

Offner 型与 Dyson 型长波红外成像光谱仪 性能对比研究

孙佳音^{1,2} 刘 英^{1*} 李 淳¹ 刘建卓¹ 张晓龙^{1,2} 孙 强¹

(¹ 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 针对传统长波红外成像光谱仪难以同时实现弱遥感信号下高信噪比和小型化的现状,在数值孔径 NA 为 0.19 和 0.33,工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 下,设计并对比分析了两种具有同心结构的 Offner 凸面光栅和 Dyson 凹面光栅光谱仪,借助 Zemax 软件,获得了它们的最优解。当 $NA_1=0.19$ 时,两者均能理想成像,Offner 结构大小为 $245\ \text{mm}\times 213\ \text{mm}\times 111\ \text{mm}$,调制传递函数(MTF)大于 0.38,光谱分辨率为 35 nm,谱线弯曲小于 4.8%,色畸变小于 12.8%;Dyson 结构大小为 $308\ \text{mm}\times 61\ \text{mm}\times 49\ \text{mm}$,MTF 大于 0.48,光谱分辨率为 12 nm,谱线弯曲小于 0.047%,色畸变小于 0.138%。当 $NA_2=0.33$ 时,Offner 结构无法理想成像,Dyson 结构仍有很好的像质,大小为 $317\ \text{mm}\times 88\ \text{mm}\times 88\ \text{mm}$,MTF 大于 0.71,光谱分辨率为 1 nm,谱线弯曲小于 0.015%,色畸变小于 0.028%。设计结果表明,长波红外波段中,相对于 Offner 结构,Dyson 结构具有数值孔径大、体积小、光谱分辨率和传递函数高以及谱线弯曲和色畸变小的优点。

关键词 光谱学;长波红外成像光谱仪;数值孔径;Dyson;Offner

中图分类号 TH744; TN214

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.1030003

Comparative Study on Performances of Long-Wave Infrared Imaging Spectrometers Based on Offner Form and Dyson Form

Sun Jiayin^{1,2} Liu Ying¹ Li Chun¹ Liu Jianzhuo¹ Zhang Xiaolong^{1,2} Sun Qiang¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract In view of the difficulties in traditional long-wave infrared imaging spectrometer which is hard to realize a high signal-to-noise ratio and miniaturization as well under the weak remote sensing signal, two types of concentric optical systems, Offner convex grating and Dyson concave grating imaging spectrometers, are designed and analyzed under the common numerical apertures (NA) of 0.19 and 0.33 with spectral range of $8\sim 12\ \mu\text{m}$. The optimal structures are achieved by optical design software Zemax. The two structures both have a perfect image at $NA_1=0.19$, the size of Offner structure is $245\ \text{mm}\times 213\ \text{mm}\times 111\ \text{mm}$, value of modulation transfer function (MTF) is higher than 0.38, spectral resolution is 35 nm, smile is lower than 4.8% and keystone is lower than 12.8%. The size of Dyson structure is $308\ \text{mm}\times 61\ \text{mm}\times 49\ \text{mm}$, value of MTF is higher than 0.48, spectral resolution is 12 nm, smile is lower than 0.047% and keystone is lower than 0.138%. Dyson has an ideal image at $NA_2=0.33$ different from Offner. The size of Dyson structure is $317\ \text{mm}\times 88\ \text{mm}\times 88\ \text{mm}$, value of MTF is higher than 0.71, spectral resolution is 1 nm, smile is lower than 0.015% and keystone is lower than 0.028%. It is obvious that Dyson structure possesses advantages of larger numerical aperture, smaller volume, higher spectral resolution, higher MTF, lower smile and lower keystone in long-wave infrared wavelengths compared with Offner structure.

