

doi:10.3788/gzxb20134208.0950

用于成像光谱仪的宽视场离轴三反望远镜设计

陈伟, 薛闯

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:大相对孔径宽视场成像光谱仪已成航天、航空遥感的迫切需求,要求其望远镜具有大相对孔径、宽视场和像方远心、成像质量高等特点.以同轴三反望远镜的几何成像理论为基础,研究了大相对孔径、宽视场远心离轴三反望远镜的光学设计问题,并且编制了初始结构计算程序.采用视场离轴方式设计了一个波段范围 200~1 000 nm,焦距 210 mm,相对孔径 1:2.5,线视场 14°的远心离轴三反望远镜,主镜和三镜为 6 次非球面,次镜为二次曲面.点列图直径的均方根值小于 16 μm ,80%的能量集中在一个像元以内,在奈奎斯特空间频率 22.2 lp/mm 处,调制传递函数大于 0.75,畸变小于 0.2%,各项指标均满足应用要求.

关键词:光学设计;望远镜;成像光谱仪;离轴三反消像散;空间分辨力

中图分类号:O433.1; TN744.1 文献标识码:A 文章编号:1004-4213(2013)08-0950-6

Design of Wide Field-of-view Off-axis Three-mirror Telescope for Imaging Spectrometer

CHEN Wei, XUE Chuang

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

Abstract: Space and airborne remote sensing urgently require large relative aperture and wide field-of-view imaging spectrometer. Its telescope must have large relative aperture, wide field of view, telecentric image space, and high image quality. Based on the geometric imaging theory of common-axis three-mirror systems, the design problem of large relative aperture, wide field-of-view, telecentric off-axis three-mirror anastigmatic (TMA) telescope are studied. The procedure for calculating initial structural parameter is programmed. By means of field of view off-axis, an telecentric off-axis three-mirror telescope system is designed. The spectral range is 200~1 000 nm, the focal length is 210 mm, the relative aperture is 1:2.5, and the field of view is 14°. The primary mirror and third mirror are six-order aspheric surfaces, and the second mirror is a quadratic surface. RMS diameter of the spot diagram is less than 16 μm , 80% of the enclosed energy is in a pixel, the MTF is more than 0.75 at Nyquist spatial frequency 22.2 lp/mm, the distortion is less than 0.2%, and each specification satisfy the application requirement.

Key words: Optical design; Telescope; Imaging spectrometer; Off-axis three-mirror anastigmatic; Spatial resolution

0 引言

成像光谱仪是图像和光谱合一的新型遥感仪器,在国土资源遥感、大气遥感、海洋遥感、对地侦查等航天、航空遥感领域正在发挥着重要作用^[1-2].成像光谱仪光学系统由望远镜和光谱仪两部分组成,二者通过入射狭缝连接在一起,为了与光谱仪进行光瞳匹配,要求望远镜像方远心,光谱仪物方远心.

望远镜在成像光谱仪中起着至关重要的作用,它把目标清晰地成像在入射狭缝上,并收集足够的能量保证成像光谱仪的信噪比要求^[3].光谱仪把成像在入射狭缝上的像进行色散,分波长成像在 CCD 探测器上,沿狭缝像的长度方向为空间维,沿狭缝像的宽度方向为光谱维.目前,国际上具有代表性的成像光谱仪的有美国 TRW 公司研制的 Hyperion^[4],美国海军 NEMO 卫星的主载荷 COIS^[5],英国 Sira 公司

