

空间遥感测绘光学系统研究综述

巩盾

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要:将遥感技术应用到测绘当中是现代地质测绘技术的发展趋势,随着光学载荷分辨率的不断提高,遥感测绘已经成为社会发展和国民经济发展的重要保障。光学载荷决定了测绘空间遥感的分辨率、测绘精度、卫星平台体积与重量,是传感器的核心部分。本文对高成像质量透射光学系统、同轴三反光学系统、离轴三反系统等常用的空间遥感测绘光学系统的结构形式和光学性能分别进行了介绍,并对处于研发阶段的新型空间反射光学系统的结构形式和光学性能进行了展望。分析认为,根据不同的应用环境和技术指标,合理选用不同种类的遥感测绘光学系统,可以最大程度利用平台资源,满足遥感测绘需求。

关键词:遥感测绘;光学系统设计;传递函数;相对畸变

中图分类号:V248.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20150805.0714

Review on mapping space remote sensor optical system

GONG Dun

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: gongdun@sina.com

Abstract: The application of remote sensing technology to the mapping is the development trend of modern geological mapping technology. With the increasing resolution of optical load, mapping remote sensor has become an important guarantee for social development and the development of the national economy. Optical load which is the core component of remote sensor determines the resolution of mapping space remote sensor, the precision of mapping, and the volume and weight of the satellite platform. Structure and optical properties of the mapping space remote sensor optical system are introduced, such as high image quality refractive system, co-axial three mirrors system and off-axial three mirrors system. Then, structure and optical properties of new space reflective optical system in development are prospected. Analysis result indicates that according to different application environment and technical index, different types of optical system should be selected reasonably, so the platform resources can be used fully to meet the demand of mapping remote sensor.

Key words: mapping remote sensor; optical system design; MTF; relative distortion

收稿日期:2015-03-11;修订日期:2015-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

1 引 言

随着科学技术的发展和自然环境的变化,人们越来越重视自然资源和太空资源的开发和利用。遥感技术能够全面、快速地探测资源的实际分布状况,为合理的资源开发提供必要依据^[1-3],可满足人们对资源探测的需求。

航天遥感是指通过飞船、卫星等现代航天设备从大气层外对地球表面进行观测,人们的日常生活和国家安全保障等多方面因素都离不开航天遥感。高分辨率的光学遥感主要应用于地理测绘、抗震减灾、土地规划、气象观测、资源调查、环境监测、空间摄影测量、侦察和预警、行星恒星等空间物理现象观测以及空间目标搜索等科研领域^[4-5]。

将遥感技术应用到测绘当中是现代地质测绘技术的发展趋势,遥感技术能够直接贯穿于整个地质测绘工作的全过程,具有信息量大、宏观性强、时效性好等许多优点。早期的遥感测绘受到光学载荷分辨率的限制,还不能完全拟合实际地质信息。近年来,随着光学载荷分辨率的不断提高,遥感测绘精度已经可以完全满足地理探测与绘图的要求,成为国民经济和社会发展的重要保障^[6]。

在地质测绘的过程中,遥感技术起到了至关重要的作用,在地质制图和大比例尺地质测绘时,遥感技术能够对实际地质情况进行真实的反映,提供真实、准确的地理环境信息与坐标,实现地址测绘的同时还可以确保一些不可再生资源的可持续发展。高质量的遥感测绘使信息获取更加准确,能够大幅度提升地图的精确程度^[7]。

为了获得高精度的测绘图像,提高地图测绘精度,需要在现有的侦查型遥感卫星平台基础上增强卫星的姿态控制稳定度,提高星敏感器、陀螺仪等姿态获取传感器的定位精度等一系列性能指标,其中,高质量的光学载荷是获得高精度图像的基础,是遥感测绘卫星的核心组成部分,只有不断提升遥感测绘光学系统的性能指标才能从根本上提高遥感测绘的图像精度^[8-10]。

光学载荷决定了测绘型空间遥感器的分辨

率、测绘精度、平台体积与重量,是遥感器的核心部分。随着光学设计与制造技术的不断更新,发展出了多种多样的空间遥感测绘光学系统。常用的遥感测绘光学系统可以分为透射式和全反射式两类,其中全反射式又可以分为同轴反射式和离轴反射式^[11-13]。

本文分别介绍了对称式、匹兹瓦式和亚对称式高成像质量透射光学系统、视场离轴型和非视场离轴性两种同轴三反光学系统、离轴三反光学系统等常用的空间遥感测绘光学系统的结构形式和光学性能,并对处于研发阶段的几种新型空间反射光学系统的结构形式和光学性能进行了展望。根据不同的应用环境和技术指标,合理选用不同种类的遥感测绘光学系统,可以最大程度地利用平台资源,满足遥感测绘需求。

2 遥感测绘光学系统的特点

从20世纪90年代至今,美国、法国等先进国家相继发射了多颗遥感测绘卫星;我国也在近几年发射了以“天绘”为代表的新型遥感测绘卫星。随着技术的进步,当代遥感测绘主要呈以下发展趋势:从单线阵到多线阵,从低分辨率到高分辨率,从小幅宽到大幅宽,从有地面控制点到无地面控制点,从重访周期长到重访周期短^[14]。

