

空间多光谱 CCD 相机调焦精度分析

吕世良^{1,2}, 刘金国¹, 贾平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: 调焦精度是保证多光谱 CCD 相机成像质量的关键技术之一, 针对星载对地观测多光谱 CCD 相机大视场角、宽地面覆盖的离轴三返光学系统结构特点, 设计实现了一种高精度调焦系统。首先以 CCD 多光谱相机感应谱段中最短波长计算出相机调焦需求精度 $10.00\ \mu\text{m}$, 根据多光谱 CCD 相机的光学系统特点, 对比常用的传统航天相机的三种调焦方式, 选择 CCD 焦平面调焦方式; 然后提出采用以步进电机为动力源驱动高精度涡轮蜗杆副、齿轮副做旋转运动, 通过超精密级滚珠丝杠将旋转运动转换为直线运动, 并结合直线导轨约束运动形式, 以 14 位绝对式编码器为位置检元件组成高精度调焦系统, 经计算, 调焦系统的理论灵敏度为 $0.12\ \mu\text{m}$, 该调焦系统具有结构简单紧凑、调焦灵敏度高的优点; 最后通过实验测试, 在 $\pm 2.2\ \text{mm}$ 调焦行程内实际调焦精度 $3.62\ \mu\text{m}(3\sigma)$, 调焦系统随相机经过力学环境实验、热真空环境实验后的复测调焦精度为 $3.64\ \mu\text{m}(3\sigma)$ 。测试结果表明: 所设计的调焦系统设计合理, 结构可靠, 调焦精度稳定性高, 满足多光谱 CCD 相机成像清晰对调焦精度的要求。

关键词: 调焦精度; 多光谱 CCD 相机; 调焦系统; 调焦机构

中图分类号: TP394.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0392-06

Accuracy analysis of the focusing precision for multispectral CCD space camera

Lv Shiliang^{1,2}, Liu Jinguo¹, Jia Ping¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Focusing is one of the key technologies to improve the imaging quality in multispectral CCD camera. The design, realization, and performance of a focusing system for multispectral CCD camera were presented in detail, featuring wide field of view and wide swath wide with TMA optical system, based on earth observation satellite. First, the focusing precision required was calculated according to the shortest spectrum wave in the optical system. Compared with other focusing methods, the method of direct adjusting CCD focal plane was proposed, which was suitable for this CCD camera optical system. Second, a focusing system was developed, the hardware system including stepper motor, worm couple, pair of gears, precision screw ball, linear bearing, and encoder was constructed. And its theoretical

收稿日期: 2012-06-16; 修订日期: 2012-07-13

基金项目: 国家青年科研基金(61008046)

作者简介: 吕世良(1974-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事伺服控制和空间遥感成像技术研究。Email: lvsl@ciomp.ac.cn

导师简介: 贾平(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事航空成像与测量仪器技术研究。Email: jiap@ciomp.ac.cn

focusing sensitivity was calculated to be $0.12 \mu\text{m}$, The proposed focusing system has the advantages of lower constructional complexity, easier hardware implementation and high focusing sensitivity. Finally, experimental setup was constructed to evaluate the focusing precision performance of the focusing system. The result of the experiment indicated the $\pm 3.62 \mu\text{m}$ (3σ) precision of focusing in a range of $\pm 2.2 \text{ mm}$. And after mechanical vibration test and thermal vacuum test, the focusing precision was $\pm 3.64 \mu\text{m}$ (3σ) precision of focusing in a range of $\pm 2.2 \text{ mm}$. The experimental result shows that the proposed focusing system is remarkable, reasonable, and reliability, as well as stable, which meet the focusing precision requirements for multispectral CCD camera.

Key words: focusing precision; multispectral CCD camera; focusing system; focusing mechanism

0 引言

随着遥感应用技术的发展,当前需要具有图像传输速率快、成像质量高、宽视场、宽覆盖、高分辨率的航天相机,基于卫星平台的对地观测传输型航天相机,对地观测成像具有实时高效、观测范围广、空间上能实现全球覆盖能力、传输速率高等优点^[1-2]。多光谱相机在工作过程中多个光谱波段对同一景物进行成像,因此它既可获取目标的图像信息,又可获取目标的光谱信息^[3]。利用不同光谱段图像的组合应用可以获取被观测目标丰富的物理属性信息。基于卫星平台的多光谱相机对地观测获得多光谱遥感图像,被广泛应用于国土资源调查与监测、农林水文和地质勘查、生态环境监测、防灾减灾调查,以及城市规划与军事测绘制图等方面,对于军事和民用都具有重要意义^[4-5]。

