

## 云相机绝对辐射定标技术研究

池杲鋆<sup>1,2,3</sup>, 汪杰君<sup>1</sup>, 李孟凡<sup>2,3\*</sup>, 胡亚东<sup>2,3</sup>, 王相京<sup>2,3</sup>, 洪津<sup>2,3</sup><sup>1</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;<sup>2</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;<sup>3</sup>中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

**摘要** 云相机用于对目标区域进行云识别和云覆盖率的判别,其采用阈值法进行云判。为满足云判的准确性,确定探测器响应值与辐亮度之间的关系尤为重要。以云相机采用的基于拜耳阵列的面阵彩色 CCD 相机为研究对象,分析其成像过程,发现其红(R)、绿(G)、蓝(B)通道的辐射响应光谱存在重叠;以此为基础,建立了多通道 CCD 探测器辐射响应定标模型。针对云相机使用的 R 和 B 通道,使用 747 nm LED 和 443 nm LED 作为积分球的光源,设置光谱辐亮度的最小值、典型值、最大值,在单光源条件下进行云相机的绝对辐射响应定标实验以确定相应的绝对辐射响应系数,在双光源条件下验证了提出的辐射响应定标模型的正确性。该方法消除了探测器响应混叠带来的定标不确定性,有效提高了绝对辐射定标的准确度。

**关键词** 测量; 云相机; CCD 相机; 辐射定标; 绝对定标

中图分类号 TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0612001

## Absolute Radiometric Calibration Technique of Cloud Camera

Chi Gaojun<sup>1,2,3</sup>, Wang Jiejun<sup>1</sup>, Li Mengfan<sup>2,3\*</sup>, Hu Yadong<sup>2,3</sup>, Wang Xiangjing<sup>2,3</sup>, Hong Jin<sup>2,3</sup><sup>1</sup>School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;<sup>2</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Cloud camera is designed to perform cloud recognition and cloud coverage discrimination of the target area, and it adopts the threshold method for cloud detection. To satisfy the accuracy of cloud detection, it is important to determine the relationship between the response value of the detector and the radiance. We take the Bayer array based plane array color CCD camera adopted by the cloud camera as the research object, analyze its imaging process, and find that the radiation response spectra of R, G, and B channels overlap. Based on this phenomenon, a multi-channel CCD detector radiation response calibration model is established. For the R and B channels used by the cloud camera, the 747 nm LED and 443 nm LED are used as the light sources of the integrating sphere, and the minimum, typical, and maximum values of spectral radiance are set. The absolute radiation response calibration experiment of the cloud camera is carried out under the single light source condition to determine the corresponding absolute radiation response coefficients, and the correctness of the proposed radiation response calibration model is verified under the dual light source condition. This method eliminates the calibration uncertainty caused by the detector response aliasing and effectively improves the accuracy of absolute radiation calibration.

**Key words** measurement; cloud camera; CCD camera; radiometric calibration; absolute calibration

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2021-08-10; 录用日期: 2021-08-31

基金项目: 王宽诚率先进入人才计划“卢嘉锡国际团队项目”(GJTD-2018-15)

通信作者: \*mfli@aiofm.ac.cn

## 1 引言

光学遥感卫星图像广泛应用于农业、环境、防灾等领域,但不是所有的图像都满足信息处理的要求,影响图像处理的因素之一是云的覆盖。根据国际卫星云气候项目 (ISCCP) 的数据,全球年均云量的平均值约为 66.7%<sup>[1]</sup>。云的覆盖阻止了光学卫星获得地球表面的清晰视野,影响成像的纹理信息和光谱信息,降低了图像的数据利用率。因此,云检测是光学遥感推广应用的关键问题。

云相机<sup>[2]</sup>是中国科学院安徽光学精密机械研究所针对小卫星平台进行设计的云分布信息获取载荷,可搭载于卫星进行对地云分布状况的识别。其主要任务与功能是在卫星主载荷成像前对目标区域提前进行云识别和云覆盖率的判别,从而为主载荷提供观测时间窗口和必要的指向信息,提高数据利用率,减少无效数据,进而优化带宽使用。

云相机采用大视场、可见光彩色面阵 CCD 的探测形式,通过预滤光片及 CCD 片上拜耳滤光片实现探测波段的选择,星载云判算法根据采集图像的空间信息和光谱信息完成目标区域的实时云反演。云相机在轨云判算法主要基于先验地表反射率数据并通过合理设置阈值来检测晴空像元,在云判算法中,辐射度量的准确性将会影响最终的反射率计算结果。相机辐射定标的意义在于将载荷获取的数据值与实际物理量相对应,建立辐射量与探测器输出量的数值联系,从而建立国家辐射基准到探测器输出量的传递链路,保障载荷定标基准的稳定和有效<sup>[3-4]</sup>。绝对辐射定标旨在确定图像灰度值与被测辐亮度之间的对应关系,以便于最终获得准确的反

