

光谱可调谐式高分辨率光学载荷校准技术

史朝龙¹, 孙红胜², 王加朋², 孙广尉², 吴柯萱²

(1. 海军驻中国航天科工集团公司第三研究院军事代表室, 北京 100074;

2. 北京振兴计量测试研究所, 北京 100074)

摘要: 基于对高分辨率光学载荷测试设备开展现场计量和校准的迫切需求, 建立一套光谱可调谐式高分辨率光学载荷校准装置, 该装置中光谱可调谐光源可以发出 300~800 nm 范围内任意光谱分布的光能, 再通过空间调制系统形成无穷远处的具有特定光谱分布的清晰目标, 实现高分辨率光学载荷光谱参数校准、辐射参数校准和成像性能参数校准。校准装置的光谱辐亮度校准范围为 $6.54 \times 10^{-4} \sim 3.14 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$, 空间分辨率校准精度为 0.059 mrad, 视场角校准范围为 $1^\circ 3' 30''$, 光谱辐亮度响应非均匀性校准精度为 0.39%。主要介绍了校准装置的基本原理、结构组成等, 并给出了详细的测试结果。由此可见, 该光学载荷校准装置具有光谱任意调制、可拓展性强、高分辨率的优点。

关键词: 光谱可调谐; 高分辨率光学载荷; 光谱校准; 辐射校准; 成像性能校准

中图分类号: V448.25+3 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1117007

Calibration technology for high-resolution optical load by spectrally tunable source

Shi Chaolong¹, Sun Hongsheng², Wang Jiapeng², Sun Guangwei², Wu Kexuan²

(1. Military Representative Office of Navy in Third Academy of China Aerospace Science and Industry Group, Beijing 100074, China;

2. Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100074, China)

Abstract: Based on the urgent need of calibration on high-resolution optical load, a series of calibration device for high-resolution optical load by spectrally tunable source were designed. The spectrally tunable source can produce any spectral display light from 300–800 nm, which is turned by spatial modulation and being at infinity, clear target. Spectrum parameter, radiation parameter, imaging performance parameter can be calibrated by the device. The calibration device's spectral radiance ranges from $5.64 \times 10^{-4} \sim 3.14 \times 10^{-1} (\text{W} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1})$. The calibration device's spatial resolution accuracy is 0.059 mrad. The calibration device's field of view ranges from 0 to $1^\circ 3' 30''$. The spectral radiance response non-uniformity is 0.39%. The basic principle, system design of the calibration device and detailed test results were introduced. Thus, the calibration device for the optical load has the advantages of arbitrary spectrum modulation, scalable, high resolution.

Key words: spectrally tunable; high-resolution optical load; spectrum calibration; radiation calibration; imaging performance calibration

收稿日期: 2016-03-11; 修订日期: 2016-04-14

作者简介: 史朝龙(1974-), 男, 硕士, 主要从事光电测量技术方面的研究。Email: shichaolong@163.com

0 引言

高分辨率光学载荷是安装在飞行器平台上对地面摄影的精密光学仪器,主要由光学系统、焦平面和成像电路组件等组成,广泛应用于侦查与监视、测绘、环境监测等各个领域。高分辨率光学载荷主要包括星载高分辨率成像光谱仪、机载全谱段多模态成像光谱仪、大视场高分辨率扫描仪等^[1]。高分辨率光学载荷工作波段宽,分辨力高,目前国际上有代表性的高光谱成像仪有美国 TRW 公司研制的 Hyperion, 美国海军 NEMO 卫星的主载荷 COIS 等, 这些光谱成像仪分辨力高,在空间遥感中发挥了重要作用,但是缺点是视场角较小,随着空间遥感应用的不断深入,对高光谱成像仪的要求也越来越高,因此在提高成像光谱仪空间分辨率的同时还需要提高其光谱分辨率,尤其是通过目标的光谱特性细节可以获得目标的更多信息,当使用伪装材料将装甲车等物体伪装成草地或森林时,使用传统的成像仪或低光谱分辨率成像光谱仪无法区分伪装材料和背景,而高光谱分辨率光学载荷可以对观测目标在不同波段处分光谱成像,即可得到被观测目标的各个波段的目标特性^[2]。高分辨率光学载荷的校准技术是确定载荷输出信号与真实目标信息之间关系的一项关键技术,它可以建立光学载荷相对于标准辐射源在量值、空间、光谱和时间变化上的响应关系,决定着载荷获取数据的真实性以及复原目标真实情况能力^[3-4]。在对高分载荷进行校准时,当观测目标如地球、空间、山川、海洋等和标准辐射源的光谱分布、空间分布、光源辐亮度等主要参数相差较大时,测量结果就会存在较大的差异。传统的高分辨率光学载荷辐射校准使用标准卤钨灯,卤钨灯的色温为 2 800 K 且光谱分布固定不变,在模拟高温恒星或低色温地面目标时,由于校准光源与模拟目标之间光谱不匹配会造成的辐射定标较大误差。

