

文章编号: 0253-2239(2010)12-3508-07

嫦娥一号卫星 CCD 立体相机焦平面设计与辐射定标

宋宗玺^{1,2} 赵葆常¹ 高伟¹ 杨建峰¹ 阮萍¹

(¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)
(²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 讨论了嫦娥一号卫星 CCD 立体相机的特殊焦平面设计与实验室辐射定标。嫦娥一号卫星 CCD 立体相机采用一个广角、远心和消畸变的光学透镜配以面阵 CCD 作为接受器, 完成三线阵自推扫成像。由于快门污染的存在, 造成前视、正视与后视间的曝光时间存在较大的差异, 这给辐射定标带来困难。本文提出了在面阵 CCD 焦平面前方设置一个三狭缝面罩的方案, 从而使三行 CCD 的曝光时间基本相同, 其残差在实验室辐射定标中作进一步修正, 取得了较好的效果。本文还介绍了辐射定标中的其他重要性能指标, 包括最短曝光时间的预估、饱和辐亮度的配准、暗电流检测、输出对输入的线性度以及相对定标、绝对定标的不确定度。

关键词 光学设计; 嫦娥一号探月卫星; CCD 立体相机; 焦平面设计; 辐射定标

中图分类号 O431.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3508

Focal Plane Design of Chang'e-1 Satellite CCD Stereo-Camera and Laboratory Radiation Calibration

Song Zongxi^{1,2} Zhao Baochang¹ Gao Wei¹ Yang Jianfeng¹ Ruan Ping¹

(¹Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The special focal plane design and radiation calibration of Chang'e-1 satellite CCD stereo-camera are discussed. A wide-angle, telecentric and orthoscopic optical lens coupled with an area array CCD is used as a sensor in Chang'e-1 satellite CCD stereo camera to complete the three-line array self-propelling-sweeping imaging. But with the existence of shutter smear, the exposure time has some great differences between the foresight, vertical sight and back sight. It brings difficulties to the radiometric calibration. This paper presents a solution of setting up a three-slit mask in front of the CCD focal plane, which makes the three line exposure time almost the same and after the residuals in the laboratory calibration are further adjusted, good result is obtained. This paper also introduces other performances in the radiation calibration including the estimation of the shortest exposure time, the registration of the saturation radiance, the dark current noise test, the linearity of CCD pixel response and the uncertainties of relative calibration and absolute calibration.

Key words optical design; Chang'e-1 lunar satellite; CCD stereo camera; focal plane design; radiation calibration

1 引 言

嫦娥一号卫星于 2007 年 10 月 24 日零窗口发射, 11 月 5 日卫星被月球捕获, 经调轨调姿后, CCD 立体相机于 11 月 20 日开机工作并实时下传第一轨

图像, 11 月 26 日发布我国首次探月工程的第一幅月面照片, 图像清晰、层次丰富, 获得了国内外众多权威学者的一致好评。2008 年初完成了在轨检测与评估, 6 月底获取了全月面的图像, 它是迄今为止

收稿日期: 2010-03-25; 收到修改稿日期: 2010-05-06

基金项目: 嫦娥一号卫星光学成像探测系统项目资助课题。

作者简介: 宋宗玺(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事光电信号测量及数据处理等方面的研究。

E-mail: songxi@opt.ac.cn

导师简介: 赵葆常(1939—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事应用光学和干涉光谱等方面的研究。

E-mail: bczhao@opt.ac.cn

最齐全、最清晰的全月图像。2009 年 3 月 1 日卫星受控撞月,期间仍发回大量清晰的照片。2009 年 9 月底发布 1:2500000 全月地形地貌数字图像,从而使我国拥有自己的月球数据库,并为嫦娥二号卫星实施详查提供了有价值的科学数据。