射率计算结果<sup>[5]</sup>。

目前国内外普遍采用的实验室辐射定标方法有标准灯-漫反射板辐射定标<sup>[6]</sup>、积分球辐射定标<sup>[7]</sup>、黑体点源-准直系统定标<sup>[8]</sup>、基于标准探测器的辐射定标等<sup>[9]</sup>,关于对可见光彩色 CCD 相机的绝对辐射定标方法的研究较少。受云相机拜耳滤光片自身因素的影响,在添加预滤光片后 CCD 探测器不同通道的光谱响应在所需要的双窄波段内会有串扰。为此,本文基于光谱辐射计 (ASD) 辐亮度定标系统,针对可见光彩色 CCD 相机提出一种绝对辐射定标方法。相比于传统的绝对辐射定标,本文方法消除了拜耳滤光片接收 460~470 nm 波段和 745~755 nm 波段的光带来的串扰问题,通过 ASD 将较高级的初级标准传递至相机探测器,消除了传统定标模型带来的系统误差。同时,分析了标准传递过程中的影响因素,给出了该绝对辐射定标方法的不确定度,这为提高绝对辐射定标精度提供了参考。

## 2 云相机结构组成和定标模型

### 2.1 云相机结构组成

云相机光机结构和广角成像光学系统示意图分别如图 1 和图 2 所示,云相机光学系统主要由广角像方远心成像物镜、滤光片和面阵 CCD 探测器组成,可实现针对目标区域的云判功能。其中广角成像光学系统通过在探测器前设置预滤光片并配合拜耳滤光片实现光谱选择,使得相机能够接收 460~470 nm 和 745~755 nm 波段的光,双波段辐射度量基于预先计算的四季地表反射率数据<sup>[10]</sup>,通过双波段阈值法进行云判。

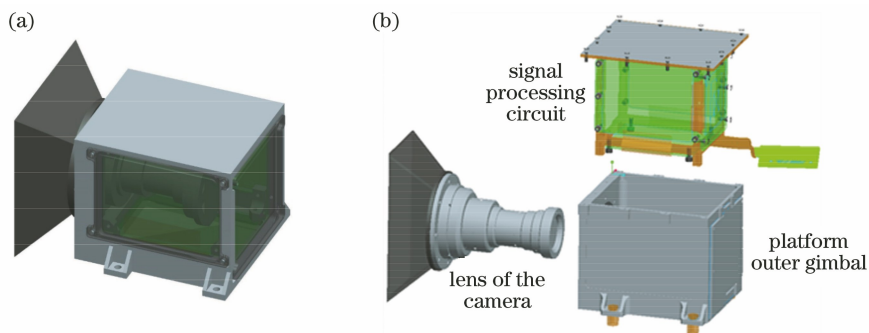


图 1 云相机光机结构图。(a)外观;(b)三维爆炸模型

Fig. 1 Optomechanical structure diagrams of cloud camera. (a) Appearance; (b) three-dimensional explosion model

云相机采用的面阵 CCD 探测器型号为安森美公司的 KAI-08050,该 CCD 探测器为行间转移型 CCD,像元表面按照拜耳规律排列的基色滤光片用

于实现基色分离<sup>[11]</sup>,每个像元对一种基色进行感光,通过插值算法获得其他两种基色,从而获取彩色图像,该 CCD 探测器表面的拜耳阵列如图 3 所示。

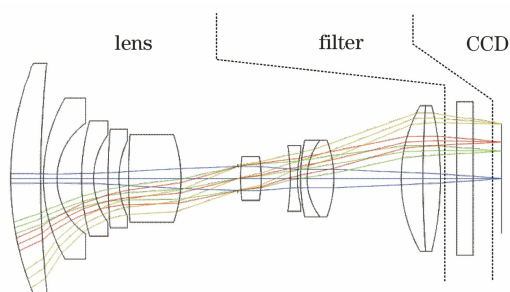


图 2 广角成像光学系统图  
Fig. 2 Schematic of wide-angle imaging optical system

2.2 定标模型

云相机模块主要通过预滤光片和 CCD 探测器表面的拜耳滤光片实现波长选择,其他光学镜片的光谱透过率对响应曲线形状有一定影响。CCD 产品量子效率曲线(已考虑拜耳滤光片透过率)如图 4 (a)所示,拜耳阵列 R、G、B 通道的光谱响应存在多处重叠,同时根据云判算法所需要的 460~470 nm

