光学拼接焦平面空间相机的相对辐射定标

李宪圣[1,2]，刘洪兴[2]，孙景旭[2]，薛常喜[1]，任建岳[2]，张立国[2]，陈长征[2]，任建伟[2]

[1]长春理工大学光电工程学院，吉林 长春 130022；

[2]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033

摘要 为了提高光学拼接焦平面空间相机的成像性能和图像质量，开展了空间相机研制全过程的辐射定标技术研究，包括辐射响应性能分析、图像传感器的辐射定标及筛选、焦平面辐射定标、系统级辐射定标以及辐射定标数据应用等，并对具有反射镜光学拼接焦平面的空间相机进行了辐射定标实验。结果表明，利用相对辐射校正系数对图像校正，可以有效消除渐晕，图像的非均匀性由 14.1%降至 0.4%，图像质量明显提升；图像传感器的筛选以及焦平面组件的辐射定标，减少了图像传感器之间的辐射响应差异，相对定标不确定度小于 1.0%。

关键词 遥感；渐晕；辐射定标；相对辐射定标；空间相机；光谱定标

中图分类号 V443 **文献标识码** A

doi：10.3788/AOS201737.0828006

Relative Radiometric Calibration for Space Camera with Optical Focal Plane Assembly

Li Xiansheng[1,2], Liu Hongxing[2], Sun Jingxu[2], Xue Changxi[1], Ren Jianyue[2], Zhang Liguo[2], Chen Changzheng[2], Ren Jianwei[2]

[1] *School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin* 130022, *China*;

[2] *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*

Abstract In order to improve the imaging performance and image quality of space cameras with an optical focal plane assembly, the radiometric calibration researches in the whole develop process of the space cameras are conducted which include the radiation response performance analysis, the radiometric calibration and screening of the image sensors, the focal plane radiometric calibration, the system-level radiometric calibration, and the applications of radiometric calibration data. The radiometric calibration experiment is conducted for the space cameras with a reflector-based mosaic focal plane. The results show that the vignetting can be effectively eliminated when the image is corrected by using the relative radiometric correction coefficient, and the nonuniformity of the image decreases from 14.1% to 0.4% with an obvious enhancement in the image quality. Moreover, the radiometric response difference between the image sensors is reduced by utilizing the screening of the image sensors and the radiometric calibration of focal plane components, and the relative calibration uncertainty is less than 1.0%.

Key words remote sensing; vignetting; radiometric calibration; relative radiometric calibration; space camera; spectral calibration

OCIS codes 280.4788; 120.0280; 130.6010; 280.4991

1 引 言

空间相机的成像性能和图像质量不仅取决于其光学系统、机械结构、热控性能、图像传感器及电子学系统，还与研制过程中的实验室辐射定标技术息息相关。随着光学遥感技术的快速发展，定量化遥感的需求日

收稿日期：2017-01-24；**收到修改稿日期**：2017-05-04

作者简介：李宪圣(1979—)，男，博士研究生，主要从事光学遥感器辐射定标方面的研究。E-mail：lixs688@163.com

导师简介：薛常喜(1979—)，男，博士，副教授，博士生导师，主要从事衍射光学和超精密光学加工方面的研究。E-mail：xcx272479@sina.com(**通信联系人**)

益迫切，对卫星图像的质量和辐射定标的精度提出了更高的要求[1]。光学遥感器定量化的应用水平，取决于发射前及在轨运行后的辐射定标精度。辐射定标按阶段可分为发射前实验室辐射定标、在轨星上定标和在轨替代定标[2-3]。其中发射前实验室辐射定标是卫星在轨运行后辐射定标的基础，能为相机提供光谱响应度、光谱范围、中心波长、带外响应、响应线性度、绝对辐射响应度、相对辐射校正系数、暗电流、传递函数等参数，其在定量化遥感中发挥着重要作用。

Mendenhall 等[4-5]研究了 EO-1 卫星(First Earth-Observing satellite)先进陆地成像仪(ALI)的实验室光谱定标和辐射定标以及发射后在轨辐射场的定标方法。Kuester 等[6]研究了用于长期生态环境观测的成像光谱仪的实验室辐射定标方法。Montanaro 等[7]研究了 Landsat 8 卫星中长波红外通道的实验室和在轨辐射定标方法。任建伟等[8]针对离轴三反空间相机光学系统光路和结构的特点，研究了离轴三反宽视场空间相机的实验室辐射定标，系统地介绍了实验室辐射定标的过程及数据处理方法。任焕焕等[9]从暗电流、相对定标、绝对定标三个方面研究了时间延迟积分-电荷耦合器件(TDI-CCD)空间立体相机的实验室辐射定标。空间相机的焦平面拼接形式由机械交错拼接发展到光学拼接，而光学拼接焦平面在相邻两片 CCD 的交界处易出现光学渐晕，使得交界处的辐射能量呈逐渐下降趋势，致使像元之间的辐射响应差别较大，从而导致图像质量明显下降。传统的渐晕消除方法[10]有查表法、逐行扫描法和函数逼近法。查表法是采用渐晕系数对照表逐个校正，不适合于工程应用；逐行扫描法的计算量比较大，当相邻两行灰度变化较大时，恢复的图像会产生线性条纹；函数逼近法通过多次定标求得各个照度下每个像元的补偿因子，拟合出照度和每个像元补偿因子的函数关系，再依据这个函数关系对后续的图像进行渐晕处理，在实际计算中往往产生很大的误差。

