

激光与光电子学进展

云相机相对辐射定标技术研究

汪杰君¹, 池杲璠^{1,2,3}, 李孟凡^{2,3*}, 王相京^{2,3}, 胡亚东^{2,3}, 厉卓然^{2,3}, 洪津^{2,3}¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;²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;³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 云相机采用阈值法对观测目标区域进行在轨实时云识别。在云判算法中, 辐射度量的准确性将会影响最终的反演结果。本文建立了云相机像元响应值与辐亮度之间的信息模型, 针对云相机探测器各像元在入射光均匀一致时, 输出响应值出现不相等的情况提出了改进措施。首先, 根据云相机的信息模型分析了探测器像元响应值不同的原因, 建立了云相机的相对辐射定标模型。然后, 由于云相机视场角较大, 大口径积分球辐射源出射光也难以一次性覆盖所有视场, 在实验中设计了分视场测试的方式。最后, 根据相对辐射定标模型和分视场测量方式, 进行了云相机的相对辐射定标。实验结果表明: 云相机对积分球成像结果校正前非均匀性为 6% 左右, 经相对辐射定标校正后, 在轨典型信噪比条件下非均匀性达到 1.5% 以内, 低信噪比条件下达到 3.25%。定标测试结果满足云相机设计的指标要求。

关键词 测量; 云相机; 信息模型; 辐射定标; 相对定标; 分视场测试

中图分类号 TH74

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221395

Relative Radiometric Calibration Technique of Cloud Camera

Wang Jiejun¹, Chi Gaojun^{1,2,3}, Li Mengfan^{2,3*}, Wang Xiangjing^{2,3}, Hu Yadong^{2,3},
Li Zhuoran^{2,3}, Hong Jin^{2,3}¹School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin 541004, Guangxi, China;²Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Sciences, Chinese Academy of
Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;³Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract The cloud camera adopts the threshold method to detect cloud distribution information in the observation target area. In the cloud judgment algorithm, the accuracy of the radiance will affect the final inversion result. An information model between the response value of the pixel and the radiance was established. Improvement measures are proposed for the situation where the output response values of each pixel of the cloud camera are unequal when the incident light is uniform. First, according to the information model, the reasons for the different response values of the detector were analyzed, and the relative radiometric calibration model was established. It is difficult for the light emitted by the large-diameter integrating sphere radiation source to cover all the fields of view simultaneously due to the large field of the cloud detection camera. Therefore, a subfield of view measurement method was designed. The relative radiometric calibration of the cloud camera was performed using the calibration model and the subfield of view measurement method. The experimental results indicate that the nonuniformity of the imaging results of the integrating sphere is approximately 6% before correction. After the relative radiometric calibration correction, the nonuniformity is less than 1.5% under a typical signal-noise-ratio (SNR) and approximately 3.25% under a low SNR. The results of the calibration meet the requirements of the design of the cloud camera.

Key words measurement; cloud camera; information model; radiometric calibration; relative calibration; sub-field of view measurement

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-05-07; 录用日期: 2022-05-12; 网络首发日期: 2022-05-22

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

通信作者: *mfli@aiofm.ac.cn

1 引言

随着遥感技术的发展,光学遥感器性能不断提升,如空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率等,并对数据质量和利用率提出了更高要求。然而根据国际卫星云气候项目的数据,全球年均云量达到 60% 以上^[1]。为降低云对遥感数据的影响,可以使用在轨实时云判技术,提前探测云分布信息,为遥感器提供指向信息,有效提高遥感器使用率。云相机^[2-3]是中国科学院安徽光学精密机械研究所针对小卫星平台设计的云分布信息实时获取载荷,搭载卫星进行对地云分布状况识别。在轨云判算法根据采集图像的空间位置信息和光谱信息,基于先验地表反射率数据通过合理设置阈值完成观测目标区域的实时云反演。其中,辐射度量的准确性将会影响最终的反演结果。

高质量的云分布信息反演归根于高质量的定标。云相机辐射定标的意义在于将载荷接收记录的电压信号或数字值(DN)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。对于云识别和云覆盖率判别的实现,不仅取决于载荷本身的性能,也取决于其探测数据的定量化反演的水平,而定标系数是数据定量化反演中必要的参量。云相机通过大视场获取数据,采用可见光彩色面阵 CCD 的探测形式,通过预滤光片及 CCD 表面的 Bayer 阵列实现探测波段的选择。由于成像光学系统和 CCD 探测器加工制造过程不可避免存在的不均匀性和不一致性,载荷发射之前需要进行实验室相对辐射定标,为在轨实时云检测过程提供参考校正系数,消除或者减小这种偏差^[4-5]。

目前关于 CCD 探测器的非均匀性校正,基于参考源的常用方法有单点法、两点法、多点法和最小二乘法^[6-13]。单点法适用于探测器输出数据偏移量近似为零的情况;两点法适用于探测器输出数据偏移量未完全消除的情况;多点法和最小二乘法适用于非线性的探测器响应情况,多点法通过多段线性关系逼近非线性响应曲线,最小二乘法按照残差平方和最小原则确定拟合系数。

姜平等^[14]基于多尺度分析和加权最小二乘法对探测器的条纹噪声进行去除;白乐等^[15]提出了基于黑体定标数据,采用神经网络对不同积分时间下的红外图像数据进行非均匀性校正的方法;Yao 等^[16]分析了多角度偏振成像仪的非均匀性来源,对探测器非均匀性进行多点法校正。在对面阵 CCD 探测器进行非均匀性校正的过程中,大部分基于红外波段进行校正,CCD 探测器像元较少,即使采用复杂的均匀性校正方式也能较快处理。修吉宏等^[9,17]对大面阵可见光 CCD 相机通过最小二乘法进行了非均匀性校正,但是未考虑探测器不同通道间工作谱段的串扰问题且定标方法计算量过大。

由于云相机的视场较大、透镜的镀膜厚度不同,以

及面阵 CCD 探测器制造过程的工艺波动造成响应的不一致性等因素,云相机面阵 CCD 探测器响应往往夹杂着各类噪声,响应不仅与观测目标的辐射有关,还与温度、所在探测器像素位置、暗电流等相关。因此需要建立信息模型,从云相机原始数据中除去系统误差。

传统的定标方法侧重通过分别确定不同影响因素对探测器的响应特性影响进行校正,而云相机有效像元数较多,数据量较大。通过这种方式在轨进行预处理耗时较长,影响云判结果响应时间。