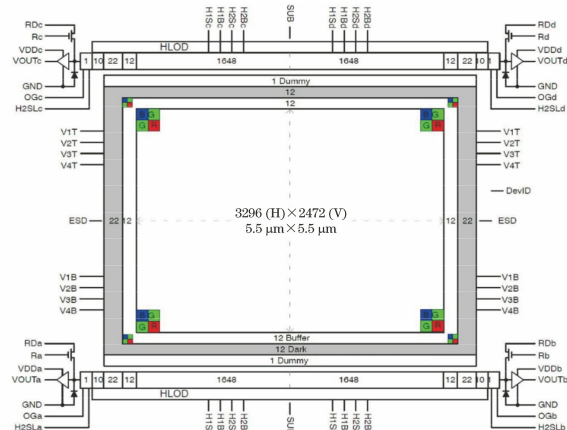


图 3 云相机 CCD 探测器的拜耳彩色滤光片模板  
Fig. 3 Bayer color filter pattern of CCD detector of cloud camera

波段 b 和 745~755 nm 波段 r,设计窄带滤光片进行波段选择。设计的预滤光片如图 4(b)所示,将滤光片双通道透过率设置为 36% 和 90% 是为了使动态范围匹配。

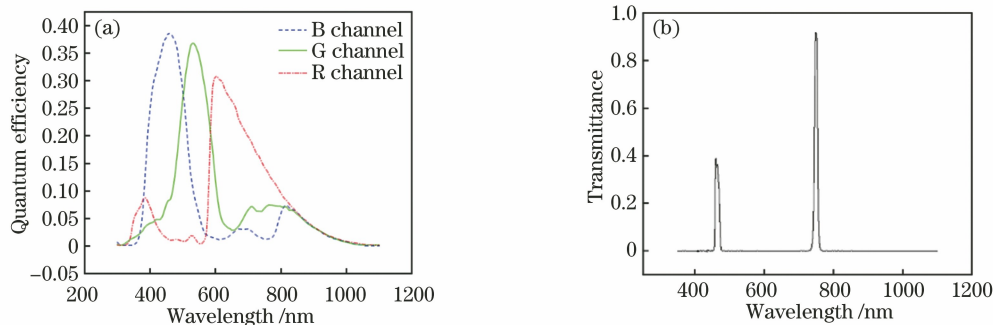


图 4 拜耳阵列与预滤光片。(a)拜耳阵列不同颜色通道的量子效率曲线;(b)预滤光片的透过率  
Fig. 4 Bayer array and pre-filter. (a) Quantum efficiency curves of different color channels of Bayer array; (b) transmittance of pre-filter

添加预滤光片后,云相机 CCD 探测器的 R 通道和 B 通道的相对光谱响应率如图 5 所示,经分析可得,云相机的工作谱段(r 和 b 波段)的中心波长分别为 749.46 nm 和 464.40 nm,带宽分别为

9.96 nm 和 12.79 nm。可以看出,滤光片后的拜耳阵列对双波段的光谱响应在窄带内会有串扰,其中 B 通道对波段 r 的响应约占其总响应的 9%,R 通道对波段 b 的响应约占其总响应的 1.5%。在云相机

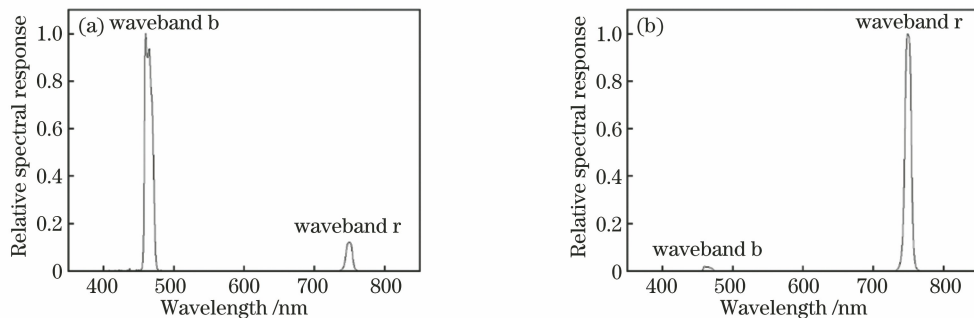


图 5 添加预滤光片后 CCD 探测器不同通道的光谱响应曲线。(a) B 通道;(b) R 通道  
Fig. 5 Spectral response curves of different channels of CCD detector after adding pre-filter. (a) B channel; (b) R channel

绝对辐射定标过程中,串扰会造成当前谱段下的光谱响应准确度下降,进而造成定标的准确度下降,即误差增加,从而影响云相机的云判结果。

根据彩色 CCD 相机自身特性<sup>[12-13]</sup>,相机 R、G、B 三个颜色通道的辐射响应特性均可使用一次多项式曲线形式进行拟合,设计了多通道的 CCD 探测器的辐射定标模型:

$$D_a = \sum_{a=1}^n \sum_{k=1}^m A_a^{(k)} L_a^{(k)}, \quad (1)$$

式中: $a$  表示拜耳阵列的通道, $a=R,G,B$ ;  $k$  表示光谱波段; $D_a$  表示  $a$  通道的响应值; $A_a^{(k)}$  表示  $a$  通道在光谱波段  $k$  下的绝对辐射响应系数; $L_a^{(k)}$  表示  $a$  通道在积分球对应被测波段  $k$  的带内平均辐亮度值。