Key words spectroscopy; long-wave infrared imaging spectrometer; numerical aperture; Dyson; Offner

OCIS codes 300.6320; 300.6340; 230.1950

收稿日期: 2014-04-30; 收到修改稿日期: 2014-05-29

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ14051702)、吉林省科技厅项目(20140204030GX)

作者简介: 孙佳音(1988—),女,博士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: superjiayin@163.com

导师简介: 孙 强(1971—),男,博士,研究员,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: liuy613@163.com

1 引 言

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代发展起来的新型遥感技术,通过成像技术和光谱技术的结合,可同时获取目标图像信息和光谱信息。波长为 8~14 mm 的长波红外作为大气窗口之一,具有良好的大气穿透性,且很多化学物质在此波段内具有丰富的分子“指纹”光谱特性。长波红外成像光谱仪因具有保密性好、昼夜连续工作、受天气影响较小(可穿透雾、霭、雨、雪)等优点,在陆地海洋地理遥感,大气、土壤和水体的污染物遥感监测,军事目标侦查探测等军民领域,发挥着越来越重要的作用^[1-2]。

国外在长波红外成像光谱仪方面的研究起步较早,1997 年,美国 JPL 实验室报导了一台长波红外成像光谱仪(TIRIS),主要用于气体的检测,其工作波段为 7~14 μm ,光谱分辨率为 100 nm ^[3];1998 年,美国夏威夷大学研制出红外成像光谱仪(AHI),主要用来寻找埋在地下的矿物质^[4];2000 年之后,有更多的单位展开了对长波红外成像光谱仪的研究。我国长波红外成像技术与国际水平差距较大,只有极少数科研单位在开展预研,如中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院安徽光学精密机械研究所等,他们的设计都是以平面光栅作为分光元件,或者是提高了系统的信噪比而没有减小系统大小,或者减小了光谱仪的体积而没有提高系统的信噪比,没有从根本上解决高信噪比与小型化之间的矛盾^[5-6]。

同心光学系统是由一系列折、反射球面组成的具有同一个球心的光学系统,基于同心结构的光栅光谱仪结构简单紧凑、体积小、重量轻、数值孔径(NA)大、谱线弯曲和色畸变小,并且可以在焦平面处得到 1:1 放大倍率的像,Offner 结构与 Dyson 结构是两种典型的同心结构^[7]。近年来,具有同心结构的 Offner 型凸面光栅光谱仪与 Dyson 型凹面光栅光谱仪因兼有高信噪比和小体积而得到关注。在可见/近红外和短波红外波段,由于系统对数值孔径要求不大,且 Offner 结构具有对材料要求低及无色差等优势,因而得到了广泛的应用^[8-9],但是这两种结构在长波红外成像光谱仪中孰优孰劣尚未见报道。

针对长波红外成像光谱仪国内外发展现状和研究的不足,本文在不同的数值孔径下,分别设计了 Offner 型与 Dyson 型光栅光谱仪,并对两种结构光谱仪的性能进行了比对研究,以作为光谱仪设计选型中的参考。

2 长波红外成像光谱仪技术指标的确定

在长波红外波段,自然界物体的辐射能量较弱,探测器灵敏度较低、噪声电压高、需要光学系统接收更多的入射辐射才能满足能量要求,因此需采用较低的 F 数以获得较高的信噪比。为了对比长波红外谱段中 Offner 型与 Dyson 型光栅光谱仪系统体积、重量以及成像性能,分别以 2.5、1.5 作为系统的 F 数来进行比对研究。

图 1 为光栅型成像光谱仪光学系统的原理设计图,它由前置望远系统和光谱分光系统组成,二者由狭缝连接在一起。其中,光谱分光系统的选择和设计直接影响着整个成像光谱仪的性能、结构的复杂程度、重量和体积等^[10]。光谱分光系统又由准直镜、衍射光栅、会聚镜组成。前置望远系统的 F 数即为光学系统的 F 数,为了保证整个系统的能量利用率,光谱分光系统的物方数值孔径应与望远系统的像方数值孔径一致。对于之前给出的两个 F 数,光谱分光部分的物方数值孔径应分别为 $NA_1 = 0.19$, $NA_2 = 0.33$ 。

