

同轴偏视场共孔径面阵成像光学系统设计

赵宇宸¹, 何欣¹, 冯文田², 刘强¹, 付亮亮¹, 谭进国¹, 孟庆宇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. 32142 部队 72 分队, 河北 保定 071000)

摘要: 随着对空间信息获取能力的要求不断提高, 使得高分辨率动态遥感成为空间光学领域一个新的研究热点。偏视场同轴三反光学系统具有长焦距、体积小、轻量化程度和成像质量高等特点, 能够满足低轨视频卫星高分辨率、多谱段、多功能性和低成本的要求, 因此在高分辨率动态遥感领域有着广泛的应用前景。以高斯光学和三反射消像差理论为基础, 设计了可见光面阵成像、近红外和中红外线阵推扫成像的共孔径光学系统。可见光系统焦距 4.1 m, 近红外系统焦距 2.6 m, 中红外系统焦距 1.85 m, 三者孔径均为 520 mm, 视场均为 $0.6^\circ \times 0.6^\circ$, 成像质均接近衍射极限, 成像质量良好。系统总长小于 $f'_{\text{visible}}/3.7$, 且系统的加工和装配公差较为宽松, 易于实现。

关键词: 光学设计; 面阵成像; 同轴三反光学系统; 共孔径; 公差分析

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0718004

Design of common aperture coaxial field-bias optical system used in area array imaging sensor

Zhao Yuchen¹, He Xin¹, Feng Wentian², Liu Qiang¹, Fu Liangliang¹, Tan Jinguo¹, Meng Qingyu¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033 China;
2. Branch 72 of No.32142 Army, Baoding 071000, China)

Abstract: With the increasing requirement of space information acquisition ability, the dynamic high-resolution remote sensing has become a new hotspot research in space optical fields. The field-bias coaxial three-mirror optical system has the advantage of long focal length, small volume, high level of lightweight and high quality image, which can satisfy the high-resolution, multi-spectrum, versatility and low cost requirement for the LEO video satellite, so it is widely used in the field of the dynamic high-resolution space sensing field. Based on the Gaussian optics and three-mirror aberration theory, the common aperture optical system with area array imaging in visible spectrum and linear push-broom imaging in NIR and MIR spectrum was designed. The focal length for visible spectrum is 4.1 m, the focal length for NIR spectrum is 2.6 m and the focal length for MIR spectrum is 1.85 m, the aperture of three systems is 520 mm, field of view is $0.6^\circ \times 0.6^\circ$. The optical structure is convenient for area array

收稿日期: 2018-02-24; 修订日期: 2018-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(61705220)

作者简介: 赵宇宸(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事空间光学系统设计及杂散光分析方面的研究。Email: bernard19@163.com

imaging, and the imaging quality of the optical system approaches the diffraction limit. The total length of the optical system is less than $f'_{\text{visible}}/3.7$, and is easily implemented because of the relatively loose tolerance about processing and assembling.

Key words: optical design; area array imaging; coaxial three-mirror optical system; common aperture; tolerance analysis

0 引言

自 1999 年美国 IKONOS-2 高分辨率空间成像光学系统成功发射以来, 线阵推扫式空间光学系统在近几十年内得到了迅速发展^[1]。随着 2013 年美国 Skybox Imaging 公司研发的首颗低轨道视频卫星 SkySat 的成功发射, 使得高分辨率动态遥感成为各国空间光学领域一个新的研究热点。例如印度尼西亚和德国联合研制的 LAPAN-Tubsat 卫星、美国 VIC 小型卫星、南非的 SumbandilaSat 探路者卫星、中国天拓二号卫星及吉林一号卫星均为视频卫星^[2-3]。

视频卫星是指卫星采用“凝视”的方式对目标区域进行连续成像, 并通过视频的方式对热点目标的运动轨迹、态势变化等进行记录, 这种信息获取方式在防灾救灾、资源普查、反恐及大型活动中人流变化监测等方面具有广泛的应用。而目前实现视频卫星的方式主要有两种^[4]: 静止轨道空间光学系统, 利用系统与地面相对静止的轨道特性, 实现卫星的视频成像能力; 低轨道空间光学系统, 利用卫星姿态敏捷能力或图像运动补偿, 实现卫星的视频成像能力。两者相比较而言, 静止轨道卫星不需要采用运动补偿装置, 且具有大视场、高稳定性的特点, 但为了达到米级地面像元分辨率, 系统口径通常很大, 这也增加了系统的研制和发射成本, 而利用卫星敏捷姿态的低轨道视频卫星以其高分辨率、低成本的特点, 得到了越来越多的关注。