基金项目:国家自然科学基金(No.41105014)资助

第一作者:陈伟(1963-),女,工程师,学士,主要研究方向为光学设计、计算机管理等. Email:xue_ciomp@163.com

收稿日期:2012-12-27;录用日期:2013-03-15

研制的 CHRIS^[6],这些成像光谱仪的望远镜的视场分别为 0.624° 、 2.5° 、 0.553° ,相对孔径均为 $1:4$,工作波段均为 $400\sim 1\,000\text{ nm}$.随着遥感应用的不断发展,成像光谱仪的工作波段从通常的可见/近红外波段向紫外波段扩展(例如: $200\sim 1\,000\text{ nm}$).由于紫外波段的光谱辐射比可见/近红外波段弱很多,因此,要求成像光谱仪的望远镜具有大相对孔径,相对孔径要达到 $1:2.5$.另外,为了达到高时间分辨率,减小回访周期,要求望远镜具有宽视场、大覆盖宽度,视场要达到 14° .国内中科院长春光机所的刘晓梅^[7]、李欢^[8-9]等设计的成光谱仪望远镜的相对孔径为 $1:4$,视场为 5° 、 6.8° 和 10° ,薛庆生^[10]等设计的成像光谱仪望远镜的相对孔径为 $1:4$,视场为 11.2° .显然,现有的成像光谱仪的望远镜在相对孔径、视场角方面均不能满足成像光谱仪发展的需要,因此研究大相对孔径宽视场远心望远镜具有重要意义.

本文在几何光学成像理论的基础上,研究了用于成像光谱仪的大相对孔径宽视场远心离轴三反消像散(Three-Mirror Anastigmatic, TMA)望远镜的设计问题,编制了初始结构计算程序,在求解初始结构参量后,再利用光学设计软件进行优化设计.作为一个实例,设计了一个工作波段为 $200\sim 1\,000\text{ nm}$,焦距为 210 mm ,相对孔径为 $1:2.5$,线视场为 14° 的离轴三反望远镜,对设计的离轴三反望远镜的初始性能和优化设计后的性能进行了分析与评价.

1 结构型式的选择

用于成像光谱仪的望远镜是宽波段、大相对孔径、宽视场、高分辨力的光学系统.反射系统与折射系统相比,无色差,且易于轻量化,尤其包含紫外波段时,由于折射系统可用的光学材料的种类十分有限,反射系统可不受光学材料的限制,在包含紫外波段的宽波段内具有很高的反射率,优势更为明显.

由两个二次曲面反射镜组成的望远镜,如卡塞格林(Cassegrain)望远镜及格里高里(Gregory)望远镜等,由于校正像差的自由度所限,不能满足大相对孔径、宽视场的要求^[11].由三个反射镜组成的三反望远镜具有三个半径、两个间隔和三个二次曲面系数共 8 个变量,在满足焦距、球差、彗差、像散、场曲的条件下,还剩余三个可变参量满足光学系统结构要求.同轴三反望远镜在大视场的情况下,中心遮挡过大,影响进入系统的能量,同时降低了光学系统的分辨力.离轴三反望远镜可以实现完全无遮挡^[12].离轴三反望远镜根据离轴方式不同分为光阑离轴和视场离轴两种类型.光阑离轴的三反系统,孔径光阑在主镜上,一般有中间像面,光学系统很不对

称,所以视场角不能做太大^[13-14].视场离轴的三反系统,孔径光阑放在次镜上,使光学系统比较对称,可以设计成很大的视场角,成像质量好.因此根据用于成像光谱仪的望远镜的特点,选择视场离轴的三反系统作为其结构型式.

2 初始结构参量计算

离轴三反望远镜是在同轴三反望远镜的基础上进行离轴得到的,所以同轴三反望远镜的三级像差理论是离轴三反望远镜设计的基础.首先把离轴三反望远镜看成同轴系统进行初始结构参量计算,同轴三反望远镜的光学结构和参量定义如图 1 所示,图中所标长度量均为带有符号的量,规定,从左到右为正,从右到左为负.