2 CCD 立体相机焦平面设计

2.1 方案简介

根据任务书指标,嫦娥一号卫星 CCD 立体相机

要求在 200 km 标称轨道高度上具有 120 m 的地元分辨率,60 km 的成像幅宽。采用了 Thomson 公司的面阵 CCDTH7888A 作为接受器,它的像元为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $14 \mu\text{m}$,因此光学系统的焦距应为 23.33 mm。根据成像幅宽以及前、后视间基高比为 0.6 的要求,其视场角 $2u$ 应大于等于 36° ,所选光谱范围为 $500 \sim 750 \text{ nm}$,从光能与调制传递函数(MTF)综合考虑出发,选取相对孔径为 $f/5$,其中 f 为透镜的焦距。其原理图如图 1 所示。

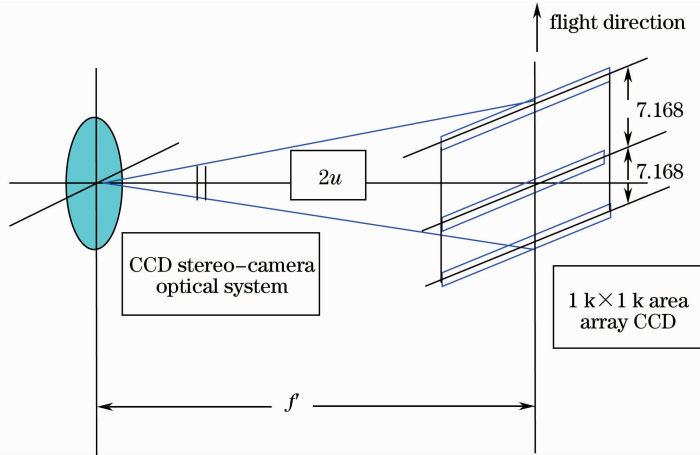


图 1 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机原理图

Fig. 1 Principle of Chang'e-1 satellite CCD stereo-camera

由于焦距较短,所以用面阵 CCD 的第 1 行、第 512 行及第 1024 行作为前视、正视与后视传感器就可以满足基高比 0.6 的要求,该方案为国内外首例。与传统的方案相比,它具有结构紧凑、小型轻量、装配容易及航天环境适应性强等诸多优点^[1]。

2.2 焦平面设计

为了适应不同辐亮度的目标,CCD 立体相机设计有四档曝光时间:3.2,7,20 和 84 ms,其中 84 ms 为换幅时间,亦即最长可能的曝光时间,而 3.2 ms 是根据月球的最大辐亮度值计算得到的最短曝光时间。在轨运行表明,CCD 立体相机的最短曝光时间的设定基本合理,也就是说在 3.2 ms 曝光时间条件下,图像没有出现大面积的饱和。

Thomson 公司的 TH7888A 面阵 CCD 是帧转移 CCD,设计的垂直转移频率为 500 kHz,因此转移一帧的时间约为 2 ms。图像积分完成后,感光区的电荷迅速转移到存储区过程中,由于没有物理快门来遮挡感光区的光线,因此在转移过程中这些像元仍然感光,这些在转移过程中收集的额外电荷称为“快门污染”^[2](shutter smear)。如果不采取特殊的措施,它的前视、正视与后视的最短曝光时间分别变

成为 5.2,4.2 及 3.2 ms(不考虑一行的转移时间约 $2 \mu\text{s}$),这时如果使 5.2 ms 饱和则 3.2 ms 的后视行的信号强度只有饱和值的 62.5%,从而降低图像的信噪比(S/N)和动态范围。对于面阵成像这种“快门污染”可以通过修正加以消除,消除方法参看文献^[2]。由于只选取了面阵中的三行数据,因而无法从根本上消除“快门污染”,只能尽可能地降低“快门污染”,为此在面阵 CCD 前方加了一个刻有三条细缝的面罩,它们分别与前视、正视和后视的 CCD 相配准来降低“快门污染”。

面罩距离 CCD 感光面间有一定距离,所以它存在渐晕。下面按照设计的参数计算加面罩后对 CCD 电荷转移过程中的附加曝光的抑制情况。

根据 CCD 芯片厂商提供的参数,已知 CCD 保护玻璃片前表面距离 CCD 光敏面的光学距离(即把保护玻璃的厚度折算为空气间隔后的尺寸)为 2.31 mm。选用钛合金面罩的厚度为 1 mm,面罩后表面距保护玻璃前表面间隔为 1 mm,因此面罩前表面到 CCD 感光面间总距离为 4.31 mm。面罩上狭缝的宽度为 1 mm,光学系统的相对孔径为 $f/5$ 。所以在焦平面上有 10 行 CCD 处于无渐晕的完全曝