要实现高质量的遥感测绘就要进一步提高光学相机的光学性能,遥感测绘光学系统需要具备分辨率高、成像质量好和畸变小的特点。其中分辨率由光学系统的焦距和像元尺寸决定;成像质量由光学系统的传递函数决定;而畸变则取决于光学系统的结构和像差校正。因为要同时具备以上多条优点,遥感测绘光学系统的设计难度一般都比较大^[15]。

像方远心光路是指通过光学系统的各视场出射光束主光线与光轴平行,出瞳位于无限远处。空间遥感测绘应用的光学系统可能会小幅度地移动像面进行调焦。像方远心光学系统由于各视场出射光束主光线与光轴平行,各视场像点的质心不会随像面的移动而产生变化,在移动像面调焦时不会引起像高的测量误差。因此,遥感测绘应用的光学系统要尽可能设计为像方远心光路^[16]。

随着技术指标的提高,遥感测绘光学系统也呈现出了一定的发展趋势:最传统的透射系统为了增长焦距发展为同轴三反系统,为了在长焦距基础上增大幅宽又发展为离轴三反系统;为了进一步提升性能指标,一些新型光学系统也进入了研究阶段。

3 高成像质量透射光学系统

不同类型的光学系统都有各自固有的优势与不足。透射光学系统体积小、结构简单、稳定性好,有利于结构设计,充分利用卫星平台资源。透射光学系统像差校正自由度多,可以设计为较大的视场,并保持较小的畸变,提高遥感测绘幅宽的同时保证了较高的测绘精度。并且,透射光学系统一般都采用传统的加工、装调方案,技术成熟,有利于缩短项目周期,提高载荷可靠性。

透射光学系统的不足也很明显,一般的透射光学系统温度、气压适应性差,需要良好的温控环境与气压校正手段。受二级光谱和透镜口径限制,透射光学系统的焦距都较短,不能满足极高分辨率的遥感测绘需求。为了增加像差优化自由度,需要较多的透镜元件,透镜元件的装调调整环节较多,公差要求较高^[17]。

常用的空间遥感测绘型透射系统主要分三种结构形式:匹兹瓦型、对称型和亚对称型。匹兹瓦型、对称型和亚对称型光学系统结构图如图1至图3所示。

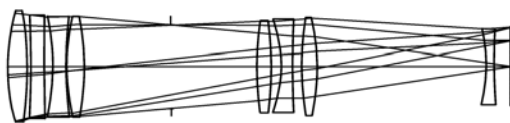


图1 匹兹瓦型透射光学系统结构

Fig. 1 Petzval transmissive optical system structure

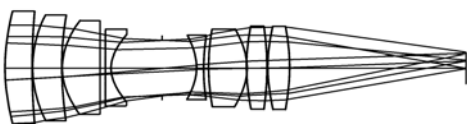


图2 对称型透射光学系统结构

Fig. 2 Symmetry transmissive optical system structure

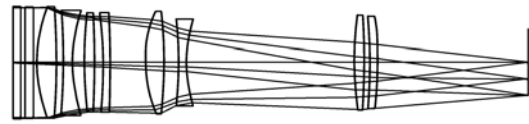


图3 亚对称型透射光学系统结构图

Fig. 3 Sub-symmetry transmissive optical system structure

匹兹瓦型光学系统通光孔径较大,光学筒长较长,后截距过短;对称型光学系统通光孔径适中,光学筒长较短,但加工公差较严,较难设计为像方远心光路。亚对称型光学系统通光孔径小、筒长适中、后截距长,并可以设计为像方远心光路,是遥感测绘应用的理想选择^[18]。

2007年,由长春光机所光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室科研人员设计、制造的高分辨、低畸变遥感测绘光学系统通过验收并发射成功,至今在轨运行情况良好。其中的主载荷光学系统就是典型的亚对称型透射光学系统^[19]。

高质量的亚对称透射光学系统焦距达到700 mm以上,相对孔径1/5,视场大于 6.5° 。图4是光学系统的传递函数曲线,图5是光学系统的相对畸变曲线。在全视场范围内,光学系统在77 lp/mm时传递函数值大于0.589,接近衍射极限;最大相对畸变小于 2×10^{-5} ,小于1/3个像元,不会影响测绘精度。光学系统成像质量良好,传递函数和相对畸变都达到了透射光学系统的优秀水平。

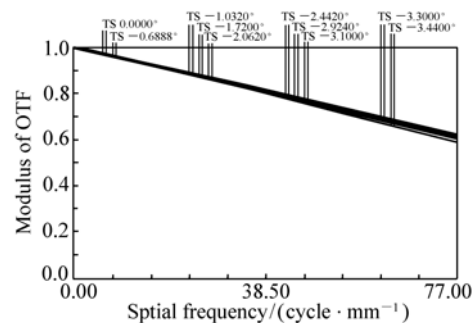


图4 亚对称型透射光学系统传递函数曲线

Fig. 4 MTF curves of sub-symmetry transmissive optical system

亚对称型光学系统采用光阑前置设计,有效缩小了透镜口径。使用光焦度分配方法校正了二级光谱,增长了系统焦距,提高了系统传递函数。

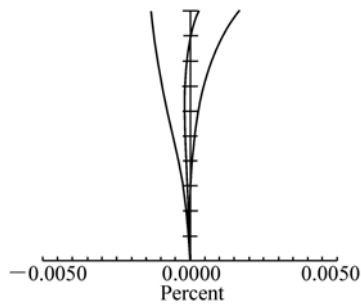


图 5 亚对称型透射光学系统相对畸变曲线

Fig. 5 Relative distortion curves of sub-symmetry transmissive optical system

全系统只采用两种玻璃材料组合,减小了光学材料误差对系统成像质量的影响。光线平缓的通过各透镜元件,没有过大折射角,减小了高级像差,放宽了公差要求。光学系统设计为像方远心光路,调焦引起的误差不会影响测绘精度。