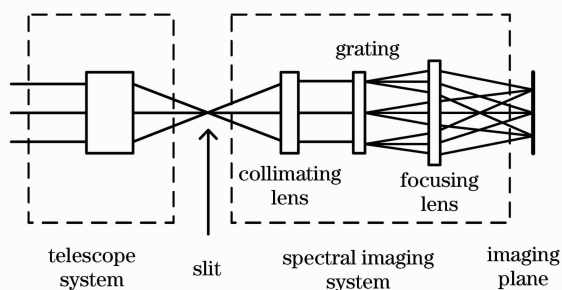


图 1 成像光谱仪原理图

Fig. 1 Schematic of imaging spectrometer

为了保证系统具有足够的能量响应度,选用制冷型长波红外 HgCdTe 探测器作为系统的探测元件,其像素数为 256×256 ,像素大小 $a = 40 \mu\text{m}$ 。由于光谱成像系统的放大率为 1,因此狭缝大小即望远系统的像面尺寸,为 $10.24 \text{ mm} \times 40 \mu\text{m}$ 。通常 8~14 μm 波段常用的光栅刻线数为 20、50、75、100、150 line/mm ^[6]。在工作于长波红外波段的 Offner 结构中,太大的色散值会使像质变差,因此选择 20 line/mm 的光栅,此时光栅常数 $d = 50 \mu\text{m}$ 。光栅的衍射方程可表示为

$$d(\sin i \pm \sin \theta) = m\lambda, \quad (1)$$

式中 d 为光栅常数, i 和 θ 分别为入射角和衍射角, m 为衍射级次, λ 为衍射波长。当衍射光线和入射光线位于光栅法线同侧时, (1) 式取正号, 反之取负号。为获得较好的成像质量以及较高的能量利用率,在

Offner 型光栅中选取 $m = -1$ ，在 Dyson 型光栅中选取 $m = +1$ 。根据光栅的线色散公式：

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{mf'}{d \cos \theta}, \quad (2)$$

式中 dl 、 $d\lambda$ 分别为探测器像素尺寸与单个像素对应的光谱分辨率， f' 为会聚镜组焦距。中心工作波长 $\lambda_0 = 10 \mu\text{m}$ 处的衍射角 θ 较小，约为 0° 。为保证全工作波段经光栅衍射后的色散宽度恰好为探测器光谱维大小，即令

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{Na}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (3)$$

式中 N 为探测器的光谱维像素数， λ_1, λ_2 为工作最小与最大波长。计算得到成像物镜焦距 $f' = 128 \text{ mm}$ 。表 1 给出了光谱仪分光系统的设计指标。

表 1 光谱仪分光系统的设计指标

Table 1 Polychromator performance parameters of spectrometer

Performance parameter	Value
Spectral range	8~12 μm
NA	0.19, 0.33
d	50 μm
Diffraction orders in Offner	-1
Diffraction orders in Dyson	+1
Slit size	10.24 mm×40 μm
Imaging lens focal length	128 mm

3 两种同心光栅光谱仪结构特点与设计分析

3.1 Offner 型光栅光谱仪

Offner 结构由一个凹面反射镜 (M1) 和一个凸面反射镜 (M2) 组成，其半径分别为 R_1, R_2 ，M2 为系统的光阑且位于 M1 的焦平面处，两面反射镜拥有共同的球心 C ，如图 2 所示。由于系统光阑位于凹面镜焦平面处，在不考虑球差的情况下，系统为远心系统，入射光线平行于出射光线，能够理想成像。然而由于主光线球差的存在，入射光线并不平行于出射光线。当且仅当球心到入射光线的距离 $H = \frac{R_1 \sqrt{4R_2^2 - R_1^2}}{2R_2}$ 时，入射光线可以与出射光线平行。

在主光线与物像平面垂直且孔径角 u 不大 ($NA \leq 0.18$) 的情况下，Offner 结构中可以找到这样一个“无”像差的细环视场，其半径满足球心到入射光线的距离为 H ，此时出射光线与入射光线可基本保持平行，细环视场内的物点可以近似视为理想成像^[11]。

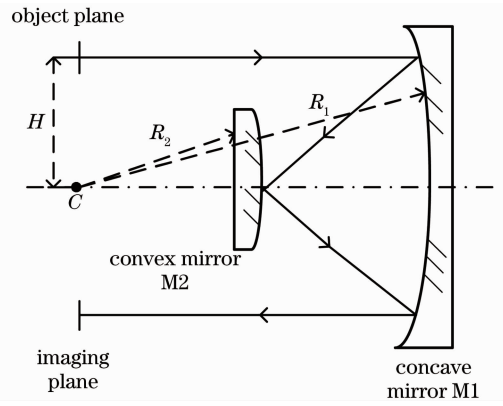


图 2 Offner 同心结构示意图

Fig. 2 Schematic of Offner concentric system

根据 Offner 同心系统的结构特点，将凸面反射镜换为凸面反射光栅，并以表 1 中的数据作为设计指标，用 Zemax 软件分别设计了具有不同数值孔径的 Offner 型光谱仪。为降低加工难度，系统中不采用非球面镜。由于光栅的引入，破坏了光线的对称性，产生了较大的像散。优化时，先去掉系统的同心性，并将凹面反射镜分为两部分，以增加系统的自由度，在光线不被遮挡的前提下，通过改变各元件的半径、各元件间的距离以及控制各元件的偏心来获得理想的像。