光状态下,在图 2 中以 OA 表示,上下对称,宽度为 0.138 mm ,从 A 点向外扩展到 B 点,从无渐晕过渡到 50% 渐晕(即主光线正好通过), AB 的宽度为 0.431 mm 。它相当于单边 30.8 行。再从 B 点到 C 点,光束的渐晕从 50% 增大到 100% ,它的宽度同样为 0.431 mm ,相当于 30.8 行。 C 点以外就没有任何光线落到 CCD 感光面上。这样加了钛合金面罩后,对第 512 行正视传感器来说,由于拦截不彻底,在电荷转移过程中,经折算后仍有 72 行处于无渐晕地完全曝光之中。

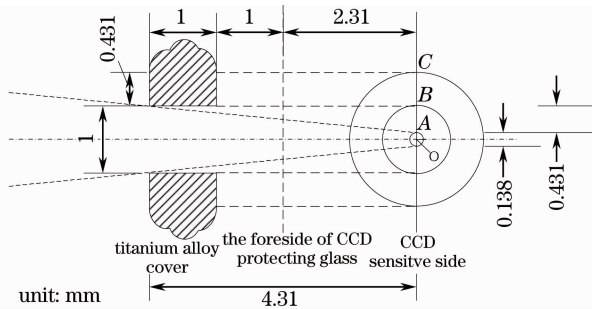


图 2 焦平面渐晕计算

Fig. 2 Vignette effect calculation of focal plane

对于第 1 行与第 1024 行,由于只有一个方向上处于 CCD 光敏区,所以两者之和的作用相当于第 512 行的情况。因此对此 CCD 来说,电荷转移过程中最大残留有 144 行处于曝光之中,其残差为 14% 或者相当于 0.28 ms 。这样前视、正视和后视的实际曝光时间变为 $3.48, 3.34$ 及 3.2 ms 。这时若使 3.48 ms 的曝光达到饱和,则后视为饱和值的 92% ,从而大大改善了动态范围,使三个视角的图像都达到较高的信噪比。

这里面要说明两点:1)该光学系统为远心系统,因此上述计算符合实际情况;2)由于探测器是同一个面阵传感器,所以前视、正视和后视无法分别调整曝光时间。

2.3 实验结果验证

图 3 为未加三条细缝面罩的归一化的响应曲线,图 4 是加入面罩后的归一化的响应曲线。

从对比图 3 中可以看出前视和正视分别比后视高 65% 和 45% 左右。由于前视和后视在位置上关于光轴对称,光强分布相近,因此与预估的 62.5% 很接近;由于光线在空气-玻璃界面上的入射角不同(轴外入射角大于轴上入射角),使得正视光场比后视光场强 16% 左右。去除上述该因素,则正视的结果 29% ($45\% \sim 16\%$) 与预估的结果 30% 也很接近,因而可以客观的证明预估方法及模型的正确性。比

对图 4 可以发现,前视比后视高 17% 左右,这同预估的 14% 的结果很接近,而正视比后视高 24% 左右,这同预估结果 23% [16% (光场分布不均匀) + 7% 理论预估结果] 也很接近,从而进一步证明了预估方法及模型的正确性。

从图 5 可以看出未加面罩的时候,CCD 相机在 $15\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 左右的输入时就达到了饱和,而加入面罩后 CCD 在 $30\text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 左右的时候才饱和,因此在 CCD 前加入三狭缝面罩能够大大提高 CCD 的动态范围,使得相机满足设计的要求。