本文针对光学拼接焦平面空间相机的设计、研制和在轨应用等阶段开展了全过程辐射定标研究，通过辐射定标实验验证，并利用相对辐射校正数据对空间相机图像进行校正，图像渐晕得到有效消除，辐射响应的非均匀性大幅降低，图像质量明显提升。

2 空间相机研制过程中的辐射定标

空间相机辐射定标贯穿其研制全过程，在设计、研制和在轨运行等各阶段都发挥重要作用。在空间相机设计阶段，辐射响应性能分析为空间相机获取高成像性能奠定基础；在相机研制过程中，其定标包括图像传感器的辐射定标与筛选[11]、焦平面组件的辐射定标、整机实验室辐射定标，为空间相机获取高成像性能提供技术保障；空间相机在轨运行后，利用相对辐射定标数据对卫星图像进行辐射校正[12]，可提升图像质量；利用绝对辐射定标结果建立空间相机在轨成像的工作参数表[13]，当空间相机在轨成像时，能通过设置适合的成像参数(积分级数、增益和偏置等)获得最佳图像；辐射定标数据还可应用于在轨传函测试[14]，客观评价相机性能。空间相机研制过程中的各类辐射定标，能形成数据之间的相互验证，为相机成像性能与图像品质的提升提供技术保障。

空间相机优良的硬件性能是其获取卫星图像的前提和必要基础，而研制过程中的辐射性能测试与定标是其获取最佳图像质量的必要环节，尤其是在多通道、光学拼接焦平面等复杂空间相机研制过程中，辐射定标的意义更为重要。光学拼接焦平面空间相机除 CCD 之间辐射响应的差异外，部分 CCD 入射光经反射镜反射，在相邻两片 CCD 之间还存在由反射镜反射率引入的系统透过率差异，特别是交接处由于光学拼接易产生渐晕，导致像元辐射响应明显下降，因此，相对辐射校正是光学拼接焦平面相机的主要研究内容。在全过程中开展辐射定标，可及时发现、解决研制过程中的问题，并及时对电子学进行优化设计，保障研制进度。

2.1 空间相机设计阶段的辐射响应性能分析

辐射响应性能分析是通过对地面景物辐射信息、光学系统焦比、系统透过率、探测器响应性能等相机成像性能进行综合分析，来估算空间相机的辐射响应能力及信噪比，为空间相机设计提供有利的数据支撑。辐射响应性能分析还能使相机设计者结合传递函数、信噪比、探测器性能等参数优化光学系统的设计，使空间相机响应性能达到最优状态，同时使研制成本最低化。

在辐射响应性能的分析过程中，利用 MODTRAN 软件进行估算获得相机入瞳处的地物辐射亮度，光学

系统的焦比和透过率可以代入光学设计的数值进行计算。其中关键参数是探测器的响应度，在计算过程中一般代入谱段内峰值波长的量子效率进行计算，但会造成信噪比等参数的估算结果偏高。利用矩带宽归一化方法[15]计算带宽内的平均响应度 R_n 是一种较为适合的计算方法，R_n 表达式为

$$R_n=\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty}R(\lambda)\mathrm{d}\lambda\Big/\Delta\lambda=\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty}\frac{\lambda\eta(\lambda)A_D}{hc}\mathrm{d}\lambda\Big/\Delta\lambda,\tag{1}$$

式中 λ 为波长，$\Delta\lambda$ 为波段带宽；$\eta(\lambda)$ 为图像传感器在波长 λ 处的量子效率；A_D 为图像传感器单个像元的面积；h 为普朗克常数(6.626×10^{-34} J·s)；c 为光速(3.0×10^{8} m·s^{-1})；$R(\lambda)$ 为光谱响应度，表达式为

$$R(\lambda)=\frac{\lambda\cdot\eta(\lambda)\cdot A_D}{hc}。\tag{2}$$

计算谱段内平均辐射响应度所用的参数及计算公式见表 1。

表 1　平均辐射响应度参量及表达式

Table 1　Parameters and expressions of average radiometric responsivity

Parameter	Expression
Zeroth moment M_0	$M_0=\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty}R(\lambda)\mathrm{d}\lambda$
First moment M_1	$M_1=\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty}\lambda R(\lambda)\mathrm{d}\lambda$
Second moment M_2	$M_2=\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty}\lambda^2 R(\lambda)\mathrm{d}\lambda$
Center wavelength λ_C	$\lambda_C=M_1/M_0$
Variance σ^2	$\sigma^2=M_2/M_0-\lambda_C^2$
Short wavelength limit λ_1	$\lambda_1=\lambda_C-\sqrt{3}\sigma$
Long wavelength limit λ_2	$\lambda_2=\lambda_C+\sqrt{3}\sigma$
Bandwidth $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda=2\sqrt{3}\sigma$
Average radiometric responsivity R_n	$R_n=M_0/\Delta\lambda$