文中基于系统参数, 通过高斯光学和三反射消像差理论, 计算得到了具有中间像面的同轴三反光学系统的初始结构。同轴三反射系统具有反射式系统无色差的特点, 且系统具有三个半径、三个二次曲面系数和两个间隔共八个变量, 在满足焦距、球差、彗差、像散、场曲五个条件外还有三个变量可以用于系统结构调整, 具有较大的设计自由度, 是空间光学

系统较为常见的一种结构形式。同时, 结合空间光学系统多功能化的要求, 通过引入偏视场的使用方法, 使平面反射镜与后续光学系统空间分离, 既进一步压缩系统尺寸, 也为后续光路的光分提供空间。此类光学系统存在中间像面和实出瞳, 在实出瞳附近进行分光有利于不同谱段成像的共孔径设计。同时在中间像面和实出瞳分别设置视场光阑和冷光阑, 可以有效抑制红外谱段的杂散光。文中针对光谱范围为 $0.48\sim 0.78\ \mu\text{m}$ 可见光谱段、 $1.2\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 近红外谱段和 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 中波红外谱段, 具体设计了多谱段共孔径同轴偏视场折反射式光学系统, 在充分利用主光学系统能力的同时, 尽可能压缩系统整体尺寸, 这对低轨轻小型高分辨率视频卫星光机结构的轻量化设计也具有重要意义。

1 光学系统参数

同轴三反光学系统初始结构的计算方法在诸多文献中都有详细的介绍, 在此不再赘述^[5-7]。主要针对空间光学系统设计过程中所涉及的参数进行介绍。设计参数主要包括: 焦距 f 、视场 ω 、系统口径 D 、调制传递函数 f_{MTF} 、像元尺寸 α 、地面像元分辨率 g_{GSD} 、轨道高度 H 和地面覆盖宽度 W 。各参数之间的关系可以表示为^[8]:

$$f=H\times\alpha/g_{\text{GSD}} \quad (1)$$

$$\theta_{\alpha}=\alpha/f \quad (2)$$

$$\theta_o=1.22\lambda/D \quad (3)$$

$$W=2H\times\tan(\omega/2) \quad (4)$$

$$f_{\text{MTFstatic}}(\rho_N)=f_{\text{MTF}\alpha}\times f_{\text{MTF}\epsilon}\times f_{\text{MTFd}}(\rho_N)\times f_{\text{MTFs}}(\rho_N) \quad (5)$$

式中: θ_{α} 为像元角分辨率; θ_o 为光学系统角分辨率; λ 为系统的工作波长; $f_{\text{MTFstatic}}(\rho_N)$ 为系统在奈奎斯特频率 $\rho_N(\rho_N=1/2\alpha)$ 处的静态调制传递函数; $f_{\text{MTF}\alpha}$ 为系统的加工装调传函, 通常取 0.85; $f_{\text{MTF}\epsilon}$ 为电子学传函, 通常取 0.9; $f_{\text{MTFd}}(\rho_N)$ 为系统在奈奎斯特频率处的设计

传函; $f_{MFR}(\rho_N)$ 为系统的采样传函, 通常取 0.64。

从公式(1)中可以看出, 在轨道高度 H 和地面像元分辨率 g_{GSD} 一定的情况下, 针对不同像元尺寸 α 可以对不同谱段光学系统焦距 f 进行求解。公式(2)表示在像元尺寸一定时光学系统的像元角分辨率, 在光学设计过程中要求光学系统的角分辨率 θ_o 要高于像元角分辨率 θ_α , 从而通过公式(2)、(3)可以求出满足设计指标要求的光学系统口径。公式(5)为空间光学系统静态传函的计算公式, 通常在测试过程中要求系统 $f_{MFR}(\rho_N) \geq 0.2$, 因此可以通过公式(5)计算得出奈奎斯特频率下的光学设计传函 $f_{MFR}(\rho_N)$ 。