4 同轴三反光学系统

同轴三反系统是最先得到应用的全反射遥感测绘光学系统,美国近几年发射的 Worldview 系列和 Geoeye 系列一体化遥感卫星都是采用同轴三反结构。相比于透射系统,反射系统的温度适应性更好,更有利于空间遥感应用;由于不受二级光谱等色差的影响,并且反射元件口径更大,因此可以实现更长的焦距。

同轴三反系统为全反射光学系统,不受色差影响,近轴像差校正能力强,焦距可以达到 10 m 以上。光学系统筒长短、体积小,结构紧凑,以利于平台、载荷一体化设计。所有反射镜都是旋转对称曲面,加工、装调难度小。但同轴三反系统轴外像差校正能力弱,视场较小,不能满足大幅宽要求。系统中有中心遮拦,降低了系统传递函数,为了实现较高成像质量往往需要增大反射镜口径。为了满足长焦距要求并校正轴外像差,同轴三反光学系统结构比较固定,系统较难实现远心光路^[20]。

常用的同轴三反结构主要有视场离轴型和非视场离轴型两种结构,光学系统结构如图 6、图 7 所示。同轴三反光学系统的主镜为孔径光阑,减小了主镜口径和系统体积;像面前的折叠反射镜

起到缩短光路和调焦镜的作用。

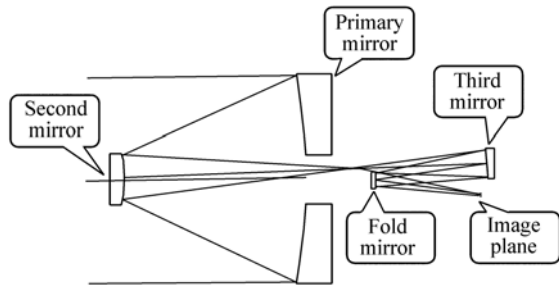


图 6 视场离轴型同轴三反系统结构

Fig. 6 Co-axial three mirrors system structure with fields off-axis

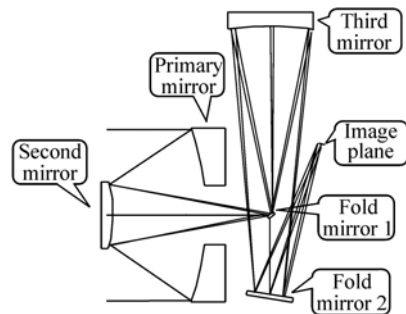


图 7 非视场离轴型同轴三反系统结构

Fig. 7 Co-axial three mirrors system structure without fields off-axis

美国在 2012 年发射的民用商业侦查卫星 Geoeye-2 就是采用的视场离轴型同轴三反星载一体化设计方案。Geoeye-2 轨道高度为 500 km,幅宽为 14.2 km,光学载荷单色地面像元分辨率为 0.25 m,焦距达到 12 m^[21]。

视场离轴型同轴三反系统采用视场离轴避免折叠反射镜对光线的二次遮拦。由于视场离轴,光线不能到达全视场像面的中心,只在全视场的四周成像,因此一般采用线阵推扫方式拼接成像。

我国在 2000 年以前离轴非球面的加工技术尚不完全成熟,非视场离轴型同轴三反结构的 3 片反射镜都是轴对称曲面,加工难度较低;因此,20 世纪末的许多高分辨率遥感光学系统在研发阶段都对这种结构进行了论证,但由于这种结构在载荷体积相同的情况下相比于视场离轴型结构成像质量偏低,在轨运行的遥感测绘光学系统还没有采用这种系统结构的先例。

非视场离轴型同轴三反系统在一次像面处放置折叠反射镜,使反射镜口径最小,减小二次遮拦;如果采用线阵推扫方式拼接成像,光学系统视场为矩形视场,一次像面处的折叠反射镜也为矩形,穿轨与沿轨方向的二次遮拦比不同,两方向成像质量不完全一致。光学系统全视场的光线都能够到达像面,没有视场缺失,可以采用画幅式面阵成像。

采用两种系统结构分别完成长焦距、大视场同轴三反遥感光学系统设计,系统焦距为 4 550 mm,全视场 3°,相对孔径 1/6.5。两种结构光学系统的传递函数曲线如图 8、图 9 所示,相对畸变曲线如图 10、图 11 所示。