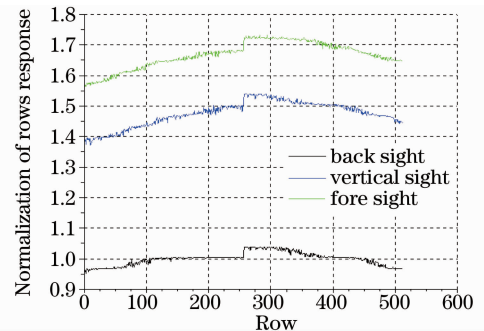


图 3 未加面罩的归一化的响应曲线

Fig. 3 Normalization of response without mask

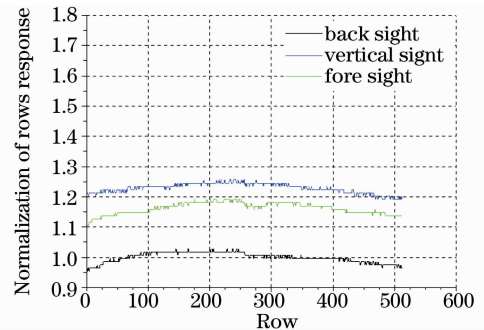


图 4 加面罩后的归一化的响应曲线

Fig. 4 Normalization of response with mask

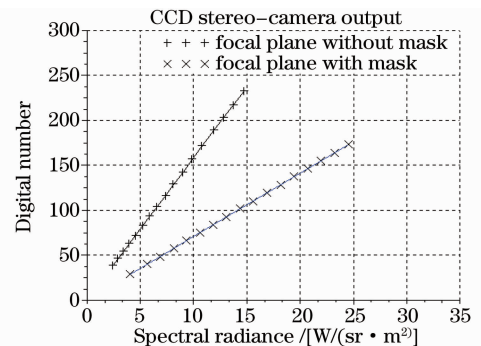


图 5 加面罩前后 CCD 输出的对比

Fig. 5 CCD camera output without vs with mask

在轨运行的结果表明, 3.2 ms 曝光时间下前视、正视和后视三线均无大面积饱和现象,从而客观上证明了在 CCD 前加入三狭缝面罩方法的正确性。

3 最大辐亮度的配准与动态范围预估

对月立体成像碰到的一个难点是,当太阳光直射赤道时,反射光的能量很强^[3]。而在极区由于太阳光的斜角很大,反射光很弱。同时月表物质的反射系数也有很大的差异。通过对国际上发布的大量数据^[4~11]进行分析和归纳,预估在 500~700 nm 光谱范围内其最大反射系数为 0.25,最小反射系数为 0.05。为了充分利用 CCD 立体相机的动态范围,要求对最大辐亮度的目标在最短曝光时间及最低电子学增益情况下,使 CCD 的输出接近饱和,反过来说,要选择一个合适的最短曝光时间。

由于地球大气外在 500~700 nm 内的辐照度为 393 W/m²,可以预估最大辐亮度为

$$L_{\max} = \frac{E_{\max} \rho_{\max}}{\pi} = 31.3 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2).$$

以它作为输入,结合光学系统的相对孔径和透射率等参数,可以计算出在最大辐亮度输入情况下的最短曝光时间为 $t_{\min} = 3.2 \text{ ms}$ 。也就是说在 3.2 ms 的曝光时间,1 倍电子学增益情况下,当输入最大辐亮度时,CCD 的输出基本接近饱和。在轨运行表明,预估基本合理,在任何情况下相机都没有出现极大面积的饱和情况。

根据地元空间分辨率 $G_{\text{SD}} = 120 \text{ m}$ 和地速 $v = 1.427 \text{ km/s}$ 可以计算出允许的最长曝光时间为 $t_{\max} = 84 \text{ ms}$,电子学增益共有四档 $1 \times, 1.5 \times, 3 \times, 3.5 \times$ 。从图象质量要求评估,结合 CCD 立体相机的 MTF 值,认为 $S/N \geq 40$ 是可以接受的。而对噪声评估,最大噪声不大于 1DN(digital number)(由

于量化等级为 8 bit,最大 DN 为 255),故要求最小 DN 输出为 40。

因此可以预估 CCD 立体相机可以达到的动态范围值为

$D = 84 \text{ ms}/3.2 \text{ ms} \times 3.5 \times 250\text{DN}/40\text{DN} = 574$,这一数据已大于最大辐亮度/最小辐亮度的值,证明 CCD 立体相机能够满足使用要求,这一点也得到了在轨运行的证实。实际上 CCD 立体相机在获取全月图时,最大曝光时间仅用到 20 ms,这时的动态范围为 137。