本文以云相机采用的 Bayer 阵列的彩色面阵 CCD 为研究对象,分析其成像过程,建立了云相机的信息模型,根据信息模型制定了云相机的定标模型,以云相机自身中间像元为基准,将所有非均匀影响因素统一为一个非一致性因子,减少了处理步骤和校正数据存储空间,适合在轨进行实时处理。根据定标模型,搭建了相应的测试环境进行相对辐射定标实验,并比较通过这种方法进行相对辐射定标校正前后的非均匀性。

2 云相机系统信息模型和定标模型

2.1 云相机系统与信息模型

云相机广角成像光学系统示意图如图 1 所示,与 POLDER 的光学系统^[18]相似,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,可实现目标区域云判功能。第一透镜材料采用石英玻璃构成,具有良好的抗辐照能力,保护整个物镜。前组的主要功能是扩大光束和减小入射光与光轴之间的角度,从而控制系统的畸变和球差,后组实现将图像聚焦在面阵 CCD 探测器上的功能,并校正物镜的像差和色差。其中广角成像光学系统通过在探测器前设置预滤光片配合 Bayer 滤光片实现光谱选择,使得相机能够接收 460~470 nm 波段和 740~755 nm 波段的光,双波段辐射度量配合预先计算的反射率数据,进行云的阈值判断。

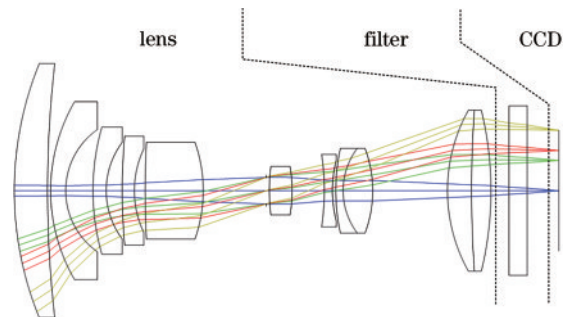


图 1 广角成像光学系统图

Fig. 1 Schematic diagram of the wide-angle imaging optical system

从图 1 可以看出,在系统的前组中不同视场的光束孔径的大小随着视场增大而增大,并且分布在透镜的不同位置。透镜的曲率半径和减反射膜性能对光学

系统有很大影响。为了减少反射效应、光干扰和物镜的偏振率,透镜都采用了减反射涂层。

云相机成像过程如图 2 所示,观测目标发出的光

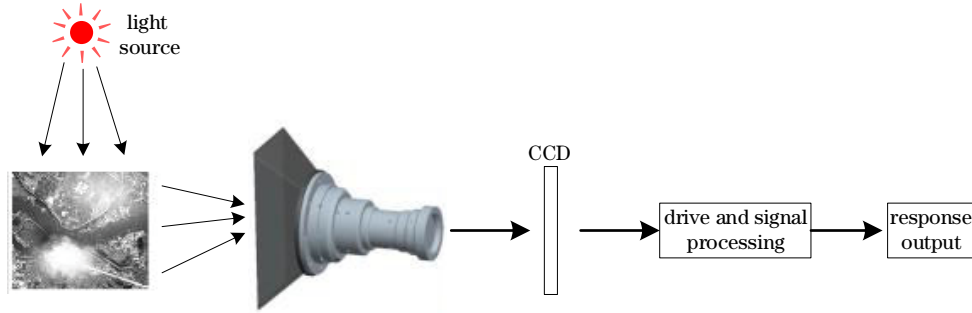


图 2 云相机成像过程

Fig. 2 Imaging process of the cloud camera

忽略大气等环境因素的影响,经分析可知,云相机输出首先受光学系统的影响,根据 \cos^4 定律^[19], CCD 探测器像面照度关系如下式所示, CCD 探测器像面照度与视场角成反比。因此与成像画面中心部分相比,越向边缘,画面越暗。

$$E'_M = E'_0 \cos^4 \omega', \quad (1)$$

式中: E'_M 为轴外像点 M' 的照度; E'_0 为像面轴上点的照度; ω' 为轴外像点的主光线和光轴间的夹角,即视场角。

此外,透镜所镀膜层厚度在中心视场与边缘视场存在差异造成透过率的不同,这些因素都影响了探测器的响应输出。根据彩色 CCD 探测器自身特性,面阵 CCD 探测器像元响应 DN 值可以表示为

$$D_{a,u,v,T} = GT \frac{\pi S_d}{4F^2} \int_0^\infty L_{\text{object}}(X, Y, Z, \lambda) \rho(X, Y, Z, \lambda) f[(X, Y, Z) \rightarrow (u, v)] \cos^4 \omega_{u,v} \cdot \tau_{a,u,v}(\lambda) \cdot R_{a,u,v}^{\text{CCD}}(\lambda) d\lambda + N_{u,v,T}, \quad (2)$$

式中: a 表示 Bayer 阵列的通道号; u 和 v 表示观测目标在 CCD 探测器输出图像上的像素坐标; T 表示积分时间,即 CCD 探测器曝光时间; $D_{a,u,v,T}$ 表示 a 通道在积分时间 T 下像素坐标 (u, v) 处的探测器响应值; X, Y, Z 表示观测目标在物方空间中的空间坐标; G 表示 CCD 探测器增益; S_d 表示像元有效面积; F 表示光圈数; $L_{\text{object}}(X, Y, Z, \lambda)$ 表示观测目标在物方空间坐标 (X, Y, Z) 处接收的光谱辐亮度; $\rho(X, Y, Z, \lambda)$ 表示观测目标在物方空间坐标 (X, Y, Z) 处的反射特性函数; $f[(X, Y, Z) \rightarrow (u, v)]$ 表示目标在物方空间 (X, Y, Z) 与像素坐标 (u, v) 之间的映射函数; $\omega_{u,v}$ 表示像素坐标 (u, v) 处像元主光线与光轴间的夹角; $\tau_{a,u,v}(\lambda)$ 表示入射光到像素坐标 (u, v) 处像元的光学系统透过率; $R_{a,u,v}^{\text{CCD}}(\lambda)$ 表示云相机 CCD 探测器像素坐标 (u, v) 处像元的光谱响应; λ 表示光谱波长范围; $N_{u,v,T}$ 表示 CCD 探测器在积分时间 T 下像素坐标 (u, v) 处的本底噪声值,包含暗电流噪声、散粒噪声等。