2.2　图像传感器的辐射定标与筛选

空间相机的成像性能与图像传感器的辐射响应性能息息相关。目前，空间相机为实现大视场宽幅成像，多采用多片图像传感器拼接出长焦平面[16]。在焦平面拼接前，图像传感器的辐射定标尤为重要。受图像传感器制造工艺等因素的影响，即使是同一批次生产的图像传感器，其辐射响应性能也会存在较大的差异。因此，在拼接之前需要对图像传感器进行辐射定标，将光谱响应差异大、带外响应严重、串扰明显、响应非线性大、响应非均匀性大的图像传感器剔除。利用饱和辐射照度一致性筛选法[11]筛选出图像传感器，更有利于充分发挥传感器的性能。

2.3　焦平面组件的辐射定标

焦平面组件上各图像传感器在拼接前经过严格的测试筛选，具有几乎相同的辐射响应性能，但是成像电路之间的差异会造成饱和辐射照度及辐射响应度较大的差异，因此，需要利用焦平面组件的辐射定标对电子学系统进一步调试，使焦平面所有图像传感器的饱和辐射照度与之前的测试值相当，以充分发挥图像传感器的成像性能。另外，相机焦平面组件经过各种环境实验后，还要经过焦平面组件的辐射定标，以判断实验是否对焦平面组件造成损伤及焦平面组件的辐射响应是否下降。

空间相机属于典型的辐射亮度响应系统，输出图像的灰度值正比于入瞳前的辐射亮度，而无前置光学系统的 CCD 输出灰度值正比于像面上的辐射照度，因此，需要将光学遥感器的辐射亮度响应关系转换为 CCD 接收面上的辐射照度关系，即

$$Y=\frac{\pi}{4F_{\#}^2}L\cdot\tau_O\cdot R\cdot M\cdot G\cdot T_{int}=E\cdot R_E,\tag{3}$$

式中 Y 为图像灰度值(单位为 DN),R 为辐射照度响应度,$E=\frac{\pi}{4F_{\#}^2}L\cdot\tau_O$ 为入瞳辐射亮度 L 在焦平面上产生的辐射照度,$F_{\#}$ 为光学系统焦比,τ_O 为光学系统的透过率,R_E 为 CCD 在积分时间为 T_{int}、积分级数为 M、增益为 G 时的辐射照度响应度。

焦平面的测试装置如图 1 所示,将溴钨灯光源车、中性减光片、杂光光阑、焦平面组件成像电路安装在 6 m 光学导轨上,通过改变照明光路的光程和中性减光片,在焦平面接收面上产生与辐射亮度 L 对应的辐射照度 E。获取 10 个辐射照度和对应的图像数据,利用最小二乘法获得辐射照度响应度。通过设置成像单元的相关参数以及微调电路的驱动时序,使得各成像单元与对应的图像传感器具有基本相同的辐射响应度(辐射响应一致性大于 99%),并且与相机的辐射响应范围相匹配。

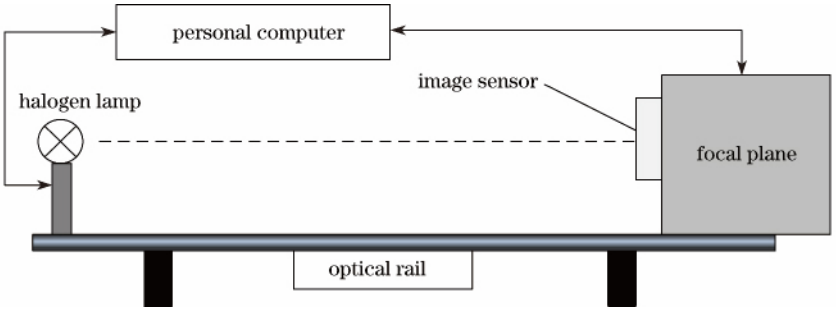


图 1　焦平面辐射定标装置示意图

Fig. 1　Schematic of focal plane radiometric calibration device

2.4　系统级实验室辐射定标

系统级的实验室辐射定标,是指在空间相机光机电系统装调及各种实验完成后,对相机整机进行的系统级辐射响应性能定标,主要包括相对光谱响应度定标、绝对和相对辐射定标。其主要目的在于获取光谱响应度、光谱响应范围、绝对辐射响应度、相对辐射响应的校正系数、响应线性度、响应非均匀性、饱和辐射亮度,噪声等效辐射亮度、动态范围、信噪比等参量。

2.4.1　相对光谱定标

光谱定标是通过定标建立相机入瞳处的单波长辐射输入与图像数码输出之间的响应关系,并获取相机的光谱辐射响应数据,如图 2 所示。单色仪输出的单色光经平行光管后输出单色平行光,再经相机的光学系统成像至焦平面的图像传感器上,控制单色仪采集各波长位置处的图像数据,然后使用标准辐射计采集各波长位置处平行光管输出的单色平行光的辐射通量。相机光谱响应度 $R_{cam}(\lambda)$ 的计算公式为

$$R_{cam}(\lambda)=\frac{Y_{cam}(\lambda)-Y_{cam_dark}(\lambda)}{Y_{dec}(\lambda)-Y_{dec_dark}(\lambda)}R_{dec}(\lambda),\tag{4}$$