目前我国尚无基于光谱可调谐技术的高分辨率光学载荷定标装置,不能为高分辨率学载荷成功研制提供相应的计量保障^[5]。急需一种能够提供与被测目标光谱能量分布近似的校准技术,同时实现观测目标的光谱特性和空间几何特性参数校准,使光学载荷的校准过程与实际工作状态近似保持一致,进

而提升光学载荷数据校准的准确性。

1 设计方案

根据高分辨率光学载荷研制需求,采用光谱可调谐技术开展光学载荷校准技术研究。研制一套校准系统实现高分辨率光学载荷的光谱参数、辐射参数和成像性能等参数的综合校准。主要研究内容包括:光谱可调谐校准技术理论研究、光谱校准、辐射校准和性能参数校准。总体技术框架如图 1 所示。

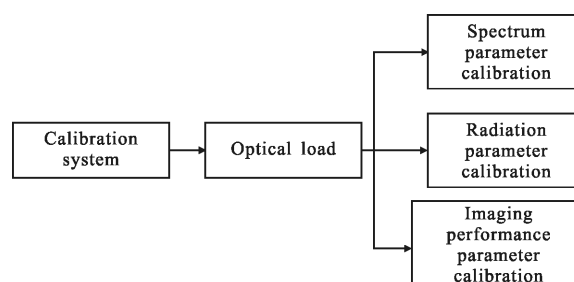


图 1 总体技术框架

Fig.1 Overall technical framework

1.1 光谱校准标准装置

高分辨率光学载荷的光谱准确性和分辨率决定着后期反演的精度,因此需要进行光谱校准。光谱校准的任务是确定各通道光谱中心波长位置,以便确定光谱采样间隔,并测量出各通道的等效光谱带宽和通带函数,主要包括中心波长、光谱带宽以及光谱范围^[6]。装置主要由复合光源、分光系统、光谱调制系统、匀光系统、参考探测器、控制系统等组成。为了满足不同波段光谱校准要求,可以换不同的辐射源组件。光源发出的光经过分光系统后,在光谱调制器件上分布一系列平直光谱。通过计算机控制可以对该光谱进行光谱强度调制,也可以根据校准需求选择不同的光谱位置,设定不同的光谱带宽。经光谱调制后的光辐射进入均匀混光系统,在均匀混光系统的作用下,以近似朗伯体的辐射特性辐射出去,由此可以对光学载荷进行光谱校准。光谱校准系统可以输出标准波长谱线,使用光学载荷读出光谱中心位置,即可实现光谱准确度标定^[7-8]。也可以输出标准带宽光谱,由光学载荷输出的光谱曲线可以计算出光学载荷的光谱分辨率。同理,也可以对光学载荷的光谱响应区域进行校准。为了模拟成像光谱的

真空工作环境, 可以将光学载荷置于真空环境模拟系统中, 实现光学载荷真实工作状态的标定。光谱校准装置在使用前需要进行光谱校准, 该量值可以溯源到中国计量科学研究院。

1.2 辐射校准标准装置

由于被探测目标的辐射强度并不与探测器的输出呈线性关系, 还与目标的光谱辐射特性、环境传输特性、光学载荷响应函数等其他因素有关, 因此需要对光学载荷进行辐射校准^[9]。校准装置主要由复合光源、分光系统、光谱调制系统、匀光系统、参考探测器、控制系统、稳定电源、标准光源、标准光谱辐射计等组成。光源发出的光经过分光系统后获得一系列平直光谱, 该光谱分布在光谱调制系统上, 通过综合控制系统可以实现光谱强度调制。根据实际需要, 改变输出辐射的光谱分布, 使校准光源与观测目标光谱特性近似一致。在均匀混光系统输出端, 利用标准辐射源和光谱辐射计对其进行高精度校准, 由此可以将辐射量值传递至光学载荷。辐射校准装置在使用前需要进行辐射定标, 该量值可以溯源到中国计量科学研究院。