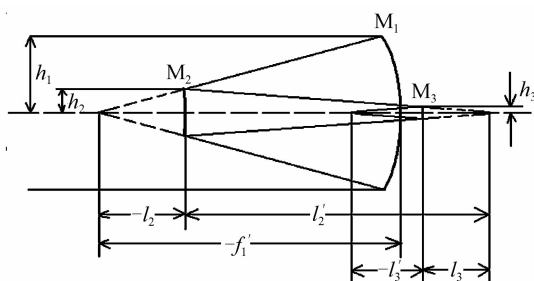


图 1 同轴三反系统结构

Fig. 1 Layout of three-mirror system

目标位于无穷远,即 $l_1 = \infty, u_1 = 0$; f' 为系统的总焦距; α_1 、 α_2 分别为次镜对主镜的遮拦比、三镜对次镜的遮拦比; β_1 、 β_2 分别为次镜和三镜的放大率; d_1 、 d_2 、 $d_3 = l'_3$ 分别为主镜与次镜、次镜与三镜及三镜与像面的间距; r_1 、 r_2 、 r_3 分别为主镜、次镜和三镜的曲率半径; $k_1 = -e_1^2$ 、 $k_2 = -e_2^2$ 、 $k_3 = -e_3^2$ 分别主镜、次镜和三镜的二次曲面系数.光线从左侧入射,依次经主镜、次镜和三镜的反射,到达像面.根据符号规则,则 $d_1 < 0$ 、 $d_2 > 0$ 、 $l'_3 < 0$.由图 1 所示的几何关系可知

$$\alpha_1 = l_2 / f'_1 \approx h_2 / h_1 \quad (1)$$

$$\alpha_2 = l_3 / l'_2 \approx h_3 / h_2 \quad (2)$$

$$\beta_1 = l'_2 / l_2 \approx u_2 / u'_2 \quad (3)$$

$$\beta_2 = l'_3 / l_3 \approx u_3 / u'_3 \quad (4)$$

对于反射镜, $n' = -n$,根据高斯公式可得到

$$1/l' + 1/l = 2/r \quad (5)$$

用于成像光谱仪的三反望远镜主要应用在航空航天遥感领域,通常对结构尺寸和质量有一定要求,为了使设计的三反望远镜结构紧凑,布局合理,并满足有关结构方面的要求.设计时以 d_1 、 d_2 、 l'_3 为给定条件,即将 d_1 、 d_2 、 l'_3 作为已知量.推导出 r_1 、 r_2 、 r_3 满足

$$1/r_1 - 1/r_2 + 1/r_3 = S_{IV} \quad (6)$$

$$\frac{r_1 r_2 - 2r_2 d_1}{2r_1 - 4d_1 - 2r_2} - d_2 = \frac{1}{f'} \quad (7)$$

$$\frac{2(r_1 r_3 - 2r_3 d_1 - r_2 r_3) + 1}{2r_1 r_2} = \frac{l'_3}{f'} \quad (8)$$

将望远镜要求的匹兹瓦和 S_{IV} , 总焦距 f' , 间距 d_1, d_2, l'_3 代入式(6)~(8), 可以求出 r_1, r_2, r_3 . 推导出遮拦比 α_1, α_2 和放大率 β_1, β_2 的表达式如式(9)~(12)

$$\alpha_1 = 1 - 2d_1/r_1 \quad (9)$$

$$\alpha_2 = 1 - \frac{2d_2(r_1 - 2d_1 - r_2)}{r_2(r_1 - 2d_1)} \quad (10)$$

$$\beta_1 = \frac{-r_2}{r_2 - r_1 + 2d_1} \quad (11)$$

$$\beta_2 = \frac{r_3}{\beta_1 r_1 - 2\beta_1 d_1 - 2d_2 - r_3} \quad (12)$$

将 d_1, d_2, r_1, r_2, r_3 代入式(9)~(12)可以求出 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$. 根据高斯光学理论推导出三反望远镜的球差 S_I 、彗差 S_{II} 和像散 S_{III} 的三级像差系数分别为

$$S_I = \frac{1}{4}\beta_1^3\beta_2^3e_1^2 - \frac{1}{4}\alpha_1\beta_2^3(1+\beta_1)^3e_2^2 + \frac{1}{4}\alpha_1\alpha_2(1+\beta_2)^3e_3^2 + \frac{1}{4}[-\beta_1^3\beta_2^3 + \alpha_1\beta_2^3 + (1+\beta_1)(1-\beta_1)^2 - \alpha_1\alpha_2(1+\beta_2)(1-\beta_2)^2] \quad (13)$$

$$S_{II} = -\frac{(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1+\beta_1)^3}{4\beta_1\beta_2}e_2^2 + \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1+\beta_2)^3}{4\beta_1\beta_2}e_3^2 + \frac{(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1+\beta_2)(1-\beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{1}{2} \quad (14)$$

$$S_{III} = -\frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1-\beta_1)^3}{4\alpha_1\beta_1^2}e_2^2 + \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1+\beta_2)^3}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2}e_3^2 + \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2 + (1+\beta_2)(1-\beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} - \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)(1-\beta_1)(1+\beta_1)}{\alpha_1\beta_1} - \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1+\beta_2}{\alpha_1\alpha_2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1-\beta_2)(1+\beta_2)}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2} \quad (15)$$