式中 $Y_{cam}(\lambda)$ 为相机在波长为 λ 的单色光照明下输出图像的灰度值,$Y_{cam_dark}(\lambda)$ 为相机在波长 λ 处的暗信号,$Y_{dec}(\lambda)$ 为标准辐射计在波长为 λ 的单色光照明下输出的信号值,$Y_{dec_dark}(\lambda)$ 为标准辐射计在波长为 λ 的单色光

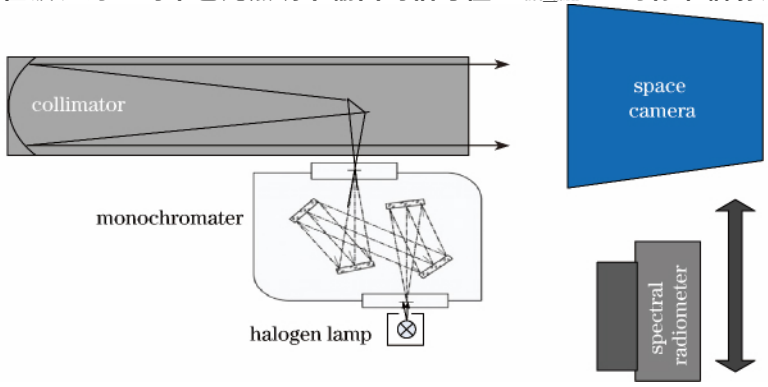


图 2　光谱定标装置原理图

Fig. 2　Principle diagram of spectral calibration device

照明下输出的暗信号值，$R_{\mathrm{dec}}(\lambda)$为标准辐射计的光谱响应度。对(4)式归一化后可得相机的相对光谱响应度。

将获得的光谱响应度数据代入表 1 中的公式，计算出光谱响应范围、中心波长、波段宽度等参量。

2.4.2　系统辐射定标

相对辐射定标是指建立像元之间相对的辐射响应关系，可用于图像的非均匀性校正。绝对辐射定标是指建立相机入瞳前的辐射亮度输入与图像灰度值输出之间的函数响应关系。通过辐射定标可以确定相机的相对辐射响应度、响应线性度、绝对辐射响应度、响应非均匀性、信噪比、动态范围等参量。

2.4.2.1　辐射定标物理模型

空间相机任意一个像元的输出灰度值与入射辐射亮度的响应函数，可以用泰勒多项式函数表达。空间相机的辐射响应关系多为线性响应关系，即

$$Y_i = Y_{\mathrm{dark}\text{-}i} + R_{\mathrm{SYS}\text{-}i} L\,, \tag{5}$$

式中 Y_i 为像元 i 初始的图像灰度值，$Y_{\mathrm{dark}\text{-}i}$ 为在无光照时输出的图像灰度值，$R_{\mathrm{SYS}\text{-}i}$ 为像元 i 的辐射响应度，L 为相机入瞳前的波段积分辐射亮度。

根据(5)式，利用积分球光源输出的辐射亮度和对应定标图像的像元灰度平均值，建立每个像元上辐射亮度输入与图像灰度输出的关系：

$$\begin{bmatrix} Y_{1,0}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}1} & Y_{1,1}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}1} & Y_{1,2}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}1} & \cdots & Y_{1,m}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}1} \\ Y_{2,0}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}2} & Y_{2,1}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}2} & Y_{2,2}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}2} & \cdots & Y_{2,m}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}2} \\ Y_{3,0}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}3} & Y_{3,1}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}3} & Y_{3,2}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}3} & \cdots & Y_{3,m}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n,0}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}n} & Y_{n,1}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}n} & Y_{n,2}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}n} & \cdots & Y_{n,m}-Y_{\mathrm{dark}\text{-}n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\mathrm{SYS}\text{-}1} \\ R_{\mathrm{SYS}\text{-}2} \\ R_{\mathrm{SYS}\text{-}3} \\ \vdots \\ R_{\mathrm{SYS}\text{-}n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L_0 & L_1 & L_2 & \cdots & L_m \end{bmatrix}, \tag{6}$$

式中每列序号 1,2,3,…,n 为像元序号，每行序号 1,2,3,…,m 为辐射定标时辐射亮度的等级序号，$Y_{i,j}$ 为图像像元的灰度值，L_i 为空间相机的入瞳辐射亮度。(6)式表示了空间相机像元的辐射响应关系，等号左边矩阵中的行数据表示不同辐射亮度等级对应的图像灰度值。通过求解(6)式可获得(5)式所示的每个像元的绝对辐射响应度 $R_{\mathrm{SYS}\text{-}i}$ 以及响应线性度，进而获得辐射响应范围等参量。在所有像元的响应度 $R_{\mathrm{SYS}\text{-}i}$ 中，计算像元响应度的最大值 $R_{\max}$，通过归一化获得每个像元的相对响应度 $R'_{\mathrm{SYS}\text{-}i}$，进而获得每个像元的相对辐射响应系数：

$$R'_{\mathrm{SYS}\text{-}i} = \frac{R_{\mathrm{SYS}\text{-}i}}{R_{\max}}。 \tag{7}$$