而航天相机由于运载发射振动的影响,或空间热环境发生变化可能导致各反射镜、透镜的自身结构发生变形,反射镜的曲率半径发生改变^[1],或支撑材料性能发生改变以及相机轨道高度作升轨、降轨机动调整,都会引起相机成像面沿光轴方向离焦,造成光学系统成像模糊,甚至可能完全淹没目标。为了保证相机在轨工作的成像质量,需要对离焦量进行补偿。基于此研制航天相机,需要设计调焦系统,实现在离焦情况下通过调焦也能获得高质量清晰像。

针对一种星载宽视场、宽覆盖对地观测多光谱 CCD 相机的光路设计特点和焦平面结构特性,以成像谱段中最短波长计算出该相机对调焦精度需求指标。以此为依据,文中提出并设计实现了一种高精度调焦系统,经过力学环境实验和热真空环境实验

证,调焦系统的调焦精度稳定可靠,在轨实际应用中,通过调焦获得了大量高质量、清晰的遥感图像。

1 光学系统

多光谱 CCD 相机工作轨道高度 500 km , 视场角 $2\omega \geq 6.88^\circ \times 0.60^\circ$, 星下点地面覆盖宽度大于 60 km , 一般同轴光学系统很难同时实现大视场角和宽地面覆盖,因此,采用消像散离轴三反射式光学系统 (TMA)。这种光学系统可以同时实现大视场和宽地面覆盖,且结构紧凑、质量轻、无中心遮拦、焦面照度高、理论调制传递函数高、对空间杂光抑制能力强,同时具有谱段宽、反射系统不产生色差等优点^[6-8],获得接近理想的成像效果。光学系统设计结果如下。焦距 $f=660 \text{ mm}$; 相对孔径 $D/f=1/5$; 视场角 $2\omega \geq 6.88^\circ \times 0.60^\circ$; 波段范围——蓝光波段 B1: $0.43 \sim 0.52 \mu\text{m}$, 绿光波段 B2: $0.52 \sim 0.61 \mu\text{m}$, 红光波段 B3: $0.61 \sim 0.69 \mu\text{m}$, 近红外波段 B4: $0.76 \sim 0.90 \mu\text{m}$ 。

相机的光学系统如图 1 所示。包括三块非球面镜,分别为主镜组件、次镜组件、第三镜组件,以及 CCD 焦平面和系统整体框架。

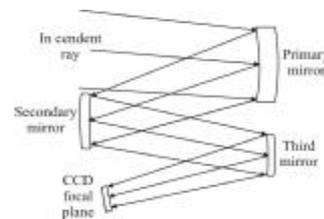


图 1 光路系统原理图

Fig.1 Principle diagram of optical system

2 CCD 焦平面组件

为满足视场角 $2\omega \geq 6.88^\circ \times 0.60^\circ$ 的要求,光学设计像面为 $78 \text{ mm} \times 6.88 \text{ mm}$ 的矩形像面,选用线阵多

光谱 CCD 器件。CCD 由 4 排分别对蓝、绿、红、近红外感应灵敏的线阵 CCD 并列组成,每排 6 000 像元,像元尺寸为 $13\ \mu\text{m}\times 13\ \mu\text{m}$,每排 CCD 间隔 $0.72\ \text{mm}$,CCD 可感光范围为 $78\ \text{mm}\times 2.21\ \text{mm}$ 。像面尺寸完全覆盖一片 CCD 器件的感光范围,实现对地推扫成像地面覆盖宽度大于 $60\ \text{km}$ 。CCD 焦平面组件结构设计如图 2 所示。