本文基于拜耳阵列 CCD 探测器的各通道响应可以表示为

$$\begin{cases} D_R = A_R^{(red)} L_R^{(red)} + A_R^{(green)} L_R^{(green)} + A_R^{(blue)} L_R^{(blue)} \\ D_G = A_G^{(red)} L_G^{(red)} + A_G^{(green)} L_G^{(green)} + A_G^{(blue)} L_G^{(blue)} \\ D_B = A_B^{(red)} L_B^{(red)} + A_B^{(green)} L_B^{(green)} + A_B^{(blue)} L_B^{(blue)} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:下标 R、G、B 分别表示拜耳阵列的 R、G、B 通道;red、green、blue 分别表示对应的光谱谱段。云相机光学系统的预滤光片决定了 CCD 探测器仅在 r 和 b 波段产生响应,因此选用拜耳阵列的 R 通道和 B 通道。(2)式可简化为

$$\begin{cases} D_R = A_R^{(r)} L_R^{(r)} + A_R^{(b)} L_R^{(b)} \\ D_B = A_B^{(r)} L_B^{(r)} + A_B^{(b)} L_B^{(b)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:上标 r、b 在此文特指 745~755 nm 波段和 460~470 nm 波段。

经过实际计算可得两通道像素在同一谱段的亮度差异很小,R 通道的等效辐亮度在光谱波段 r 下

比 B 通道的等效辐亮度高约 0.4%,在光谱波段 b 下比 B 通道的等效辐亮度高约 1%。于是:

$$\begin{cases} L_R^{(r)} \approx L_B^{(r)} \\ L_R^{(b)} \approx L_B^{(b)} \end{cases} \quad (4)$$

理想情况下,在入射光为同一光谱波段时,积分球出射光的辐亮度可以认为近似一致,将  $L_R^{(r)}$ 、 $L_B^{(r)}$  和  $L_R^{(b)}$ 、 $L_B^{(b)}$  分别用  $\bar{L}^{(r)}$  和  $\bar{L}^{(b)}$  表示,因此(3)式可变为

$$\begin{cases} D_R = A_R^{(r)} \bar{L}^{(r)} + A_R^{(b)} \bar{L}^{(b)} \\ D_B = A_B^{(r)} \bar{L}^{(r)} + A_B^{(b)} \bar{L}^{(b)} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} D_R \\ D_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_R^{(r)} & A_R^{(b)} \\ A_B^{(r)} & A_B^{(b)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{L}^{(r)} \\ \bar{L}^{(b)} \end{bmatrix}$$

式中: $\begin{bmatrix} A_R^{(r)} & A_R^{(b)} \\ A_B^{(r)} & A_B^{(b)} \end{bmatrix}$  为云相机的绝对辐射响应系数矩阵。通过确定绝对辐射响应系数矩阵,即确定绝对辐射响应系数  $A_R^{(r)}$ 、 $A_R^{(b)}$ 、 $A_B^{(r)}$ 、 $A_B^{(b)}$ ,可建立云相机 CCD 探测器的响应值与观测目标光谱辐亮度值之间的关系。

### 3 绝对辐射定标实验与结果

#### 3.1 绝对辐射定标方法

绝对辐射响应系数<sup>[14-15]</sup>是在确定的辐射亮度输入时云相机 CCD 探测器像元的响应值与辐亮度的比值。绝对辐射定标在实验室内采用积分球辐射源、ASD、地检计算机等实现,示意图和现场图如图 6 所示。积分球辐射源为云相机提供稳定、能量可调的均匀面光源,通过 ASD 将积分球出口光谱辐亮度传递至云相机 CCD 探测器中心像元,实现绝对辐射响应系数定标。

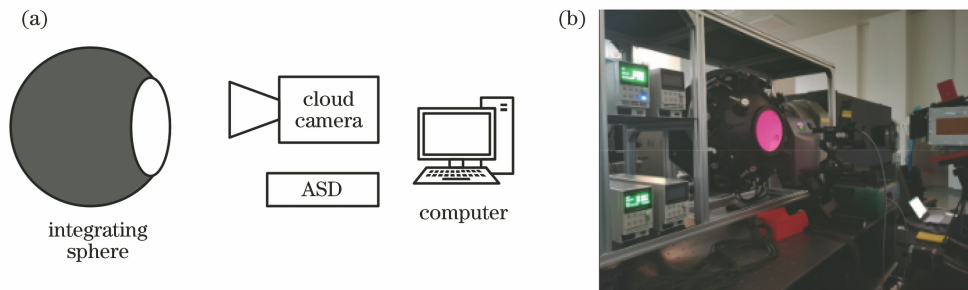


图 6 绝对辐射响应系数定标。(a)示意图;(b)现场图

Fig. 6 Calibration of absolute radiance responsivity coefficient. (a) Diagram; (b) scene picture