4 CCD 立体相机的辐射定标

4.1 概述

CCD 立体相机在正样交付前完成了实验室辐射定标,辐射定标的目的之一在于将原始图像的数字输出转化为反射率^[12]。在辐射定标中除验证最大辐亮度外,还检测了暗电流、输出输出的线性度以及相对定标和绝对定标^[14]。在定标中,对 4 档曝光时间(3.2, 7, 20 和 84 ms)以及 4 档电子学增益($1 \times, 1.5 \times, 3 \times$ 和 $3.5 \times$)共 16 种组合以及 3 个视角分别进行了检测,向用户提供了暗电流矩阵、相对定标矩阵及绝对定标系数,并给出了不确定度的评估。

4.2 定标过程与标准具检验

4.2.1 定标用设备

1) 在定标中使用了如表 1 所示的设备。

表 1 实际用于定标的设备一览表

Table 1 Devices which are used in laboratory radiometric calibration

Name	Type	Technical specifications and purpose
Spectral radiometer	Fieldspace Pro UV/VNIR	Spectral range: 350~1050 nm, spectral sample interval: 1.4 nm, spectral resolution: 3 nm, ADC resolution: 16 bit
Spectral radiometer	Fieldspace Pro UV/VNFR	Spectral range: 350~1050 nm, spectral resolution: 3 nm, ADC resolution: 16 bit
Spectral radiometer	VF921	Spectral range: 350~1050 nm, spectral resolution: 3 nm, ADC resolution: 16 bit
Integrating spheres	LABSPEHRE VSS-6500	Sphere diameter: 65 inch($\phi 1.65 \text{ m}$), output port diameter: 22 inch ($\phi 550 \text{ mm}$). 20 halogen lamps can be adjusted individual. Power dissipation: 3000 W, luminance uniformity >98.7% (nonuniformity: 1.3%)
Multispectral radiometer	Radstd-8	Spectral Bands: 400~1000 nm, absolute uncertainty <2%, relatively uncertainty <0.05%, ADC Resolution: 24 bit (practice 16 bit)
Spectral irradiance standard lamps	National institute of metrology No. F07	Power: 1000 W, Spectral range: 250~2500 nm, Accurate grade: $V = 1.3\% \sim 4\%$

续表 1

Name	Type	Technical specifications and purpose
Diffuse reflectance target	LABSPEHRE STR-99-240	Size: 617 mm×617 mm, Spectral range: 250~2500 nm, spectral reflect inconsistency<0.003
Radiometric detector	Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics	Silicon photovoltaic detector, low dark current and high sensitivity and reliability

使用三台光谱辐亮度计的目的是为了相互核对,其中两台为安徽光机所提供。

2) 标准传递

定标过程实质为标准传递过程,标准传递链保证了各种传感器的响应可以溯源到一个共同级准^[20]。光谱辐照度标准灯与漫反射标准板由中国计量院标定并出具数据,由它传递到光谱辐射度计,再传递到积分球,如图 6 所示。