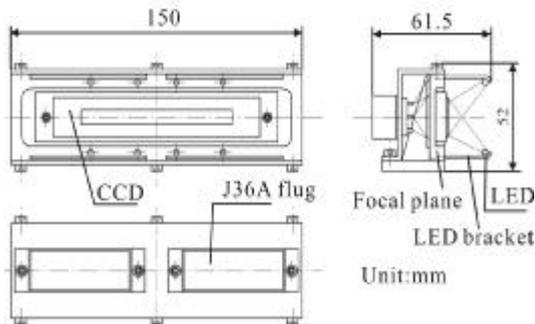


图 2 CCD 像面组件机械原理图

Fig.2 Principle of mechanical assembly CCD focal plane

3 调焦系统

3.1 调焦方式选择

调焦方式主要由光学系统、相机结构形式、调焦精度及工作环境条件决定,航天相机的调焦方式通常有以下三种。

(1) 镜组调焦:调节光路系统中的某些镜组位置以实现调焦。

(2) 平面反射镜调焦:在光路中加一个平面反射镜,起到折转光路,使光路结构紧凑,同时调整反射镜的前后位置实现焦面位置的变化,达到调焦的作用。

(3) 焦平面调焦:直接移动 CCD 焦平面,调焦精度要求相对较低,只有半焦深的一半;运动指向精度相对较低;驱动载荷小。

根据该多光谱 CCD 相机的光学系统和结构特点,选择 CCD 焦面调焦方式,通过调焦机构带动 CCD 焦平面运动来达到调焦的目的。

3.2 调焦精度指标计算

多光谱 CCD 相机半焦深计算公式为:

$$|\pm\Delta| = 2F^2\lambda$$

式中: $\pm\Delta$ 为光学系统半焦深; F 为光学系统数(相对孔径倒数); λ 光学系统光谱波长。

采用移动 CCD 焦平面调焦,调焦精度应为半焦深的一半,即 $\pm\Delta/2$ 。在 CCD 多光谱相机蓝、绿、红、近红外 4 个光谱段中,以蓝光波长 $\lambda=0.43\ \mu\text{m}$ 最短,求得半焦深为 $\pm 21.5\ \mu\text{m}$,因此调焦精度优于 $\pm 10\ \mu\text{m}$ 。考虑到装调误差、温度引起的反射镜曲率变化及光学零件轴向间隔改变引起的焦距变化量,相机 CCD 焦平面沿光轴方向的调焦行程设计为 $\pm 2.2\ \text{mm}$ 。

3.3 调焦机构设计

采用步进电机为驱动部件,调焦机构采用二级减速器:第一级采用精度等级为 5 级的蜗轮蜗杆副,速比为 33:1;第二级采用精度等级为 5 级的齿轮副,速比为 3:1,总减速比为 99:1。后接一根螺距为 $5\ \text{mm}$ 、精度等级为超精密级的 $\Phi 10\times 5$ 的滚珠丝杠副将圆周运动转为直线运动,采用两根平行放置的圆导轨,以精度等级为 1 级的直线轴承做滑动部件,驱动 CCD 焦平面沿导轨做直线运动。采用 14 位绝对式光电轴角编码器作为位置检测元件联接在丝杠末端,可以满足像面调焦的精度要求。调焦机构结构如图 3 所示。

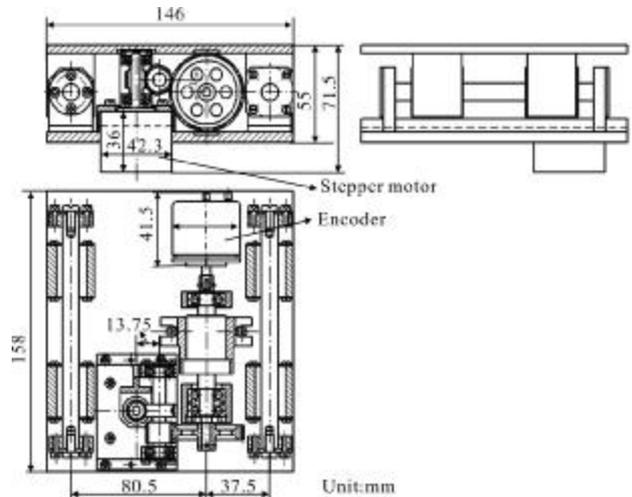


图 3 调焦机构结构图

Fig.3 Schematic diagram of focusing mechanic

3.4 调焦灵敏度计算

14 位绝对式位编码器的角分辨率为 $79.1''$,精度为 $\pm 100''$ (峰值误差)。14 位绝对式编码器码旋转一周码值数为 $2^{14}=16\ 384$ 个码值,每个码值换算成角度为:

$$360^\circ \times 60' \times 60'' / 16\ 384 = 79.1'' \quad (1)$$

采用混合式四相步进电机为驱动部件,保持转

矩为 $1.7 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, 定位转矩小于 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, 步进电机按四向八拍方式工作, 每步转动角度 0.9° , 换算为:

$$0.9^\circ \times 60' \times 60'' = 3\,240'' \quad (2)$$

通过减速机构变速, 电机每走一步丝杠转动

$$3240''/99 = 32.727'' \quad (3)$$

此时丝杠上的螺母直线运动位移即调焦直线灵敏度为:

$$32.727'' \times 5 / (360^\circ \times 60' \times 60'') = 0.12 \mu\text{m} \quad (4)$$