利用相对辐射校正系数对图像按像元进行辐射校正以获得辐射校正图像，辐射校正方程式为

$$Y'_i = Y_i \times R'_{\mathrm{SYS}\text{-}i}\,, \tag{8}$$

式中 Y'_i 为校正后的图像灰度值，Y_i 为校正前的原始图像灰度值。

2.4.2.2　实验室辐射定标方法及定标装置

可见近红外空间相机主要采用近距离均匀扩展辐射源定标方法，如图 3 所示，主要的辐射定标装置为充满空间相机光学口径和视场的积分球光源。目前国内最大的积分球光源为长春光学精密机械与物理研究所研制的 8 m 积分球辐射定标光源，如图 4 所示，可满足目前大多数空间相机的辐射定标要求。

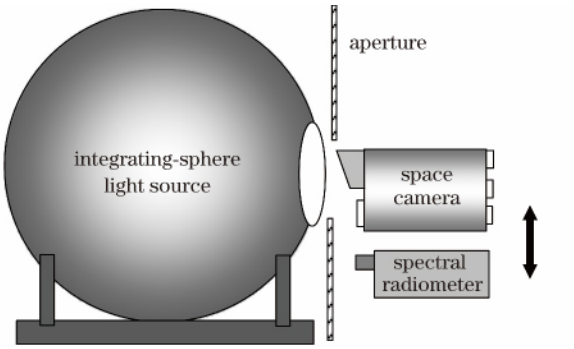


图 3　整机辐射定标示意图

Fig. 3　Schematic of overall unit radiometric calibration



图 4　8 m 积分球辐射定标光源

Fig. 4　8 m integrating-sphere radiometric calibration source

3　相机辐射定标实验及定标结果

利用空间相机研制全过程的辐射定标研究方法，对光学直线拼接焦平面相机进行了全过程的辐射定标，结果如下。

3.1　空间相机基本参数

可见近红外空间相机的基本参数：$F_{\#}$为 9.0；焦距为 2.2 m；光学系统的透过率为 0.74；CCD 像元数为 5120，尺寸为 8.75 μm；焦平面拼接的 CCD 数量为 3，拼接形式为反射镜光学直线拼接。

3.2　图像传感器辐射定标及筛选结果

在焦平面组件拼接前，对 6 片 CCD 进行了辐射定标，将光谱响应差异大、有串扰、响应非线性大、响应非均匀性大的 CCD 排除，最终选出饱和辐射照度最接近的 3 片 CCD 用于焦平面拼接，所选用 CCD 的定标结果见表 2，饱和辐射照度的相对偏差为 0.27%。

表 2　图像传感器定标结果

Table 2　Calibration results of image sensors

CCD number	CCD serial number	Radiometric responsivity /(DN·W^{-1}·m^{2})	Saturation irradiance /(W·m^{-2})
CCD 1	8652	1538.9	0.5078
CCD 2	8644	1535.5	0.5083
CCD 3	8657	1527.9	0.5051
Relative deviation		0.30%	0.27%

3.3　焦平面组件的辐射定标结果

焦平面采用反射镜拼接方式，光线经光学系统到达焦平面附近后，一部分光线经 1 号反射镜入射到 CCD 1 上，一部分光线直接入射到 CCD 2 上，另一部分光线经 2 号反射镜入射到 CCD 3 上。光学拼接焦平面与交错拼接的相比，在反射镜的边界处产生光学渐晕，造成两片 CCD 相邻位置处像元的灰度值呈逐渐下降趋势。在焦平面定标时，为避免渐变对焦平面定标的影响，利用精密直线导轨移动焦平面，使点光源依次垂直照明每一片 CCD 的中心。

从表 2 可以看出，在 3 片 CCD 中，编号 8657 的 CCD3 饱和辐射照度最小，因此以该片 CCD 的饱和辐射照度 0.5051 W·m^{-2}为基准进行电路调试。焦平面组件的辐射定标结果见表 3。在成像电路调整前，饱和辐射照度的相对偏差为 2.2%；成像电路调整后，3 片 CCD 的饱和辐射照度的相对偏差达到 0.7%。

表 3　焦平面组件定标结果

Table 3　Calibration results of focal plane components

CCD number	CCD serial number	Saturation irradiance before circuit adjustment /(W·m^{-2})	Saturation irradiance after circuit adjustment /(W·m^{-2})
CCD 1	8652	0.4822	0.5054
CCD 2	8644	0.5082	0.5046
CCD 3	8657	0.4917	0.5051
Relative deviation		2.2%	0.7%

3.4　相机光谱定标结果

相机的光谱响应曲线如图 5 所示，其中 B，G，R，IR，P 分别代表空间相机的蓝、绿、红、近红外和全色五个谱段。根据相对光谱响应度数据，利用表 1 中的计算公式，计算各个辐射光谱辐射参量，结果见表 4。

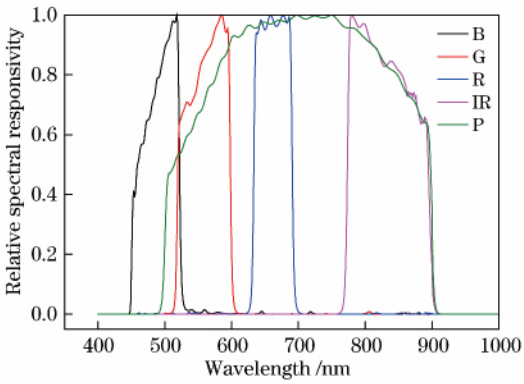


图 5　相机光谱响应曲线

Fig. 5　Spectral response curves of camera

表 4　相机光谱定标结果

Table 4　Spectral calibration results of camera

Spectrum band number	Short wavelength /nm	Center wavelength /nm	Long wavelength /nm	Out-of-band responsivity
B	448	494	528	1.01%
G	511	563	614	0.47%
R	625	662	700	0.67%
IR	765	831	895	0.06%
P	523	708	896	0.01%