再由 $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$ 可以求出二次曲面系数 e_1^2, e_2^2, e_3^2 , 至此, 系统的 8 个结构参量就完全确定了. 由于视场离轴三反望远镜采用的是无中间像面的共轴初始结构, 其初始结构参量应满足 $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \beta_1 < 0, \beta_2 < 0$, 而且系统总焦距 f' 为负值.

从前面的分析可以看出, 三反望远镜的初始结构参量求解公式比较复杂, 本文利用 MATLAB 软件编制了初始结构快速计算程序, 程序框图如图 2. 输入 d_1, d_2, l'_3, f' , 输出 $r_1, r_2, r_3, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, e_1^2, e_2^2, e_3^2$.

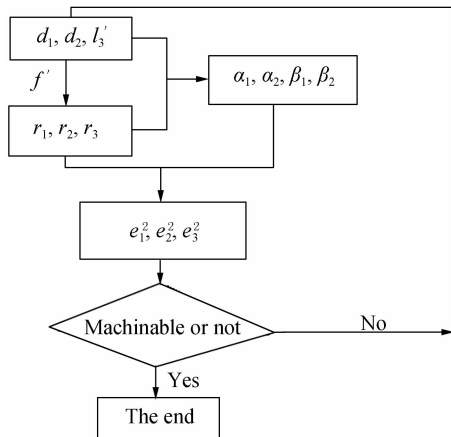


图 2 初始结构参量计算程序框图

Fig. 2 Program block diagram for computing initial structure parameters

3 设计实例与性能分析

某一大气探测成像光谱仪预计工作在轨道高度 $H=800$ km 的卫星平台上, 对星下点的大气推扫成像, 获取包含紫外波段的宽波段太阳散射光谱图像数据, 进而反演大气成分如 O_3, NO_2 、气溶胶等的分布信息, 为污染监测和数值天气预报服务. 要求刈幅宽度 $GW=196$ km, 地面像元分辨率 $GSD=86$ m, 光谱分辨率 0.5 nm, 探测器像元尺寸 $22.5 \mu\text{m}$, 像元数 1142×576 . 成像光谱仪光学系统由离轴三反望远镜和 Offner 光谱仪^[15] 组成, 根据成像光谱仪技术指标和所选用的探测器指标, 确定用于该成像光谱仪的离轴三反望远镜应满足: 1) 工作波段范围 $200 \sim 1000$ nm; 2) 线视场 14° ; 3) 焦距 210 mm; 4) 相对孔径 $1:2.5$; 5) 调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) $\geq 0.5 @ 22.2$ lp/mm; 6) 畸变 $\leq 0.5\%$.

根据上节初始结构参量的计算方法, 利用基于 MTALAB 的初始结构参量快速求解程序, 求得离轴三反望远镜的初始结构参量如表 1.

从表 1 可以看出主镜为双曲面, 次镜为椭球面, 三镜为扁椭球面. 将中心视场离轴, 选取合适的离轴角, 避免中心遮拦, 由本系统的相对口径大, 视场离

表 1 望远系统初始结构参量

Table 1 System parameter of telescope

Surface	Radius	Thickness	$-e^2$	6 th order
Object surface	Infinity	Infinity		
Primary mirror	-386.938	-106.744	-1.5758	
Second mirror	-132.510	106.744	-0.4331	
Third mirror	-194.604	130	0.1479	
Image	infinity			