此调焦灵敏度高于已查过文献中的航天相机调焦灵敏度, 从现有文献中查到比较高的航天相机调焦调焦灵敏度是 $0.2 \mu\text{m}$ 。

根据公式(3), 电机每走一步, 编码器码值跳动

$$32.727''/79.1'' = 0.42 \text{ 码/步} \quad (5)$$

按照设计要求, 多光谱相机调焦精度为 $10 \mu\text{m}$, 则 CCD 焦平面运动 $10 \mu\text{m}$ 时, 电机走的步数为:

$$10 \mu\text{m} / 0.12 \mu\text{m} = 83.3 \text{ 步}$$

此时编码器走

$$83.3/2.42 = 34.42 \text{ 个码值}$$

由此可知, 步进电机每转动 83 步, 编码器变化 34.42 个码值; CCD 焦平面运动 $10 \mu\text{m}$ 直线距离。采用两根平行放置的圆导轨, 以精度等级为 1 级的直线轴承做滑动部件, 满足 CCD 焦平面调焦的精度要求。

3.5 调焦控制系统

相机的调焦控制系统由相机控制计算机、调焦系统控制器、电机控制驱动电路、调焦步进电机、涡轮蜗杆副、齿轮副、滚珠丝杠、CCD 焦平面面和位置检测编码器组成。调焦控制方框图如图 4 所示。

调焦控制执行过程如下: 卫星地面控制中心通过遥控指令把调焦指令和参数传给星务计算机; 星务计算机通过 CAN 总线把调焦信息发送至相机控制器; 相机控制器把调焦命令和位置信息参数通过 RS422 总线发送给调焦系统控制器, 调焦系统控制器根据接受指令和位置信息参数控制驱动步进电机带动 CCD 焦平面运动, 并采集计算出当前编码器码值作为 CCD 焦平面位置信息反馈给相机控制器, 相机控制器在把焦平面位置信息通过 CAN 总线发送给星务计算机, 然后通过无线传输形式发送到地面控制中心。

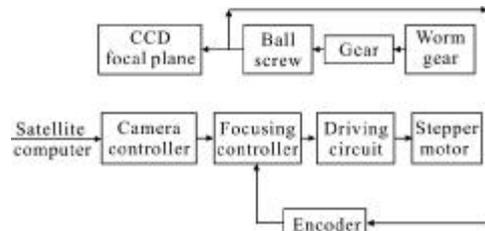


图 4 闭环调焦控制系统方框图

Fig.4 Block diagram of close loop focusing control system

4 调焦精度测试与分析

4.1 调焦行程测试与残差分析

以调焦步进电机步数为输入量来控制调焦机构带动 CCD 焦平面运动。数字千分表的底座固定在相机不动件上, 指针顶在与 CCD 焦平面固定连接的运动机构的某个面上, 这样当 CCD 焦平面运动时, 千分表指针显示出对应直线读数。电机以 83 步/次运动, 测试 164 次并记录每次电机运动后对应的编码器码值变化量和直线变化量, 测试行程范围内编码器码值与 CCD 焦平面对应曲线, 如图 5 所示。

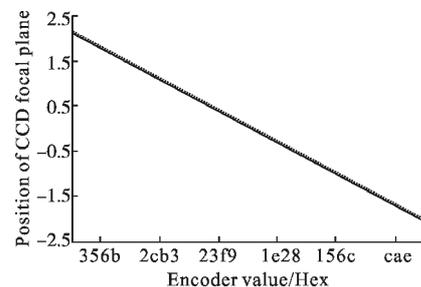


图 5 CCD 焦平面与编码器码值对应关系

Fig.5 Position of CCD focal plane with respect to encoder code

根据记录测试数据计算出编码器码值变化量的平均值和 CCD 焦平面直线位移变化量对应平均值, 选取 50 个测试点计算 CCD 焦平面直线测量残差, 如图 6 所示。可以看出, 每次测量残差都小于 $2 \mu\text{m}$,