$NA_1 = 0.19$ 时，经优化得到如图 3(a) 所示的光路图，系统大小为 $245 \text{ mm} \times 213 \text{ mm} \times 111 \text{ mm}$ 。在中心波长为 $12 \mu\text{m}$ 处，系统最大的点斑均方根半径约为 $25.6 \mu\text{m}$ ，接近衍射极限；在特征频率 12.5 lp/mm 处调制传递函数 (MTF) 为 0.38，如图 3(b) 所示，光谱分辨率为 35 nm ，如图 3(c) 所示，系统的谱线弯曲小于 4.8% ，色畸变小于 12.8% 。以上性能参数均符合成像的要求。

$NA_2 = 0.33$ 时，由于系统存在较大的高级球差和像散 (如图 4 所示)，难以通过面型、镜面间隔、离轴量等参数的调整，获得良好的成像和分光效果。经优化，在波长为 $12 \mu\text{m}$ 处，系统中最大的点斑均方根半径远远大于艾里斑半径。

可见 Offner 结构难以在较大数值孔径时实现理想成像。此外，由于系统采用的是单一的反射式结构，为使光线不被遮挡，光路中必须有较大的离轴量，所以系统的总体积较大。在空间适应性方面，由于系统采用的是反射式结构，因此不用考虑光学材料的折射率受温度变化影响而带来的像面偏移，加入光栅后的 Offner 结构在对称性上受到了一定的影响，尤其是优化时对 M1 和 M3 的偏心的控制，使对称性受到了进一步的破坏，加上结构本身的体积

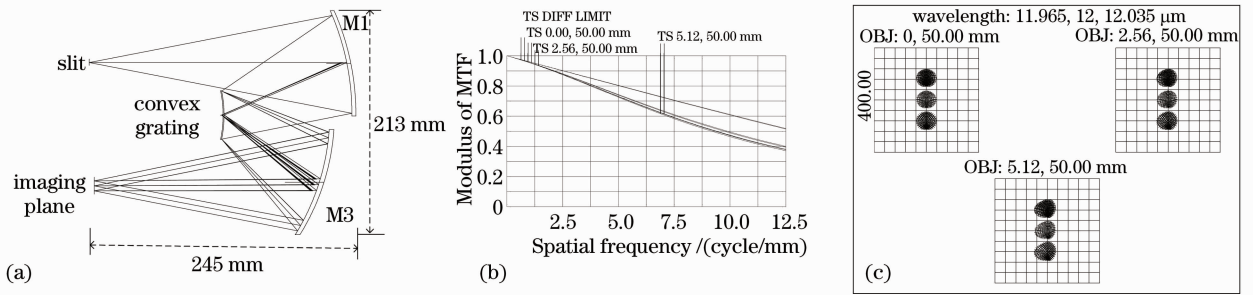


图 3 (a) $NA_1 = 0.19$ 时 Offner 型光谱成像系统图; (b) 系统在 $12 \mu\text{m}$ 处的 MTF; (c) 谱宽为 $\pm 35 \text{ nm}$ 时波长为 $12 \mu\text{m}$ 处的点列图

Fig. 3 (a) $NA_1 = 0.19$, Offner spectral imaging system; (b) MTF of system at $12 \mu\text{m}$; (c) spot diagram of system at $12 \mu\text{m}$ with line width of $\pm 35 \text{ nm}$