1.3 光谱成像性能参数校准装置

在研制过程中和搭载发射之前, 光学载荷的主要性能指标都需要进行严格的校准和评估, 如系统的空间分辨率、畸变、非均匀性、视场角等决定着光学载荷的工作性能, 因此其性能校准就显得尤为重要^[10]。现阶段成像光谱仪等属于图谱合一类的光学载荷, 在参数校准时要求两个参数同时校准, 因此需建立光谱成像性能校准装置。光学载荷性能校准标准装置总体上可以分为两大部分, 分别为光源光谱调制系统和空间调制系统。光源光谱调制可以实现光源的光谱强度调制, 空间调制系统可以实现模拟目标的空间频率和对比度的调制。根据光学载荷工作波段选择所需的光源, 光源辐射经过分光系统后获得一系列平直光谱, 该光谱分布在光谱调制系统上, 通过计算机控制可以实现光谱强度调制, 实现观测目标的近似光谱分布输出。调制后的光源进入均匀混光系统, 由此出射的光辐射具有出射强度均匀和光谱非分离的特点。利用该均匀光源照明空间调制器, 通过计算机控制可以进行空间频率和对比度调制, 最后通过光学投影系统投射进入被测光

学载荷的视场, 进行相关性能指标评价^[11]。系统有内部和外部两个校准系统, 一个位于均匀混光系统后, 用于监测光源的稳定性, 另一个为参考辐射计, 对整个系统的出射光束进行辐射校准。同样, 可以将光学载荷置于真空环境模拟系统中, 在真空状态下对光学载荷进行性能校准。

1.4 校准软件

校准软件具备校准模式选择功能, 可以根据待校准光学载荷波段的不同, 选择相应的工作模式。如选择可见光模式对可见光光学载荷校准、选择紫外模式对紫外光学载荷校准。软件可以实现数字微镜阵列的控制, 其中包括单峰调制, 多峰调制, 亮度调制等。通过数据通讯, 具备快速处理光谱可调谐式高分辨率光学载荷校准装置输入信号的能力, 并根据校准装置的数学校准模型, 对目标光谱曲线进行分析处理, 输出 DMD 翻转状态。系统软件研制过程中, 主要研究各个参数的最优测量方法与理论、校准的数学模型、测量不确定度等, 以提升校准精度。

2 校准装置和测试结果

2.1 高分辨率光学载荷空间分辨率测试

测试中, 高分辨率光学载荷为相机。使用光谱可调谐式高分辨率光学载荷成像性能校准装置对待测相机校准。光谱可调谐光源照明空间分辨率靶, 通过目标模拟系统后对待测相机进行校准^[12]。光源本底光谱及光源光谱调制曲线如图 2 所示。空间分辨率测试结果如表 1 所示。

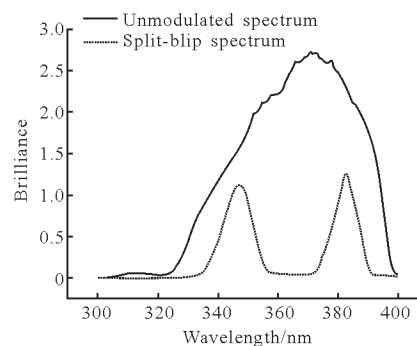


图 2 光源光谱调制曲线图

Fig.2 Curve diagram of modulation spectrum

表中, m 表示美国空军靶第 m 行, n 表示第 n 列, N 表示空间分辨率。

表 1 空间分辨率测试结果

Tab.1 Test results of spatial resolution

Sequence number	m	n	$N=1/(wf)$	Resolution/mrad
1	1	4	0.059	0.059
2	1	4	0.059	
3	1	4	0.059	
4	1	4	0.059	
5	1	4	0.059	
6	1	4	0.059	

2.2 高分辨率光学载荷视场角测试

校准靶标更换为十字靶标,使用相机和高精度二维云台组合对拍摄到的图像进行分析,视场角测试装置实物图如图 3 所示。测试结果如表 2 所示。其中, α 表示最左侧角度读数, β 表示最右侧角度读数, ω' 表示视场角测试值。