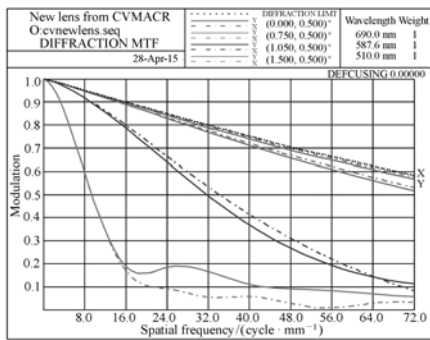


图 8 视场离轴型同轴三反系统传递函数曲线

Fig. 8 MTF curves of co-axial three mirrors system with fields off-axis

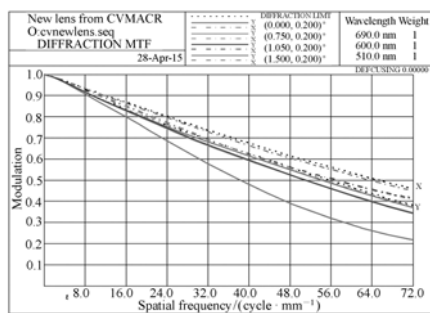


图 9 非视场离轴型同轴三反系统传递函数曲线

Fig. 9 MTF curves of co-axial three mirrors system without fields off-axis

通过传递函数曲线和相对畸变曲线的对比可以看到,在相同焦距、视场与相对孔径的前提下,视场离轴型同轴三反系统在全视场 1.5°范围内

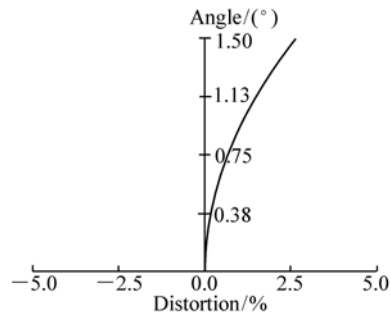


图 10 视场离轴型同轴三反系统相对畸变曲线

Fig. 10 Relative distortion curve of co-axial three mirrors system with fields off-axis

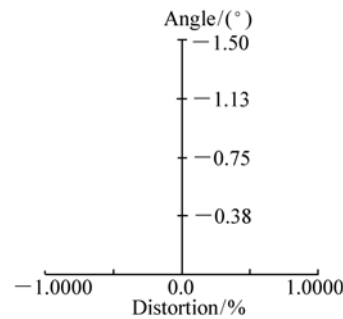


图 11 非视场离轴型同轴三反系统相对畸变曲线

Fig. 11 Relative distortion curve of co-axial three mirrors system without fields off-axis

传递函数曲线接近衍射极限,在 72 lp/mm 时最低传函为 0.525,明显高于非视场离轴系统,但当视场增大时,成像质量迅速下降,视场达到 3°时,在 72 lp/mm 时最低传函为 0.04,已经无法实现清晰成像;视场离轴型系统的相对畸变也较大,最大相对畸变达到 2.7×10^{-2} ,如果不进行后期校正就会明显的影响测绘精度。

由于二次遮拦的影响,非视场离轴型同轴三反在 1.5°视场范围内成像质量不高,不能达到衍射极限,但视场增大时成像质量下降较小,全视场达到 3°时仍可以成像,在 72 lp/mm 时最低传递函数为 0.269;相对畸变也明显小于视场离轴型系统,全视场最大相对畸变小于 2.3×10^{-5} 。

两种同轴三反光学系统光学性能的比较如表 1 所示,可以根据视场、畸变、传递函数等不同的技术指标要求合理选择两种结构形式。

表 1 两种同轴三反系统光学性能的比较

Tab. 1 Performance comparison of two coaxial three-mirror optical systems

	Fields	Secondary obstruction	Image quality	Distortion
With fields off-axis	small	none	high	modest
Without fields off-axis	big	present	low	minor

5 离轴三反光学系统

离轴三反系统是近几年新兴的空间全反射光学系统,具有更好的光学性能和更广阔的应用前景。2001 年,美国 DigitalGlobe 公司研制并发射的 Quickbird 是全球第一台采用离轴三反结构光学载荷的空间遥感卫星。与此同时,中科院长春光机所翁志成研究员领导的科研团队也对离轴三反系统的设计展开了系统研究。至今,已有多个遥感卫星平台采用这种先进的光学系统作为主要载荷,在轨运行稳定,图像清晰准确^[22-23]。

离轴三反光学系统焦距较长,没有中心遮拦,可以在较大视场范围内实现较高的成像质量,满足大幅宽要求;光学系统畸变较小;可以采用光学设计方法实现像方远心,更有利于遥感测绘应用。同时,离轴三反系统也存在一定的不足,如:光学系统筒长较长,体积较大;主镜、三镜为离轴非球面,加工难度较大;装调难度也明显大于同轴系统^[24]。