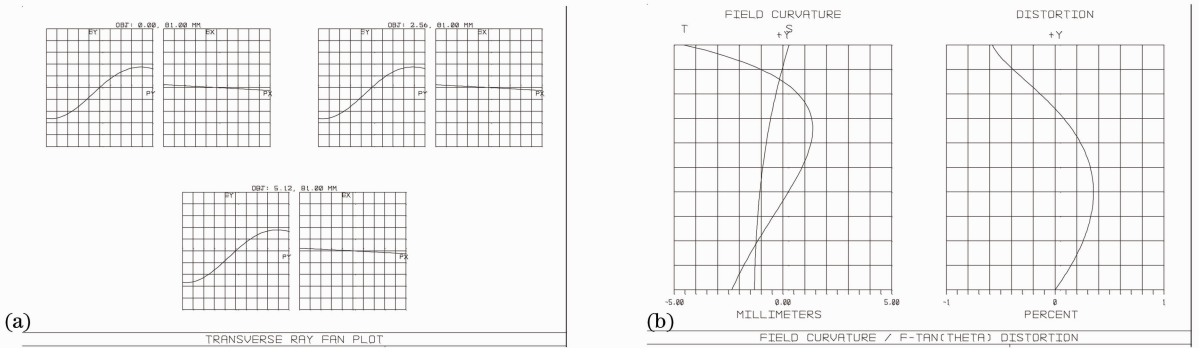


图 4 $12 \mu\text{m}$ 处像差曲线

Fig. 4 Aberration curves at $12 \mu\text{m}$

较大,所以在轻量化方面优势不大。

3.2 Dyson 型光栅光谱仪

Dyson 结构由一个平凸厚透镜和一个大的凹面反射镜构成,凸面、凹面的半径分别为 r 、 R ,两者具有共同的球心 C ,如图 5 所示。凹面镜为系统光阑且位于平凸厚透镜的焦平面处,即若厚透镜的折射率为 n ,则有 $R = \frac{n}{n-1}r$ 。Dyson 结构中的光阑位于平凸厚透镜焦平面处,入射光线平行于出射光线。

实际的结构中由于主光线球差的存在,使得二者间存在一个偏离角,这个偏离角的存在会引起成像位置的偏移。孔径角为 u 时,在视场为 x 处,实际光线在理想像面上相对于理想位置的偏移距离 dx 可表示为

$$dx = \frac{n(n-1)x^4 \sin u \cos u^2}{r^3} \quad (4)$$

可见孔径角对这个偏移的影响要远远小于视场的影响,因此 Dyson 结构能够实现大孔径高质量成像^[12]。

由于 Dyson 为折/反式结构,因此平凸透镜必须选择在长波红外波段具有良好透射性的光学材

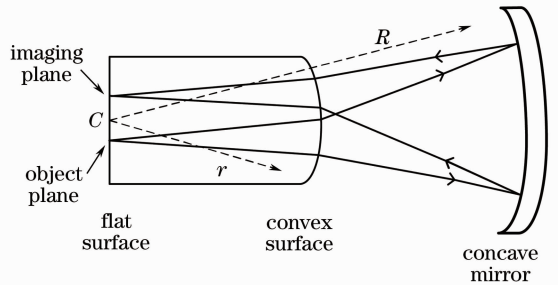


图 5 Dyson 同心结构

Fig. 5 Schematic of Dyson concentric system

料。基于现有的材料合成加工技术,可选 ZnSe 、 Ge 晶体等作为透镜材料,它们在长波红外波段均有较高的透射率。相对于 Ge , ZnSe 具有较小的折射率温度系数 dn/dt ($\text{ZnSe}: 6 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 、 $\text{Ge}: 3.9 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$),可以一定程度上减小温度变化对像面位置的影响,因此选取 ZnSe 作为透镜材料。

根据 Dyson 同心系统的结构特点,将凹面反射镜换为凹面反射光栅,并以表 1 中的数据作为设计指标,用 Zemax 软件分别设计了具有不同数值孔径的 Dyson 型凹面光栅光谱仪,为降低加工难度,系统中不采用非球面镜。由于光栅的引入,破坏了系

统的同心性,产生了较大的像散。优化时,可去掉同心性,并通过控制平凸透镜的曲率半径和平凸透镜与光栅间距离来获得理想的像。

$NA_1=0.19$ 时,经优化得到如图 6(a)的光路图,系统大小为 $308\text{ mm}\times 61\text{ mm}\times 49\text{ mm}$;在中心波长为 $12\text{ }\mu\text{m}$ 处,系统最大的点斑均方根半径约