根据公式(1)~(5)的计算, 可以得出各谱段光学系统的参数如表 1 所示。

表 1 空间光学系统设计参数

Tab.1 Design parameters of space optical system

Parameters	Visible	NIR	MIR
Spectral band/ μm	0.48-0.78	1.2-1.5	3-5
Focal length/m	4.1	2.6	1.85
Aperture/mm	520	520	520
Field of view/ $^\circ$	0.6 \times 0.6	0.6 \times 0.6	0.6 \times 0.6
f_{MFR}	≥ 0.408	≥ 0.408	≥ 0.408
Pixel size/ μm	6.5	15	25
g_{GSD}/m	0.8	2.5	6.8
Width/km	5	5	5

2 光学系统优化设计及性能分析

2.1 光学系统优化设计

在同轴三反光学系统初始结构的基础上, 通过增加偏视场消除系统二次遮拦, 可以得到全反射式的可见光成像系统, 系统焦距 4.1 m, 孔径光阑位于主镜, 视场为 0.6 \times 0.6 $^\circ$, 各反射镜参数如表 2 所示。

从表 2 中可以看出, 可见光系统的主镜为二次曲面系数接近于 1 的椭球面, 这种面型有利于初级球差、正弦差和像散的矫正; 次镜和三镜分别为双曲面和椭球面; 同时增加主镜和三镜的六次、八次非球面系数作为优化变量, 尽可能减小系统像差, 同时在保证成像质量的前提下尽可能扩大视场。光学系统的整体布局如图 1 所示。

表 2 同轴光学系统参数

Tab.2 Parameters of coaxial optical system

	Radius/mm	Thickness/mm	Conic	6th order coefficients	8th order coefficients
Primary mirror	-1 356.17	-519.3	-0.954 9	3.350 9 $\times 10^{-20}$	-1.876 3 $\times 10^{-20}$
Secondary mirror	-406.1	1235.4	-2.061 6	-	-
Tertiary mirror	576.42	534.2	-0.483 9	-1.865 $\times 10^{-18}$	-

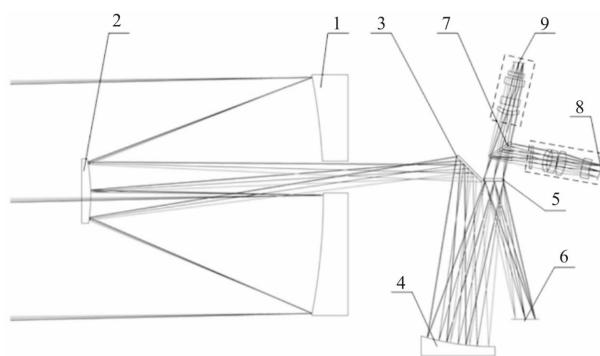


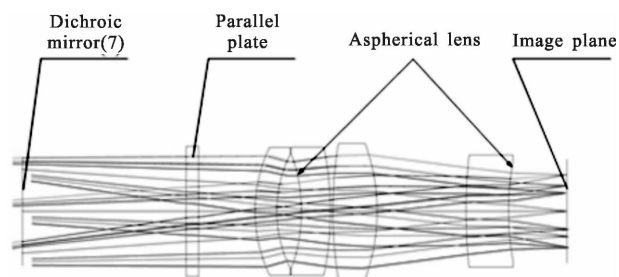
图 1 光学系统布局

Fig.1 Layout of optical system

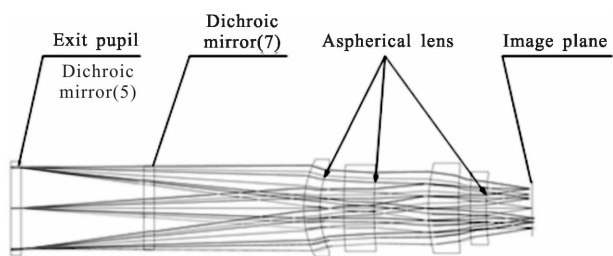
可见光系统由三个非球面镜和两个平面反射镜组成, 地面目标光线经过主镜(1)、次镜(2)后在主镜后部形成一次像面, 这种结构有利于孔径光阑的设计与安装, 成像光线再通过平面反射镜(3)、三镜(4)和材料为硒化锌的分色镜(5)最终在像面处进行成像。在主光学系统优化设计过程中需要注意的是: 减小次镜对主镜的遮拦比, 提高目标亮度并减小衍射光斑次级大对成像质量的影响; 平面反射镜(3)尽可能远离中间像面, 减小镜面缺陷对系统成像质量的影响^[9]; 由于采用偏视场成像, 主镜中心通光孔具有一定的离轴量(40 mm), 为了避免在杂散光抑制结构设计中主镜中心遮光罩产生的二次遮拦, 应控制通光孔径上边缘与次镜边缘的距离, 保证遮光罩的安装位置; 三镜为离轴反射镜(离轴量为 81.5 mm), 为了降低系统装调难度, 镜面的法线方向应与系统的子午平面重合; 在三镜与像面中间采用分色镜(5)对可见光光路进行折转, 一方面可以通过调整反射镜