轴角也必须较大,否则就会有遮拦,视场离轴角取 11.2° 。图 3 为离轴三反望远镜初始光学结构,图 4 为离轴三反望远镜焦面上的初始点列图分布,点列图均方根 (Root-Mean-Square, RMS) 直径约为 $\Phi 30 \mu\text{m}$,大于探测器的像元尺寸 $22.5 \mu\text{m}$ 。图 5 为离轴三反望远镜的初始能量集中度曲线,从图中可以看出,成像点 80% 的能量集中在 $\Phi 30 \mu\text{m}$ 范围内。图 6 为离轴三反望远镜的初始 MTF 曲线,从图中可以看出各视场在特征频率 22.2 lp/mm 处的最低 MTF 为 0.38。图 7 为离轴三反望远镜的初始网格畸变曲线,最大畸变为 0.96%。可以看出,求解的初

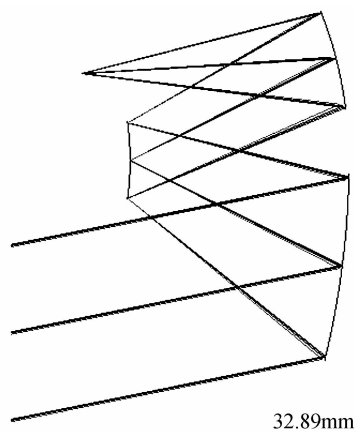


图 3 离轴三反望远镜初始光学结构
Fig. 3 Initial optical path of TMA telescope

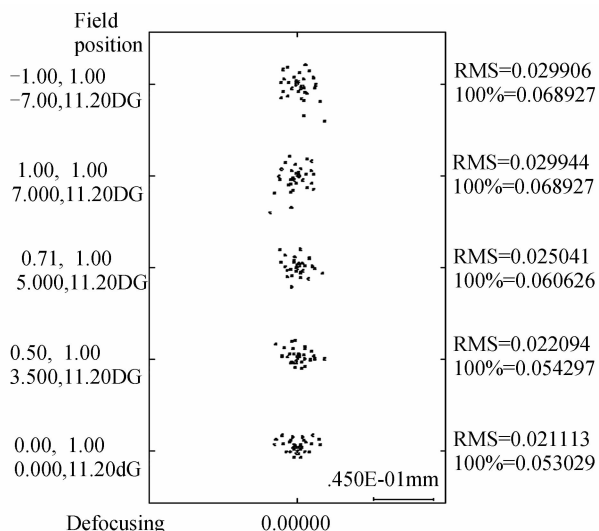


图 4 离轴三反望远镜初始点列图分布
Fig. 4 Initial spot diagram of TMA telescope

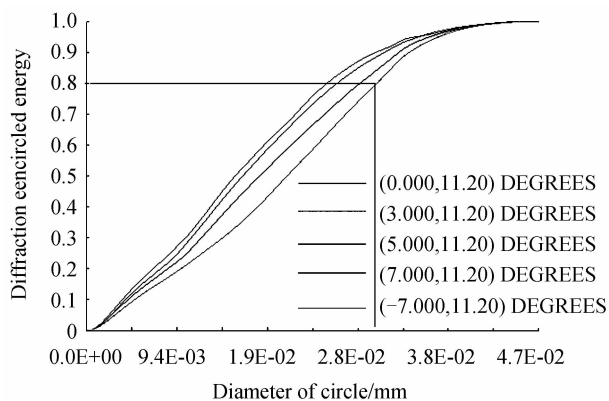


图 5 离轴三反望远镜初始点初始能量集中度曲线
Fig. 5 Initial encircled energy of TMA telescope

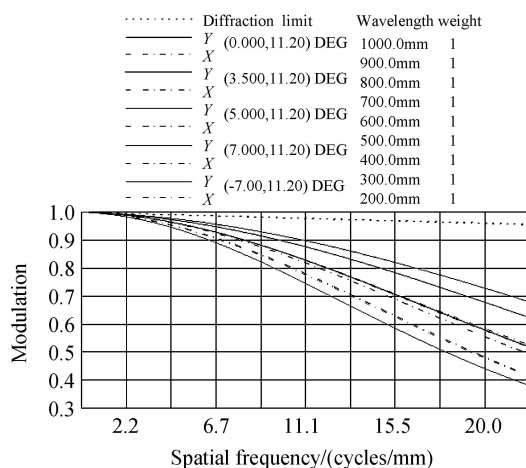


图 6 离轴三反望远镜初始点初始调制传递函数
Fig. 6 Initial MTF of TMA telescope

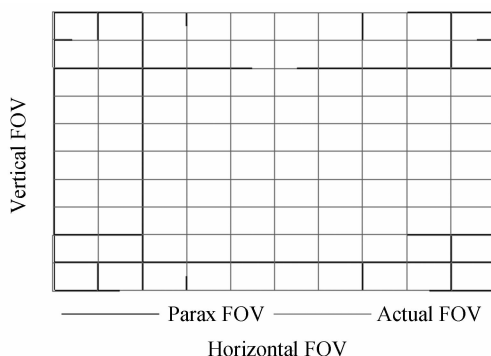