3.5　相机辐射定标结果

利用(6)式，计算所有像元的辐射响应度，以 CCD 2 中的 4 个像元为例，建立方程组

$$\begin{bmatrix} 857 & 658 & 468 & 139 & 42 \\ 881 & 676 & 481 & 143 & 42 \\ 886 & 681 & 484 & 144 & 43 \\ 885 & 680 & 484 & 144 & 42 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\mathrm{SYS\text{-}1}} \\ R_{\mathrm{SYS\text{-}2}} \\ R_{\mathrm{SYS\text{-}3}} \\ R_{\mathrm{SYS\text{-}4}} \end{bmatrix} \times [60.01 \quad 45.11 \quad 32.07 \quad 9.76 \quad 2.80]。 \tag{9}$$

4 个像元的辐射响应曲线如图 6 所示，辐射响应的定标结果见表 5，由(9)式获得像元响应度，再根据辐射定标获得像元暗信号、饱和灰度值等，最后分别求得饱和辐射亮度和动态范围。根据辐射亮度和像面辐射照度的关系，可以计算出像面的辐射照度为 0.505 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$ 左右，与 CCD 辐射定标和焦平面辐射定标的结果基本一致。三个阶段辐射定标结果的一致性，说明相机充分发挥了 CCD 的辐射响应性能。

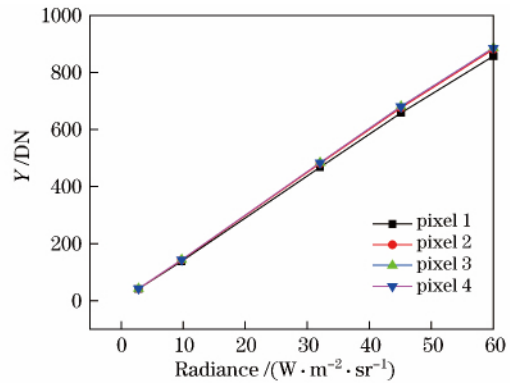


图 6　全色波段四个像元的辐射响应曲线

Fig. 6　Radiometric response curves of four pixels in panchromatic band

表 5　全色相机辐射响应参数

Table 5　Radiometric calibration parameters of panchromatic camera

Parameter	Pixel 1	Pixel 2	Pixel 3	Pixel 4
Responsivity /(DN·W^{-1}·m^{2}·sr)	14.5	14.6	14.7	14.7
Gray level of dark noise /DN	1.51	1.51	1.52	1.51
Linear correlation coefficient	0.9997	0.9995	0.9995	0.9995
Saturation radiance /(W·m^{-2}·sr^{-1})	70.5	70.1	69.6	69.6
Dynamic range	677	677	673	677
Saturation irradiance /(W·m^{-2})	0.506	0.503	0.499	0.499

利用像元的绝对辐射响应度，计算所有像元的相对辐射校正系数，计算结果如图 7 所示。可以看出，相机焦平面采用反射镜直线拼接时，在反射镜的交接位置出现光学渐晕，渐晕区域像元的辐射校正系数数值相对偏高。

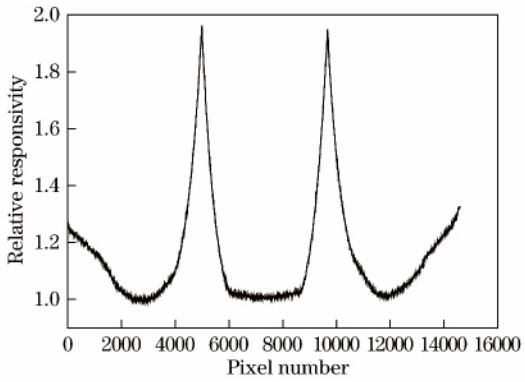


图 7　相对辐射响应曲线

Fig. 7　Relative radiometric response curve

3.6　辐射定标数据应用

利用像元的相对辐射校正系数，对图像进行辐射校正。辐射校正前后的像元灰度值曲线如图 8 所示。辐射校正前后的光响应非均匀性(PRNU)数据见表 6。由于焦平面采用反射镜光学直线拼接，反射镜的边界(即相邻两片 CCD 交界处)出现光学渐晕，如图 9(a)所示，交界处的图像灰度值呈逐渐下降趋势，造成 3 片 CCD 所有像元的非均匀性达到 14.1%。经过定标数据辐射校正后，渐晕区域的像元响应被修正，响应明显更均匀，如图 9(b)所示，响应非均匀性下降至 0.4%。图 10(a)所示为含渐晕的原始图像，图 10(b)所示为辐射校正后的图像，可以看出经过辐射校正后，图像质量明显提升。