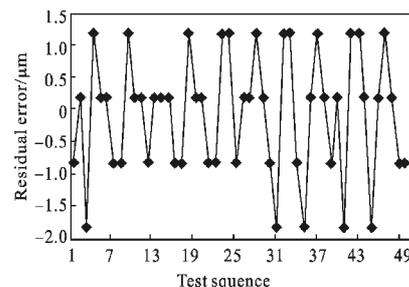


图 6 CCD 焦平面位置直线量的残差曲线

Fig.6 Residual error curve CCD focal plane

且测试过程中无粗大误差产生。

4.2 调焦精度分析

取其中 14 组测试数据,利用统计学知识计算 14 次测量变化量的平均值及其方差,计算结果与理论设计值对比,结果如表 1 所示。可以看出,CCD 焦平面调焦控制精度实验的测试结果为 $3.62 \mu\text{m}(3\sigma)$ 。

表 1 调焦控制精度测试结果与理论设计对比

Tab.1 Comparison results of experimental test and design

Number	Test result		3σ		Design value	
	θ	$x(\mu\text{m})$	θ	$x(\mu\text{m})$	θ	$x(\mu\text{m})$
1	33	10.00	-	-	-	-
2	33	10.00	-	-	-	-
3	33	9.00	-	-	-	-
4	33	11.00	-	-	-	-
5	33	10.00	-	-	-	-
6	32	9.00	-	-	-	-
7	34	9.00	-	-	-	-
8	33	12.00	1.90	3.62	34.42	10.00
9	34	9.01	-	-	-	-
10	32	9.00	-	-	-	-
11	34	12.00	-	-	-	-
12	33	9.00	-	-	-	-
13	34	10.00	-	-	-	-
14	33	12.00	-	-	-	-
Average value	33.14	10.01	-	-	-	-

5 力学环境和热环境模拟实验

航天相机经过运输发射过程,不可避免地对其有振动冲击作用,同时,航天相机在轨工作空间热环境温度温差变化大,所设计的调焦系统必须经过地面模拟的力学振动环境实验和热真空环境实验,以检验调焦系统设计的合理性和调焦精度的稳定性。因此,调焦系统随相机整机分别进行了 X、Y、Z (其中 X 轴为飞行方向,Z 轴为对地方向,Y 轴按右手定则确定为垂直 X 轴、Y 轴的方向)3 个方向的正弦振动、随机

振动实验,并进行热真空实验,实验后对调焦系统的调焦精度复测。

5.1 实验后调焦行程与残差复测

力学实验和热真空环境实验后对调焦行程复测,测试记录 164 次数据,测试行程范围内编码器码值与 CCD 焦平面对应曲线如图 7 所示。测试结果表明,实验前后调焦行程内码值和 CCD 焦平面直线行程是一致的。

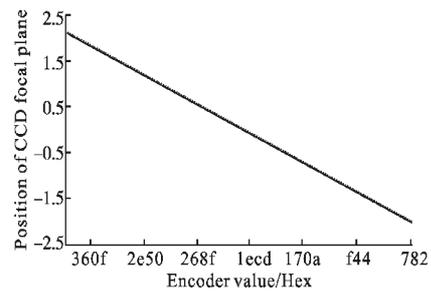


图 7 实验后 CCD 焦平面位置与编码器码值对应关系

Fig.7 Position curve of CCD focus plane after trial

同理,根据实验后测试数据选取 50 个测试点计算 CCD 焦平面直线测量残差,如图 8 所示。实验前后测量残差基本不变。

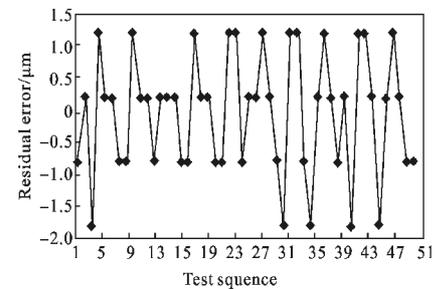


图 8 实验后 CCD 焦平面位置直线量的残差

Fig.8 Residual error curve of CCD focal plane after trial

5.2 实验后调焦精度分析

为了与振动和热真空实验前进行对比,实验后也取其中 14 组测试数据计算平均值及其方差,计算结果与理论设计值对比,结果如表 2 所示。

由表 1 和表 2 对比得出,在力学实验和热真空实验后,调焦精度发生的变化非常微小($0.06 \mu\text{m}$)。

综上所述,经过地面模拟的力学振动环境实验和热真空环境实验,证明了所设计的调焦系统的合理性和调焦精度的高稳定性。

表 2 实验后调焦控制精度测试结果与理论设计对比
Tab.2 Comparison results of controlling
and design after trial