能经大气、光学系统照射到面阵 CCD 探测器上,探测器接收光辐射后输出电信号,经过放大、变换等信号处理系统,记录成像结果。

将式(2)进行简化,表示为

$$L(X, Y, Z, \lambda) = L_{\text{object}}(X, Y, Z, \lambda) \cdot \rho(X, Y, Z, \lambda), \quad (3)$$

$$R_{a,u,v}(\lambda) = \cos^4 \omega_{u,v} \cdot \tau_{a,u,v}(\lambda) \cdot R_{a,u,v}^{\text{CCD}}(\lambda), \quad (4)$$

式中: $L(X, Y, Z, \lambda)$ 表示观测目标在 (X, Y, Z) 空间位置处的光谱辐亮度; $R_{a,u,v}(\lambda)$ 表示整个云相机系统的光谱响应。

由于所选用的面阵 CCD 探测器在加工制造过程不可避免地出现工艺波动,各个像元响应的一致性难以保证,选取云相机 a 通道中间像元的光谱响应作为参考值,则有

$$R_{a,u,v}(\lambda) = U_{a,u,v} R_a(\lambda), \quad (5)$$

式中:由于不同原因造成的非均匀性因子数据格式都为有效像元行数乘以有效像元列数的矩阵,最终可用 $U_{a,u,v}$ 表示不同像元光谱响应的非一致性因子; $R_a(\lambda)$ 表示云相机 a 通道中间像元的光谱响应。

定义 $RR_a(\lambda)$ 表示云相机 a 通道中间像元的相对光谱响应,定义系数 r_{ref} 表示计算相对光谱响应时的参考值,则 $R_a(\lambda)$ 可表示为

$$R_a(\lambda) = r_{\text{ref}} RR_a(\lambda). \quad (6)$$

根据式(3)~(6),式(2)可以化简为

$$D_{a,u,v,T} = GT \frac{\pi S_d}{4F^2} U_{a,u,v} \cdot r_{\text{ref}} \cdot \int_0^\infty L(X, Y, Z, \lambda) f[(X, Y, Z) \rightarrow (u, v)] \cdot RR_a(\lambda) d\lambda + N_{u,v,T}. \quad (7)$$

$f[(X, Y, Z) \rightarrow (u, v)]$ 即为云相机的几何定标过程,将目标所在的世界坐标系中的物方空间坐标转换为像素坐标。经过几何定标后,目标在空间坐标 (X, Y, Z) 处的光谱辐亮度可以变换成云相机在像素坐标 (u, v) 对应的入瞳处所接收到的光谱辐亮度,即:

$$L_{u,v}(\lambda) = L(X, Y, Z, \lambda) f[(X, Y, Z) \rightarrow (u, v)]. \quad (8)$$

根据式(8),式(7)进一步简化为

$$D_{a,u,v,T} = GT \frac{\pi S_d}{4F^2} U_{a,u,v} \cdot r_{\text{ref}} \cdot \int_0^{\infty} L_{u,v}(\lambda) \cdot RR_a(\lambda) d\lambda + N_{u,v,T} \quad (9)$$

将式(9)表示为

$$D_{a,u,v,T} = A_{a,u,v} \cdot L_{a,u,v} \cdot T + N_{u,v,T} \quad (10)$$

其中,

$$A_{a,u,v} = G \frac{\pi S_d}{4F^2} U_{a,u,v} \cdot r_{\text{ref}}, \quad (11)$$

$$L_{a,u,v} = \int_0^{\infty} L_{u,v}(\lambda) \cdot RR_a(\lambda) d\lambda, \quad (12)$$

式中: $A_{a,u,v}$ 表示线性变换的系数; $L_{a,u,v}$ 表示目标辐亮度对 a 通道的相对光谱响应的光谱采样值。

2.2 定标模型

由于云相机视场较大,超过 $\pm 40^\circ$,且有效像元较多,对全像元进行绝对辐射定标操作难度较大,故对中心视场像元进行绝对辐射定标,结合相对辐射定标的方式建立响应 DN 值与真实辐亮度的关系,即确定云相机辐射模型中的绝对辐射响应系数和全视场相对辐射响应系数。

经过本底噪声定标后,可以去掉式(10)中的常数项。在均匀光入射条件下,云相机在扣除本底噪声后响应 DN 值记为 $d_{a,u,v,T}$,此时各像元光谱辐亮度一致, $L_{a,u,v}$ 与像元坐标无关,式(10)可以化简为

$$d_{a,u,v,T} = A_{a,u,v} \cdot L_{a,u,v} \cdot T. \quad (13)$$

根据式(13)可以看出,即使在均匀光照射下,云相机每个像元的响应 DN 值还是不同的,为消除云相机由于自身缺陷造成的同通道下各像元的响应不一致性,避免各像元在入射光均匀一致时,响应 DN 值出现不相等的情况,因此需要进行相对辐射定标。

根据云相机的信息模型推导,该非均匀性由像元响应不一致性、光学系统能量差异的损失引起,对应于式(4)中的 $R_{a,u,v}^{\text{CCD}}(\lambda)$ 、 $\tau_{a,u,v}(\lambda)$ 、 $\cos^4 \omega_{u,v}$ 。其中, $\cos^4 \omega_{u,v}$ 即为像面的照度与视场的四次方关系引起的低频相对响应系数, $\tau_{a,u,v}(\lambda)$ 为透镜所镀膜层厚度在中心视场与边缘视场的差异引起的低频相对响应系数, $\cos^4 \omega_{u,v}$ 即为云相机所使用的 CCD 探测器像元响应非一致性引起的高频相对响应系数。对每个像元而言,全视场相对辐射定标响应系数均可由上述的三个因素引起,也即统一表现为式(5)中的 $U_{a,u,v}$ 。因此,将式(13)表示为

$$d_{a,u,v,T} = U_{a,u,v} \cdot P_a \cdot L_a \cdot T. \quad (14)$$

其中,

$$P_a = \frac{A_{a,u,v}}{U_{a,u,v}}. \quad (15)$$

因为相对辐射定标是对不同像元同一辐亮度下的不同响应值进行校正,且本文以云相机中间像元的响应 DN 值为参考,并在绝对辐射定标中对中间像元进行绝对辐射定标,以中间像元响应均值 $N_{a,T}^{\text{ref}}$ 作为参考,