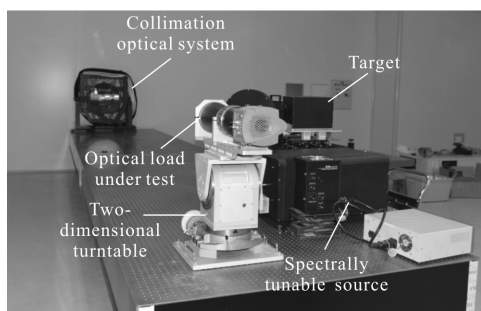


图 3 视场角测试装置

Fig.3 Test device for FOV

表 2 视场角测试结果

Tab.2 Test results of FOV

Sequence number	α	β	ω'	Field of view
1	1°11'40"	1°15'20"	1°3'40"	1°3'30"
2	1°11'40"	1°15'10"	1°3'30"	
3	1°11'40"	1°15'0"	1°3'20"	
4	1°11'40"	1°15'10"	1°3'30"	
5	1°11'40"	1°15'0"	1°3'20"	
6	1°11'30"	1°15'10"	1°3'40"	

二维云台角度分辨率为 10",角度精度为 10",视场角测试时校准装置的平均最大视场角为 1°3'30",

角度精度引入的误差很小。

2.3 高分辨率光学载荷畸变测试

标准靶标更换为畸变靶,使用相机和高精度二维云台组合对拍摄到的图像进行分析,测试结果如表 3 所示。其中 L_c 表示中心视场, L_u 表示边缘视场。

表 3 畸变测试结果

Tab.3 Test results of distortion

Sequence number	Project	L_c	L_u	J	Distortion
1	Separa- tion	478.037 655 4	477.051 359 9	-0.206%	-0.29%
2		477.084 898 1	476.051 467 8	-0.217%	
3		477.051 359 9	475.051 576 1	-0.419%	
4		461.351	460.088	-0.274%	
5		479.051	478.051	-0.209%	
6		480.051	478.051	-0.417%	

2.4 高分辨率光学载荷光谱辐亮度测试

光学载荷的光谱辐亮度是由光谱可调谐光源进行校准的。为保证量值的准确可靠,光谱可调谐光源自身量值的准确性由标准辐射计进行量传^[13]。控制光谱可调谐光源使其输出光最弱,使用彩色亮度计 PR740 对光谱辐亮度校准系统进行测试,测试数据如表 4 所示。

表 4 光谱辐亮度测试结果(500 nm 处)

Tab.4 Test results of spectral radiance(at 500 nm)

Sequence number	Minimum spectral radiance $/(W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1})$	Maximum spectral radiance $/(W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1})$
1	5.7×10^{-4}	3.1×10^{-1}
2	6.8×10^{-4}	3.2×10^{-1}
3	6.7×10^{-4}	3.1×10^{-1}
4	6.7×10^{-4}	3.1×10^{-1}
5	6.8×10^{-4}	3.2×10^{-1}
6	6.8×10^{-4}	3.3×10^{-1}
Mean	6.54×10^{-4}	3.14×10^{-1}

2.5 高分辨率光学载荷光谱分辨率测试

光谱可调谐光源通过光谱调制可以对高分辨率光学载荷进行光谱校准。控制光谱可调谐光源输出一束单峰光谱,并控制 DMD 单像素移动,使得输出光的中心波长发生变化,计算输出光的中心波长的变化可以得出光谱可调谐光源的光谱分辨率。光谱可调谐系统的光谱分辨率可以由高精度单色仪进行测试。光谱分辨率测试结果如表 5 所示。

表 5 光谱分辨率测试结果

Tab.5 Test results of spectral resolution

Sequence number	Wavelength change corresponding to single-pixel at	Wavelength change corresponding to single-pixel at
	0.4-0.8 μm/nm	0.3-0.4 μm/nm
1	0.480 8	0.087 9
2	0.450 1	0.059 6
3	0.559 5	0.074 8
4	0.492 1	0.079 7
5	0.537 5	0.083 3
6	0.417 2	0.064 9
Mean	0.50	0.075

2.6 高分辨率光学载荷光谱辐亮度响应非均匀性测试

一般情况下,光学载荷的视场角相对较大,而其光谱辐亮度响应非均匀性校准是采用大面积均匀光源作为观测目标。对该光源直接进行数据采集,然后对其进行数据处理,得到光学载荷的光谱辐亮度响应非均匀性。光谱辐亮度响应非均匀性测试结果如表 6 所示。