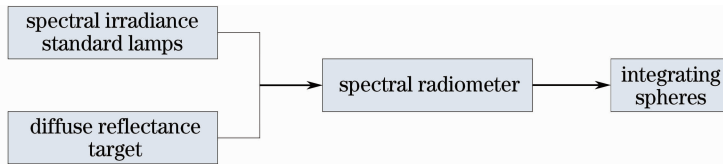


图 6 标准传递链

Fig. 6 Transfer chain of standards

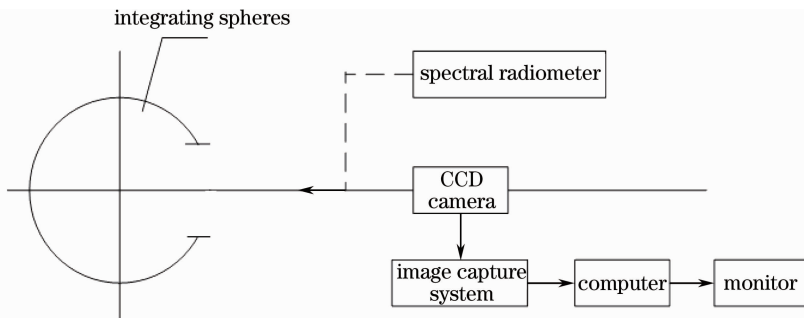


图 7 定标装置配置图

Fig. 7 Schematic diagram of calibration device

4.2.2 标准具的检验不确定度评估

在嫦娥一号卫星 CCD 立体相机定标中,标准具的检验是委托安徽光机所遥感研究室完成的,其检验重点是积分球的面均匀性与角均匀性,并给出定标用标准具的不确定度评估。

用于绝对定标的标准具是光谱辐射度计,它的响应率是通过光谱辐照度标准灯来标定的,其不确定度评估见如表 2 所示。

由表 2 可知光谱辐射度计总的不确定度^[19]为 2.8%。

积分球还会引入面非均匀性、角非均匀性及辐射非稳定性,它们分别为 0.65%,1.1%及 0.02%,因此标准具总的绝对不确定度为 3%。

3) 定标装置

定标前积分球要提前 1 h 开机预热,其作用是消除附着在积分球内壁上的水汽以及让系统的工作状态处于稳态。

光谱辐射度计与被定标 CCD 立体相机同时对准积分球出口,通过改变开灯的数目,调节积分球输出的辐亮度,如图 7 所示。

表 2 光谱辐射度计不确定度

Table 2 Spectral radiometer uncertainties

Source of errors	Uncertainty /%
Spectral irradiance standard lamp	1.9
Distance measure error	0.1
Stable current precision error	0.1
Lamp and target standard error	0.2
Reflectance fact error between center to edge	0.28
Reflectance error of diffuse reflectance target	2

4.3 定标结果

4.3.1 最大辐亮度配准实验验证

对嫦娥一号卫星 CCD 立体相机实际最大辐亮

度检测结果为:对 $33 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ ($500\sim 700 \text{ nm}$) 的输入,在最短曝光时间为 3.2 ms 及 $1\times$ 电子学增益时,CCD 的最大输出达到饱和,它与理论预估值 $31.3 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 相差 5% 。

4.3.2 暗电流检测

暗电流检测是指 CCD 立体相机在没有光输入

表 3 CCD 立体相机的暗电流检测结果

Table 3 Results of dark current noise test

Gain mode	$K=1$		$K=1.5$		$K=3.0$	
	Mean	Deviation	Mean	Deviation	Mean	Deviation
$t=3.2 \text{ ms}$	3.236	0.360	4.322	0.402	7.108	0.676
$t=7.0 \text{ ms}$	3.460	0.474	4.363	0.414	7.150	0.664
$t=20 \text{ ms}$	3.488	0.481	4.429	0.456	7.306	0.617
$t=84 \text{ ms}$	3.789	0.301	4.554	0.445	7.868	0.786

由上表可知它是一个 $3 \text{ 行}\times 500 \text{ 元}$ 的一个二维暗电流矩阵。

4.3.3 相对定标(平场)不确定度估算

相对定标,国外称为平场或者渐晕校正,所谓相对定标(平场)是通过软件处理 CCD 各像元间响应的不一致性进行修正,修正后的残差控制在一定的不确定度范围内。在嫦娥一号卫星 CCD 立体相机的相对定标中使用积分球的光辐射输出作为光源。它产生一个非常均匀的光源,采集 CCD 像元各自的输出,然后用软件修正,结果如表 4 所示。在相对定标评价中,并不考虑修正矩阵元素值的大小,而是评估它的不确定度。

表 4 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机相对定标的不确定度

Table 4 Uncertainties of relative calibration of Chang'e-1 satellite CCD stereo-camera

Errors	Uncertainty / %	Note
Standards uncertainty	0.36	
CCD camera uncertainty	0.31	Including: dark current noise, photo noise, photo response non-uniformity
Relative radiometric calibration residual error	1.84	