可得到云相机全视场相对辐射定标响应系数:

$$U_{a,u,v} = \frac{d_{a,u,v,T}}{d_{a,T}^{\text{ref}}}. \quad (16)$$

全视场相对辐射定标响应系数表征了云相机全视场对于相同辐亮度的入射光的响应差异性。

经过本底噪声定标和相对辐射定标后,云相机中间像元单位时间的响应 DN 值可以表示为

$$d_a^{\text{unit}} = \frac{N_{a,T}^{\text{ref}}}{T} = P_a^{\text{ref}} \cdot L_a, \quad (17)$$

式中: P_a^{ref} 表示 a 通道中心像元在光谱波段下的绝对辐射定标响应系数。云相机绝对定标过程详见文献[20],在此不再赘述。

3 相对辐射定标实验与结果

3.1 相对辐射定标方法

云相机绝对辐射定标解决了中心视场测量的 DN 值与观测目标辐亮度之间的转换,而其余视场位置的 DN 值到辐亮度的转换关系需要通过云相机相对辐射定标来解决。云相机全视场相对辐射响应系数主要分为像面的照度随视场增大减小、透镜组中心视场与边缘视场的差异引起的低频相对响应系数和 CCD 探测器响应非一致性引起的高频相对响应系数。由于高、低频相对响应系数的数据格式都为有效像元行数乘以有效像元列数的矩阵,且云相机选用 CCD 探测器有效像元为中间轴对称的 1700 行、3296 列,令 (i,j) 代表第 i 行、第 j 列像元,根据几何定标确定有效像元所在位置为 $(2,21)$ 至 $(1701,3316)$ 。R 通道和 B 通道的全视场相对辐射响应系数矩阵为

$$\begin{cases} U_R = \begin{bmatrix} U_{R,2,22} & \cdots & U_{R,2,3316} \\ \vdots & & \vdots \\ U_{R,1700,1} & \cdots & U_{R,1700,3316} \end{bmatrix} \\ U_B = \begin{bmatrix} U_{B,3,21} & \cdots & U_{B,3,3315} \\ \vdots & & \vdots \\ U_{B,1701,1} & \cdots & U_{B,1701,1648} \end{bmatrix} \end{cases}. \quad (18)$$

通过分别对 R 通道和 B 通道进行相对辐射定标,确定 R 通道和 B 通道的全视场相对辐射响应系数矩阵,从而获得其余视场位置的 DN 值到辐亮度的转换关系。

然而云相机视场较大,即使采用大口径积分球也难以一次性覆盖所有视场。针对这一问题,设计了分视场测试的方式,将云相机的像元划分为 K 块区域,使用二维转台带动云相机转动,使积分球光源中心区域依次成像在云相机像面的各个区域,最后拼接所有区域的响应从而获得云相机全视场响应。对获得的全视场响应进行归一化处理,即获得云相机全视场相对辐射响应系数矩阵。云相机相对辐射定标系统由稳定且能量可调的卤灯积分球辐射源、二维转台以及地检计算机实现,示意图和现场图如图 3 所示。

实际操作中, K 块区域的划分需要考虑使用的光源口径大小及其均匀性, 根据实际情况选择将像面划分为 3×8 个区域, 如图 4 所示, 通过计算机控制转台俯

仰角和方位角, 依次使云相机每块区域中心对准积分球出光口中心, 使积分球辐射源出射面充满当前区域视场。

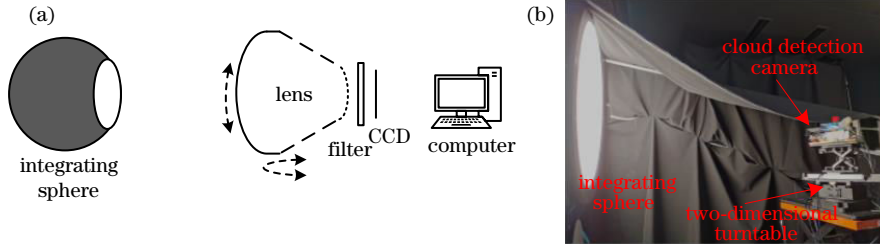


图 3 相对辐射定标。(a)示意图;(b)现场图

Fig. 3 Calibration of the relative radiance. (a) Diagram; (b) scene picture

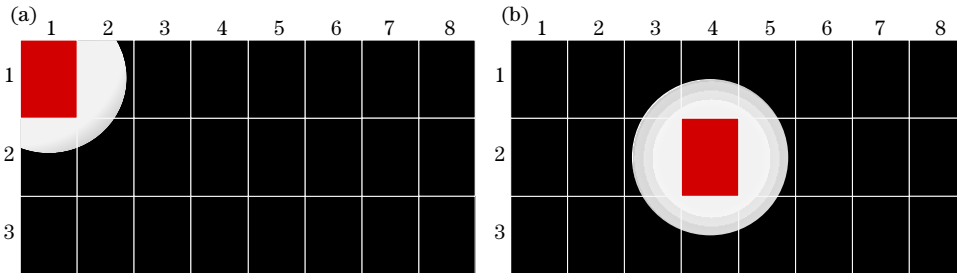


图 4 云相机全像面响应分视场测试示意图。(a)积分球辐射源中心成像于像面边缘视场区域;(b)积分球辐射源中心成像于像面中心视场区域

Fig. 4 Diagram of the sub-field of view of response test of cloud camera. (a) Center of the integrating sphere radiation source is imaged on the edge of the image; (b) center of the integrating sphere radiation source is imaged on the center of the image

计算机控制云相机依次对划分的 3×8 个区域视场进行 M 次采样, 根据式(10)计算云相机扣除本底噪声后的各像元响应均值, 表示为

$$\overline{d_{a,i,j,T}} = \frac{1}{M} \left(\sum_{m=1}^M D_{a,i,j,T,m} - \sum_{m=1}^M N_{a,i,j,T,m} \right), \quad (19)$$

式中: m 为云相机在当前区域采集次序; $\overline{d_{a,i,j,T}}$ 表示 a 通道在积分时间 T 下的第 i 行第 j 列像元扣除本底后的响应均值; $D_{a,i,j,T,m}$ 、 $N_{a,i,j,T,m}$ 分别表示 a 通道在积分时间 T 下的第 i 行第 j 列像元第 m 次测量时的响应值和本底值。