$8.9\text{ }\mu\text{m}$,达到衍射极限;在特征频率 12.5 lp/mm 处 MTF 为 0.48 ,如图 6(b)所示;光谱分辨率为 12 nm ,如图 6(c)所示;系统的谱线弯曲小于 0.047% ,色畸变小于 0.138% 。以上性能参数均符合成像的要求。

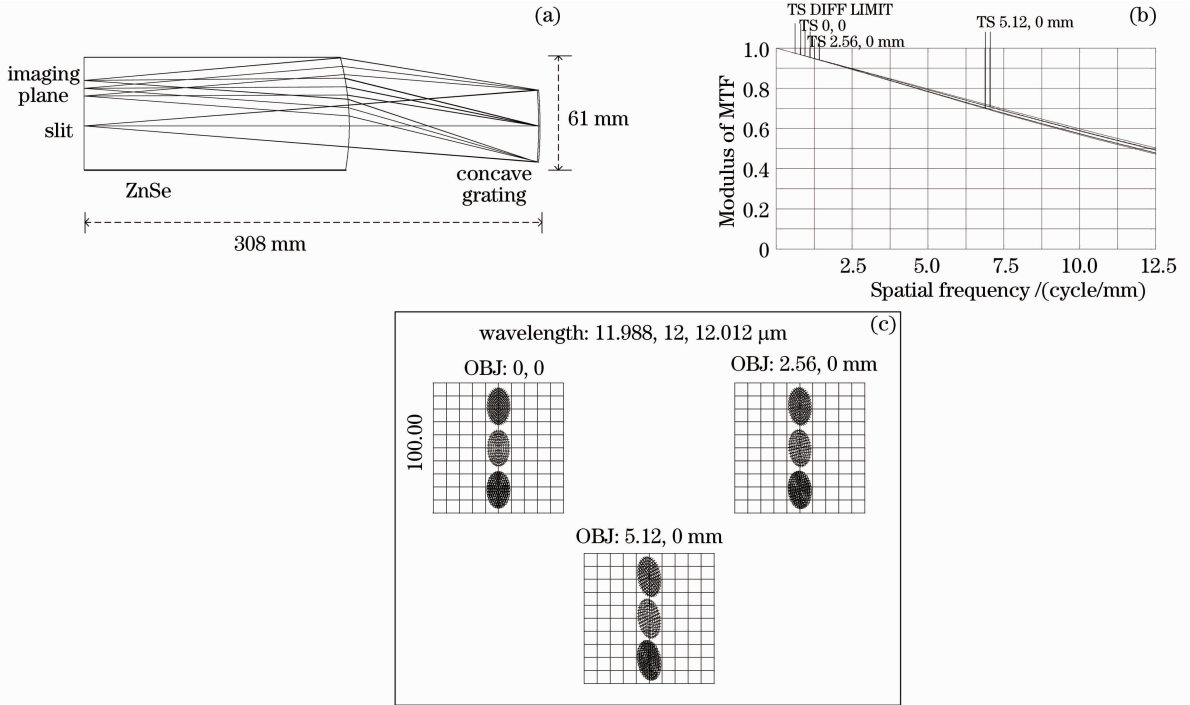


图 6 (a) $NA_1=0.19$ 时 Dyson 型光谱成像系统; (b) 系统在 $12\text{ }\mu\text{m}$ 处的 MTF; (c) 谱宽为 $\pm 12\text{ nm}$ 时波长为 $12\text{ }\mu\text{m}$ 处的点列图

Fig. 6 (a) $NA_1=0.19$, Dyson spectral imaging system; (b) MTF of system at $12\text{ }\mu\text{m}$; (c) spot diagram of system at $12\text{ }\mu\text{m}$ with line width of $\pm 12\text{ nm}$

$NA_2=0.33$ 时,经优化可得到得到如图 7(a)的光路图,系统大小为 $317\text{ mm}\times 88\text{ mm}\times 88\text{ mm}$;在波长为 $12\text{ }\mu\text{m}$ 处,系统最大的点斑均方根半径约为 $8.6\text{ }\mu\text{m}$,达到衍射极限;特征频率 12.5 lp/mm 处 MTF 为 0.71 ,如图 7(b)所示;光谱分辨率为 1 nm ,如图 7(c)所示;谱线弯曲小于 0.015% ,色畸变小于 0.028% 。以上性能参数均符合成像的要求。

