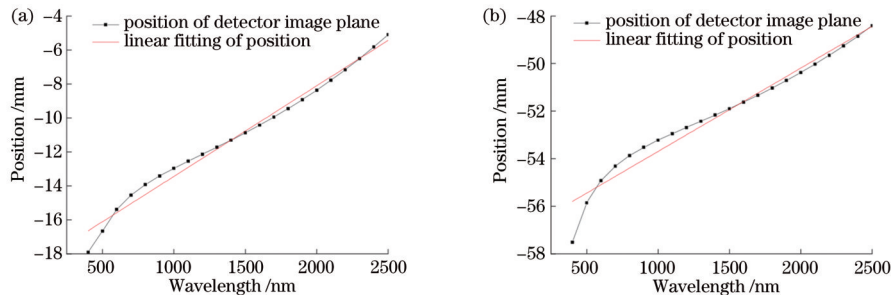


图 12 线性色散曲线图。(a)两种棱镜材料像面光谱位置曲线;(b)单一棱镜材料像面光谱位置曲线

Fig. 12 Linear dispersion curves. (a) Spectral position curves of image plane of two prism materials;

(b) spectral position curves of image plane of single prism material

4 结 论

通过对 Silica 及 CaF_2 材料进行色散的线性校正,配合透镜组及超环反射面综合控制像差,使得系统在满足分辨率及像质的条件下,能够兼顾探测器焦面位置色散的线性程度。通过对材料的选取及合理地分配组分任务,在 80 mm 狭缝长度下,光学系统设计值 MTF 大于 0.6, RMS 小于 12 μm , 满足光谱分辨率 10 nm 的需求,且能量分布集中,谱线性度高。这为地面微量及缓慢变化的观测量提供了高能量利用率及较光栅更高信噪比的方案。

本设计在 400~2500 nm 波段范围有较好的线性特征,该成像光谱仪在 300~400 nm 范围内仍然满足 10 nm 光谱分辨率需求,但线性较差,可通过增加棱镜数量及 ZF10 材料等进行色散线性的改进,但同时要考

虑整体过于沉重及引入像差的问题。另外,若将该结构设定为覆盖 400~900 nm、900~2500 nm 时,狭缝长度可达 100 mm。

参 考 文 献

- [1] HypsIRI Mission Concept Team. HypsIRI final report [EB/OL]. (2018-10-05)[2021-04-09]. https://hypsiri.jpl.nasa.gov/downloads/reports_whitepapers/HypsIRI_FINAL_Report_1.
- [2] Kramer H J. SPOT-6 and SPOT-7 commercial imaging constellation[EB/OL]. [2021-08-14]. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/spot-6-7>.
- [3] 刘银年,孙德新,胡晓宁,等.高分五号可见短波红外高光谱相机设计与研制[J].遥感学报,2020,24(4):333-344.
Liu Y N, Sun D X, Hu X N, et al. Development of

- visible and short-wave infrared hyperspectral imager onboard GF-5 satellite[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(4): 333-344.
- [4] 杨晋. 光谱成像仪同心光学系统设计与优化研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012: 35-42.
Yang J. The study on optical design and optimization of concentric imaging spectrometers[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 35-42.
- [5] 张云翠, 刘龙, 曹冠英, 等. Fery 棱镜光谱仪设计[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 287-289.
Zhang Y C, Liu L, Cao G Y, et al. Design of spectrograph with novel Fery prism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 287-289.
- [6] Nie Y F, Bin X L, Zhou J S, et al. Design of airborne imaging spectrometer based on curved prism[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8197: 81970U.
- [7] 孙佳音. 基于 Dyson 结构的长波红外高光谱成像光谱仪光学系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016: 45-90.
Sun J Y. Study on optics system of long-wave infrared hyperspectral imaging spectrometer base on Dyson form [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 45-90.
- [8] 冯蕾, 魏立冬, 杨雷, 等. 双通道曲面棱镜高光谱成像系统设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0511002.
Feng L, Wei L D, Yang L, et al. Design of double-channel hyperspectral imaging system based on curved prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0511002.
- [9] 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 Z P, Zhao Z C, 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.
- [10] 杨秋杰, 秦侠格, 何志平, 等. 基于材料补偿的线性色散组合棱镜研究[J]. *红外*, 2017, 38(5): 12-18, 36.
Yang Q J, Qin X G, He Z P, et al. Study of compound prisms with linear dispersion based on material compensation[J]. *Infrared*, 2017, 38(5): 12-18, 36.