放置角度,使系统焦平面与其他光学元件空间分离,保证焦平面组件的安装空间,另一方面可以将其放置在主光学系统实出瞳附近,通过反射可见光谱段透射红外谱段,实现系统的共孔径设计。

在分色镜(5)后采用 45°倾斜放置的材料为硒化锌的分色镜(7)对近红外谱段和中红外谱段进行分光,后组光学系统的光线追迹如图 2 所示。近红外和中红外谱段分别采用两片和三片二次曲面镜对系统的轴外像差进行校正,其二次曲面系数分别为:1.26、0.94; -2.43、-2.87、4.35。两个红外谱段采用倾斜光轴 45°的分色镜(7)进行分光,这也导致轴上视场的视场像差增大,其中最为严重的就是像散。因此,在近红外谱段内增加一个倾斜的平行平板对分色镜(7)所引入的像散进行校正。同时为了有效抑制杂散光对红外系统成像质量的影响,在主光学系统实出瞳位置设置冷光阑(分色镜(5)),以降低背景杂散光和主光学系统内部杂散光强度。在必要情况下可以将红外系统放置在冷箱中,以提高冷光阑效率。



(a) 近红外谱段
(a) NIR band



(b) 中红外谱段
(b) MIR band

图 2 红外谱段光学布局图

Fig.2 Layout of infrared spectral optical system

最终,经过多个平面反射镜对光路进行压缩后,

光学系统总长 $f'/3.7 \sim f'/3.8$, 高 $f'/7.9$ (f' 为可见光系统焦距)。这种系统的主要优点包括:(1) 同轴三反系统通过偏视场应用,避免了平面反射镜的二次遮拦,提高了系统的能量集中度;(2) 采用具有中间像面的光学结构,便于视场光阑及里奥光阑的设置,有利于系统杂散光的抑制;(3) 采用实出瞳进行分光,实现了可见光、近红外和中红外三谱段的共孔径成像,充分利用主光学系统性能,同时提高了系统的使用效率;(4) 通过平面反射镜对光路的折叠,使得系统整体体积较小,结构紧凑。

2.2 光学性能分析

系统视场为 $0.6^\circ \times 0.6^\circ$, 选取五个典型视场角对系统的成像质量进行评价,如表 3 所示。

表 3 视场角

Tab.3 Field of view

	1	2	3	4	5
$x/(\circ)$	0	0.21	0.3	-0.21	-0.3
$y/(\circ)$	0.95	0.95	0.65	1.25	1.25

分别采用 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 、 $\lambda=1350 \text{ nm}$ 和 $\lambda=4000 \text{ nm}$ 作为可见光谱段、近红外谱段和中红外谱段的参考波长,各系统的波像差如表 4 所示。根据参考波长及系统参数,可以得到各谱段的艾里斑直径分别为: $12.17 \mu\text{m}$ (可见光谱段); $16.47 \mu\text{m}$ (近红外谱段); $34.75 \mu\text{m}$ (中红外谱段),系统各视场点列图如表 5 所示。各谱段调制传递函数(f_{MTF})值在各空间频率处皆接近衍射极限,如图 3 所示。

表 4 光学系统波像差(参考波长 $\lambda=632.8 \text{ nm}$)

Tab.4 Wavefront error of optical system

(Reference wavelength $\lambda=632.8 \text{ nm}$)