根据式(16), 云相机全视场相对辐射响应系数可以表示为

$$U_{a,i,j} = \frac{\overline{d_{a,i,j,T}}}{d_{a,T}^{\text{ref}}}. \quad (11)$$

将云相机固定在二维转台后, 调整积分球辐射源辐亮度和云相机积分时间, 使云相机所有像元输出信号 DN 值处于饱和值的 80% 左右, 目的是在合适信噪比下进行测试, 获得最优全视场相对辐射响应系数。地检计算机控制二维转台带动云相机转动, 对图 5 所示的各个区域多次成像取均值后将分视场观测有效数据汇总为一幅完整图像, 并准备归一化参考值, 便于最后一步的归一化处理。图像拼接有以下几种方法, 包括最大值法、分区组合法和均值拼接法。

1) 最大值法。选中正对积分球的中心视场区域提取其观测信号数据并计算出 R、B 通道各自像元响应均值, 作为归一化参考值; 再将其他区域有效图像数据提取出各像元数据最大值作为像元最终值, 拼接为一幅完整的图像。

2) 分区组合法。归一化参考值的处理与最大值法相同, 再将其他区域有效图像数据划分为完全相等的 4 块如“田”字, 四个子视场分别对应着 1/4 有效区域, 区域划分如图 5 所示, 分别含“视场 A”、“视场 B”、“视场 C”、“视场 D”。提取观测时各自有效的 1/4 区域数据拼接为一幅完整的图像。

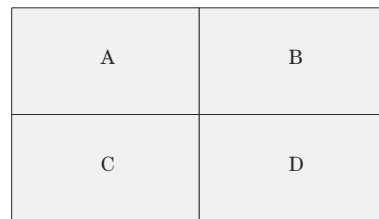


图 5 分区组合法子视场划分示意图

Fig. 5 Schematic of sub-field of view division of partition combination method

3) 均值拼接法。归一化参考值的处理与最大值法相同, 再将其他区域有效图像数据均值作为像元最终值, 拼接为一幅完整的图像。

3.2 相对辐射定标实验结果

将云相机固定在二维转台后,调整积分球辐射源亮度和云相机积分时间,使云相机所有像元输出信号DN值处于饱和值的80%左右,目的是在合适信噪比下进行测试,获得最优全视场相对辐射响应系数。对图4所示的各个区域多次成像取均值后将分视场观

测有效数据选用最大值法进行图像拼接,如图6所示。其中:R通道在积分球辐射源开启卤灯24灯、电流8.5 A,云相机积分时间15 ms情况下测得;B通道在积分球辐射源开启卤灯63灯、电流8.5 A,云相机积分时间25 ms情况下测得。

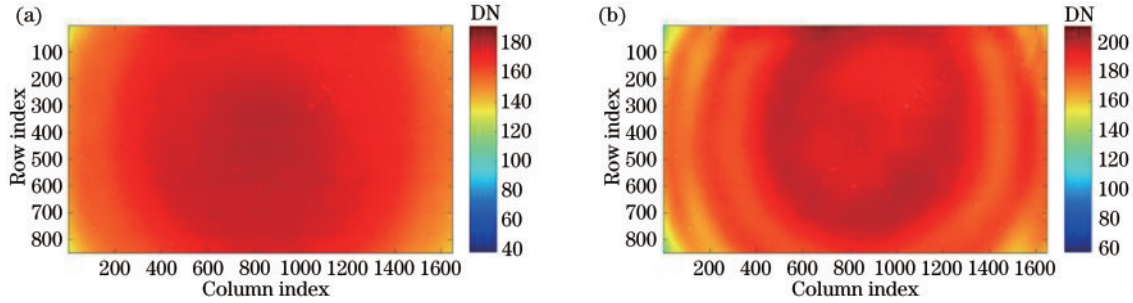


图6 云相机分视场拼接后全像面响应结果。(a)R通道;(b)B通道

Fig. 6 Response results of the cloud camera after sub-field splicing. (a) R channel; (b) B channel

计算机计算归一化参考值,进行云相机全视场相对辐射响应系数计算,各通道全视场相对辐射响应系数如图7所示。

由于云相机在对B通道进行相对辐射定标时R通道像元处于饱和值,且目视观察B通道非均匀性情况比R通道更显著,故选取以下三种情况进行校正前后效果对比,分别是:1)情况1。取云相机R通道像元输出信号扣除本底后响应DN值均值为169.55的某次成

像结果。2)情况2。取云相机B通道对积分球某次成像像元输出信号扣除本底后响应DN值均值为187.57的某次成像结果。3)情况3。取云相机B通道对积分球某次成像像元输出信号扣除本底后响应DN值均值为43.3的某次成像结果;情况1和情况2下响应均值为在轨观测时典型值区间内情况,信噪比大于100,情况3为在轨观测时非典型情况,信噪比仅为30左右。校正前后结果如图8所示。

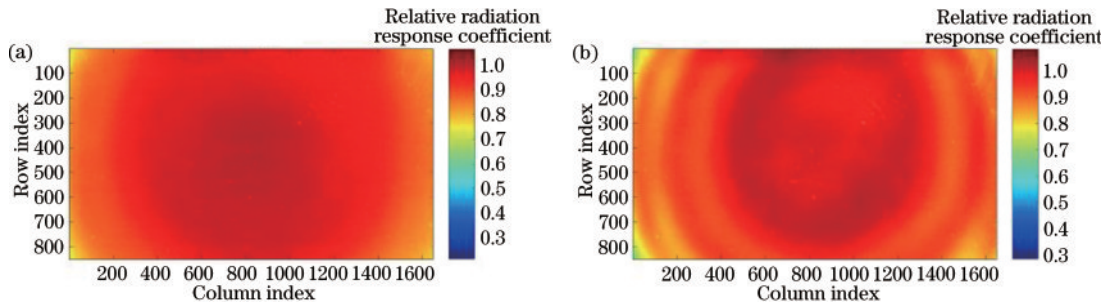


图7 云相机全视场相对辐射响应系数。(a)R通道;(b)B通道

Fig. 7 Relative radiation response coefficient of the cloud camera in a full field of view. (a) R channel; (b) B channel