常用的离轴三反结构主要是主镜作为光阑的 Rug 型结构和次镜作为光阑的 Cook 型结构,光学系统结构如图 12、图 13 所示。

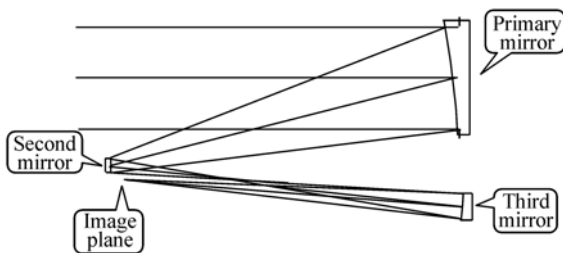


图 12 Rug 型离轴三反光学系统结构

Fig. 12 Rug off-axis three mirrors system structure

Rug 型结构主镜为光学系统孔径光阑,采用光阑离轴避免中心遮拦,主、次镜和三镜都为离轴非球面,系统有中间像,可以在一次像面处放置消

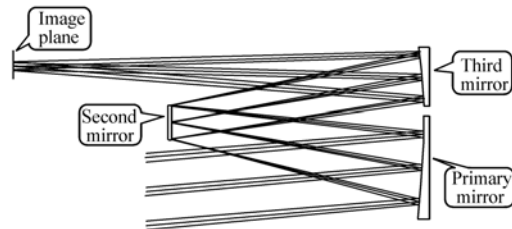


图 13 Cook 型离轴三反光学系统结构

Fig. 13 Cook off-axis three mirrors system structure

杂光阑,系统结构不对称,轴外像差校正能力不强,视场较小,并且不利于校正畸变,光学系统像方远心性较差。

Cook 型离轴三反结构次镜为孔径光阑并且不离轴,主镜、三镜为离轴非球面;主、次镜和次、三镜间隔相同,结构对称,轴外像差校正能力强,视场较大,畸变较小;通过光焦度分配,可以将光学系统设计为像方远心光路,远心性较好,更加适合遥感测绘应用^[25]。

采用 Rug 型和 Cook 型两种结构分别设计焦距 3 500 mm,视场 6.88°,相对孔径 1/9 的离轴三反系统,光学系统传递函数曲线和相对畸变曲线如图 14~17 所示。

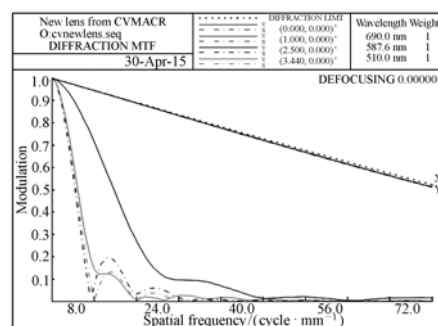


图 14 Rug 型离轴三反系统传递函数曲线

Fig. 14 MTF curves of Rug off-axis three mirrors system

由于没有中心遮拦,并且光学系统焦距与相

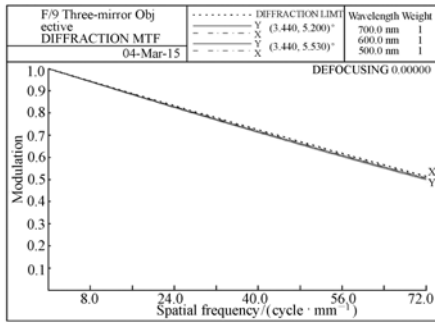


图 15 Cook 型离轴三反系统传递函数曲线

Fig. 15 MTF curve of Cook off-axial three mirrors system

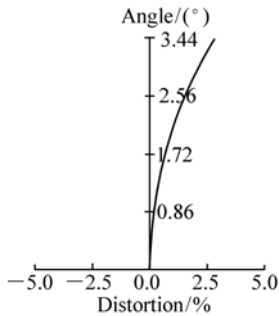


图 16 Rug 型离轴三反系统相对畸变曲线

Fig. 16 Relative distortion curve of Rug off-axial three mirrors system

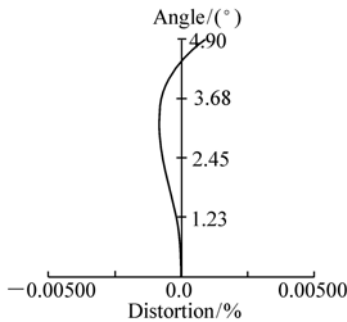


图 17 Cook 型离轴三反系统相对畸变曲线

Fig. 17 Relative distortion curve of Cook off-axial three mirrors system

对孔径相同,当全视场小于 2° 时,两种光学系统成像质量一致,都可以达到衍射极限。当视场增大时,Rug 型离轴三反系统成像质量明显变差;而 Cook 型离轴三反系统成像质量没有显著变化,仍然接近衍射极限,在 72 lp/mm 时,系统最低传递

函数为 0.532;通过两种结构光学系统相对畸变曲线的比较可知,Cook 型离轴三反系统的畸变也较小,最大相对畸变小于 8×10^{-6} ,是目前长焦距、大幅宽遥感测绘光学系统的最佳选择。

6 新型反射式空间光学系统

为了满足不断提高了遥感测绘需求,光学系统需要更长的焦距、更大的视场和更小的体积。现有的光学系统结构和反射镜元件已经不能满足这些要求,需要对现有结构进行调整与优化,设计出性能更好的新型光学系统。

6.1 自由曲面同轴三反光学系统

同轴三反系统具有筒长短、体积小优势,但一直不能克服视场较小的缺点,通过调整面形或增加反射镜来增大同轴反射系统的视场是解决这一缺点的主要途径。

非视场离轴型同轴三反系统的视场较大、畸变小,但成像质量较差。为了提高大视场的成像质量并保持筒长短、体积小优势,在光学系统结构不变的基础上,在主镜上加工自由曲面,增加优化自由度,可以增大系统的视场、提高系统轴外成像质量。通过添加自由曲面,显著提高了光学系统大视场的传递函数,光学系统视场达到 3° 以上,是传统同轴三反系统视场的 2 倍,焦距为 $4\,550 \text{ mm}$,全视场为 3° ,相对孔径为 $1/6.5$ 的自由曲面同轴三反光学系统传递函数曲线和相对畸