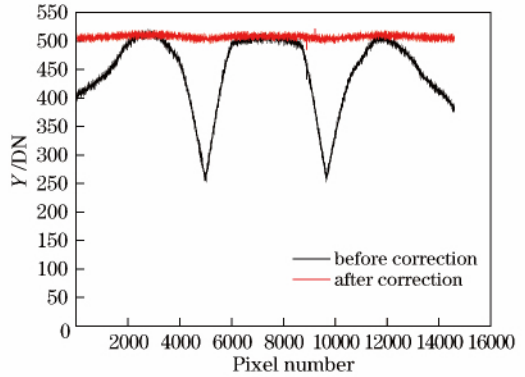


图 8　辐射校正前后的像元灰度曲线

Fig. 8　Curves of pixel gray level before and after radiometric correction

表 6　辐射校正前后的光响应非均匀性

Table 6　PRNU before and after radiometric correction

Image	Average gray value	Standard deviation of gray value	PRNU
Before correction	447.5	63.0	14.1%
After correction	507.3	2.1	0.4%

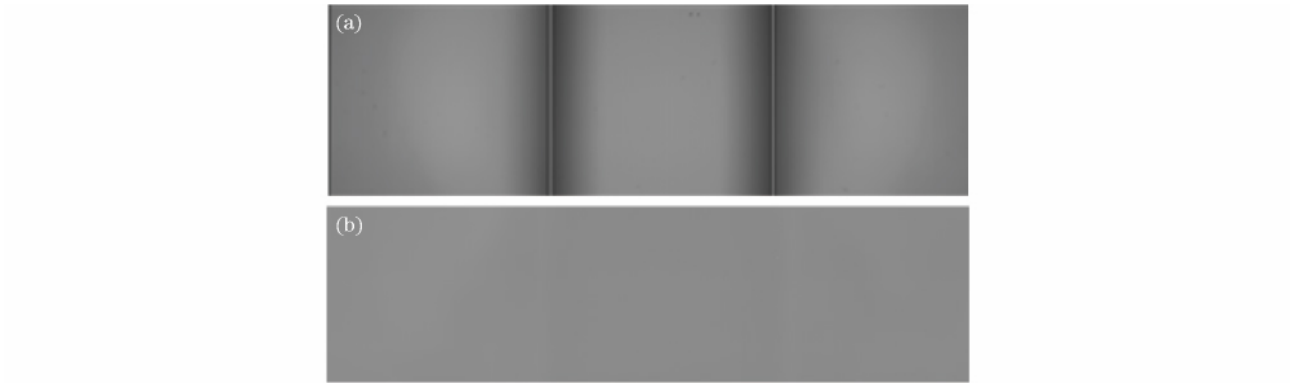


图 9　辐射校正前后的定标图像。(a)相对辐射校正前的渐晕图像;(b)相对辐射校正后的图像

Fig. 9　Calibration images before and after radiometric correction. (a) Vignetting image before relative radiometric correction; (b) image after relative radiometric correction

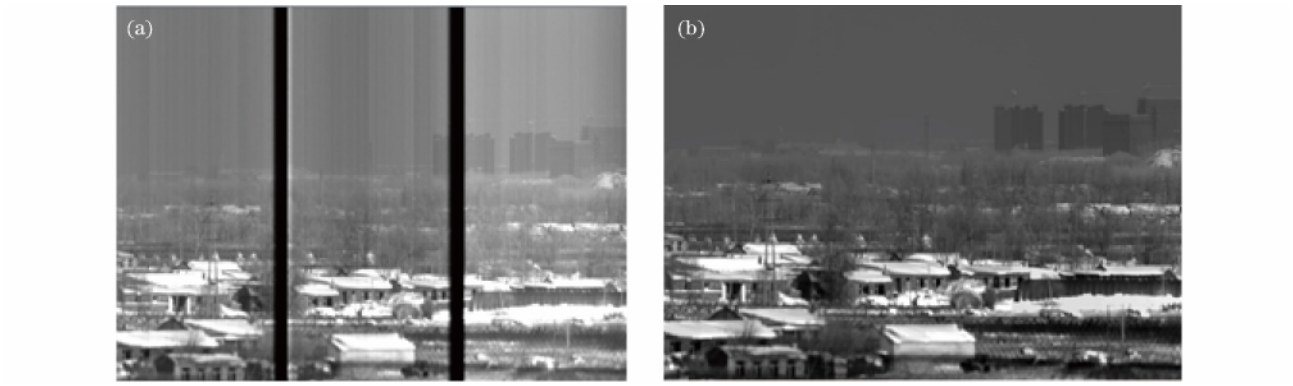


图 10　辐射校正前后的景物图像。(a)相对辐射校正前的初始渐晕图像;(b)相对辐射校正后的图像

Fig. 10　Scene images before and after radiometric correction. (a) Original vignetting image before relative radiometric correction; (b) image after relative radiometric correction