根据图像传感器与相机性能测试标准^[15],本文采用在均匀入射辐射下,探测器响应标准差与均值的比值来对空间非均匀性进行描述,

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_{y, \text{dark}} &= \frac{1}{P \times Q} \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q N_{p,q} \\ \mu_y &= \frac{1}{P \times Q} \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q D_{p,q} \\ s_{y, \text{dark}}^2 &= \frac{1}{P \times Q - 1} \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q (N_{p,q} - \mu_{y, \text{dark}})^2, \quad (12) \\ s_y^2 &= \frac{1}{P \times Q - 1} \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q (D_{p,q} - \mu_y)^2 \\ U &= \frac{\sqrt{s_y^2 - s_{y, \text{dark}}^2}}{\mu_y - \mu_{y, \text{dark}}} \times 100\% \end{aligned} \right.$$

式中:下标 y 表示 L 幅分辨率为 $P \times Q$ 的图像各像元平均后的图像; P 、 Q 是图像的行程数和列数; p 、 q 是图像阵列中行和列的具体位置; $\mu_{y, \text{dark}}$ 表示 L 幅分辨率为 $P \times Q$ 的系列暗场图像各像元平均得到的本底均值; μ_y 表示 L 幅分辨率为 $P \times Q$ 的系列图像各像元平均得到的响应均值; $s_{y, \text{dark}}^2$ 、 s_y^2 分别表示本底和图像响应的方差; U 表示相对于平均值的标准差。

三种情况下云相机图像校正前后非均匀性如表1所示,R通道和B通道的非均匀性均显著减小。

3.3 场景校正前后对比

在实验室进行相对校正后,对室外场景进行了成像,如图9(a)和(c)所示,分别为云相机R通道和B通道对同一场景的成像结果。在对成像结果进行相对校

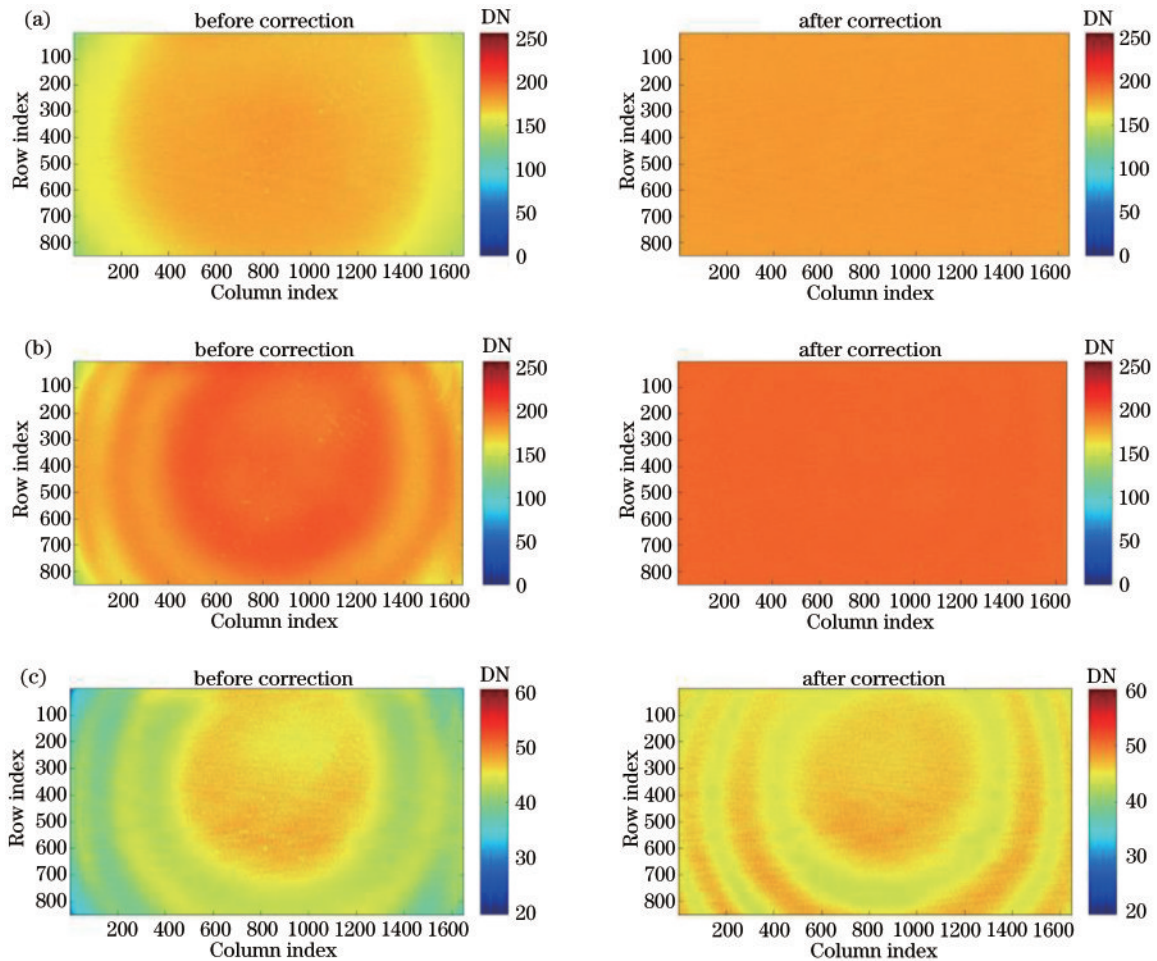


图 8 云相机图像校正前后对比。(a)情况 1;(b)情况 2;(c)情况 3;

Fig. 8 Comparison of the cloud camera image before and after correction. (a) Case 1; (b) case 2; (3) case 3

表 1 不同情况下积分球图像校正前后的非均匀性

Table 1 Nonuniformity of the integrating sphere image before and after correction under different conditions

Test condition	Image nonuniformity /%	
	Before correction	After correction
Case 1	5.63	1.34
Case 2	5.64	1.24
Case 3	6.29	3.25

正后,如图 9(b)和(d)所示,由于成像目标包含地物天空,反射率不同,目视观察图像框选区域,即天空处整体非均匀性显著减小。

由于室外场景物体的反射率不同,所以云相机对观测目标成像时,探测器像元响应值无法通过探测器响应标准差与均值的比值来进行定量评估,本文采取图像校正前后的水平与垂直断面图来进一步描述,如图 10 和 11 所示,图中实线表示校正前数据,虚线表示校正后数据。图 10 和 11 中的(a)为选取图像正中间第 475 行的数据;(b)为选取图像正中间第 824 列的数据;(c)为将图像所有列按列进行平均的数据;(d)为将图像所有行按行进行平均的数据。