Number	Test result				Design value	
	Test result		3 σ		θ	x(μm)
	θ	x(μm)	θ	x(μm)		
1	34	10.00	-	-	-	-
2	32	12.00	-	-	-	-
3	34	9.00	-	-	-	-
4	32	9.00	-	-	-	-
5	33	11.00	-	-	-	-
6	33	10.00	-	-	-	-
7	33	9.00	-	-	-	-
8	33	11.00	1.98	3.64	34.42	10.00
9	33	11.00	-	-	-	-
10	33	9.00	-	-	-	-
11	34	10.00	-	-	-	-
12	34	12.00	-	-	-	-
13	32	9.00	-	-	-	-
14	32	9.00	-	-	-	-
Average value	33.0	10.07	-	-	-	-

6 结 论

针对文中介绍的一种星载对地观测大视场、宽覆盖、四谱段多光谱 CCD 相机离轴三反光学系统的特点和光机结构特性,设计实现了一种结构简单、机构紧凑,与调焦步进电机、编码器组成的高灵敏度调焦系统。通过对多光谱 CCD 相机调焦实验测试,分析出调焦精度为 3.62 μm (3 σ);经过地面模拟的力学振动环境实验和热真空环境实验检验,证明所设计的调焦系统设计合理,结构可靠,调焦精度稳定性高,满足多光谱 CCD 相机成像清晰对调焦控制精度 10 μm 的技术指标要求。

目前相机已经在轨工作,通过调焦获得了大量高质量遥感图像,具有较高的使用价值。

进行在轨调焦的过程中发现,目前地面卫星控制中心以遥控方式对星务计算机注入调焦指令和参数调焦,然后星务计算机命令调焦控制器进行调焦,地面控制中心需要长时间等待从卫星上返回的调焦

后的 CCD 焦平面的位置信息,同时需要等待星上传下来的图像数据合成图像,结合返回的位置信息和图像信息判断调焦效果。这种大系统调焦方式效率低、周期长,下一步工作需要探讨如何实现在轨实时调焦,以缩短调焦时间,提高调焦效率,从而提高相机有效工作时间。

参考文献:

- [1] Lv Shiliang, Liu Jinguo, Jia Ping, et al. Analysis of focusing precision for high resolution TDICCD camera [J]. Opt Precision Eng, 2011, 19 (7): 427-432. (in Chinese)
吕世良, 刘金国, 贾平, 等. 高分辨率 TDICCD 相机调焦精度分析[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 427-432.
- [2] Chang Jun, Jiang Huilin. Design of wide angle space optical systems of long focal length [J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(1): 42-44. (in Chinese)
常军, 姜会林. 大视场、长焦距空间光学系统的设计[J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 42-44.
- [3] Xu Hong, Wang Xiangjun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 13-17.
许洪, 王向军. 多光谱超光谱成像技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 13-17.
- [4] Fan Bin, Cai Weijun, Zhang Xiaohong, et al. Technology of the multi-spectral camera of ZY-3 satellite [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(3): 75-75. (in Chinese)
范斌, 蔡伟军, 张孝弘, 等. “资源三号”卫星多光谱相机技术[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 75-76.
- [5] Jiao Binliang, Wang Zhaohui, Li Kexiang, et al. A multispectral CCD camera for satellite use [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(2): 146-147. (in Chinese)
焦斌亮, 王朝晖, 林可祥, 等. 星载多光谱 CCD 相机研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(2): 146-147.
- [6] Wang Meiqin, Wang Zhonghou, Bai Jianguang. Stray light analysis for hyper-spectral imaging spectrometer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (6): 1533-1534. (in Chinese)
王美钦, 王忠厚, 白加光. 高光谱成像仪的杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1533-1534.
- [7] Light D L. Characteristics of remote sensors for mapping and earth science applications [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1990, 56(12): 1613-1623.
- [8] Reynolds G, Hammonda M, Binns L A. Camera correlation focus: an image based focusing technique [C]//SPIE, 2005, 5752: 103221041.