图 7 离轴三反望远镜初始网格畸变曲线
Fig. 7 Initial distortion grid of TMA telescope

始结构已具有较好的性能,还不能满足设计指标要求,需要进一步优化。

在初始结构参量的基础上,利用 CODE V 光学设计软件对离轴三反望远镜进行了优化设计. 由于此望远镜的相对孔径为 $1:2.5$,线视场为 14° ,相对孔径和视场都很大,主镜、次镜和三镜均为二次曲面的经典离轴三反系统不能满足成像质量要求,因此优化时,增加了主镜和三镜的 6 次非球面系数作为变量. 为了保证优化设计的光学布局结构合理,结构紧凑且不会出现拦光,利用 CODE V 的宏语言编制了

优化约束程序. 优化设计后的光学结构参量如表 2 所示, 形成如图 8 所示的离轴三反望远镜, 次镜为孔径光阑, 无中间像, 出瞳在无穷远, 像方远心. 主镜和三镜为六次非球面, 次镜为二次曲面, 系统总长约为系统焦距的 1/2. 主镜、次镜和三镜均在我国目前的非球面加工和检测的能力范围内.

表 2 优化后望远镜结构参量

Table 2 System parameter of fore telescope

Surface	Radius	Thickness	$-e^2$	6 th order
Object surface	Infinity	Infinity		
Primary mirror	-380.629	-104.051	-1.687 8	$-8.722 7 \times 10^{-15}$
Second mirror	-131.073	104.051	-0.505 5	
Third mirror	-194.959	-131.376	0.185 4	$8.003 0 \times 10^{-14}$
Image	Infinity			