4　结　论

对光学拼接焦平面空间相机的图像传感器、焦平面组件和整机进行了全过程辐射定标，结果表明，三个阶段图像传感器的饱和辐射照度均为 0.505 $W \cdot m^{-2}$，证明定标数据可以相互验证，说明相机充分发挥了 CCD 的辐射响应性能。图像传感器和焦平面的辐射定标都为整机的辐射响应性能提供了必要的技术保障。利用像元的绝对辐射响应度计算了像元之间的相对辐射校正系数，有效避免了偶然因素引入的相对定标误差。在研制过程中对图像传感器进行了辐射定标和筛选，选出的 CCD 具有较好的一致性(0.27%)。焦平面经过辐射定标后，一致性达到了 0.7%，为相机整机的辐射响应性能奠定了较好的基础。相机经过辐射定标校正后，响应非均匀性达到了 0.4%。综合考虑相机噪声等其他因素，光学拼接焦平面空间相机相对定标的不确定度小于 1.0%。

该光学拼接焦平面空间相机的焦平面组件采用反射镜光学拼接方式将 3 片 CCD 拼接在一起，这种拼接方式造成相邻两片 CCD 交界处出现了光学渐晕现象，影响了相机的成像性能及图像质量，导致相机辐射响应的非均匀性达到了 14.1%。利用辐射定标获得的辐射校正系数校正后，渐晕现象被有效去除，相机辐射响应的非均匀性下降至 0.4%，图像质量明显提升。

参 考 文 献

[1] Han Qijin, Ma Lingling, Liu Li, *et al*. On-orbit calibration and evaluation of GF-2 satellite based on wide dynamic ground target[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0728003.
韩启金, 马灵玲, 刘 李, 等. 基于宽动态地面目标的高分二号卫星在轨定标与评价[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0728003.

[2] Zhang Zhijie, Zhang Hao, Chang Yuguang, *et al*. Review of radiometric calibration methods of Landsat series optical remote sensors[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(5): 719-732.
张志杰, 张 浩, 常玉光, 等. Landsat 系列卫星光学遥感器辐射定标方法综述[J]. 遥感学报, 2015, 19(5): 719-732.

[3] Xu Na, Wu Ronghua, Hu Xiuqing, *et al*. Integrated method for on-obit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1228001.
徐 娜, 吴荣华, 胡秀清, 等. FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1228001.

[4] Mendenhall J A, Lencioni D E, Evans J B. Spectral and radiometric calibration of the advanced land imager[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2005, 5(2): 207-224.

[5] Lencioni D E, Heam D R, Mendenhall J A, *et al*. EO-1 advanced land imager calibration and performance overview[C]. SPIE, 1999, 3750: 89-96.

[6] Kuester M A, Mccorkel J T, Johnson B R, *et al*. Radiometric calibration concept of imaging spectrometers for a long-term ecological remote sensing project[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2008, 27(12): 1487-1500.

[7] Montanaro M, Lunsford A, Tesfaye Z, *et al*. Radiometric calibration methodology of the Landsat 8 thermal infrared sensor[J]. Remote Sensing, 2014, 6(9): 8803-8821.

[8] Ren Jianwei, Liu Zexun, Wan Zhi, *et al*. Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmat space camera with wide viewing field[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1491-1497.
任建伟, 刘则洵, 万 志, 等. 离轴三反宽视场空间相机的辐射定标[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1491-1497.

[9] Ren Huanhuan, Ruan Ping, He Jianwei, *et al*. Study of the radiation calibration of TDI-CCD spatial stereo camera[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3476-3480.
任焕焕, 阮 萍, 何建伟, 等. TDI-CCD 空间立体相机辐射定标研究[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3476-3480.

[10] Tao Minghui, Ren Jianyue, Zhang Yu, *et al*. Vignetting correction method of assembled images using reflector[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(6): 45-49.
陶明慧, 任建岳, 张 宇, 等. 反射镜拼接渐晕消除方法[J]. 光电工程, 2011, 38(6): 45-49.

[11] Li Xiansheng, Wan Zhi, Liu Zexun, *et al*. The method of CCD test and screening for space camera with wide field of view[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2245-2250.
李宪圣, 万 志, 刘则洵, 等. 大视场空间相机 CCD 性能测试及筛选方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2245-2250.

[12] Liu Hongxing, Li Xiansheng, Li Xiaojie, *et al*. Correction of vignetting image for reflector-based mosaic CCD camera[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(2): 9-14.
刘洪兴, 李宪圣, 李晓杰, 等. 反射式拼接 CCD 相机渐晕图像校正[J]. 光电工程, 2015, 42(2): 9-14.

[13] Li Xiansheng, Ren Jianyue, Ren Jianwei, *et al*. Establishing method of image model for on-board space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 47-53.
李宪圣, 任建岳, 任建伟, 等. 空间相机在轨成像模式建立方法[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(7): 47-53.

[14] Li Xiansheng, Liu Hongxing, Sun Jingxu, *et al*. Measurement method of the on-orbit MTF without atmosphere effect[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0711004.
李宪圣, 刘洪兴, 孙景旭, 等. 不含大气的在轨传递函数测试方法[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0711004.

[15] Palmer J M, Grant B G. The art of radiometry[M]. Bellingham: SPIE Press, 2010: 305-307.

[16] Sun Bin, Li Jinglin, Zhang Xingxiang, *et al*. Interleaving assembly of TDICCDs on 600 mm focal plane[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 2908-2913.
孙 斌, 李景林, 张星祥, 等. 600 mm 长焦平面时间延迟积分 CCD 的交错拼接[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(11): 2908-2913.