表 6 光谱辐亮度响应非均匀性测试结果

(单位:cd·m⁻²)

Tab.6 Test results of spectral radiance response non-uniformity(Unit: cd·m⁻²)

Se-quence number	Loca-tion	Left	Middle	Right	S _{max}	S _{min}	P _s	Het-ero-gene-ity
1	Up	2 958	2 959	2 967	2 967	2 956	0.37%	
	Middle	2 961	2 956	2 962				
	Down	2 961	2 962	2 964				
2	Up	2 964	2 966	2 975	2 975	2 960	0.51%	0.39%
	Middle	2 961	2 960	2 962				
	Down	2 961	2 965	2 961				
3	Up	2 965	2 967	2 976	2 976	2 961	0.51%	
	Middle	2 965	2 962	2 967				
	Down	2 961	2 965	2 963				
4	Up	2 962	2 964	2 971	2 971	2 961	0.34%	
	Middle	2 963	2 961	2 966				
	Down	2 962	2 966	2 963				
5	Up	2 963	2 965	2 975	2 975	2 963	0.40%	0.39%
	Middle	2 964	2 964	2 966				
	Down	2 965	2 967	2 968				
6	Up	2 960	2 961	2 966	2 966	2 960	0.20%	
	Middle	2 963	2 964	2 965				
	Down	2 964	2 965	2 965				

3 测量不确定度

3.1 空间分辨率测量不确定度

数学模型:

$$N=N_i$$

式中: N 为空间分辨率 (lp/mm); N_i 为空间分辨率测量值(lp/mm)。

测量重复性引入的标准不确定度, $u_1=0.005$ mrad; 空间分辨率靶标误差引入的标准不确定度, $u_2=0.003$ mrad; 准直光学系统误差引入的标准不确定度, $u_3=0.001 2$ mrad; 分辨极限判据引入的标准不确定度, $u_4=0.035$ mrad; 分辨极限判据带来的测量不确定度 $u_5=0.007$ mrad。

空间分辨率测量的合成不确定度:

$$u_{res}=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2+u_4^2+u_5^2}=0.036 \text{ mrad}$$

扩展不确定度为:

$$U=2u_{res}=0.072 \text{ mrad}(k=2)$$

3.2 视场角测量不确定度

数学模型:

$$\delta=\omega'-\omega$$

式中: δ 为视场角; ω' 为视场角测量图案位于相机像面最左端时转台读数; ω 为视场角测量图案位于相机像面最左端时转台读数。

测量重复性引入的标准不确定度, $u_1=0.002 5^\circ$; 标准二维云台引入的标准不确定度, $u_2=0.001 7^\circ$; 光学系统成像引入的标准不确定度, $u_3=0.000 36^\circ$; 位置判读引入的标准不确定度, $u_4=0.017^\circ$ 。

视场角测量的合成不确定度:

$$u_{res}=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2+u_4^2}=0.02^\circ$$

扩展不确定度为:

$$U=2u_{res}=0.04^\circ(k=2)$$

3.3 畸变测量不确定度

畸变校准的数学模型表达式为:

$$J=\frac{l_u-l_c}{l_c} \times 100\%$$

式中: J 为被测光学系统畸变值, %; l_u 为相机图像中左上和右上点质心连接线长度, l ; l_c 为相机图像中左中和右中点质心连接线长度, l 。

测量重复性引入的标准不确定度 $u_1=0.2\%$; 标准二维云台引入的标准不确定度 $u_2=0.17\%$; 光学系统成像引入的标准不确定度 $u_3=0.036\%$; 空间距离判

读引入的标准不确定度 $u_4=0.2\%$ 。

畸变测量合成不确定度为：

$$u_{\text{DIST}}=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2+u_4^2}=0.33\%$$

扩展不确定度为：

$$U=2u_{\text{DIST}}=0.66\%(k=2)$$

3.4 辐亮度响应非均匀性测量不确定度

辐亮度响应校准的数学模型表达式为：

$$P_s=\frac{2(S_{\text{max}}-S_{\text{min}})}{S_{\text{max}}+S_{\text{min}}}\times 100\%$$