将云相机、ASD 安装在平台上,调整云相机与 ASD 分别对准积分球出光口中心,积分球辐射源射出面充满云相机整个视场,打开云相机、积分球辐射源预热至稳定工作状态。云相机、ASD 同步进行多

次测量,测量次数为  $N(N \geq 10)$ 。

通过计算云相机中心像元响应均值与云相机带内平均辐亮度的比值得到云相机在积分时间  $T$  下的绝对辐射响应系数  $A_T^{(k)}$ :



$$A_T^{(k)} = \frac{\frac{1}{n} \left( \sum_{m=1}^n D_{T,i,j,m}^{(k)} - \sum_{m=1}^n D_{\text{dark},T,i,j,m}^{(k)} \right)}{L^{(k)}}, \quad (6)$$

式中:  $n$  为总采集次数;  $m$  为当前采集次序;  $D_{T,i,j,m}^{(k)}$ 、 $D_{\text{dark},T,i,j,m}^{(k)}$  分别表示云相机在  $k$  光谱波段、积分时间  $T$  下, 第  $i$  行、第  $j$  列像元(中心像元)第  $m$  次的测量值和本底;  $L^{(k)}$  为积分球对应被测波段的带内平均辐亮度值:

$$L^{(k)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) r(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

式中:  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别表示被测波段的下限波长和上限波长;  $L(\lambda)$  表示积分球辐射源的光谱辐亮度, 是关于波长  $\lambda$  的函数, 由 ASD 测得;  $r(\lambda)$  表示云相机的相对光谱响应率, 也与波长  $\lambda$  有关, 其归一化结果为

$$\begin{cases} R(\lambda) = \lambda \eta_{\text{CCD}}(\lambda) \tau(\lambda) \\ r(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{R_{\max}(\lambda)} \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $R(\lambda)$  为未归一化之前的光谱响应率,  $R_{\max}(\lambda)$  表示未归一化之前光谱响应率的最大值;  $\eta_{\text{CCD}}(\lambda)$  表示云相机 CCD 探测器的量子效率曲线;  $\tau(\lambda)$  表示云

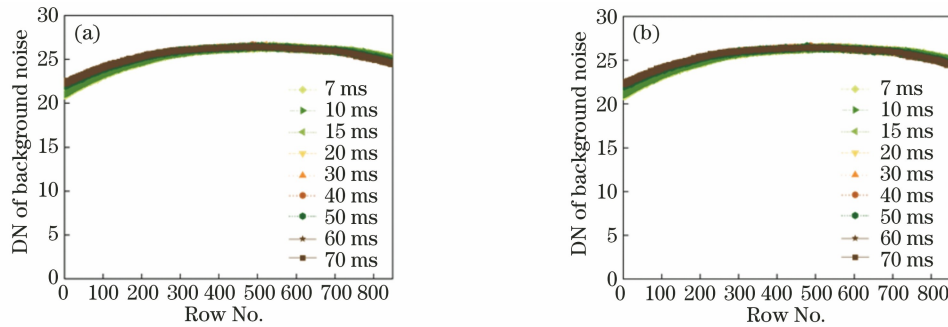


图 7 云相机本底定标结果。(a) R 通道; (b) B 通道

Fig. 7 Background noise calibration results of cloud camera. (a) R channel; (b) B channel

获取云相机本底后, 接下来进行绝对辐射响应系数测试。根据(5)式和(6)式, 要精确获得 CCD 探测器表面拜耳阵列 R 通道和 B 通道的绝对辐射响应系数, 需要精确获取云相机探测器的响应值与辐亮度值。根据实验室条件, 本文采用 747 nm LED (LED1) 和 443 nm LED (LED2) 光源提供积分球的入射光, 其光谱范围涵盖了 460~470 nm 波段和 745~755 nm 波段, 辐亮度能覆盖相机动态范围。通过调节 LED 的电流值调节光谱辐亮度, 使其覆盖 CCD 探测器的光谱辐亮度动态范围, 分别设置光谱辐亮度最小值、典型值、最大值进行测试, 设置 CCD 探测器的积分时间为 10 ms, 在单光源条件下测量