可见,Dyson 结构能够实现较大的数值孔径。由于 Dyson 结构仪采用的是折/反式结构,在优化时无需考虑光线的遮挡,体积较小。但折/反式结构也带来了 3 点不足:1)限制了透镜材料的选取,现有的材料合成加工技术已经可以提供具有良好光学特性的红外材料;2)由于光机热效应,光学系统经受较高或较低温度时,透镜材料的折射率随温度变化而变化,进而产生像面的分离,针对这点可以选取 dn/dt 较小的红外材料,同时在后续设计中可进行无热

化处理进行补偿;3)带来了色差,特别是轴向色差带来了谱面的弯曲或倾斜,使其无法与平面探测器重合,降低了成像质量以及光谱分辨率。但是在长波红外波段,轴向色差带来的影响并不大,其主要原因是红外材料的阿贝数往往较大,产生的色差往往很小。由设计结果也可以看出,光谱成像系统最大的点斑已被控制在合理的范围内且系统具有很高的光谱分辨率,所以折/反式结构给系统带来的不良影响可以忽略。由设计结果可以看出 Dyson 结构在优化之后仍然具有较好的对称性,加上其体积小重量轻的优势,可以基本实现系统的轻量化。

4 结 论

基于长波红外成像光谱仪对分光系统的要求,设计并对比了不同的数值孔径下具有同心结构的 Offner 凸面光栅光谱仪及 Dyson 凹面光栅光谱仪

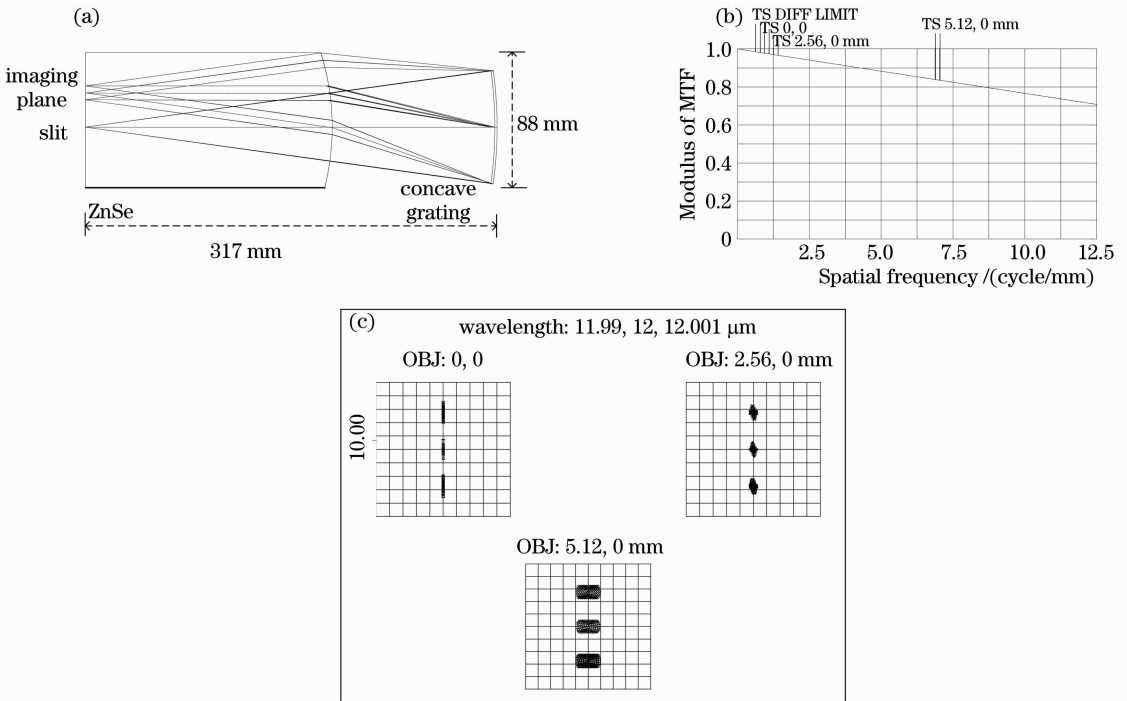


图 7 (a) $NA_2=0.33$ 时 Dyson 型光谱成像系统; (b) 系统在 $12\ \mu\text{m}$ 处的 MTF; (c) 谱宽为 $\pm 1\ \text{nm}$ 时波长为 $12\ \mu\text{m}$ 处的点列图