由上表可知总的相对定标不确定度为 1.9% 。

4.3.4 绝对辐射定标

绝对辐射定标是在已完成相对定标(平场)的基础上进行的^[2,12~19]。由于已完成平场修正,所以可以忽视像元间在空间域响应的不一致性,从而使绝对定标成为单值。绝对辐射定标是在一定的不确定度范围内,建立起输出对输入的定量关系。输出和

的情况下 CCD 的输出。具体测量方法为在暗室中或者在夜间,把 CCD 立体相机的盖子盖上,并用黑色天鹅绒包裹,根据在卫星上的实际工作温度(采用了热控措施)。设定环境温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。CCD 立体相机开机工作,检测暗电流输出,检测结果如表 3 所示,单位为 DN, K 为数字相机增益。

输入关系为 $V_{\text{out}} = f(L, t, k)$ 。可以看出,输出 V_{out} 是输入辐亮度 L ,曝光时间 t 和电子学增益 k 的函数。在嫦娥一号卫星 CCD 立体相机绝对定标中,为了提高绝对定标的精确度,按 4 种曝光时间与 4 种电子学增益共 16 种组合分别给出绝对定标系数,即它有 16 个单值,使用时对号入座。

按照国军标(GJB)的规定,绝对定标系数 A 的公式为 $A = X/L$, X 为 CCD 输出,单位为 DN; L 为输入,单位为 $\text{W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 。它同样以积分球的输出作为光源,其辐亮度值由光谱辐射度计直接读出,CCD 的输出由 CCD 像元读出,结果如表 5 所示。同样我们不关心 A 的值为多少,而是关心绝对定标的不确定度。

表 5 CCD 立体相机绝对定标不确定度评估

Table 5 Uncertainties of absolute calibration of Chang'e-1 satellite CCD stereo-camera

Errors	Uncertainty / %	Note
Standards uncertainty	3	
CCD camera uncertainty	0.31	
Nonlinearity of CCD input vs output	1	
Absolute calibration residual error	4.37	

由表 5 可知因此 CCD 立体相机总的绝对定标不确定度为 5.4% 。

4.3.5 输出对输入的线性检测

输出 V_{out} 对输入 L 的线性度检测共采用了 17 档不同的输入辐亮度,并检测了它们相应的输出。实际上对每一个 CCD 像元,在不同的模式(曝光时间与电子学增益)下,都有一条线性曲线,对它们进行拟合,

并求出残差,得检测结果如图 8 和图 9 所示。

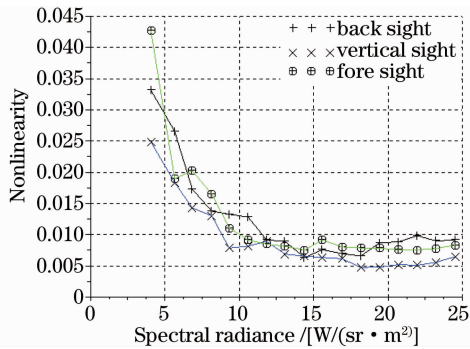


图 8 CCD 立体相机绝对定标的非线性

Fig. 8 Nonlinearity of CCD absolute calibration of CCD stereo-camera

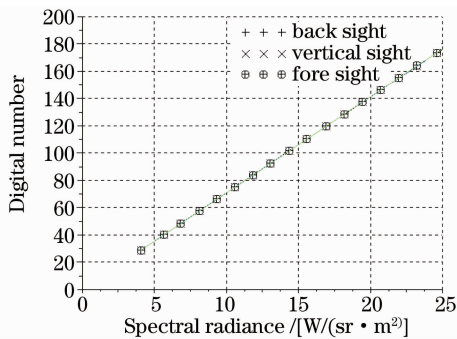


图 9 CCD 立体相机线性度

Fig. 9 Linearity of CCD stereo-camera output

5 结 论

在叙述嫦娥一号卫星 CCD 立体相机特殊方案的基础上,重点讨论了焦平面设计,由于在面阵 CCD 前方加了一个特殊设计的面罩,从而大大减小了面阵 CCD 在电荷转移过程中的附加曝光,使前视、正视和后视三行 CCD 的实际曝光时间趋向一致。并详细介绍了 CCD 立体相机的定标,包括暗电流检测、最大辐亮度配准、相对定标(平场)、绝对定标以及线性度检测。除介绍原理外,文中还给出了定标结果。