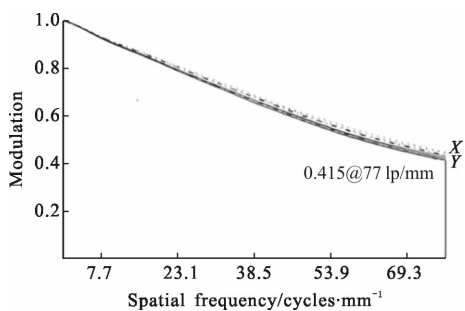
FOV	Visible WFE		NIR WFE		MIR WFE	
	PV	RMS	PV	RMS	PV	RMS
$(0^\circ, 0.95^\circ)$	0.243	0.04	0.139	0.027	0.032	0.006
$(0.21^\circ, 0.95^\circ)$	0.248	0.039	0.187	0.033	0.052	0.009
$(0.3^\circ, 0.6^\circ)$	0.264	0.045	0.176	0.037	0.093	0.014
$(-0.21^\circ, 1.25^\circ)$	0.220	0.04	0.236	0.042	0.03	0.005
$(-0.3^\circ, 1.25^\circ)$	0.240	0.044	0.271	0.045	0.043	0.007

表 5 各谱段点列图

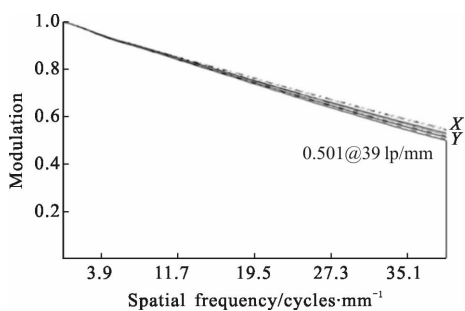
Tab.5 Spot diagram of different spectrum

	(0°,0.95°)	(0.21°,0.95°)	(0.3°,0.6°)	(-0.21°,1.25°)	(-0.3°,1.25°)
Visible					
NIR					
MIR					

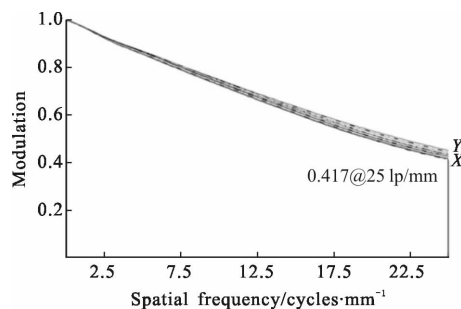
根据设计结果可以看出,系统最大波像差 RMS 值为 $\lambda/22$,且各视场点列图均在艾里斑以内。由于系统为同轴系统,次镜不可避免地会对主镜产生中心遮拦,这也导致系统的 f_{MFF} 下降,通过增加次镜及其支撑结构的遮挡可以看出,可见光谱段奈奎斯特频



(a) 可见光谱段
(a) Visible spectrum



(b) 近红外谱段
(b) NIR spectrum



(c) 中红外谱段
(c) MIR spectrum

图 3 各谱段 MTF 曲线

Fig.3 MTF curves of different spectrum

率(77 lp/mm)处最低 f_{MFF} 值为 0.415,近红外谱段奈奎斯特频率(39 lp/mm)处最低 f_{MFF} 值为 0.501,中红外谱段奈奎斯特频率(25 lp/mm)处最低 f_{MFF} 值为 0.417,各谱段平均 f_{MFF} 值均大于 0.408 的设计指标要求,可以保证最终光学系统的静态 f_{MFF} 优于 0.2。系统成像质量良好,视场较大且成像质量优良,满足空间光学系统的设计要求。

3 公差分析

折反射系统的公差主要包括位置公差和加工公差。可见光系统由反射镜组成,各反射镜均具有六个自由度,即六个位置公差^[10]:沿 x 、 y 、 z 轴的平移公差(DLX、DLY、DLZ)和绕 x 、 y 、 z 轴的旋转公差(DLA、

DLB、DLC)。近红外和中红外系统为旋转对称系统，因此各透镜具有五个位置公差。光学元件的加工公差主要包括曲率半径公差(DLR)、二次曲面系数公差(DAK)、高次非球面系数公差(DAA、DAB 等)和面型公差(RES)。为保证各系统在全视场内的像质，以各系统奈奎斯特频率处的 f_{MFF} 作为性能指标，以像面的

位置调整量作为补偿对系统的公差进行分析。

通过灵敏度及反转灵敏度分析，可以得到可见光系统的公差分配结果如表 6 所示。而近红外和中波红外谱段，以图 1 中出瞳镜的表面为 1、2，其他表面依次排列，可以得到近红外和中红外系统的公差分配结果如表 7 所示。