Fig. 7 (a) $NA_2=0.33$, Dyson spectral imaging system; (b) MTF of system at $12\ \mu\text{m}$; (c) spot diagram of system at $12\ \mu\text{m}$ with line width of $\pm 1\ \text{nm}$

的性能。数值孔径为 0.19 时,两种结构都具有简单的结构,谱线弯曲和色畸变在可接受的范围之内,成像质量好;数值孔径为 0.33 时,Offner 由于结构本身的局限性,已无法得到理想的像质,Dyson 结构则仍然可以获得高质量的成像。在体积大小上,Offner 结构为了保证光线不被遮挡,有较大离轴量,所以相对于 Dyson 结构,其体积较大。此外,Offner 结构由于采取反射式,对光学元件的材料没有特殊要求,也无需考虑色差对像质的影响;Dyson 结构由于系统采用折/反式,对光学材料有一定要求,需要进行无热化处理,同时带来了一定的色差,但从设计结果中可以看出,色差对系统像质的影响并不明显。综上,在长波红外波段,Dyson 结构在体积大小及辐射通量上具有较明显的优势,更符合长波红外成像光谱仪对光谱系统的要求。在空间适应性方面,Offner 结构因无需考虑反射镜的折射率变化而在热稳定性方面较有优势,Dyson 结构则因其具有较小的体积和较好的对称性而在力稳定性方面较有优势。

参 考 文 献

1 Lin Qing, Jin Weiqi, Guo Hong, *et al.*. Confocal-window telescope objective design in visible and long-wave infrared [J].

Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0922005.
 林 青, 金伟其, 郭 宏, 等. 可见光/长波红外共聚焦窗口望远镜设计[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0922005.
 2 Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.*. Design of hybrid refractive and reflective optical system of long-wave infrared region imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122005.
 张晓龙, 刘 英, 孙 强, 等. 折/反混合式长波红外成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122005.
 3 Nahum Gata, Suresh Subramaniana, Steve Rossa. Thermal infrared imaging spectrometer (TIRIS) status report [C]. SPIE, 1997, 3061: 1-8.
 4 P G Lucey, T J Williams, M E Winter, *et al.*. Two years of operations of AHI: a LWIR hyperspectral imager [C]. SPIE, 2000, 4030: 31-40.
 5 Yuan Liyin, Wang Jianyu, Lin Ying, *et al.*. Optical design and test of an infrared hyperspectral imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1075-1078.
 袁立银, 王建宇, 林 颖, 等. 红外高光谱成像系统光学设计及检测[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1075-1078.
 6 Li Yangyu, Fang Yonghua, Liu Yang. Optical design of a miniature long-wave infrared grating spectrometer [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2012, 7(4): 315-320.
 李杨裕, 方勇华, 刘 洋. 小型长波红外光栅光谱仪光学设计[J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(4): 315-320.
 7 Yang Jin, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.*. Design of Dyson concentric optical hyperspectral imaging system with achromatized Fery prism [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1130003.
 杨 晋, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 基于 Dyson 同心光学系统的消色差 Fery 棱镜高光谱成像仪的设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1130003.
 8 Liu Yujuan. The Study of Newly Imaging Spectrometer Based on Concentric Optics [D]. Changchun: Changchun Institute of

- Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012, 50-55.
- 刘玉娟. 基于同心光学系统的新型成像光谱仪研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012. 50-55.
- 9 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0822001.
- 薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0822001.
- 10 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.
- 11 Huang Yuanshen, Ni Zhengji. Research of the concentric three-reflection optical system [J]. Optical Instrument, 2005, 27(2): 42-46.
- 黄元申, 倪争技. 同心三反射镜光学系统研究[J]. 光学仪器, 2005, 27(2): 42-46.
- 12 J Dyson. Unit magnification optical system without Seidel aberrations [J]. J Opt Soc Am, 1959, 49(7): 713-716.

栏目编辑: 史敏