相机的预滤光片及其他光学镜片的组合透过率。

### 3.2 绝对辐射定标实验结果

云相机本底为无入射辐亮度条件下, 云相机在不同积分时间下的响应信号大小, 根据热控分析提供的在轨 CCD 温度范围, 设置若干温度点, 在指定温度点下进行不同积分时间的本底定标。

将云相机放置在真空罐内, 在云相机在轨温度范围内选取若干温度点进行本底定标, 分别控制真空罐温度, 令云相机模块稳定在指定温度点, 打开云相机, 将其预热至稳定状态后, 设置云相机 CCD 探测器的积分时间, 连续采集云相机本底图像  $n$  幅, 设置不同的温度和积分时间, 获取各积分时间下的本底图像。对云相机 CCD 探测器的本底数据求均值:

$$D_{\text{dark},T,t,i,j}^{(k)} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n D_{\text{dark},T,t,i,j,m}^{(k)}, \quad (9)$$

式中:  $D_{\text{dark},T,t,i,j}^{(k)}$  表示光谱波段  $k$  下第  $i$  行、第  $j$  列的像元在温度  $t$ 、CCD 探测器积分时间  $T$  条件下获取的本底。

经测试, 云相机本底与积分时间的关联性较小, 7~70 ms 范围内的本底基本一致, 按行取均值结果如图 7 所示。

CCD 探测器 R 通道和 B 通道的中心像元响应值和等效光谱辐亮度, 结果如表 1 所示, 表中 off 表示 LED 关闭, min、typ、max 分别表示 LED 辐亮度位于最小值、典型值、最大值。

在 LED1 与 LED2 光源都打开的条件下, 分别在两灯光谱辐亮度最小值、典型值、最大值条件下测量 CCD 探测器 R 通道和 B 通道的中心像元响应值, 如表 2 所示。通过比较实际测量值与理论值, 可以看出在单光源条件下 CCD 探测器的通道响应值之和(理论值)与 LED1 和 LED2 光源都打开条件下测得的数据(实际测量值)基本一致, 这证明了本文定标模型构建的正确性。

表 1 单光源不同亮度条件下的 CCD 探测器通道响应值和等效光谱辐亮度

Table 1 CCD detector channel response value and equivalent spectral radiance under different brightness of single light source conditions of single light source

Test condition	DN of R channel	DN of B channel	Radiance / ( $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ )
LED1 off, LED2 max	4.846	197.950	59.146
LED1 off, LED2 typ	2.957	117.248	35.412
LED1 off, LED2 min	1.438	51.061	15.955
LED1 max, LED2 off	108.327	8.912	30.011
LED1 typ, LED2 off	64.917	5.461	17.765
LED1 min, LED2 off	29.969	2.531	8.205

表 2 LED1 与 LED2 都打开的条件下 CCD 探测器通道实测值与理论值

Table 2 Measured and theoretical values of CCD detector channel when LED1 and LED2 are turned on

Test condition	DN of measured value		DN of theoretical value		Bias / %	
	R channel	B channel	R channel	B channel	R channel	B channel
LED1 max, LED2 max	112.926	206.699	113.173	206.862	-0.218	-0.079
LED1 typ, LED2 typ	67.726	122.177	67.874	122.709	-0.218	-0.434
LED1 min, LED2 min	31.473	55.521	31.407	53.592	0.209	3.474

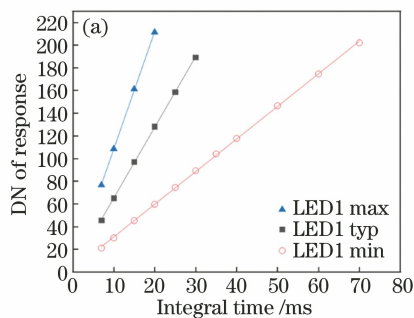
通过计算中心像元响应均值与 ASD 测量的辐亮度值的比值得到云相机在指定积分时间下的绝对辐射响应系数。根据表 1 中测试数据和(5)式,可以得出积分时间为 10 ms 时 R 通道与 B 通道的中心像元对 460~470 nm 波段和 745~755 nm 波段的绝对辐射响应系数。绝对辐射响应系数通过对光谱辐亮度最小值、典型值、最大值时的数据进行线性拟合得出,拟合结果为

$$\begin{cases} D_R = 3.59117\bar{L}^{(r)} + 0.07894\bar{L}^{(b)} \\ D_B = 0.29214\bar{L}^{(r)} + 3.40091\bar{L}^{(b)} \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} D_R \\ D_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.59117 & 0.07894 \\ 0.29214 & 3.40091 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{L}^{(r)} \\ \bar{L}^{(b)} \end{bmatrix}$$

式中:  $\begin{bmatrix} 3.59117 & 0.07894 \\ 0.29214 & 3.40091 \end{bmatrix}$  即为云相机在 10 ms 积分时间下的绝对辐射响应系数矩阵。