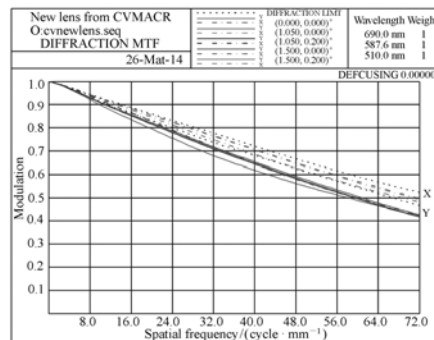


图 18 自由曲面同轴三反系统传递函数曲线

Fig. 18 MTF curves of free-form surface co-axial three mirrors system

变曲线如图 18、图 19 所示。全视场传递函数在 72 lp/mm 时大于 0.413,相对畸变小于 2×10^{-5} 。

500 km 轨道高度时,光学系统幅宽可达 28 km,畸变满足遥感测绘精度要求,一定范围内可以替代离轴三反系统,在小卫星平台星载一体化设计领域具有较高实用性^[26]。

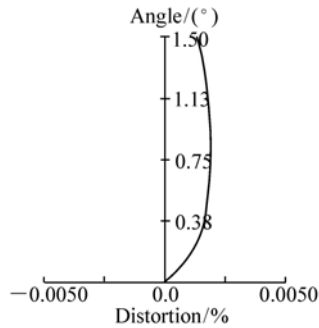


图 19 自由曲面同轴三反系统相对畸变曲线

Fig. 19 Relative distortion curve of free-form surface co-axial three mirrors system

6.2 大视场同轴四反光学系统

增加反射镜也能起到增大同轴反射系统视场的作用,在同轴三反系统一次像面后增加一片凸

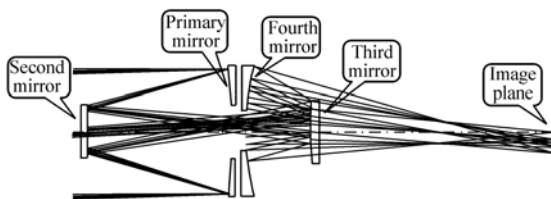


图 20 大视场同轴四反光学系统结构

Fig. 20 Large field co-axial four mirrors optical system structure

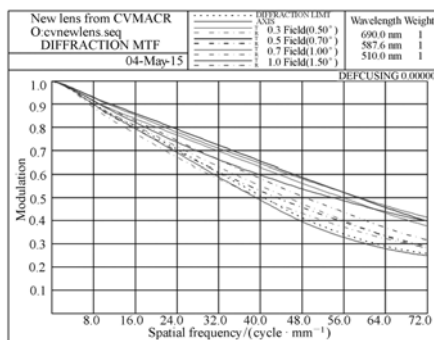


图 21 大视场同轴四反光学系统传递函数曲线

Fig. 21 MTF curves of large field co-axial four mirrors optical system

非球面反射镜可以更好的校正轴外像差,提高大视场成像质量,光学系统结构如图 20 所示。焦距 4 550 mm,全视场 3°,相对孔径 1/6.5 的同轴四反光学系统传递函数和相对畸变曲线如图 21、22 所示。

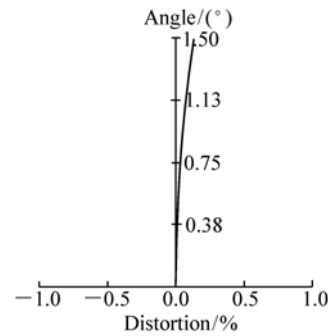


图 22 大视场同轴四反光学系统相对畸变曲线

Fig. 22 Relative distortion curve of large field co-axial four mirrors optical system

光学系统反射镜口径较小,加工、装调难度较小,但光学系统筒长较长,不利于小型化。由于二次遮拦较大,如果想进一步提高系统成像质量只能增大光学系统的相对孔径。

6.3 超大视场离轴四反光学系统

超大幅宽离轴四反光学系统由四块非球面反射镜组成,光学系统结构如图 23 所示。采用视场离轴方式避免了中心遮拦,既保持了离轴三反系统良好的成像质量又增加了系统优化自由度,大幅度地增大了光学系统的视场。但由于视场增大,反射镜口径和系统体积也随之增大,光学系统的加工和装调难度都比较高^[27]。

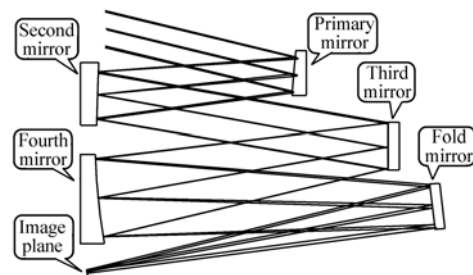


图 23 超大视场离轴四反光学系统结构

Fig. 23 Ultra-large field off-axial four mirrors optical system structure

经过结构优化与合理的光焦度分配,光学系

统可以实现大于 40° 的全视场,系统焦距 1 800 mm,相对孔径 1/9,在 72 lp/mm 时全视场最低传函大于 0.54。但由于视场过大,畸变难以校正,系统最大相对畸变达到 8%,不能满足遥感