致谢 首先要感谢原国防科工委探月工程中心对项目的支持。同时还要感谢中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感所研究室的吴浩宇教授及同仁。

参 考 文 献

- Zhao Baochang, Yang Jianfeng, He Yinghong *et al.*. Lunar exploration optics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 461~467
- 赵葆常, 杨建峰, 贺应红 等. 探月光学[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 461~467

- J. Bell, J. Joseph, J. Sohl-Dickstein. MER/Pancam data processing user's guide[DB/OL]. http://pds-geosciences.wustl.edu/mer/mer2-m-pancam-2-edr-sci-v1/mer2pc_0xxx/document/pancam_users_guide.pdf
- Y. G. Shkuratov, M. A. Kreslavsky, A. A. Ovcharenko *et al.*. Opposition effect from Clementine data and mechanisms of backscatter[J]. *Icarus*, 1999, **144**(1): 132~155
- S. Nozette, P. Ruston, L. P. Plesance *et al.*. The clementine mission to the moon: scientific overview[J]. *Science*, 1994, **266**(5192): 1835~1839
- Chon Trung Hua. Ultraviolet diffuse reflectance spectroscopy for lunar, meteoritic, and terrestrial samples[C]. Proc. Lunar Sci. Conf. 1976. 2605~2622
- P. Lucey, R. L. Korotev, J. J. Giuis *et al.*. Understanding the lunar surface and space-moon interactions[J]. *Rev. Mineral. Geochem.*, 2006, **60**: 83~219
- S. Tompkins, C. M. Pieters. Mineralogy of the lunar crust: results from Clementine[J]. *Meteorit. Planet. Sci.*, 1999, **34**(1): 25~41
- J. M. Sunshine, C. M. Pieters. Determining the composition of olivine from reflectance spectroscopy[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **102**(E6): 13675~13688
- M. A. Wieczorek, R. J. Philips. The structure and compensation of the lunar highland crust[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(E5): 10933~10943
- A. S. McEwen, M. S. Robinson, E. M. Eliason *et al.*. Clementine observations of the Aristarchus region of the Moon[J]. *Science*, 1994, **266**(5192): 1858~1862
- C. M. Pieters. The moon as a spectral calibration standard enabled by lunar samples: the clementine example[C]. Workshop on New Views of the Moon 2: Understanding the Moon Through the Integration of Diverse Datasets, 1999
- J. A. Mendenhall, D. E. Lencioni, A. C. Parker. Radiometric calibration of the EO-1 advanced land imager[C]. *SPIE*, 1999, **3750**: 117~131
- Y. G. Shkuratov, V. G. Kaidash, M. A. Kreslavsky *et al.*. Absolute calibration of the clementine UVVIS data: comparison with ground-based observation of the moon[J]. *Sol. Sys. Res.*, 2001, **35**(1): 29~34
- J. Campos. Radiometric calibration of charge-coupled-device video cameras[J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5): 459~464
- A. R. Eisenman, C. C. Liebe, R. Perez. The mars exploration rover suncam[EB/OL]. <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/13331/1/01-2119.pdf>
- J. N. Maki, J. F. Bell, K. E. Horkonhalf *et al.*. Mars exploration rover engineering cameras[J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(E12): 1~24
- D. T. Janzen, A. L. Fredeen, R. D. Wheate. Radiometric correction techniques and accuracy assessment for Landsat TM data in remote forested regions[J]. *Can. J. Remote Sens.*, 2006, **32**(5): 330~340
- M. Robinson, M. Riner. Advances in lunar science from the Clementine mission: a decadal perspective Mark[J]. *J. Earth Sys. Sci.*, 2005, **114**(6): 669~686
- P. N. Slater, S. F. Biggar, K. J. Thome *et al.*. Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors[J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1996, **13**(2): 349~359
- Feng Yu, Zheng Xiaobin, Zhang Wei *et al.*. Optical radiometric calibration based on correlated photons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 457~460

冯 瑜, 郑小兵, 张 伟 等. 基于相关光子的光辐射定标方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 457~460