在增益相同且响应未达到饱和的条件下,CCD



探测器 R、G、B 通道的输出响应值随积分时间呈线性变化<sup>[13]</sup>,R 通道和 B 通道在单光源光谱辐亮度最小值、典型值、最大值下的积分时间与响应值的关系分别如图 8 和图 9 所示,图中曲线为线性拟合结果。

因此在积分时间  $T$  下 CCD 探测器 R 通道或 B 通道的绝对辐射响应系数可以基于上述线性关系计算得出。相应地,云相机响应与辐亮度之间的关系可以表示为

$$\begin{cases} D_{R,T} = (3.59117\bar{L}^{(r)} + 0.07894\bar{L}^{(b)}) \frac{T}{10} \\ D_{B,T} = (0.29214\bar{L}^{(r)} + 3.40091\bar{L}^{(b)}) \frac{T}{10} \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} D_{R,T} \\ D_{B,T} \end{bmatrix} = \frac{T}{10} \begin{bmatrix} 3.59117 & 0.07894 \\ 0.29214 & 3.40091 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{L}^{(r)} \\ \bar{L}^{(b)} \end{bmatrix}$$

式中: $D_{R,T}$  和  $D_{B,T}$  分别表示在积分时间  $T$  下 CCD 探测器 R 通道和 B 通道的响应值。

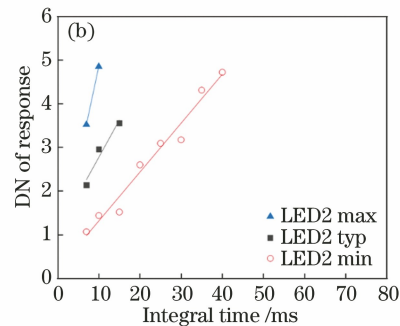


图 8 不同积分时间下 CCD 探测器 R 通道的响应值。(a)仅 LED1 光源打开;(b)仅 LED2 光源打开

Fig. 8 Response values of CCD detector R channel under different integral time. (a) LED1 is turned on only; (b) LED2 is turned on only

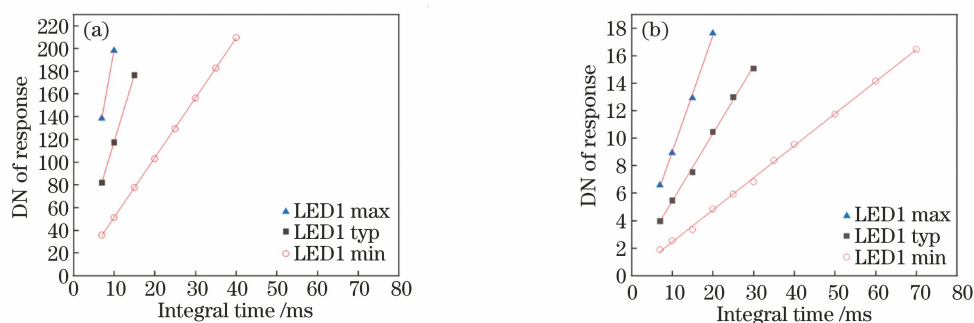


图 9 不同积分时间下 CCD 探测器 B 通道的响应值。(a)仅 LED2 光源打开;(b)仅 LED1 光源打开

Fig. 9 Response values of CCD detector B channel under different integral time. (a) LED2 is turned on only; (b) LED1 is turned on only

### 3.3 定标不确定度分析

实验室定标的目的在于确定云相机的响应并评估其不确定度。云相机基于 ASD 辐亮度定标系统实现绝对辐射定标,其传递链路为:通过已经定标过的 ASD 对积分球辐射源系统进行辐亮度标准传递,将积分球辐射源作为工作标准对云相机进行辐亮度响应定标。

云相机绝对辐射定标的不确定度主要来源于两个方面:1)辐亮度定标系统引入的不确定度;2)云相机探测器自身的响应误差。其中,前者又来源于 ASD 示值不确定度及辐射定标用积分球的均匀性、稳定性误差,后者来源于探测器线性、稳定性误差等。最终云相机绝对辐射定标的不确定度  $u$  满足

$$u^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2, \quad (12)$$

式中: $u_1$  为积分球输出亮度的不确定度,通过评估积分球出射光源的均匀性与稳定性得到; $u_2$  为 ASD 示值的不确定度,通过 ASD 的辐亮度标准溯源 ASD 响应非线性、非稳定性、非重复性等得到; $u_3$  为云相机 CCD 探测器响应的不确定度,包括非线性和非稳定性,可以通过测试得出,详见文献[2],限于篇幅不再赘述。云相机辐射定标不确定度在各个波段均不同,以 465 nm 和 747 nm 为例,其不确定度分析详见表 3。根据表 3 及(11)式,云相机绝对辐射定标在 465 nm 波段的不确定度为 2.99%,在 747 nm 波段的不确定度为 2.34%,均在 3% 以内,满足 5% 的任务指标。