表 6 可见光系统公差分配结果

Tab.6 Tolerance allocation result of visible system

Type	Item	Primary mirror	Secondary mirror	Third mirror
Assembling	Displacement x/mm	0.02	0.05	0.3
	Displacement y/mm	0.01	0.02	0.1
	Displacement z/mm	0.2	0.5	1
	Tilt $\alpha/(\prime)$	10	10	20
	Tilt $\beta/(\prime)$	5	8	6
	Tilt $\gamma/(\prime)$	60	60	60
	$\Delta R/mm$	2	0.6	1
Manufacturing	ΔK	0.000 5	0.001 5	0.001
	ΔB	5.0×10^{-21}	-	5×10^{-19}
	ΔC	5.0×10^{-26}	-	-
	Surface error RMS($\lambda=632.8\text{ nm}$)	$\lambda/50$	$\lambda/50$	$\lambda/50$

表 7 近红外系统公差分配结果

Tab.7 Tolerance allocation result of NIR system

Type	Item	Lens 1	Lens 2	Lens 3	Lens 4
Assembling	Displacement x/mm	0.2	0.1	0.1	0.2
	Displacement y/mm	0.2	0.1	0.1	0.2
	Displacement z/mm	0.1	0.1	0.1	0.1
	Tilt $\alpha/(\prime)$	20	20	20	20
	Tilt $\beta/(\prime)$	20	20	20	20
	$\Delta R/mm$	0.06	0.1	0.1	0.15
Manufacturing	$\Delta K(\text{concave surface})$	-	0.002	-	0.002
	Surface error RMS($\lambda=1.35\ \mu\text{m}$)	$\lambda/40$	$\lambda/40$	$\lambda/40$	$\lambda/40$

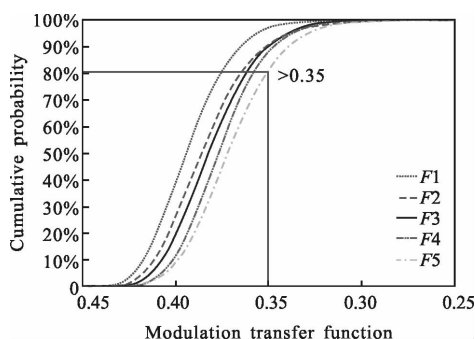
通过 CodeV 的公差分析验证公差分配结果的合理性。可见光、近红外和中红外分别按照表 6~8 进行取值，对系统进行 1000 次加工装调模拟，以系统奈奎斯特频率处的 f_{MFF} 作为评价指标，得到各系统累计概率

随 f_{MFF} 变化的曲线如图 4 所示，统计结果如表 9 所示。从表 9 中可以看出，按照上述公差分配结果进行分析后，各谱段奈奎斯特频率处 f_{MFF} 均有 84% 的概率优于 0.368，满足静态 f_{MFF} 优于 0.2 的设计指标要求。

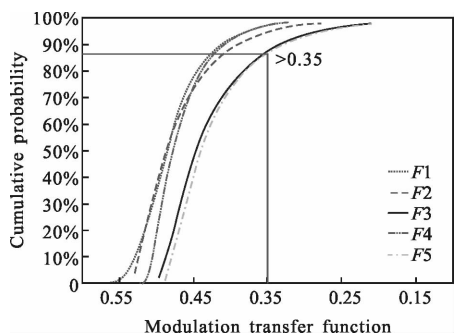
表 8 中红外系统公差分配结果

Tab.8 Tolerance allocation result of MIR system

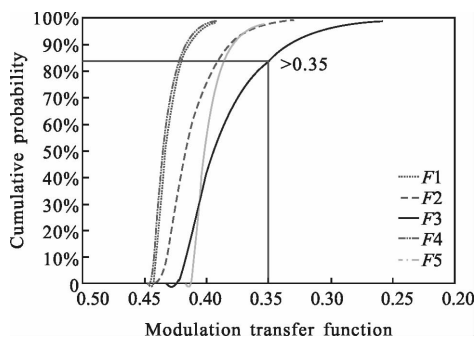
Type	Item	Lens 1	Lens 2	Lens 3	Lens 4
Assembling	Displacement x/mm	0.1	0.1	0.15	0.2
	Displacement y/mm	0.1	0.2	0.15	0.2
	Displacement z/mm	0.1	0.2	0.2	0.2
	Tilt $\alpha/(\prime)$	50	50	50	50
	Tilt $\beta/(\prime)$	50	50	50	50
	$\Delta R/mm$	0.15	0.15	0.15	0.2
Manufacturing	$\Delta K(\text{concave surface})$	0.001	0.001	-	0.001
	Surface error RMS($\lambda=9 \mu\text{m}$)	$\lambda/40$	$\lambda/40$	$\lambda/40$	$\lambda/40$