测绘精度要求,只能通过图像处理等其他方法去除畸变的影响。光学系统的传递函数曲线和相对畸变曲线如图 24、图 25 所示。

7 结束语

当技术指标分辨率较低、幅宽较大时,透射光学系统体积小、结构紧凑、技术成熟,仍然具有较高的实用性;分辨率较高、幅宽较小时,为了减小系统体积,节约平台资源,实现星载一体化设计,可以采用同轴三反光学系统;分辨率较高、幅宽较大时,离轴三反系统具有明显性能优势,是最佳的空间遥感测绘光学系统结构形式;新型光学系统相比于传统结构在某些方面提高了光学性能,具有更广阔的应用前景,同时也还有需要解决的科学问题,尚待进一步分析和研究。

根据光学性能、结构尺寸的不同,在不同的应用环境选择多种结构形式的遥感测绘光学系统,对卫星平台资源进行合理的分配和组合,在有限的平台资源下实现更高的系统技术指标。

本文详细阐述了空间遥感测绘光学系统的发展趋势、技术指标中的特殊要求,以及遥感测绘光学系统的设计难点。分别介绍了高成像质量透射光学系统、同轴三反光学系统、离轴三反系统等常用的空间遥感测绘光学系统的结构形式和光学性能,并对处于研发阶段的新型空间反射光学系统的结构形式和光学性能进行了展望,对遥感测绘光学系统的设计与不同应用环境光学系统的选择具有重要的指导意义。

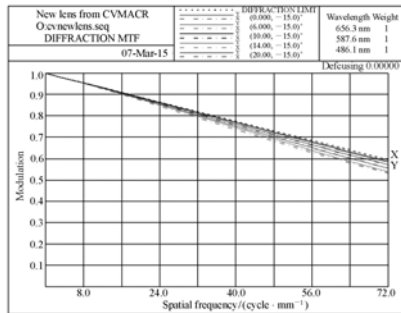


图 24 超大视场离轴四反光学系统传递函数曲线

Fig. 24 MTF curve of ultra-large field off-axial four mirrors optical system

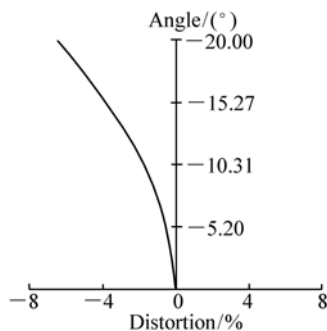


图 25 超大视场离轴四反光学系统相对畸变曲线

Fig. 25 Relative distortion curve of ultra-large field off-axial four mirrors optical system

参考文献:

- [1] 朱红,刘维佳,张爱兵. 光学遥感立体测绘技术综述及发展趋势[J]. 现代雷达,2014,36(6):6-12.
ZHU H,LIU W J,ZHANG A B. Overview and development trend of optical remote sensing stereo mapping techniques[J]. *Modern Radar*,2014,36(6):6-12. (in Chinese)
- [2] 王素敏,李向英,何劲. 资源三号卫星影像测绘性能分析[J]. 影像技术,2013,3(3):48-50.
WANG S M,LI X Y,HE J. The measurement performance analyses of 'ZY-3' satellite image[J]. *Image technology*, 2013,3(3):48-50. (in Chinese)
- [3] 吕勇,冯其波,孙世君,等. 三线阵测绘相机交会角在轨监测可行性分析[J]. 红外与激光工程,2012,41(12):3390-3395.
LV Y,FENG Q B,SUN SH J,et al. . Feasibility analysis of on-orbit intersection angle monitoring for three-line-array mapping camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2012,41(12):3390-3395. (in Chinese)
- [4] 岳涛,黄宇民,刘品雄,等. 未来中国卫星遥感的发展分析[J]. 航天器工程,2008,17(4):77-82.