表 3 辐射定标测量不确定度分析

Table 3 Measurement uncertainty analysis of radiometric calibration

Spectral band /nm	Uncertainty factor			Combined uncertainty /%
	Integral sphere	ASD measurement	Cloud camera	
465	2.22	0.63	1.90	2.99
747	1.85	0.62	1.29	2.34

## 4 结 论

以云相机采用的基于拜耳阵列的面阵彩色 CCD 相机为研究对象,建立了多通道 CCD 探测器辐射响应定标模型,系统介绍了基于 ASD 辐亮度定标系统实现云相机绝对辐射定标的辐射标准传递方法,并给出该方法在彩色 CCD 相机实验室定标中的具体实施方案。与传统方法相比,本文方法消除了彩色 CCD 探测器不同颜色通道的辐射响应光谱存在重叠带来的影响,因而提高了绝对辐射定标准确度。该方法被成功应用于中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的有效载荷云相机上,有效提高了其实验室绝对辐射定标精度,可为类似的多通道光

学载荷的研制和定量化应用提供定标技术参考。

### 参 考 文 献

- [1] Kang Y F, Pan L, Sun M W, et al. Destriping high-resolution satellite imagery by improved moment matching [J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(22): 6346-6365.
- [2] Shi J J, Hu Y D, Li M F, et al. Design and implementation of cloud camera control system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2001001. 石晶晶, 胡亚东, 李孟凡, 等. 云相机控制系统的设计及实现 [J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2001001.
- [3] Qiao Y L, Zheng X B, Wang X H, et al. Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10

- (5): 616-623.  
乔延利, 郑小兵, 王先华, 等. 卫星光学传感器全过程辐射定标[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 616-623.
- [4] Zheng X B. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 36-43.  
郑小兵. 高精度卫星光学传感器辐射定标技术[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5): 36-43.
- [5] Zhao X Y, Zhang W, Xie X F. Study of relationship between absolute calibration and relative calibration [J]. *Infrared*, 2010, 31(9): 23-29.  
赵晓熠, 张伟, 谢蓄芬. 绝对辐射定标与相对辐射定标的关系研究[J]. 红外, 2010, 31(9): 23-29.
- [6] Ornstein L S, Vermeulen D, van der Held E F M. Calibration of standard lamps for relative and absolute measurements[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1930, 20(10): 573-584.
- [7] Brown S W, Johnson B C. Development of a portable integrating sphere source for the Earth Observing System's calibration validation programme [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(2): 215-224.
- [8] Zhao X Y, Xie X F, Zhang W. Radiometric calibration of large entrance pupil space telescope[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(5): 762-767.  
赵晓熠, 谢蓄芬, 张伟. 基于 FY-2C 的大口径空间相机辐射定标研究[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 762-767.
- [9] Li Z Z, Zheng X B, Tang L L, et al. An advanced technology of absolute radiometric calibration for optical remote sensors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(4): 581-588.  
李照洲, 郑小兵, 唐伶俐, 等. 光学有效载荷高精度绝对辐射定标技术研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 581-588.
- [10] Chang Y Y, Sun B, Huang C, et al. Cloud detection and parameter inversion using multi-directional polarimetric observations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1101002.  
常钰阳, 孙斌, 黄禅, 等. 多角度偏振云检测及云参数反演[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1101002.
- [11] Yang Y M, Li Q J, Li W M, et al. Modulation transfer function for color area CCD based on Bayer filtering[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1611-1618.  
杨永明, 李清军, 李文明, 等. 基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 调制传递函数[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1611-1618.
- [12] He C L, Yi W N, Luo J, et al. Validation and assessment of CBERS-2 CCD camera's absolute radiometric calibration coefficients [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(2): 150-155.  
何超兰, 易维宁, 罗军, 等. CBERS-2 CCD 相机绝对辐射定标系数验证与评价[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(2): 150-155.
- [13] Xiu J H, Huang P, Li J, et al. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1365-1373.  
修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1365-1373.
- [14] Xie C Y, Zhai W C, Li J J, et al. Absolute radiance responsivity calibration based on supercontinuum laser and monochromator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0714002.  
谢臣瑜, 翟文超, 李健军, 等. 基于超连续激光-单色仪的绝对辐亮度响应度定标[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0714002.
- [15] Xu H Y, Zhang L M, Huang W X, et al. On-board absolute radiometric calibration and validation based on solar diffuser of HY-1C SCS [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0928002.  
许和鱼, 张黎明, 黄文薪, 等. 基于 HY-1C SCS 太阳漫反射板的星上绝对辐射定标与验证[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0928002.