从图 10 和 11 可以看出,无论是 R 通道还是 B 通道,与校正前图像比较,校正后的图像中心像元处的响应值基本无变化,视场边缘处响应值得到校正获得增强。计算图像校正前后断面图数据的标准差与均值比值来分析其均匀性,相关结果如表 2 所示,可以看出,校正后图像整体均匀性有所改善,但不是很明显,究其原因云相机所拍摄物体包含了天空、草地、建筑物,不同观测目标的反射率不同,造成了探测器响应 DN 值的差异。

观察图 9 可知,云相机外场试验图像 B 通道经过校正后图中还是存在随视场增大而出现的“光圈”,即图像还存在一定程度的非均匀性,同样情况也出现在图 8(c)中。主要原因是相对辐射定标时,不同响应均值下求得的全视场相对辐射响应系数矩阵不同,而由于卫星在轨存储计算能力有限、观测目标的辐亮度差异很大,只能通过获取最优全视场相对辐射响应系数矩阵来校正获取的图像。而在信噪比较大时,获取的全视场相对辐射响应系数矩阵最优,这也是本文在进行相对辐射定标时选取像元输出信号 DN 值处于饱和值的 80% 左右的原因。

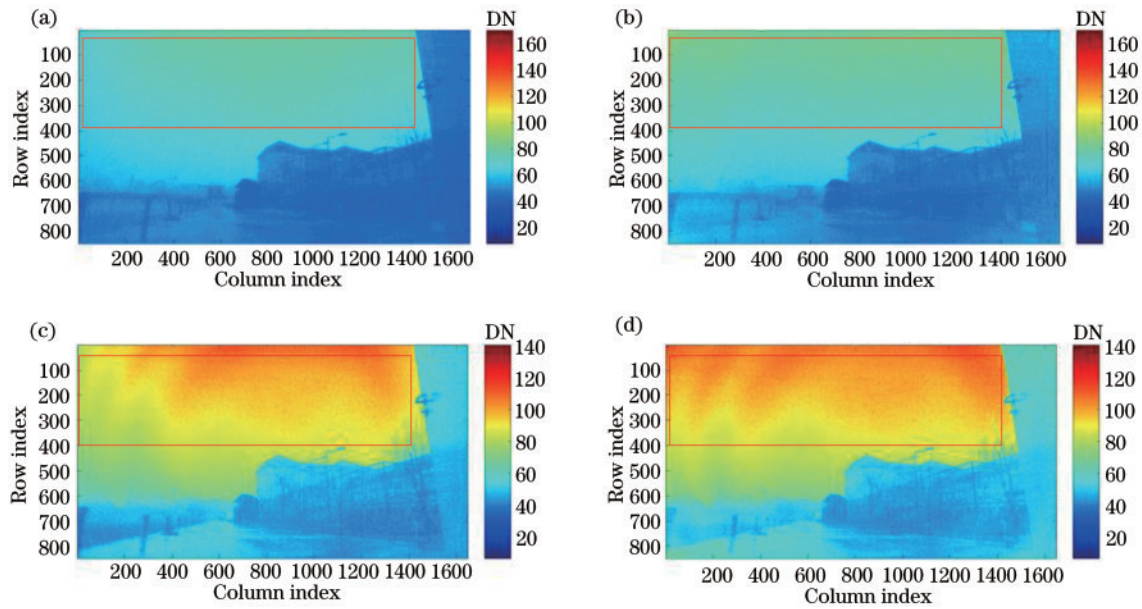


图 9 云相机外场试验图像校正前后对比。(a)R通道校正前;(b)R通道校正后;(c)B通道校正前;(d)B通道校正后

Fig. 9 Comparison of the cloud camera image of outfield experimentation before and after correction. (a) R channel before correction; (b) R channel after correction; (c) B channel before correction; (d) B channel after correction

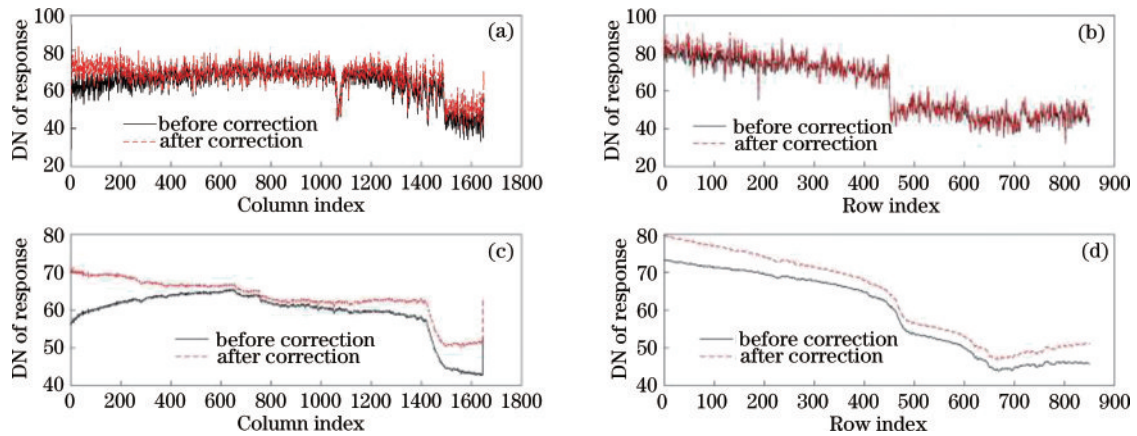


图 10 云相机R通道外场图像校正前后断面图。(a)图像中间第475行;(b)图像中间第824列;(c)图像按列平均;(d)图像按行平均

Fig. 10 Cross-sectional images of cloud camera R channel outfield image before and after correction. (a) 475th row in the center of the image; (b) 824th column in the center of the image; (c) average of all columns; (d) average of all rows