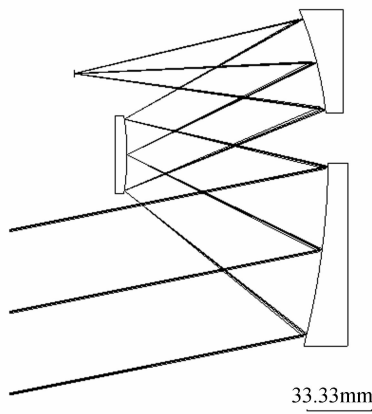


图 8 优化设计后离轴三反望远镜光学结构

Fig. 8 Optimized optical path of TMA telescope

图 9 为优化设计后离轴三反望远镜焦面上的点列图分布, 各视场点列图 RMS 直径均在 $\Phi 16 \mu\text{m}$ 范

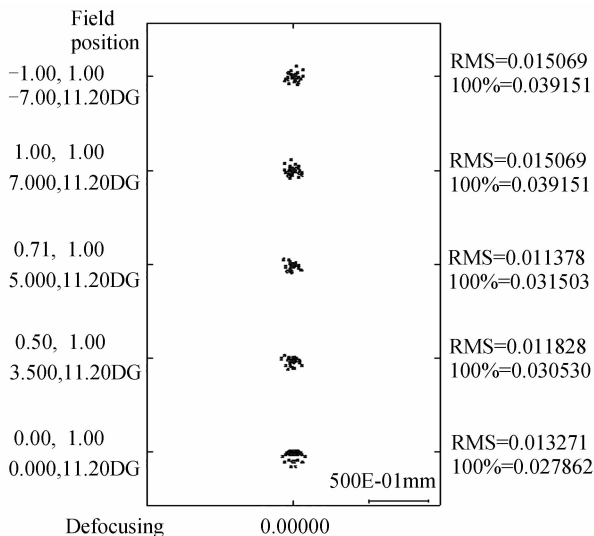


图 9 优化设计后离轴三反望远镜点列图分布

Fig. 9 Optimized spot diagram of TMA telescope

围内, 小于探测器的像元尺寸 $22.5 \mu\text{m}$. 图 10 为优化设计后离轴三反望远镜的能量集中度曲线, 从图中可以看出, 成像点 80% 的能量集中在 $\Phi 18 \mu\text{m}$ 范围内, 亦小于探测器的像元尺寸 $22.5 \mu\text{m}$. 图 11 为优化设计后离轴三反望远镜的 MTF 曲线, 从图中可以看出各视场在特征频率 22.2 lp/mm 处的最低 MTF 为 0.75, 大于 0.5. 图 12 为优化设计后离轴三反望远镜的网格畸变曲线, 最大畸变为 0.2%, 小于 0.5%. 优化设计后离轴三反望远镜的 MTF 曲线, 从图中可以看出各视场在特征频率 22.2 lp/mm 处的最低 MTF 为 0.75, 大于 0.5. 图 12 为优化设计后离轴三反望远镜的网格畸变曲线, 最大畸变为 0.2%, 小于 0.5%.

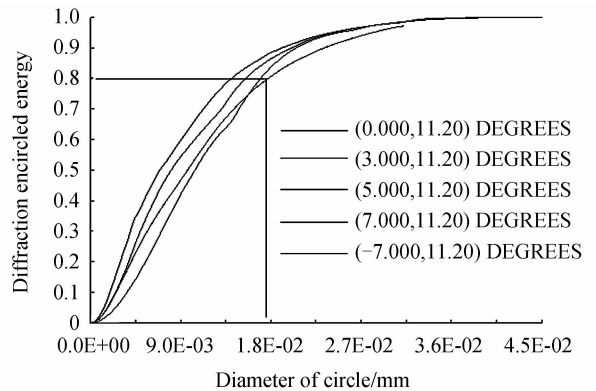


图 10 优化设计后离轴三反望远镜能量集中度曲线

Fig. 10 Optimized encircled energy of TMA telescope

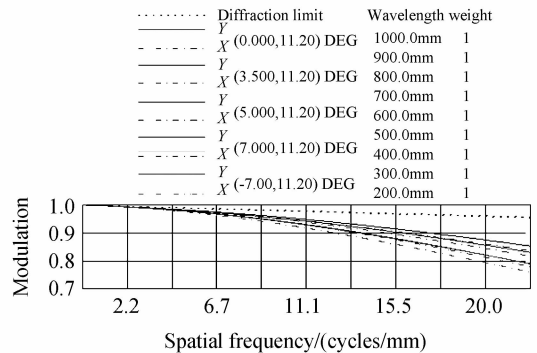


图 11 优化设计后离轴三反望远镜调制传递函数曲线

Fig. 11 Optimized MTF of TMA telescope

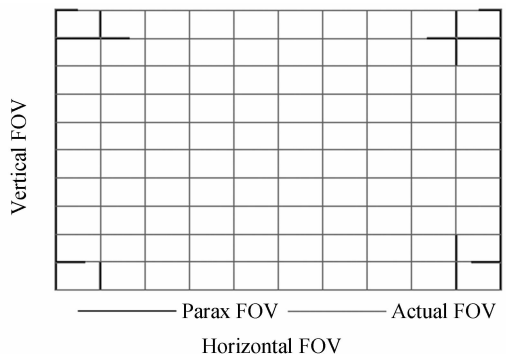


图 12 优化设计后离轴三反望远镜网格畸变曲线

Fig. 12 Optimized distortion grid curve of TMA telescope

表 3 为设计达到的指标与设计要求的比对,从表 3 可知,各项指标均满足设计指标要求。

表 3 优化后达到的技术指标与设计要求的比对

Table 3 Comparison of specifications required with specifications achieved for limb sounder

Specification	Required	Achieved
Spectral range/nm	200~1 000	200~1 000
Field of view/(°)	14	14
Relative aperture	1 : 2.5	1 : 2.5
MTF(@22.2 lp/mm)	≥0.5	≥0.75
Distortion	≤0.5	≤0.2