(a) 可见光谱段
(a) Visible spectrum



(b) 近红外谱段
(b) NIR spectrum



(c) 中红外谱段
(c) MIR spectrum

图 4 公差概率曲线

Fig.4 Curves of tolerance probability

表 9 公差分析结果

Tab.9 Results of tolerance analysis

Cumulative probability	f_{MIR}		
	Visible (77 lp/mm)	NIR (39 lp/mm)	MIR (25 lp/mm)
50%	0.366	0.443	0.397
84.1%	0.368	0.393	0.383
97.7%	0.315	0.343	0.371
99.9%	0.290	0.293	0.359

系统中主镜的公差较为严格，因此在装调过程中可以通过补偿器对主镜进行初调，再利用计算机辅助装调技术对主、次镜进行安装。通过调整主、次镜间隔及光轴倾斜可以有效减小装调所引入的球差和像散，从而得到像质优良的两镜系统。以两镜系统作为基准，对平面反射镜及三镜进行安装，并对可见光系统进行精密调整。在可见光系统装调完成后，再依次对近红外和中红外谱段进行装调。

4 结论

研究并设计了一种三谱段共孔径同轴偏视场折反射式光学系统，并对系统的成像质量及加工、装调公差进行了分析。从光学传递函数曲线可以看出，系统在各谱段的成像质量良好，均接近衍射极限，能够满足从可见光到中波红外多谱段的工作需求，且具有较高的空间分辨率。与一般的离轴系统相比，系统加工、装调简单，体积较小，配合面阵成像模式，充分适应低轨道敏捷视频卫星的结构特性。随着空间遥感需求的发展，光学加工及计算机辅助装调技术的不断进步，这种可以满足长焦距、大孔径、多谱段、高杂散光抑制能力、轻量化水平高、装调简单且成像质

量优良的同轴偏视场光学系统,将在空间光学应用领域得到更加广泛的应用。

参考文献:

- [1] Man Yiyun, Li Haichao. Imaging characteristics analysis for LEO video satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(5): 52-57. (in Chinese)
满益云, 李海超. 低轨视频卫星成像特性分析 [J]. 航天器工程, 2015, 24(5): 52-57.
- [2] Han Peishan, Jin Guang, Zhong Xing. Design of new type of micro video-capable satellite optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(5): 691-697. (in Chinese)
韩培山, 金光, 钟兴. 一种新型微小视频卫星光学系统能够设计[J]. 应用光学, 2015, 36(5): 691-697.
- [3] Liu Tao. Research of abroad video-satellite development [J]. *Space International*, 2014, 9(429): 50-56. (in Chinese)
刘韬. 国外视频卫星发展研究 [J]. 国际太空, 2014, 9(429): 50-56.
- [4] Wei Jingbo. Attitude control technology of a small video satellite [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 1-8. (in Chinese)
魏静波. 视频小卫星姿态控制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 1-8.
- [5] Pan Junhua. Design, Fabrication and Testing of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 10-37. (in Chinese)
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 10-37.
- [6] Li Peimao, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Dual-band infrared optical system design and image quality evaluation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2882-2888. (in Chinese)
李培茂, 王霞, 金伟其, 等. 双波段红外光学系统设计与像质评价[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 2882-2888.
- [7] Meng Qingyu, Wang Wei, Ji Zhenhua, et al. Design of off-axis three-mirror system based on integration of primary and tertiary mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 42(2): 578-582. (in Chinese)
孟庆宇, 王维, 纪振华, 等. 主三镜一体化离轴三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 42(3): 578-582.
- [8] Chen Yonghe, Chen Hongda, Fu Yutian. Optical design of small-sized camera in visible for micro-satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2087-2092. (in Chinese)
陈永和, 陈洪达, 傅雨田. 适用于微小卫星平台的小型可见光相机设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2087-2092.
- [9] Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0416002. (in Chinese)
魏晓孝, 许峰, 余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416002.
- [10] Wang Hong, Tian Tiejun. Design of three line array mapping camera and its tolerance analysis [J]. *Optics and Precision Engineering Analysis*, 2011, 19(7): 1444-1450. (in Chinese)
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): 1444-1450.