式中： P_s 为非均匀性； S_{max} 为扣除背景光的相机响应最大值； S_{min} 为扣除背景光的相机响应最小值。

测量重复性引入的标准不确定度 $u_1=0.5\%$ ；积分球不均匀性引入的标准不确定度 $u_2=0.3\%$ 。

辐亮度响应非均匀性测量合成不确定度：

$$u_{\text{PRUN}}=\sqrt{u_1^2+u_2^2}=0.58\%$$

扩展不确定度为：

$$U=2u_{\text{PRUN}}=1.16\%(k=2)$$

4 结 论

光谱可调谐式高分辨率光学载荷校准装置的空间分辨率校准能力可以达到 0.059 mrad, 波长校准能力分别可以达到 0.50 nm (400~800 nm) 和 0.075 nm (300~400 nm), 视场角校准能力可以达到 1°3'30", 辐射度校准能力可以达到 $6.54\times 10^{-4} \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2\cdot\text{nm})$ (在 500 nm 处), 非均匀性校准能力可以达到 0.39%, 空间分辨率校准精度为 0.059 mrad、畸变校准能力可以达到 0.29%。

针对高分专项中高分辨率光学载荷的校准难题, 考虑到国内光谱可调谐校准技术的空白, 依托国内外先进的光学载荷计量校准技术基础, 开展了光谱可调谐校准技术研究, 建立了一套光谱可调谐式高分辨率光学载荷校准装置, 用于高分辨率光学载荷光谱参数、辐射参数和成像性能参数校准, 可随时在国内开展光学载荷量值传递和校准测试业务, 提升了光学载荷的校准能力。

参考文献：

[1] Rice J P, Steven W B, Jorge E N, et al. A hyperspectral image projector for hyperspectral imagers [C]// SPIE, 2007, 6565: 65650C.
 [2] Rice J P, Brown S W, Neira J E. Development of

hyperspectral image projectors[C]//SPIE, 2006, 6297: 629701.
 [3] Xing Hui, Zhao Huijie, Cheng Xuan, et al. Radiometric calibration of hyperspectral imaging spectrometer based on AOTF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 206-209. (in Chinese)
 邢辉, 赵慧洁, 程宣, 等. AOTF 的高光谱成像光谱仪的辐射定标技术[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 206-209.
 [4] Bender H A, Pantazis M, Robert O G, et al. Optical design, performance and tolerancing of next-generation airborne imaging spectrometers[C]//SPIE, 2010, 7812: 78120P.
 [5] Delwart S, Bourg L. Radiometric calibration of MERIS[C]// SPIE, 2004, 5570.
 [6] Bauer M, Griebbach D, Säuberlich T, et al. MERTIS - Using diffractive optical elements for geometrical calibration [C]//SPIE, 2010, 7808: 78080N.
 [7] Rice J P, Steven W B, Jorge E N, et al. A hyperspectral image projector for hyperspectral imagers [C]//SPIE, 2007, 6565: 65650C.
 [8] Eppeldauer G P, Rice J P, Zhang J, et al. Spectral irradiance responsivity measurements between 1 μm and 5 μm[C]//SPIE, 2004, 5543: 248-257.
 [9] Duncan W, Lee B, Rancuret P, et al. DLP switched blaze grating: the heart of optical signal processing [C]//SPIE, 2003, 4983: 297-304.
 [10] Liu Hongxing, Ren Jianwei, Wan Zhi, et al. Measurement of relative spectral responsivity of photodetector by LED-based spectrum-tunable source [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(1): 250-254. (in Chinese)
 刘洪兴, 任建伟, 万志, 等. 基于 LED 光谱可调谐光源的光电探测器相对光谱响应测量研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(1): 250-254.
 [11] Wang Hu, Luo Jianjun. Optical system design of multi-spectral camera for space debris [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1188-193. (in Chinese)
 王虎, 罗建军. 空间碎片多光谱探测相机光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1188-193.
 [12] Zhang Yue, Zhou Feng. Thermal design of light and small high resolution camera on Mars orbit[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2979-2983. (in Chinese)
 张月, 周峰. 火星轨道轻小型高分辨率相机热分析与热设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 2979-2983.
 [13] Bai Yu, Xing Tingwen, Jiang Yadong, et al. Design of infrared dual field of view optical system with long focal length and high resolution [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2589-2594. (in Chinese)
 白瑜, 邢廷文, 蒋亚东, 等. 长焦距高分辨率红外两档变焦光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2589-2594.