4 结论

用于成像光谱仪的大相对孔径宽视场离轴三反望远镜在航天航空领域备受关注. 基于成像光学成像理论,推导处离轴三反望远镜初始结构参量计算方法,并编制了初始结构参量快速计算程序. 作为一个设计实例,设计了一个用于大气探测成像光谱仪的大相对孔径宽视场离轴三反望远镜,相对孔径 1 : 2.5,线视场 14°,焦距 210 mm,具有无中心遮挡、大相对孔径、宽视场、小尺寸、平像场、像方远心等特点,设计结果满足指标要求. 本文设计的大相对孔径宽视场离轴三反望远镜不但适用于宽波段成像光谱仪,也可用于采用线阵探测器推扫成像的其他光学成系统。

参考文献

- [1] ZHENG Yu-quan, GAO Zhi-liang. Optical system design of CO₂ sounder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(12): 2645-2653.
郑玉权,高志良. CO₂ 探测仪光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(12): 2645-2653.
- [2] XUE Qing-sheng. Design and study of limb sounder of atmospheric trace gas for spaceborne remote sensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 271-277.
薛庆生. 空间遥感大气痕量气体临边探测仪设计与研究[J]. 光学学报, 2013, **42**(3): 271-277.
- [3] XUE Qing-sheng, HUANG Yu, LIN Guang-yu. Optical system design of wide-angle and high resolution spaceborne imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822001-1-0822001-6.
薛庆生,黄煜,林冠宇,等. 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): 0822001-1-0822001-1.
- [4] PEARLMAN J, SEGAL C, LIAO L B, *et al.* Development and operations of the EO-1 Hyperion imaging spectrometer [C]. *SPIE*, 2004, **4135**: 243-253.
- [5] WILSON T, CURTISS D. Naval earthmap observer (NEMO) satellite[C]. *SPIE*, 1999, **3753**: 1-11.
- [6] CUTTER M A, HILL S. Compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) design and performance[C]. *SPIE*, 2004, **3753**: 1-11.
- [7] LIU Xiao-mei, XIANG Yang. Research and design of telecentric off-axis three-mirror system with real entrance pupil [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1122002-1-1122002-4.
刘晓梅,向阳. 具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1122002-1-1122002-4.
- [8] LI Huan, XIANG Yang. Design of 10°FOV telecentric off-axis three-mirror anastigmatic telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2256-2260.
李欢,向阳. 10°远心离轴三反消像散望远系统的光学设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(9): 2256-2260.
- [9] LI Huan, XIANG Yang. Optical design of off-axis three-mirror telescope systems of imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3): 500-504.
李欢,向阳. 成像光谱仪离轴三反望远系统的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(3): 500-504.
- [10] XUE Qing-sheng. Design of wide field of view off-axis three-mirror systems for hyperspectral imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 942-946.
薛庆生. 用于高光谱成像仪的大视场离轴三反系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(4): 942-946.
- [11] LI Jie, MING Jing-qian, LU Ruo-fei. Design of an Ameliorating infrared Cassegrain optical system [J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(2): 76-80.
李婕,明景谦,卢若飞. 一种改进型的红外卡赛格林光学系统设计[J]. 红外技术, 2010, **32**(2): 76-80.
- [12] HANG Chang-yuan. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2164-2172.
韩昌元. 高分辨力空间相机光学系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(11): 2164-2172.
- [13] YAN Pei-pei, FAN Xue-wu, ZOU Gang-yi, *et al.* Stray light removing design and simulation of the three-mirror optical system used in field bias [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(10): 1997-2002.
闫佩佩,樊学武,邹刚毅,等. 偏视场用三反系统消杂光设计与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(10): 1997-2002.
- [14] YAN Chang-xiang, XU Jie, PENG Yan. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(2): 289-293.
颜昌翔,许杰,彭岩,等. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(2): 289-293.
- [15] CUI Ji-cheng, LIU Yu-juan, PAN Ming-zhong, *et al.* The integrative design for imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy And Spectral Analysis*, 2012, **32**(3): 839-843.
崔继承,刘玉娟,潘明忠,等. 成像光谱仪一体化设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(3): 839-843.