- YUE T, HUANG Y M, LIU P X, *et al.*. Analysis of China's future satellite remote sensor development[J]. *Spacecraft Engineering*, 2008, 17(4):77-82. (in Chinese)
- [5] 张勇, 谷正气, 刘水长, 等. 基于高分辨率遥感影像的城市群交通路网监测技术研究[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(1):76-81.
- ZHANG Y, GU Z Q, LIU SH C, *et al.*. Study on transportation network monitoring based on high resolution aerial images for city-clusters[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(1):76-81. (in Chinese)
- [6] 黄宇民, 范一大, 马骏, 等. 中国遥感卫星系统灾害监测能力研究[J]. *航天器工程*, 2014, 23(6):7-12.
- HUANG Y M, FAN Y D, MA J, *et al.*. Research on disaster monitoring ability of chinese remote satellite system[J]. *Spacecraft Engineering*, 2014, 23(6):7-12. (in Chinese)
- [7] 王敏彦, 赵坤. 遥感图像中农用地与人工建筑自动分割技术研究[J]. *现代电子技术*, 2015, 38(6):105-107.
- WANG M Y, ZHAO K. Research on automatic segmentation of agricultural land and artificial buildings in remote sensing image[J]. *Modern Electronics Technique*, 2015, 38(6):105-107. (in Chinese)
- [8] 尤政, 王翀, 邢飞, 等. 空间遥感智能载荷及其关键技术[J]. *航天返回与遥感*, 2013, 34(1):34-43.
- YOU ZH, WANG C, XING F, *et al.*. Key technologies of smart optical payload in space remote sensing[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(1):34-43. (in Chinese)
- [9] 唐新明, 谢俊峰, 张过. 测绘卫星技术总体发展和现状[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(3):17-24.
- TANG X M, XIE J F, ZHANG G. Development and status of mapping satellite technology[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(3):17-24. (in Chinese)
- [10] 钟红军, 杨孟飞, 卢欣. 星敏感器标定方法研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5):1343-1348.
- ZHONG H J, YANG M F, LU X. Calibration method of star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5):1343-1348. (in Chinese)
- [11] 李海星, 惠守文, 丁亚林. 国外航空光学测绘装备发展及关键技术[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(5):469-477.
- LI H X, HUI S W, DING Y L. Development and key techniques of optical mapping equipment in foreign airborne[J]. *J. Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(5):469-477. (in Chinese)
- [12] 刘新平, 高英俊, 鲁昭, 等. 遥感器小型化技术研究[J]. *遥感技术与应用*, 1999, 14(3):30-33.
- LIU X P, GAO Y J, LU ZH, *et al.*. Research on the miniaturizing techniques of remote sensor[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, 14(3):30-33. (in Chinese)
- [13] 岳涛. 中国航天光学遥感技术成就与展望[J]. *航天返回与遥感*, 2008, 29(3):10-19.
- YUE T. The achievements and future prospects of chinese space optical remote sensing technology[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(3):10-19. (in Chinese)
- [14] 曲宏松, 金光, 张叶. "Next View 计划"与光学遥感卫星的发展趋势[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(6):467-476.
- QU H S, JIN G, ZHANG Y. NextView program and progress in optical remote sensing satellites[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2009, 2(6):467-476. (in Chinese)
- [15] 韩昌元. 空间光学的发展与波前传感技术[J]. *中国光学与应用光学*, 2008, 1(1):13-24.
- HAN CH Y. Progress in space optics and wave front sensing technique[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1):13-24. (in Chinese)
- [16] 李同海, 王海霞, 赵新亮, 等. 像方远心航拍数码相机镜头设计[J]. *光电工程*, 2011, 38(3):25-28.
- LI T H, WANG H X, ZHAO X L, *et al.*. Design of the telecentric beam path aerial digital camera lens[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(3):25-28. (in Chinese)
- [17] 韩昌元. 空间光学系统[M]. 长春: 长春光学精密机械研究所教材. 2003:32-34.
- HAN CH Y. *Space Optical System*[M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanic Textbook, 2003:32-34. (in Chinese)
- [18] 王红, 田铁印. 三线阵测绘相机光学系统的设计和公差分析[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7):1444-1449.

- WANG H, TIAN T Y. Design of three line array mapping camera and its tolerance analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1444-1449. (in Chinese)
- [19] 苗健宇, 张立平, 翟岩, 等. 三线阵 CCD 立体测绘相机的集成装调[J]. *中国光学*, 2012, 5(4):366-372.
MIAO J Y, ZHANG L P, ZHAI Y, *et al.*. Integrative assembly for three-line array CCD tridimensional mapping camera [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4):366-372. (in Chinese)
- [20] 孙倩倩, 胡新奇. 同轴三反线阵空间相机宽视场波前误差的在轨检测方法[J]. *光学技术*, 2015, 41(2):166-170.
- [21] 刘兆军, 周峰, 胡斌, 等. 长焦距同轴三反空间相机光学系统研究[J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(6):46-52.
LIU ZH J, ZHOU F, HU B, *et al.*. Study on coaxial three-mirror-anastigmat space camera with long focal length [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(6):46-52. (in Chinese)
- [22] 郭疆, 刘金国, 王国良, 等. 测绘用离轴三反光学系统技术[J]. *遥感学报*, 2012, 16(增刊):17-21.
GUO J, LIU J G, WANG G L, *et al.*. Technology of off-axis TMA aerospace mapping camera [J]. *J. Remote Sensing*, 2012, 16(s):17-21. (in Chinese)
- [23] 常军, 翁志成, 姜会林, 等. 宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(1):55-58.
CHANG J, WENG ZH C, JIANG H L, *et al.*. Design of optical system for space camera with long focal length, wide coverage and high resolution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1):55-58. (in Chinese)
- [24] 巩盾, 田铁印, 王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8):1754-1759.
GONG D, TIAN T Y, WANG H. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1754-1759. (in Chinese)
- [25] 邵明东, 郭疆, 孙继明. 离轴三反测绘相机调焦机构的设计[J]. *中国光学*, 2012, 5(4):373-379.
SHAO M D, GUO J, SUN J M. Design of focusing mechanism for off-axis TMA mapping cameras [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4):373-379. (in Chinese)
- [26] 薛栋林, 郑立功, 张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12):2813-2820.
XUE D L, ZHENG L G, ZHANG F. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2813-2820. (in Chinese)
- [27] 丁学专, 王欣, 兰卫华, 等. 离轴四反射镜光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2):319-321.
DING X Z, WANG X, LAN W H, *et al.*. Design of four mirror reflective anastigmat optic system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2):319-321. (in Chinese)

作者简介:



巩盾(1982—),男,吉林长春人,博士,副研究员,主要从事光学遥感器与大型光电经纬仪方面的研究。E-mail: gongdun@sina.com