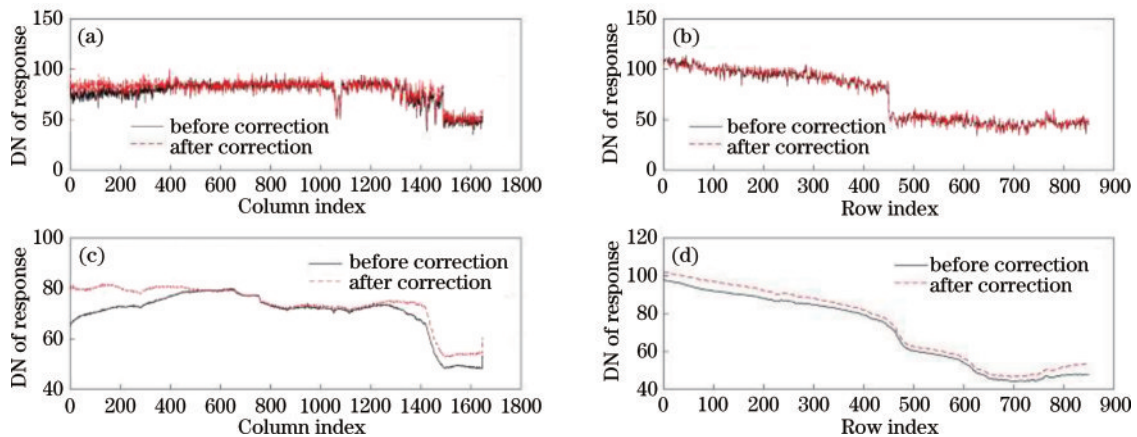


图 11 云相机B通道外场图像校正前后断面图。(a)图像中间第475行;(b)图像中间第824列;(c)图像按列平均;(d)图像按行平均

Fig. 11 Cross-sectional images of cloud camera B channel outfield image before and after correction. (a) 475th row in the center of the image; (b) 824th column in the center of the image; (c) average of all columns; (d) average of all rows

表 2 图像校正前后断面图的非均匀性

Table 2 Nonuniformity of cross-sectional images before and after correction

Channel	Condition	Image nonuniformity / %	
		Before correction	After correction
R	Horizontal 475th row	13.22	11.3
	Vertical 824th column	23.52	23.94
	Average of all columns	10.09	8.16
	Average of all rows	17.95	17.84
B	Horizontal 475th row	15.44	13.98
	vertical 824th column	33.95	33.99
	Average of all columns	12.19	10.76
	Average of all rows	26.85	26.32

4 结 论

云相机相对辐射定标旨在统一同通道下不同像元之间的转换尺度,以便于确定目标对象中各像元之间、各波谱之间以及不同时间测得的辐射量的相对值。本文建立了云相机像元响应值与辐亮度之间的信息模型,成像过程中像面的照度与视场的四次方关系、透镜镀膜层厚度和探测器像元响应的非一致性都会造成在入射光均匀一致时,响应 DN 值出现不相等的情况,因此这些因素引起的相对响应系数的数据格式都为有效像元行数乘以有效像元列数的矩阵,将其统一为全视场相对辐射响应系数进行相对辐射定标能有效较少在轨数据处理与存储。由于云相机视场角较大,积分球辐射源出射光难以一次性覆盖其全视场。针对这一问题,设计了分视场测量的方式,通过二维转动平台调整云相机各分视场对准相同辐亮度的积分球辐射源,然后进行拼接的方案实现全视场的相对辐射定标。实验结果证明:通过该方式定标后对原始图像进行校正,图像非均匀性在典型情况下由 5.6% 提升到 1.3%,非典型情况下非均匀性能由 6.29% 提升到 3.25%,满足了云相机的指标要求。

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] 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.
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.
- [3] Chi G J, Wang J J, Shi J J, et al. FPGA-based real-time cloud detection camera for small satellites[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 12065: 1206502.
- [4] 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.

- 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.
- [5] 郑小兵. 高精度卫星光学遥感辐射定标技术[J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(5): 36-43.
Zheng X B. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 36-43.
- [6] 程万胜, 赵杰, 蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2): 314-318.
Cheng W S, Zhao J, Cai H G. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 314-318.
- [7] 李晶, 赵建科, 昌明, 等. 复合面阵 CCD 摄影相机的实验室辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 73-83.
Li J, Zhao J K, Chang M, et al. Radiometric calibration of photographic camera with a composite plane array CCD in laboratory[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 73-83.
- [8] 王文华, 何斌, 韩双丽, 等. 星上 CCD 成像非均匀性的实时校正[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6): 1420-1428.
Wang W H, He B, Han S L, et al. Real-time correction of nonuniformity in CCD imaging for remote sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1420-1428.
- [9] 修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机成像非均匀性校正[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0711003.
Xiu J H, Huang P, Li J, et al. Nonuniformity correction of large area array color CCD aerial mapping camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0711003.
- [10] 余毅, 常松涛, 王旻, 等. 宽动态范围红外测量系统的快速非均匀性校正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1932-1938.
Yu Y, Chang S T, Wang M, et al. Fast nonuniformity correction for high dynamic infrared radiometric system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1932-1938.
- [11] Jin Y, Jiang J, Zhang G J. Three-step nonuniformity correction for a highly dynamic intensified charge-coupled device star sensor[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(7): 1753-1758.
- [12] Marcotte F, Tremblay P, Farley V. Infrared camera NUC and calibration: comparison of advanced methods [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8706: 870603.
- [13] 常松涛, 夏豪杰. 时间延迟积分荧光显微成像平场校正技术[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(5): 527-535.
Chang S T, Xia H J. Flat field correction technique for time delay integration fluorescence microscopy imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(5): 527-535.
- [14] 姜平, 王恩德, 金磊, 等. 基于多尺度分析和加权最小二乘法的非制冷红外条纹噪声校正算法[J]. *光子学报*, 2019, 48(9): 0910002.
Jiang P, Wang E D, Jin L, et al. Uncooled infrared stripe noise correction algorithm based on multi-scale analysis and weighted least squares[J]. *Acta Photonica*

- Sinica, 2019, 48(9): 0910002.
- [15] 白乐, 赖雪峰, 韩维强, 等. 适应积分时间调整的红外图像非均匀性校正方法[J]. 光子学报, 2020, 49(1): 0110002.
Bai L, Lai X F, Han W Q, et al. Infrared image nonuniformity correction method adapted to adjustment of integration time[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(1): 0110002.
- [16] Yao P P, Tu B H, Xu S L, et al. Nonuniformity calibration method of space-borne area CCD for directional polarimetric camera[J]. Optics Express, 2021, 29(3): 3309-3326.
- [17] 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.
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.
- [18] Andre Y, Laherrere J M, Bret-Dibat T, et al. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2572: 79-90.
- [19] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [20] 池杲鋆, 汪杰君, 李孟凡, 等. 云相机绝对辐射定标技术研究[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0612001.
Chi G J, Wang J J, Li M F, et al. Absolute radiometric calibration technique of cloud camera[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0612001.